POHJAVESIMALLINNUS

LIITE 6

Elementis Minerals B.V. Branch Finland

Kaivannaisjätteiden ja vesienhallinnan YVA-selostus

Asiakas: Elementis Minerals B.V. Branch Finland

Projekti: Punasuon louhoksen numeerinen pohjavesimallinnus

Projektinumero: 101025460-001

Päiväys
17/12/2024
Projektitunnus
101025460-001

Asiakas
Elementis Minerals B.V. Branch Finland

Punasuon avolouhoksen numeerinen pohjavesimallinnus

AFRY
ÅF PÖYRY

TIIVISTELMÄ

Elementis Minerals B.V. Branch Finland louhii Suomessa Kainuussa ja Pohjois-Karjalassa talkkimalmia sekä rikastaa ja jatkojalostaa siitä talkkituotteita. Sotkamossa on toiminnassa oleva Punasuon avolouhos ja sen vieressä 1960-luvun alussa avattu ja vuonna 2010 suljettu, nykyään vedellä täyttynyt Lahnaslammen talkkilouhos. Tässä raportissa esitetään Sotkamon Punasuon avolouhoksen numeerinen pohjavesimallinnus. Mallinnus on tehty nykyiselle (vuosi 2024) ja vuoden 2035 louhokselle sekä sulkemisen jälkeiselle tilanteelle.

Työssä kerättiin ja käytiin läpi kaivoksen alueelta saatavilla oleva geologinen, hydrologinen, hydrogeologinen, geofysikaalinen ja geometrinen aineisto. Maaperän paksuus mallinnettiin käyttäen maastokarttoja ja geologisia karttoja, kairarei'istä ja pohjavesiputkista mitattuja maaperäkerrosten paksuuksia ja geofysiikan mittaustuloksista tulkittuja maakerrospaksuuksia. Kairasydännäytteistä kartoitettujen geoteknisten parametrien (RQD) perusteella tehtiin kallioanalyysi, jossa tarkasteltiin tilastollisesti kallion rakoilua suhteessa syvyyteen. Pohjavesimallinnus tehtiin FEFLOW-ohjelmalla tasapainotilan malleina. Louhoksen sulkemisen jälkeistä tilannetta mallinnettiin myös muuttavan tilanteen eli transienttitilan mallina. Malli kalibroitiin nykytilanteeseen eli vastaamaan mitattuja pohjavesipintoja ja kuivatuspumppausmääriä vuonna 2024.

Vuosi 2024 toimii mallin lähtötilanteena. Louhintoja edeltävää aikaa ei mallinnettu, eikä vuoden 2024 Punasuon louhoksen kuivatuspumppauksen aiheuttaman alenemakartion laajuutta suhteessa louhintoja edeltävään aikaan siten ole laskettu. Vuoden 2035 simuloinnissa Punasuon louhoksen kuivatuksesta aiheutuu pohjavesipinnan alenemaa nykytilaan verrattuna. Vähintään 0,5 m pohjavesipinnan laskua voi tapahtua enintään 200–900 m etäisyydellä avolouhoksen reunasta. Pohjavettä suotautuu louhokseen noin 1810 m^3/vrk (vuosi 2024) ja 2560 m^3/d (vuosi 2035). Kun suoraan louhokseen satava vesi otetaan mukaan ja haihdunnan oletetaan louhoksen kohdalla olevan 50 % sadannasta, mallin laskemaksi kuivatusvesimääräksi saadaan 1990 m^3/vrk vuonna 2024 ja 2750 m^3/vrk vuonna 2035. Punasuon louhoksen mitatut kuivatusvesimäärät ovat 1980, 2180 ja 2040 m^3/vrk vuosille 2021, 2022 ja 2023.

Kuivatuspumppauksen lopettamisen jälkeen vuoden 2035 mukaisen louhoksen vedellä täyttyminen kestää noin 15 vuotta. Laskennassa ei ole mukana louhokseen muualta johdettavia tai pintavaluntana tulevia vesiä. Täyttymisen jälkeen pohjaveden virtausgradientti on kohti koillista ja itää. Mallinnuksen mukaan louhoksen ylivuoto tapahtuu pääasiassa ylivuoto-ojaa pitkin, ja pohjaveden virtaus kallio-osuudessa on hyvin vähäistä. Täyttyneeseen louhokseen suotautuu pohjavettä noin 682 m^3/d ja suorasta sateesta tulee vettä 215 m^3/d, kun

copyright© AFRY Finland Oy

haihdunnan oletetaan olevan 50 % vuosittaisesta sadannasta. Louhoksesta poistuu vettä lähinnä ylivuotona 898 m^3/d.

copyright© AFRY Finland Oy

Sisällys

Tiivistelmä

1 Johdanto 5
1.1 Tausta 5
1.2 Työn tavoite 6
1.3 Tämä raportti 7
2 Lähtöaineistot ja puuteanalyysi 8
3 Mallinnettava alue 10
3.1 Kaivosalue 10
3.2 Topografia 12
3.3 Valuma-alueet 13
3.4 Mallinnusalueen rajaus 13
3.5 Sadanta 14
3.6 Maa- ja kallioperä 15
3.6.1 Maaperä 15
3.6.2 Kallioperä 15
3.6.3 Ruhjeet 19
3.7 Pohjavesi 26
3.8 Maaperän syvyysmalli 30
3.9 Kallioanalyysi 37
3.10 Louhinta 41
3.11 Kuivatusvesimäärät 44
3.12 Hydrogeologiset mittaukset 46
3.13 Hydrogeologinen konseptualisointi 48
4 Numeerisen 3D-pohjavesimallin muodostaminen 50
4.1 2D verkko 50
4.2 Kerrosmalli 52
4.3 Reunaehdot 55
4.4 Materiaalien ominaisuudet 57
4.5 Kalibrointi 58
4.6 Mallinnuksen tulokset 62
4.6.1 Vaihe 1, vuosi 2024 63
4.6.2 Vaihe 2, vuosi 2035 67
4.6.3 Vuoden 2035 louhoksen sulkemisen jälkeinen tilanne 73
4.7 Herkkyystarkastelut 77
5 Johtopäätökset ja epävarmuudet 79
6 Yhteenveto 82
7 Lähteet 85

copyright© AFRY Finland Oy

1 Johdanto

1.1 Tausta

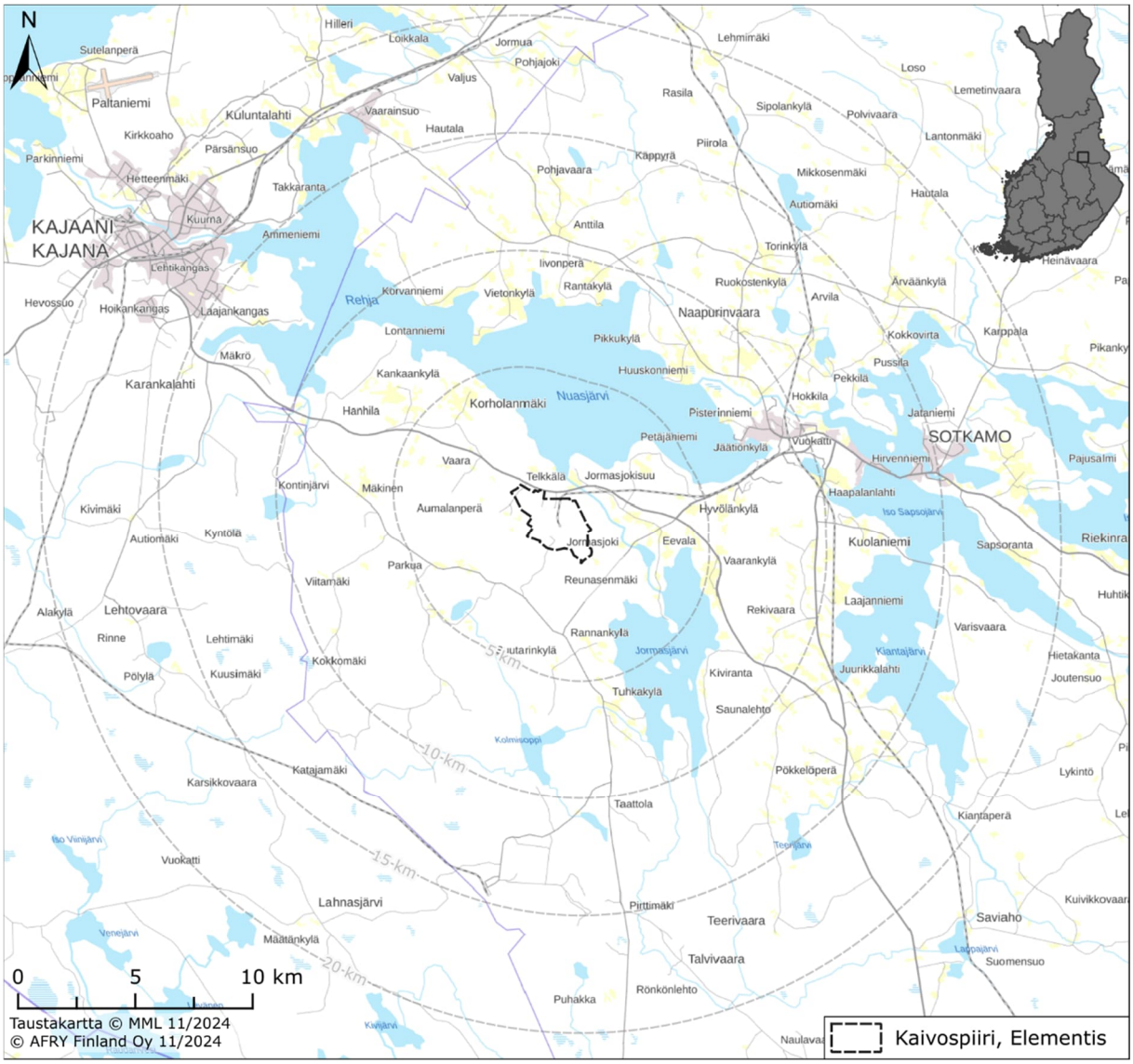
Elementis Minerals B.V. Branch Finland on kansainvälinen erikoiskemikaalien yritys, joka louhii Suomessa Kainuussa ja Pohjois-Karjalassa talkkimalmia sekä rikastaa ja jatkojalostaa siitä talkkituotteita. Tuotantolaitokset sijaitsevat Sotkamossa ja Vuonoksessa (Outokumpu). Aktiivisia kaivoksia on yhteensä neljä kappaletta: Sotkamossa Punasuon ja Uutelan avolouhokset ja Polvijärvellä Horsmanaho-Pehmytkiven sekä Karnukan avolouhokset.

Sotkamossa toiminnassa olevan Punasuon avolouhoksen vieressä on 1960-luvun alussa avattu ja vuonna 2010 suljettu ja nykyään vedellä täyttynyt Lahnaslammen talkkilouhos. Lahnaslammen suljettua louhosta täytetään Punasuon louhoksen sivukivellä. Louhokseen on läjitetty myös pieni määrä magnesiittihiekkaa. Myös Punasuon louhoksen kuivanapitovedet on johdettu Lahnaslammen louhokseen lokakuuhun 2024 saakka. Punasuon kuivatusvesien ohjaamista on muutettu niin, että vedet ohjataan jatkossa suoraan purkuveden käsittelyn kautta Lahnasjokeen.

Vuonna 2012 Water Hope Oy ja Pöyry Finland Oy tekivät Punasuon ja Lahnaslammen louhoksista hydrologisen selvityksen ja numeerisen pohjavesimallin, jolla arvioitiin pohjavesiolosuhteita vuonna 2020, kun Lahnaslammen louhoksen sulkemisesta ja Punasuon louhoksen toiminnan aloittamisesta on kulunut noin 10 vuotta (Pöyry Finland Oy 2012). Mallinnus tehtiin PitMine3D-ohjelmalla. Kainuun ELY-keskus on kehottanut Elementis Minerals B.V. Branch Finland:ia päivittämään vuonna 2012 tehdyn pohjavesimallin vuoden 2024 loppuun mennessä.

Koska vuoden 2012 pohjavesimallinnus tehtiin ei kaupallisella PitMine3D-ohjelmalla, joka ei ole enää käytettävissä, aiempaa mallia ei voitu päivittää. Elementis Minerals B.V. Branch Finland on tilannut AFRY Finland Oy:ltä uuden Punasuon avolouhoksen numeerisen pohjavesimallinnuksen, jossa mallinnetaan nykytilanne (vuosi 2024) ja simuloidaan vuoden 2035 pohjavesiolosuhteita sekä vuoden 2035 mukaisen louhoksen sulkemisen jälkeistä tilannetta. Vuoden 2035 mallinnusskenaario valittiin, koska Papinlammen rikastushiekka-allas on tällöin oletettavasti maksimikorossa +190 m mpy, minkä jälkeen alueelle tarvitaan uusi rikastushiekan läjityspaikka toiminnan jatkamiseksi. Mallilla varaudutaan myös simuloimaan vuoden 2035 suunniteltua louhosta laajempaa Punasuon avolouhosta.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 1-1. Punasuon talkkikaivoksen sijainti Sotkamossa.

1.2 Työn tavoite

Työn tavoitteena on syventää ymmärrystä Punasuon talkkikaivoksen alueen hydrogeologiasta ja laatia alueesta nykytilaa kuvaava 3D-pohjavesimalli sekä simuloida louhoksen vuoden 2035 ja sulkemisen jälkeistä tilannetta. Pohjavesimallinnuksen ensimmäinen työvaihe sisältää lähtötietojen kokoamisen, niiden käytettävyyden arvioinnin ja puuteanalyysin. Tämän jälkeen kootaan hydrogeologinen konseptuaalinen malli, jonka perusteella tehdään numeerinen 3D pohjavesimalli alueesta. Pohjavesimalli kalibroidaan nykytilanteeseen mitattujen pohjavesipintojen ja louhosten kuivatusvesimäärien perusteella. Kalibroidulla mallilla simuloidaan vuoden 2035 louhoksen vaikutuksia ympäristöön,

copyright© AFRY Finland Oy

vuotovesimääriä ja alenemakartion laajuutta ja lopuksi mallinnetaan sulkemisen jälkeinen tilanne.

1.3 Tämä raportti

Työn tausta, tarkoitus ja sisältö esitellään luvussa 1. Luvussa 2 käydään läpi lähtöaineisto ja tehdään puuteanalyysi. Luvussa 3 kuvataan mallinnettava alue, maaperän syvyysmalli eli kallion topografia ja hydrogeologinen konseptuaalinen malli. Numeerisen mallin muodostaminen, mallin kalibrointi nykytilaan, vuosien 2024 ja 2035 sekä sulkemisen jälkeisen tilanteen pohjavesiolosuhteiden simulointi ja mallin herkkyystarkastelut on kuvattu luvussa 4. Johtopäätökset ja mallin tuloksiin liittyvät epävarmuudet esitetään luvussa 5. Yhteenveto on luvussa 6. Lopuksi luvussa 7 on esitetty lähdeluettelo.

Tässä raportissa esitetyt syvyyslukemat on esitetty yksikössä metriä merenpinnan yläpuolella (m mpy, N2000). Koordinaatistona on käytetty ETRS-TM35FIN.

copyright© AFRY Finland Oy

2 Lähtöaineistot ja puuteanalyysi

Konseptuaalista ja numeerista mallinnusta varten käytiin läpi kaikki saatavilla oleva hydrologinen, geologinen, hydrogeologinen, geofysikaalinen ja geometrinen aineisto mallinnettavasta alueesta. Punasuon kaivosalueelta on saatavilla tutkimuksia ja mittauksia, joiden käytettävyyttä arvioitiin pohjaveden numeerista mallinnusta ajatellen. Aineistoja saatiin AFRY Finland Oy:n ja Pöyry Finland Oy:n aikaisemmista Punasuon ja Lahnaslammen kaivosten alueen projekteista, Elementisiltä ja ladattiin julkisista tietokannoista: Ilmatieteen laitos, Geologian tutkimuskeskus (GTK), Maanmittauslaitos (MML), Suomen ympäristökeskus (SYKE) sekä Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY).

Taulukossa 2-1 esitetään saatavilla oleva aineisto, jota voidaan hyödyntää konseptuaalisessa ja numeerisessa pohjavesimallissa sekä esitetään pohjavesimallin kannalta oleelliset, mutta puuttuvat aineistot.

Taulukko 2-1. Konseptuaalisessa ja numeerisessa pohjavesimallissa käytettävä saatavilla oleva ja puuttuva lähtöaineisto.

Aineisto	Kuvaus	Lähde	Parametri malliin	Saatavuus	Puute	Suunnitelma
Hydrologia						
Ilmasto	Paikallinen säähavainto-aineisto: sadanta	Sääasema (Ilmatieteen laitos, Kuolaniemi)	Pohjaveden muodostumin en/veden imeytyminen maanpinnalta	Aineisto ladattu Ilmatieteen-laitoksen avoimesta datapalvelusta (Kuolaniemi)		
Pintavedet	Järvet, joet, purot, uomat, lammet	Maanmittauslaitos (MML), SYKE	Pohjavesi-mallin rajaaminen, mallin geometria, reunaehdot ja pohjaveden muodostu-minen	Aineisto ladattu MML:n palvelusta, 3. jakovaiheen valuma-alueet (SYKE 1990)		
Geometriat						
Topografia	Maanpinnan topografia	Maanmittauslaitos (MML)	Mallin rajaus, malli-geometria	Aineisto ladattu MML:n avoimen datan palvelusta		
	Kalliopinnan topografia	AFRY määrittelee	Malli-geometria	Kairareiät, GTK:n geofysiikan aineistoja ja kartta-aineistoa (GTK), kalliotopogra-fian malli (Pöyry Finland Oy 2012)		
Kaivos-geometriat	Nykytila 2024,	Elementis Minerals B.V. Branch Finland	Malli-geometria,	Saatu Elementisiltä		

copyright© AFRY Finland Oy

Aineisto	Kuvaus	Lähde	Parametri malliin	Saatavuus	Puute	Suunnitelma
	suunniteltu 2035, laajin vaihe, sulkemisen jälkeinen tilanne: avo-louhokset, altaat, kasat		laajimman vaiheen geometriaa on käytetty malliverkon luomisessa, mutta sitä ei ole mallinnettu tässä työssä			
Geologia						
Maaperä	Maalajit, kerros-paksuudet	GTK maaperäkartta, kairaustiedot	Malli-geometria, maaperän veden-johtavuus	Maaperäkartta (GTK)		
Kallioperä	Kivilajit RQD, rakotiheys	Kairatietokanta (Elementis Minerals B.V. Branch Finland), GTK kallioperäkartta	RQD-analyysi syvyyden mukaan, malli-geometria, kallioperän veden-johtavuus	Kallioperä-kartta (GTK), kairatietokanta saatavilla, geotekniset parametrit kartoitettu		
	Ruhje-vyöhykkeet	Ruhjetulkinnat (GTK)	Malli-geometria, kallioperän veden-johtavuus	GTK määritellyt alueelliset ruhjevyöhykkeet (GTK Hakku), erillinen selvitys GTK 2001		
Hydrogeologia						
Pohjavesi	Maaperän pohjavesi	Pohjavesiputkista tehdyt pohjaveden pinnankorkeuden ja veden-johtavuuden mittaukset	Pohjavesi-pinta maaperässä, maaperän vedenjohtavuus	Pohjavesiput-kissa tehty pohjavesipin-nan seurantaa, maaperän veden-johtavuuden mittauksia tehty 11 pohjavesiputke-ssa ja sivukivialueella peittokerrok-sen vedenläpäisy-kokeita	Turvealueilla ei ole tehty vedenjohtavuu smittauksia	Turpeen vedenjohtavuus perustuu kirjallisuusarvoon
	Kallioperän pohjavesi	Kairarei'issä tehdyt vedenjohtavuuden mittaukset	Kallioperän ja ruhjeiden veden-johtavuus	Ei saatavilla	Kallioperän ja ruhjeiden veden-johtavuutta ei ole mitattu	Kalibroidaan malli olemassa olevien Lahnaslammen ja Punasuon louhosten mitattujen vuotovesimäärien perusteella.
	Louhoksen vuotovesi-määrät	Elementis Minerals B.V. Branch Finland	Kallioperän ja maaperän vedenjohtavuus	Saatu Punasuon ja Lahnaslammen louhoksille Elementisiltä		

copyright© AFRY Finland Oy

3 Mallinnettava alue

3.1 Kaivosalue

Kaivosalueen eri toimintojen sijainnit on esitetty kuvassa 3-1.

Punasuon avolouhos on nykytilassa (vuosi 2024) kooltaan noin 830 × 420 metriä ja syvyydeltään noin 80 metriä. Louhintasuunnitelman mukaan Punasuon kaivos tulee vuonna 2035 olemaan noin 120 metriä syvä, mutta pinta-ala ei merkittävästi kasva vuoden 2024 tilanteesta. Lahnaslammen avolouhos oli tuotannossa vuosina 1968–2010 ja toiminnan loppuessa laajimmassa vaiheessaan vuonna 2010 kooltaan noin 680 × 520 metriä ja syvyydeltään noin 170 metriä. Louhinnan lopettamisen jälkeen Lahnaslammen kaivokseen on läjitetty Punasuon kaivoksen sisäraakkua ja hyödyntämiskelvotonta sivukiveä niin, että sen syvyys vuonna 2024 oli noin 125 metriä.

Sivukiveä on sijoitettu Lahnaslammen kaivoksen lisäksi sivukivialueelle. Rikastushiekan läjitys on tapahtunut tähän asti pääasiallisesti Papinlammen rikastushiekka-altaaseen, mutta Lahnaslammen kaivokseen on läjitetty hiukan myös rikastushiekkaa. Lahnaslammen kaivokseen on johdettu myös Punasuon kaivosvedet lokakuuhun 2024 saakka, sivukiven läjitysalueelta tulevat käsitellyt suotovedet, Pikarinpuron vedet sekä tarvittaessa prosessivettä. Lahnaslammen louhos on louhinnan lopettamisen jälkeen täyttynyt vedellä, ja 26.8.2024 vesipinta oli 149,67 m mpy. Lahnaslammen vettä pumpataan vesienkäsittelyyn, jossa pH:ta nostetaan, jolloin metallit, erityisesti nikkeli, saadaan saostettua. Saostuksen jälkeen vesi selkeytetään Soidinsuon altaalla ja selkeytynyt vesi johdetaan Lahnasjokeen purkavan purkuputken kautta.

Sivukiven läjitysalue sijaitsee kaivospiirin luoteiskulmalla ja on pinta-alaltaan noin 60 ha. Läjitysalueelle on läjitetty pääasiassa Lahnaslammen kaivoksesta louhittua sivukiveä. Läjitysalueen korkeus on noin 30–40 m ympäröivää maanpintaa korkeammalla noin tasolla +190…+205 m mpy. Sivukiven läjitysalue on osin maisemoitu. Nykyisen sivukivialueen alle ei ole alun perin tehty erityistä pohjarakennetta, vaan pohja muodostuu huonosti vettä läpäisevästä luonnonmoreenista.

Soidinsuon altaan pohjoinen osa (19,1 ha) on palvellut 1970-luvulla nikkelipiirin vesien ylitevesialtaana ja sen aikaisen magnesiittialtaan paisuntasäiliönä, johon on valunut vesien mukana rikastushiekkaa välittömästi eteläpuolella sijaitsevaa magnesiittiallasta korotettaessa. Nykyään Soidinsuon allas palvelee käsiteltyjen vesien selkeytysaltaana ennen juoksutusta vesistöön.

Soidinsuon altaan eteläinen osa (14 ha) (vanha magnesiittikasa) toimi rikastus-hiekka-altaana vuosina 1974–1990. Toiminnan viimeisinä vuosina altaiden pintaa nostettiin vastaavalla tavalla tekemällä altaan sisälle erillisiä altaita magnesiittia

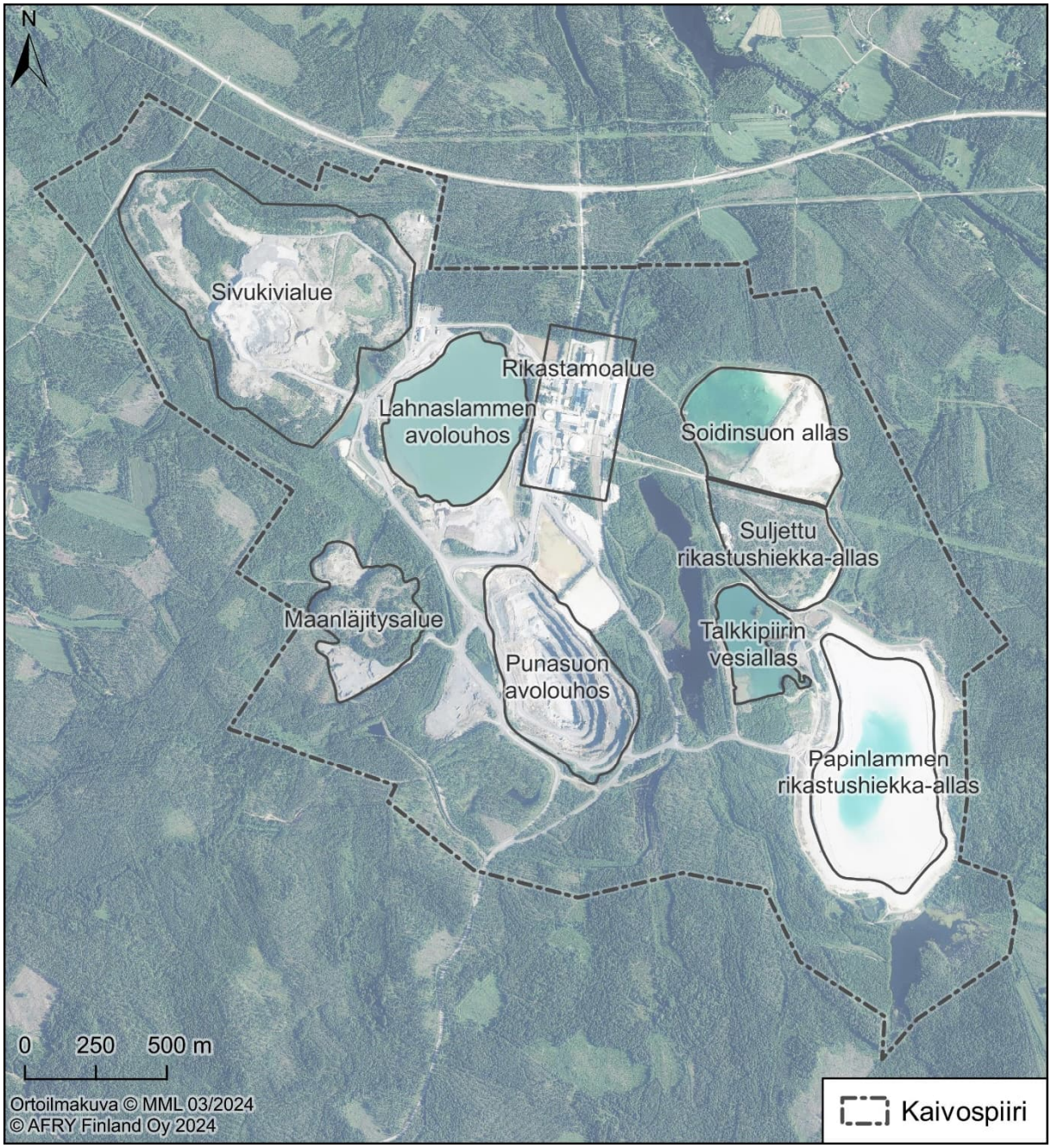
copyright© AFRY Finland Oy

patoamalla kuin nyt Papinlammella. Täyttymisen jälkeen kasa on maisemoitu vuosina 1991–1992 pölyämisen estämiseksi moreenilla, johon on syntynyt kasvukerros. Lopullinen täyttötaso on noin +165 m. Sulkemistoimenpiteet on hyväksytty ja alue on metsittynyt.

Talkki- ja nikkelirikastuksen lopputuotteena muodostuva hienojakoinen rikastushiekka (magnesiittihiekka) pumpataan vesilietteenä varastoitavaksi Papinlammen rikastushiekka-altaaseen, joka sijaitsee tehdasalueen itäpuolella. Rikastushiekka-altaan pinta-ala on noin 40 ha. Rikastushiekka-altaan padot olivat syyskuun 2023 drone-mittaustulosten perusteella tasolla +176 m ja korotus tasolle +178 oli rakenteilla. Papinlammen rikastushiekka-altaan patoja on lupa korottaa tasolle +182 ja Elementis hakee lupaa vielä yhdelle korotukselle tasolle +190. Vuonna 2035 rikastushiekka-allas tulee olemaan siis arviolta tasolla +190 m mpy.

Sulkemisvaiheessa Punasuon louhoksen kuivatuspumppaus lopetetaan ja louhoksen annetaan täyttyä vedellä. Punasuon ja Lahnaslammen louhosten ylivuotovedet johdetaan purkuojiin. Alueella olevat vesialtaat puretaan, Soidinsuonallas ja Papinlammen rikastushiekka-allas peitetään peittomoreenilla ja sivukivialue peitetään bentoniitilla.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-1. Kaivosalueen toimintojen sijainnit.

3.2 Topografia

Punasuon kaivosalueen ympäristössä maanpinta on tasossa noin +155 m mpy. Maanpinta on korkeimmillaan alueen luoteispuolella Napavaaran alueella noin 270 m mpy ja laskee itään päin tasolle 140–145 m mpy. Nuasjärven vesipinta on tasolla 137,9 m mpy ja Jormasjärven 144,9 m mpy.

copyright© AFRY Finland Oy

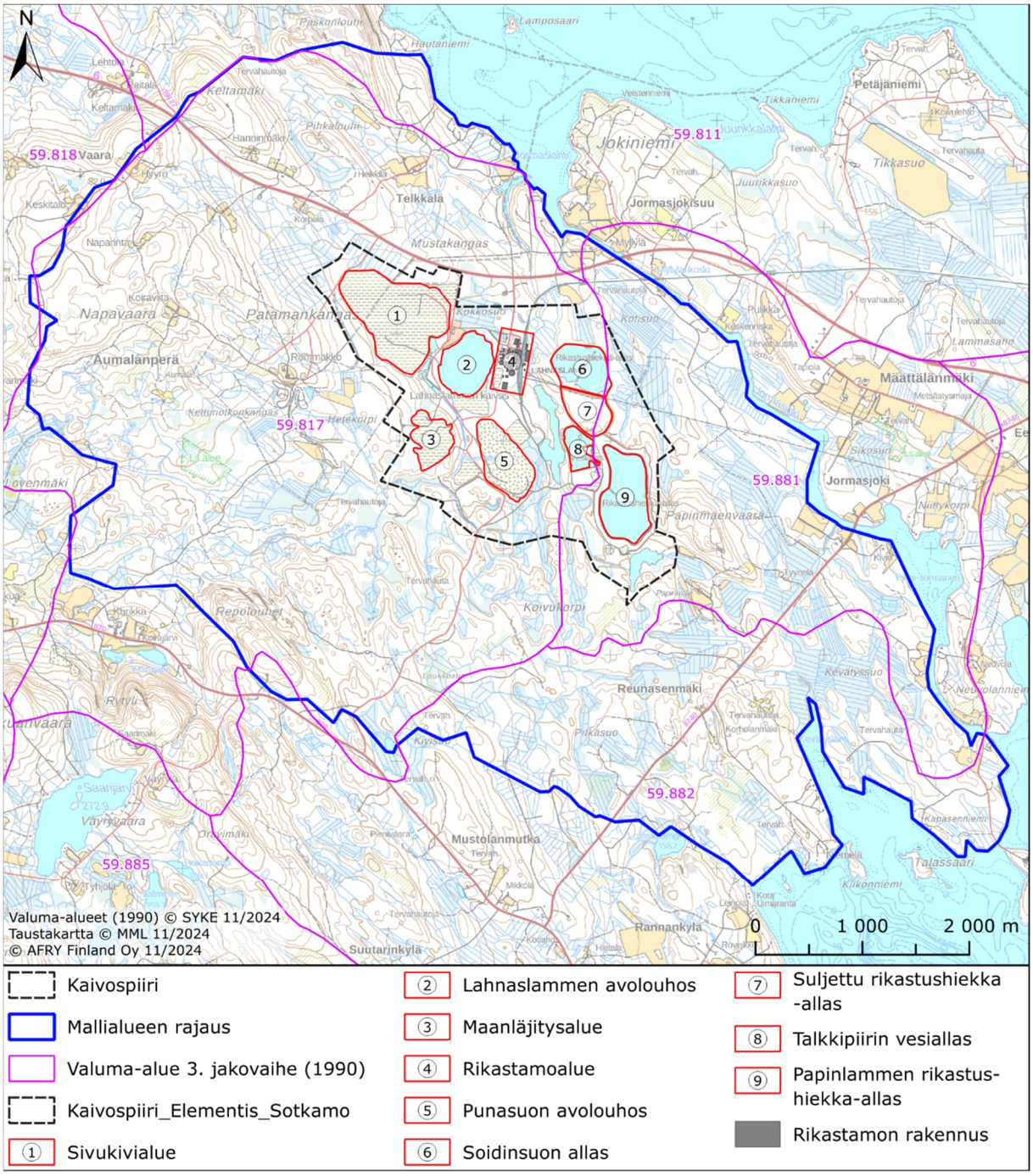
3.3 Valuma-alueet

Kaivosalue sijaitsee vedenjakaja-alueella (Kuva 3-2). Länsiosa kaivosalueesta sijaitsee Nuasjärven valuma-alueella (59.81) ja itäosa Nuasjärven-Kiimasjärven valuma-alueella (59.8), jotka ovat 2. jakovaiheen vesistöalueita (SYKE 1990 valuma-aluejako) Oulujoki (59) -päävesistössä. Kolmannen jakovaiheen luokituksessa alueet ovat Lahnasjoen valuma-alue (59.817) ja Jormasjoen valuma-alue (59.881).

3.4 Mallinnusalueen rajaus

Kuvassa 3-2 esitetään mallinnusalueen rajaus peruskartalla. Mallin alue rajattiin niin, että sen voidaan olettaa olevan selkeästi kaivoksen vaikutusaluetta laajempi. Pohjoisessa ja idässä malli rajautuu Nuasjärveen, Jormasjärveen, Pieni-Jormaseen ja Jormasjokeen. Lännessä ja etelässä malli on rajattu valuma-alueiden rajoja ja pintavesiä mukaillen (luku 3.3).

copyright© AFRY Finland Oy

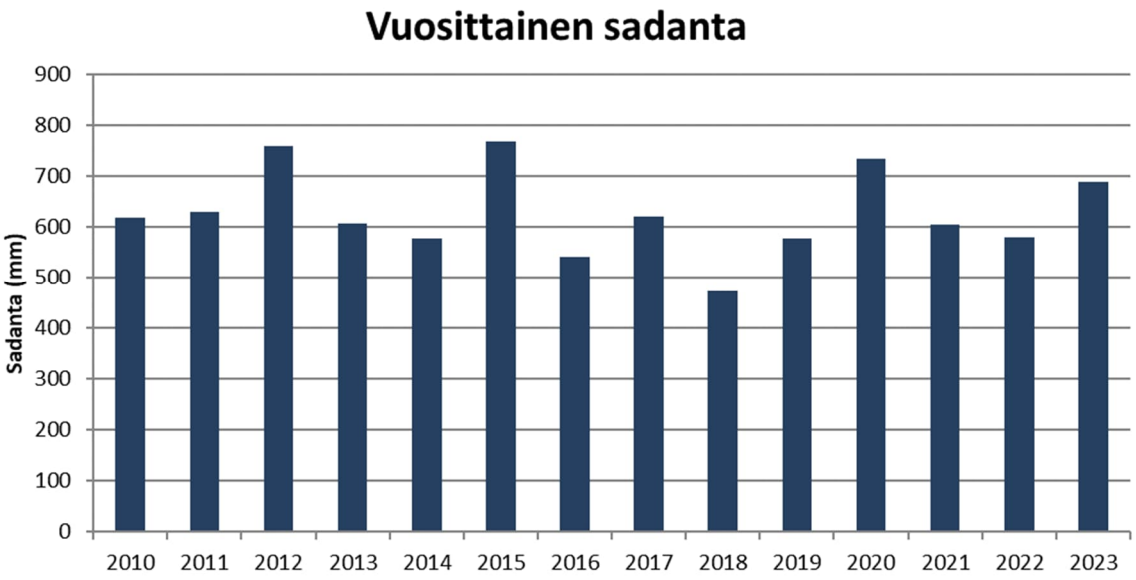


Kuva 3-2. Punasuon kaivoksen mallinnettava alue.

3.5 Sadanta

Kuolaniemen (101756) sääasema sijaitsee noin 13 kilometriä Punasuon kaivosalueesta itään. Vuosina 2010–2023 keskimääräinen vuosisadanta on ollut noin 627 mm/a (Ilmatieteenlaitos 2024). Ajanjakson pienin sademäärä oli vuonna 2018 472 mm/a ja suurin vuonna 2015 767 mm/a (Kuva 3-3).

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-3. Vuosittainen sadanta Kuolaniemen sääasemalla vuosina 2010–2023.

3.6 Maa- ja kallioperä

3.6.1 Maaperä

Punasuon kaivosalueen yleispiirteinen maaperäkartta on esitetty kuvassa 3-4. Maaperä on pääasiassa sekalajitteista maalajia eli moreenia, joka on paikoin turvekerroksen peittämä. Myös hienolajitteisia maalajeja (siltti) ja kalliopaljastumia tavataan paikoin. Maaperän paksuus on GTK:n karttapalvelun (https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/) mukaan noin 10 m.

Alueella on tehty vedenjohtavuusmittauksia pohjavesiputkissa (luku 3.12). Turvealueilla ei ole tehty hydraulisen johtavuuden mittauksia eikä maatuneisuusaste ole tiedossa. Turpeen vedenjohtavuus riippuu turvetyypistä, syvyydestä ja turpeen maatuneisuusasteesta. Rahkaturpeen vedenjohtavuus vaihtelee syvyydestä ja maatuneisuusasteesta riippuen välillä $2{,}3 \cdot 10^{-8}$ – $1{,}9 \cdot 10^{-5}$ m/s (Kesäniemi 2009).

