



**Sakatin kaivoshankkeen
pohjavesivaikutusten mallinnus**

Mallinnusraportti

30. kesäkuuta 2020

Tilaaaja:

Anglo American Sakatti Mining Oy

Laatija:

Stantec Consulting Ltd
500-311 Portage Avenue
Winnipeg, MB R3B 2B9



Tarkistus	Kuvaus	Laatinut		Laaduntarkastus		Riippumaton tarkastus	

SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

Tämän asiakirjan nimeltään Sakatin kaivoshankkeen pohjavesivaikutusten mallinnus on laatinut Stantec Consulting Ltd ("Stantec") osapuolen Anglo American Sakatti Mining Oy ("Asiakas") lukuun. Kaikki tämän asiakirjan käyttö on kielletty kolmansilta osapuolilta. Sen sisältämä materiaali heijastaa Stantecin ammatillista harkintaa asiakirjassa sekä Stantecin ja asiakkaan välisessä sopimuksessa mainitun laajuuden, aikataulun ja muiden rajoitteiden suhteen. Asiakirjassa esitetyt mielipiteet pohjautuvat asiakirjan julkaisuhetkellä vallitseviin olosuhteisiin ja tietoon, eikä niissä huomioida tämän jälkeen tapahtuneita muutoksia. Stantec ei ole varmentanut muiden osapuolten toimittamia tietoja asiakirjaa laatiessaan. Kaikki tämän asiakirjan käyttö kolmansien osapuolten toimesta on kyseisen kolmannen osapuolen vastuulla. Kyseinen kolmas osapuoli sitoutuu siihen, että Stantec ei ole vastuussa kyseiselle tai muulle kolmannelle osapuolelle tämän asiakirjan käytöstä koituvien päätösten tai toimenpiteiden aiheuttamista mahdollisista kuluista tai vahingoista.

Laatinut _____



(allekirjoitus)

Mundzir Basri Ph.D. (Project Groundwater Modeler),

Laatinut ja arvioinut _____



(allekirjoitus)

Robert Berry, Ph.D. (Project Technical Manager)

Hyväksynyt _____



(allekirjoitus)

Sebastiaan Weijndema (Project Manager)



Sisällysluettelo

TIIVISTELMÄ.....	I
LYHENTEET	IV
SANASTO	V
1.0 JOHDANTO	1.1
1.1 TAUSTA	1.1
1.2 TYÖN TAVOITTEET	1.1
1.3 TYÖN KATTAVUUS	1.2
2.0 KUVAUS SAKATIN TUTKIMUKSISTA JA AINEISTOSTA	2.1
2.1 HELSINGIN YLIOPISTON TUTKIMUKSET	2.1
2.1.1 VIIANKIAAVAN SUO	2.1
2.1.2 GLASIAALISET JA FLUVIAALISET SEDIMENTIT	2.3
2.2 SAKATIN KALLIOPERÄN GEOLOGINEN MALLI.....	2.9
2.2.1 Keski-Lapin vihreäkivivyöhyke.....	2.9
2.2.2 Sakatin mineraaliesiintymä.....	2.9
2.2.3 Sakatin kallioperän geologinen malli	2.14
2.3 AKVIFERITESTIT JA POHJAVEDEN SEURANTA-AINEISTO.....	2.15
2.3.1 POHJAVEDEN PINNAN SEURANTA-AINEISTO.....	2.15
2.3.2 AKVIFERITESTIT	2.18
3.0 KONSEPTUAALINEN HYDROGEOLOGINEN MALLI	3.1
3.1 GEOLOGINEN YHTEENVETO HANKEALUEESTA.....	3.1
3.2 YHTEENVETO HYDROSTRATIGRAFISISTA YKSIKÖISTÄ.....	3.2
3.3 PINTA- JA POHJAVEDEN VIRTAAUS JA HYDROLOGISET YHTEYDET	3.3
3.4 KONSEPTUAALISEN HYDROGEOLOGISEN MALLIN AVAINELEMENTIT	3.4
4.0 SAKATIN KAIVOKSEN TOTEUTUSSUUNNITELMA.....	4.1
4.1 SUUNNITELLUN SAKATIN KAIVOKSEN LOUHOKSET	4.1
4.1.1 Suunnitellun kaivoksen kehitysvaiheet	4.2
4.2 SUUNNITELLUT MAANPÄÄLLISET RAKENTEET	4.3
5.0 NUMEERINEN MALLINTAMINEN	5.1
5.1 JOHDANTO.....	5.1
5.2 TAUSTA	5.1
5.3 MALLINTAMISESSA KÄYTETYT OLETTAMUKSET	5.1
5.4 KONSEPTUAALINEN MALLI	5.3
5.5 LUMEN SULANNAN LÄMPÖTILAINDEKSIMALLI	5.9
Lumen sulamismallin soveltaminen	5.9
5.6 NUMEERINEN FEFLOW-MALLI	5.13
6.0 NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN	6.1



6.1	MALLIN ALUE	6.1
6.2	REUNAHDOT	6.1
6.3	MALLIN KOLMIOVERKKO	6.4
6.4	MALLIN KERROKSET	6.8
6.5	HYDROSTRATIGRAFISET KERROKSET	6.8
6.6	GEOLOGISET RAKENTEET	6.13
6.7	ALUSTAVAT HYDRAULISET PARAMETRIT	6.13
6.8	MAANALAISEN KAIVOKSEN KUVAUS	6.29
7.0	NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI	7.1
7.1	STEADY-STATE-KALIBROINTI	7.1
7.1.1	Kalibrointimenettely	7.1
7.1.2	Havaintoputket	7.4
7.1.3	Kalibrointitulokset	7.5
7.1.4	Kalibroidut hydrauliset muuttujat	7.5
7.2	TRANSIENTTI KALIBROINTI	7.13
7.2.1	Kalibrointimenettely	7.13
7.2.2	Havaintoputket	7.13
7.2.3	Kalibrointitulokset	7.13
7.2.4	Kalibroidut hydrauliset parametrit	7.19
7.3	YHTEENVETO	7.20
8.0	MALLINNUSTULOKSET: KAIVOS PERUSLIEVENNYS TOIMENPITEILLÄ	8-1
8.1	PERUSLIEVENNYS TOIMENPITEILLÄ TOTEUTETUN KAIVOKSEN PÄÄELEMENTIT	8-1
8.2	POHJAVEDEN ARVIOITU SISÄÄNVIRTAUS	8-2
8.3	POHJAVEDEN MALLINNETTU ALENEMA YLIMMISSÄ KERROSTUMISSA	8-2
8.4	POHJAVEDEN PINNAN PALAUTUMINEN KAIVOSTOIMINNAN LOPETTAMISEN JÄLKEEN	8-8
9.0	MALLINNUKSEN TULOKSET: KAIVOSTOIMINTA ERITYISIN LIEVENTÄVIN TOIMENPITEIN	9.1
9.1	ERITYISET LIEVENNYS TOIMENPITEET	9.1
9.2	KAIVOKSEN INJEKTOIMINEN ERITYISENÄ LIEVENTÄVÄNÄ TOIMENPITEENÄ	9.1
9.3	MALLINNETTU POHJAVEDEN ALENEMA YLEMMÄSSÄ KERROKSESSA	9.2
9.4	POHJAVEDEN PINTOJEN PALAUTUMINEN KAIVOSTOIMINNAN PÄÄTYTTYÄ	9.8
10.0	ILMASTONMUUTOS JA SAKATIN ALUE	10.9
11.0	JOHTOPÄÄTÖKSET	11.1
12.0	VIITTEET	12.1



LISTA TAULUKOISTA

Taulukko 5-1	Lumen sulamismallin aineisto.....	5.10
Taulukko 6-1	FEFLOW-mallikerrokset	6.13
Taulukko 6-2	Alustavat hydrauliset parametrit FEFLOW-mallissa.....	6.29
Taulukko 7-1	Pohjaveden havaintoputkien koordinaatit sekä muodostuma, johon havaintoputket on asennettu	7.3
Taulukko 7-2	Tärylankapietsometrit kallioperässä	7.5
Taulukko 7-3	Kalibroidut hydrauliset parametrit (hydraulinen johtavuus, vaakatasossa, K_h ; ja pystytasossa, K_z): steady-state-kalibrointi	7.11
Taulukko 7-4	Steady-state-mallin massatase	7.13
Taulukko 7-5	Kalibroidut hydrauliset parametrit: transienttikalibrointi.....	7.19
Taulukko 8-1	Kaivostoiminta peruslievennystoimenpiteillä.....	8-2
Taulukko 9-1	Kallioperän pohjaveden purkautumismäärät maanalaiseen kaivokseen erityisin lieventävin toimenpitein toteutettavassa kaivoksessa	9.2



LISTA KUVISTA

Kuva 1-1Projektin sijoittuminen kartalla.....	1.4
Kuva 2-1Turpeen paksuusmalli ja maaperä turpeen alla Viiankiaavan suolla.	2.2
Kuva 2-2Jäätikön ja jokitoiminnan kerrostamia maaperäyksiköitä maa-ainesten ottopaikassa Kitisen länsirannalla.	2.4
Kuva 2-3Geologinen poikkileikkaus jäätikkö- ja jokisyntyisiin maaperäkerrostumiin Kitisen länsipuolella olevan Kärvasniemen leikkauksen alueella.	2.6
Kuva 2-4Geologinen poikkileikkaus Kitisen itärannan glasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin	2.7
Kuva 2-5Itä-länsi-suuntainen poikkileikkaus Viiankiaavalta Sahankankaalle A–A'.....	2.8
Kuva 2-6Keski-Lapin vihreäkivivyöhyke (CLGB).	2.11
Kuva 2-7Sakatti-projektin alueen geologinen kartta	2.12
Kuva 2-8Poikkileikkaus Sakatin mineraaliesiintymän kallioperän pääyksiköihin.	Error!
Bookmark not defined.	
Kuva 2-9Pohjavedenpinnan samanarvokäyrät jäätikkö- ja jokisyntyisissä sedimenteissä.	2.16
Kuva 2-10 Vuosittainen pohjavedenpinnan vaihtelu jäätikkö- ja jokisyntyisiin sedimentteihin asennetuissa tarkkailuputkissa.....	2.17
Kuva 2-11 Vedenjohtavuuskertoimen arvon vaihtelu jäätikkö- ja jokisyntyisissä sedimenteissä (SRK 2018, 2019)	2.19
Kuva 2-12 Vedenjohtavuuskertoimen arvon vaihtelu rapautuneessa ja rikkoutuneessa kallioperässä (SRK 2018, 2019).	2.20
Kuva 2-13 Vedenjohtavuuskertoimen arvon vaihtelu terveessä, muuttumattomassa kallioperässä (SRK 2018, 2019)	2.21
Kuva 3-1Sakatin kaivoshankkeen konseptuaalinen hydrogeologinen malli.	3.7
Kuva 4-1Sakatin kaivoksen maanpäälliset toiminnot vaihtoehdolle VE1A.	4.2
Kuva 4-2Kaaviokuvaus Sakatin kaivoksen kaivossuunnitelmasta	4.3
Kuva 5-1Helsingin Yliopiston Leapfrog mallialue.....	5.4
Kuva 5-2Pienennetty Leapfrog-mallialue.....	5.5
Kuva 5-3Yhdistelmä Leapfrog-malli	5.7
Kuva 5-4 Pohjaruhjeen laajuus FEFLOW-mallissa.....	5.8
Kuva 5-5Konsepti sateen ilmenemismuodosta suhteessa lumen ja veden kynnyslämpötiloihin.....	5.10
Kuva 5-6Sodankylän sääaseman mitattu sadanta- ja lämpötila-aineisto	5.11
Kuva 5-7Simuloidut ja mitatut lumen syvyydet sekä pohjaveden muodostumisnopeus	5.12
Kuva 5-8Päivittäisen sadannan keskiarvon, pohjaveden muodostumisen, ilman lämpötilan ja lumen syvyyden välinen suhde	5.13
Kuva 6-1FEFLOW-mallin alueen sijainti.....	6.2
Kuva 6-2FEFLOW mallin alue (vaalea läpinäkyvä) ja turpeen paksuuden jakauma kerroksessa 1	6.3
Kuva 6-33D FEFLOW-malli, jossa näkyvät hydraulisen korkeuden ja suotopintojen (seepage face) reunaehdot.....	6.5
Kuva 6-4Ajallisesti vaihteleva pohjaveden muodostuminen välillä 2012–2019 eri rasisusjaksoilla	6.6
Kuva 6-5FEFLOW-mallin superhilaverkko ja tarkennettu hilaverkko Kitisen joen, 5 km vinotunnelin, pääkaivoksen ja seurantakaivojen kohdalla	6.7
Kuva 6-6Poikkileikkauksenäkymä superhilaverkosta (vasen yläkulma) ja siirrostien sekä pohjan työntösiirroksen vertikaalisesta diskretoinnista FEFLOW-mallissa	6.9



Kuva 6-7 Alemman moreenin (sininen) ja alimpien hiekkojen ja sorien (vihreä) spatiaalinen levinneisyys Leapfrog-mallissa.....	6.10
Kuva 6-8 Alemman moreenin (sininen) ja alimpien hiekkojen ja sorien spatiaalinen levinneisyys FEFLOW-mallin kerroksessa 8	6.11
Kuva 6-9 Poikkileikkausnäkö Leapfrog-mallista (A) ja FEFLOW-mallista (B).....	6.12
Kuva 6-10 FEFLOW-mallin kerros 1, jossa turve (oranssi), lajittuneet pintakerrostumat (keltainen) ja hajanaisena ylempi moreeni (vihreä).....	6.14
Kuva 6-11 FEFLOW-mallin kerros 2, jossa lajittuneet pintakerrostumat (keltainen) ja hajanaisena ylempi moreeni (vihreä)	6.15
Kuva 6-12 FEFLOW-mallin kerros 3, jossa ylempi moreeni (vihreä) ja hajanaisena lajittuneet pintakerrostumat (keltainen)	6.16
Kuva 6-13 FEFLOW-mallin kerros 4, jossa keskimmäiset hiekat ja sorat (vihreä) länsipuolella ja hajanaisena ylempi moreeni (vaaleanvihreä) itäpuolella	6.17
Kuva 6-14 FEFLOW-mallin kerros 5, jossa keskimmäiset hiekat ja sorat (vihreä) länsipuolella ja hajanaisena ylempi moreeni (vaaleanvihreä) itäpuolella	6.18
Kuva 6-15 FEFLOW-mallin kerros 6, jossa keskimmäiset hiekat ja sorat (vihreä) länsipuolella ja hajanaisena ylempi moreeni (vaaleanvihreä) itäpuolella	6.19
Kuva 6-16 FEFLOW-mallin kerros 7, jossa alempi moreeni (sininen) ja hajanaisena keskimmäiset hiekat ja sorat (vaaleanvihreä).....	6.20
Kuva 6-17 FEFLOW-mallin kerros 8, jossa alempi moreeni (sininen) ja hajanaisena alimmat hiekat ja sorat (tummansininen) sekä keskimmäiset hiekat ja sorat (vaaleanvihreä)	6.21
Kuva 6-18 FEFLOW-mallin kerros 9, jossa alempi moreeni (sininen) ja hajanaisena alimmat hiekat ja sorat (tummansininen) sekä keskimmäiset hiekat ja sorat (vaaleanvihreä)	6.22
Kuva 6-19 FEFLOW-mallin kerros 10, jossa rapautunut kallioperä (indigonsininen) ja paikallisena ehjä kallioperä (violetti)	6.23
Kuva 6-20 FEFLOW-mallin kerros 11, jossa ehjä kallioperä (violetti) koko mallin toimialueella.....	6.24
Kuva 6-21 Leapfrog-malli, jossa pohjasiirros suunnitellun kaivoksen jalkapuolella (footwall).....	6.25
Kuva 6-22 FEFLOW-malli, jossa suunnitellun kaivoksen alla uusi hilaverkko näyttää pohjasiirroksen	6.26
Kuva 6-23 Leapfrog 3D-näkymä suunnitellun kaivoksen läpäisevästä itäisestä siirroksista	6.27
Kuva 6-24 FEFLOW 3D-näkymä suunnitellun kaivoksen läpäisevästä itäisestä siirroksista	6.28
Kuva 6-25 FEFLOW-mallin hilaverkko, jossa näkyvissä suunniteltu kaivos kuten se kuvattiin mallissa	6.30
Kuva 6-26 Suunniteltu kaivos ja suotopintojen reunaehdot FEFLOW:ssa	6.31
Kuva 7-1 Kalibroinnissa käytettyjen pohjaveden havaintoputkien sijainti kartalla. Suunniteltu maanalainen kaivos on merkitty kuvassa sinisellä.....	7.2
Kuva 7-2 Steady-state -kalibroinnissa käytettyjen simuloitujen ja mitattujen pohjaveden pintojen kalibrointikäyrä.	7.7
Kuva 7-3 Steady-state-mallin kalibroinnissa käytettyjen havaintoputkien vedenpintojen keskivirheet (residuaalit).	7.8
Kuva 7-4 Steady-state-mallin kalibraation residuaalien alueellinen jakauma.....	7.9
Kuva 7-5 Kalibroidut vedenpintojen korkeudet. Mallin kerros 1.	7.10



Kuva 7-6	Transienttimallin kalibroinnin tulokset turpeeseen asennetuille havaintoputkille.	7.14
Kuva 7-7	Transienttimallin kalibroinnin tulokset lasiaalisiin ja fluviaalisiin kerrostumiin asennetuille havaintoputkille.	7.15
Kuva 7-8	Transienttimallin kalibroinnin tulokset rapakallioon asennutetuille havaintoputkille.	7.16
Kuva 7-9	Transienttimallin kalibroinnin tulokset kallioperään asennetuille havaintoputkille.	7.17
Kuva 7-10	Transienttimallin kalibroinnin tulokset kallioperään asennetuille tärylankapietsometreille (havaintoputkille).	7.18
Kuva 8-1	Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (lasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-1.....	8-3
Kuva 8-2	Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (lasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-3.....	8-4
Kuva 8-3	Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (lasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-8.....	8-5
Kuva 8-4	Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (lasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-15.....	8-6
Kuva 8-5	Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (lasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-22.....	8-7
Kuva 8-6	Kaivostoiminnan perustapaus: mitattavissa oleva pohjaveden pintojen alenema mallikerroksessa 1 sekä pohjaveden muodostumisen vuodenaikaisvaihtelu.....	8-8
Kuva 8-7	Kaivos peruslievennystoimin.....	8-9
Kuva 8-8	Kaivos peruslievennystoimin: Kaivoksen sulkemisen jälkeinen kallioperän pohjaveden pintojen prosentuaalinen palautuminen ajan funktiona vuosissa.....	8-10
Kuva 8-9	Kaivos peruslievennystoimin: Kaivostoiminnan jälkeinen kallioperän pohjaveden pintojen taso (Hydraulic Head) metreissä suhteessa merenpinnan tasoon ajan funktiona vuosissa kaivostoiminnan lopettamisen jälkeen.....	8.11
Kuva 9-1	Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y1)	9.3
Kuva 9-2	Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y3)	9.4
Kuva 9-3	Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y8)	9.5
Kuva 9-4	Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y15).....	9.6
Kuva 9-5	Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y22).....	9.7
Kuva 9-6	Mallinnettu pohjaveden alenema mallikerroksessa 1 verrattuna kausittaiseen pohjaveden muodostumiseen erityisin lievennystoimenpitein toteutetussa kaivoksessa.	9.8

LISTA LIITTEISTÄ

LIITE AA.ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.



Tiivistelmä

Stantec Consulting Ltd (Stantec) laati numeerisen pohjavesimallin suunnitellusta Anglo American Sakatti Mining Oy:n maanalaisesta kaivoksesta, joka sijoittuu Pohjois-Suomeen, noin 25 kilometriä (km) Sodankylästä pohjoiseen. Suunniteltu Sakatin kaivos tulisi olemaan maanalainen ja sen tarkoituksena on hyödyntää kupari-nikkeli-platina-PGE-kulta-esiintymää Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeellä Pohjois-Suomessa. Kaivostoimintaa suunnitellaan luonnontilaiselle alueelle.

Stantec on hyödyntänyt kolmiulotteisen numeerisen pohjavesimallin laatimisessa ilmakuvia, geologisia karttoja, geofysikaalista kartoitusaineistoa, kairauspöytäkirjoja, pohjaveden seuranta-aineistoa sekä Anglo American Sakatti Mining Oy:n (”Asiakas”) toimittamaa hydraulisen testauksen aineistoa. Lisäksi Stantec hyödynsi Helsingin Yliopiston tutkijoiden tuottamaa geologista mallinnusta Viiankiaavan suokompleksin (”suo”) glasiaalisista (jäätikkösyntyisistä) ja fluviaalisista (jokitoiminnan kerrostamista) sedimenteistä (Åberg et al. 2017 a, b; Åberg 2019 et al.) sekä geologista mallia, jonka SRK Limited (UK) Ltd (2019) kehitti Asiakkaalle kohdealueen paleoproterotsooisesta kallioperästä ja suunnitellusta maanalaisesta kaivoksesta.

Suunnitellusta kaivoksesta sekä Viiankiaavan alapuolella olevista glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä laadittiin geologinen malli. Tämä toteutettiin siten, että Helsingin Yliopiston kehittämä (Åberg et al. 2017a, b; Åberg et al. 2019) Leapfrog-ohjelmistolla tehty (Leapfrog Geo 2019) geologinen malli Viiankiaavan suon glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä yhdistettiin SRK:n kehittämään kallioperän geologiseen malliin (2019), joka pohjautuu Asiakkaan toimittamiin malminetsinnällisiin kairausaineistoihin. Kyseisen yhdistetyn geologisen Leapfrog-mallin pohjalta määritettiin numeerisen pohjavesimallin hydrostratigrafiset kerrosyksiköt.

Tässä raportissa kuvataan suunnitellun kaivoksen hydrogeologisen mallin rakentamista Leapfrog Works V 3.0 -ohjelmapaketin (Seequent Ltd 2019) avulla sekä numeerisen pohjavesivirtausmallin rakentamista FEFLOW:n (Deirch 2014) avulla. Mallien avulla pyrittiin arvioimaan suunnitellun kaivostoiminnan (hankevaihtoehto VE1A, YVA) mahdollisia vaikutuksia kallioperän vedenpintaan sekä yläpuolella olevien Viiankiaavan suon ja ympäröivän Natura 2000 -suojelualueen glasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin ja turpeeseen. Pohjavesimallin avulla myös arvioitiin mahdollisia lisätoimenpiteitä, jotka lieventäisivät suunnitellun maanalaisen kaivostoiminnan vaikutuksia Viiankiaavan suon sekä Natura 2000 -suojelualueen vedenpintaan. Mallintamisessa keskityttiin kaivoskohteen läpäiseviin siirroksiin, joita pitkin vesi voisi mahdollisesti kulkeutua glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien maanpinnan lähellä olevista pohjavesimuodostumista (akvifereista) suunniteltuun maanalaiseen kaivokseen. FEFLOW on numeerinen mallintamiskoodi, jonka avulla voi mallintaa kyllästyneen ja ei-kyllästyneen suotoveden virtausta sekä siirroksia, murtumia ja hydrostratigrafisia kerroksia.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli arvioida suunnitellun maanalaisen kaivostoiminnan mahdollisia vaikutuksia yläpuolella olevaan Viiankiaavan suohon ja Natura 2000 -suojelualueeseen, joka on osa kansallista soidensuojeluohjelmaa. Kaivoksen kehittämisen eri vaiheiden vaikutukset suohon arvioitiin mallintamalla Anglo Americanin suunnittelemaat kaivostoiminnan vaiheet maanalaisessa kaivoksessa ja tavat, joilla kaivostoiminnan vaiheet vaikuttavat pohjavesivirtaukseen. Pohjaveden mallintamisessa arvioitiin myös siirrosten rooli pohjavesivirtauksen hallinnassa ja niiden vaikutukset kohteen yläpuolella olevaan suohon.

Muuttumattomista (steady-state) ja hetkellisistä (transient) olosuhteista tehty manuaalinen ja automaattinen kalibrointi osoitti, että mitatut pohjaveden pinnat yhtyivät mallin laskemien ennustettujen pintojen kanssa



sillä tarkkuudella kuin vakio-ohjeistuksissa edellytetään (Hill 1998). Kalibraatioanalyysissa käytettiin lasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin asennettuja pohjaveden havaintoputkia sekä valikoituja paleoproterotsooiseen kallioperään asennettuja havaintoputkia. Siirrostien hydraulisia ominaisuuksia vaihtelemalla mallille saatiin vastaavuus, joka täytti mallintamisen ohjeistuksien edellyttämät vastaavuudet (Hill 1998) pohjaveden pinnankorkeudelle, tällöin pohjaruhje oli mallinnettu hyvin vettä läpäiseväksi ja pystysiirroksia huonosti vettä läpäiseviksi. Parametrivaihtelulla saatiin mallin laskema pohjaveden painetaso vastaamaan sitä, mikä luonnossa oli eri tyyppisissä havaintoputkissa havaittu.

Kalibroidun mallin avulla arvioitiin pohjaveden pinnan alenemaa ylimmässä kerroksessa, joka koostuu Viiankaavan turpeesta sekä suon alapuolella olevista lasiaalisten ja fluviaalisten sedimenteistä. Siirrostien vaikutuksia lasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien vedenpintaan sekä kallioperän vedenpintaan arvioitiin kolmen vaihtoehdoisen skenaarion osalta: siirroksille annettiin kalibroidut hydrauliset läpäisevyysarvot, siirroksille annettiin alhaisemmat hydrauliset läpäisevyydet ja siirroksille annettiin korkeammat hydrauliset läpäisevyydet. Mallintamistulokset osoittavat, että siirroksia voivat aiheuttaa alaspäin suuntautuvaa virtausta mallin ylemmistä lasiaalisista ja fluviaalisista kerroksista syvemmällä olevaan kallioperäkerrokseen riippuen mallissa käytetystä vedenläpäisevyydskertoimesta. Kalibroidun mallin avulla arvioitiin pohjaveden purkautumista suunniteltuun 5 kilometrin pituiseen vinotunneliin, josta on kulku maanalaisiin louhoksiin ja malmioon johtavien tuotantotunneleiden verkostoon. Louhinnan jälkeen louhitut alueet (louhintaperät ja louhokset) täytetään pastatäytöllä joten kyseisiä kaivoksen louhittuja osia ei mallinnettu. Kaivostäyttö vähentää avointa tilaa malmion louhittuissa osassa ja synnyttää kallioperää muistuttavia hydraulisia ominaisuuksia.

Pohjavesimallin avulla tehtiin arvio veden sisäänvirtauksesta kaivokseen sen arvioidun 22-vuotisen toiminnan ajalta. Kaivostoiminnan perusskenaariossa (vaihtoehto VE1A toteutettuna peruslievennystoimenpiteillä) sisäänvirtaus olisi noin 3 000 m³/vrk. Kaivostoiminnan perusskenaariossa Viiankaavan suon ja Natura 2000 -suojelualueen lasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien pohjavedenpinnan maksimialeneman arvioitiin olevan noin 0,5 metriä. Kaivoksen erityisten lievennystoimien skenaariorissa (vaihtoehto VE1A toteutettuna erityisillä lievennystoimenpiteillä), jossa 5 kilometrin pituinen vinotunneli ja infrastruktuuritunnelit injektoidaan, sisäänvirtaus on arviolta puolet perusskenaariossa määrästä ja maksimialenema noin 0,1 metriä. Suurin mitattava alenema sijoittuisi arviolta talvikuukausille ja mitattava alenema alkaisi aikaisin syksyllä, kun kevään lumen sulamisen vaikutus on päättynyt.

Pohjaveden palautuminen suon lasiaalisissa ja fluviaalisissa sedimenteissä kaivostoiminnan päätyttyä kestäisi vain vuoden johtuen lumen sulamisen aiheuttamasta suon tulvimisesta keväällä. Perusskenaariossa kallioperän pohjaveden palautuminen kestäisi noin 200 vuotta, ennen kuin vedenpinta lähestyisi kaivostoimintaa edeltävää tasoa. Pohjavedestä olisi palautunut yhdeksänkymmentäviisi prosenttia noin 80 vuotta kaivostoiminnan päättymisen jälkeen. Louhinnan jättämä tyhjä tila aiheuttaa sen, että kallioperän pohjavesi ei koskaan saavuta täysin ennen kaivostoiminnan aloittamista vallitsevaa vedenkorkeutta. Kallioperän pohjaveden palautuminen kestäisi kaivoksen erityisten lievennystoimien skenaariorissa huomattavasti kauemmin kuin kaivostoiminnan perusskenaariossa johtuen siirrostien injektioinnista. Pohjaveden palautumiseen kuluva ylimääräinen ajan arvioidaan olevan vähintään 50–100 vuotta.

Kaiken kaikkiaan suunnitellulla perusskenaariolla (vaihtoehto VE1A) on minimaaliset vaikutukset kohteen yläpuolella sijaitsevaan Viiankaavan suohon. Suon alla olevien lasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien maksimialenema on noin 0,5 metriä, minkä odotetaan ajoittuvan pääosin talvikuukausille. Pohjaveden sisäänvirtaus avolouhoksiin, 5 kilometrin pituiseen vinotunneliin sekä tuotantotunneleihin olisi keskimäärin 3 000 m³/vrk, mikä olisi helposti hallittavissa. Kaivoksen erityisten lievennystoimien skenaariorissa pohjaveden virtaus olisi noin 1 700 m³/vrk ja suon lasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien arvioitu maksimialenema vain 0,1 metriä, ja tämä sijoittuisi pääosin talvikuukausille.



Lyhenteet

2D	kaksiulotteinen
3D	kolmiulotteinen
°C	celsiusaste
mpy.	korkeus merenpinnan yläpuolella
BP	ennen nykyhetkeä
CLGB	Keski-Lapin vihreäkivivyöhyke
Asiakas	Anglo American Sakatti Mining Oy
cm	senttimetri
GTK	Geologian tutkimuskeskus
HST-allas	korkearikkisen rikastushiekan varastoallas
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli
km	kilometri
m/s	metriä sekunnissa
MDP	kaivoksen vedenpoistoallas
msl	keskimääräinen merenpinta
MWF	rikastushiekka-alue (Mine Waste Facility)
NRMSE	normalisoitu keskineliövirheen neliöjuuri
Sakatin hanke	Sakatin kupari-nikkeli-PGE-kulta-hanke
Ss	veden luovutuskyky (akviferin vesivarastosta poistuvan veden tilavuus pohjavedenpinnan alentumisen takia)
Stantec	Stantec Consulting, Ltd
Sy	ominaisantoisuus
suo	Viiankiaapa
TBM	tunnelipora
TI	lämpötilaindeksi
WRD	sivukiven sijoitusalue
WSP	veden varastoallas (Water Storage Pond))



Sanasto

Hydraulinen johtavuus	Verrannollisuuskertoimen, joka kuvaa veden virtaamisen nopeutta huokoisessa väliaineessa
Läpäisevyys	Termi, jota usein käytetään hydraulisen johtavuuden sijaan
Vedenpinta	Pohjavedenpintaa vastaava termi, rajoittamattomassa akviferissa oleva pohjavedenpinta
Pietsometrinen pinta	Pinta, jonka korkeudelle vesi nousee tiiviisti suljetussa kaivossa. Termi, joka viittaa suljetun akviferin pohjavedenpintaan tai painekorkeuteen
Varastokerroin	Pietsometrisen pinnan muutosta vastaava akviferista poistuvan tai siihen varastoituvan veden tilavuus pinta-alayksikköä kohti.
Ominaisantoisuus	Vedellä kyllästetystä maasta painovoiman vaikutuksesta poistuvan veden tilavuuden suhde kokonaistilavuuteen
Pohjaveden muodostuminen	Vesimäärän lisääntyminen pohjavesiesiintymässä (akviferissa) sateiden tai lumen sulamisen takia
Jyrkkä siirros/pystysierros	Normaalsierros, jolla on jyrkkä, usein yli 60 asteen kaltevuus
Ylityöntösiirros	Loiva-asentoinen siirros, joka syntyy yhden kallioperälohkon liikkumisesta (työntymisestä) toisen kallioperälohkon päälle
LEAPFROG	Ohjelmisto, jonka avulla digitaaliset geologiset kairauspöytäkirjat voidaan muuntaa geologisiksi mallikerroksiksi syötetyn tiedon perusteella
FEFLOW	Numeerinen pohjaveden elementtimallintamisohjelma, jonka vaihtelevan koon monikulmioruudukkojärjestelmä mahdollistaa pienten geologisten ominaisuuksien ja suotopintojen rajojen yksityiskohtaisen mallintamisen
MODFLOW	Äärelliseen erotukseen pohjautuva numeerinen pohjaveden mallintamisohjelma, joka käyttää tavallista suorakulmaista ruudukkojärjestelmää pohjavesivirtauksen mallintamiseen
Vihreäkivivyyhyke	Geologinen termi. Se viittaa alueisiin, joiden kallioperä koostuu emäksisistä (mafisista) tai ultramafisista (ultraemaaksista) kivilajeista, ja joissa on yleisesti vihreänsävyisiksi muuttuneita mineeraleja kuten kloriittia ja amfioleja.
Alenema	Vedenpinnan tai pietsometrisen pinnan aleneminen pohjaveden poistuman takia
Turve	Orgaaninen hiilipitoinen materiaali, joka koostuu pääosin kasvimateriaalin hajoamisesta syntyvästä aineksesta
Glasiaaliset sedimentit	Jäätikön liikkeen ja sulamisen yhteydessä kerrostuneita moreeneita, soria, hiekkoja ja hienojakoisia sedimenttejä.
Fluviaaliset sedimentit	Enimmäkseen purojen ja jokien virtauksen liikuttamaa hiekkaa, silttiä ja soraa



REPORT TITLE

Prekambrinen	Geologinen aikakausi, joka alkoi 4,5 miljardia vuotta sitten ja päättyi 540 miljoonaa vuotta sitten
Paleoproterotsooinen	Osa prekambrista aikakautta, joka oli 2,5–1,6 miljardia vuotta sitten
Pleistoseeninen	Geologinen aikakausi, joka alkoi 2,6 miljoonaa vuotta sitten ja päättyi noin 11 700 vuotta sitten
Diamiktoni	Glasiaalinen moreeni Heikosti tai ei ollenkaan lajittunut terrigeeninen sedimentti, joka koostuu siirtokivilohkareista, sorasta, hiekasta ja savesta. Luokitellaan yleensä jäätiköiden toiminnan synnyttämäksi
Huuhtoutuneet sedimentit	Sulavien ja vetäytyvien jäätiköiden eteen kulkeutuvaa ja kerrostuvaa hiekkaa, soraa ja savea
Suo	Suo- tai rämealue, jossa on usein turvetta



1.0 JOHDANTO

Stantec Consulting, Ltd (Stantec) toteutti Anglo American Sakatti Mining Oy:n (Asiakas) pyynnöstä mallinnuksen pohjavesivirtauksesta arvioidakseen suunnitellun maanalaisen kaivoksen vaikutuksia Viiankiaavan suohon (suo) sekä ympäröivään Natura 2000 -suojelualueeseen Sakatin Pohjois-Suomessa sijaitsevaa kupari-nikkeli-PGE-kulta-hanketta (Sakatin hanke) varten (**kuva 1-1**). Kyseinen työ oli osa hanketta numero 12765708690, josta Stantec ja Asiakas ovat allekirjoittaneet sopimuksen.

1.1 TAUSTA

Kaivoshankkeen kehittämisen ensimmäiset vaiheet, joissa keskitytään malminetsintään ja alustaviin kannattavuustutkimuksiin, antavat mahdollisuuden tutkia tulevan kaivoskohteen hydrogeologisia olosuhteita niiden luonnollisessa tilassa ennen kaivostoiminnan aloittamista. Näin voidaan saada etukäteistietoa seuraavista asioista: 1) käytettävissä olevat pohjavesivarannot; 2) mahdollisen vedenpoiston määrä maanalaisissa louhoksissa sekä 3) kaivostoimintaa edeltävä vedenpintojen korkeus ja -laatu. Tämä taustatieto on välttämätön vertailukohta ennakoitaessa kaivostoiminnan vaikutuksia. Pohja- ja pintaveden korkeuden ja laadun määrittäminen on tärkeää tulevia ympäristövaikutusten arviointeja varten, sillä tämän vertailuaineiston nojalla voidaan arvioida kaivoshankkeen vaikutuksia pohja- ja pintavesiin toiminnan aikana samoin kuin mahdollisia toiminnan tai kaivoksen sulkemisen aikana ja/tai jälkeen toteutettujen kontrolli- ja/tai kunnostustoimenpiteiden tehokkuutta. Suunniteltu Sakatin kaivos on maanalainen kaivos kupari-nikkeli-PGE-kulta-esiintymän hyödyntämiseksi Pohjois-Suomessa noin 25 kilometriä (km) Sodankylästä pohjoiseen. Kaivos on suunniteltu toteutettavaksi luonnontilaiselle alueelle.

Asiakas solmi Stantecin kanssa sopimuksen numeerisen pohjavesimallin tekemisestä, jolla olisi mahdollista havainnollistaa kaivostoiminnan vaikutukset pohjaveden pintoihin kohteen päällä sijaitsevalla Viiankiaavan suolla ja Natura 2000 -suojelualueella sekä arvioida pohjaveden sisäänvirtausta maanalaisiin kaivostiloihin toiminnan aikana. Stantec määrittä numeerisessa pohjavesimallissa pohjavesivirtauksen kannalta tärkeät pääarakenteet ja kivilajiyksiköt (litologiset yksiköt) niin tarkasti kuin mahdollista. Esimerkiksi suunnitellun kaivoksen läpäisevät jyrkkäkaateiset normaalsiirrokset mallinnettiin numeerisessa mallissa tarkasti hyödyntämällä alueelle kehitettyä geologista mallia, joka pohjautui malminetsinnällisiin kairausaineistoihin ja hydrogeologiseen testaukseen. Geologisessa mallissa käytetyn lähdeaineiston on toimittanut paleoproterotsooisien kallioperän osalta Asiakas (SRK 2019) ja Viiankiaavan suon glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttiyksiköiden osalta Åberg et al. (2017a, b).

1.2 TYÖN TAVOITTEET

Stantec toteutti numeeriset pohjaveden mallintamistutkimukset seuraavia tarkoituksia varten

1. Arvioidakseen suunnitellun maanalaisen kaivoksen mahdollisia pohjavesivaikutuksia, joiden perusteella on mahdollista arvioida vedenhallintaan tarvittavia toimenpiteitä.
2. Arvioidakseen Viiankiaavan suon ja Natura 2000 -suojelualueen glasiaalisissa ja fluviaalisissa sedimenteissä mallinnetut pohjaveden pinnan alenemat, joita suunniteltu kaivostoiminnan perusskenaario (vaihtoehto VE1A) ja erityisten lievennystoimien skenaario (vaihtoehto VE1A) toteutettuna erityisillä lievennystoimenpiteillä) saattavat aiheuttaa.



3. Arvioidakseen mahdollisia erityisiä lievennystoimia, joita Asiakas saattaa käyttää kaivostoiminnan aikana vähentääkseen veden sisäänvirtausta ja minimoidakseen mahdollisia alenemia kohteen päällä olevien glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien pohjavedessä.
4. Arvioidakseen pohjavesitason ennalleen palautumisen kestoa ja lopullista palautuneen pohjaveden korkeutta kaivostoiminnan päätyttyä sekä kaivostoiminnan perusskenaariossa että erityisten lievennystoimien skenaariossa (vaihtoehto VE1A).
5. Lisäksi Stantec toteutti kvalitatiivisen arvioinnin ilmastomuutoksen mahdollisista vaikutuksista pohjavedenpintaan Viiankiaavan suolla ja sen ympäristössä aina vuoteen 2100 asti arvioidakseen, miten ilmastomuutos vaikuttaa kaivostoiminnasta mahdollisesti aiheutuviin muutoksiin vedenpinnoissa.

1.3 TYÖN KATTAVUUS

Sakatin hanketta tehtiin numeerinen pohjavesimalli, joka kalibroitiin ja siitä tehtiin malliajot, joiden tarkoituksena oli arvioida suunnitellun maanalaisen kaivoksen kehittämisen vaikutuksia vedenpintaan Viiankiaavan suolla ja sen alapuolella. Tämä työ kattoi hankekohteen geologisen mallin ja numeerisen pohjavesimallin kehittämisen. Mallin kehittämisessä integroitiin Helsingin Yliopiston geologinen malli Viiankiaavan suosta (Åberg et al. 2017a, b) ja Åberg et al. (2019), glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä ja rapautuneesta/rikkonaisesta kallioperästä SRK:n (2019) geologiseen malliin ehjästä paleoproterotsooisesta kallioperästä ja kaivoksen louhoksista. Näiden kahden geologisen mallin integroinnin lisäksi tarkasteltiin Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) geologista ja geofysikaalista aineistoa hankealueesta ja sen lähialueista sekä Asiakkaan, Helsingin Yliopiston työntekijöiden ja GTK:n tuottamia raportteja. Lisäksi tarkasteltiin valikoituja verkossa saatavilla olevia akateemisia lopputöitä Sakatin mineraaliesiintymästä ja Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeestä, jotta prekambriksen kallioperän geologiasta ja rakenteellisista ominaisuuksista saataisiin kokonaisvaltaisempi ymmärrys. Alle on koottu yhteenvedo hankealueen geologisten ja numeeristen mallien rakentamisen vaiheista.

Yhdistetyn Leapfrog -mallin kehittäminen käyttäen seuraavia lähtöaineistoja ja menetelmiä:

SRK:n Leapfrog Geo -malliin sovelletun koordinaattijärjestelmän (KKJ) muuntaminen Helsingin Yliopiston Leapfrog Geo -mallin koordinaattijärjestelmän (EUREF-FIN) mukaiseksi.

SRK:n Leapfrog -mallin pääominaisuuksien erottaminen (esim. pystysiirokset ja pohjaruhje).

Rapautuneen kallioperän laajuuden ja ominaisuuksien vahvistaminen yhdessä Helsingin Yliopiston Leapfrog Geo -mallin kehittäneen mallintajan kanssa.

Helsingin Yliopiston Leapfrog Geo -mallin yhdistäminen SRK:n Leapfrog Geo -malliin prekambriksen kallioperän osalta ja yhdistetyn Leapfrog-mallin muuntaminen numeeriseksi FEFLOW-pohjavesimalliksi.

FEFLOW-pohjavesimallin kehittäminen:

Pohjaveden muodostumisnopeuksien määrittäminen suoalueelle Snowmelt Temperature Index -mallin avulla.

Numeerisen virtausmallin kalibrointi, jossa käytetään saatavilla olevia staattisia vedenpintoja steady-state-olosuhteissa.

Transientin virtausmallin kalibrointi tarkkailemalla vuosien 2017 ja 2019 saatavilla olevien jatkuvatoimisten pietsometrien vedenkorkeuksien vastaavuutta niin matalien glasiaalisten kuin fluviaalisten ja niiden alapuolella olevien kallioperän kerrosten osalta.



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

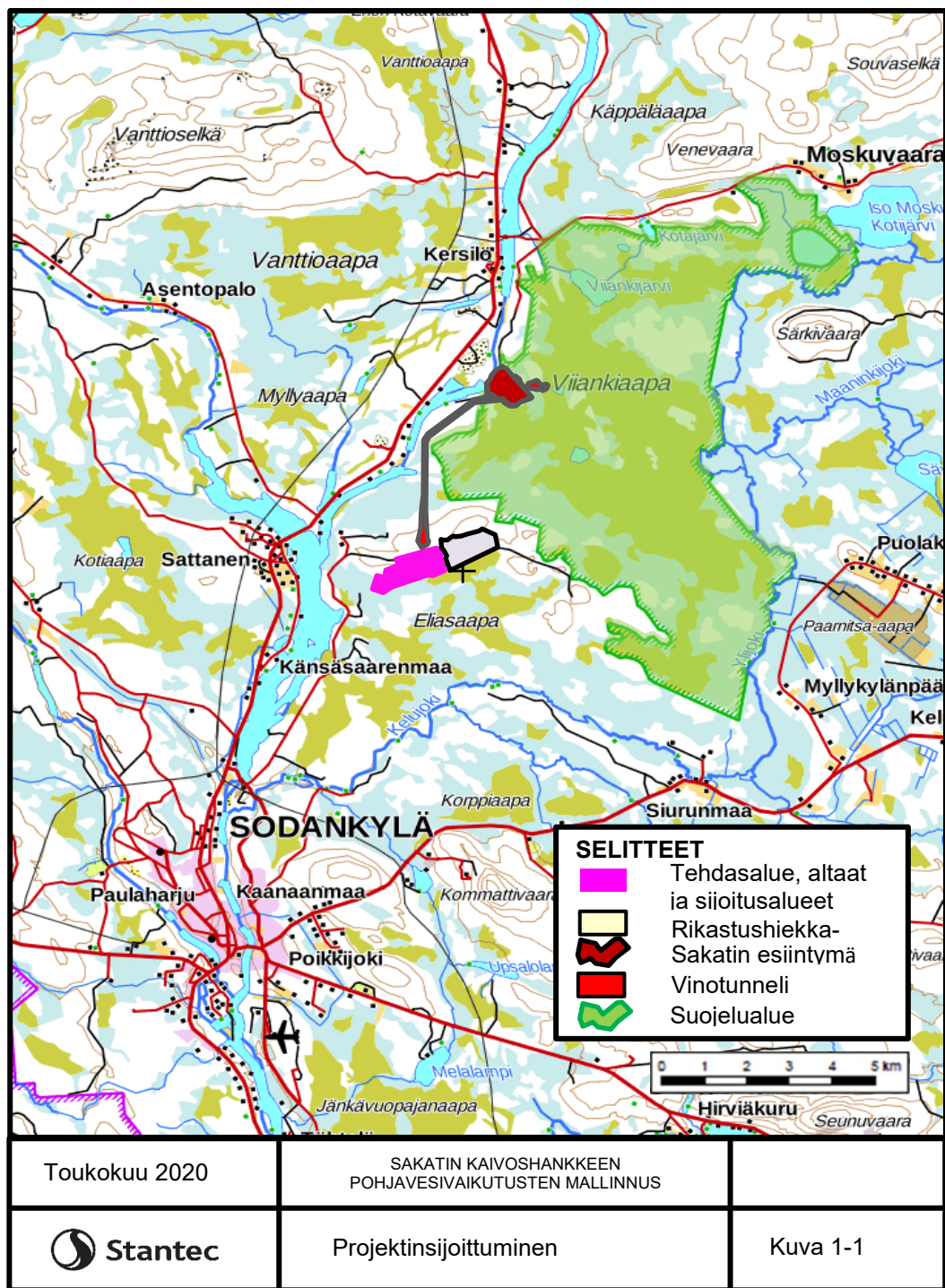
JOHDANTO

Vertailukohteena olevan FEFLOW-mallin vahvistaminen, jotta voidaan arvioida kaivoksen perusskenaarion (vaihtoehto VE1A) ja sen toiminnan vaikutukset pohjavesisysteemiin sekä Sakatin kohteen vaikutuspiirissä olevaan suoalueeseen.

Maanalaisen kaivoksen suunnitellun toiminnan kuvaaminen FEFLOW-mallia varten Shapefile- ja DWG-tiedostoina.

Mallisimulaatiot, joiden avulla arvioidaan pohjaveden sisäänvirtausta maanalaisiin kaivostiloihin ja maanalaisen kaivoksen kuivanapitopumppauksen vaikutuksia paikallisen kallioperän pohjavesijärjestelmään, glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien pohjavesijärjestelmään, suohon ja Kitisen jokeen.





Kuva 1-1 Projektin sijoittuminen kartalla.



2.0 KUVAUS SAKATIN TUTKIMUKSISTA JA AINEISTOSTA

Sakatin kaivoshanke ja sen yläpuolella sijaitseva Viiankiaavan suo on saanut paljon huomiota suon luontoarvojen suojelun sekä Anglo Americanin suon alta löytämän poikkeuksellisen merkittävän mineraaliesiintymän takia. Helsingin Yliopiston tutkijaryhmä, johon on kuulunut henkilökuntaa, tutkijoita ja opiskelijoita, ovat useiden vuosien ajan tutkineet suota sekä glasiaalisia ja fluviaalisia maaperäkerrostumia Kitisen joen varrella, jotta maaperäkerrostumien ominaisuuksista, alkuperästä ja suhteesta suon biologiaan ja hydrologiaan olisi tarvittava perustietämys. Anglo American on kairannut malminetsinnössään yli 270 kairareikää Sakatin hankealueen mineralisoituneeseen kallioperään ja kehittänyt niiden pohjalta alueesta geologisen mallin. Golder Associates Ltd (2015), SRK Consulting (UK) Ltd (2019) ja Helsingin Yliopisto (Salonen ym. 2015; Åberg ym. 2017a, b, Åberg ym. 2019) ovat tehneet glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien sekä niiden alla olevan paleoproterotsooisien kallioperän mallinnuksia ja suorittaneet akviferien testausta. Tässä kappaleessa kuvataan lyhyesti tutkimusten keskeiset vaiheet sekä Sakatin hankkeesta kerätty aineisto numeerisen FEFLOW-virtausmallin kehittämisen kannalta oleellisilta osin.

2.1 HELSINGIN YLIOPISTON TUTKIMUKSET

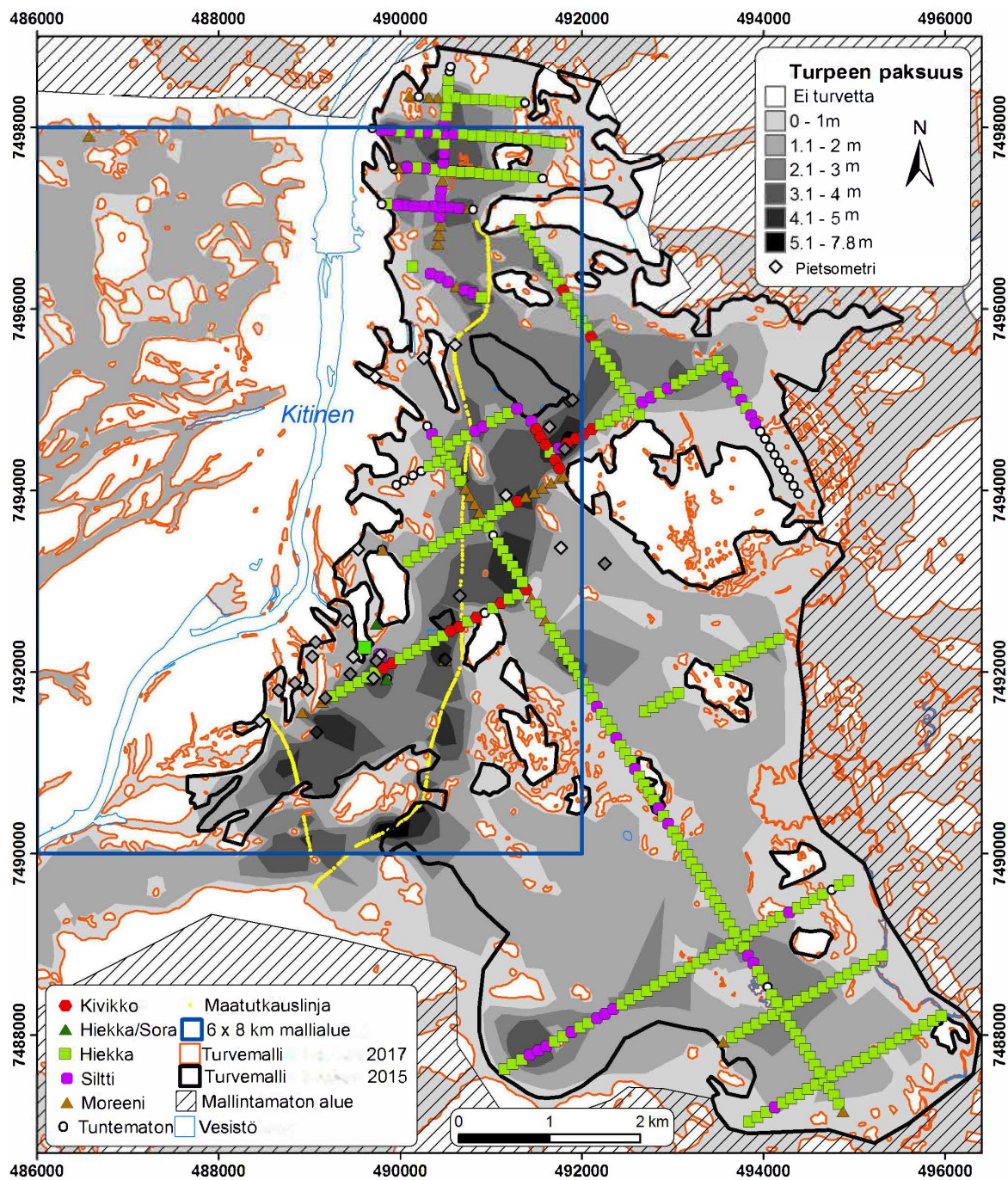
Helsingin Yliopisto on toteuttanut monta erinomaista ja hyödyllistä tutkimusta Sakatin hankealueella olevista glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä ja työt alueella jatkuvat tälläkin hetkellä. SRK (2019) luettelee ison osan näistä tutkimuksista. Muutama hankealueen kannalta keskeisistä tutkimuksista, jotka kuvataan tässä osiossa ovat: 1) Salonen ym. (2015); 2) Lahtinen (2017); 3) Åberg ym. (2017a); 4) Åberg ym. (2017b); 5) Korkka-Niemi ym. (2017) ja 6) Åberg ym. (2019).

2.1.1 VIIANKIAAVAN SUO

Viiankiaavan suoalueen laajuutta ja turpeen paksuutta on arvioitu turvekairauksin ja muilla kenttätutkimuksilla, jotka ulottuvat 1960- ja 1970-luvulle, jolloin GTK toteutti turvetutkimuksia (Lappalainen ja Pajunen 1982). Kyseinen tutkimus kattoi 402 turvekairausta 44 kilometrin pituisella profiililla. Lappalainen esitti väitöskirjassaan (1970) Viiankiaavalta 311 turvekairausprofiilia ja tarkasteli Kitisen joen tulvimisen vaikutusta suon kehittymiseen.

Kuva 2-1, joka on Helsingin Yliopiston tutkijoiden koostama (Korkka-Niemi ym. 2017), kuvaa turpeen paksuuden alueellista vaihtelua Viiankiaavan suolla ja sen lähialueilla. Turpeen keskimääräinen paksuus on noin 2,3 metriä mutta voi ylittää 5,0 metriä niissä kohdissa, joissa alla olevissa glasiaalisissa ja fluviaalisissa sedimenteissä on painanteita. Helsingin Yliopiston toteuttaman radiometrisen ajoituksen (Salonen ym. 2015) mukaan soistuminen (turpeen muodostuminen) on alkanut 9 735 – 10 155 vuotta sitten (ennen nykyhetkeä, BP). Turpeen tuhkapitoisuus oli aluksi korkea, mikä viittaa Kitisen joen tulvimisen olennaiseen rooliin sedimentin kuljettamisessa suolle. Turpeen tiiviys kasvaa syvemmälle mentäessä ja toimii paikallisesti osittaisena tiivisteenä alla oleville glasiaalisille ja fluviaalisille sedimenteille. Turpeen vesi on käytännössä salpavettä, ja turpeessa on huokosvettä sen sijaan, että se toimisi akviferina.





Kuva 2-1 Turpeen paksuusmalli ja maaperä turpeen alla Viiankaaavan suolla.



2.1.2 GLASIAALISET JA FLUVIAALISET SEDIMENTIT

Helsingin Yliopiston tutkijat ja opiskelijat ovat tutkineet glasiaalisia moreeneja, jokisuiston kerrostumia ja interglasiaalisia fluviaalisia sedimenttejä (glasiaaliset ja fluviaaliset sedimentit) yksityiskohtaisesti tarkastelemalla maaleikkauksia soranottoalueilta, maakairausaineistoja, maatutkaluotausten tuloksia sekä kemiallisia ja isotooppikemiallisia tutkimustuloksia. Kyseisten tutkimusten perusteella on saatu monipuolinen käsitys maaperän kerrosjärjestyksestä ja voitu luoda kolmiulotteinen geologinen malli glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä Leapfrog Geo -mallin (Aranz Geo 2019) avulla. Tässä osiossa kuvatut tärkeät tutkimukset ovat toteuttaneet Åberg ym. (2017a, b), Åberg ym. (2019), Korkka-Niemi ym. (2017) ja Salonen ym. (2015).

Sakatin mineraaliesiintymän sisältävän paleoproterotsooisien kallioperän päällä olevat glasiaaliset ja fluviaaliset sedimentit koostuvat kolmesta moreeniyksiköstä, jotka edustavat kolmea eri jäätiköiden etenemisen aikakautta ja neljää kerrostumien välistä glasiaalista huuhtoutunutta ja/tai fluviaalista hiekka- ja sorayksikköä. Kallioperän topografia määrittää maaperäyksiköiden paksuuden jakautumista, niin että kaikki yksiköt ovat huomattavasti paksumpia niillä alueilla, joissa on interglasiaalisen rapautumisen aiheuttamia painanteita. Glasiaaliset moreenit on rinnastettu Veiksel-jääkaudelle (Salonen ym. 2015), ja vanhimmat Sakatin hankealueelta tunnistetut glasiaaliset sedimentit on ajoitettu 67 000 – 79 000 vuoden taakse (ennen nykyhetkeä, BP) (alempi moreeni). Ylimmät fluviaaliset huuhtoutuneet hiekat ja sora (päällimmäiset esiintymät) on ajoitettu 11 000 – 21 000 vuoden ikäisiksi.

Glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä havaittu maaperäyksiköiden monimuotoisuus näkyy kahdesta sedimenttileikkauksesta, jotka on dokumentoitu Sakatin alueella olevasta kahdesta Kitisen joen läntisellä puolella sijaitsevasta sorakuopasta (Salonen ym. 2015). Nämä kaksi stratigrafista leikkausta esitellään profiileina **Kuvassa 2-2** ja kuvataan alla:

Profiili TS1-2015 on Sodankylän Soran operoiman suuren sorakuopan luoteiselta puolelta. Tutkittu leikkaus on 6 metrin paksuinen ja siinä näkyvät seuraavat glasiaaliset ja fluviaaliset maaperäyksiköt:

Yksikkö 1: Yksikkö on silttinen ja hyvin tiivis diamiktoni (glasiaalinen moreeni), jossa on satunnaisia suuria siirtolohkareita. Kaivinkone ei yltänyt yksikön pohjaan, ja pohjavedenpinta on yksikön yläreunan tasolla.

Yksikkö 2: Yksikkö on 1,6 metrin paksuinen ja koostuu bimodaalisesta massiivisesta sorasta ja hiekasta. Yksikkö ohenee ylöspäin ja sisältää kerroksen, jossa on pohjavedestä saostunutta rautaa.

Yksikkö 3: Yksikkö on huonosti lajittunut diamiktoni, joka koostuu hienon hiekan ja suurten lohkaroiden yhdistelmästä. Sisältää satunnaisia hiekkalinssejä ja -kerroksia.

Yksikkö 4: Yksikkö koostuu hyvin lajittuneista ja heikosti vaakakerroksellista karkearakeisista sorista. Yksikkö sisältää paksun sorakerroksen, joka muuttuu yläpuolella kaukalaristikerrokselliseksi hiekaksi.

Yksikkö 5: Hiekkainen löyhä diamiktoni, joka vaihtuu asteittain alla oleviin hiekkoihin. Massiivinen yksikkö, jota tukee hajanaisista klasteista koostuva hiekkainen matriisi.

Yksikkö 6: Päällimmäinen yksikkö koostuu huonosti lajittuneesta sorasta, jonka pinnalla on maannos.



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

KUVAUS SAKATIN TUTKIMUKSISTA JA AINEISTOSTA

Yksikkö 4: Yksikkö koostuu vuorottain esiintyvistä paksuista hiekka- ja sorakerroksista. Ylimmät 10 senttimetriä (cm) muodostavat kiilamaisen, huonosti lajittuneen diamiktonin.

Yksikkö 5: 1,6 metrin paksuinen hiekkayksikkö, joka sisältää vaakasuoria aaltoilevia kerroksia ja vuorottain esiintyviä hienosta hiekasta ja keskihiekasta koostuvia kerroksia. Kerrosten paksuus kasvoi ylöspäin. Aaltoristilaminaatiota havaittavissa paikoittain.

Yksikkö 6: Yksikkö on diamiktoni, jossa on kulmikkaita klasteja.

Yksikkö 7: Pikkukivistä koostuva sora, jossa on vahva limitys.

Yksikkö 8: Yksikkö on 60 senttimetriä paksu hiekkainen, löyhä diamiktoni, joka vaihtuu asteittain/injektion myötä alla oleviin soraesiintymiin. Yksikkö on massiivinen, ja siinä on hiekkainen matriisi ja satunnaisia klasteja.

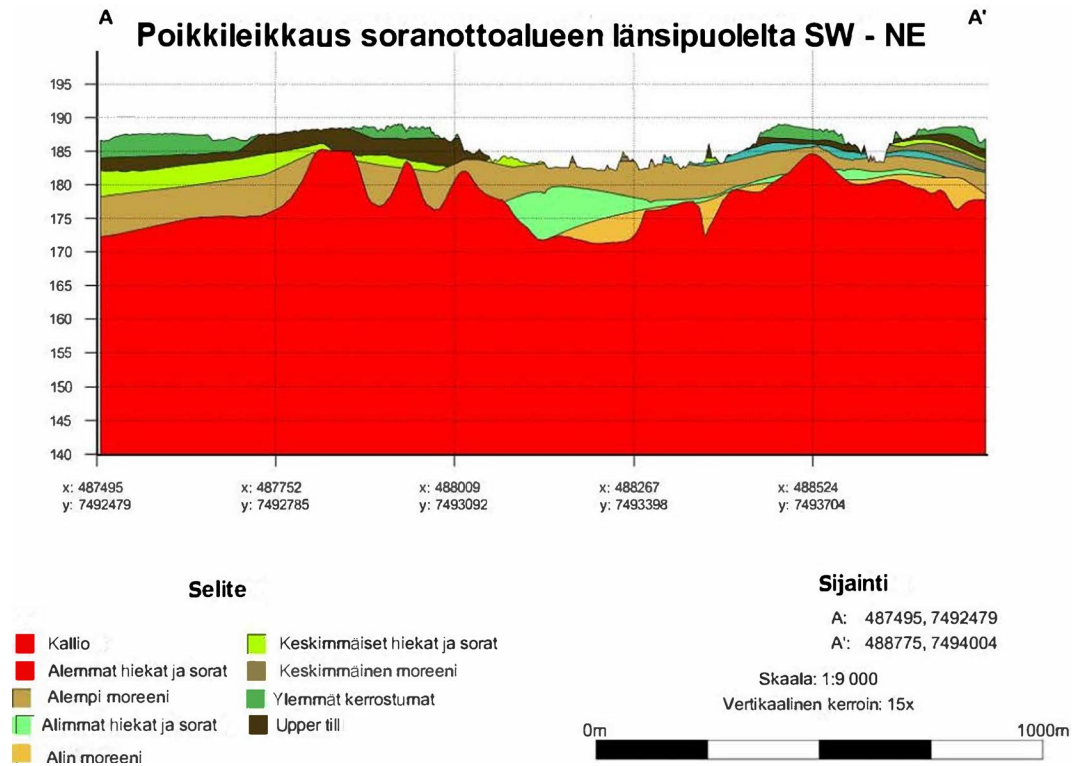
Yksikkö 9: Yksikkö on massiivista soraa.

