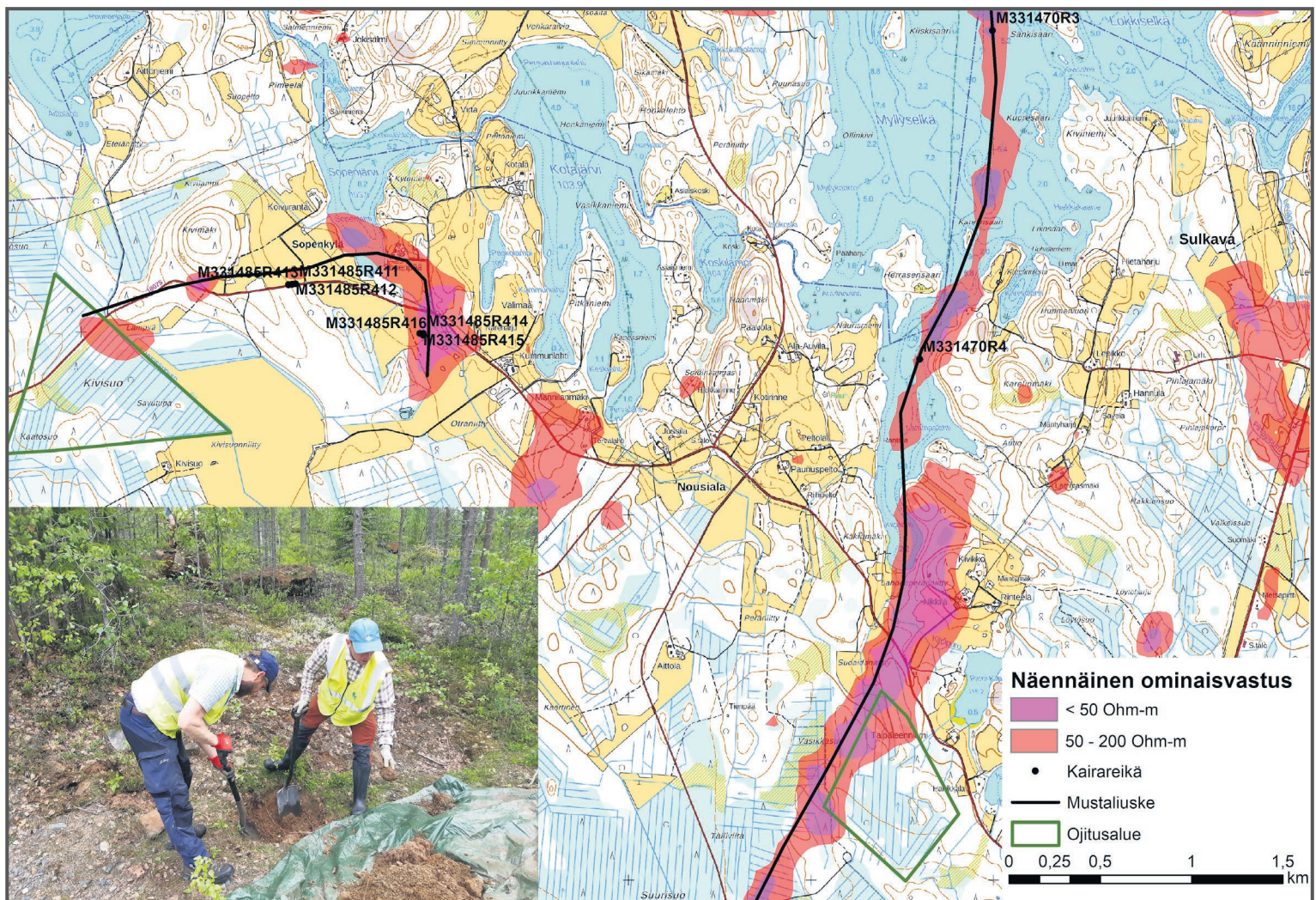


Opas mustaliuskeiden ympäristövaikutusten arviointiin ja hallintaan

Kirsti Loukola-Ruskeeniemi, Jaakko Auri, Jari Hyvärinen, Eija Hyvönen, Jouni Lerssi, Tiina M. Nieminen, Kristiina Nuottimäki, Riitta Turunen ja Liisa Ukonmaanaho

GTK:n tutkimustyöraportti 81/2023



GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS

Tutkimustyöraportti 81/2023

Kirsti Loukola-Ruskeeniemi, Jaakko Auri, Jari Hyvärinen, Eija Hyvönen, Jouni Lerssi,
Tiina M. Nieminen, Kristiina Nuottimäki, Riitta Turunen ja Liisa Ukonmaanaho

Opas mustaliuskeiden ympäristövaikutusten arviointiin ja hallintaan

Ne kuvat, joissa ei mainita tekijää, ovat raportin kirjoittajien tekemiä.

Kansikuva: Mustaliuskeiden esiintymisen arviointi perustuu alueelliseen sähkömagneettiseen ja magneettiseen lentomittausaineistoon sekä geologisiin paljastuma- ja kairaustietoihin, joita täydennetään geologisilla ja geofysikaalisilla kohdetutkimuksilla. Kansikuvan kartassa kallioperän mustaliuskeet on esitetty mustilla viivoilla ja sähkömagneettisen lentomittausaineiston näennäinen ominaisvastus punaisilla väreillä. Kartta: Eija Hyvönen, GTK.
Näytteenottokuva: Anton Boman, GTK. Pohjakartta © Maanmittauslaitos.

Taitto: Elvi Turtiainen Oy

Espoo 2023

Loukola–Ruskeeniemi, K., Auri, J., Hyvärinen, J., Hyvönen, E., Lerssi, J., Nieminen, T. M., Nuottimäki, K., Turunen, R. & Ukonmaanaho, L. 2023. Opas mustaliuskeiden ympäristövaikutusten arviointiin ja hallintaan. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 81/2023*, 55 sivua, 24 kuvaa ja 6 taulukkoa.

Geologian tutkimuskeskus on kartoittanut mustaliuskeiden esiintymisen maanlaajuisesti ensimmäisenä maailmassa. Kartoitus perustui erityisesti geofysikaalisiin tutkimuksiin, koska suurin osa Suomen kallioista on viimeisten jäätiköitymisten aikana ja niiden jälkeen muodostuneen maaperän peitossa. Geofysikaalisia tutkimuksia täydennettiin valitsemalla kallionäytteitä kairasydämistä.

Mustaliuske sisältää rikkiä ja rapautuu herkästi, mikäli pintavedet huuhtelevat kallioleikkauksia ja lohkareita. Runsaasti rikkiä sisältävät mustaliuskemuodostumat heijastuvat maaperän ja pinta- ja pohjavesien kemiallisessa koostumuksessa. Mustaliuskealueilla asuvat ihmiset voivat saada esimerkiksi nikkeliä ja mangaania kaivovesien kautta, minkä vuoksi runsaasti rikkiä sisältävään mustaliuskeeseen ei kannata tehdä talousvesikaivoja.

Maankäytön suunnittelussa pyritään mustaliuskealueilla välttämään sellaista maankäyttöä, joka altistaa kallioita tai moreenia rapautumiselle ja hapettumiselle. Kaivettujen maamasojen hallintakeinoja ovat neutralointi ja hapettumisen ehkäiseminen. Mikäli maa-aineksen geotekniset ominaisuudet ovat huonot, mutta sitä kuitenkin halutaan hyödyntää rakentamisessa, stabilointi on yksi mahdollisuus. Hapettomissa olosuhteissa, tyypillisesti pohjaveden pinnan alapuolella, rikki on sulfidimuodossa, eikä siitä aiheudu happamoitumishaittaa, paitsi jos maata muokataan tai pohjaveden pinta laskee.

Mustaliuskeiden aiheuttamien ympäristöriskien arvioinnin kannalta on merkittävää tunteea

- mustaliuskeiden esiintyminen
- niiden kemiallinen koostumus ja mineraalit
- alueella tehdyt maankäytön ja maanmuokkauksen toimenpiteet
- tiedot luontoarvoista ja vesistöjen tilasta vaikutusalueella.

Maankäytön riskiä arvioidaan sekä vesi- että maaperänäytteenoton avulla. Hapontuotto-potentiaali kuvaa maaperässä muodostuvaa ja siitä mahdollisesti vapautuvaa happamuutta. Vastaanottavan vesistön herkkyydelle merkittäviä tekijöitä ovat vesistön koko ja puskuri-kyky. Vesistöille ja eliöstölle ongelmallisia ovat veden alhainen pH ja liukoiset haitta-aineet, kuten rikkiä sisältävistä mineraaleista vapautuvat haitalliset aineet.

Mustaliuskeista ja mustaliuskepitoisesta maaperästä voi olla tarve arvioida niiden mahdollisesti aiheuttamaa korroosiota rakentamiskohteissa. Korroosio vaikuttaa erityisesti maan-alaisiin teräs- ja betonirakenteisiin. Korroosio-potentiaali lisääntyy sulfaattipitoisuuden ja sähköjohtavuuden kasvaessa ja pH:n alentuessa.

Ympäristöriskit lisääntyvät, mikäli mustaliusketta on kallioperässä yli kolme metriä paksu kerros, se sisältää yli prosentin rikkiä, sijaitsee lähellä maanpintaa tai on paljastuneena esimerkiksi ojan tai puron reunoilla tai sen pohjassa. Jokainen kohde pitää selvittää tapauskohtaisesti, koska hapontuotto-potentiaaliin vaikuttavat myös muun muassa maaperän laatu ja alueen kivilajien kalsiumpitoisuus. Oleellisia ovat mustaliuske-esiintymän laatu ja laajuus sekä vastaanottavan vesistön tila. Mikäli ojitetuissa metsissä kuivatussyvyyttä ei lisätä eikä ojitus ole aiemmin lisännyt vesistön happamoitumista, ympäristöriskit ovat vähäisempiä.

Mustaliuskeaineiston käyttömittakaava on 1:100 000, koska lähtöaineistona käytettiin pääosin GTK:n vuosina 1972–2007 tekemien kolmen kHz:n taajuuden sähkömagneettisten ja magneettisten matalalentomittausten tuloksia ja niistä prosessoituja aineistoja. Mustaliuskeiden ympäristövaikutusten yksityiskohtainen selvittäminen edellyttää kohdetutkimuksia maastossa.

Asiasanat: mustaliuske, rikki, haitalliset alkuaineet ja yhdisteet, vesistövaikutukset, happamuus, maankäyttö, aluesuunnittelu, geofysikaaliset mittaukset

Kirsti Loukola-Ruskeeniemi, Jaakko Auri ja Kristiina Nuottimäki
Geologian tutkimuskeskus
PL 96
02151 Espoo

Sähköposti: kirsti.loukola-ruskeeniemi@gtk.fi, jaakko.auri@gtk.fi, kristiina.nuottimaki@gtk.fi

Jari Hyvärinen, Jouni Lerssi ja Riitta Turunen
Geologian tutkimuskeskus
PL 1237
70211 Kuopio

Sähköposti: jari.hyvarinen@gtk.fi, jouni.lerssi@gtk.fi, riitta.turunen@gtk.fi

Eija Hyvönen
Geologian tutkimuskeskus
PL 77
96101 Rovaniemi

Sähköposti: eija.hyvonen@gtk.fi

Tiina M. Nieminen ja Liisa Ukonmaanaho
Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki

Sähköposti: tiina.m.nieminen@luke.fi, liisa.ukonmaanaho@luke.fi

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
1.1	Kallioperän ja maaperän aiheuttamat ympäristöriskit Suomessa	5
1.2	Mitä mustaliuskeet ovat?	5
2	MUSTALIUSKEET SUOMEN IKIVANHASSA KALLIOPERÄSSÄ	8
3	GTK:N MUSTALIUSKE-TIETOTUOTE	11
4	MUSTALIUSKEISTA PERÄISIN OLEVAN AINEKSEN ESIINTYMINEN MAAPERÄSSÄ	20
4.1	Moreeni ja lohkarieet	20
4.2	Harjut ja reunamuodostumat.....	22
4.3	Suot	24
5	MUSTALIUSKEIDEN VAIKUTUS PINTA- JA POHJAVESIIN, EKOSYSTEEMIIN JA MUSTALIUSKEALUEELLA ASUVIIN IHMISIIN	27
6	MUSTALIUSKEIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN SELVITTÄMINEN	30
6.1	Tietotarpeet	30
6.2	Julkiset kartta- ja paikkatietoaineistot	31
6.3	Näytteenotto ja kemiallinen analysointi	36
6.4	Ympäristöriskien arviointi ja riskinhallinta	37
7	SUOSITUKSIA MAANKÄYTÖN SUUNNITTELUUN RAKENTAMISHANKKEISSA, VEDENHANKINNASSA, MAA-AINESTEN OTOSSA, TURVETUOTANNOSSA SEKÄ METSÄTALOUTEEN LIITTYVISSÄ OJITUKSISSA JA MAANMUOKKAUKSESSA.....	42
7.1	Haittavaikutusten ennalta ehkäiseminen maankäytön suunnittelussa	42
7.2	Haittavaikutusten hallinta metsätaloudessa	42
7.3	Pintavesien tarkkailu	48
8	OHJEET, SUOSITUKSET, LAINSÄÄDÄNTÖ JA ASETUKSET MAANKÄYTÖN MUUTOKSIIN MUSTALIUSKEALUEILLA	48
9	KIITOKSET	53
	LÄHDE- JA KIRJALLISUUSLUETTELO	54

1 JOHDANTO

1.1 Kallioperän ja maaperän aiheuttamat ympäristöriskit Suomessa

Kallioperä luo raamit kaikelle sen päällä elävälle. Suomessa ei juuri ole korkeita vuoria, joilta kivet ja lohkareet vierisivät laaksoon, ja jyrkät kalliioleikkaukset on tavallisesti onnistuttu verkottamaan niin, ettei kulkijoille aiheudu vaaraa. Sen sijaan kallioperä ja maaperä vaikuttavat meilläkin pintavesien ja pohjavesien kemialliseen koostumukseen. Yli 90 % Suomen kallioista on maaperän ja vesistöjen peitossa. Pohjamooreni sisältää kiviainesta, jota mannerjää on irrottanut ja jauhanut mukaansa kallioperästä, mutta myös moreenin pintaosissa, turvekerrostumissa ja harjuaineksessa voi havaita alueen kallioperän vaikutusta. Mineraalikoostumus heijastuu pohjavesien ja pintavesien pitoisuuksissa; esimerkiksi rapakivialueilla vesissä on enemmän fluoria kuin muualla, kun taas Askolan graniittiset kivet sisältävät paikoin runsaasti uraania. Pirkanmaalla ja Kittilässä pohjavesien keskimääräistä suuremmat arseenipitoisuudet johtuvat kallioperän arseenimineraaleista.

Mustaliuskeet ovat vain yksi runsaasti rikkiä sisältävistä kivilajeista. Rikkiä vapautuu tulivuorten purkauksissa ilmaan ja vedenalaisissa purkauksissa mereen. Meilläkin on ollut tulivuoritoimintaa, mutta siitä on kauan, yli 1 800 miljoonaa vuotta. Suomen vanhoissa vulkaanisissa kivissä on rikkiä ja muita haitallisia aineita. Mustaliuskeita on Suomessa enemmän kuin muita runsaasti rikkiä sisältäviä kivilajeja ja mineralisatioita, minkä vuoksi keskitymme tässä oppaassa mustaliuskeisiin.

Happamat sulfaattimaat muistuttavat mustaliuskeita syntytapansa vuoksi. Nekin ovat kerrostuneet merenpohjaan, mutta geologisesti vasta hiljattain, muutamia tuhansia vuosia sitten Litorinamereen. Myöhemmin ne ovat paljastuneet meren alta maanpinnalle ja altistuneet hapettumiselle ja pintavesien huuhtelulle. Happamat sulfaattimaat aiheuttavat merkittävämmän ympäristöriskin kuin mustaliuskeet laaja-alaisuutensa vuoksi.

1.2 Mitä mustaliuskeet ovat?

Suomen mustaliuskeet sisältävät yli prosentin sekä rikkiä että eloperäistä hiiltä (kuva 1). Ne kerrostuivat alun perin merenpohjaan hapettomissa olosuhteissa noin kaksi miljardia vuotta sitten. Nykyisin samantapaisia mätäliejuja muodostuu esimerkiksi Mustallamerellä. Eloperäisen aineksen säilyminen meren pohjassa kertoo ikivanhoista meristä, joiden alaosissa ei ollut happea. Kaloja ei näissä merissä ollut, koska kalat eivät olleet edes kehittyneet siihen maailmanaikaan. Happipitoisuus oli paljon nykyistä pienempi paitsi merissä myös ilmakehässä. Suomen alue sijaitsi siihen aikaan lähellä päiväntasaajaa, ja mustaliuskeiden suuren hiilipitoisuuden perusteella voi arvioida, että merialtaat kuhisivat alkeellisia leviä ja bakteereita. Maapallon ydin oli nykyistä lämpimämpi, ja esimerkiksi nikkeliä kulkeutui nykyistä enemmän ylöspäin liuosten mukana maankuoren alta.

Sotkamossa Talvivaaran mustaliuskemalmi syntyi, kun rikkiä, eloperäistä hiiltä, nikkeliä, sinkkiä ja paikoin myös mangaania, kuparia ja kobolttia kerrostui merialtaan hapettomiin pohjaosiin (Loukola–Ruskeeniemi & Heino 1996). Talvivaaran esiintymässä on enemmän nikkeliä kuin mustaliuskeissa muualla Suomessa. Esiintymä on myös hyvin suuri, noin 2 000 miljoonaa tonnia. Alun perin Talvivaaran malmiesiintymä on ollut nykyistä suurempi, koska jäätiköitymisten aikana mannerjää kulutti kallioperää ja mustaliuskeainesta kulkeutui moreeniin jauhautuneena ja lohkareina jäätikön kulkusuunnassa, tavallisesti kaakkoon (Loukola–Ruskeeniemi ym. 2003).

Aikanaan Talvivaaran mätäliejun päälle kerrostui hiekkaa ja hiekan päälle paksut savikerrokset ja se hautautui syvälle maankuoreen, jossa on maan pintaosia korkeampi lämpötila ja paine.

Mineraalit muuttuivat toisiksi: hiili kiteytyi grafiitiksi ja rikkiyhdisteet sulfideiksi, kuten rikkikiisuksi, magneettikiisuksi ja sinkkivälkkeeksi (kuva 1). Mustaliuskekerrokset poimuttuivat kallioperän liikunnoissa kuin räsymatto seinää vasten työnnettäessä. Alkuperäisiä kerroksia on pakkautunut

päällekkäin, joten muodostuman kokonaispaksuus on nykyisin paikoin yli 800 metriä (Loukola-Ruskeeniemi & Lahtinen 2013). Vertailuksi: Puolassa ja Saksassa tavattava mustaliuskekerros, nk. *Kupferschiefer*, on vain 20–100 cm paksu (Parviainen & Loukola-Ruskeeniemi 2019).



Kuva 1. Mustaliusketta Talvivaaran esiintymässä Sotkamossa. Rikkikiisu kiiltelee kellertävänä juuri paljastetun kallion pinnassa. Kuva: Kirsti Loukola-Ruskeeniemi, GTK.

SUOMEN KALLIOPERÄN YLEISPIIRTEET

Kallioperä muodostuu kivilajeista. Kivilajit taas puolestaan koostuvat yhdestä tai useammasta mineraalista. Mineraali on luonnossa esiintyvä kiteinen aine, jolla on omanlaisensa kemiallinen koostumus. Kivilaji koostuu yleensä useasta mineraalista.

Syntytapansa perusteella kivilajit jaetaan magma-, sedimentti- ja metamorfisiin kivilajeihin.

Magmakivet ovat syntyneet kiteytymällä sulasta

kiviaineksesta, magmasta. Ne voidaan jakaa kolmeen ryhmään: syväkiviin, tulivuoritoimintaan liittyviin kiviin eli vulkaniitteihin ja puolipinnallisiin juonikiviin, jotka ovat syväkivien ja vulkaniittien välimuotoja. Näiden ulkonäkö ja rakenne poikkeavat toisistaan.

Taulukossa 1 on esitetty muutamia sedimenttejä, niistä syntyneitä sedimenttikiviä ja metamorfisia kiviä.

Taulukko 1. Esimerkkejä maalajista, sedimenttikivestä ja niitä vastaavasta metamorfisesta kivilajista. Suomen kivilajit ovat metamorfoituneita, poikkeuksena ainoastaan Muhoksen savikivi ja Satakunnan hiekkakivi.

Maalaji → Sedimenttikivi → **Metamorfinen kivilaji**

Savi → Savikivi → **Fylliitti, kiilleliuske, kiillegneissi, granaatti-kordieriitti-kiillegneissi**

Hiekka → Hiekkakivi → **Kvartsiitti**

Kalkkileiju → Kalkkikivi → **Kiteinen kalkkikivi, marmori**

Mätälleiju → Mustaliuskekivi (englanniksi 'black slate, black shale') → **Mustaliuske, grafiitti-sulfidi-liuske** (englanniksi 'metamorphosed black shale, graphite-sulphide schist')

Kivet metamorfoituvat, kun ne vajoavat syväälle maankuoreen ja joutuvat jopa satojen miljoonien vuosien ajaksi kovaan paineeseen ja/tai lämpötilaan. Korkeassa lämpötilassa kivet saattavat osittain sulaa, jolloin syntyy seoskiviä eli migmatiitteja.

Lisätietoja on esimerkiksi Retkeilijän kivioppaassa (Grönholm ym. 2011), jonka mukaan osa tämän kuvauksen teksteistä muokattiin.

SULFIDIMINERAALIT SISÄLTÄVÄT RIKKIÄ

Rikkikiisu FeS_2 on maankuoren yleisin sulfidimineraali. Toinen Suomessa yleinen sulfidimineraali on magneettikiisu Fe_{1-x}S . Magneettikiisussa raudan ja rikin suhde voi vaihdella 0,83–1,00. Muita sulfidimineraaleja ovat esimerkiksi sinkkivälke $(\text{Zn,Fe})\text{S}$ ja kuparikiisu CuFeS_2 .

GRAFIITTI

Grafiitti C on tummanharmaa, pehmeä ja tahraava mineraali. Suomen mustaliuskeissa on yli 1 % eloperäistä hiiltä, joka on nykyisin grafiittia.

MUSTALIUSKEIDEN TUNNISTAMINEN

Suomen mustaliuskeiden päämineraalit ovat kvartsi SiO_2 , biotiitti $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$, grafiitti C ja rikkikiisu FeS_2 , mutta paikoin magneettikiisua Fe_{1-x}S on enemmän kuin rikkikiisua. Biotiitin lisäksi voi olla muita kiilteitä. Muita mineraaleja ovat esimerkiksi sinkkivälke $(\text{Zn,Fe})\text{S}$ ja maasälvät. Granaatteja esiintyy joissain kohteissa. (Loukola-Ruskeeniemi ym. 2023)

Mineraalien tunnistusohjeita on koottu muun muassa retkeilijän kivioppaaseen (Grönholm ym. 2011). Tarkempi mineraloginen tutkimus tehdään hioutuista kiviloikeista polarisaatiomikroskooppilla ja erikoisanalyseilla.

2 MUSTALIUSKEET SUOMEN IKIVANHASSA KALLIOPERÄSSÄ

Suomen mustaliuskeet kerrostuivat aikoinaan merenpohjaan arkeeisena ja proterotsooisena aikana (kuva 2). Lisäksi Suomen luoteiskolkassa on Haltiatunturin alueella näitä huomattavasti nuorempi kallioperä, jossa on joitakin eloperäistä hiiltä sisältäviä kerroksia. Niitä ei kuitenkaan käsitellä tässä raportissa, koska ne sijaitsevat asumattomilla alueilla eivätkä aiheuta ympäristöriskejä.

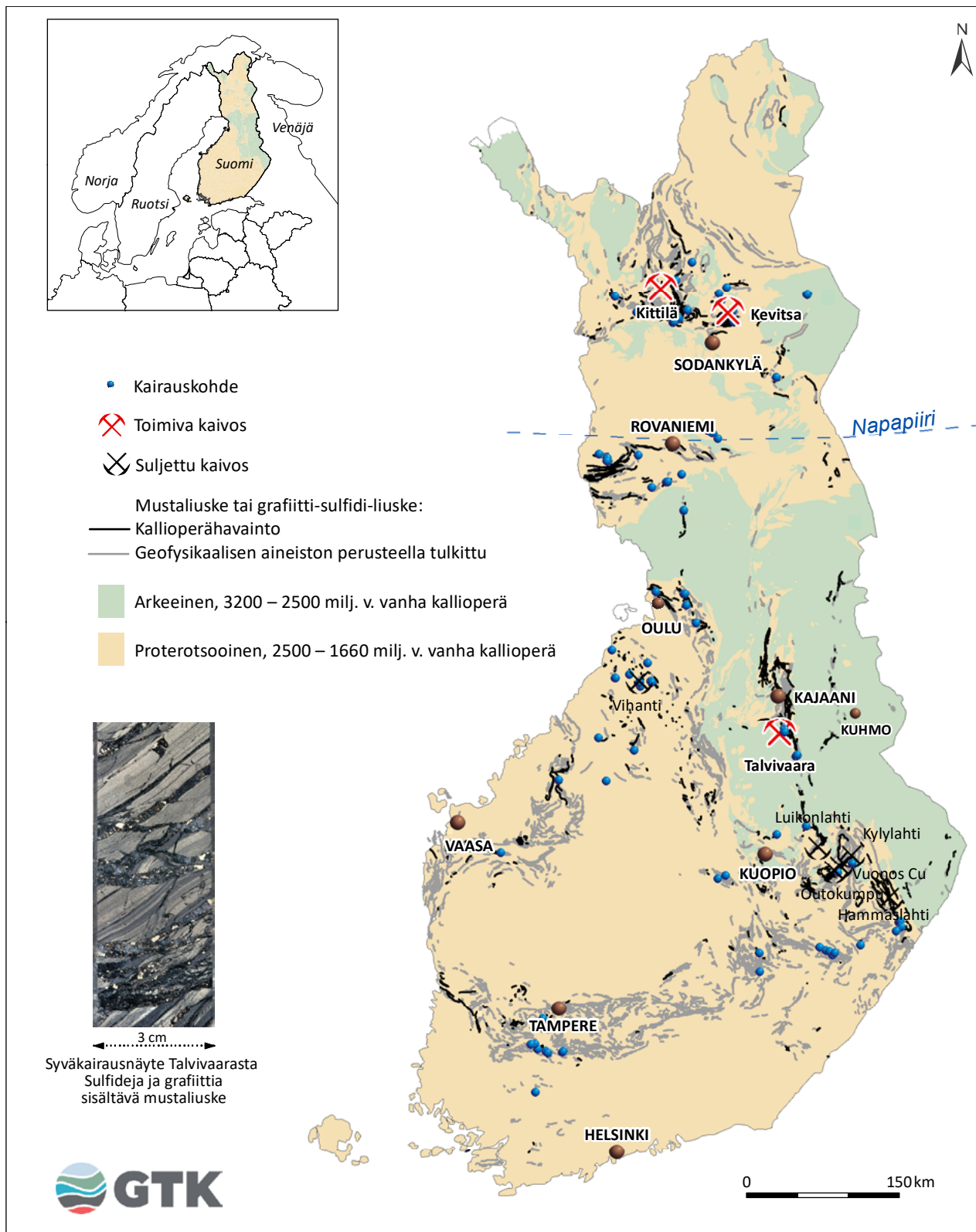
Arkeisia grafiittia sisältäviä kiviä on esimerkiksi Kuhmossa. Selvitimme, onko Suomen arkeisessa kallioperässä mustaliuskeita: valitsimme näytteitä kairasydämistä Kuhmosta (kairareivät 513 ja 517). Tutkittujen näytteiden hiilipitoisuus oli alle 1,75 % ja rikkipitoisuus alle 3,6 %. Proterotsooisten mustaliuskeiden keskimääräinen hiilipitoisuus (mediaaniarvo) yhteensä 102 kairasydämessä eri puolilla Suomea on 5,7 % ja rikkipitoisuus 4,7 % (Loukola-Ruskeeniemi ym. 2023). Kainuun ja Outokummun alueella Itä-Suomessa iältään proterotsooisten mustaliuskeiden hiilipitoisuuden ja rikkipitoisuuden mediaaniarvot ovat tätä suurempia (Loukola-Ruskeeniemi 1999).