3.6.2 Kallioperä

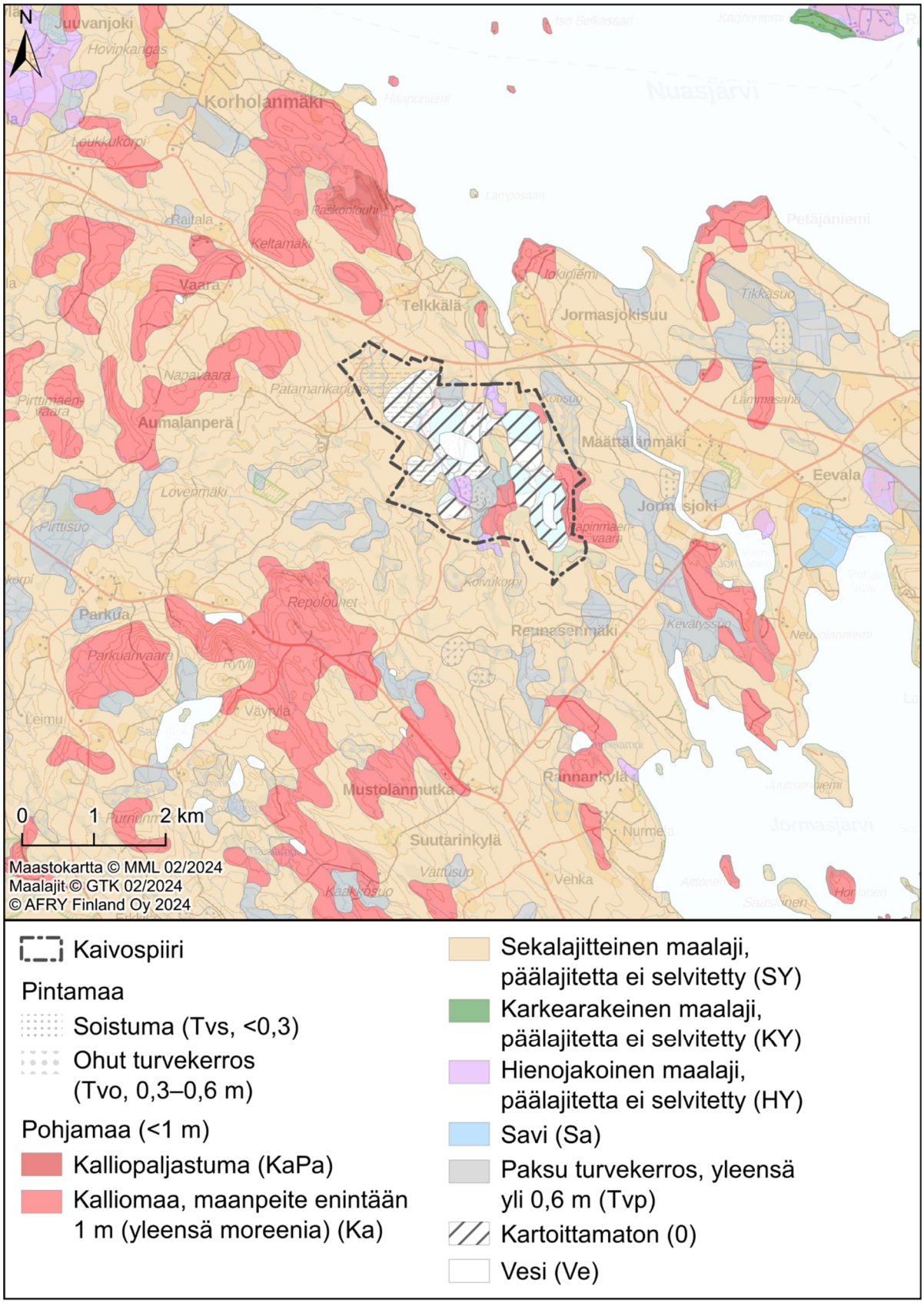
Alueen kallioperä on pääosin biotiittiparaliusketta (kiilleliuske), varsinainen talkkimalmi on talkkimagnesiittikiveä eli vuolukiveä. Kaivospiirin länsireunalla kivilajina on kvartsiitti (kvartsivakka). Biotiittiparaliuske on rakenteeltaan suuntautunut, sedimenttis-syntyinen metamorfinen kivilaji, jonka pääamineraaleja ovat kvartsi, maasälpä ja kiilteet; alkuperältään se on yleensä savisyntyinen. Lisänimensä mukaisesti se sisältää runsaasti biotiittia. Kvartsiitti koostuu nimensä mukaisesti pääosin kvartsista. Talkkimagnesiiitti on metamorfinen kivi, joka koostuu pääasiassa talkista ja karbonaatista (magnesiitti). Alueella tavataan myös

copyright© AFRY Finland Oy

mustaliusketta, ja sen takia alueen maaperä ja pohjavedet sisältävät luontaisesti kohonneita metalli-, arseeni- ja rikkipitoisuuksia.

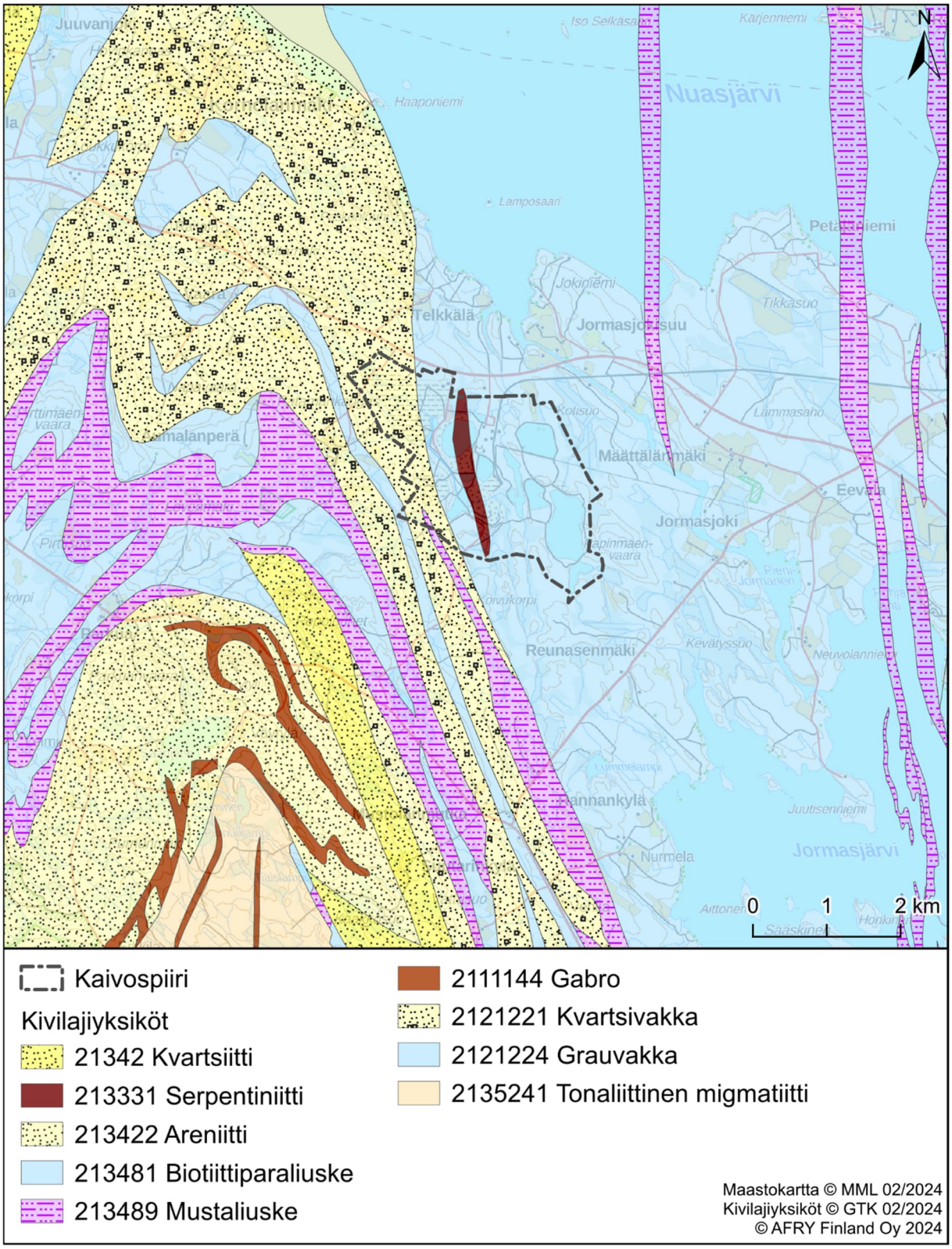
Hankealueen ja sen lähiympäristön yleispiirteinen kallioperäkartta esitetty kuvassa 3-5.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-4. Punasuon kaivosalueen ja sen lähiympäristön maaperän yleispiirteet.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-5. Punasuon kaivosalueen ja sen lähiympäristön kallioperäkartta.

copyright© AFRY Finland Oy

3.6.3 Ruhjeet

Kallion rikkonaisuuden tai rapautumisen on usein havaittu liittyvän ehyempää kalliota korkeampaan vedenjohtavuuteen. Rikkonaisuutta voi esiintyä yleisemmin kallion pintakerroksissa. Lisäksi rikkonaisuutta tavataan kallion hierto- ja ruhjevyöhykkeissä. Nämä vyöhykkeet ovat usein paksuudeltaan ohuita, mutta maanpinnan tasossa ja syvyyssuunnassa jatkuvia. Elementisin kaivosalueen geologisessa mallissa ei ole esitetty ruhjeita geometrisinä piirteinä. Punasuon avolouhoksen geoteknisessä kuvauksessa on mainittu kaksi louhosta leikkaavaa ruhjetta, joista on todettu purkautuvan pohjavettä louhokseen (WSP 2023). Näistä ruhjeista ei ole geometrista kuvausta.

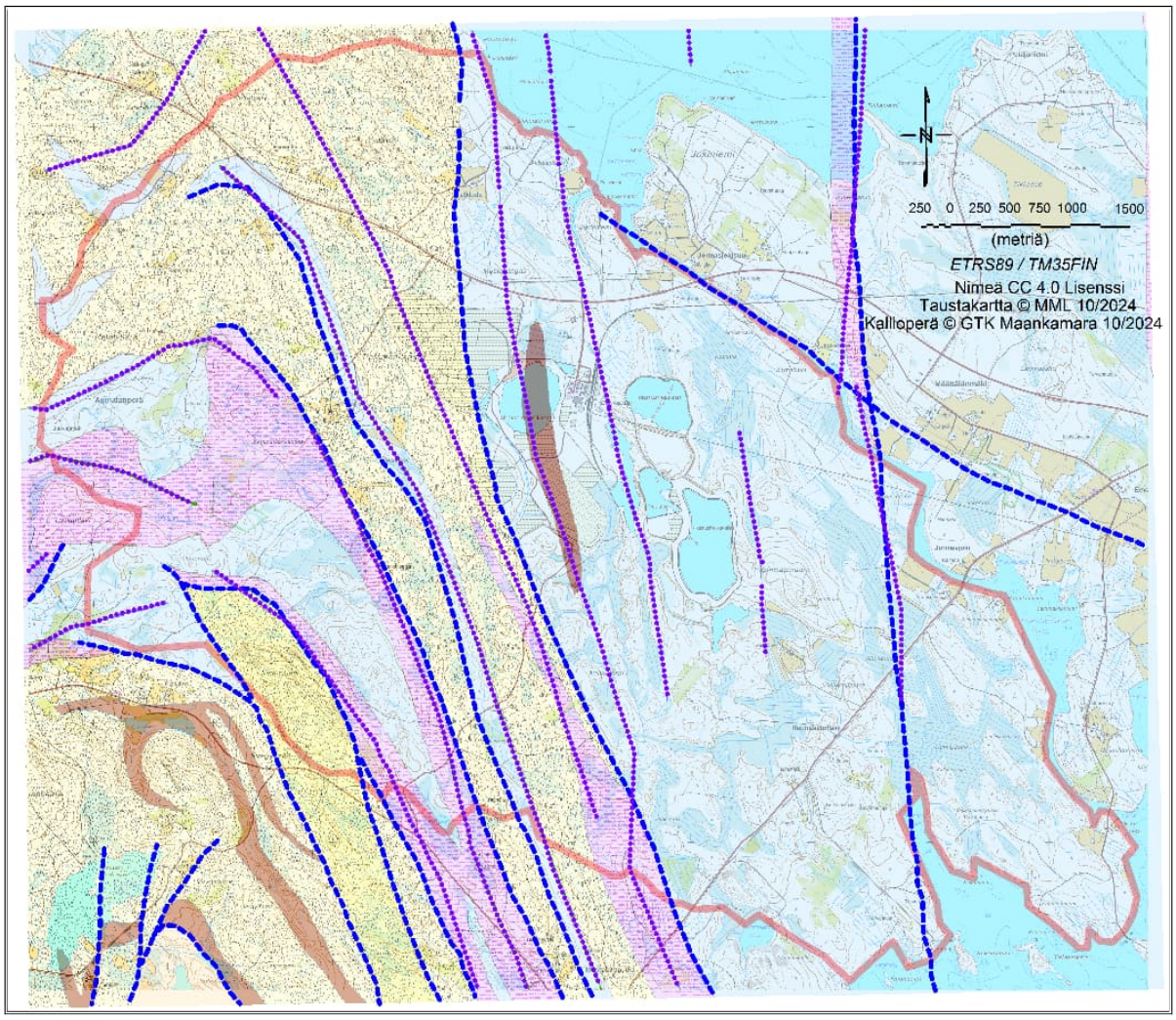
Toinen näistä ruhjeviitteistä on jyrkkäkaateinen ja kulkusuunnaltaan karkeasti pohjois-etelä-suuntainen. Suunta vastaa päärakosuuntaa. Piirre liittyy mustaliuskeeseen ja malmiesiintymän isäntäkivilajiin (serpentiniitti). Piirteen leveys on louhosseinämällä kallion yläosassa noin 30 m. Louhoksen eteläosassa leveys on noin 2 m. Todennäköisesti sama viite lävistää myös Lahnaslammen avolouhoksen, jonka pohjoisseinämällä tähän liittyen on tavattu paksut maapeitteet sekä rikkonaista kalliota. Tämä viite oli Lahnaslammen louhoksen osalta käytössä jo vuoden 2012 hydrogeologisessa mallissa. Vyöhykkeen sijainti on lähellä serpentiniittikivilajin esiintymää.

Toinen Punasuon avolouhoksen rikkonaisuusviitteistä sijaitsee avolouhoksen eteläosassa kiillegneississä. Ruhje on havaittu kahden ylimmän louhintapenkereen korkeudella. Sen on kairareikien perusteella arvioitu jatkuvan etelään louhoksesta. Tarkkaa asentoa ei ole esitetty raportissa (WSP 2023). Lävistyksen leveys on noin 30 m. Kumpaakaan louhoksen ruhjeviitteistä ei ole selvitetty kairareikien rikkonaisuushavaintojen tulkinnan avulla.

Kallioperäkairauksissa tavataan syvemmällä kalliossa rikkonaisuutta (käytännössä malmiesiintymään liittyen). Seismisen taittumisluotauksen tuloksissa Lahnaslammen avolouhoksen pohjoispuolella on kalliotopografian painanteen kohdalla matalan seismisen nopeuden alue, joka myös viittaa ruhjeen olemassaoloon.

Alueellisista ruhjetulkinnoista on saatavilla Geologian Tutkimuskeskuksen karttaesitys ja datasisältö Hakku-palvelussa (GTK 2024). Ruhjeviitteet perustuvat kivilajikontaktien ja niissä havaittavien siirtymien sijaintiin sekä lentogeofysiikan magneettisten mittaustulosten piirteiden tulkintaan (Kuva 3-6). Pääosa karttapalvelussa esitetyistä ruhjeviitteistä liittyy myös mustaliuskekerrosten esiintymiseen tai suuntaukseen. Useimmiten esitetyille piirteille ei ole annettu kaadearviota, joten ne oletetaan tässä työssä pystyiksi.

copyright© AFRY Finland Oy

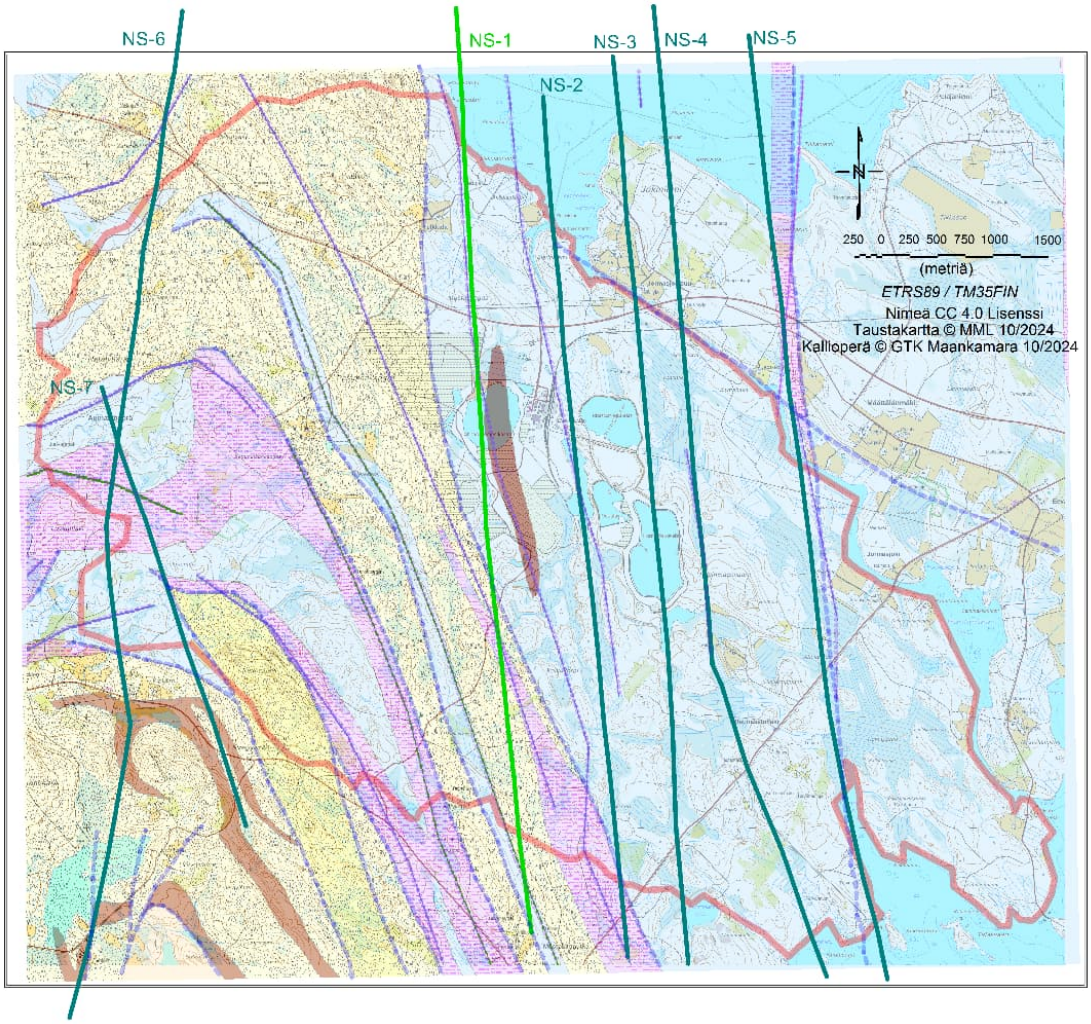


Kuva 3-6. Alueelliset ruhjeviitteet ja tulkitut mustaliuskekerrokset (GTK 2024). Geologian tutkimuskeskuksen karttapalvelussa esitetyt ruhjeet (sininen katkoviiva) ovat pääsääntöisesti pohjois-etelä -suuntaisia ja ne liittyvät usein lähelle tulkittuja mustaliuskekerroksia (lila pisteviiva). Pääsuuntaa leikkaavista mahdollisista ruhjesuuntauksista on esitetty Jormasjoen myötäinen piirre.

Vuoden 2012 hydrogeologista mallinnusta varten oli käytettävissä erillinen Geologian Tutkimuskeskuksessa laadittu (GTK 2001) Lahnaslammen kaivoksen ympäristön ruhjeiden karttaesitys (Kuvat 3-7…3-10). Tässä esityksessä oli maaston topografian ja magneettisen lentomittauksen tulosten perusteella kuvattu pohjois-eteläisen ruhjesuuntauksen lisäksi koillis-lounaiset ja luode-kaakkoiset ruhjesuuntaukset. Kaivosaluetta ympäröivällä kartta-alueella nämä ruhjeviitteet on esitetty pääsääntöisesti valuma-alueiden reunoilta reunoille jatkuvina. Vuoden 2012 hydrogeologisessa numeerisessa mallissa vedenjohtavuuden kannalta merkityksellisinä malliin sisällytettiin kolme Lahnaslammen avolouhosta lävistävää ruhjeviitettä, joista yksi oli pohjois-etelä -suuntainen, toinen luode-kaakko-suuntainen ja kolmas koillis-lounaissuuntainen.

copyright© AFRY Finland Oy

Pohjois-etelä-suuntaisista rakenneviitteistä on esitetty kartalla seitsemän (Kuva 3-7). Numerointi on tehty tätä työtä varten. Piirre NS-1 on aikaisemmin käytetty 2012 vuoden numeerisessa hydrogeologisessa mallissa. Se on ainoa, joka lävistää Lahnaslammen avolouhoksen, ja ainoa, josta oli tehty suoria havaintoja. Tämän työn hydrogeologisessa mallissa käytetään lisäksi viitteitä NS-2 ja NS-3, jotka kulkevat kaivosalueen ja rikastushiekka-altaiden kautta. Näistä piirteistä ei ole suoria havaintoja kairauksista. Piirteet ovat lisäyksiä 2012 malliin.

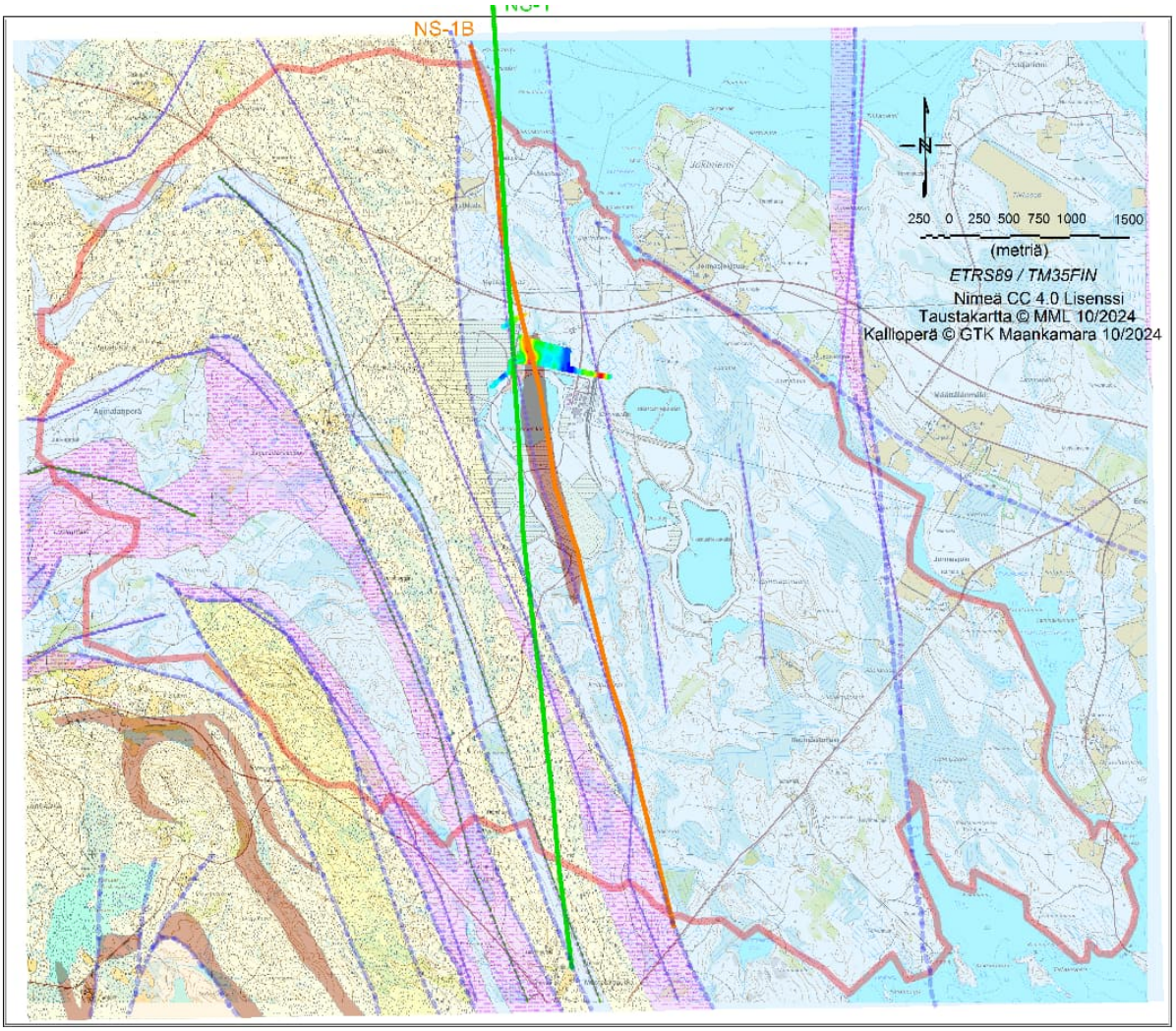


Kuva 3-7. Vuoden 2012 hydrogeologisessa mallissa tarkastellut pohjois-etelä -suuntaiset ruhjeviitteet (GTK 2001). Vaaleanvihreällä esitetty NS-1 käytettiin vuoden 2012 mallissa. Nykyiseen malliin sisällytetään myös tumman vihreällä esitetyt NS-2 ja NS-3. Piirteitä NS-4, NS-5, NS-6 ja NS-7 ei oteta malliin mukaan. Himmeällä värillä on esitetty GTK:n karttapalvelun alueelliset ruhjeviitteet ja mustaliuskeviitteet (Kuva 3-6).

Tätä työtä varten vuoden 2012 hydrogeologisen mallin pohjois-eteläiselle piirteelle NS-1 ehdotetaan vaihtoehtoista sijaintia (Kuva 3-8) siten, että piirre NS-1B kulkee seismisen taittumisluotauksen tuloksista tulkitun maapeitepaksunnoksen ja

copyright© AFRY Finland Oy

matalan seismisen nopeuden sijainnin kautta, myötää GTK:n karttapalvelun mustaliuskepiirrettä ja serpentiniittiä, sekä suuntautuu Punasuon louhoksen kautta. Vaihtoehto NS-1B on esitetty oranssilla viivalla (Kuva 3-8).

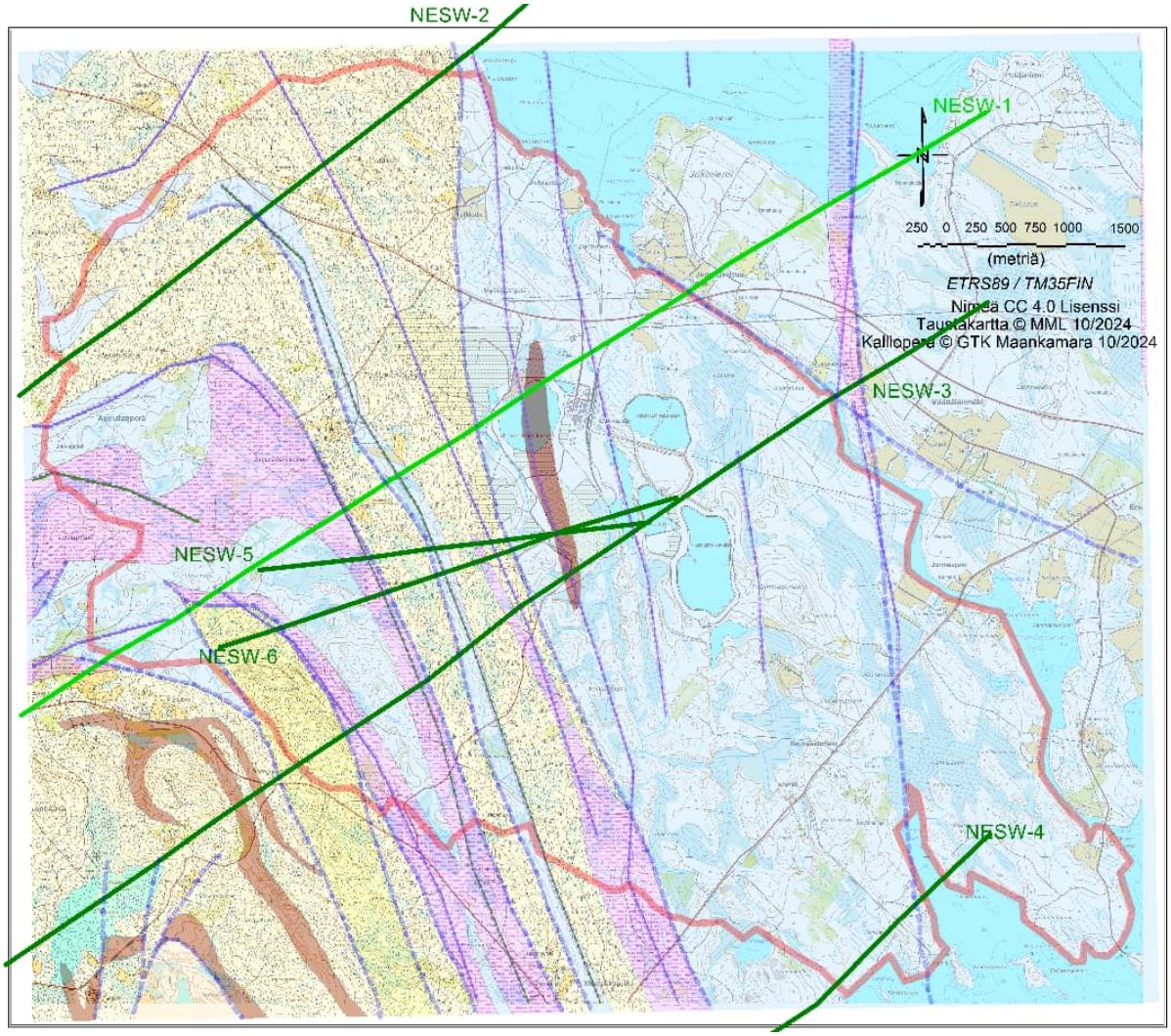


Kuva 3-8. Vaihtoehtoinen NS-1 ruhjepiirteen esitys NS-1B (oranssi viiva), joka poikkeaa vuoden 2012 hydrogeologisessa mallissa käytetystä. Tämä piirre sopii paremmin yhteen tulkitun mustaliuskeen, Lahnaslammen avolouhoksen ja Punasuon avolouhoksen ruhjeviitteiden ja kuvassa esitettyjen seismisten taittumisluotausten tulosten kanssa. Piirrettä NS-1 (vihreä viiva) ei käytetä. Tämä on muutos vuoden 2012 ja 2024 hydrogeologisten malligeometrioiden välillä.

Vuoden 2012 hydrogeologista mallia varten tarkasteltiin GTK:n (GTK 2001) kohdekohtaista ruhjeviitetulkintaa myös koillis-lounais-suuntaisten piirteiden osalta (Kuva 3-9). Näistä piirteistä tässä työssä tunnuksella NESW-1 esitetty pidetään myös tässä työssä ennallaan. Lisäksi otetaan mukaan Punasuon louhosta ja kaivosaluetta etelämpänä lävistävä NESW-3 sekä siihen liittyvät NESW-5 ja NESW-6. Yhdestäkään näistä piirteistä ei ole suoria havaintoja geofysiikan

copyright© AFRY Finland Oy

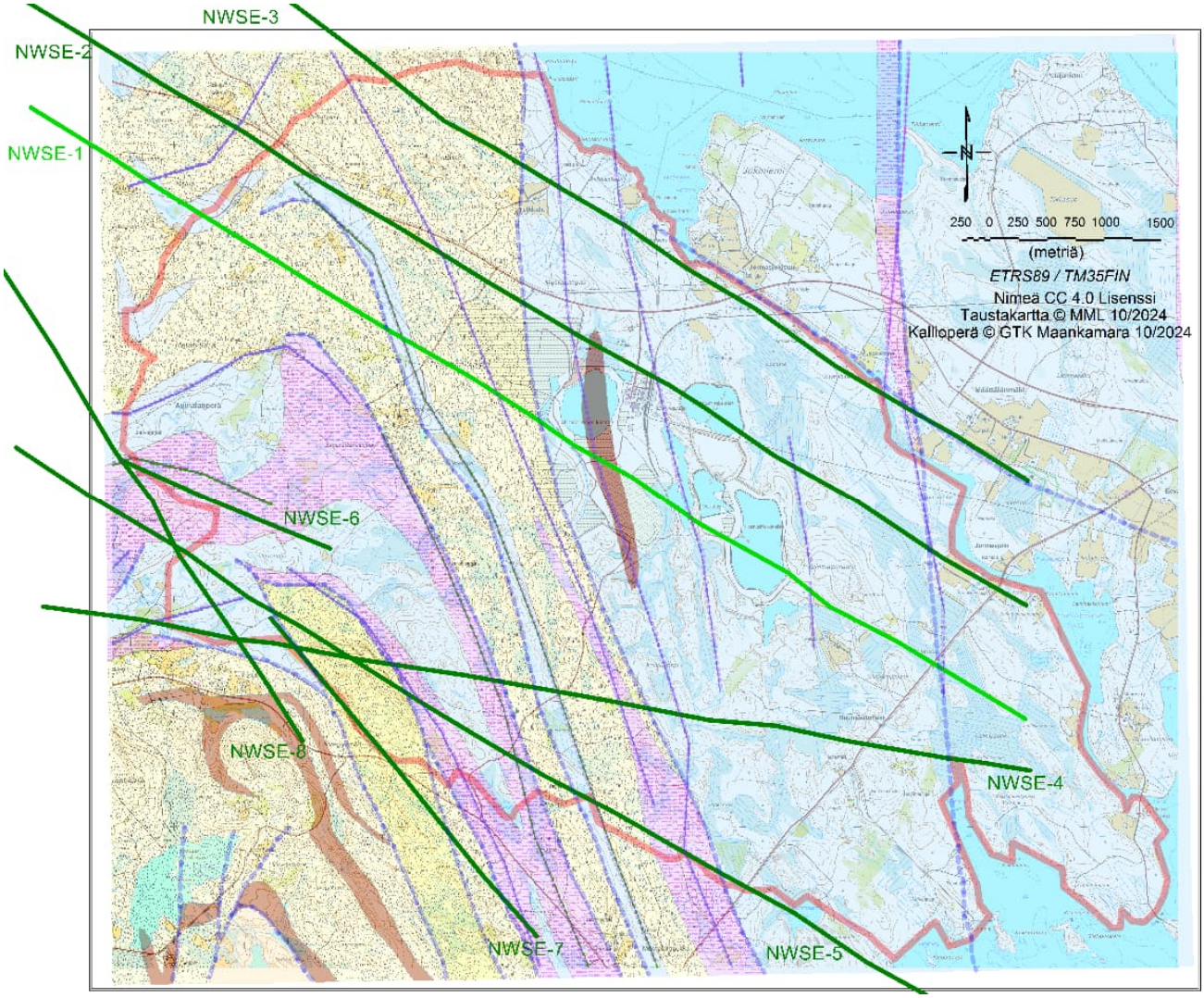
mittausten, kairausten tai louhoskartoituksen osalta. Piirteet NESW-4 ja NESW-2 ovat etäällä kaivosalueesta, joten niitä ei oteta malliin mukaan.



Kuva 3-9. Vuoden 2012 hydrogeologista mallia varten tarkastellut koillis-lounais-suuntaiset ruhjeviitteet (GTK 2001). Vaaleanvihreä NESW-1 leikkaa Lahnaslammen avolouhosta ja sitä käytettiin vuoden 2012 mallissa. Tumman vihreät NESW-3, NESW-5 ja NESW-6 lisätään tämän työn malliin. Piirteitä NESW-2 ja NESW-4 ei käytetä.

Edelleen vuoden 2012 hydrogeologista mallia varten tarkasteltiin GTK:n paikallisen ruhjeviitetulkinnan luode-kaakko-suuntaisia viitteitä (Kuva 3-10). Näistä piirteistä pidetään tässä työssä tunnuksella NWSE-1 esitetty ennallaan. Lisäksi otetaan mukaan kaivosaluetta pohjoisempana lävistävä NWSE-2. Kummastakaan näistä ei ole suoria havaintoja geofysiikan mittausten, kairausten, louhoskartoitusten tai vedenjohtavuusmittausten osalta. Piirre NWSE-3 rajaa mallinnusaluetta koillisessa. Sitä ei oteta malliin mukaan. Piirteet NWSE-4….NWSE-8 sijaitsevat alueen etelä- ja lounaisreunalla. Niitä ei oteta malliin mukaan.