Salonen ym. (2015) hyödynsivät sorakuopista ja kairauksista saatua aineistoa kehittäessään maaperämallin Sakatin aluetta ja Viiankaaavan suota dominoivista glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä. Mallin yksiköt on esitetty alla ylhäältä alaspäin pohjakerroksiin:

- Turve
- Huuhtoutuneet hiekat ja sorat (päällimmäiset kerrostumat)
- Ylempi moreeni
- Keskimmäiset hiekat ja sorat
- Keskimäinen moreeni
- Alemmat hiekat ja sorat
- Alempi moreeni
- Alimmat hiekat ja sorat
- Rapautunut kallioperä

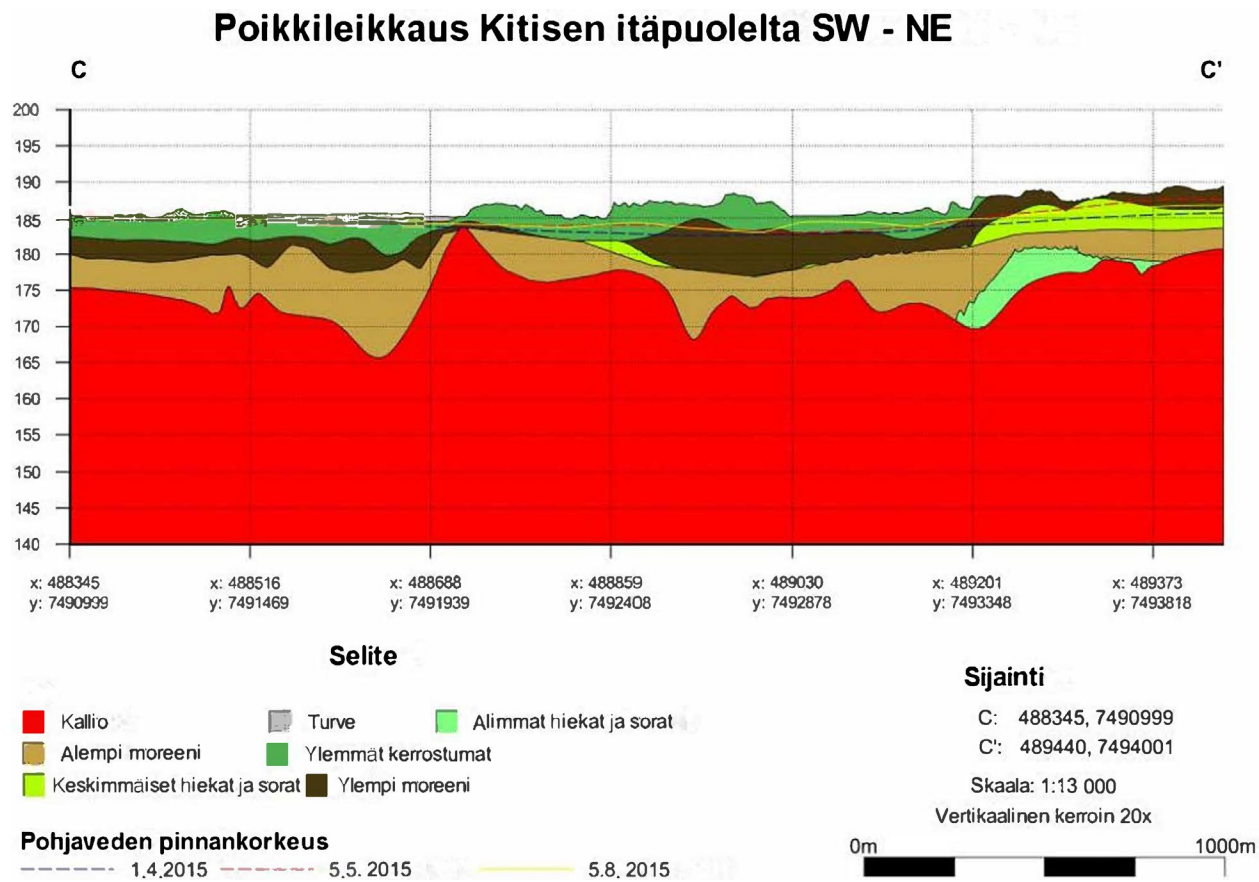
Nämä sedimenttiyksiköt kuvataan **Kuvassa 2-3** sekä **Kuvassa 2-5**. Kuten kyseisten kuvien poikkileikkaukset osoittavat, glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien yksiköt ovat kerrostuneet toistensa suhteen monimutkaisella tavalla, ja yksiköt saattavat katketa säännöllisesti, kun taas jotkut yksiköt rajoittuvat rapautuneessa kallioperässä oleviin painanteisiin. Alempi moreeni, ylempi moreeni ja päällimmäiset esiintymät ovat muita jatkuvampia sedimenttiyksiköitä. Keski- ja alemmien lajittuneiden esiintymien hiekat ja sorat ovat vähemmän jatkuvia ja usein suippenevat ulospäin yhteen tai useampaan suuntaan. Glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien yksiköiden stratigrafian monimutkaisuus saatiin mallinnettua kolmiulotteisella Helsingin Yliopiston kehittämällä (Korkka-Niemi ym. 2015, Åberg ym. 2019) Leapfrog-mallilla. Leapfrog-malli muodostaa pohjan glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien kokonaisuudelle Stantecin numeerisessa FEFLOW-virtausmallissa.





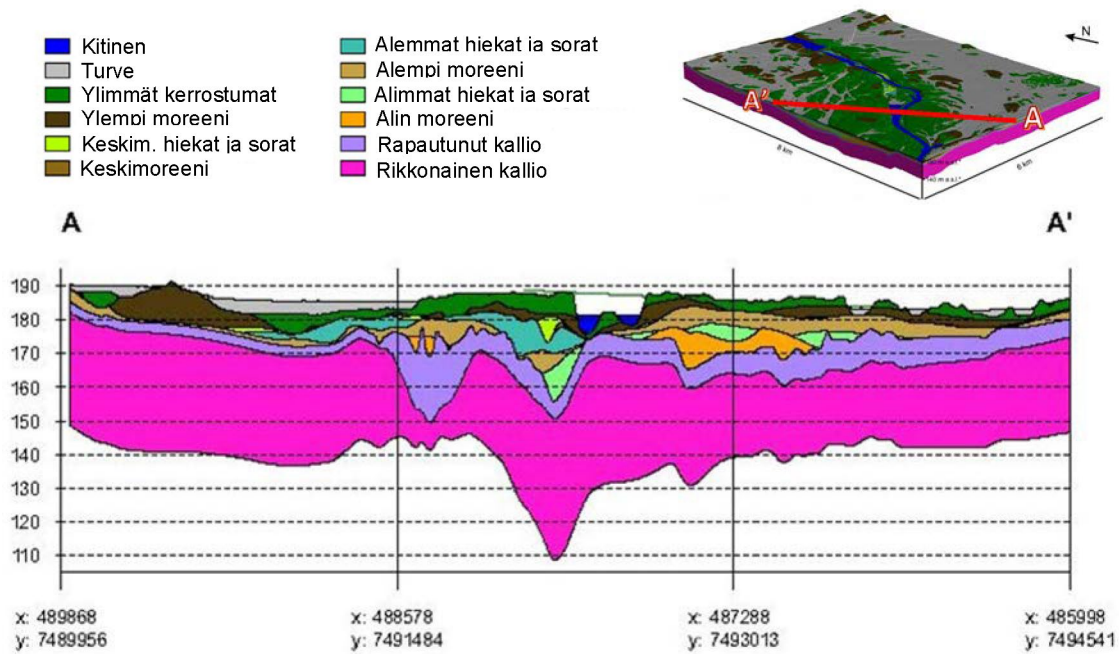
Kuva 2-3 Geologinen poikkileikkaus jäätikkö- ja jokisyntyisiin maaperäkerrostumiin Kitisen länsipuolella olevan Kärvasniemen leikkauksen alueella.





Kuva 2-4 Geologinen poikkileikkaus Kitisen itärannan glasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin

KUVAUS SAKATIN TUTKIMUKSISTA JA AINEISTOSTA



Kuva 2-5 Itä-länsi-suuntainen poikkileikkaus Viiankiaavalta Sahankankaalle A–A'.



2.2 SAKATIN KALLIOPERÄN GEOLOGINEN MALLI

2.2.1 Keski-Lapin vihreäkivivyöhyke

Sakatin mineraaliesiintymä sijaitsee Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeellä (CLGB) Pohjois-Suomessa. **Kuva 2-6** (Törmänen ja Karinen 2016), esittelee CLGB:n geologiaa Sakatin esiintymän läheisyydessä. CLGB sisältää useita kultaesiintymiä, joista Pahtavaarassa, Saattoporassa ja Suurikuusikossa on louhittu kultaa. Viimemainittu esiintymä on edelleen tuotannossa (Ojala 2007). Sakatin esiintymä ja Kevitsan kaivos ovat CLGB:n kaksi perusmetallien kehitys- ja tuotantovaiheessa olevaa merkittävää esiintymää, ja molemmat ovat Ni-Cu-PGE-esiintymiä. CLGB koostuu vulkaanisista sedimenteistä, jotka ovat peräisin ajanjaksolta suunnilleen 2,44–1,88 Ga (gigavuotta eli miljardia vuotta) sitten. Mafinen magmakivi dominoi CLGB:tä ja on selkeästi havaittavissa monessa intrusiivisessa vaiheessa, joista vanhimmat ovat ajalta 2,44 Ga peräisin olevat kerrostuneet intruusioiden Koitelaisessa ja Akanvaarassa (**kuva 2-6**). Differentioituneiden mafisten kerrosjuonien lohko tunkeutui CLGB:n eteläiseen osaan noin 2,2 Ga (Tormanen ja Karinen 2016). Viimeinen CLGB:n huomattava intrusiivinen vaihe tapahtui noin 2,05–2,0 Ga sitten ja koostui Kevitsan tyyppisistä kerrosintruusioista ja kerrosjuonista sekä gabro-luokan intruusioista ja juonista. Tällä hetkellä ainoat tunnetut magmaattiset Ni-Cu-PGE-esiintymät sijaitsevat Kevitsan intruusiolla ajalta 2,05 Ga ja pienialaisissa ultramafiiteissa, kuten esimerkiksi Sakatin esiintymässä löydettyissä intruusioissa.

2.2.2 Sakatin mineraaliesiintymä

Sakatin Cu-Ni-PGE-Au-esiintymä sijaitsee paleoproterotsooisella CLGB-vyöhykkeellä (**kuva 2-6**) Pohjois-Suomessa noin 150 km päässä Pohjoisesta Napapiiristä. Esiintymän löysi Anglo American vuonna 2009. Kolme mineralisoitunutta ultramafista osaa muodostavat pääesiintymän sekä luoteisen ja koillisen esiintymän. Päämalmivyöhyke muodostaa epäsäännöllisen 200–400 metrin levyisen, luoteeseen kaartuvan putkimaisen ultramafisen osan, jonka mitattu syvyys on noin 1 200 metriä (Brownscombe ym. 2015). Ultramafinen yksikkö koostuu serpentiiniytyneestä peridotiitista ja duniitista. Alueellisesti ultramafisia osia ympäröivät Sodankylän ryhmän kvartsiitit ja Savukosken ryhmän peliittiset metasedimentit. Nämä osoittavat esiintymän olevan nuorempi kuin 2,06 Ga. Ultramafista osaa lähimpänä oleva sivukivi on hienojakoinen afaniittinen yksikkö, jonka arvellaan olevan vulkaanista ja mahdollisesti komatiitti-pikriittiä. Esiintymän lounainen osa sisältää mafista vulkaanista ainesta, skapoliittiliuskeita ja gabrojuonia (Brownscombe ym. 2015). Stratigrafisesti ylöspäin katsottuna afaniittisia sivukiviyksiköitä ja mafista lohkoa seuraavat 100–300 metrin paksuinen muuttunut polymikkinen hematiitti-karbonaatti-albiitti-talkki-breksiayksikkö. Sivukivisekvenssin ylimmässä osassa on 600 metrin paksuinen fylliittinen yksikkö (Brownscombe ym. 2015).

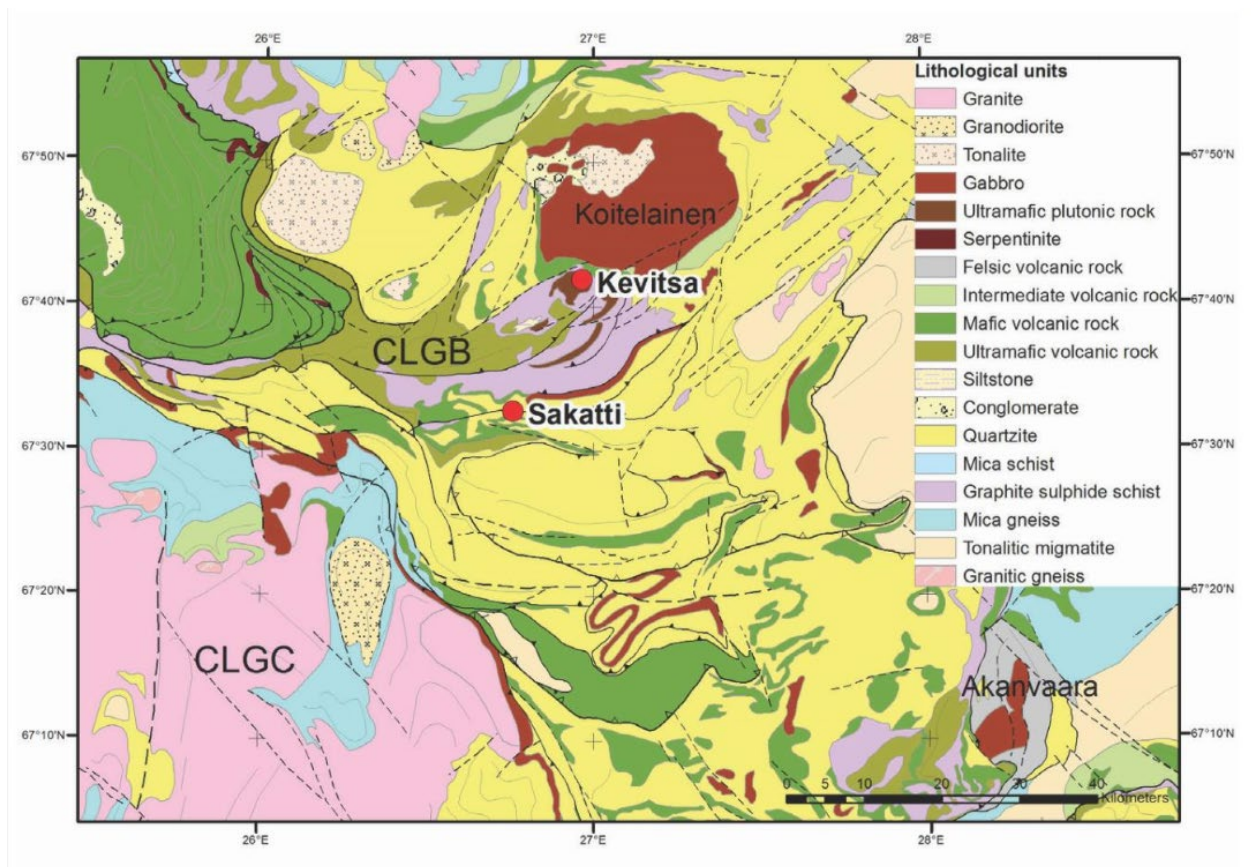
Yksityiskohtaisemmin tarkasteltuna Sakatin esiintymä on rakenteellisesti kompleksinen, mikä vaikuttaa pohjaveden liikkumiseen Sakatin esiintymää ympäröivässä kallioperässä. **Kuvassa 2-7** esitellään tarkemmin Sakatin esiintymää ympäröivän alueen geologiaa (Luukas 2017). Kola-orogeenin aikainen pohjoiseen ja etelään suuntautunut puristustyöntö johti mineralisoituneen alueen kohoamiseen, etelään päin suuntautuneeseen työntösiirrokseen ja myloniittisten hirtovyöhykkeiden syntymiseen suoraan kasautuneen pääkivimassan ala- ja yläpuolelle (Luukas 2017). Toinen noin 1,77 Ga ajoittunut rakenteellinen tapahtuma synnytti hauraita luoteis-kaakkois-suuntaisia siirroksia, jotka johtivat aikaisempien rakenteiden deformaatioon.

Alimman hirtovyöhykkeen on tulkittu olevan osa kolmea ylityöntösiirrosta, joihin viitataan ”pohjaruhjeena”, kuten **kuvassa 2-8** (Luukas 2017). Pohjaruhje koostuu sora- ja siirrosbreksiasta, jossa kairausolosuhteet ovat haastavat, minkä takia valtaosa syvistä kairausrei’istä päättyy pohjaruhjeeseen. Malminetsinnän yhteydessä ylityöntösiirroksen läpäisseet kairaukset ovat paljastaneet suurimmillaan noin 90 metrin paksuisen rakenteellisen vyöhykkeen, jossa on yhtämittaisesti rikkoutunutta kalliota. Myloniittiset

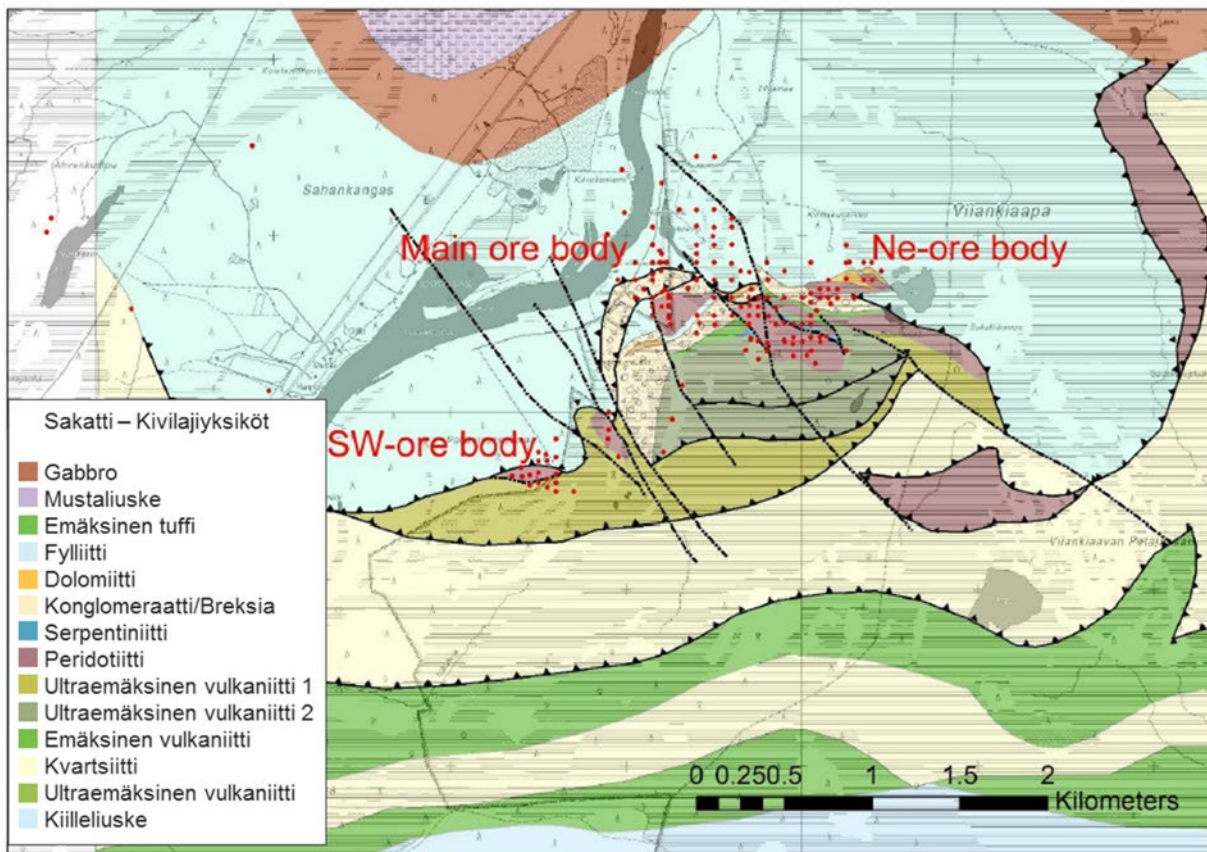
KUVAUS SAKATIN TUTKIMUKSISTA JA AINEISTOSTA

hietovyöhykkeet ja luoteis-kaakkois-suuntaiset hauraat jyrkät siirrokset ovat tyypillisempiä siirroksissa ja hierroissa, ja voivat olla muutaman metrin levyisiä ja sisältää paikallisia hajonnutta kalliota sisältäviä vyöhykkeitä. Pohjan ylityönnön kaade muuttuu pääosin loivemmaksi ylöspäin mentäessä. Luoteis-kaakkois-suuntaiset hauraat pystysiirrokset yltävät kallioperän ylemmän kerrokseen mutta eivät läpäise yllä olevia glasiaalisia ja fluviaalisia sedimenttejä.





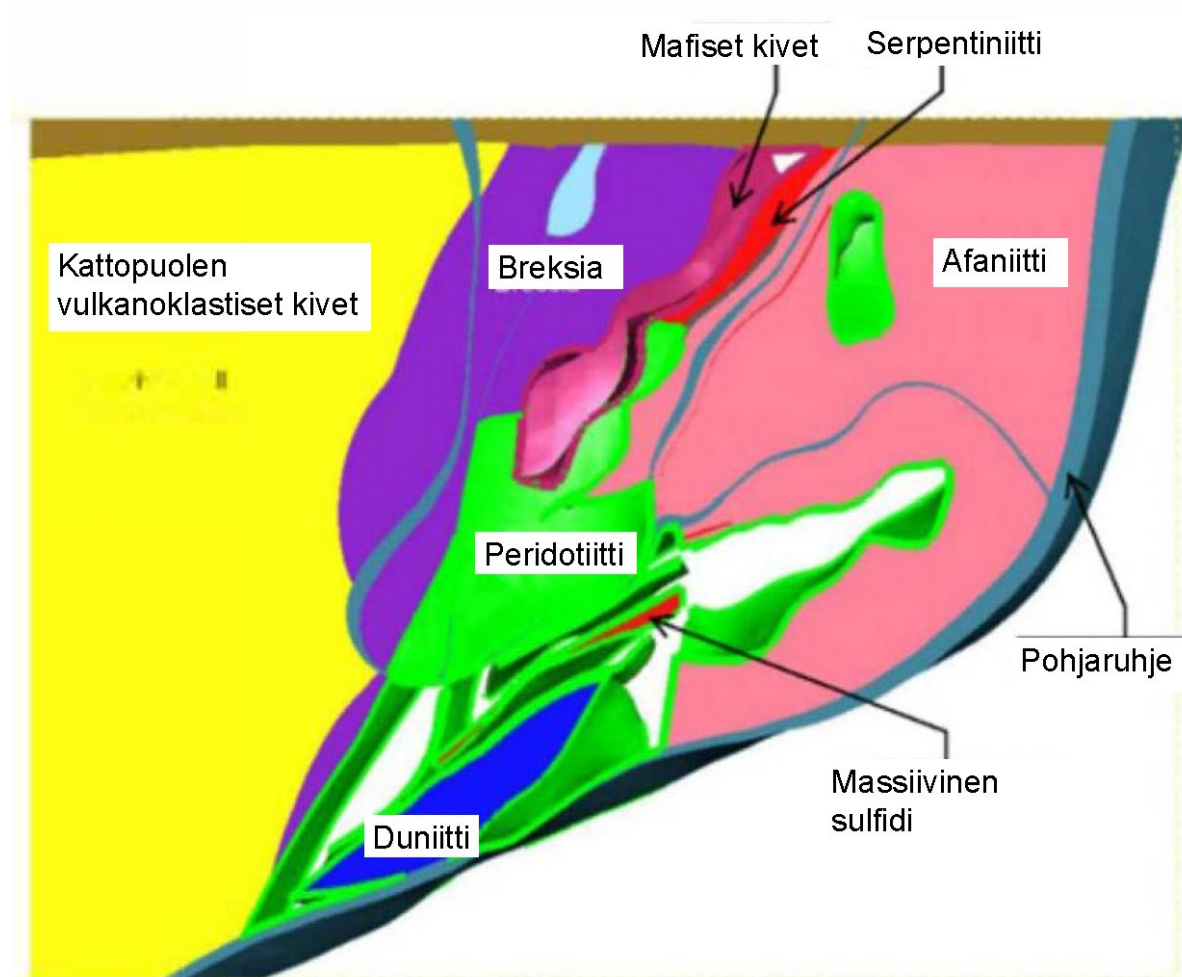
Kuva 2-6 Keski-Lapin vihreäkivivyöhyke (CLGB).



(Luukas 2017)

Kuva 2-7 Sakatti-projektin alueen geologinen kartta





Kuva 2-8 Poikkileikkaus Sakatin mineraaliesiintymän kallioperän pääyksiköihin.

SRK:n suorittamat hydrogeologiset tutkimukset (2019) ovat osoittaneet, että paleoproterotsooisen kallioperän rikkoutuneisuus vähenee voimakkaasti syvyyden myötä. Kallioperän ylemmät 200 metriä koostuvat rapautuneesta ja rikkoutuneesta kalliosta, ja rakotiheys sekä vedenjohtavuus vähenevät huomattavasti yli 50 metrin syvyydessä. Täten rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän ylemmät 50 metriä ovat suhteellisen hyvin vettä läpäiseviä korkeasta rakotiheydestä johtuen. Rapautuneen ja rikkoutuneen kallionvyöhykkeen alemmat 150 metriä ovat huomattavasti vähemmän vettä läpäiseviä. Kun luoteis-kaakkois-suuntaiset pystysiirokset tunkeutuvat ylemmän rapautuneen ja murtuneen kallioperän alla olevaan ehjään, muuttumattomaan kallioperään, kyseisten siirrostien läpäisevyys on alhaisempi kuin paleoproterotsooisen kallioperän ylemmästä rapautuneesta ja rikkoutuneesta vyöhykkeestä olevissa siirrostien osioissa.

2.2.3 Sakatin kallioperän geologinen malli

Sakatin esiintymästä tehty geologinen malli, joka perustuu Asiakkaan malminetsintäkairauksiin, Brownscomben ym. tekemään työhön (2015), Luukaksen rakenneanalyysiin (2017) ja SRK:n tekemiin hydrogeologisiin testaustutkimuksiin, voidaan tiivistää seuraavasti:

1. Mineraaliesiintymä on ultramafisesta ja mafisesta esiintymästä koostuva kompleksi, joka koostuu peridotiitista, duniitista, breksioista ja afaniittisista laavoista, jotka ovat muuttuneet ja sittemmin työntyneet etelän suuntaan.
2. Malmin päävyöhykkeet sijaitsevat pohjaruhjeen kattopuolella (**kuva 2-7**)
3. Mineraaliesiintymän lävistävät mineralisoitumisen jälkeiset pystysuorat ja jyrkät normaalisiirrokset, jotka ovat hauraita ja enimmäkseen luoteis-kaakkois-suuntaisia.
4. Ylemmät 200 metriä Sakatin esiintymän sisältävästä paleoproterotsooisesta kallioperästä on rapautunutta ja rikkoutunutta, missä ylemmässä 50 metrissä rakotiheys vaihtelee kohtalaisesta korkeaan rakotihyteen. Rakotiheys ja läpäisevyys pienenevät nopeasti ylimmän rikkonaisen kallion alapuolella olevalla 150 metrin osuudella.
5. Mineraaliesiintymän sisältävässä muuttumattomassa ehjässä kallioperässä on alhainen rakotiheys ja täten myös alhainen läpäisevyys pohjavesivirtaukselle.
6. Luoteis-kaakkois-suuntaiset pystysuorat ja jyrkät siirrokset ovat mineralisoitumisen jälkeen syntyneitä ja alkuperältään myös pohjaruhjeen syntyä myöhäisempiä. Niiden esiintyminen tarjoaa pohjavedelle virtausreitin ehjässä muuttumattomassa kallioperässä.



2.3 AKVIFERITESTIT JA POHJAVEDEN SEURANTA-AINEISTO

SRK on koonnut Sakatin hankkeen hydrologiaan ja hydrogeologiaan liittyvää aineistoa (2018, 2019). Tämä osio sisältää yhteenvedon tästä aineistosta, joka on olennainen Stantecin hankealueesta kehittämän numeerisen pohjavesimallin sekä suunnitellun kaivostoiminnan mahdollisten vaikutusten arvioinnin kannalta.

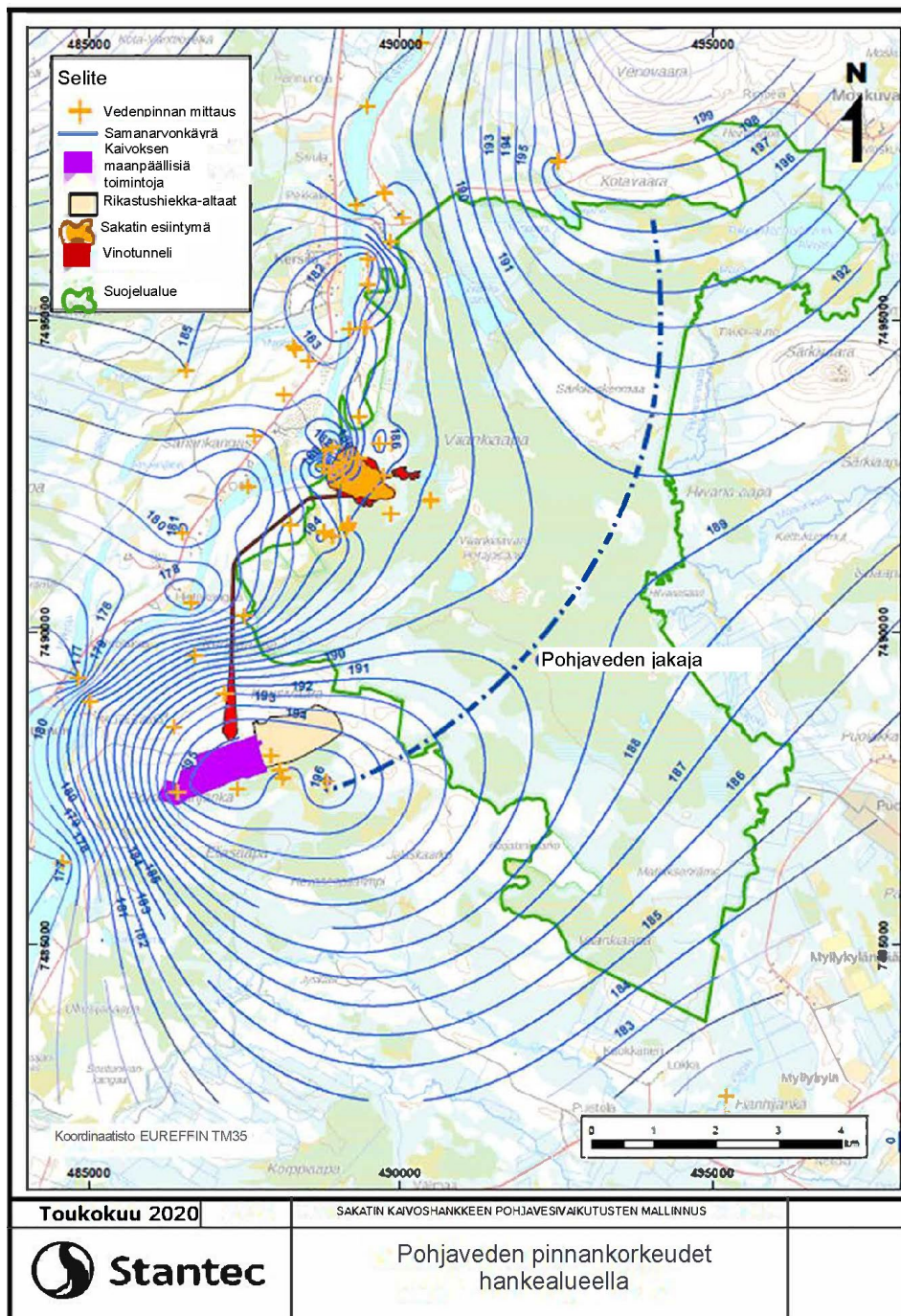
2.3.1 POHJAVEDEN PINNAN SEURANTA-AINEISTO

2.3.1.1 GLASIAALISTEN JA FLUVIAALISTEN SEDIMENTTIEN MATALA AKVIFERI

Glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien pohjavedenpintaan sekä paleoproterotsooiseen kallioperään liittyvä seuranta-aineisto (2012–2019) on peräisin Golder Associates Ltd:n (2012), SRK:n (2016–2018) sekä Asiakkaan (2019–2020) asentamista havaintokaivoista. Maaperän pohjaveden seuranta-aineisto on runsaasti, ja pohjavedenpintoihin liittyvä aineisto kuvataan kartassa, joka osoittaa maaperän vedenpinta-aineiston samanarvokäyrästä (kuva 2-9). Maaperän pohjavedenpinta vaihtelee kausittaisesti, siten että vedenpinta nousee kevättulvan ja lumen sulamisen myötä ja laskee kesällä ja syksyllä kasveista peräisin olevan haihtumisen ja haihdunnan myötä. Talvikuukausien aikana pohjavedenpinta on suhteellisen vakaa suon jäätyamisen takia. Kuva 2-10 kuvaa pohjavedenpinnan kausivaihtelua suoalueella verrattuna kohtisuoraan etäisyyteen Kitisen joesta. (Åberg ym. 2019).

2.3.1.2 KALLIOPERÄN VEDENPINTA

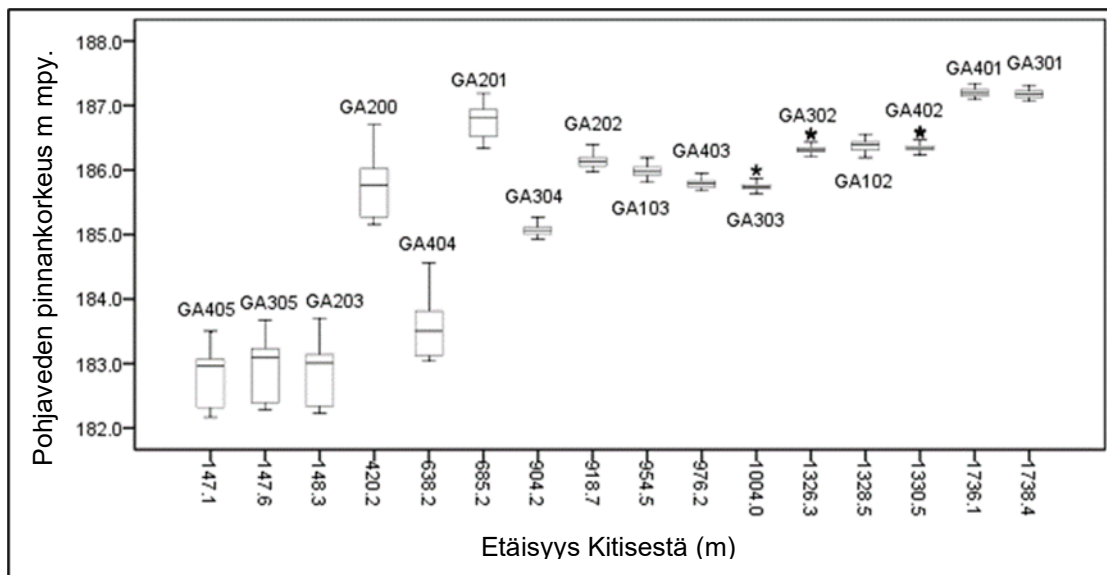
Paleoproterotsooisessa kallioperässä on muutama kallioperän vedenpintoja havainnoiva havaintoputki. Näitä vedenpintoja kuvataan pikemminkin potentiometrisinä pintoina, sillä kallioperän pohjavesi on paineellista. SRK (2018) on koonnut ja esittänyt graafisesti Golder Associates Ltd:n (2012) kaivoista sekä SRK:n ja Asiakkaan asentamista ja seuraamista havaintoputkista peräisin olevaa aineistoa. Valikoidut SRK:n graafit (2019) on koottu Liitteen A kuviin A-1 ja A-3.



(SRK 2019)

Kuva 2-9 Pohjavedenpinnan samanarvonkäyrät jäätikkö- ja jokisyntyisissä sedimenteissä.





(Åberg ym. 2019)

Kuva 2-10 Vuosittainen pohjavedenpinnan vaihtelu jäätikkö- ja jokisyntyisiin sedimentteihin asennetuissa tarkkailuputkissa.

Nämä käyrät osoittavat, että turpeen ja glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien vedenpinta sekä rapautunut ja rikkoutunut kallioperä ovat osapuilleen hydrostaattisessa tasapainossa turpeen ja glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien vedenpinnan ja rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän potentiometristen pintojen kanssa, ja että pohjavedenpinta on 185–187 metriä keskimääräisen merenpinnantason yläpuolella. Ehjän kallioperän matalat kaivot osoittavat, että potentiometriset pinnat ovat hieman alle tämän ja että niiden arvot ovat 182–186 metriä keskimääräisen merenpinnantason yläpuolella. Tämä viittaisi siihen, että paleoproterotsooisesta kallioperän ylempien 200 metrin alueelta löydetyn rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän pohjaveden pietsometrinen painetaso saattaa viettää loivasti alaspäin ehjään muuttumattomaan kallioperään, joka sijaitsee alapuolella ja sisältää Sakatin esiintymän.

2.3.2 AKVIFERITESTIT

SRK kokosi (2018, 2019) akviferin testausaineistoa edellisistä selvityksistä ja näissä tehdyistä kattavista akviferin testauksista turpeesta, glasiaalisissa ja fluviaalisissa sedimenteissä sekä kallioperässä. **Liitteen A taulukko A-1** sisältää kaiken SRK:n (2018, 2019) käytettävissä olevan akviferin testausaineiston. Tämä aineisto on kuvattu SRK:n (2019) toteuttamassa kolmessa graafissa, jotka näytetään alla.

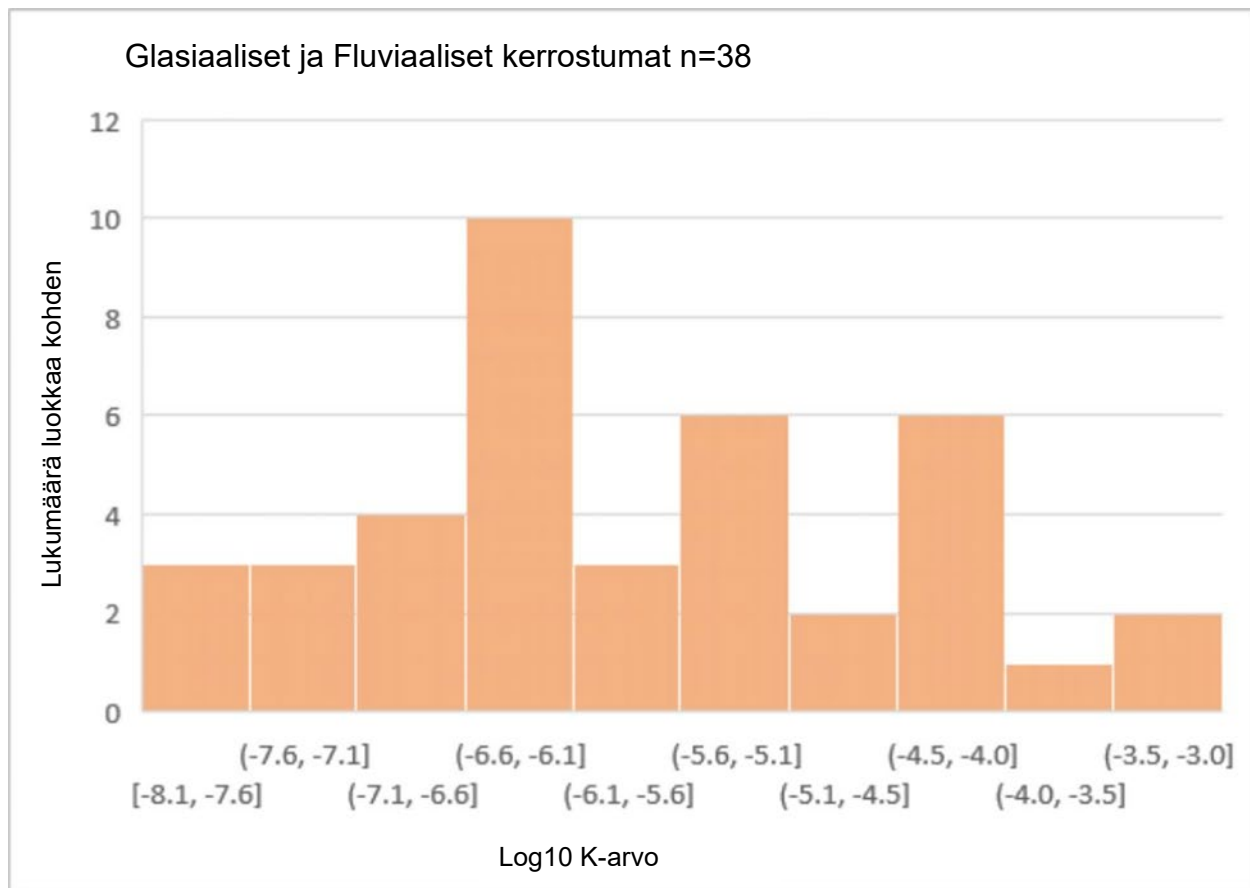
Glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä on mitattu hyvin vaihtelevia vedenjohtavuuden arvoja, mikä oli odotettavissa, kun ottaa huomioon sedimenttien laajan kirjon aina tiivistä glasiaalisista moreeneista fluviaalisiin hiekkoihin ja soriin. **Kuva 2-11** (SRK 2018) viittaa siihen, että yleisimmät vedenjohtavuusarvot ovat 7,9 E-6 metriä/s pienimmillään ja 1,0 E-4 metriä/s suurimmillaan. Pienimpiä Kx-arvoja on sedimenteissä enemmän kuin korkeita Kx-arvoja. Turpeen vedenjohtavuusarvot ovat turpeen ylemmässä ja paremmin vettä läpäisevässä osassa 1,0 E-5 metriä/s ja turpeen tiiviimmässä osassa 1,0 E-7 metriä/s (SRK 2019).

Ylemmät 200 metriä paleoproterotsooisesta kallioperästä on rapautunutta ja rikkoutunutta. Sen vedenjohtavuus vaihtelee välillä 1,0 E-4 metriä/s–1,0 E-7 metriä/s ja kullakin arvolla on samankaltainen osuus kokonaismäärästä (**kuva 2-12**; SRK 2018). Korkeammat arvot ovat todennäköisesti peräisin rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän ylemmän 50 metrin alueelta, jossa rakotiheys on suurin.

Ehjä muuttumaton paleoproterotsooinen kallioperä muodostaa Gaussin normaalijakauman mukaisen kuvion (**kuva 2-13**; SRK 2018). Valtaosa arvoista sijoittuu asteikolle 7,9 E-8 metriä/s – 1,0 E-9 metriä/s, ja keskiarvo on 1,0 E-8 metriä/s. Tämä johtuu todennäköisesti kallioperän suhteellisen homogeenisesta ja tiivistä rakenteesta sekä alhaisesta rakotiheydestä, ja murtumat ja siirrokset ovat myös jokseenkin tiiviitä eivätkä kytkeydy toisiinsa, sillä ne sijaitsevat rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän ylemmässä osassa.

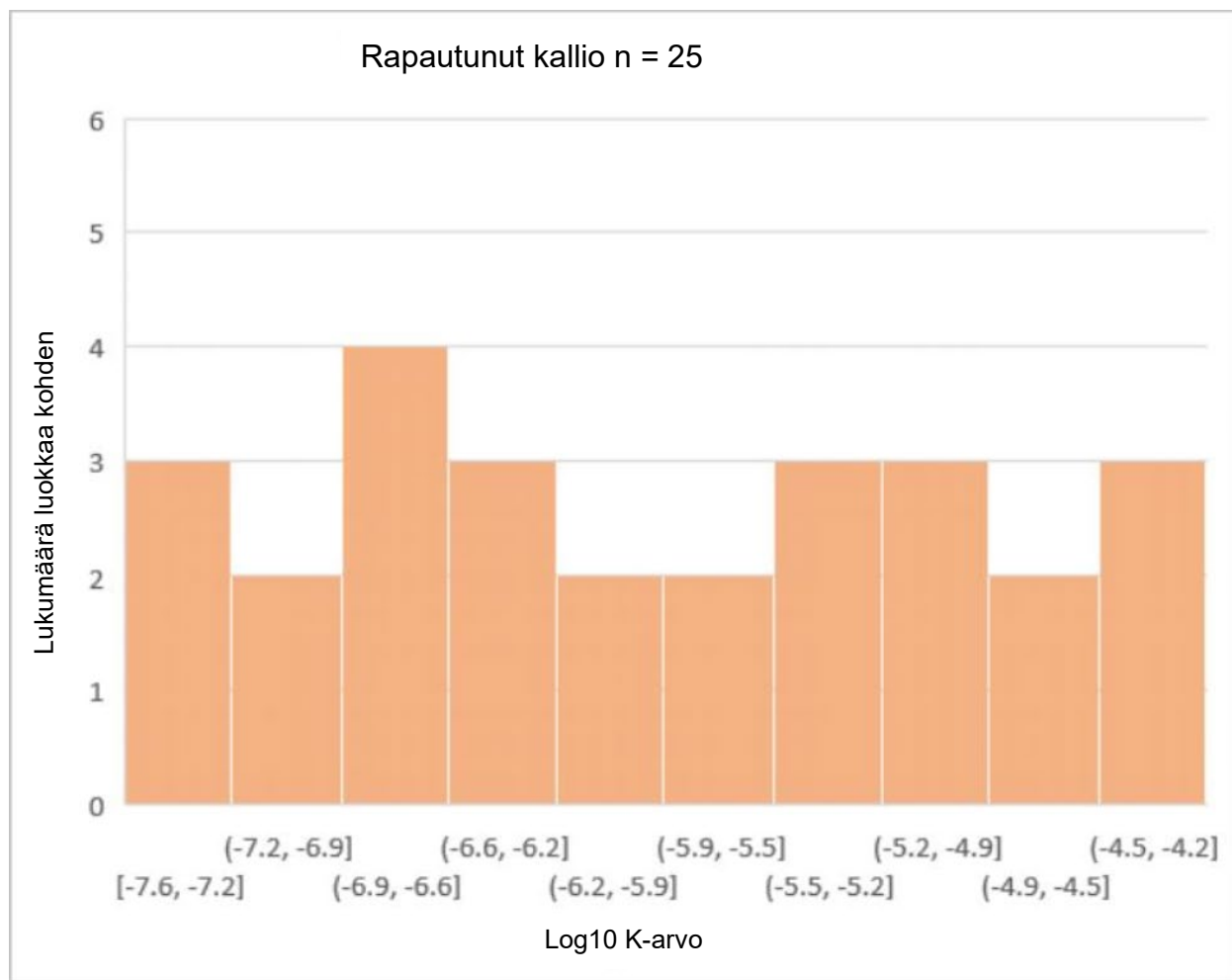
Glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien sekä rapautuneen ja rikkonaisen kallioperän laaja vedenjohtavuuden vaihtelevuus on jokseenkin haasteellista numeerisen mallinnuksen kannalta. Lopullinen mallin yksiköissä käytetty vedenjohtavuusarvo perustuu enemmän kalibrointiin kuin mitattuihin arvoihin kentällä. Ehjän muuttumattoman kallioperän vedenjohtavuusarvot viittaavat kuitenkin rajoitettuun arvoasteikkoon, jonka parissa mallintaja voi työskennellä numeerisen mallin suunnittelussa.





Yksiköt m/s (SRK)

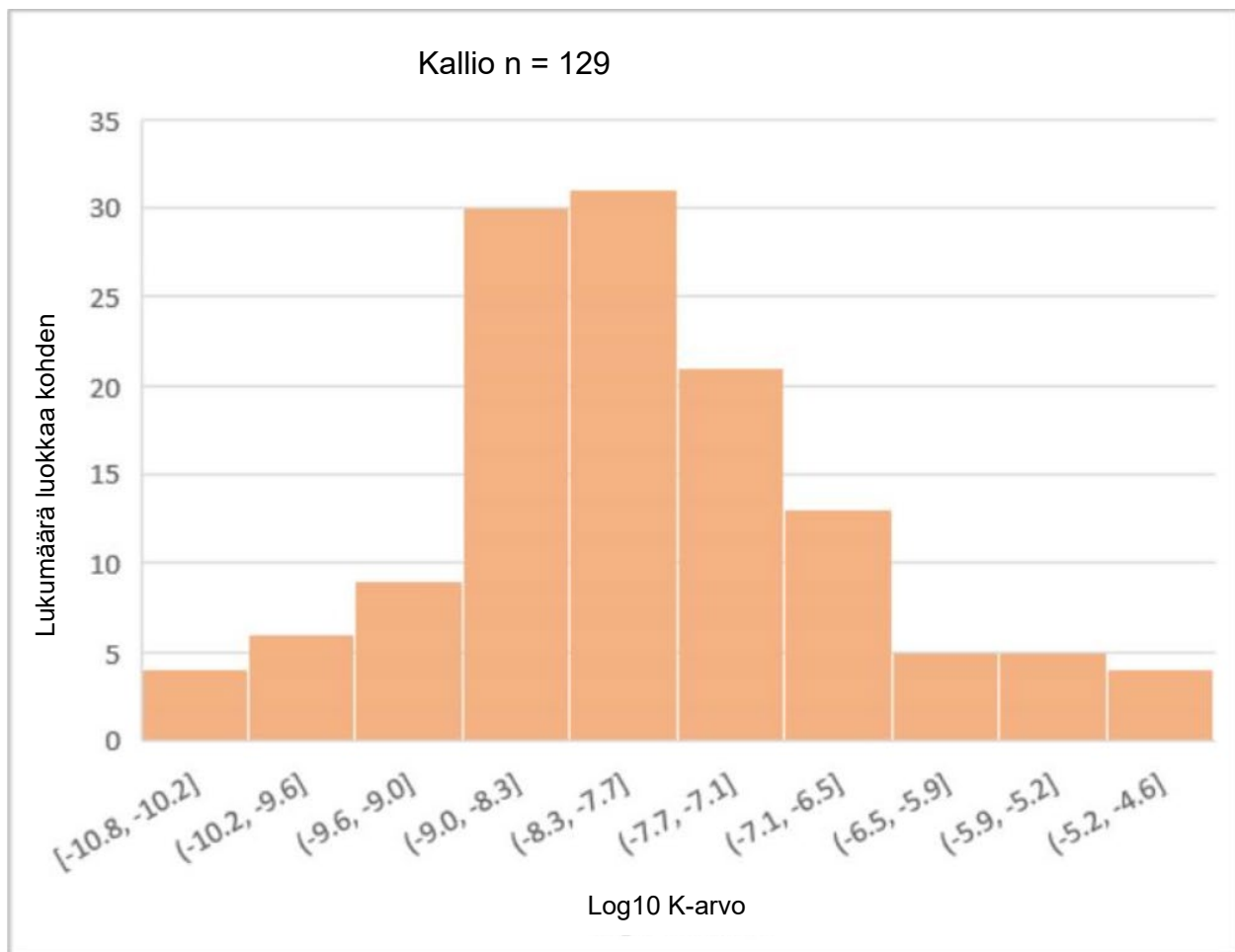
Kuva 2-11 Vedenjohtavuuskertoimen arvon vaihtelu jäätikkö- ja jokisyntyisissä sedimenteissä (SRK 2018, 2019)



Yksiköt m/s (SRK)

Kuva 2-12 Vedenjohtavuuskertoimen arvon vaihtelu rapautuneessa ja rikkoutuneessa kallioperässä (SRK 2018, 2019).





Yksiköt m/s (SRK)

Kuva 2-13 Vedenjohtavuuskertoimen arvon vaihtelu terveessä, muuttumattomassa kallioperässä (SRK 2018, 2019)

3.0 KONSEPTUAALINEN HYDROGEOLOGINEN MALLI

Sakatin Cu-Ni-PGE-Au-esiintymä sijaitsee Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeellä (Luukas 2017) noin 15 km Sodankylästä pohjoiseen Suomen Lapissa suoraan itään Kitisen joelta, joka on Kemijoen yläjuoksun suurin haara (**kuva 1-1**).

Hankealue sijaitsee Viiankiaavan suon (myöhemmin ”suo”) tuntumassa ja suoraan sen alapuolella. Suunnitellun kaivoksen toimintaa tukevat maanpäälliset rakennelmat ja toiminnot ovat Natura 2000 -suojelualueen ja suon ulkopuolella, mutta suunniteltu maanalainen kaivos sijaitsee suon alapuolella paleoproterotsooisessa kallioperässä. Hankealue on yleisesti ottaen varsin tasainen, ja maanpinnan korkeus on enimmäkseen 180–190 metriä keskimääräisen merenpinnan yläpuolella. Aapasuot, mäntymetsät, järvet ja joet ovat alueen ominaismaisemaa. Vähäiset korkeuserot kasvavat ajoittain pyöreämuotoisten kukkuloiden ansiosta Viiankiaavan suon pohjoisilla, itäisillä ja eteläisillä reunoilla. Nämä mäet koostuvat tavallisesti vulkaanisista kivistä tai kvartsiiteista, jotka ovat eroosiolle vastustuskykyisempiä (Lehtonen ym. 1998) mutta eivät nouse enempää kuin 10–20 metriä ympäröivän tasamaan yläpuolelle.

3.1 GEOLOGINEN YHTEENVETO HANKEALUEESTA

Hankealueen geologia koostuu glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien yläpuolella sijaitsevan suon turpeesta Kitisen joen itäisellä puolella. Glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien alapuolella on Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeen paleoproterotsooista kallioperää. Kallioperän ylemmät 200 metriä on paikoin rapautunutta toistuvien jäätiköitymisten ja paikallisesti rikkoutunutta toistuvien rakenteellisen deformaation aikakausien jäljiltä (SRK 2019). Rapautuneen/rikkonaisen kallioperän alapuolella on ehjä muuttumaton kallioperä, joka sisältää Sakatin mineraaliesiintymän. Sakatin esiintymä sijaitsee alemman Sodankylän ryhmän ja ylemmän Savukosken ryhmän välisellä kontaktivyöhykkeellä (Luukas 2017). Sodankylän ryhmä sisältää pääosin kiilleliuskeita, metasilttikiviä ja kvartsiitteja sekä paikallisesti runsaasti metavulkaanisia ja satunnaisia dolomiittisia kiviä. Yllä oleva Savukosken ryhmä sisältää ultramafisia vulkaanisia kiviä ja liuskeita. Sakatin malmio sijaitsee ultramafisessa vulkaanisessa aineksessa ja ultramafisissa kasaumissa, jotka sisältävät peridotiittia ja duniittia, mafisia vulkaanisia kiviä ja vulkaanisia tuhkakiviä.

Paleoproterotsooinen kallioperä on kokenut kaksi merkittävää rakenteellista tapahtumaa (SRK 2019). Ensimmäinen tapahtui Kola-orogeenin aikana noin 1,91 Ga sitten ja siihen liittyi pohjois-eteläsuuntainen puristus, joka johtui kohoamisesta ja ylityönnöstä pohjoisen suunnasta sekä myloniittisten hiertovyöhykkeiden kehitymisestä suoraan Sakatin esiintymän pääasiallisten kivimassakasautumien ylä- ja alapuolelle. Toinen tapahtuma oli noin 1,77 Ga sitten ja synnytti aikaisempien rakenteiden deformaatioon johtaneet hauraat kaakkois-luoteis-suuntaiset siirrokset.

Alin hiertovyöhyke on mallinnettu työntösiirrosten ryhmittymäksi, ja sitä kutsutaan ”pohjaruhjeeksi”. Nämä siirrokset ovat hajonneita ja sisältävät laajoja sormamaisia siirrosbreksiavyöhykkeitä, ja niitä on erittäin vaikea kairata. Valtaosa Sakatin syvistä malminetsintäkairauksista päättyy tähän pohjan työntösiirrosvyöhykkeeseen (SRK 2019). Myloniittisten hiertovyöhykkeiden kattopuoli puolestaan koostuu pystyrakenteista. Kairasydänlävistyksissä nämä esiintyvät myloniittisina liuskeina, jotka ovat usein muutaman metrin levyisiä. Näitä myloniittisia hiertovyöhykkeitä leikkaavat lähes pystyt kaakkois-luoteis-suuntaiset hauraat siirrokset, jotka yleensä yhdistetään yhdensuuntaissiirroksiin ja monen metrin mittaiseen rikkoutuneeseen kairasydännäytteeseen.



3.2 YHTEENVETO HYDROSTRATIGRAFISISTA YKSIKÖISTÄ

Sakatin alueen geologian voi jakaa neljään hydrostratigrafiseen pääyksikköön:

1. Viiankiaavan suo ja turve
2. Suon ja turpeen alapuolella olevat glasiaaliset ja fluviaaliset sedimentit
3. Rapautunut/rikkoutunut paleoproterotsooinen kallioperä
4. Ehjä rapautumaton/rikkoutumaton paleoproterotsooinen kallioperä (kallioperä), jossa mineraaliesiintymä sijaitsee

Viiankiaavan suo ja turve: Suon iän on arvioitu olevan 9 700 – 10 155 vuotta (Salonen ym. 2015), ja se oli alun perin jääkauden sulamisvaiheeseen liittyvä järvi viimeisen Suomessa tapahtuneen huomattavan jäätiköiden etenemisjakson lopusta alkaen. Suo on Natura 2000 -suojelualue, joka koostuu kosteikkoturveympäristöstä, jossa on herkkä ja uhanalainen kasvi- ja eläinlajikonaisuus. Suo sisältää useita vesistöjä, ja se on enimmäkseen avointa suota, jossa on jänne- ja rimpikuvioita sekä yleistä valumaa Kitisen joesta länteen päin (Korkka-Niemi ym. 2017). GTK:n (Lappalainen and Pajunen 1982) suorittamat geologiset turvekairaukset ovat osoittaneet, että turve on korkeintaan 7,8 metriä paksu ja sen arvioitu keskimääräinen paksuus on 2,3 metriä. Myöhemmin tehdyissä turpeen mallintamistutkimuksissa (Korkka-Niemi ym. 2017) turpeen keskimääräisen paksuuden arvioitiin olevan noin 1,9 metriä. Turpeesta tulee tiiviimpää syvemmälle mentäessä ja vähemmän vetä läpäisevää, mikä aiheuttaa suolla paikallisesti kohonneita vedenpintoja. Golder Associates Ltd:n (2015) suorittamat vedenjohtavuusarvot osoittavat arvojen olevan 2,9 E-4 m/s ja 3,4 E-6 m/s välillä ja geometrisen keskiarvon olevan 1,0 E-5 m/s (SRK 2019). Korkka-Niemi ym. (2019) mittasivat läpäisevyyскоelaitteen avulla turpeen vedenjohtavuusarvot, jotka olivat 1,0 E-5 m/s ja 1,0 E-7 m/s välillä. Suon vedenlaatua hallitsee kalsium-magnesium-bikarbonaatti - vesityyppi (Korkka-Niemi ym. 2017; SRK 2019).

Turpeen alapuolella olevat glasiaaliset ja fluviaaliset sedimentit: Turpeen alla olevat glasiaaliset ja fluviaaliset sedimenttikokonaisuudet voidaan jakaa karkeasti kahteen litologiseen päätyyppiin: 1) hiekka- ja soraesiintymiin ja 2) glasiaalisiin moreeniesiintymiin (SRK 2019). Kolme tärkeintä moreeniesiintymää ovat: 1) ylempi moreeni: löyhä, silttinen ja ruskeahko moreeni; 2) väli- tai keskimoreeni ja 3) alempi moreeni, joka on tiivistä, massiivista ja lohkareista harmaata moreenia (Salonen ym. 2015). Lajittuneet sedimentit (päällimmäiset esiintymät) ylemmän moreenin yläpuolella ovat kaikista jatkuvimpia hiekka- ja soraesiintymiä ja edustavat huuhtoutuneita fluviaalisia sedimenttejä, jotka ovat muodostuneet osana palmikoitunutta jokimorfologiaa yhdessä uomien ja särkkien kanssa. Niitä esiintyy Kitisen joen molemmin puolin, mutta ne ovat itäisellä puolella pääosin suon turpeen peittämiä. Ylä-, keski- ja alamoreenien väliset hiekka- ja soravyöhykkeet ovat kerrostuneet moreeniyksikköjen väleihin ja alueellisesti rajoitetumpia, sillä ne rajoittuvat Kitisen joen leveään uomaan (Salonen ym. 2014; Salonen ym. 2015). Kitisen joen varrella esiintyvät lähteet ja suotovedet ovat peräisin glasiaalisista ja fluviaalisista kerrostumista (Salonen ym. 2015; Åberg ym. 2019).

Golder Associates Ltd:n (2015) toteuttamissa hydraulisisissa testauksissa 38 testauskuopassa mitatut arvot vaihtelivat 3,0 E-7 m/s ja 4,0 E-5 m/s välillä, ja niiden keskiarvo oli noin 3,0 E-6 m/s (SRK 2019). Alempi moreeni on tiivis, ja sillä on alhainen vedenjohtavuus. Alempi moreeni toimii hydraulisena eristeenä yllä olevien glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien sekä alla olevan kallioperän välillä niissä kohdin, joissa alempi moreeni peittää kalliota. Toistuvista jäätiköitymisistä ja kallioperän rikkonaisuudesta johtuen kallioperän topografia on epäsäännöllinen ja alemmaa moreenia ei aina esiinny, ja tällöin kallioperä on



KONSEPTUAALINEN HYDROGEOLOGINEN MALLI

suorassa yhteydessä yllä olevien hiekkojen ja sorien kanssa. Glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien hydrostratigrafisen yksikön vedenlaatua dominoi kalsium-magnesium-bikarbonaatti-vesityyppi, ja vedenlaatu on samankaltainen kuin yllä olevan suon.

Rapautunut/rikkoutunut paleoproterotsooinen kallioperä: Rapautunut/rikkoutunut kallioperä kattaa ylemmät 200 metriä Sakatin mineraaliesiintymän sisältävästä paleoproterotsooisesta kallioperästä. Tämä ylempi vyöhyke on rikkoutunut ja rapautunut prekambriksen ajan jälkeen toistuneiden jäätiköiden etenemisten ja vetäytymisten ja epäilemättä myös huomattavien eroosiovaiheiden ja tektonisten tapahtumien jäljiltä. SRK:n (2019) toteuttamat hydrogeologiset tutkimukset ovat osoittaneet, että tämän rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän ylempien 50 metrin vedenjohtavuus on huomattavasti korkeampaa kuin alemmassa osiossa. Arvio ylempänä olevien 50 metrien keskimääräisistä vedenjohtavuusarvoista on $5,0 \text{ E-5 m/s}$, ja arvot ovat $1,0 \text{ E-5 m/s}$ ja $1,0 \text{ E-7 m/s}$ välillä. Alemman osion arvot ovat keskimäärin noin $5,0 \text{ E-6 m/s}$ ja vaihtelevat alaspäin asteikolla $1,0 \text{ E-8 m/s}$ (SRK 2019). Pystysiirokset tunkeutuvat kallioperään, joka sisältää myös rapautuneen/rikkoutuneen kallioperävyöhykkeen, mutta siirrokset eivät yllä oleviin glasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin. Monet näistä siirroksista ovat pidemmälle rapautuneita kuin muu kallioperä, mikä johtaa kallioperän painanteisiin siirrostensa kulun yhteydessä sekä eri siirrostensa leikkauskohdissa (SRK 2019). Rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän pystysiirosten mitatut läpäisevyysarvot ovat noin $5,0 \text{ E-3 m}^2/\text{vrk}$. Tämän rapautuneen/rikkoutuneen ylempään kallioperävyöhykkeen vedenlaatua dominoi kalsium-magnesium-bikarbonaatti-vesityyppi, ja vedenlaatu on samankaltainen kuin yllä olevien glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien.

Ehjä paleoproterotsooinen kallioperä: Sakatin mineraaliesiintymän sisältävällä suhteellisen ehjällä ja rapautumattomalla kallioperällä on alhaiset vedenjohtavuusarvot, jotka liikkuvat $1,0 \text{ E-5 m/s}$ ja $1,0 \text{ E-9 m/s}$ välillä ja ovat keskiarvoltaan $1,0 \text{ E-8 m/s}$ (SRK 2019). Pystysuorat siirrokset, jotka tunkeutuvat kallioperään, ovat mitatuilta läpäisevyysarvoiltaan noin $4,0 \text{ E-3 m}^2/\text{vrk}$. Pohjeruhjeella on huomattavasti korkeampi läpäisevyys, joka on arviolta $14,6 \text{ m}^2/\text{vrk}$ (SRK 2019). Syvän ehjän kallioperän vesi on paikoin erittäin suolapitoista, runsaskloriittista ja -sulfaattista ja sisältää mineralisoituneilta vyöhykkeiltä peräisin olevia kohonneita metalliarvoja. Syvän kallioperän vedenlaatu poikkeaa huomattavasti yllä olevan rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän vedenlaadusta, mikä viittaa rajoitettuun hydrologiseen vuorovaikutukseen näiden kahden kallioperän vyöhykkeen välillä.

3.3 PINTA- JA POHJAVEDEN VIRTAAUS JA HYDROLOGISET YHTEYDET

Kolmella ylemmällä hydrostratigrafisella yksiköllä, suolla, glasiaalisilla ja fluviaalisilla sedimenteillä sekä rapautuneella/rikkoutuneella kallioperällä on keskenään laadullisesti samankaltainen pohjavesi, mikä viittaa hydrologiseen yhteyteen näiden kolmen yksikön kanssa ainakin pleistoseenisten jäätiköitymistensa aikana ja loppupuolella, ja hydrologinen yhteys on todennäköisesti edelleen olemassa. Suon vesi virtaa Kitisen jokeen kevään lumen sulannan aikana, ja maaperän pohjavesi on lähteiden ja suotovesien tärkein varasto joen varrella ympäri vuoden. Vaikka glasiaalisia ja fluviaalisia sedimenttejä erottaa alla olevasta rapautuneesta/rikkoutuneesta kallioperästä alhaisen vedenjohtavuuden omaava moreenin pohjakerros (alempi moreeni), tätä pohjamoreenia ei ole kaikkialla, vaan rapautunut/rikkoutunut kallioperä yhtyy ylöspäin glasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin monessa kohdassa, mikä mahdollistaa hydrologisen yhteyden rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän ja maaperän pohjaveden välillä.

Ehjän rapautumattoman paleoproterotsooisesta kallioperän pohjavedellä on sen sijaan erilainen kemiallinen koostumus, joka on paikoin erittäin suolapitoinen ja poikkeaa huomattavasti maaperän pohjaveden sekä rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän ylempään osaan pohjaveden laadusta. Tämä viittaa rajoitettuun hydrologiseen vuorovaikutukseen ehjän kallioperän ja kolmen ylempään hydrostratigrafisen yksikön välillä. Pohjaveden havaintokaivojen aineisto on osoittanut pohjavedenpintojen rajoitettua ja viivästynyttä vastetta kallioperässä kairausten, akviferin testauksen ja kevään lumen sulamisen yhteydessä. Tämä viittaa jonkinasteiseen yhteyteen ehjän kallioperän pohjaveden ja sen yllä olevien yksiköiden pohjaveden välillä.



Erot vedenlaadussa viittaavat siihen, että kaikki ehjän kallioperän pohjaveden ja ylemmän rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän pohjaveden välinen vuorovaikutus on rajoittunutta ja todennäköisesti pystysuorien siirrostien kontrolloimaa.

