

Yhteyshenkilö
Elias Pentti
Puhelin
+358 10 33 26408
Matkapuhelin
+358 50 570 6800
Sähköposti
elias.pentti@afry.com

Pvm.
17.11.2022
Projektiviite
101013797-001
Dokumenttinumero
101013797-E0005

Asiakas
AA Sakatti Mining Oy

Kuusivaaran tarvekilouhoksen numeerinen pohjavesimallinnus

Sisältö

Sisältö.....	2
1 Johdanto.....	3
2 Lähtötiedot.....	4
2.1 Tarvekilouhoksen suunnitelmat	4
2.2 Geologinen rakennemalli.....	5
2.3 Vedenjohtavuus.....	6
2.4 Pohjaveden pinnankorkeuden seuranta.....	7
3 Mallin muodostaminen	10
3.1 Laskentaverkko	10
3.2 Reunaehdot	11
4 Louhosmallin kalibrointi	14
5 Louhoksen mallinnus	19
5.1 Louhinta ja kuivatus.....	19
5.2 Louhosjärvi	23
6 Epävarmuuden tarkastelu	26
6.1 Turvekerroksen mallintaminen.....	26
6.2 Herkkyystarkastelu	27
6.3 Epävarmuuden vähentäminen	29
7 Vaihtoehtoiset louhoksen sijainnit	30
8 Johtopäätöksiä.....	31
Lähteet	32



1 Johdanto

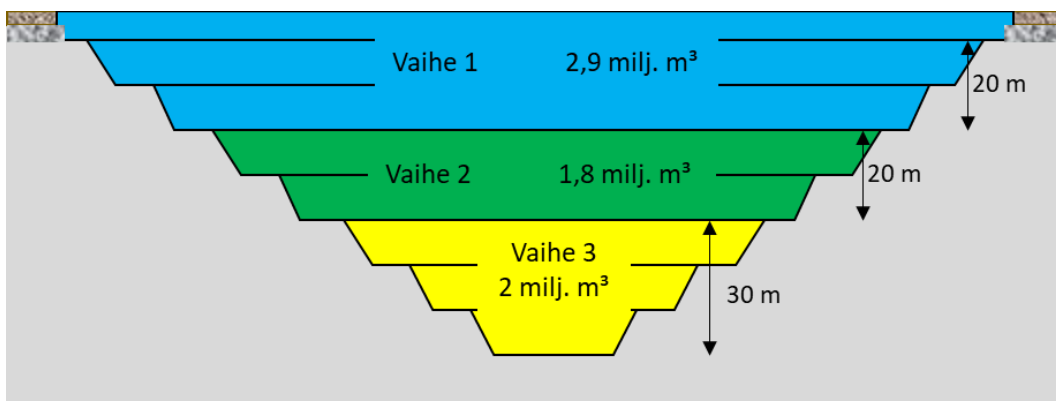
Mallinnuksen tavoitteena oli arvioida Kuusivaaralle suunniteltuun tarvekivilouhokseen tulevan pohjaveden virtausta louhinnan edetessä, siitä johtuvaa pohjaveden painekorkeuden ja pohjavesipinnan alenemaa louhoksen ympäristössä, ja tutkia tarvekivilouhoksen täyttymistä vedellä louhinnan päätyttyä ja pohjaveden läpivirtausta muodostuneessa louhosjärvessä. Mallinnus tehtiin FEFLOW:n versiolla 7.3, joka on kolmiulotteinen elementtimenetelmään perustuva pohjaveden virtauslaskentaan tarkoitettu tietokone-ohjelma.

2 Lähtötiedot

2.1 Tarvekilouhoksen suunnitelmat

Tarvekilouhoksen sijainti Kuusivaaralla (merkitty karttaan kuvassa 2-2) ja louhittavan kalliotilavuuden muoto perustuvat kevään 2021 suunnitelmiin. Louhintasuunnitelman mukaan louhos kattaa likimain neliömäisen 10 hehtaarin laajuisen alueen, ja sen lopullinen syvyys on 70 metriä rapautuneen pintakallion alapinnasta ja louhittava kalliotilavuus noin 6 miljoonaa m³ maaperän ja rapakallion lisäksi.

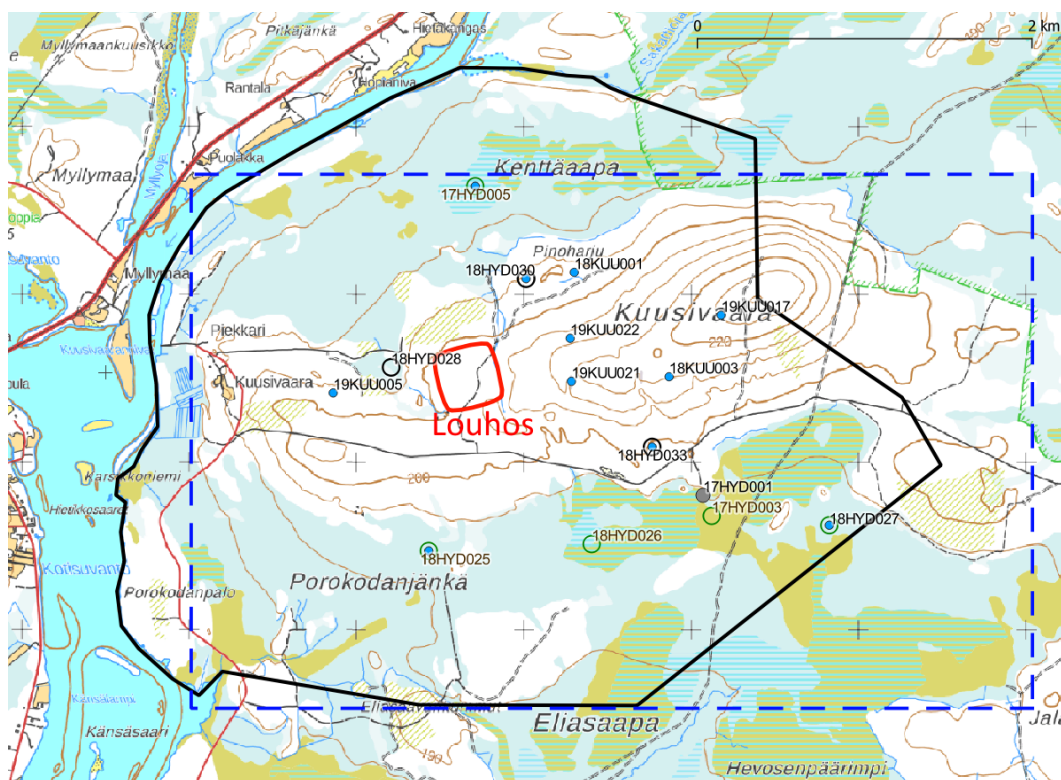
Louhos on suunniteltu louhittavaksi 10 metriä korkeina tasoina, kokonainen taso kerrallaan. Pohjaveden virtauksen transienttimallinnuksessa louhinnan oletettiin etenevän kolmessa vaiheessa, joista jokaisessa noin kolmasosa louhoksen suunnitellusta tilavuudesta muuttuu avoimeksi tilaksi samalla hetkellä. Suunnittelun louhoksen jako mallinnusvaiheiksi on esitetty kuvassa 2-1. Koska laskentaverkon geometriaa ei ole mahdollista muuttaa simulaation aikana, louhinnan eteneminen kuvattiin poistamalla verkon elementtejä vaiheittain laskennasta ja määrittelemällä louhoksen seinämän ja pohjan suotopintareunaehto ajasta riippuvaksi. Mallinnuksen ensimmäisessä vaiheessa louhittu tilavuus käsittää maapeitteen, rapautuneen pintakallion ja kaksi ylintä 10 metrin kalliokerrosta. Louhoksen tilavuus ensimmäisessä mallinnusvaiheessa on noin 2,9 miljoonaa m³, josta maapeitteen ja rapakallion osuus noin 700 000 m³. Mallinnuksen toisessa vaiheessa on louhittu myös seuraavat kaksi 10-metristä kalliokerrosta, joiden tilavuus on yhteensä noin 1,8 miljoonaa m³. Kolmannessa mallinnusvaiheessa tarvekilouhos saavuttaa louhintasuunnitelman mukaisen täyden laajuuden, kun alimmat kolme kerrosta (tilavuus n. 2 miljoonaa m³) louhitaan. Ajallisesti louhinnan arvioitiin etenevän siten, että ensimmäinen mallinnusvaihe saavutettaisiin kahdessa vuodessa toiminnan alkamisesta, toinen vaihe yhdeksännen vuoden lopussa ja kolmas vaihe kaivoksen toiminnan loppuessa 23 vuoden jälkeen.



Kuva 2-1. Tarvekilouhoksen louhintasuunnitelman jako kolmeksi mallinnusvaiheeksi. Ei mittakaavassa.

2.2 Geologinen rakennemalli

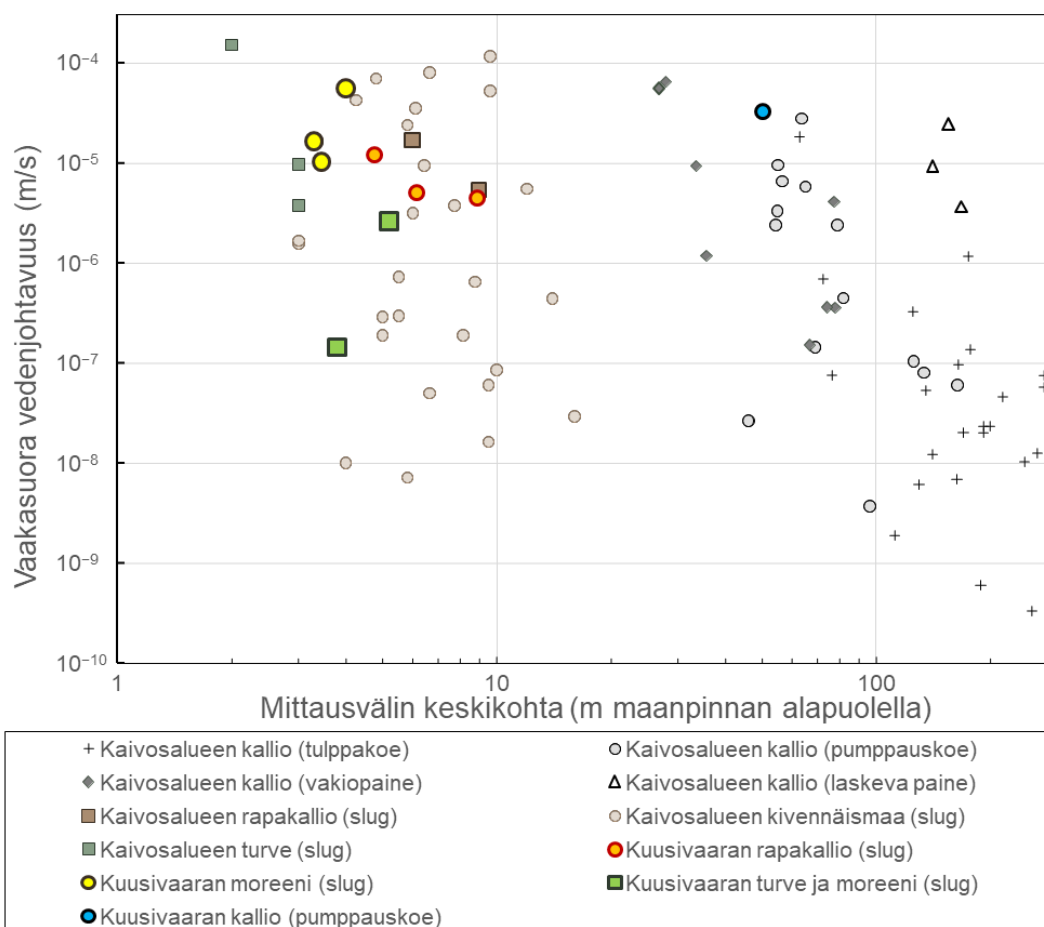
Maaperän kerrosten ja kallioperän rapautuneen pintaosan mallinnus perustuu Topias Puumalaisen pro gradu -tutkielmaan (2021). Siinä esitettyä geologista rakennemallia yksinkertaistettiin pohjavesimallinnusta varten siten, että kaikki turvekerroksen ja rapakallion väliset moreeni- ja lajittuneet kivennäis-maalajikerrokset yhdistettiin yhdeksi kerrokseksi, jonka oletetaan koostuvan pääasiassa moreenista. Tämä yksinkertaistus voitiin tehdä, koska yhtiön teettämien tutkimusten perusteella lajittuneiden maalajien kerrostumat ovat paikallisia ja ohuempia kuin hallitseva ja yhtenäinen moreenikerros. Rakennemallin kattama suorakulmion muotoinen alue on merkitty kuvan 2-2 karttaan sinisellä katkoviivalla ja pohjavesimallin rajausta mustalla viivalla. Sen länsi- ja pohjoisreunojen ulkopuolelle jäävissä, Kitisen rantaan ja Sakattiojalle ulottuvissa pohjavesimallin osissa käytettiin rakennemallista ekstrapoloituja kerrospaksuuksia. Etelässä pohjavesimalli rajattiin rakennemallin reunaan, jolloin se ulottuu suunnitellusta louhoksesta likimäärin yhtä kauas kuin muissakin suunnissa, ja idässä Kuusivaaran huipun ja siitä kaakkoon jatkuvan korkeamman maaston muodostamalle vedenjakajalle asti.