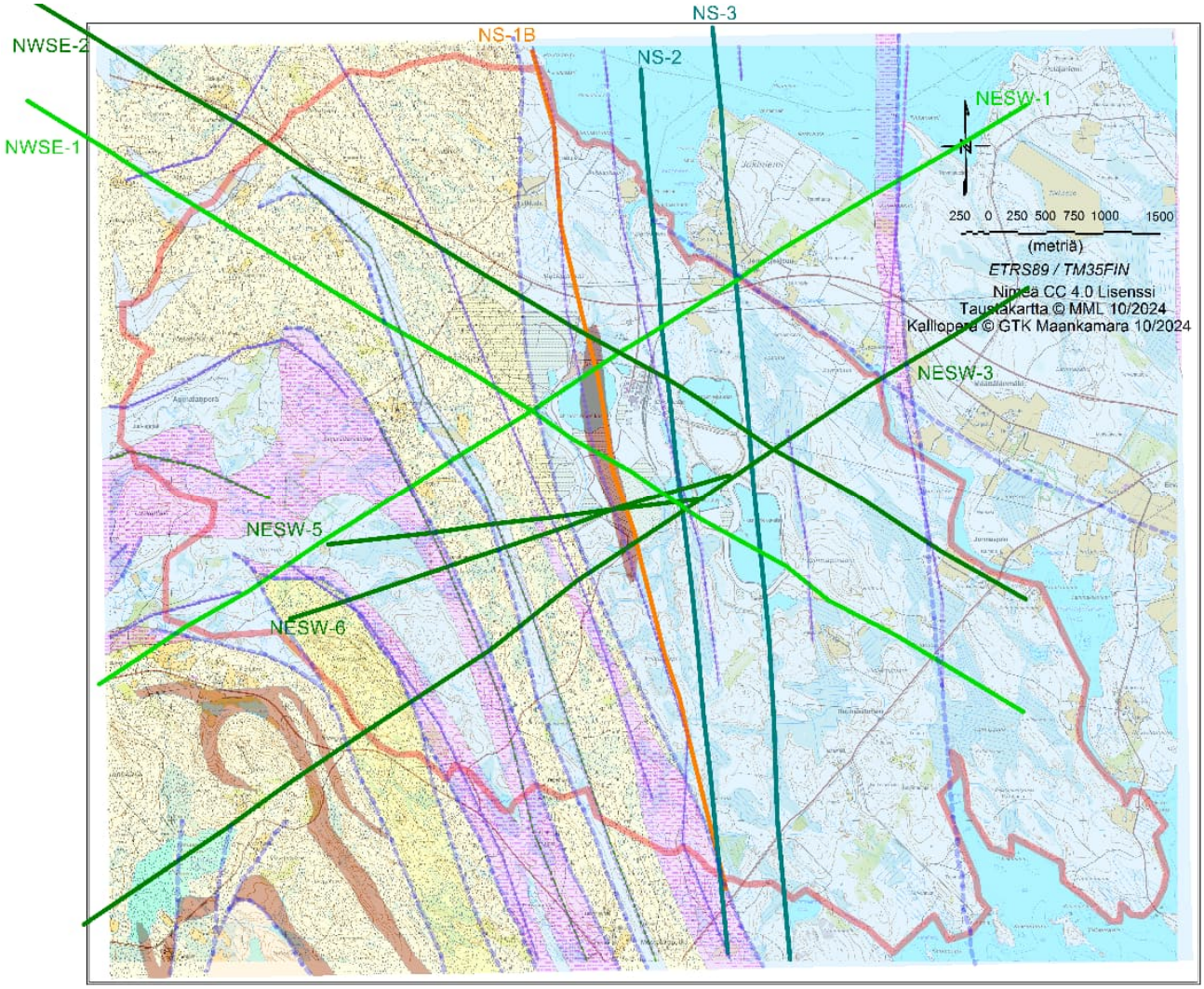
copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-10. Vuoden 2012 hydrogeologista mallia varten tarkastellut luode-kaakko-suuntaiset ruhjeviitteet (GTK 2001). Vaaleanvihreä NWSE-1 kulkee läheltä Lahnaslammen eteläreunaa. Sitä käytettiin vuoden 2012 mallissa. Piirteitä NWSE-2 …NWSE-8 ei käytetty aiemmin. Tämän työn malliin voidaan lisätä piirre NWSE-2, joka lävistää kaivosaluetta Lahnaslammen avolouhoksen pohjoispuolella. Muita ei käytetä tämän työn mallissa.

Kuvassa 3-11 esitetään kootusti tämän työn malliin sisällytettävät ruhjeviitteet. Viitteet esitetään mallissa kauttaaltaan jatkuvina. Niiden ominaisuuksia voidaan muokata tarvittaessa jatkuvuuden ja vedenjohtavuuden asettamiseksi. Vedenjohtavuudesta ei ole havaintotietoja. Muiden kuin NS-1B piirteiden osalta ei ole olemassa suoria havaintoja olemassaolosta, sijainnista tai geometriasta.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-11. Tämän työn mallissa käytettävät ruhjeviitteet. Piirre NS-1B on muutettu vuoden 2012 mallin vastaavan piirteen esityksestä hiukan idemmäs ja kulultaan vastaamaan havaintoja sekä mustaliuskekerroksen tulkintaa (oranssi viiva). Vaalean vihreällä esitetyt NESW-1 ja NWSE-1 olivat vuoden 2012 mallissa mukana. Tumman vihreällä esitetyt NS-2 ja NS-3, NESW-3, NESW-5 ja NESW-6 sekä NWSE-2 lisätään tämän työn malliin.

Ruhjeviitteet (GTK 2001) käsiteltiin vuoden 2012 hydrogeologisessa mallissa pystyasentoisina, mallinnusalueen reunoille jatkuvina ja kauttaaltaan 10 m paksuina. Niiden vedenjohtavuus asetettiin mallissa korkeammaksi kuin ympäröivän kallion.

Ruhjeita koskevat ominaisuudet ovat voimakkaasti yksinkertaistettuja ja konservatiivisia. Lukuun ottamatta pohjois-etelä-suuntaista Lahnaslammen avolouhosta lävistävää ruhjetta (viite NS-1B), yhdestäkään piirteestä ei ole suoria kairaushavaintoja, geofysikaalisia havaintoja tai geologista 3D mallia. Ruhjeista ei ole myöskään vedenjohtavuuden mittaustuloksia. Tyypillisesti ruhjeiden ominaisuudet vaihtelevat niiden kulun suunnassa siten että ne voivat haarautua, päättyä, ja niiden paksuus voi vaihdella. Kulkua vastaan kohtisuora paksuus,

copyright© AFRY Finland Oy

rikkonaisuus ja vedenjohtavuus pienenevät syvyyden kasvaessa. Avolouhokseen tapahtuvan pohjaveden purkautumisen kannalta ruhjeilla on pohjaveden kulkeutumista edistävänä eniten merkitystä muutaman sadan metrin etäisyydelle louhoksen seinämästä.

Vuoden 2024 numeerista hydrogeologista mallinnusta varten kaikki aiemmat GTK:n esittämät kohdekohtaiset ruhjeviitteet poimittiin karttaesitykseen. Piirteitä verrattiin GTK:n karttapalvelun alueellisiin 1:200 000 mittakaavan ruhjeiden esityksiin ja Finstruct-ruhjeviitetietoihin. Näiden esitysten välillä on pieniä eroja. Leikkaavat NW-SE ja SW-NE -suuntaiset piirteet ovat yleistä karttaesitystä täydentäviä. Pohjois-etelä-suuntainen ruhje vaikuttaa havaintojen perusteella olevan hiukan (100 m) idempänä kuin aiemmassa hydrogeologisessa mallissa. Se vaikuttaa kulkevan Lahnaslammen ja Punasuon avolouhosten kautta ja lähellä serpentiniittiesiintymän kontaktia. Siksi tämän ruhjeen sijaintia ja kulkua mallissa on muutettu vuoden 2012 mallin tilanteesta siten, että ruhje lävistää molemmat louhokset. Tämän avulla voidaan arvioida ruhjeisuuden vaikutusta Lahnaslammen louhoksesta Punasuon louhokseen suuntautuvaan virtaukseen. Vähäisillä sijainnin ja asennon eroilla ei ole merkitystä poistettavan pohjaveden määrän suuruusluokan kannalta.

Vuoden 2012 malliin verrattuna, kaksi Papinlammen rikastushiekka-altaan kautta kulkevaa N-S suuntaista ruhjeviitettä on lisätty malliin. Lisäksi malliin on lisätty kolme NE-SW suuntaista ruhjeviitettä, jotka kulkevat läheltä Punasuon avolouhosta, sekä toinen NW-SE suuntainen ruhjeviite, joka leikkaa kaivosaluetta lähellä avolouhoksia niiden pohjoispuolella.

Hydrogeologisessa numeerisessa mallinnuksessa on mukana yhteensä 10 ruhjetta, joista viisi leikkaa Punasuon louhosta. Varmennetut geometriset ja vedenjohtavuutta koskevat tiedot ruhjeista kuitenkin puuttuvat. Ruhjeiden merkitystä on mahdollista testata mallissa muuttamalla niiden ominaisuuksia.

3.7 Pohjavesi

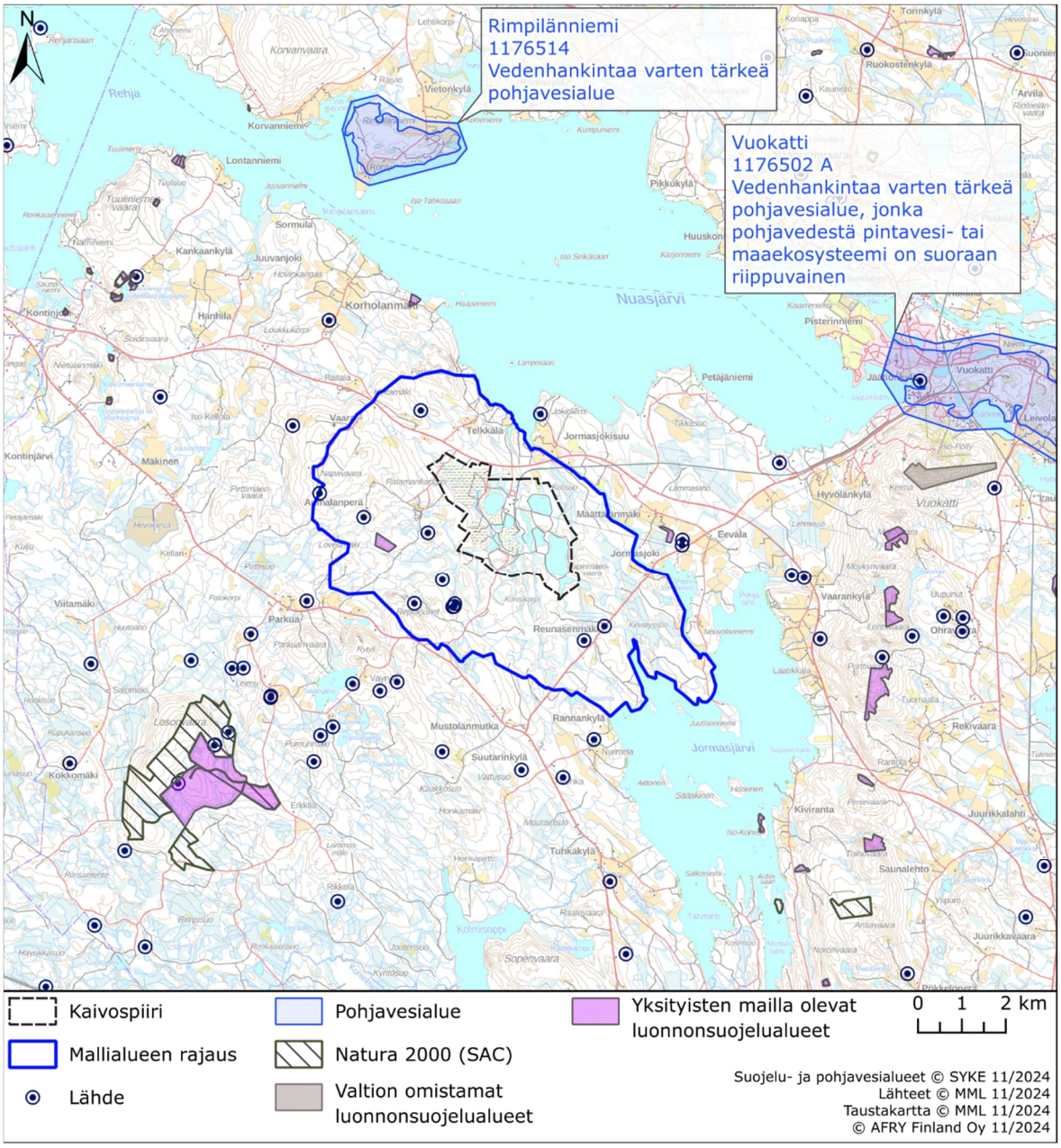
Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukset (ELY-keskukset) luokittelevat pohjavesialueet sen mukaan, kuinka hyvin ne soveltuvat vedenhankintaan, sekä mahdollisen suojelutarpeen mukaan. Luokkia on kolme: 1-luokkaan kuuluvat vedenhankintaa varten tärkeät pohjavesialueet, joiden vettä käytetään tai on tarkoitus käyttää yhdyskunnan vedenhankintaan taikka talousvetenä enemmän kuin keskimäärin 10 kuutiometriä vuorokaudessa tai yli viidenkymmenen ihmisen tarpeisiin. 2-luokkaan kuuluvat muut vedenhankintakäyttöön soveltuvat pohjavesialueet, jotka pohjaveden antoisuuden ja muiden ominaisuuksien perusteella soveltuvat 1 kohdassa tarkoitettuun käyttöön. E-luokkaan kuuluvat

copyright© AFRY Finland Oy

pohjavesialueet, joiden pohjavedestä pintavesi- tai maaekosysteemi on suoraan riippuvainen.

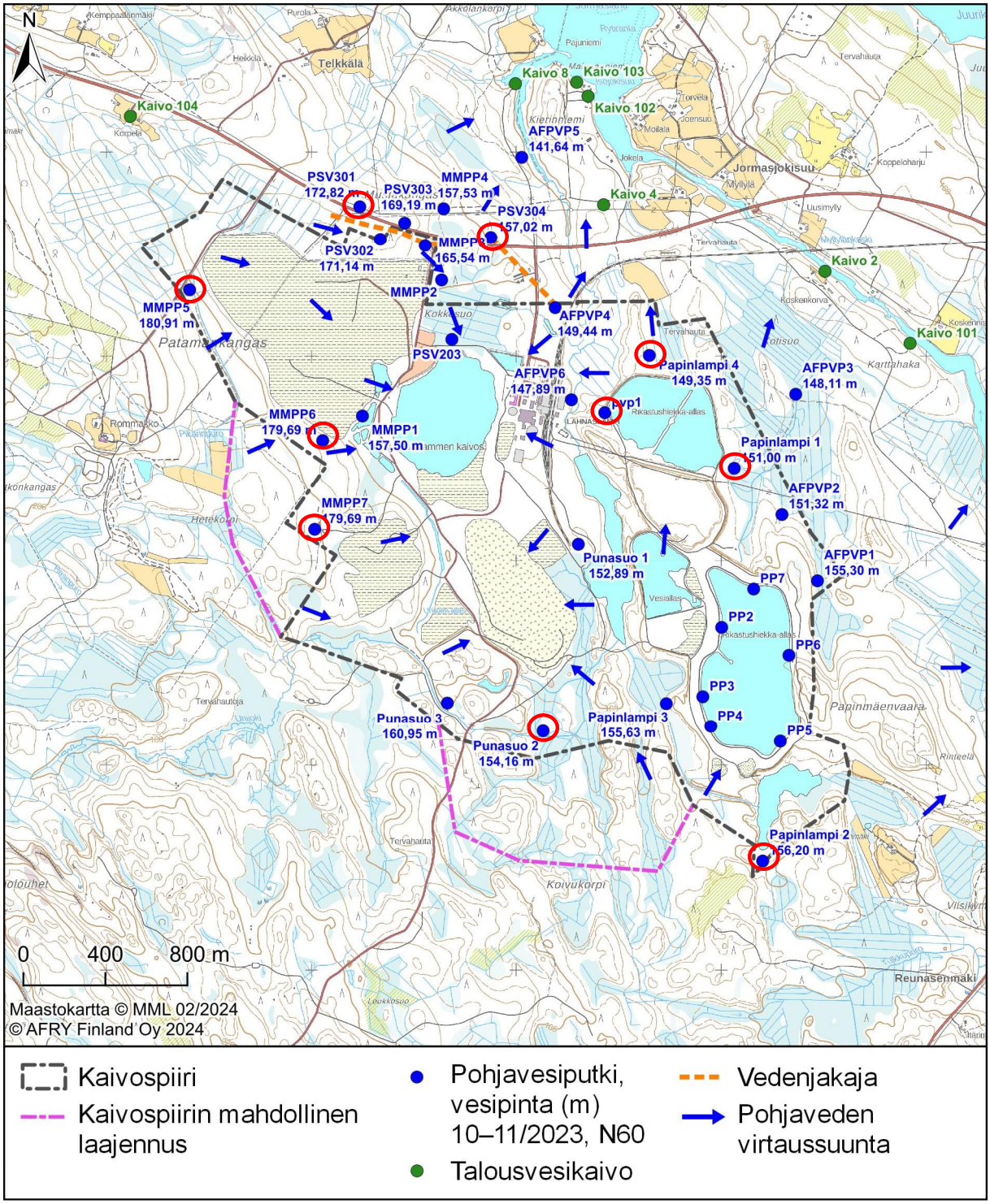
Punasuon kaivosalueella tai sen välittömässä läheisyydessä ei ole luokiteltuja pohjavesialueita. Lähimmät luokitellut pohjavesialueet Vuokatti 9 (1176502A, luokka 1E) ja Rimpilänniemi 6 (1176514, luokka 1) sijaitsevat noin 8–9 kilometrin etäisyydellä kaivosalueen itä- ja pohjoispuolella. Läheisyydessä on muutamia talousvesikaivoja, joista muutama on ollut seurannassa. Lähimmät pohjavesialueet, luonnonsuojelualueet ja lähteet on esitetty kuvassa 3-12. Tarkkailuohjelmassa olevien kaivojen ja pohjavesiputkien sijainnit sekä vesipinnat 10–11/2023 on esitetty kuvassa 3-13 ja pohjavesipinnan seurantatulokset vuosilta 2022–2024 kuvassa 3-14. Mitattuja pohjavesipintoja käytetään apuna pohjavesimallin kalibroinnissa (luku 4.5).

copyright© AFRY Finland Oy



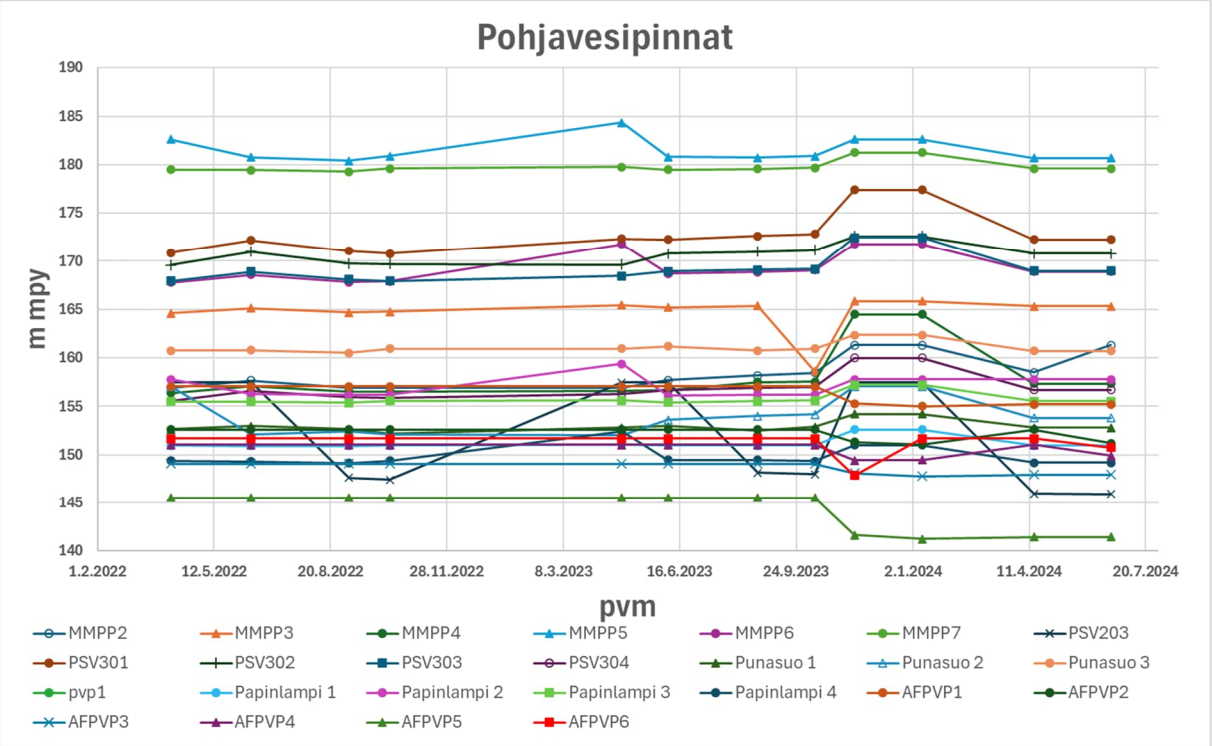
Kuva 3-12. Punasuon kaivosalueen lähimmät pohjavesialueet, luonnonsuojelualueet ja lähteet.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-13. Pohjavesiputket ja talousvesikaivot sekä pohjaveden yleispiirteinen virtauskuva. Putket PP2–PP7 ovat padon tarkkailuputkia. Pohjavesiputket, joissa on tehty vedenjohtavuusmittaus (slug-testi) on merkitty punaisella ympyrällä. (AFRY Finland Oy 2024)

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-14. Pohjavesipinnan seurantatulokset 2022–2024.

3.8 Maaperän syvyysmalli

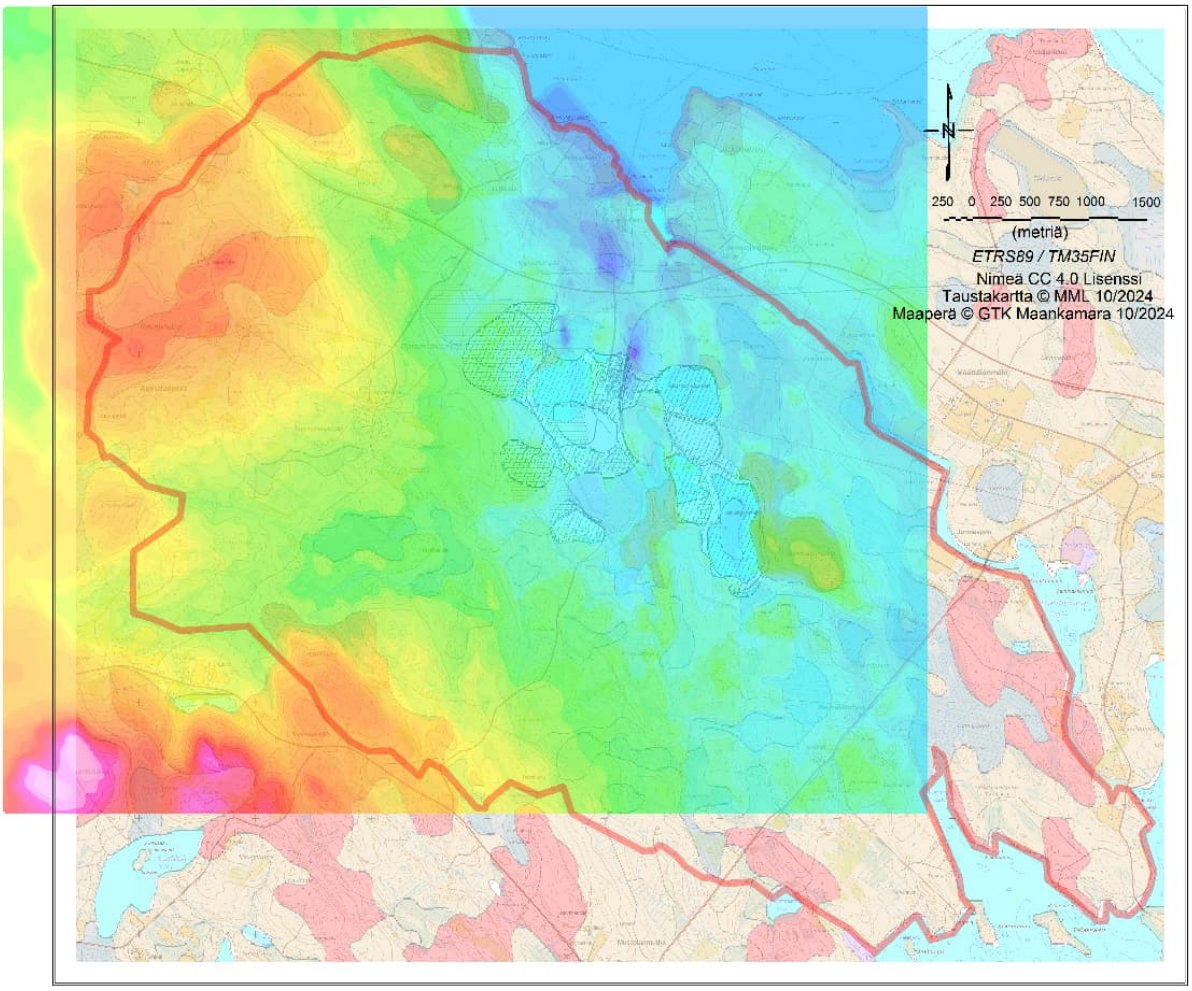
Maaperän paksuuden ja kalliopinnan syvyyden mallinnus perustuu maastokarttoihin (Maanmittauslaitos), geologisiin karttoihin (kalliopaljastumat, GTK Maankamara) sekä kairarei'istä ja pohjavesiputkista mitattuihin maaperäkerrosten paksuuksiin ja geofysiikan mittaustuloksista tulkittuihin maakerrospaksuuksiin.

Maaperän kerroksista mallinnettiin maapeitteen kokonaispaksuus (kalliotopografia). Mallinnus tehtiin hydrogeologisen numeerisen mallin reunaviivan sisäpuoliselle alueelle.

Maapeitemalli säilytettiin sisällöltään samankaltaisena kuin vuoden 2012 numeerisessa hydrogeologisessa mallissa käytetty kalliotopografian malli (Kuva 3-15). Malli saatiin tekstitiedostosta "Kallio1968_out.xyz", joka oli laadittu 2012 hydrogeologisen numeerisen mallin koostamisen yhteydessä (Pöyry Finland Oy 2012). Malli edustaa kaivostoiminnan aloitusta edeltävää kalliopinnan topografiaa. Sen vertailutasona on laadittaessa ollut vuoden 1968 maanpinnan korkeusasema.

Malliin päivitettiin uusien kairareikätietojen maapeitepaksuus ja täydennetyssä kartoituksessa esitetyt kalliopaljastumat. Maapeitepaksuuden mallia laajennettiin kattamaan mallinnusalueeseen lisätyt alueet.

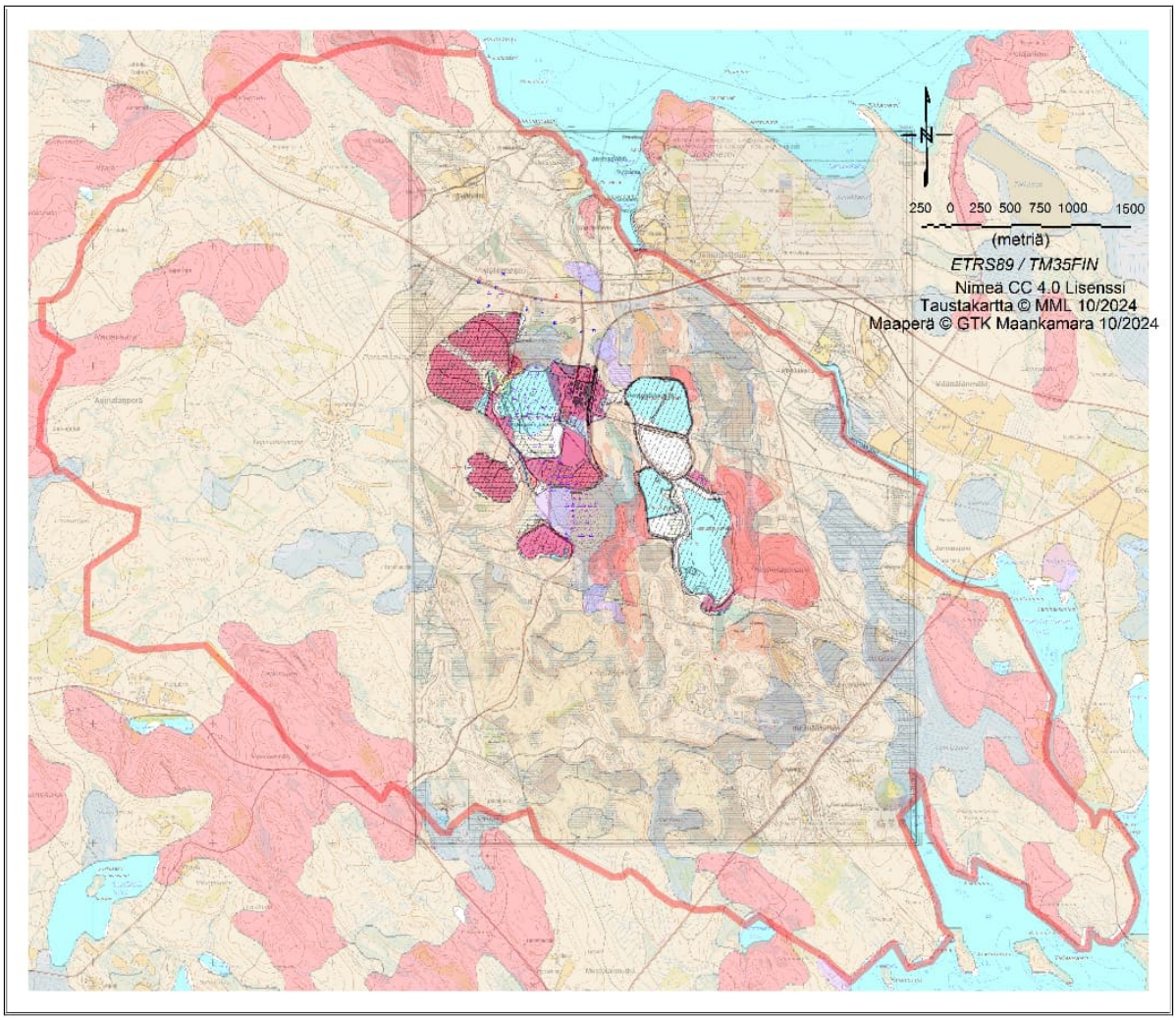
copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-15. Vuoden 2012 hydrogeologisessa mallinnuksessa käytetty kalliopinnan topografia.

Vuoden 2012 numeerisessa hydrogeologisessa mallissa työn lähtöaineistona olivat GTK:n esittämä maapeitepaksuuden malli, joka saatiin käyttöön CAD-tiedostona. Tässä aineistossa olivat mukana painovoimamittauksista tulkitut maakerrospaksuudet rajatulla alueella Lahnaslammen kaivosalueen ja Nuasjärven välillä, sekä avolouhoksen pohjoispuolen maatutkaluotausten ja seismisten taittumisluotausten maapeitepaksuuden tulkinnat. Malliin lisättiin havaintoina kalliopaljastumien reunat sekä kairareikien ja maaperätutkimusten porareikien ja pohjavesiputkien maapeitepaksuushavainnot (Kuva 3-16). Aikaisemmassa mallissa kalliopaljastumien reunoilta syvennettiin kalliotopografiaa 10 % kaltevuudella tasoon, jossa maapeitepaksuus saavutti 10 m. Kaikkialla muualla käytettiin havaintojen puuttuessa keskimääräistä kalliopinnan syvyyttä 10 m maanpinnasta. Aiempi kalliotopografian malli oli saatavilla numeerisessa muodossa, joten se käytettiin tämän työn tarkastelun lähtöaineistona.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-16. Numeerisen hydrogeologisen mallinnusalueen maaperätiedot (GTK 2024, kaivosyhtiön aiemmin teettämä yksityiskohtainen maaperäkartta, sekä kairareikien, pohjavesiputkien, geofysiikan mittausten tulkintojen ja maaperän porausten maapeitepaksuustietojen sijainnit. Avokallioalueet on merkitty punaisella värillä.

Kairaustiedot kattavat lähinnä kaivosalueen. Kalliokairauksen maaputken syvyystiedot voivat liioitella kalliopinnan syvyyttä rapautuneen pintakallion alueella. Maaperän havaintotiedot ovat melko harvassa. Maatutkaluotausten tuloksia on saatavilla lähinnä kaivoksen pohjoispuolella. Maatutkamenetelmällä ei saada tietoa kalliopinnasta yli 8–10 m paksujen maakerrosten kohdalta. Moreenin ja kallion rajapinnan havaitseminen maatutkatuloksista ei aina ole varmaa.

Seismisiä tutkimuksia on myös vain Lahnaslammen avolouhoksen pohjoispuolelta. Seismisen luotauksen tuloksissa maakerrospaksuus voi olla todellista syvempi rapautuneen pintakallion alueilla, koska tiivistä moreenia ja rapautunutta kalliota voi olla vaikea erottaa toisistaan seismisen nopeuden perusteella. Painovoimatutkimuksilla saadaan viitteet lähinnä paksuimpien maakerrosten

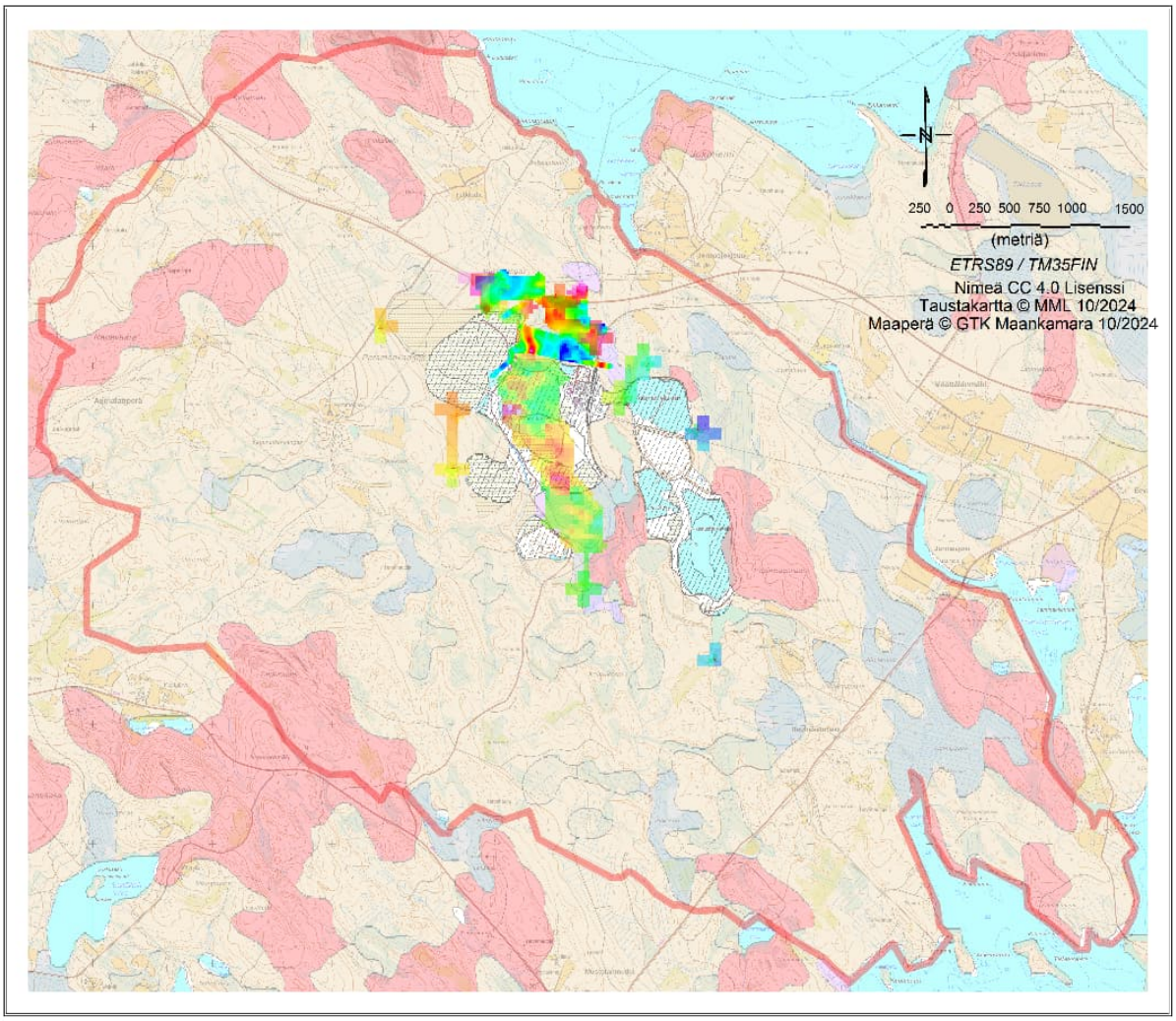
copyright© AFRY Finland Oy

sijainnin osalta. Näistä tuloksista ei ollut saatavilla numeerista tulkintadataa, vaan aiempi GTK:n laatima kalliotopografian malli, jossa tulokset ovat mukana.

Aiemmat lähtötiedot sekä uudet kairaustiedot ja paljastumatiedot tarkasteltiin aiemman kalliotopografian mallin rinnalla. Kalliotopografian ja kaivostoimintaa edeltäneen maanpinnan topografian erotuksesta luotiin 40 × 40 m pistetiheydelle säännöllinen maapeitepaksuuden pisteverkko. Laajennetulle mallialueelle asetettiin maapeitepaksuus nollaksi (0 m) kalliopaljastumien reunoille ja reunojen sisälle. Maapeitepaksuutta kasvatettiin reunoilta siten että etäällä paljastumista paksuus on 10 m aiemman mallin alueella ja etelässä laajennetulla alueella 3 m.

