

TAVASE

**VEHONIEMEN – ISOKANKAAN – SYRJÄNHARJUN
TEKOPOHJAVESIMALLINNUS**

Virtausmallien päivitys
Tutkimusalueet 1, 2 & 3

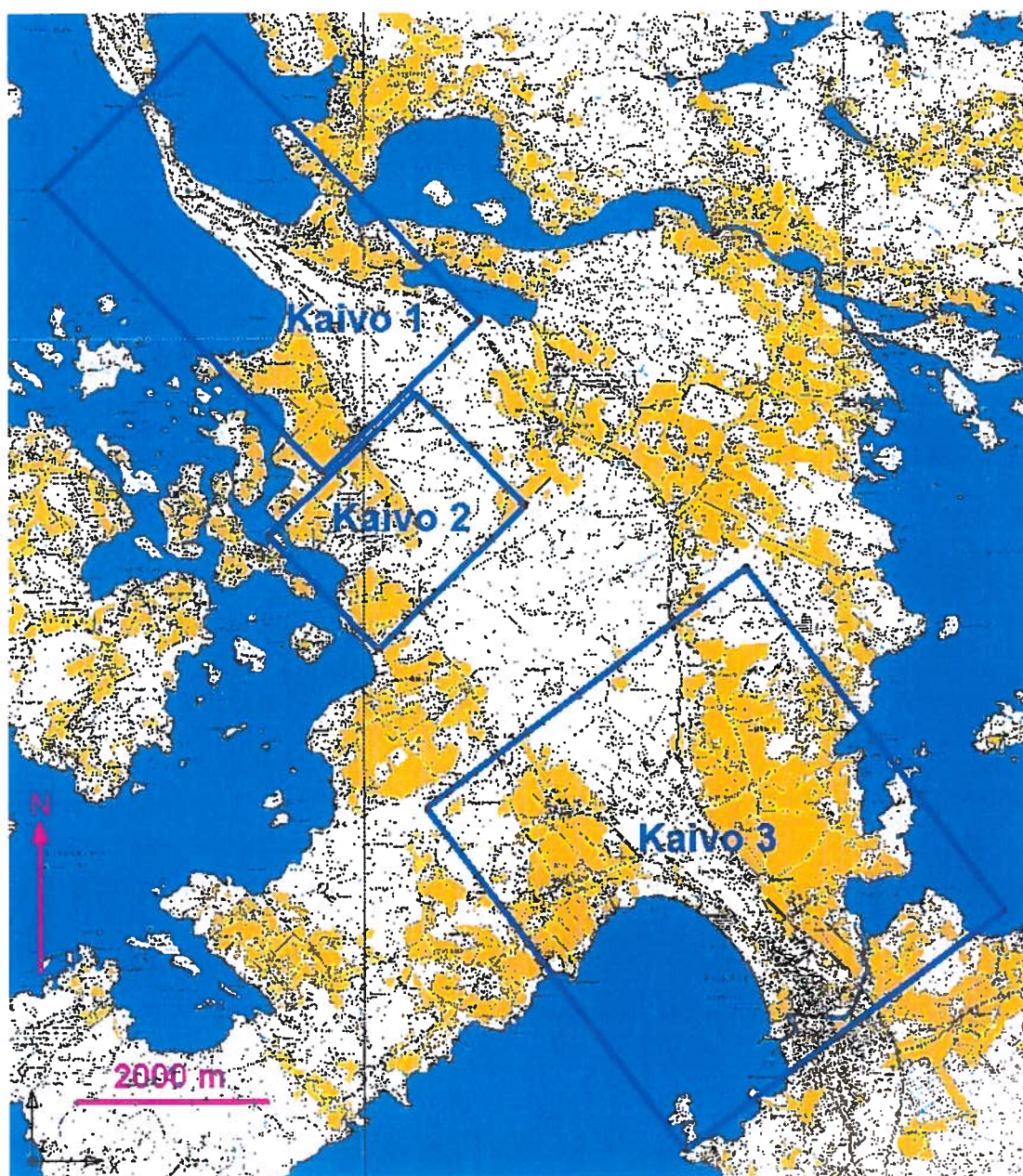


SISÄLLYS

1. Yleistä	5
2. Geologiaa ja hydrologiaa	6
3. Mallinnusympäristö	6
4. Pohjaveden virtauksen mallintamisen uudet lähtötiedot	8
5. Mallien kalibrointi	9
6. Kaivo 1	10
- Lähtötiedot ja kalibrointi	10
- Ennustejot	17
- Herkkyystarkastelu	21
7. Kaivo 2	22
- Lähtötiedot ja kalibrointi	22
- Ennustejot	27
- Herkkyystarkastelu	33
8. Kaivo 3	36
- Lähtötiedot ja kalibrointi	36
- Ennustejot	41
- Herkkyystarkastelu	46
9. Yhteenveto	46
10. Jatkotoimenpiteet	46
 Kirjallisuutta	47
Aikaisemmat tutkimukset	47

1. Yleistä

TAVASE-työryhmän toimeksiannosta on Suomen ympäristökeskuksessa (SYKE) aiemmin tehty virtausmallit tekopohjavesihankkeen kolmelle eri osa-alueelle (koekaivot 1, 2 & 3). Vuonna 2002 tehtyjen lisätutkimusten myötä myös virtausmallit on päivitetty. Tässä raportissa esiteltujen yksityiskohtaisten mallien lisäksi tehtiin yleispiirteiset virtausmallit (Maa ja Vesi Oy), joiden avulla selvitettiin tutkimusalueiden virtauskuvien ns. suuret linjat. Yleispiirteisistä virtausmalleista tehdyt johtopäätökset koskien mm. vedenjohtavuusvyöhykkeitä, vesitaseasioita ja kalliokynnyksiä hyödynnettiin myös tässä raportissa esiteltujen mallien kalibroinnissa.



Kuva 1. Mallinnettujen alueiden sijainnit.

2. Geologiaa ja hydrologiaa

Vehoniemenharju-Syrjänharju on laaja luode-kaakkoissuunnassa kulkeva jakso, joka on osa jääkaudella jääkielekkeiden välillä syntynyttä saumamuodostumaa, joka puolestaan alkaa Hämeenkoskelta ja jatkuu Pälkäneen, Kangasalan kautta Tampereelle (Pyynikki) ja edelleen Ylöjärven kautta Hämeenkyröön. Vehoniemenharju vapautui jäästä vajaat 10 000 vuotta sitten. Jäätikön edustalla olleen Yoldiameren pinta oli tuolloin noin 155 metriä nykyisen merenpinnan yläpuolella. Alue on pääasiassa subakvaattista eli vedenkoskettamaa. Jaksolle on tyypillistä hyvin vaihteleva kerrosjärjestys, joka käsittää silttiä, hiekkaa, sora- ja kiviä ja moreenia. Moreenia esiintyy sekä välikerroksina että pohjalla. Paksuimmillaan moreenikerrokset ovat yli 10 metriä. Maakerrosten kokonaispaksuus on Vehoniemenharjulla 50 - 80 metriä. Kalliokynnykset jakavat Syrjänharju-Isokankangas-Vehoniemi alueella harjujakson neljäksi osittaiseksi pohjavesialueeksi.