Kuva 2-2. Mallinnusalue. Kuusivaaran tarvekilouhoksen suunniteltu sijainti punaisella. Musta monikulmio kuvaa pohjavesimallin rajauksen ja sininen katkoviiva Topias Puumalaisen geologisen mallin kattaman alueen. Pohjavesiasemista on merkitty automaattisessa pinnankorkeus-seurannassa olleet (vaaleansininen pallo) ja ne, joissa on tehty vedenjohtavuuden slug-mittauksia rapautuneessa kalliassa (musta rengas) tai maaperässä (vihreä rengas).

2.3 Vedenjohtavuus

Maa- ja kallioperän vedenjohtavuus eli hydraulinen johtavuus on tärkeimpiä pohjavesimallin lähtötietoja. Kuusivaaran pohjavesimallin alueelta on melko vähän mittaustuloksia eri geologisten yksikköjen vedenjohtavuuksista, ja ne ovat suurimmaksi osaksi moreeni- ja rapakalliokerroksista, koska tulokset on saatu näihin kerroksiin asennetuissa pohjaveden mittausasemissa tehdyistä slug-kokeista. Kahdessa tapauksessa pohjavesiaseman mittaussväli eli reiän suojaputken siiviläosuus on osittain turvekerroksen alaosassa ja osittain sen alapuolisessa moreenikerroksessa, joten mitattu arvo ei suoraan edusta mitään yksittäistä kerrosta. Ne kolme mittausasemaa, joiden mittaussväli on kokonaan moreenikerroksessa, edustavat kaikki ylempää hiekkamoreenin kerrosta, mikä selittää niistä mitatut suhteellisen suuret vedenjohtavuudet. Vedenjohtavuustietoja on runsaammin itse Sakatin suunnitellun maanalaisen kaivoksen alueelta, jossa on tehty kymmeniä hydraulisia kokeita eri menetelmillä sekä maaperässä että satojen metrien syvyisissä kallioperän tutkimusrei'issä (SRK 2019). Kuusivaaran ja Sakatin maanalaisen kaivoksen alueen vedenjohtavuusmittausten tuloksia on esitetty kuvassa 2-3 mitatun välin (pohjavesiputken siiviläosuus, reiän avoin osuus jne.) keskikohdan syvyyden funktiona. Kuvaajasta käy ilmi, että tulosten hajonta on suurta. Sakatin maanalaisen kaivoksen alueen kallioperässä tehtyjen mittausten perusteella vedenjohtavuus pienenee siellä syvyyden funktiona, mutta koska vastaavia havaintoja ei ole geologialtaan erilaiselta Kuusivaaran alueelta, tässä mallinnuksessa ei oletettu kallioperässä muuta vedenjohtavuuden vaihtelua kuin rapautuneen pintaosan ja sen alla olevan ehjän kallion välinen ero. Kaikki mittaustulokset edustavat vedenjohtavuuden vaakasuoraa tai lähes vaakasuoraa komponenttia siksi, että mitatut reiät ovat joko aivan pystysuoria tai lähellä sitä, joten mittauksessa aiheutettu ja mitattu virtaus on tapahtunut pääasiassa vaakatasossa. Pystysuuntaisen johtavuuden määrittäminen malliin on siksi perustunut mallinnuksissa yleisesti käytettyyn oletukseen sen suhteesta vaakasuuntaiseen vedenjohtavuuteen ja mallin kalibroimiseen.



Kuva 2-3. Mittaustuloksia vedenjohtavuudesta maa- ja kallioperässä Sakatin maanalaisen kaivoksen alueella (SRK 2019) ja Kuusivaaran alueella (Puumalainen 2021).

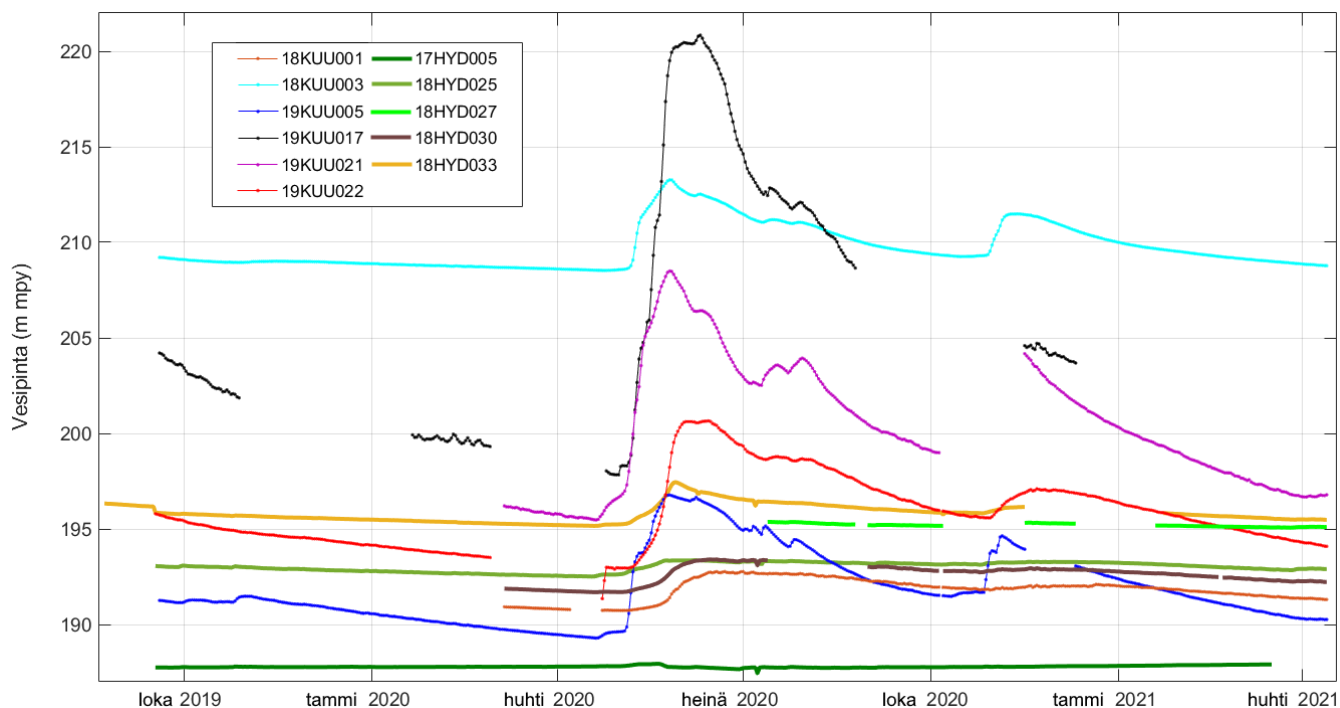
2.4 Pohjaveden pinnankorkeuden seuranta

Kuusivaaran alueella on 11 pohjavesiasemaa, joissa vesipinnan korkeutta on seurattu jatkuvatoimisesti vuodesta 2019 tai 2020 lähtien. Seuratut pohjavesiasemat ja ne, joissa on tehty vedenjohtavuuden mittauksia mutta ei pinnankorkeuden automaattiseurantaa, on esitetty taulukossa 2-1 ja kuvan 2-2 kartassa. Kuva 2-4 esittää seurannan tulokset huhtikuuhun 2021 asti. Kuvissa 2-5 ja 2-6 on esitetty Kuusivaaran pinnanmuoto idästä ja etelästä katsottuna, pohjaveden seuranta-asemien sijainnit ja vedenpinnan vaihteluväli ja keskiarvo seurantajaksolla. Yleisesti seurantatuloksista ilmenee, että Kuusivaaraa ympäröivällä alueella pohjaveden pinta maaperässä on hyvin vakaasti lähellä maanpintaa, kun taas Kuusivaaran kallioperässä vaihtelu on voimakasta ja keskimääräinen pohjavesipinta nousee vain noin puoleen Kuusivaaran itsensä korkeudesta. Tulosten tulkintaa tosin vaikeuttaa se, että seurantatuloksia maaperästä on lähinnä Kuusivaaran ympäriltä, mutta kymmenien metrien syvyyteen kallioperään ulottuvat seuratut reiät ovat Kuusivaaralla ja niissä suuri osa reiän kokonaispituutta on mittausväliä.

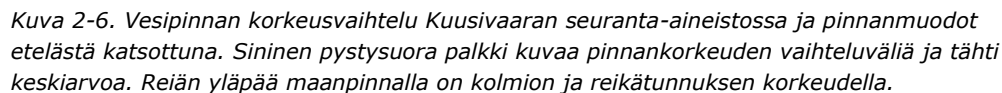
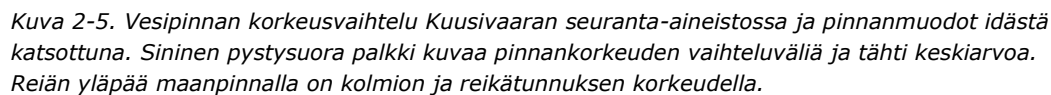


Taulukko 2-1. Kuusivaaran alueen pohjavesiasemat, joiden mittauksia käytettiin pohjavesimallin teossa.

Reikä tunnus	Mittausväli (m maanpinnasta)	Geologia	Mitattu vedenjohtavuus, ka (10^{-6} m/s)	Vesipinnan seuranta
17HYD001	27,7–75,7	kallio	32,5	
17HYD003	2,4–8	turve, moreeni	2,6	
17HYD005	3–5	moreeni, hiekka	56	X
18HYD025	2,45–4,45	moreeni	10,2	X
18HYD026	2,8–4,8	turve, moreeni	0,145	
18HYD027	2,3–4,3	moreeni	16,5	X
18HYD028	3,75–5,75	rapakallio	12	
18HYD030	7,9–9,9	murskaantunut ja rapautunut kallio	4,5	X
18HYD033	5,15–7,15	rapakallio	5,1	X
18KUU001	72–150	kallio		X
18KUU003	23–60	kallio		X
19KUU005	20–50	kallio		X
19KUU017	0–50	moreeni, kallio		X
19KUU021	7–60	kallio		X
19KUU022	80–100	kallio		X



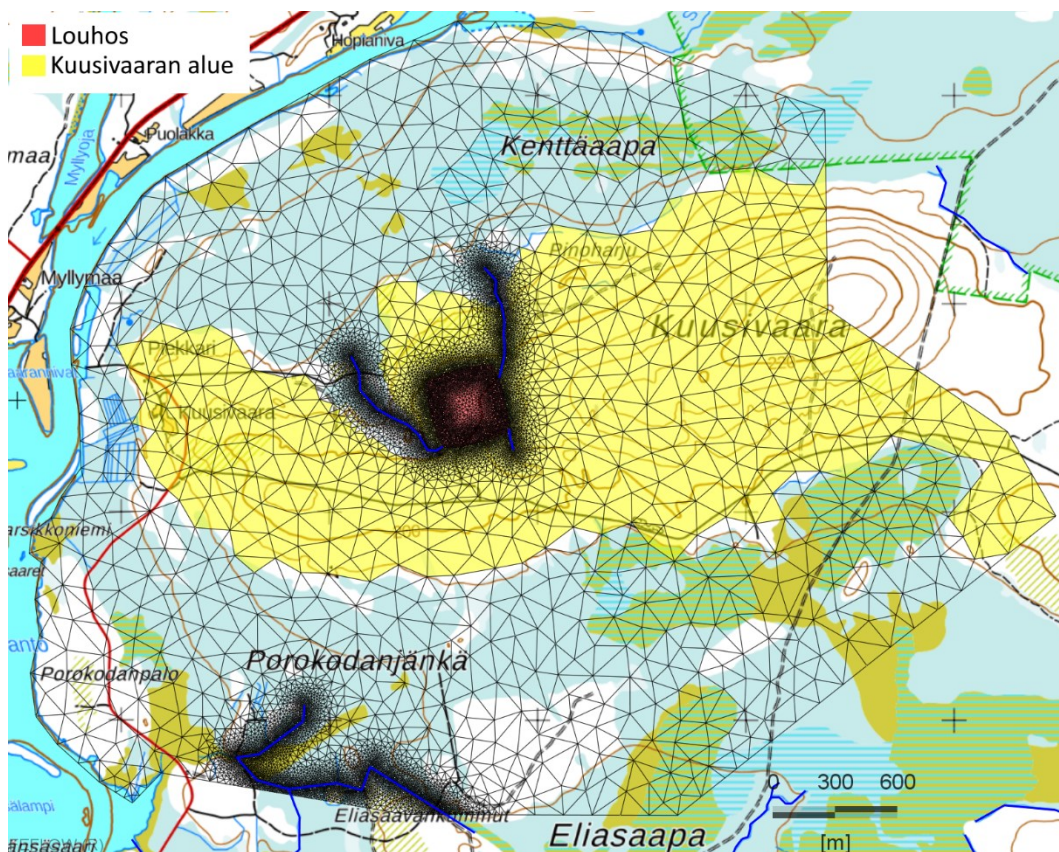
Kuva 2-4. Pohjaveden pinnankorkeuden jatkuvan seurannan tulokset Kuusivaaran alueella syksystä 2019 kevääseen 2021.