Arkeiset mustaliuskekerrokset ovat keskimäärin ohuempia kuin proterotsooiset ja hiili- ja rikkipitoisuuskin on pienempi, joten ne eivät aiheuta merkittäviä ympäristöriskejä, eikä niitä sen vuoksi käsitellä tämän jälkeen tässä raportissa. Sen sijaan malmiesiintymissä ja malmiaiheissa voi arkeiseläkin alueella olla runsaasti sulfideja.

Suomen mustaliuskeiden mineraalikoostumus ja rakenne ovat muuttuneet sen jälkeen, kun ne

alun perin kerrostuivat meren pohjaan. Sedimentit painuivat syvemmälle maankuoreen, kun niiden päälle kerrostui runsain määrin hiekkaa, savea ja/tai mutaa. Lämpötila ja paine kasvoivat sitä suuremmiksi, mitä alemmas maankuoreen kerrokset painuivat. Paikoin alempaa maankuoreesta ja maapallon vaipan yläosasta nousi ylöspäin kuumaa magmaa eli kivisulaa. Osa magmasta purkautui merenpohjaan, osa virtasi tai lensi tulivuorista maan kamaralle, mutta osa kiteytyi maankuoreessa eikä noussut sulassa muodossa maan pinnalle. Tällaiset hiljalleen kiteytyvät magmat aiheuttivat kuumuuden ja kuumien liuosten vuoksi muutoksia viereisiin kiviin ja sedimentteihin, esimerkiksi alas vajonneisiin mustaliuskekerrostumiin.

Näiden tapahtumien lisäksi maankuoreessa tapahtui liikuntoja. Laattaliikunnot jatkuvat nykypäivänä, esimerkiksi Intian laatta työntyy edelleen Himalajan alle nostaen vuoristoa ylöspäin. Maankuoreessa on jännitteitä ja puristuksia, jotka muokkaavat kiviä. Suomen mustaliuskeissa on yleisesti liuskeisuutta; mineraalit ovat suuntautuneet tiettyyn suuntaan. Tästä kaikesta huolimatta paksuissa mustaliuskekerroksissa voi erottaa varhaisia hienojakoisia kerroksia niissä kivissä, jotka eivät ole käyneet suurella lämpötilalla ja paineella syvällä maankuoreessa. Esimerkiksi Keski-Lapin kallioperässä on säilynyt varhaisia rakenteita.



Kuva 2. Arkeinen ja proterotsooinen kallioperä ja mustaliuskeiden esiintyminen Suomessa. Arkeisilla alueilla on kapeita hiiltä ja rikkiä sisältäviä kerroksia, mutta niiden hiili- ja rikkipitoisuus on yleensä pieni. Proterotsooisella alueella sen sijaan on paksuja ja runsaasti hiiltä ja rikkiä sisältäviä mustaliuskemuodostumia etenkin Itä- ja Pohjois-Suomessa. Sinisillä palloilla merkityistä kairauskohteista valitsimme mustaliuskenäytteitä kemiallista, mineralogista ja petrofysikaalista tutkimusta varten (Loukola-Ruskeeniemi ym. 2023). Toiminnassa olevista kaivoksista kartalle on poimittu muutama esimerkki: Terrafame Oy:n mustaliuskekaivos Sotkamon Talvivaarassa, Boliden Kevitsan kaivos Sodankylässä ja Agnico Eagle Finland Oy:n kultakaivos Kittilässä. Muutamia suljettuja kaivoksia on merkitty alapäin osoittavilla mustilla kaivosmerkeillä Outokummun-Hammasslahden alueella ja Vihannissa. Mustaliuskeita esiintyy yleisesti Suomen sulfidikaivosten kivilajiseurueissa.

SYVÄKAIRAUUS

Kallioperää tutkitaan paitsi geofysikaalisin menetelmin myös kairamalla reikiä kallioon. Syväkairauksessa moottorikäyttöinen timanteilla varustettu porakruunu leikkaa pitkän, lieriönmuotoisen näytteen kalliosta. Sydännäyte jää kruunun takana olevaan putkeen. Sydännäytteet nostetaan ylös muutaman metrin pituisina pätkinä, ja näytteet säilytetään laatikoissa samassa järjestyksessä kuin ne on nostettu. Tavallisesti kairataan 100–200 metriä syviä reikiä.

SUOMEN KALLIOPERÄ ON VANHAA

Suomen vanhimmat kivet ovat iältään arkeeisia ja syntyivät 3 200 – 2 500 miljoonaa vuotta sitten. Arkeeiset alueet on merkitty vihreällä värillä kuvassa 2.

Proterotsooinen kallioperä alkoi syntyä arkeeisen ajan päätyttyä 2 500 miljoonaa vuotta sitten. Suomen nuorimmat proterotsooiset kivet, rapakivigraniitit, kiteytyivät 1 660 miljoonaa vuotta sitten. Proterotsooiset alueet on merkitty keltaisella värillä kuvassa 2.

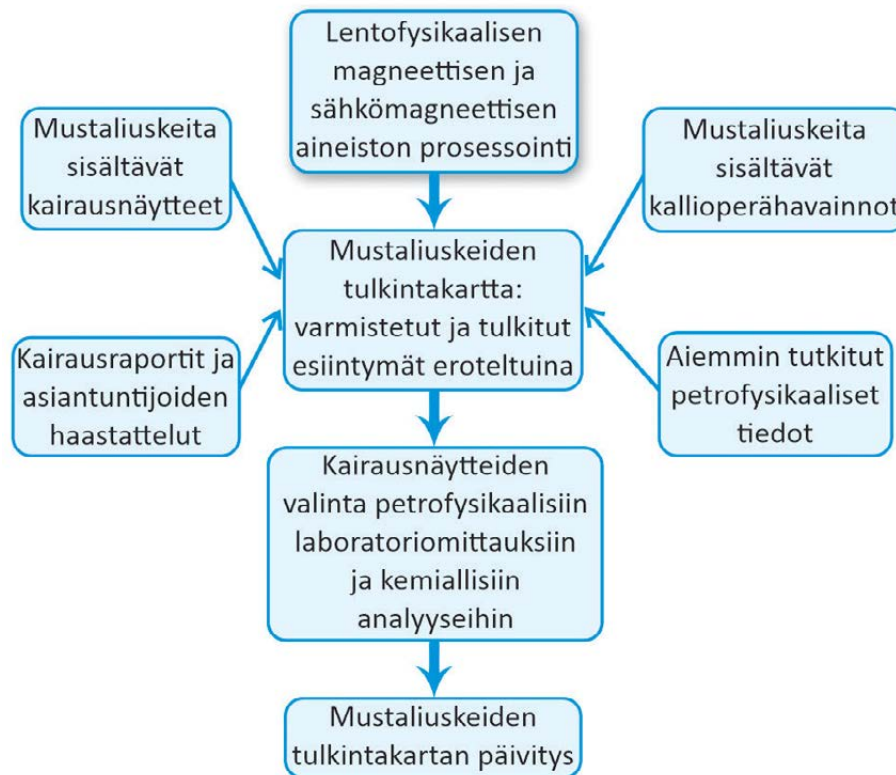
3 GTK:N MUSTALIUSKE-TIETOTUOTE

Geologian tutkimuskeskus (GTK) aloitti mustaliuskeiden kartoittamisen geofysikaalisten matallalentoaineistojen avulla 1990-luvulla, ja vuonna 2000 valmistui ensimmäinen versio tietokannasta (Arkimaa ym. 2000). Mustaliuske-tuotteesta mustaliuskeiksi on luokiteltu yli prosentin sekä hiiltä että rikkiä sisältävät sedimenttikivet. Ne kerrostuivat aikoinaan merenpohjaan hapettomissa olosuhteissa, mutta ovat sen jälkeen muuttuneet monin tavoin satojen miljoonien vuosien aikana syvällä maankuoressa.

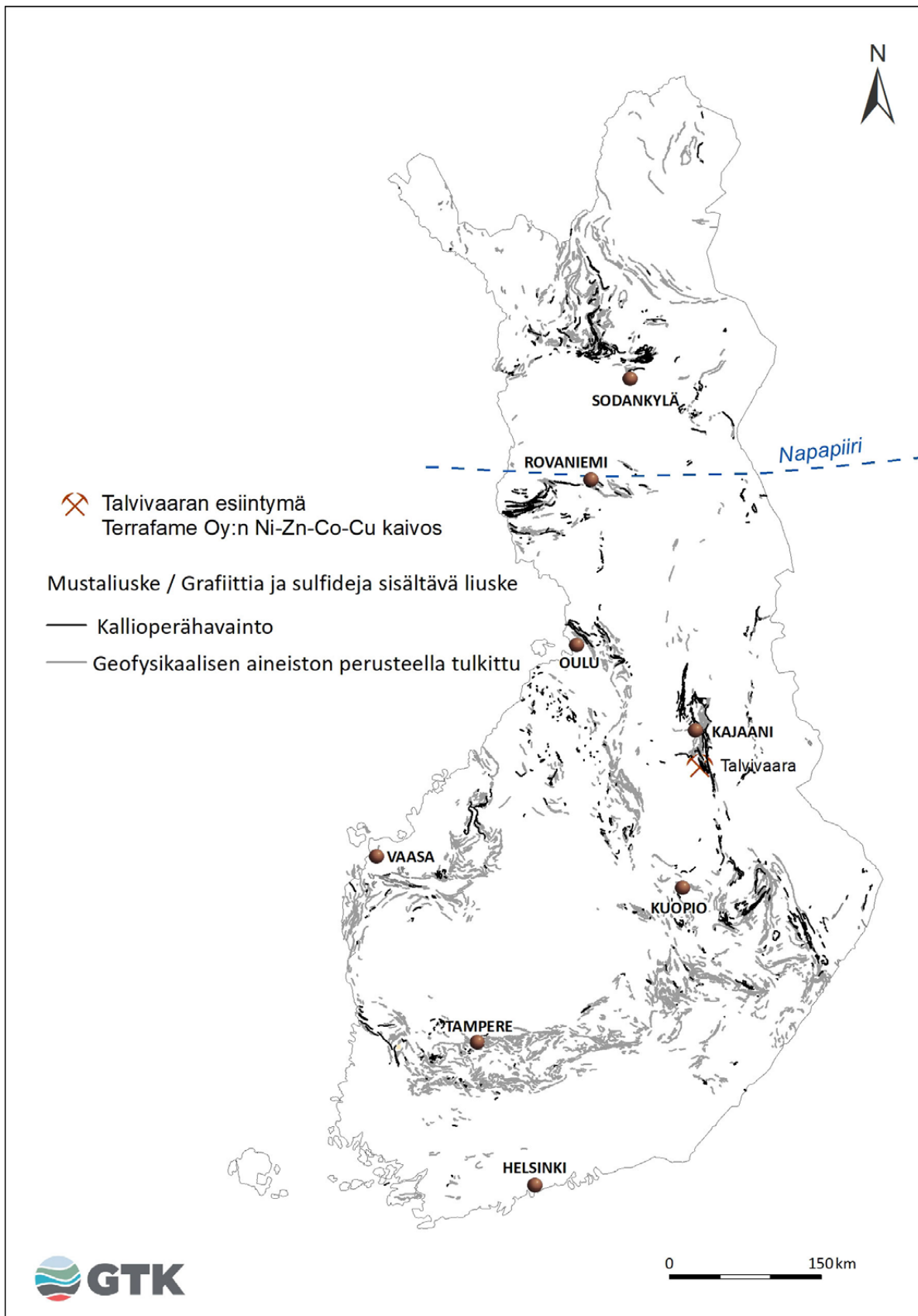
Mustaliuskeiden päällä on useimmiten viimeisimmän jäätiköitymisvaiheen aikaisia maaperä-

muodostumia tai vesistöjä, mutta hyvin sähköä johtavina ja useimmiten magneettisesti ympäristöstään poikkeavina ne on mahdollista paikantaa geofysikaalisin mittauksin. Sähköiset anomaliat johtuvat pääosin rikkikiisusta, magneettikiisusta, sinkkivälkkeestä ja grafiitista. Magneettiset anomaliat aiheutuvat ferrimagneettisesta magneettikiisusta.

Mustaliuskeiden esiintymisen arviointi pohjautuu alueelliseen sähkömagneettiseen ja magneettiseen lentomittausaineistoon sekä geologisiin paljastuma- ja kairaustietoihin (kuva 3). Aineistossa kallioperän mustaliuskeet on esitetty viivatasona.



Kuva 3. Mustaliuske-tietoaineiston vuokaavio.



Kuva 4. Mustaliuskeiden esiintyminen Suomessa. Mustilla viivoilla on esitetty ne mustaliuskeet (grafiittia ja sulfideja sisältävät liuskeet), joista on kallioperähavainto, esimerkiksi tieleikkaus. Harmailla viivoilla on esitetty todennäköisten mustaliuskeiden esiintyminen geofysikaalisten ominaisuuksien perusteella arvioituna. Viivojen paksuus ei kuvasta todellista laajuutta, koska viivoja on paksunnettu, jotta ne näkyvät tässä mittakaavassa. Mustaliuskeet esiintyvät tavallisesti 1–20 metrin paksuisina välikerroksina muissa kivilajeissa. Joillain alueilla Itä- ja Pohjois-Suomessa niitä on kuitenkin yli sadan metrin paksuisina pinkkoina.

GTK:n kallioperän mustaliuskeaineistossa (<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>) mustaliuskeiksi on luokiteltu yli prosentin sekä elope- räistä hiiltä että rikkiä sisältävät metamorfoituneet sedimenttikivet.

GTK toteutti vuosina 1972–2007 koko maan kattavan kolmen kHz:n taajuuden sähkömagneettisen ja magneettisen matalalentokartoituksen. Sitä hyödynnettiin mustaliuskeiden esiintymisen tulkinnassa (kuva 5). Tulkinnassa hyödynnettiin lisäksi geologisia paljastuma- ja kairaustietoja, valtakunnallista petrofysiikan rekisteriä ja Maanmittauslaitoksen (MML) maastotietokantaa.

Mustaliuskeiden tulkinnassa käytettiin seuraavia perusteita: 1) kairasydännäyte, josta on tehty kemialliset analyysit ja mitattu petrofysikaaliset ominaisuudet, 2) kairasydännäyte, josta on tehty kemialliset analyysit, 3) kairasydännäyte, josta on mitattu petrofysikaaliset ominaisuudet, 4) GTK:n kairasydänarkiston tietokannoissa olevat kairaukset, joista on raportoitu grafiittia tai mustaliusketta, 5) kallioperähavainnot, joista on raportoitu grafiittia tai mustaliusketta ja 6) magneettisen/sähkömagneettisen lentomittausaineiston pohjalta tulkitut geofysikaalisilta ominaisuuksiltaan samankaltaiset kivilajiyksiköt kuin kairauksin ja kalliopaljastumin todennetut mustaliusketta sisältävät kivilajiyksiköt.

Koska tulkitut johteet voivat olla myös sulfidiliuskeita, jotka eivät sisällä grafiittia, tulkinnan yhteydessä aineistosta poistettiin tunnetut sulfidiliuskeet. Kallioperän aiheuttamien johteiden lisäksi myös järvisedimentit ja tietyt suoalueet näkyvät sähköisinä anomalioina, minkä vuoksi esimerkiksi järven alla sijaitsevaa mustaliuskekerrosta on vaikea erottaa. Rajojen tarkistus tehtiin GTK:n kallioperäaineistoa ja MML:n maastotietokantaa käyttäen.

Lopulliseen tuotteeseen mustaliuskeet luokiteltiin neljään luokkaan:

1. kohteeseen liittyy kallioperähavainto ja tulkinta perustuu sähkömagneettiseen/magneettiseen aineistoon
2. tulkinta perustuu magneettiseen aineistoon
3. tulkinta perustuu sähkömagneettiseen aineistoon
4. tulkinta perustuu kairaustietoon.

Tuotteessa on mukana myös viitteet tutkimuskohteisiin liittyviin geologisiin tutkimus- ja kairausraportteihin.

Mustaliuskeiden petrofysikaalisten ominaisuuksien ja kemiallisen koostumuksen vertailua varten valittiin vuosina 2009–2011 eri puolilta Suomea kairatuista mustaliuskeista yli 800 näytettä, joista edelleen valittiin 76:sta eri kohteesta 467 näytettä petrofysikaalisiin mittauksiin ja kemiallisiin analyyseihin (kuva 2, Loukola–Ruskeeniemi ym. 2011). Mustaliuskeet on esitetty viivatasona ja ne on jaoteltu geofysikaalisten mittausten perusteella tulkittuihin ja geologisten kairausten tai havaintojen perusteella tunnettuihin esiintymiin (kuvat 6, 7 ja 8).

Tuotteessa on esitetty yhteensä 387 mustaliuskenäytteen (> 1 % C ja > 1 % S) alumiini-, pii-, kalsium-, nikkeli- ja kuparipitoisuus (Al_2O_3 , SiO_2 , CaO, Ni ja Cu). Ne analysoitiin Labtium Oy:ssä XRF-analysaattorilla. Lisäksi on esitetty hiili- ja rikkipitoisuudet (C ja S), jotka analysoitiin Leco-analysaattorilla. Alkuainepitoisuus on esitetty prosentteina (%), ja jos arvo on analyysimenetelmän määrittäjäraja pienempi, tarkistusmerkki '<' on esitetty ko. alkuaineen 'QC'-kentässä.

Tutkimusnäytteiden petrofysikaaliset mittaukset tehtiin GTK:n petrofysiikan laboratoriossa Espoossa. Tuotteessa on esitetty seuraavat mittaukselliset tulokset: tiheys (D/g/cm^3), magneettinen susceptibiliteetti ($\text{K}/10^{-6}\text{SI}$), remanentin magnetoituman voimakkuus eli remanenssi (J/mA/m), näytteen paino (P/g) ja ominaisvastus ($\text{R}/\text{Ohm-m}$).

Lentoaineisto prosessoitiin Erdas Ermapper- ja Esrin ArcGis -ohjelmistoilla ja NMDS-analysointi (*Non-metric multidimensional scaling*; Kruskal 1964) R-ohjelmalla (<https://www.R-project.org>). Mustaliuskeviivojen tulkinta, digitointi ja tuoteistus tehtiin ArcGis-paikkatieto-ohjelmistolla.

Aineiston käyttömittakaava on 1:100 000, joten se ei sovellu 1:100 000-mittakaavaa yksityiskohdaisempaan tarkasteluun. Aineisto on esitetty siten, että mustaliuskeviivat näkyvät 1:100 000-mittakaavassa. Sen vuoksi useimmat mustaliuskeyksiköt on esitetty laajempina kuin ne todellisuudessa ovat. Tarkat tiedot mustaliuskekerroksen paksuudesta kivilajiseurueessa löytyvät kairasydänraporteista (linkki *Collar report*-kentässä).

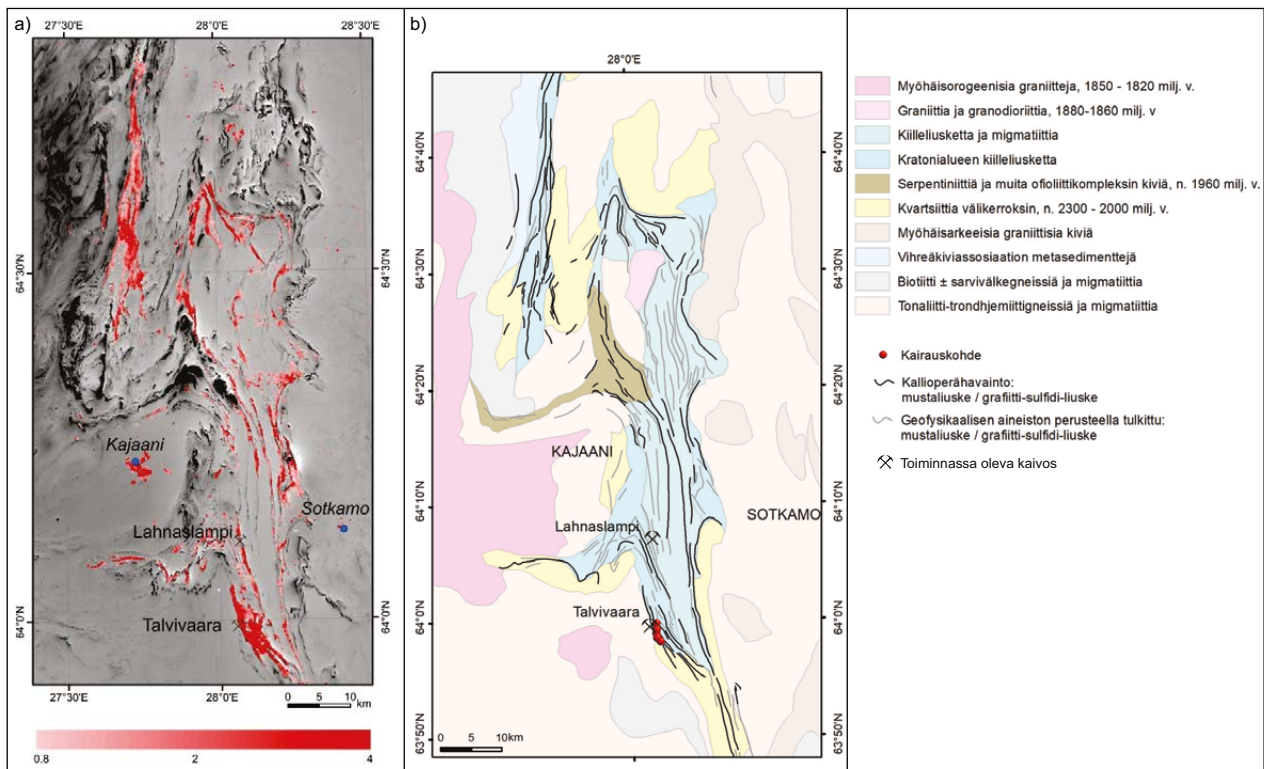
Mustaliuskeiden luokitusta varten 467 näytteen petrofysikaalisten ominaisuuksien ja kemiallisen koostumuksen tulokset analysoitiin käyttäen moniulotteista ei-parametrista tilastollista NMDS-analyysiä (kuva 9, Loukola–Ruskeeniemi ym. 2022a, 2023). Tutkitut mustaliuskenäytteet jakautuivat viiteen eri luokkaan. Suuri ja pieni pitoisuus tarkoittavat tässä tapauksessa hiukan suurempaa

tai pienempää keskimääräistä pitoisuutta verrattuna koko näyteaineistoon.

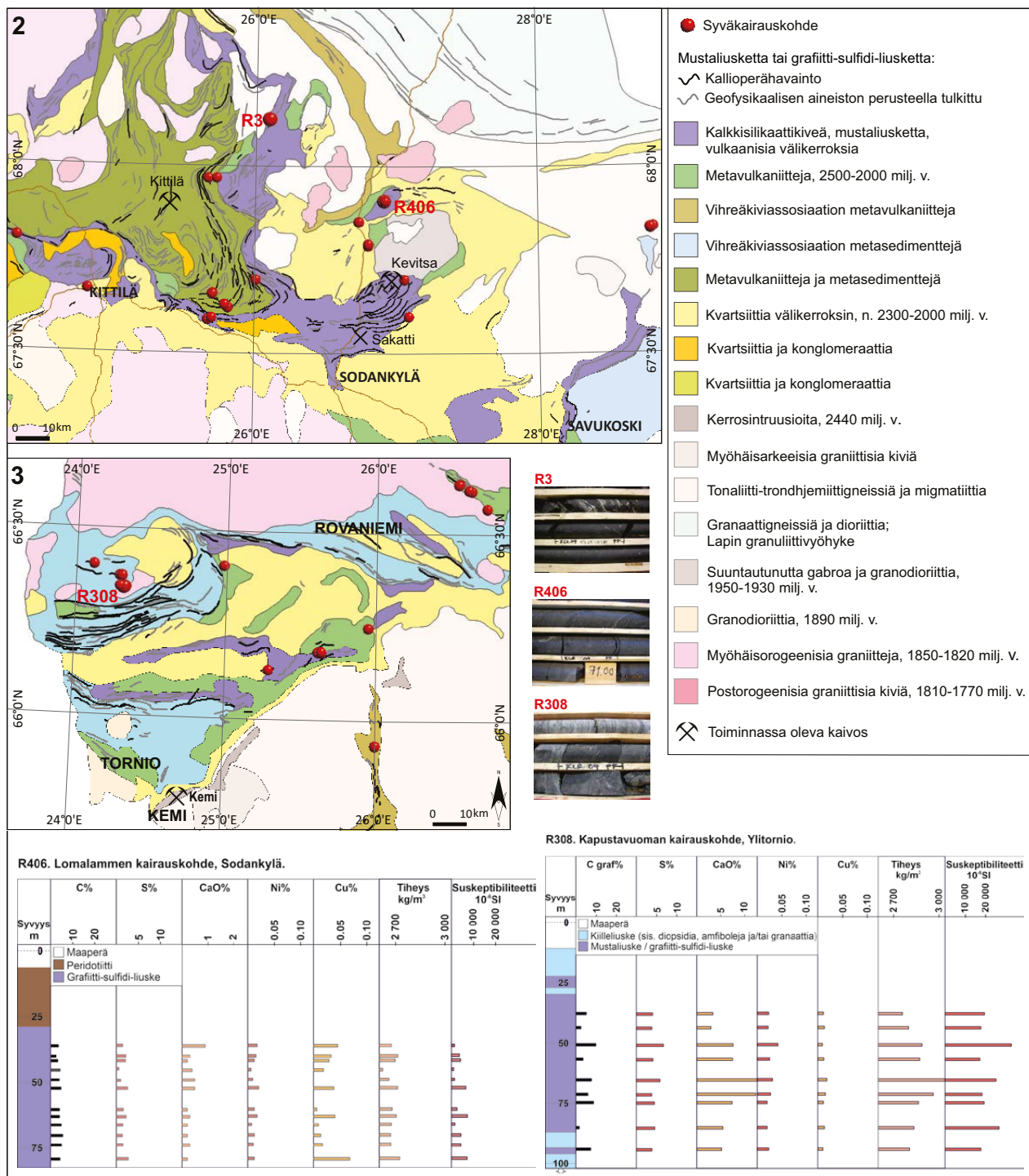
- Luokka 1. Suuri pitoisuus: natrium, alumiini, pii, kalium. Pieni pitoisuus: kalsium, fosfori, mangaani, rauta, rikki, tiheys, susceptibiliteetti, remanenssi ja sähköjohtavuus.
- Luokka 2. Suuri kalsiumpitoisuus ja karbonaattisen hiilen määrä.
- Luokka 3. Suuri magnesium- ja titaanipitoisuus ja pieni karbonaattisen hiilen määrä.
- Luokka 4. Suuri fosfori-, mangaani-, nikkeli-, kupari- ja sinkkipitoisuus ja pieni natrium-, magnesium- ja alumiinipitoisuus.
- Luokka 5. Suuri pitoisuus: rauta, vanadiini, hiili, susceptibiliteetti, remanenssi ja johtavuus sekä pieni pii- ja kaliumpitoisuus.

NMDS-analyysin perusteella tunnettujen mustaliuske-esiintymien joukosta valittiin kutakin luokkaa parhaiten edustavat yksiköt mallinnuksen opetusalueiksi. Mallinnus tehtiin käyttäen epälineaarista SVM (*Support Vector Machine*) –mallinnusta (Burgess 1998, Middleton 2014). Mallinnuksessa käytettiin matalalentomittausaineiston sähkömagneettista, magneettista ja radiometrisen aineiston uraanikomponenttia (kuva 9).