Tutkimusalueen luoteispäässä Vehoniemenharjulla pohjaveden virtaussuunta on harjun pituussuunnassa luoteeseen kohti Kaivannon kanavaa ja vesi purkautuu lounaisreunalla Roineeseen. Pohjavesipinnan kaltevuus eli gradientti lähes koko mallinnusalueella on varsin pieni. Roineen ja Längelmäveden pinnanvaihtelet vaikuttavat pohjavedenkorkeuteen vielä noin 3,5 km etäisyydellä kaakkoon Kaivannon kanavaan.

Kaksi keskimmäistä pohjavesialuetta purkavat vetensä harjun lounaisreunalle Roineen suuntaan. Näistä toinen on Kinnalan vedenottamon pohjavesiallas. Toinen on Vehoniemenharjun kaakkoisosassa oleva kolmelta suunnalta kalliorajama pohjavesiallas, jossa pohjavesi virtaa luode-kaakko-suuntaiselta jakaja-alueelta muodostuman poikki lounaaseen purkautuen harjun länsipuolella oleviin ojiin, lähteisiin sekä jonkin verran Roineeseen.

Pälkäneen Isokangas on Vehoniemenharjun kaakkoispuolisena jatkeena sijaitseva, Pälkäneen keskusta-alueelle saakka ulottuva laaja harjumuodostuma. Muodostuman leveys on luoteisosassa noin 1,5 km, mutta kapenee huomattavasti kaakkoissuuntaan. Isokankaalla pohjaveden pääasiallinen virtaussuunta on luoteesta kaakkoon. Pohjavesi purkautuu pääasiassa Pälkäneen keskustan taajaman pohjoispuolella Mallasveteen.

3. Mallinnusympäristö

Pohjavesimalli rakennettiin kokonaisuudessaan GMS-pohjavesimallinnusjärjestelmässä. Pohjavesimallinnuksessa käytettiin US Geological Surveyn kehittämiä MODFLOW- ja MODPATH-mallikoodeja (McDonald & Harbaugh 1988, Pollock 1989). Kalibroinnissa käytettiin parametrien estimointiohjelmaa PEST.

MODFLOW-ohjelma koostuu pääohjelmasta ja joukosta itsenäisiä moduuleja (McDonald & Harbaugh 1988). Jokainen moduuli käsittelee omaa erikoisaluettaan hydrologisessa systeemissä. Jokaisessa mallinnustapauksessa käyttäjä valitsee kyseiseen tapaukseen tarvittavat moduulit. Tässä mallinnustyössä käytettiin moduuleja BAS, BCF, WEL, DRN, RCH ja PCG2. BAS-moduli (Basic) käsittelee malliin kokonaisuuteen liittyviä asioita kuten reunoja, aika-askeleen pituutta ja alkuarvoja. BCF-moduli (Block-Centered Flow) laskee differenssiyhtälöiden termejä, jotka edustavat virtausta huokoisessa väliaineessa, erityisesti virtausta solmupisteiden välillä. WEL (Well) ja RCH (Recharge) -modulit lisäävät kaivoihin ja pohjaveden muodostumiseen liittyvät termit differentiaaliyhtälöihin.

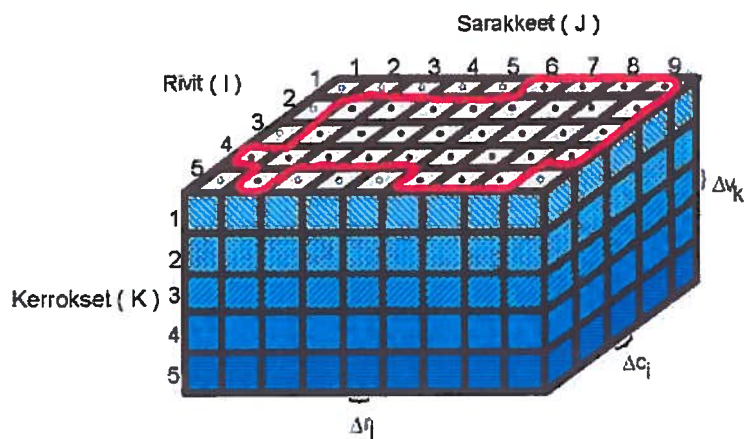
DRN-modulilla lasketaan pohjaveden purkautumista ojitetuilla alueilla. PCG2-moduli (Preconditioned Conjugate-Gradient 2) sisältää differentiaaliyhtälöiden ratkaisumenetelmän.

Pohjaveden virtaus simuloidaan käyttäen differenssimenetelmää, jossa on hilakeskeinen solmupisteverkko (kuva 2). MODFLOW-mallin hilaverkko tehdään GMS:ssä automaattisesti kaivoihin ja maaperään liittyvien paikkatietojen perusteella. Hilaruutujen ei tarvitse olla keskenään saman levyisiä. Kerrosten paksuudet voivat vaihdella ja ne voivat olla rajattuja tai vapaapintaisia tai ne voivat vaihdella näiden tilojen välillä. Hilaruudukko jakaantuu aktiiviseen ja inaktiiviseen osaan. Varsinainen pohjavesialue ympäröivine peltoineen määritellään aktiiviseksi alueeksi, eli alueeksi jolla pohjaveden virtausta tarkastellaan. Inaktiivisia ovat alueet, joilla kallio nousee pohjavedenpintaa korkeammalle sekä alueet, joilla pohjaveden virtausta ei laskennan kannalta tapahdu. Inaktiivisen alueen vastainen reuna on MODFLOW-malleissa yleensä ns. no-flow eli reuna, jonka läpi ei tapahdu pohjaveden virtausta. Vakiovedenpinnan reunaehdon sisältävissä ruuduissa vesipinta pysyy koko laskennan ajan samalla, syöttötiedoissa annettuna tasolla. Vakiovedenpinnalla kuvataan lähinnä pohjavesialueen niitä reunoja, jotka ovat hydraulisessa yhteydessä vesistöön.

Kun pohjasuhdemallin pinnat on saatu oikeaan muotoon, ne luetaan suoraan MODFLOW-laskennan lähtötiedoksi, siten että pintamalleista interpoloidaan pinnankorkeudet hilaverkon solmupisteissä. MODFLOW:n laskenta-ajot käynnistetään suoraan GMS:n kautta ja tuloksena saaduista pohjaveden pintatiedoista visualisoidaan lasketut pohjavedenpinnat ja niitä voidaan verrata mitattuihin havaintoihin.

Mallinnus on tehty steady state- eli pysyvän tilanteen laskentana. Ominaisantisuuden (S) ja sitä kautta huokoisuuden kalibroinnissa tehtiin myös transient- eli muuttuvan tilanteen laskenta-ajoja.