Kitisen joki toimii vastaanottavana vesistönä kolmesta eri yksiköstä purkautuvalle vedelle: maaperän pohjavedelle, turpeen huokosvedelle sekä rapautuneesta ja rikkonaisesta kallion ylemmästä osasta purkautuvalle pohjavedelle ehjän paleoproterotsooisien kallioperän yläpuolelta. Ehjän kallioperän pohjavesivirtauksesta ei ole selkeää tietoa syvien seurantakaivojen puutteesta johtuen. Korkka-Niemi ym. (2020) ajoittivat syvän kallioperän pohjaveden vuoteen 32 000 BP. Tämä saattaa viitata siihen, että syvän kallioperän pohjaveden viipymä on hyvin pitkä ja sisältää vettä pleistoseenialalta, mutta syvän kallioperän pohjaveden muodostumisen luonne ja virtausjärjestelmä eivät ole tiedossa yksityiskohtaisesti.

3.4 KONSEPTUAALISEN HYDROGEOLOGISEN MALLIN AVAINELEMENTIT

Sakatin kaivoskohteen hydrogeologisen rakenteen konseptuaalisen mallin keskeiset elementit kuvataan alla. Nämä elementit ovat yhdistelmä SRK:n (2019) ja Stantecin kehittämiä luonnehdintoja. **Kuvassa 3-1** esitellään nämä hydrogeologisen mallin elementit.

1. Lumen sulaminen ja kevättulva: Kohteen vuotuisen keskimääräisen sademäärän määritettiin olevan 524 mm. Noin puolet sademäärästä kertyy lumena. SRK:n (2019) laskelmien mukaan vuotuinen keskimääräinen kokonaishaihdunta on 269 mm. Lunta ja jäätä kertyy paksuina kinoksina suolle talvikuukausina ja sulaa kevättulvan aikana, jolloin vettä vapautuu suolle nopeasti. Lumen sulaminen on merkittävin veden lähde ylemmän kolmen hydrostratigrafisen yksikön (turve, glasiaaliset ja fluviaaliset sedimentit ja rapautunut/rikkoutunut kallioperä) pohjaveden muodostumiselle. Tämä lumen sulaminen synnyttää ylimääräistä vettä suolle, ja valtaosa tästä kulkeutuu suolta pintavaluntana Kitisen jokeen. Osa sulamisvedestä varastoituu turpeeseen imeytymisen kautta ja edelleen imeytyy alla oleviin glasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin sekä rapautuneeseen/rikkoutuneeseen kallioperään.
2. Aapasuo: Kevättulva aiheuttaa valuntaa suon pinnalla. Suuret alueet suolla kuitenkin varastoivat vettä kesäkuukausina järvien sekä jänne- ja rimpikuvion ansiosta. Tämä ylikesäinen pidättynyt vesi on tärkeä vedenlähde kasville ja eläimille.
3. Pintaveden virtauskuviot ja matalan pohjaveden virtaus: Suon valuma-alueen laidoilla pintaveden valuma purkautuu Kitisen jokeen. Suon reunalla olevat glasiaaliset ja fluviaaliset sedimentit ovat avoimia suon reunoilla ja vain osittain paljastuneina suolla. Nämä sedimentit muodostavat kallioperän yläpuolella olevan tärkeimmän pohjavesiyksikön, ja niistä pohjavesi kulkeutuu pohjavesivirtauksena ja suotovenenä Kitisen jokeen. Maaperän pohjavesivirtaus syöttää vettä lähteille ja suotovesille suon reunoilla ja joentörmän varrella.
4. Ihmisperäiset vaikutukset: Suolta lähtevä pintavaluma kerääntyy paikoittain lammikoiksi suon länsiosaa reunustavan metsämaan halki rakennetun, alun perin hakkuutarkoituksia varten rakennetun tien vuoksi. Tie kulkee metsämaata pitkin suon ja Kitisen joen välillä.
5. Kitisen joen säätely: Kitisen joen virtaus hankealueen lähellä on vesivoimapatojen säätelemää. Tämä säätely alkoi 1970-luvun loppupuolella. Joen virtauksen säätely on muuttanut joen ja suon hydrologiaa huomattavasti tulvien ja vedenpinnan muutosten vähenemisen myötä (Åberg ym. 2017a, b).



6. Turpeen huokosvesi: Turpeen sisältämä vesi, joka on enimmäkseen huokosvettä, on osittain orsivettä. Turpeella on löyhä pinta ja alhaisen vedenjohtavuuden omaava tiivistä turpeesta koostuva pohja, joka eristää alla olevia glasiaalisia ja fluviaalisia kerrostumia osittain (Salonen ym. 2015; Korkka-Niemi ym. 2017). Tätä alhaisen vedenjohtavuuden omaavaa tiivistä turpeen pohjakerrosta ei esiinny kaikkialla suolalueella, joten paikallisesti turpeen sekä maaperäkerrostumien välillä voi olla hydraulinen yhteys. Havaintokaivojen samankaltaiset vedenpintojen vasteet kevätulantaan ja eri vesien samankaltainen kemiallinen koostumus viittaavat tällaisen yhteyden olemassaoloon.
7. Pietsometriset korkeudet: vedenpinnan tasot ovat samankaltaisia kallioperässä ja yläpuolella olevissa glasiaalisissa ja fluviaalisissa sedimenteissä, mikä viittaa näiden hydrostratigrafisten yksiköiden tasapainottumiseen jäätiköiden sulamisen ja vetäytymisen aikana. Osa kallioperän painekorkeuksista saattaa olla hieman maanpinnan yläpuolella, mikä johtuu hankealueen sijainnista joen valuma-alueella, missä purkautuminen on voimakkaampaa kuin uudelleen imeytyminen (SRK 2019).
8. Glasiaalinen ja fluviaalinen hydrostratigrafinen yksikkö: Glasiaaliset ja fluviaaliset kerrostumat ovat avoimia suon reunoilla, missä hiekka- ja sorakerrostumien pohjavedenpinnoissa havaitaan vaste sulamisveden ja sateen aiheuttamaan pohjavesivarastojen täydentymiseen imeytymisen kautta. Maaperäkerrostumat ovat suljettuja tai osittain suljettuja turpeen alapuolisissa kerrostumissa johtuen turpeen tiiviin pohjakerroksen alhaisesta vedenjohtavuudesta (Salonen ym. 2015; Korkka-Niemi ym. 2017). Turvekerroksen alemmaa tiivistä alhaisen vedenjohtavuuden vyöhykettä ei esiinny kaikkialla suolla, jolloin paikallisesti turpeen ja maaperäkerrostumien välillä voi olla hydraulinen yhteys. Havaintokaivojen samankaltaiset vedenpintojen vasteet kevätulantaan ja eri vesien samankaltainen kemiallinen koostumus viittaavat tällaisen yhteyden olemassaoloon.
9. Matala (alluviaalinen) pohjavesivirtaus: Maaperäkerrostumien pohjavesi on hankealueen pääpohjavesiyksikkö. Valtaosa maaperän pohjavesivirtauksesta esiintyy hiekka- ja sorayksiköissä ja pienempi osa tiiviimmissä glasiaalisissa moreeneissa. Glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien kohonnut vedenjohtavuus verrattuna yllä olevaan turpeeseen tai alla olevaan rapautuneeseen/rikkoutuneeseen kallioperään verrattuna osoittaa, että valtaosa lumen sulamisen tuottamasta pohjaveden muodostumisesta esiintyy maaperän hiekka- ja sorakerrostumissa. Lisäksi maaperäkerrostumien mallinnettu alenema sijoittuu pääosin hiekka- ja sorakerrostumiin.
10. Rapautunut/rikkoutunut kallioperä: Rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän hydrostratigrafisen yksikön vedenjohtavuus vaihtelee kohtalaisesta alhaiseen, ja vaihtelevuus on suurta. Yksikön vedenjohtavuus laskee syvemmälle mentäessä, ja ylimpänä olevan 50 metrin osiossa on korkein vedenjohtavuus. Rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän pystysuurroksissa on korkeampi vedenjohtavuus kuin alla olevan ehjän kallioperän samankaltaisissa suurroksissa. Rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän pohjavesi on yhteydessä yllä olevan maaperän pohjaveden kanssa, minkä havaintokaivojen samankaltainen veden kemiallinen koostumus sekä samankaltaiset havaintokaivojen vedenpintojen vasteet testaukseen tai kevättulvaan osoittavat. Rapautuneessa/rikkoutuneessa kallioperässä esiintyy paikallisesti kaukalomaisia painaumia siirrostien ja siirrostien yhtymäkohtien aiheuttaman rakenteellisen heikkouden takia.
11. Ehjä paleoproterotsooinen kallioperä: Ehjässä, suhteellisen muuttumattomassa paleoproterotsooisessa kallioperässä on yleisesti ottaen alhainen läpäisevyys, ja valtaosa pohjaveden liikkumisesta rajoittuu todennäköisesti siirroksiin tai kallioperän rakenteisiin. Ehjän kallioperän havaintokaivojen vaste kairauksen ja testauksen aikana viittaa siihen, että pohjavesivirtaus on rajallisesti mahdollista kiteisessä kallioperässä. Ehjän kallioperän suolapitoinen veden kemiallinen koostumus heijastaa mineralisaatiota ja viittaa rajoittuneeseen

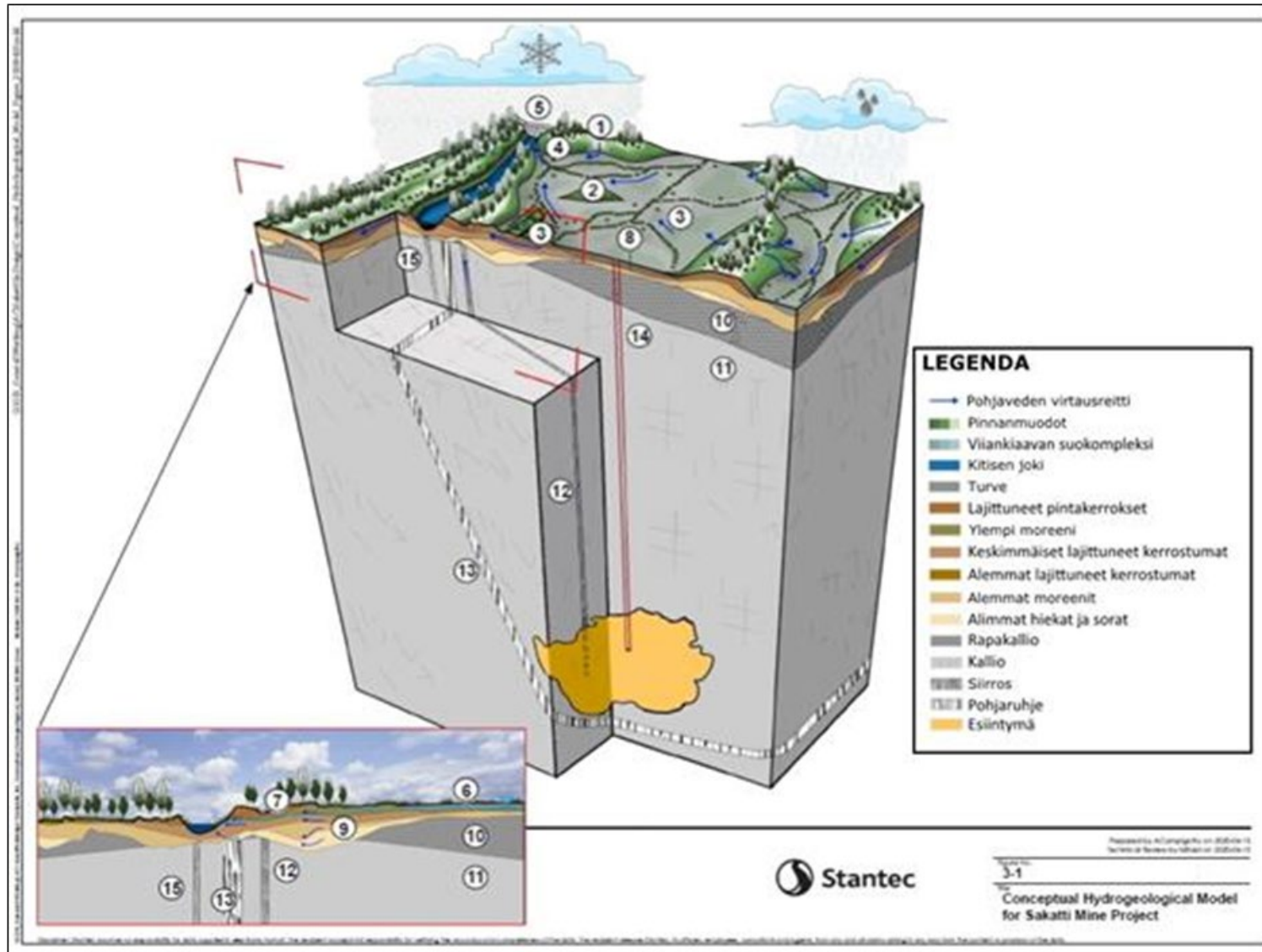
kemialliseen vuorovaikutukseen yllä olevan rapautuneen/rikkonaisen kallioperän ja lasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien kanssa.

12. Pystysuorat ja jyrkät siirrokset: Hankealueella kauttaaltaan esiintyvissä pystysuorissa ja jyrkissä siirroksissa on yleisesti ottaen alhainen vedenläpäisevyys. Nämä pystysuorat ovat heikosti yhteydessä toisiinsa ja niiden pohjaveden varastointikapasiteetti on alhainen (SRK 2019). Jotkut näistä siirroksista kulkevat malmion halki ja tulevat risteämään toistensa kanssa maanalaisen louhinnan edistyessä. Siirrosten vaihtelevat ominaisuudet, jotka käyvät ilmi vesihävikkitesteissä (pakker-testit), viittaavat jokseenkin vaihtelevaan vedenjohtavuuteen ja veden varastointikapasiteettiin yksittäisen siirroksen kohdalla.
13. Pohjaruhje: Pohjaruhje on huomattavin hankealueella tunnistettu geologinen rakenne, ja sen paksuus vaihtelee muutamasta metristä noin 80–90 metriin eteläisellä sivulla. Pohjaruhjeen vedenjohtavuus vaihtelee kohtuullisesta korkeaan ja voi varastoida pohjavettä paikallisesti. Kyseinen rakenne ei ole suoraan yhteydessä suunniteltuun louhokseen muutoin kuin malmiesiintymään johtavan 5-kilometrisen vinotunnelin osalta. Täten pohjasiirros on tärkeä kaivostoiminnan näkökulmasta, mutta sillä ei ole vaikutusta maaperän pohjaveteen tai turpeen huokosveteen.
14. Avoimet kairareivät: Malminetsintäkairaukset hankealueella ovat synnyttäneet runsaasti avoimia kairareikiä, jotka lävistävät mineralisoitunutta aluetta, ja joilla voi olla yhteys yllä oleviin maaperän kerrostumiin. yhteyden estämiseksi Asiakas on asentanut teräksiset suojaputket kairausreikiin ja sementoinut suojaputket kiinni kallioperään. Lisäksi kairareivät on pintatulpattu, ja vuodesta 2016 lähtien tulppia on asennettu moniin kairausreikiin malmivyöhykkeen yläpuolella. Asiakkaalla on käynnissä ohjelma kairausreikien sulkemiseksi, koska avoimet kairareivät voivat olla ongelmallisia maanalaiselle kaivostoiminnalle.
15. Kitisen joen geologiset rakenteet: Kitisen joen alle talvella 2016–2017 kairatusta kahdesta kairausreistä havaittiin rikkonaista kalliota ja kallion rikkonaisuudesta johtuen korkeita vedenjohtavuuksia. Tämän perustella on mahdollista, että Kitisellä on yhteys kallioperään rakenteiden välityksellä. Yksi hypoteettinen syvä alueellinen siirros on esitelty **kuvassa 3-1**.



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

KONSEPTUAALINEN HYDROGEOLOGINEN MALLI



Kuva 3-1 Sakatin kaivoshankkeen konseptuaalinen hydrogeologinen malli.

4.0 SAKATIN KAIVOKSEN TOTEUTUSSUUNNITELMA

Suunniteltu Sakatin kaivoshanke kattaa maanalaisen kaivostoiminnan ja sen kautta tapahtuvan pääsyn paleoproterotsooisien kallioperän sisältävän mineralisoituneen osion malmiin ja sen louhintaan sekä maanpinnalla olevat vesialtaat, sivukiven ja kaivosjätteen käsittelylaitokset sekä rikastamon. **Kuva 4-1** esittelee hankkeen suunnitellun maanpäällisten toimintojen pohjapiirroksen.

4.1 SUUNNITELLUN SAKATIN KAIVOKSEN LOUHOKSET

Valmistuneen maanalaisen kaivoksen korkeus vaihtelisi 90 metristä merenpinnan yläpuolella (mpy) noin -930 metriin merenpinnan alapuolella (mpa). Maanalaiseen kaivokseen purkautuvat pohjavedet ohjattaisiin kahteen pumppaamoon. Pääpumppausjärjestelmä sijaitsisi -635 metriä mpa ja keräisi ja kuljettaisi kaiken tuotannon yhteydessä syntyvän kaivosveden. -635 metriä mpa sijaitseva pumppaamo käsittelisi myös hyvin suolapitoisen pohjaveden, joka tunkeutuu kaivokseen alle -420 metriä mpa syvyydellä. Tämä edellyttäisi yhteensä neljä pumppua ja kaksi putkea maanpinnan tasolle.

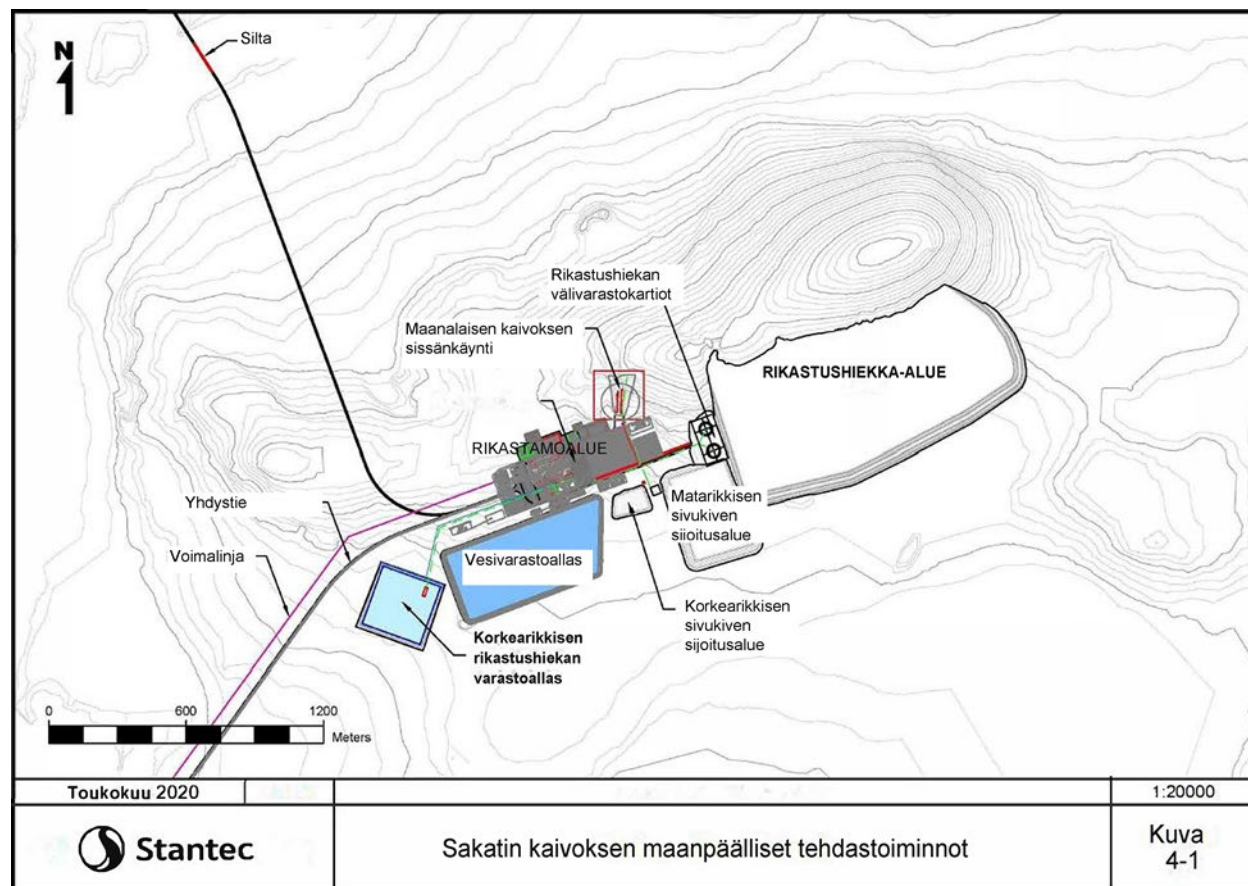
Toissijainen vedenpoistojärjestelmä sijaitsisi -435 metriä mpa, ja se keräisi ja kuljettaisi yli -420 metriä mpa tasolle kaivokseen purkautuvia alhaisemman suolapitoisuuden pohjavesiä. Tämä edellyttäisi yhteensä kaksi pumppua ja yhden putken maanpinnan tasolle. Pumppausrakennelmat on suunnitellut Bestech (2018), ja molemmat pumppaamot pumppaisivat vettä maanpinnan tasolla olevaan kaivoksen laskeutusaltaaseen.

Maanalaisen esiintymän louhinta sisältää: 1) 5 kilometrin pituisen vinotunnelin maanpinnalta esiintymään; 2) tuotantotunneleista koostuvan maanalaisen verkoston, joiden välityksellä päästään malmivyöhykkeelle ja kuljettamaan malmia maanpinnalle ja 3) louhintaperiä ja louhoksia malmin louhimiseksi ja kuljettamiseksi tuotantotunneleihin. Kulku kaivokseen ja sen ilmanvaihto tapahtuisi kahdesta rinnakkaisesta maanalaisen kaivoksen sisäänkäynnistä, jotka sijaitsevat Kuusivaaran harjanteen länsikärjessä korkeustasolla 190 metriä mpy. Kaksi 8 metrin levyistä vinotunnelia porattaisiin rinnakkain pohjoisen suuntaan 15 prosentin kaltevuudessa 3,8 kilometrin etäisyydelle Kuusivaarasta ennen kääntymistä itään malmion läpäisemiseksi, ensin -370 metrin kohdalla mpa (580 metriä maanpinnan alapuolella) ja sitten -619 metrin kohdalla mpa (-820 metriä maanpinnan alapuolella). Kahta tunnelia erottaisi 16 metrin paksuinen pilari, joka takaisi kunkin tunnelin rakenteellisen eheyden. Ylempi tunneli sisältäisi hihnakuljettimen kaivostäyttöä varten ja alempi tunneli olisi puolestaan ilman tulo- ja poistoilmaa varten ja se sisältäisi malmin ja jätteen hihnakuljettimen.

Kuvassa 4-2 esitellään yksinkertaistettu versio suunnitellun maanalaisen kaivoksen suunnittelusta. Louhintaperät ja louhokset täytettäisiin sivukivi- ja rikastushiekkamassalla ja sementillä louhinnan edetessä, jolloin jokainen louhittu osio täytetään pian louhinnan jälkeen ja näin louhittuun malmioon ei jää tyhjää tilaa. Ainoat avoimet tilat tai maanalaiset tyhjät tilat olisivat vinotunnelit ja malmivyöhykkeelle vievät tuotantotunnelit. Nämä alueet jäisivät avonaisiksi koko louhinnan ajaksi ja kaivoksen sulkemisen jälkeen.

Louhinta etenisi vaiheittain sarjoissa. Kaivostoimintaa olisi kokonaisuudessaan arviolta noin 22 vuoden ajan. Suunnitellut kaivostoiminnan vaiheet kuvataan alla:





Kuva 4-1 Sakatin kaivoksen maanpäälliset toiminnot vaihtoehdolle VE1A.

4.1.1 Suunnitellun kaivoksen kehitysvaiheet

V1 (1. vuosi): 5 kilometrin pituisen vinotunnelin rakentaminen. Kaivoksen sisäänkäynti on suunniteltu louhittavan tunneliporalla (Tunnel boring machine, TBM) lähtien Kuusivaaran rikastamoalueen tuntumassa sijaitsevasta sisäänkäynnistä. Kaksi halkaisijaltaan 8 metriä olevaa vinotunnelia muodostavat pääsy- ja poistumistien kaikille työntekijöille, materiaaleille, laitteille, palveluille ja ilmanvaihdolle; maanpinnalle johtavia pystykuiluja ei ole suunniteltu. Tunneliporalla on suunniteltu louhittavan yhteensä 20 kilometriä tunneleita. Ylempien osien vinotunnelien tiivistäminen veden sisääntulon estämiseksi tehdään injektoinnilla tarvittavilta osin.

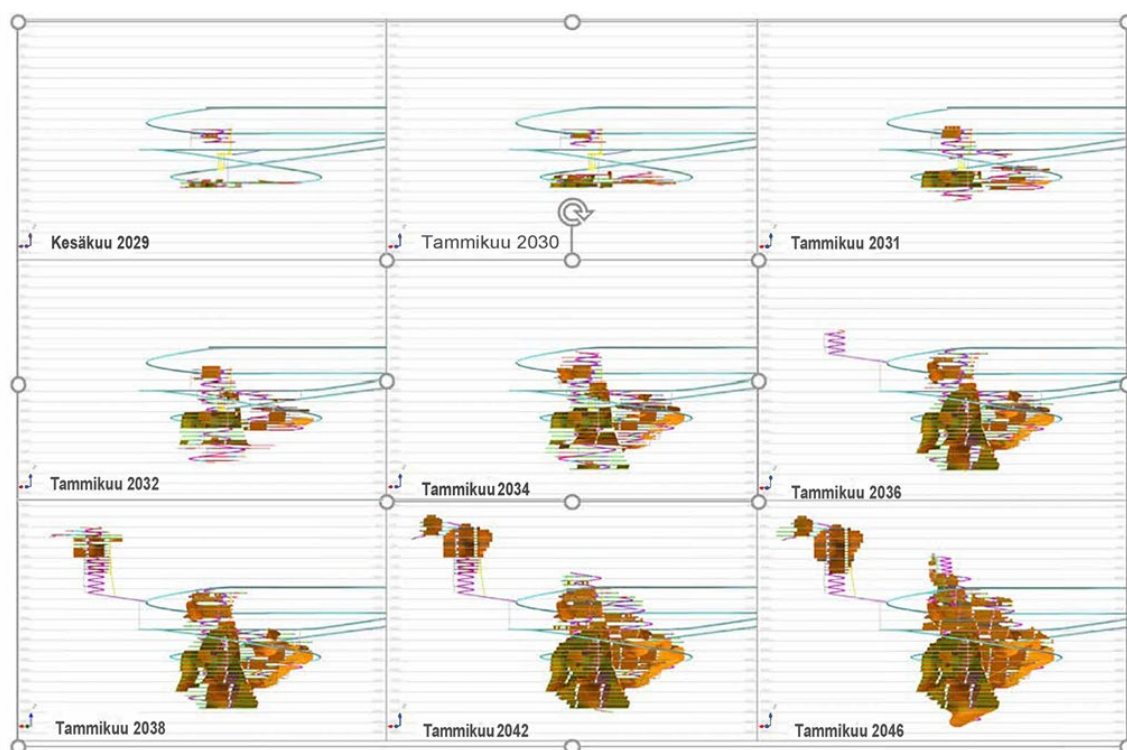
V3 (vuodet 2–3): Malmin louhimiseen käytetään välitaso- ja pengerlouhinnan eri sovelluksia: Käytettävät menetelmät ovat lyhytreikätyttölouhinta-menetelmä, pitkäreikälouhinta-menetelmä sekä näiden yhdistelmä. Malmion sivusuuntaisen alueen ulottuneisuus vaatii huomattavan tarkkaa suunnittelua, jotta esiintymän arvokkaiisiin osiin päästään käsiksi aikaisessa vaiheessa.

V8 (vuodet 4–8): Pääesiintymän ja NE satelliittiesiintymän louhinta. Potentiaalisesti happoa muodostava jäte (PAG-jäte) varastoidaan maanpinnalle. Malmin rikastuksessa syntyvää korkearikkistä rikastushiekkaa varastoidaan korkearikkisen rikastushiekan varastoaltaaseen (HST-allas). Rikastushiekan kuivaläjitysalueen lohko 1 otetaan käyttöön matalarikkisen rikastushiekan varastoimiseksi.



V15 (vuodet 9–15): Pää- ja NE-esiintymien louhinta jatkuu. Vuonna 11 matalarikkisen sivukiven sijoitusalueelle (NAG-alue) on hyödynnetty kokonaisuudessaan ja alue poistetaan käytöstä. Vuoden 13 aikana matalarikkisen rikastushiekan kuivaläjitysalueen lohko 1 suljetaan komposiittipeiterakenteella. Matalarikkisen rikastushiekan kuivaläjitysalueen lohkoa 2 otetaan käyttöön.

V22 (vuodet 16–22): Louhinta jatkuu ja kaivosalueen kunnostamistoimet käynnistyvät. Mahdollisesti happoa muodostava sivukivi sijoitetaan pastatäyttönä maan alla kokonaan vuoteen 15 mennessä, ja korkearikkisen sivukiven sijoitusalue poistetaan käytöstä. Kaivostoiminta saatetaan päätökseen, matalarikkisen rikastushiekan kuivaläjitys lohko 2 suljetaan ja maanpinnalla olevien rakenteiden kunnostaminen alkaa.



Päivämäärät ovat teoreettisia ja tarkoitettu vain havainnoillistamiseen, SRK 2019.

Kuva 4-2 Kaaviokuvaus Sakatin kaivoksen kaivossuunnitelmasta

4.2 SUUNNITELLUT MAANPÄÄLLISET RAKENTEET

Vesienkäsittelyyn liittyvät maanpäälliset rakenteet koostuvat seuraavista:

Vesivarastoallas

Kaivoksen laskeutusaltaat

Korkearikkisen rikastushiekan varastoallas



SAKATIN KAIVOKSEN TOTEUTUSSUUNNITELMA

Rikastushiekka-alue ja laskeutusallas

Matala- ja korkearikkisen sivukiven sijoitusalueet

Hulevesien keräilyallas

Vesivarastoallas: Vesivarastoallas toimii hankkeen pääasiallisena vesivarastona ja vastaanottaa vesijakeita muista kaivoksen ja rikastamon alueen toiminnoista. Rikastusprosessiin ja muihin toimintoihin tarvittava vesi otetaan pitkälti vesivarastoaltaasta. Tarvittaessa vesivarastoaltaan ylijäämävesi johdetaan vesienkäsittelylaitoksen kautta Kitiseen.

Kaivoksen laskeutusaltaat: Laskeutusaltaat sijaitsevat kaivoksen sisäänkäynnin läheisyydessä (5-kilometrisen vinotunnelin sisäänkäynti) ja vastaanottavat maanalaisen kaivoksen kuivanapitovesiä. Laskeutusaltaille pumpattu kaivoksen kuivanapitovesi johdetaan kaivoksen sisäiseen vesikiertoon tai tarvittaessa käsitellään vesienkäsittelylaitoksella ennen johtamista Kitiseen.

Korkearikkisen rikastushiekan varastoallas: Korkearikkisen rikastushiekan varastoaltaalle sijoitetaan rikastusprosessissa syntynyttä korkearikkistä rikastushiekkaa kaivostoiminnan ensimmäisen kahden vuoden ajan. Allas mitoitetaan niin, että sen varastointikapasiteetti riittää sen käyttöänsä aikana muodostuvalle vedelle ja korkearikkiselle rikastushiekalle. Kahden vuoden jälkeen altaalle varastoitu rikastushiekka ja vesi pumpataan pastalaitokselle ja sijoitetaan maanalaisen kaivoksen louhintaperiin ja louhoksiin pastatäyttönä. Kaikki myöhemmin muodostuva korkearikkinen rikastushiekka pumpataan suoraa pastalaitokselle ja sijoitetaan maan alle pastatäyttönä. Kaivostoiminnan päätyttyä korkearikkisen rikastushiekan varastoallas tyhjennettäisiin tyhjennetään vedestä ja suljetaan sulkemissuunnitelman ja Suomen kaivostoimintaan liittyvien lakien ja säädösten mukaisesti.

Rikastushiekka-alue ja laskeutusallas: Rikastusprosessissa syntyvä matalarikkinen rikastushiekka suodatetaan ja sijoitetaan kaivoksen rikastushiekka-alueelle, joka on kuivaläjitäysalue. Rikastushiekka-alueen suotovedet kerätään laskeutusaltaaseen. Rikastushiekka-alue koostuu kahdesta lohkoista, joista ensimmäinen rakennetaan ja suljetaan ennen kuin toisen lohkon toiminta käynnistetään. Sulkemisen aikana molemmat lohkot peitetään komposiittirakenteella. Valuma- ja suotovesien kerääminen jatkuu, kunnes vesi täyttää Suomen kaivostoimintaan liittyvien lakien ja säädösten vaatimukset. Rikastushiekka-altaan suotovedet ohjataan vesivarastoaltaalle. Rikastushiekka-alueen ympärille rakennetaan niskaajat, johtamaan ympäristön valumavedet pois alueelta.

Väliaikaiset sivukivien sijoitusalueet: Sivukiven käsittely arvioidun kaivostoiminnan aikana edellyttää kahta sivukivien sijoitusaluetta (WRD). Korkearikkisen sivukiven sijoitusalueelle varastoidaan väliaikaisesti mahdollisesti happoa muodostava (PAG) sivukivi ennen sen käyttämistä pastatäytössä maan alla. Korkearikkisen sivukiven sijoitusalueen suoto- ja valumavedet kerätään omaan selkeytysaltaaseen. Korkearikkisen sivukiven sijoitusalue poistetaan lopulta käytöstä ja jäljelle jäävä materiaali sijoitetaan maan alle pastatäyttönä. Korkearikkisen sivukiven sijoitusalue ja selkeytysaltaan pohjarakenteet poistetaan ja alue kunnostetaan.

Matalarikkisen sivukivi varastoidaan matalarikkisen sivukiven sijoitusalueelle (NAG-varastoalue), joka sijoittuu rikastushiekka-alueen viereen. Matalarikkisen sivukiven sijoitusalueen suoto- ja valumavedet ohjataan myös rikastushiekka-alueen laskeutusaltaaseen. Matalarikkistä sivukiveä hyödynnetään kaivoksen koko toiminta-ajan rakennusmateriaalina, mikä hitaasti pienentää matalarikkisen sivukiven sijoitusalueen jalanjälkeä. Matalarikkisen sivukiven on arvioitu olevan täysin käytetty ja matalarikkisen sivukiven sijoitusalueen ennallistettu kaivoksen sulkemiseen mennessä.



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

SAKATIN KAIVOKSEN TOTEUTUSSUUNNITELMA

Hulevesien keräilyallas: Tehdasalueella syntyvät hulevedet kerätään piha-alueen selkeytysaltaaseen. Selkeytysaltaan ylijäämävedet ohjataan vesivarastoaltaalle.



5.0 NUMEERINEN MALLINTAMINEN

5.1 JOHDANTO

Sakatin kaivoshankkeen numeerisen pohjavesimallin tavoitteena oli kuvata pohja- ja pintavesisysteemejä Sakatin hankealueella sekä Viiankiaavan suolla, jotta: 1) arvioitaisiin mahdolliset vaikutukset suohon; 2) arvioitaisiin mahdolliset vaikutukset alla olevien glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien pohjavedenpintoihin ja 3) mallinnettaisiin Sakatin kaivoksen kehittämiseen ja toimintaan liittyvät pohjavesivaikutukset paleoproterotsooisessa kallioperässä. Numeeriseksi pohjavesivirtauksen mallinnusohjelmaksi valittiin FEFLOW (DHI 2016), ja Leapfrog Worksin versiota 3.0 (Leapfrog) (Seequent 2019) käytettiin FEFLOW:n syötteeksi vaadittavien geologisten mallien laatimiseen. Leapfrog-malli, jonka Helsingin yliopisto (Salonen ym. 2015; Åberg ym. 2017a, b; Åberg ym. 2019) kehittivät kuvaamaan Viiankiaavan suon glasiaalisia ja fluviaalisia kerrostumia, tuotiin suoraan FEFLOW-malliin, ja SRK:n (2019) kehittämää Leapfrogin geologista mallia paleoproterotsooisesta kallioperästä käytettiin kallioperän kuvaamiseen FEFLOW-mallissa. Lumen sulannan lämpötilan indeksimallia (Vehviläinen 1992) käytettiin kevättulvan aikaisen lumipeitteen sulamisen aiheuttaman pohjaveden muodostumisen arvioinnissa. Numeerinen FEFLOW-malli edustaa luvuissa 3.0 ja 5.0 kehitetyn konseptuaalisen hydrogeologisen mallin muuntamista numeeriseen muotoon, joka mahdollistaa pohjavesivirtauksen mallintamisen. FEFLOW-mallissa kuvataan hydrostratigrafiset vyöhykkeet, hydrauliset parametrit, reunaehdot, hydrauliset korkeudet (vedenpinnat) ja hydrauliset yhteydet akviferien välillä.

5.2 TAUSTA

Helsingin yliopiston tutkijat ovat keränneet tietoja Viiankiaavan suon alapuolella ja sen läheisyydessä olevista glasiaalisista ja fluviaalisista kerrostumista hyödyntäen laajaa kairausaineistoa sekä stratigrafisia leikkaushavaintoja (osio 2.0). Kerrostumista on laadittu 3D Leapfrog-maaperämalli kairaustuloksien, testikuoppien, historiallisen kairausaineiston, moreeniaineiston, geofysikaalisten tutkimusten ja testausaineiston pohjalta. Tätä Helsingin yliopiston geologista Leapfrog-mallia (Salonen ym. 2015; Åberg ym. 2017a, b; Åberg ym. 2019) käytettiin kehitettäessä Stantecin geologista mallia kaivoskohteesta. SRK (2019) kehitti geologisen Leapfrog-mallin kaivoskohteen maaperäkerrostumien alapuolella olevasta paleoproterotsooisesta kallioperästä AA Sakatti Mining Oy:n malminetsinnän kairausaineiston perusteella. Stantecin geologinen Leapfrog-malli rakennettiin yhdistämällä Helsingin yliopiston Leapfrog-malli ja SRK:n Leapfrog-malli.

SRK (2019) teki myös numeerisen MODFLOW-USG-mallin (Panday ym. 2017), joka keskittyi pääosin kaivostoiminnan pohjavesivaikutuksiin kallioperässä kaivoksen suunnittelun tukena ja antoi hyödyllistä tietoa kehitettäessä Stantecin FEFLOW-mallia syvemmistä kallioperän kerroksista. Tämä malli ei hyödyntänyt Helsingin yliopiston geologista Leapfrog-mallia maaperän kerrostumista eikä täten kuvaa suon alla olevien glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien tarkkaa litologiaa tai arvioi tarkasti kaivostoiminnan mahdollisia vaikutuksia näiden kerrostumien pohjavesivarantoihin.

5.3 MALLINTAMISESSA KÄYTETYT OLETTAMUKSET

Pohjavesimallit ovat yksinkertaistuksia luonnosta, joita kehittämällä voi arvioida suunniteltujen toimenpiteiden mahdollisia vaikutuksia pohjavesivarantoihin. Koska numeerisen mallin suppeneminen (konvergoituminen) ja kalibrointi edellyttää yksinkertaistettuja luonnon olosuhteita, kuten tässä tapauksessa geologisia yksiköitä, pohjavedenpintoja ja virtauskuvioita, on tärkeää ymmärtää mallintamisessa käytettyjä



NUMEERINEN MALLINTAMINEN

olettamuksia sekä rajoituksia, joita ne asettavat mallintamisen tuloksille. Numeerisen FEFLOW-mallin kehittämisessä käytettiin seuraavia olettamuksia:

1. Pohjavesimallin tekohetkellä oli 77 kpl ennen vuotta 2016 kairattua malminetsinnän kairareikää tulppaamatta. Kaikkiin kairareikiin on asennettu kuitenkin pintatulppa ja hattu. Avoimet kairareiät voivat toimia pohjaveden kulkuväylinä ja mahdollistaa yhteyden kallioperän ja maaperän kerrostumien välillä. Malminetsinnän kairareiät tullaan sulkemaan ennen kaivostoiminnan aloittamista, ja tästä syystä kyseisiä kairareikiä ei ole sisällytetty numeeriseen FEFLOW-malliin.
2. Muuttumattoman virtauksen mallin (steady state model) kalibrointi perustui ensisijaisesti matalien havaintoputkien (maaperän pohjaveden havaintoputket ja matalat kalliopohjaveden havaintoputket) vedenpintamittauksiin ja seuranta-aineistoon. Syviä kalliopohjaveden havaintoputkia käytettiin rajoitusti mallin kalibroinnissa. Kalibroinnissa ei käytetty seurantakaivoja, jotka näyttivät poikkeavia vedenpintamuutoksia.
3. Reunaehdot ja hydrauliset reunakorkeudet (vedenpinnat) perustuvat numeerisessa mallissa mallintajan arviointiin alueellisen pohjaveden seuranta-aineiston puuttumisesta johtuen. Mallinnusalueen ulkopuolisia havaintokaivoja käytettiin reunaehtoien asettamiseen, silloin kun tämä oli mahdollista.
4. Geologisten mallien kuuluu jo perusolemukseltaan yksinkertaistaa lasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien ja mineralisoituneen kallioperän monimutkaista geologiaa. Tämä yksinkertaistettu geologia sisällytetään Leapfrog-malleihin sekä numeeriseen pohjavesimalliin.
5. Hankealueella on lukuisia paleoproterotsooisien ajan pystysiiroksia. Huomattavimmat siirrokset on sisällytetty numeeriseen virtausmalliin. Siirrostien iän ja hydraulisten ominaisuuksien vaihtelevuuden takia siirrostien kuvaaminen edellyttää niiden geologisten ja hydraulisten ominaisuuksien yksinkertaistamista.
6. Hankealueella on huomattava geologinen rakenne, pohjaruhje, joka koostuu päällekkäisistä paleoproterotsooisista ylityöntösiirroksista. Tämä ylityöntösiirrosvyöhyke sijaitsee esiintymän alapuolella ja rakenne ei risteä esiintymän eikä kallioperän yläpuolella olevien lasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien kanssa. Suunniteltu 5 kilometrin pituinen vinotunneli leikkaa tätä pohjaruhjetta ja kulkee sen läpi. Kairaaminen pohjaruhjeessa on vaikeaa pitkälti rikkoutuneen kallion takia. Tästä syystä myös hydrogeologinen testaus on ollut pohjaruhjeessa rajoitettua. Pohjaruhje on kuvattu ja rakenteen hydrauliset ominaisuudet on määritetty geologisessa Leapfrog-mallissa ja numeerisessa virtausmallissa saatavilla olevan aineiston perusteella.

Viiankiaavan turve on koostumukseltaan vaihtelevaa ja sen paksuus vaihtelee huomattavasti. Turve muuttuu tiiviimmäksi syvemmälle mentäessä eikä toimi varsinaisena pohjavesivarastona. Koska turve tiivistyy syvyyden kasvaessa, se on käytännössä (orsi-)vettä varastoiva yksikkö, jolla on rajoitettu yhteys alla oleviin kerrostumiin. Turpeen arvioitu vedenjohtavuus vaihtelee turpeen ylempien vettä paremmin johtavien osien noin 1 metristä/vrk turpeen tiiviin pohjan alhaisempaan arvoon, joka on noin 0,01 metriä/vrk (SRK 2019). Turpeen mallintaminen numeerisessa pohjavesimallissa on haastavaa. Viiankiaavalla turpeen alapuolella ja ympärille sijoittuu lajittuneita pintakerrostumia, jotka ovat pääosin fluviaalisia kerrostumia lasiaalisen ja fluviaalisen hydrostratigrafisen yksikön ylimmästä osasta.

FEFLOW-mallissa turvekerros on sisällytetty mallikerrokseen 1 lajittuneiden pintakerrostumien kanssa, ja turve käsittää noin 30 prosenttia kyseisestä mallikerroksesta (kerros 1). Koska turve on sisältyä mallikerrokseen 1, se on mallinnettu FEFLOW-mallissa akviferiksi. Näin ollen FEFLOW-mallissa turvetta käsitellään kuin se olisi akviferin osa mallikerroksessa 1, vaikka turve on todellisuudessa erillinen eikä kuulu mallikerroksen 1 lajittuneiden pintakerrostumien pohjavesiesiintymään (akviferi). Mallinnettaessa mallikerroksen 1 alenemaa, saatu vedenpinnan alenema koskee myös turvetta. Todellisuudessa turvekerroksessa ei todennäköisesti esiinny suurta vedenpinnan alenemaa, koska turpeen yhteys lajittuneiden pintakerrostumien kanssa on rajoitettua tiivistä turpeen pohjaosasta johtuen. Täten FEFLOW-malli pitkälti yliarvioi turvekerroksen vedenpinnan aleneman. Vaikka turpeessa saattaa esiintyä



vedenpinnan alenemaa samanaikaisesti kun alenemaa havaitaan mallikerroksen 1 lajittuneiden pintakerrostumien akviferissä on aleneman suuruus vähäisempi kuin FEFLOW-mallissa on arvioitu.

5.4 KONSEPTUAALINEN MALLI

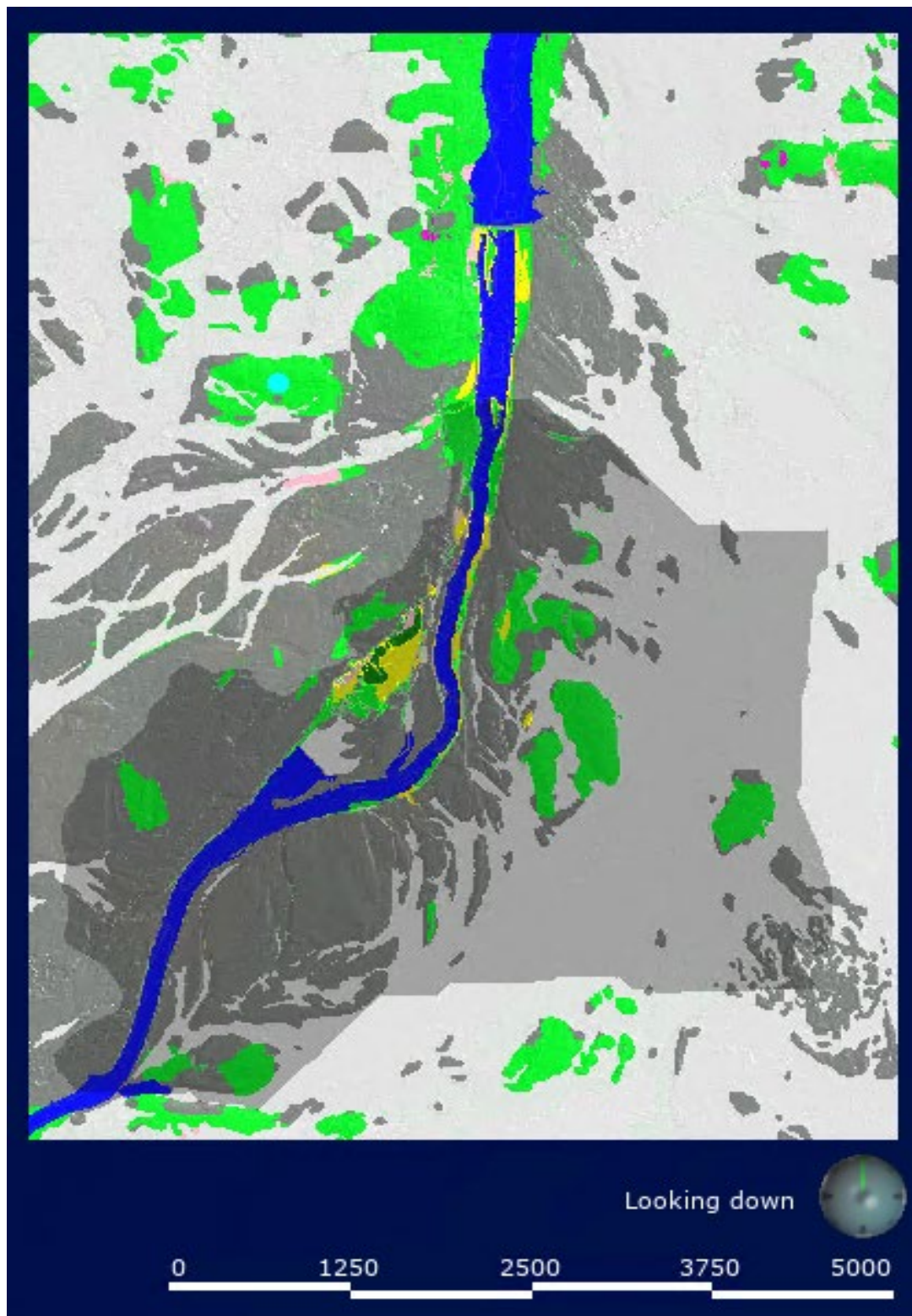
Konseptuaalisen mallin kehittäminen on ensimmäinen olennainen vaihe numeerisen pohjavesimallin valmistelussa. Malli yhdistää kohteen saatavilla olevan geologisen ja hydrogeologisen aineiston ja mahdollistaa hydrostratigrafian ja reunaehtojen tulkitsemisen, jotta ne voidaan siirtää numeeriseen pohjavesivirtausmalliin. Mallintamisen tavoitteiden saavuttamiseksi hydrogeologisen ja numeerisen mallin kehittämisessä malleihin lisättiin saatavilla olevan aineiston puitteissa kompleksisuutta.

Hydrogeologisen mallin kehittämistä helpotti kolmiulotteisen geologisen mallintamisohjelmiston Leapfrog Works® version 3.0 (Seequent 2019) käyttö. Kyseinen mallintamisohjelmisto mahdollistaa kairareikäaineiston (logeissa) tai muissa digitaalisissa muodoissa olevan geologisen ja litologisen aineiston muuntamisen geologisiksi ja hydrostratigrafisiksi yksiköiksi tai kerroksiksi. Leapfrog Works®-ohjelmistoa käytettiin hydrogeologisessa mallissa määritettyjen hydrostratigrafisten yksikköjen kolmiulotteisten (3D) tilavuuksien luomiseen. Tilavuuden määrittelyä varten syötetty aineisto sisälsi LIDAR/DEM-aineistoa pintatopografiasta, kirjallisuusaineistosta saatua tietoa sekä kairareikäaineistosta ja havaintoputkien aineistoista saatua eri litologioiden kontaktipisteitä. Leapfrog Works-ohjelmisto® voi siirtää mallin suoraan FEFLOW-malliin.

Hydrogeologisen konseptuaalisen mallin kehittämisessä käytettiin kahta pääasiallista Leapfrog-mallia ja yhtä rapautuneen kallioperän mallia. Kaksi pääasiallista Leapfrog-mallia ovat Helsingin yliopiston maaperämalli turpeen alapuolella olevista glasiaalisista ja fluviaalisista kerrostumista (Salonen ym. 2015; Åberg ym. 2017a, b; Åberg ym. 2019) ja SRK:n (2019) geologinen malli paleoproterotsooisesta kallioperästä. Helsingin yliopiston Leapfrog-malli sisälsi rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän, joka kattaa kallioperän ylemmät 200 metriä. Rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperäkerroksen ominaisuuksia ei kuitenkaan kuvattu tarkasti Helsingin yliopiston Leapfrog-mallissa. SRK (2019) on sisällyttänyt tiedot rapautuneesta ja rikkoutuneesta kallioperästä Leapfrog-malliinsa. Tämä rapautunut ja rikkoutunut kallioperäkerros SRK:n (2019) Leapfrog-mallissa ei ollut täysin yhteneväinen Anglo Americanin keräämän kenttäaineiston kanssa. Tästä syystä kehitettiin uusi Leapfrog-malli rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperäkerroksen mallintamiseksi Anglo Americanin toimittaman 25 kairareian geologisen aineiston pohjalta.

Helsingin yliopiston Leapfrog-mallia rajattiin, jotta se sopisi FEFLOW-pohjavesivirtausmallin kattamaan mallialueeseen (model domain). Helsingin yliopiston 8 km x 6 km malli, joka esitellään **kuvassa 5-1**, leikattiin sopimaan 17 km²:n Leapfrog-malliin, kuten **kuvassa 5-2** näkyy. EUREF-FIN TM35:n (Åberg ym. 2017a, b) koordinaattijärjestelmää käytettiin Stantecin pohjavesimallia varten kehitetyssä yhdistetyssä Leapfrog-mallissa. Tämä koordinaattijärjestelmä pidettiin Stantecin yhdistetyssä Leapfrog-mallissa, sillä kyseinen koordinaattijärjestelmä oli yhteneväinen muun Anglo Americanin toimittaman aineiston kanssa. Tämä aineisto sisälsi 25 kairareian aineistot, jotka kattoivat rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän pääesiintymällä ja NE-esiintymän osalta.



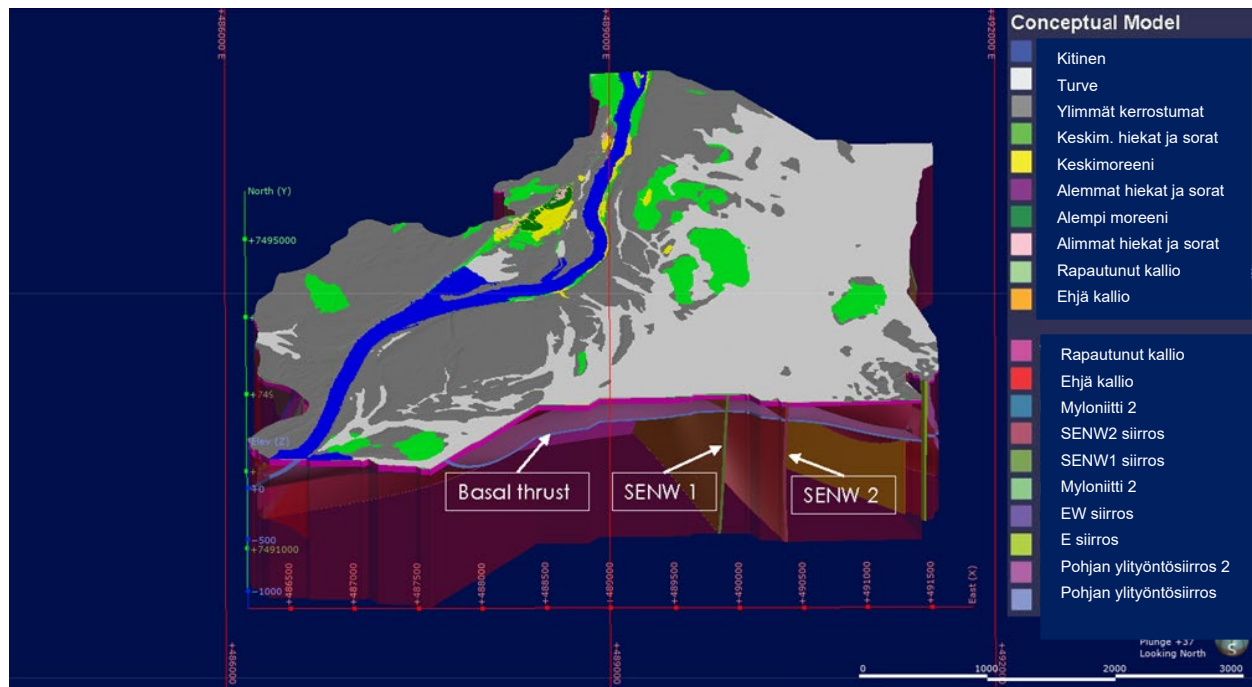


Kuva 5-1 Helsingin Yliopiston Leapfrog mallialue



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERINEN MALLINTAMINEN



Kuva 5-2 Pienennetty Leapfrog-mallialue



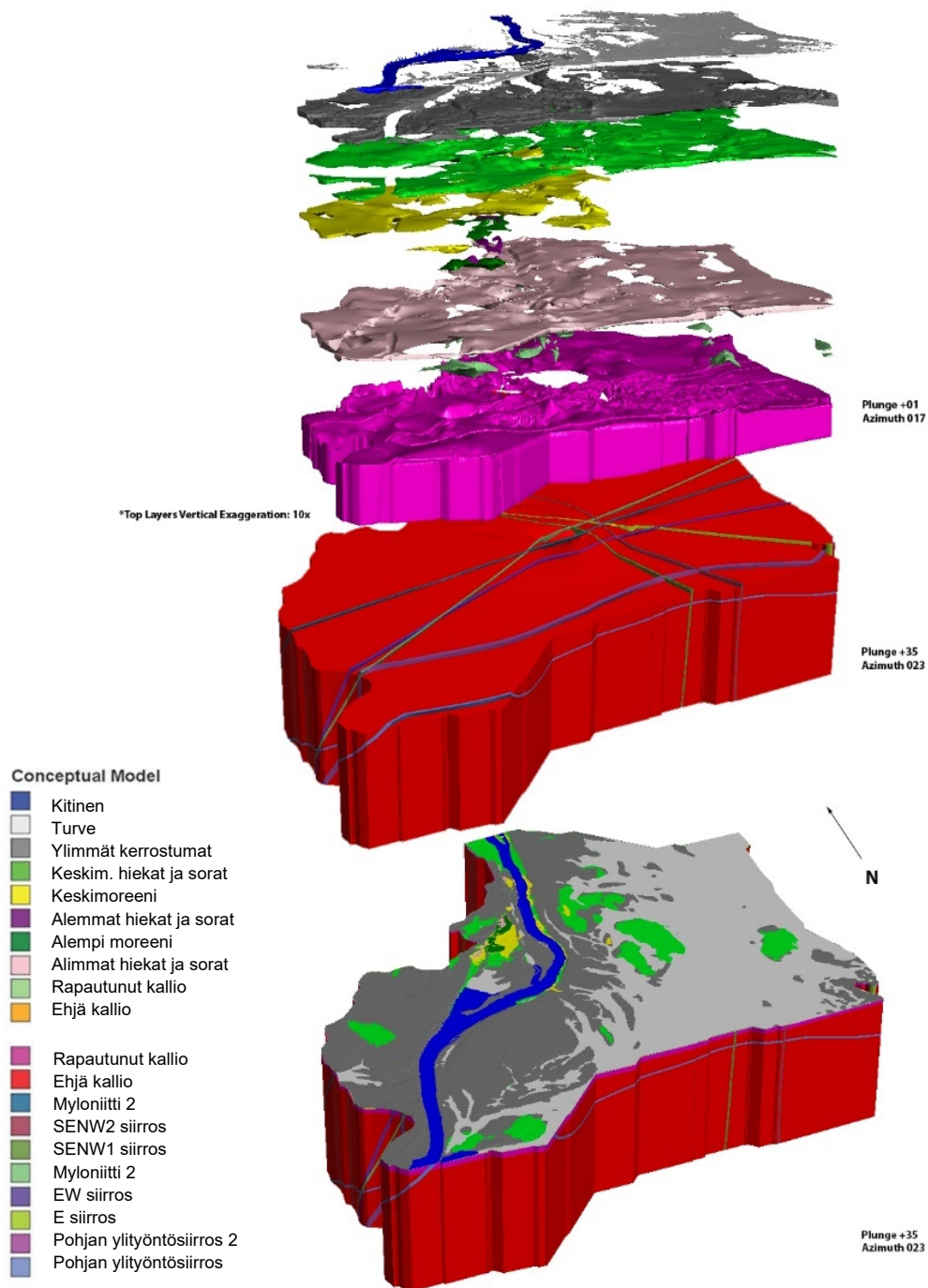
NUMEERINEN MALLINTAMINEN

SRK:n (2019) Leapfrog-malli ehjästä muuttumattomasta paleoproterotsooisesta kallioperästä ja geologisista rakenteista (esim. huomattavista siirroksista ja pohjaruhjeesta) sisällytettiin Stantecin yhdistettyyn Leapfrog-malliin. Käytetty koordinaattijärjestelmä ei ollut yhteneväinen Helsingin yliopiston Leapfrog-mallin kanssa ja SRK:n Leapfrog-malli muunnettiin EUREF-FIN TM35 -muotoon. Yhdistetty Leapfrog-malli sisälsi maaperän kerrostumat, korjatun ja päivitetyn aineiston rapautuneesta ja rikkoutuneesta kallioperästä, johon kuuluvat ylemmät 200 metriä paleoproterotsooisesta kallioperästä, ja alla olevan ehjän muuttumattomasta kallioperän. Malli sisällytettiin numeeriseen FEFLOW-pohjavesimalliin. **Kuvassa 5-3** esitellään rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän yläpuolella olevat maaperäkerrostumat sekä ehjä muuttumaton kallioperä. Siirrokset ja pohjaruhje mallinnettiin geologisesti aina maanpintaan asti, ja kyseiset siirrokset rajattiin rapautuneen ja rikkoutuneen kallioperän pinnan päällimmäiseen kohtaan asti. Siirrokset ja pohjaruhje laajennettiin kattamaan koko Stantecin mallialue. Rakenteiden laajentamisessa käytettiin GTK:n (GTK 2016a-d) alueellista karttaa geologisista rakenteista. **Kuva 5-4** näyttää keltaisella pohjaruhjeen laajuuden, jonka SRK (2019) alun perin mallinsi, ja sinisellä laajennetun siirroksen.



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

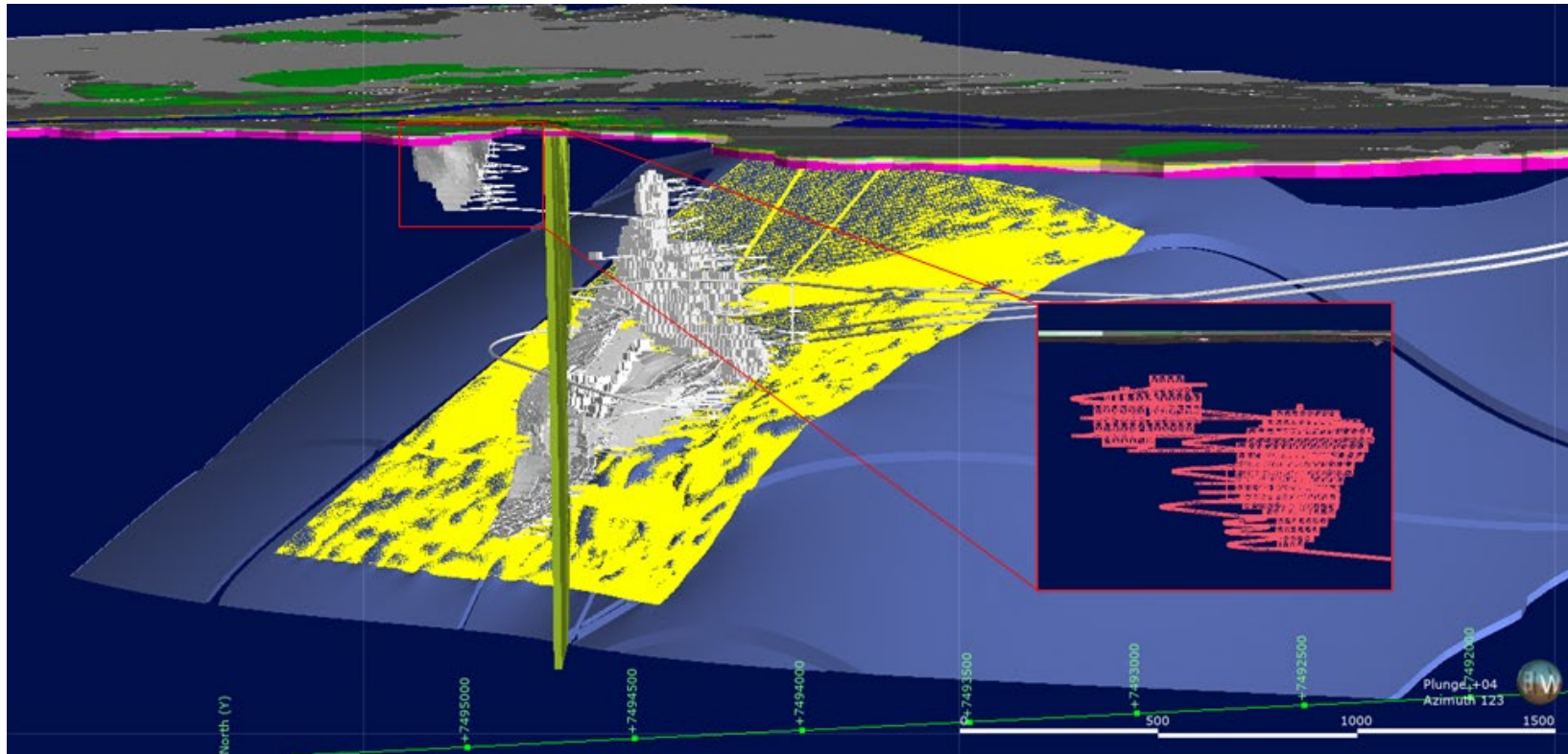
NUMEERINEN MALLINTAMINEN



Kuva 5-3 Yhdistelmä Leapfrog-malli



NUMEERINEN MALLINTAMINEN



Kuva 5-4 Pohjaruhjeen laajuus FEFLOW-mallissa



5.5 LUMEN SULANNAN LÄMPÖTILAINDEKSIMALLI

Sakatin kaivoshanke sijaitsee Lapissa Pohjois-Suomessa alueella, jolle ovat ominaista pitkät talvet ja paksu lumipeite. Pohjaveden muodostuminen, erityisesti alluviaalisten kerrostumien ja matalien pohjavesiesiintymien hallitsemilla alueilla, perustuu ensisijaisesti lumen sulamiseen keväällä. Viiankiaavan turpeen alapuolella sijaitsee glasiaalisia ja fluviaalisia kerrostumia ja näissä kerrostumissa olevan alluviaalisen pohjaveden. Kevättulvan aikaisen lumen sulannan aiheuttaman pohjaveden muodostumisen arvioinnissa päätettiin käyttää lumen sulamisen lämpötilaindeksimallia (Vehviläinen 1992).