Aiemmin esitetyn maakerrosmallin aluerajauksen sisällä uusien havaintopisteiden vaikutus malliin muokattiin pisteverkkoon (Kuva 3-17). Aiemmat havaintopisteet tarkistettiin. Tuloksena saatu päivitetty ja laajennettu pisteverkko luotiin säännölliseksi kriging-menetelmällä. Pisteverkko vähennettiin kaivostoimintaa edeltäneestä maanpinnan topografiasta, jolloin saatiin kalliopinnan korkeusasema. Tämänhetkiset kaivosalueen avolouhosten, sivukivialueiden, rikastushiekka-altaiden ja vesivarastoaltaiden sekä patojen pinnan muodot on saatu alueen CAD-tiedostoista.

copyright© AFRY Finland Oy



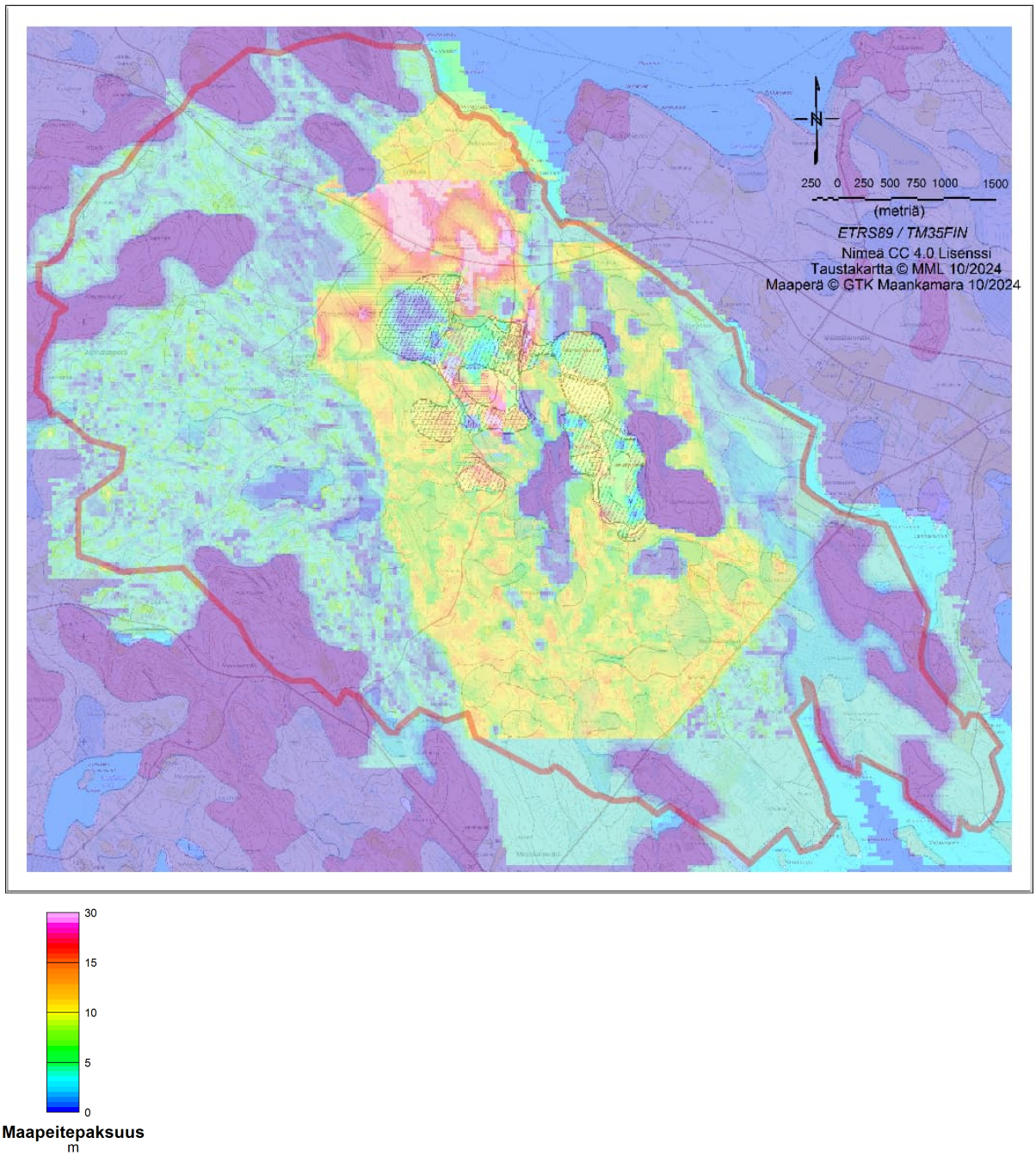
Kuva 3-17. Maapeitteen paksuushavaintojen arvot paikallisesti esitettyinä väripintakarttoina. Lähinnä kairauksista on saatu uusia maapeitepaksuuden tietoja.

Kalliopaljastumien alueet rajattiin Geologian tutkimuskeskuksen Maankamara-karttapalvelun avulla maakerrospaksuuksiksi 0 m. Muualla kuin havaintojen alueella maakerrospaksuudeksi asetettiin 10 m, kuitenkin siten että noin 100 m matkalla kalliopaljastumien reunoista paksuutta vähennettiin asteittain. Aiemman mallin kattamalla alueella, mutta havaintojen ulkopuolella lännessä ja pohjoisessa käytettiin mallista saatua maaperän paksuutta, paitsi paljastumien alueilla, joissa paksuus asetettiin nollaksi.

Vesistöjen reunojen kohdalla maakerroksen paksuudeksi merkittiin myös arvo 10 m. Nuasjärven rannan osalta tarkasteltiin järven pohjan syvyysaineistoa, ja reunan alueella kalliosyvyyttä muokattiin pohjan syvyyden alapuolelle. Aiemman mallin kattaman alueen ulkopuolella mallinnusalueen eteläosassa maaperäpaksuudeksi asetettiin 3 m.

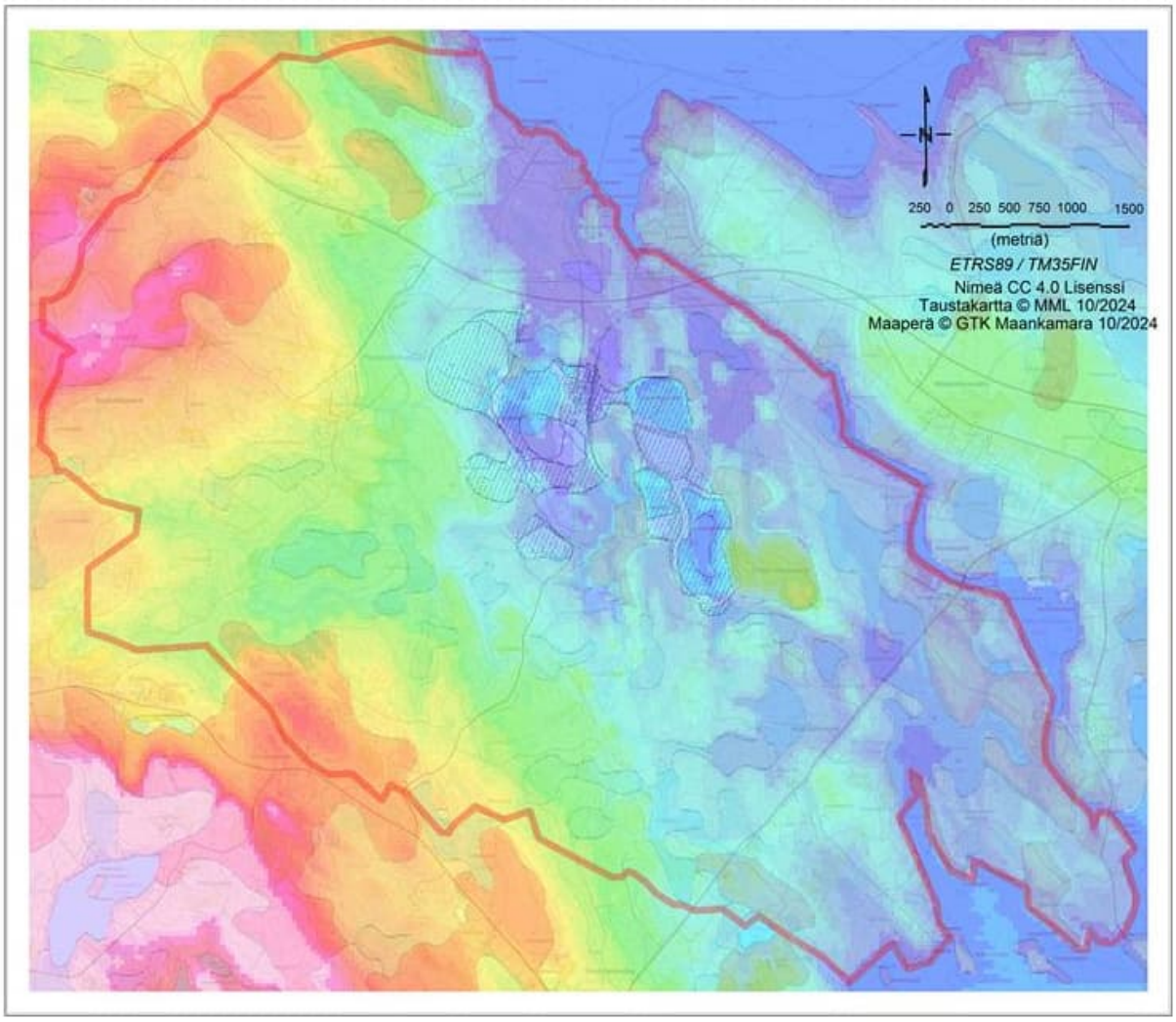
copyright© AFRY Finland Oy

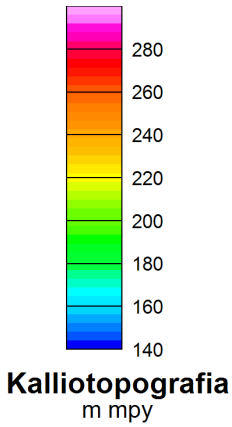
Maakerroksen kokonaispaksuudesta interpoloitiin 40 × 40 m pisteverkko käyttämällä havaintojen ja annettujen paksuusarvojen krigingiä (Kuva 3-18). Lopullisesta pisteverkosta varmistettiin, ettei maaperän paksuus missään kohtaa ole negatiivinen. Maakerroksen pisteverkon arvot vähennettiin maanpinnan topografiasta, jolloin saatiin kalliopinnan topografian pisteverkko (Kuva 3-19).



Kuva 3-18. Maakerrospaksuuden pisteverkko. Siniset alueet mallinnusalueen ulkopuolella ja paljastumien alueella ovat paksuudeltaan 0 m. Havaintoja on eniten kaivosalueen sisällä ja pohjoispuolella. Paksuimmat 15–25 m maakerrokset on tavattu kairauksissa ja seismisten mittausten tuloksista. Aiemman mallin alueella enemmän keltaista 5–10 m maapeitepaksuutta esiintyy alavien maastonkohtien seuduilla. Laajennetulla mallin alueella etelässä on annettu ohuemmat maapeitteet.

copyright© AFRY Finland Oy





Kuva 3-19. Aiempaan kalliotopografian malliin, lisättyihin havaintopisteisiin ja kalliopaljastumien alueisiin perustuva interpoloitu kalliotopografian pisteverkko. Lisäpisteitä on kaikkialla 40 × 40 m verkossa puuttuvien havaintojen kohdalla.

Kallion topografian malli (kalliotopografia=maaperän syvyys) tallennettiin 40 × 40 m korkeusmalliksi X, Y, Z muotoisena tekstitiedostona.

copyright© AFRY Finland Oy

3.9 Kallioanalyysi

Kallion vedenjohtavuus riippuu rakoilusta. Rakojen vedenjohtavuuteen vaikuttavat rakojen avoimuus, täytteisyys, jatkuvuus sekä rakojen liittyminen toisiin rakoihin. Tämän takia reikätietokannassa raportoituja rakoiluun liittyviä tietoja voidaan tarkastella ja analysoida merkkinä vedenjohtavuudesta ja sen vaihtelusta kallioperässä. Tässä työssä reikätietokannan RQD-aineistoa käytettiin kallioperän vedenjohtavuuden syvyyssuuntaisen vaihtelun arvioimiseen.

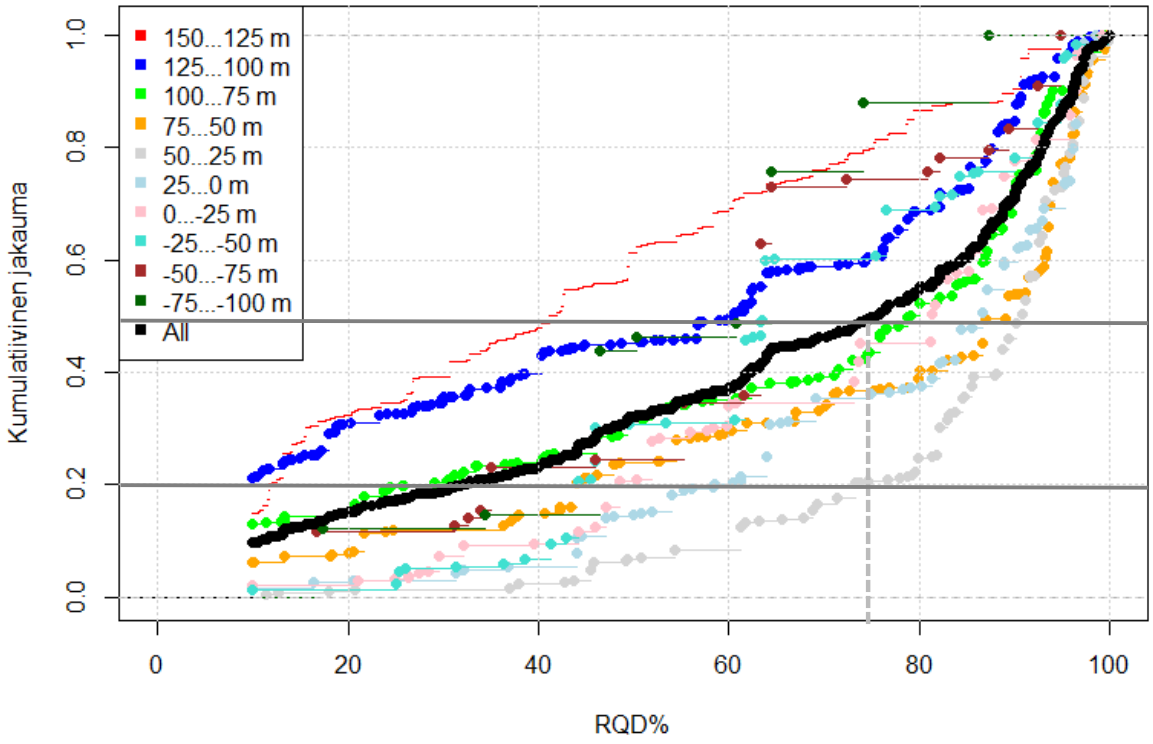
Elementisin reikätietokantaan tallennetut Rock Quality Designation (Hoek & Brown 1982) (RQD) tiedot analysoitiin tilastollisesti. RQD on karkea mitta kiven rakoilulle. RQD-luokitus suoritetaan laskemalla yli 10 cm pitkien ehjien kallionäytteiden osuus koko kairasydämen pituudesta. Tulos annetaan prosentteina, mitä pienempi prosenttiarvo sitä huonolaatuisempi kivi. Hyvälaatuisella kivellä RQD on suurempi kuin 75 %, huonolaatuisella alle 50 %, ja hyvin huonolaatuisella pienempi kuin 25 %.

Tilastollista tarkastelua varten kairasydännäytteistä kartoitetuista RQD-arvoista koostettiin yhden metrin datakoosteet, jotka sisältävät koordinaatit (x, y, z), kivilajin ja RQD-arvon. Datakoosteessa on yhteensä 3935 kappaletta yhden metrin reikäjaksoja, joista RQD tieto on saatavilla. Paras metrikattavuus on kallioperän yläosasta, sillä syvemmältä kallioperästä kairausmetrejä on vähemmän saatavilla. Suurin osa kairarei'istä on malmimuodostumassa, joten sivukivestä on vähemmän tietoa saatavilla.

RQD:n tilastollista jakaumaa analysoitiin koko datasetille, sekä lisäksi syvyyden suhteen ja kivilajeittain. Kuvassa 3-20 esitetään RQD:n arvojen jakautumisen prosenttiosuuksien kertymät 25 m vertikaaleina syvyysjaksoina (m mpy) ja kuvassa 3-21 prosenttiosuuksien kertymät kivilajeittain. Jakaumien perusteella kallioperän pintaosan rikkonaisuus on voimakkaampaa ensimmäisen 25–50 metrin syvyydelle kallion pinnasta. Tämän pintakerroksen vaikutus on suurin maaperästä kallioon suotautuvan pohjaveden, sekä kalliossa tapahtuvan veden virtauksen, ja mahdollisesti syntyvän pohjaveden aleneman kannalta. Rikkonaisuutta esiintyy myös syvemmällä kalliossa, missä se todennäköisesti on joko kivilajiriippuvaa tai liittyy ruhjelävistyksiin. Malmin sijainti itsessään voi olla rikkonaisuusvyöhykkeeseen liittyvää. Malminetsinnän kairareiät yleensä päättyvät esiintymän lävistykseen, jolloin niillä ei välttämättä tavata uudelleen ehyempää kalliolaatua. Kivilajeittain tehdyssä tarkastelussa epäpuhdas talkkimagnesiitti (ITM), mustaliuske (BLACKW), grafiittilusta (GS), kvartsikivi QR, kloriitti-rikas talkkimagnesiittikivi (chIITM) ja kloriittipitoinen mustaliuske (CBS) erottuvat muita rikkonaisempina kivilajeina. Talkkimagnesiitti (TM) ja kalkkimagnesiitti (MS) ovat keskimääräisesti rakoilleita ja karsi (SK) sekä serpentiniittibreksia (SPB) muita ehyempiä.

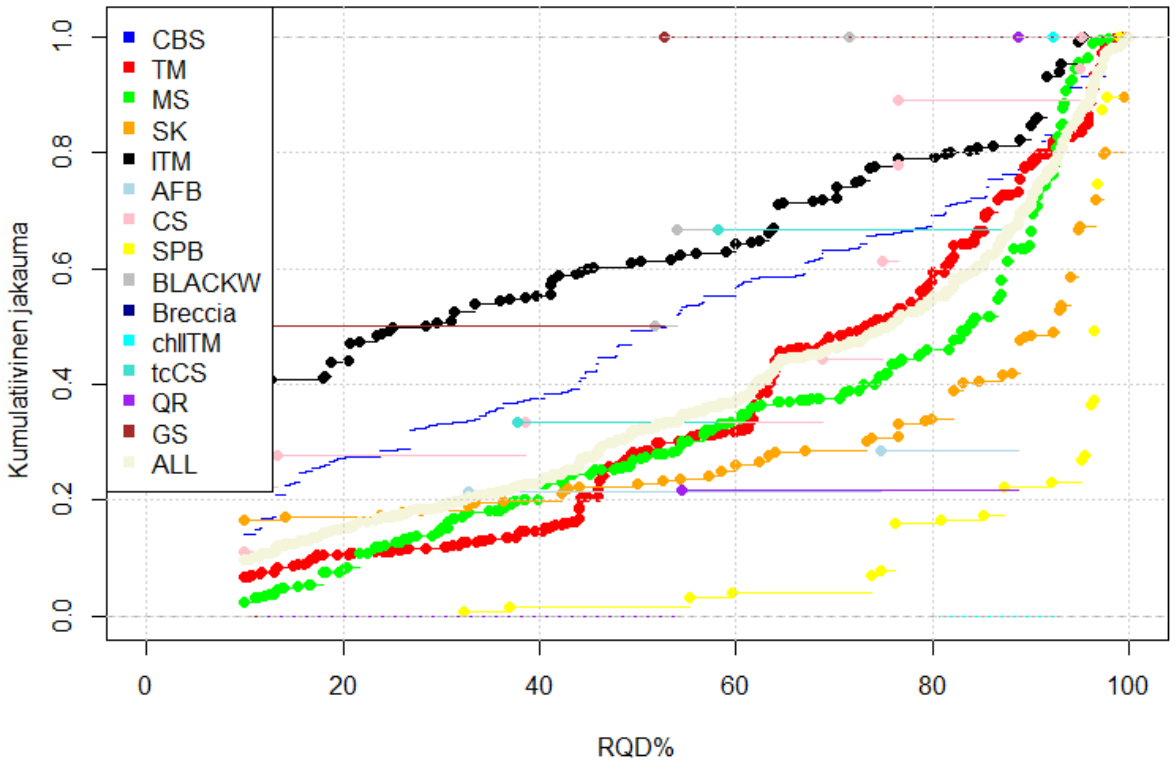
copyright© AFRY Finland Oy

Vastaavaa tarkastelua on tehty Punasuon avolouhoksen kairareikien geoteknisen raportoinnin osalta kivilajeittain (WSP 2023). Raportoidusta reikäpituudesta noin 20–40 % on RQD-luvultaan heikkoa tai erittäin heikkoa. Kivilajina mustaliuske on voimakkaammin rikkoutunutta kuin muut kivilajit.



Kuva 3-20. Kairasydännäytteistä 1 m välein määritettyjen RQD-arvojen jakauman prosenttiosuuksien kertymä 25 metrin vertikaalisin (m mpy) syvyysvälein ja koko datasetille. Mustat symbolit esittävät jakaumassa kaikkia havaintoja (All). Eri syvyystasojen poikkeaminen havaitaan jakaumien erona. Kaikkien havaintojen jakauman yläpuolella kuvassa olevat +150…+100 m mpy tasojen kairanäytteiden tiedot edustavat selvästi rikkonaisempaa kalliota kuin keskimäärin. Vastaavasti kuvan alaosassa +100…+0 m mpy korkeustasot edustavat selvästi ehyempää kalliolaatua kuin keskimäärin.

copyright© AFRY Finland Oy



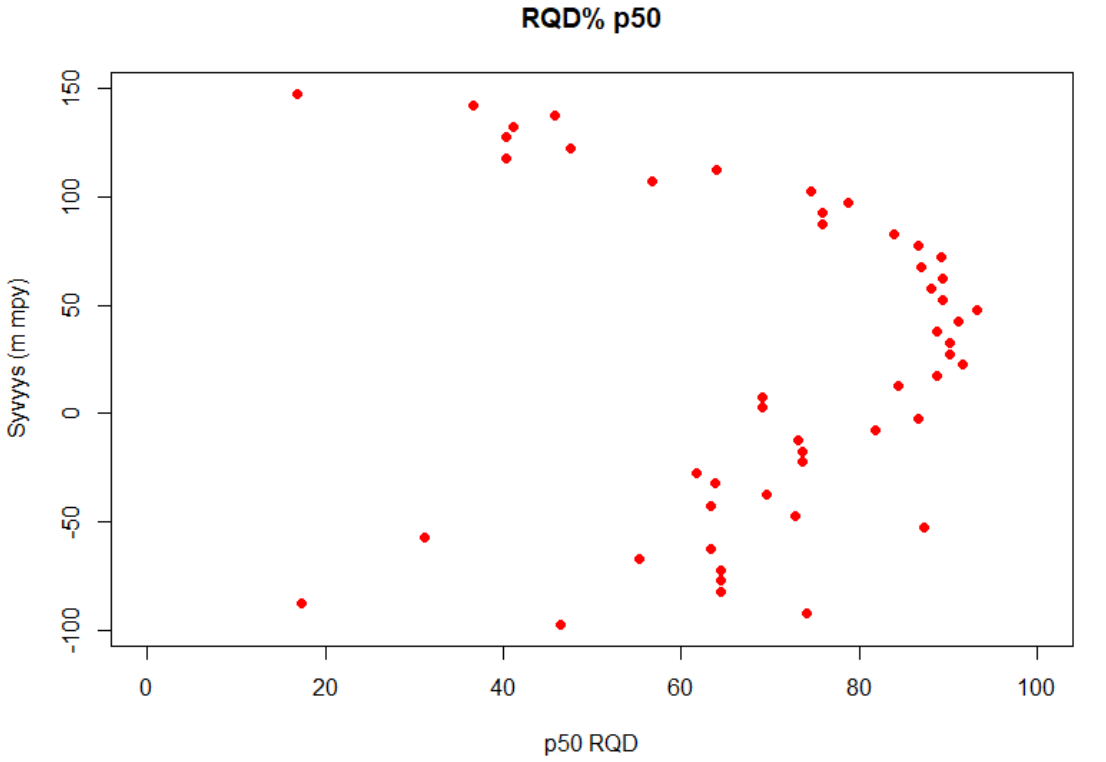
Kuva 3-21. Kairasydännäytteistä 1 m välein määritettyjen RQD-arvojen jakauman prosenttiosuuksien kertymä kivilajeittain. CBS= kloriittipitoinen mustaliuske, TM=talkkimagnesiitti, MS=kiilleliuske, SK=karsi, ITM=epäpuhdas talkkimagnesiitti, AFB=antrofylliittibreksia, CS=kloriittiliuske, SPB=serpentiniittibreksia, BLACKW=mustaliuske, Breccia=breksia, chlITM= kloriitti-rikas talkkimagnesiittikivi, tcCS=talkki-kloriittiliuske, QR= kvartsikivi, GS= grafiittilusta. Beiget symbolit esittävät jakaumassa kaikkia havaintoja (All).

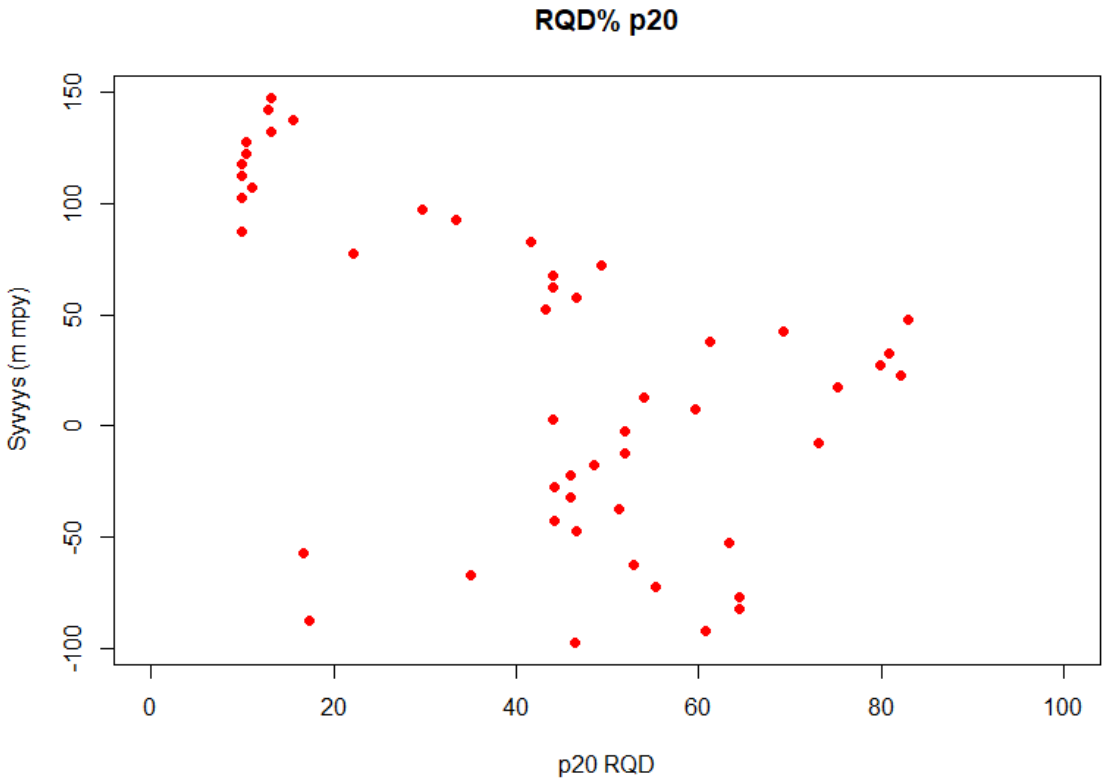
Keskimäärin lähes 50 %:n osuus ja kun kaikki syvyysvälit huomioidaan 20 % osuus kairanäytepituuksista edustaa RQD-arvoja, jotka ovat suurempia kuin 75 %. Tämän takia 20 % ja 50 % osuus kertymästä valittiin tilastolliseen tarkasteluun edustamaan eniten rakoilleita näytejaksoja (Kuva 3-20, harmaa horisontaali viiva). Kun RQD-lukua tarkastellaan ensimmäisen 20 % ja 50 % kertymän osuudelta 5 m vertikaalein syvyysvälein, kivilaadun paraneminen (RQD-luvun kasvu) syvyyden suhteen kallion pinnasta 25–50 metrin syvyyteen erottuu hyvin (Kuva 3-22). Rikkonaisuus on suurinta pintakalliossa, syvemmällä rikkonaisuus vähenee, mutta rikkonaisia jaksoja on myös syvemmällä kalliossa. Syvemmällä sijaitsevat rikkonaisuushavainnot voivat liittyä malmiesiintymän lähellä sijaitsevan ruhjeen lävistykseen.

Rikkonaisuutta ja vedenjohtavuutta ei ole verrattu keskenään, koska havaintoja vedenjohtavuudesta ei ole. Muista kohteista on voitu arvioida, että vedenjohtavuuden riippuvuus rikkonaisuudesta voi vaihdella alueittain mm. rakotyyppien ja avaumien, rakojen jatkuvuuden ja keskinäisten leikkaussuhteiden mukaan. Rikkonaisuuden jakautumista voidaan kuitenkin käyttää apuna

copyright© AFRY Finland Oy

rajattaessa kallion eri syvyystasoja, joille voidaan kalibroinnin avulla määrittää erilaiset vedenjohtavuusarvot.





Kuva 3-22. Rikkonaista kiveä on enemmän kallion yläosassa kuin syvemmällä. Ehjän kiven osuus kasvaa syvemmälle mentäessä. Reikien loppuosissa syvemmällä todennäköisesti lävistetään ruhjevyöhykettä.

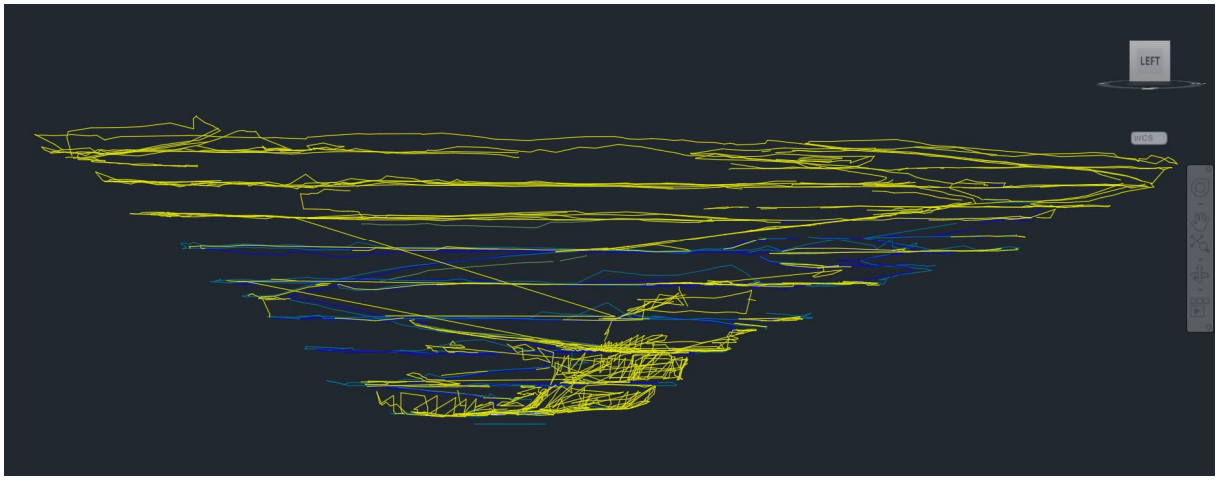
copyright© AFRY Finland Oy

3.10 Louhinta

Pohjavesimallinnusta varten Elementis toimitti Lahnaslammen avolouhoksen laajimman vaiheen geometrian (vuosi 2010: lalopputilanne.dwg), Punasuon avolouhoksen nykyisen geometrian (kesä 2024: punasuon avolouhos_30.1.dwg) sekä Punasuon louhoksen suunnitellun geometrian vuodelle 2035 (vuosi 2035: pun_eoy_surface_2035.dxf). Koska mallilla varaudutaan simuloimaan myös vuotta 2035 laajempaa Punasuon avolouhosta, suunnitelmien mukainen Punasuon louhoksen laajin geometria otettiin myös mukaan (240730_punasuo_shell17_life-of-mine-pit_v9_topo.dxf). Lisäksi Elementis toimitti nykytilaisen osittain jo täytetyn Lahnaslammen louhoksen geometrian (Lahnaslammen louhos.dwg). Louhosgeometriat on esitetty kuvassa 3-23.

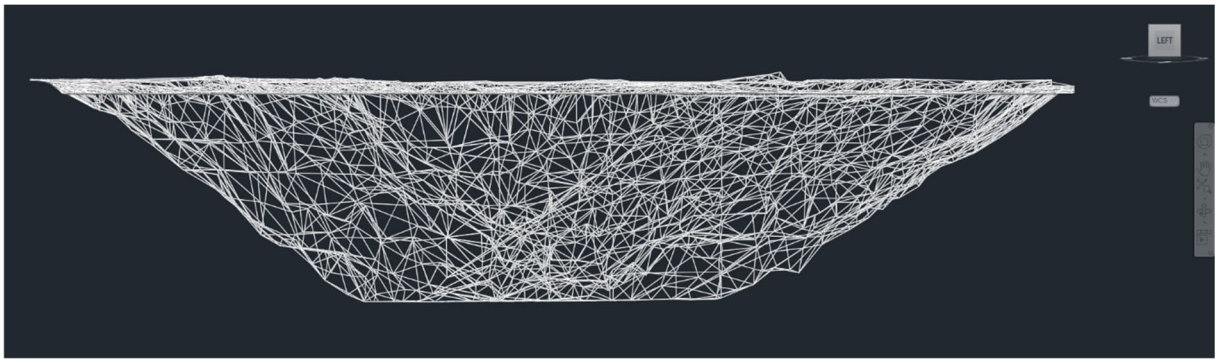
copyright© AFRY Finland Oy

a)

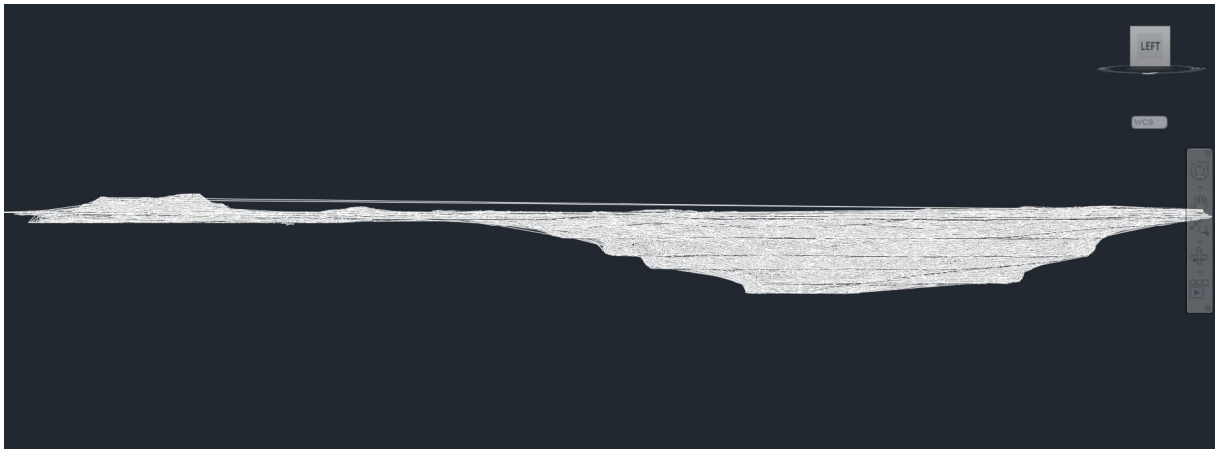


2010 Lahnaslampi: lalopputilanne.dwg

b)



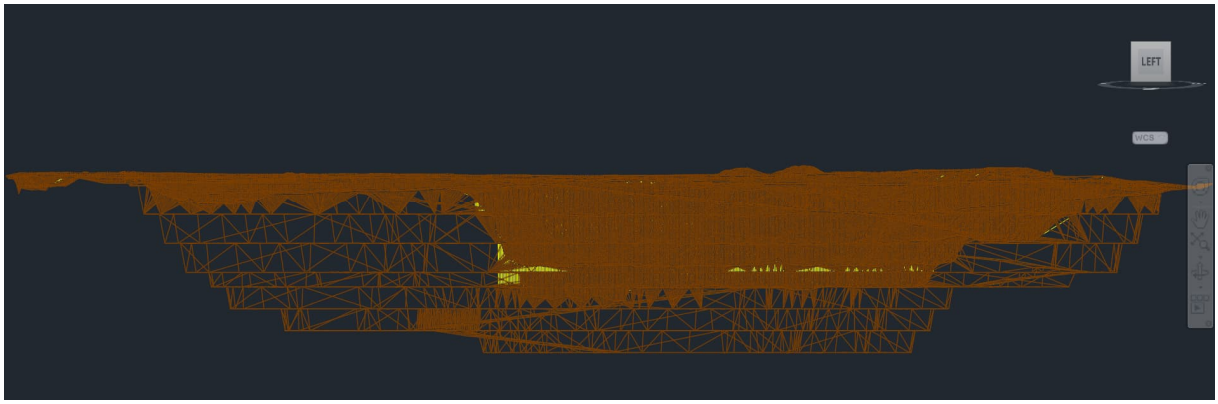
2024 Lahnaslampi: *Lahnaslammen louhos.dwg*



2024 Punasuo: *Punasuon avolouhos_30.1.dwg*

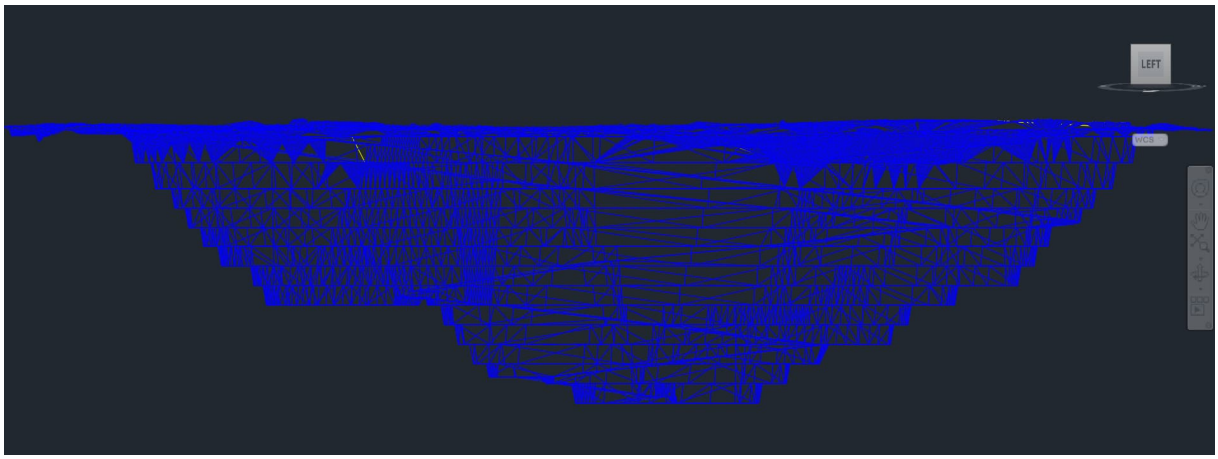
copyright© AFRY Finland Oy

c)



2035 Punasuo: *pun_eoy_surface_2035.dxf*

d)



Punasuon laajin tilanne: *240730_punasuo_shell17_life-of-mine-pit_v9_topo.dxf*

Kuva 3-23. Lahnaslammen ja Punasuon avolouhosten geometriat a) Lahnaslampi 2010 (syvyystaso −23 m mpy), b) Lahnaslampi 2024 (syvyystaso +22 m mpy) ja Punasuo 2024 (syvyystaso +65 m mpy) c) Punasuon louhos 2035 (syvyystaso +35 m mpy) ja d) Punasuon louhos laajin (syvyystaso −55 m mpy).

copyright© AFRY Finland Oy

3.11 Kuivatusvesimäärät

Elementisiltä saatiin tiedot vuosilta 2005–2023 Lahnaslammen ja Punasuon louhosten kuivatuspumppausten vesimääristä, jotka sisältävät louhoksiin satavan veden ja niihin suotautuvan pohjaveden. Kuivatuspumppauksen vesimäärät ovat vaihdelleet ajoittain peräkkäisten vuosienkin välillä paljon. Vuosina 2009 ja 2010 molempia louhoksia on kuivatettu samanaikaisesti. Punasuon louhoksen vesimäärät sisältävät myös koelouhoksen kuivattamisen. Kuivatuspumppausten vesimäärät on esitetty taulukossa 3-1.