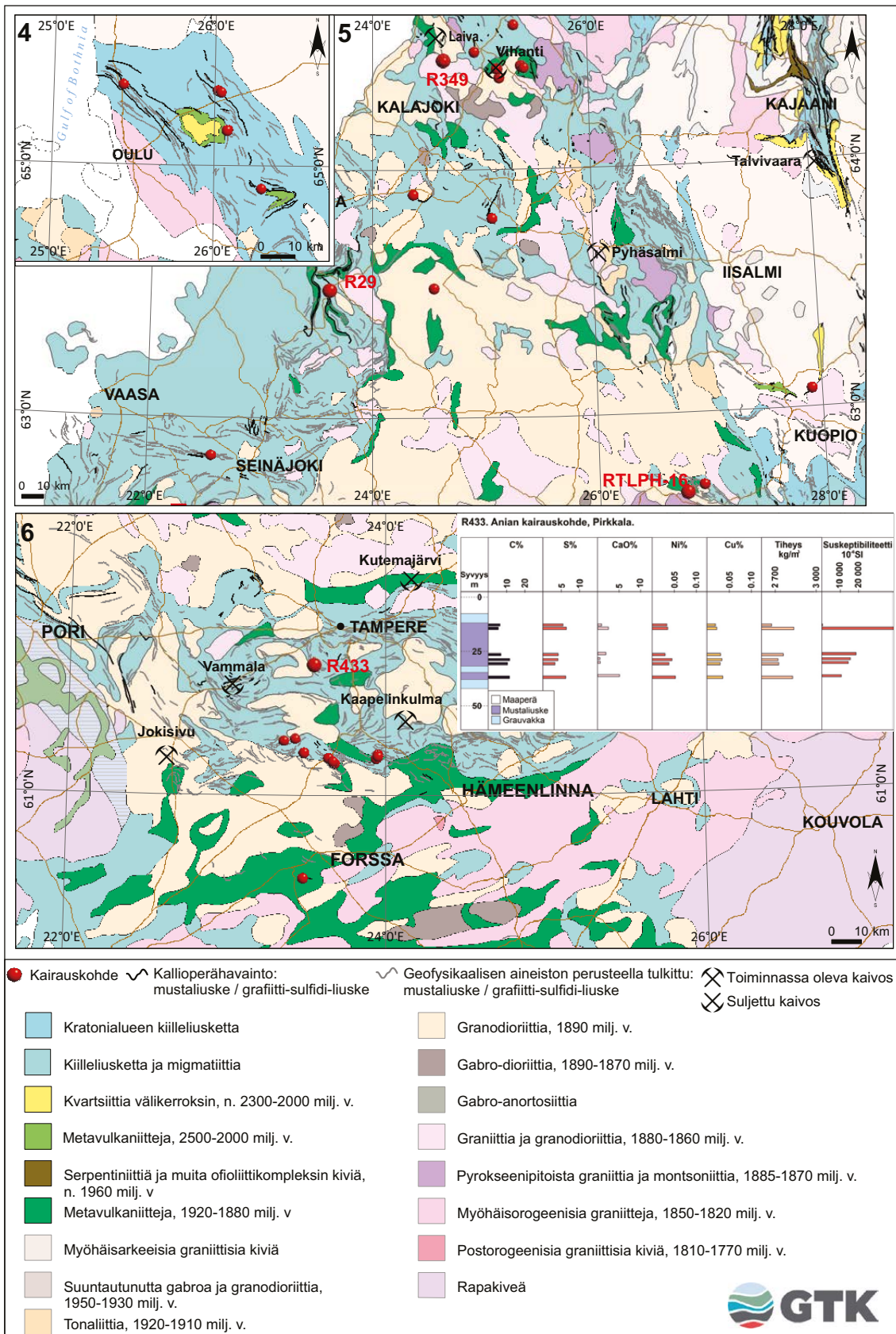
Mustaliuskeet on mahdollista tunnistaa lento-geofysikaalisen aineiston perusteella, mutta erityyppisten mustaliuskeiden erottaminen toisistaan on vaikeaa, koska niiden fysikaaliset ominaisuudet ovat samankaltaisia ja toisaalta mustaliuskeiden kemiallinen koostumus vaihtelee saman mustaliuskemuodostuman sisällä. Tämä pitää huomioida luokitustuloksia tulkittaessa.



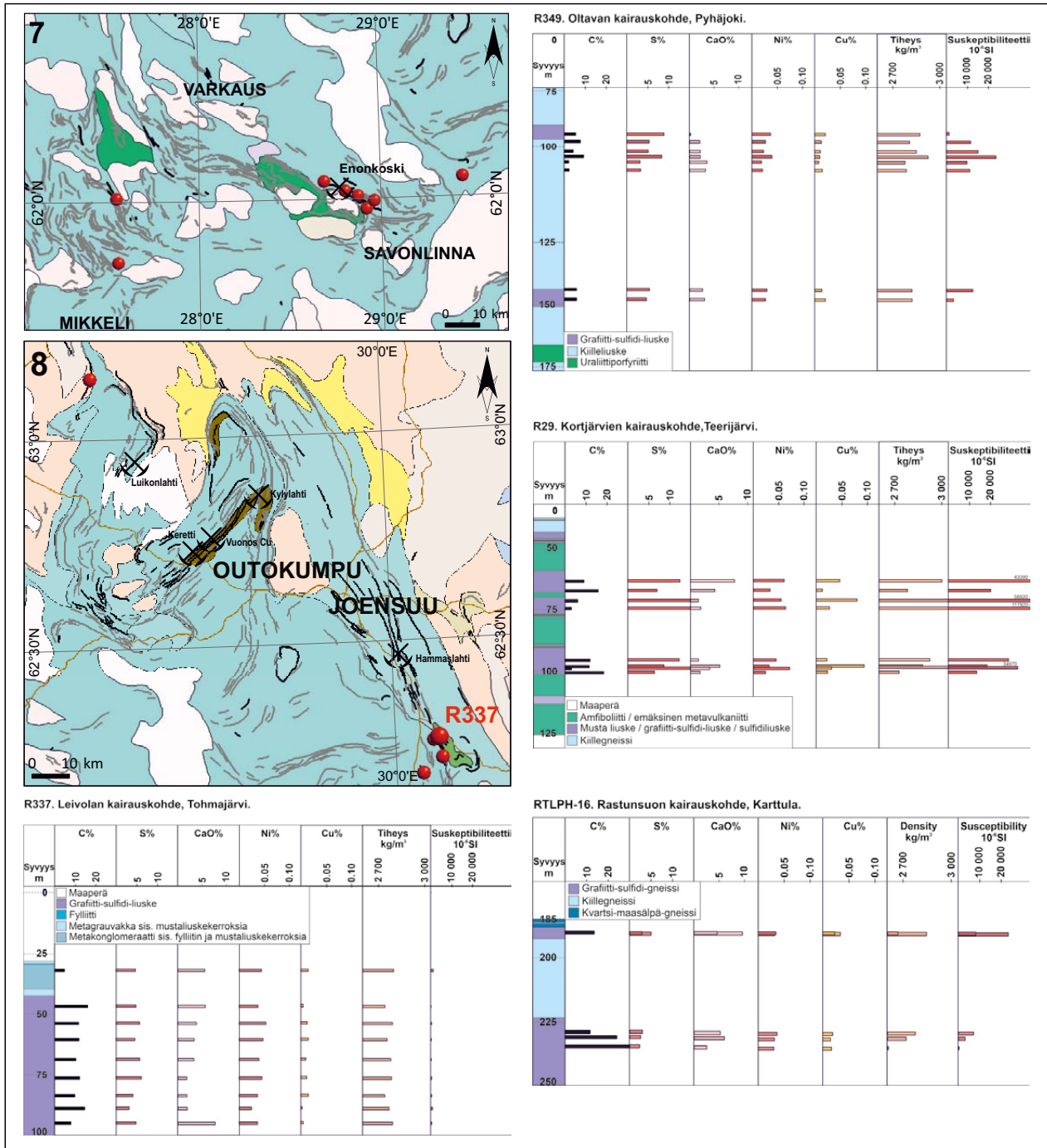
Kuva 5. a) Kainuun alueen magneettinen ja sähköinen kartta GTK:n matalalentomittausaineiston perusteella. Sähköjohtavuusanomaliat ovat punaisella magneettisen anomaliakartan päällä. Tummanharmaat alueet ovat magneettisempia kuin vaaleanharmaat. Mustaliuskeet aiheuttavat tavallisesti sekä sähköisen että magneettisen anomalian, joten tummat viivat, joissa on punaista päällä, osoittavat grafiittia ja sulfideja sisältäviä mustaliuskeita. b) GTK:n kallioperäkartta (Kallioperä 1:5 000 000, <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>) ja sen päällä mustaliuskeiden esiintyminen mustilla ja harmailla viivoilla (Loukola-Ruskeeniemi ym. 2023). Talvivaaran mustaliuskekaivos (Terrafame Sotkamo Oy) ja Lahnaslammen talkkikaivos on merkitty vasarasympolilla. Kajaanin kaupungin kohdalla oleva sähköinen anomalia johtuu asutuskeskuksen infrasta.



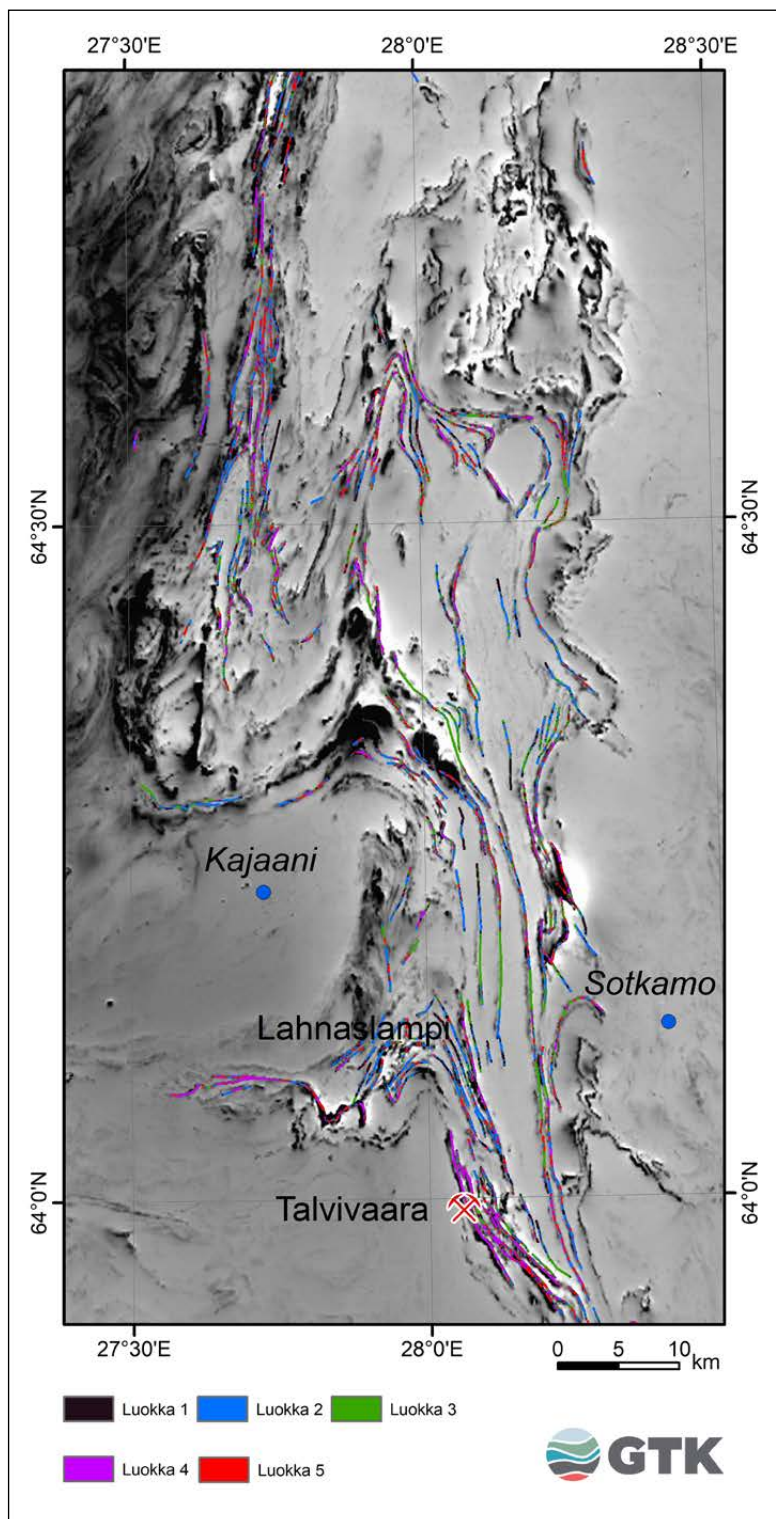
Kuva 6. Keski-Lapin ja Peräpohjan geologinen kartta (Kallioperä 1:5 000 000 <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>), mustaliuskeiden esiintyminen ja ne kairauskohteet, joista valitsimme mustaliuskenäytteitä kemiallista, mineralogista ja petrofysikaalista tutkimusta varten (Loukola–Ruskeenieniemi ym. 2023). Kuvan keskellä on kolme esimerkkiä kairausnäytteistä sisältävistä laatikoista. Alla on esitetty kahden kairauskohteiden mustaliuskenäytteiden hiili-, rikki-, kalsium-, nikkeli- ja kuparipitoisuus sekä tiheys ja susceptiiliteetti. Kairareissä R406, joka sijaitsee Lomalammen kohteessa Sodankylässä, on mustaliusketta noin 50 metriä paksu kerros, sama paksuus kuin Ylitornion Kapustavuoman kohteen kairareissä R308. Ylitornion Kapustavuoman näytteissä on paljon enemmän kalsiumia kuin Lomalammella.



Kuva 7. Oulun alueen, Etelä- ja Keski-Pohjanmaan ja Tampereen-Hämeenlinnan seudun geologinen kartta (Kallioperä 1:5 000 000 <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>), mustaliuskeiden esiintyminen ja ne kairauskohteet, joista valitsimme mustaliuskenäytteitä kemiallista, mineralogista ja petrofysikaalista tutkimusta varten (Loukola-Ruskeeniemi ym. 2023). Pirkkalan Anian kairareian R433 hiili-, rikki-, kalsium-, nikkeli- ja kuparipitoisuus sekä tiheys ja susceptibiliteetti on esitetty tässä kuvassa, mutta kairareikien R349, R29 ja RTLPH-16 tiedot ovat kuvassa 8.



Kuva 8. Savon ja Pohjois-Karjalan geologinen kartta (Kallioperä 1:5 000 000 <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>), mustaliuskeiden esiintyminen ja ne kairauskohteet, joista valitsimme mustaliuskenäytteitä kemiallista, mineralogista ja petrofysikaalista tutkimusta varten (Loukola-Ruskeenieni ym. 2023). Kivilajikuvaus ja kairareikien R349, R29 ja RTLPH-16 paikat on esitetty kuvassa 7. Tohmajärven Leivolan kairareikässä R337 mustaliuskekerros on yli 50 metriä paksu, mutta Pyhäjoen Oltavan, Teerijärven Kortjärven ja Karttulan Rastunsuon kohteissa mustaliuskekerros on alle 25 metriä paksu. Karttulan Rastunsuon mustaliuskeissa on paikoin paljon grafiittia ja Teerijärven Kortjärvellä paljon rikkiä.



Kuva 9. Kainuun magneettinen kartta. Sen päälle on merkitty mustaliuskeet jaoteltuna viiteen luokkaan, joiden ominaisuudet suhteessa muihin näytteisiin ovat seuraavat: **Luokka 1.** Keskimääräistä suurempi pitoisuus: natrium, alumiini, pii, kalium. Pienempi pitoisuus: kalsium, fosfori, mangaani, rauta, rikki, tiheys, susceptibiliteetti, remanenssi ja sähkönjohtavuus, **Luokka 2.** Keskimääräistä suurempi kalsiumpitoisuus ja karbonaattisen hiilen määrä, **Luokka 3.** Keskimääräistä suurempi magnesium- ja titaanipitoisuus ja pienempi karbonaattisen hiilen määrä, **Luokka 4.** Keskimääräistä suurempi fosfori-, mangaani-, nikkeli-, kupari- ja sinkkipitoisuus ja pienempi natrium-, magnesium- ja alumiinipitoisuus sekä **Luokka 5.** Keskimääräistä suurempi pitoisuus: rauta, vanadiini, hiili, susceptibiliteetti, remanenssi ja johtavuus sekä pienempi pii- ja kaliumpitoisuus. NMDS-analyysin perusteella valittiin kutakin luokkaa parhaiten edustavat yksiköt mallinnuksen opetusalueiksi tunnettujen mustaliuske-esiintymien joukosta. Mallinnus tehtiin käyttäen epälineaarista SVM (*Support Vector Machine*) mallinnusta (Burgess 1998, Middleton 2014). Mallinnuksen lähtöaineistona käytettiin matalalentomittausaineiston sähkömagneettista, magneettista ja radiometrisen aineiston uraanikomponenttia (Loukola-Ruskeeniemi ym. 2022a).

PETROFYSIikka

Petrofyysiikka tutkii maa- ja kallioperän fysikaalisia ominaisuuksia.

Tiheys kuvaa aineen massaa suhteessa sen tilavuuteen.

Magneettinen susceptibiliteetti kuvaa aineen magneettisia ominaisuuksia, jotka voidaan ominaisuuksiltaan jakaa kolmeen ryhmään: diamagneettiset aineet, paramagneettiset aineet ja ferromagneettiset aineet. Diamagneettisia aineet (mm. grafiitti) ja paramagneettiset aineet ovat heikosti magnetoituvia. Ferromagneettiset aineet (esim. rauta, nikkeli ja koboltti) ovat sen sijaan voimakkaasti magnetoituvia. Ferrimagneettiset aineet kuuluvat ferromagneettisten aineiden alaluokkaan, joissa susceptibiliteetti on alhaisempi kuin ferromagneettisilla aineilla, mutta niillä voi olla hyvinkin voimakas remanenssi. Suomen mustaliuskeissa yleinen magneettikiisuus on magneettisilta ominaisuuksiltaan tavallisesti ferrimagneettinen.

Remanentti magnetoituma eli remanenssi on kiven sisäinen magnetoituma, joka on olemassa ilman ulkoista magneettikenttää ja muodostaa osan kiven kokonaismagnetoitumasta. Tämä ominaisuus liittyy ainoastaan ferrimagneettisia mineraaleja sisältäviin kiviin.

Sähkönjohtavuus kuvaa materiaalin kykyä johtaa sähköä.

GEOFYSIKAALISET LENTOMITTAUKSET

Geofysikaalisilla matalalentomittauksilla kartoitetaan maankamaran fysikaalisia ominaisuuksia, kuten magneettisuutta ja johtavuutta. Mittaukset voidaan tehdä kiinteäsiipisellä lentokoneella, helikopterilla tai dronella. Mittauksilla saadaan kartoitettua nopeasti isoja alueita, mutta lentokorkeuden vuoksi mitausten erotuskyky on heikompi kuin maanpintamittauksilla.

Magneettisissa mittauksissa mitataan maan magneettikentän voimakkuutta (magneettivuon tiheyttä) ja mittaustuloksena saatava suure on kokonais- eli totaalmagneettikentän voimakkuus.

Sähkömagneettisilla mittauksilla saadaan tietoa maankamaran sähköisistä ominaisuuksista. Mittaussuureina saadaan reaali- ja imaginaari-komponentti. Mittaussuureista on laskettu näennäinen ominaisvastus, jonka käänteissuure on johtavuus.

Aeroradiometrisillä mittauksilla mitataan maankamarasta emittoituvaa gammasäteilyä. Mittauksissa rekisteröidään uraanin (U-238), toriumin (Th-232) ja kaliumin (K-40) aiheuttamaa gammasäteilyä.

4 MUSTALIUSKEISTA PERÄISIN OLEVAN AINEKSEN ESIINTYMINEN MAAPERÄSSÄ

4.1 Moreeni ja lohkarieet

Moreeni on jäätikön kerrostamaa maa-ainesta, joka voi koostua kaikista maalajitteista, savesta lohka-reisiin. Moreeniaines on kulkeutunut ja kerrostunut jäätikön mukana. Se voi olla peräisin kallioperästä, jota jäätikkö on louhinut ja jauhanut. Erityisesti herkästi rapautuvasta kallioperästä, kuten mustaliuskeesta, kiviainesta on voinut kulkeutua moreeniin paikallisesti suuria määriä. Moreeniaineksessa voi olla sekoittuneena myös maa-ainesta vanhoista maakerroksista, joita jäätikön toiminta on uudelleen kerrostanut.

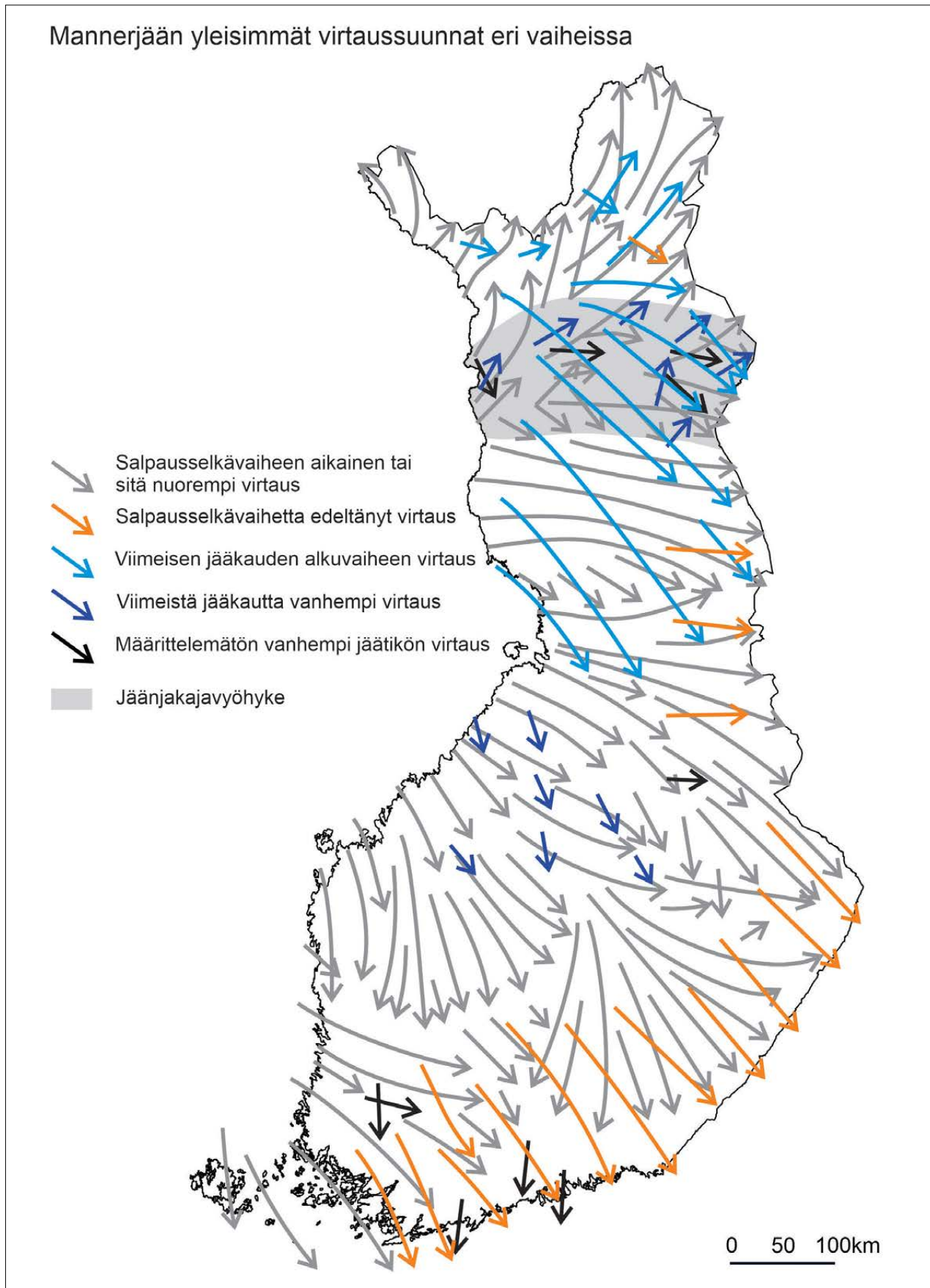
Suomessa erityisesti maaperän pintaosan moreenikerrokset ovat kerrostuneet viimeisimmän jäätiköitymisen aikana (Myöhäis-Veiksel) noin 25 000–11 700 vuotta sitten. Maaperän pintaosissa on moreenikerrostumia noin puolessa Suomen pinta-alasta, mutta lisäksi moreenia tavataan yleisesti lajittuneiden maalajien ja turpeiden alla. Moreenin kivilajikoostumus heijastelee karkeasti paikallista kallioperän koostumusta jäätikön kulkeutumissuunnassa. Kuvassa 10 on esitetty kallioperän uurrehavainnoista tulkitut jäätikön virtaussuunnat.

Lohkarieet ja moreenin karkea aines ovat voineet kulkeutua jäätikön mukana useita kilometrejä, kun taas moreenin hienoaines on tavallisesti paikallista ja kulkeutunut alle sata metriä. Erityisesti hienoaineksen sulfidimineraaleja tai niiden muuttumistuotteita sisältävä aines voi edustaa paikallista kallioperää. Suuret mustaliuskelohkarieet ovat voineet kulkeutua kymmeniä kilometrejä. Sulfidimineraaleja sisältävät lohkarieet ovat usein helposti tunnistettavia ruosteisen värin perusteella (kuva 11). Yksittäisten lohkarieiden ympäristövaikutukset ovat todennäköisesti vähäisiä, mutta lohkarieiden runsas esiintyminen voi viitata siihen, että myös moreeniaineksessa on keskimääräistä suurempaa rikkipitoisuutta.

Kun tulkitaan mustaliuskeaineksen esiintymistä moreeniaineksessa suhteessa mustaliuskeaineis-

tossa esitettyihin mustaliuskemuodostumiin, on otettava huomioon paitsi lähtöaineiston mittakaava (1:100 000) myös jäätikön virtaussuunta (kuva 10). Esiintymän paksuus kallioperässä ja sen syvyys maanpinnasta ovat oleellisia. Tietokannassa mustaliuskeviivat on esitetty todellista paksu-pana, jotta ne erottuvat 1:100 000-mittakaavassa, minkä vuoksi mustaliuskeen todellinen paksuus pitää selvittää joko kairausraporteista tai geofysikaalisilla maastomittauksilla. Mikäli esiintymä on yli kolme metriä paksu, voi mustaliuskeainesta olla laajemmalla alueella kuin silloin, jos esiintymä on ohut. Karkeana yleistykseenä moreeni-maa-alueilla mustaliuskeviivoille voidaan asettaa noin sadan metrin vyöhyke, jossa mustaliuskeainesta voi esiintyä. Vaikutuspiirin tarkempi selvitys edellyttää tausta-aineiston (lentogeofysiikka ja mahdolliset kairaukset) yksityiskohtaisempaa tarkistelua ja/tai geofysikaalisia maastomittauksia ja/tai maaperänäytteenottoa.

Moreeniaineksen rikkipitoisuuden ja hapontuotopotentiaalin kartoittaminen voi olla moreeniaineksen heterogeenisyyden vuoksi maastossa vaikeaa, ja maanäytteenotto olisikin syytä suunnitella tapauskohtaisesti suunnitellun maankäytön erityispiirteet huomioiden. Laaja-alaisilla ja -vaikutteisilla maankäyttökohteilla, kuten peruskuivatushankkeissa, riittävän näytepistetihedden arvioiminen voi olla vaikeaa ja edellyttää tiheämpää verkostoa kuin vastaavilla lajittuneiden maalajien alueilla. Pienialaisemmalla kohteella (esimerkiksi infra-rakentaminen), jossa riskit liittyvät lähinnä kaivettujen maamassojen ympäristövaikutuksiin, tutkiminen on yksinkertaisempaa ja tarvittavien näytepisteiden määrä vähäisempi. Erityisesti rakennuskohteilla näytteet mustaliusketutkimuksia varten voidaan ottaa pohjatutkimusten yhteydessä ja noudattaa näytteenotossa kansallisen HaSu-oppaan periaatteita (happamat sulfaattimaat, Autiola ym. 2022).



Kuva 10. Mannerjään yleisimmät virtaussuunnat. Jäätiköitymisten aikana mustaliusketta on irronnut kallioista pohjamooreeniin ja kulkeutunut jäätikön kulkusuunnassa. Aineksen kulkeutumismatka pohjamooreenissa vaihtelee, mutta tavallisesti se on alle sata metriä. (Geologian tutkimuskeskus 2023, Maaperäkartan käyttöopas: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/jaatikonkulutus.htm>.)



Kuva 11. Mustaliuskelohkareita Kolmisoppi-järven rannassa Sotkamossa. Kuva: Kirsti Loukola-Ruskeeniemi, GTK.