MODFLOW-laskentaa käytetään lähtötietona MODPATH partikkelikulkeutumaohjelmalle. MODPATH-ohjelma tuottaa pohjasuhdemalliin kolmiulotteiset virtausviivat. GMS:n avulla voidaan tuottaa laskentatuloksista erilaisia visualisointeja kuten tasa-arvokäyrät, virtausnopeusvektorit sekä virtausviivat.



- Pohjavesimuodostuman raja
- Aktiivinen hilaruutu
- Inaktiivinen hilaruutu
- Δx_j Hilaruudun leveys rivien suunnassa. Alaviite (j) viittaa sarakkeen numeroon
- Δx_i Hilaruudun leveys sarakkeiden suunnassa. Alaviite (i) viittaa rivin numeroon
- Δx_k Hilaruudun korkeus pystysuunnassa. Alaviite (k) viittaa kerroksen numeroon

Kuva 2. Hypoteettisen pohjavesisysteemin hilaruudukko (McDonald & Harbaugh 1988).

4. Pohjaveden virtauksen mallintamisen uudet lähtötiedot

Mallinnusalueiden reunoina on käytetty rantoja sekä kallion- ja pohjavedenpintojen välisiä leikkausviivoja. Rannat on malleissa esitetty pysyvän pohjavedenpinnan reunaehtoruutuina. "Kuivien" alueiden (kallionpinta ylempänä kuin pohjavedenpinta) vastaiset reunat ovat ns. no-flow reunoja. Rajaukset ovat hiukan muuttuneet edellisen kierroksen malleista johtuen lähinnä tarkentuneista kallion- ja pohjavedenpintatiedoista. Uusien rajausten sekä osin uuteen käyttöjärjestelmään siirtymisen myötä on kaikille mallinnusalueille tehty uudet hilaruudukot. Ruudukot on tihennetty kaivo- ja imeytysalueiden vaiheilla sekä eräiden kapeiden kallioperän uurteiden kohdalla milloin on ollut kyse keskeisen hydraulisen yhteyden säilymisestä mallissa. Ruudukoiden tihennetyillä alueilla laskentatarkkuus on suurempi kuin siellä, missä laskentapistettä on harvemmassa.

Mallit on tehty yksikerrosmalleina kuten aiemminkin. Erona aiempiin malleihin on kuitenkin se, että nyt kerrokset määriteltiin rajatuiksi (confined) kun ne aiemmin olivat vapaapintaisia (unconfined). Näin voidaan tehdä, kun pohjavedenpinnankorkeuksien muutokset ovat pieniä verrattuna kyllästyneen vyöhykkeen paksuuteen ja kun rajaavana pintana kussakin laskenta-ajossa käytetään pohjavedenpinnan pintamallia, joka on mahdollisimman lähellä todennäköistä mallinnustulosta.

Kallionpintaan (mallissa vettä johtavan kerroksen pohja) on lisätty uudet mitatut tiedot kairauksista sekä maaperäkartoilta digitoidut kalliopaljastumat. Järvien alla olevia tulkittuja pisteitä on nostettu hiukan entisestä. Järvien alla olevan kallionpinnan tulkinnassa on käytetty hyväksi lähimpänä rantaa olevia kairaus- tai geofysikaalisten mittausten pisteitä. Geofysikaalisista mittauksista tulkittuja kallionpinnan korkeuksia on tarvittavin osin nostettu tai laskettu enimmillään kyseisille menetelmille tyypillisten virhemarginaalien verran (seisminen ja gravimetrinen: $\pm 5\text{m}$) riippuen yleispiirteisistä malleista (Maa ja Vesi Oy) tehdyistä johtopäätöksistä: paikoin malleissa oli syytä laajentaa aktiivista aluetta ja paikoin oli viitteitä pohjaveden virtaukseen vaikuttavien kalliokynnysten olemassaolosta.

Luonnontilaisen pohjavedenpinnan pintamalliin (mallissa laskennan alkuarvo sekä vettä johtavan kerroksen yläpinta luonnontilassa) on otettu mukaan uudet pohjavedenpinnan korkeushavainnot ja jätetty huomiotta orsivedeksi määritellyt havainnot. Pohjavedenpinnan alapuolisten maakerrosten jakaminen vedenjohtavuudeltaan erilaisiin vyöhykkeisiin uudistettiin perustuen uusiin kairautietoihin, tarkennettuihin tulkintoihin aiemmista kairauksista sekä yleispiirteisten virtausmallien (Maa ja Vesi Oy) kalibroinnissa saatuihin kokemuksiin.

Sadantana on käytetty korjatun sadannan pitkäaikaista keskiarvoa. Malleissa imeyntä on jaettu pintamaalajien mukaan vyöhykkeisiin seuraavasti:

Taulukko 1. Imeyntien jako maalajeittain.

Alue	Aiemmat arvot			Päivitetyt arvot
	Kaivo 1	Kaivo 2	Kaivo 3	Kaikki alueet
Sadanta [mm a^{-1}]	614	614	614	700
Imeytymisprosentit				
- sora	100	100	55	60
- muu karkea aines	50	50	55	60
- hieno hiekka	25	25	35	35
- hienoainesalueet	0	0	15	15

Inaktiivisilta alueilta tuleva "lisävesi" on Kaivo 1:n mallissa esitetty kapeana viisinkertaisen imeynnän alueena no-flow-reunan läheisyydessä. Kaivo 2:n mallissa vastaava vesi on esitetty vettä syöttävinä kaivoina. Kaivo 3:n mallissa "lisävettä" on esitetty sekä suuremman imeynnän alueena mallinnusalueen länsireunalla että vettä syöttävinä kaivoina mallialueen pohjoisreunalla.

Ojien korkeusasematietoja on tarkennettu. Aiemmin Kaivo 1:n mallissa ei ollut koettu tarpeelliseksi huomioida ojitetuista alueita johtuen niiden sijainnista hienoainespitoisella alueella, jolla ei suuremmin tapahdu virtausta. Kaivojen 2 ja 3 malleista saatujen kokemusten perusteella myös Kaivo 1:n malliin otettiin ojapaketti mukaan. Kaivo 1:n mallissa ojiin purkautuvan veden määrä onkin vähäinen: suuruusluokaltaan vain kymmenesosa siitä määrästä, joka purkautuu ojiin Kaivojen 2 ja 3 malleissa.

5. Mallien kalibrointi

Mallien kalibroituvaiheessa kokeiltiin lähinnä erilaisia vedenjohtavuusarvoja. Kustakin alueesta on olemassa pohjavedenpinnan korkeustietoja sekä luonnontilasta että erilaisista koetilanteista. Vedenjohtavuusarvot on kalibroitu erityisesti luonnontilaa kuvaavien mittaustulosten avulla, mutta myös pumppaus- ja imeytyskokeiden tietoja on hyödynnetty. Luonnontilaa kalibroitaessa käytettiin PEST-kalibrointiohjelmaa. Sovitettaessa malleja myös koetilanteita vastaaviksi käytettiin yritys-erehdys-metodia.