Lahnaslammen louhoksen kuivatus lopetettiin vuonna 2010, jonka jälkeen vesipinta on noussut louhoksessa. Lahnaslammen täyttyminen on osaltaan vaikuttanut alueen pohjavesipintoihin ja Punasuon vuotovesimääriin täyttymisen aikana. Punasuon louhoksen kuivatusvesimäärä on kasvanut selvästi vuoden 2020 jälkeen. Vuosina 2020–2021 Lahnaslammen vesipinta on noussut tasolta +142 m mpy tasolle 150 m mpy (Taulukko 3-2). Punasuon ja Lahnaslammen louhosten välillä on ruhjeisuutta ja Lahnaslammen täyttyneestä louhoksesta voi suotautua vettä Punasuon kuivatettavaan louhokseen, mikä voi osaltaan selittää Punasuon kuivatusvesimäärän kasvua vuosina 2021–2023.

Taulukko 3-1. Lahnaslammen ja Punasuon avolouhosten kuivatuspumppausmäärät 2005–2023.

Vuosi	Lahnaslampi m^3	Punasuo m^3	Lisätiedot
2005	520 000		
2006	490 000		
2007	450 000		
2008	500 000		
2009	330 000	550 000	Punasuon koelouhoksen tyhjennys
2010	540 000	450 000	Punasuon koelouhoksen tyhjennys
2011		504 990	
2012		769 930	Unijoen tulvavesi mukana, Unijoki tulvi kaivokseen 2012. Tulvamääräksi on arvioitu 200 000–220 000 m^3.
2013		506 496	
2014		381 838	
2015		507 913	
2016		435 594	

copyright© AFRY Finland Oy

Vuosi	Lahnaslampi m^3	Punasuo m^3	Lisätiedot
2017		378 884	
2018		360 457	
2019		360 494	
2020		534 380	
2021		722 595	
2022		795 486	
2023		745 598	

Taulukko 3-2. Lahnaslammen louhoksen vesipinta 2020–2021.

Päivämäärä	Vesipinta Lahnaslammen louhoksessa m mpy
8.3.2021	150,09
4.3.2021	150,06
1.3.2021	150,0
25.2.2021	149,94
22.2.2021	149,91
18.2.2021	149,91
15.2.2021	149,9
11.2.2021	149,86
8.2.2021	149,79
4.2.2021	149,77
27.1.2021	149,60
20.1.2021	149,55
14.1.2021	149,50
7.1.2021	149,35
30.12.2020	149,24
23.12.2020	149,08

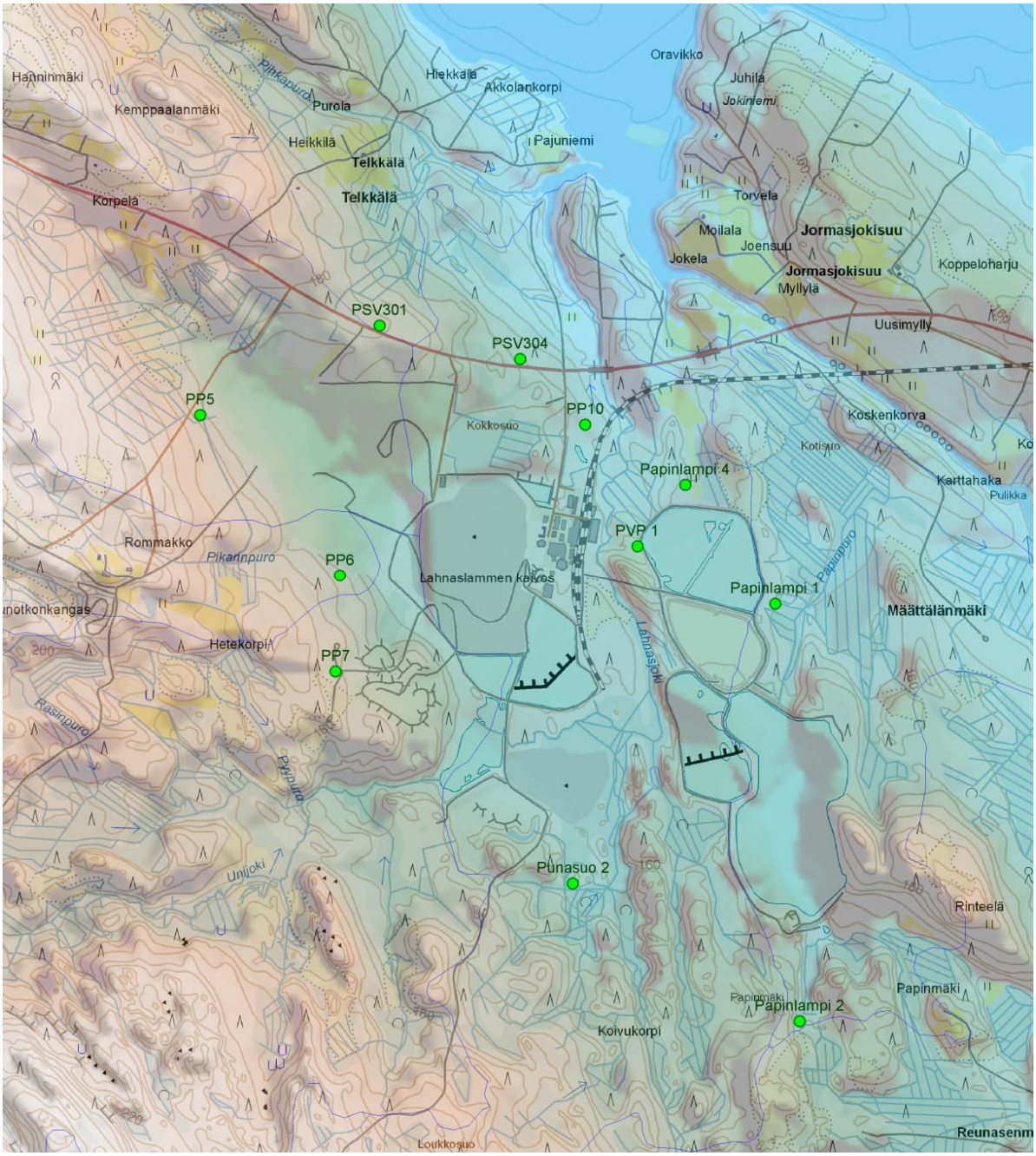
copyright© AFRY Finland Oy

Päivämäärä	Vesipinta Lahnaslammen louhoksessa m mpy
17.12.2020	148,96
10.12.2020	148,77
3.12.2020	148,66
26.11.2020	148,52
19.11.2020	148,21
12.11.2020	148,05
5.11.2020	147,84
29.10.2020	147,65
30.9.2020	146,9
31.8.2020	146,1
10.8.2020	145,85
24.6.2020	144,65
26.5.2020	144,3
28.4.2020	143,1
3.4.2020	142

3.12 Hydrogeologiset mittaukset

Punasuon ja Lahnaslammen louhosalueella on tehty aiemman mallinnustyön (Pöyry Finland Oy 2012) yhteydessä maaperän vedenjohtavuuden määrittämiseksi slug-testejä maaperän pohjavesiputkissa. Pohjavesiputket on valittu eri puolilta kaivospiirin aluetta sijaitsevista avoinna olevista putkista karttatarkastelun perusteella. Mittausten perusteella saadut vedenjohtavuuden arvot on esitetty taulukossa 3-3.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 3-9. Slug-testeissä käytettyjen pohjavesiputkien sijainnit. (AFRY Finland Oy 2012)

Taulukko 3-3. Slug-testeissä saadut vedenjohtavuuden arvot (K-arvo).

Tunnus	K-arvo (m/s)	Huom.
Papinlampi 1	$2{,}30 \cdot 10^{-5}$	
Papinlampi 2	$3{,}40 \cdot 10^{-5}$	Siivilä noin 10 cm kuivilla
Papinlampi 4	$1{,}3 \cdot 10^{-6}$	Palautuma kaksivaiheinen -> Pienempi arvo luultavasti oikea. Porausreiän väljyys aiheuttaa todennäköisesti kyseisen lopputuloksen.
PP5	$7{,}00 \cdot 10^{-6}$	

copyright© AFRY Finland Oy

Tunnus	K-arvo (m/s)	Huom.
PP6	$5{,}40 \cdot 10^{-6}$	
PP7	$2{,}50 \cdot 10^{-6}$	
PP10	$1{,}30 \cdot 10^{-5}$	
PSV301	$3{,}00 \cdot 10^{-6}$	
PSV304	$3{,}20 \cdot 10^{-6}$	
Punasuo 2	$1{,}20 \cdot 10^{-6}$	Siivilä noin 40 cm kuivilla
PVP 1	$2{,}20 \cdot 10^{-5}$	

Lahnaslammen kaivoksen vieressä olevan sivukivialueen maisemointi on toteutettu metrin paksuisena tasalaatuisena pintakerroksena. Rakennetta ei ole hyväksytty sulkemisrakenteeksi. Pintakerroksen materiaalina on käytetty Punasuon alueelta saatavaa moreenia. Pintakerrosta on levitetty suurimmalle osaa sivukivialuetta. Pintarakenteen päälle on paikoin levitetty turvetta kasvukerrokseksi. Pintakerroksen materiaalin vedenläpäisevyyttä on selvitetty vedenläpäisevyyskokein (Mitta Oy 2020). Vedenläpäisevyys (K-arvo) vaihteli testeissä välillä $1{,}4 \cdot 10^{-8}$ m/s – $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Havaintojen geometrinen keskiarvo on $1{,}97 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Taulukko 3-4. Sivukivialueen peittokerroksen vedenläpäisevyystestien tulokset (Mitta Oy 2020).

Tunnus	K-arvo (m/s)
Näyte 1	$1{,}9 \cdot 10^{-7}$
Näyte 11	$1{,}4 \cdot 10^{-7}$
Näyte 13	$6{,}6 \cdot 10^{-7}$
Näyte 18	$1{,}1 \cdot 10^{-6}$
Näyte 22	$2{,}1 \cdot 10^{-8}$
Näyte 25	$7{,}6 \cdot 10^{-8}$
Näyte 28	$7{,}4 \cdot 10^{-7}$
Näyte 32	$3{,}7 \cdot 10^{-7}$
Näyte 35	$1{,}4 \cdot 10^{-8}$
Näyte 38	$1{,}8 \cdot 10^{-7}$
Näyte 40	$1{,}8 \cdot 10^{-7}$
Näyte 45	$8{,}9 \cdot 10^{-7}$

3.13 Hydrogeologinen konseptualisointi

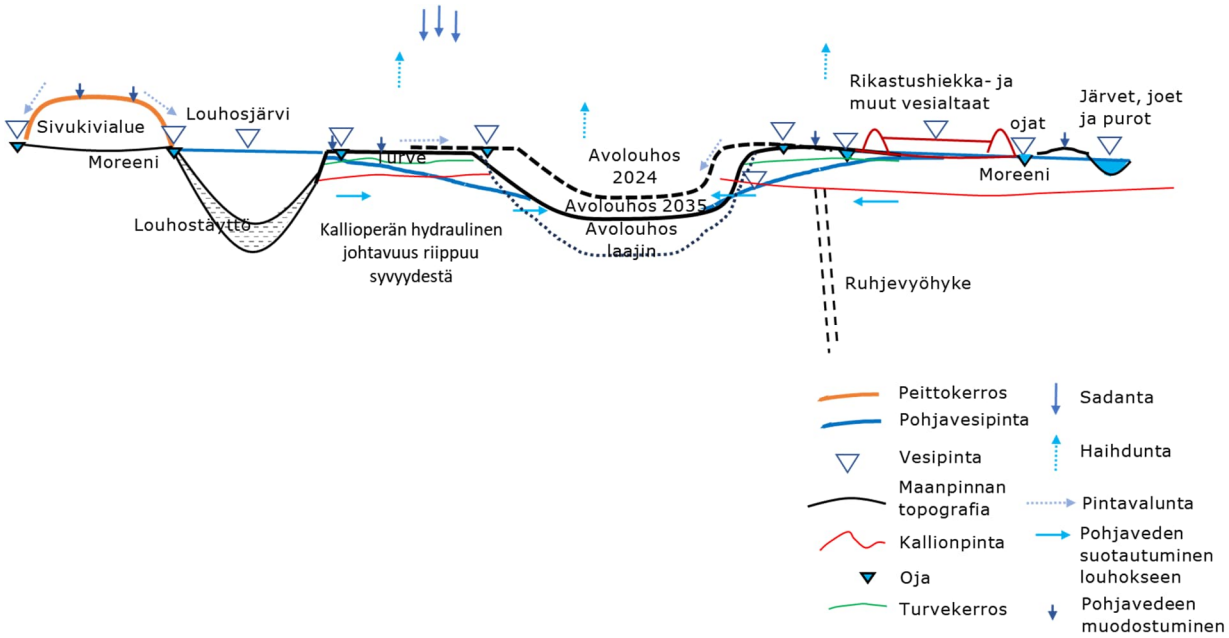
Kaaviomainen poikkileikkaus kuvassa 3-24 esittää rakenteet ja prosessit, jotka huomioidaan numeerisessa 3D-mallinnuksessa, konseptuaalisella tasolla nykytilan mallissa sekä 2035 louhostilanteen mallissa. Mallinnettava tilavuus on jaettu maaperään ja kallioperään. Maaperä on pääosin moreenia, jonka päällä on suoalueilla turvekerros. Turvekerros voi olla ohut tai paksu. Lajittuneita kerroksia esiintyy paikoin. Maaperän vedenjohtavuus riippuu maalajista (moreeni, hieta, turve). Maaperäkerroksen alla on rakoilleen kallion vyöhyke ja syvemmällä

copyright© AFRY Finland Oy

vähemmän rakoillut kallio. Kallioperässä on alueellisia ruhjevyöhykkeitä. Kallion vedenjohtavuus pienenee syvyyden kasvaessa. Ruhjeissa vedenjohtavuus on korkeampi kuin ympäröivässä kalliossa. Maaperäkerroksen paksuus vaihtelee, ja kallion pinta nousee paikoin maanpinnan tasolle. Sadannasta osa haihtuu ja poistuu pintavaluntana ja lopusta muodostuu pohjavettä, joka voi purkautua jokiin, ojiin, lähteisiin, lampiin ja järviin. Sadannasta pohjavedeksi imeytyvän veden määrä riippuu maalajista.

Pohjavettä purkautuu Punasuon avolouhokseen, mikä vaikuttaa pohjaveden virtaussuuntiin. Avolouhoksen pinta muodostaa tihkupinnan, jossa pohjavedenpaine on sama kuin ilmanpaine ja vesi poistuu mallista kuivatuspumppauksen seurauksena. Kaivosalueella on sivukivialue ja vesialtaita. Vanhoja vesialtaita on peitetty moreenilla. Lahnaslammen louhosta on osin täytetty sivukivellä ja rikastushiekalla, ja se on täyttynyt vedellä.

Toiminnan lopettamisen jälkeen Punasuon louhoksen kuivatuspumppaus lopetetaan, jolloin avolouhos täyttyy vähitellen vedellä ja pohjavesipinta palautuu lähelle kaivosta edeltävää tilaa. Avolouhoksista ylivuotovesi poistetaan purkuojaa pitkin. Sivukivialue peitetään bentoniitilla. Vesialtaat puretaan. Soidinsuon allas ja Papinlammen rikastushiekka-allas peitetään moreenikerroksella.



Kuva 3-24. Hydrogeologinen Punasuon kaivosalueen konseptualisointi numeerista mallinnusta varten esitettynä kaavamaisena poikkileikkauksena toiminnan aikaiselle tilanteelle vuosina 2024 ja 2035.

copyright© AFRY Finland Oy

4 Numeerisen 3D-pohjavesimallin muodostaminen

Numeerinen pohjavesimalli perustuu hydrogeologiseen konseptuaaliseen malliin, joka on esitetty luvussa 3.13, ja dataan, joka on esitetty taulukossa 2-1.

Numeerinen pohjavesimalli tehtiin FEFLOW-ohjelmalla (v 8.1), joka perustuu finite-element laskentaan. Laskennassa mallinnettava tilavuus jaetaan tiheästi pieniin osatilavuuksiin (elementteihin). Elementeille asetetaan ominaisuudet kuten vedenjohtavuus. Mallinnettavat muuttujat paine ja virtaus lasketaan elementtien yhdistymiskohdissa (reunoilla) sijaitsevissa solmupisteissä (noodi), joihin asetetaan tarvittaessa myös laskentaa ohjaavat reunaehdot.

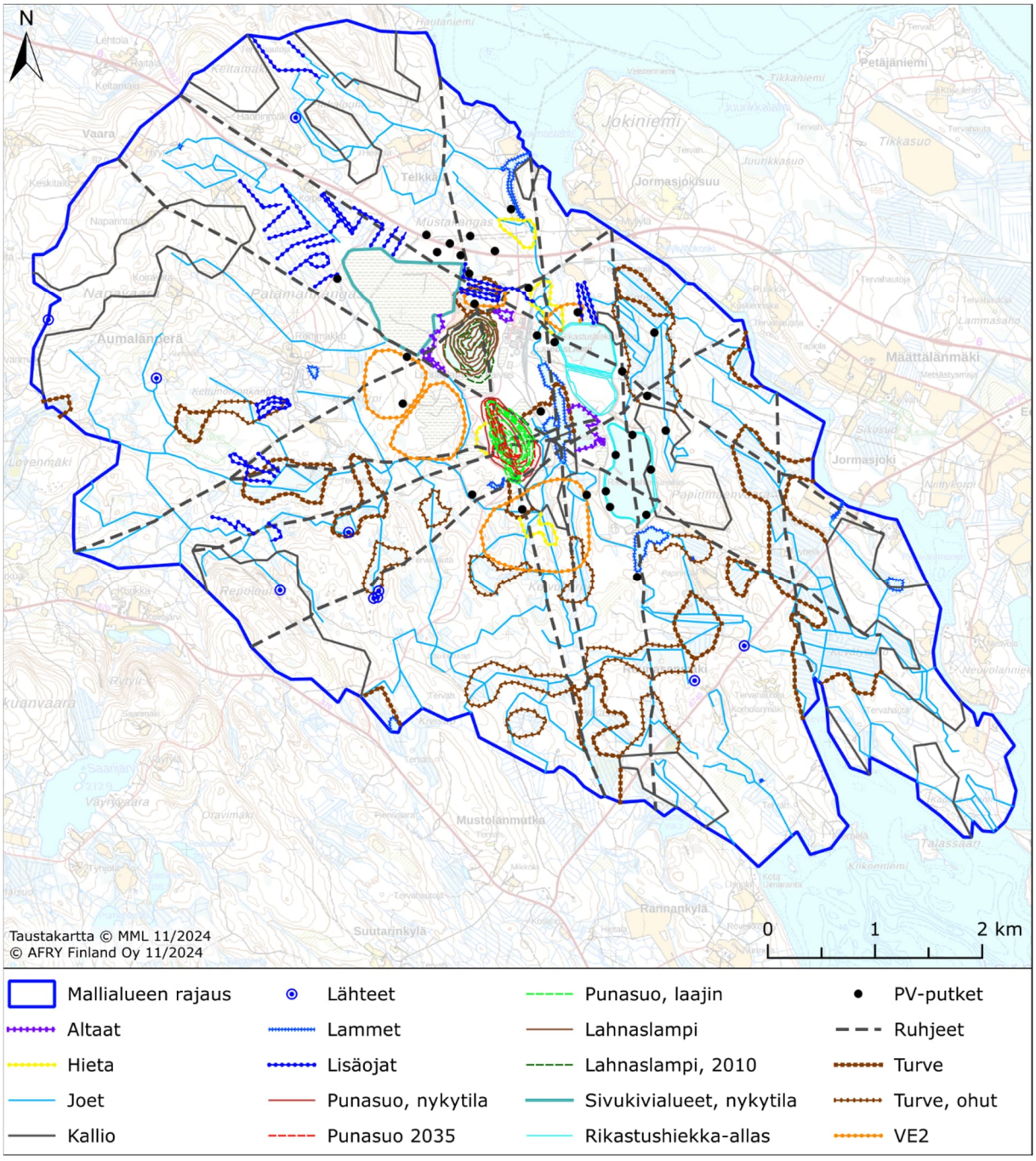
Malli kalibroitiin saatavilla olevien lähtötietojen perusteella vastaamaan mitattuja pohjavedenpinnan korkeuksia ja nykytilan (vuosi 2024) louhoksen vuotovesimääriä ja mitattuja pohjavesipintoja. Kalibroidulla mallilla tehtiin vuoden 2035 tilanteelle simulointi, jolla arvioitiin louhoksen vaikutusta ympäristöön, pohjaveden virtaussuuntia, kuivatusvesimääriä ja pohjavedenpinnan alenemakartion laajuutta. Mallinnukset tehtiin saturoituneella virtauksella tasapainotilanteen mallina. Myös vuoden 2035 louhoksen sulkemisen jälkeiselle tilanteelle tehtiin tasapainotilanteen mallinnus. Louhoksen vedellä täyttymisen laskenta tehtiin ajansuhteen muuttuvana eli transienttimallina.

Vuoden 2035 mallissa on huomioitu Papinlammen rikastushiekka-altaan korotus tasolle +190 m mpy.

4.1 2D verkko

Mallin rakentaminen alkoi karttatietoon perustuvan horisontaalisen 2D-verkon luomisesta. QGIS-ohjelmassa luodut ja shape-tiedostoiksi tallennetut pintageometriat (Kuva 4-1) vietiin FEFLOW-ohjelmaan. Polygonit ja viivat esittävät mallin rajauksen, Punasuon avolouhoksen vuosien 2024 ja 2035 sekä laajimman vaiheen reunaviivat ja eri syvyystasot, Lahnaslammen laajimman vaiheen (vuosi 2010) ja nykytilanteen reunaviivat ja eri syvyystasot, alueelliset ruhjevyöhykkeet, ojat, joet ja lammet, lähteet, turve-, hieta- ja moreenialueet, kalliopaljastumat, vesialtaiden patoreunat ja sivukivialueen reunat. Ojat sisältävät karttaan merkittyjä luonnonojia sekä kaivosalueen ojitukset. Myös käynnissä olevan kaivannaisjätteiden ja vesienhallinnan YVA-hankkeen vaihtoehdon VE2 (YVA-ohjelma 6.5.2024) sivukivialueet ja rikastushiekka-allas on otettu malligeometriaan mukaan, jotta niiden vaikutusta voidaan tarvittaessa myöhemmin mallintaa.

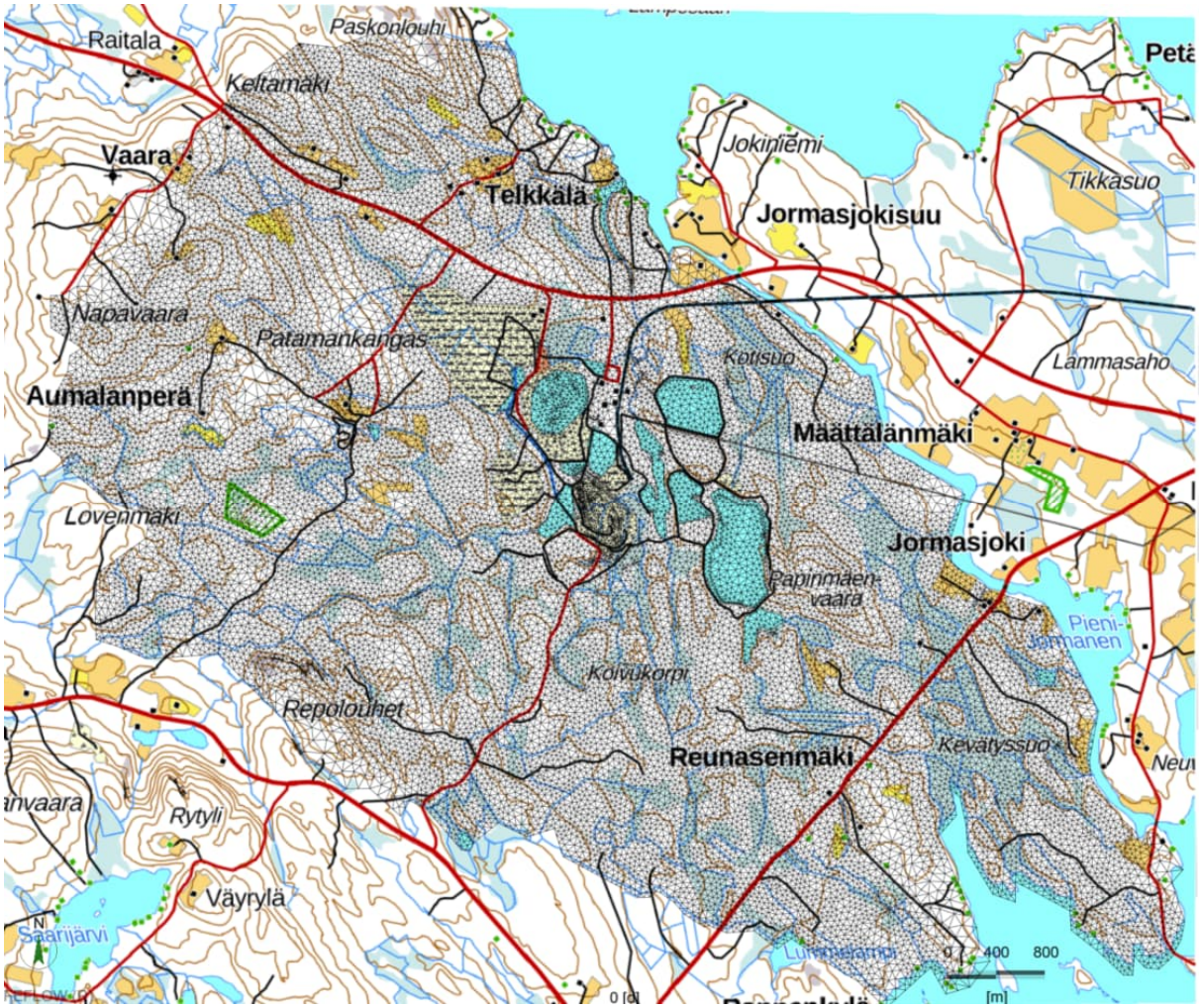
copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-1. Viivat, polygonit ja pisteet, jotka kuvaavat alueen geometriaa ja joita käytettiin 2D-verkon luomiseen.

Kuvassa 4-2 esitetään FEFLOW-ohjelman tekemä 2D-verkko. Se koostuu 40 174 kolmikulmaisesta elementistä. Verkkoa on tihennetty yllä mainittujen viivojen kohdalla, jotta laskennan tarkkuus paranee suurimpien oletettujen hydraulisten gradienttien kohdalla.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-2. Punasuon louhoksen pohjavesimallia varten luotu 2D-kolmioverkko.

4.2 Kerrosmalli

2D-verkon luomisen jälkeen malligeometrialle määritetään vertikaali suunta. Punasuon kaivoksen mallille käytettiin kerrosmallia.

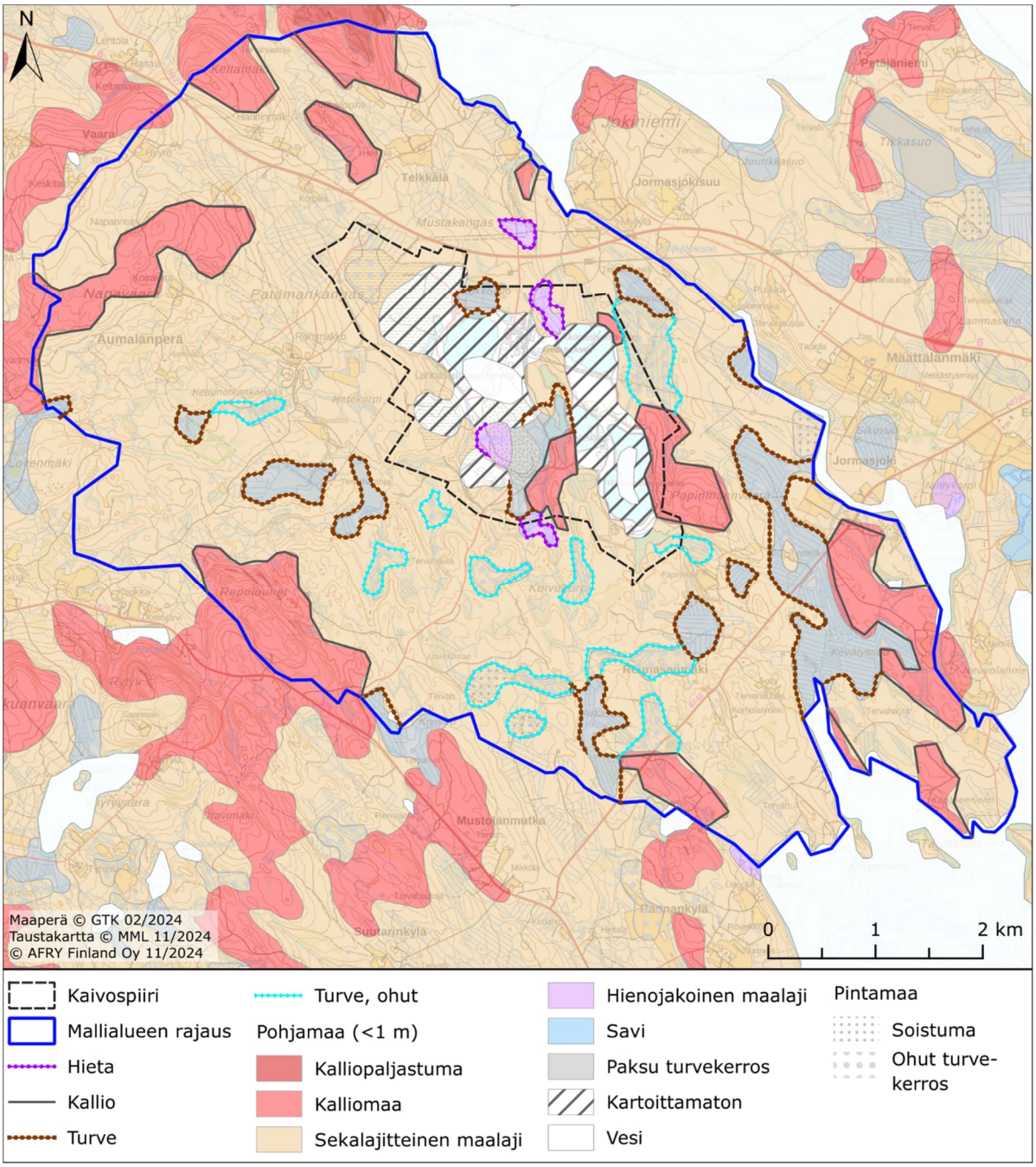
Maaperäosuus on kuvattu mallissa neljällä kerroksella. Kaksi ylintä kerrosta on ohuita 0,5 m kumpikin, ja ne on varattu sivukivialueiden ja vesivarastoaltaiden sekä turvekerroksen kuvaamiseen. Ylin kerros on allas, sivukivi- ja turvealueiden ulkopuolella maalajien osalta sama kuin mallin toinen kerros. Toinen kerros kuvaa turve- ja moreenialueita. Ohuilla turvealueilla vain mallin ylin kerros on asetettu turpeeksi ja paksuilla turvealueilla mallin kaksi ylintä kerrosta on asetettu turpeeksi. Turvealueet on rajattu mallissa kuvan 4-3 mukaisesti. Kolmas ja neljäs kerros kuvaavat moreenikerrosta. Kalliopaljastumien kohdissa kerrosten 1–4 materiaali on asetettu kallioksi.

Mallin pinta noudattaa maanpinnan topografiaa, joka perustuu Maanmittauslaitoksen dataan. Papinlammen rikastushiekka-altaan kohdalla

copyright© AFRY Finland Oy

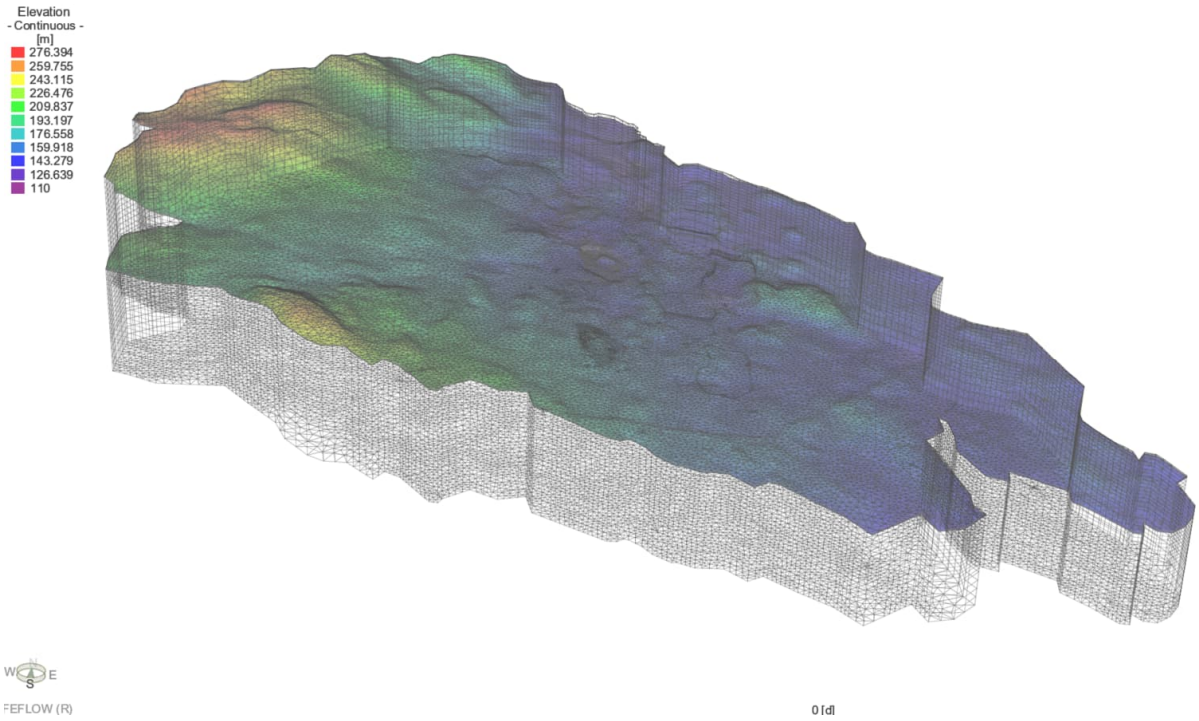
ylimmän kerroksen korkeustaso asetettiin vastaamaan suunniteltuja altaan korkeustasoja (vuosi 2024 +176 m mpy, vuosi 2035 +190 m mpy).

Kallioperän päällä olevan moreenikerroksen (mallikerros numero 4) paksuudeksi asetettiin 0,5 m. Moreenikerrosta kuvaavan mallin neljännen kerroksen yläpinta laskettiin lisäämällä kalliopinnan korkeuteen 0,5 m. Kalliotopografia perustuu maaperäkerroksen syvyyden mallinnukseen (luku 3.8).