Yksi tärkeistä tekijöistä käytettäessä lumen sulannan aiheuttaman pohjaveden muodostumisen mallia on määrittää, vastaako lumen sulannan lämpötilaindeksimallista saatu kausittainen pohjaveden muodostumisnopeus hankealueella havaittuja pohjavedenpintojen muutoksia. Tätä varten lumen kertymästä ja sulannasta kehitettiin malli, johon viitataan nimellä "lumen sulantamalli". Mallin riippumattomien ja riippuvien muuttujien funktionaalisen suhteen kehittämiseksi käytettiin lämpötilan indeksilähestymistapaa (Temperature Index Approach), tai aste-päivämetodia (Degree-Day method). Lumen sulantamallissa käytetyt riippumattomat muuttujat ovat sademäärä, lämpötila, säätiedot ja sääindikaattorit, kun taas riippuvat muuttujat ovat lumen kertymän ja sulannan nopeus. Lumen sulantamalli hankealueesta kehitettiin päivittäistä simulaatiota varten. Lumen kertymä ja maassa oleva lumi laskettiin prosessoimalla päivittäinen sademäärä ja lämpötila aste-päivä-funktiolla. Tämän jälkeen tuloksena saatuja lumen kertymiä verrattiin Sodankylän sääasemalta saatuu aineistoon mitatusta maassa olevasta lumesta.

Lumen sulamismallin soveltaminen

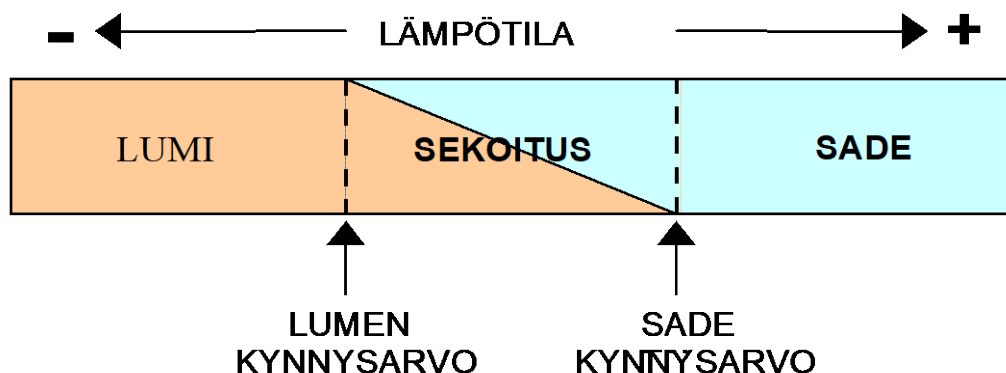
Lumen sulantamallissa käytetään lumen sulannan nopeuden kuvaamiseen yksinkertaista funktionaalista suhdetta. Lumen sulantanopeus on astepäivä-kertoimen (degree-day factor), ja mitatun ilman lämpötilan ja sulannan peruslämpötilan erotuksen funktio. Kaikissa lumen sulantamalleissa käytetään astetunti-faktorin sijaan astepäivä-faktoria, sillä lämpötilamuutosta tarkastellaan päivittäin.

Lämpötilaindeksimallin lumen sulannan kaavoissa lumen sulannan määrä ei ole ainoastaan ilman lämpötilan funktio vaan riippuvainen myös siitä, toteutuuko sade vetenä vai lumena. Sateen muoto määritetään ilman lämpötilan mukaan. Jos ilman lämpötila on alle tietyn kriittisen lämpötilan tai lumen kynnyslämpötilan, sade luokitellaan lumeksi, ja jos ilman lämpötila on yli kriittisen lämpötilan tai veden kynnyslämpötilan, sade luokitellaan vedeksi. Lumen ja sateen kynnysarvojen ei tarvitse olla samat, ja ne eivät ole välttämättä nolla celsiusastetta (0 °C). Excelin ratkaisin-toiminnon avulla etsitään parhaiten sovitettut parametrit mallin kalibroimiseksi. Kalibrointiprosessi kattaa sekä lumen että sateen kynnyslämpötilat muiden mallissa käytettyjen parametrien lisäksi.

Kun asetetaan kaksi eri kynnysarvo-olettamusta lumi- ja vesisateen erottamiseksi toisistaan, tuloksena on se, että näiden kynnysarvojen välinen lämpötila-asteikko on tuntematon. Jos ilman lämpötila asettuu tälle välille, toteutuva sade on sekoitus vettä ja lunta. Lumisadetta pidetään sekä itsessään että sateeseen sekoittuneena lumen ja veden ekvivalenttina (snow water equivalent). Tiedettäessä lumen ja veden vastaavat ekvivalentit on mahdollista määrittää lumipeitteeseen varastoituneen veden tai maassa olevan lumen määrä. Lumipeitteen fyysinen rakenne koostuu huokoisesta matriisista, jossa lumen sulanta voi pysyä lumirakeiden välissä nestemäisenä vetenä. Näiden välissä olevien tilojen täyttäminen vedellä kasvattaa lumipeitteen tiheyttä ja vesisisältöä. Lumipeite voi pitää rajoitetun määrän vettä, ja tämän kapasiteetin täytyttyä lumen sulanta alkaa virrata alaspäin ja muuttua osaksi lumen sulannan valumaa.

NUMEERINEN MALLINTAMINEN

Lumipeitteen nestemäinen vesi ja molemmat lumen kynnyslämpötilan yläpuolella esiintyvät sademuodot voivat jäätymä uudelleen, kun ilman lämpötila laskee alle jäätymisen peruslämpötilaksi oletetun lämpötilan. Tämä jäätymisprosessi otetaan huomioon tässä mallissa, sillä se lykkää jään muuntumista juokseväksi vedeksi ja vaikuttaa lumen tiheyteen ja lumipeitteen kertymiseen. Jokaisen päivittäisen aika-askeleen kohdalla malli laskee valuman ilman lämpötilan perusteella ja ottaa huomioon sadetyypin, sulamisen ja uudelleen jäätymisen. **Kuvassa 5-5** esitellään sateen muodon konsepti kynnyslämpötilojen näkökulmasta.



Kuva 5-5 Konsepti sateen ilmenemismuodosta suhteessa lumen ja veden kynnyslämpötiloihin

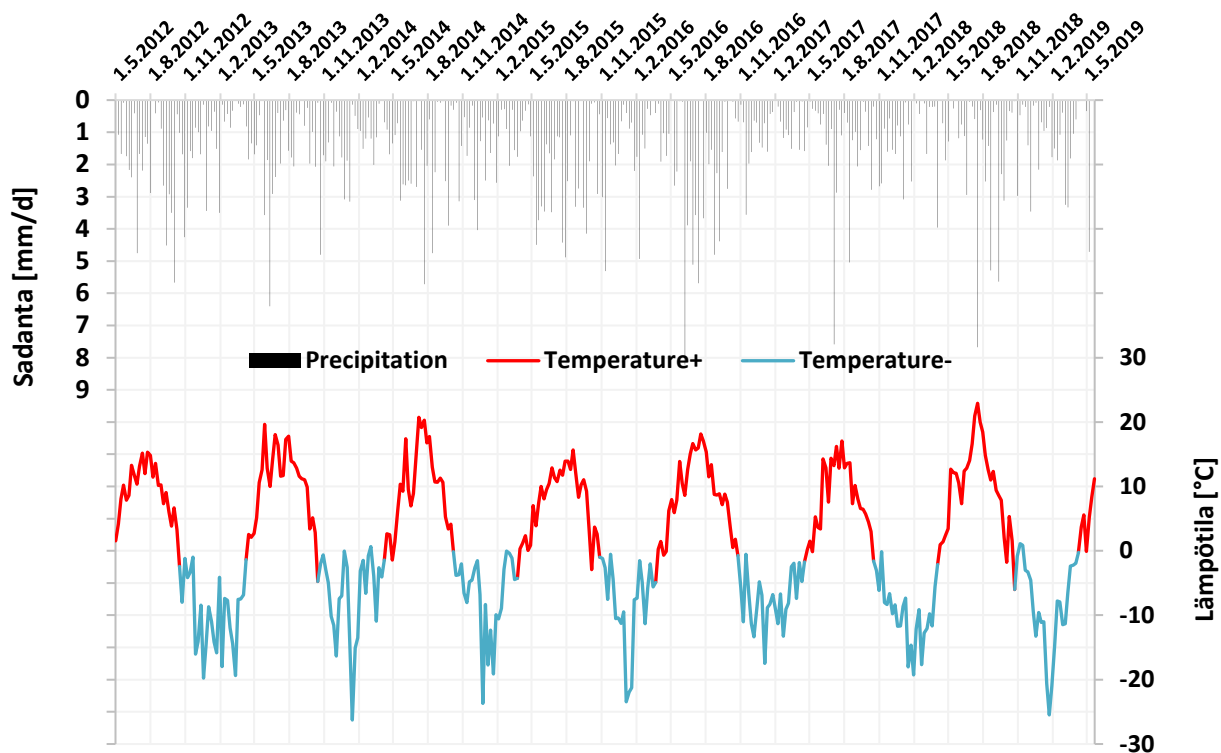
Hankealueen lumen lämpötilaindeksimallin kalibrointi ja testaaminen edellyttää, että sademäärän ja muun ilmastoon liittyvän aineiston, kuten maassa olevan lumen aineisto on saatavilla samalta ajanjaksolta kuin **Taulukossa 5-1**. Tämä aineisto oli saatavilla Sodankylän sääasemalta, esitettynä **kuvassa 5-6**, mikä osoittaa sademäärien olevan korkeimmillaan lämpötilojen ollessa jäätymispisteen yläpuolella. Lumen sulantamalli kalibroitiin Excelin ratkaisin-toiminnolla. Tämä optimointiohjelma on tarkoitettu mallin parantamiseen niin, että mallin parametrit on automaattisesti määritetty etsittäessä osumia havaittujen ja simuloitujen maassa olevien lumimäärien välillä. Tämän optimointijärjestelmän avulla voi ratkaista samanaikaisesti kolme kalibroinnissa valittua tavoitetta: maassa olevan lumen maksimimäärän, nollamäärän (zero yield) alle nollan asteen lämpötilassa ja lumen sulamisen ajan.

Taulukko 5-1 Lumen sulamismallin aineisto

Aseman nimi	Sijainti			Tiedon tyyppi	Mittauksen ajanjakso			Mittauksen tyyppi
	Alue	Leveysaste	Pituusaste		Alku	Loppu	Vuodet	
SDK	Lappi	67.415999°	26.588973°	Sademäärä	2011	2019	8	Päivittäin
SDK	Lappi	67.415999°	26.588973°	Lämpötila	2011	2019	8	Päivittäin
SDK	Lappi	67.415999°	26.588973°	Maassa oleva lumi	2011	2019	8	Päivittäin
SDK	Lappi	67.415999°	26.588973°	Säätiedot	2011	2019	8	Päivittäin
SDK	Lappi	67.415999°	26.588973°	Astiahaihunta	2011	2019	8	Kausittainen

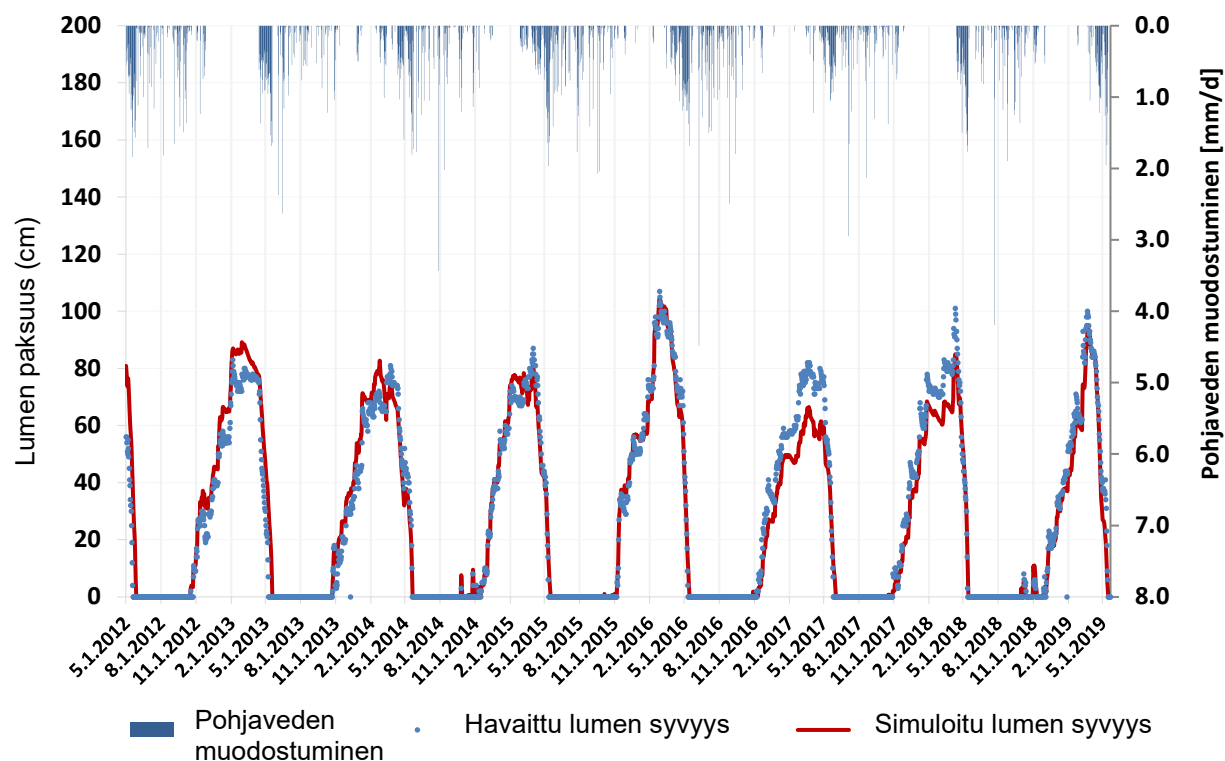
Huomautus: SDK = Sodankylän sääasema





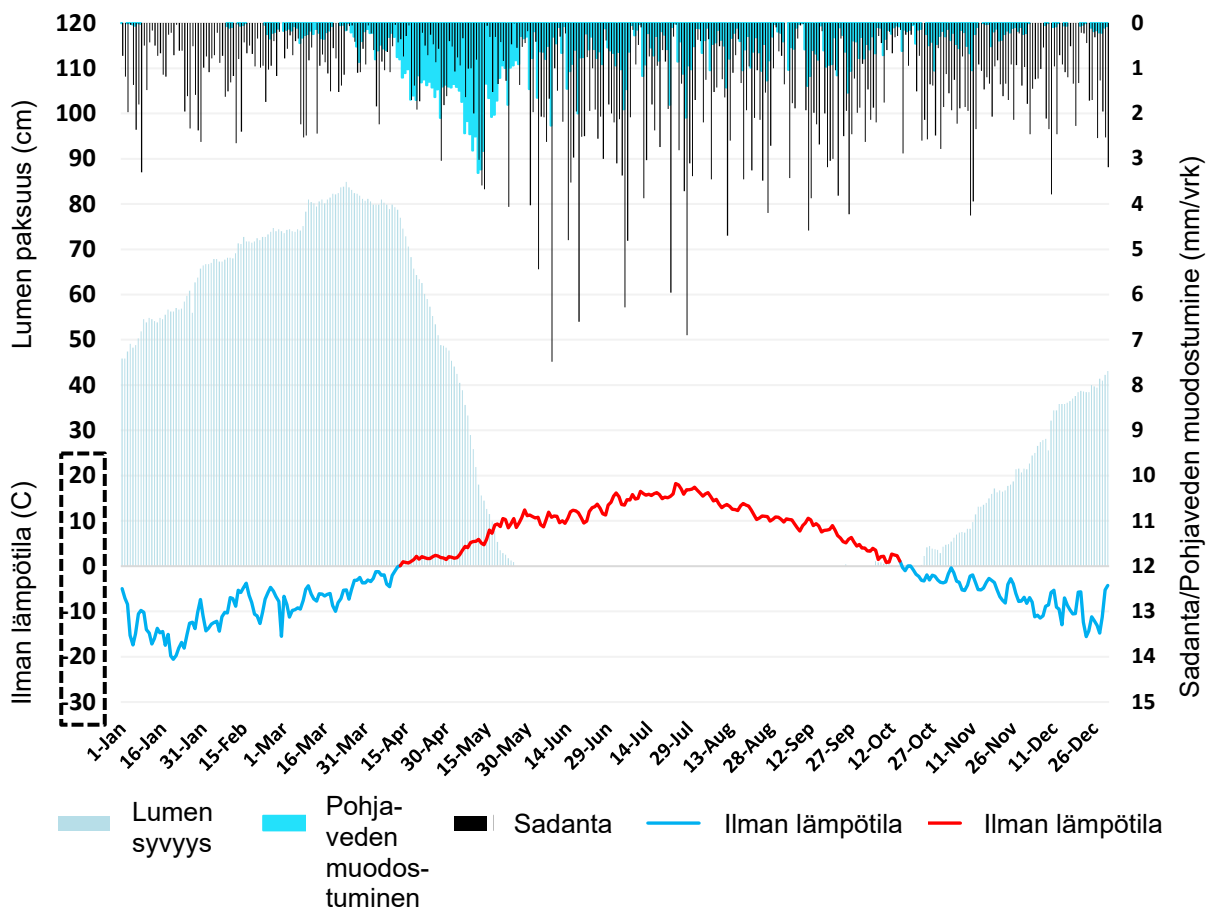
Kuva 5-6 Sodankylän sääaseman mitattu sadanta- ja lämpötila-aineisto

Kuvassa 5-7 esitetään lumen lämpötilaindeksimallista saatu lumen syvyys verrattuna Sodankylän sääasemalta saatua tietoon mitattua lumen syvyydestä. Kuten tämä kuva osoittaa, lumen sulannan indeksimallin kalibrointi Sodankylän sääasemalla mitattuun lumen syvyyteen on melko hyvä. **Kuvassa 5-8** esitellään sademäärien ja pohjaveden muodostumisen keskinäinen suhde kalibroidussa lumen sulannan lämpötilaindeksimallissa. Kuva viittaa siihen, että pohjaveden muodostuminen on huomattavinta myöhään keväällä tai aikaisin kesällä lumipeitteen sulettua ja jälleen kesäkuukausina korkeampien sademäärien aikana. Kaiken kaikkiaan lumen sulantamalli vastasi simuloituja maassa olevan lumen määriä suhteellisen hyvin. Siksi lumen sulantamallista saatua ajallista pohjaveden muodostumisnopeutta käytettiin mallintamaan pohjaveden muodostumisen syötteitä FEFLOW-pohjavesimallissa.



Kuva 5-7 Simuloidut ja mitatut lumen syvyydet sekä pohjaveden muodostumisnopeus





Kuva 5-8 Päivittäisen sadannan keskiarvon, pohjaveden muodostumisen, ilman lämpötilan ja lumen syvyyden välinen suhde

5.6 NUMEERINEN FEFLOW-MALLI

FEFLOW (DHI 2016) on kansainvälisesti käytetty numeerinen pohjavesivirtauksen elementtimallintamisohjelmisto, joka voi mallintaa kolmiulotteisesti pohjavesivirtausta ja aineiden kulkeutumista. FEFLOW valikoitui Sakatin kaivoshankkeen pohjavesivirtauksen simulaatioon sen laajalti dokumentoidun ja hyvin testatun mallintamiskoodin ansiosta. Mallintamiskoodin avulla voi tehdä kehittyneitä simulaatioita alueellisista ja paikallisista pohjavesivirtausjärjestelmistä, sillä se voi simuloida ajallisesti vaihtelevia reunaehtoja vaihtelevilla kolmioverkko-resoluutioilla (triangular mesh resolution) epäsäännöllisellä mallialueella (model domain). FEFLOW:n hilaverkko-ominaisuudet mahdollistavat sen, että malli voi kuvata hydrostratigrafisten yksiköiden monimutkaisia geometrioita ja mallintaa maanalaisen kaivoksen yksityiskohtaisesti. FEFLOW on hyväksytty ja yleisesti käytössä oleva mallintamisohjelmisto kaivosalalla monimuotoisen geologian ja monimutkaisten louhosten mallintamiseen.

FEFLOW sallii joustavan 3D-kolmioverkon luomisen käyttämällä jäsentelemättömiä, mukautuvia, pintageometrian mukaisia hilaverkkoja, jotka voivat tarkentua kiinnostuksen kohteena olevalla alueella (tai alueilla) verkon tiheyden tai monikulmioiden reunojen avulla. FEFLOW osaa myös ratkaista numeerisia

NUMEERINEN MALLINTAMINEN

järjestelmiä, jotka kuvaavat luonnonmukaisesti monimutkaisia reunaehdoja, kuten suotopintojen reunaehdoja sekä kaivoksen tuotantotunneleiden seiniä. Lisäksi se osaa määrittää ajallisesti vaihtelevia tai vakaita rajoituksia erityyppisille reunaehdoille ja interpolointijärjestelmille. DHI tarjoaa yksityiskohtaisen kuvauksen FEFLOW-mallintamiskoodista (2016).

Sakatin kaivos Hankkeen kohdalla pidettiin tärkeänä käyttää pohjavesivirtauksen mallintamiskoodia, jolla on FEFLOW:n ominaisuudet, jotta voitaisiin: 1) mallintaa suon alla olevien glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien monimuotoinen litostratigrafia; 2) mallintaa maanalaisen kaivoksen tuotantotunnelien mukainen suotopintojen virtaus (seepage face flow) ja 3) mallintaa pystysiirokset ja pohjaruhje. FEFLOW:n kykyä hyödyntää monimutkaista vaihtelevaa ruudukkosuunnittelua ja vaihdella ruudukon tiheyttä kolmessa ulottuvuudessa pidettiin kriittisenä mallinnettaessa Sakatin hankealueen glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien monimuotoista litostratigrafiaa, kallioperän siirroksia, suunniteltua maanalaisista louhosta ja pohjavesisysteemejä. Lisäksi koodin valinnassa otettiin huomioon FEFLOW:n tunnetut ominaisuudet ja kansainvälinen hyväksyntä kaivosalalla. FEFLOW:n käyttö pohjavesivirtauksen mallintamisessa Sakatin hankkeessa kuvataan tarkemmin seuraavissa osioissa.

5.7 MALLIVIRHE

Numeerisissa pohjavesimalleissa on aina sisäistä mallivirhettä, joka johtuu mallien käyttämisestä numeerisista menetelmistä niiden arvioidessa osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, jotka kuvaavat pohjaveden virtausta ajan ja tilan funktiona. Termi "mallivirhe" viittaa tässä osiossa käytettynä mallin laskemaan aleneman pienimpään määrään tai rajaan, jota voi pitää "luotettavana". Yleisesti ottaen tämä raja on sekä äärellisen elementtimallin (finite element model) että äärellisen erotukseen pohjautuvan mallin (finite difference model) kohdalla noin 0,5 metriä. Stantecin Sakatin maanalaisesta kaivoksesta kehittämässä äärellisessä FEFLOW-elementtimallissa rajana pidetään noin 0,3 metriä perustuen erittäin tarkkoihin spatiaalisiin ja ajallisiin otoksiin, joilla mallinnettiin suunniteltu maanalainen louhos, siirroksia, litologiset yksiköt ja suunnitellussa käytetyt 54 kerrosta. Mallivirhe viittaa täten siihen, että kaikkiin mallin laskemiin alle 0,3 metrin alenema-arvoihin tulisi suhtautua varauksella, sillä mallintamisen näkökulmasta näin pieniä laskettuja alenema-arvoja pidetään "epäluotettavina". Mallin kannalta kaikki alle 0,3 metrin mallivirheen olevat alenema-arvot tarkoittavat käytännössä "ei alenemaa".



6.0 NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

6.1 MALLIN ALUE

Sakatin kaivoshankkeen FEFLOW-mallin mallialue (model domain) suunniteltiin niin, että: 1) mallialue sisälsi suunnitellun maanalaisen louhoksen ja 2) mallialueen reunat olivat tarpeeksi kaukana suunnitellusta kaivoksesta ja Viiankiaavan suosta, jotta reunaehdot eivät vaikuttaisi suunnitellun kaivostoiminnan aiheuttamien mahdollisten pohjavesivaikutusten mallintamiseen. Helsingin yliopiston (Salonen ym. 2015; Åberg ym. 2017a, b; Åberg ym. 2019) ja SRK:n (2019) aikaisemmat mallit käsittivät suuria mallialueita, joissa oli joko vähän pohjavesien seuranta-aineistoja tai nämä puuttuivat kokonaan. Helsingin yliopiston mallissa oli laaja mallialue, 6 kilometriä itä-länsisuunnassa ja 8 kilometriä pohjois-eteläsuunnassa. Malli suunniteltiin kattamaan ja mallintamaan suunnitellun Sakatin kaivoskohteen sijaan suurempi osuus pleistoseenisistä glasiaalisista ja fluviaalisista sedimenteistä. SRK:n MODFLOW-USG-malli käytti noin 320 neliökilometrin mallialuetta, joka kattoi laajoja alueita ilman olemassaolevaa havaintokaivojen aineistoja. Molempia mallialueita pidettiin Sakatin hankkeen maanalaisesta kaivoksesta aiheutuvien mahdollisten pohjavesivaikutusten mallintamisen näkökulmasta suurempina kuin on tarpeen.

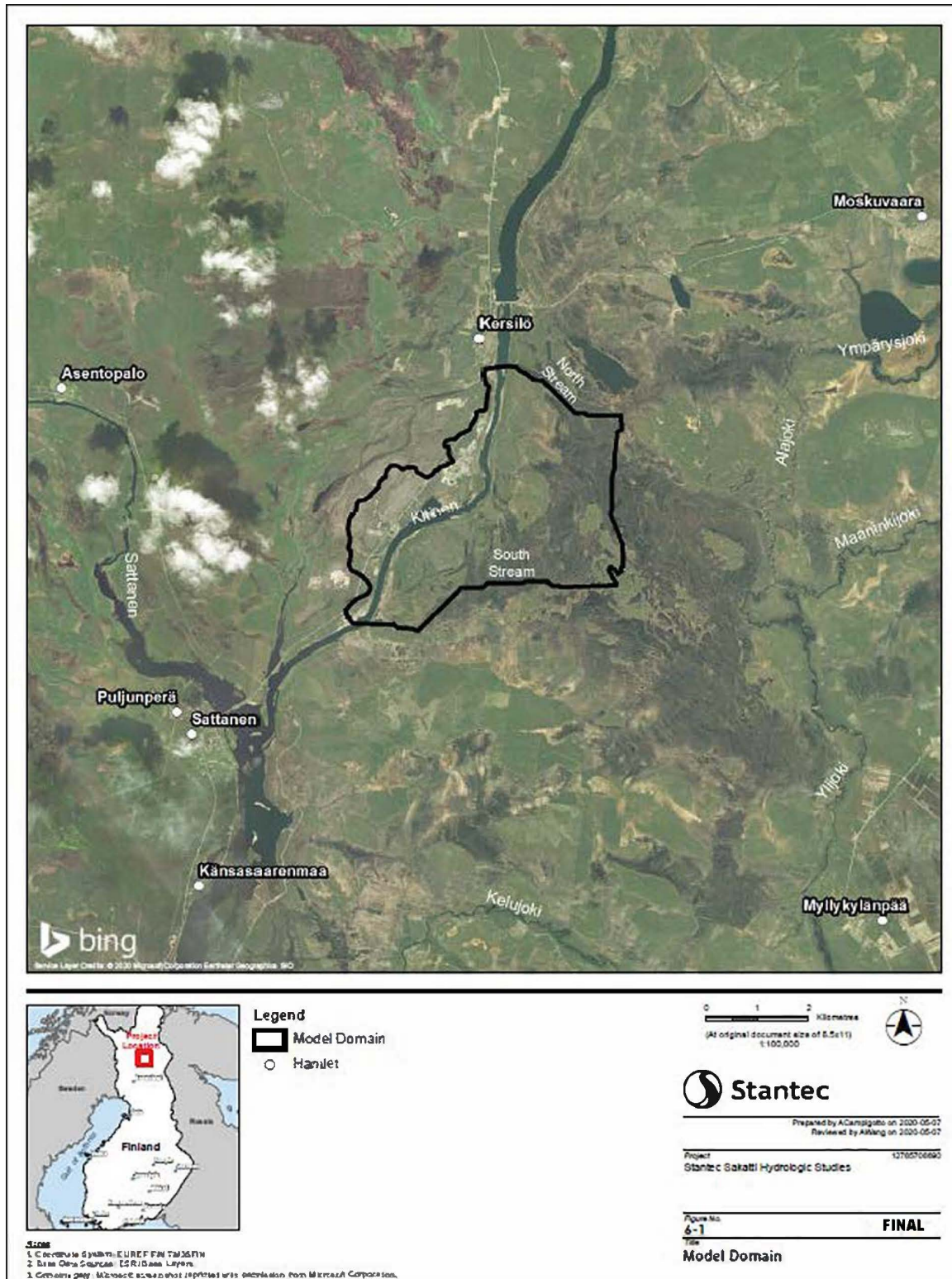
FEFLOW-mallin mallialue Sakatin hankealueesta mitoitettiin niin, että se sopii vaaka- ja pystysuoran hilaverkon tarkentamiseen, mikä on tarpeellista kuvattaessa suunniteltua maanalaista kaivosta, paleoproterotsooisia geologisia rakenteita, yllä olevan Viiankiaavan suon pleistoseenisia glasiaalisia ja fluviaalisia kerrostumia ja kalibroinnin kohteena olevia havaintokaivoja mallissa. FEFLOW-mallialueen pienentämiseksi käytettiin digitaalista korkeusmallia (DEM) ja Watershed Delineation -työkalua ArcGIS:n versiossa 10.6 (ESRI 2016). Valuma-alueen määrittelyn simulaatio tuotti topografian korkeustiedot, jotka ovat lähempänä kaivosaluetta kuin kummassakaan aikaisemmassa mallialueessa. Uusi mallialue seurasi näitä topografisia korkeuksia ja päätteli vedenjakajat läntisillä ja itäisillä reunoilla sekä topografian matalat osat, jotka viittaavat ajoittain esiintyviin puroihin pohjoisilla ja eteläisillä reunoilla. FEFLOW-mallialueen maantieteellinen sijainti esitellään **kuvassa 6-1**. FEFLOW-mallialue on kokonaisuudessaan 17 km². **Kuvassa 6-2** esitellään FEFLOW-mallialue sekä turpeen levinneisyys Viiankiaavan suolla.

6.2 REUNAHDOT

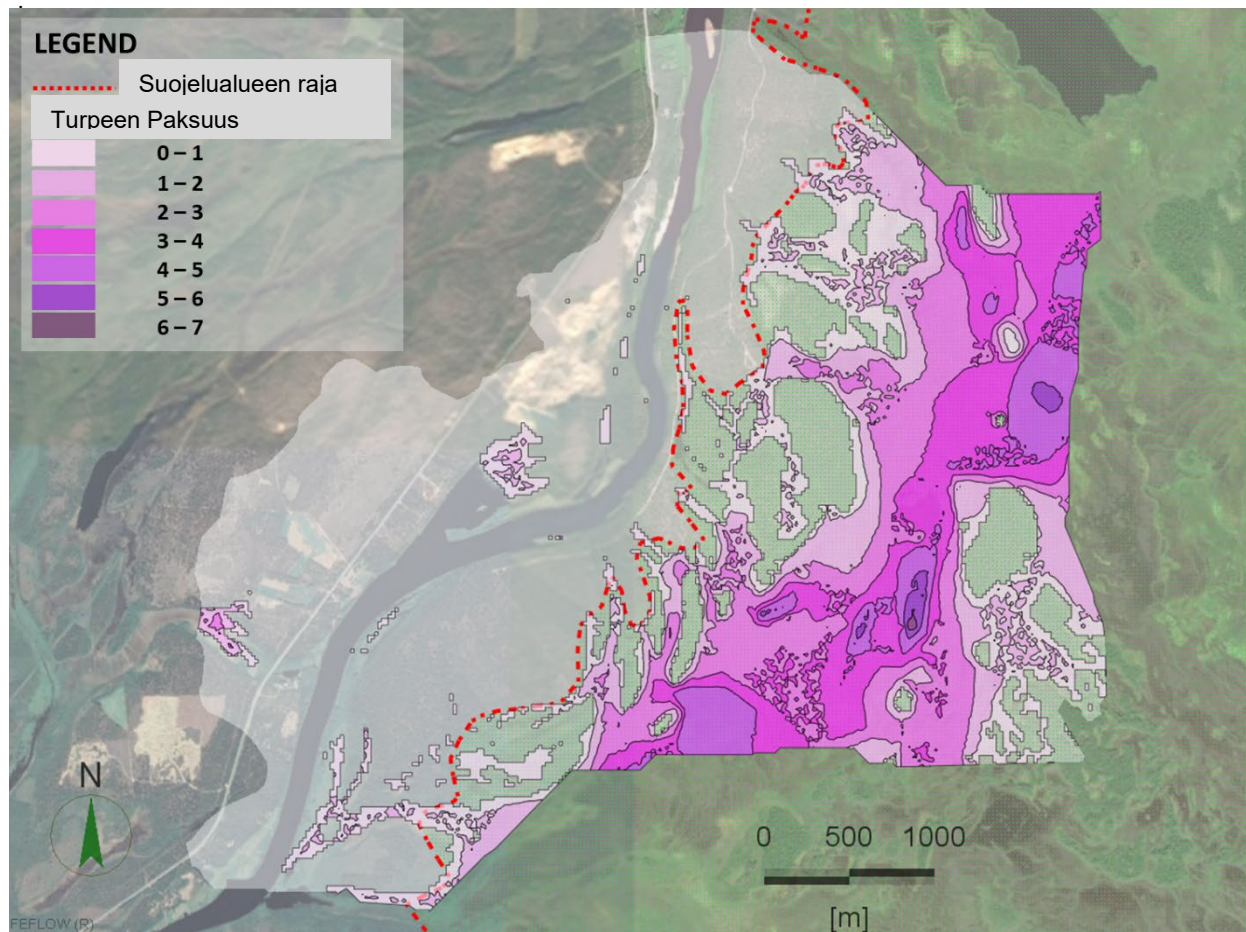
Pintavedenjakajat itäisillä ja läntisillä mallialueella määritettiin numeerisessa FEFLOW-mallissa virtausta sisältämättömiksi reunaehdoiksi (no-flow boundary condition). Pohjoiselle ja eteläiselle reunalle asetettiin vakiodut pohjaveden korkeudet reunaehdoiksi (constant hydraulic head boundary condition). Pohjavesien pinnantasojen realistinen määrittäminen ja reunavaikutusten ehkäiseminen edellytti pohjaveden korkeuksien vaihtelua 3 metriä ja 1 metri topografian alapuolella pohjoisilla ja eteläisillä reunoilla, tässä järjestyksessä.

Osiossa 5.5 esiteltyä arviota pohjaveden muodostumisen keskiarvosta tarkennettiin muuttumattoman virtauksen mallin (steady state model) kalibroinnissa. Ajan mukaan vaihteleva pohjaveden muodostuminen vuosina 2012–2019 (ks. osio 5.5) otettiin käyttöön muuttuvan virtauksen mallin (transient model) kalibroinnissa. Nämä pohjaveden muodostumisnopeudet asetettiin koko mallinnusalueelle, lukuun ottamatta Kitisen joen aluetta ja mallin pohjoisia ja eteläisiä reunoja.





Kuva 6-1 FEFLOW-mallin alueen sijainti



Kuva 6-2 FEFLOW mallin alue (vaalea läpinäkyvä) ja turpeen paksuuden jakauma kerroksessa 1

Tarkka arvio suunnitellun kaivostoiminnan pohjavesivaikutuksista edellytti suotopintojen reunaehtojen (seepage face boundary conditions) määrittelyä vinotunnelin ja tuotantotunneleiden kohdalla. Suotopinta edustaa tiettyä vapaan pinnan ehtoa malliin määritetyssä geometriassa (esim. suunniteltu maanalainen kaivos). Nämä suotopintojen reunaehdot mahdollistavat veden purkautumisen tuotantotunneleihin, silloin kun pohjaveden korkeus (painetaso) on suurempi kuin tunnelin seinämien korkeus (merenpinnasta). Nämä suotopintojen reunaehdot esitetään **kuvassa 6-3** sinisin ympyröin valkoisilla rajoilla. Suotopintojen reunaehdot, joiden modulaatiefunktio on jatkuva simulaatio siirryttäessä yhdestä kaivoksen kehittämisvaiheesta toiseen, esitellään **kuvan 6-3** oikean alakulman lisäosiossa.

FEFLOW-mallin rasitusjaksoihin (stress periods) viitataan aika-akseleina. Kalibrointijaksoa (2012–2019) ja kaivoksen käyttöä aikaista simulaatiojaksoa (22 vuotta) käytettiin määrittäessä mallintamiseen tarvittu sopiva määrä aika-askeleita. Näistä jaksoista tehtiin tarpeeksi tarkka diskretointi, jotta saatiin kuvattua rasituksen ja korkeusjakaumien kompleksisuusaste kalibrointi- ja simulaatiojaksojen ajalta.

Kuvassa 6-4 esitellään päivittäiset, viikoittaiset ja kuukausittaiset pohjaveden muodostumisnopeudet. Korkeita, yli 13 mm/vrk (alin kaavio) muodostumisnopeuksia voi verrata kuukausittaisiin 3 mm/vrk (ylin kaavio) aika-askeliin. Pohjaveden muodostumisnopeudet päivittäisin aika-askelin voisivat tuottaa realistisempia ennustettuja pohjavedenpintoja, mutta näihin aika-askeleisiin menevät laskentatunnit olisivat äärimmäisen pitkiä. Kuukausittaisten aika-askeleiden alhainen pohjaveden muodostuminen puolestaan sivuuttaisi matalan pohjaveden vastedynamiikan suhteessa kevättulvaan ja lumen sulannan pohjaveden muodostumiseen.

FEFLOW-malli, jossa on viikoittaiset aika-askeleet, valittiin tulevan kaivoksen alueella havaittujen pohjavedenpintojen kausittaisten vaihtelevuuden mukaan jotta mallia pystyttiin simuloimaan kohtuullisesti. Viikoittaiset aika-askeleet valittiin myös muuttuvan virtauksen mallin (transient model) kalibrointiin ja suunnitellun kaivostoiminnan ennustamiseen.

6.3 MALLIN KOLMIOVERKKO

Numeeriselle mallialueelle tehtiin diskretointi kohtuullisen pienillä elementeillä, ja kolmioverkko (mesh) luotiin tarkemmalla resoluutiolla, joka oli tarpeellinen arvioitaessa suunnitellun maanalaisen kaivoksen pohjavesivaikutuksia kallioperän pohjavesijärjestelmään ja maaperän pohjaveteen sekä turpeeseen. Kolmioverkon luominen sisälsi kolme askelta: 1) "superkolmioverkon" luominen osion 6.1 mallissa määritetyn mallialueen perusteella sisältäen kaiken 3D-pohjavesivirtausmallin edellyttämän geometrisen tiedon; 2) kaksikulotteisen (2D) kolmioverkon luominen mallialueelle topografisesta laajuudesta ja 3) 2D-kolmioverkon laajentaminen monikerroksiseksi 3D-kolmioverkoksi, joka antaa tarkan kuvan suunnitellusta maanalaisesta kaivoksesta ja geologisista rakenteista.

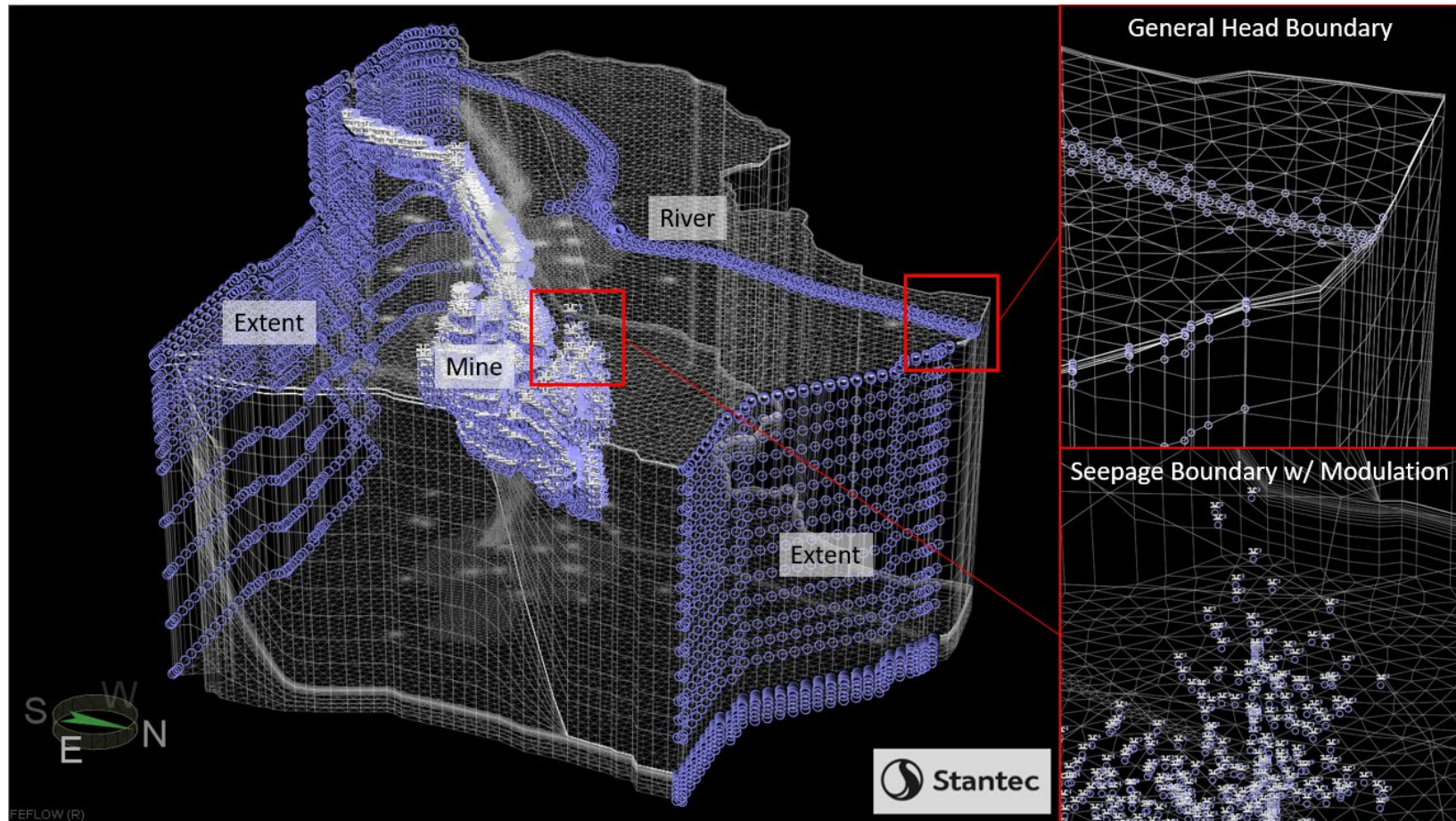
Kaikki reunat valikoitiin niin, että ne sijaitsevat tarpeeksi kaukana suunnitellusta maanalaisesta kaivoksesta, jotta ehkäistään ei-toivottu mallin reunojen ja kiinnostuksen kohteena olevan alueen välinen vuorovaikutus (ts. "reunavaikutukset"). Mallin kolmioverkkoa tarkennettiin nostamalla solmukohtien (node) ja elementtien tiheyttä kaivoksen tuotantotunneleiden läheisyydessä, pääesiintymässä ja NE-esiintymässä, Kitisessä ja havaintokaivoissa, kuten **kuvassa 6-5** näkyy.

Lopullista mallialuetta varten tehtiin 3D-verkko sisältää 1 060 400 solmukohtaa ja 2 063 070 kolmioelementtiä. Elementtien määrä minimoitiin niin pieneksi kuin mahdollista mallin numeerisen tarkkuuden tasapainottamiseksi suhteessa tarvittavaan laskennalliseen työhön. Muotosuhde (elementtien ulottuvuuksien maksimien ja minimien välinen suhde) asetettiin pieneksi, jotta lasketut virtaussuunnat eivät altistu huomattaville virheille, mikä noudattaa Andersonin ja Woessnerin (1992) sekä Istokin (1989) ohjeistuksia.

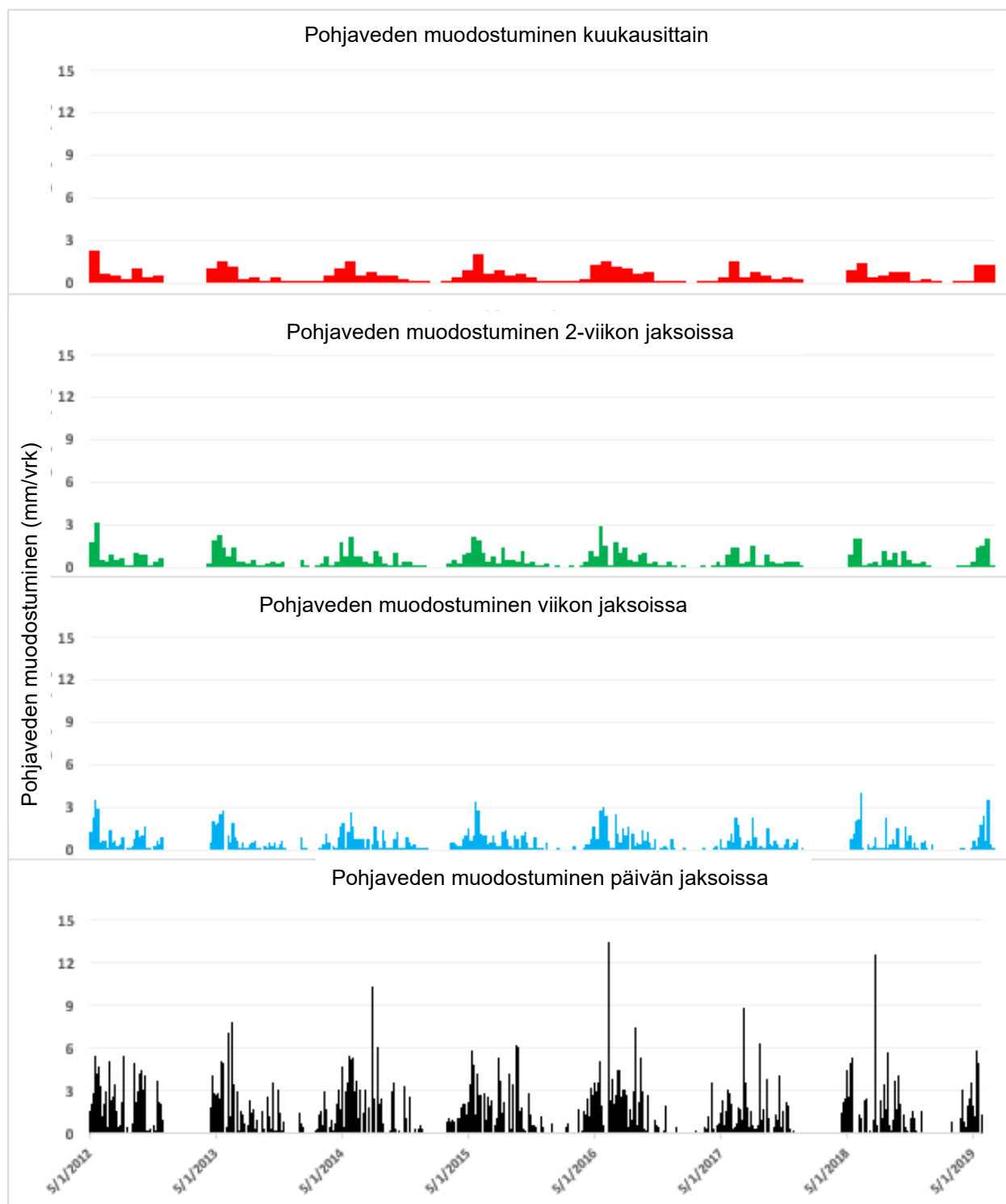


SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-3 3D FEFLOW-malli, jossa näkyvät hydraulisen korkeuden ja suotopintojen (seepage face) reunaehdot

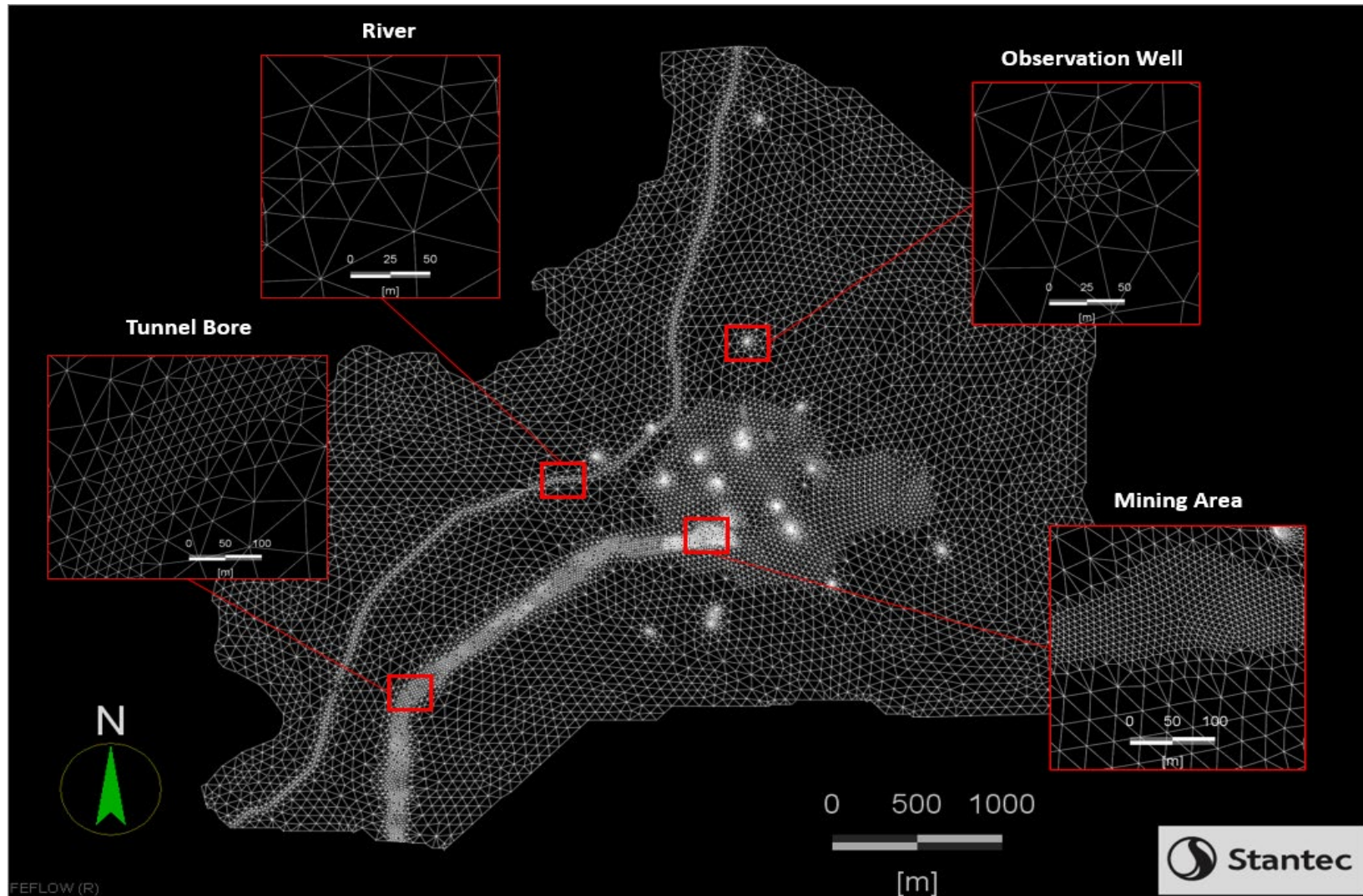


Kuva 6-4 Ajallisesti vaihteleva pohjaveden muodostuminen välillä 2012–2019 eri rasisusjaksoilla



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-5 FEFLOW-mallin superhilaverkko ja tarkennettu hilaverkko Kitisen joen, 5 km vinotunnelin, pääkaivoksen ja seuranta-kaivojen kohdalla

6.4 MALLIN KERROKSET

FEFLOW-malli koostuu 54 kerroksesta. Tämä 54-kerroksinen FEFLOW-malli kuvataan **kuvan 6-6** poikkileikkauksissa. Helsingin yliopiston (Salonen ym. 2015; Åberg ym. 2017a, b; Åberg ym. 2019) kerrosjärjestelmä glasiaalisille ja fluviaalisille sedimenteille siirrettiin ensimmäiseen yhdeksään kerrokseen. **Kuvissa 6-7** and **6-8** esitellään alemman moreenin ja alimpien hiekkojen spatiaalinen ulottuneisuus Helsingin yliopiston Leapfrog-mallista ja miten nämä yksiköt esiintyvät FEFLOW-mallin kerroksessa 8. Sekä Leapfrog- että FEFLOW-malleista tehtiin useita geologisia poikkileikkauksia. **Kuvassa 6-9** (A ja B) esitellään esimerkkejä Leapfrog- ja FEFLOW-malleissa tehdyistä poikkileikkauksista.

Uudelleen muodostettu rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän hydrogeologinen vyöhyke kuvattiin kerroksessa 10. SRK:n (2019) paleoproterotsooinen kallioperäjärjestelmä siirrettiin kokonaisuudessaan FEFLOW-mallin jäljellä oleviin kerroksiin 11–54.

6.5 HYDROSTRATIGRAFISET KERROKSET

Stantecin konseptuaalinen geologinen/numeerinen mallintamislähestymistapa alkoi hydrostratigrafisten vyöhykkeiden ja hydraulisten parametrien määrittämisellä Leapfrog-mallin tekovaiheessa. Neljä päävyöhykettä määritettiin (osio 3.0): 1) Ensimmäinen hydrostratigrafinen vyöhyke kattoi suon turpeen; 2) Toinen vyöhyke sisälsi Viiankiaavan suon turpeen alapuolella olevat glasiaaliset ja fluviaaliset sedimentit, jotka ovat hyvin edustettuina Helsingin yliopiston Leapfrog-mallissa; 3) Kolmas vyöhyke oli päivitetty rapautunut ja rikkoutunut kallioperävyöhyke, jonka ominaisuuksista saatiin tietoa Asiakkaan toimittamasta 24 kairareian aineistosta ja 4) Neljäs hydrostratigrafinen vyöhyke kattoi ehjän paleoproterotsooisen kallioperävyöhykkeen, joka sijaitsee rapautuneen/rikkoutuneen kallioperän alapuolella ja sisältää SRK:n (2019) geologisessa Leapfrog-mallissa kuvatun suunnitellun kaivoksen.

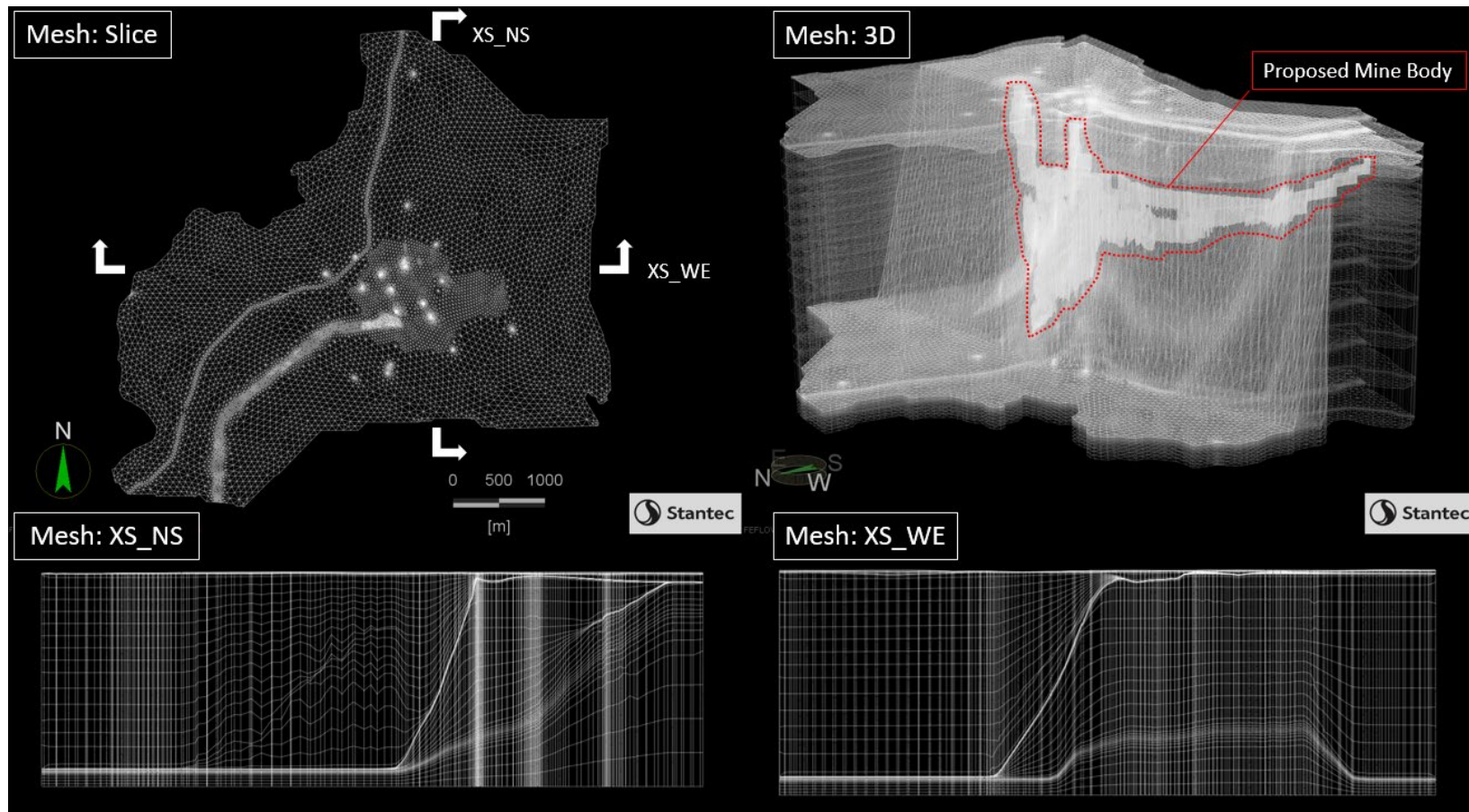
Helsingin yliopiston Leapfrog-mallin turve ja fluviaaliset sedimentit muunnettiin FEFLOW-malliin yhdeksässä mallikerroksessa. FEFLOW-mallin kerrokset ovat vaihtelevan paksuisia eivätkä ole täysin rinnastettavissa Leapfrog-mallin litologisiin kerroksiin. Lisäksi Leapfrog-mallin litologiset yksiköt kaartuvat Kitiseen päin ja niiden suunta vaihtelee alla olevan kallioperän topografian mukaan. Jotkut Leapfrog-mallin litologiset yksiköt myös suippenevat ulospäin yhteen tai useampaan suuntaan. Tästä johtuen FEFLOW-mallin glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien litologisten yksiköiden levinneisyys ei ole yhteneväinen Leapfrog-mallista nähdyn kanssa. **Taulukossa 6-1** on yhteenveto vallitsevista litologisista yksiköistä jokaisessa FEFLOW-mallin kerroksessa, ja FEFLOW-mallista otetuissa **Kuvissa 6-10 – 6-20** näytetään, mitkä litologiset yksiköt sijaitsevat yhdeksässä ylimmässä kerroksessa ja näiden litologisten yksikköjen spatiaalinen levinneisyys jokaisessa kerroksessa.

FEFLOW-mallin päällimmäiset kolme kerrosta edustavat pääosin mallin toimialueen itäisen osan turvetta (kerros 1) ja lajittuneita pintakerrostumia ja ylempää moreenia. Nämä ensimmäiset kolme kerrosta näkyvät **kuvissa 6-10 – 6-12**. Jäljellä olevat FEFLOW-malliin muunnetut Helsingin yliopiston Leapfrog-mallin glasiaaliset ja fluviaaliset sedimentit on sisällytetty kerroksiin 4-9. Rapautunut kallioperä on mallin kerroksessa 10, ja mallin kerrokset 11-54 kattavat ehjän muuttumattoman kallioperän. **Taulukossa 6-1** on yhteenveto kunkin mallin kerroksen pääyksiköistä ja **kuvat 6-10–6-20** esittelevät kunkin mallin kerroksen litologisen yksikön spatiaalisen levinneisyyden.