4.2 Harjut ja reunamuodostumat

Mannerjäätikön sulamisvesien vaikutuksesta syntyneitä jäätikköjokimuodostumia ovat pitkittäisharjut, deltat sekä ns. lajittuneet sauma- ja reunamuodostumat, kuten Salpausselät. Harjumuodostumat koostuvat pääasiassa hiekasta ja sorasta. Suomen maanpinta-alasta harjumuodostumat kattavat noin 2,2 %. Pitkittäisharjun poikkileikkauksessa kerrossuhteet ja raekoko vaihtelevat, mutta muodostuman pituussuunnassa rakenteen ja aineksen vaihtelu on yleensä vähäisempää. Harjujen syntytavasta johtuu, että niiden keskivaiheilla voi olla hieman koholla oleva karkeampi ydinosa, josta muodostuma ohenee reunoja kohti symmetrisesti tai epäsymmetrisesti maan aineksen muuttuessa samalla hienorakeisemmaksi.

Ydinharjussa kallionpintaa verhonnut moreeni- peite on pääosin kulunut pois ja sorat ovat kerrostuneet kallion päälle. Ytimen lähelle kerrostuu

usein karkeita hiekkvoja. Harjun karkea ydinosa on tavallisesti myöhemmin kerrostuneiden hienompirakeisten lievehiekkvojen ja/tai rantahiekkvojen peitossa, eikä sitä ole useinkaan havaittavissa maanpinnalla.

Harjumuodostumissa kiviaineksen jäätikkökuljetus on Suomessa tyypillisesti 10–30 km. Kenttähavaintojen mukaan mustaliuskeaineksen määrä sekä eri sorakerroksissa että eri puolilla tutkimusaluetta voi vaihdella 20 %:n ja 100 %:n välillä samassakin harjumuodostumassa. Tämä johtuu sekä kivilajien että kerrostumisolosuhteiden vaihteluista. Maaperän kiviaines heijastaa kallioperän kivilajeja. Esimerkiksi Joensuun seudun lajittuneissa maa-aineksissa on mukana kiviainesta, joka on kulkeutunut alueelle Outokummun/Polvijärven suunnalta mannerjäätikön sulamisvesien mukana (kuva 12).



Kuva 12. Harjuleikkaus, jossa on näkyvissä mustaliuskepitoista ainesta. Kuva: Jari Hyvärinen, GTK.

Harjukiviaineksen kulkeutumisen selvittäminen edellyttäisi kairauksia ja näytteenottoja, mutta usein tarkka kulkeutumistutkimus ei ole välttämätöntä ympäristöselvityksissä. Monin paikoin Outokummun-Polvijärven kallioperässä esiintyy sulfidipitoisia kiviä, kuten mustaliuskeita, jolloin myös niiden sisältämiä haitallisia aineita voi liueta keskimääräistä happamampien sadevesien vaikutuksesta. Mustaliuskeiden ja muiden runsaasti rikkiä sisältävien kivilajien esiintymisellä on yleensä haitallista vaikutusta maaperän laatuun ja siten myös pohjaveden kemialliseen koostumukseen ja happamuuteen (pH-arvoon). Sotkamon mustaliuskealueella tehdyissä tutkimuksissa havaittiin, että

mustaliuskekalliot vaikuttavat sekä pintavesien että pohjavesien kemialliseen koostumukseen ja veden happamuuteen (esim. Gustavsson ym. 2012).

Keskimääräistä runsaammin nikkeliä sisältävien serpentiniitti- ja mustaliuskejaksojen vaikutuspiirissä olevilla harjualueilla Kontiolahden Kerolankankaalla maaperän luontaiset nikkeli- pitoisuudet ylittävät tutkimusten perusteella maaperän pilaantuneisuuden arvioinnissa käytettävän kynnyksarvon (50 mg/kg; VNa 214/2007, Hyvärinen ym. 2021). Myös koboltin kynnyksarvot ylittyvät paikoitellen. Joensuun seudun harjuaineksessa nikkelin ja koboltin pitoisuudet ovatkin moninkertaisia Suomen keskimääräisiin pitoisuuksiin verrattuna.

4.3 Suot

Turpeiden on todettu sitovan tehokkaasti mustaliuskeista peräisin olevia haitallisia alkuaineita ja yhdisteitä. Mustaliuskemateriaalista liennutta rikkiä voi olla rikastuneena suoalueilla erityisesti turvekerroksessa mutta myös turpeen alla olevissa lieju- ja moreenikerroksissa. Turve- ja liejukerroksiin rikkiä on todennäköisesti kulkeutunut pääosin valumavesien mukana. Osin turve- ja liejukerrosten rikki voi olla peräisin suon pohjalla olevasta mustaliuskekalliosta tai mustaliuskeinesta sisältävästä jäätikön kerrostamasta moreenista tai harjuaineksesta. Virtanen ja Lerssi (2006) toteavat, että mustaliuskealueen soissa rikkiä saattaa olla runsaasti, vaikka turvekerroksen ja kallioperän välissä on irtomaakerroksia, esimerkiksi moreenia, hiekkaa, savea ja/tai liejua. Virtanen ja Lerssin (2006) tutkimusten mukaan rikki myös rikastuu tasaisemmin koko suoaltaan alueelle, kun taas eräät muut alkuaineet rikastuvat lähinnä siihen osaan suota, jossa mustaliuskeita on. Mustaliuskeperäistä rikkiä on tavallisesti myös rikastuneena eniten turvekerroksen pohjaosiin, kun taas pintaturpeessa pitoisuudet ovat yleensä pienempiä.

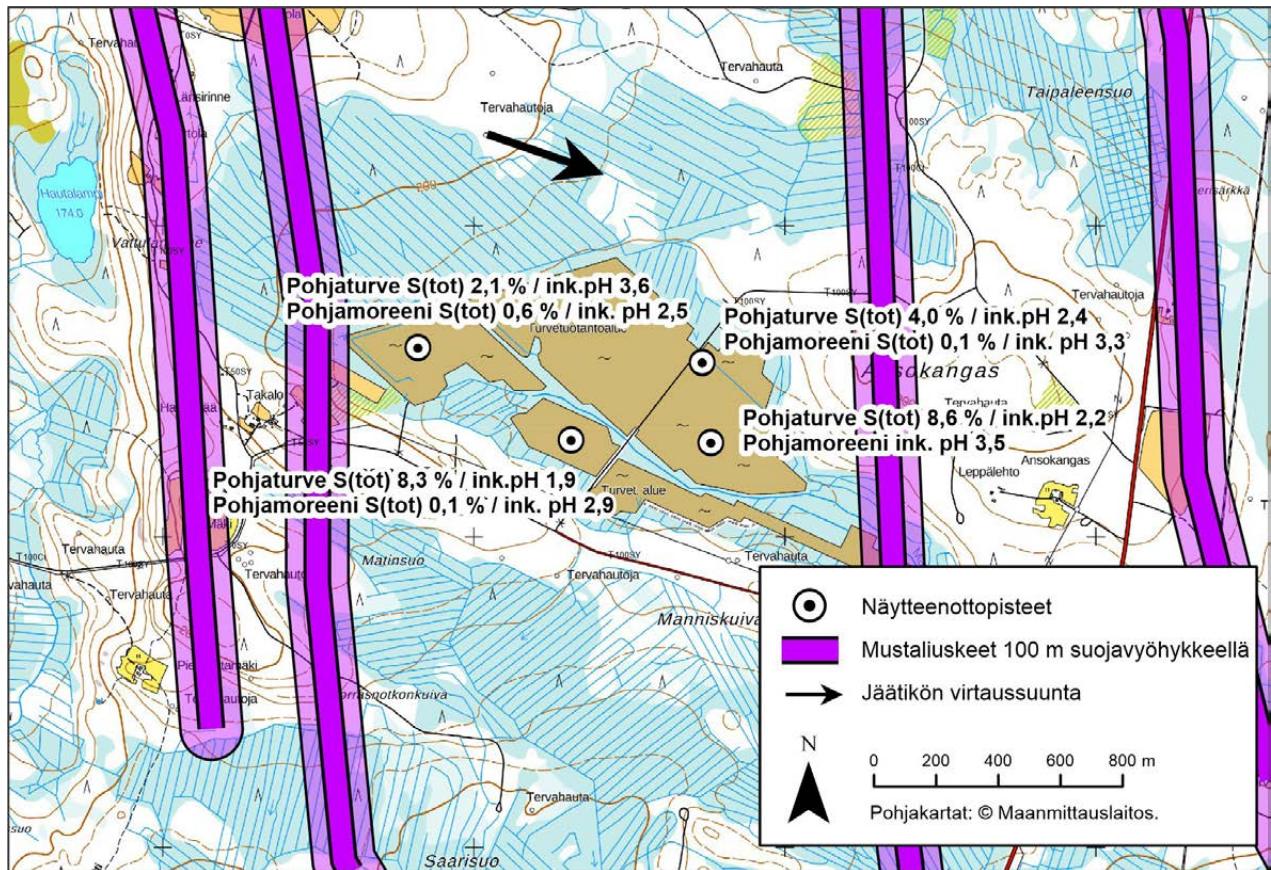
Yleistyksenä voidaan sanoa, että suoalueet, jotka ovat enintään sadan metrin etäisyydellä mustaliusketta sisältävästä kallioperästä mannerjään virtaussuunnassa, voivat olla sen vaikutuspiirissä (kuva 13). Etäisyys voi kuitenkin olla useita satoja metrejä, jos mustaliuske-esiintymä on yli 20 metriä paksu ja/tai suoalueelle on kulkeutunut suota tai valumavesiä mustaliuskeiden vaikutuspiiristä. Mikäli suoalue on kokonaisuudessaan jäätikön kulkusuunnassa mustaliuskekallioperän suojapuolella (ks. kuva 10) eikä alueelle kerry valumavesiä mustaliuskejakson suunnasta, mustaliuskeiden ympäristövaikutukset alueella ovat epätodennäköisiä.

Suoalueilla mustaliuskeiden aiheuttamat riskit liittyvät lähinnä ojitukseen ja kuivatukseen (suopellot ja -metsät tai turvetuotanto), jolloin rikkipitoista ainesta voi päästä happattumaan ja

happamoitumaan. Happamuus voi liuottaa maaperästä haitallisia aineita, jotka voivat yhdessä happamuuden kanssa heikentää pintavesien ekologista ja kemiallista tilaa. Mustaliuskealueiden turpeissa voi olla tavanomaista suurempia haitallisten aineiden pitoisuuksia (Virtanen & Lerssi 2006).

Ennakkotietona riskinarvioissa on hyvä huomioida mustaliuskeiden erot eri alueilla. Ympäristövaikutusten suhteen merkityksellisiä ovat sellaiset mustaliuskejaksot, joissa mustaliusketta on yli kolme metriä paksu kerros, se sisältää paljon rikkiä ja mustaliuske sijaitsee lähellä maanpintaa tai on paljastuneena, esimerkiksi kalliopaljastumina ojan tai puron reunoilla tai pohjassa. Tarkennetussa riskinarviossa on tarpeen ottaa maaperänäytteitä sekä turve- että pohjamaakerroksista. Näytteistä analysoidaan kokonaisrikkipitoisuus sekä hapontuotto-ominaisuuksia, kuten hapetetun näytteen pH (inkubaatio pH) ja maanäytteen hapontuottopotentiaali (asiditeetti). Tuloksia tulkittaessa on huomioitava, että turpeen, liejun ja pohjamaan puskurikyky happamoitumista vastaan sekä luontainen hapontuotto voivat poiketa toisistaan huomattavasti. Erityisesti turpeissa voi olla runsaasti orgaanista happamuutta, joka ei liity rikkipitoisuuteen. Toisaalta turpeen orgaaninen eli eloperäinen aines voi puskuroida muodostuvaa happamuutta tehokkaasti.

Turpeiden ja liejujen rikkipitoisuudet voivat olla mustaliuskealueilla paikoin jopa yli 10 %. Se on paljon verrattuna mineraalimaiden pitoisuuksiin ja turpeiden keskimääräiseen rikkipitoisuuteen, joka on 0,2 % (Virtanen ym. 2003). Tulkittaessa maalajien rikkipitoisuuksia olisi kuitenkin hyvä huomioida niiden irtotiheys, joka on esimerkiksi turpeilla tyypillisesti vain noin kymmenesosa mineraalimaiden irtotiheydestä. Mikäli pitoisuuksia tarkastellaan tilavuusperusteisesti, ei ero mineraalimaihinkin ole yhtä huomattava (Visuri ym. 2021).



Kuva 13. Mustaliuskeet turvetuotantoalueen kartoituksessa. Rikkipitoisuudet voivat olla turpeessa hyvin suuria ja pH:n lasku inkubaatio-hapetuksessa voimakasta. Kartalla **S (tot)** kuvaa kokonaisrikkipitoisuutta prosentteina ja **ink. pH** laboratoriossa mitattua inkubaatio-pH:ta 9–19 viikon hapetusjakson jälkeen. Suojavyöhykkeet liittyvät moreeniaineksen kulkeutumiseen. Pohjakartta © Maanmittauslaitos.

SUOMEN MAAPERÄN YLEISPIIRTEET

Kallioperä on Suomessa suureksi osaksi maaperän peitossa. Maalajit ovat joko mineraali- ja kivilajisyntyisiä tai eloperäisiä. Edelliset koostuvat kivilajeista ja mineraaleista, jotka ovat irronneet kallioperästä fysikaalisten ja/tai kemiallisten reaktioiden seurauksena ja särkyneet lohkareiksi ja kiviksi tai jauhautuneet esimerkiksi hiekaksi, hiesuksi tai saveksi. Eloperäiset maalajit, kuten turve, multa ja lieju, sisältävät kasvien ja/tai eläinten jäännöksiä.

Moreeni on mannerjäätikön irrottamasta ja kuljettamasta kiviaineksesta syntynyt sekalajitteinen maalaji, joka voi sisältää eri raekokoja savesta lohkareisiin.

Harju on jäätikköjokien kerrostama pitkä ja kapea, enimmäkseen lajittuneen maa-aineksen (hiekkä, sora) muodostuma. Harjut ovat tärkeitä pohjavesialueita sekä soran ja hiekan raaka-ainelähteitä.

Reunamuodostuma on jäätikön reunalla syntynyt, joko moreenia tai lajittuneita kerrostumia sisältävä reunan suuntainen maastomuoto. Reunamuodostumat esiintyvät jäätikön reunan suhteen poikittain. Esimerkkejä reunamuodostumista ovat Salpausselät.

MAAPERÄNÄYTTEET JA HAPPAMUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

Maanäytteen pH-inkubaatio: Maanäytteen haptusmenetelmä laboratoriossa. Tavoite on hapettaa näytteessä olevat rautasulfidit ilman kemikaleja ja tunnistaa hapan sulfaattimaa pH-laskun perusteella.

pH: pH:lla kuvataan happamuutta, jolla tarkoitetaan vetyionien aktiivisuutta liuoksessa. Hapot lisäävät ja emäkset vähentävät vetyionien määrää liuoksessa. Liuos on neutraali, kun pH on 7, hapan, kun se on tämän alle, ja emäksinen, kun pH on yli 7.

Asiditeetti: Asiditeetilla tarkoitetaan veden kykyä neutraloida vahva emäs tiettyyn pH-arvoon. Käytännössä asiditeettiarvo kuvaa näytteessä olevan hapon määrää.

Hapontuottopotentiaali: Hapontuottopotentiaalilla tarkoitetaan maanäytteessä olevaa tai siinä haptuksen seurauksena muodostuvaa happomäärää vetyionipitoisuutena mitattuna (esim. mmol H⁺ / kg).

Maalajin irtotiheys: Kuivatilavuuspaino; kuinka monta grammaa yksi millilitra märkänäytettä painaa kuivattuna.

5 MUSTALIUSKEIDEN VAIKUTUS PINTA- JA POHJAVESIIN, EKOSYSTEEMIIN JA MUSTALIUSKEALUEELLA ASUVIIN IHMISIIN

Runsaasti rikkiä sisältävien paksujen mustaliuskekerrosten vaikutukset pintavesiin voi pääosin rinnastaa happamien sulfaattimaiden aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin. Sulfidien hapettumisen seurauksena syntyvä vesien happamoituminen (veden pH:n aleneminen) edesauttaa haitallisten alkuaineiden liukenemista maa-aineksesta vesistöihin, mikä voi heikentää niiden ekologista ja kemiallista tilaa. Englanniksi näistä käytetään termiä *'potentially harmful elements and compounds'*. Vaikutusten merkittävyys riippuu paitsi huuhtoutuvan happamuuden ja haitallisten aineiden määrästä myös vastaanottavan vesistön herkkyydestä, kuten sen koosta, puskurikyvystä ja eliölajistosta. Mustaliuskeita sisältävä kallioperä vaikuttaa vesistöjen tilaan erityisesti Itä-Suomen iältään proterotsooisilla alueilla, koska siellä esiintyy paksuja (> 20 metriä) ja runsaasti rikkiä (keskiarvo noin 7 % S) sisältäviä mustaliuskejaksuja (esim. Loukola-Ruskeeniemi 1999, Mäkinen ym. 2010).

Vesistöjen ja eliöstön kannalta ongelmallisia ovat alhainen pH ja liukoiset haitalliset aineet. Alumiini on erityisen haitallista alhaisen pH:n olosuhteissa, koska se voi sakkautua raudan kanssa kalojen kidusten pinnalle ja aiheuttaa siten kalakuolemia. Mustaliuskeille tyypillisiä vesistöissä esiintyviä haitallisia aineita ovat muun muassa kadmium, koboltti, kupari, mangaani, sinkki ja nikkeli. (Sutela ym. 2012, Vehanen ym. 2022)

Talvivaaran mustaliuskeet aiheuttivat happamoitumista alueen vesistöissä jo yli 9 000 vuotta sitten (Loukola-Ruskeeniemi ym. 1998). Jäätikön eteen muodostui sulamisvesistä Sotkamossa iso jääjärvi. Kun sulamisvesien määrä kasvoi, vedenpaine puhkasi uuden purkautumisväylän, vedenpinta laski

nopeasti ja mustaliuskekalliot paljastuivat. Koska alueella ei vielä ollut kasvillisuutta kallioiden rapautumista vähentämässä, mustaliuskealueella sijaitsevan Härkälammen veden pH laski alle neljään ja nikkelpitoisuus nousi. Runsaasti nikkeliä, sinkkiä ja kuparia sisältäviä vesiä valui myös turpeisiin (Mäkilä ym. 2012, Parviainen ym. 2014). Paikallisten asukkaiden kaivovesien ja hiusunäytteiden nikkeli- ja mangaanipitoisuudet heijastivat maaperän ja pinta- ja pohjavesien nikkeli- ja mangaanipitoisuuksia vuonna 1999, vuosia ennen kuin kaivostoiminta alkoi Talvivaarassa (Kousa ym. 2021). Kuvassa 14 näkyy murskatun mustaliuskekallion rapautumista.

Mustaliuskeissa on paitsi rikkiä myös rautaa. Rautayhdisteiden kulkeutuminen on runsasta erityisesti karkearakeisissa happamissa sulfaattimaissa. Rautapitoisuuden lisääntyminen vesistöissä on yleistä turvemilla. Kuvassa 15 on pienen lammen pohjassa olevaa rautasaostumaa Talvivaaran mustaliuskealueella ennen kaivostoiminnan alkua.

Hiilen, rikin ja kalsiumin määrä mustaliuskeissa vaihtelee. Lisäksi kivilajiseurueen muiden kivilajien rikki- ja kalsiumpitoisuudet ovat tärkeitä: rikki lisää pintavesien happamoitumisriskiä ja kalsium vähentää sitä. Esimerkiksi paksujen dolomiitterosten kanssa vuorotteleva mustaliuske aiheuttaa vähemmän happamoitumista (englanniksi *'acid rock drainage'*), koska dolomiitti sisältää paljon kalsiumia. Sen sijaan mustaliuskeiden lähellä tavattavat tulivuoriperäiset vulkaniitit lisäävät ympäristöriskejä, mikäli ne sisältävät haitallisia aineita ja rikkiä.



Kuva 14. Mustaliusketta ennen kaivostoiminnan alkua Talvivaaran malmiesiintymän alueella. Louhoksen pintaosat ovat rapautuneet, ja sadevesilammikoiden veden pH on laskenut alle neljän. Kuva: Klaus Einsalo, Teknillinen korkeakoulu.



Kuva 15. Rautasaostumia pikkulammen pohjassa Talvivaaran esiintymän alueella vuosia ennen kaivostoiminnan alkua. Kolmisoppi-järvestä nostettiin kauan sitten järjvimalmia. Kuva: Kirsti Loukola-Ruskeeniemi, GTK.

Pohjaveden laatuun vaikuttavat muun muassa sadanta, haihtuminen ja geologiset tekijät. Pohjavesiesiintymän geologisen rakenteen lisäksi maa- ja kallioperän mineraali- ja kivilajikoostumus on merkittävä. Sadevesi on maassamme useimmiten varsin hapanta (pH noin 4–6), joten satava vesi liuottaa helpommin rapautuvista kalliosta mukaansa enemmän aineksia kuin pohjavesi. Yleisesti ottaen tummat kivilajit kestävät rapautumista huomattavasti paremmin kuin vaaleat, minkä vuoksi mustaliuskevaikutteisilla alueilla pohjavesi saattaa sisältää juomaveden raja-arvoja ylittäviä määriä liuenneita aineita.

Suomessa kalliopohjavesien merkittävimmät vesivarat sijaitsevat kallioperän ruhjevöhykkeissä, ja eräiden arvioiden mukaan kalliopohjavesien määrä jopa ylittää maaperäpohjavesien määrän. Kalliopohjavesien yhteydet maaperän pohjavesiin on viimeaikaisissa tutkimuksissa todettu merkittäviksi (Ruskeeniemi & Putkinen 2023). Se kannattaa pitää mielessä, kun puhutaan maaperän pohjavesien laadusta. Kalliopohjavedet sisältävät liuenneita aineita yleisesti maaperän pohjavesiä enemmän. Tämä tilanne on nähtävissä mustaliusketta sisältävillä alueilla.

Pohjavesialueilla sijaitseville vedenottamoille mustaliuskealueilta peräisin oleva pohjavesi on aiheuttanut ongelmia. Pohjavedenottamoiden kaivoja on ainakin Joensuun seudulla jouduttu poistamaan käytöstä liian suurten luontaisten nikkelpitoisuuksien vuoksi. Havaintojen perusteella esimerkiksi Pohjois-Karjalan harjualueilla pohjavesien nikkelpitoisuudet vaihtelivat samallakin pohjavesialueella sen eri kohdissa, ja vähäisempää vaihtelua oli myös pohjavesivöhykkeessä eri syvyyksillä. Suurimpia nikkelpitoisuuksia mitattiin soranottoalueiden pohjavesissä. (Hyvärinen ym. 2021)

Mustaliuskevaikutteisella alueella tehtävällä maa- ja kalliokiviainesten otolla saattaa olla haitallista vaikutusta alueen pohjavesien kemialli-

seen koostumukseen, varsinkin jos maannoskerros on poistettu laajoilla alueilla ja otto on ulottunut lähelle pohjaveden pintaa tai muutoin syvälle. Joensuun seudulla tehtyjen havaintojen mukaan maaperän nikkelpitoisuus on ollut suurempi lähellä kalliopintaa kuin luontaisen maanpinnan lähellä. Pohjavesiin vaikuttavat kuitenkin myös muut tekijät, muun muassa pohjavesien muodostumis- ja virtausolosuhteiden ja pohjavedenottamoiden pumppausmäärien vaihtelut. Lisäksi geologiset olosuhteet ja kalliopohjavedet voivat vaikuttaa pohjavesien kemialliseen koostumukseen.

Esimerkiksi Joensuun alueen kallioperän paikotellen sisältämien mustaliuskeiden sekä nikkeliä sisältävien serpentiniittien ja niiden muuttumistuotteiden vuoksi Joensuun seudun pohjavesissä on monin paikoin havaittu luontaiset taustapitoisuudet ja osin myös talousveden laatuvaatimukset ylittäviä pitoisuuksia, erityisesti nikkeliä (Ni), mutta myös kobolttia (Co), kuparia (Cu), sinkkiä (Zn), alumiinia (Al) ja rikkiä (S). Samantyyppinen tilanne on havaittavissa monilla muillakin mustaliuskealueilla.

Nikkeli (Ni) esiintyy pohjavesissä ioneina. Esiintymisen tärkein säätelevä tekijä on maaperän pH. Nikkelin liikkuvuus kasvaa maaperän happamoituessa, mutta liikkuvuutta säätelevät myös orgaanisen aineksen ja alumiinipitoisten savim mineraalien määrä. Nikkelin liikkuvuus pohjavesissä on varsin hyvä moniin muihin epäorgaanisiin haitallisiin aineisiin verrattuna.

Kontiolahdella Kulhon pohjavesialueella pohjavesien nikkelpitoisuus vaihtelee 5–3 200 µg/l sekä sijainnin että näytesyvyyyden mukaan. Myös alueella sijaitsevista Joensuun Veden pohjavedenottokaivoissa on havaittu lähelle talousveden laatuvaatimuksia (20 µg/l) kohoavia nikkelpitoisuuksia. Sotkamon mustaliuskealueella yksityisten kaivovesien nikkelpitoisuus oli suurimmillaan 51 µg/l (Kousa ym. 2021).

6 MUSTALIUSKEIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUSTEN SELVITTÄMINEN

6.1 Tietotarpeet

Runsaasti rikkiä sisältävien mustaliuskeiden aiheuttaman riskin arvioinnin kannalta on merkittävää tuntea

- mustaliuskemuodostuman koko ja mustaliuskeiden rikin ja haitallisten aineiden pitoisuus
- maaperämuodostumat ja niiden ominaisuudet mustaliuske-esiintymän läheisyydessä ja kohdealueella
- maankäytön ja -muokkauksen toimenpiteet
- tiedot luontoarvoista ja vesistöjen tilasta vaikutusalueella.

Tietotarpeiden arvioinnissa voi hyödyntää kansallisessa HaSu-oppaassa julkaistua vaikutusten merkittävyyden arviointityökalua (happamat sulfaattimaat, Autiola ym. 2022). Tietotarpeiden keräämisen jälkeen voidaan tehdä päätös mahdollisesta kartoituksesta ja näytteenotoista. Tietoja mustaliuskeiden sijainnista ja ominaisuuksista saadaan GTK:n kallioperän mustaliuskeaineistosta (<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>), mutta myös mahdollisista erillisistä kairausraporteista ja maaperägeologisista pohjatutkimuksista. Oleellista on selvittää mustaliuske-esiintymän paksuus ja keskimääräinen rikkipitoisuus, sillä lähtökohtaisesti suurin riski liittyy mustaliuskeisiin, joiden paksuus on yli kolme metriä ja jotka sisältävät paljon rikkiä. Ympäristöriskihin vaikuttaa suuresti myös se, sijaitseeko mustaliuske lähellä maanpintaa ja onko se alttiina pintavesien ja hapen vaikutukselle (Loukola-Ruskeeniemi ym. 2022b). Lähistöllä sijaitseva mineralisaatio ja muut rikkiä runsaasti sisältävät kivet lisäävät ympäristöriskiä tai voivat myös olla pääasiallinen happamoitumisen syy. Mineraaliesiintymien sijainti löytyy GTK:n paikkatietopalvelusta (Mineraaliesiintymät, <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>) ja GTK:n mineraaliesiintymäkarttapalvelusta (Mineral Deposits and Exploration (MDaE), <https://gtdata.gtk.fi/mdae/index.html>). Malmilohkare-aineisto on myös tuotteistettu ja löytyy sekä GTK:n paikkatietopalvelusta (Lohkarehavainnot, <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>) että GTK:n mineraaliesiintymäkarttapalvelusta (MDaE).