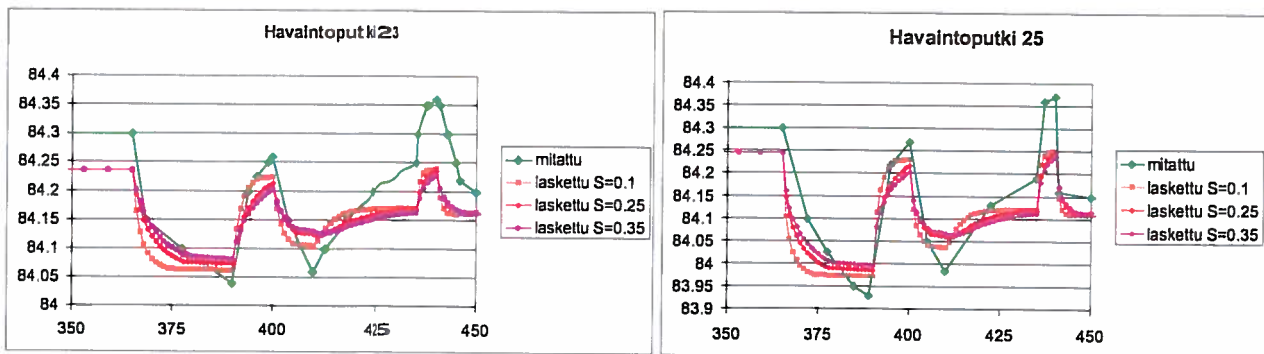
Kalibrointitilanteiden kuvissa on esitetty mitatun ja mallin laskeman pohjavedenpinnankorkeuden erotukset eli residuaalit pylväinä, joissa käytetyt värit ovat:

Vihreä	< 1 m
Keltainen	hiukan yli 1 m
Punainen	selvästi yli 1 m

Väripylvään korkeus kuvastaa residuaalin suuruutta: mitä pienempi pylväs, sitä pienempi eroavaisuus mitatun ja mallin laskeman tuloksen välillä. Havaintoputken sijaintia osoittavan pisteen vasemmalla puolella on poikkiviiva, joka kuvaa mitattua pohjavedenpinnan korkeutta: mikäli mallin laskema tulos on korkeampi kuin mitattu havainto, on väripylväs poikkiviivan yläpuolella ja vastaavasti mikäli mallin laskema tulos on matalampi kuin mitattu havainto, on väripylväs poikkiviivan alapuolella.

Laskenta-ajon vesitaseessa esiintyvä epätasapaino (malliin tulevan ja siitä poistuvan vesimäärän erotus prosentteina koko vesimäärästä, "percent descercancy") on hyväksyttävissä, mikäli se on alle 10.

Huokoisuutta arvioitiin tekemällä Kaivo 1:n mallilla transient- eli ajallisesti muuttuvan tilanteen ajo S-arvoilla 0.1, 0.25 ja 0.35. Simuloinnissa luonnonsadannasta tapahtuva imeyntä pidettiin vakiona, mutta pumppaus ja imeytysmäärät jaksotettiin Kaivo 1:n alueella tehtyjen pumppaus- ja imeytyskokeiden (imeytysosa-alueet 1 ja 2) mukaisiksi. Verrattaessa mallin laskemia pohjavedenpinnankorkeuksia jatkuvatoimisten mittareiden tuloksiin voidaan havaita, että arvolla 0.1 laskettaessa vedenpintojen käyttäytyminen (nousut ja laskut) on liian "jyrkkää" ja arvolla 0.35 hiukan liian "loivaa". Kokeiluista arvoista 0.25 tuottaa vedenpinnan muutoskäyrät, jotka eniten muistuttavat kokeiden aikana tehtyjä havaintoja. Samoin on toisessa tekopohjavesitutkimuksessa Virttaankankaalla, joka varsin paljon muistuttaa maaperältään Vehoniemen-Syrjänharjua, transient-simuloinnilla todettu 0.25 soveliaaksi S-arvoksi.

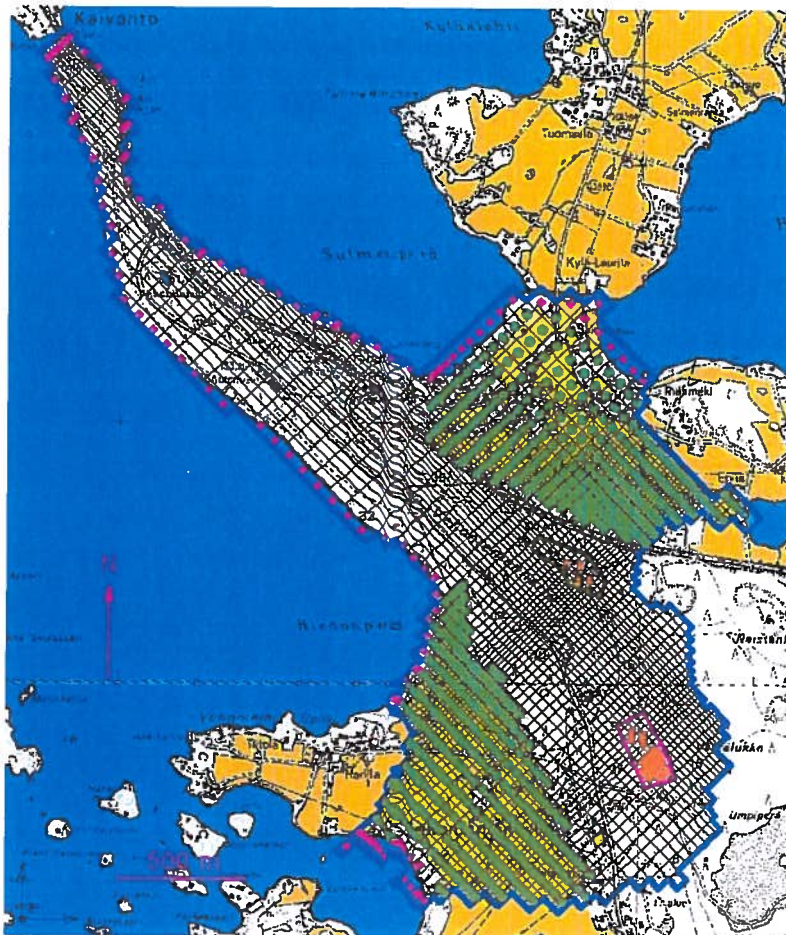


Kuva 3. Transient-simuloinnin tuloksena saadut pohjavedenpinnan korkeudet havaintoputkien 23 ja 25 kohdalla.

6. Kaivo 1

Lähtötiedot ja kalibrointi

Kaivo 1:n mallia on laajennettu Raikun suuntaan Vehoniemenharjun pohjoispuolelle (kuva 4). Lisäksi imeytysalue kokonaisuudessaan sekä sen ja havaintoputken 14 välinen alue on aktivoitu (kuva 5). Hilaruutuja on 54:ssä rivissä 82 saraketta. Ruutujen leveydet vaihtelevat 15 ja 80 metrin välillä.