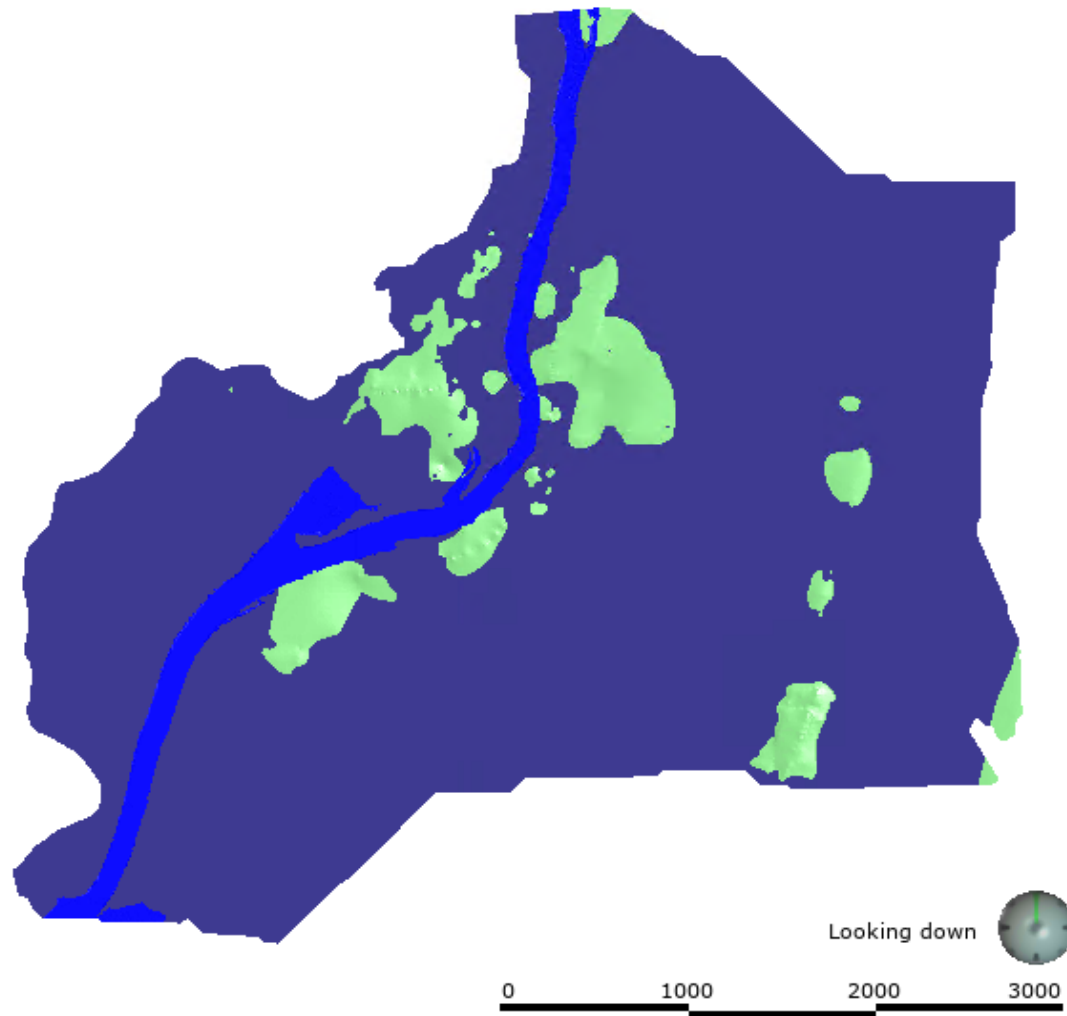
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-6 Poikkileikkausnäkömä superhilaverkosta (vasen yläkulma) ja siirrosten sekä pohjan työntösiirroksen vertikaalisesta diskretoinnista FEFLOW-mallissa

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

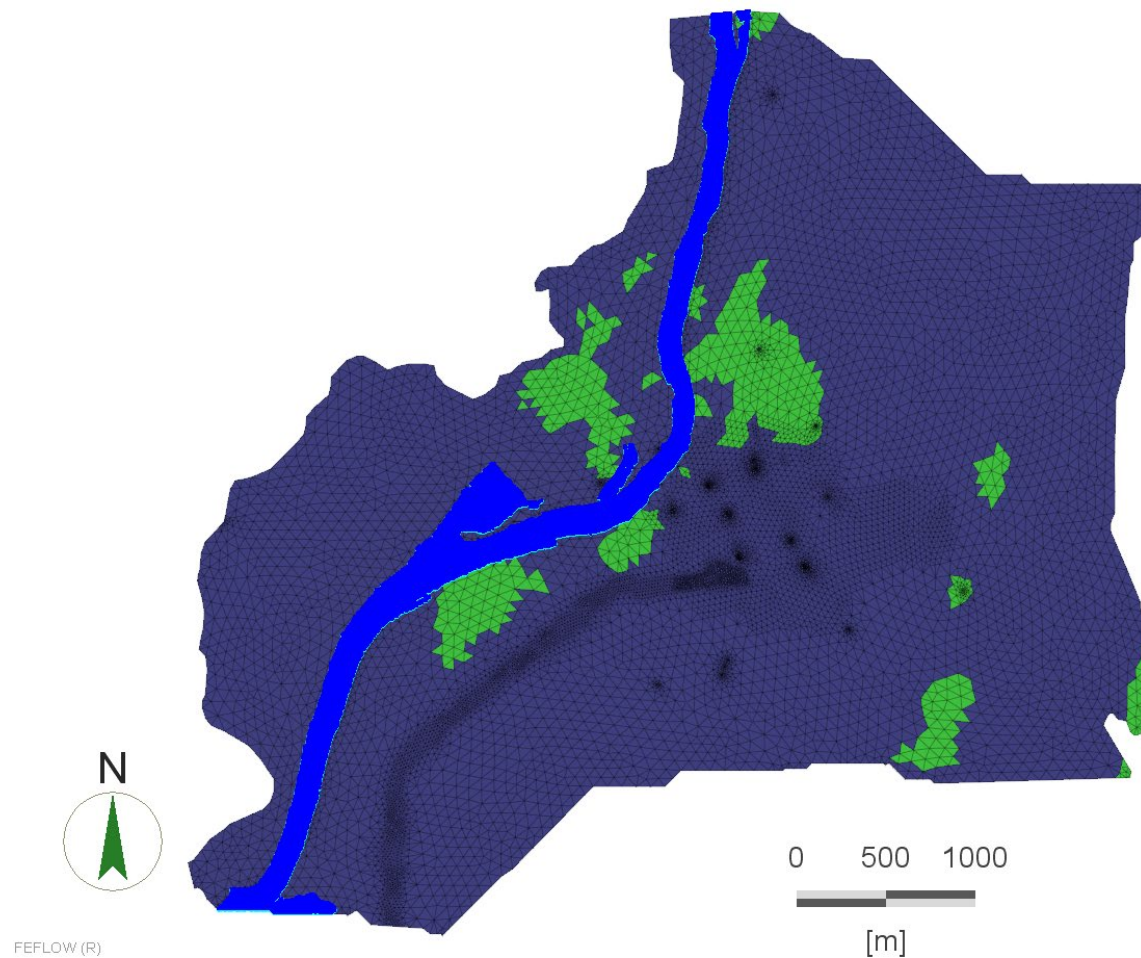


Kuva 6-7 Alemman moreenin (sininen) ja alimpien hiekkojen ja sorien (vihreä) spatiaalinen levinneisyys Leapfrog-mallissa



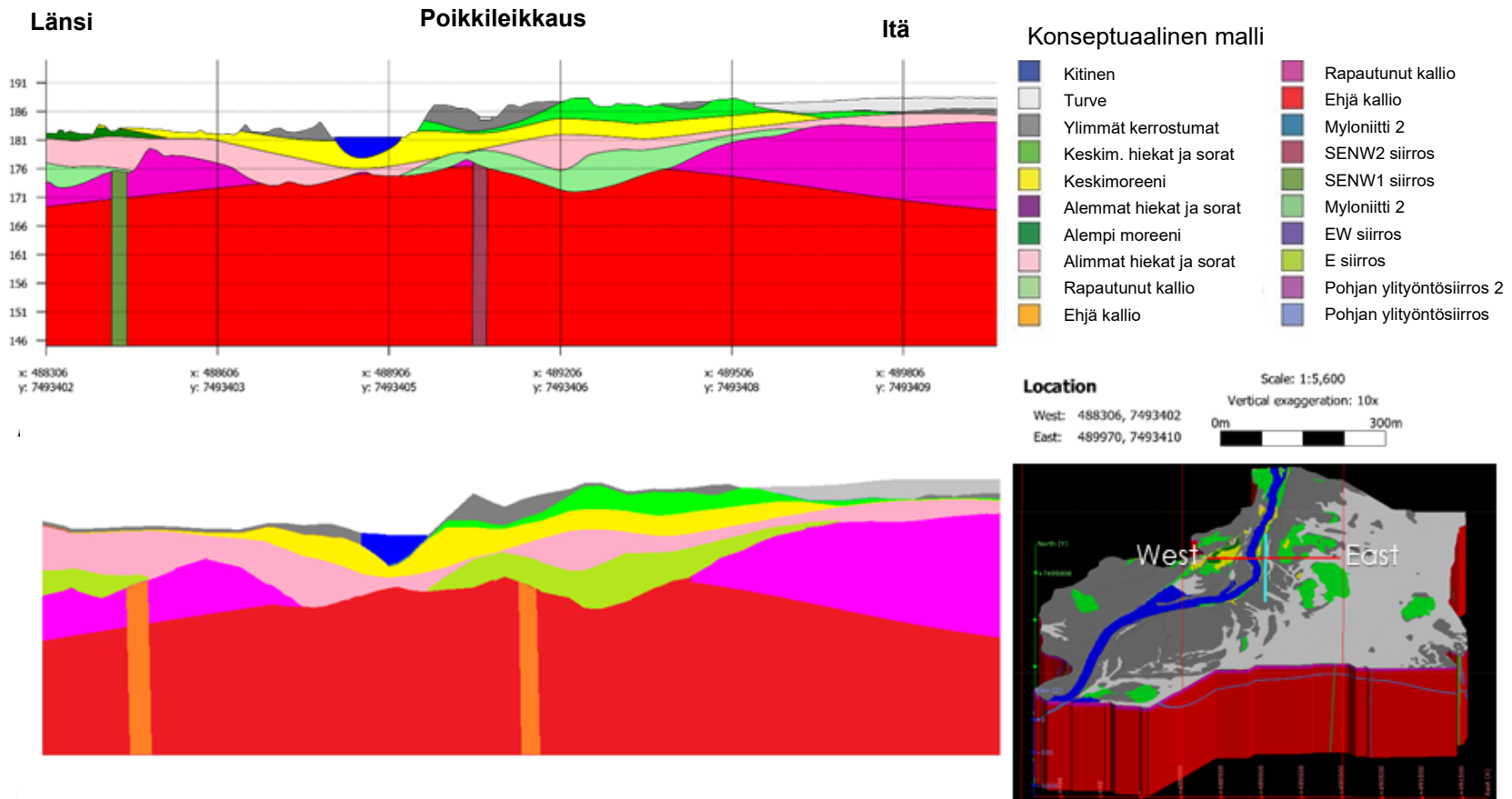
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-8 Alemman moreenin (sininen) ja alimpien hiekkojen ja sorien spatiaalinen levinneisyys FEFLOW-mallin kerroksessa 8

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-9 Poikkileikkauksenäkymä Leapfrog-mallista (A) ja FEFLOW-mallista (B)



Taulukko 6-1 FEFLOW-mallikerrokset

Mallikerros	Vallitsevat litologiset yksiköt edustettuina
1	Kitinen, Turve, Ylimmät kerrostumat
2	Ylimmät kerrostumat, Ylin moreeni
3	Ylin moreeni ja ylimmät kerrostumat
4	Keskimmäiset ja alemmat hiekat ja sorat ja ylempi moreeni
5	Keskimmäiset hiekat ja sorat ja ylempi moreeni
6	Keskimmäiset ja alemmat hiekat ja sorat ja ylempi moreeni
7	Alempi moreeni ja keskimmäiset ja alemmat hiekat ja sorat
8	Alempi moreeni ja alimmat hiekat ja sorat
9	Alempi moreeni ja alimmat hiekat ja sorat
10	Rapautunut kallioperä
11–54	Ehjä kallioperä

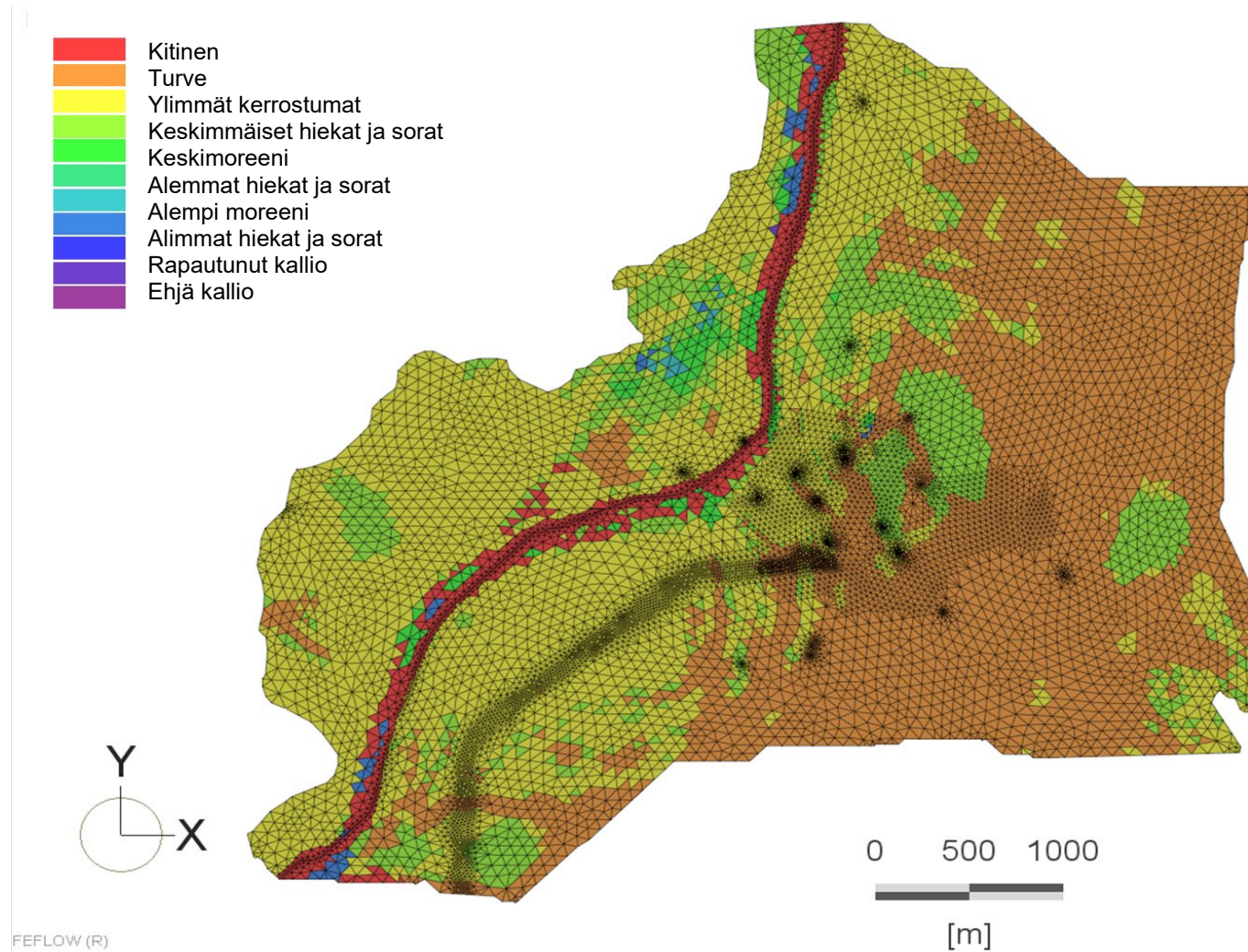
6.6 GEOLOGISET RAKENTEET

SRK:n (2019) Leapfrog-mallin geologiset rakenteet siirrettiin numeeriseen FEFLOW-malliin. Uusi kolmioverkko kehitettiin niin, että se esittää FEFLOW-mallissa pystysiiroksia ja pohjaruhjetta. Tämä menetelmä tuotti olennaisilta osiltaan vertikaalisen verkon, joka noudattaa siiroksien ja pohjaruhjeen kaadetta ja suuntausta. **Kuvassa 6-6** esitetään pohjaruhjeen (alhaalla vasemmalla **kuvassa 6-6**) ja pystysiiroksien (alhaalla oikealla **kuvassa 6.6**) verkko- ja mallikuvio. **Kuvissa 6-21–6-24** esitetään SRK:n (2019) Leapfrog-mallista FEFLOW-pohjavesimalliin siirretyt geologiset rakenteet.

6.7 ALUSTAVAT HYDRAULISET PARAMETRIT

Kohdassa 6.6 kuvatulla tavalla hydrogeologiset vyöhykkeet ja hydrauliset muuttujat määritettiin Leapfrog-mallin kehitysvaiheessa. FEFLOW-mallissa käytetyt hydraulisten muuttujien lähtöarvot litologisille yksiköille maaperän kerrostumissa ja mallinnetuille kallioperän yksiköille tai geologiselle rakenteelle esitetään **taulukossa 6-2**. Glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien ominaisantisuuden (Sy) lähtöarvo-oletus oli 0,2.

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-10 FEFLOW-mallin kerros 1, jossa turve (oranssi), lajittuneet pintakerrostumat (keltainen) ja hajanaisena ylempi moreeni (vihreä)

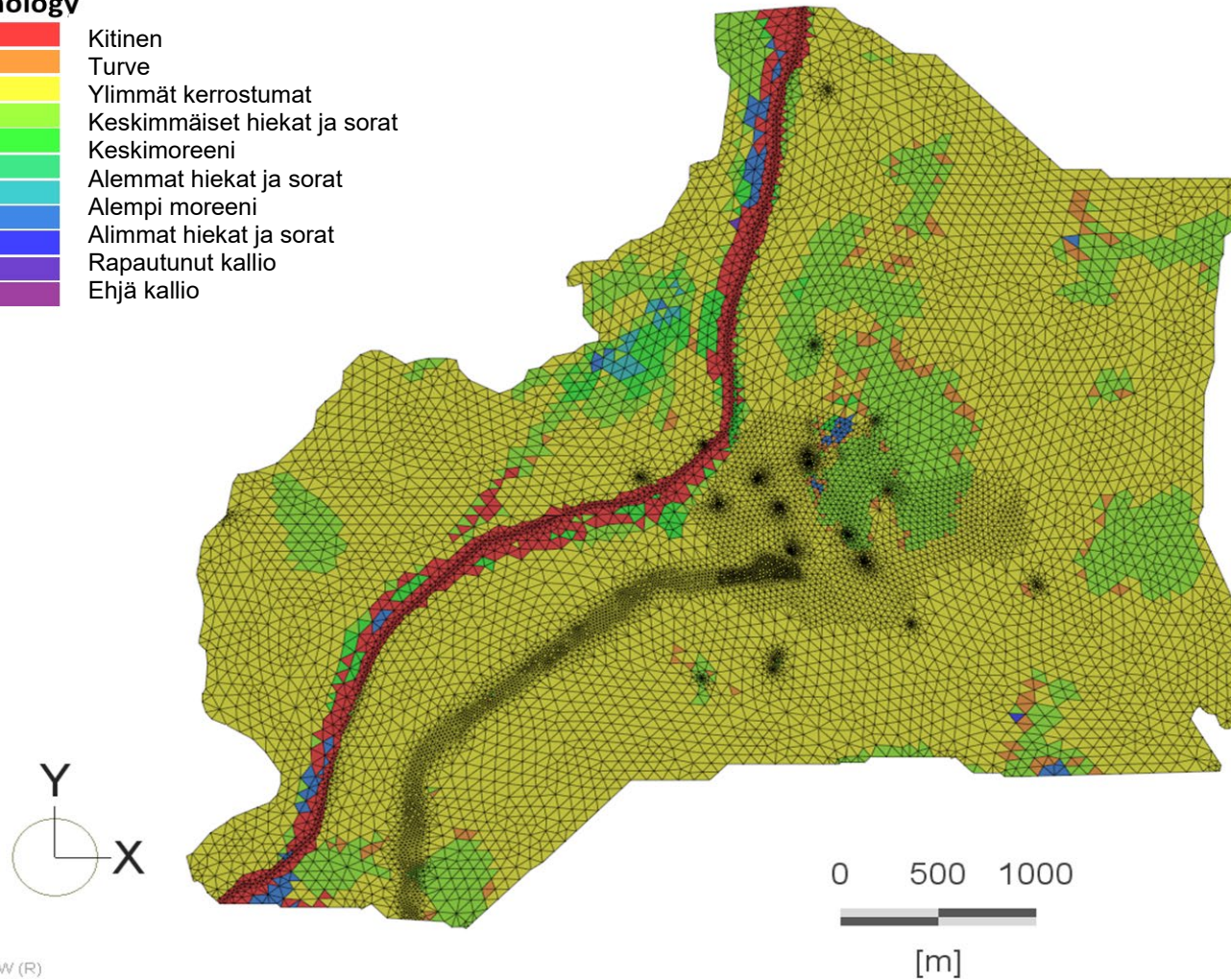


SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

Lithology

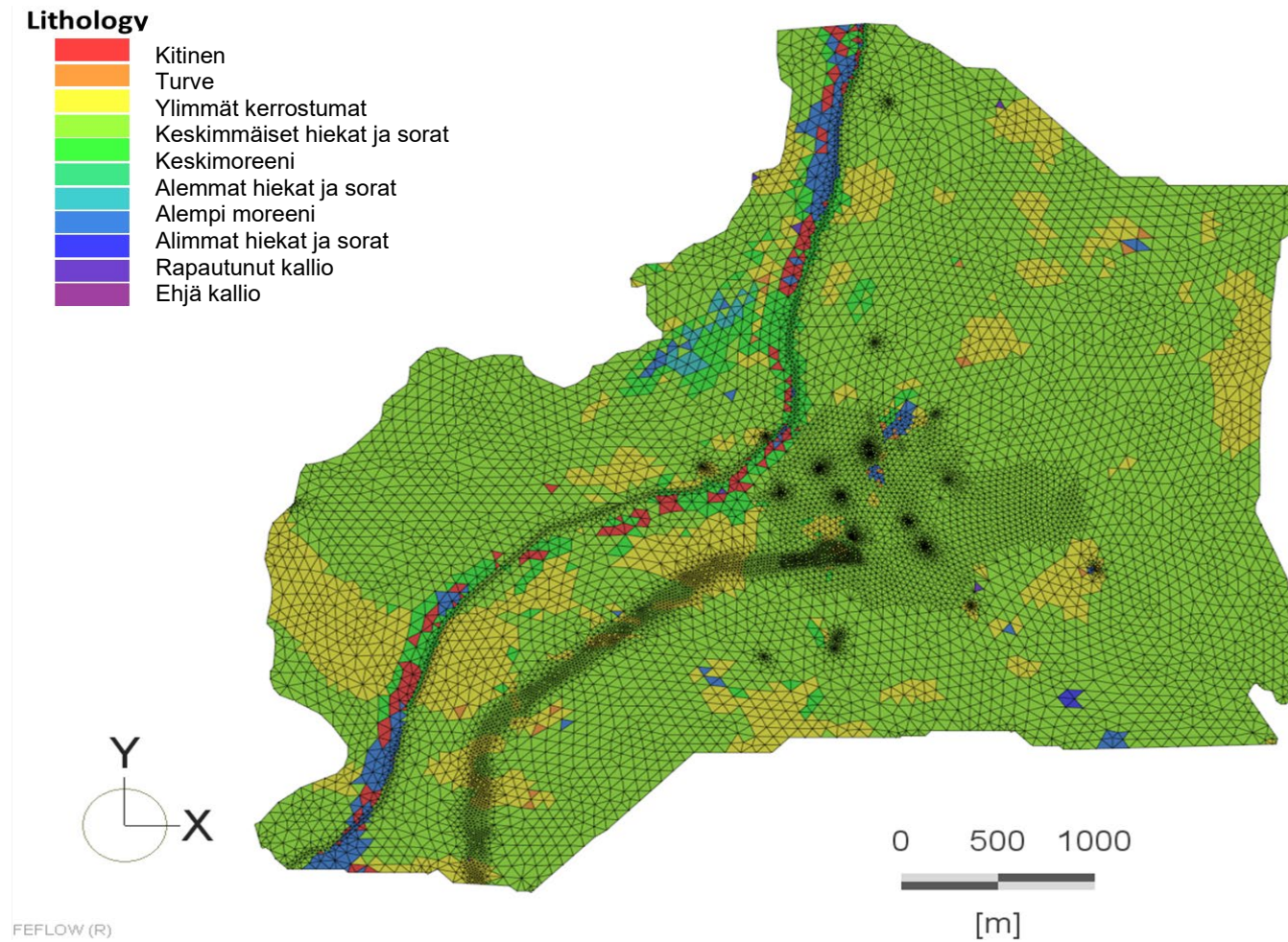
- Kitinen
- Turve
- Ylimmät kerrostumat
- Keskimmäiset hiekat ja sorat
- Keskimoreeni
- Alemmat hiekat ja sorat
- Alempi moreeni
- Alimmat hiekat ja sorat
- Rapautunut kallio
- Ehjä kallio



FEFLOW (R)

Kuva 6-11 FEFLOW-mallin kerros 2, jossa lajittuneet pintakerrostumat (keltainen) ja hajanaisena ylempi moreeni (vihreä)

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

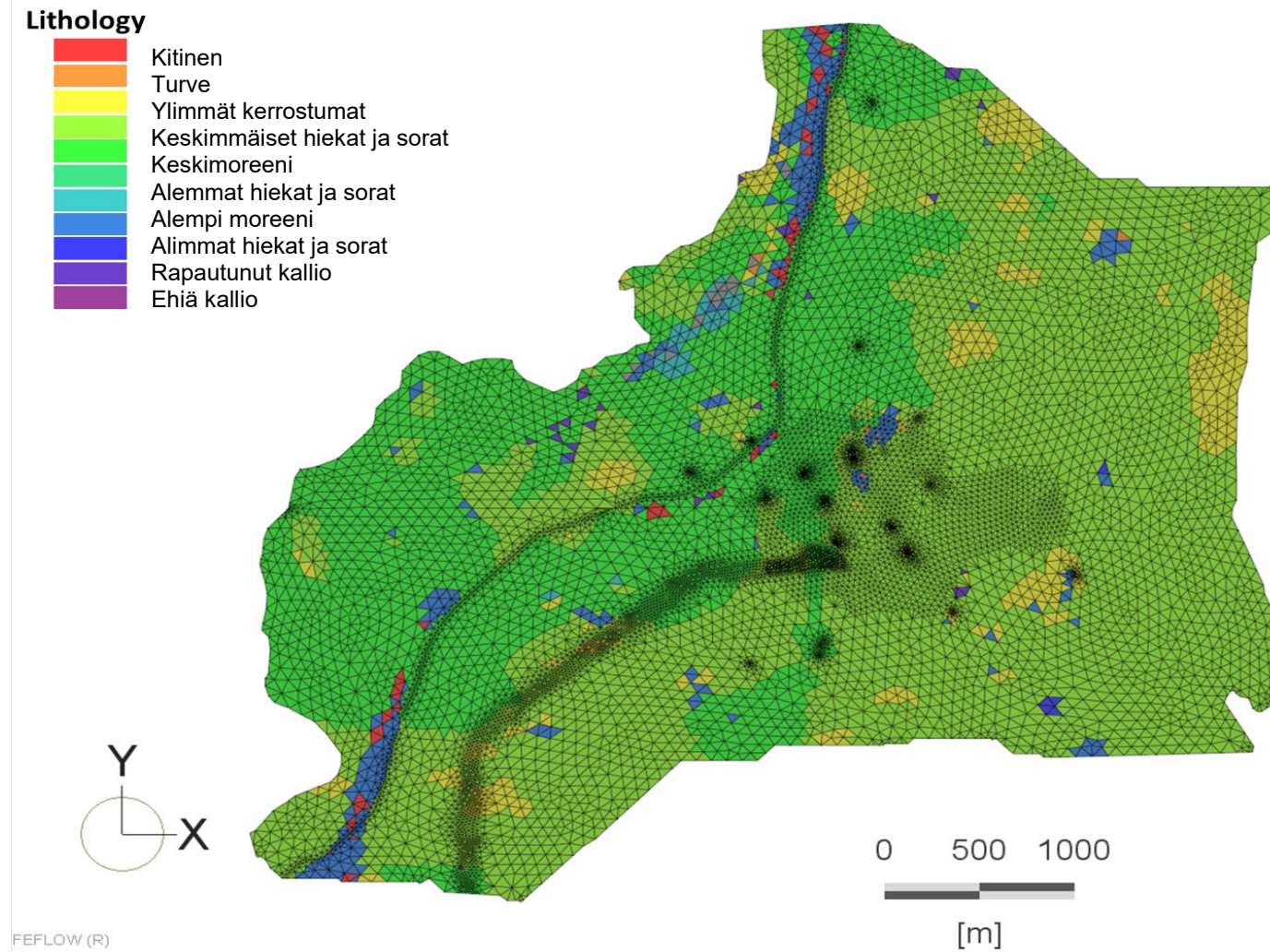


Kuva 6-12 FEFLOW-mallin kerros 3, jossa ylempi moreeni (vihreä) ja hajanaisena lajittuneet pintakerrostumat (keltainen)



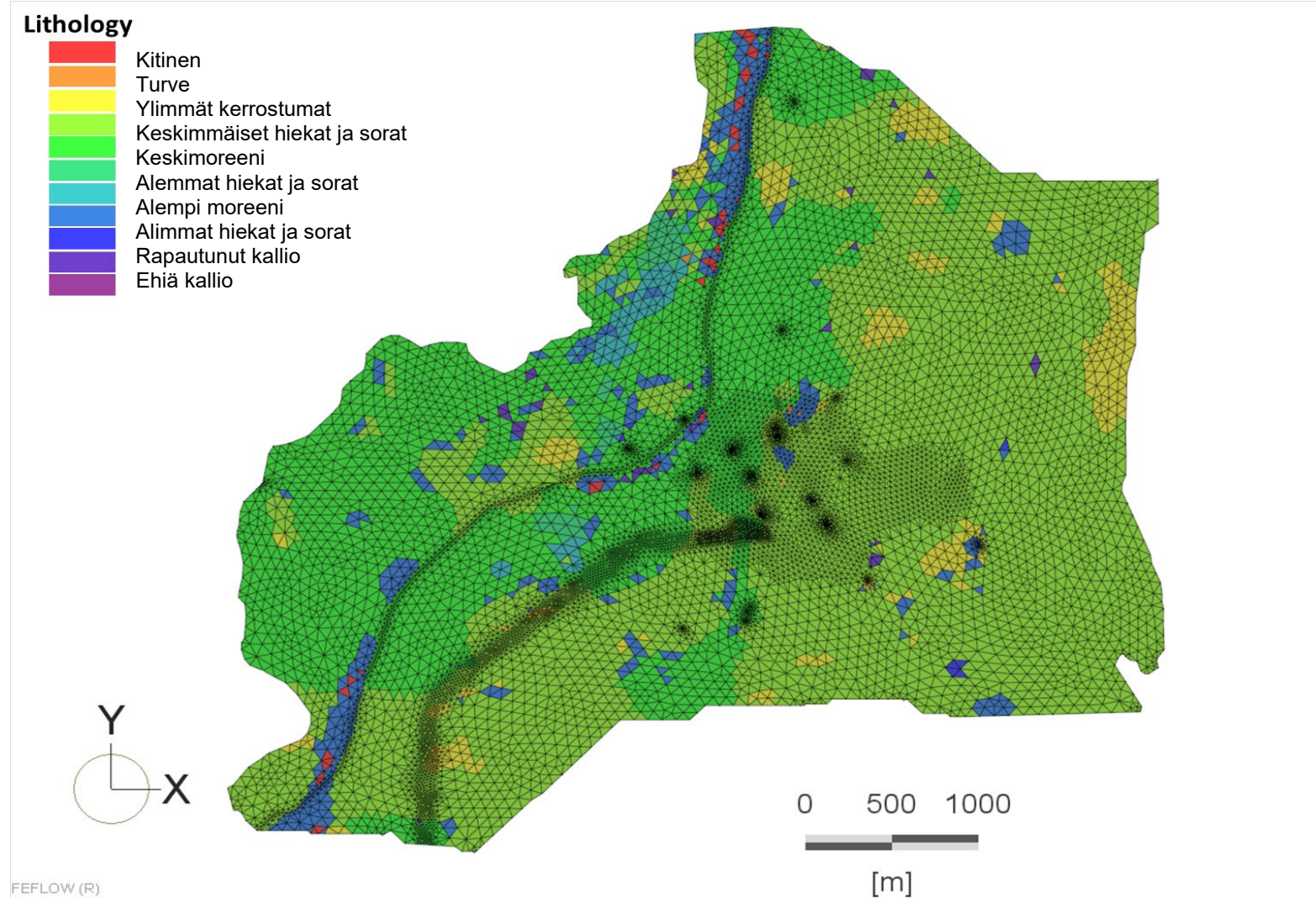
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-13 FEFLOW-mallin kerros 4, jossa keskimmäiset hiekat ja sorat (vihreä) länsipuolella ja hajanaisena ylempi moreeni (vaaleanvihreä) itäpuolella

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



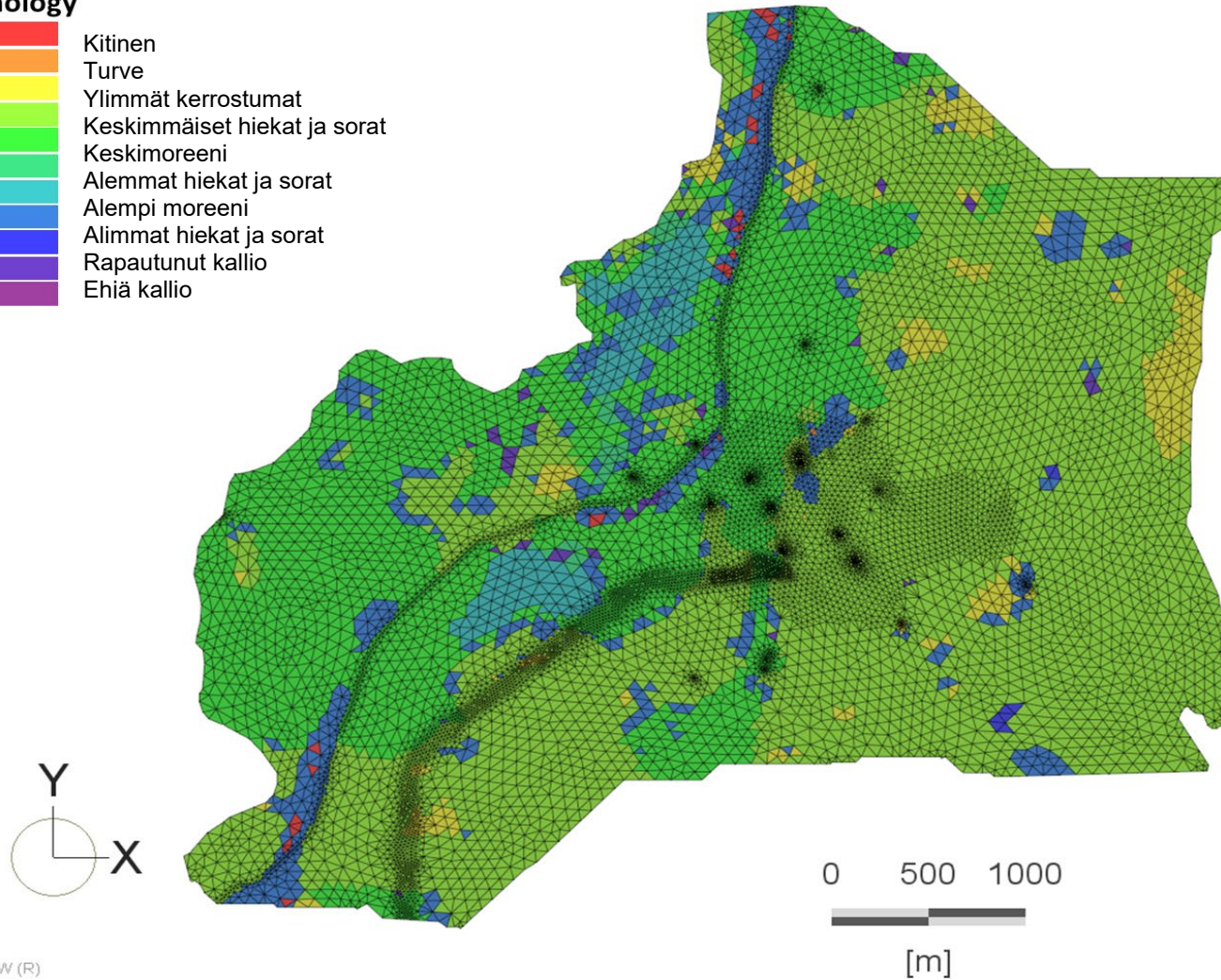
Kuva 6-14 FEFLOW-mallin kerros 5, jossa keskimmäiset hiekat ja sorat (vihreä) länsipuolella ja hajanaisena ylempi moreeni (vaaleanvihreä) itäpuolella



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

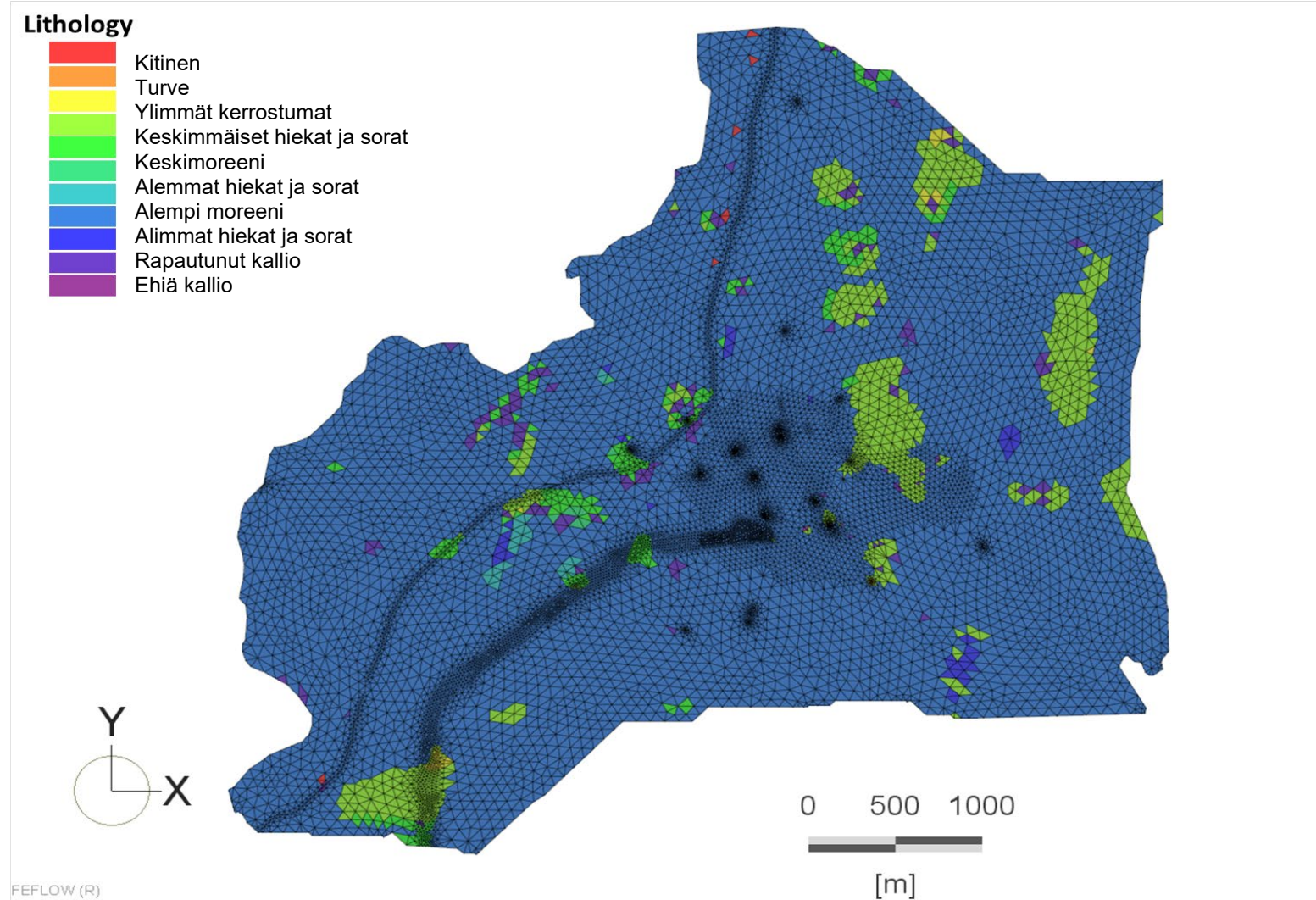
NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

Lithology



Kuva 6-15 FEFLOW-mallin kerros 6, jossa keskimmäiset hiekat ja sorat (vihreä) länsipuolella ja hajanaisena ylempi moreeni (vaaleanvihreä) itäpuolella

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-16 FEFLOW-mallin kerros 7, jossa alempi moreeni (sininen) ja hajanaisena keskimmäiset hiekat ja sorat (vaaleanvihreä)

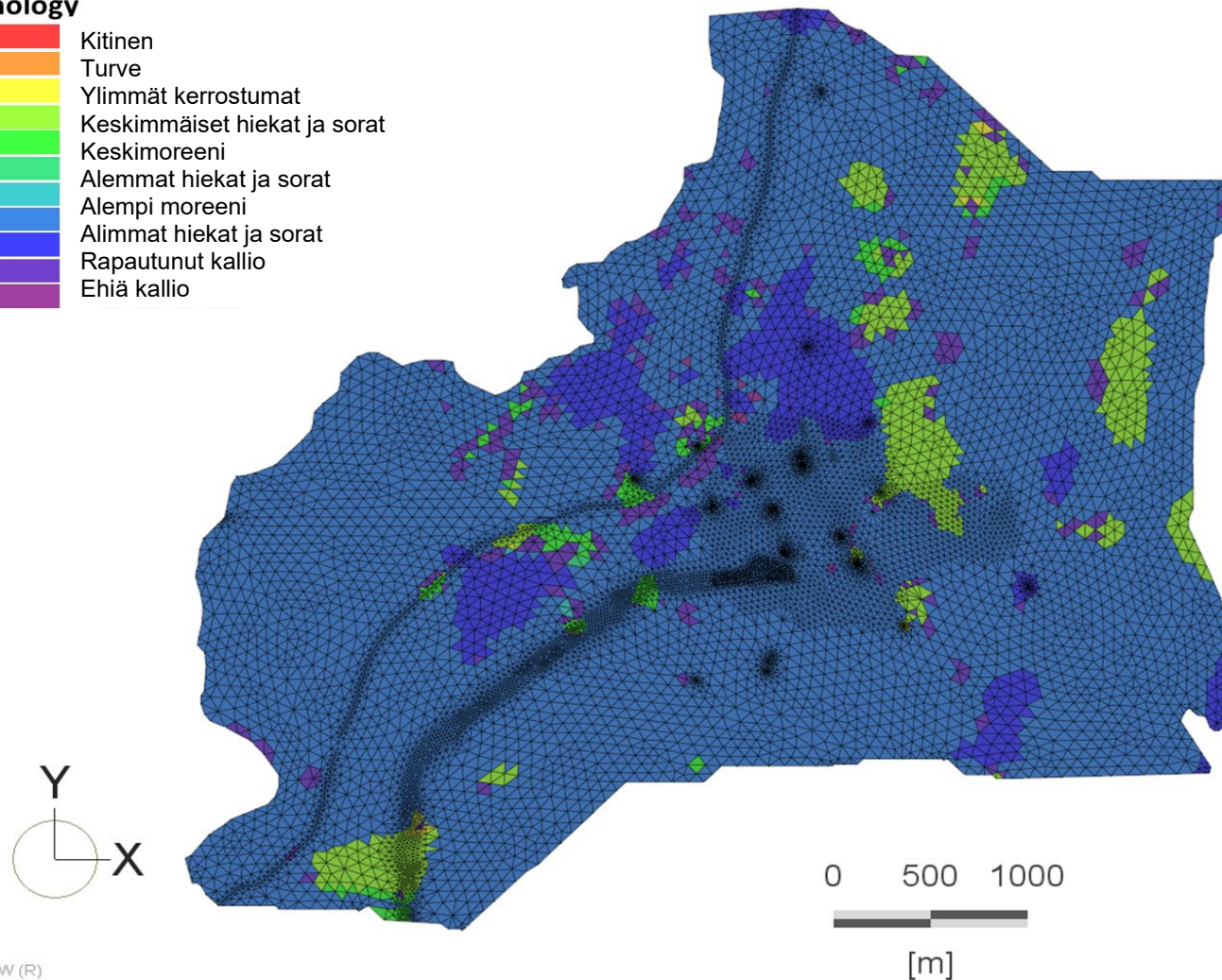


SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

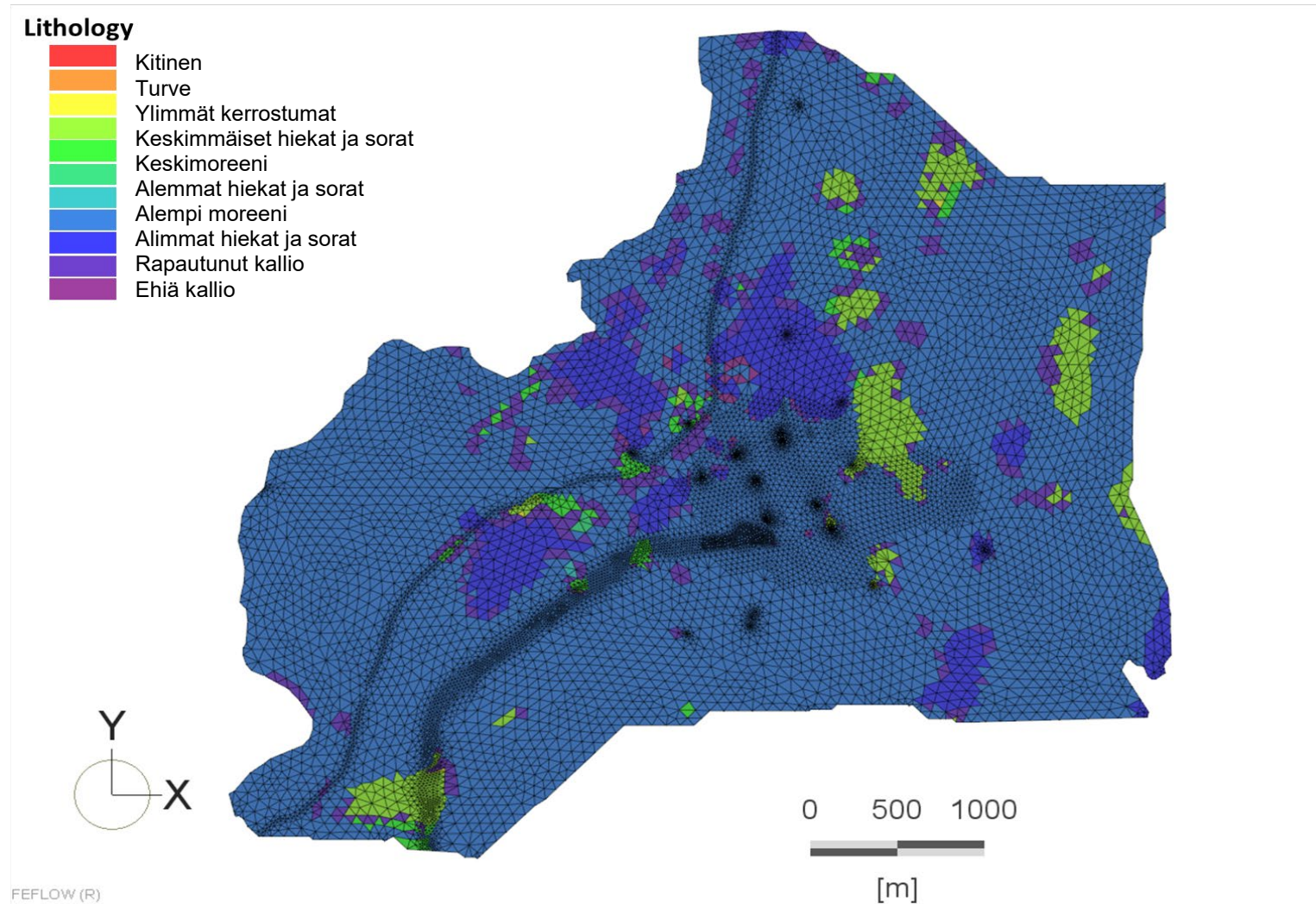
Lithology

	Kitinen
	Turve
	Ylimmät kerrostumat
	Keskimmäiset hiekat ja sorat
	Keskimoreeni
	Alemmat hiekat ja sorat
	Alempi moreeni
	Alimmat hiekat ja sorat
	Rapautunut kallio
	Ehiä kallio



Kuva 6-17 FEFLOW-mallin kerros 8, jossa alempi moreeni (sininen) ja hajanaisena alimmat hiekat ja sorat (tummansininen) sekä keskimmäiset hiekat ja sorat (vaaleanvihreä)

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-18 FEFLOW-mallin kerros 9, jossa alempi moreeni (sininen) ja hajanaisena alimmat hiekat ja sorat (tummansininen) sekä keskimmäiset hiekat ja sorat (vaaleanvihreä)

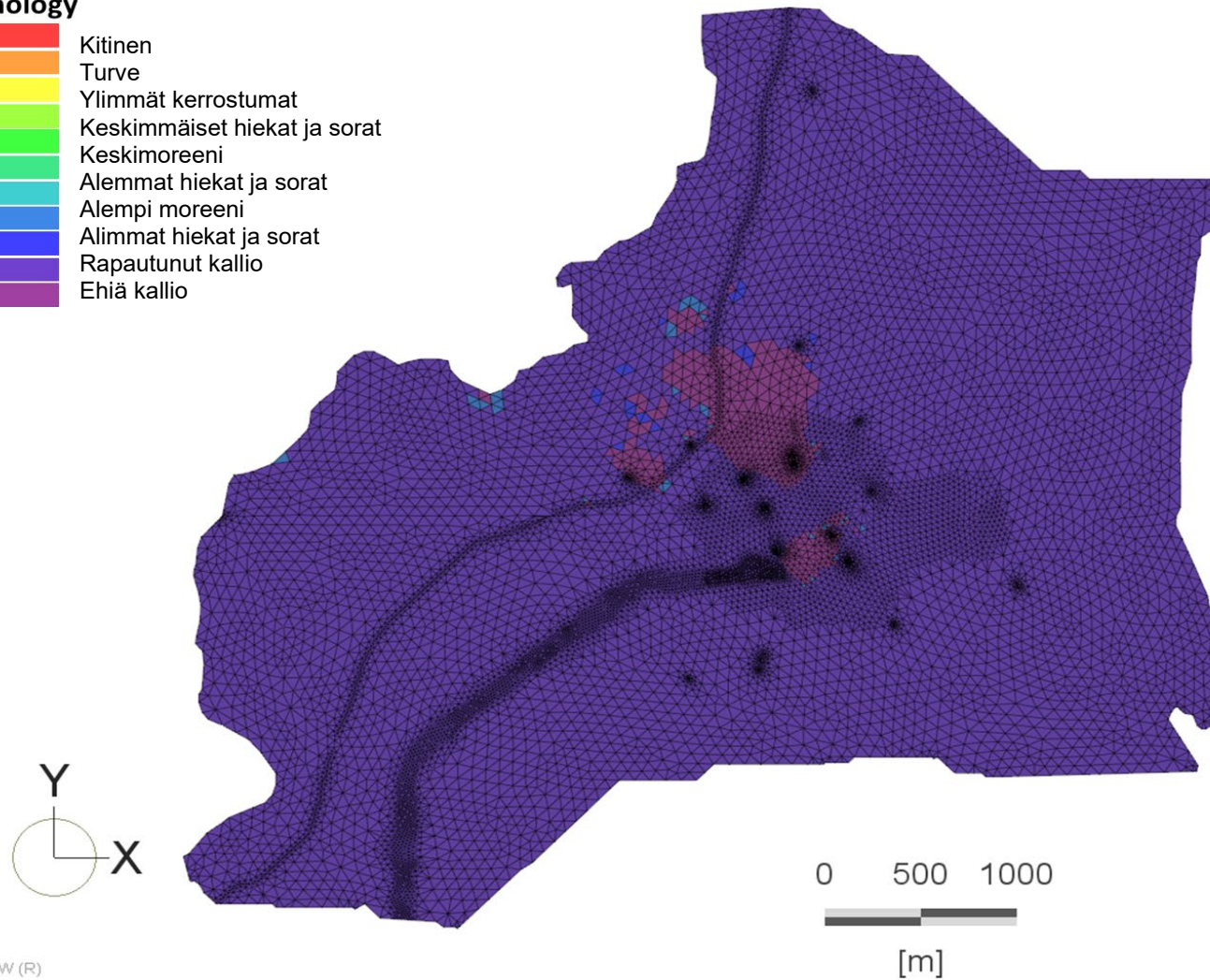


SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

Lithology

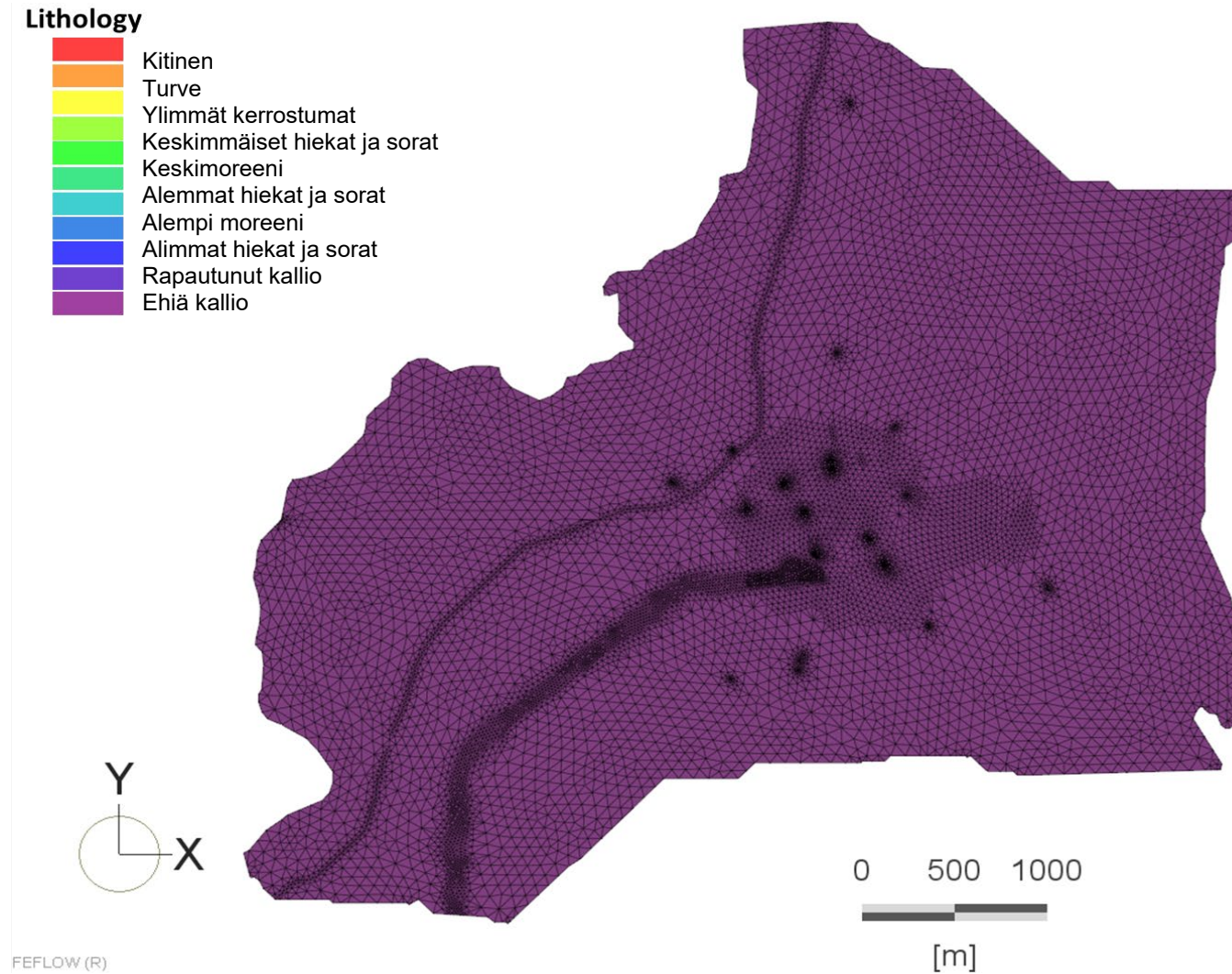
	Kitinen
	Turve
	Ylimmät kerrostumat
	Keskimmäiset hiekat ja sorat
	Keskimoreeni
	Alemmat hiekat ja sorat
	Alempi moreeni
	Alimmat hiekat ja sorat
	Rapautunut kallio
	Ehiä kallio



Kuva 6-19
(violetti)

FEFLOW-mallin kerros 10, jossa rapautunut kallioperä (indigonsininen) ja paikallisena ehjä kallioperä

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

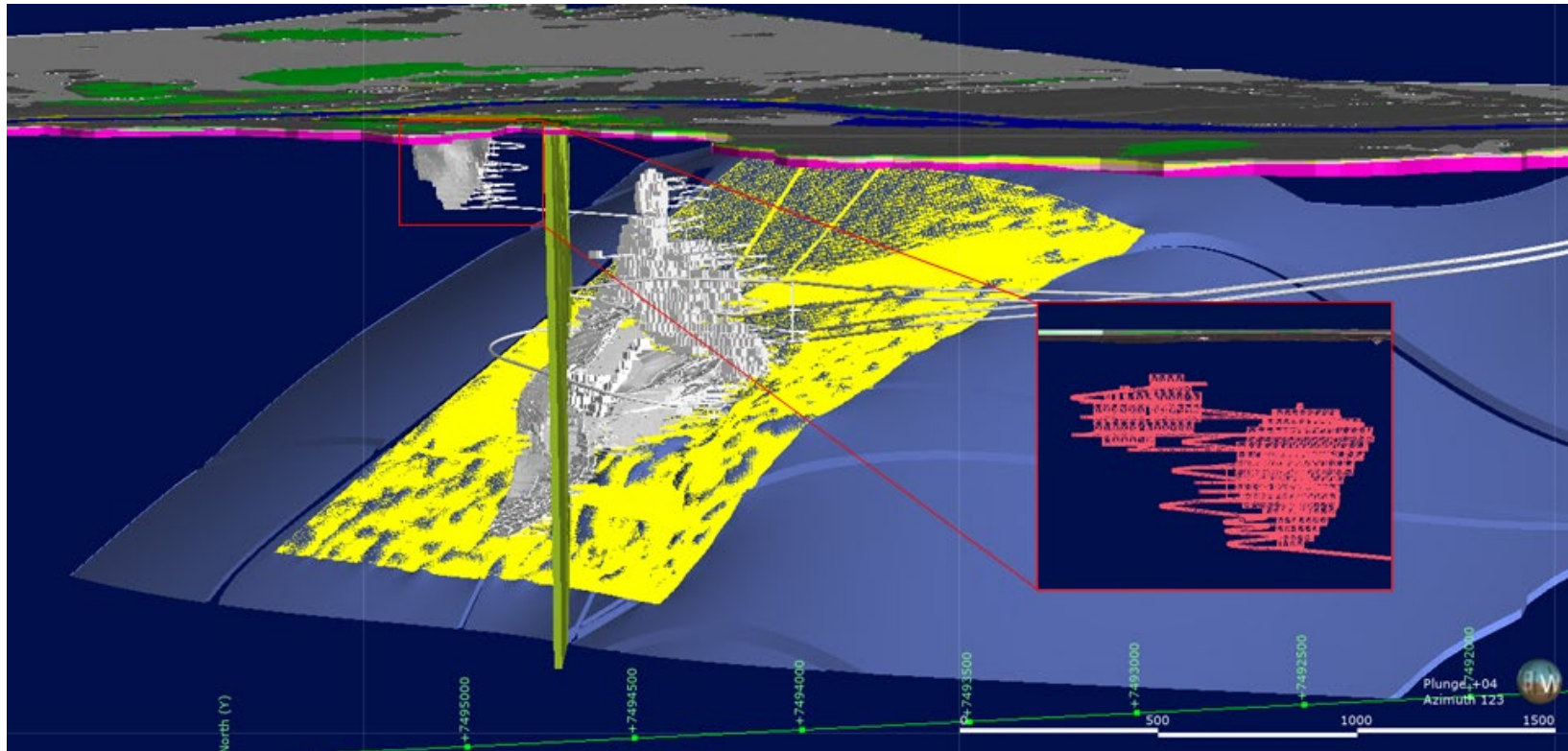


Kuva 6-20 FEFLOW-mallin kerros 11, jossa ehjä kallioperä (violetti) koko mallin toimialueella



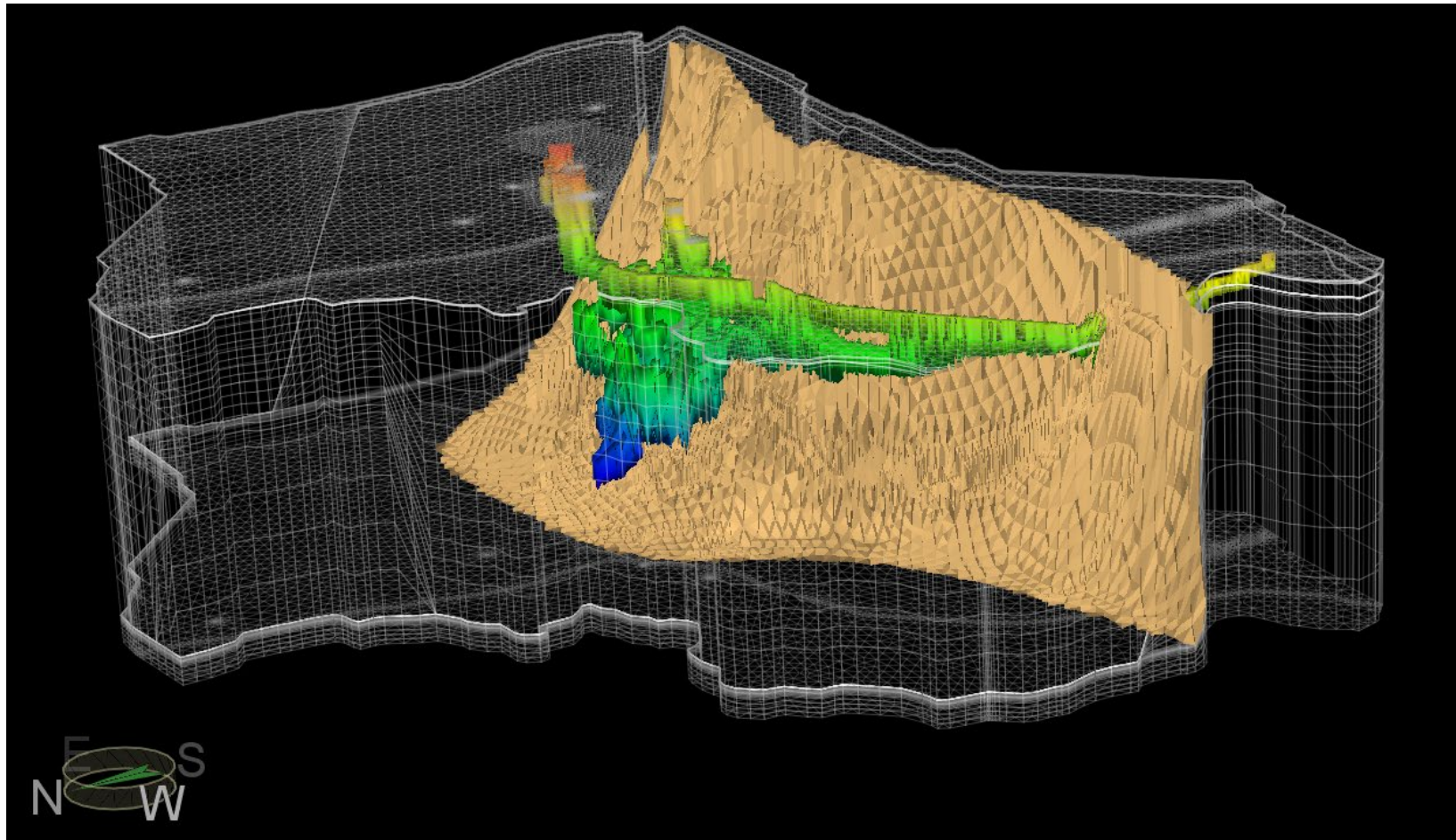
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-21 Leapfrog-malli, jossa pohjasiirros suunnitellun kaivoksen jalkapuoletta (footwall)

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN

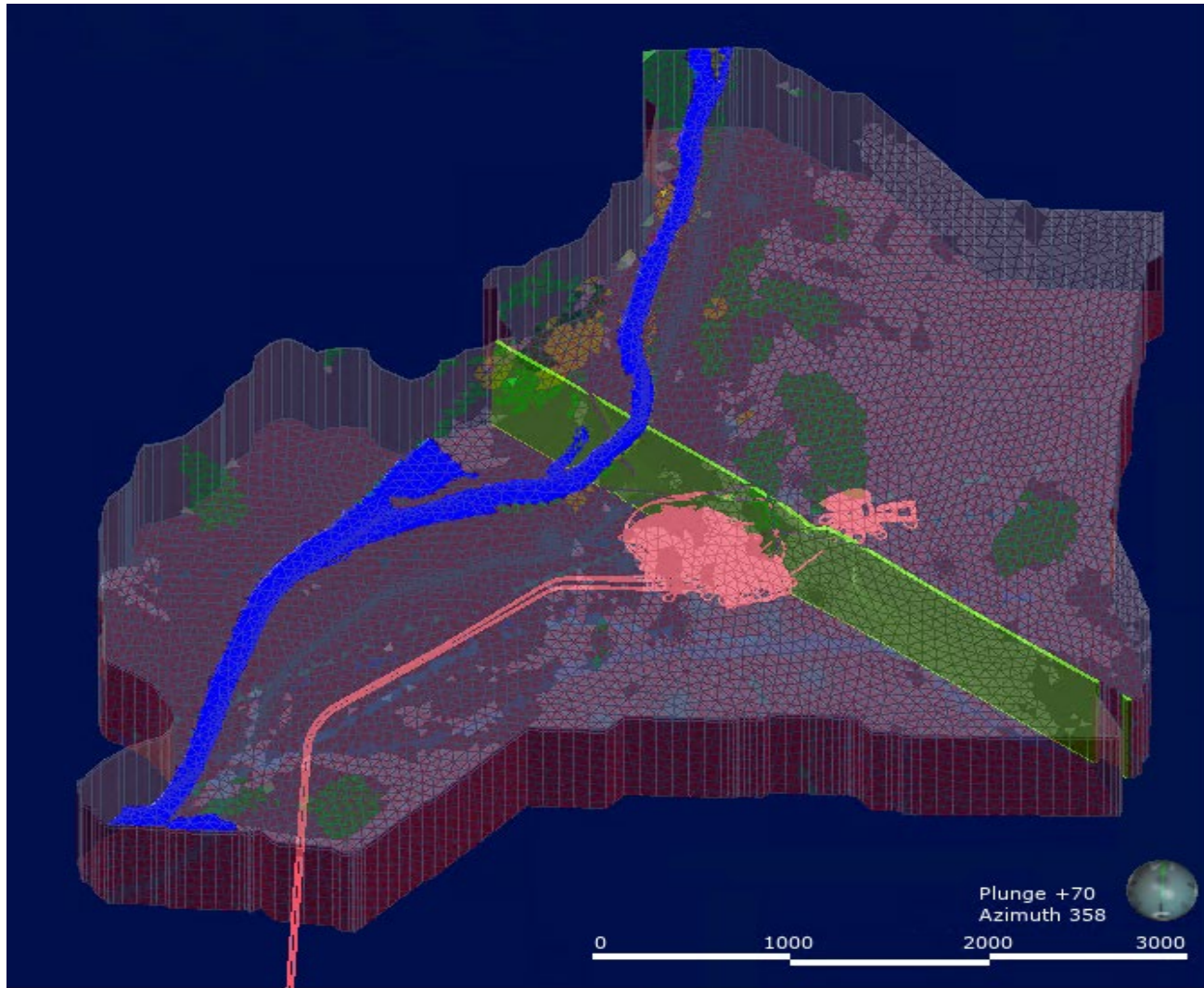


Kuva 6-22 FEFLOW-malli, jossa suunnitellun kaivoksen alla uusi hilaverkko näyttää pohjasiirroksen



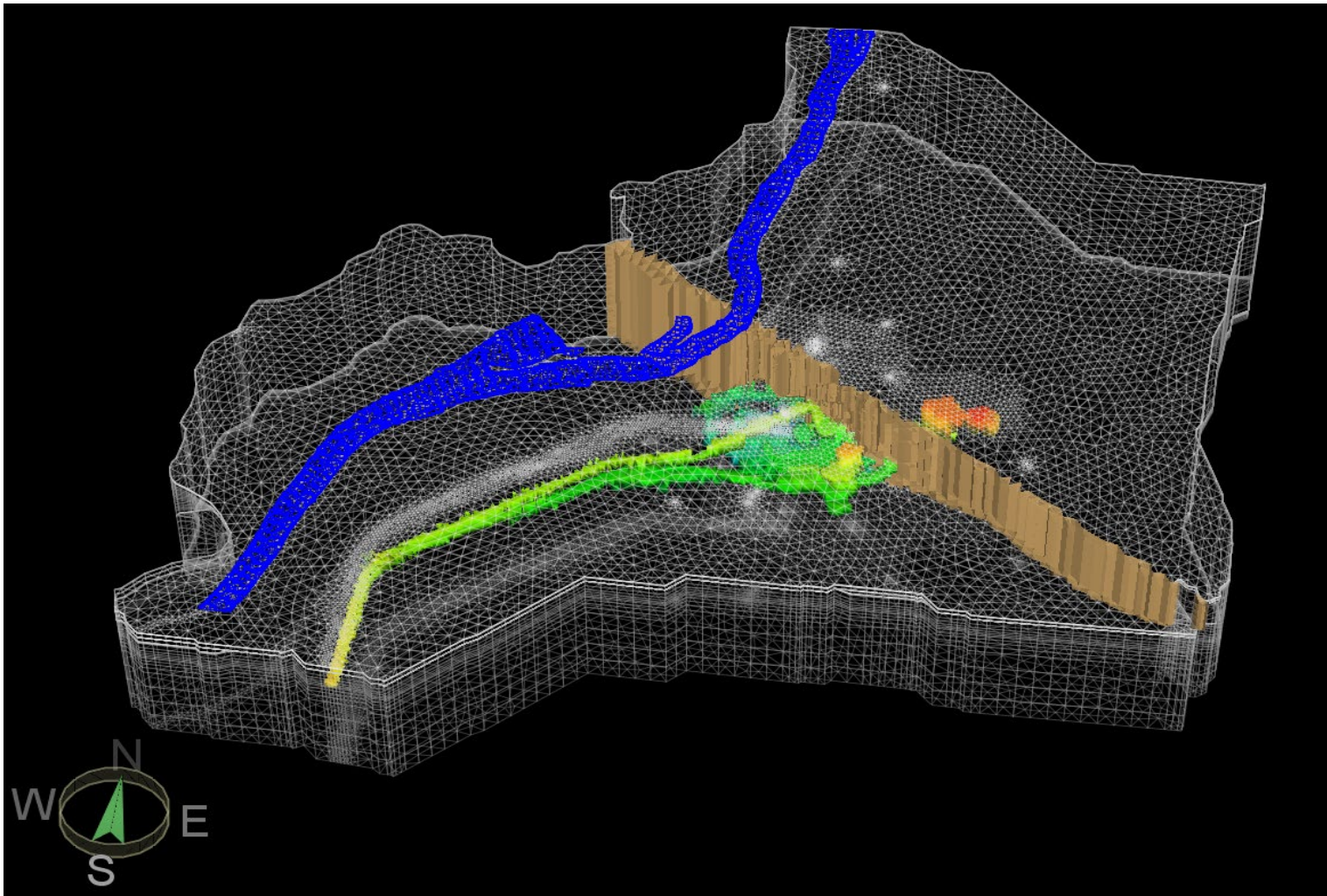
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-23 Leapfrog 3D-näkymä suunnitellun kaivoksen läpäisevästä itäisestä siirroksesta

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-24 FEFLOW 3D-näkymä suunnitellun kaivoksen läpäisevästä itäisestä siirroksesta



Taulukko 6-2 Alustavat hydrauliset parametrit FEFLOW-mallissa

Litologia	Tietolähde	Kh (m/vrk)	Kz (m/vrk)	Ss
Kitinen	Helsingin yliopisto*			
Turve	Helsingin yliopisto*	3.00E+00	4.00E-03	1.00E-05
Ylimmät kerrostumat	Helsingin yliopisto*	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-05
Ylempi moreeni	Helsingin yliopisto*	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-05
Keskimmäiset hiekat ja sorat	Helsingin yliopisto*	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-05
Keskimmäinen moreeni	Helsingin yliopisto*	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-05
Alemmat hiekat ja sorat	Helsingin yliopisto*	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-05
Alempi moreeni	Helsingin yliopisto*	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-05
Alimmat hiekat ja sorat	Helsingin yliopisto*	5.00E-01	5.00E-02	1.00E-05
Alin moreeni	Helsingin yliopisto*	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-05
Rapautunut kallioperä	Helsingin yliopisto* ja AA**	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-05
Ehjä kallioperä	Helsingin yliopisto* ja AA**	1.00E-04	1.00E-05	1.00E-04
Siirros myloniitti 2	SRK***	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
Siirros SENW 2	SRK***	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
Siirros SENW 1	SRK***	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
Siirros myloniitti 1	SRK***	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
Siirros E	SRK***	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
Siirros EW	SRK***	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
Pohjan työntösiirros 2	SRK***, GTK [^] ja Geovisor ^{^^}	1.45E-01	1.45E-01	1.00E-06
Pohjan työntösiirros	SRK***	1.45E-01	1.45E-01	1.00E-06

*Åberg ym. 2017;

**Anglo American Sakatti Mining Oy;

***SRK (2019);

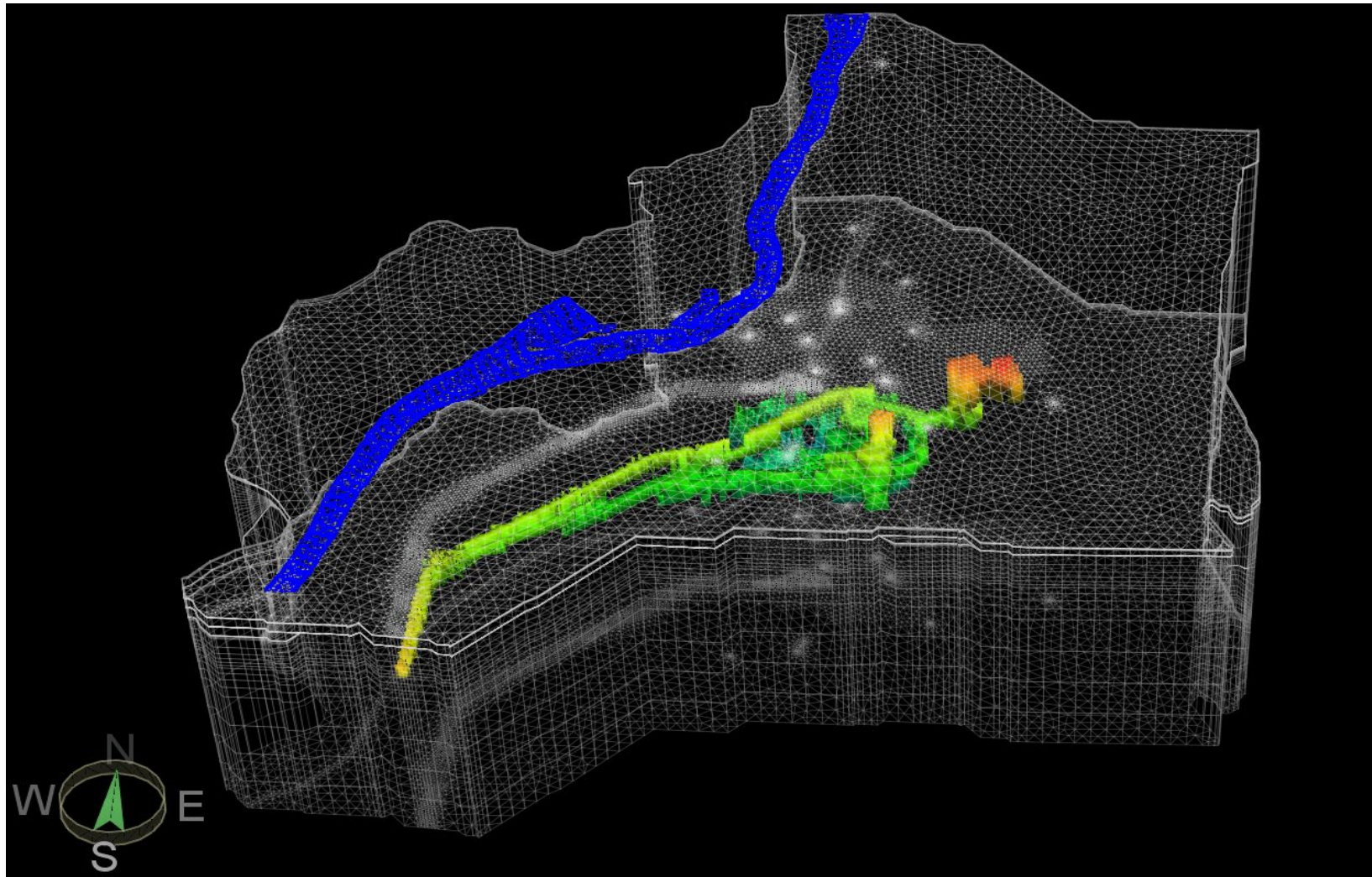
[^]GTK (2009);

^{^^} Geovisor Oy (2018); VLF ja ERT Surveys Sakatti, Sodankylä, 2018. Ss = specific storage (veden luovutuskyky)

6.8 MAANALAISEN KAIVOKSEN KUVAUS

Suunnitellun Sakatin maanalaisen kaivoksen 5 kilometrin vinotunneli ja tuotannon vaatimat tunnelit esitettiin FEFLOW-mallissa avoimina tiloina, tai tyhjinä tiloina, joissa suotopinnan reunaehdot (seepage face boundary conditions) (kohta 5.5) voitiin määrittää kaivoksen reunaviivaa pitkin. Kaivoksen infrastruktuuri noudattaa AA Sakatti Mining Oy:n ympäristövaikutusten arvioinnin vaihtoehtoa 1A (VE1A). FEFLOW-malliin luotiin tyhjä tila tuomalla malliin DXF-tiedostomuotoiset kaivostiedot DESWIK-ohjelmasta (**kuva 6-25**). Suotopinnan reunaehtoihin valittiin aukon kaikki solmut (noodit), jotka myötäilivät kaivoksen reunaviivaa (**katso kuva 6-26**). FEFLOW-malliin ei mallinnettu louhintaperiä eikä louhoksia, jotka pian louhinnan jälkeen täytetään pastatäytöllä, täten täytettyjen louhintaperien ja louhosten hydrauliset ominaisuudet muistuttavat kallioperää, eivätkä ne siis läpäise kallioperän pohjavettä.