3 Mallin muodostaminen

3.1 Laskentaverkko

Kuva 3-1 esittää mallinnusalueen jaon 2-ulotteiseksi kolmioverkoksi ja alueen jaon Kuusivaaran alueeseen, ympäröiviin suoalueisiin ja louhittavaksi suunniteltuun alueeseen. Kolmioverkko tiennettiin louhoksen alueella ja malliin sisältyvien ojien kohdalla (siniset viivat), eli paikoissa, joissa on odotettavissa pohjaveden purkautumista.



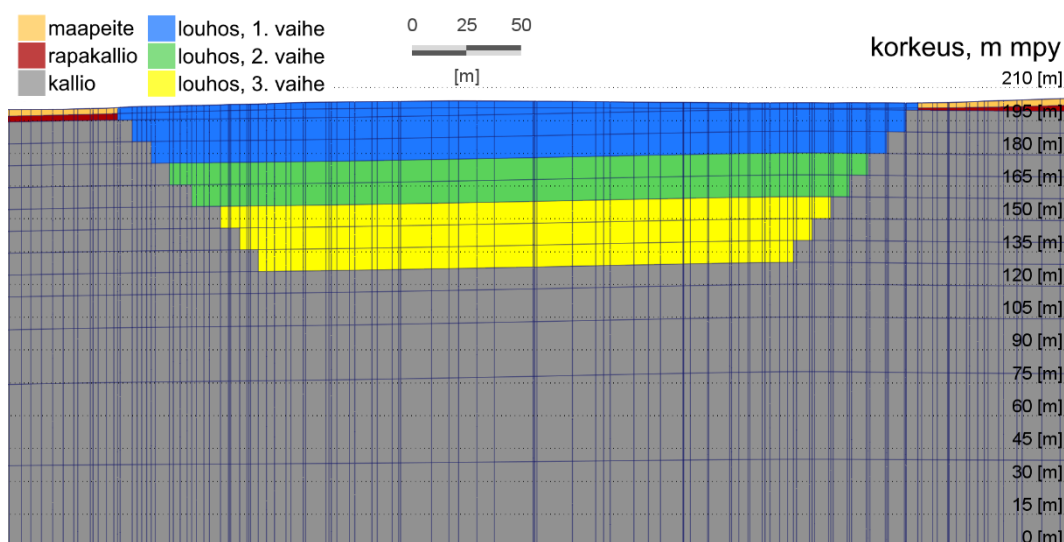
Kuva 3-1. Mallin 2-ulotteinen laskentaverkko ja alueen jakautuminen louhokseen (punainen), Kuusivaaran alueeseen (keltainen) ja sitä ympäröiviin suoalueisiin. Laskentaverkkoon maastokartan perusteella mukaan otetut ojat on merkitty sinisellä.

Laskentaverkossa on 15 päällekkäistä kerrosta, joista kaksi ylintä kuvaavat maaperää, kolmas kallioperän rapautunutta pintaosaa ja loput kallioperää. Ylimpien kolmen kerroksen paksuudet perustuvat geologiseen rakennemalliin (Puumalainen 2021) tai sen ekstrapolointiin mallin länsi- ja pohjoisreunoilla. Kalliokerrosten paksuudet on valittu niin, että ylimmät kerrokset vastaavat louhintasuunnitelman mukaisia 10 metrin tasoja, ja louhoksen alapuolella kerrosten paksuus vaihteellisesti kasvaa siten, että mallin pohja on merenpinnan tasolla.

Taulukko 3-1. Laskentaverkon kerrokset.

Kerros	Geologia	Paksuus
1	Turve tai moreeni	Rakennemallin mukainen turvekerroksen paksuus tai 0,5 m
2	Moreeni	Alapinta rapakallion pinnan mukainen
3	Rapakallio	Rakennemallin mukainen rapakallion paksuus
4–11	Kallio	Vakio 10 m
12	Kallio	Vakio 15 m
13	Kallio	Vakio 25 m
14	Kallio	Paksuus 20–50 m
15	Kallio	Pohja tasolla 0 m mpy (paksuus 20–50 m)

Kuva 3-2 esittää laskentaverkon poikkileikkauksen suunnitellun tarvekivilouhoksen kohdalta. Louhittavaksi suunnitellut osat on väritetty kolmen mallinnusvaiheen mukaan.



Kuva 3-2. Laskentaverkon poikkileikkaus suunnitellun louhoksen kohdalta.

3.2 Reunaehdot

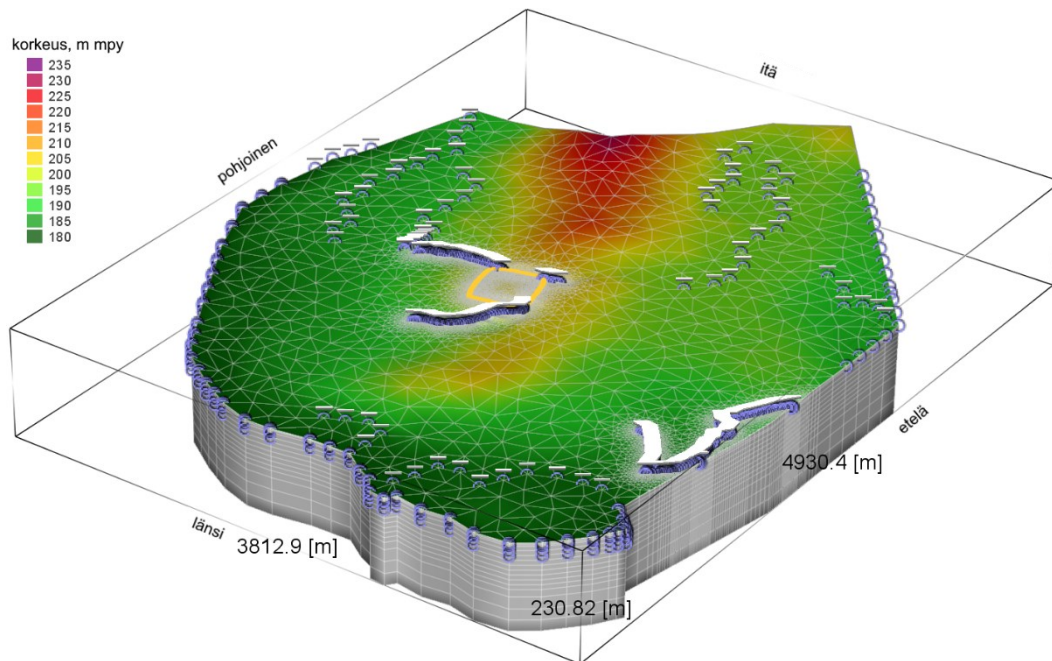
Tarvekivilouhoksen numeerisen pohjavesimallin reunaehdoilla kuvataan sitä, miten pohjavesisysteemiin tulee lisää vettä mallin ulkopuolelta ja miten sitä toisaalta voi poistua siitä.

Pohjaveden imeytymisnopeudelle mallin ylimmässä kerroksessa käytettiin tässä mallissa kahta ajan suhteen muuttumatonta arvoa: yhtä Kuusivaaran alueella (keltainen alue kuvassa 3-1) ja toista muualla, koska Kuusivaaran enimmäkseen moreenipeitteisellä metsämaalla pohjavettä voidaan olettaa muodostuvan selvästi enemmän kuin sen ympäristön soilla. Tämä perustuu aiempaan Sakatin alueen pohjavesimallinnukseen (Åberg ym. 2019) ja Lokan tekoaltaaseen liittyviin tutkimuksiin (Hyypä 1962), joiden mukaan keskimääräinen imeytymisnopeus maaperään metsäisillä moreeni- tai hiekkamailla on luokkaa 40–70 % sadannasta eli noin 0,6–1,0 mm/vrk, mutta soilla alle 20 % sadannasta eli alle 0,3 mm/vrk.



Itse louhoksen kohdalla pohjaveden muodostumisnopeus asetettiin nolllaksi. Louhoksen vaikutuksen ja pohjavesivuodon transienttisimulaatiossa pohjaveden imeytymisnopeus pidettiin vakiona arvioidussa keskimääräisessä arvossa. Simulaatio ei siten kuvaa vuodenaikojen ja sääolosuhteiden vaihtelusta johtuvaa luonnollista vaihtelua vaan pelkästään kuivana pidettävän louhoksen aiheuttamaa keinotekoisista muutosta pohjavesi-systeemin keskimääräiseen tilaan.

Pohjaveden purkautuminen Kitiseen ja muihin uomiin mallinnettiin asettamalla vakiopainereunaehdoja mallin reunan ja yläpinnan solmupisteisiin kuvan 3-3 mukaisesti. Kitiseen rajoittuvalla länsi- ja luoteisreunalla asetettiin neljän ylimmän kerroksen (maanpinnasta rapakalliokerroksen alapintaan) painekorkeudeksi 181,3 m, joka on topografiadatan mukaan Kitisen pinnan korkeus Kelukosken voimalaitoksen yläpuolella koko mallin reunan pituudelta. Mallin kaakkoisreunalla Eliasaavalla painekorkeus asetettiin maanpinnan tasolle. Näillä reunoilla vettä voi paitsi poistua mallista, myös virrata mallinnettuun pohjavesisysteemiin lisää, jos pohjaveden painekorkeus asettuu reunan vieressä alemmaksi kuin reunaehdossa oletettu taso. Sen sijaan laskentaverkossa huomioitujen ojien Kuusivaaralla ja Porokodanjängellä (siniset viivat kuvassa 3-1), mallin pohjoisreunalla olevan Sakattiojan ja maastokartan perusteella kosteimpien suoalueiden kohdalle asetettiin suotopintareunaehdoja, joiden kautta pohjavettä voi vain poistua mallista. Suotopinta on erityinen vakiopainereunaehto, jossa pohjaveden paine mallin solmupisteessä joko pysyy nolllana pisteen kautta poistuvan virtauksen vuoksi tai laskee negatiiviseksi, jolloin virtaus reunaehdopisteen kautta lakkaa. Suotopintareunaehtoä käytettiin myös tarvekilouhoksen seinämien ja pohjan solmupisteissä kuvaamaan pohjavesivuotoa kuivana pidettävään louhokseen. Reunaehdon käyttö sisältää implisiittisesti oletuksen, että kaikki louhokseen vuotava pohjavesi pumpataan välittömästi pois.

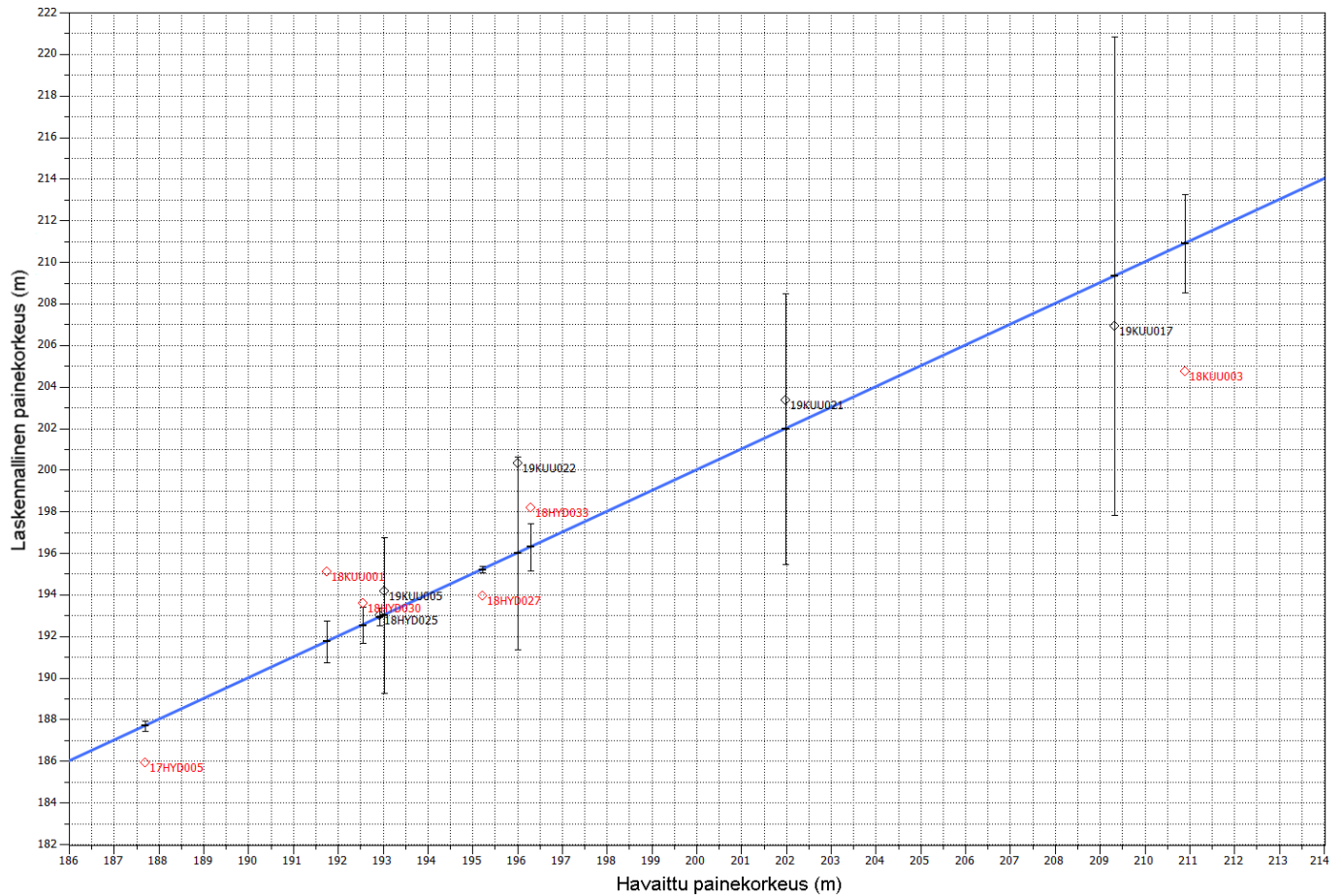


Kuva 3-3. Laskentaverkon 3-ulotteinen visualisointi lounaasta nähtynä. Pystysuuntainen mitta-kaava on kolminkertainen vaakasuuntaiseen verrattuna. Yläpinnan väritys esittää maanpinnan korkeutta ja siniset renkaat verkon solmupisteitä, joihin on asetettu vakiopainereunaehto. Valkoinen vaakaviiva merkitsee virtauksen rajoitusta siten, että reunaehdotuksen kautta pohjavesi voi virrata vain mallista ulos (purkautua esim. ojaan), ei malliin sisään.