Mustaliuskeiden aiheuttaman ympäristöriskin arviointi edellyttää pääsääntöisesti kohdetutkimuksia, mikäli mustaliusketta on yli kolme metriä paksu kerros, se sisältää yli 1 % rikkiä ja

mustaliuske sijaitsee lähellä maanpintaa tai on paljastuneena, esimerkiksi kalliopaljastumina ojan tai puron reunoilla tai pohjassa. Maaperän laatua voi arvioida pohjatutkimustietojen (<https://gtdata.gtk.fi/Pohjatutkimukset/index.html>) ja maaperän luontaisen taustapitoisuuksien (<https://gtdata.gtk.fi/tapir/index.html>) perusteella sekä Maankamara-karttapalvelun (<https://gtdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>) ja mahdollisten kallioperän kairaus tietojen perusteella (Kallioperäkairaukset, <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>). Oleellista on tunnistaa moreeni-, harjuaines- ja suoalueet, sillä erityisesti niihin on voinut rikastua mustaliuskeperäistä rikkiä. Maaperäkartoista (Maaperä 1:20 000 / 1:50 000 ja Maaperä 1:200 000 (maalaji), <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>) tarkastellaan jäätikön virtausuuntaa, koska ne ovat vaikuttaneet mustaliuskeaineiden kulkeutumiseen mustaliuske-esiintymästä maaperään (luku 4). Kulkeutumissuuntaa voi arvioida kallioperän uurrehavaintojen perusteella (Maankamara-karttapalvelu, <https://gtdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>). Maaperän laatu voi vaikuttaa myös maa-aineiden hapettumisen ja happamoitumisen nopeuteen. Erityisesti karkearakeisessa ja lajittuneessa maaperässä happamoituminen voi olla nopeaa. Toisaalta happamuus voi vähentyä ja liuenneet aineet huuhtoutua suhteellisen nopeasti pois.

Maankäytön toimenpiteissä on tärkeää tunnistaa toimenpiteen mahdollinen vaikutus maaperän kuivatustasoon (pohjavedenpinnan taso), vaikutusalueen laajuus sekä vaikutusten kesto. Myös kaivettujen maamassojen määrä ja niiden sijoittaminen tai hyödyntämismahdollisuus on syytä arvioida. Lähtökohtaisesti suurin riski liittyy laaja-alaiseen kuivatustason alentamiseen. Erityisesti pitkällä aikavälillä maaperän happamuus voi lisääntyä, ja prosessia voi olla vaikea hallita, jos se on päässyt käyntiin. Huomionarvoista on, että myös kohteellisen maanmuokkauksen (esim. rakennuskohde) vaikutusalue voi olla huomattavasti laajempi kuin itse hankealue. Kaivettujen massojen riskinarvioon vaikuttaa niiden käytön suunnittelu. Mikäli maamassat joudutaan loppusijoittamaan maankaato paikalle, se ei välttämättä vaadi erillistä käsittelyä, mutta maankaato paikalla tulee olla ympäristölupa, joka mahdollistaa happamuutta tuottavien masso-

jen vastaanoton. Mikäli massat läjitetään tai väli-varastoidaan tai niitä käytetään hyödyksi kohteella, ne tulee käsitellä asianmukaisesti (neutralointi/stabilointi, Autiola ym. 2022).

Mustaliuskeiden ja mustaliuskepiteisen maaperän aiheuttaman korroosion mahdollisuutta voi olla tarvetta arvioida. Sulfidiperäinen korroosio vaikuttaa erityisesti maanalaisiin teräs- ja betonirakenteisiin, ja sen tutkimista ja huomioimista varten on laadittu erityinen korroosiotutkimusohjelma (Väylävirasto 2023).

Kohdealueen luontoarvojen ja vesistön tilan arvioinnissa on tärkeää tunnistaa alueen pohja- ja pintavesien virtaussuunnat ja laatu. Myös luonnonympäristön suojeluarvot ja vastaanottavan vesistön ekologinen ja kemiallinen luokitus sekä virkistysarvot on syytä huomioida (Autiola ym. 2022). Vastaanottavan vesistön herkkyydelle merkittäviä tekijöitä ovat vesistön koko ja puskurikyky.

Vesistöjen, pohjavesien ja maaperän tilaa voi tarkastella valtakunnallisista ja kohteellisista tieto-

kannoista, esimerkiksi Suomen ympäristökeskuksen VESLA- ja POVET- tietokannoista ja GTK:n Tapir-taustapitoisuustietokannasta ([Avoimet ympäristötietojärjestelmät - syke.fi](https://avoimet.ymparistotietojarjestelmät-syke.fi) ja <https://gtkdata.gtk.fi/tapir/index.html>). Vesienhoidon ekologisen tilan luokittelu löytyy Ympäristötiedon hallintajärjestelmästä (Hertta). Uusi vesien- ja merenhoidon tietojärjestelmä PISARA kattaa meri-alueet, pohjavedet ja pintavedet.

Mikäli kohteen lähistöllä on moreenikartoituksen näytepisteitä, joissa esimerkiksi luontainen sinkkipitoisuus ylittää pilaantuneiden maiden arvioinnissa käytettävän kynnyksarvon, valtakunnallisessa tai kohteellisessa pintavesitietokannassa veden pH on alle 5,5 tai kohteen pohjavedessä on keskimääräistä enemmän rautaa tai nikkeliä, kyse voi olla mustaliuskeiden tai muiden runsaasti rikkiä sisältävien kivien ja maaperämuodostumien vaikutuksesta.

6.2 Julkiset kartta- ja paikkatietoaineistot

Julkisia kartta- ja paikkatietoaineistoja voi hyödyntää mustaliuskeiden esiintymisen arvioinnissa ja niiden ympäristövaikutusten selvittämisessä. Edellisessä kappaleessa mainitut Suomen ympäristökeskuksen ja GTK:n paikkatietotuotteet ja karttapalvelut löytyvät seuraavista palveluista: '[Avoimet ympäristötietojärjestelmät - syke.fi](https://avoimet.ymparistotietojarjestelmät-syke.fi)' ja '[Aineistot ja verkkopalvelut | GTK](https://www.gtk.fi/paikkatietoaineistot)'.

Kallioperä:

- GTK:n mineraaliesiintymäkarttapalveluissa (MDaE) (<https://gtkdata.gtk.fi/mdae/index.html>) on tietoa mineraaliesiintymistä, metallogeenisista alueista ja runsaasti sulfideja sisältävistä kallioista.
- GTK:n paikkatietopalvelusta (<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>) voi ladata useita kallioperään liittyviä tuotteita. Alueellista kallioperäkartoista on kartta-aineistoja eri mittakaavoissa, ja niiden lisäksi palvelussa on kallioperähavaintoihin ja kallioperäkairaukseen liittyvää tietoa.
- Tiedot sulfidimineraaleja sisältävistä lohkarista ja lohkarien kivilajista voi ladata Hakku-palvelun paikkatietotuotteista (Lohkarehavainnot, <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>).
- Kallioperän mustaliuskeaineisto on ladattavissa GTK:n paikkatietopalvelusta (<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>).

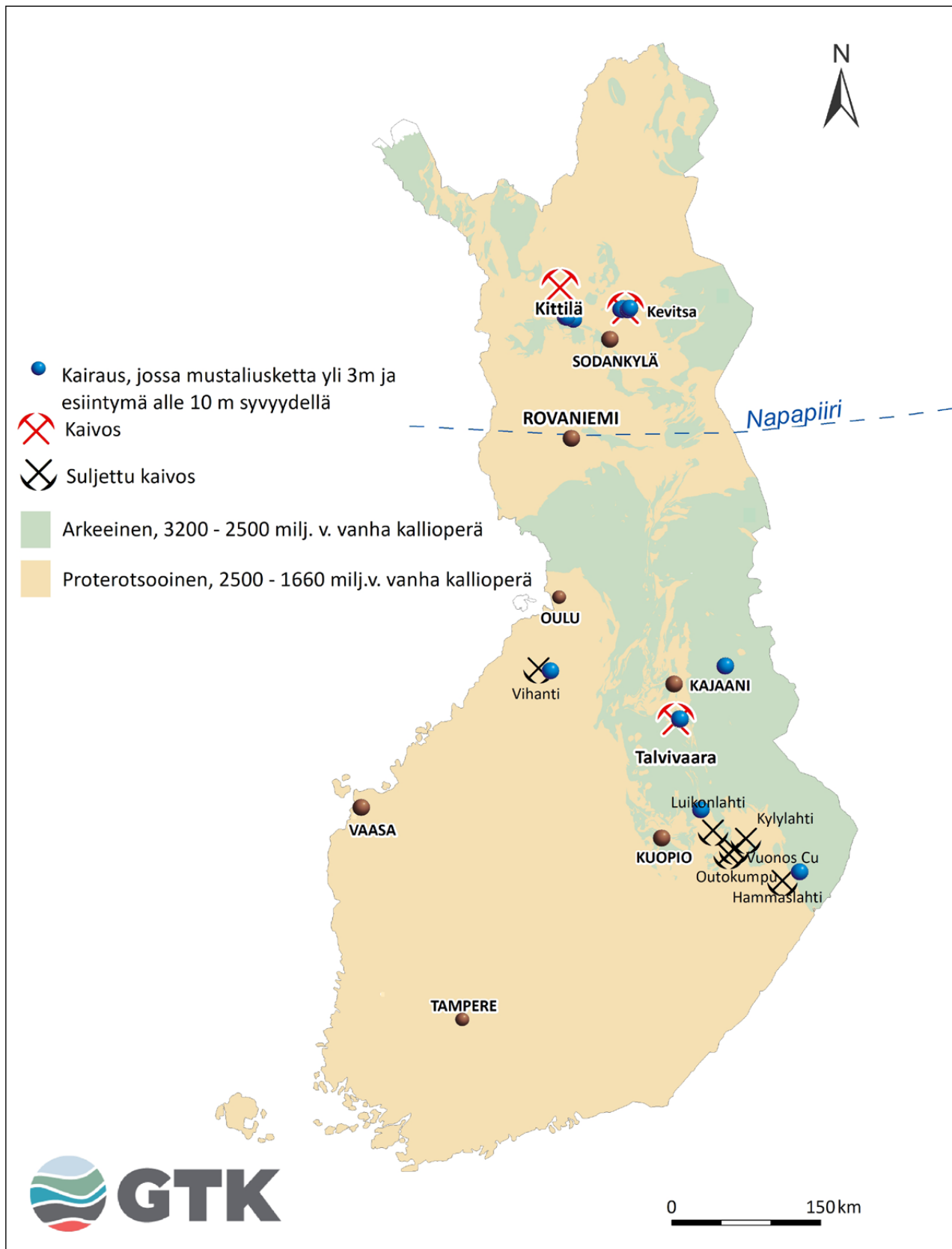
[gtk.fi/fi/locations/search](https://www.gtk.fi/fi/locations/search)). Aineisto sisältää GTK:n lentomittausaineiston sekä kallioperän havainto- ja kairaus tietojen perusteella tulkitut mustaliuskeet viivatasoina, jaoteltuna tunnetuihin ja tulkittuihin esiintymiin. Aineistossa on myös valituilta kallioperäkairauskohteilta mustaliuskeiden kemiallisia analyysitietoja ja petrofysikaalisia mittaustuloksia.

- Kallioperähavaintoihin ja kairasydämiin liittyviä kemiallisia analyysituloksia ja petrofysikaalisia mittaustuloksia on mahdollista ostaa GTK:sta (sähköposti: geodata@gtk.fi).

Maaperä:

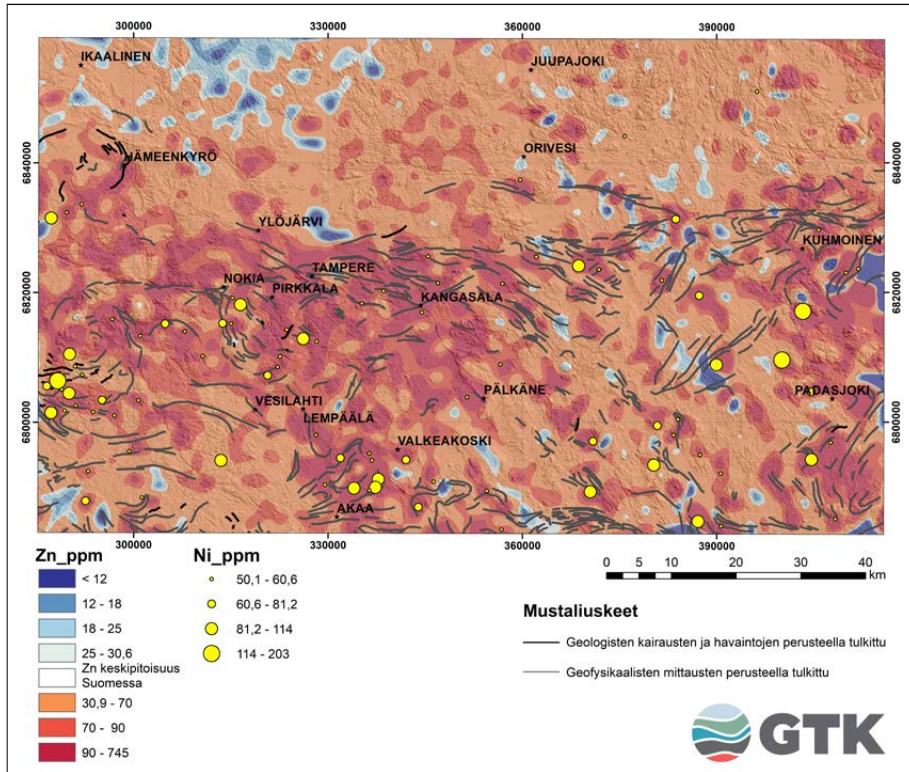
- Maankamara-karttapalvelussa (<https://gtkdata.gtk.fi/Maankamara/index.html>) on GTK:n tuottamaa maaperäaineistoa, muun muassa kartta-aineistoja eri mittakaavoissa. Palvelusta löytyy myös Suomen ympäristökeskuksen tuottamia pohjaveden sekä valuma- ja suojelualueisiin liittyviä tietoaineistoja.
- Maaperän laatuun ja rakenteeseen liittyvää tietoa on Pohjatutkimukset -karttapalvelussa (<https://gtkdata.gtk.fi/Pohjatutkimukset/index.html>).
- Happamien sulfaattimaiden sijainti- ja ominaisuustietoja: <https://www.gtk.fi/palvelut/aineistot-ja-verkkopalvelut/>.

- Tietoja maaperän luontaisista taustapitoisuuksista on koottu GTK:n Tapir-karttapalveluun <https://gtkdata.gtk.fi/tapir/index.html>.
 - Koko Suomen kattava alueellinen moreenigeokemian aineisto on tuotteistettu ja ladattavissa GTK:n paikkatietopalvelusta (<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>). Tässä aineistossa näytteenottosyvyys on ollut 1,5–2,0 metriä.
 - Alueellisen aineiston lisäksi paikkatietopalvelusta voi ladata GTK:n ja Outokumpu Oyj:n (OKU) kohteellista moreenigeokemian tietoaineistoa. Kemialliset analyysitulokset voi ostaa GTK:sta (sähköposti: geodata@gtk.fi).
 - GTK:n LÄHDE-karttapalvelussa (https://lahde.gtk.fi/?page_id=543) on tietoa pohjavesialueista, pohjaveden laadusta ja pohjavesialueiden herkkyydestä. Palvelussa on myös Suomen ympäristökeskuksen tuottamaa pohjavesiaineistoa.
 - Suomen ympäristökeskuksen karttapalvelusta löytyy pintavesien laatutietoja.
- Esimerkkejä eri tietokantojen yhdistämisestä mustaliuskeiden ympäristötutkimusten tarpeisiin näytetään kuvissa 16–19.

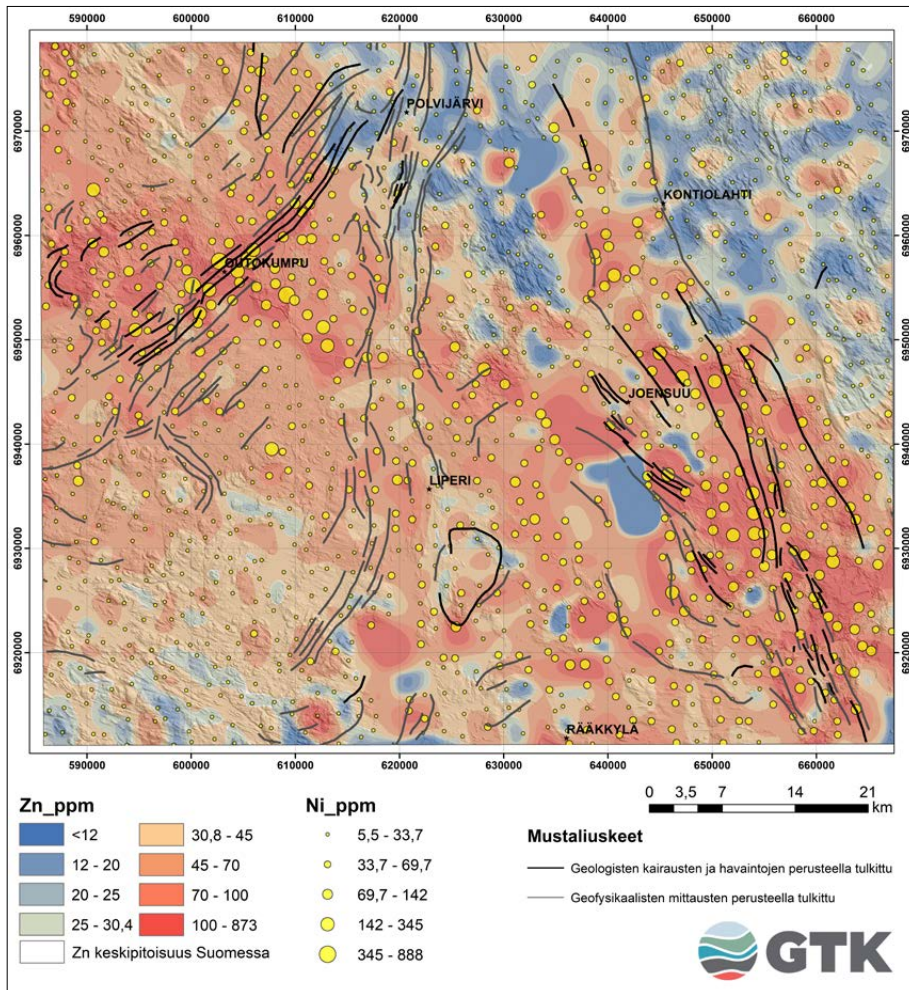


Kuva 16. Kartassa on esitetty Geologian tutkimuskeskuksen syväkairausaineistosta poimitut aineistot, joissa kivilaji on mustaliuske, muodostuman paksuus on yli kolme metriä ja se on havaittu alle kymmenen metrin syvyydestä, jolloin ympäristöriski on suurempi kuin silloin, jos mustaliuskeita esiintyy syvällä kallioperässä. Kallioperän syväkairauksien perustietoa, kuten paikka- ja kivilajitietoa, sisältävä tuote on maksutta ladattavissa Geologian tutkimuskeskuksen paikkatietopalvelusta <https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>.

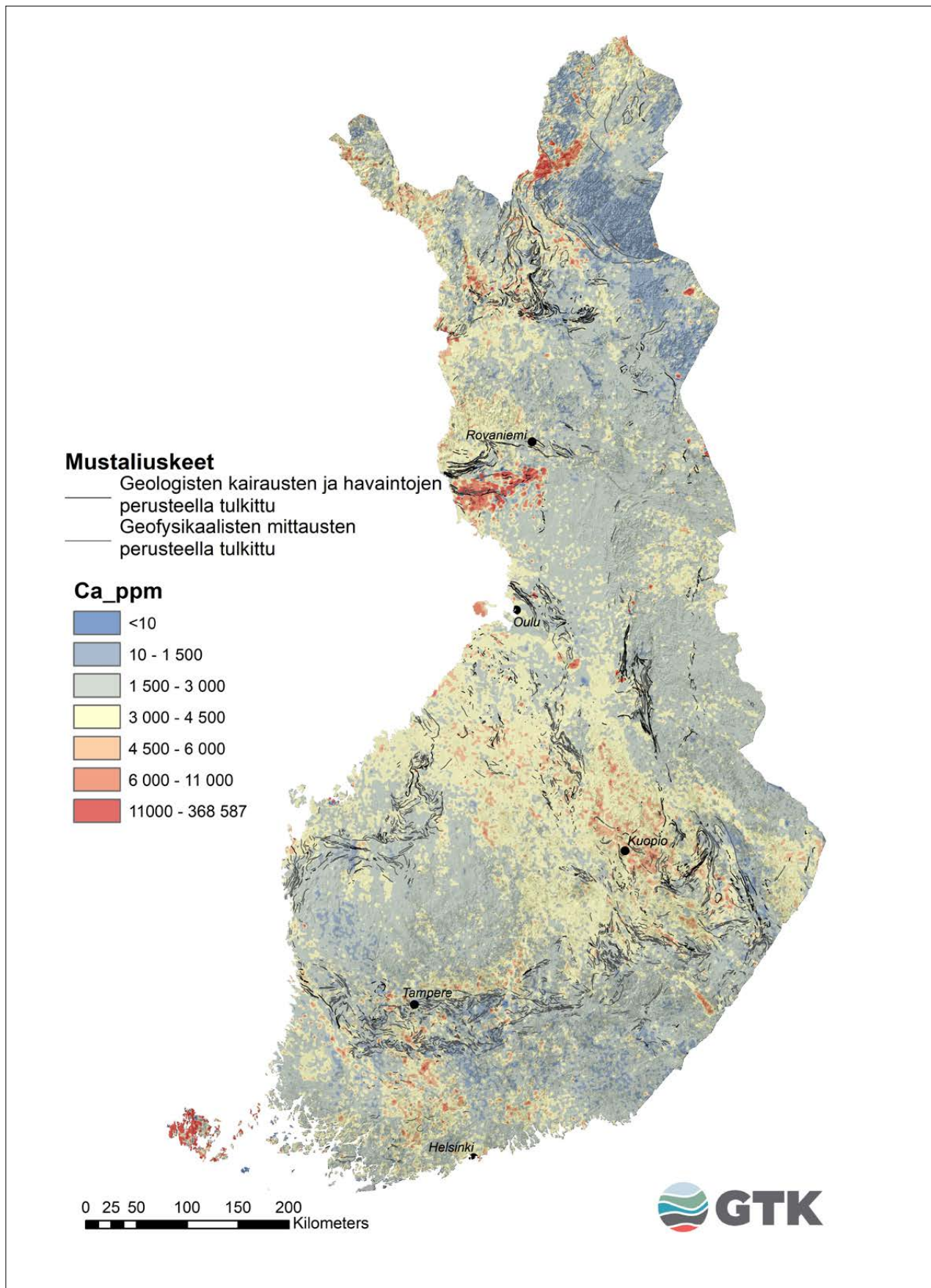
Kuva 17a.



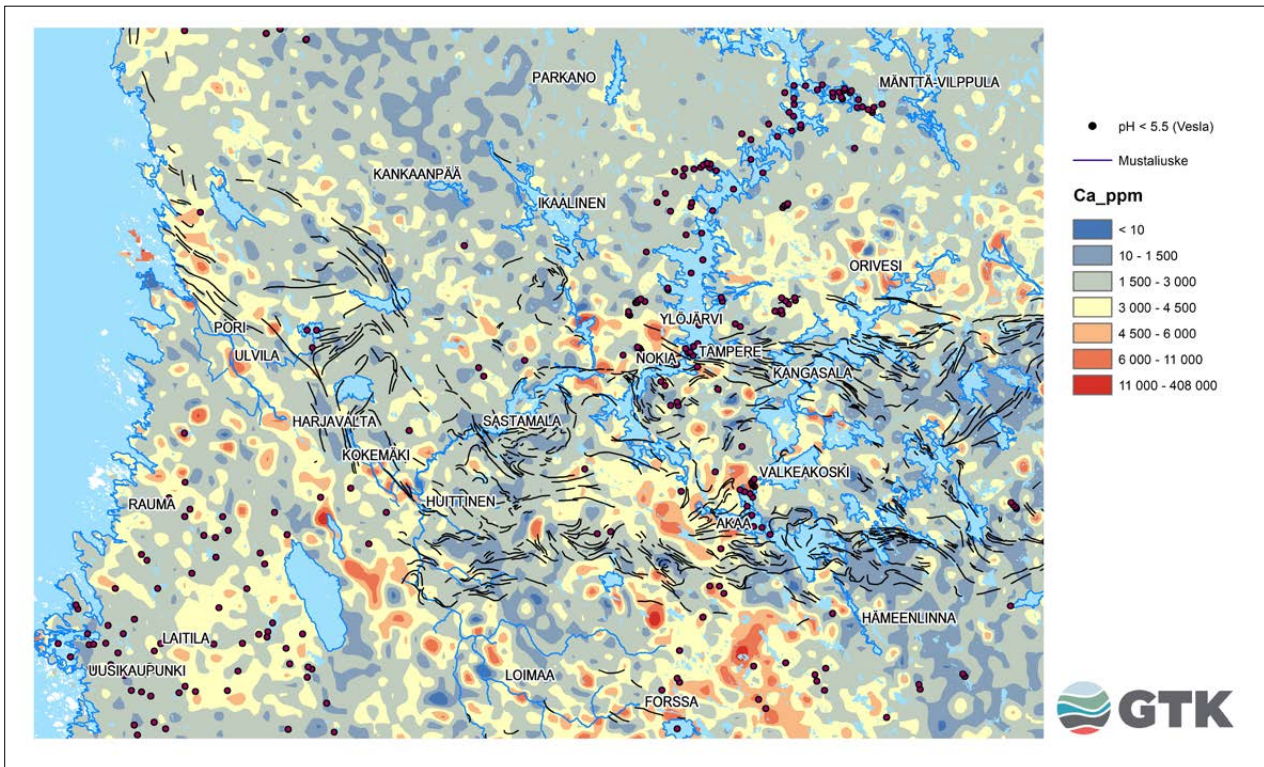
Kuva 17b.



Kuva 17. Moreenin hienoaineksen sinkkipitoisuus on esitetty väripintoina ja nikkelpitoisuudet keltaisina palloina. Mustaliuskeiden esiintyminen on kuvattu mustilla ja harmailla viivoilla. a) Tampereen alue, b) Joensuun alue. Nikkelpitoisuus on keskimäärin suurempi Joensuun alueella, mikä johtuu kallioperästä.



Kuva 18. Moreenin hienoaineksen kalsiumpitoisuus ja mustaliuskeiden esiintyminen. Mikäli moreenin hienoaineksessa on keskimääräistä enemmän kalsiumia, se voi lisätä vesistöjen kantokykyä rikkiyhdisteiden rapautumisen aiheuttamalle happamoitumiselle. Kuvassa 17 on esitetty Tampereen ja Joensuun ympäristöt, joiden kallioperässä on keskimääräistä vähemmän kalsiumpitoisia mineraaleja.



Kuva 19. Esimerkki Suomen ympäristökeskuksen ja GTK:n tietoaineistojen yhdistämisestä. Syke:n VESLA-tietokannasta on poimittu pintavedet, joissa veden pH on alle 5,5. Pohjakarttana on GTK:n tietoaineistoista moreenin hienoaineuksen kalsiumpitoisuus, joka kuvaa alueen geologista puskurikykyä happamoitumista vastaan. Mustaliuskeiden esiintyminen on kuvattu viivoilla. Kartasta näkee, että mustaliuskeet eivät ole ainoa pintavesien happamoitumista aiheuttava tekijä. Säskylän Pyhäjärven ja Harjavallan länsipuolella happamoituminen johtuu suureksi osaksi happamista sulfaattimaista (Autiola ym. 2022). Valkeakoskella ja Mäntässä teollisuus on ollut yksi tekijöistä. Myös suo- ja metsäojitukset voivat vaikuttaa pintavesien pH-arvoon.

6.3 Näytteenotto ja kemiallinen analysointi

Maankäytön riskiä mustaliuskealueella voi arvioida sekä vesi- että maaperänäytteenoton avulla. Vesinäytteenoton perusteella ongelman lähteen paikantaminen voi olla vaikeaa, ja näytteenoton oikea ajoitus suhteessa vuodenaikaan ja sääolosuhteisiin on tärkeää. Happamoituminen ja haitallisten aineiden kulkeutuminen liittyvät tyypillisesti pidempiä kuivia ajanjaksoja seuranneisiin sateisiin ja valuntoihin. Kuormitus voi näkyä erityisesti ojituskohdeilla vasta vuosien viiveellä. Kasoihin läjitetyistä maamassoista happamuuden muodostuminen sen sijaan voi olla nopeampaa.

Vesinäytteenotossa voidaan jo maastossa arvioida pH-mittausten ja sähkönjohtavuuden perusteella mustaliuskeiden vaikutusta (Visuri ym. 2021, Autiola ym. 2022). Keskimääräistä alempi pH (< 4,5) yhdistettynä suureen sähkönjohtavuuteen (> 20 mS/m) on tyypillinen sulfidiperäisen happamoitumisen indikaattori. Myös sulfaattipitoisuus korreloi pH-arvon ja sähkönjohtavuuden kanssa

siten, että mitä alempi pH ja suurempi sähkönjohtavuus vesinäytteessä on, sitä enemmän siinä on sulfaattia. Sulfaattipitoisuuden mittausta varten on kehitetty myös spektrofotometrisiä maastokäyttöisiä analysointilaitteita.