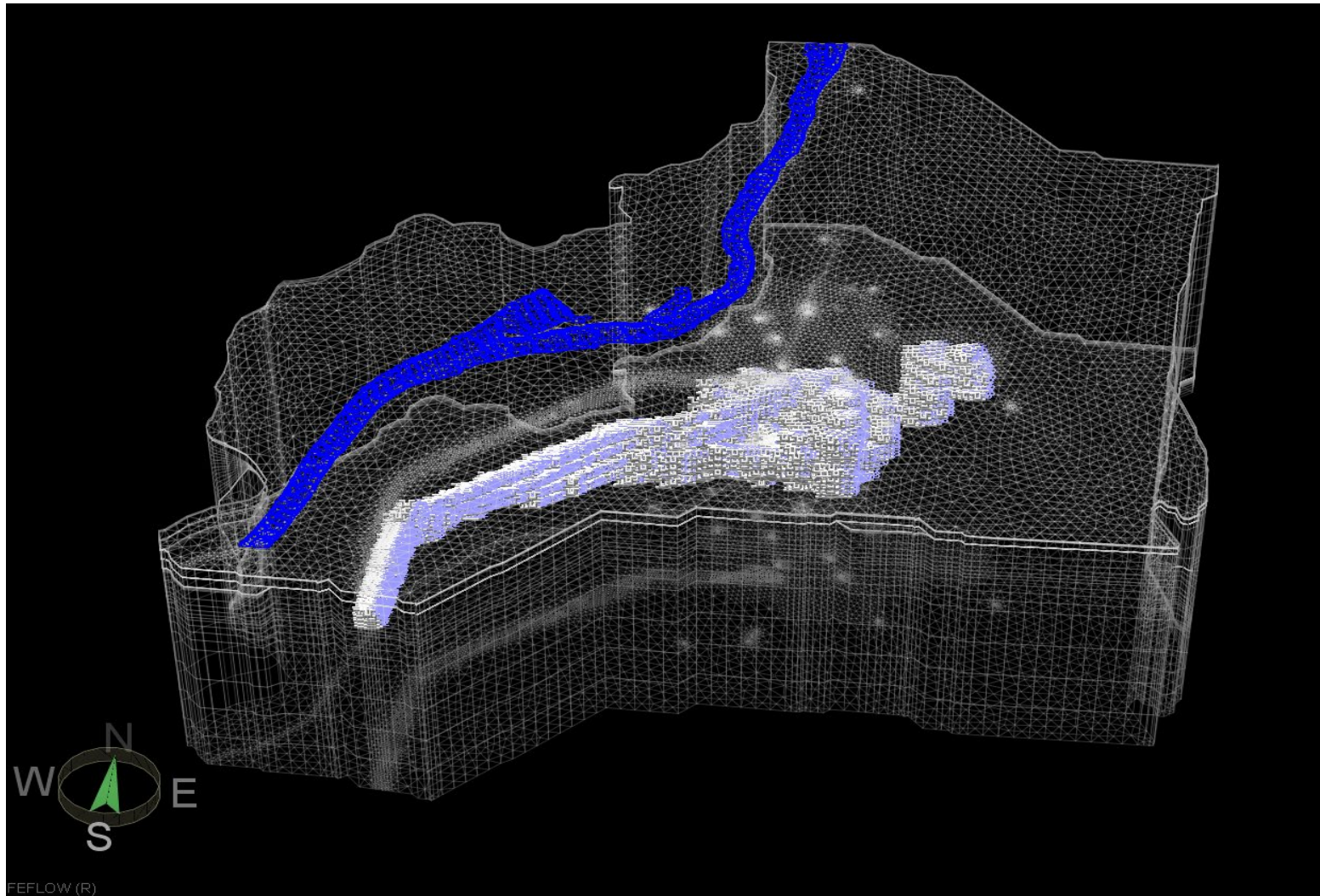


Kuva 6-25 FEFLOW-mallin hilaverkko, jossa näkyvissä suunniteltu kaivos kuten se kuvattiin mallissa



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN LAATIMINEN



Kuva 6-26 Suunniteltu kaivos ja suotopintojen reunaehdot FEFLOW:ssa

7.0 NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI

Sakatin kaivoshankkeen FEFLOW-3D-pohjavedenvirtausmalli kalibroitiin sekä steady-state (pysyvän virtauksen)- että transienttina (muuttuvan virtauksen) mallina. Aluksi malli kalibroitiin käyttämällä tyypillistä vedenpinnan keskiarvoa, joka perustui vuosien 2012 ja 2019 välisenä aikana tehtyihin havaintoihin alueella (**kuva 7-1**). Sen jälkeen malli kalibroitiin transientissa mallissa käyttämällä pohjavesimuodostuman vastetta, joka sisälsi pohjaveden pintojen mittaustulokset välillä 10.4.2012–2.7.2019. Kun transienttimallin kalibrointi oli valmis, sitä vasten tarkistettiin steady-state-mallin kalibrointi. Näitä kahta kalibroitinvaihetta toistettiin Hillin ohjeistuksen mukaan (1998), kunnes kummankin kalibroitinvaiheen vastaavuus oli hyväksyttävä.

Kuvassa 7-1 esitettyjen havaintoputkien lukumäärä oli pienempi kuin SRK:n (2019) raportoimissa ja Helsingin yliopiston tutkimuksissa (Salonen ym. 2015; Åberg ym. 2017a, b; Åberg yml. 2019). Osa havaintoputkista jätettiin pois seuraavista syistä: 1) havaintoputket sijaitsivat FEFLOW-mallialueen ulkopuolella, 2) joistakin kaivoista kerätyt aineistot näyttivät virheellisiä vedenpinnan tai pietsometrisen tason vaihteluita ja 3) joidenkin syvien kalliohavaintoputkien tärylankapietsometrillä saatuja vedenpintatietoja pidettiin mallin kalibroinnin kannalta liian virheellisinä.

Mallien kalibroinnissa valittuja malliparametreja, lähinnä horisontaalista hydraulista johtavuutta (K_h) ja pohjavesimuodostuman veden luovutuskykyä (S_s) vaihdeltiin systemaattisesti ja mallien yhteensopivuutta verrattiin tilastollisesti. Simuloitujen ja havaittujen pohjavedenkorkeuksien keskinäinen yhteensopivuus arvioitiin seuraavilla kriteereillä. Steady-state-kalibroinnissa kalibroinnin laatu arvioitiin käyttämällä jäännöskeskivirhettä ja normalisoitua keskineliövirheen neliöjuurta (NRMSE, root mean square error). Keskineliövirheen keskiarvon hyväksyttäväksi maksimiarvoksi annettiin korkeintaan 5 prosenttia (Hill 1998). Kun havaintotietojen tarkka yhteensovittaminen ei transientin kalibroinnin osalta ollut mahdollista, mallin kalibroinnin tarkkuus arvioitiin tarkastelemalla visuaalista yhteensopivuutta pohjavedenkorkeuden kausittaisten vaihteluiden kanssa. Kun transienttia kalibrointia yritetään tehdä pitkällä aikavälillä muuttuville tiedoille, havaintotietojen tarkka sovittaminen on harvoin mahdollista. Tässä tapauksessa kirjallisuuden mukaan pidetään riittävänä, että kalibroinnissa sovitetaan havaintotietojen ajan funktiona muodostama kuvio tai muoto (Hill 1998).

7.1 STEADY-STATE-KALIBROINTI

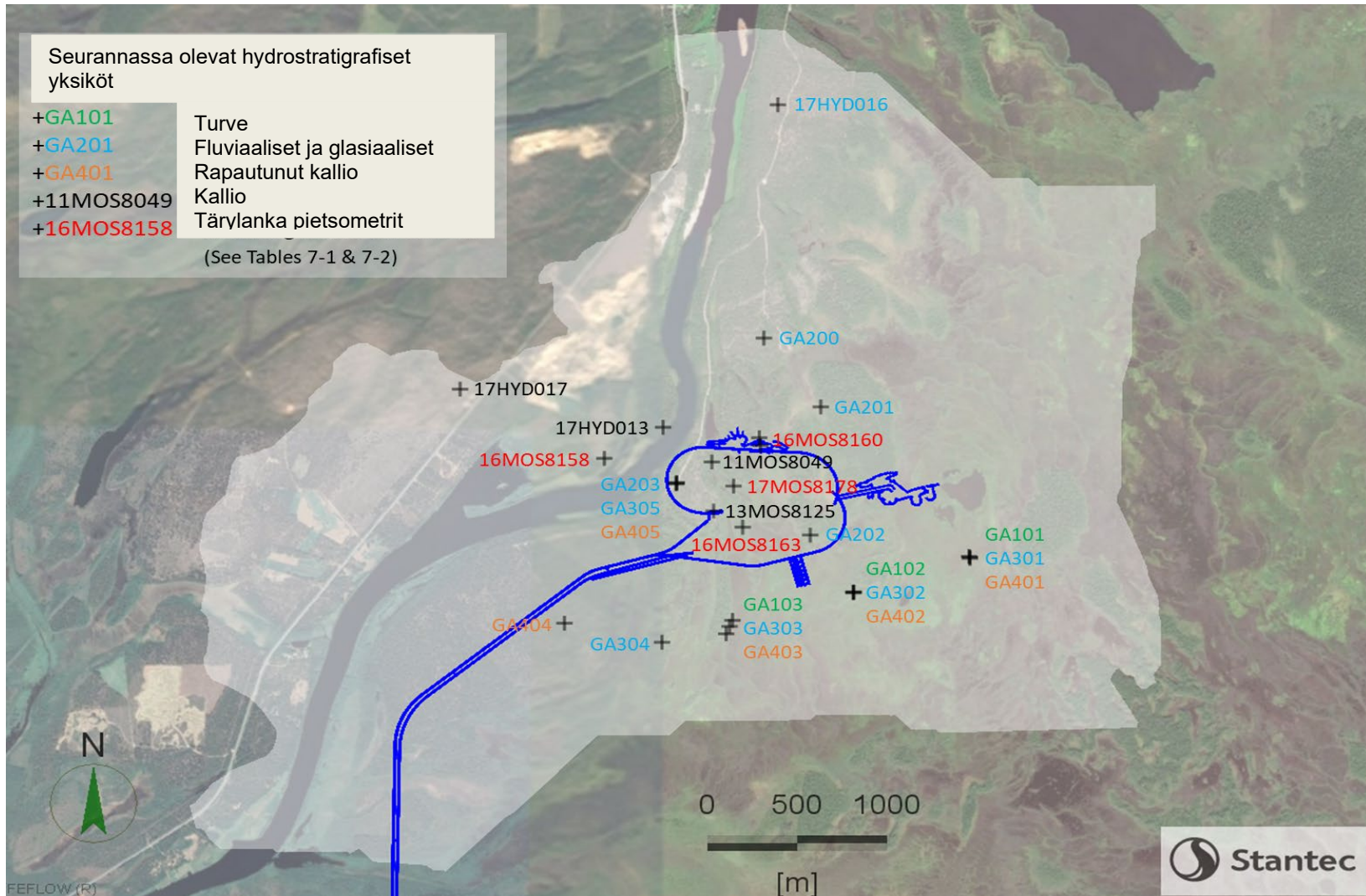
7.1.1 Kalibrointimenettely

Steady-state-malli kalibroitiin 28 seurantaputken pohjavedenpinnan keskiarvoistettuihin vedenpinnan korkeuksiin, jotka oli koottu 10.4.2012–2.7.2019 välillä. **Taulukossa 7-1** luetellaan kalibroinnissa käytettyjen havaintoputkien tunnuksot, niiden koordinaatit ja kunkin putken ne hydrogeologiset vyöhykkeet, joihin pohjavesiputki on asennettu.

Steady-state-mallin kalibrointi tehtiin FEPEST -ohjelmalla (DHI 2018). FEPEST on FEFLOW:n automaattisen parametriestimoinnin menetelmä (PEST). Steady-state-mallin kalibrointiprosessi lopetettiin, kun havaittujen ja simuloitujen steady-state-pohjavedenkorkeuksien välinen vastaavuus oli hyväksyttävissä rajoissa (Hill 1998). Steady-state-mallin kalibroinnissa mallin pintakerrokseen sovellettiin tasaista pohjaveden imeytymisnopeutta (recharge).



NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI



Kuva 7-1 Kalibroinnissa käytettyjen pohjaveden havaintoputkien sijainti kartalla. Suunniteltu maanalainen kaivos on merkitty kuvassa sinisellä.



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI

Taulukko 7-1 Pohjaveden havaintoputkien koordinaatit sekä muodostuma, johon havaintoputket on asennettu

Kohdekaivo	X_TM35 [m]	Y_TM35 [m]	Kaivonrenkaan korkeus [m]	Kaivon syvyys [m]	Suodattimen korkeus [mpy; m]	Havaittu veden korkeus [mpy; m]	Tarkkailtu muodostuma
GA101	490488	7492141	187,1	5,1	182,0	187,15	Turve
GA102	489850	7491924	186,0	3,3	182,7	186,43	Turve
GA103	489177	7491750	186,1	2,0	184,1	186,01	Turve
GA200	489351	7493474	186,7	4,5	180,2	185,91	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA201	489666	7493054	187,3	5,0	182,3	186,84	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA202	489608	7492271	186,4	5,0	181,4	186,11	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA203	488865	7492584	187,3	5,5	181,8	182,98	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA301	490493	7492129	187,0	9,5	177,5	187,07	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA302	489846	7491923	186,6	10,0	176,6	186,34	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA303	489142	7491668	185,9	12,5	173,4	185,78	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA304	488786	7491617	186,4	14,0	172,4	185,10	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA305	488866	7492588	187,3	10,0	177,3	183,00	Glasiaalinen/Fluviaa linen
GA401	490494	7492136	187,2	12,5	174,7	187,20	Rapautunut kallioperä
GA402	489848	7491919	186,3	13,0	173,3	186,41	Rapautunut kallioperä
GA403	489161	7491713	185,9	17,0	168,9	185,83	Rapautunut kallioperä
GA404	488244	7491733	188,0	10,5	177,5	183,70	Rapautunut kallioperä
GA405	488867	7492592	187,1	13,5	173,6	182,91	Rapautunut kallioperä
17HYD016	489429	7494900	190,9	11,1	179,9	184,30	Glasiaalinen/Fluviaa linen
11MOS8049	489332	7492818	185,5	914,01	-728,5	184,63	Breksia, kallioperä
13MOS8120	489062	7492718	185,6	1060,9	-875,3	182,42	Breksia, kallioperä
13MOS8125	489072	7492419	187,2	820,8	-633,6	184,76	Breksia, kallioperä
17HYD013	488792	7492929	182,4	251,4	-69,0	180,86	Kallioperä
17HYD017	487666	7493163	188,0	94,3	93,7	181,91	Kallioperä



7.1.2 Havaintoputket

Asiakkaalta saadut pohjavedenpintatiedot koostettiin ja niiden yhteenveto esitetään **taulukoissa 7-1 ja 7-2**. Tietojen ajallisesta erotuksesta aiheutuva mahdollinen kalibrointivirhe vältettiin sillä, että pohjavedenpintatiedot oli kerätty samanlaisilla aikaväleillä (2012–2019). Steady-state-mallin kalibroinnissa käytettyjen havaintoputkien sijainti on esitetty **kuvassa 7-1**.



Taulukko 7-2 Tärylankapietsometrit kallioperässä

Kohdekaivo	X_TM35 [m]	Y_TM35 [m]	Kaivonrenkaan korkeus [m]	Kaivon syvyys [m]	Suodattimen korkeus [mpy; m]	Havaittu veden korkeus [mpy; m]	Tarkkailtu muodostuma
16MOS8158_01	488466	7492740	182,5	83	99,5	179,93	Malmin kattopuolen vulkanoklastiset
16MOS8158_02	488466	7492740	182,5	287	-104,5	179,55	Malmin kattopuolen vulkanoklastiset
16MOS8158_03	488466	7492740	182,5	389	-206,5	179,91	Breksia kallioperä
16MOS8158_04	488466	7492740	182,5	593	-410,5	214,82	Breksia kallioperä
16MOS8160_01	489325	7492866	186,1	231	-44,9	181,34	Breksia kallioperä
16MOS8160_02	489325	7492866	186,1	416	-229,9	181,33	Peridotiitti kallioperä
16MOS8160_03	489325	7492866	186,1	633	-446,9	180,56	Peridotiitti kallioperä
16MOS8160_04	489325	7492866	186,1	718	-531,9	153,89	Peridotiitti kallioperä
16MOS8163_01	489233	7492319	186,3	234	-47,7	173,10	Afaniitti kallioperä
16MOS8163_02	489233	7492319	186,3	394	-270,7	172,98	Afaniitti kallioperä
16MOS8163_03	489233	7492319	186,3	556	-369,7	139,27	Afaniitti kallioperä
16MOS8163_04	489233	7492319	186,3	670	-483,7	138,82	Afaniitti kallioperä
17MOS8178_01	489183	7492571	186,0	78	108,0	186,22	Peridotiitti kallioperä
17MOS8178_02	489183	7492571	186,0	221	-35,0	184,43	Breksia kallioperä
17MOS8178_03	489183	7492571	186,0	431	-245,0	184,16	Afaniitti kallioperä
17MOS8178_04	489183	7492571	186,0	727	-541,0	185,03	Afaniitti kallioperä

7.1.3 Kalibrointitulokset

Kuvassa 7-2 esitetään steady-state-mallin kalibroinnin simuloitujen ja havaittujen pohjaveden korkeuksien Kalibroidun steady-state-mallin korrelaatiokerroin (R) oli 0,89 ja normalisoitu keskineliövirheen neliöjuuri (NRMSE) 0,13. NRMSE on pienempi kuin 5 prosentin tavoitearvo eikä simuloitujen ja havaittujen pohjavedenkorkeuksien hajontakuvio (esim. jäännösvirhe **kuvassa 7-3**) tuonut esiin systemaattista virhettä geodeettisen korkeuden eikä maantieteellisen sijainnin suhteen. Myöskään **kuvassa 7-4** esitetty spatiaalisen jäännösjakauman kartta ei osoita kalibrointitiedoissa olevan spatiaalista virhettä. **Kuvassa 7-5** esitetään vedenpintojen kalibroidut korkeuskäyrät pohjavesimallin ylimmässä kerroksessa (turve sekä glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien pintakerrokset)

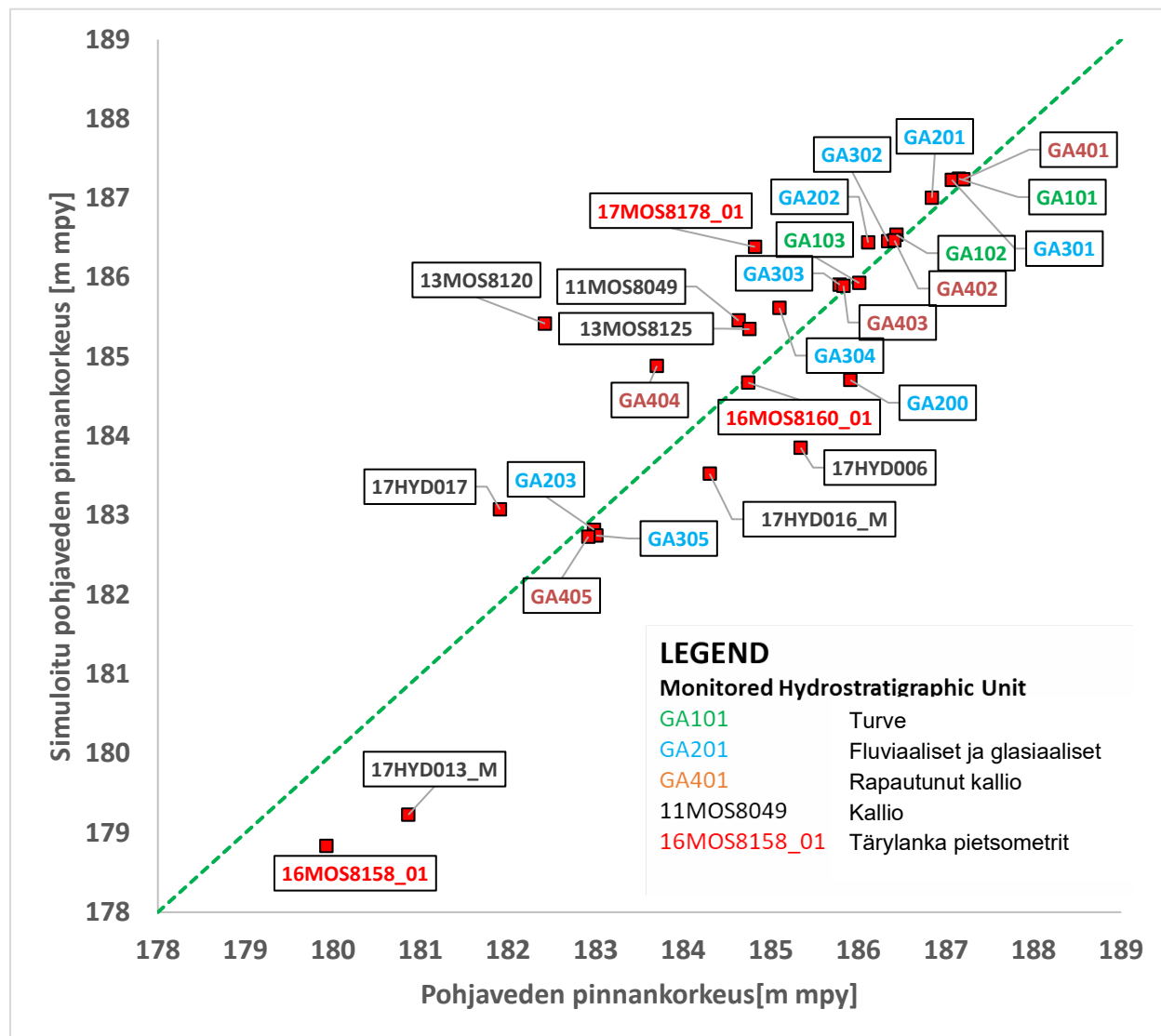
7.1.4 Kalibroidut hydrauliset muuttujat

FEPEST-kalibroinnista saadut kalibroidun steady-state-mallin hydrauliset muuttujat esitetään lyhyesti **taulukossa 7-3**. Glasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien kalibroidut hydrauliset muuttujat käyvät kohtuullisen hyvin yksiin Helsingin yliopiston tutkimuksista (Salonen et al. 2015; Åberg et al. 2017a, b; Åberg et al. 2019) saatujen ensimmäisten estimaattien kanssa. Rapautuneen ja rakoilleen kallioperän ja myös ehjän kallioperän hydrologisen johtavuuden kalibroituja arvoja täytyi kuitenkin kasvattaa

NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI

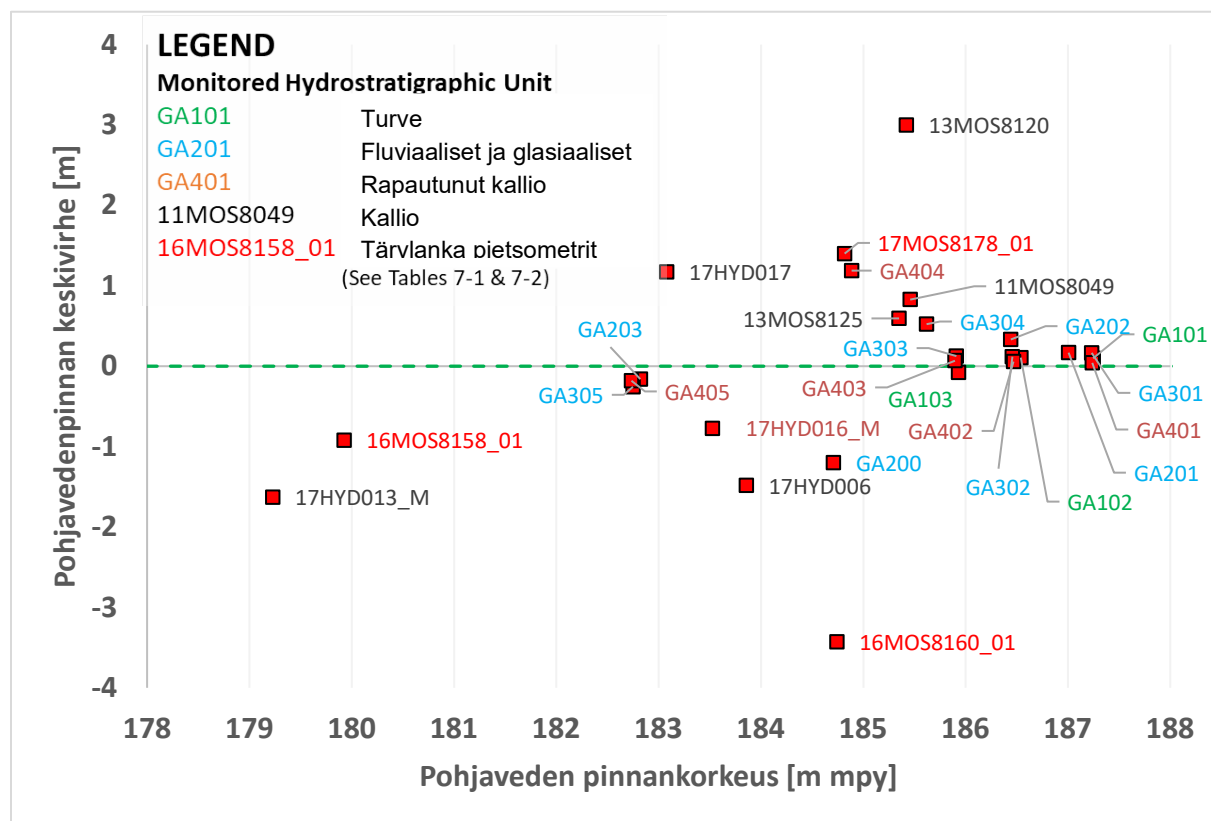
suuremmaksi kuin SRK:lta (2019) saadut arvot, niin että ne vastasivat havaittuja pohjaveden pietsometrisiä tasoja.





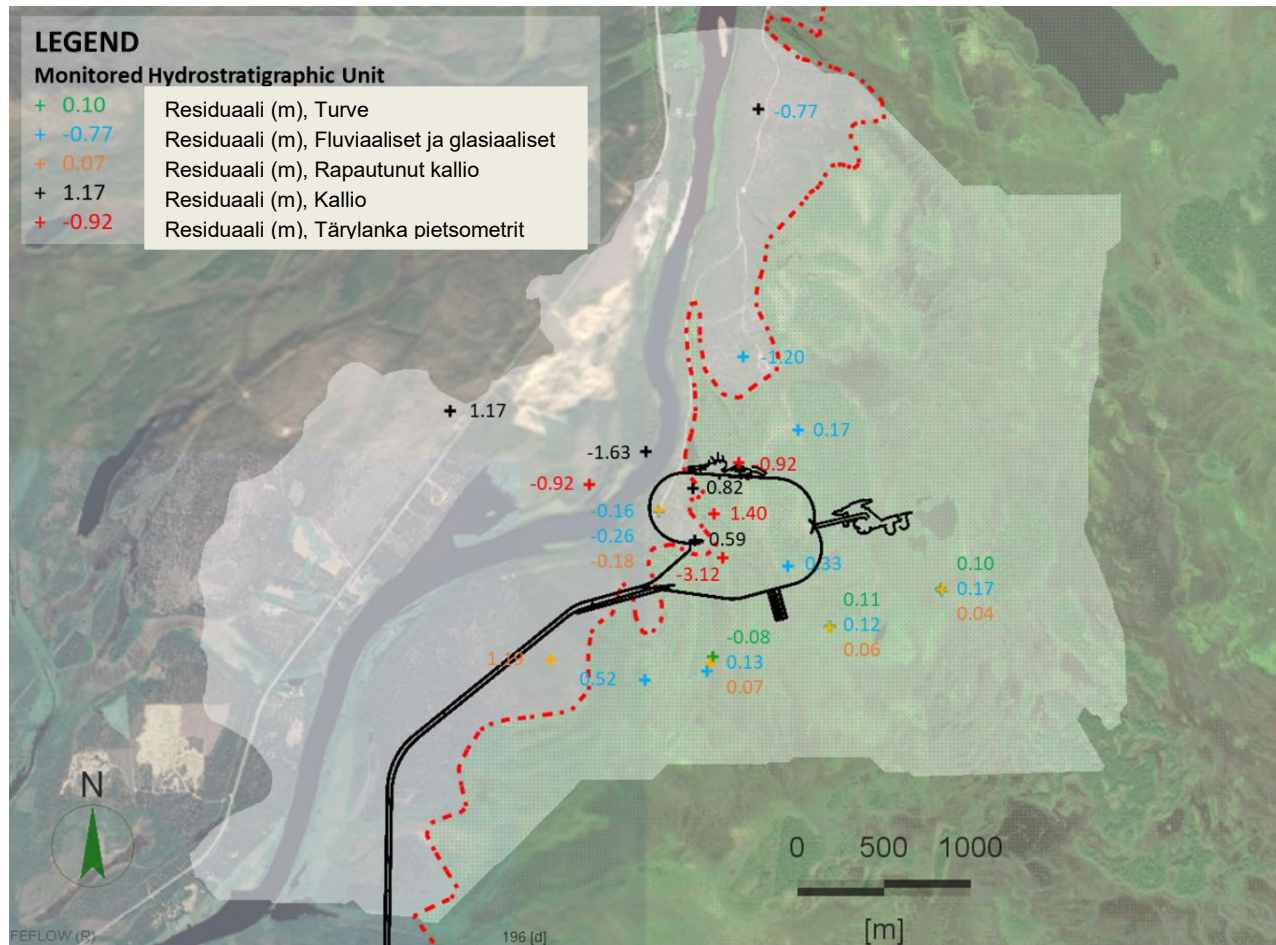
Kuva 7-2 Steady-state -kalibroinnissa käytettyjen simuloitujen ja mitattujen pohjaveden pintojen kalibrointikäyrä.

NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI



Kuva 7-3 Steady-state-mallin kalibroinnissa käytettyjen havaintoputkien vedenpintojen keskivirheet (residuaalit).

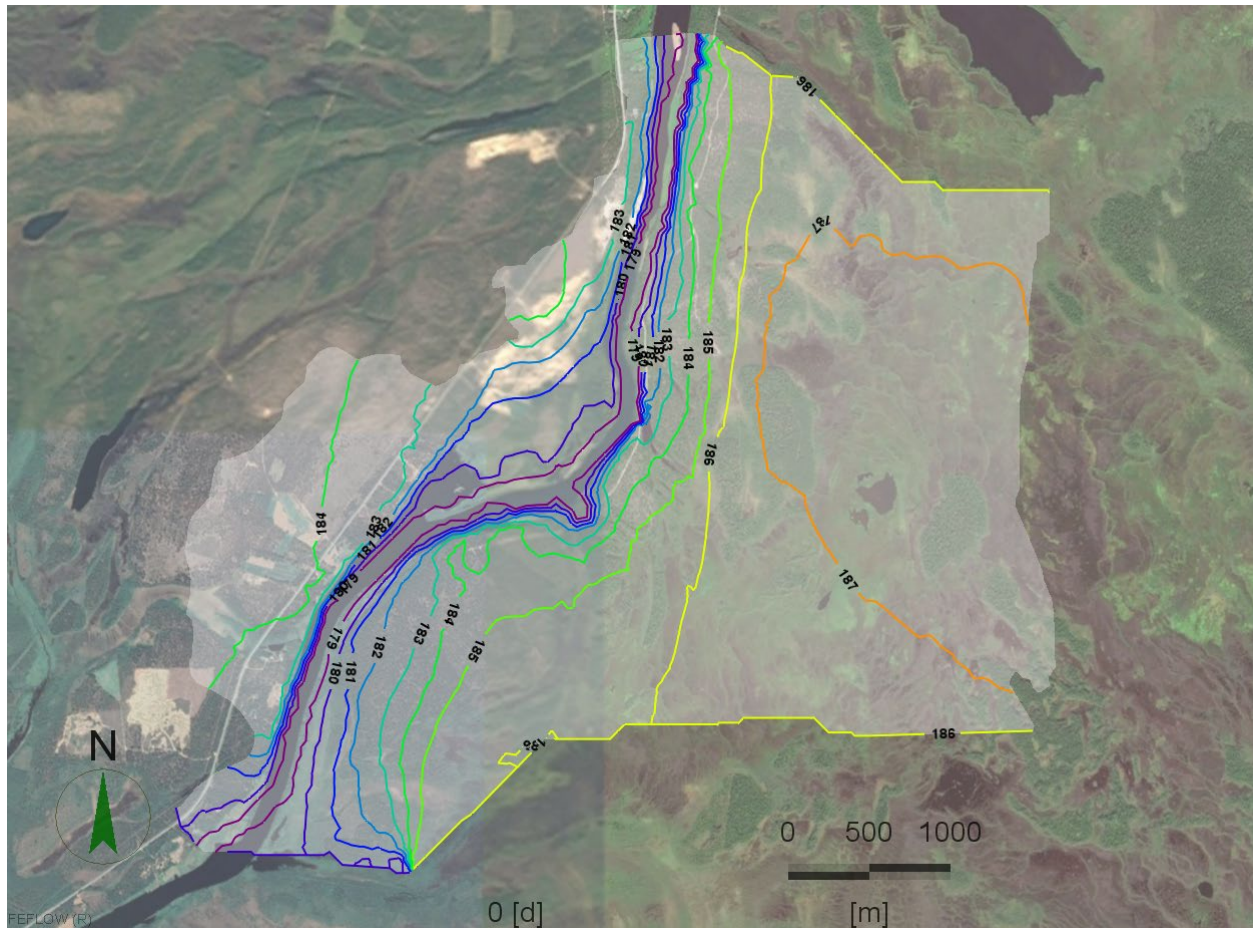




Dashed red line is Protected Area boundary

Kuva 7-4 Steady-state-mallin kalibraation residuaalien alueellinen jakauma.

NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI



Kuva 7-5 Kalibroidut vedenpintojen korkeudet. Mallin kerros 1.



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI

Taulukko 7-3 Kalibroidut hydrauliset parametrit (hydraulinen johtavuus, vaakatasossa, Kh; ja pystytasossa, Kz): steady-state-kalibrointi

Materiaalivyöhykeindeksi	Litologia	Kh (m/vrk)	Kz (m/vrk)
1	Kitinen		
	GLASIAALISET JA FLUVIAALISET SEDIMENTIT		
2	Turve	3.00E+00	4.00E-03
3	Ylimmät kerrostumat	1.00E-01	1.00E-02
4	Ylempi moreeni	1.00E-01	1.00E-02
5	Keskimmäiset hiekat ja sorat	1.00E-01	1.00E-01
6	Keskimmäinen moreeni	1.00E-01	1.00E-02
7	Alemmat hiekat ja sorat	1.00E-01	1.00E-01
8	Alempi moreeni	1.00E-01	1.00E-01
9	Alimmat hiekat ja sorat	5.00E-01	5.00E-02
10	Alin moreeni	1.00E-01	1.00E-02
	RAPAUTUNUT/RAKOILLUT KALLIOPERÄ		
11	Rapautunut kallioperä	5.00E-02	5.00E-03
12	Rapautunut kvartsiitti	5.00E-02	5.00E-03
13	Rapautunut kvartsi-silttikivi	5.00E-02	5.00E-03
14	Rapautunut gabro	5.00E-02	5.00E-03
15	Rapautunut mafinen vulkaniitti	5.00E-02	5.00E-03
16	Rapautunut grafiitti paraliuske	5.00E-02	5.00E-03
17	Rapautunut biotiitti paraliuske	5.00E-02	5.00E-03
18	Rapautunut pikriittinen vulkaniitti	5.00E-02	5.00E-03
19	Rapautunut mafinen tuffi	5.00E-02	5.00E-03
20	Rapautunut basalttinen komatiitti	5.00E-02	5.00E-03
21	Rapautunut peridotiittinen komatiitti	5.00E-02	5.00E-03
22	Rapautunut peridotiitti	5.00E-02	5.00E-03
23	Rapautunut diabaasi	5.00E-02	5.00E-03
24	Rapautunut korkea-Mg basalti	5.00E-02	5.00E-03
25	Rapautunut alueelliset siirrokset	5.00E-02	5.00E-03
26	Rapautunut FLT_EAST	5.00E-02	5.00E-03
27	Rapautunut FLT_EW	5.00E-02	5.00E-03
28	Rapautunut FLT_MYLONITE1	5.00E-02	5.00E-03
29	Rapautunut FLT_SENW1	5.00E-02	5.00E-03
30	Rapautunut FLT_SENW2	5.00E-02	5.00E-03
31	Rapautunut FLT_CENTRAL	5.00E-02	5.00E-03
Materiaalivyöhykeindeksi	Litologia	Kh (m/day)	Kz (m/day)
32	Rapautunut FLT_THRUST	5.00E-02	5.00E-03
	EHJÄ, MUUTTUMATON KALLIOPERÄ		
33	kvartsiitti	8.64E-04	8.64E-05
34	silikaatti-silttikerros	8.64E-04	8.64E-05
35	gabro	8.64E-04	8.64E-05
36	mafinen kivi	8.64E-04	8.64E-05
37	grafiitti	8.64E-04	8.64E-05
38	biotiitti	8.64E-04	8.64E-05
39	pikriitti	8.64E-04	8.64E-05
40	myloniitti 2	3.50E-04	3.50E-04
41	SENW 2	3.50E-04	3.50E-04
42	SENW 1	3.50E-04	3.50E-04
43	myloniitti 1	3.50E-04	3.50E-04
44	siirros E	3.50E-04	3.50E-04
45	siirros EW	3.50E-04	3.50E-04
	Pohjaruhje		
46	Pohjan ylityöntösiirros 2	1.45E-01	1.45E-01
47	Pohjan ylityöntösiirros	1.45E-01	1.45E-01



NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI

Kh = vaakasuora johtavuus; Kz = pystysuora johtavuus



Mallin massatase

Taulukossa 7-4 esitetään steady-state-mallin vesitase ja siihen liittyvä virhe. Mallialueelle virtaa vettä pääasiassa mallin pohjoiselta reunavyöhykkeeltä ja mallin pintakerroksen imeytymästä. Vesitaseessa näkyy säännösteltyä Kitistä myötäilevä tasainen vakiovedenpinnan alue (constant head boundary). Vesitase osoittaa, että Kitiseen tulee vettä lasiaalisten ja fluviaalisten sedimenttien pohjavesijärjestelmästä. Tätä johtopäätöstä tukevat **kuvasa 7-5** esitetyt vedenpintojen sama-arvokäyrät.

Taulukko 7-4 Steady-state-mallin massatase

	Sisäänvirtaus (m ³ /vrk)	Ulosvirtaus (m ³ /vrk)	Virhe (%)
Kaukainen pintavesiyhteys (General Head Boundary)	1928,2	3552,3	
Joen tasainen vakiovedenpinnan alue	89,6	5443,4	
Imeytyminen	6977,9	0,0	
Varastointi	0,0	0,0	
Purkautuminen	0,0	0,0	
Yhteensä	8995,7	8995,7	0,0003

7.2 TRANSIENTTI KALIBROINTI

7.2.1 Kalibrointimenettely

Kun steady-state-kalibrointi oli valmis, malli kalibroitiin 28 seurantaputkesta (10.4.2012–2.7.2019) kerättyjä jatkuvia pohjavedenpintahavaintoja käyttäen. **Taulukossa 7-1** luetellaan mallin kalibrointiin käytetyt havaintoputket, niiden koordinaatit ja pohjavedenpintojen lähtökorkeudet. Transientin (muuttuvan virtauksen) mallin kalibroinnissa ei käytetty FEPEST-ohjelmaa vaan manuaalista transienttia kalibrointia. Tässä transientin tilan mallin kalibroinnissa ajallisesti muuttuvaa viikoittaista pohjaveden imeytymisessä aikavälillä 10.4.2012 ja 2.7.2019 sovellettiin mallin pintakerrokseen tasaisesti. Transientti mallin kalibrointi saavutettiin vaihtelemalla veden luovutuskvyn (Ss) arvoja ja korjaamalla sitten hydraulisen johtavuuden arvoja. Aina kun hydraulisia johtavuusarvoja muutettiin, alustava steady-state-malli suoritettiin uudelleen sen määrittämiseksi, täytyykö malliin tehdä lisämuutoksia. Prosessia toistettiin, kunnes sekä steady-state että transienttien mallien kalibrointi oli tyydyttävä.

7.2.2 Havaintoputket

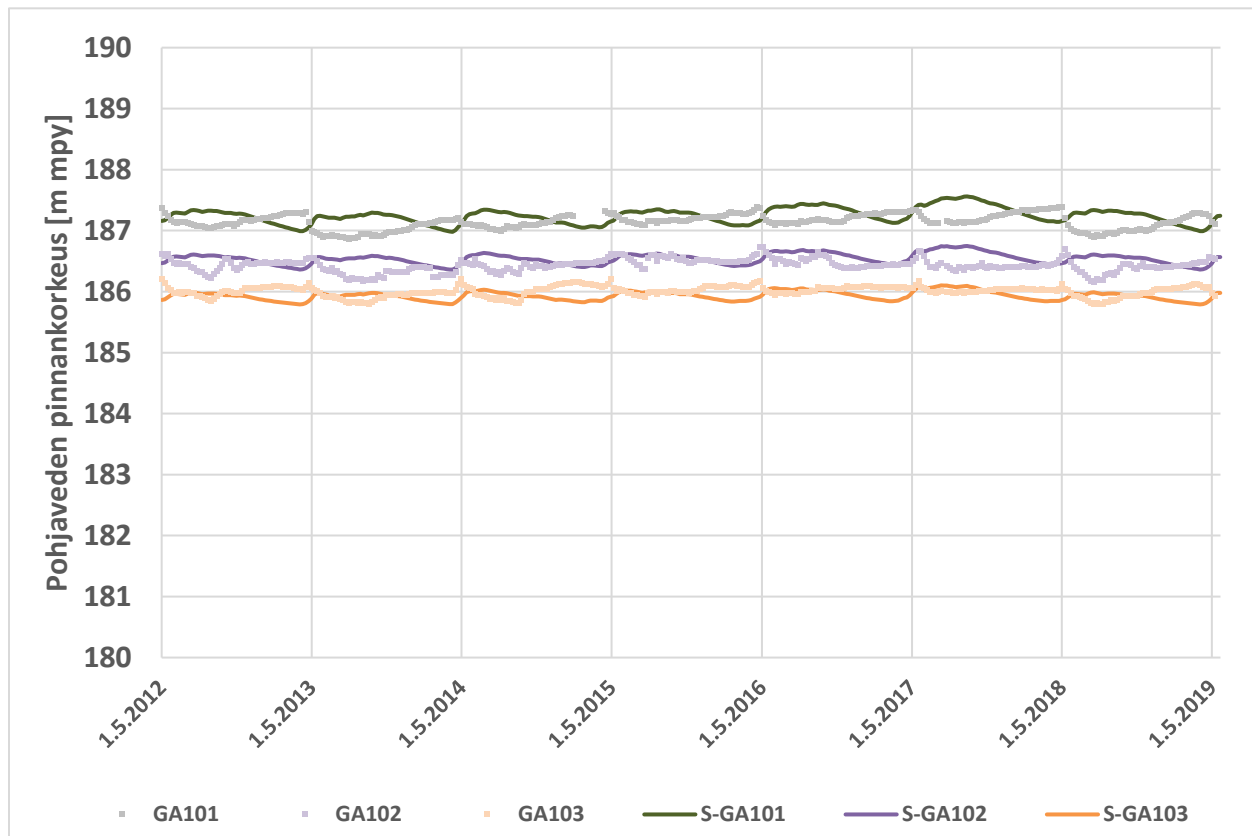
Kalibrointikohteina käytettiin **taulukossa 7-1** esitettyjä asiakkaan antamia pohjavedenpintatietoja. Kuten taulukosta käy ilmi, pohjavedenpintatiedot oli kerätty samanlaisilla aikaväleillä (vuosien 2012–2019 välillä). **Kuvassa 7-1** on esitetty pohjavedenpintakaivojen sijainti.

7.2.3 Kalibrointitulokset

Transientin mallin kalibroinnista saadut tulokset esitetään **kuvasa 7-6–7-10**. Nämä tulokset osoittavat, että FEFLOW-mallin transientti kalibrointi oli yhtenevä mallin kalibroinnin ohjesuositusten kanssa (Hill 1998), erityisesti turpeessa ja lasiaalisissa ja fluviaalisissa kerrostumissa. Joissakin havaintoputkissa, jotka on asennettu ehjille kallioperävyöhykkeille, on epäyhtenevyyksiä johtuen etupäässä kallioperän litologisesta heterogeenisuudesta.

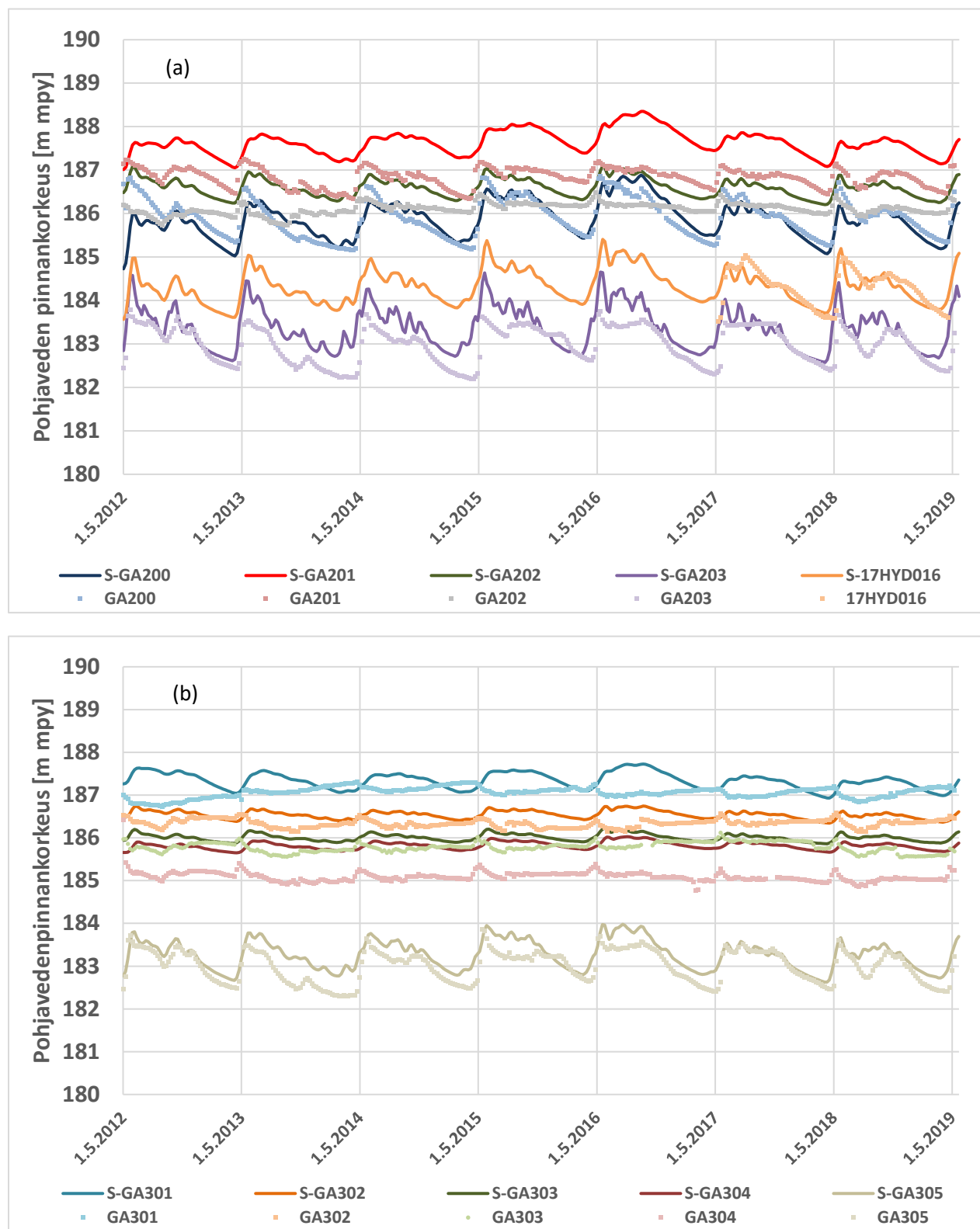


NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI



Kuva 7-6 Transienttimallin kalibroinnin tulokset turpeeseen asennetuille havaintoputkille.

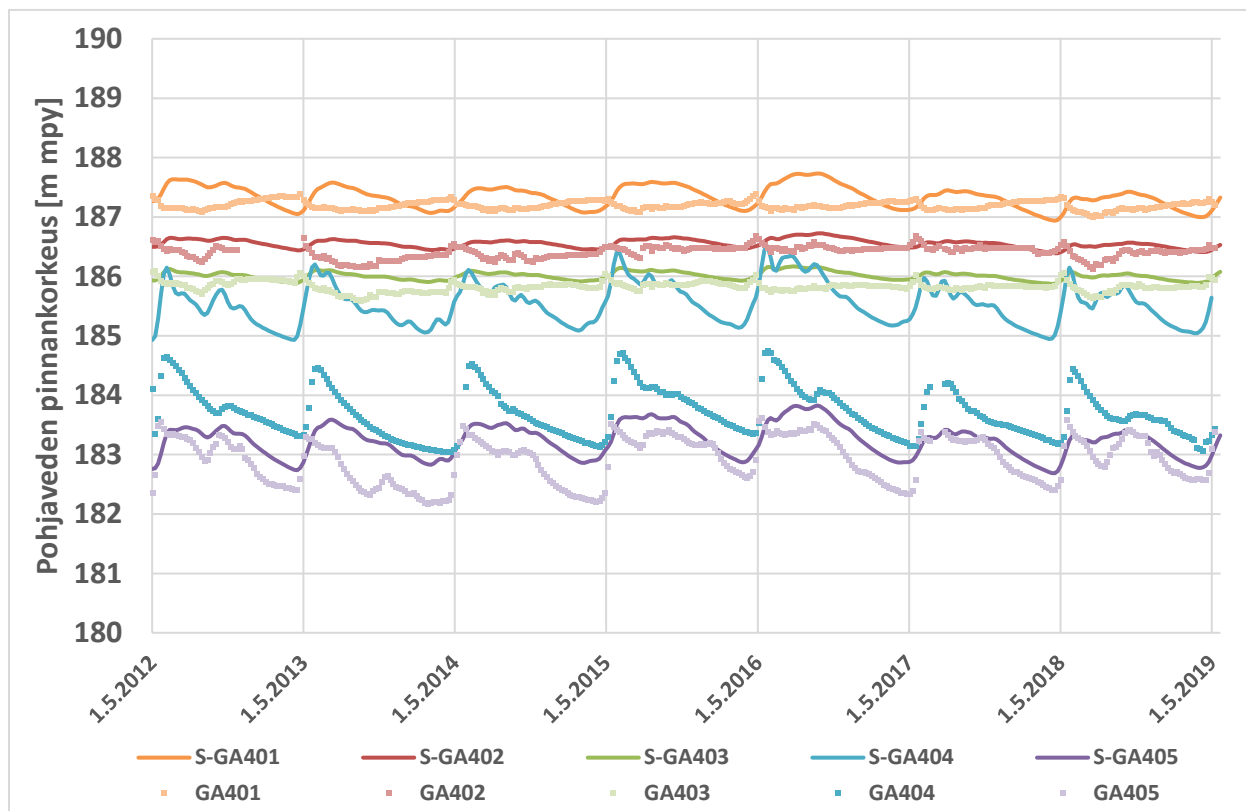




Kuva 7-7 Transienttimallin kalibroinnin tulokset glasiaalisiin ja fluviaalisiin kerrostumiin asennetuille havaintoputkille.



NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI

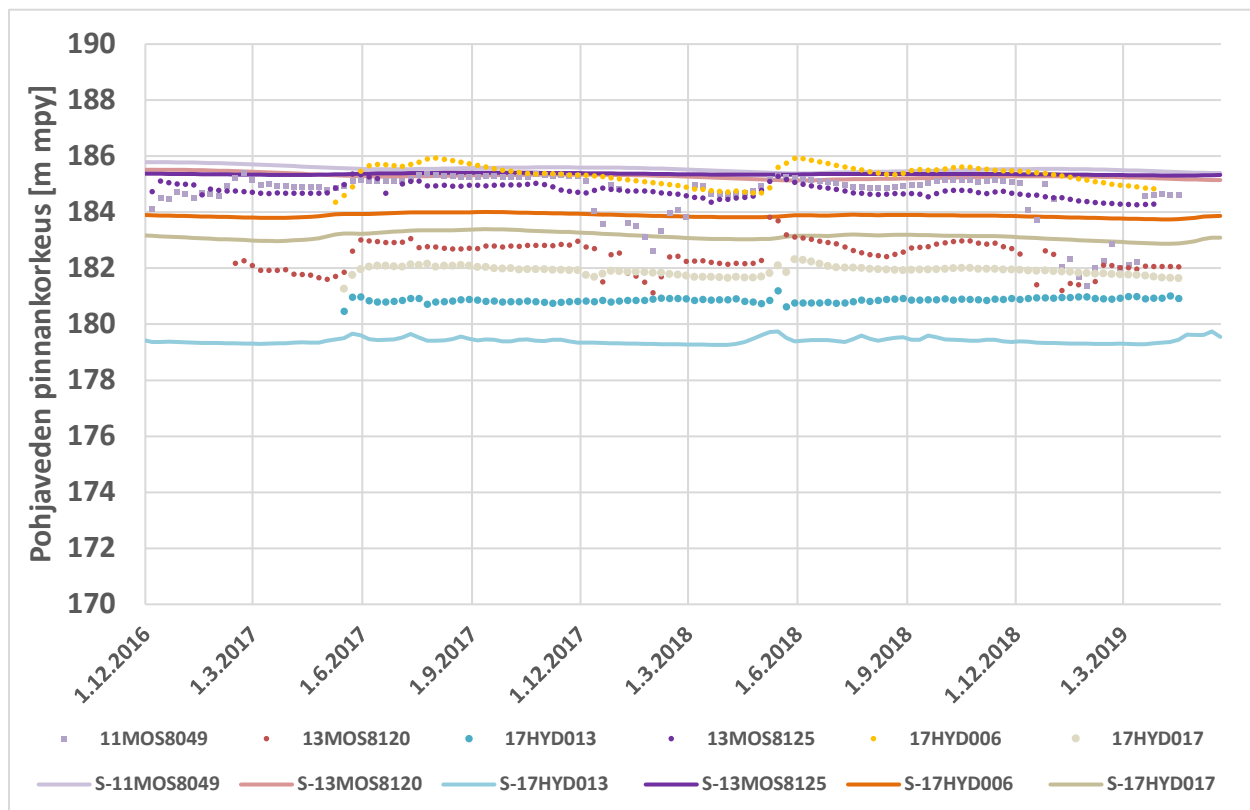


Kuva 7-8 Transienttimallin kalibroinnin tulokset rapakallioon asennutetuille havaintoputkille.