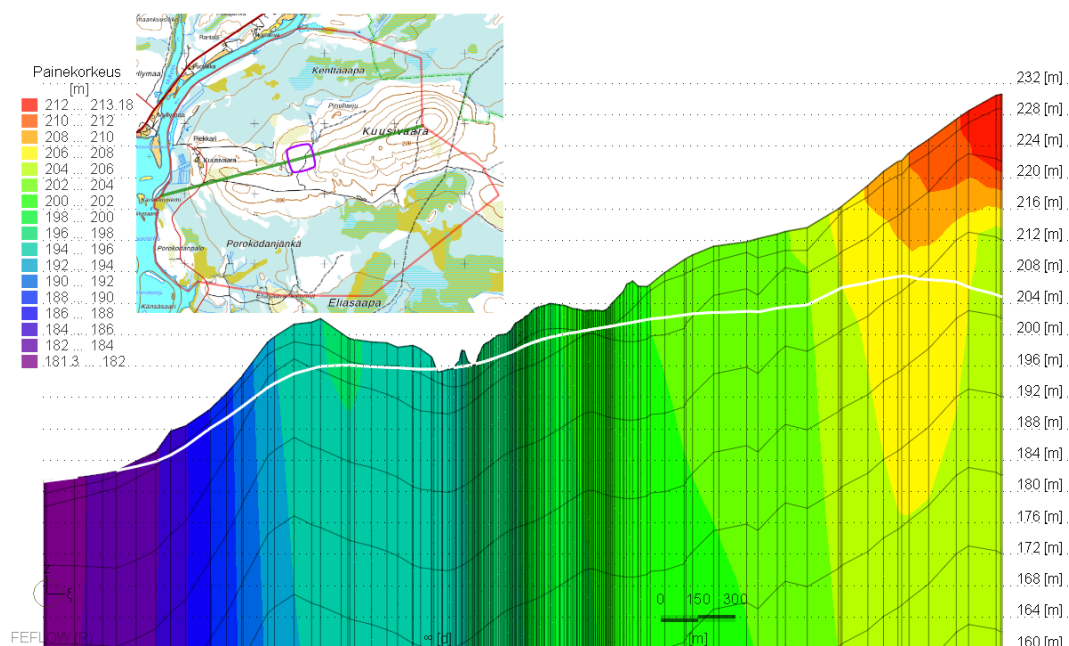
4 Louhosmallin kalibrointi

Malli kalibroitiin kahdessa vaiheessa. Ensin stationaarinen malli kalibroitiin tuottamaan havaittu keskimääräinen pohjavesipinta antamalla vedenjohtavuudelle ja pohjaveden imeytnälle sopivat arvot. Sen jälkeen transienttimallinnuksella määritettiin sellaiset tehollisen huokoisuuden ja ominaisvarastokertoimen arvot, joilla seuranta-aineiston ainoa voimakas pohjavesipintojen muutos eli keväällä 2020 runsaslumisen talven jälkeen havaittu vesipintojen nousu lumen sulamisen aikana pääpiirteittäin toistuu. Molemmat kalibrointivaiheet tehtiin säätämällä eri parametriarvoja manuaalisesti, lähtökohtana mittauksiin, kirjallisuuteen tai asiantuntija-arvioon perustuvat alkuarvot. Kuva 4-1 esittää stationaarisen mallin kalibroinnissa laskettuja painekorkeuksia monitoroitujen pohjavesiasemien mittausalueiden keskipisteissä verrattuna samassa kohdassa tehtyihin havaintoihin. Kuva 4-2 esittää länsi-itäsuuntaista mallin poikkileikkausta Kuusivaaran ja suunnitellun louhoksen kohdalta, ja siinä on esitetty laskettu pohjaveden painekorkeus väriasteikolla ja pohjaveden pinta valkoisella käyrällä. Kuva 4-3 esittää tasa-arvokäyrinä painekorkeuden moreenikerroksessa koko mallinnetulla alueella.

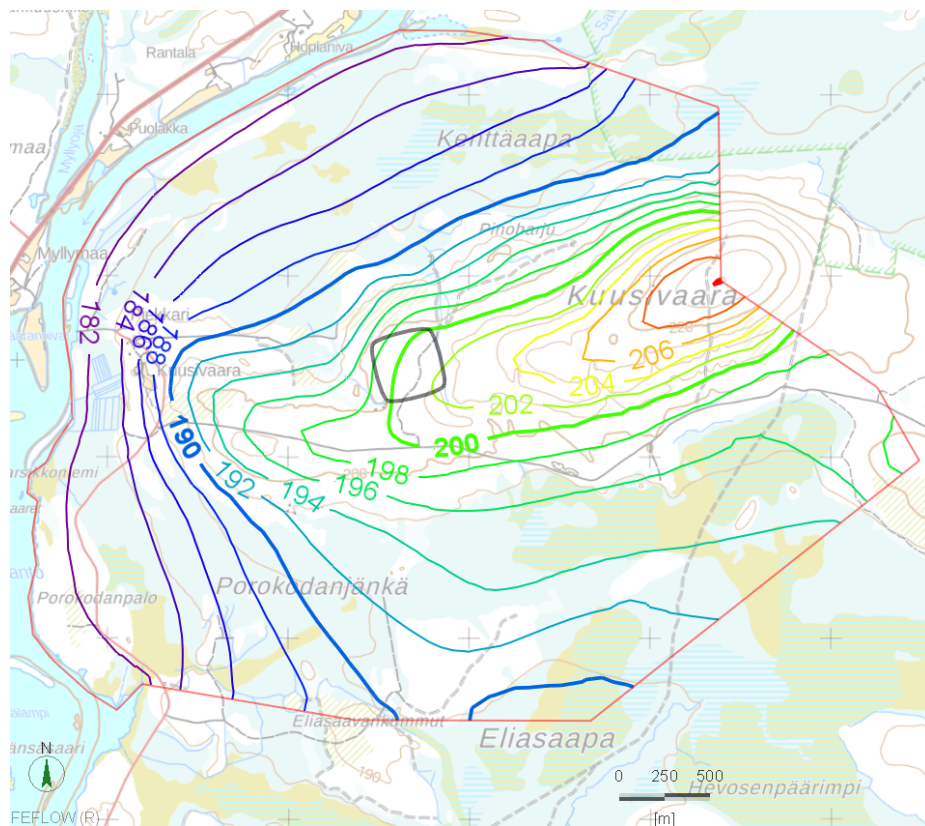
Kalibroitu malli toistaa havaitun pohjavesipinnan kohouman Kuusivaaran kohdalla, vaikka mallinnuksessa tehdyn voimakkaan yleistyksen takia yksittäisten pisteiden painekorkeudet ovatkin paikasta riippuen havaittujen arvojen ylä- ja alapuolella. Laskettujen ja havaittujen arvojen vertailuun aiheuttaa huomattavaa epävarmuutta se, että kallioperään ulottuvien pohjavesiasemien mittausvälit ovat kymmeniä metrejä pitkiä, jolloin mitattu vedenpinta ei vastaa painekorkeutta millään tietyllä syvyydellä vaan jonkinlaista keskiarvoa mittausvälin lävistämästä kalliotilavuudesta.



Kuva 4-1. Stationaarisen mallin kalibroinnissa laskettujen painekorkeuksien vertailu havaintoihin pohjavesiasemilla. Pystysuorat janat ilmaisevat mitatun painekorkeuden vaihteluvälin seuranta-jaksolla, ja yhtä suuria havaittua ja laskennallista painekorkeutta kuvaava sininen suora kulkee vaihteluvälien keskikohtien kautta. Vaihteluvälin sisällä olevat tulokset ja tunnuksat mustalla ja vaihteluvälin ulkopuolella olevat punaisella.



Kuva 4-2. Stationaarisen mallin kalibroinnissa laskettu painekorkeus (väritys) ja pohjavesipinta (valkoinen käyrä) Kuusivaaran länsi-itäsuuntaisella poikkileikkauksella, joka on merkitty karttaan vihreällä viivalla.

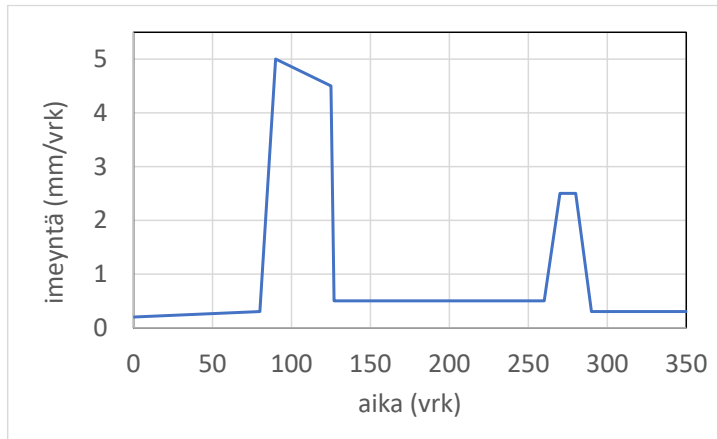


Kuva 4-3. Kalibroidun stationaarisen mallin mukainen nykytilan painekorkeus moreeni-kerroksessa.

Transienttimallin kalibroinnissa oletettiin pohjaveden imeytymisnopeuden eli imeynnän vaihtelevan Kuusivaaran alueella kuvan 4-4 mukaisesti. Suoalueilla



imeyntä pidettiin muuttumattomana, koska sen vaihtelun vaikutuksesta ei ollut seurantadataa. Lumen sulamiseen ja loppusyksyn sateiseen jaksoon liittyvät runsaan imeytymisen suuruusluokat perustuvat Sakatin maanalaisen kaivoksen alueen mallia varten tehtyihin laskelmiin imeytymisen vaihtelusta (Stantec 2020) ja ajoitus pohjaveden seurannassa havaittuihin muutoksiin. Simuloidut painekorkeudet transienttimallissa ja havaitut vedenpinnan- korkeudet vastaavissa pohjavesiasemissa on esitetty kuvassa 4-5.