Kuva 4. Kaivo 1:n mallinnusalueen
hilaruudukko.

Sininen raja: aktiivisen alueen reuna.
Vihreä pallo: ojitettu alue.

Purppuraneliö: pysyvän pohjavedenpinnan
reunaehtoruutu.

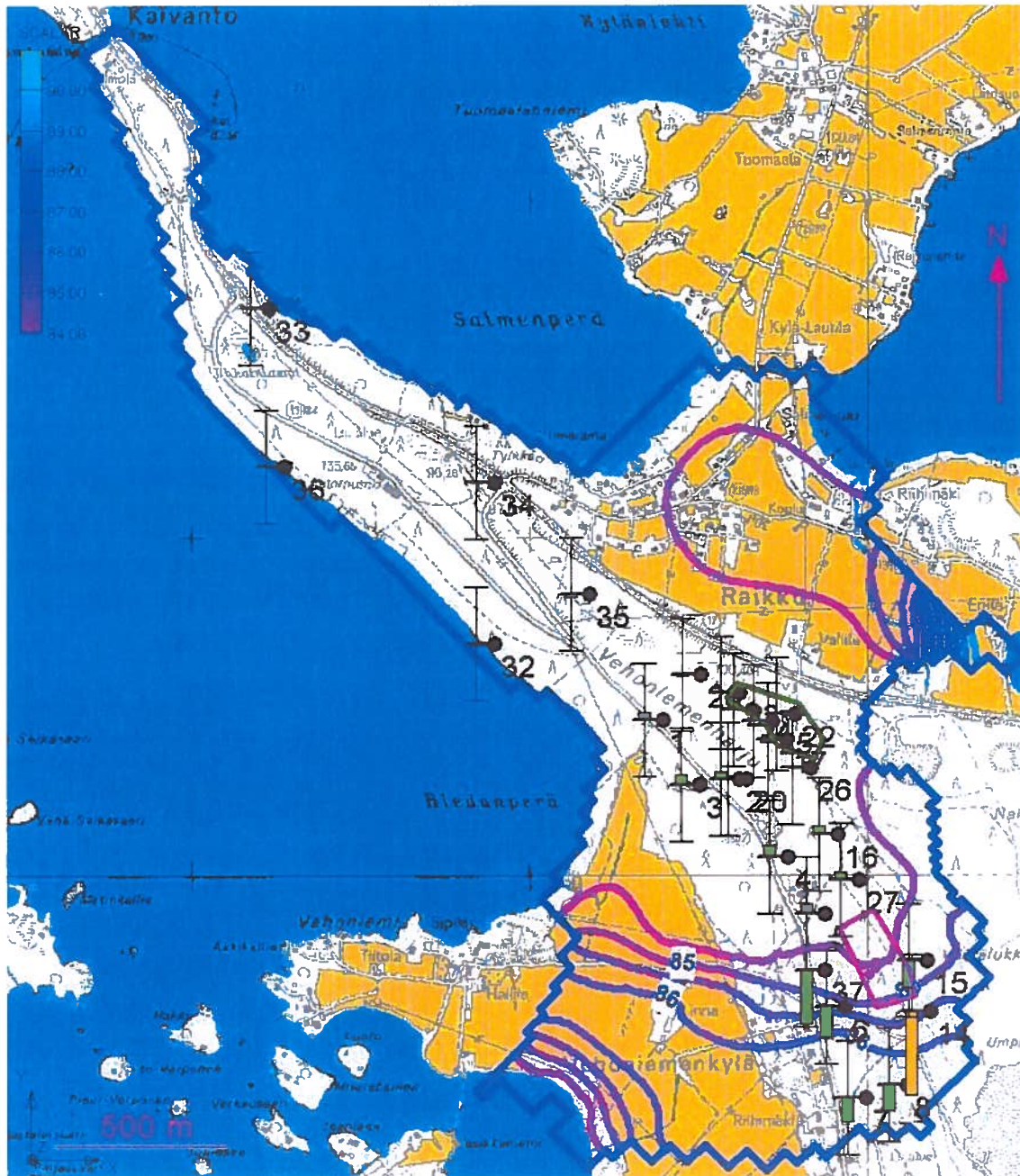
Oranssi neliö: imeytys- tai pumppauskaivon
sisältävä ruutu.

Vihreä raja: kaivokenittä.

Purppurarajaus: imeytysalue.

Mallin itäistä, kallionvastaista reunaa myöten
malliin syötetään $330 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ vettä inaktiiviselta
alueelta.

Luonnontilan laskenta-ajossa (kuvat 5 ja 6) kaikkien muiden havaintoputkien kohdalla päästään hyvään kalibroitutukseen, paitsi putken 14 kohdalla. Todellisuudessa putki 14 sijaitsee omassa pikku pohjavesialtaassaan, jolla on hydraulinen yhteys putkien 8 ja 7 suuntaan. Mallissa taas putkelta 14 on luotu yhteys kaikkiin suuntiin. Tämä eroavaisuus todellisuudesta aiheuttaa hieman suotavaa suuremman residuaalin putken 14 kohdalla. Imeytyskokeissa ja tuotantotilanteissa on kuitenkin olemassa yhtenäinen vesipatja myös mallinnusalueen kaakkoisosassa. Havaintoputken 37 kohdalla on pienipiirteistä maalajien vaihtelua, jota ei täysin voida mallissa ottaa huomioon. Tästä johtuneen lähes 1 m suuruinen residuaali putken 37 kohdalla.



Kuva 5. Kaivo 1, luonnontila: mallin laskema pohjavedenpinta [m mpy] ja residuaalipylväät (vertailujana = ± 1 m). Mallin itäistä, kallionvastaista reunaa myöten malliin syötetään $330 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ vettä inaktiiviselta alueelta.

Kuva 6. Luonnontilan laskenta-ajon vesitase [m^3s^{-1}].

[illegible]