Kuva 4-3. Maaperäkarttaan perustuvat malliin määritellyt turve- (ohut ja paksu kerros), moreeni-, hieta- ja kallioalueet.

copyright© AFRY Finland Oy

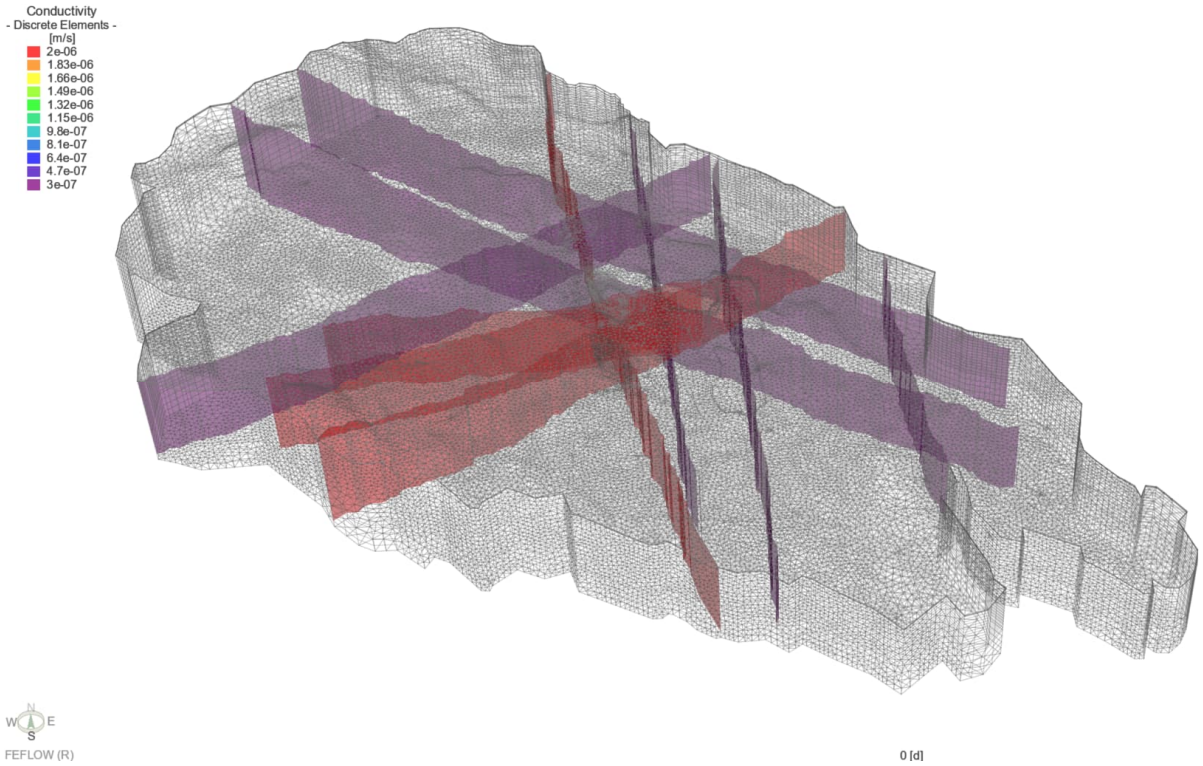


Kuva 4-4. 3D-visualisointi mallin geometriasta FEFLOW-mallissa. Kallion pinta on esitetty väripintakarttana (m mpy).

Mallinnettu kalliotilavuus jaettiin 19 kerrokseen niin, että kerrokset 18–23 on asetettu vakio syvyystasoille 0, −15, −25, −50, −75, ja −100 m mpy ja kerrokset 5–17 tasaisesti kalliopinnan tason ja tason 0 m mpy välille. Kalliopinnan topografia (sama kuin maaperäkerroksen syvyys) perustuu kairaustietoihin ja geofysiikan aineistoihin (kts. luku 3.8). Mallin alimman kerroksen pohja on asetettu tasolle −125 m mpy. Kuvassa 4-4 esitetään 3D-visualisointi mallin geometriasta. Malli koostuu 924 002 elementistä.

Kuvassa 4-5 esitetään 3D-visualisointi mallista niin, että mallissa mukana olevat ruhjevyöhykkeet näkyvät sinisinä pintoina. Ruhjevyöhykkeet mallinnettiin pystyasentoisina ja ne perustuvat GTK:n tulkintoihin (luku 3.6.3). Kaikkien ruhjeiden oletetaan jatkuvan kalliopinnasta mallin toiseksi alimman kerroksen yläpintaan, ja ne on mallinnettu pystysuorina.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-5. Mallissa mukana olevat alueelliset ruhjevyöhykkeet.

4.3 Reunaehdot

Malligeometrian luomisen jälkeen malliin määriteltiin reunaehdot. Reunaehtojen määrittelyt ovat seuraavat:

- Ei-virtausta reunaehto kaikille mallin reunoille lukuun ottamatta niitä, joihin määritettiin vakiopaine-ehto (katso alla)
- Vakiopainereunaehto seuraaville mallin reuna-alueille ja vesimuodostumille: Jormaslahti +137,9 m mpy, Nuasjärvi +137,9 m mpy, Jormasjärvi +144,9 m mpy, Pieni-Jormanen +144,6 m mpy, Jormasjärvi-Pieni-Jormanen +144,75 m mpy, Pieni-Jormanen-Nuasjärvi yläosa +142 m mpy, keskiosa +140 m mpy, alaosa +139 m mpy, Sillankorvan lahti +144,3 m mpy, Teerilampi +216,1 m mpy, Muinosenlampi +148,2 m mpy, Lummelampi +158,2 m mpy, muihin lampiin vakiopainereunaehto asetettiin 2 metriä maanpinnan alapuolelle.
- Kaivosalueen altaiden vesipinnat asetettiin seuraavasti: Lahnaslampi +149,7 m mpy, Soidinsuonallas +154,2 m mpy, Talkkipiirin allas +160,3 m mpy, Papinlammen rikastushiekka-allas +174,8 m mpy, Lahnasjoen allas (makkara-allas) +152,8 m mpy ja Papinlammen eteläpään allas +156,1 m mpy

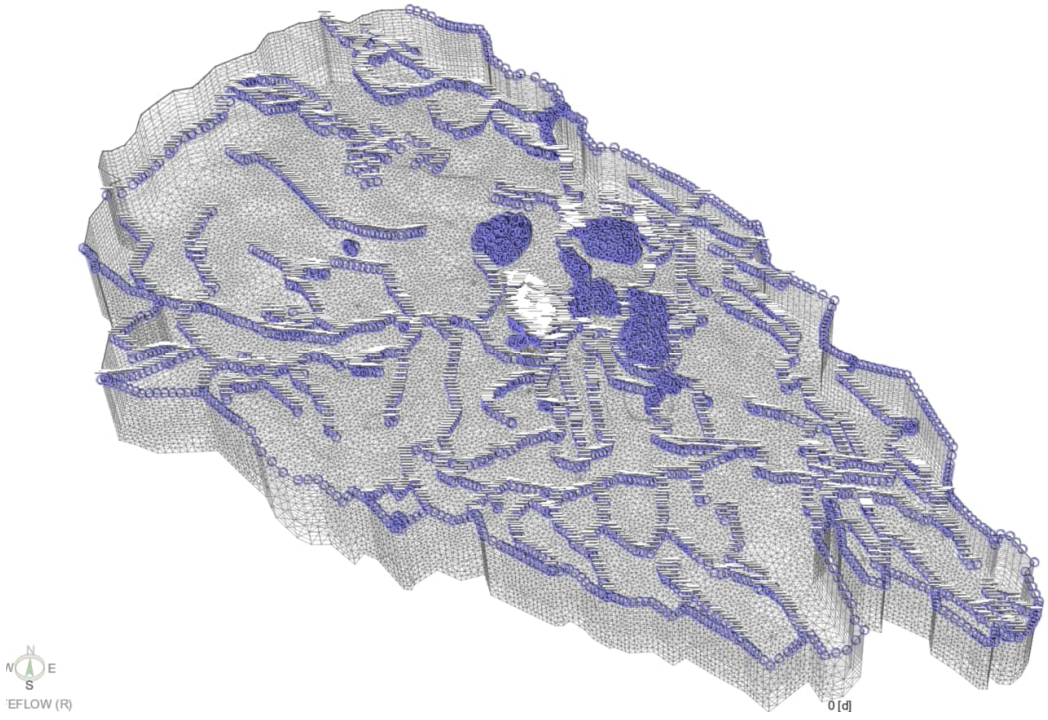
copyright© AFRY Finland Oy

- Vakiopainereunaehto virtauksen malliin estävällä rajoituksella mallin alueella oleviin jokiin, puroihin ja ojiin. Vakiopaine-ehto jokaisessa noodissa asetettiin 2 metriä mallin yläpinnan alapuolelle.
- Sisään virtaus pinnalla -reunaehto eli pohjaveden muodostuminen sadannasta asetettiin mallin ylimpään kerrokseen. Asetetut arvot perustuvat eri maalajien tyypillisiin pohjaveden muodostumisen määriin sekä mallin kalibrointiin. Pohjaveden muodostumisen arvona käytettiin moreenialueilla 290 mm/vuosi (46 % sadannasta), turvealueilla 125 mm/vuosi (20 % sadannasta), hieta-alueilla 220 mm/a (35 % sadannasta) kallioalueilla 31 mm/vuosi (5 % sadannasta), sivukivialueella 250 mm/a ja avolouhosten kohdalla 314 mm/a (50 % sadannasta). Sotkamon alueella keskimääräinen vuosisadanta on 627 mm/vuosi (viimeisen 14 vuoden keskiarvo, Ilmatieteen laitos 2024 Sotkamo Kuolaniemi). Loppuosa sadannasta poistuu haihdunnan ja pintavalunnan myötä.

Kaivoksen vuosien 2024 ja 2035 simuloinnissa tehtiin seuraavat asetukset:

- Punasuon avolouhoksen sisällä olevat verkon elementit asetettiin epäaktiivisiksi ja avolouhoksen pinta tihkupinnaksi (seepage face).

Kuvassa 4-6 esitetään 3D-näkymä nykytilan mallista. Vakiopainereunaehto nykytilan mallissa on merkitty sinisellä ympyrällä ja virtauksen malliin estävä rajoite valkoisella viivalla ympyrän päällä.



Kuva 4-6. Malliin asetetut vakiopainereunaehdot nykytilanmallissa (vuosi 2024).

copyright© AFRY Finland Oy

4.4 Materiaalien ominaisuudet

Pohjavesimallissa vedenjohtavuus määriteltiin kaikille mallin elementeille.

Mallissa maaperäkerroksissa (kerrokset 1–4) käytetyt hydraulisen johtavuuden arvot on esitetty taulukossa 4-1. Mallissa maaperäkerroksen moreenialueiden hydraulisen johtavuuden arvo perustuu pohjavesiputkissa tehtyihin vedenjohtavuuden mittauksiin (luku 3.13). Mittausten perusteella moreenin vedenjohtavuuden geometrinen keskiarvo on $6{,}9 \cdot 10^{-6}$ m/s ja mediaani $6{,}2 \cdot 10^{-6}$ m/s. Mallissa kalibroinnin perusteella arvoa pienennettiin hiukan ja mallikerroksissa 1–3 käytettiin moreenille arvoa $5{,}9 \cdot 10^{-6}$ m/s ja kerroksessa 4 arvoa $1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Turvealueilla ei ole tehty hydraulisen johtavuuden mittauksia eikä maatuneisuusaste ole tiedossa. Turpeen vedenjohtavuus riippuu turvetyypistä, syvyydestä ja turpeen maatuneisuusasteesta. Rahkaturpeen vedenjohtavuus vaihtelee syvyydestä ja maatuneisuusasteesta riippuen välillä $2{,}3 \cdot 10^{-8}$ … $1{,}9 \cdot 10^{-5}$ m/s (Kesäniemi 2009). Mallissa turpeen hydrauliseksi johtavuudeksi arvioitiin $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Kalliopaljastumilla hydrauliseksi johtavuudeksi asetettiin $1 \cdot 10^{-6}$ m/s. Turve-, moreeni ja kallioalueiden rajaukset on esitetty kuvassa 4-3.

Taulukko 4-1. Mallissa käytetyt maa- ja kallioperäkerrosten 1–4 hydrauliset johtavuudet.

Kerros	Maalaji	K (m/s) maaperän slug-testien perusteella
Kerros 1	Moreeni	$5{,}9 \cdot 10^{-6}$
	Turve	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
	Kallio	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$
Kerros 2	Moreeni	$5{,}9 \cdot 10^{-6}$
	Turve	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
	Kallio	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$
Kerros 3	Moreeni	$5{,}9 \cdot 10^{-6}$
	Kallio	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$
Kerros 4	Moreeni	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$
	Kallio	$1 \cdot 10^{-6}$

Kallioperän hydraulisen johtavuuden mittauksia ei ole saatavilla Punasuon ja Lahnaslammen louhosten alueelta. Kallioanalyysin (luku 3.9) perusteella kallion rakoilu on voimakkainta kallioperän yläosassa ensimmäisellä 25–50 m syvyysjaksolla, ja syvemmällä rakoja on vähemmän. Louhosten kuivatusvesimäärät on mitattu ja tiedossa (luku 3.11). Mallissa kalliokerroksille asetettiin syvyyden mukaan pienenevä hydraulisen johtavuuden arvo (Taulukko 4-2). Kallion vedenjohtavuuden arvot on asetettu kalibroinnin yhteydessä niin, että laskenta tuottaa mitattuja kuivatusvesimääriä vastaavan suotovesimäärän.

copyright© AFRY Finland Oy

Ruhjevyöhykkeet toteutettiin tasomaisina erillisinä objekteina (FEFLOW discrete features), jotka lisäävät hydraulista johtavuutta tasoa pitkin Darcyn lain mukaan mallissa. Ruhjeiden vedenjohtavuudesta ei ole mittaustietoa. Jokaisen ruhjevyöhykkeen paksuudeksi asetettiin 10 m. Punasuon louhosta leikkaavien ruhjeiden hydrauliseksi johtavuudeksi asetettiin $1 \cdot 10^{-6}$ m/s ja muiden $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Ruhjeiden hydrauliset johtavuuden arvot perustuvat mallin kalibrointiin (luku 4.5).

Taulukko 4-2. Pohjavesimallin kalliokerroksissa käytetyt hydraulisen johtavuuden arvot.

Syvyys kallion pinnasta (m), z noin (m mpy), (mallikerros)	Kallio Kxyz, m/s
0–10 m, +150…+140, (L5)	$1 \cdot 10^{-6}$
10–20 m, +140…+130, (L6)	$5 \cdot 10^{-7}$
20–35 m, +130…+115, (L7)	$2 \cdot 10^{-7}$
35–50 m, +115…+100, (L8)	$1{,}325 \cdot 10^{-7}$
50–100 m, +100…+45, (L9–13)	$1 \cdot 10^{-7}$
100–150 m, +45…0, (L14–17)	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$
150–225 m, −0…−75, (L18–21)	$1{,}25 \cdot 10^{-8}$
225–275 m, −75…−125, (L22–23)	$2{,}5 \cdot 10^{-9}$

Soidinsuon ja Papinlammen altaiden sekä sivukivialueen kohdalla mallin kolme ylintä kerrosta kuvaavat sivukiveä, rikastushiekkaa ja altaiden patomoreenia. Suljetun rikastushiekka-altaan sekä sivukivialueen kohdalla mallin ylin kerros kuvaa peittokerrosta. Sivukivialueelle asetettiin melko korkea vedenjohtavuus $1 \cdot 10^{-4}$ m/s ja rikastushiekalle $3{,}1 \cdot 10^{-6}$ m/s (mitattu Mitta Oy 17.4.2020). Allaspadoille asetettiin vedenjohtavuudeksi patomoreenille tyypillinen arvo $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Suljetun rikastushiekka-altaan peittokerrokselle mallin ylimpään kerrokseen asetettiin vedenjohtavuudeksi $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Sivukivialueen kohdalle mallin ylimpään kerroksen asetettiin vedenjohtavuudeksi $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ m/s. Arvo perustuu sivukivialueella tehtyihin peittokerroksen vedenjohtavuusmittauksiin (Vedenläpäisykokeet, Mitta Oy 2020, Taulukko 3-4). Lahnaslammen louhostäytön hydrauliseksi johtavuudeksi asetettiin $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Koska kaivoksella on tehty havaintoja, että vedellä täyttyneestä Lahnaslammen kaivoksesta tapahtuu veden suotautumista Punasuon louhokseen ja koska Punasuon louhoksen kuivatusvesimäärät ovat lisääntyneet selkeästi Lahnaslammen louhoksen vesipinnan noustessa tasolta +142 m mpy tasolle +150 m mpy, mallissa asetettiin kalibroinnin yhteydessä Punasuon ja Lahnaslammen kaivosten väliselle alueella kerroksiin 1–6 vedenjohtavuudeksi $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

4.5 Kalibrointi

Mallin kalibrointi tehtiin pohjavesiputkista mitattujen pohjavedenpintojen (luku 3.7) ja Punasuon louhoksen kuivatusvesimäärän perusteella (vuosina 2021–2022–

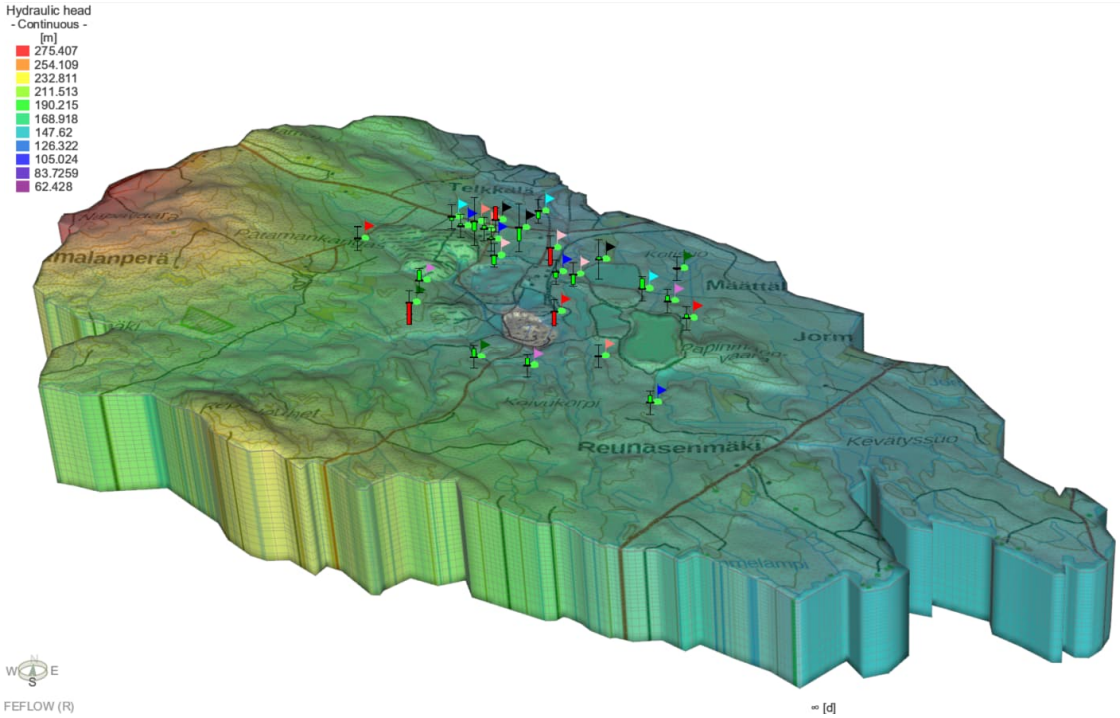
copyright© AFRY Finland Oy

2023 mitattu kuivatusvesimäärä: 1980–2180–2040 m^3/vrk, luku 3.11). Edellisissä kappaleissa on esitetty mallissa käytetyt reunaehdot ja materiaalien ominaisuudet, jotka tuottivat riittävällä tarkkuudella kaivoksen nykytilaa vastaavan laskentatuloksen.

Kalibroinnissa mallin laskema pohjaveden pinta asettui matalalle maakerrokseen, lähelle maanpintaa tai suoalueilla paikoin hiukan sen yläpuolelle, ja sopi kohtuullisen hyvin yhteen alueella pohjavesiputkista mitattujen pohjavedenpintojen kanssa (Kuva 4-7). Eniten eroa mallin ja mittaustulosten välillä on maanläjitysalueen länsipuolella sijaitsevassa pohjavesiputkessa MMPP7. Erot johtuvat todennäköisesti maaperän paikallisesta hydraulisen johtavuuden vaihtelusta. Kalibroidussa mallissa Punasuon louhokseen kuivatusvesimäärä on 1990 m^3/vrk, arvo sisältää avolouhokseen satavan veden, kun avolouhoksen kohdalla haihdunnan oletetaan olevan 50 % sadannasta.

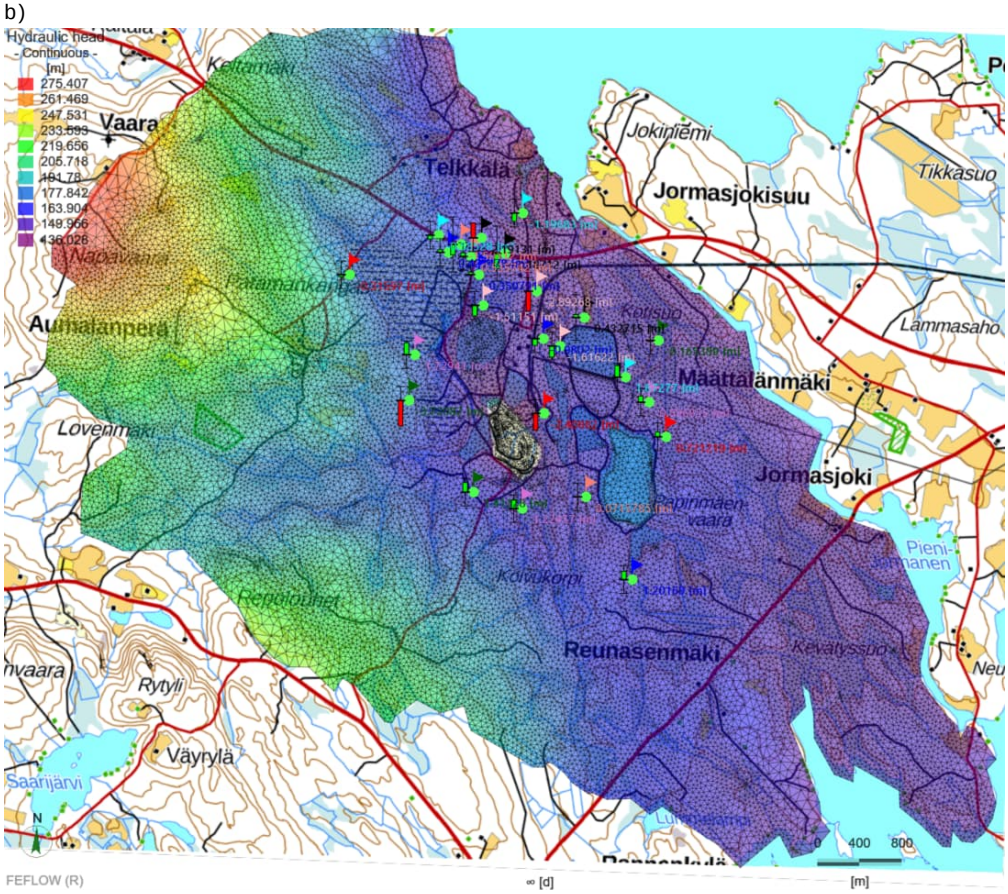
copyright© AFRY Finland Oy

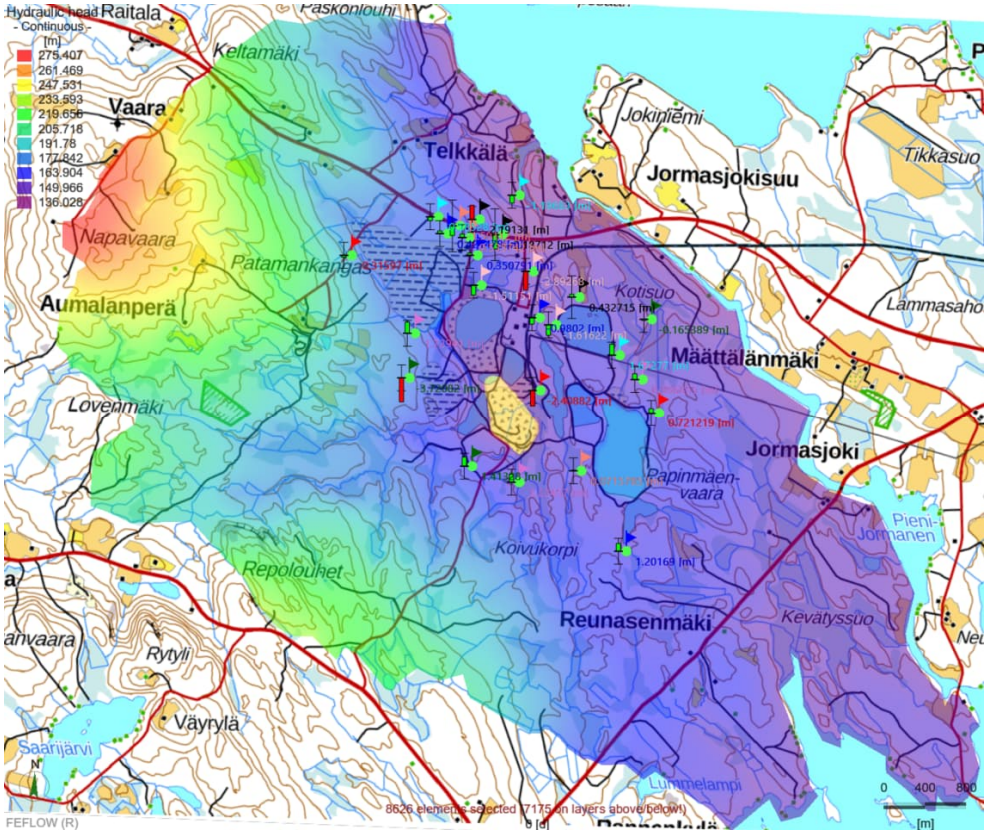
a)



copyright© AFRY Finland Oy

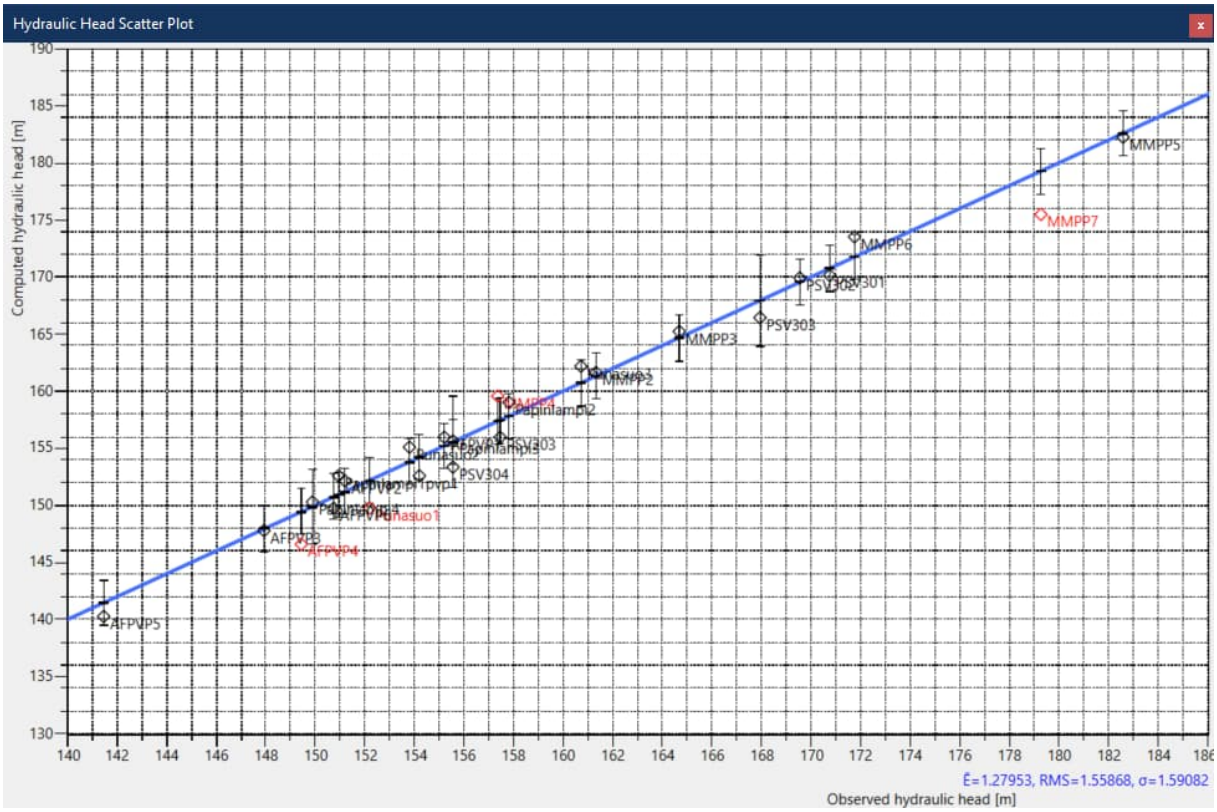
b)





copyright© AFRY Finland Oy

c)



Kuva 4-7. Mallin laskemat ja mitatut hydraulisen painekorkeuden arvot esitettynä a) 3D-malligeometriassa, b) 2D-karttaesityksenä ja c) kaaviokuvassa, jossa hydraulinen painekorkeus numeerisessa mallissa (musta vinoneliö) ja pohjaveden pinnankorkeuden mittaustulokset pohjavesiputkista (sininen viiva). Karttakuvissa vihreä ympyrä kuvaa pohjavesiputkea ja vieressä oleva jana mitatun ja mallin laskeman pohjavesipinnan korkeuden eroa.

4.6 Mallinnuksen tulokset

Mallinnus tehtiin kolmelle eri vaiheelle: vuosi 2024 ja 2035 sekä sulkemisen jälkeinen tilanne.

Raportissa esitetty pohjavesipinnan alenema on tarkasteluissa rajattu puoleen metriin mallinnuksessa käytettyihin lähtötietoihin, ennusteiden aikajänteeseen ja laskentaverkon tarkkuuteen perustuen. Esimerkiksi aleneman laskennassa pohjavesipinnan lähtötilanteelle ei ole käytettävissä mittaushavaintoja kaivosalueen ulkopuolisen alueen pohjaveden pinnankorkeudelle. Myös kallionpinnan topografian tarkkuus on kairatun alueen ulkopuolella heikompi, kun kairauksista saatava maaperän paksuustieto puuttuu.

Vuosi 2024 toimii simulaatioiden lähtötilanteena. Louhintoja edeltävää aikaa ei mallinnettu, eikä vuoden 2024 Punasuon louhoksen kuivatuspumppauksen aiheuttaman alenemakartion laajuutta suhteessa louhintoja edeltävään aikaan siten ole laskettu.

copyright© AFRY Finland Oy

4.6.1 Vaihe 1, vuosi 2024

Vaiheessa 1 simuloitiin nykyisen kaivoksen vaikutusta eli vuoden 2024 tilannetta. Kaivoksen alueella maanpinnan taso on noin 150–155 m mpy. Punasuon avolouhoksen koko on noin 830 × 420 metriä, ja se on noin 80 m syvä (alin taso noin +68 m mpy). Avolouhoksen simuloimiseksi mallissa louhoksen sisällä olevat elementit asetettiin epäaktiivisiksi ja louhoksen pinta tihkupinnaksi (seepage face). Mallin ylimmän kerroksen topografiassa on mukana sivukivialueet ja vesivarastoaltaat vuoden 2024 tilanteen mukaisina. Rikastushiekka-altaan korkeustaso on 176 m mpy.

Mallissa maaperän ja kallioperän hydrauliset johtavuudet asetettiin kalibroinnin yhteydessä niin, että mallin tuottama laskettu kaivoksen suotovesimäärä vastaa riittävän hyvin kuivatuspumppausten mittauksiin perustuvaa suotovesimäärää.

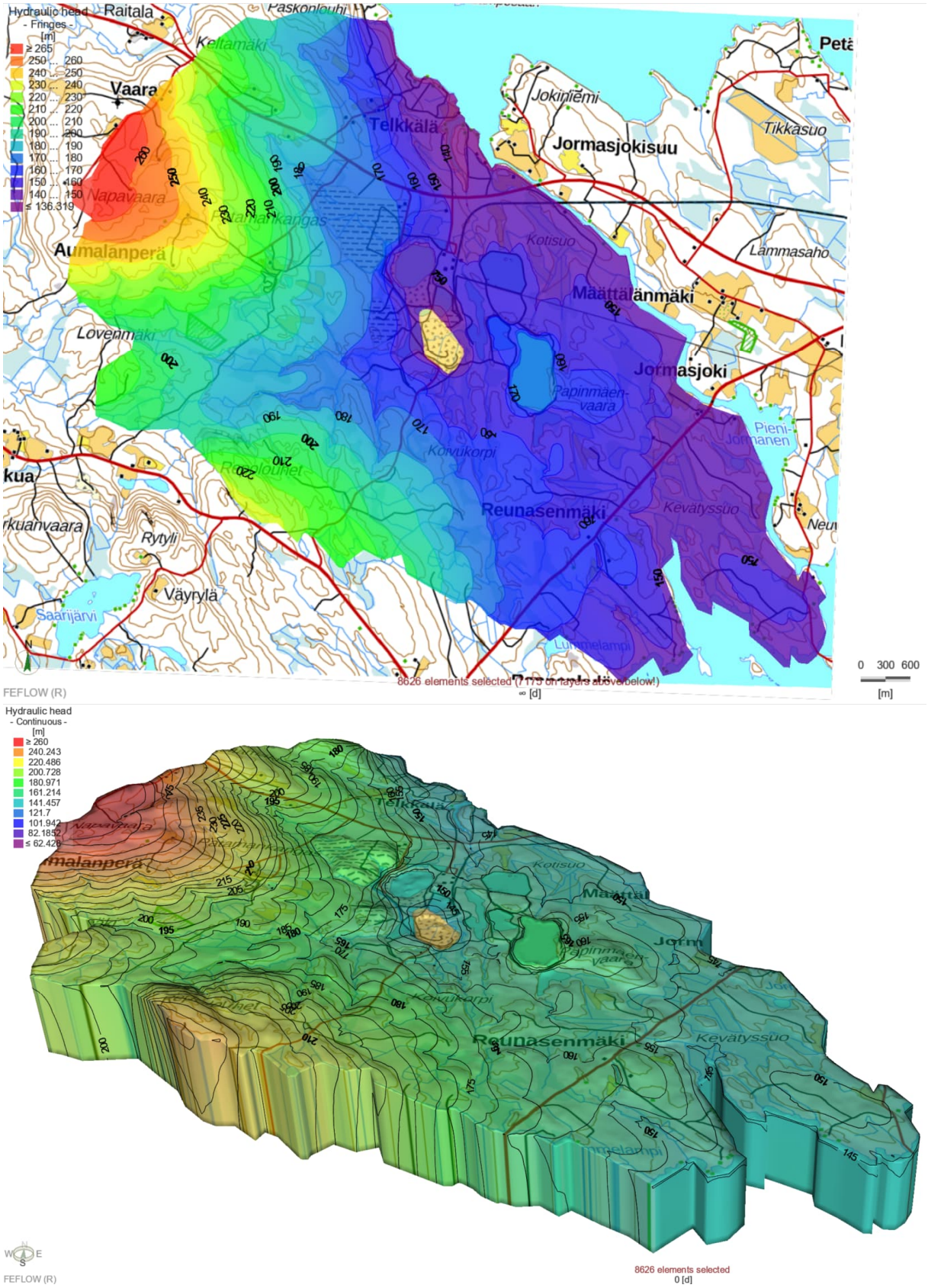
Kuvassa 4-8 on esitetty pohjaveden pinnankorkeusmallin ylimmässä kerroksessa vuonna 2024. Taustatietona on esitetty maastokartta. Kuvassa 4-9 on esitetty mallin laskemia sivukivialueelta ja rikastushiekka-altailta kulkeutuvien partikkelien kulkeutumisreittejä.

Kuvassa 4-10 esitetään mallinnustulokset poikkileikkauksissa, jotka leikkaavat Punasuon avolouhoksen. Väriskaala kuvaa laskettua pohjaveden painetta ja valkoinen viiva nollapainetta eli pohjavedenpintaa. Pohjavedenpinta seuraa avolouhoksen ja pintaa melko lähelle maanpintaa ja muodostaa sitten muutaman sadan metrin laajuisen alenemakartion avolouhoksen ympärille.

Kuvassa 4-11 esitetään pohjaveden suotautumisen jakautuminen louhosseinämille, pallon koko ja väri kuvaa pohjaveden suotautumisen määrää. Pohjavettä suotautuu eniten kallioperän yläosassa Lahnaslammen louhoksen puolelta sekä ruhjeista.