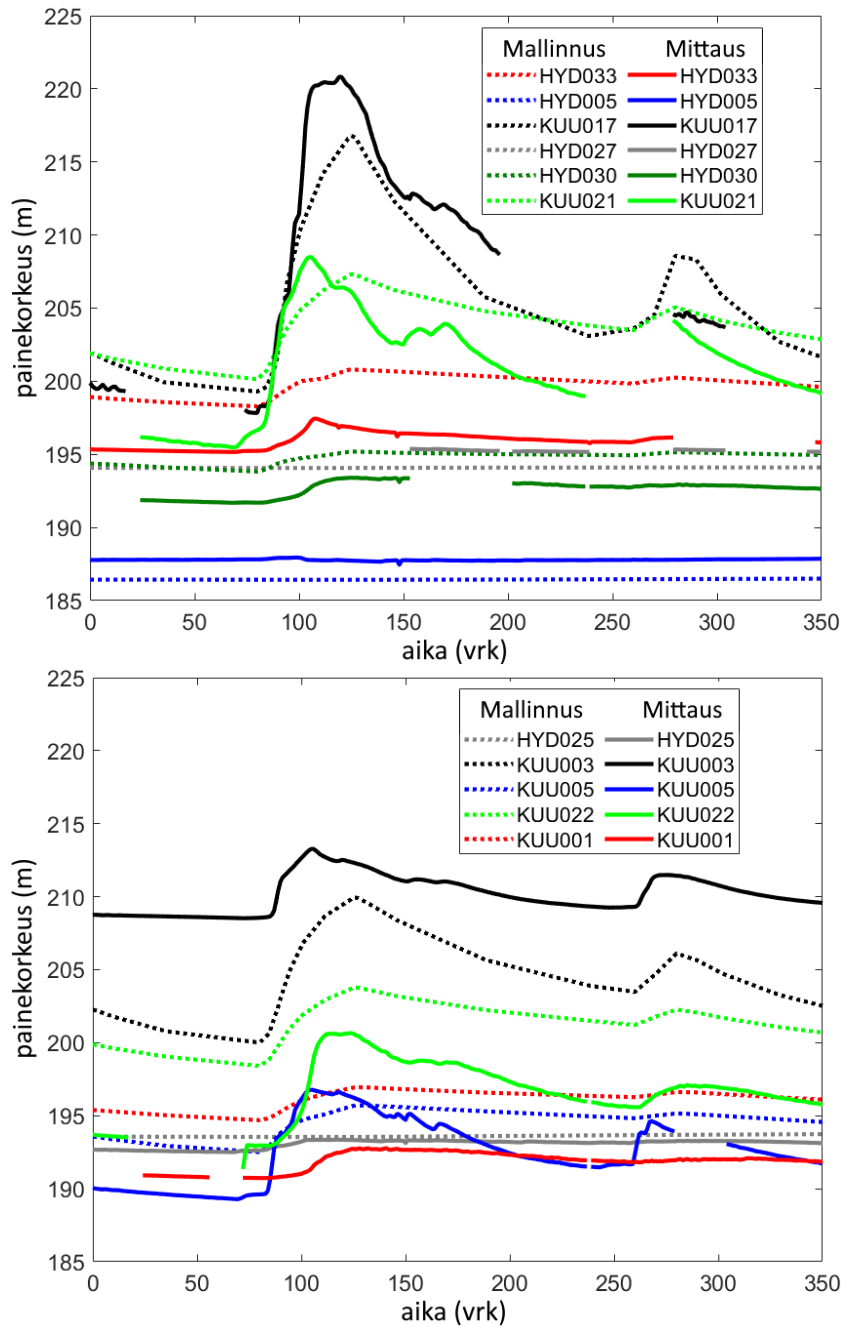


Kuva 4-4. Transienttimallin kalibroinnissa oletettu pohjaveden imeytyminen Kuusivaaralla.

Taulukossa 4-1 on esitetty kalibroinnin tuloksena saadut arviot mallin parametreista. Pohjaveden imeytymisnopeudelle stationaarisessa laskennassa päädyttiin käyttämään arvoja 0,2 mm/vrk suoalueilla ja 0,6 mm/vrk Kuusivaaran metsäisellä alueella.

Taulukko 4-1. Kalibroimalla määritetyt mallin hydrogeologiset parametrit.

Kerros	Vaakasuora hydraulinen johtavuus (m/s)	Pystysuora hydraulinen johtavuus (m/s)	Huokoisuus	Ominaisvarasto-kerroin (m^{-1})
Turve	2×10^{-4}	10^{-5}	0,2	0,001
Moreeni	10^{-4}	5×10^{-5}	0,2	0,001
Rapakallio	8×10^{-6}	10^{-6}	0,02	0,001
Kallio	3×10^{-7}	10^{-7}	0,005	10^{-4} (2 ylintä kerrosta) 10^{-6}



Kuva 4-5. Kalibroidulla transienttimallilla simuloidut pohjaveden painekorkeudet ja mitatut pinnankorkeudet Kuusivaaran monitoroituissa pohjavesiasemissa.

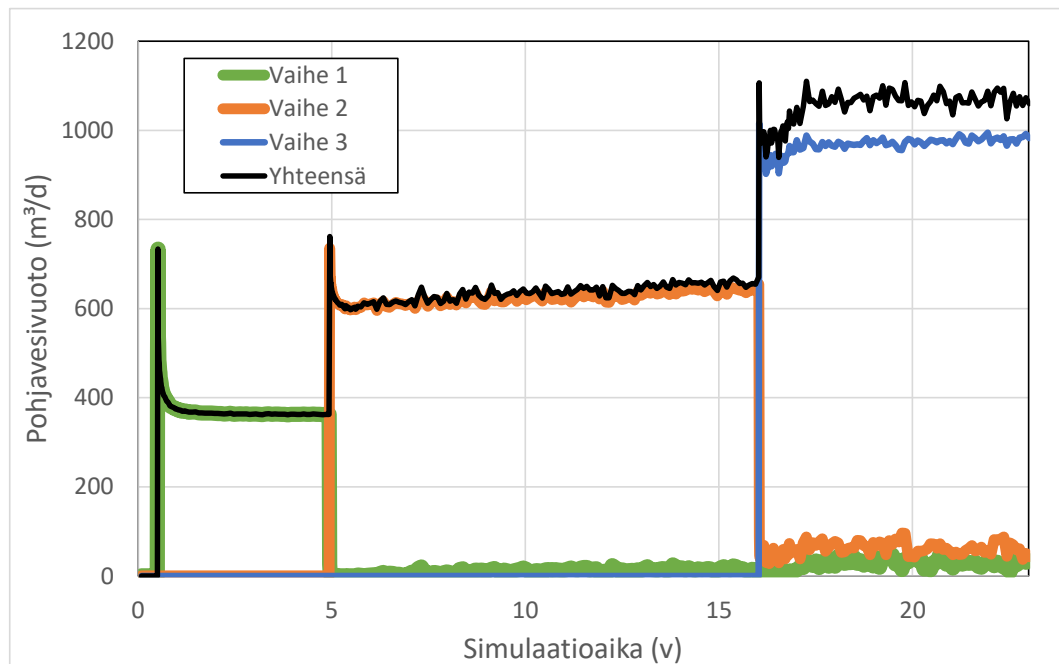


5 Louhoksen mallinnus

Kuusivaaran tarvekilouhoksen kalibroidun pohjavesimallin avulla simuloitiin vaiheittain etenevän louhinnan ja louhoksen kuivana pitopumppauksen vaikutusta alueen pohjaveteen, louhosjärven muodostumista louhoksen kuivana pidon loputtua sekä veden virtausta täyttyneen louhosjärven läpi.

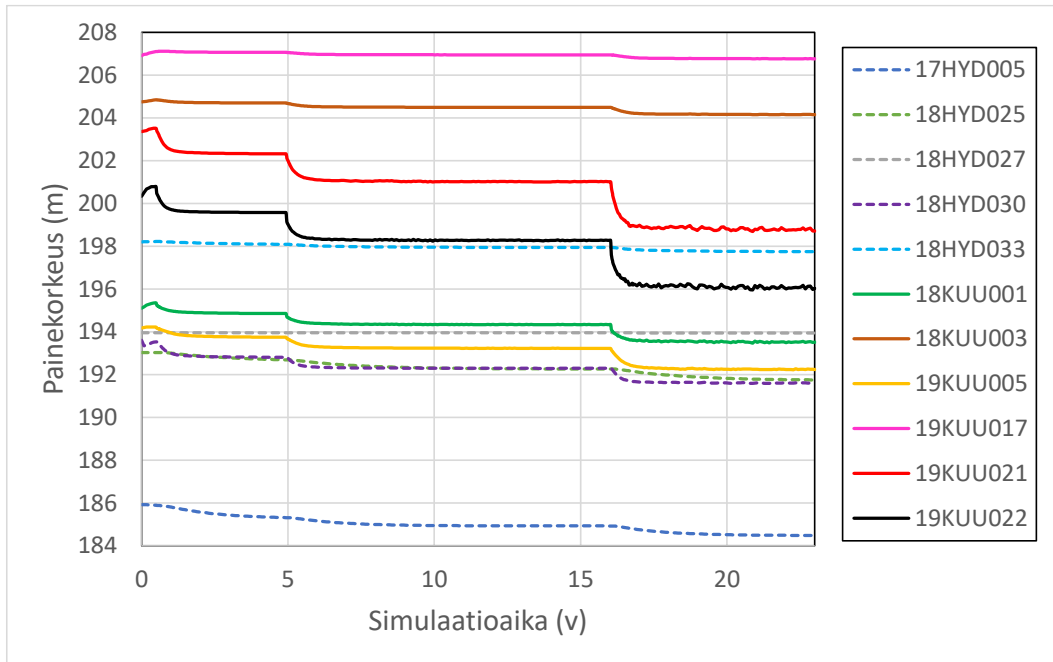
5.1 Louhinta ja kuivatus

Pohjaveden virtausta tarvekilouhokseen ja siitä johtuvaa pohjaveden alenemista mallinnettiin 23 vuoden jakson käsittävänä transientti-simulaationa, jossa louhoksen koko oli ajasta riippuva mutta kaikki muut reunaehdot muuttumattomia. Louhinnan kolme mallinnusvaihetta otettiin mallissa huomioon aikatauluarvion perusteella puolen vuoden, 5 vuoden ja 16 vuoden kuluttua simulaation alusta poistamalla louhittavaa tilavuutta vastaavat elementit laskennasta ja asettamalla louhoksen seinämille ja pohjalle suotopintareunaehto. Tämä vastaa simuloidun pohjavesisysteemin kannalta vaiheittain kasvavaa ja koko ajan pumppaamalla kuivana pidettävää avolouhosta. Kuva 5-1 esittää simuloidun pohjavesivuodon eli suotopintareunaehdon kautta mallista poistuvan pohjavesivirran kehityksen. Mustalla käyrällä kuvatun kokonaisvuodon lisäksi kuvaajaan on eritelty kolmea mallinnusvaihetta vastaavien louhoksen seinämien ja pohjan kautta tulevat pohjaveden määrät. Kolmea vaihetta vastaavat pohjavesivuodon tasapainoarvot ovat noin 360 m³/vrk, 650 m³/vrk ja 1050 m³/vrk. Kapea piikki pohjavesivuodossa jokaisen mallinnusvaiheen alussa johtuu mallinnusta yksinkertaistavasta mutta epärealistisesta oletuksesta, että noin kolmannes louhintasuunnitelman tilavuudesta poistuu samalla hetkellä.



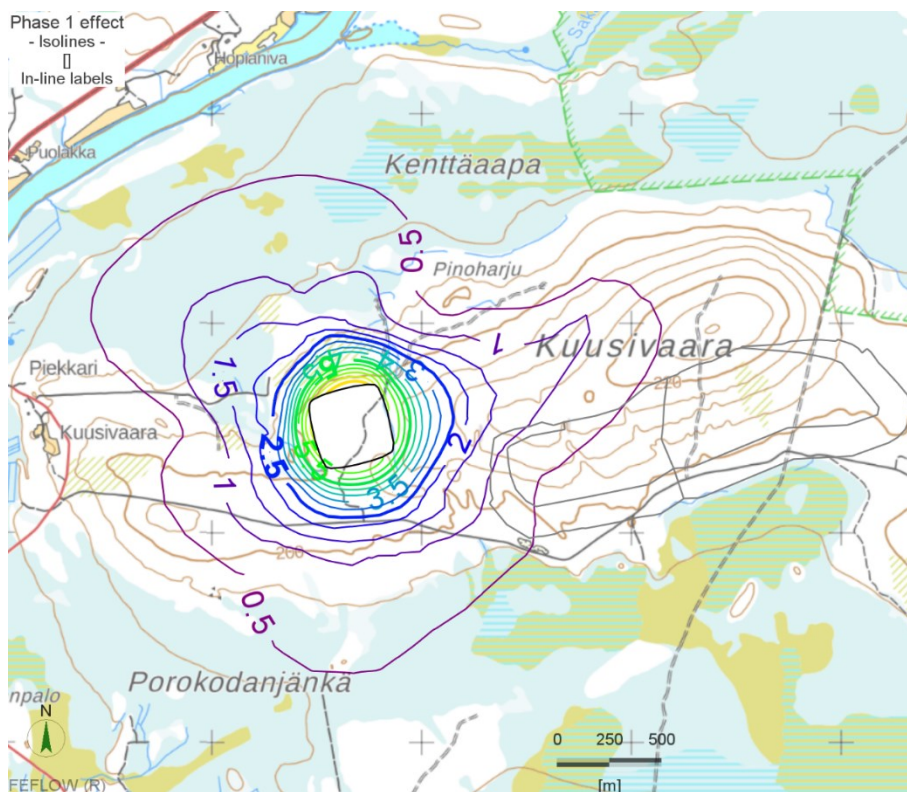
Kuva 5-1. Avolouhokseen tuleva pohjavesivuoto ajan funktiona jaoteltuna mallinnuksessa oletettujen kolmen louhintavaiheen seinämien kautta tuleviin virtaamiin.

Kuva 5-2 esittää simuloitua pohjaveden painekorkeudet mallinnetun alueen monitoroiduissa pohjavesiasemissa. Painekorkeuden arvo on otettu mallin pisteestä, joka on pohjavesiaseman mittaussälin (pohjaveden kanssa suorassa yhteydessä olevan reikäosuuden kuten putkituksessa olevan siivilän) keskipisteessä. Louhoksen vaikutus on suurin Kuusivaaran kallioperään ulottuvissa rei'issä, ja se kehittyy simuloitun louhinnan edetessä portaittain mallinnusvaiheiden mukaan.