Maaperänäytteenottoon mustaliuskekohteilla vaikuttavat maaperän laatu ja maankäytön tapa. Esimerkiksi moreenimaille sijoittuvalla ojituskohdeella näytepisteitä tarvitaan suhteellisen monta, mutta näytteenottoa ei ole tarvetta ulottaa syvälle. Harjuaines-, moreenimuodostuma- tai rakennuskohdeilla näytepisteiden määrä voi olla pienempi, mutta näytteenotto voidaan joutua ulottamaan syvemmälle, mikäli pohjaveden pinnan taso on syvällä tai rakennus- ja muokkaustoimet ulottuvat syvemmälle.

Mustaliuskealueiden näytteiden hapontuottopotentiaalin tunnistamiseen ja riskinarvioon voidaan käyttää samoja menetelmiä kuin happamilla sulfaattimailla (Visuri ym. 2021, Autiola ym. 2021).

Tärkeimmät tunnistusmenetelmät perustuvat näytteiden hapettamiseen (inkubaatio) ja pH-mittauksiin sekä rikkipitoisuuden kemialliseen analysointiin. Näytteiden hapontuottoa ja hapontuoton riskiä voidaan arvioida asiditeetti-määrittelyn perusteella. Analysoinnissa voidaan soveltaa sekä

pikamenetelmiä, joilla tulokset saadaan päivissä, että hitaaseen inkubaatioon perustuvia menetelmiä, jolloin analysointi kestää jopa 19 viikkoa. Inkubaatioon perustuvat menetelmät on todettu pikamenetelmiä luotettavammiksi.

6.4 Ympäristöriskien arviointi ja riskinhallinta

Tutkimustemme perusteella Itä- ja Pohjois-Suomen iältään arkeisen kallioperän alueella grafiittia ja sulfideja sisältävät kerrokset ovat keskimäärin kapeampia kuin proterotsooisen kallioperän alueella ja myös niiden hiili- ja rikkipitoisuudet ovat keskimäärin pienempiä. Sen vuoksi arkeiset mustaliuskeet eivät aiheuta ympäristöriskejä paitsi sijaitessaan lähellä runsaasti sulfideja sisältäviä metavulkaniitteja, mineralisaatioita tai malmiesiintymiä. Proterotsooisen kallioperän alueella kiilleliuskeiden välikerroksina esiintyvät alle kolmen metrin paksuiset mustaliuskekerrokset eivät myöskään aiheuta merkittävää ympäristöriskiä.

Ympäristöriskit liittyvät Suomessa vulkaanisten eli tulivuoriperäisten kivien ja sulfidimineralisaatioiden yhteydessä esiintyviin mustaliuskeisiin sekä yli kolme metriä paksuihin ja runsaasti rikkiä sisältäviin mustaliuskeisiin iältään proterotsooisen kallioperän alueella. Lisäksi riskiin vaikuttaa se, miten lähellä maanpintaa mustaliuske sijaitsee, onko sitä jauhautuneena tai lohkaraina maaperässä, pääsevätkö pintavedet huuhtelemaan rikkipitoista ainesta ja mikä on vastaanottavan vesistön tila.

Geologian tutkimuskeskuksen mustaliusketietokantaan sisältyvien 319 näytteen kokonaisrikkipitoisuus on vähintään 1 %, koska tätä pienempiä rikkipitoisuuksia sisältäviä esiintymiä ei otettu mukaan tietokantaan. Näytteiden rikkipitoisuuden mediaaniarvo on 4,7 % ja suurin havaittu rikkipitoisuus 32,9 % (Loukola-Ruskeeniemi ym. 2023).

Mustaliuskeet voidaan rinnastaa ympäristövaikutuksiltaan happamiin sulfaattimaihin (HaSu), sillä niiden vaikutusmekanismi on samanlainen. Happamien sulfaattimaiden kansallisessa oppaassa rakennushankkeisiin (Autiola ym. 2022) maa-aineksen rikkipitoisuuden todettiin ennustavan melko hyvin hapontuottopotentiaalia, ja muodostuva happomäärä korreloi liukenevien haitallisten aineiden määrän kanssa. Kallioperän mustaliuskeista rapautuneen ja mahdollisesti jäätikön kuljettaman aineksen raekoko on happamia sulfaattimaita karkeampi, eikä maa-aines ole levinyt yhtä laajalle alueelle kuin happa-

mat sulfaattimaat. Hienorakeiselle materiaalille (raekoko $\leq 0,06$ mm, eli geoteknisen luokituksen siltille ja sitä hienompirakeisille materiaaleille) > 1 % kokonaisrikkipitoisuuden arvioidaan aiheuttavan merkitykseltään suuria ympäristövaikutuksia. Karkearakeisemmalle materiaalille (raekoko $> 0,06$ mm, eli geoteknisen luokituksen mukaisesti hiekalle ja sitä karkearakeisemmille materiaaleille) kohtalaisen merkittävyyden ympäristövaikutuksia arvioidaan syntyvän, kun kokonaisrikkipitoisuus ylittää 0,03 %. Tunnistus-hankkeen loppuraportin mukaan (Visuri ym. 2021) HaSu-materiaalin happamuusriskin arvioinnissa tulee huomioida eri maalaajien vaikutus rikkipitoisuuden ja puskurointikyvyn vaihteluihin. Karkeiden maalajien puskurointikyky on alhainen ja niissä suotautuvan veden virtaus on nopeaa, jolloin niistä liukeneva rikki voi aiheuttaa "happamuspulseja". Syntyvän rikkihapon määrään ja ympäristövaikutusten laajuuteen voivat vaikuttaa myös seuraavat seikat: 1) kaikki rikkiä sisältävät mineraalit eivät liukene samanaikaisesti vaan pitkän ajan kuluessa, 2) maa-aineksessa oleva orgaaninen aines puskuroi pH:ta, sekä 3) ympäristön mineraaliaineksessa on neutraloivia alkuaaineita, kuten kalsiumia. Mustaliusketietokannan näytteissä kalsiumin mediaanipitoisuus on 1,6 %. Näin pieni kalsiumpitoisuus ei yksin riitä neutraloimaan mustaliuskeen rikkipitoisuutta.

Valtioneuvoston asetuksessa kaivannaisjätteistä (190/2013) kuvataan liitteessä 1 kaivannaisjätteen luokittelu pysyväksi jätteeksi. Kaivannaisjäte katsotaan pysyväksi, jos sen sulfidirikkipitoisuus on 1) enintään 0,1 % tai 2) enintään 1 % ja neutralointipotentiaalisuhde on suurempi kuin kolme (määriteltynä neutralointipotentiaalinen ja hapontuottopotentiaalinen välisenä suhteena testimenetelmän EN 15875 staattisen testin perusteella). Jäätikön kulutuksen aiheuttaman eroosion mukana kulkeutunut mustaliuskeaines on sekoittunut muiden ympäröivän alueen kivilajien mineraaliainekseen, eikä se esiinny yksinään, kuten esimerkiksi louhinnan tai kaivostoiminnan sivukivet tai rikastushiekat. Tutkimusten perusteella voi arvioida, että

vasta yli 1 % rikkiä sisältävät ja yli kolme metriä paksut mustaliuskemuodostumat, jotka sijaitsevat maanpinnan lähellä, aiheuttavat Suomessa merkittäviä ympäristöriskejä (Loukola-Ruskeeniemi ym. 1998, Gustavsson ym. 2012, Parviainen & Loukola-Ruskeeniemi 2019).

Mustaliuskeiden aiheuttama ympäristöriski voidaan tunnistaa taulukossa 2 esitetyn kaavion mukaisesti. Ympäristöriskillä tarkoitetaan tässä kallioperän ja maa-aineksen rikkipitoisuudesta mahdollisesti syntyvän rikkihapon happamoitavia ja syövyttäviä vaikutuksia sekä rikkihapon vaikutuksesta kallioperästä sekä maa-aineksesta liukenevien aineiden haitallisia vaikutuksia eri ympäristönosissa.

Ympäristöriskin tunnistaminen aloitetaan paikantamalla mahdollisen riskikohteen sijainti geologisen kartan perusteella joko arkeisella tai

proterotsooisella kallioperäalueella. Nimet viittaavat ajanjaksoihin, jolloin kallioperä on syntynyt. Arkeisella kallioperäalueella (kuva 2) mustaliuskeista aiheutuva ympäristöriski on epätodennäköinen. Sen sijaan sulfidimalmien ja mineralisaatioiden lähellä voi olla suuria pitoisuuksia.

Jos kohde sijaitsee proterotsooisella kallioperän alueella (kuva 2), tutkitaan mustaliuskejakson paksuutta ja sen rikkipitoisuutta (paino-%) tarkemmin. Jos mustaliuskekerrosten paksuus on alle kolme metriä, riskiä ei ole tai se on todennäköisesti pieni. Mikäli mustaliusketta on yli kolmen metrin kerros lähellä maanpintaa, riskejä ympäristölle voi muodostua kallioperässä, moreenissa tai harjun sorassa ja hiekassa olevasta runsaasti rikkiä sisältävästä aineksesta erityisesti ihmistoiminnan vaikutuksesta.

Taulukko 2. Mustaliuskeiden esiintymisestä aiheutuvien ympäristöriskien tunnistuskaavio.

Kallioperä	Arkeinen	Ei riskiä	
	Proterotsooinen	Mustaliuskejakson paksuus kallioperässä < 3 metriä tai rikkipitoisuus < 1 %	Ei riskiä
	Mustaliuskejakson paksuus kallioperässä ≥ 3 metriä ja rikkipitoisuus ≥ 1 %	Mahdollinen riski	Kallioperän louhinta Moreenimaan kaivaminen Harjut ja reuna- muodostumat

Mustaliuskepitoisesta maa-aineksesta voi kulkeutua rikkiä ja haitallisia aineita ympäristöön. Taulukossa 3 on eritelty luontaisia kulkeutumista ja altistumisreittejä ihmisille.

Taulukko 3. Luontainen rikin ja haitallisten aineiden kulkeutuminen mustaliuskealueilla.

Rikin ja haitallisten aineiden lähde	Luontaiset kulkeutumismekanismit	Sekundäärinen aines	Altistumisreitti (ihmiset)	Altistumisen todennäköisyys
Kallioperä	Pohjavesi	Juomavesi, keittiöpuutarhat	Nieleminen, ihoaltistus	Todennäköinen
	Pintavesi ja sedimentit (jos kallioperä on paljastuneena)	Vesiekosysteemi (kalat, ravut)	Nieleminen, ihoaltistus	Mahdollinen
Moreenimaa	Pohjavesi	Juomavesi, keittiöpuutarhat	Nieleminen, ihoaltistus	Todennäköinen
	Pintavesi (jos maa on paljastunut)	Vesiekosysteemi (kalat, ravut)	Nieleminen, ihoaltistus	Mahdollinen
	Kasvien ravinteiden otto	Viljakasvit, muut syötävät kasvit	Nieleminen	Pieni
Harjut ja reunamuodostumat	Pohjavesi	Juomavesi, keittiöpuutarhat	Nieleminen, ihoaltistus	Todennäköinen
	Pintavesi	Vesiekosysteemi (kalat, ravut)	Nieleminen, ihoaltistus (uiminen)	Mahdollinen
	Kasvien ravinteiden otto	Viljakasvit, muut syötävät kasvit	Nieleminen	Pieni
	Tuulieroosio (jos maa-aines on paljastunut)	Pöly	Hengittäminen, pölyntyneiden kasvien syöminen	Pieni

Kallioperästä voi kulkeutua rikkiä ja haitallisia aineita ympäristöön, jos mustaliusketta sisältävä kallio joutuu kosketuksiin ilman ja veden kanssa esimerkiksi kalliopaljastumilla, tieleikkauksissa tai pohjaveden virratessa kallioperän raoissa ja murrenvyöhykkeissä.

Pohjavesi voi kuljettaa haitallisia aineita juomavesikaivoihin. Haitallisia aineita voi joutua myös kasteluvedessä keittiöpuutarhoihin. Tämä reitti on tutkitusti todennäköinen alueilla, joilla juomavesikaivoja on sijoitettu mustaliuskepitoiseen kallioperään tai maaperään. Myös uudessa voi altistua pintaveden sisältämille haitta-aineille ihon tai veden nielemisen kautta.

Pintavesi voi huuhtoa haitallisia aineita kallion pinnasta ja kuljettaa niitä vesistöihin, joissa ne voivat kerrostua purojen ja järvien pohjaan. Tällöin myös vesiekosysteemi voi altistua ja kerryttää näitä aineita, ja niitä voi päätyä ihmisiin kalastuksen tai ravustuksen kautta (esim. Loukola–Ruskeeniemi ym. 2003).

Moreenimaassa voi olla jäätikön kuljettamaa ja kerrostamaa mustaliuskepitoista mineraaliainesta etenkin alueilla, jotka sijaitsevat kallioperän musta-

liuskejaksosta jäätikön virtaussuunnassa “alavirtaan” eli usein kaakkoon päin (kuva 10). Moreenista voi kulkeutua haitallisia aineita pohja- ja pintaveden mukana juomavesikaivoihin ja kasteluveden mukana puutarhoihin, jolloin altistuminen on mahdollista nielemisen ja ihokosketuksen kautta.

Kasveihin ja sieniin voi päätyä juurien kautta haitallisia aineita, ja ne voivat siirtyä ruokakasvien ja -sienien kautta ihmiseen. Tämä kulkeutumisreitti arvioidaan kuitenkin vähäiseksi mustaliuskealueilla (Kousa ym. 2021).

Harjut ja reunamuodostumat, kuten Salpausselät, voivat sisältää mustaliuskeainesta. Harjuissa ja reunamuodostumissa mustaliuskepitoinen aines voi sijaita myös syvemmillä harjun sisällä, jolloin se ei hapetu yhtä herkästi. Samoin kuin kallioperästä ja moreenista myös harjuista ja reunamuodostumista voi kulkeutua rikkiä ja haitallisia aineita pohja- ja pintavesien mukana juomavesikaivoihin, yksityiskaivoista otetun kasteluveden mukana keittiöpuutarhoihin sekä vesistöihin. Harjujen ja reunamuodostumien yhteydessä esiintyvät suppakuopat ovat paikoin uimakäytössä, ja niissä voi altistua haitta-aineille ihoaltistuksen tai nielemi-

sen kautta, jos mustaliuskeita tai muita runsaasti rikkiä ja/tai haitallisia aineita sisältävä mineraali-aines on vaikuttanut veden laatuun.

Harjut ja reunamuodostumat ovat pinnanmuodoiltaan paikoin jyrkkiä. Sen vuoksi tuulieroosio

on mahdollinen, jos esimerkiksi myrskyn seurauksena kaatuneiden puiden ala jää paljaaksi rinteessä. Tällöin haitallisia aineita sisältävää pölyä voi kulkeutua syötäviin kasveihin tai pölylle voi altistua hengityksen kautta.

Taulukko 4. Ihmistoiminnasta aiheutuvat rikin ja haitallisten aineiden lähteet.

Rikin ja haitallisten aineiden lähde	Ihmistoiminta	Kulkeutumismekanismit	Suositus altistumisen ehkäisemiseksi	Altistumisen todennäköisyys
Kallioperä	Tie- ja ratalinjausten kallioleikkaukset	Pintavesi, rankkasateet	Aluesuunnittelu	Todennäköinen
	Metsänhoitotoimenpiteet, turpeenotto	Pöly, pintavesi	Turvetuotannon lupaprosessit, ojitussyvyys	Pieni
	Maatyöt rakennuskohteilla	Pöly, pintavesi	Pölyämisen esto, pintavesien käsittelykohteella	Pieni *
	Maa- ja kiviainesten otto	Pöly, pintavesi	Kalliota ei tule paljastaa	Mahdollinen*
Moreenimaa	Tie- ja ratalinjausten kallioleikkaukset	Pintavesi, rankkasateet	Aluesuunnittelu	Mahdollinen
	Metsänhoito Turpeenotto	Pintavesi (ojitus, maan muokkaus)	Puskurivyöhykkeet vesistöjen vieressä, lupaprosessit, ojitussyvyys	Mahdollinen
	Maatyöt rakennuskohteilla	Pöly, pintavesi	Pölyämisen esto, pintavesien käsittelykohteella	Mahdollinen*
	Maatalous	Pintavesi (pelto- ojitus, maan muokkaus)	Puskurivyöhykkeet vesistöjen vieressä, ojitussyvyys, lupaprosessit	Mahdollinen
Harjut ja reunamuodostumat	Kunnallinen vesihuolto	Vesilaitos	Pohjavesialueen geologian selvittäminen, maankäytön suunnittelu, mustaliuskealueilla toimimisen välttäminen	Mahdollinen
	Maa- ja kiviainesten otto Maatyöt rakennuskohteilla	Pöly, pintavesi		Mahdollinen*
	Motocross-radat	Pöly, pintavesi		Mahdollinen
	Uimakuopat	Pöly, pintavesi		Mahdollinen
Turvemaat	Turpeenotto	Hapettuminen, pintavesi	Ottosyvyyden kontrollointi tuotannossa	Todennäköinen
	Metsänhoitotoimenpiteet	Pintavesi	Ojitussyvyys, lupaprosessit	Todennäköinen

* Kohteella työskentelevät tulee erityisesti huomioida.

Ihmisen toiminta voi aiheuttaa mustaliuskepitoisen kallio- tai maaperän altistumisen hapettumiselle tai saattaa ne kosketuksiin pintavesien kanssa esimerkiksi tie- ja rataleikkauksissa (taulukko 4). Ympäristövaikutusten syntymistä voidaan estää huomioimalla mustaliuskeiden sijainti suunnitteluvaiheissa.

Metsänhoidolliset toimenpiteet, kuten ojitus ja maanmuokkaus, voivat altistaa kallioperän mustaliuskeita ja maaperää rapautumiselle, jos ojitussyvytydessä ei oteta huomioon runsaasti rikkiä sisältäviä kallioita ja maaperää. Vesistöjen viereen pitäisi jättää puskurivyöhyke, eikä ohjata vesiä metsäojista suoraan vesistöihin. Näitä vaikutuksia voi ehkäistä metsänhoidon suunnittelu- ja lupaprosesseissa ottamalla alueen geologiset erityispiirteet huomioon.

Maanrakennustyöt rakennuskohteilla voivat paljastaa kallioperän mustaliuskeita ja lisätä rapautumista. Jos kalliota räjäytetään, saattaa syntyvässä pölyssä olla myös haitallisia aineita, ja työmaan alueelta niitä voi kulkeutua ympäristöön pintavesien kuljettaman hienoaineksen mukana. Tällöin pölyämisen estoa ja pintavesien käsittelyä tulisi harkita.

Kiviaineksen otto ja murskaus voivat aiheuttaa haitallisten aineiden kulkeutumista ympäristöön, jos murskattavan kiven seassa on mustaliusketta. Pääosin mustaliuskeita ei louhita vaan sitä pyritään välttämään. Jos mustaliuskejako sijaitsee kivenottoalueen läheisyydessä, tulisi mustaliuskeen sijainti selvittää ja jättää sen ympärille suojavyöhyke, ettei sitä paljasteta ja altisteta eroosiolle. Arseenin osalta on kehitetty riskinhallintaa sekä Suomessa että Keski-Euroopassa (esim. Loukola-Ruskeeniemi 2019, Parviainen ym. 2015, Loukola-Ruskeeniemi ym. 2022c). Tätä menetelmäkehitystä on mahdollista hyödyntää mustaliusketutkimuksessa.

Moreenimaan mustaliuskeaines voi altistua kallioperän tavoin hapettumiselle tie- ja rataleikkauksen kautta sekä metsänhoidollisten toimenpiteiden tai turpeenoton seurauksena. Metsä- ja suo-ojien syvyys sekä maanmuokkaustapoja tulisi tarkastella suhteessa mustaliuskepitoisen aineksen esiintymiseen. Lupaprosessien kautta voidaan vaikuttaa ympäristöriskeihin suunnittelu- ja luvitusvaiheissa. Maanrakennustyöt rakennuskohteilla voivat vaikuttaa moreenin mustaliuskepitoisen aineksen hapettumiseen samoin kuin kallioperän mustaliuskeisiin. Rakennuskohteella erityisesti kaivettujen maamassojen välivarastointiin ja loppusijoitukseen

liittyvää ympäristökuormitusta voidaan vähentää neutraloimalla tai stabiloimalla kaivetut maamassat. Ne voi myös peittää hapettumisen ja sadevesien pääsyn estämiseksi. Mahdollisen pölyämisen estäminen ja suoto- ja pintavesien käsittely voivat myös vähentää ympäristökuormitusta.

Maataloudessa tulee tarkastella ojitussyvytyttä mahdollisena ympäristön haittavaikutusten aiheuttajana, jos epäillään, että alueella on runsaasti rikkiä sisältävää maa-ainesta. Maataloudessa mustaliuskeiden ympäristövaikutukset aiheutuvat pintavesien mukana mahdollisesti kulkeutuvista haitallisista aineista.

Harjuilla ja reunamuodostumilla mustaliuskepitoinen aines voi vaikuttaa kunnalliseen vesihuoltoon. Mustaliuskeita sisältävä maa-ainesta voi vaikuttaa myös yleisellä tasolla pohjavesimuodostuman veden laatuun riippumatta esimerkiksi vedenotosta, maa-ainestenotosta tai muustakaan maankäytöstä. Harjuilla ja reunamuodostumilla sijaitsee merkittäviä pohjavesivarjoja, ja vedenpinnan vaihtelu muodostumassa voi aiheuttaa sekä mustaliuskeiden hapettumista että saada haitalliset aineet liukoiseen muotoon. Riski hapettumiselle kasvaa etenkin, jos pohjaveden pinnan taso alenee pysyvästi esimerkiksi pohjavedenoton seurauksena. Tällöin varsinkin syvälle maaperään ulottuvilla maankaivualueilla voi aiemmin vähähappisissa pohjavedellä kyllästyneissä maakerroksissa esiintyvä runsaasti rikkiä sisältävä mineraaliainesta altistaa hapettumiselle.

Maa-ainesten otto samasta muodostumasta voi aiheuttaa mustaliuskeiden hapettumista, vaikka pohjaveden pinta ei vedenoton seurauksena merkittävästi vaihtelisi. Kun on syytä epäillä mustaliuskepitoisen mineraaliaineksen esiintymistä harjussa tai reunamuodostumassa, jossa on vedenottoa, olisi pohjavesimuodostumaa tutkittava haitallisten vaikutusten välttämiseksi. Tällaisilla alueilla täytyy huomioida myös vesilain (587/2011) mukainen vesitaloushankkeiden yleinen luvantarve. Luvantarpeen synnyttävällä vaikutuksella tarkoitetaan muun ohella vesilain 3. luvun 2§:ssä ja ympäristönsuojelulain (527/2014) pohjaveden pilaamiskiellossa (YSL 17 §) mainittuja seikkoja, kuten vesistön tai pohjaveden muutosta, joka olennaisesti vähentää tärkeän tai muun vedenhankintakäyttöön soveltuvan pohjavesiesiintymän antoisuutta tai muutoin huonontaa sen käyttökelpoisuutta, muulla tavalla aiheuttaa vahinkoa tai haittaa vedenotolle tai veden käytölle talousvetenä.

Jos harju- tai reunamuodostuman alueelle rakennetaan, maatyöt rakennuskohteilla voivat aiheuttaa mustaliuskepitoisen aineksen pölyämistä ja hapettumista ja saattaa sen pintaveden kuljetettavaksi. Näitä vaikutuksia voidaan estää rakennustoimien suunnittelu- ja luvitusvaiheissa.

Harjuilla ja niihin maanoton aikana kaivetuilla sorakuopilla on paikoin motocross-ratoja. Jatkuva pintamaan kulutus estää kasvillisuuden palaamista näille alueille, ja altistaa alueen mineraaliainesta tuulen mukana kulkeutumiselle. Joskus soranottoalueet on jätetty tarkoituksellisesti syviksi, ne

ulottuvat pohjaveteen saakka, ja niillä käydään uimassa. Jos alueella esiintyy mustaliuskeita, niistä kulkeutuneille haitallisille aineille voi altistua uudessa ihokontaktin tai veden nielemisen kautta.

Turpeenotto voi edesauttaa haitallisten aineiden kulkeutumista ympäristöön, jos turvetuotantoalueen alla esiintyvä moreeni sisältää mustaliuskepitoista mineraaliainesta. Tällöin ojitussyvyydellä voidaan vaikuttaa siihen, pääseekö aines hapettumaan. Sama koskee turvemailla kasvatettavia metsiä ja niiden ojitusta.

7 SUOSITUKSIA MAANKÄYTÖN SUUNNITTELUUN RAKENTAMISHANKKEISSA, VEDENHANKINNASSA, MAA-AINESTEN OTOSSA, TURVETUOTANNOSSA SEKÄ METSÄTALOUTEEN LIITTYVISSÄ OJITUKSISSA JA MAANMUOKKAUKSESSA

7.1 Haittavaikutusten ennalta ehkäiseminen maankäytön suunnittelussa

Maankäytön suunnittelussa tulee pyrkiä välttämään sellaista maankäyttöä, joka altistaa mustaliuskekallioperää tai runsaasti mustaliuskeainesta sisältävää maaperää rapautumiselle ja hapettumiselle. Erityisesti alueellisessa kuivatuksessa sulfidipitoisen aineksen laaja-alainen hapettuminen voi aiheuttaa ympäristöriskin. Happamien (pH < 4,5) ja haitallisia aineita sisältävien vesien käsittely voi olla vaikeaa, mikäli vesiä ei saada kerättyä kokoon käsittelyä varten. Vesiä voidaan käsitellä sekä passiivisin (esim. kalkkirouhepato) että aktiivisin (esim. neutralointikaivo) menetelmin. Neutralointiaineiden annostelu tai niiden pinnoittuminen rautasakalla voivat aiheuttaa ongelmia, mikä heikentää neutraloinnin tehoa passiivisissa menetelmissä. Aktiivisissa menetelmissä haasteena voivat olla huoltotarve, ulkoisen voimanlähteen tarve sekä kustannukset.

Kaivettujen mustaliuskepitoisten massojen hallintakeinoja ovat neutralointi ja joissain tapa-

uksissa stabilointi, mikäli aineksen geotekniset ominaisuudet, kuten heikko kantavuus ja kokoonpuristumien häiriintyvyys, ovat heikkolaatuisia ja sitä silti halutaan hyödyntää rakentamisessa. Mustaliuskeaineksen neutralointi voidaan tehdä kalkilla (Autiola ym. 2022). Tarvittava kalkin määrä voidaan laskea materiaalin potentiaalisen asiditeetin perusteella (hapontuotto). Mustaliuskepitoisen maa-aineksen neutralointiin vaadittu kalkkimäärä on usein vähäinen, eikä siitä muodostu suuria kuluja. Kalkin käyttö voi kuitenkin aiheuttaa huomattavia hiilidioksidipäästöjä (tuotanto ja kuljetus), ja siten tapauskohtaisesti voi neutraloinnissa olla suositeltavaa ja mahdollista käyttää kalkin korvaavia teollisia sivuvirtamateriaaleja, joita ovat esimerkiksi tuhkat ja kuonat. Sivuvirtamateriaalien käytön turvallisuus ja luvantarve on kuitenkin varmistettava.