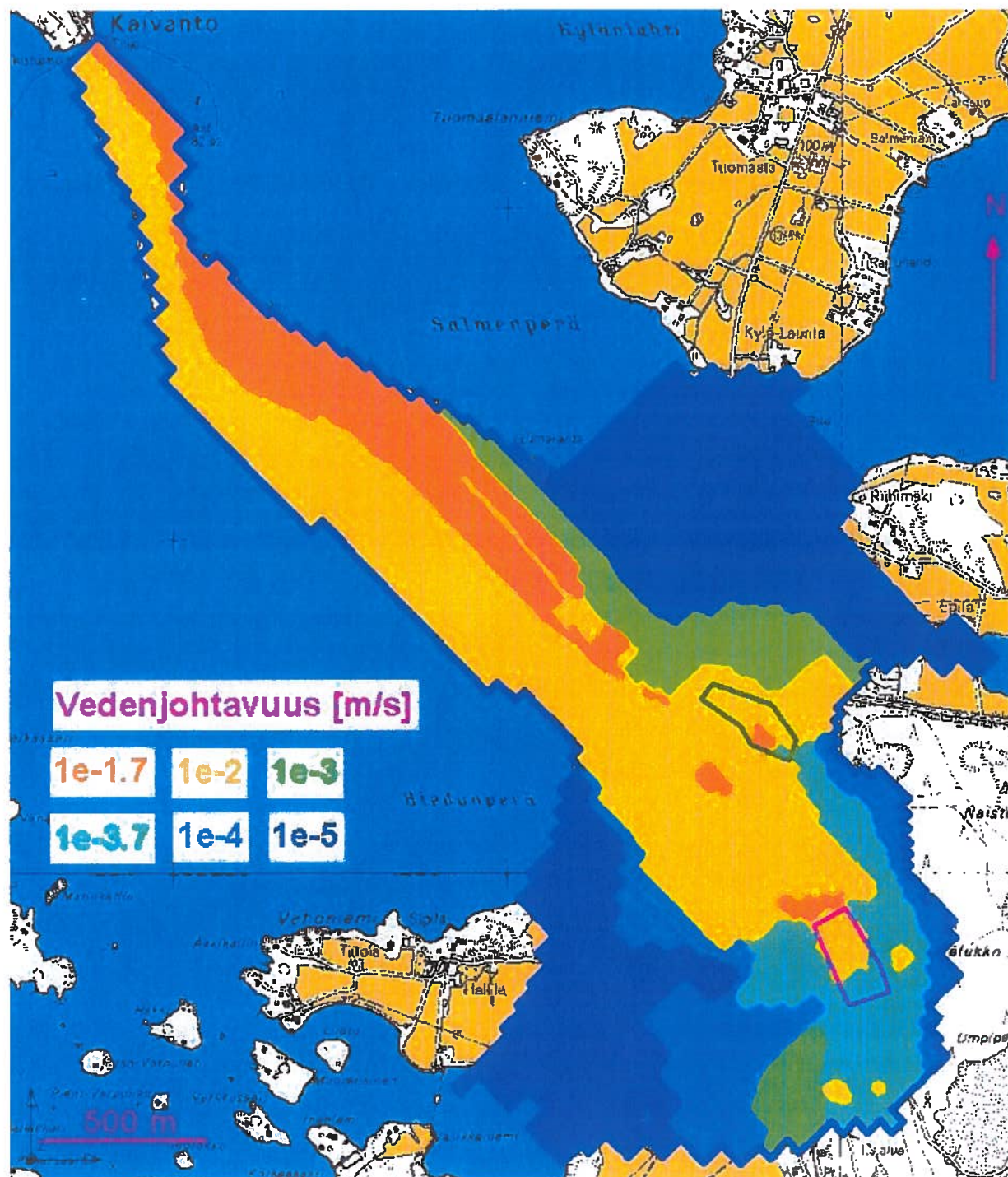
```

RATES FOR THIS TIME STEP                                L**3/T
-----
      IN:
      ---
          STORAGE =          0.0000
CONSTANT HEAD =    0.99810E-05
          WELLS =    0.46296E-01
          DRAINS =          0.0000
          RECHARGE =    0.32339E-01
          TOTAL IN =    0.78645E-01
      OUT:
      ----
          STORAGE =          0.0000
CONSTANT HEAD =    0.33948E-01
          WELLS =    0.46300E-01
          DRAINS =    0.22896E-03
          RECHARGE =          0.0000
          TOTAL OUT =    0.80477E-01
          IN - OUT =   -0.18324E-02
PERCENT DISCREPANCY =

```

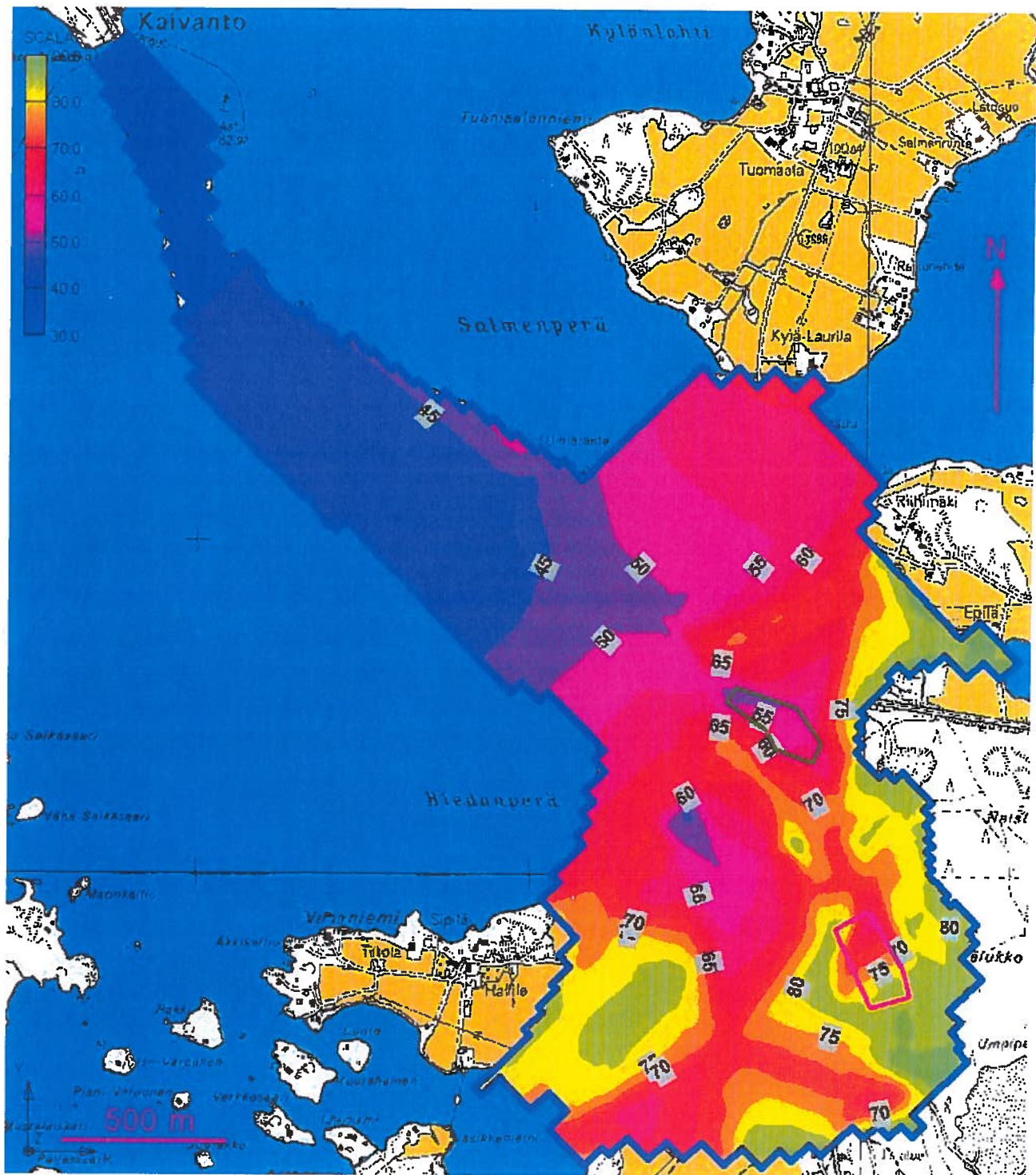
Kuva 7. Kaivo 1, pumppaus- ja imeytyskoe: mallin laskema pohjavedenpinta [m mpy] & residuaalipylväät (vertailujana = ± 1 m) sekä laskenta-ajon vesitase [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]. Mallin itäistä, kallionvastaista reunaa myöten malliin syötetään $330 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ vettä inaktiiviselta alueelta.