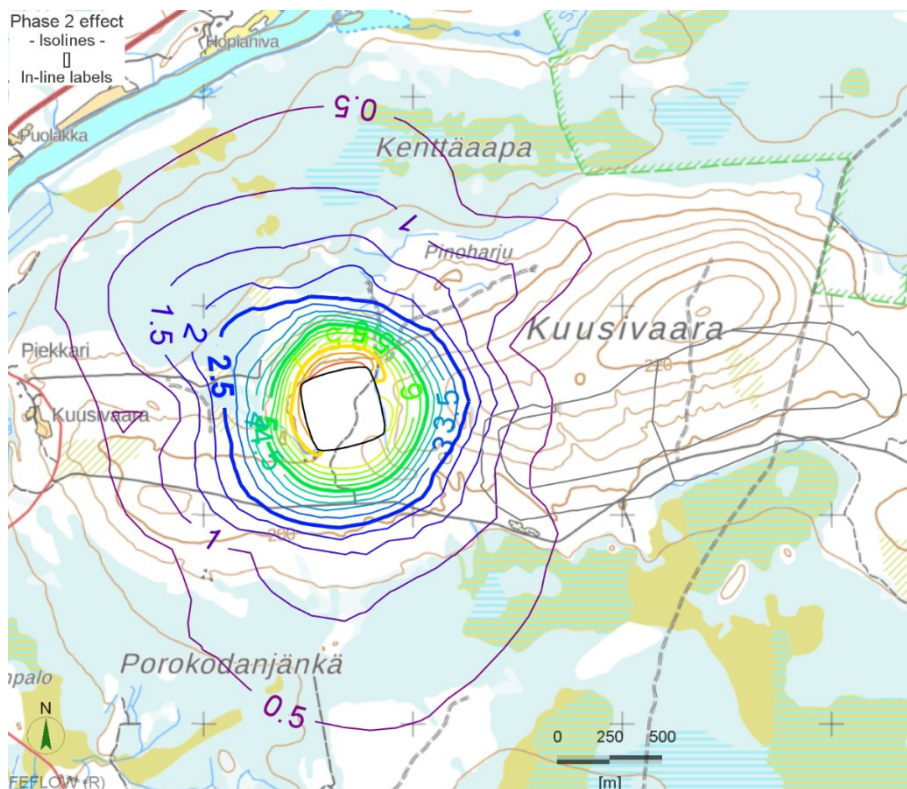


Kuva 5-2. Simuloitua painekorkeudet Kuusivaaran monitoroiduissa pohjavesiasemissa. Maaperässä olevat havaintopisteet esitetty katkoviivalla ja kallioperässä olevat yhtenäisellä viivalla.

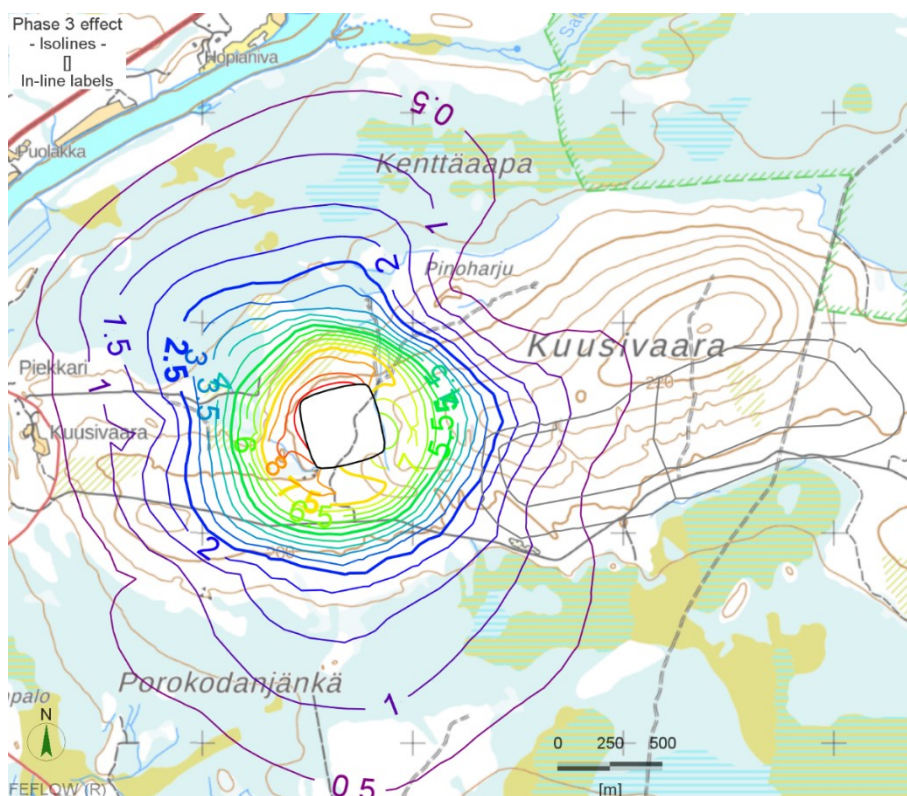
Kuvissa 5-3, 5-4 ja 5-5 on esitetty tasa-arvokäyrinä kartalla louhinnan mallinnusvaiheita vastaavat pohjaveden alenemat ja kuvassa 5-6 painekorkeus viimeisessä louhintavaiheessa. Kaikki neljä kuvaa esittävät tuloksia mallin kahden ylimmän kerroksen eli turpeen ja moreenin rajalla, jossa stationaarisen mallin antama keskimääräinen muutos on luotettavampi kuin ylimmällä mallinnetulla tasolla eli maanpinnalla, missä ajallinen luonnollinen vaihtelu on voimakkainta. Muualla kuin aivan louhoksen vieressä päällekkäisten kerrosten väliset erot painekorkeudessa ovat hyvin pieniä, joten laskennallinen alenema on oleellisesti kuvien mukainen myös ainakin moreenin alla olevassa rapakalliossa ja kiinteän kallion yläosassa. Käyrät perustuvat stationaariseen laskentaan kunkin mallinnusvaiheen mukaiselle kuivalle louhokselle. Transienttisimulaation perusteella pohjavesisysteemi asettuu tiettyä louhoksen kokoa vastaavaan tilaan noin vuoden viiveellä, joten ainakin kaivoksen toiminnan loppuvaiheessa, kun tarvekiveä louhitaan vähän tai ei lainkaan, louhoksen vaikutus pohjaveteen on käytännössä stationaarisen ratkaisun mukainen.



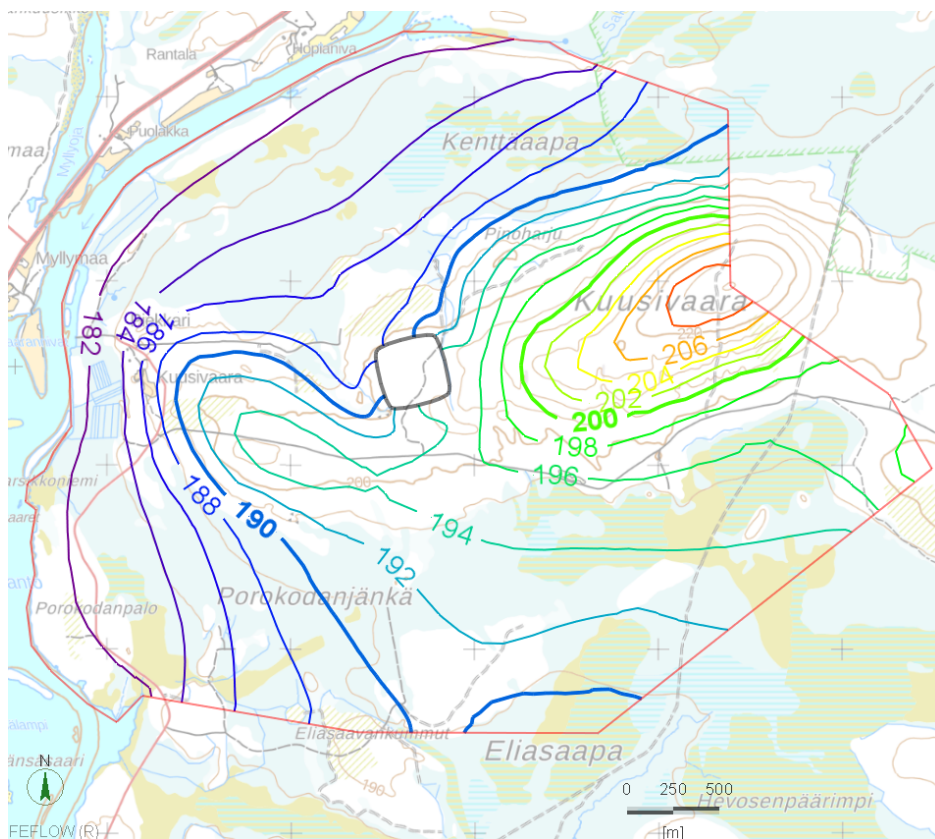
Kuva 5-3. Louhoksen vaihetta 1 (kalliota louhittu 20 m syvyydeltä noin 2 miljoonaa m^3) vastaava pohjaveden alenema metreinä turve- ja moreenikerrosten rajalla.



Kuva 5-4. Louhoksen vaihetta 2 (kalliota louhittu 40 m syvyydeltä noin 4 miljoonaa m^3) vastaava pohjaveden alenema metreinä turve- ja moreenikerrosten rajalla.

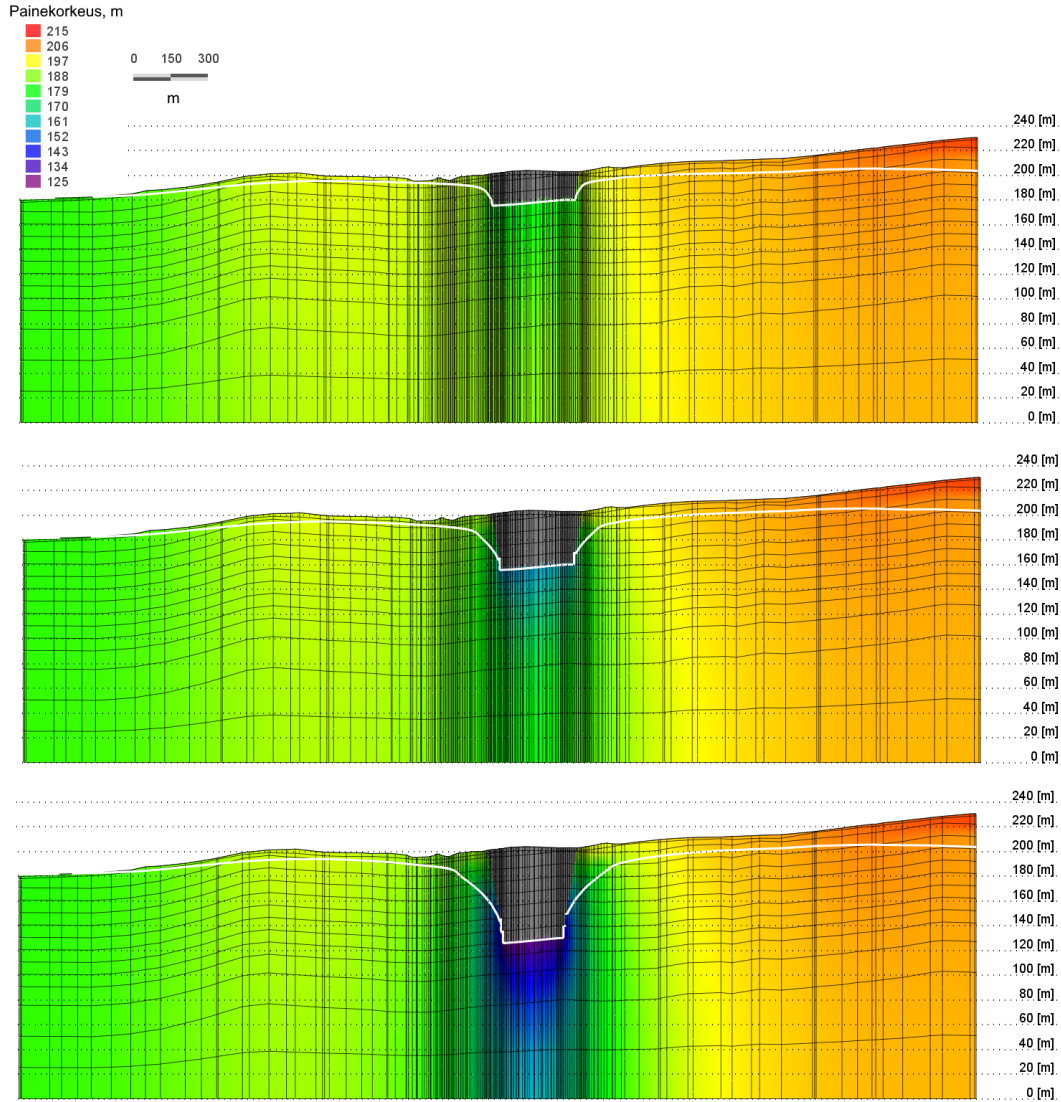


Kuva 5-5. Louhoksen vaihetta 3 (kalliota louhittu 70 m syvyydeltä noin 6 miljoonaa m³) vastaava pohjaveden alenema metreinä turve- ja moreenikerrosten rajalla.



Kuva 5-6. Pohjaveden painekorkeus turve- ja moreenikerrosten rajalla lopullisen louhintavaiheen mallinnuksen mukaan.