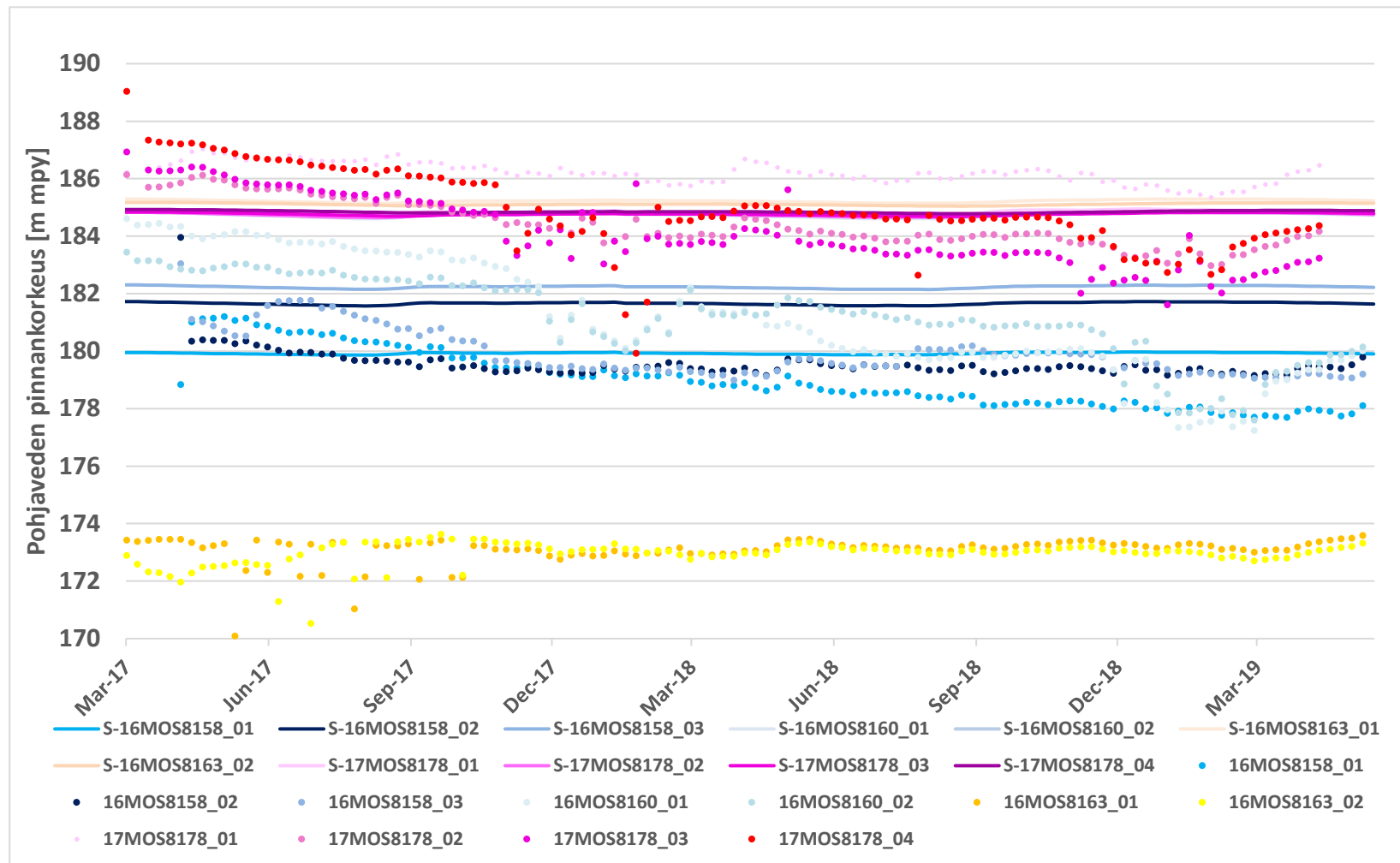
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI



Kuva 7-9 Transienttimallin kalibroinnin tulokset kallioperään asennetuille havaintoputkille.

NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI



Kuva 7-10 Transienttimallin kalibroinnin tulokset kallioperään asennetetuille tärylankapietsometreille (havaintoputkille).



7.2.4 Kalibroidut hydrauliset parametrit

Transientista kalibroinnista tehtiin lisäksi herkkyysanalyysit, joilla parannettiin mallin dynaamista vastetta. **Taulukossa 7-5** esitetään lyhyesti transientista kalibroinnista saadut kalibroidut hydrauliset muuttujat. Kolmen hydrogeologisen vyöhykkeen vesivarastokertoimet eivät muuttuneet merkittävästi alkuperäisistä arvoista, joiden lähteitä olivat Salonen ym. (2015), Åberg ym. (2017a, b) ja SRK (2019).

Taulukko 7-5 Kalibroidut hydrauliset parametrit: transienttikalibrointi

Materiaalivyöhykeindeksi	Litologia	Kh (m/vrk)	Kz (m/vrk)	Ss (1/m)
1	Kitinen			
	GLASIAALISET JA FLUVIAALISET SEDIMENTIT			
2	Turve	3.00E+00	4.00E-03	1.00E-03
3	Ylimmät kerrostumat	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-03
4	Ylempi moreeni	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-03
5	Keskimmäiset hiekat ja sorat	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-03
6	Keskimmäinen moreeni	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-03
7	Alemmat hiekat ja sorat	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-03
8	Alempi moreeni	1.00E-01	1.00E-01	1.00E-03
9	Alimmat hiekat ja sorat	5.00E-01	5.00E-02	1.00E-03
10	Alin moreeni	1.00E-01	1.00E-02	1.00E-03
	RAPAUTUNUT/RAKOILLUT KALLIOPERÄ			
11	Rapautunut kallioperä	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
12	Rapautunut kvartsiitti	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
13	Rapautunut kvartsi-silttikivi	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
14	Rapautunut gabro	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
15	Rapautunut mafinen vulkaniitti	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
16	Rapautunut grafiitti paraliuske	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
17	Rapautunut biotiitti paraliuske	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
18	Rapautunut pikriittinen vulkaniitti	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
19	Rapautunut mafinen tuffi	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
20	Rapautunut basalttinen komatiitti	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
21	Rapautunut peridotiittinen komatiitti	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
22	Rapautunut peridotiitti	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
23	Rapautunut diabaasi	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
24	Rapautunut korkea-Mg basaltti	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
25	Rapautunut alueelliset siirrokset	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
26	Rapautunut FLT EAST	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
27	Rapautunut FLT EW	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
28	Rapautunut FLT MYLONITE1	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
29	Rapautunut FLT SENW1	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
30	Rapautunut FLT SENW2	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
31	Rapautunut FLT CENTRAL	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
32	Rapautunut FLT THRUST	5.00E-02	5.00E-03	1.00E-03
	EHJÄ, MUUTTUMATON KALLIOPERÄ			
33	kvartsiitti	8.64E-04	8.64E-05	1.00E-03
34	silikaatti-silttikerros	8.64E-04	8.64E-05	1.00E-03
35	gabro	8.64E-04	8.64E-05	1.00E-03
36	mafinen kivi	8.64E-04	8.64E-05	1.00E-03
37	grafiitti	8.64E-04	8.64E-05	1.00E-03
38	biotitiitti	8.64E-04	8.64E-05	1.00E-03
39	pikriitti	8.64E-04	8.64E-05	1.00E-03
40	myloniitti 2	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
41	SENW 2	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
42	SENW 1	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
43	myloniitti 1	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06



NUMEERISEN MALLIN KALIBROINTI

Materiaalivyöhykeindeksi	Litologia	Kh (m/vrk)	Kz (m/vrk)	Ss (1/m)
44	siirros E	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
45	siirros EW	3.50E-04	3.50E-04	1.00E-06
	Pohjaruhje			
46	Pohjan ylityöntösiirros 2	1.45E-01	1.45E-01	1.00E-06
47	Pohjan ylityöntösiirros	1.45E-01	1.45E-01	1.00E-06

Kh = vaakasuora johtavuus; Kz = pystysuora johtavuus; Ss = veden luovutuskyky

7.3 YHTEENVETO

Stantecin numeerisen FEFLOW-pohjavedenvirtausmallin kalibrointi Sakatin kaivoshankkeelle noudattaa julkaisuissa Hill (1998) ja Anderson ja Woessner (1992) esitettyjä ohjeistuksia. Glasiaalista ja fluviaalista hydrostratigrafista vyöhykettä, joka sisältää pääasiassa glasiaalisia ja fluviaalisia kerrostumia, kuvaavan mallin kalibrointi perustuu 28 pohjavesiputkeen, ja kalibroidut hydrauliset muuttujat ovat kohtuullisen yhtäpitäviä lähtöarvojen kanssa, jotka on otettu seuraavista mallinnustutkimuksista: Salonen ym. (2015), Åberg ym. (2017a, b) ja Åberg ym. (2019). Kalibrointi rapautuneelle ja rikkonaiselle kallioperälle ja ehjälle kallioperälle on teollisuuden ohjeistuksen puitteissa (Hill 1998) mutta ei niin tarkka kuin kalibrointi glasiaalistien ja fluviaalistien kerrostumien vedenpinnoille. Kallioperän havaintoputkien spatiaalisen sijoittumisen ja kallioperän litologisen vaihtelevuuden takia kallioperän pietsometrisille vedenpinnoille on vaikea saavuttaa vastaavaa kalibrointitasoa kuin glasiaalistien ja fluviaalistien kerrostumien vedenpinnoille.



8.0 MALLINNUSTULOKSET: KAIVOS PERUSLIEVENNYSTOIMENPITEILLÄ

8.1 PERUSLIEVENNYSTOIMENPITEILLÄ TOTEUTETUN KAIVOKSEN PÄÄELEMENTIT

Kaivostoiminnan perusskenaario peruslievennystoimenpitein toteutettuna (vaihtoehto VE1A) on Sakatin mineraaliesiintymän kaivossuunnitelmaehdotus, joka perustuu maanalaisiin louhintamenetelmiin. Tämän kaivossuunnitelmaehdotuksen pääkohdat on esitetty yksityiskohtaisesti luvussa 4. Alla esitetään kaivossuunnitelmaehdotuksen pääkohdat, jotka vaikuttavat pohjaveden virtaukseen kaivoksessa kaivostoiminnan aikana ja sen lopettamisen jälkeen.

1. Maanalainen kaivos käsittää esiintymälle johtavan 5 kilometrin pituisen vinotunnelin. Tämä vinotunneli on avoin kaivoksen koko elinkaaren ajan ja jää avoimeksi, eikä sitä hyödynnetä enää kaivostoiminnan loputtua. Tunneli koostuu neljästä TBM-tunnelista ja yhteensä tätä tunneliporausta on 20 kilometriä.
2. Tuotantotunnelien verkoston kautta päästään esiintymälle ja niiden kautta kuljetetaan malmi pinnalle. Tuotantotunnelien verkosto pidetään auki kaivoksen koko eliniän ja jää avoimeksi, eikä sitä hyödynnetä enää kaivostoiminnan loputtua.
3. Mineraaliesiintymän louhiminen käyttäen välitaso- ja pengerlouhinnan eri sovelluksia ja avoin louhittu tila täytetään pastatäytöllä, kun louhinta on lopetettu. Koska pastatäytön massa on hyvin pienihuokoista ja louhitut alueet täytetään pian louhinnan lopettamisen jälkeen, mineraaliesiintymän louhittua osuutta (louhintaperien ja louhosten muodostamaa aluetta) ei mallinnettu vaan sitä käsiteltiin kuin sillä olisi paleoproterotsooisien kallioperän hydrauliset ominaisuudet.
4. Kaivostoiminnan loputtua tuotantotunnelien järjestelmä jätetään auki – toisin sanoen sitä ei täytetä.
5. Kaivostoiminnan loputtua myös 5 kilometrin vinotunneli ja vastaavat tunneliporaukset jätetään avoimiksi – niitä ei siis täytetä. Vinotunnelin suuaukko suljetaan, niin että maan alle pääsy estyy.
6. Kaikki hyvin vettä johtavat pystysiirokset tai muut rakenteet, jotka läpäistään kaivostoiminnan aikana, injektoidaan ennen niiden läpäisemistä. Tämä suojaa kaivostyöntekijöitä mahdolliselta äkilliseltä veden sisäänvirtaukselta.
7. Pohjaruhje injektoidaan niiltä osin kuin 5 kilometrin vinotunneli läpäisee rakenteen ennen kuin vinotunnelia aletaan louhia rakenteen läpi. Näin suojataan hanketyöntekijöitä ja vähennetään veden virtausta vinotunneliin.

Täytettäessään malmion louhitut osat pastatäytöllä Anglo American vähentää suuresti pohjaveden virtausta kaivokseen ja vähentää samalla kaivostoiminnan aikana käsiteltävän veden määrää. Samoin kaivostoiminnan aikana läpäistävien pystysiirosten injektointi vähentää pohjaveden virtausta maanalaiseen kaivokseen ja suojaa kaivoshenkilökuntaa mahdolliselta äkilliseltä veden tulvimiselta. Vinotunneleiden rakentamisen aikana pohjaruhje injektoidaan niiltä osin kuin se läpäistään tunnelien rakentamisen aikana. Tämä on välttämätöntä, koska pohjaruhje rikkonainen ja lisäksi pohjaruhjeessa on tuntematon määrä pleistoseenikautista vettä, mikä havaittiin akviferin testauksessa.



8.2 POHJAVEDEN ARVIOITU SISÄÄNVIRTAUS

Yksi tärkeimmistä huomioon otettavista seikoista Sakatin mineraaliesiintymän ehdotetun maanalaisen kaivostoiminnan aikana on pohjaveden sisäänvirtaus kaivokseen. Pohjaveden sisäänvirtaus avoimeen maanalaiseen kaivokseen kaivostoiminnan eri vaiheiden aikana aina 5 kilometrin vinotunnelin rakentamisesta esiintymän louhimisen lopettamiseen saakka arvioitiin numeerisella pohjavesimallilla. Pohjavettä virtaa rajallisia määriä 5 kilometrin vinotunneliin ja tuotantotunnelien verkostoon, joita pitkin päästään esiintymään ja kuljetetaan malmia ulos kaivoksesta. Pohjavettä ei virtaa kaivosperiin eikä louhoksiin, joissa malmiota louhitaan, sillä louhinnan päätyttyä kaikki osat täytetään sivukivimassalla. Injektoinnin rajoittavaa vaikutusta siirrostien ja pohjaruhjeen vedenvirtaukseen simuloitiin käyttämällä siirrostien ja pohjaruhjeen mallinnuksessa hyvin pientä hydraulisen johtavuuden arvoa.

Taulukossa 8-1 on yhteenveto arvioidusta pohjaveden sisäänvirtauksesta maanalaiseen kaivokseen kaivostoiminnan edetessä 5 kilometrin vinotunnelin rakentamisesta kaivostoiminnan lopettamiseen. Pohjaveden sisäänvirtausta mallinnettiin käyttämällä luvussa 4.0 kuvattuja kaivostoimintavaiheita. Kaivostoiminnan edetessä kaivostoimintavaiheesta Y-1 kaivostoimintavaiheeseen Y-3 ja myöhempiin kaivostoimintavaiheisiin pohjavesi virtaa olemassa oleviin kaivoksen osiin samoin kuin kaivostoimintavaiheessa rakennettuihin uusiin osiin. Kaivostoimintavaiheessa Y-3 pohjavettä virtaa kaivostoimintavaiheessa Y-1 rakennettuihin maanalaisiin tunneleihin (656 m³/vrk) sekä lisäksi kaivostoimintavaiheessa Y-3 rakennettuihin uusiin tunneleihin (2 405 m³/vrk). Pohjaveden yhteenlaskettu sisäänvirtaus kaivostoiminnan vuosina 2–3 on 3 061 m³/vrk.

Taulukko 8-1 Kaivostoiminta peruslievennystoimenpiteillä

Ajanjakso [vuosi]	Kaivosvaihe Y-1 [M ³ /VRK]	Kaivosvaihe Y-3 [M ³ /VRK]	Kaivosvaihe Y-8 [M ³ /VRK]	Kaivosvaihe Y-15 [M ³ /VRK]	Kaivosvaihe Y-22 [M ³ /VRK]	Total [M ³ /VRK]
Vuosi 1	955	-	-	-	-	955
Vuodet 2–3	656	2405	-	-	-	3061
Vuodet 4–8	652	1978	649	-	-	3280
Vuodet 9–15	653	1908	611	256	-	3428
Vuodet 16–22	650	1820	463	247	358	3538

Huomautus: Kallioperän pohjaveden sisäänvirtausmäärät maanalaiseen kaivokseen. Kaivosvaihe Y-1 käsittää 5 kilometrin vinotunnelin rakentamisen. Kaikki muut kaivosvaiheet sisältävät 5 kilometrin vinotunnelin sekä infrastruktuurin pääsyntunnelien louhinnan ja rakentamisen. Kaivosvaiheet ovat esitetty kappaleessa 4.0.

Yksiköt: M³/VRK = kuutiometriä vuorokaudessa.

Kuten **taulukosta 8-1** voidaan nähdä, pohjaveden sisäänvirtaus saavuttaa nopeasti arvon 3 000 m³/vrk lopullisen arvon ollessa 3 538 m³/vrk. Näiden mallinnettujen arvioiden perusteella voidaan olettaa, että suurimman osan Sakatin kaivoksen elinkaaresta kaivokseen virtaavan käsiteltävän veden määrä on 3 000–3 500 m³/vrk.

8.3 POHJAVEDEN MALLINNETTU ALENEMA YLIMMISSÄ KERROSTUMISSA

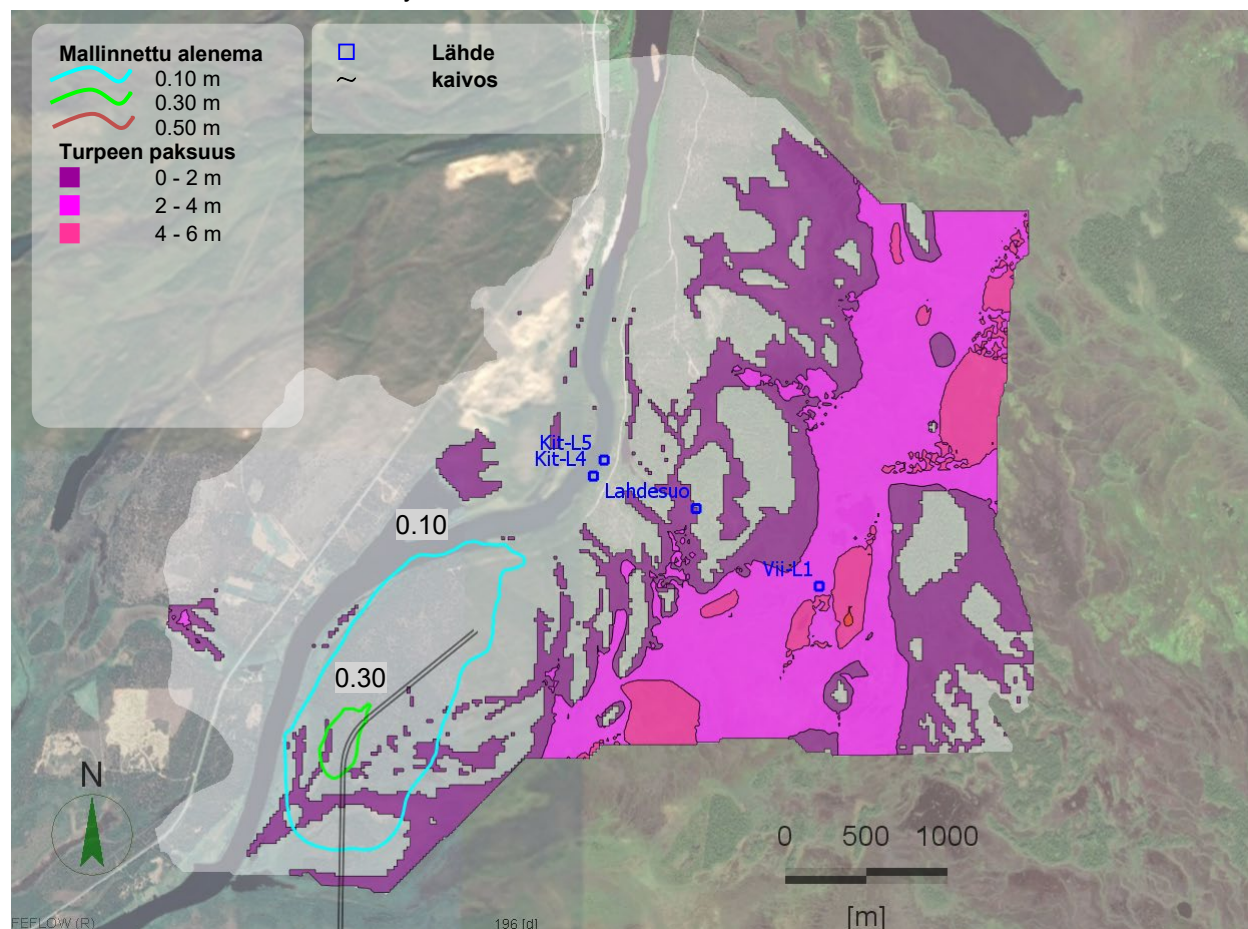
Sakatin kaivoshankeen tärkeä huolenaihe on maanalaisesta kaivostoiminnasta mahdollisesti aiheutuva alenema turpeen alla olevien glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien pohjavedenpintaan. Esiin ovat nousseet mahdolliset vaikutukset herkkiin ja uhanalaisiin lajeihin. Mallikerroksen 1 muodostavien hiekka- ja sorakerrostumien (pintakerrostumissa) sekä turpeen alenemaa arvioitiin numeerisella pohjavesimallilla. Mahdollinen alenema mallinnettiin ja pohjavedenvirtaus suunniteltuun maanalaiseen kaivokseen arvioitiin



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

MALLINNUSTULOKSET: kaivos peruslievennystoimenpiteillä

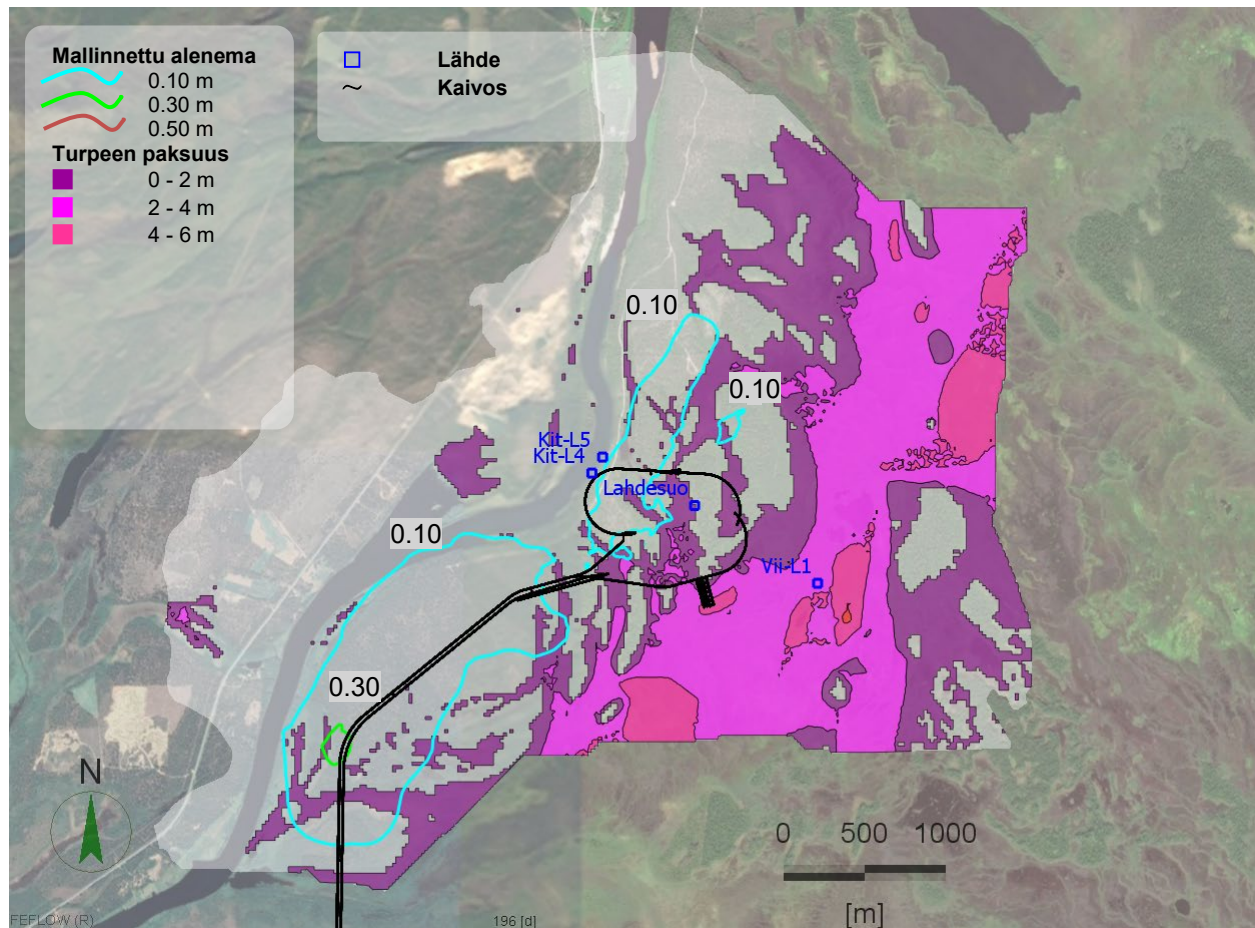
Anglo Americanin jokaiselle kaivostointavaiheelle, joita käsitellään luvussa 4-0. **Kuvat 8-1–8-5** havainnollistavat aleneman kehittymistä kaivostoiminnan edetessä.



Kaivoksen jäljellä on 5 kilomerin vinotunneli

Kuva 8-1 Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (glasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-1.





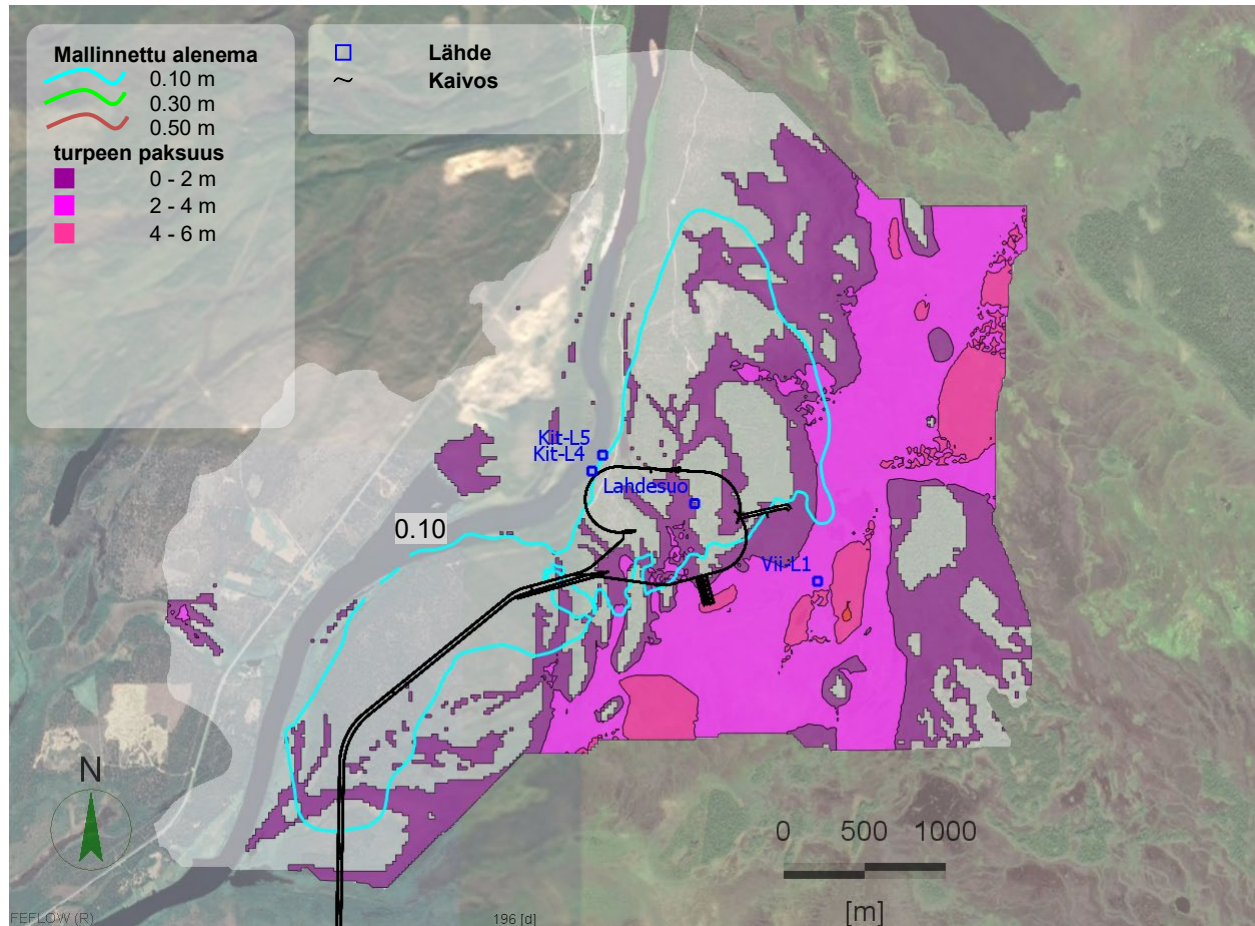
Kaivostoiminnan jalanjälki on vinotunneli ja osa tuotantotunneleista

Kuva 8-2 Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (glasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-3.

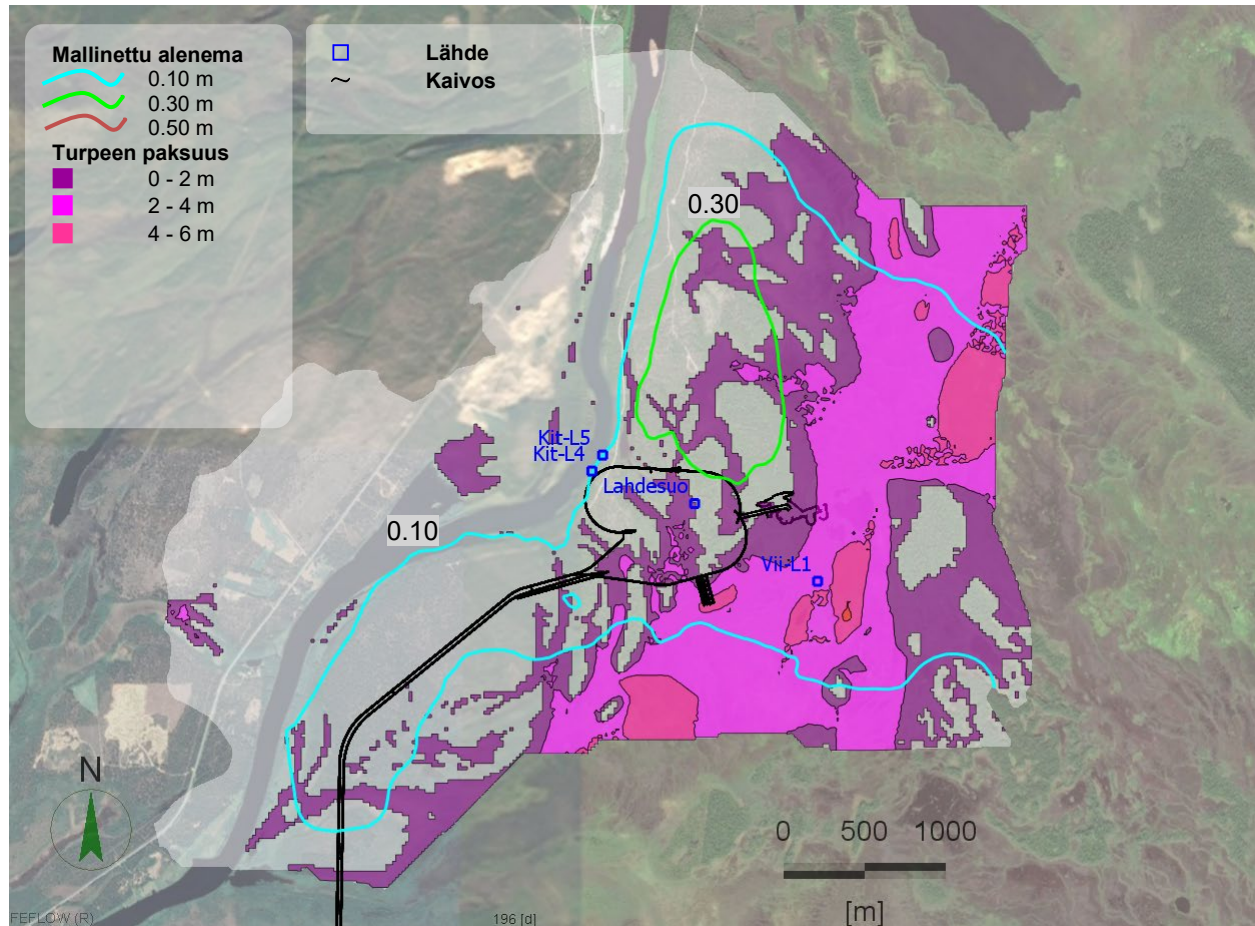


SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

MALLINNUSTULOKSET: kaivos peruslievennystoimenpiteillä



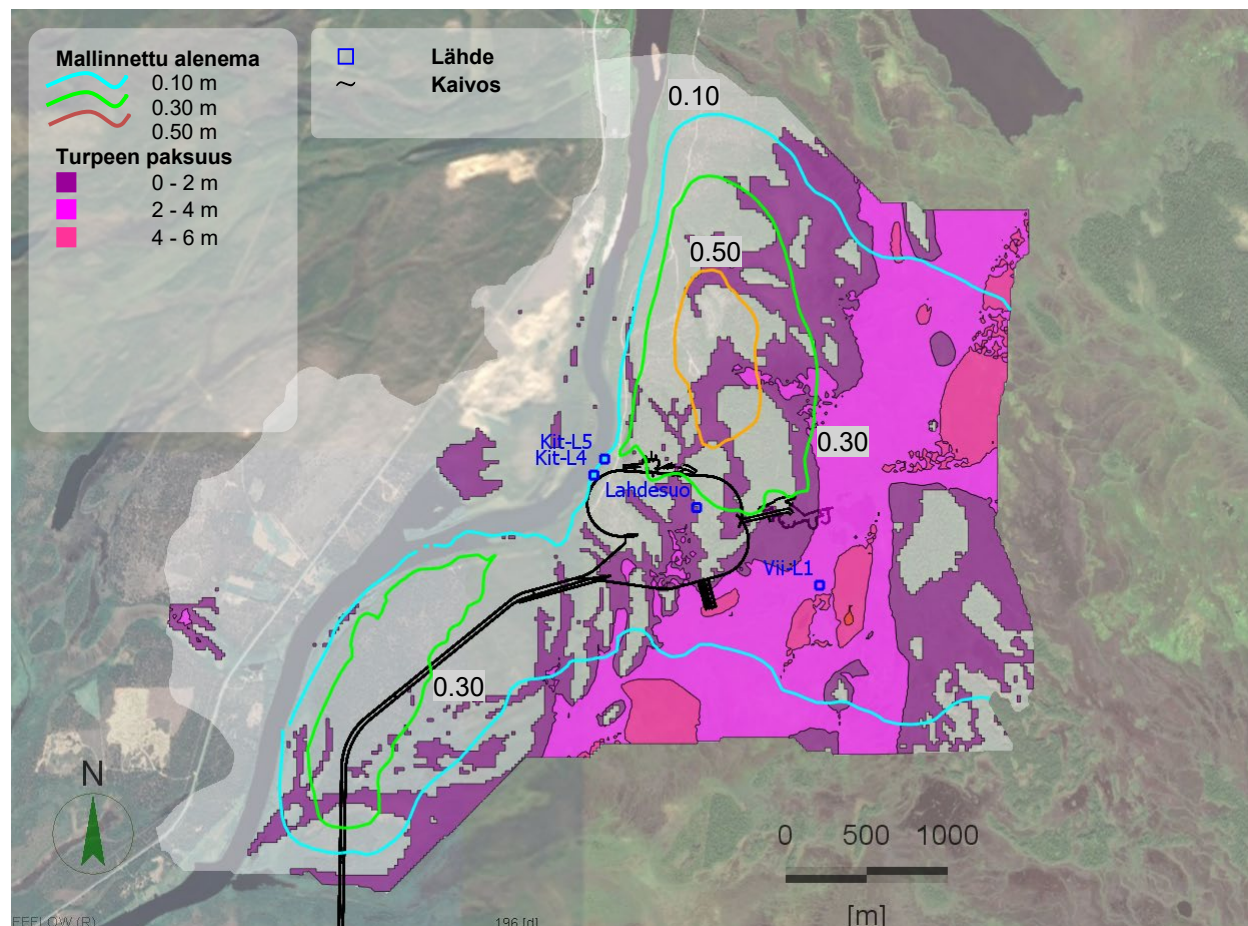
Kuva 8-3 Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (glasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-8.



Kuva 8-4 Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenema mallin kerroksessa 1 (glasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-15.



MALLINNUSTULOKSET: kaivos peruslievennystoimenpiteillä

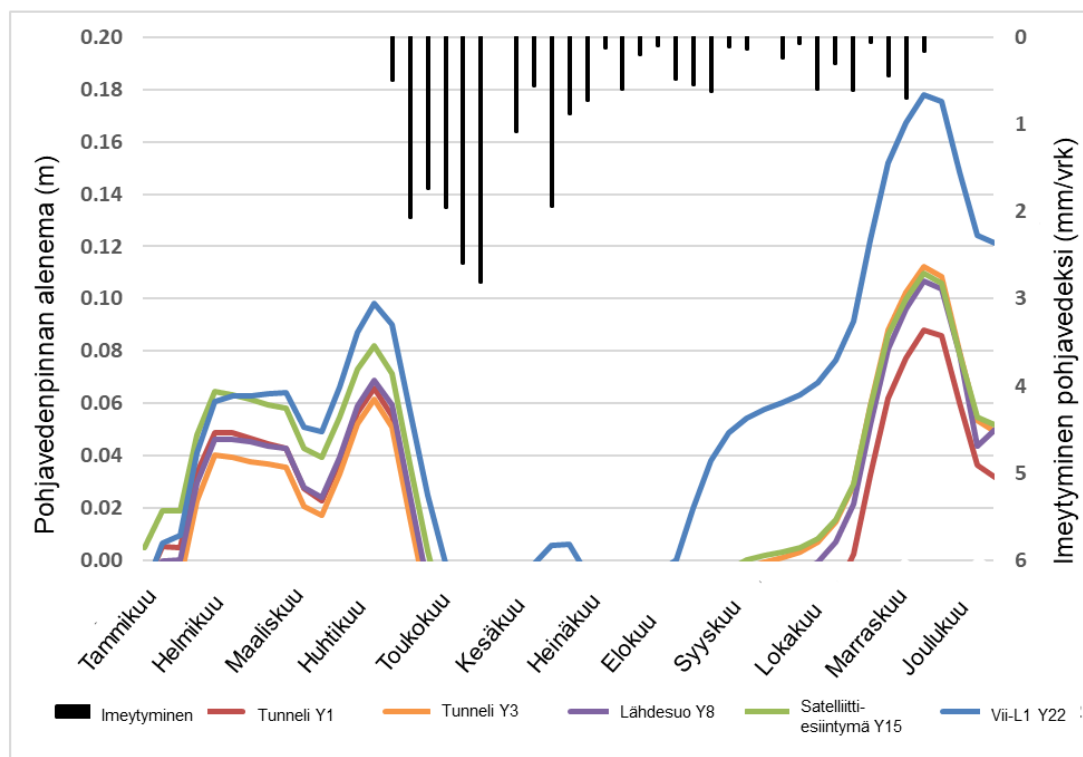


Kuva 8-5 Kaivos peruslievennystoimenpitein: Pohjaveden pinnan alenuma mallin kerroksessa 1 (glasiaaliset ja fluviaaliset pintakerrokset ja turve) kaivostoiminnan vaiheessa Y-22.

Kuva 8-1 esittää alenumaa, joka liittyy kaivostoimintavaiheen Y-1 aikana rakennettavaan 5 kilometrin vinotunneliin. **Kuvat 8-2-8-5** esittävät alenuman kehittymistä mallikerroksessa 1 kaivostoiminnan edetessä. Arvioitu enimmäisalenuma on noin 0,5 metriä, joka toteutuu kaivostoimintavaiheessa Y-22. Alenuma on mallinnettu eikä todellinen kentällä mitattavissa oleva alenuma, koska keväällä roudan sulaessa alenuma korvautuu lumen sulamisvesistä imeytymisen kautta syntyvällä pohjavedellä (katso seuraava kappale). FEFLOW-mallissa mallinnettu kerroksen 1 alenuma koskee sekä lajittuneita pintakerrostumia että turvetta, jonka katsotaan olevan pintakerrostumien tavoin osa akviferia (katso luku 5.0). Todellisuudessa turve ei ole osa akviferia vaan orsivettä sisältävä ja alaosaan vettä huonosti johtava yksikkö, mikä rajoittaa veden vuorovaikutusta alla olevien pintakerrostumien hiekka- ja soraosien kanssa. Alenuman oletetaan olevan turpeessa paljon pienempi kuin mitä FEFLOW-mallissa on arvioitu.

Numeerisen mallin mukaan laskettu alenuma ei ota huomioon ylempään glasiaaliseen ja fluviaaliseen hiekka- ja sorakerrokseen (mallikerros 1) imeytyvän pohjavesimäärän vaihtelua, joka johtuu lumen ja roudan sulamisesta. Koska suo roudan sulaessa tulvi, alenuman mittaustulokset ovat toukokuussa ja kesäkuussa hyvin pieniä. Kun roudan sulamisen aiheuttama pohjaveden muodostumien keski- ja myöhäiskesällä vähenee, pohjavesi alkaa aleta kerroksen 1 (pintakerrostumat) glasiaalisissa ja fluviaalisissa kerrostumissa, ja alenuma saattaa olla mitattavissa (katso **kuva 8-6**). Alenuma on

suurimmillaan talvikuukausina, kun suo on jäässä eikä imeytyminen vaikuta vedenpintoihin. Kaavio **kuvassa 8-6** havainnollistaa, miten vaihteleva imeytyminen vaikuttaa suon todelliseen mitattavaan alenemaan.



Kuva 8-6 Kaivostoiminnan perustapaus: mitattavissa oleva pohjaveden pintojen alenema mallikerroksessa 1 sekä pohjaveden muodostumisen vuodenaikaisvaihtelu.

8.4 POHJAVEDEN PINNAN PALAUTUMINEN KAIVOSTOIMINNAN LOPETTAMISEN JÄLKEEN

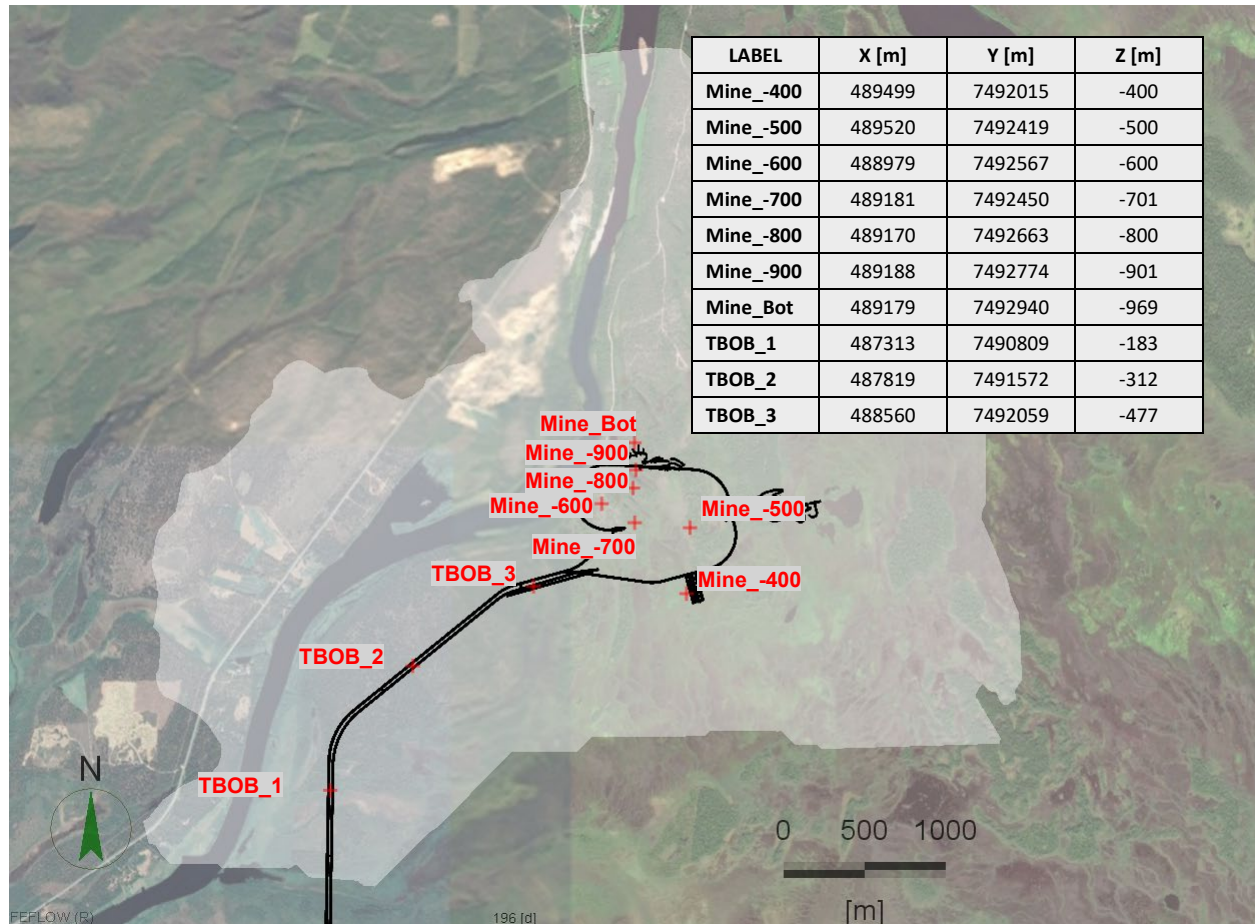
Kun kaivostoiminta suunnitellussa Sakatin kaivoksessa aikanaan loppuu, maan alle jäävät sekä täytetyt kaivosperät ja louhokset että malmioon johtavat tuotantotunnelit ja 5 kilometrin pituinen vinotunneli. Paleoproterotsooisen kallioperän pohjavesi tulee täyttämään tuotantotunnelit ja 5 kilometrin vinotunnelin ja kalliopohjaveden pinta palautuu lähelle kaivostoimintaa edeltäviä tasoja. Suon alla sijaitsevilla glasiaalisissa ja fluviaalisissa kerrostumissa pohjavesi palautuu kaivostoimintaa edeltävälle tasolle 1 vuodessa – tämä johtuu lumien sulamisvesien imeytymisestä ja pohjavesivarantojen täydentymisestä. **Kuvat 8-7–8-9** esittävät pohjaveden palautumista kallioperässä. **Kuva 8-7** esittää niiden alueiden sijaintia, joita käytettiin pohjaveden palautumisen arvioinnissa. **Kuva 8-8** esittää palautumisen prosentuaalisen osuuden ajan funktiona kaikilla näillä alueilla. Palautumiseen kuluvaksi ajaksi on arvioitu kalliopohjavedelle noin 200 vuotta ja 95-prosenttinen palautuminen kestää arviolta noin 80 vuotta. **Kuvassa 8-9** esitetään palautunut pohjavedenkorkeus ajan funktiona. Suurimmillaan kallioperän palautunut vedenpinta (pohjavedenkorkeus) on arviolta noin 183 metriä keskimääräisen merenpinnan yläpuolella, noin 1,8 metriä



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

MALLINNUSTULOKSET: kaivos peruslievennystoimenpiteillä

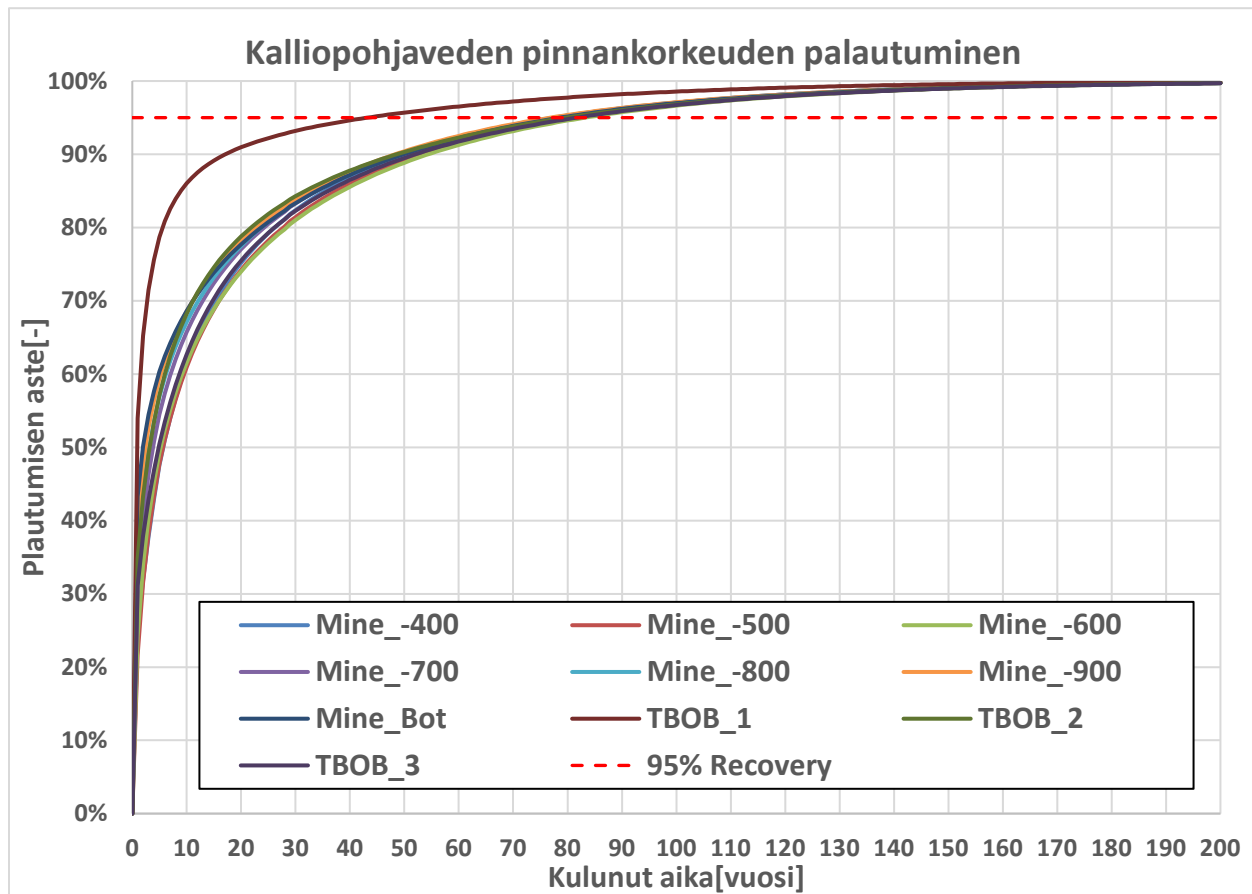
5-kilometrisen vinotunnelin suuaukon tason alapuolella. Palautumisen jälkeen kalliopohjaveden pintojen arvellaan olevan 181–183 metriä keskimääräisen merenpinnan yläpuolella.



Kalliopohjaveden palautumisen arvioimisessa käytetyt sijainnit.

Kuva 8-7 Kaivos peruslievennystoimin



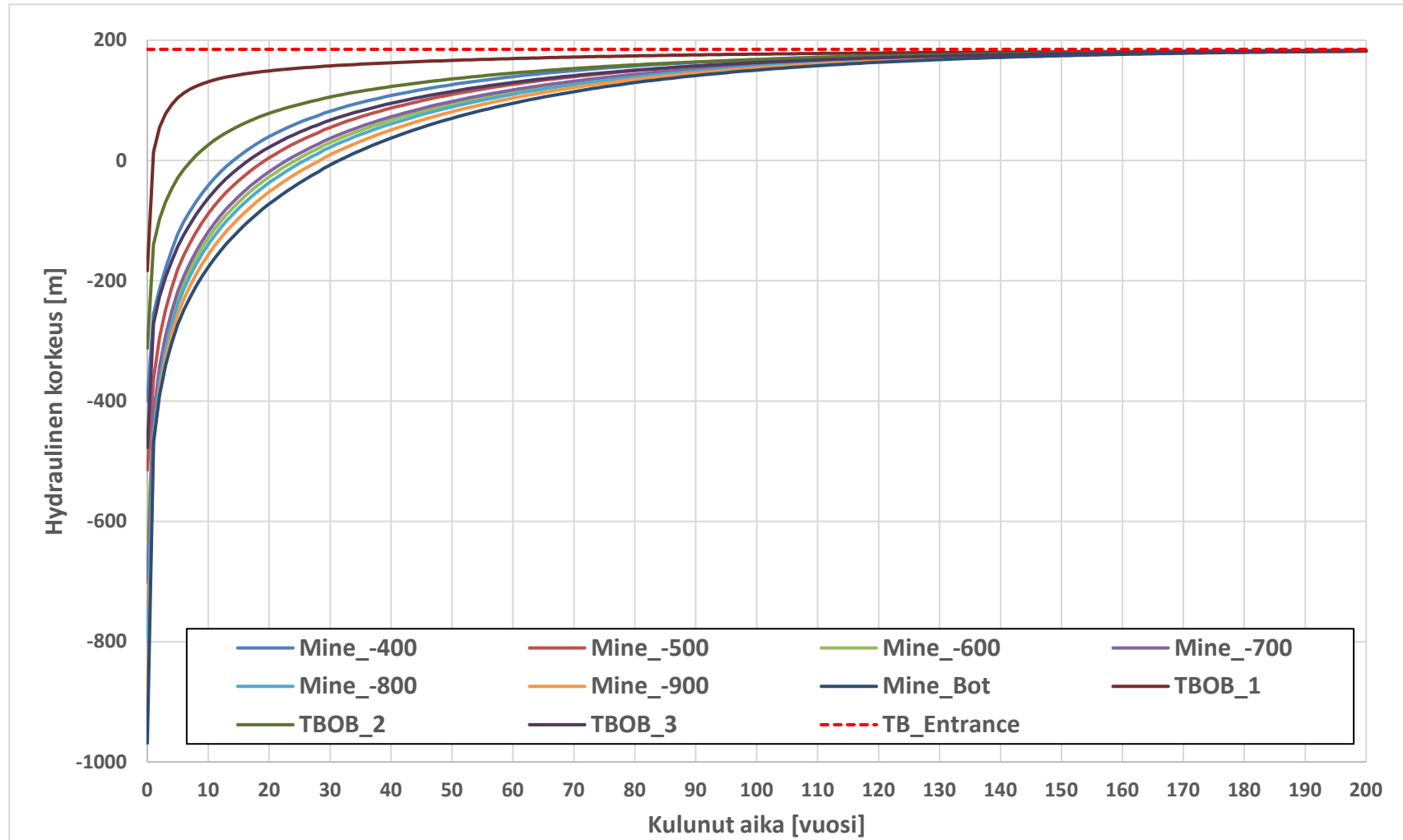


Kuva 8-8 Kaivos peruslievennystoimin: Kaivoksen sulkemisen jälkeinen kallioperän pohjaveden pintojen prosentuaalinen palautuminen ajan funktiona vuosissa.



SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

MALLINNUSTULOKSET: kaivos peruslievennystoimenpiteillä



Kuva 8-9 Kaivos peruslievennystoimin: Kaivostoiminnan jälkeinen kallioperän pohjaveden pintojen taso (Hydraulic Head) metreissä suhteessa merenpinnan tasoon ajan funktiona vuosissa kaivostoiminnan lopettamisen jälkeen.



9.0 MALLINNUKSEN TULOKSET: KAIVOSTOIMINTA ERITYISIN LIEVENTÄVIN TOIMENPITEIN

Maanalaiseen kaivokseen virtaavan pohjavesimäärän vähentäminen on tärkein seikka, johon Anglo Americanin tulee kiinnittää huomiota. Se on tärkeää työntekijöiden turvallisuuden ja käsittelyä tarvitsevan vesimäärän vähentämisen kannalta sekä lopulta Viiankiaavan turpeeseen ja muihin maaperäkerrostumiin kohdistuvan vaikutuksen vähentämisen kannalta. Tässä työssä tutkittiin erilaisia toimenpiteitä, joilla pohjaveden purkautumista kaivokseen voidaan pienentää.

9.1 ERITYISET LIEVENNYS-TOIMENPITEET

Pohjaveden purkautumisen vähentämiseksi tarkasteltiin pääasiassa kahta vaihtoehtoa: 1) kallioperän ja kallioperän pystysiirosten kanssa kosketuksessa olevien glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien vedenjohtavuuden pienentäminen ja 2) maanalaisen tilojen vedejohtavuuden pienentäminen.

Ensimmäisessä vaihtoehdossa harkittiin kallioperän ja siirosten kanssa suorassa kosketuksessa olevien glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien vedenjohtavuuden pienentämistä "maaperän jäädyttämiseksi" kutsutulla menetelmällä. Tässä menetelmässä kallioperän kanssa kosketuksissa olevien glasiaalisten ja fluviaalisten kerrostumien hiekkavaltaiset osat jäädytetään, jolloin niiden huokoisuus saadaan poistettua lähes kokonaan. Menetelmän avulla voitaisiin merkittävästi pienentää turpeen alla olevissa kerrostumissa tapahtuvaa pohjaveden alenemaa. Menetelmää voidaan kuitenkin hyödyntää vain väliaikaisesti noin 3–5 vuoden ajan, minkä vuoksi sitä voitaisiin käyttää vain eniten vedenpintaa laskevan kaivostoimintavaiheen aikana. Kerrostumien jäädyttäminen on huomattavan kallis menetelmä, joka vaatii luvittamista eikä sen toteuttamiskelpoisuudesta kaikissa tilanteissa ole varmuutta. Lisäksi kerrostumien jäädyttäminen katkaisee pohjaveden luonnollisen virtauksen ja muodostumisen turpeen alla olevissa maaperäkerrostumissa ja saattaa siten vaikuttaa suohon merkittävämmän kuin kaivostoiminnan aiheuttama rajallinen vedenpinnan alenema, jota käsitellään luvussa 8.0. Tämä lähestymistapa hylättiin mahdollisten ympäristövaikutusten, teknisten vaikeuksien ja epävarman onnistumisen vuoksi.

Toista lieventämistapaa, eli tuotantotunnelien ja 5 kilometrin pituisen vinotunnelin vedenjohtavuuden vähentämistä, arvioitiin teknisestä näkökulmasta ja sen havaittiin olevan kustannustehokas ja toteuttamiskelpoinen. Tässä menetelmässä injektoidaan laaja-alaisemmin ne tuotantotunnelien ja 5 kilometrin pituisen vinotunnelin alueet, joilla numeerisen virtausmallin mukaan tapahtuu pohjaveden purkautumista/sisäänvirtausta. Lisäksi käytössä ovat peruslievennystoimenpiteet. Pohjaveden purkautumisen väheneminen arvioitiin näiden alueiden injektointia simuloivalla mallilla.

9.2 KAIVOKSEN INJEKTOIMINEN ERITYISENÄ LIEVENTÄVÄNÄ TOIMENPITEENÄ

Ensisijaiseksi erityiseksi lievennystoimenpiteeksi valittiin sekä tuotantotunnelien että 5 kilometrin pituisen vinotunnelin injektointi. Tätä toimenpidettä mallinnettiin numeerisella mallilla, jonka avulla arvioitiin maanalaisiin kaivostiloihin virtaavan veden määrän väheneminen ja suohon kohdistuvan vaikutuksen pienentyminen. Mallisimulaatio vähensi kallioperän hydraulista vedenjohtavuutta ja läpäisevyyttä alueilla, joilla maanalaiseen vinotunneliin ja tuotantotunneleihin virtaavan pohjaveden määrä oli pieni osoittaen injektion avulla rajoitettua vedenvirtausta.



9.3 MALLINNETTU POHJAVEDEN ALENEMA YLEMMÄSSÄ KERROKSESSA

Injektoiminen vähensi pohjaveden purkautumista tuotantotunneleihin ja 5 kilometrin vinotunneliin noin 50 prosentilla. **Taulukossa 9-1** esitetään erityisin lieventämistoimenpitein toteutettavan kaivoksen arvioidut pohjaveden purkautumismäärät verrattuna peruslieventämistoimenpiteillä toteutettavan kaivoksen arvoituihin pohjaveden purkautumismääriin.

Taulukko 9-1 Kallioperän pohjaveden purkautumismäärät maanalaiseen kaivokseen erityisin lieventävin toimenpitein toteutettavassa kaivoksessa

Ajanjakso [VUOSI]	<i>Pohjaveden purkautuminen erityisin lievennystoimenpitein</i>						<i>Perusmalli</i>
	Y1 [M3/VRK]	Y3 [M3/VRK]	Y8 [M3/VRK]	Y15 [M3/VRK]	Y22 [M3/VRK]	Yhteensä [M3/VRK]	Yhteensä [M3/VRK]
Vuosi 1	452	-	-	-	-	452	955
Vuodet 2–3	322	1181	-	-	-	1504	3061
Vuodet 4–8	319	968	318	-	-	1604	3280
Vuodet 9–15	321	937	300	126	-	1684	3428
Vuodet 16–22	320	897	228	122	176	1745	3538

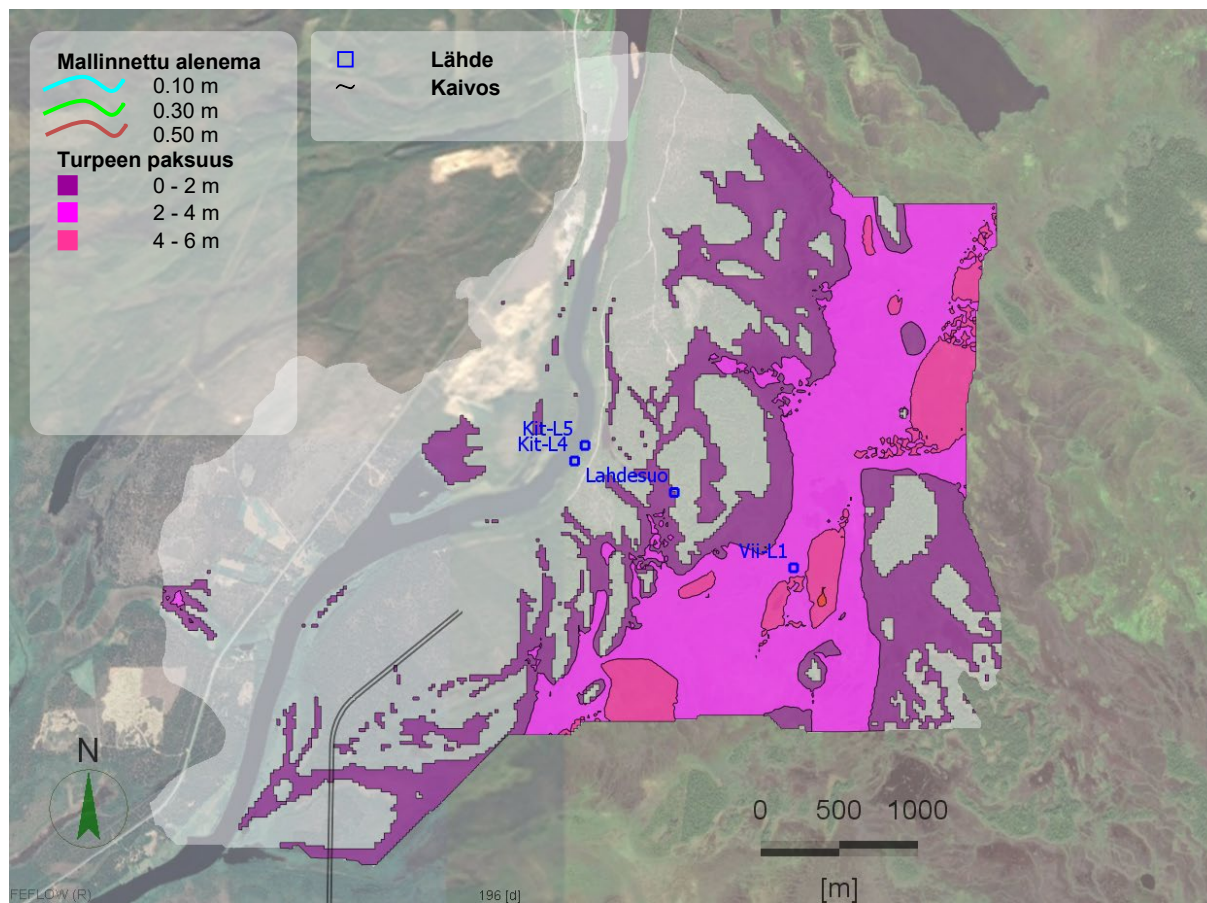
Kaivosvaihe Y-1 käsittää 5 kilometrin vinotunnelin rakentamisen. Kaikki muut kaivosvaiheet sisältävät 5 kilometrin vinotunnelin ja infrastruktuurin pääsyntunneleiden kehityksen. Kaivosvaiheet ovat esitetty kappaleessa 4.0.
Yksiköt: M3/VRK = kuutiometriä vuorokaudessa.

Pohjaveden pinnan alenema mallinnettiin ylimmissä sora- ja hiekkakerroksissa (pintakerrostumissa) ja turpeessa erityisin lieventävin toimenpitein toteutettavassa kaivoksessa. Aleneman mallintamiseen käytetty menetelmä oli sama kuin luvussa 8.0 esitetty. Kaivostoiminnan eri vaiheiden aiheuttama alenemat mallinnettiin ja laskettiin turve- ja pintakerrokset sisältävälle mallikerrokselle 1 samoin kuin **luvussa 8.0**. Nämä alenemat esitetään valituille kaivostoimintavaiheille **kuvin 9-1–9-5**.