Kaivo 1:n mallinnuksessa saavutettu kalibrointitaso on sekä luonnontilassa että aktiivitilanteessa varsin hyvä: residuaalit ovat suurimmaksi osaksi erittäin pieniä ja mallinnusalueen kaakkoisosassakin vielä hyväksyttävissä. Kalibroinnin myötä muotoutunut vedenjohtavuusarvojen jakauma on esitetty kuvassa 8. Vedenjohtavuudet vaihtelevat välillä $1e-5 - 0,0185 \text{ ms}^{-1}$ ($1 - 1600 \text{ md}^{-1}$).



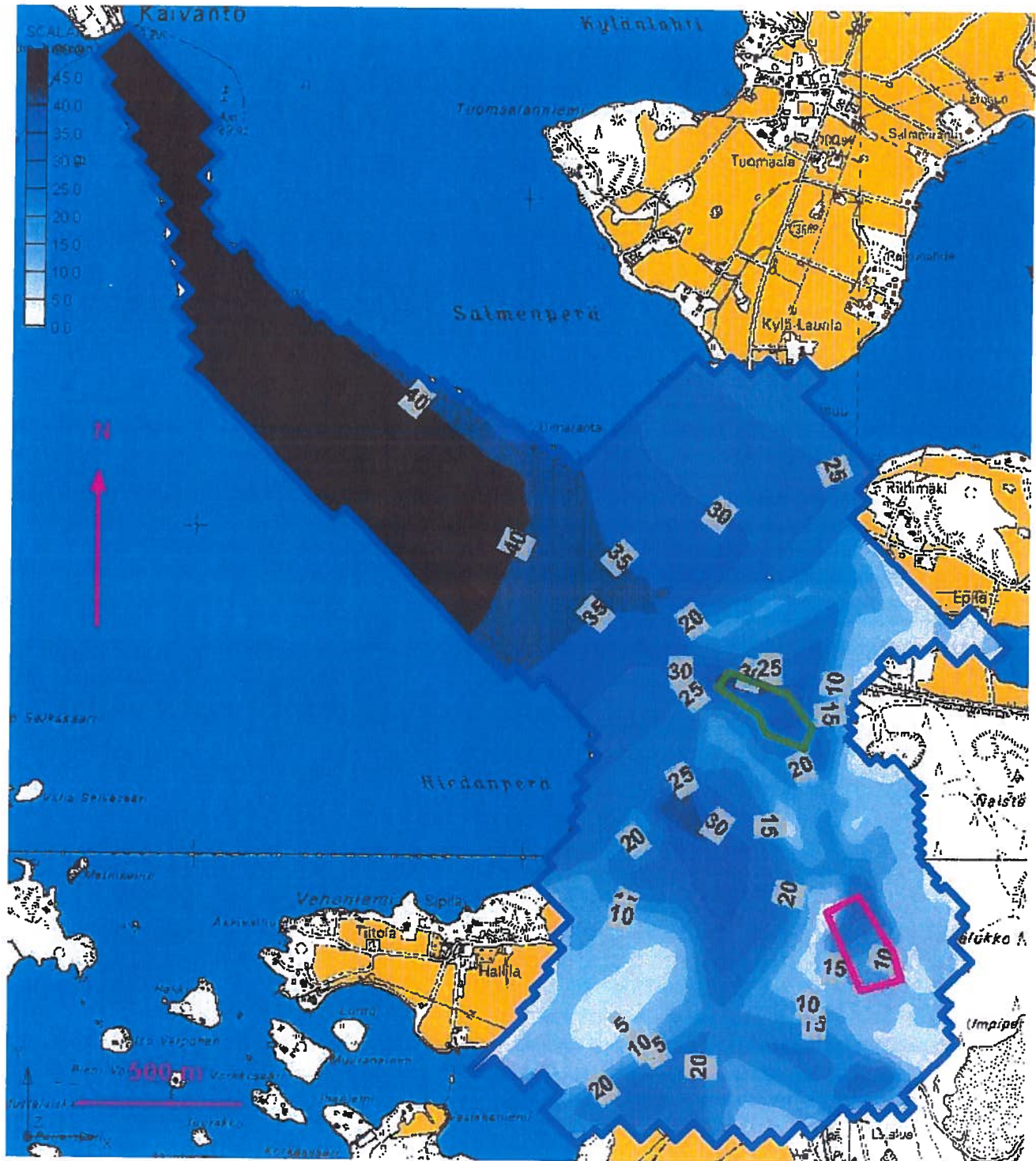
Kuva 8. Kaivo 1: vedenjohtavuusvyöhykkeet [ms^{-1}].

Pohjavesikerroksen pohja voi olla kallio tai tiivis maalaji. Tässä mallissa pohjavesikerroksen alapintana käytettiin kallionpintaa (kuva 9).