Kuva 5-7 esittää stationaarisen laskennan mukaiset painekorkeudet ja pohjavesipinnat länsi-itäsuuntaisella poikkileikkauksella kaikissa kolmessa mallinnetussa louhintavaiheessa.



Kuva 5-7. Painekorkeus (väritys) ja pohjaveden pinta (valkoinen käyrä) Kuusivaaran ja louhoksen poikkileikkauksella kolmessa mallinnetussa louhintavaiheessa. Poikkileikkaus lännestä itään samaa suoraa pitkin kuin kuvassa 4-2.

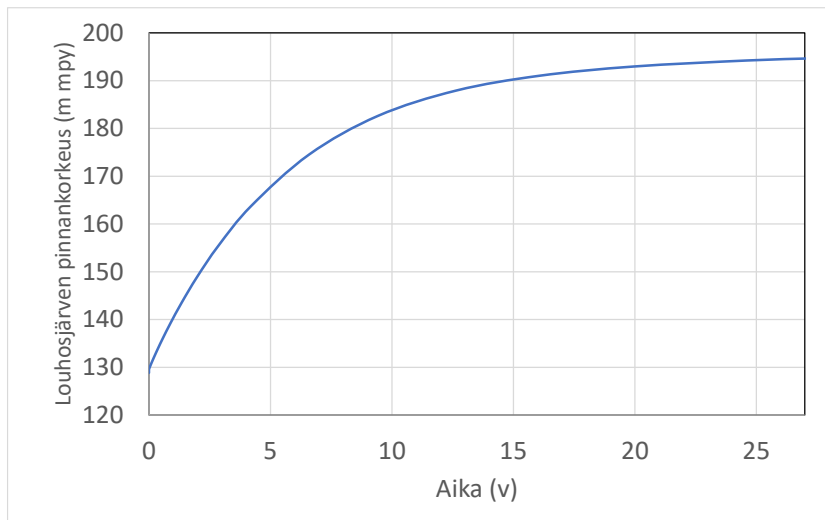
5.2 Louhosjärvi

Louhosjärven täyttymisnopeuden arvioimiseksi tehtiin simulaatio, jossa käytettiin alkutilanteena kuivana pidettyä, suunnitelman täyteen laajuuteen louhittua louhosta ja sen aiheuttamaa pohjaveden painekorkeuden alenemaa. Suotopintareunaehto poistettiin louhoksesta ja louhitut elementit palautettiin mukaan malliin tilavuutena, jolla on erittäin suuri vedenjohtavuus, alkutilan painekorkeus louhoksen pohjan tasolla ja varastokertoimena louhoksen syvyyden käänteisluku $(70 \text{ m})^{-1}$. Näillä muutoksilla 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.

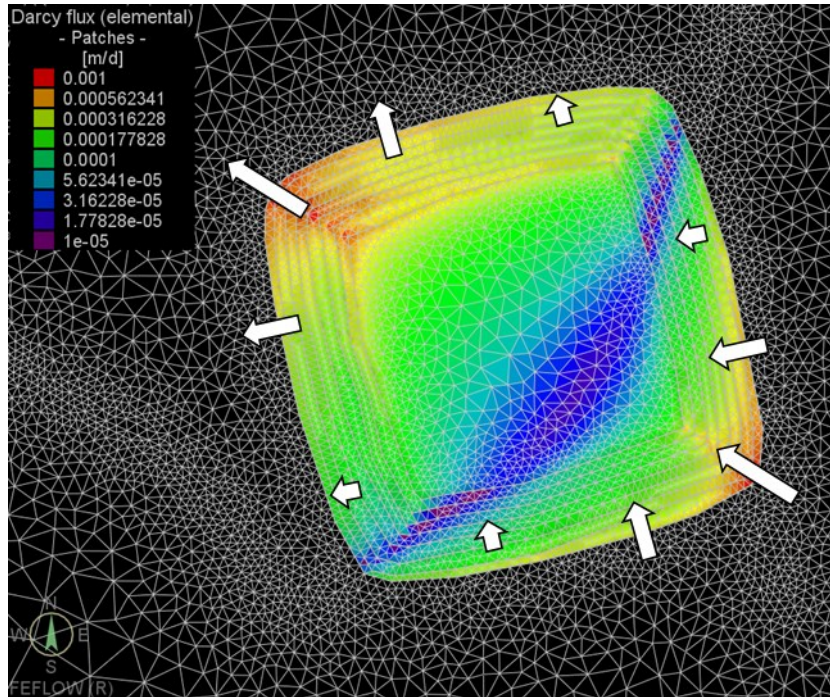
Simuloitu painekorkeuden nousu louhoksessa eli louhosjärven pinnankorkeus on esitetty kuvassa 5-8. Tulosten mukaan louhosjärven täyttyminen kestää noin kaksi vuosikymmentä, ja sen pinta asettuu noin 195 metriin merenpinnasta.



Kuva 5-8. Louhosjärven pinnankorkeuden nousu täyttymisen simulaatiossa.

Louhosjärven vedenlaadun arvioimista varten laskettiin myös veden virtaus täyttyneen louhosjärven ja pohjaveden välillä. Kuva 5-9 esittää louhosjärven stationaarisen mallinnuksen tuloksesta laskettua pohjaveden vuota.

Louhoksen poikki lounaasta koilliseen kulkevan vyöhykkeen (kuvassa sinisellä), jossa pohjaveden virtaus louhosjärven pohjan läpi on olemattoman pientä, kaakkoispuolella pohjavettä virtaa louhosjärveen, pääasiassa maaperästä ja kallion rapautuneesta pintaosasta, ja luoteispuolella (etenkin luoteisnurkassa) louhosjärven vettä imeytyy pohjaveteen. Pohjaveden virtaama louhosjärveen on mallinnuksen mukaan noin 80 m³/vrk, josta neljäsosa tulee rapautuneen pintakerroksen alapuolisesta kalliosta, ja virtaama järvestä pois on luokkaa 200 m³/vrk, kun oletetaan että pohjaveden läpivirtauksen lisäksi puolet suorasta sadannasta järveen jatkaa myös pohjavetenä toisen puolen haihtuessa.



Kuva 5-9. Visualisointi pohjaveden vuosta täyttyneen louhosjärven pohjan läpi. Järven etelä- ja itäreunalla virtauksen suunta on kuvaan hahmoteltujen nuolten mukaisesti pohjavedestä järveen ja pohjois- ja länsipuolella järvestä pohjaveteen.

6 Epävarmuuden tarkastelu

Kuusivaaran tarvekilouhoksen pohjavesimallinnuksen epävarmuus liittyy suurimmaksi osaksi mallinnetun maa- ja kalliotilavuuden hydrogeologisiin parametreihin ja niistä erityisesti vedenjohtavuuteen, joka oleellisesti määrää louhoksen pohjavesivaikutukset tasapainotilassa. Maaperän vedenjohtavuudesta mallinnusalueella oli käytettävissä muutamia mitattuja arvoja, mutta maaperän kerrospaksuuksiin verrattuna pitkien mittausvälien vuoksi tulokset eivät aina edusta mitään yksittäistä kerrosta, ja käytetty mittausmenetelmä mittaa johtavuutta vaakatasossa. Varsinkin kerrostuneissa maa-lajeissa ja myös kallioperässä on oletettavaa, että pystysuuntainen vedenjohtavuus on vaakasuuntaista pienempi, ja tämän eron huomioiminen mallissa jouduttiin toteuttamaan mallin kalibroinnin ja yleisen hydrogeologisen käsityksen pohjalta. Suppean mittausaineiston vuoksi mallin kerrosten ominaisuudet oli myös oletettava vakioiksi. Epävarmuutta lisää jonkin verran myös se, että pohjaveden pinnankorkeuden seurantalukoksia oli niin lyhyeltä ajalta, että niihin on saattanut vaikuttaa ilmaston satunnainen vaihtelu, kuten esimerkiksi vuoden 2020 talven keskimääräistä runsaampi lumipeite.

Kaksi muuta hydrogeologista parametria, ominaisvarastokerroin ja huokoisuus, vaikuttavat siihen, miten nopeasti pohjavesisysteemin tila muuttuu ennen uuden tasapainotilan saavuttamista. Ajasta riippuvan mallinnuksen perusteella louhoksen pohjavesivaikutusten viive on vuoden–parin luokkaa, joten tasapainotilan mallinnusta voidaan hyvin käyttää pohjaveden aleneman arvioimiseen. Varastokertoimen ja huokoisuuden epävarmuus ei siis ympäristövaikutusten kannalta ole yhtä merkittävä kuin vedenjohtavuuden.

6.1 Turvekerroksen mallintaminen

Etenkin aivan maaperän pintaosassa, joka Kuusivaaran ympäristössä on yleensä turvetta, numeerisen pohjavesimallin kyky ennustaa pohjaveden pinnan muutoksia on rajallinen, koska vedenjohtavuus ja muut ominaisuudet ja olosuhteet (esim. maaperäkerrosten lajit ja paksuudet, huokoisuus, kasvillisuuden määrä ja laatu, pintavaluntaan vaikuttavat pienet pinnanmuodot, lumen ja roudan kertyminen ja sulamisnopeus) vaihtelevat voimakkaasti sekä paikan että ajan funktiona tavalla, josta ei ole mitattua tietoa. Yleisesti numeerisessa pohjavesimallinnuksessa käytetty periaate asettaa pohjaveden imeytymisnopeus vakiovirtauksen kaltaisena reunaehtona mallin yläpinnalle ei välttämättä kuvaa riittävän realistisesti pohjaveden muodostumista. Itse Sakatin maanalaisen kaivoksen pohjavesivaikutusten mallinnuksen yhteydessä on perustellusti esitetty, että ajoittain (erityisesti keväällä lumen sulamisen aikana) alueen soilla on ylimäärin pintavettä, joka nostaa pohjaveden pinnan samalle maksimitasolle riippumatta siitä, onko turvekerroksen alapuolella pohjaveden paine alentunut kaivokseen suuntautuvan virtauksen takia. On myös tunnettua, että turvekerroksen tiiviiksi maatuneen pohjaosan vedenjohtavuus on hyvin pieni, ja se voi estää pohjaveden virtauksen pintaosasta alaspäin ja siten myös vesipinnan laskun

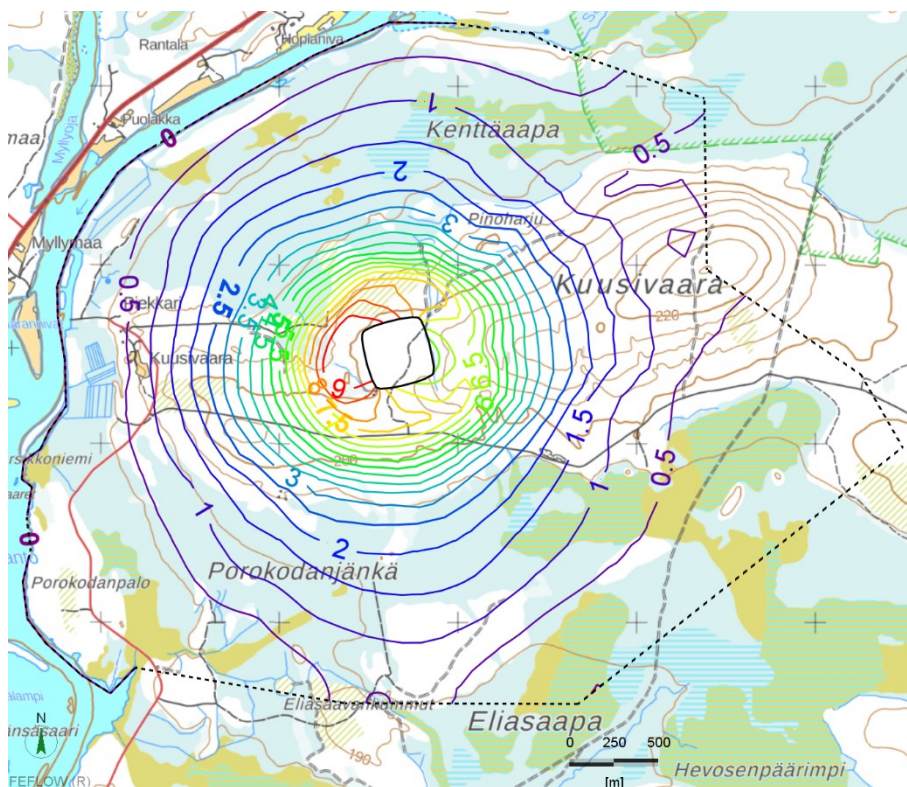
niin tehokkaasti, että vaikka moreenikerroksessa ja sen alapuolisessa kalliassa pohjaveden paine alentuisikin, pohjaveden keskimääräinen pinta ei laske. Tätä aihetta koskevat selvitykset ovat vielä kesken, joten näiden tekijöiden realistinen kuvaaminen ajallisesti ja paikallisesti keskimääräisen ja yleistetyn numeerisen pohjavesimallin avulla ei ole toistaiseksi mahdollista. Siten tämän mallinnuksen tulokset alenemasta soilla Kuusivaaran pohjois- ja eteläpuolella kuvaavat enemmänkin suurinta odotettavissa olevaa kuin todennäköisintä vaikutusta pohjaveden pintaan.