7.2 Haittavaikutusten hallinta metsätaloudessa

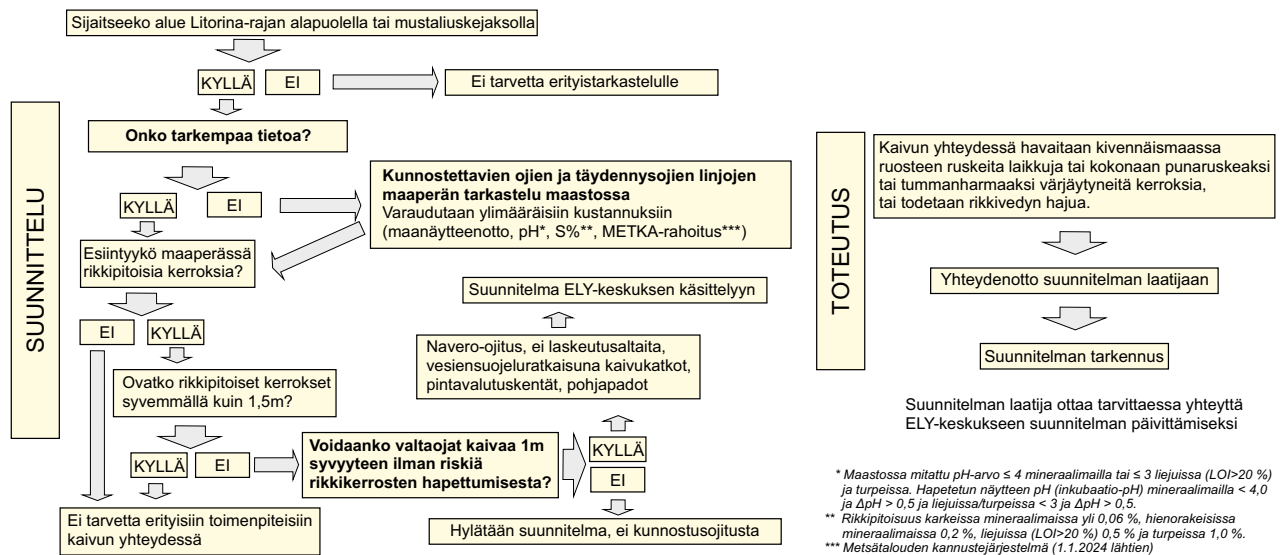
Metsätaloudesta aiheutuvien haittojen vähentämiseksi on tärkeä tunnistaa alueet, joiden kallioperässä tavataan mustaliuskeita tai muita runsaasti rikkiä sisältäviä kivilajeja. Sen vuoksi on tärkeää lisätä kattava paikkatieto mustaliuskeiden esiintymisestä metsäalan tietojärjestelmiin. Lisäksi on tarkoituksenmukaista lisätä tiedotusta ja jär-

jestää koulutusta mustaliuskeiden aiheuttamista ympäristöriskeistä.

Mustaliuskeen sisältämät sulfidimineraalit muodostavat rikkihappoa (H_2SO_4) ollessaan kosketuksissa ilman hapen kanssa ja happamoittavat siten alueelta purkautuvan valumaveden. Mustaliuskeen mineraalit sisältävät usein myös

haitallisia aineita, joiden liukeneminen valamavesiin voimistuu happamoitumisen myötä. Kaivostoimintaan liittyessään happamoitumisilmiö tunnetaan happamana kaivosvaluntana (englanniksi 'acid mine drainage'). Mustaliuskealueen tunnistaminen edellyttää kuitenkin selvityksiä, koska mustaliuskeainesta voi esiintyä moreenissa laajemmalla alueella kuin niiden tunnetut kallio-

peräsiintymät. Rikkiyhdisteiden tavanomaista runsaampaa esiintymistä metsän maaperässä voi pääsääntöisesti olla vaikea aistinvaraisesti havaita. Varovaisuusperiaatteen mukaisesti happamoitumisriski pitäisi ottaa toimenpiteiden suunnitteluvaiheessa huomioon, jos on epäilyä mustaliuskevaikutuksesta (kuva 20).



Kuva 20. Mustaliuskeiden ympäristövaikutusten arviointi metsätaloudessa. Navero-oja on matala vesiura, jonka avulla ohjataan pintavettä pois puuntaimien istutuskohdista liiallisen märkyyden poistamiseksi. Tavoitteena ei ole ohjata vesiä pois alueelta vaan muodostaa paikallisia kuivempia kohtia taimien kasvuun lähdon turvaamiseksi.

Metsien kunnostusojitus on nykyisistä metsätalousojituskäytännöistä vesistöille suurinta haittaa aiheuttava toimenpide (kuva 21). Suometsissä se lisää merkittävästi ravinne- ja kiintoainekuormitusta vesistöihin, etenkin jos ojat ulottuvat turpeen alla olevaan kivennäismaahan. Kunnostusta kaipaavaa metsäojitusverkostoa on jonkin verran myös kangasmetsissä, joissa riskit ovat suurempia, koska kivennäismaata suojaavaa turvekerrosta ei ole. Sulfidipitoisiin kerroksiin ulottuva ojien kuivatusvaikutus voi aiheuttaa maaperän ja vesistöjen

happamoitumista. Suoraan ojaluisista ja ojan pohjasta huuhtoutuvan kuormituksen lisäksi hapanta huuhtoutumaa voi muodostua laajemminkin, kun ojien syventäminen laskee vedenpintaa ojien välissä olevalla saralla ja aiempaa syvemmät maakerrokset kuivuvat ja hapettuvat. Hapettumiselle altistuvat voimakkaimmin lähinnä ojaa olevat alueet, joiden vedenpinta laskee eniten (Saarinen ym. 2013). Vedenpinnan taso on ylempänä ojasta etäännyttäessä. Tehokas kuivatusvaikutus ulottuu yleensä alle kymmenen metrin päähän ojasta (esim. Ahti 1979).



Kuva 21. Kunnostusojitus Sotkamossa. Kuva: Ismo Kyngäs, Luke.

Metsäojien kunnostuksen tarkoituksena on estää veden pinnan nouseminen niin lähelle maanpintaa, että juuristokerroksen hapenpuute ei heikennä puiden kasvua. Kansallisten metsänhoidonsuositusten (MMM 2023, <https://metsanhoidonsuosituksset.fi/fi/toimenpiteet/ojien-kunnostus>) mukaisesti toimittaessa vanhoja mataloituneita sarkaojia perataan enintään alkuperäiseen 0,8–0,9 metrin syvyyteen ja valtaojia 1,2 metrin syvyyteen. Mustaliuskealueilla riskinä on, että alkuperäiseen ojasyvyyteen kunnostettavat ojat ulottuvat aiemmin häiriintymättömiin sulfidipitoisiin kerroksiin, sillä ojitetuissa suometsissä turvekerros on kuivatuksen seurauksena painunut ja tiivistynyt.

Mikäli runsaasti rikkipitoista ainesta sisältäviä kerroksia esiintyy alle metrin syvyydessä, ainut vaihtoehto haittojen ehkäisemiseksi on jättää ojien kunnostus kokonaan tekemättä. Jos alkuperäiset ojat ulottuvat runsaasti rikkiä sisältävään kerrokseen, on niiden perkaamisesta luovuttava. Uusien

matalien täydennysojien kaivaminen voi kuitenkin olla mahdollista, jos ne eivät ulotu lähelle runsaasti rikkiä sisältäviä maakerroksia. Jos alkuperäisten ojien kunnostus arvioidaan tarkoituksenmukaiseksi, tulee suunnittelussa ottaa huomioon rikkiyhdisteitä sisältävien kerrosten esiintymissyvyys ja esiintymien sijainti, jotta voidaan välttää kaivun ja kuivatusvaikutuksen ulottuminen niihin (Nieminen ym. 2020). Ojien kunnostuksen yhteydessä toteutettavien vesiensuojelurakenteiden kaivua on harkittava tarkkaan, ettei niillä pahenneta rikkiyhdisteiden hapettumisesta aiheutuvaa vesistökuormitusta. Syvien vesiensuojelurakenteiden, kuten laskeutusaltaiden, kaivamista tulee välttää ja vesien selkeytys hoitaa esimerkiksi pintavalutuksen ja kaivukatkojen avulla (Nieminen ym. 2016). Haittoja voidaan vähentää pohja- ja putkipatorakenteiden tai kalkkirouhepatojen avulla. Myös tuhkalannoituksen tehoa haittojen torjunnassa on tutkittu (Tapio 2020). Ojien penkoille noste-

tuista runsaasti rikkiä sisältävistä kaivumassoista voi huuhtoutua sadeveden mukana happamuutta, joten maamassojen nostamista ojien välittömään läheisyyteen on vältettävä ja ne on syytä peittää esimerkiksi turpeella hapettumisen hidastamiseksi (Nieminen ym. 2016).

Ojia ei ole tarkoituksenmukaista kunnostaa tiheämmin kuin kaksi kertaa puustonkiertoaikana: ennen päätehakkuuta ja metsänuudistamisen yhteydessä. Ojien kunnostusta ei välttämättä tarvita lainkaan metsänuudistamisen aikana, jos avohakkuun sijaan poistetaan osa puustosta ja säästetään riittävä määrä haihduttavaa puustoa ylläpitämään sopivaa veden pinnan tasoa. Jatkuvapeitteiseen metsänkasvatukseen yhdistetty tuhkalannoitus parantaa puuston kasvua ja voi varmistaa riittävän haihdunnan tason (Routa & Huuskonen 2022). Kunnostusojitusten toteutus voi vähentyä, koska siihen ei enää jatkossa myönnetä valtion tukea. Suometsien ennallistaminen uudelleenvetämällä kohti alkuperäistä vähäpuustoista tilaa voi myös aiheuttaa ympäristöriskejä.

Muita mahdollisia runsaasti rikkiä sisältävien kerrosten hapettumiseen johtavia metsänhoitotoi-

menpiteitä ovat jaksolliseen kasvatukseen liittyvä päätehakkuu sekä sitä seuraava metsän uudistaminen maanmuokkauksineen. Mustaliuskekohteiden maanmuokkauksessa on suosittava mahdollisimman kevyttä menetelmää etenkin ohutturpeisilla soilla ja kangasmailla, joilla muokkaus saattaa aiheuttaa haittoja ympäröiviin vesistöihin.

Maaperän voimakas happamoituminen ja haitallisten aineiden liukeneminen voivat vesistöhaittojen lisäksi aiheuttaa kasvuhäiriöitä taimille. Taimien kasvun onkin happamilla sulfaattimailla todettu olevan maanmuokkauksen jälkeen merkittävästi hitaampaa ja taimien kuolleisuuden suurempaa kuin muussa vastaavasti muokatussa metsämaassa (Kubin 1999). Metsän uudistamisessa tulisikin kaikilla happamoitumisuhan alaisilla kohteilla suosia luontaista uudistamista ja kuusialikasvosten hyödyntämistä viljelyn sijaan (Nieminen ym. 2020). Ojitusmätästyksen turvauduttaessa on vältettävä ojien pohjamaan kasaamista istutusmätäiksi taimikuolemien ja kasvuhäiriöiden ehkäisemiseksi (Nieminen ym. 2016).

PÄÄTEHAKKUUN JA MAANMUOKKAUKSEN VAIKUTUS PURKUOJEN HUHTOUMAAN MUSTALIUSKEKOYTELLA SOTKAMOSSA

Sotkamossa tutkittiin vuosina 2008–2010 suomet-sien puunkorjuun, kantojen noston, hakkuutähteiden korjuun ja maanmuokkauksen aiheuttamia hydrologisia muutoksia ja niiden seurauksena tapahtuvaa haitallisten aineiden huuhtoutumista pienvesiin (kuva 22). Koealat sijaitsivat kahdella erilaisella kallioperällä: runsaasti rikkiä sisältävällä mustaliuskealueella sekä kvartsiitti- ja granitoidialueilla, joiden kallioperässä rikkiä on vain vähän. Turpeen rikkipitoisuus on nähtävissä kuvassa 23. Hakkuumenetelminä olivat tavanomainen hakkuu (puun rungot) ja kokopuukorjuu (rungot, kannot+ hakkuutähteet) (kuva 22a,b). Hakkuut, kantojen nosto ja hakkuutähteiden keräys toteutettiin vuonna 2009 ja maanmuokkaus vuonna 2010.

Valumavesien sinkki- kupari- ja nikkelpitoisuudet olivat mustaliuskealoilla keskimäärin suuremmat kuin vertailuna käytettyjen kvartsiittia tai granitoidia sisältävän kallioperän päällä. Erityisen korkea nikkeli- ja sinkkipitoisuus oli mustaliuskealalla ML07 (taulukko 5). Pitoisuudet nousivat Sotkamon päätehakkuualoilla toimenpiteiden jälkeen kallioperästä tai hakkuuta- vasta riippumatta, kuitenkin niin, että pitoisuus oli yleensä suurin välittömästi hakkuuta seuranneena

vuonna, mutta laski jo toisena vuonna hakkuiden jäl- keen. Maaperän rikkoutuminen ja pohjaveden pin- nan nousu hakkuutoimenpiteiden seurauksena on todennäköisesti vapauttanut aikojen kuluessa maa- perään sitoutuneita aineksia, kuten nikkeliä, kuparia ja sinkkiä. Keskimäärin pitoisuudet olivat suuremmat mustaliuskealoilla, mitä selittää kallioperän suurempi rapautumisalttius ja haitallisten aineiden pitoisuus. Kokonaiselohopean huuhtoutuminen lisääntyi hak- kuiden jälkeen, metyylielohopean erityisesti koko- puukorjuukohteilla (kuva 24). Onkin mahdollista, että useammat metsäkoneiden käyntikerrat häiritsevät maaperää ja siten edesauttavat sellaisten olosuhteiden syntymistä, joka suosii maaperään varastoituneen elo- hopean metyloitumista metyylielohopeaksi. Joidenkin aineiden, kuten raudan ja kokonaiselohopean, suhteen näyttäisi, että pitoisuuden lisäys olisi yhteydessä liu- enneen orgaanisen hiilipitoisuuden määrän kasvun kanssa.

Mustaliuskekohteet voivat olla alttiimpia haitallis- ten aineiden huuhtoumille kuin kvartsiitti- tai grani- toidikohteet. Siksi mustaliuskealueilla maaperän käsittelyä pitäisi välttää tai ainakin noudattaa varo- vaisuutta.

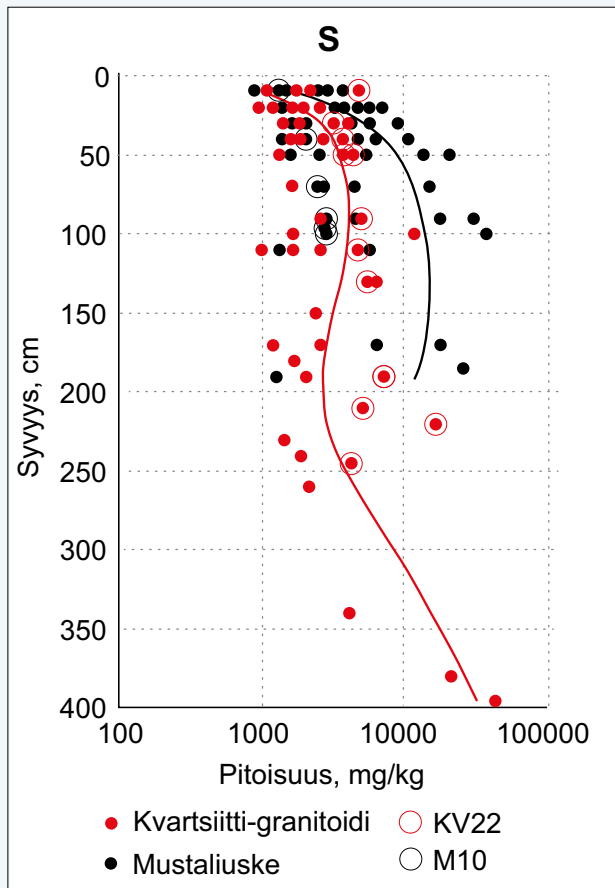


a)



b)

Kuva 22. a) Tavanomainen runkopuukorjuu (kvartsiitti-granitoidi-ala), b) kokopuukorjuu (rungot, hakkuutähteet ja kannot) (mustaliuskeala), Sotkamo. Kuvat: Liisa Ukonmaanaho, Luke.

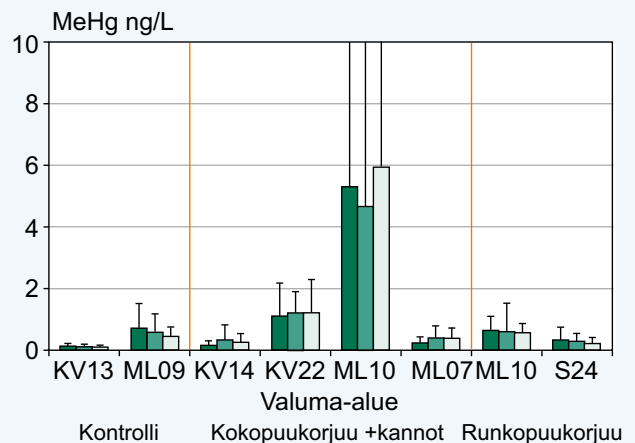
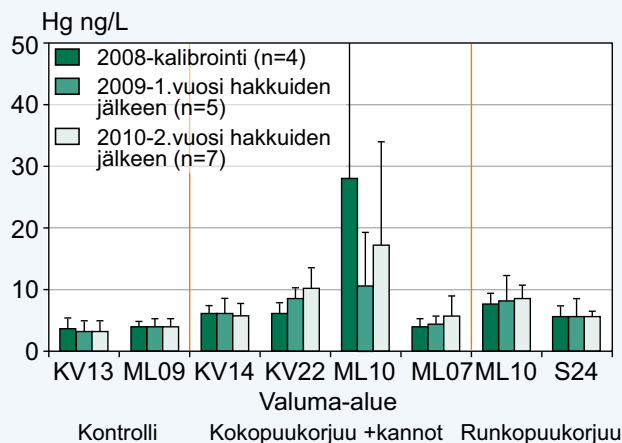


Kuva 23. Turpeen keskimääräinen rikkipitoisuus mustaliuskekohteilla ja kvartsiitti-granitoidi-kohteilla Sotkamossa v. 2008–2010. Alat KV 22 ja M10 on esitetty erikseen, koska rikkipitoisuus on keskimääräistä suurempi kvartsiitti-granitoidi-alalla KV22 ja mustaliuskealalla M10 taas keskimääräistä pienempi (muokattu Mäkilän ym. 2015 mukaan).

Taulukko 5. Valuntavesien keskimääräinen alumiini-, rauta-, sinkki-, kupari- ja nikkelpitoisuus Sotkamossa vuonna 2008–2010 eri kalliooperäalueilla (Ukonmaanaho ym. 2013).

	Al mg L ⁻¹	Fe	Zn	Cu µg L ⁻¹	Ni
Kvartsiitti- ja granitoidialat					
KV13, kontrolli	0,06	0,72	21,47	0,95	0,80
KV14*	0,10	2,58	33,51	1,16	0,98
KV22*	0,66	1,82	28,22	1,68	2,84
S24#	0,26	1,13	22,47	1,33	1,19
Mustaliuskealat					
ML09, kontrolli	0,07	0,35	20,14	0,99	1,49
ML07*	0,43	1,71	103,90	2,87	53,70
ML10*	0,16	6,14	54,73	1,40	1,63
M10#	0,38	0,79	30,08	1,69	3,11

* kokopuukorjuu + kantojen nosto # tavanomainen runkopuukorjuu



Kuva 24. Kokonais- ja metyylielohopeahuhtouma eri kalliooperäalueilla ja eri hakkuutavoilla vuosina 2008–2010. KV- ja S-alat ovat kvartsiitti-granitoidi-aloja, M- ja ML-alat mustaliuskealoja (Ukonmaanaho ym. 2013).

7.3 Pintavesien tarkkailu

Happamien sulfaattimaiden vesien tarkkailua ja käsittelyä on ohjeistettu kansallisessa HaSu-oppaassa (Autiola ym. 2022). Samoja ohjeita voidaan soveltaa maankäyttöön runsaasti rikkiä sisältävillä mustaliuskekohteilla. Vesien seuranta- ja käsittelytarve voi olla väliaikaista, kuten infrarakentamisessa, jolloin voi olla esimerkiksi tarvetta pitää maakaivantoja kuivana. Tätä pysyvämpi seuranta ja käsittelytarve voivat olla tarpeen maankäytössä, jossa pohjaveden pinnantasoa alennetaan pitkäaikaisesti esimerkiksi turvetuotantoalueella.

Vesien tarkkailussa on oleellista tunnistaa mustaliuskealueella vallitsevat pinta- ja pohjavesiolosuhteet ja mahdollisesti selvittää kohdealueen ympäristön ja vaikutusalueen tila ennen muokkauksien aloittamista. Kohdealueen nykytilan määrittämisen tarpeesta on syytä keskustella ympäristöviranomaisten kanssa (kunta/ELY).

Vesien laatua voidaan tarkkailla mustaliuskealueilla maastomittauksin, joista erityisesti veden pH ja sähkönjohtavuus voivat kertoa rikkipitoisen aineksen hapettumisesta. Happamien sulfaattimaiden vaikutusalueella pienten virtavesien pH

voi tyypillisesti laskea alle 4,5 ja sähkönjohtavuus nousta yli 20 mS/m. Myös sulfaatti- ja alumiini-, kadmium-, koboltti-, mangaani-, nikkeli- ja sinkkipitoisuudet ovat tyypillisesti keskimääräistä suurempia. Vastaava selvitys kannattaa tehdä mustaliuskealueilla.

Vesien väliaikaisessa käsittelyssä voidaan hyödyntää esimerkiksi neutralointikaivoa, jossa osa happamasta vedestä neutraloidaan selvästi emäksiseksi. Neutraloitu vesi yhdistetään loppuun neutraloimattomaan veteen, jolloin on mahdollista saavuttaa sopiva pH-taso. Vastaavaa neutralointikaivoa voidaan käyttää myös pidempiaikaiseen neutralointiin. Tällöin on kuitenkin kiinnitettävä huomiota kaivon rakenteiden korroosionkestävyyteen. Muita käsittelyvaihtoehtoja ovat kalkkirouhepadot ja suotokentät. Kalkkirouhetta käytettäessä on huomioitava, että kalkki pinnoittuu herkästi rautayhdisteillä ja menettää neutralointitehoaan. Neutralointiprosesseissa pitää huomioida haitallisten aineiden mahdollinen liikkeelle lähteminen uudelleen pH-vaihteluiden seurauksena.

8 OHJEET, SUOSITUKSET, LAINSÄÄDÄNTÖ JA ASETUKSET MAANKÄYTÖN MUUTOKSIIN MUSTALIUSKEALUEILLA

Mustaliuskeiden esiintyminen luonnossa ei ilman maankäytön muutoksia sinällään muodosta ympäristöriskiä, jos kallioiden ja maaperän kasvillisuus, turpeiden tai vesistöjen peitossa tai runsaasti rikkiä sisältävä kallioperä on pohjavedenpinnan alapuolella. Tähän oppaaseen olemme koonneet suosituksia, joilla voi ehkäistä ympäristöriskejä, mikäli mustaliuskekallioita louhitaan, mustaliuskeainesta sisältävää maaperää kaivetaan tai runsaasti rikkiä sisältävää kalliota tai maaperää muutoin paljastetaan alttiiksi rapautumiselle ja pintavesien vaikutukselle.

Maankäyttö mustaliuskealueilla voidaan rinnastaa luvanvaraisuuden suhteen happamiin sulfaattimaihin, mikäli mustaliuske sisältää yli 1 % rikkiä, on yli kolme metriä paksu ja sijaitsee lähellä maanpintaa. Seuraavassa esitetään tiivistetysti kansallisessa HaSu-oppaassa kuvattut lähtökohdat luvanvaraisuudelle (Autiola ym. 2022). Kaivettuja happamia sulfaattimaita ja mustaliuskepitoista ainesta ei sellaisenaan luokitella

pilaantuneiksi maa-aineksiksi tai jätteeksi, vaan ne ovat rinnastettavissa mihin tahansa kaivettavaan maa-ainekseen ja niiden hyötykäyttö tapahtuu lähtökohtaisesti samoja kriteerejä noudattaen. Kuitenkin happamien sulfaattimaiden ja runsaasti rikkiä sisältävien mustaliuskeiden hapontuotokyvyn vuoksi niiden käsittelystä, välivarastoinnista tai loppusijoittamisesta voi aiheutua kuormitusta ympäristöön tai vesistöön, jolloin niiden käsittely voi vaatia ympäristöluvan.

Yksi esimerkki ympäristöluvanvaraisesta maankäytöstä on turvetuotanto, jossa muun muassa arvioidaan alueen nykytila ja arvioidaan toiminnasta aiheutuvia vaikutuksia. Happamat sulfaattimaita huomioidaan yleisesti turvetuotannon lupaehdoissa. Tyypillisimmät ehdot liittyvät happamien sulfaattimaiden kartoitukseen ja vesien tarkkailuun, jossa veloitetaan seuraamaan tuotantoalueelta lähtevän veden laatua (muun muassa pH, sähkönjohtavuus ja sulfaattipitoisuus), ja tiettyjen raja-arvojen alittuessa/ylittyessä toimija

velvoitetaan sovittuihin riskinhallintatoimenpiteisiin. Vastaavaa menettelytapaa voitaisiin tapauskohtaisesti soveltaa luvanvaraiseen maankäyttöön mustaliuskealueilla.

Turvetuotantoalueilla maaperässä oleva happamuus on turvetuotannon päättyessä pääosin vielä suojaavan turvekerroksen alla (Hadzic ym. 2014, Hadzic ym. 2020). Tuotannon loppuvaiheessa suojaava turvekerros voi olla jo ohut, ja mikäli jälkikäyttö edellyttää alueen ojitusta tai kuivatusta, voi jälkikäyttö aiheuttaa merkittävämmän riskin kuin itse turvetuotanto. Siksi turvetuotantoalueiden jälkikäyttöön olisi kiinnitettävä erityistä huomiota happamilla sulfaattimailla ja mustaliuskealueilla myös mahdollisessa luvituksessa.

Nykyllä sääntö ei ota selkeästi kantaa happamien sulfaattimaiden ja mustaliuskeiden huomioimiseen rakentamishankkeissa. Jokaista toiminnanharjoittajaa ohjaa kuitenkin ympäristönsuojelulain (YSL) selvillä ovelvollisuuteen liittyvä pykälä YSL § 6. YSL:n 2 luvun yleisiin velvollisuuksiin, periaatteisiin ja kieltoihin kuuluva selvillä ovelvollisuus (6 §), jonka mukaan toiminnanharjoittajan on oltava selvillä toimintansa ympäristövaikutuksista, ympäristöriskeistä ja niiden hallinnasta sekä haitallisten vaikutusten vähentämismahdollisuuksista (selvillä ovelvollisuus). Selvillä ovelvollisuuden lisäksi on säädetty velvollisuudesta ehkäistä ja rajoittaa ympäristön pilaantumista (YSL 7 §). Mikäli toiminnasta voi aiheutua vaikutuksia, luvanvaraisuus tulee harkittavaksi. Maankäytön suunnittelua ja rakennuslupamenettelyitä ohjaa maankäyttö- ja rakennuslaki (MRL 132/1999), jossa säädetään mm. kaavoituksen vaikutusarviointista sekä ympäristön arvojen turvaamisesta. Lainsäädännössä ei ole suoraan mainittu happamia sulfaattimaita tai mustaliuskeita, mutta niiden huomioimisen voidaan katsoa sisältyvän vaikutusten arviointiin.

Ojitukset ja ojien kunnossapito

Ojituksista tehdään ojituseroilmoitus paikalliselle ELY-keskukselle. Tässä yhteydessä tarkastellaan HaSu-maihin kohdistuvien ojitusten vaikutuksia ympäristöolosuhteisiin, kuivatustason muutosta ja massanvaihtojen määrää. Hankkeen vesilain mukaisen luvan tarve arvioidaan vesilain 5 luvun 3 §:n perusteella. Sen mukaan ojituksella sekä ojan käyttämisellä ja kunnossapidolla on oltava vesilain mukainen lupaviranomaisen lupa, jos se voi aiheut-

taa ympäristönsuojelulain 5 §:n 1 momentin 2 kohdassa tarkoitettua pilaantumista vesialueella (kuten esimerkiksi happamoitumista mustaliuskeiden ollessa kyseessä) tai vesilain 3 luvun 2 §:ssä tarkoitettuja haitallisia seurauksia vesistöissä (Autiola ym. 2022). Ojituseroilmoituksia tehdään harvakseltaan rakentamishankkeissa. Tällöin on yleensä kyseessä valtaojien siirto tai uuden kaava-alueen rakentaminen. Pääsääntöisesti ojitukset liittyvät maa- ja metsätalouteen. Suosittelemme mustaliuskeiden esiintymisen selvittämistä samaan tapaan kuin happamien sulfaattimaiden osalta tehdään.