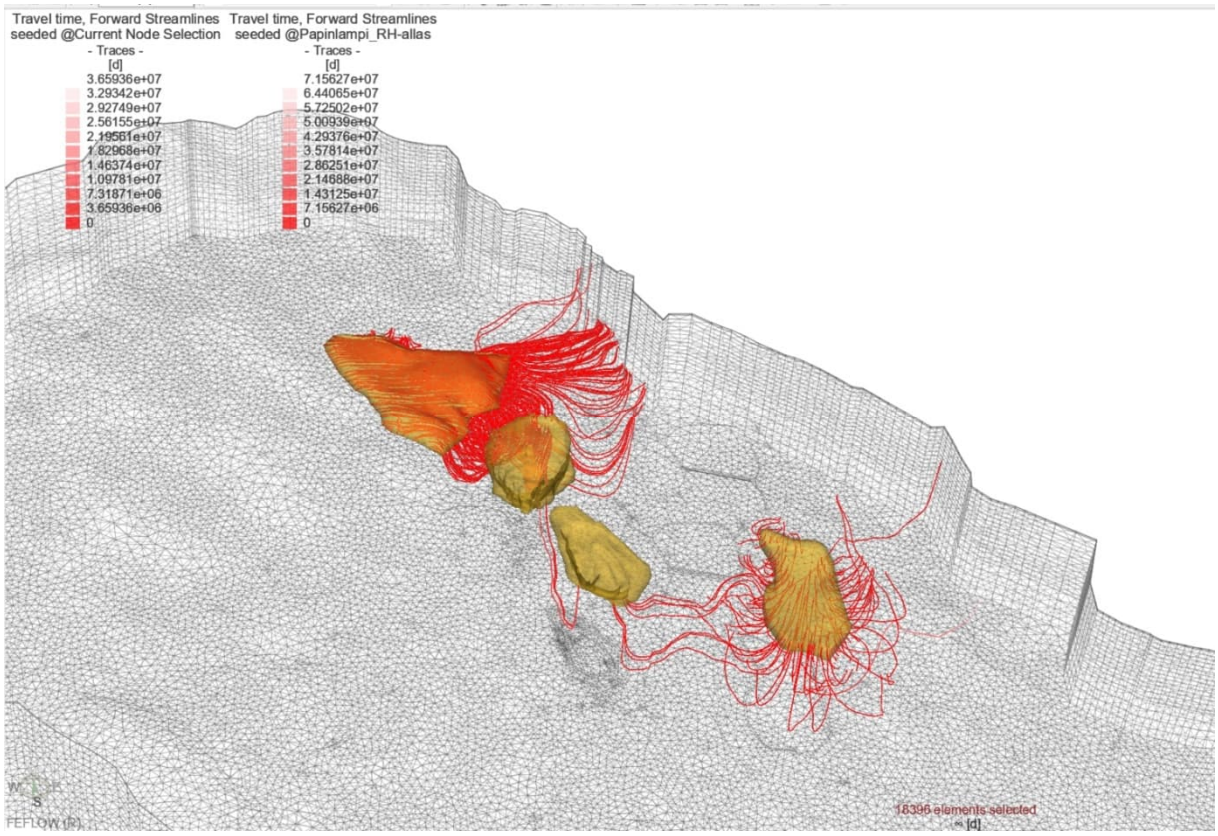
Vuoden 2024 louhoksen simuloinnin tulosten perusteella pohjavettä suotautuu louhokseen noin 1810 m^3/vrk, ja kuivatusvesimäärä on noin 1990 m^3/vrk, kun sadannan mukana avolouhoksen kautta kaivokseen tuleva vesi lasketaan mukaan ja haihdunnan louhoksen kohdalla oletetaan olevan 50 % sadannasta.

copyright© AFRY Finland Oy



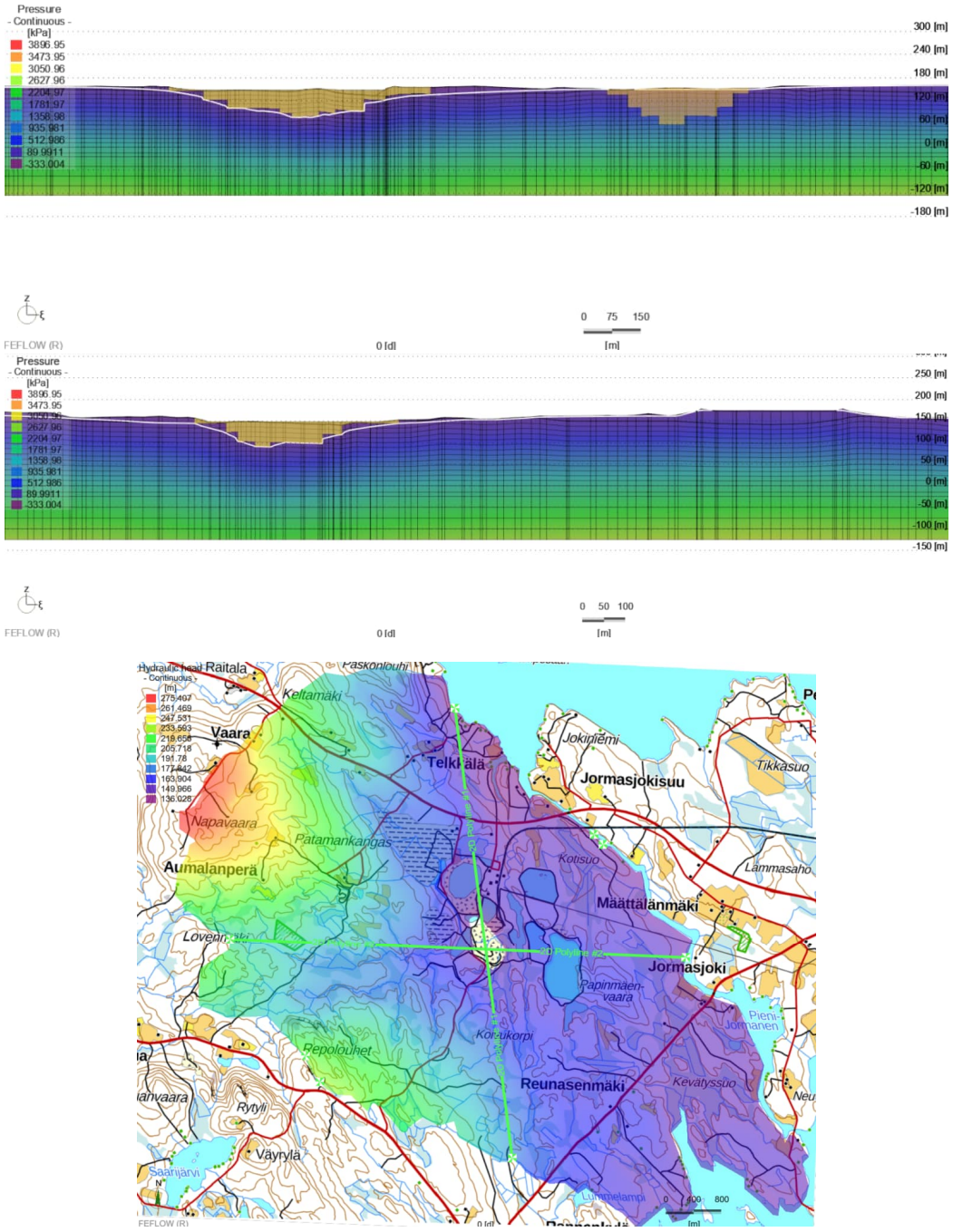
Kuva 4-8. Mallin laskema pohjavedenpinnan korkeus vuonna 2024.

copyright© AFRY Finland Oy



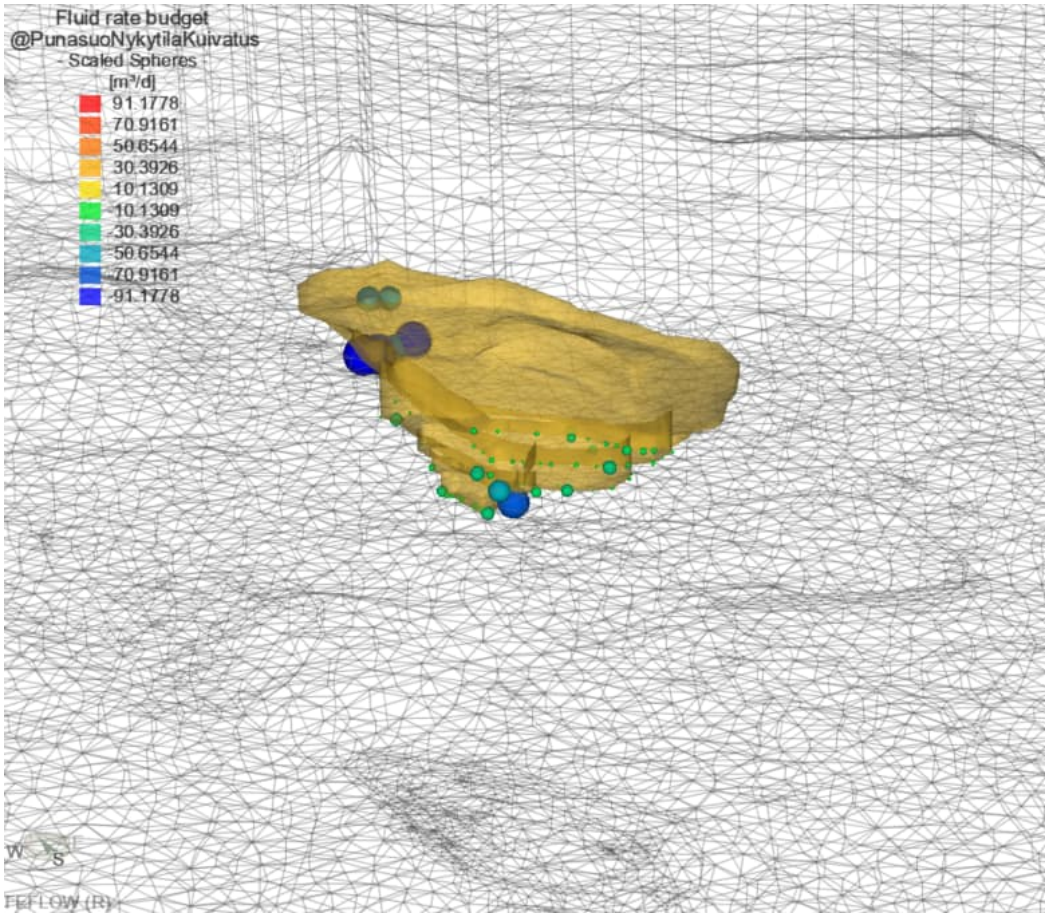
Kuva 4-9. Mallin laskemia sivukivialueelta ja Papinlammen rikastushiekka-altaalta lähtevien partikkelien kulkeutumisreittejä vuoden 2024 louhoksen tilanteessa.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-10. Poikkileikkaukset pohjavedenpinnan (valkoinen viiva) visualisoimiseen. Punasuon ja Lahnaslammen louhokset korostettu keltaisella.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-11. Pohjaveden suotautumisen jakautuminen louhosseinämälle, pallon koko ja väri kuvaa pohjaveden suotautumisen määrää.

4.6.2 Vaihe 2, vuosi 2035

Vaiheessa 2 mallinnettiin vuoden 2035 tilanne, jossa Punasuon louhosta on laajennettu vuoden 2024 tilanteesta, ja se ulottuu noin 120 metrin syvyydelle maanpinnasta (taso +35 m mpy). Lahnaslammen avolouhos, sivukivialueet ja vesivarastoaltaat ovat samanlaiset kuin vaiheessa 1 lukuun ottamatta Papinlammen rikastushiekka-allasta, jonka korkeus on +190 m mpy ja vesipinta 185 m mpy. Avolouhoksen simuloimiseksi vuoden 2035 mukaisen louhoksen sisällä olevat elementit asetettiin epäaktiivisiksi ja louhoksen pinta tihkupinnaksi (seepage face).

Kuvassa 4-12 on esitetty pohjavedenpinnan alenema mallin ylimmässä kerroksessa vuonna 2035 vuoteen 2024 verrattuna. Alenemakartiosta nähdään, että pohjavedenpinnan alenema ulottuu noin 200–900 m laajuiselle alueelle avolouhoksen ympärille. Laajuus vaihtelee eri suunnissa. Kuvassa 4-13 on esitetty pohjaveden pinnankorkeus mallin ylimmässä kerroksessa vuonna 2035. Kuvassa

copyright© AFRY Finland Oy

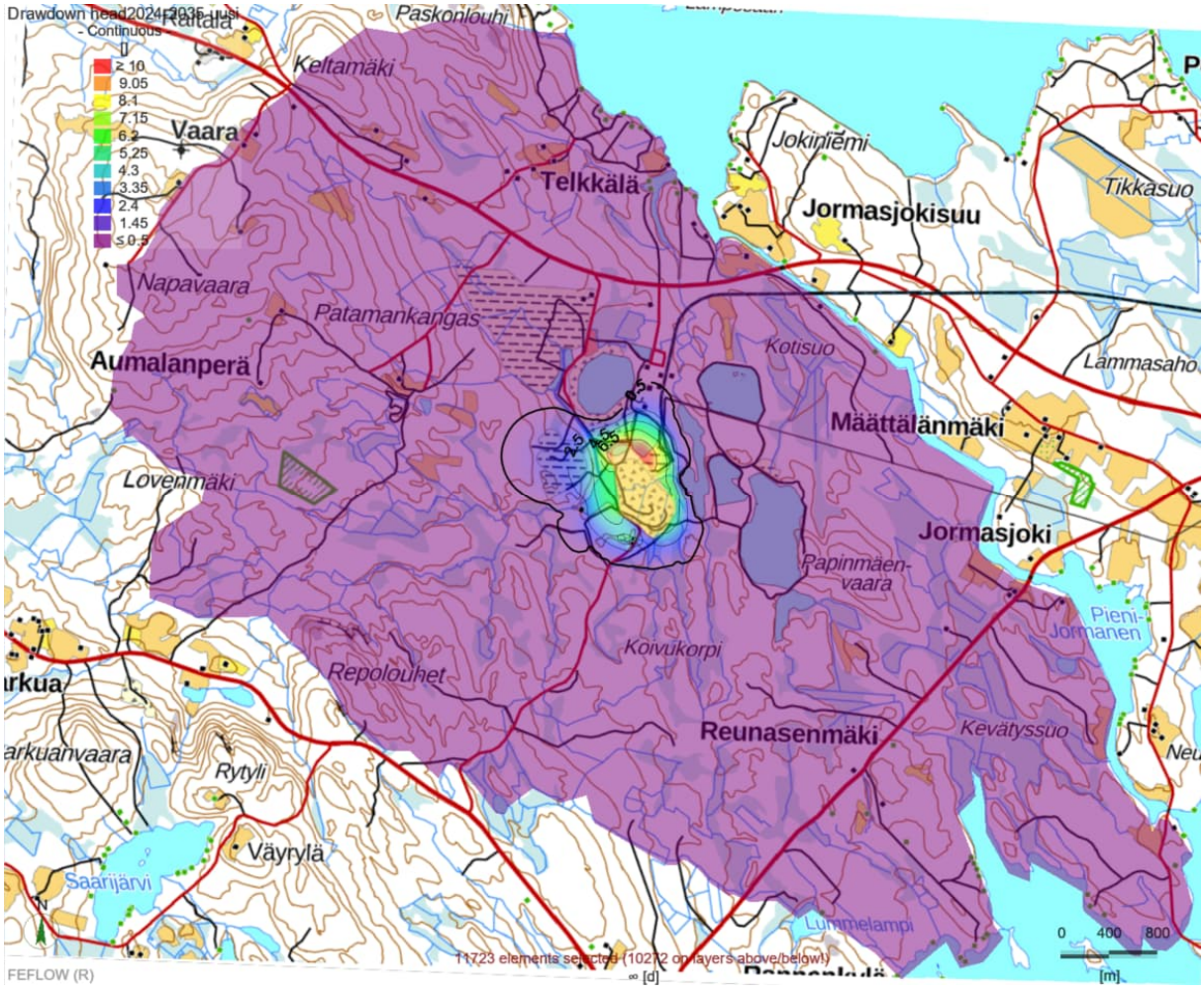
4-14 on esitetty mallin laskemia sivukivialueelta ja rikastushiekka-altailta kulkeutuvien partikkelien kulkeutumisreittejä.

Kuvassa 4-15 esitetään mallinnustulokset poikkileikkauksissa, jotka leikkaavat avolouhoksen. Väriskaala kuvaa laskettua pohjaveden painetta ja valkoinen viiva nollapainetta eli pohjavedenpintaa. Pohjavedenpinta seuraa avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen pintaa melko lähelle maanpintaa ja muodostaa sitten muutaman sadan metrin laajuisen alenemakartion avolouhoksen ympärille.

Kuvassa 4-16 esitetään pohjaveden suotautumisen jakautuminen louhos seinämille, pallon koko ja väri kuvaa pohjaveden suotautumisen määrää.

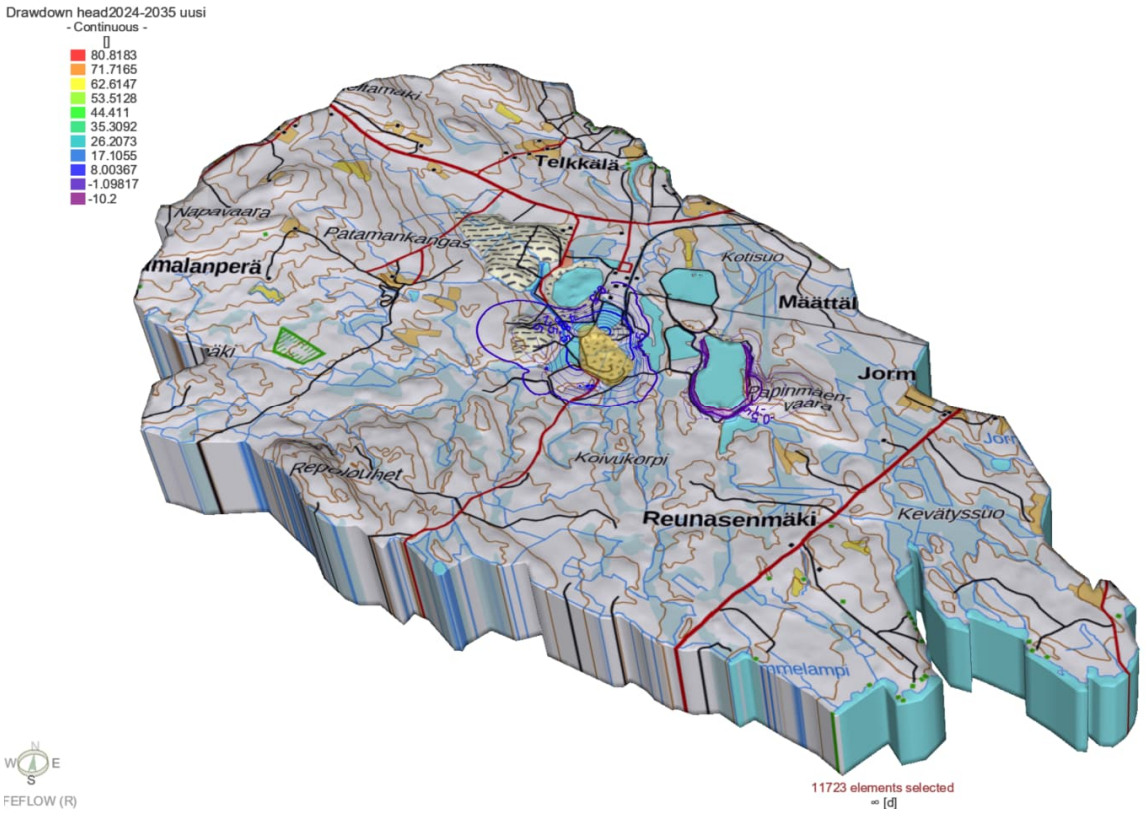
Vuoden 2035 louhoksen simuloinnin tulosten perusteella pohjavettä suotautuu louhokseen noin 2560 m^3/d, ja kuivatusvesimäärä on noin 2750 m^3/vrk, kun sadannan mukana avolouhoksen kautta kaivokseen tuleva vesi lasketaan mukaan.

a)

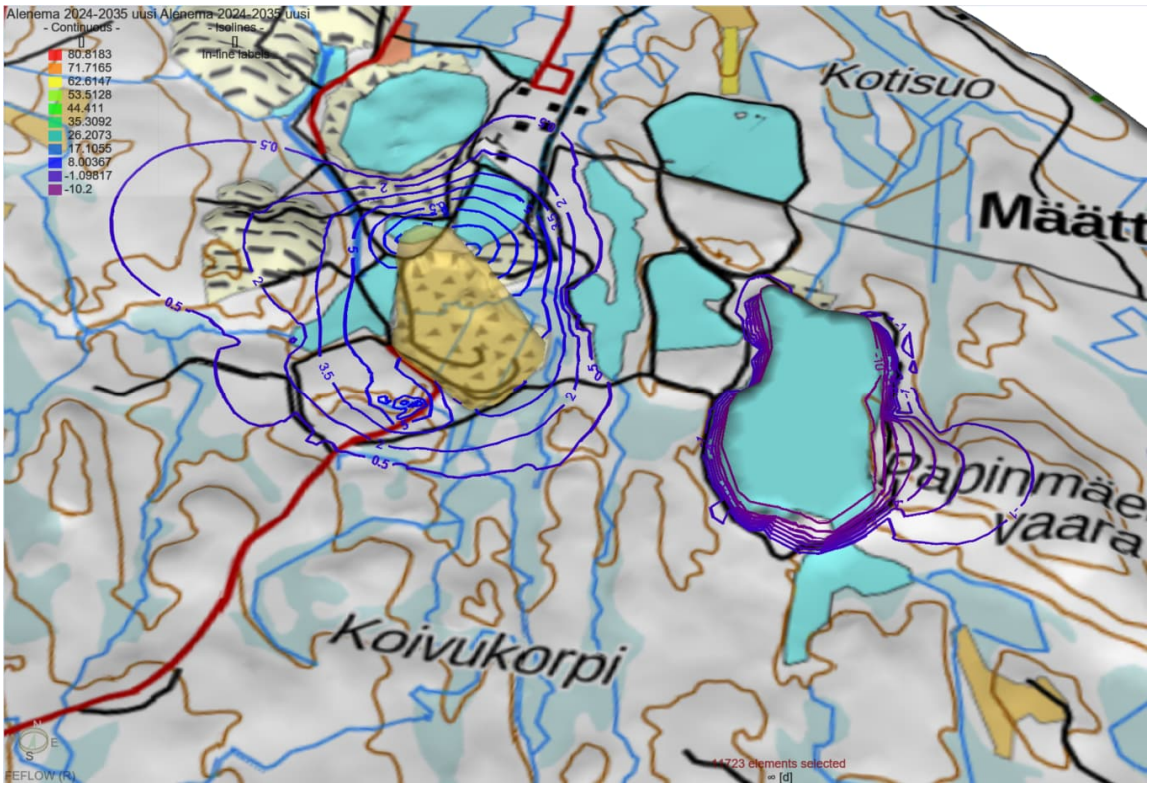


b)

copyright© AFRY Finland Oy

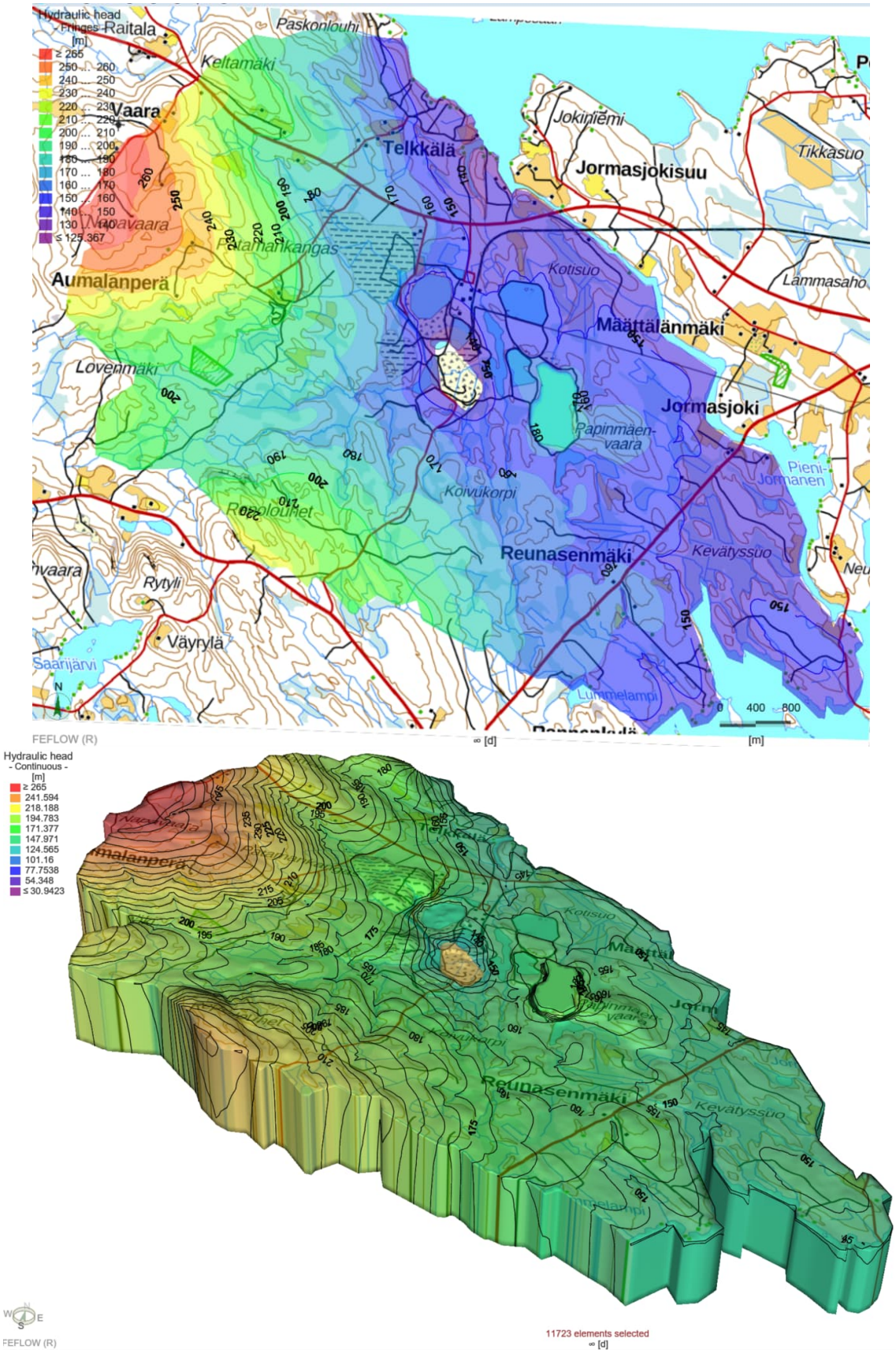


c)



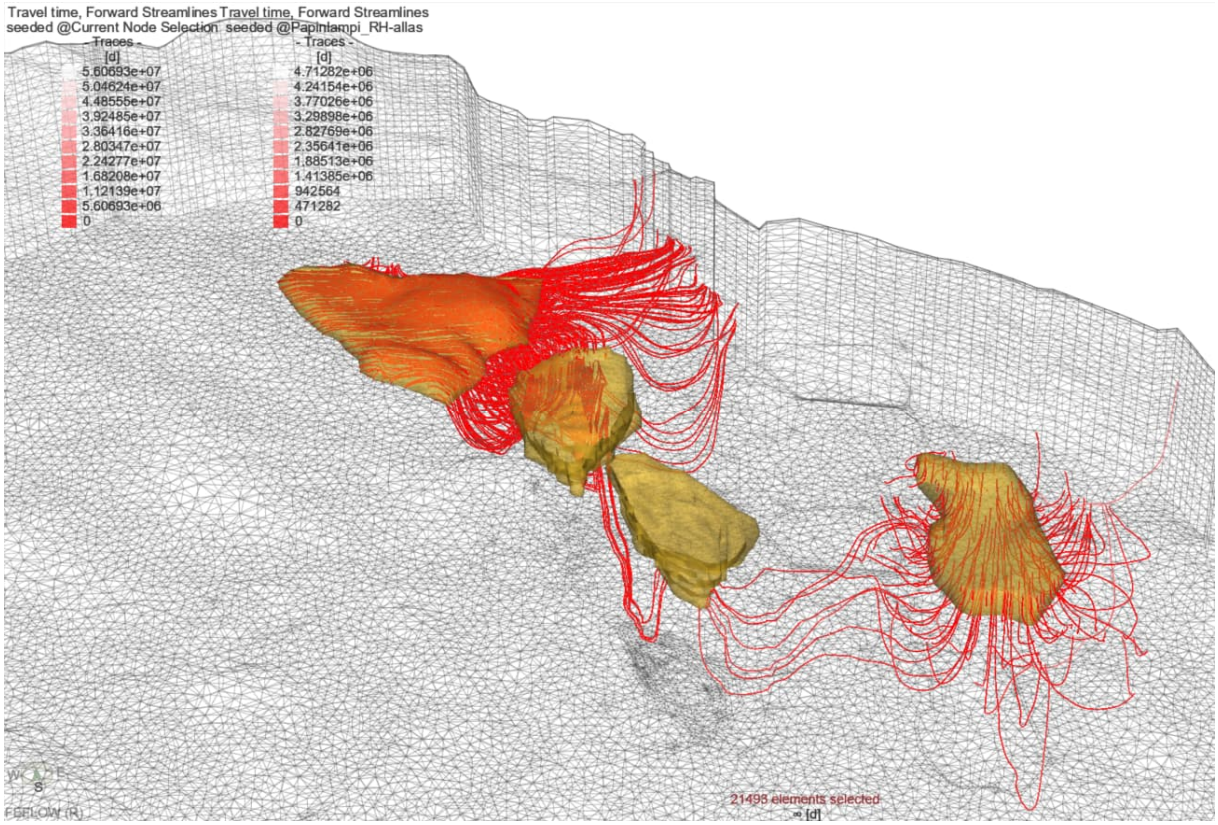
Kuva 4-12. Pohjavedenpinnan alenema vuonna 2035 verrattuna vuoden 2024 pohjavedenpintaan a) 2D esitys, b) 3D esitys ja c) louhoksen lähialue. Punasuon louhoksen ympärillä pohjavesipinta laskee ja Papinlammen rikastushiekka-altaan kohdalla vesipinta nousee. 0,5 m tasa-arvonkäyrä louhoksen ympärillä rajaa alueen, jonka ulkopuolella pohjavesipinnan muutos on pienempi kuin 0,5 m.

copyright© AFRY Finland Oy



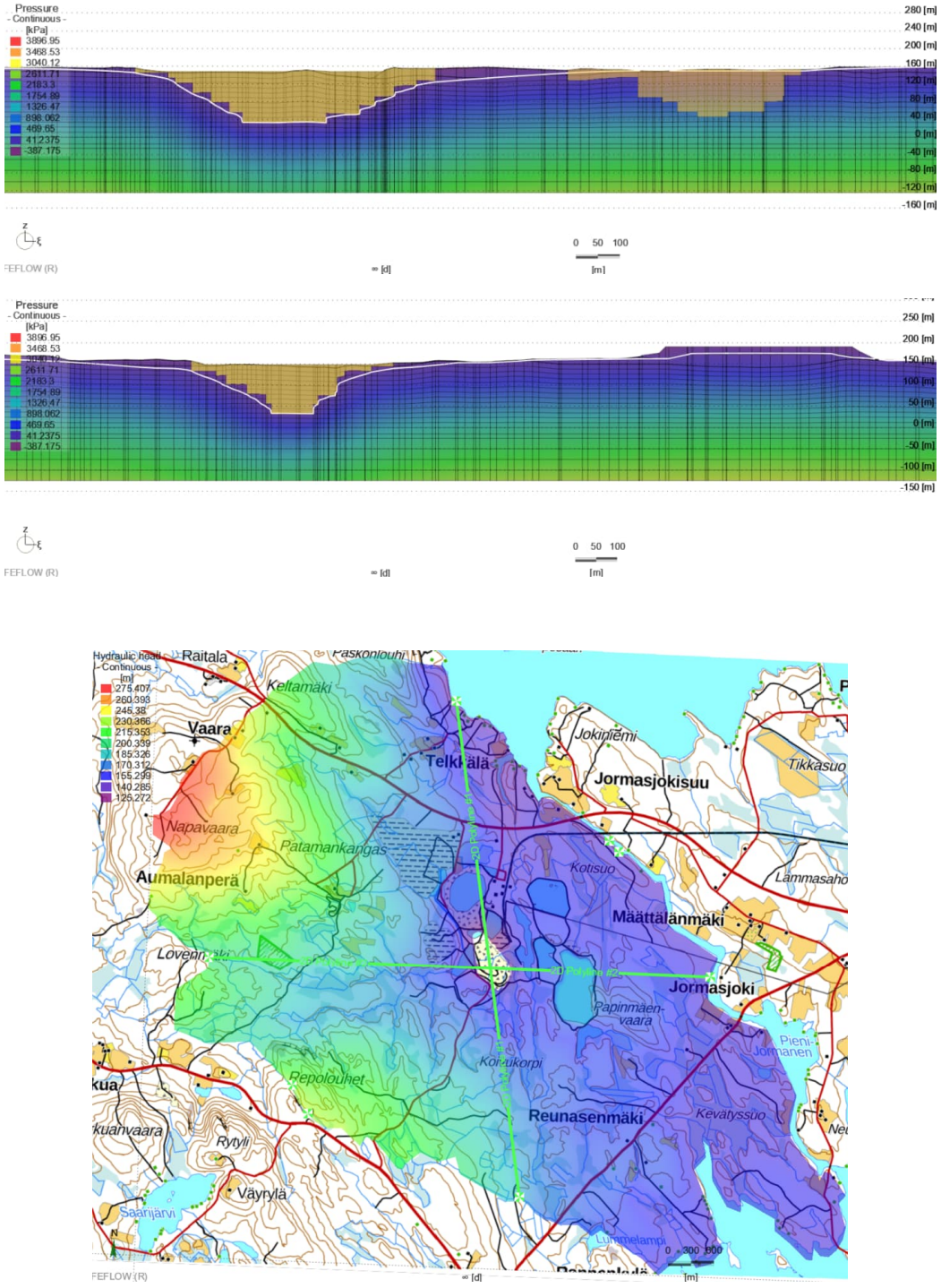
Kuva 4-13. Mallin laskema pohjavedenpinnan korkeus vuonna 2035.

copyright© AFRY Finland Oy



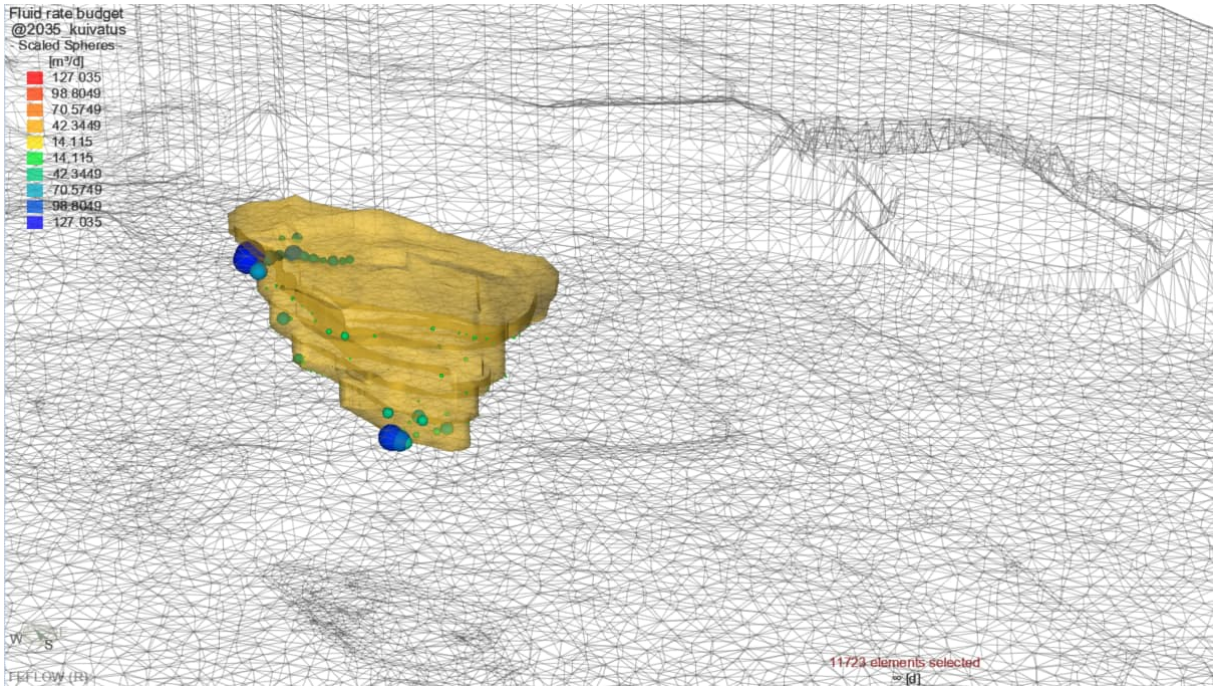
Kuva 4-14. Mallin laskemia sivukivialueelta ja Papinlammen rikastushiekka-altaalta lähtevien partikkelien kulkeutumisreittejä vuoden 2035 louhoksen tilanteessa.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-15. Poikkileikkaus pohjavedenpinnan (valkoinen viiva) visualisoimiseen.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-16. Pohjaveden suotautumisen jakautuminen louhosseinämälle, pallon koko ja väri kuvaa pohjaveden suotautumisen määrää.

4.6.3 Vuoden 2035 louhoksen sulkemisen jälkeinen tilanne

Vuoden 2035 mukaisen louhoksen sulkemisen jälkeistä tilannetta mallinnettiin tasapainotilan ja muuttuvan tilanteen eli transienttilaskentana. Lähtökohtana oli vuoden 2035 malli.

Punasuon louhosjärven täyttymisnopeuden arvioimiseksi tehtiin simulaatio, jossa käytettiin alkutilanteena kuivana pidettyä, vuoden 2035 laajuuden louhosta eli vuoden 2035 mallia ja sen aiheuttamaa pohjaveden painekorkeuden alenemaa. Ojitukset muutettiin vastaamaan sulkemisen jälkeistä tilannetta eli Punasuon ja Lahnaslammen louhoksiin lisättiin purkuojat tasoille 150,0 m mpy. Sivukivialueen bentoniittipeittokerroksen vedenjohtavuudeksi asetettiin $7 \cdot 10^{-9}$ m/s ja Papinlammen ja Soidinsuonaltaan rikastushiekka-altaan peittomoreenikerroksen vedenjohtavuudeksi $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Lahnasjoen allas (makkara-allas) jätettiin malliin sellaisenaan ja muut vesialtaat poistettiin mallista (Kuva 3-1). Rikastushiekka-altaan vesipinnan korkeuden reunaehto poistettiin ja allasalueen pohjaveden muodostumisen määräksi asetettiin 290 mm/a. Sivukivialueella pohjaveden muodostumisen nopeudeksi asetettiin 5 % sadannasta eli 31 mm/a (bentoniittipeitteen vuoksi). Suotopintareunaehto (seepage face) poistettiin avolouhoksesta ja louhoksen sisällä olevat elementit palautettiin mukaan malliin tilavuutena, jolla on erittäin suuri vedenjohtavuus. Avolouhoksessa varastokertoimeksi asetettiin avolouhoksen syvyyden käänteisluku $(120\ m)^{-1}$.

copyright© AFRY Finland Oy

Näillä muutoksilla avolouhoksen louhoselementtien muodostama avoin tila käyttäytyy mallinnuksessa kuten täyttyvä louhosjärvi, jossa painekorkeus vastaa vedenpinnan korkeutta. Suorasta sadannasta oletettiin jäävän järveen puolet, ja toisen puolen poistuvan haihtumalla.