6.2 Herkkyystarkastelu

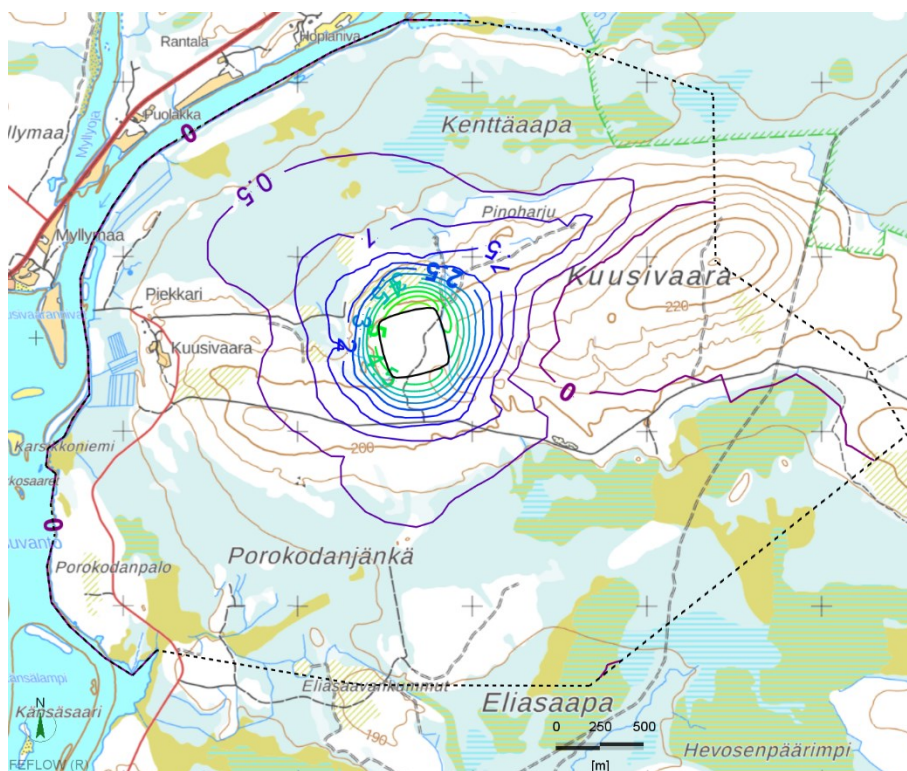
Mallille tehtiin herkkyystarkastelu kallion vedenjohtavuuden suhteen ajamalla stationaarinen laskenta yhdellä kalibroituja arvoja suuremmalla (noin kolminkertaisella) ja kahdella pienemmällä (noin puolet ja kolmasosa) kallion vedenjohtavuuden arvolla. Louhoksen laajuudeksi oletettiin 2. mallinnusvaihe eli noin 40 metrin syvyys ja 4 miljoonaa m³ louhittua kalliota. Herkkyystarkastelussa sovelletut arvot ja niitä vastaavat pohjaveden virtausnopeudet louhokseen ovat taulukossa 6-1. Kuvat 6-1 ja 6-2 esittävät pohjaveden aleneman tasa-arvokäyrät moreenikerroksessa "suuren" ja "pienen" vedenjohtavuuden tapauksissa. Alenemana ilmenevän louhoksen vaikutuksen ulottumisessa Kenttääavan ja Porokodanjängän alueille on huomattava ero.

Taulukko 6-1. Herkkyystarkastelussa käytetyt kallion vedenjohtavuudet ja vastaavat virtausmäärät louhokseen.

Tapaus	Vaakasuora johtavuus (m/s)	Pystysuora johtavuus (m/s)	Pohjaveden virtaus louhokseen (m ³ /vrk)
Suuri johtavuus	10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻⁷	1325
Kalibroitu	3 × 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	590
Pieni johtavuus	1,5 × 10 ⁻⁷	5 × 10 ⁻⁸	370
Pienin johtavuus	10 ⁻⁷	3 × 10 ⁻⁸	270



Kuva 6-1. Pohjaveden alenema metreinä moreenikerroksessa laskettuna kalibroitu arvoa suuremmalla kallion vedenjohtavuudella. Mallinnetun alueen raja on merkitty mustalla katkoviivalla. Louhoksen koko vastaa mallinnusvaihetta 2.



Kuva 6-2. Pohjaveden alenema metreinä moreenikerroksessa laskettuna kalibroitu arvoa pienemmällä kallion vedenjohtavuudella. Mallinnetun alueen raja on merkitty mustalla katkoviivalla. Louhoksen koko vastaa mallinnusvaihetta 2.



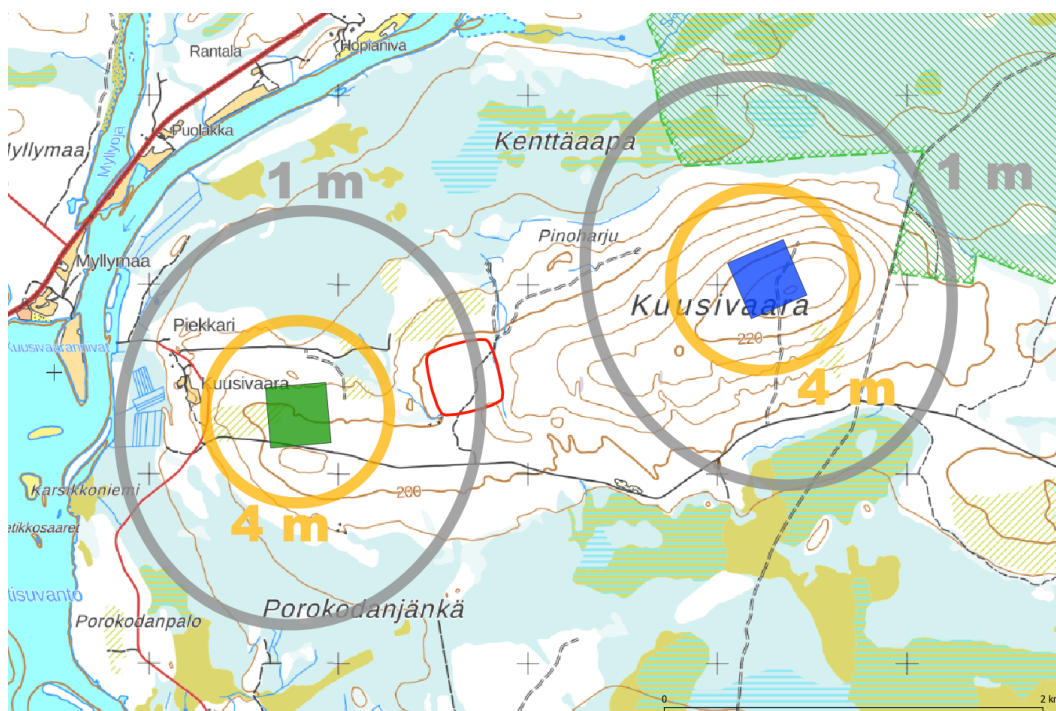
6.3 Epävarmuuden vähentäminen

Merkittävimpiä keinoja, jolla suunnitellun tarvekilouhoksen pohjavesivaikutusten arvioinnin epävarmuutta voitaisiin vähentää, olisi hankkia mittaustietoa kallioperän vedenjohtavuuden paikallisesta vaihtelusta, mukaan lukien syvyysriippuvuudesta, louhoksen lähialueella. Se parantaisi varsinkin louhokseen tulevan pohjaveden määräarvion tarkkuutta. Mallinnusta hyödyttäisi, jos vaakasuuntaisen johtavuuden lisäksi saataisiin tietoa myös pystysuuntaisesta johtavuudesta.

Suoalueille mahdollisesti ulottuvan pohjavesipintaa alentavan vaikutuksen mallintamisen luotettavuutta lisäisi esimerkiksi tarkempi käsitys siitä, miten voimakkaasti turvekerroksen alla vallitsevan pohjaveden paineen muutos vaikuttaa pintavesiin ja pintakerroksessa olevaan pohjaveteen.

7 Vaihtoehtoiset louhoksen sijainnit

Sakatin kaivoshankkeen YVA-menettelyssä on tarkasteltu myös kahta vaihtoehtoista tarvekilouhoksen sijaintia pohjavesimallinnus oletetun ensisijaisen paikan lisäksi. Molemmat vaihtoehdot olisivat myös Kuusivaaralla, toinen sen länsipäässä ja toinen idässä, vaaran huipun kohdalla. Koska pohjavesimallinnus käytettiin yleistettyä, koko aluetta koskevia vedenjohtavuuden ja muiden hydrogeologisten parametrien arvoja, simuloidun louhoksen pohjavesivuodon määrän ja louhoksen ympärille muodostuvan pohjaveden aleneman voi olettaa pätevän myös vaihtoehtoisiin sijainneille. Kuva 7-1 esittää vaihtoehtoisten louhoksen sijaintien ympärille mallinnustulosten perusteella hahmotellut alueet, joissa pohjaveden alenema moreenikerroksessa olisi 1 m (harmaa kehä) ja 4 m (keltainen kehä) mallinnusvaiheen 2 mukaisen tarvekilouhoksen tapauksessa. Tämän arvion mukaan 1 metrin aleneman alue ulottuisi itäisessä sijaintivaihtoehdossa selvästi Viiankiaavan Natura-alueelle.



Kuva 7-1. Arvioitu pohjaveden alenema vaihtoehtoisiin tarvekilouhoksen sijainneille (vihreä ja sininen neliö). Louhoksen ympärille muodostuvan aleneman on oletettu vastaavan numeerisesti mallinnettua tarvekilouhoksesta (sijainti merkitty punaisella).

8 Johtopäätöksiä

Kuusivaaralle suunniteltuun tarvekilouhokseen tulevan pohjaveden määräksi arvioitiin numeerisen pohjavesimallin avulla enimmillään noin 1000 m³/vrk, jos louhintaa jatketaan suunniteltuun maksimilaajuuteen 6 miljoonaa m³ kalliota ja 70 m syvyyteen asti. Louhoksen jäädessä pienemmäksi sinne tulevan pohjaveden määräkin on pienempi likimäärin louhostilavuuden tai sen syvyyden suhteessa. Transienttisimulaation perusteella pohjavesisysteemi asettuu louhinnan keskeytymisen jälkeen tasapainoon parissa vuodessa, ja lähimmissä pohjavesiasemissa voidaan havaita muutaman metrin alenema keskimääräisessä pohjavesipinnan korkeudessa, mikä useissa tapauksissa on selvästi vähemmän kuin vuosien 2019–2021 seurantajaksolla havaittu luonnollinen vaihtelu.

Mallinnuksen mukaan louhos aiheuttaa ympärilleen pohjaveden paine- korkeuteen aleneman, joka voi ulottua havaittavan suuruisena moreeni- kerroksessa satojen metrien päähän sekä Kenttääavalle pohjoisessa että Porokodanjängälle etelässä. On mahdollista, että alenema vähentää tällä alueella olevien lähteiden virtaamia ja lisää niiden ajoittaista kuivumista, jota on nykytilassa havaittu vähäisen pohjaveden aikoina. Herkkyystarkastelun perusteella kallioperän oletettua suurempi vedenjohtavuus saisi aleneman ulottumaan Viiankiaavan Natura-alueen lounaisreunalle mallinnetulla tarvekilouhoksen sijoittumisella (Kuusivaaran laen länsipuolella) mallinnetussa louhintavaiheessa 2, jolloin kalliota olisi louhittu 40 m syvyydeltä noin 4 miljoonaa m³. Kallioperän vedenjohtavuuden ollessa oletettua pienempi alenema-alue olisi myös pienempi ulottuen jonkin verran Porokodanjängän sekä Kenttääavan suoalueille.

Mallissa on käytetty koko alueelle yleistettyjä vedenjohtavuuden arvoja, joten lasketut alenema-arvot ovat hyvin karkeita arvioita mahdollisesta vaikutuksesta. Sekä maaperäkerrosten että kallion vedenjohtavuudessa voi esiintyä suurtakin paikallista vaihtelua, joka voi joko vähentää tai lisätä louhoksen pohjaveden pintaa alentavaa vaikutusta.

Lähteet

- Hyypä, J. (1962) Pohjavesitutkimuksia Sodankylän pitäjän pohjoisosaan suunnitellun Lokan patoamisaltaan ympäristössä. Geologian tutkimuskeskus, Maaperäosasto.
- Puumalainen, T. (2021) A 3D geological model and geochemical and hydrogeological properties of sediments in Kuusivaara, Sodankylä, Finland. Pro gradu -tutkielma, Oulun yliopiston teknillinen tiedekunta.
- SRK (2019) Sakatti Cu-Ni-PGE Project Pre-feasibility Study: Water Management. Raportti Anglo American Sakatti Oy:lle (ei julkinen).
- Stantec (2020) Groundwater Modeling Assessment of the Proposed Underground Mine at the Sakatti Cu-Ni-PGE-Au Deposit.
- Åberg, S., Korkka-Niemi, K., Rautio, A., Salonen, V.-P. & Åberg, A. (2019) Groundwater recharge/discharge patterns and groundwater-surface water interactions in a sedimentary aquifer along the River Kitinen in Sodankylä, northern Finland. Boreal Environmental Research 24: 155–187.