Pohjavedenpinnan alentaminen

Pitkäaikainen tai jatkuva pohjavedenpinnan alentaminen esimerkiksi alikulkujen pohjaveden alentamiskohteissa vaatii luvan vesilain 3 luvun 3 §:n 2 momentin 2 kohdan perusteella, kun pumpattavan veden määrä ylittää 250 m³/vrk. Luvan yhteydessä käsitellään myös vesien tarkkailu sekä mahdollinen vesien käsittelyn tarve. Mikäli asiaan liittyy YSL:n osia, pyydetään hakemus yhteiskäsittelyä VL 11 luku 12 §:n ja YSL 47 §:n mukaisesti. Lyhytaikainen, esimerkiksi pari viikkoa kestävä, putkilinjan suun- taporauksen vaativa kaivannon kuivanapito ei tyypillisimmin edellytä vesilupaa. Kuitenkin pohjaveden pumppaus yli 100 m³/vrk, myös tilapäisesti toteutettuna, edellyttää ilmoitusta paikalliselle ELY-keskukselle. Rakentamiselle, johon toimenpide liittyy, on edellytetty maankäyttö- ja rakennuslain ja asetuksen mukaisia rakennus-, toimenpide- tai maisematyölupia, joissa voidaan antaa määräyksiä kaivantovesien tarkkailuun ja mahdolliseen käsittelyyn liittyvistä asioista.

Tarkkailu

Kaivantovesien tarkkailusta ja pois johdettavien vesien laatuksista on määrätty kuntien ympäristönsuojelumääräyksissä sekä kuntien laatimissa työmaavesiohjeissa.

Maamassojen kaivu ja sen minimointi

Massojen kaivu ja kaivun minimointiin liittyvät geotekniset ratkaisut esitetään rakennuslupasuunnitelmissa, katusuunnitelmissa sekä väylien tien ja radan rakennussuunnitelmissa. Pohjanvahvistusmenetelmistä stabiloinnille on edellytetty ympäristölupaa, mikäli sideaineina on

käytetty jätejakeita, kuten lentotuhkaa. Ympäristölupahakemuksen käsittely on joko kunnassa tai AVI:ssa käsiteltävien massamäärien mukaan. Kun käsiteltävä massamäärä on < 50 000 t/v, käsitelijänä on kunta.

Myös maa-ainestenottoa koskee luvanvaraisuus (MAL 555/1981, 4 §). Maa-ainelain 3 §:n mukaan maa-aineksia ei saa ottaa niin, että siitä saattaa aiheutua tärkeän tai muun vedenhankintaan soveltuvan pohjavesialueen veden laadun tai antoisuuden vaarantuminen, jollei siihen ole saatu vesilain mukaista lupaa (VL 587/2011, VL 3 luku 3 §). Mustaliuskealueelle suunniteltu maa-ainestenotto saattaa siis vaatia myös vesitalouslupan, mikäli maa-ainestenotto toiminnalla voi olla vaikutuksia pohjaveden laatuun.

Väliavarastointi

Massojen väliavarastointi työmaa-alueella ei vaadi työmaan muista luvista poikkeavia lupia, jos väliavarastointi on lyhytaikaista. Jos varastointi jatkuu yli kolme vuotta, tulkitaan tilanne (Autiola ym. 2022) jo pysyväksi jätteenkäsittelylaitoksen muodostumiseksi, joka edellyttää ympäristölupaa ja YVA-menettelyä.

Massojen käsittely

Massojen käsittelyllä tarkoitetaan HaSu-maiden ja mustaliuskeiden yhteydessä massojen neutralointia, joka tehdään kalkkituotteilla. Kalkituksen tarkoituksena on muuttaa aineksen kemiallisia ominaisuuksia siten, että materiaalin ympäristölle ja terveydelle aiheutuvat haitat vähenevät. Ympäristöministeriön muistion 3.7.2015 mukaisesti pelkkää kalkitsemista muilla kuin jätteeksi luokitetuilla materiaaleilla ei kuitenkaan pidetä muuntamistoimena. Mikäli neutralointiin käytetään jätteeksi luokiteltuja materiaaleja, kuten lentotuhkaa, on ympäristölupakäsittely toistaiseksi vielä tarpeen.

Loppusijoittaminen

Kaivettujen happamien sulfaattimaiden ja mustaliuskeiden loppusijoittamisen vaihtoehtoja ovat

- hyödyntäminen täyttömateriaalina maisema- ja meluvallirakenteissa tai peltomassana
- loppusijoittaminen maankaatopaikalle.

Turvallinen sijoittaminen edellyttää joko neutralointia tai suojarakenteita, joilla estetään hapettuminen ja rapautuminen. Lisäksi tarkkailu ja tarkoituksenmukainen suunnittelu ovat useimmiten tarpeen. Näin ollen HaSu-maiden ja runsaasti rikkiä sisältävien mustaliuskemateriaalien hyödyntäminen maisema- ja meluvallirakenteissa edellyttää ympäristölupaa. Pellonparannuksen yhteydessä hyötykäyttö vaatii tapauskohtaista harkintaa luvanvaraisuudesta erityisesti, jos massamäärät ovat suuria. Sijoittaminen maankaatopaikalle toteutetaan maankaatopaikan ympäristöluvan ehtojen mukaisesti.

Pysyvän vesipinnan alapuolelle sijoittaminen

HaSu-maiden ja mustaliuskeiden hyötykäyttö täyttömateriaalina on mahdollista pysyvän pohjaveden pinnan alapuolella. Tällaisia hyötykäyttöalueita voivat olla vanhat maa-aines- ja kalliolouhinta-alueet sekä merestä tai järvestä pengertämällä eristetyt altaat. Vesistöön pengerrettyjen altaiden rakentaminen edellyttää vesilupaa, jonka yhteydessä luvitetaan myös altaan täyttömateriaalit. Alueen jatkokäyttö esimerkiksi kenttäalueena tulee perustua suunnitelmiin. Jatkokäytön tapa sanelee myös täytöissä hyödynnettävän materiaalin teknisen laadun ja keinot sen saavuttamiseksi. Pohjaveden pinnan alapuoliseen täyttöön sopivat ensisijaisesti hapettumattomat sulfidipitoiset massat ja lisäksi veden pinnan alapuolisten olosuhteiden tulisi olla vakaat ja vähähappiset.

Taulukkoon 6 on koottu ohjeita, suosituksia, lakeja ja asetuksia.

Taulukko 6. Ohjeita, suosituksia, lakeja ja asetuksia.

Ohje tai suositus	Sisältö	Linkki
Happamien sulfaattimaiden kansallinen opas rakennushankkeisiin: Opas sulfaattimaiden huomioimiseen ja vaikutusten hallintaan	Opas tarjoaa suosituksia HaSu-maiden kartoitukseen sekä haitallisten vaikutusten ennaltaehkäisyyn ja hallintaan rakentamisessa ja maankäytön suunnittelussa. Oppaan tavoite on yhtenäistää tunnistamiseen käytettäviä tutkimusmenetelmiä ja kriteereitä sekä esittää tapoja luotettavan aineiston kokoamiseksi, jotta rakennushankkeissa voidaan valita kuhunkin hankkeeseen soveltuvia ennaltaehkäisy- ja riskinhallintakeinoja. Oppaassa on esitetty työkalu vaikutusten merkittävyyden arviointiin.	https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163782
Kaivetut maa-ainekset. Jäteluonne- ja käsittely. Ympäristöministeriön muistio 3.7.2015	Muistion tarkoitus on selkeyttää maa-aineksiin ja maa-ainesjätteisiin liittyvien lakien tulkintoja: jätelaki 646/2011 siten kuin se on viimeksi muutettu lailla 528/2014 ja ympäristönsuojelulaki 527/2014 siten kuin se on viimeksi muutettu lailla 423/2015. Muistio on tarkoitettu ensisijaisesti viranomaisille, mutta se soveltuu myös maa-ainesalan muille toimijoille maa-ainesten jäteluonteen sekä hyödyntämiskelpoisuuden arvioimisen avuksi.	https://ym.fi/documents/1410903/38439968/YM_Maa-ainemuistio_FINAL_03072015-5E488047_B25B_45E4_AAE2_6495FBB53B5B-110447.pdf
Pilaantuneen maa-alueen riskinarviointi ja kestävä riskinhallinta	Ohje selostaa valtioneuvoston asetuksen 214/2007 mukaista maa-alueen pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arviointia ja korvaa aiheesta aiemmin annetun ohjeen (Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2007). Ohjetta voidaan soveltaa myös muissa tarkoituksissa, joissa haitallisten aineiden aiheuttamia riskejä tai ympäristön pilaantumista on arvioitava. Ohjeessa käsitellään riskinarvioinnin tavoitteita, toteutusta ja dokumentointia sekä kestävä riskinhallinnan arviointia ja periaatteita. Lisäksi ohjeessa annetaan näitä koskevia yleisiä suosituksia.	https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/136564
Maastokäyttöisten tunnistusmenetelmien kehittämisen happamille sulfaattimaille. Tunnistus-hankkeen loppuraportti	Tunnistus-hankkeessa kehitettiin aiempaa nopeampia menetelmiä happamien sulfaattimaiden tunnistamiseen ja happamista sulfaattimaista aiheutuvien riskien arviointiin.	https://helda.helsinki.fi/items/50683c00-c65a-47d8-9574-4a6d9bb1c055
Lait ja asetukset		
Ympäristönsuojelulaki	Lakia sovelletaan toimintaan, josta aiheutuu tai saattaa aiheutua ympäristön pilaantumista siten kuin jäljempänä säädetään. Lisäksi tätä lakia sovelletaan toimintaan, jossa syntyy jätettä, sekä jätteen hyödyntämiseen tai käsittelyyn.	https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2000/20000086
Jätelaki	Lain tarkoituksena on edistää kiertotaloutta ja luonnonvarojen käytön kestävyyttä, vähentää jätteen määrää ja haitallisuutta, ehkäistä jätteistä ja jätehuollosta aiheutuvaa vaaraa ja haittaa terveydelle ja ympäristölle, varmistaa toimiva jätehuolto sekä ehkäistä roskaantumista.	https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110646

Ohje tai suositus	Sisältö	Linkki
Vesilaki	Lain tavoitteena on: 1) edistää, järjestää ja sovittaa yhteen vesivarojen ja vesiympäristön käyttöä niin, että se on yhteiskunnallisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä; 2) ehkäistä ja vähentää vedestä ja vesiympäristön käytöstä aiheutuvia haittoja; ja 3) parantaa vesivarojen ja vesiympäristön tilaa.	https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110587
Valtioneuvoston asetus kaivannaisjätteistä	Asetusta sovelletaan kaivannaisjätteen jätehuoltosuunnitelman laatimiseen ja täytäntöönpanoon, kaivannaisjätteen jätealueen perustamiseen, hoitoon, käytöstä poistamiseen ja jälkihoitoon, kaivannaisjätteen hyödyntämiseen tyhjässä louhoksessa sekä kaivannaisjätteen jätehuollon seurantaan, tarkkailuun ja valvontaan.	https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130190
Maankäyttö- ja rakennuslaki (Alueidenkäyttölaki)	Lain tavoite on järjestää alueiden käyttö ja rakentaminen niin, että luodaan edellytykset hyvälle elinympäristölle sekä edistetään ekologisesti, taloudellisesti, sosiaalisesti ja kulttuurisesti kestävää kehitystä.	https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132
Maa-aineslaki	Lakia sovelletaan kiven, soran, hiekan, saven ja mullan ottamiseen pois kuljettavaksi tai paikalla varastoitavaksi tai jalostettavaksi, jollei 2 §:stä muuta johdu.	https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1981/19810555
Luonnonsuojelulaki	Lakia sovelletaan luonnon ja maiseman suojeluun ja hoitoon.	https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2023/20230009
Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista	Asetuksessa säädetään maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista.	https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20070214
Metsälaki	Lain tarkoitus on edistää metsien taloudellisesti, ekologisesti ja sosiaalisesti kestävää hoitoa ja käyttöä siten, että metsät antavat kestävästi hyvän tuoton samalla, kun niiden biologinen monimuotoisuus säilytetään.	https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961093
Valtioneuvoston asetus vesiympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista	Asetuksen tarkoitus on suojella pinta- ja pohjavesiä sekä merivesiä ja parantaa niiden laatua ehkäisemällä vaarallisista ja haitallisista aineista aiheutuvaa pilaantumista ja sen vaaraa asettamalla päästökieltoja, päästöraja-arvoja sekä ympäristölaatuunormeja.	https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2006/20061022#P9

Ohje tai suositus	Sisältö	Linkki
Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laadusta ja valvonnasta sekä rakennusten vesilaitteistojen riskienhallinnasta	Tässä asetuksessa säädetään: 1) talousveden laatuvaatimuksista, laatuvaivoista, käsittelystä, käsittelyyn käytettävistä kemikaaleista ja desinfioinnista; 2) riskienhallintaan perustuvasta talousveden säännöllisestä valvonnasta sekä tutkimustulosten raportoinnista, tiedottamisesta ja tietoverkossa esitettävistä tiedoista; 3) menettelystä, jos talousvesi ei täytä laatuvaatimuksia tai -tavoitteita; 4) talousveden radioaktiivisista aineista aiheutuvan säteilyaltistuksen rajoittamisesta; 5) rakennusten vesilaitteistojen ja niistä otettavan veden riskienhallintaa koskevista menettelytavoista; 6) häiriötilanteisiin varautumista koskevan suunnitelman sisällöstä ja laatimisesta.	https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2015/20151352

Lisää ohjeistusta on seuraavilla nettisivuilla:

Tunnistus-hankkeen kotisivu <https://www.syke.fi/hankkeet/tunnistus>

CircVol-hankkeessa mm. stabiloitiin happamia ruoppausmassoja.

Loppuraportti: https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/19_2021.pdf

Ympäristöluvan tarpeesta löytyy ohjeistusta Suomen ympäristökeskuksen sivuilta:

<https://www.ymparisto.fi/fi/luvut-ja-velvoitteet/ymparistolupa>

Ympäristövaikutusten arviointi: <https://www.ymparisto.fi/fi/osallistu-ja-vaikuta/ymparistovaikutusten-arviointi>

CircVol-hankkeissa mm. stabiloitiin happamia ruoppausmassoja.

Loppuraportit: https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/19_2021.pdf ja

https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/29_2022.pdf

9 KIITOKSET

Lähetimme oppaan laajalle arviointikierrokselle ennen julkaisua. Kommentointiin osallistuivat Kaisa Figueiredo (Pohjois-Karjalan ELY-keskus), Mika Huttunen (Pohjois-Karjalan ELY-keskus), Arto Hyvönen (GTK, vesiratkaisut), Elina Häikiö (Pohjois-Savon ELY-keskus), Jaana Jarva (GTK, ympäristöratkaisut), Kristina Karvonen (GTK), Ari Koski (Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus), Tiina Käki (Pohjois-Karjalan ELY-keskus), Hanne Lohilahti (Itä-Suomen aluehallintovirasto/ympäristölupavastualue), Soile Nieminen (Kainuun ELY-

keskus), Elli Moilanen (Kainuun ELY-keskus), Jukka Pietilä (Metsänhoitoyhdistys Pohjois-Karjalary), Satu Pietola (Oulun kaupunki), Ninni Rissanen (Pohjois-Karjalan ELY-keskus), Pirita Rousu (Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus), Markus Saari (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus), Tuula Sivonen (Lapin ELY-keskus), Jaana Sunell (Ramboll), Tapio Sutela (Luke), Merja Talvitie (Oulun kaupunki), Teppo Vehanen (Luke) ja Helena Vikstedt (Kainuun ELY-keskus). Parhaat kiitokset kaikille käyttämätänne ajasta ja erittäin hyödyllisistä kommentteista!

LÄHDE- JA KIRJALLISUUSLUETTELO

- Ahti, E. 1979.** Maaveden energiasuhteista ojitetulla suolalla. Summary: Energy relationships of soil water on drained peat. *Communications Instituti Forestalis Fenniae* 94(3), 1–56.
- Arkimaa, H., Hyvönen, E., Lerssi, J., Loukola-Ruskeeniemi, K. & Vanne, J. 2000.** Suomen mustaliuskeet aeromagneettisella kartalla – Proterozoic black shale formations and aeromagnetic anomalies in Finland, 1:1 000 000. Espoo: Geologian tutkimuskeskus.
- Autiola, M., Suonperä, E., Suvanto, S., Napari, M., Nyland, M., Kupiainen, V., Vienonen, S., Forsman, J., Suikkanen, T., Auri, J., Boman, A. & Mattbäck, S. 2022.** Happamien sulfaattimaiden kansallinen opas rakennushankkeisiin: Opas happamien sulfaattimaiden huomiointiin ja vaikutusten hallintaan. Ympäristöministeriön julkaisuja 2022:3. 152 s. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-222-8>
- Burges, C. J. C. 1998.** A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition. *Data Mining and Knowledge Discovery* 2, 121–167.
- Geologian tutkimuskeskus 2023.** Maaperäkartan käyttöopas, jäätikön kulutus [Verkkosivu]. Saatavissa: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/jaatikonkulutus.htm> [Viitattu 15.3.2023]
- Grönholm, S. (toim.), Alviola, R., Kinnunen, K. A., Kojonen, K., Kärkkäinen, N. & Mäkitie, H. 2011.** Retkeilyjän kiviopas. Geologian tutkimuskeskus, Retkeilykartat ja -oppaat 78. 88 s. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_078.pdf
- Gustavsson, N., Loukola-Ruskeeniemi, K. & Tenhola, M. 2012.** Evaluation of geochemical background levels around sulfide mines – a new statistical procedure with beanplots. *Applied Geochemistry* 27(1), 240–249.
- Hadzic, M., Nystrand, M., Auri, J., Österholm, P., Korpoo, M., Laamanen, T., Korhonen, A., Räisänen, J., Huttunen, M., Vento, T. & Ihme, R. 2020.** Toimintamallit happamuuden ennakoimiseksi ja riskien hallitsemiseksi turvetuotannossa. Sulfa II -hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 16/2020. 117 s.
- Hadzic, M., Postila, H., Österholm, P., Nystrand M., Pahkakangas, S., Karppinen, A., Arola, M., Nilivaara-Koskela, R., Häkkinen, K., Saukkoriipi, J., Kunnas, S. & Ihme, R. 2014.** Sulfaattimaillo syntyvän happaman kuorituksen ennakointi- ja hallintamenetelmät – SuHE-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17/2014. 88 s.
- Hyvärinen, J., Hyvönen, A. & Kiiskinen, A. 2021.** Kontiolahden Kulhon pohjavesialueen geologinen rakenne- ja pohjavesien virtausmallinnus. Geologian tutkimuskeskus, Työraportti 24/2021. 49 s., 16 liitettä. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/24_2021.pdf
- Kousa, A., Loukola-Ruskeeniemi, K., Hatakka, T. & Kantola, M. 2021.** High manganese and nickel concentrations in human hair and well water and low calcium concentration in blood serum in a pristine area with sulphide-rich bedrock. *Environmental Geochemistry and Health* 44, 3799–3819 (2022). Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-021-01131-6>
- Kruskal, J. B. 1964.** Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika* 29(1), 1–27.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. 1999.** Origin of Black Shales and the Serpentinite-Associated Cu-Zn-Co Ores at Outokumpu, Finland. *Economic Geology* 94, 1007–1028.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. 2019.** Arseeniriskin hallinta Suomessa ja Saksassa. *Ympäristö ja Terveys-lehti* 8, 54–59.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. & Heino, T. 1996.** Geochemistry and genesis of the black shale-hosted Ni-Cu-Zn deposit at Talvivaara, Finland. *Economic Geology* 91(1), 80–110.
- Loukola-Ruskeeniemi, K. & Lahtinen, H. 2013.** Multi-phase evolution in the black-shale-hosted Ni-Cu-Zn-Co deposit at Talvivaara, Finland. *Ore Geology Reviews* 52, 85–99.
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Airo, M.-L., Arkimaa, H., Hyvönen, E. & Lerssi, J. 2022a.** Country-wide black shale mapping using airborne geophysics and petrophysical, geochemical and modelling studies. *Julkaisussa: Christie, A. B. (toim.) Proceedings of the 16th Biennial SGA Meeting, Rotorua, New Zealand, 28–31. March 2022.* 1, 212–215. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/359810630_Country-wide_black_shale_mapping_using_airborne_geophysics_and_petrophysical_geochemical_and_modelling_studies
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Hyvönen, E., Airo, M.-L., Arkimaa, H., Eskelinen, J., Lerssi, J., Vanne, J. & Vuoriainen, S. 2011.** Onko Suomessa uusia Talvivaara-tyyppisiä malmeja? Geofysikaalisiin ja geokemialisiin tutkimuksiin perustuva Suomen mustaliuskekartta. Abstract: Evaluation of the ore potential of black shale units in Finland – preliminary results of a geophysical and geochemical study. *Geologi* 63(3), 68–79. Saatavissa: https://www.geologinenseura.fi/sites/geologinenseura.fi/files/geologi_-_artikkelit/mustaliuske.pdf
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Hyvönen, E., Airo, M.-L., Lerssi, J. & Arkimaa, H. 2023.** Country-wide exploration for graphite- and sulphide-rich black shales with airborne geophysics and petrophysical and geochemical studies. *Journal of Geochemical Exploration* 244, 107123. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107123>
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Hyvönen, E., Lerssi, J., Arkimaa, H. & Auri, J. 2022b.** Maankäytön vaikutus pintavesien laatuun mustaliuskealueilla. *Ympäristö ja Terveys-lehti* 4, 64–69.
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Kantola, M., Halonen, T., Seppänen, K., Henttonen, P., Kallio, E., Kurki, P. & Savolainen, H. 2003.** Mercury-bearing black shales and human Hg intake in eastern Finland: impact and mechanisms. *Environmental Geology* 43, 283–297.
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Müller, I., Reichel, S., Jones, C., Battaglia-Brunet, F., Elert, M., Le Guédard, M., Hatakka, T., Hellal, J., Jordan, I., Kaija, J., Keiski, R. L., Pinka, J., Tarvainen, T., Turkki, A., Turpeinen, E. & Valkama, H. 2022c.** Risk management for arsenic in agricultural soil-water systems: lessons learned from case studies in Europe. *Journal of Hazardous Materials* 424, Part D. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127677>
- Loukola-Ruskeeniemi, K., Uutela, A., Tenhola, M. & Paunkola, T. 1998.** Environmental impact of metalliferous black shales at Talvivaara in Finland, with indication of lake acidification 9000 years ago. *Journal of Geochemical Exploration* 64, 395–407.
- Middleton, M. 2014.** Hyperspectral close-range and remote sensing of soils and related plant associations. Spectroscopic applications in the boreal environment. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. 68 s.

- (väitöskirja). Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_088.pdf
- MMM 2023.** Ojien kunnostus. [Verkkosivu]. Saatavissa: <https://metsanhoidonsuosituksset.fi/fi/toimenpiteet/ojien-kunnostus> [Viitattu 24.5.2023]
- Mäkilä, M., Loukola-Ruskeeniemi, K. & Säävuori, H. 2012.** High pre-mining metal concentrations and conductivity in peat around the Talvivaara nickel deposit, eastern Finland. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 196. 36 s. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_196.pdf
- Mäkilä, M., Nieminen, T. M., Säävuori, H., Loukola-Ruskeeniemi, K. & Ukonmaanaho, L. 2015.** Does underlying bedrock affect the geochemistry of drained peatlands? *Geoderma* 239–240, 280–292. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.002>
- Mäkinen, J., Kauppila, T., Loukola-Ruskeeniemi, K., Mattila, J. & Miettinen, J. 2010.** Impacts of point source and diffuse metal and nutrient loading on three northern boreal lakes. *Journal of Geochemical Exploration* 104, 47–60. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.11.007>
- Nieminen, T. M., Hökkä, H., Ihalainen, A. & Finér, L. 2016.** Metsänhoito happamilla sulfaattimailla. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 12/2016. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 42 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-190-7>
- Nieminen, T. M., Silver, T., Boman, A., Ilvesniemi, H., Joensuu, S. & Härkönen, L. 2020.** Happamien sulfaattimaiden yleiskartoituksen hyödyntäminen metsätaloudessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 21/2019. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 26 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-939-2>
- Parviainen, A. & Loukola-Ruskeeniemi, K. 2019.** Environmental impact of mineralised black shales. *Earth-Science Reviews* 192, 65–90. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.01.017>
- Parviainen, A., Loukola-Ruskeeniemi, K., Tarvainen, T., Hatakka, T., Härmä, P., Backman, B., Ketola, T., Kuula, P., Lehtinen, H., Sorvari, J., Pyy, O., Ruskeeniemi, T. & Luoma, S. 2015.** Arsenic in bedrock, soil and groundwater – the first arsenic guidelines for aggregate production established in Finland. *Earth-Science Reviews* 150, 709–723. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.09.009>
- Parviainen, A., Mäkilä, M. & Loukola-Ruskeeniemi, K. 2014.** Pre-mining acid rock drainage in the Talvivaara Ni-Cu-Zn-Co deposit (Finland): natural peat layers as a natural analogue to constructed wetlands. *Journal of Geochemical Exploration* 143, 84–95. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.03.024>
- Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.) 2022.** Jatkuvapeitteinen metsänkasvatus: Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022. Helsinki: Luonnonvarakeskus. 132 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-427-2>
- Ruskeeniemi, T. & Putkinen, N. 2023.** Kurikan syväpohjavesitutkimukset 2020–2022: Vaihe 8. Geologian tutkimuskeskus, asiakasraportti. 106 s., 18 liitettä.
- Saarinen, T., Mohammadighavam, S., Marttila, H. & Klöve, B. 2013.** Impact of peatland forestry on runoff water quality in areas with sulphide-bearing sediments; how to prevent acid surges? *Forest Ecology and Management* 293, 17–28.
- Sutela, T., Vuori, K.-M., Louhi, P., Hovila, K., Jokela, S., Karjalainen, S. M., Keinänen, M., Rask, M., Teppo, A., Urho, L., Vehanen, T., Vuorinen, P. J. & Österholm, P. 2012.** Happamien sulfaattimaiden aiheuttamat vesistövaikutukset ja kalakuolemat Suomessa. *Suomen Ympäristö* 14. 50 s.
- Tapio 2020.** Tuhkan käyttöä metsänkäsittelyn yhteydessä testattiin happamilla sulfaattimailla. [Verkkosivu]. Saatavissa: <https://tapio.fi/artikkelit/tuhkan-kayttoa-metsankasittelyn-yhteydessa-testattiin-happamilla-sulfaattimailla/> [Viitattu 24.5.2023]
- Ukonmaanaho, L., Nieminen, M., Hytönen J., Nieminen T.M., Moilanen, M., Kantola, M., Kiikkilä, O., Laurén A., Merilä, P., Penttilä, T., Piispanen, J., Starr, M., Kaila, A., Pyhtilä, H. & Perämäki, P. 2013.** Energiapuun korjuun vaikutus ravinne- ja raskasmetallihuutoutumiin ja ravinteiden riittävyteen suometsissä. Julkaisussa: Asikainen A., Ilvesniemi, I & Muhonen, T. (toim.) Bioenergiaa metsistä. Metlan työraportteja 289, 97–11. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2468-9>
- Vehanen, T., Sutela, T., Aroviita, J., Karjalainen, S.-M., Riihimäki, J., Larsson, A. & Vuori, K.-M. 2022.** Land use in acid sulphate soils degrades river water quality – Do the biological quality metrics respond? *Ecological Indicators* 141. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X2200568>
- Virtanen, K. & Lerssi, J. 2006.** Mustaliuskekilvilajin vaikutus turpeen alkuainepitoisuuksiin. Geologian tutkimuskeskus, arkistoraportti S 42/0000/2006/1. 33 s., 29 liites. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/s42_0000_2006_1.pdf
- Virtanen, K., Hänninen, P., Kallinen, R.-L., Vartiainen, S., Herranen, T. & Jokisaari, R. 2003.** Suomen turvevarat 2000. Summary: The Peat Reserves of Finland in 2000. Geologian tutkimuskeskus, Tutkimusraportti 156. 101 s., 103 liites. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_156.pdf
- Visuri, M., Nystrand, M., Auri, J., Österholm, P., Nili-vaara, R., Boman, A., Räisänen, J., Mattbäck, S., Korhonen, A. & Ihme, R. 2021.** Maastokäyttöisten tunnistusmenetelmien kehittäminen happamille sulfaattimailla. Tunnistus-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 43/2021. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/items/50683c00-c65a-47d8-9574-4a6d9bb1c055>
- Väylävirasto 2023.** Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCC1 7. Väyläviraston ohjeita 14/2023: Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-387-3>



Kaikki GTK:n julkaisut verkossa hakku.gtk.fi