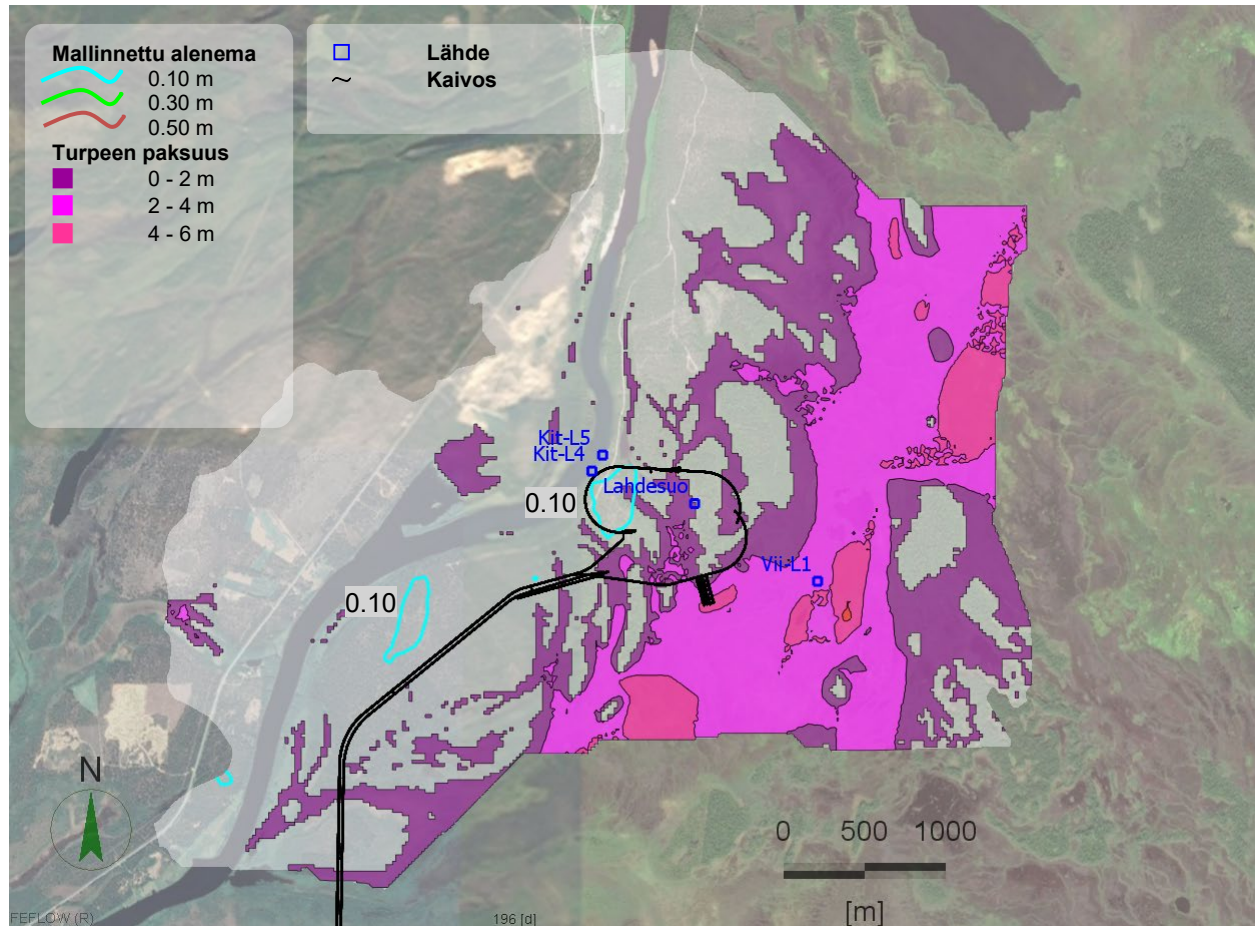
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

MALLINNUKSEN TULOKSET: KAIVOSTOIMINTA ERITYISIN LIEVENTÄVIN TOIMENPITEIN



Kuva 9-1 Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y1)

MALLINNUKSEN TULOKSET: KAIVOSTOIMINTA ERITYISIN LIEVENTÄVIN TOIMENPITEIN

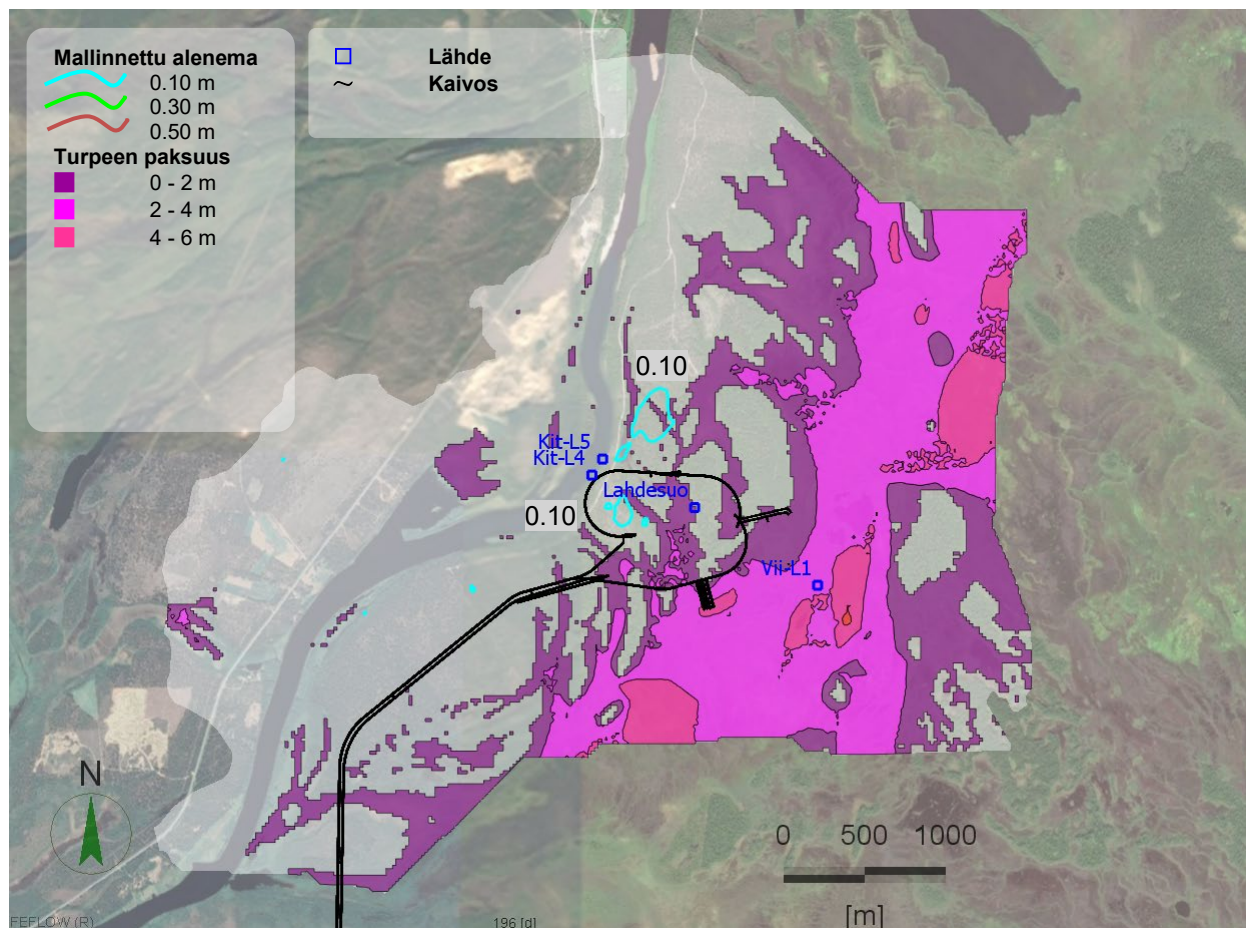


Kuva 9-2 Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y3)



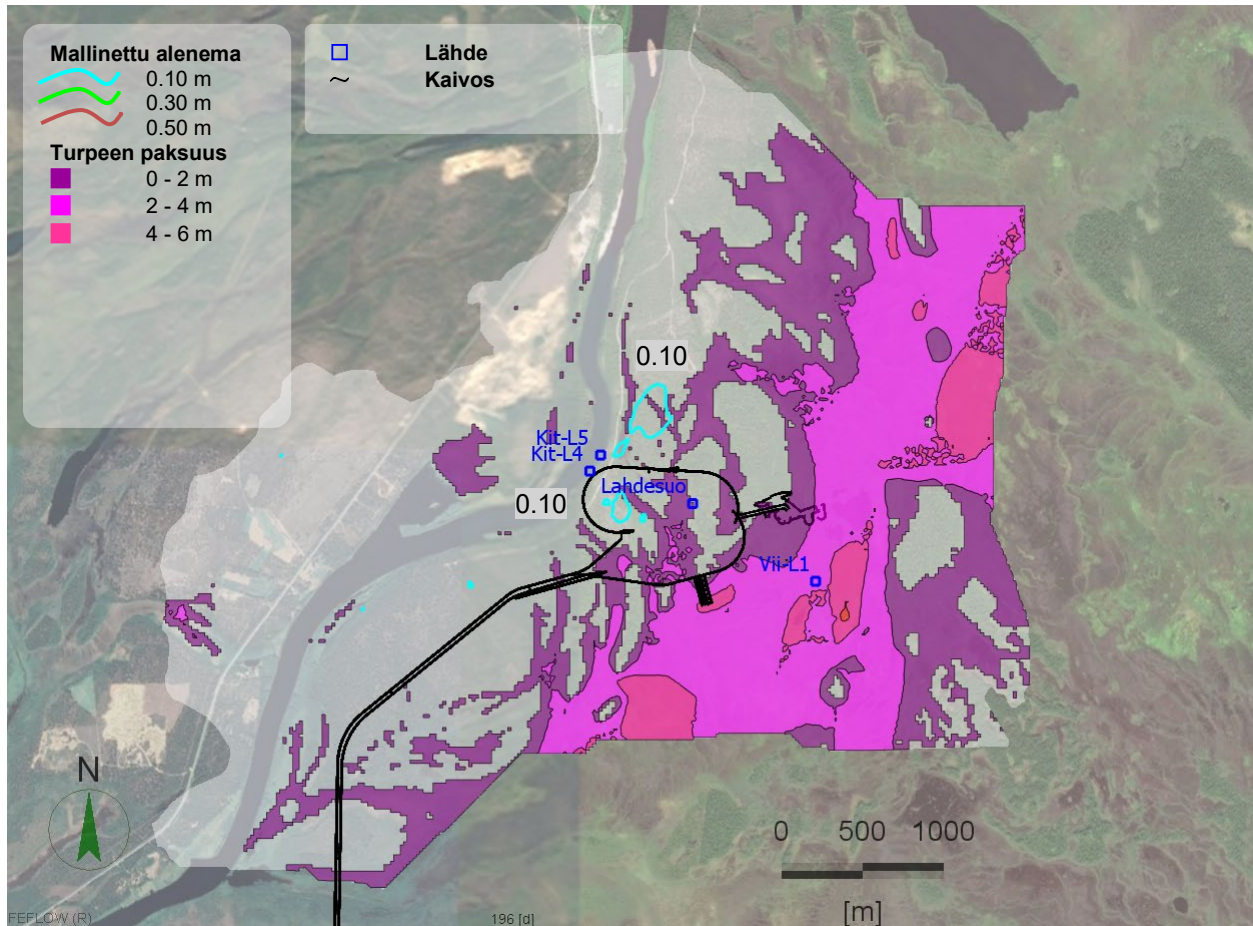
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

MALLINNUKSEN TULOKSET: KAIVOSTOIMINTA ERITYISIN LIEVENTÄVIN TOIMENPITEIN



Kuva 9-3 Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y8)

MALLINNUKSEN TULOKSET: KAIVOSTOIMINTA ERITYISIN LIEVENTÄVIN TOIMENPITEIN

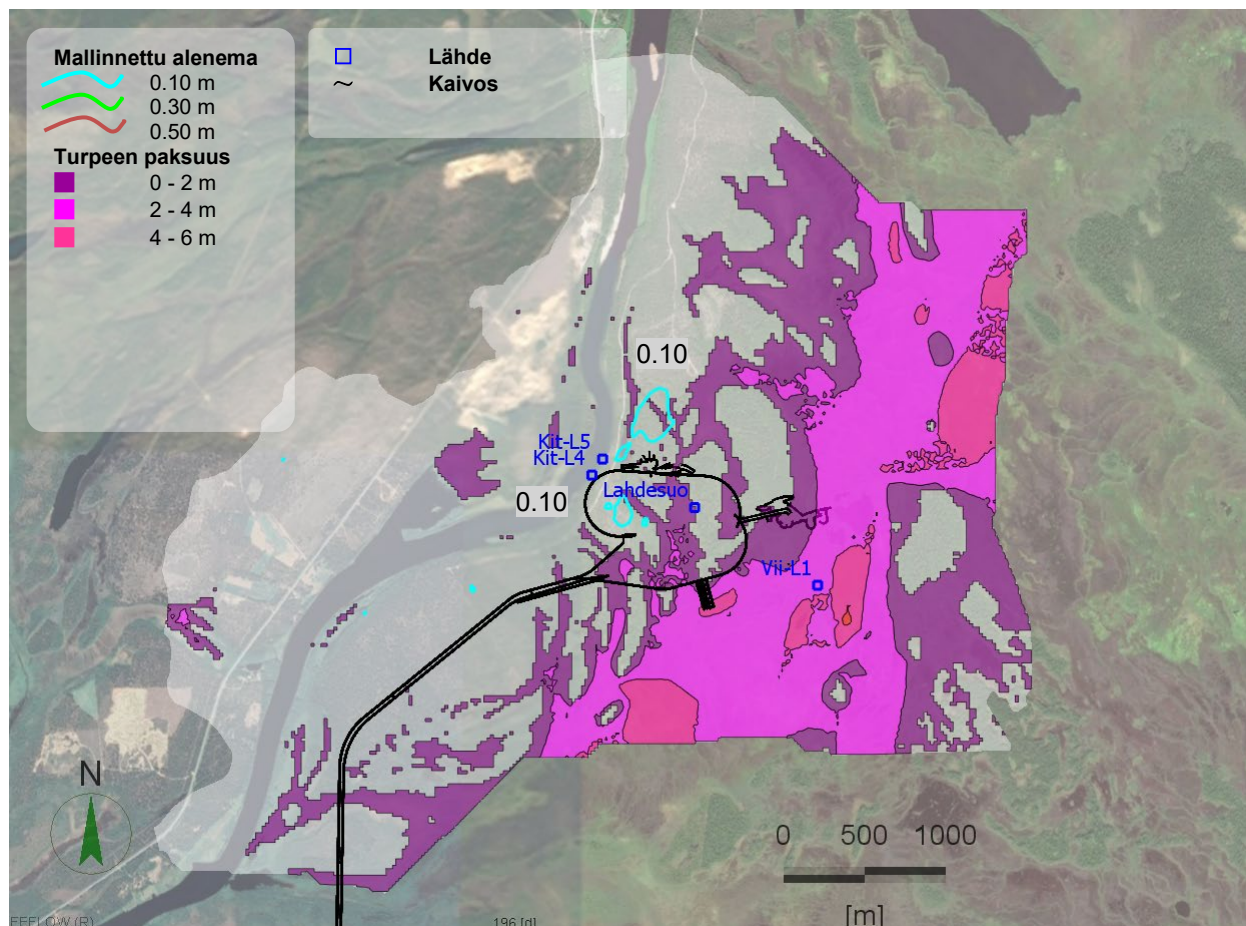


Kuva 9-4 Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y15)



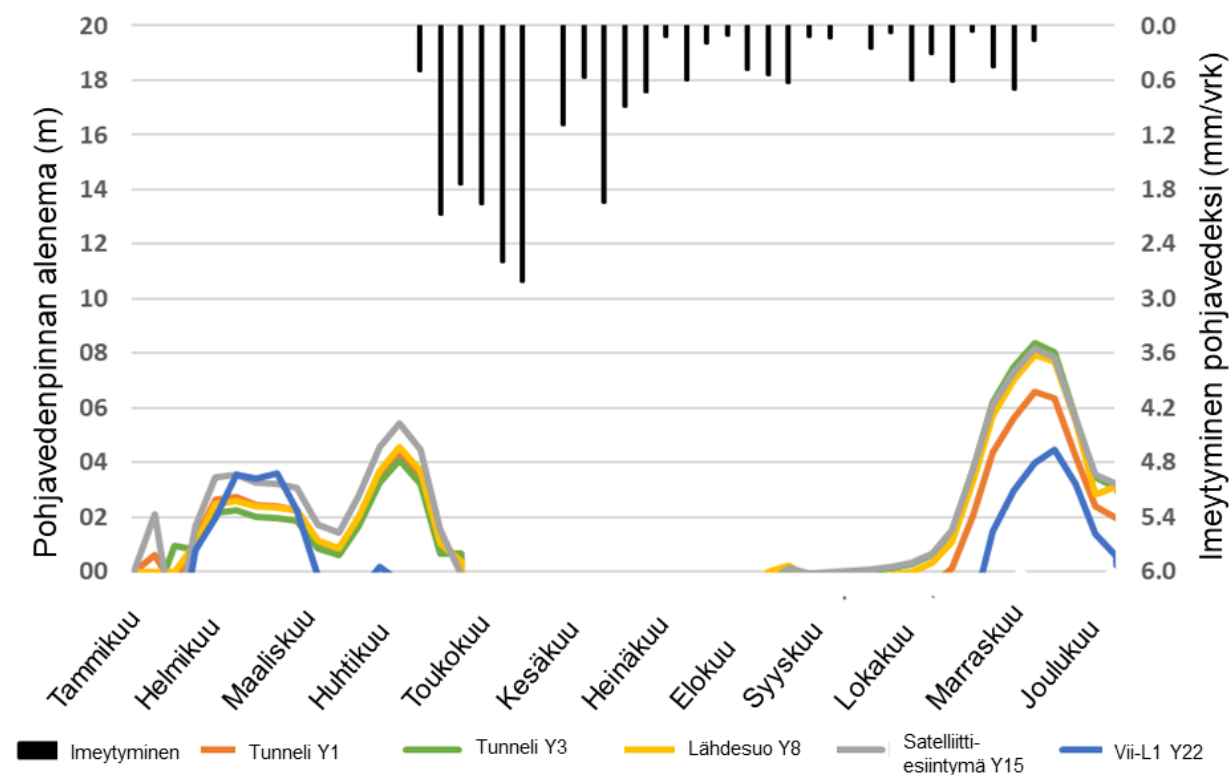
SAKATIN KAIVOSHANKKEEN POHJAVESIVAIKUTUSTEN MALLINNUS

MALLINNUKSEN TULOKSET: KAIVOSTOIMINTA ERITYISIN LIEVENTÄVIN TOIMENPITEIN



Kuva 9-5 Kaivos erityisin lievennystoimenpitein: Pohjaveden alenema mallikerrokselle 1 (Kaivosvaihe Y22)

Kuten peruslievennystoimenpiteillä toteuttavassa kaivoksessa todellinen alenema vaihtelee suolla vuodenajasta riippuen. Keväällä sulamisvesien aiheuttama pohjaveden muodostuminen kompensoi alenemaa ja todellinen mitattavissa oleva alenema saattaa olla nolla. Kun pohjaveden muodostuminen vähenee keski- ja myöhäiskesällä, alenema alkaa näkymään ylimmässä hiekka- ja sorakerroksessa (mallikerros 1) ja alenema saavuttaa maksimin talvikuukausina. **Kuvassa 9-6** esitetään arvioitu alenema erityisin lievennystoimenpitein toteutettavalle kaivokselle.



Kuva 9-6 Mallinnettu pohjaveden alenema mallikerroksessa 1 verrattuna kausittaiseen pohjaveden muodostumiseen erityisin lievennystoimenpitein toteutetussa kaivoksessa.

9.4 POHJAVEDEN PINTOJEN PALAUTUMINEN KAIVOSTOIMINNAN PÄÄTTYTTYÄ

Kaivostoiminnan peruslieventämistapauksen mukaisesti kaivostoiminnan päättyessä alkaa pohjavettä virrata tuotantotunneleihin ja 5 kilometrin vinotunneliin ja lopulta nämä kaivostoiminnan jälkeensä jättämät avoimet tilat täyttyvät vedellä. Tämän seurauksena kallioperän pohjavedenpinta alkaa palautua ja saavuttaa lopulta kaivostoimintaa edeltävän vedenpinnan tason. Kaivostoiminnan jälkeistä pohjaveden palautumista ei mallinnettu erityisin lievennystoimenpiteillä toteutettavalle kaivokselle, koska pohjavesi palautuu samalla tavalla kuin peruslievennystoimenpiteillä toteutettavassa kaivoksessa. Molemmissa malliskenaarioissa lopullinen vedenpinta tulee olemaan sama.

Erona peruslievennystoimenpiteisiin ja erityisiin lievennystoimenpiteisiin perustuvissa malleissa on pohjavedenpintojen palautumisnopeus. Erityisten lievennystoimenpiteiden tilanteessa pohjaveden pintojen palautuminen kallioperään kestää kauemmin, sillä 5 kilometrin vinotunnelin ja tuotantotunnelien vettä johtavien osien injektointi hidastaa näiden avointen kaivostilojen vedellä täyttymistä. Täten pohjaveden 95-prosenttiseen ja myös täydelliseen palautumiseen kuluu enemmän aikaa. Pohjaveden pintojen palautumisajan arvioidaan kestävän noin 50–100 vuotta kauemmin erityisin lievennystoimenpitein toteutettavalle kaivokselle kuin kaivostoiminnan peruslievennyskenaariossa.



10.0 ILMASTONMUUTOS JA SAKATIN ALUE

Ilmastomuutos vaikuttaa kaikkialla maapallolla maailmanlaajuisen lämpenemisen johdosta ja ilmiöllä on dramaattinen vaikutus arktiseen alueeseen. Jäätiköt vetäytyvät eikä merijäätä muodostu napapiirin pohjoispuolella edes talvikuukausien aikana. Ikirouta on alkanut sulaa ja vapauttaa usein metaanikaasua, jota muodostuu kasvillisuuden hajotessa ja jota vapautuu ilmakehään ensimmäistä kertaa vuosisatoihin. Jäätilanteen vuoksi talvikuukausien ajaksi suljetut satamat alkavat olla joko jäätömiä tai jäätä on talvella vähemmän, minkä ansiosta laivaliikenne voi lisääntyä talvikuukausien aikana. Pitkällä aikavälillä kasvillisuuskuvioiden arvioidaan muuttuvan arktisella alueella vuoteen 2100 mennessä siten, että arktisten valtioiden alempien leveyspiirien kasvillisuus siirtyy pohjoisemmas. Sakatin kaivosalueen kannalta on tärkeätä selvittää, miten globaali lämpeneminen vaikuttaa Viiankiaapaan ja on vuorovaikutuksessa niiden vaikutusten kanssa, joita saattaa aiheutua esitetyn maanalaisen Sakatin kaivostoiminnasta ja mineraaliesiintymän louhimisesta suunnitellun 22 toimintavuoden aikana.

Suomen maa- ja metsätalousministeriön laatimassa *Ilmastomuutoksen kansallisessa sopeutumisstrategiassa* (Marttila ym. 2005) esitetään lyhyesti erilaiset mallinnustulokset ja globaalin lämpenemisen mahdolliset biologiset, fysikaaliset ja kulttuuriset seuraukset Suomessa 2010–2100. Julkaisu tarjoaa mallinnustuloksia, joita voidaan käyttää arvioitaessa kvalitatiivisesti, miten globaali lämpeneminen mahdollisesti vaikuttaa Viiankiaapaan ja Sakatin kaivosalueeseen. Lisäksi SRK (2018) kehitti ajanjaksolle 2011–2100 Sodankylän alueelle lämpötila- ja sademääräarviot kokoamalla ilmastomallit hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin viidennestä arviointiraportista (IPCC; AR5 [IPCC 2014]) ja suorittamalla erilaisten malliennusteiden todennäköisyysanalyysin. Nämä arviot ovat periaatteessa yhteneviä Veikko Marttilan (ym. 2005) esittämien arvioiden kanssa.

SRK (2018) arvioi, että lämpötila Sodankylässä ja ehdotetulla Sakatin kaivosalueella muuttuu 1,72 °C vuosina 2011–2040, 3,22 °C vuosina 2041–2070 ja 4,59 °C vuosina 2071–2100. Tämä noudattaa Marttilan ym. (2005) arvioimaa 2–3 °C:n lisäystä vuoteen 2040 mennessä ja 3–5 °C:n lisäystä vuoteen 2060 mennessä. Vuonna 2040, joka on suunnitellun Sakatin kaivoksen viimeinen arvioitu toimintavuosi, lämpötilanousu on noin 10 prosenttia verrattuna ajanjakson 1961–1990 keskilämpötilaan. Marttilan ym. raportti (2005) osoitti, että lämpötilat ovat suurimpia talvi- ja kevätkuukausina. Kasvukausi pitenee 4 viikolla, pintavesien lämpötilojen nousu on noin 5 °C vuoteen 2100 mennessä ja vuoteen 2100 mennessä satamien jääpeite vähenee 54–80 prosenttia.

Marttilan et al: raportin (2005) mukaan sadanta vuosina 2010–2039 lisääntyisi talvikuukausina 9–16 prosenttia ja kevätkuukausina 4–12 prosenttia. Kesäkuukausina lisäys olisi 4–9 prosenttia ja syyskuukausina 5–7 prosenttia. Vuosittainen sadannan lisääntyminen on noin 6–9 prosenttia vuoteen 2039 mennessä. Talvikuukausina lumipeite ohenee ja vesisateet lisääntyvät. SRK:n (2019) mukaan sadannan keskimääräinen lisäys vuosina 2011–2040 on 109 mm/vuosi, joka on perustason sadantaan (608 mm/vuosi) nähden 18 prosentin lisäys. Vuosina 2041–2070 sadanta lisääntyy arviolta 207 mm/vuosi (34 prosenttia) ja vuosina 2071–2100 lisäys on 298 mm/vuosi (49 prosenttia). SRK:n (2018) arviot ovat huomattavasti suurempia kuin Marttilan ym. (2005) esittämät.

Viiankiaavan arvioitujen lämpötila- ja sadantamuutosten mahdollista vaikutusta ei ole helppo ennustaa millään tarkkuustasolla. Kuitenkin voidaan tehdä joitakin kvalitatiivisia oletuksia siitä, mitä tapahtuu ja miten se saattaa vaikuttaa Sakatin maanalaisesta kaivostoiminnasta johtuviin vaikutuksiin. Lämpötilan nousun voidaan olettaa johtavan kasvillisuuden muuttumiseen kasvilajien levinnäisyysrajojen siirtyessä Keski- ja Etelä-Suomesta vähitellen pohjoisemmas vuosina 2010–2100. Tämä saattaa johtaa Viiankiaavan kokonaishaihdunnan kasvuun johtuen lämpötilojen noususta ja kasvillisuuslajien muutoksesta. Lisääntynyt kokonaishaihdunta saattaa alentaa suon vedenpintoja, mutta koska sekä sadanta että kokonaishaihdunta



lisääntyvät, nettosadannan muutos (sadannan ja kokonaishaihdunnan välinen ero) saattaa hillitä vedenpinnan muutoksia.

Viiankiaapaan vaikuttavat eniten vuosina 2010–2040 toteutuvat sadantamuutokset. Lisääntynyt sadanta, erityisesti vesisateen muodossa, voi rankkasadekausina aiheuttaa tulvia. Marttilan et al. (2005) raportti painottaa äärevien sääolojen lisääntymistä vuosina 2010–2100, kun talvimyrskyt ja niihin liittyvä sadanta voimistuu, ja myös ankaria kuivia kausia ennakoidaan esiintyvän kesällä. Lisääntynyt sadanta talvi- ja kesäkuukausina lisää pohjaveden muodostumista, mikä vuorostaan saattaa korvata kaivoksen kuivanapitopumppauksen aiheuttaman vedenpinnan laskun. Kuivat kesäkaudet, erityisesti ankara kuivuus, johtavat todennäköisesti suon ja sen alla olevan maaperän pohjavedenpintojen laskuun. Tämä vedenpintojen lasku saattaa olla suurempi kuin kaivoksen kuivanapitopumppauksen aiheuttama lasku ja saattaa siten peittää kaivostoiminnan vaikutuksen pohjavedenpintoihin.

Lyhyesti sanottuna voidaan olettaa, että Pohjois-Suomessa kohonneen lämpötilan, lisääntyneen sadannan ja lisääntyneen kokonaishaihdunnan muodossa ilmenevä ilmastonmuutos muuttaa Viiankiaavan ja ympäröivän alueen pohjavedenpintoja. Nämä muutokset ovat asteittaisia ja lisääntyvät ajan myötä, erityisesti vuoden 2040 jälkeen. Nämä muutokset tulevat Sakatin kaivoshankkeen kuivanapitopumppauksen aiheuttamien vähäisten muutosten lisäksi ja saattavat hämärtää kaivostoiminnan aiheuttamia vedenpinnan muutoksia, jolloin kaivostoiminnasta aiheutuva pohjavesivaikutus on vaikea erottaa ilmastonmuutoksen aiheuttamasta kvantitatiivisesti ja tilastollisesti.



11.0 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sakatin hankealueelle on kehitetty yhdistetty geologinen Leapfrog-malli, jossa Viiankiaavan alla sijaitseviin glasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin sovellettiin Helsingin yliopiston kehittämiä geologisia malleja (Åberg ym. 2017a, b; Åberg ym. 2019) ja Sakatin mineraaliesiintymän sisältävään prekambrikauden kallioperään käytettiin SRK:n (2019) kehittämää Leapfrog-mallia. Yhdistetty malli tuotti Leapfrog-malliin perustuvan pohjaveden numeeriseen FEFLOW-virtausmallin, joka antoi tarkan arvion suunnitellun Sakatin kaivoshankkeen yläpuolella sijaitsevan Viiankiaavan alla sijaitseviin glasiaalisiin ja fluviaalisiin sedimentteihin ja turpeeseen kohdistuvista pohjavesivaikutuksista.

Kaiken kaikkiaan esitetyllä kaivoshankkeella (vaihtoehto VE1A) on vähäinen vaikutus suon alla olevien maaperäkerrostumien pohjaveteen, jonka enimmäisaleneman arvioidaan olevan 0,50 metriä ja toteutuvan pääasiassa talvikuukausien aikana. Skenaariossa, jossa kaivosrakentamisessa noudatetaan systemaattisesti erityisiä lievennystoimenpiteitä, on pohjaveden arvioitu enimmäisalenema suo-alueella 0,10 m ja tämä enimmäisalenema tulisi esiintymään suo-alueella vain talvikuukausina. Turvekerrostumissa vaikutus olisi pienempi kuin sora- ja hiekkakerrostumissa, sillä turve ei ole akviferi vaan vettä pidättävä yksikkö, jonka vedenjohtavuus on pieni.

Numeerinen mallinnus tuotti suunnitellun Sakatin kaivoshankkeen mahdollisesta vaikutuksesta suohon seuraavat johtopäätökset:

1. Turpeen huokosvesi, maaperän pohjavesi sekä rapautuneen ja rikkonaisen kallio yläosan pohjavesi ovat hydrologisessa vuorovaikutuksessa toistensa kanssa perustuen, samankaltaiseen vesikemiaan ja samankaltaisiin vasteisiin kevätulannan aikana pohjavesiputkissa.
2. Sakatin mineraaliesiintymä sijaitsee ehjässä, muuttumattomassa paleoproterotsooisessa kallioperässä, jossa on paikoin selvästi erottuva suolainen vedenlaatu. Se viittaa rajalliseen hydrologiseen vuorovaikutukseen sen yläpuolella olevien kolmen hydrostratigrafisen yksikön pohjaveden kanssa. Tätä johtopäätöstä tukee myös se tosiasia, että kevätulannan imeytyminen tai pumppauskokeet näissä kolmessa yläpuolisessa yksikössä aiheuttavat kallioperän havaintoputkissa vain vähäisen vasteen.
3. Pohjaruhje sisältää ikivanhaa pleistoseenianajan vettä eikä sillä näytä olevan hydrologista yhteyttä suon alla olevan maaperän pohjaveden kanssa.
4. Pystysiirokset, jotka läpäisevät kallioperän, eivät läpäise maaperän kerrostumia eivätkä niissä olevia pohjavesiesiintymiä.
5. Hankealueen pystysiirosten vedenjohtavuus vaihtelee suuresti. Siirroksen hydraulinen johtavuus rapautuneessa tai rikkoutuneessa kallioperässä on suurempi kuin saman siirroksen vedenjohtavuus ehjässä kallioperässä. Pohjavesi liikkuu kallioperässä todennäköisesti näitä siirroksia pitkin ja myös kallioperän rikkonaisuuksia pitkin. Syvemmällä (yli 200 metrin syvyydessä), ehjässä kallioperässä siirrosten väliset yhteydet ovat vähäisiä. Rapautuneessa tai rikkoutuneessa kallioperässä on siirroksia ja myös siirrosten välisiä yhteyksiä enemmän.
6. Kaivostoiminnan perusskenaarion mukaan (vaihtoehto VE1A) ilman erityisiä lieventäviä toimenpiteitä pohjaveden sisäänvirtaus maanalaisiin louhoksiin on 2 600–3 100 m³/vrk ja 3 169 m³/vrk. Tällöin suon alla olevissa glasiaalisissa ja fluviaalisissa sedimenteissä toteutuu noin 0,50 metrin enimmäisalenema, joka on mitattavissa talvikuukausien aikana mutta ei keväällä lumen ja roudan sulamisaikana. Vaikutus on pienempi turpeessa, koska sen vedenjohtavuus vettä pidättävänä yksikkönä on vähäinen.



JOHTOPÄÄTÖKSET

7. Jos kaivostoiminnassa noudatetaan systemaattisesti erityisiä lievennystoimenpiteitä, on pohjaveden sisäänvirtaus maanalaisiin louhoksiin 1 500–1 700 m³/vrk louhinnan alkuvaiheessa, kun valmiina ovat 5 kilometrin vinotunneli ja maanalaiset infrastruktuuritunnelit. Kaivostoimintavaiheen Y-22 aikana veden sisäänvirtaus on suurimmillaan 1 745 m³/vrk. Tällöin enimmäisalenema glasiaalisissa ja fluviaalisissa sedimenteissä on noin 0,10 metriä. Turpeessa vaikutus on pienempi johtuen alinna olevasta tiivistyneestä katotelma-kerroksesta, joka sisältää pitkälle maatunutta kasvimateriaalia. Enimmäisalenema on mitattavissa talvikuukausien aikana mutta ei keväällä roudan ja lumen sulaessa.
8. Suunniteltu Sakatin kaivos vaikuttaa suoalueen pohjaveteen vain vähäisesti. Arvioitu 0,5 metrin enimmäisalenema on suon vedenpinnan vuodenaikavaihtelun rajoissa.
9. Kaivostoiminnan lakattua pohjavesi palautuu kallioperään kaivostoiminnan perusskenaarion mukaan (vaihtoehto VE1A) noin 200 vuodessa, jolloin vedenpinta saavuttaa kaivostoimintaa edeltävän tason. Yhdeksänkymmentäviisiprosenttinen palautuminen vie noin 80 vuotta. Kallioperän vedenpinta ei koskaan palaa täysin kaivostoimintaa edeltäneille korkeustasoille maan alle jätettävien tyhjien kaivosonkaloiden vuoksi. Skenaariossa, jossa kaivosrakentamisessa noudatetaan systemaattisesti erityisiä lievennystoimenpiteitä, kallioperän pohjaveden palautuminen kestää siirrosten/rakenteiden sementtoimisesta johtuen noin 50–100 vuotta kauemmin kuin kaivostoiminnan perusskenaariossa.
10. Viiankiaavalla ja sen alla olevissa turpeessa sekä glasiaalisissa ja fluviaalisissa sedimenteissä pohjavesi palautuu jo yhdessä vuodessa. Tämä johtuu suon tulvimisesta keväällä, kun lumi ja routa sulavat.



12.0 VIITTEET

- Åberg, S. C., Korkka-Niemi, K., Rautio, A., Salonen, V.-P. and Åberg, A. K. 2019. Groundwater Recharge/Discharge Patterns and Groundwater-Surface Water Interactions in a Sedimentary Aquifer along River Kitinen near Sodankylä, Northern Finland. *Boreal Environment Research*, v. 24, pp. 155–187.
- Åberg, A. K., V-P Salonen, K. Korkka-Niemi, A. Rautio, E. Koivisto, and S. C. Åberg, S.C. 2017a. GIS-based 3D Sedimentary Model for Visualizing Complex Glacial Deposition in Kersilö, Finnish Lapland. *Boreal Environment Research*, p 277–298.
- Åberg, S. C., A. K. Åberg, K. Korkka-Niemi, and V-P Salonen. 2017b. Hydrostratigraphy and 3D Modeling of a Bank Storage Affected Aquifer in mineral exploration area in Sodankylä, Northern Finland. *IMWA*, p. 237–243.
- Anderson, M. P. and W. W. Woessner. 1992. *Applied Groundwater Modeling— Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, Inc., San Diego, CA, 381 p.
- Aranz Geo. 2019. Leapfrog Geological Modeling Software. Aranz Geological, New Zealand.
- Bestech, Ltd. 2018. Mine Dewatering System Design. Report for Anglo American Sakatti Mining Oy, October 2018.
- Boscombe, W., C. Ihlenfeld, J. Coppard, C. Hartshung, S. Klatt, J. Siikaluoma, and R. Harrington. 2015. Geochemistry of the Sakatti Magmatic Cu-Ni-PGE Deposit, Northern Finland. In *Mineral Deposits of Finland*, Chapter 3.7.
- Deirch. 2014. FEFLOW Numerical Groundwater Flow Model.
- DHI. 2018. FEFLOW model code and manual.
- DHI. 2016. FEFLOW (Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation) model code and manual. Version 6.2.
- ESRI. 2016: ArcGIS version 10.6 < <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.6/get-started/setup/arcgis-desktop-system-requirements.htm>>
- Geological Survey of Finland (GTK) 2016a, *Bedrock of Finland scale-free, Version 2.1*, 29 May 2019, <https://gtkdata.gtk.fi/mdae/index.html>
- Geological Survey of Finland (GTK) 2016b, *Structural lines in: Bedrock of Finland scale-free, Version 2.1*, 29 May 2019, <https://gtkdata.gtk.fi/mdae/index.html>
- Geological Survey of Finland (GTK) 2016c, *Rock class in: Bedrock of Finland scale-free, Version 2.1*, 29 May 2019, <https://gtkdata.gtk.fi/mdae/index.html>
- Geological Survey of Finland (GTK) 2016d, *Rock name in: Bedrock of Finland scale-free, Version 2.1*, 29 May 2019, <https://gtkdata.gtk.fi/mdae/index.html>



- Geovisor Oy. 2018. VLF and ERT surveys in Sakatti, Sodankylä, 2018. Report prepared for Anglo American Sakatti Mining Oy.
- Golder Associates Ltd, 2012. Viiankiaapa – Preliminary Hydrological and Hydrogeological Characterization. Report No: 11514150081.500/B.0, 25 p.
- Golder Associates Ltd, 2015. Viiankiaapa - pinta- ja pohjavesi- olosuhteiden selvitys. Report prepared for Anglo American Sakatti Mining Oy.
- Hill, M. C. 1998. Methods and guidelines for effective groundwater model calibration. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report (WRIR) 98-4005.
- Istok, J. 1989. Groundwater modeling by the finite element method. In: Water Resource Monograph Series, Vol. 13, American Geophysical Union
- Korkka-Niemi, K., A. Rautio, P. Bigler, and S. Åberg. 2017. Characterization of Geo-Hydro-Ecological Factors Affecting the Distribution of Endangered Species in Viiankiaapa Mire, a Mineral Exploration Site. IMWA, p. 1022–1028.
- Korkka-Niemi K (ed.), Rautio A, Åberg S, Åberg A, Bigler P and Salonen V-P, 2017. Hydro and Environment Geological Studies during the Years 2016-2017 around Sakatti Exploration Target. Final report (Draft 1): Characterization of Geo-Hydro-Ecological Factors Possibly Controlling the Distribution of Endangered Species of Viiankiaapa Mire. University of Helsinki. Final report prepared for AA Sakatti Mining Oy.
- Korkka-Niemi K & Turtiainen H. 2019. Hydraulic properties of peat and hydrogeochemical characteristics of groundwater and porewater in Viiankiaapa mire. Report prepared for Anglo American Sakatti Mining Oy.
- Korkka-Niemi, K, Koskimaa, K., and Karhu, J. 2020. Hydrology of the Sakatti Exploration Target Area: Dating of Groundwater. Report prepared for Anglo American Sakatti Mining Oy.
- Lahtinen, T. 2017. Hydrogeochemical Characterization of the Sakatti Mine Prospecting Area, Sodankylä, Finnish Lapland. Master's Thesis Univ. Helsinki, 2017.
- Lappalainen. 1970. Über die spatquartäre Entwicklung der Flusssufermoore Mittel-Laplands. Bull. Comm. Geol. Finlande, 244, pages 1–79.
- Lappalainen and Pajunen. 1982. Lapin turvevarat. Geologinen tutkimuslaitos maaperäosasto, raportti P 13.6/80/20. 158–159.
- Leapfrog Geo. 2019. Version 2.1. Aranz Geo Ltd, Box 3894, Christchurch 8140, New Zealand.
- Lehtonen et al. 1998. The Stratigraphy, Petrology, and Geochemistry of the Kittilä Greenstone Area, Northern Finland. Geol. Survey Finland publication 144.
- Luukas. 2017. Updates to Sakatti Report Fault Model and Lithological 3D Models. Geological Survey of Finland.



viitteet

- Marttila, V. et al. 2005. Finland National Strategy on Adaption to Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Ojala, J.V. (ed) 2007. Gold in the Central Lapland Greenstone Belt. Geological Survey of Finland, Special Paper 44, 267 pages.
- Panday, S., C. D. Langevin, M. Ibaraki, R. G. Niswonger, and J. D. Hughes. 2017. MODFLOW-USG version 1.4. An unstructured grid version of MODFLOW for simulation of groundwater flow and tightly coupled processes using a control finite-difference formulation. U.S. Geological Survey Software Release, 27 October 2017.
- Salonen, V-P (ed), K. Korkka-Niemi, A. Rautio, E. Koivisto, A. Åberg, S. Åberg, J. Laakso, T. Lahtinen, and E. Suonperä. 2015. Sakatti Geoenvironments: A Baseline Study on Quaternary Sediments, Hydrogeological Conditions, and Groundwater-Surface Water Interactions in Kersilö Area, Sodankylä. Report prepared for Anglo American Sakatti Oy.
- Salonen et al. 2014. Recent Geological History of the Sakatti Area, Sodankylä and its Hydro-Environmental Implications – A Baseline Study. Report prepared for Anglo American Sakatti Mining Oy.
- Seequent. 2019. Leapfrog Works v. 3.0. A 3D Subsurface Modeling Platform
- SRK. 2019. A Hydrological Impact Assessment for the Sakatti Cu-Ni-PGE-Au Deposit, Northern Finland. Prepared for Anglo American Sakatti Mining Oy, June 2019.
- SRK. 2018. PFS A Water Management Study for the Sakatti Project, Northern Finland. Prepared for Anglo American Sakatti Mining Oy, December 2018.
- SRK 2019. A Hydrogeological Impact Assessment for the Sakatti Cu-Ni-PGE Deposit, Northern Finland. Prepared for Anglo American Sakatti Mining Oy, Finland. June 2019.
- Törmanen, T. and T. Karinen. 2016. The Kevitsa and Sakatti Ni-Cu-PGE deposits. In Mineral Resources in the Arctic, R. Boyd et al. (editors), Geological Survey of Norway. Pages 351–353.
- Vehviläinen, B. 1992. Snow Cover Models in Operational Watershed Forecasting. Publication of Water and Environmental Research Institute. National Board of Water and Environment, Helsinki, Finland





**Sakatin kaivoshankkeen
pohjavesivaikutusten mallinnus**

Mallinnusraportti

30. kesäkuuta, 2020

Asiakas:

Anglo American Sakatti Mining Oy

Laatinut:

Stantec Consulting Ltd
500-311 Portage Avenue
Winnipeg, MB R3B 2B9

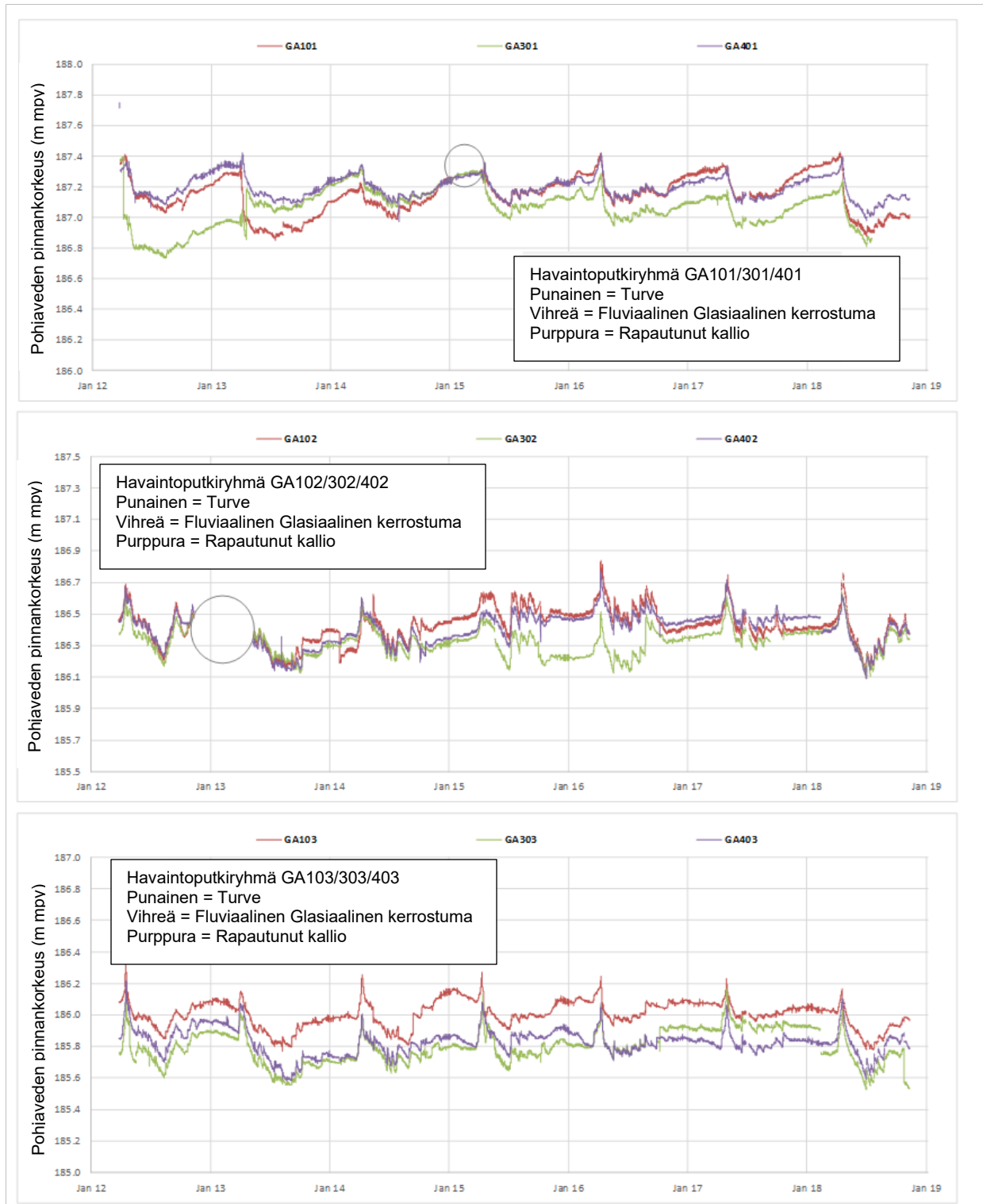


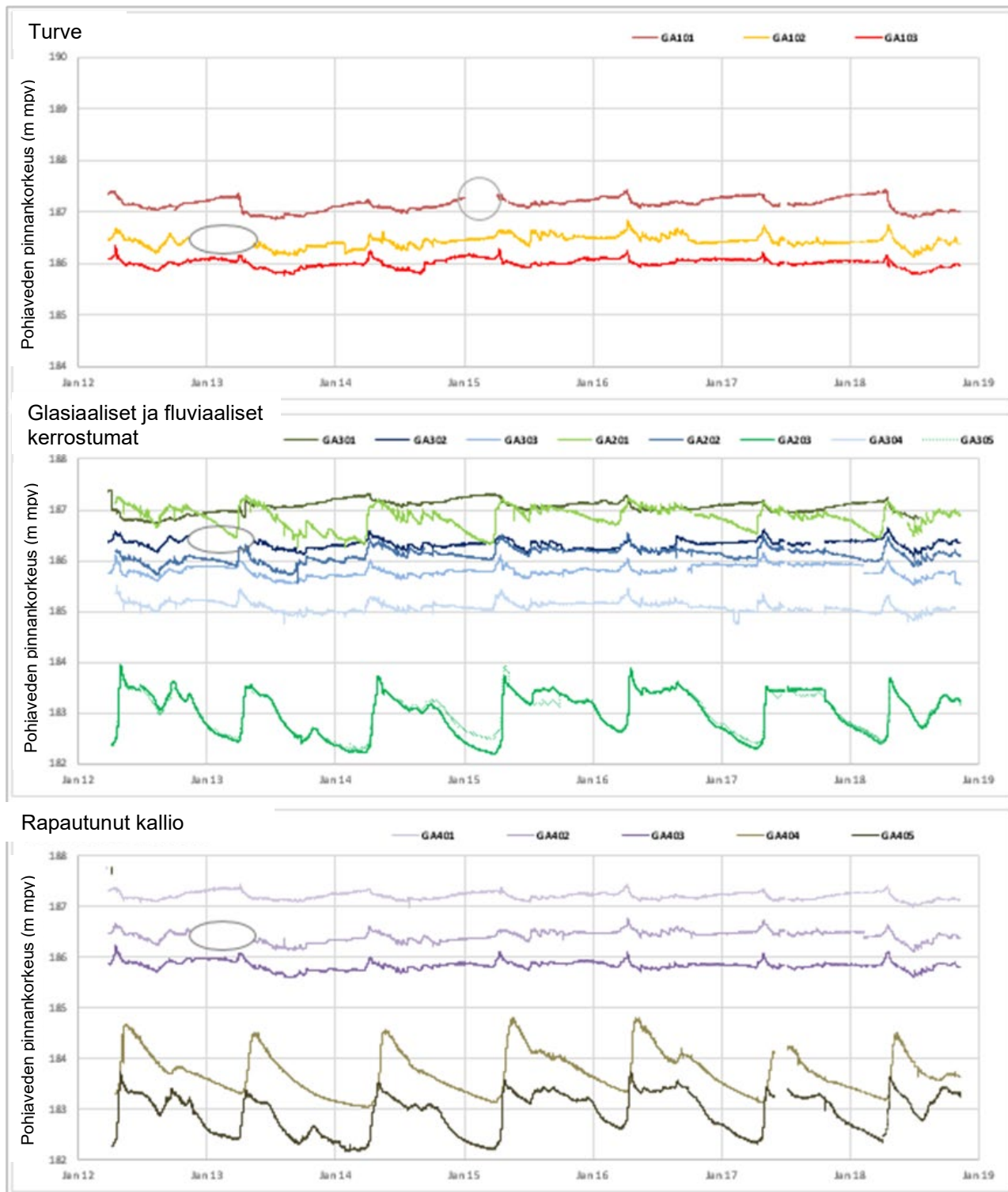
MALLINNUSARVIO SUUNNITELLUN MAANALAISEN KAIVOKSEN POHJAVEDESTÄ SAKATIN CU-NI-PGE-AU-ESIINTYMÄSSÄ

LIITE A



MALLINNUSARVIO SUUNNITELLUN MAANALAISEN KAIVOKSEN POHJAVEDESTÄ SAKATIN CU-NI-PGE-AU-ESIINTYMÄSSÄ

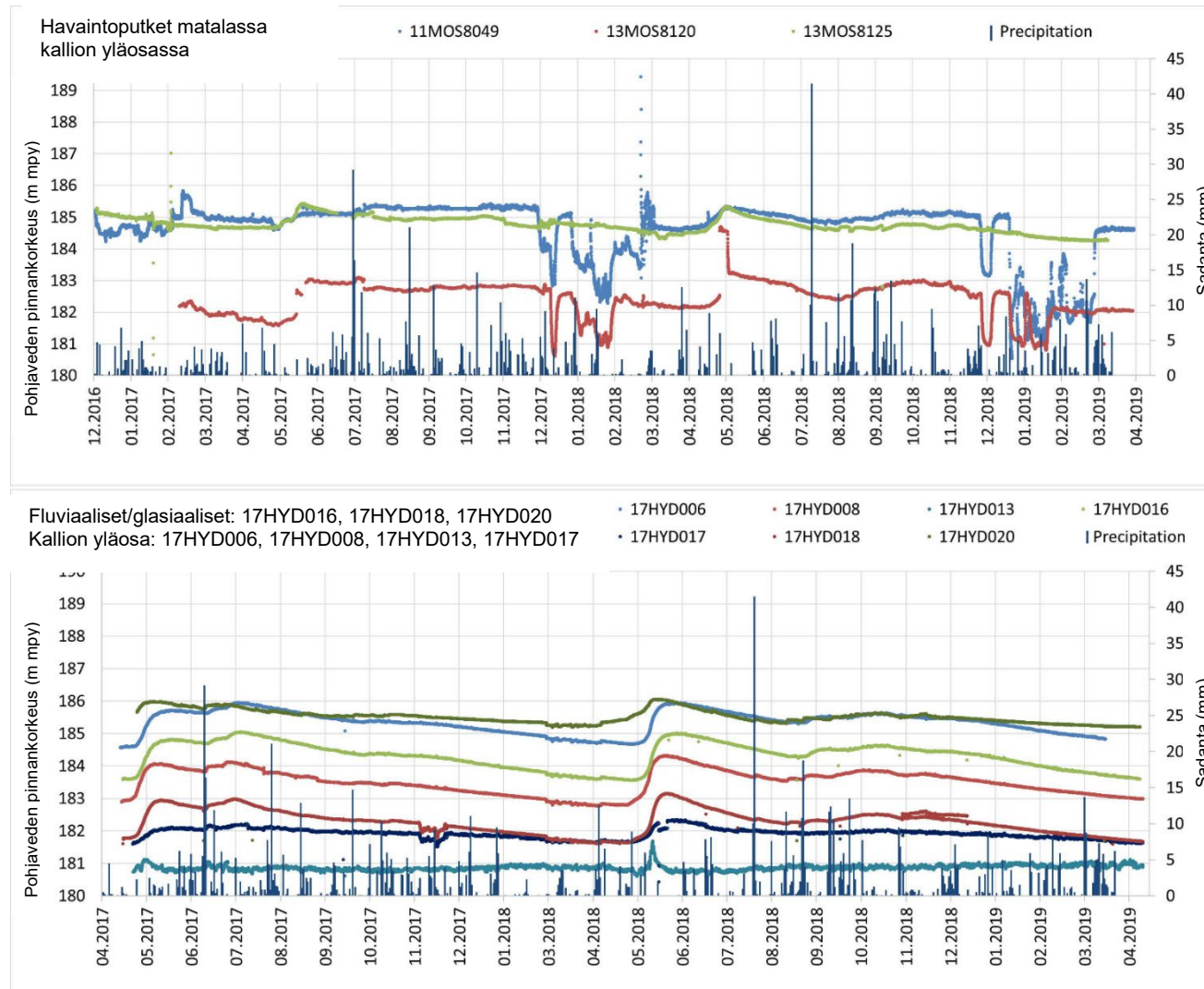




Kuva A-1 Pohjaveden pintojen vaihtelu turpeessa, glasiaalisissa ja fluviaalisissa kerrostumissa sekä rapautuneessa kallioperässä (2)



MALLINNUSARVIO SUUNNITELLUN MAANALAISEN KAIVOKSEN POHJAVEDESTÄ SAKATIN CU-NI-PGE-AU-ESIINTYMÄSSÄ



Kuva A-1 Pohjaveden pintojen vaihtelu matalassa kallioperässä sekä glasiaalisissa ja fluviaalisissa kerrostumissa.



Taulukko A-1

Kaivon ID	Testin keskipiste (metriä bgs)	Testin tyyppi	Testattu muodostuma	Kx (m/s)
16MOS8160	46	Pumppaus	Kallioperä	2,68E-08
16MOS8160	335,3	Pakker -testi	Kallioperä	5,85E-08
16MOS8160	305,3	Pakker-testi	Kallioperä	3,77E-08
16MOS8160	430,4	Pakker-testi	Kallioperä	1,26E-08
16MOS8160	518,4	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000192
16MOS8160	570,53	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000069
16MOS8160	651,03	Pakker-testi	Kallioperä	6,17E-08
16MOS8160	726,93	Pakker-testi	Kallioperä	1,14E-08
16MOS8160	786,3	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000547
16MOS8160	844,23	Pakker-testi	Kallioperä	6,31E-11
16MOS8160	821,73	Pakker-testi	Kallioperä	5,83E-09
16MOS8160	466,23	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000013
16MOS8163	79,05	Pumppaustesti	Kallioperä	0,0000024
16MOS8163	191,4	Pakker-testi	Kallioperä	2,37E-08
16MOS8163	245,65	Pakker-testi	Kallioperä	1,04E-08
16MOS8163	340,13	Pakker-testi	Kallioperä	2,66E-09
16MOS8163	371,63	Pakker-testi	Kallioperä	5,87E-09
16MOS8163	445,78	Pakker-testi	Kallioperä	8,34E-10
16MOS8163	693,28	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000675
16MOS8163	666,28	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000519
16MOS8163	621,28	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000243
17MOS8169	26,85	Pumppaustesti	Kallioperä	0,0000552
17MOS8169	72,58	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000698
17MOS8169	125,48	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000033
17MOS8169	164,53	Pakker-testi	Kallioperä	9,65E-08
17MOS8169	309,58	Pakker-testi	Kallioperä	3,37E-09
17MOS8169	387,58	Pakker-testi	Kallioperä	8,06E-10
17MOS8169	461,63	Pakker-testi	Kallioperä	1,11E-09
17MOS8169	608,53	Pakker-testi	Kallioperä	1,09E-08
17MOS8169	632,53	Pakker-testi	Kallioperä	1,62E-08
17MOS8169	704,98	Pakker-testi	Kallioperä	2,01E-10
17MOS8169	795,98	Pakker-testi	Kallioperä	1,16E-10
17MOS8170	66,85	Pumppaustesti	Kallioperä	0,000000152
17MOS8170	112,05	Pakker-testi	Kallioperä	1,89E-09
17MOS8170	188,58	Pakker-testi	Kallioperä	6,14E-10
17MOS8170	257,98	Pakker-testi	Kallioperä	3,34E-10
17MOS8170	362,88	Pakker-testi	Kallioperä	2,52E-09
17MOS8172	33,55	Pumppaustesti	Kallioperä	0,00000933
17MOS8174	77,95	Pumppaustesti	Kallioperä	0,000000356
17MOS8174	129,68	Pakker-testi	Kallioperä	6,17E-09
17MOS8174	191,83	Pakker-testi	Kallioperä	2,03E-08
17MOS8174	277,38	Pakker-testi	Kallioperä	7,51E-08
17MOS8174	351,88	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000045
17MOS8174	434,83	Pakker-testi	Kallioperä	2,88E-08
17MOS8174	513,58	Pakker-testi	Kallioperä	9,56E-08
17MOS8174	659,88	Pakker-testi	Kallioperä	1,18E-08
17MOS8178	77,4	Pumppaustesti	Kallioperä	0,00000412
17MOS8178	135,23	Pakker-testi	Kallioperä	5,34E-08
17MOS8178	215,68	Pakker-testi	Kallioperä	4,57E-08



MALLINNUSARVIO SUUNNITELLUN MAANALAISEN KAIVOKSEN POHJAVEDESTÄ SAKATIN CU-NI-PGE-AU-ESIINTYMÄSSÄ

17MOS8178	350,33	Pakker-testi	Kallioperä	1,36E-09
Kaivon ID	Testin keskipiste (metriä bgs)	Testin tyyppi	Muodostuma	Kx (m/s)
17MOS8178	452,53	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000037
17MOS8178	552,98	Pakker-testi	Kallioperä	3,50E-09
17MOS8178	710,93	Pakker-testi	Kallioperä	3,15E-09
17MOS8178	760,33	Pakker-testi	Kallioperä	2,35E-10
17MOS8178	781,35	Pakker-testi	Kallioperä	9,01E-10
17MOS8180	27,9	Pumppaustesti	Kallioperä	0,0000649
17MOS8180	62,78	Pakker-testi	Kallioperä	0,0000182
17MOS8180	76,28	Pakker-testi	Kallioperä	7,57E-08
17MOS8180	163,38	Pakker-testi	Kallioperä	6,93E-09
17MOS8183	35,65	Pumppaustesti	Kallioperä	0,00000119
17MOS8183	74,3	Pumppaustesti	Kallioperä	0,000000365
17MOS8183	175,13	Pakker-testi	Kallioperä	0,00000117
17MOS8183	334,45	Pakker-testi	Kallioperä	9,44E-08
17MOS8183	394,21	Pakker-testi	Kallioperä	2,16E-08
17MOS8183	489,13	Pakker-testi	Kallioperä	1,13E-08
17MOS8184	81,9	Pumppaustesti	Kallioperä	0,00000045
17MOS8184	169,93	Pakker-testi	Kallioperä	2,02E-08
17MOS8184	276,8	Pakker-testi	Kallioperä	5,77E-08
17MOS8184	310,55	Pakker-testi	Kallioperä	2,91E-08
17MOS8184	400,28	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000102
17MOS8184	473,83	Pakker-testi	Kallioperä	8,65E-08
17MOS8184	529,33	Pakker-testi	Kallioperä	1,54E-08
17MOS8184	609,5	Pakker-testi	Kallioperä	4,34E-09
16MOS8158	69,05	Pumppaustesti	Kallioperä	0,000000144
16MOS8158	140,78	Pakker-testi	Kallioperä	1,23E-08
16MOS8158	199,58	Pakker-testi	Kallioperä	2,34E-08
16MOS8158	266,03	Pakker-testi	Kallioperä	1,27E-08
16MOS8158	385,83	Pakker-testi	Kallioperä	0,00000208
16MOS8158	424,73	Pakker-testi	Kallioperä	0,00000244
16MOS8158	476,53	Pakker-testi	Kallioperä	0,00000301
16MOS8158	579,73	Pakker-testi	Kallioperä	0,00000877
16MOS8158	622,78	Pakker-testi	Kallioperä	0,0000208
16MOS8158	679,63	Pakker-testi	Kallioperä	0,0000139
16MOS8158	779,63	Pakker-testi	Kallioperä	0,00000265
16MOS8158	819,33	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000252
16MOS8159	54,46	Pumppaustesti	Kallioperä	0,00000243
16MOS8159	177	Pakker-testi	Kallioperä	0,000000136
16MOS8159	289,83	Pakker-testi	Kallioperä	5,34E-09
16MOS8159	380,48	Pakker-testi	Kallioperä	5,76E-09
16MOS8159	590,18	Pakker-testi	Kallioperä	1,64E-08
17HYD003	6,64	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000805
17HYD005	4,8	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000698
17HYD007	8,77	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000000648
17HYD009	6,64	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	5,02E-08
17HYD011	6,42	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000938
17HYD012	4,25	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000424
17HYD015	6,1	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000354
17HYD018	7,73	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000375
17HYD016	8,14	Paineilma	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000000191
17HYD001	50,35	Pumppaus	Kallioperä	0,0000325
17HYD002	63,7	Pumppaus	Kallioperä	0,0000279



17HYD014	96,15	Pumppaus	Kallioperä	3,76E-09
Kaivon ID	Testin keskipiste (metriä bgs)	Testin tyyppi	Muodostuma	Kx (m/s)
17HYD004	55	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	0,00000956
17HYD015	9,6	Pumppaus (Spinner -testi)	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000521
17HYD006	54,9	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	0,00000333
17HYD016	9,6	Pumppaus (Spinner -testi)	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000116
17HYD008	56,45	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	0,00000656
11MOS8054	538,33	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	1,11E-09
13MOS8123	460,09	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	9,74E-09
16MOS8161	442,85	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	7,21E-09
12MOS8096	163,59	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	6,11E-08
17HYD013	125,7	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	0,000000104
17HYD017	65,05	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	0,00000581
17MOS8169	133,68	Pumppaus (CRT)	Kallioperä	8,05E-08
17MOS8174	346,49	Pumppaus (Spinner -testi)	Kallioperä	9,32E-09
11MOS8049	168	Falling-head -menetelmä	Kallioperä	0,00000365
13MOS8120	155,5	Falling-head -menetelmä	Kallioperä	0,0000242
13MOS8125	141,5	Falling-head -menetelmä	Kallioperä	0,00000919
M1N1	1,9	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000081
M1N2	1,3	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000026
M2N3	1,5	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000037
M3N4	5	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000079
M3N5	4,6	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,001
M3N6	1,9	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00054
M3N7	0,8	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000036
M4N8	1,1	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000079
M5N9	3,2	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000055
M5N10	2,4	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000037
M5N11	1	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000065
M6N12	2,7	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000047
M6N13	0,9	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000032
M6N14	0,7	Laboratorionäyte	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000011
GA102	3	Slug -testi	turve	0,00000964
GA103	2	Slug -testi	turve	0,000151
GA104	3	Slug -testi	turve	0,00000376
GA202	3	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000157
GA202	5,8	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	7,21E-09



MALLINNUSARVIO SUUNNITELLUN MAANALAISEN KAIVOKSEN POHJAVEDESTÄ SAKATIN CU-NI-PGE-AU-ESIINTYMÄSSÄ

GA203	5	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000000289
GA204	5,5	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000000297
Kaivon ID	Testin keskipiste (metriä bgs)	Testin tyyppi	Muodostuma	Kx (m/s)
GA300	3	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000167
GA200	5,8	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000024
GA201	5	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000000191
GA205	4	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	1,02E-08
GA301	9,5	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	6,09E-08
GA302	9,5	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	1,64E-08
GA303	12	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000555
GA304	14	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000000442
GA304	16	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	2,95E-08
GA305	10	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	8,64E-08
GA306	6	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,00000314
GA400	6	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,0000166
GA402	5,5	Slug -testi	Fluviaalinen-glasiaalinen	0,000000732
GA404	9	Slug -testi	Rapautunut	0,00000533