Simuloitu louhosjärven vesipinnan korkeuden nousu Punasuon avolouhoksessa on esitetty kuvassa 4-17. Laskennan perusteella louhoksen vedellä täyttyminen on nopeinta ensimmäisen 5–10 vuoden aikana. Vedenpinnan nousu hidastuu tämän jälkeen ja tasaantuu noin 15 vuoden kohdalla. Avolouhoksessa vesipinta nousee noin tasolle +150 m mpy eli purku-uoman tasoon. Simuloinnin tulos on kuitenkin karkea arvio, koska avolouhoksen täyttymiseen vaikuttaa muualta alueelta avolouhokseen johdettavan veden määrä ja avolouhokseen tuleva pintavalunta.

Sulkemisen jälkeistä tilaa mallinnettiin myös tasapainotilan mallilla, jolla simuloitiin pohjaveden virtausta, kun kaivos on täyttynyt puoliksi ja kokonaan vedellä.

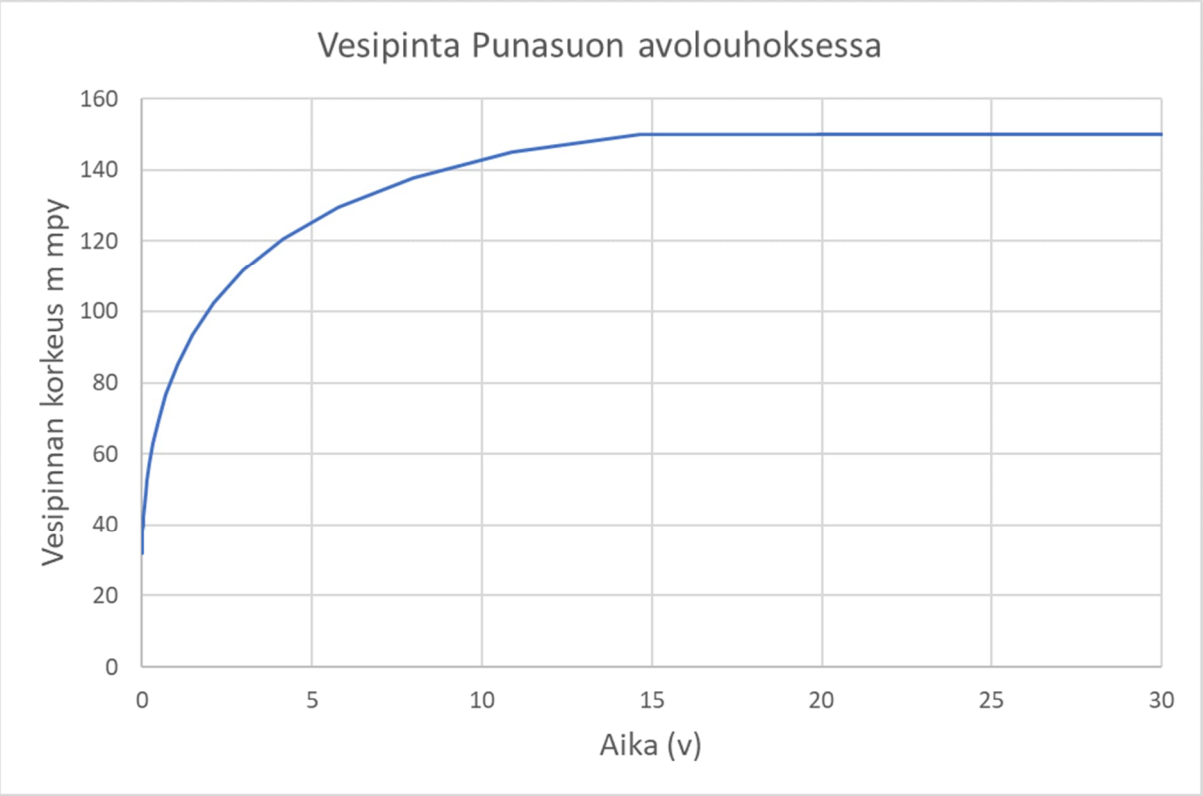
Vuonna 2035 louhinnan laajimmassa vaiheessa Punasuon louhoksen ollessa vielä tyhjä louhokseen suotautuu pohjavettä noin 2560 m^3/d. Kun louhos on täyttynyt puoliksi vedellä, ja vesipinta on noin tasolla +90 m mpy, pohjavettä suotautuu noin 2245 m^3/d. Täyttyneeseen louhokseen suotautuu pohjavettä noin 682 m^3/d.

Vastaavasti Punasuon louhoksen täyttymisen jälkeen viereiseen Lahnaslammen vedellä täyttyneeseen louhokseen suotautuu pohjavettä 900 m^3/d.

Pohjavesipinta sulkemisen jälkeisessä tasapainotilassa on esitetty kuvassa 4-18. Louhosjärven alueelta pohjaveden gradientti on lännestä ja lounaasta itään ja koilliseen kohti Nuasjärveä ja Jormasjokea. Esitetyt vesimäärät eivät sisällä louhosjärviin pintavaluntana tulevia tai muualta alueelta johdettavia vesiä.

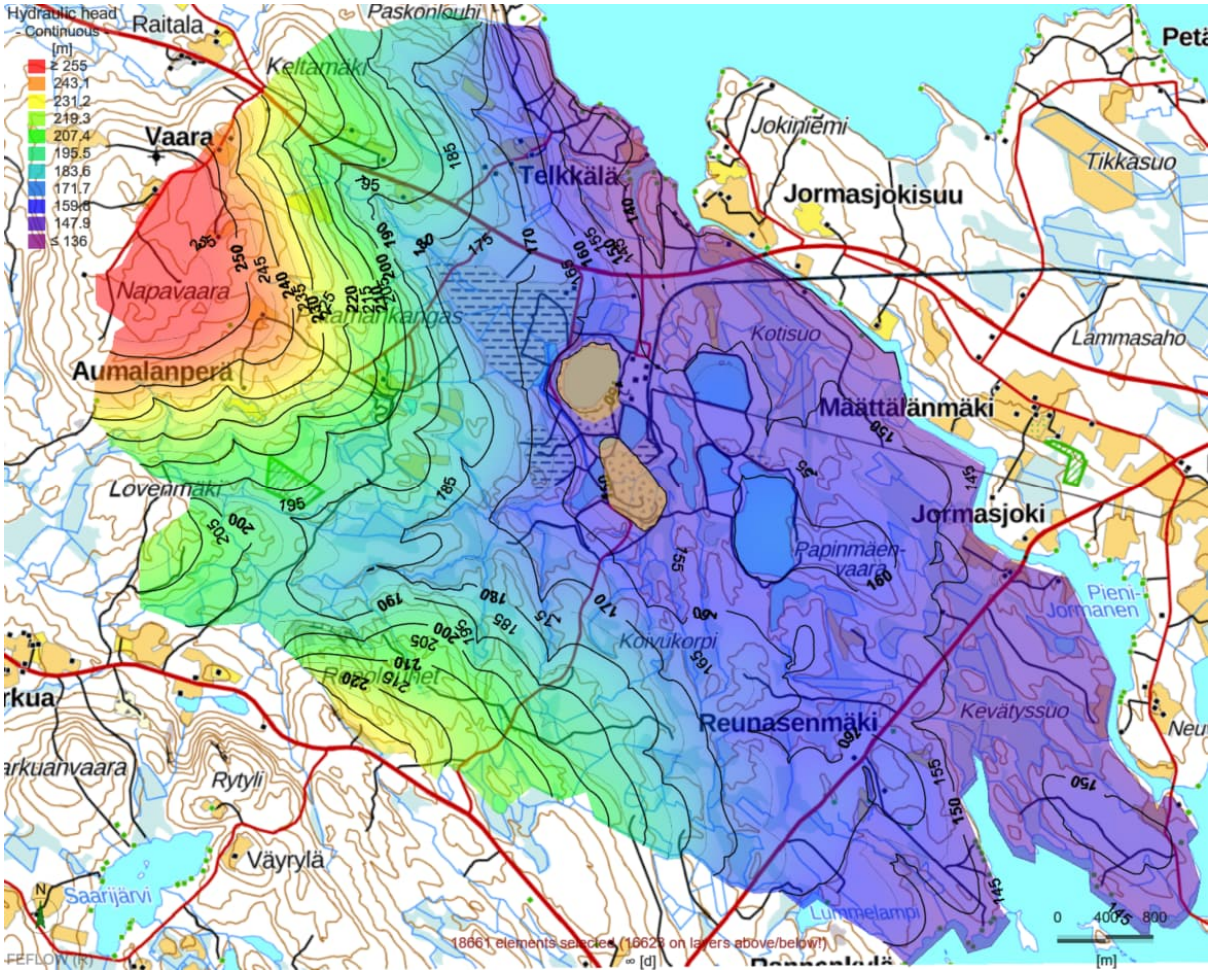
Kuvassa 4-19 on esitetty mallin laskemia sivukivialueelta ja rikastushiekka-altailta kulkeutuvien partikkelien kulkeutumisreittejä sulkemisen jälkeisessä tilanteessa. Kulkeutumisajat voivat olla hyvin pitkiä.

copyright© AFRY Finland Oy



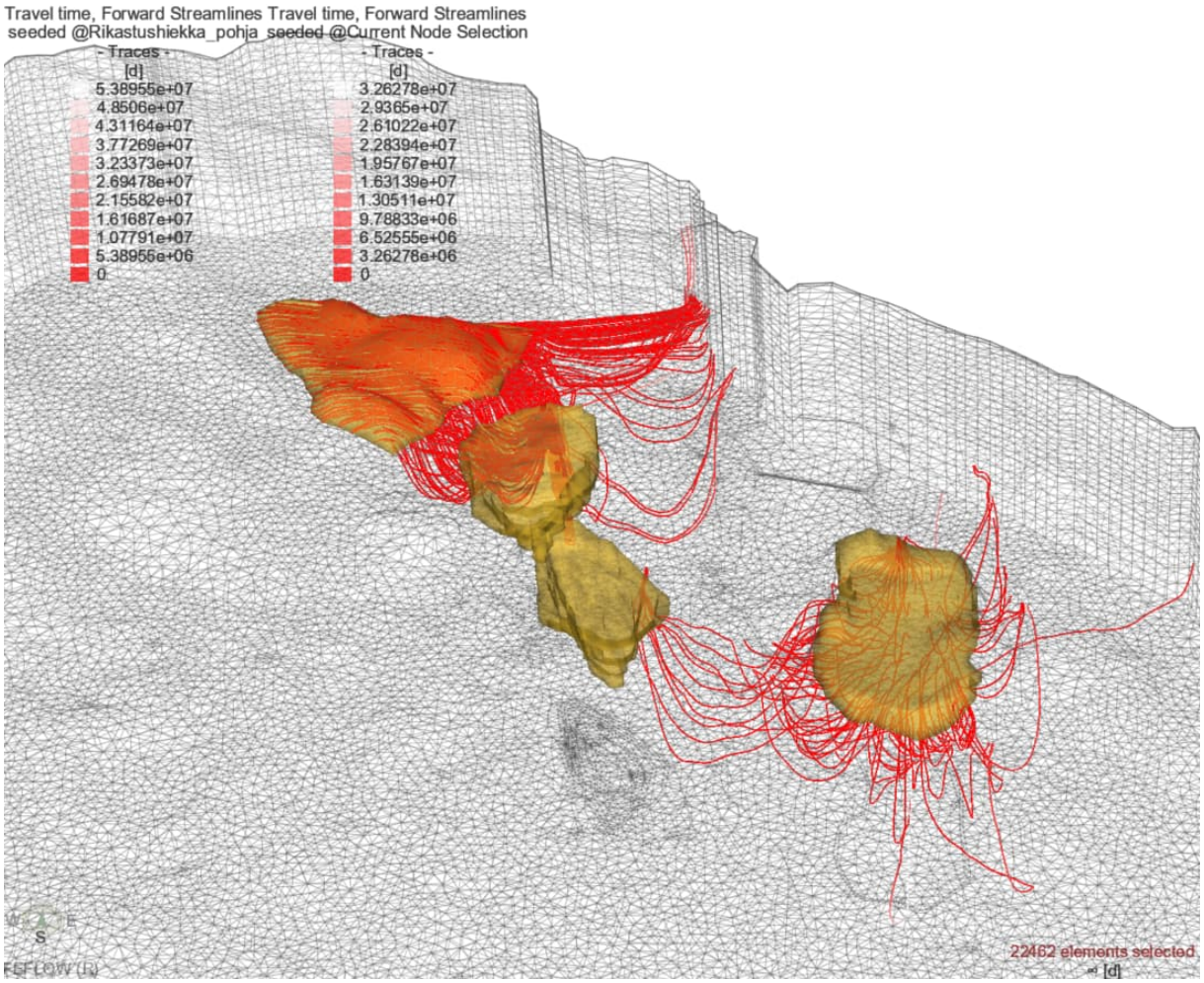
Kuva 4-17. Punasuon avolouhoksen täyttyminen vedellä kaivoksen sulkemisen jälkeen. Täyttymisnopeuteen vaikuttaa myös pintavalunta ja muualta alueelta louhokseen johdettavien vesien määrä, joita ei tässä arviossa ole huomioitu.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-18. Pohjavesipinnan korkeus sulkemisen jälkeisessä tilanteessa, kun Punasuon louhos on täyttynyt vedellä. Punasuon ja Lahnaslammen louhosjärvet on korostettu keltaisella.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 4-19. Mallin laskemia sivukivialueelta ja Papinlammen rikastushiekka-altaalta lähtevien partikkelien kulkeutumisreittejä sulkemisen jälkeisessä tilanteessa.

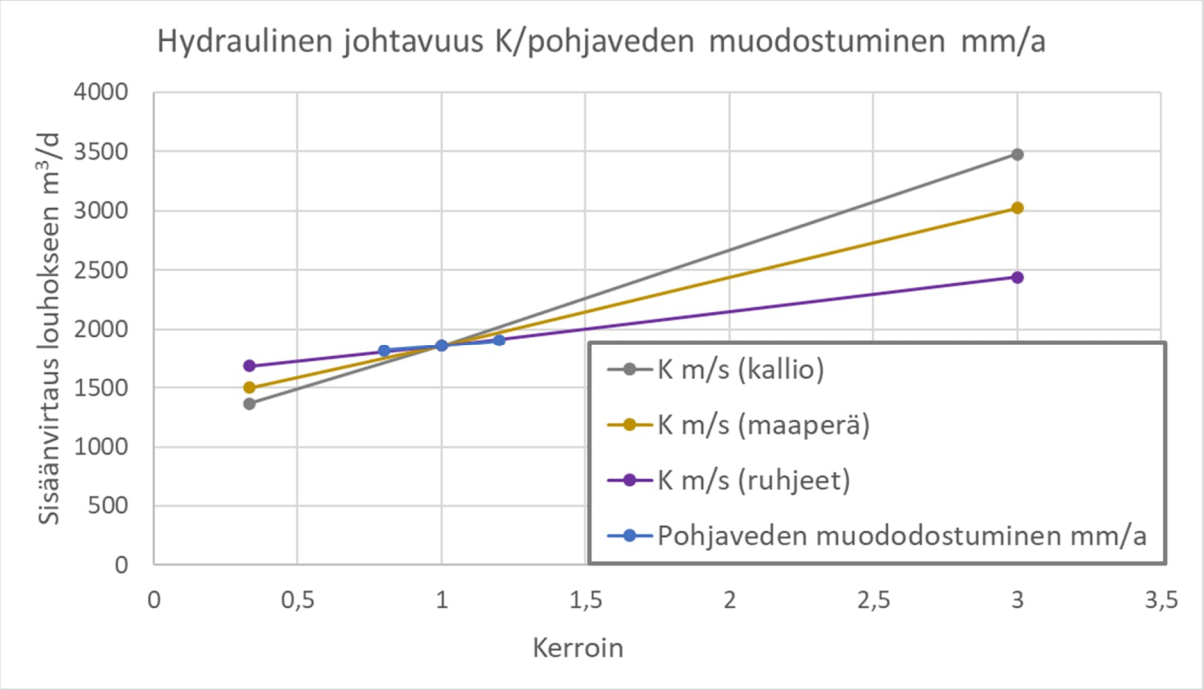
4.7 Herkkyystarkastelut

Hydraulisen johtavuuden ja sadannan vaikutusta laskettuihin kaivoksen suotovesimääriin arvioitiin tekemällä herkkyysanalyysiä. Herkkyystarkastelut esitetään kallion, ruhjeiden ja maaperän hydraulisen johtavuuden sekä pohjaveden muodostumisen suhteen nykytilanteen simulointeina.

Tarkastelut tehtiin erillisinä. Hydraulista johtavuutta muutettiin kaikissa mallin maa- tai kalliokerroksissa jakamalla tai kertomalla kalliotilavuudelle määritellyt K-arvot tekijällä kolme (Kuva 4-20). Samoin herkkyystarkastelua tehtiin Punasuon louhosta leikkaavien ruhjeiden suhteen jakamalla tai kertomalla ruhjeille määritellyt K-arvot tekijällä kolme. Kallion hydraulinen johtavuus vaikuttaa eniten suotovesimääriin. Maakerrosten hydraulisen johtavuuden muutoksilla ei ollut aivan yhtä suurta vaikutusta suotovesimääriin kuin kalliokerrosten muutoksilla. Suhteessa pienin vaikutus oli ruhjeiden hydraulisen johtavuuden arvolla. Mallin

copyright© AFRY Finland Oy

herkkyys hydraulisen johtavuuden arvon suhteen on systemaattinen, mikä viittaa siihen, että malli toimii numeerisesti järkevästi mallinnetuissa tilanteissa.



Kuva 4-20. Hydraulisen johtavuuden herkkyysanalyysi nykytilanteen mallissa. Kaivoksen suotovesimäärän vaihtelu, kun ruhjeille, kalliolle ja maaperälle asetettuja hydraulisen johtavuuden arvoja suurennettiin tai pienennettiin kertoimella 3 tai pohjaveden muodostumisen määrää muutettiin kertoimella 0,8 tai 1,2 (20 %).

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia Suomen olosuhteisiin on arvioitu Ilmasto-opas.fi (Ilmatieteenlaitos 2023b) sivustoilla. Suomen sademäärien arvioidaan kasvavan. Sotkamon alueella vuotuisten sademäärien arvioidaan kasvavan vuosisadan aikana 6–17 prosenttia verrattuna jaksoon 1981–2010. Keskimäärin vuodessa sataisi 690–770 mm.

Herkkyysanalyysissä tarkasteltiin sadannan vaikutusta. Sadannasta pohjavedeksi imeytyvän veden määrää kasvatettiin ja pienennettiin 20 % alkuperäisestä arvosta. Näiden muutosten vaikutus kaivoksen suotovesimäärään on esitetty kuvassa 4-20.

copyright© AFRY Finland Oy

5 Johtopäätökset ja epävarmuudet

Punasuon louhoksen mitattu kuivatusvesimäärä on vuosina 2021, 2022 ja 2023 ollut noin 722 595, 795 486 ja 745 598 m^3 (1980, 2180 ja 2040 m^3/vrk). Määrä sisältää sadeveden ja louhokseen suotautuvan pohjaveden. Kuivatusvesimäärät Punasuon ja viereisen Lahnaslammen louhoksilta on saatavilla vuosilta 2005–2023. Vesimäärät ovat vaihdelleet paljonkin perättäisten vuosien välillä. Vuosina 2009 ja 2010 kuivatusta on tehty molemmissa louhoksissa. 2011 alkaen Lahnaslammen louhoksen kuivatus on lopetettu ja louhos on täyttynyt vedellä. Tämä on vaikuttanut viereisen Punasuon louhoksen kuivatusvesimääriin, sillä pohjavettä on suotautunut Lahnaslammen louhokseen. Vuosien 2020–2021 aikana Lahnaslammen louhoksen vesipinta on noussut tasolta 142 m mpy tasolle 150 m mpy, ja samalla Punasuon louhoksen kuivatusvesimäärä on kasvanut noin 200 000 m^3/d. Punasuon louhoksen kuivatusvedet on johdettu lokakuuhun 2024 asti Lahnaslammen louhokseen. Kaivoksella tehtyjen havaintojen perusteella täyttyneestä Lahnaslammen kaivoksesta suotautuisi vettä takaisin Punasuon louhokseen.

Punasuon louhoksen nykytilaa simuloivan (vuosi 2024) numeerisen pohjavesimallin laskema pohjaveden suotovesimäärä louhokseen on noin 1810 m^3/vrk ja jos suoraan louhokseen satava vesi otetaan mukaan ja oletetaan haihdunnan louhosalueella olevan 50 % sadannasta, kuivatusvesimäärä on 1990 m^3/vrk. Vuoden 2035 louhosta simuloivassa mallissa pohjaveden suotovesimäärä on noin 2560 m^3/d ja vastaava sadeveden sisältävä kuivatusvesimäärä noin 2750 m^3/vrk.

Kuvassa 5-1 esitetään, kuinka suotovesimäärä jakaantuu simuloinnissa kaivoksen eri syvyysväleille vuosien 2024 ja 2035 louhoksessa. Maanpinnan korkeus Punasuon avolouhoksen kohdalla on noin +150…+160 m mpy. Suotovesimäärä on suurin syvyystasolla +100…+125 m mpy.

Kun verrataan nykytilanteen ja vuoden 2035 simulaation laskemia pohjavesipintoja louhosalueella, vuoden 2035 louhoksen kuivatuspumppauksen aiheuttama pohjaveden alenemakartio ulottuu noin 200–900 m etäisyydelle louhoksen reunasta ja on laajin louhoksen länsipuolella.

Punasuon louhoksen kuivatuspumppauksen lopettamisen jälkeen avolouhoksen vedellä täyttymiseen menee mallin mukaan noin 15 vuotta, mutta tulokseen vaikuttaa paljon myös pintavalunta ja louhokseen muualta johdettava vesimäärä, jotka eivät ole laskennassa mukana. Täyttymisen jälkeen pohjaveden virtausgradientti on kohti koillista ja itää, mutta Punasuon avolouhoksen ylivuoto tapahtuu lähinnä purkuojaa pitkin ja pohjaveden virtaus kallio-osuudessa on hyvin vähäistä.

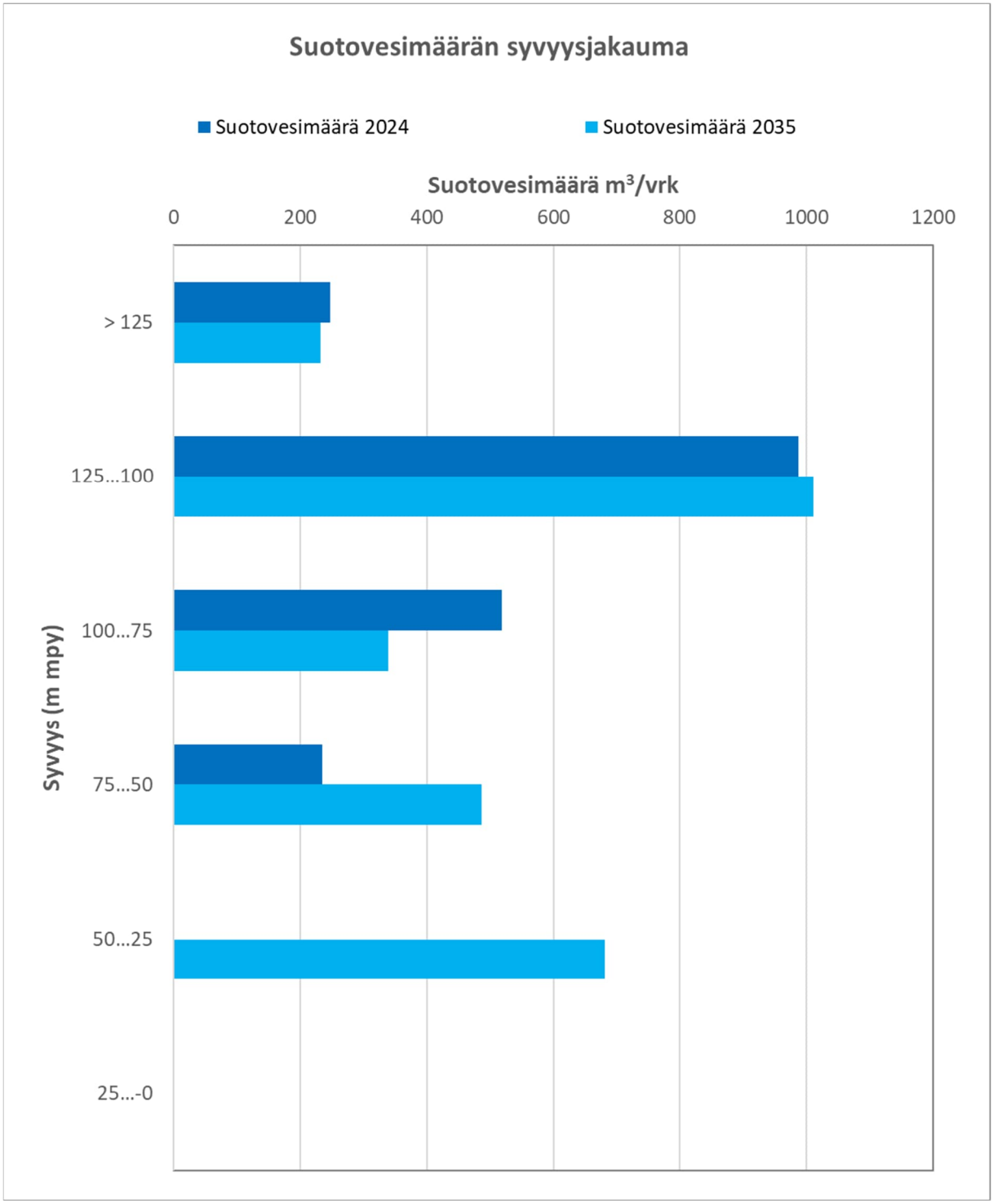
copyright© AFRY Finland Oy

Numeerisessa pohjavesimallinnuksessa merkittävä epävarmuuden lähde tuloksissa on usein kallioperän hydraulinen johtavuus, mikä on vaikea mitata tarkasti ja kattavasti sekä yleistää koko mallinnettavalle kalliotilavuudelle. Herkkyystarkastelussa maaperän ja ruhjeiden hydraulisen johtavuuden merkitys vuotovesien määrään on pienempi kuin kallion hydraulisen johtavuuden arvojen. Punasuon louhoksen alueella ei ole tehty kallioperän hydraulisen johtavuuden mittauksia. Mittauksia on tehty ainoastaan maaperäkerroksessa. Punasuon louhoksen pohjavesimallissa kallioperän hydraulinen johtavuus perustuu mallin kalibrointiin mitattujen kuivatusvesipumppausten määrien ja pohjavesipintojen perusteella. Kairasydännäyte loggausten tulosten perusteella on tehty myös kallioanalyysi eli analysoitu tilastollisesti kallioperän rakoilun vaihtelua alueella syvyyden suhteen (luku 3.9). Kallioanalyysin perusteella kallion rikkonaisuus on suurinta ensimmäisen 25–50 m syvyydellä. Tätä tietoa on käytetty apuna kallion vedenjohtavuusarvojen määrittämisessä niin, että mallissa kallioperän ylimmille kerroksille on asetettu korkeampi vedenjohtavuus kuin kallion syvemmille osille, ja vedenjohtavuus pienenee syvyyden kasvaessa. Rikkonaisuutta esiintyy myös syvemmällä kalliossa. Tämä on mahdollisesti kairauksin lävistettyjen ruhjeiden ominaisuus.

Sadannasta pohjavedeksi imeytyvän veden määrää on myös vaikea mitata tai arvioida tarkasti. Herkkyysanalyysissä tarkasteltiin sadannasta pohjavedeksi imeytyvän veden määrän vaikutusta suotovesimääriin. Vaikutus suotovesimääriin on pienehkö verrattuna kallion hydraulisen johtavuuden vaikutukseen.

Mallin luotettavuutta on mahdollista parantaa tekemällä kallioperän vedenjohtavuuden mittauksia, täydentämällä kallioanalyysiä uusilla kairareikätiedoilla ja pohjavedenpinnan seurannalla. Alueella on maaperän osalta jo kohtuullisen kattava pohjaveden pinnankorkeuksien havaintoverkosto, jolla pystytään seuraamaan maapohjaveden tilannetta. Pohjavesipinnan alenema kohdistuu ensisijaisesti kallion ylimpiin kerroksiin. Tätä voitaisiin parhaiten seurata kallioon asennettavalla pinnankorkeuden havaintoverkostolla. Vaikutus maapohjaveteen riippuu maa- ja kallioperän hydraulisen vuorovaikutuksen voimakkuudesta. Automatisoitu painetason seuranta on myös mahdollista järjestää.

copyright© AFRY Finland Oy



Kuva 5-1. Pohjaveden suotautumismäärät kaivokseen eri syvyysväleillä vuosina 2024 ja 2035.

copyright© AFRY Finland Oy

6 Yhteenveto

Tässä raportissa esitetään Elementis Minerals B.V. Branch Finlandin Sotkamon Punasuon talkkikaivoksen numeerinen pohjavesimallinnus. Mallinnus on tehty nykyisen avolouhoksen (vuosi 2024) sekä vuoden 2035 ja sulkemisen jälkeisen tilanteen pohjavesiolosuhteiden kuvaamista varten. Mallilla on varauduttu myös simuloimaan vuotta 2035 laajempaa Punasuon louhosta. Mallinnuksen tavoitteena on selvittää kaivokseen suotautuvan pohjaveden määrää ja kaivoksen kuivatuspumppauksen vaikutusta pohjaveden pinnankorkeuteen ja paineeseen ympäröivässä maa- ja kallioperässä kaivoksen eri vaiheissa sekä simuloida pohjaveden virtaussuuntia sekä kaivoksen vedellä täyttymisaikaa kaivoksen sulkemisen jälkeisessä tilanteessa.

Työssä kerättiin ja käytiin läpi kaivoksen alueelta saatavilla oleva geologinen, hydrologinen, hydrogeologinen, geofysikaalinen ja geometrinen aineisto. Alueelle tehtyä pintavesien pienvaluma-alueanalyysia käytettiin apuna mallinnusalueen rajaamisessa. Maaperän paksuuden ja kalliopinnan syvyyden mallinnus perustuu maastokarttoihin (Maanmittauslaitos), geologisiin karttoihin (kalliopaljastumat, GTK Maankamara) sekä kairarei'istä ja pohjavesiputkista mitattuihin maaperäkerrosten paksuuksiin ja geofysiikan mittaustuloksista tulkittuihin maakerrospaksuuksiin. Maaperän kerroksista mallinnettiin maapeitteen kokonaispaksuus (jonka avulla laskettiin kalliotopografia). Perustana käytettiin vuoden 2012 numeerisessa hydrogeologisessa mallissa käytettyä kalliotopografian mallia (Pöyry Finland Oy 2012). Turvealueet rajattiin maaperäkartan perusteella. Ohuen turpeen paksuudeksi asetettiin 0,5 m ja paksun turpeen 1 m.

Kairasydännäytteistä kartoitettujen geoteknisten parametrien (RQD) perusteella tehtiin kallioanalyysi, jossa tarkasteltiin tilastollisesti kallion rakoilua suhteessa syvyyteen. Kallioanalyysin perusteella on muodostettu käsitys kallion rakoilun esiintymisestä syvyyden suhteen RQD-aineiston pohjalta. Analyysin perusteella kallion yläosa noin 25–50 metrin syvyydelle on voimakkaammin rakoilleempaa kuin kallio syvemmällä. Koostettuun aineistoon ja analyyseihin pohjautuen tehtiin puuteanalyysi ja hydrogeologinen konseptuaalinen malli kaivosalueesta. Konseptuaalisen mallin perusteella luotiin numeerinen pohjavesimalli käyttäen FEFLOW-ohjelmaa (v 8.1). FEFLOW perustuu finite-element laskentaan.

Mallinnus tehtiin kolmessa eri vaiheessa vuosille 2024, 2035 sekä sulkemisen jälkeiselle tilanteelle. Mallit tehtiin tasapainotilanmalleina (steady state). Sulkemisen jälkeistä tilannetta, jossa Punasuon louhoksen kuivatuspumppaus lopetetaan ja louhos alkaa täyttyä vedellä mallinnettiin myös muuttuvan tilanteen eli transienttitilan mallina. Vuoden 2024 mallilla simuloitiin nykyisen louhoksen vaikutusta (alin taso noin +68 m mpy) ja kalibroitiin malli vastaamaan mitattuja pohjavesipintoja ja kuivatuspumppausmääriä. Vuoden 2035 mallilla simuloitiin

copyright© AFRY Finland Oy

tilanne, jossa avolouhosta on laajennettu vuoden 2024 tilanteesta ja se ulottuu tasolle +35 m mpy. Rikastushiekka-allasta on korotettu nykyisestä noin +176 m mpy tasosta tasolle +190 m mpy. Sulkemisen jälkeinen tilanne mallinnettiin vuoden 2035 louhokselle. Sulkemisvaiheessa sivukivialue peitetään bentoniitilla, Papinlammen sekä Soidinsuon altaat peitetään moreenilla ja vesivarastoaltaat poistetaan.

Vuosi 2024 toimii mallin lähtötilanteena. Louhintoja edeltävää aikaa ei ole tässä työssä mallinnettu, eikä vuoden 2024 Punasuon louhoksen kuivatuspumppauksen aiheuttaman pohjavedenpinnan alenemaa suhteessa louhintoja edeltävään aikaan siten ole esitetty. Vuoden 2035 mallissa Punasuon louhoksen kuivatuksen seurauksena pohjavesipinnan alenema louhoksen ympärillä edelleen kasvaa nykyisestä. Vähintään 0,5 m pohjavesipinnan laskua nykytilaan verrattuna voi tapahtua enintään 200–900 m etäisyydellä avolouhoksen reunasta. Lähellä louhosta alenema on merkittävästi suurempi kuin kauempana.

Mallin laskema Punasuon louhoksen pohjaveden suotovesimäärä on noin 1810 m^3/vrk vuoden 2024 louhokselle ja 2560 m^3/d vuoden 2035 louhokselle. Kun suoraan louhokseen satava vesi otetaan mukaan ja haihdunnan oletetaan louhoksen kohdalla olevan 50 % sadannasta, mallin laskemaksi kuivatusvesimääräksi saadaan 1990 m^3/vrk vuonna 2024 ja 2750 m^3/vrk vuonna 2035. Punasuon louhoksen mitatut louhokseen satavan veden sisältävät kuivatusvesimäärät ovat 1980, 2180 ja 2040 m^3/vrk vuosille 2021, 2022 ja 2023.

Vuoden 2035 mukaisen Punasuon louhoksen kuivatuspumppauksen lopettamisen jälkeen louhoksen vedellä täyttymiseen menee mallilaskennan mukaan noin 15 vuotta, mutta tulokseen vaikuttaa louhokseen muualta johdettavat ja pintavaluntana tulevat vedet, joita pohjavesimallin laskenta ei ota huomioon. Täyttymisen jälkeen pohjaveden virtausgradientti on kohti koillista ja itää, mutta louhoksen ylivuoto tapahtuu mallilaskennan perusteella pääasiassa ylivuoto-ojaa pitkin, ja pohjaveden virtaus kallio-osuudessa on hyvin vähäistä.

Numeeriseen malliin liittyviä epävarmuuksia tarkasteltiin tekemällä herkkyystarkastelua ruhjeiden, kallioperän ja maaperän hydraulisen johtavuuden ja pohjaveden muodostumisen suhteen. Yleensä epävarmuudet laskennassa liittyvät kallion vedenjohtavuuteen, koska se on vaikea määritellä tarkasti ja kattavasti koko mallinnettavalle kalliotilavuudelle. Punasuon louhoksen mallissa kallion hydraulisen johtavuuden arvot perustuvat nykyisen louhoksen vuotovesimäärän ja mitattujen pohjavesipintojen perusteella tehtyyn mallin kalibrointiin. Arvojen määrittelyssä käytettiin hyväksi myös työssä tehtyä kallioanalyysiä ja Lahnaslammen louhoksen aikaisia kuivatusvesimääriä, mikä osoittautui kuitenkin vaikeaksi, sillä vuosina 2009–2010 louhoksia kuivatettiin saman aikaisesti ja tämän jälkeen Lahnaslammen louhos täyttyi vedellä ja vaikutti

copyright© AFRY Finland Oy

osaltaan Punasuon louhoksen suotovesimääriin. Herkkyystarkastelujen perusteella mallin tuloksena saatavaan suotovesimäärään vaikuttaa eniten kallion hydraulisen johtavuuden arvot. Maaperän ja ruhjeiden hydraulisen johtavuuden sekä pohjaveden muodostumisen merkitys vuotovesien määrään on pienempi kuin kallion hydraulisen johtavuuden arvojen.

Mallin luotettavuutta on mahdollista parantaa tekemällä kallioperän vedenjohtavuuden mittauksia sekä pohjavedenpinnan seurannalla.

copyright© AFRY Finland Oy

7 Lähteet

AFRY Finland Oy 2024. Kaivannaisjätteiden ja vesienhallinnan YVA-ohjelma.

GTK Hakku-palvelu, 2024. https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search, haettu rakennetulkinnat

Hoek, E. & Brown, E.T. 1982. Underground excavations in rock. London, England: The Institution of Mining and Metallurgy, p. 14-36.

Ilmatieteenlaitos. 2024a. Avoimen datan palvelu. Haettu sadanta, sääasema Kuolaniemi 2010–2023.

Ilmatieteenlaitos. 2023b. Ilmasto-opas.fi. https://www.ilmasto-opas.fi. Luettu 11/2023.

Kesäniemi. 2009. Rahkaturvemaiden hydrauliset ominaisuudet. Teknillinen korkeakoulu, Yhdyskunta- ja ympäristötekniikan laitos, Lisensiaatintyö.

Maanmittauslaitos. 2024. Avoimen datan palvelu, maanpinnan topografia, taustakartta-aineistoa.

Mitta Oy. 2020. Lahnaslammen kaivoksen sivukivialueen sulkutyöt, vedenläpäisykokeet.

Pöyry Finland Oy. 2012. Lahnaslammen louhoksen virtausmallinnus. 67 s.

WSP. 2023. Elementis Oy. Rock mechanical study of Punasuo mine. 86 s.

SYKE (Suomen ympäristökeskus) 2024. Ympäristöhallinnon avoimet ympäristötietojärjestelmät. Haettu pohjavesialueet ja 3. jakovaiheen valuma-alueet.

copyright© AFRY Finland Oy