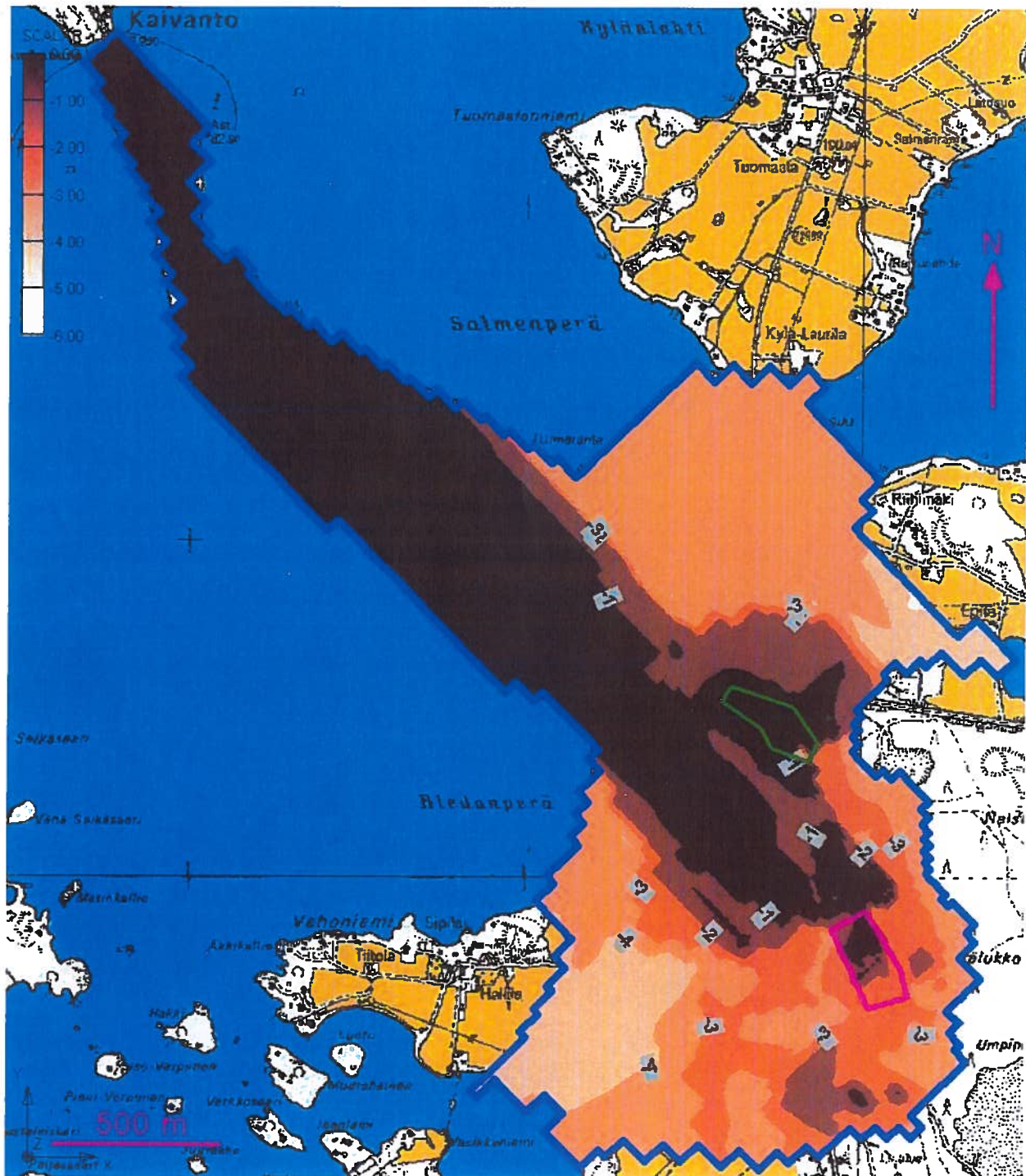
Kuva 9. Kaivo 1: kallionpinta [m mpy].

Kyllästyneen vyöhykkeen eli mallinnetun kerroksen paksuus (kuva 10) on laskettu mallinnuskerroksen yläpinnan (pohjavedenpinta) ja alapinnan (kallio) erotuksena.



Kuva 10. Kaivo 1: kyllästyneen vyöhykkeen paksuus [m].

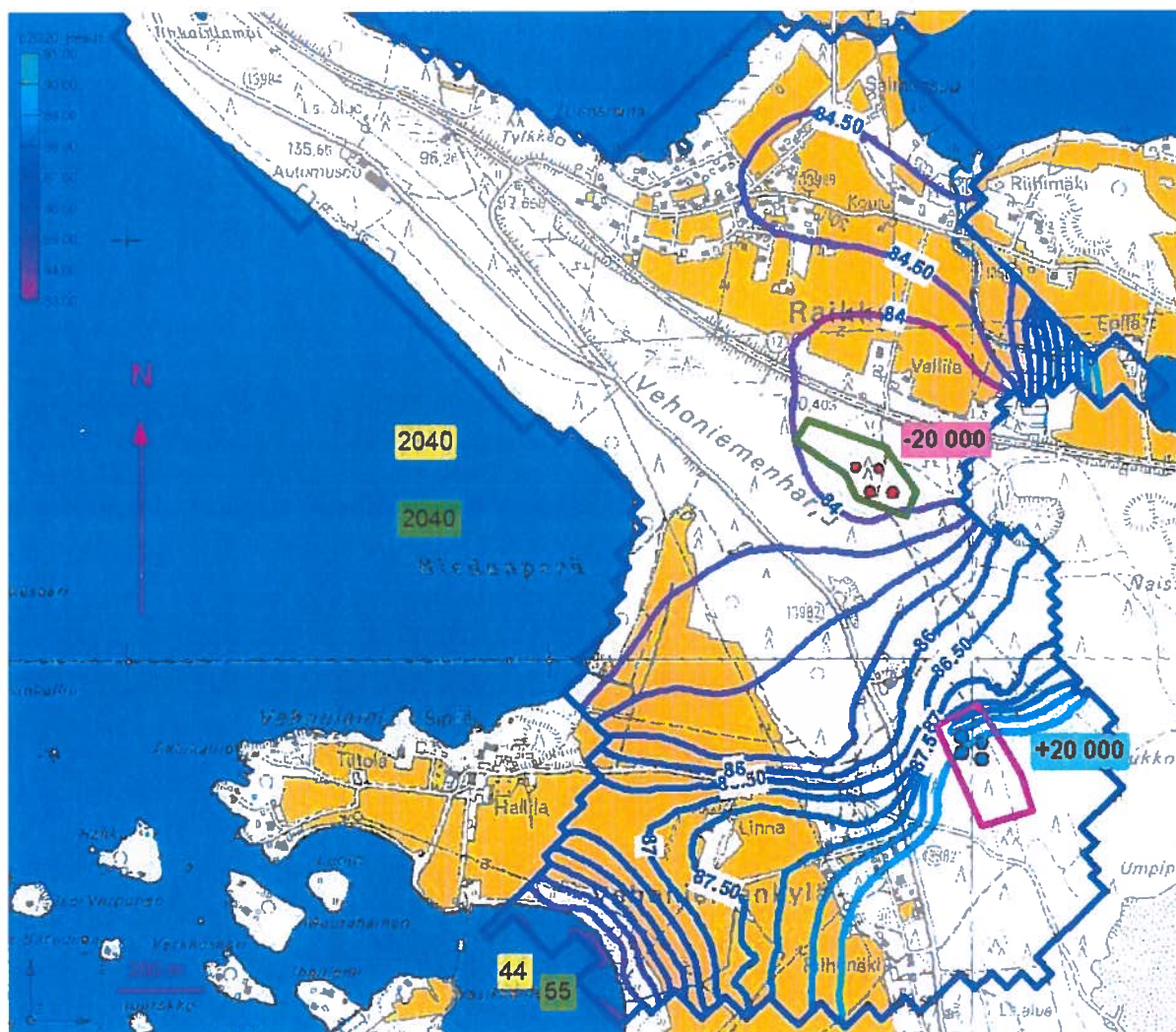
Pohjaveden virtausolosuhteita kuvaa vedenjohtavuuden ja mallinnuskerroksen paksuuden tulo eli vedenjohtokyky (T). Koska T-arvot voivat vaihdella useiden dekaadien verran, ne on kuvassa 11 esitetty logaritmiarvoina eli varsinainen T-arvo saadaan kohottamalla luku kymmenen käyrien osoittamaan potenssiin.



Kuva 11: Kaivo 1: Vedenjohtokyvyn vaihtelu, logaritminen esitys [$\log(m^2s^{-1})$].

Ennustejot

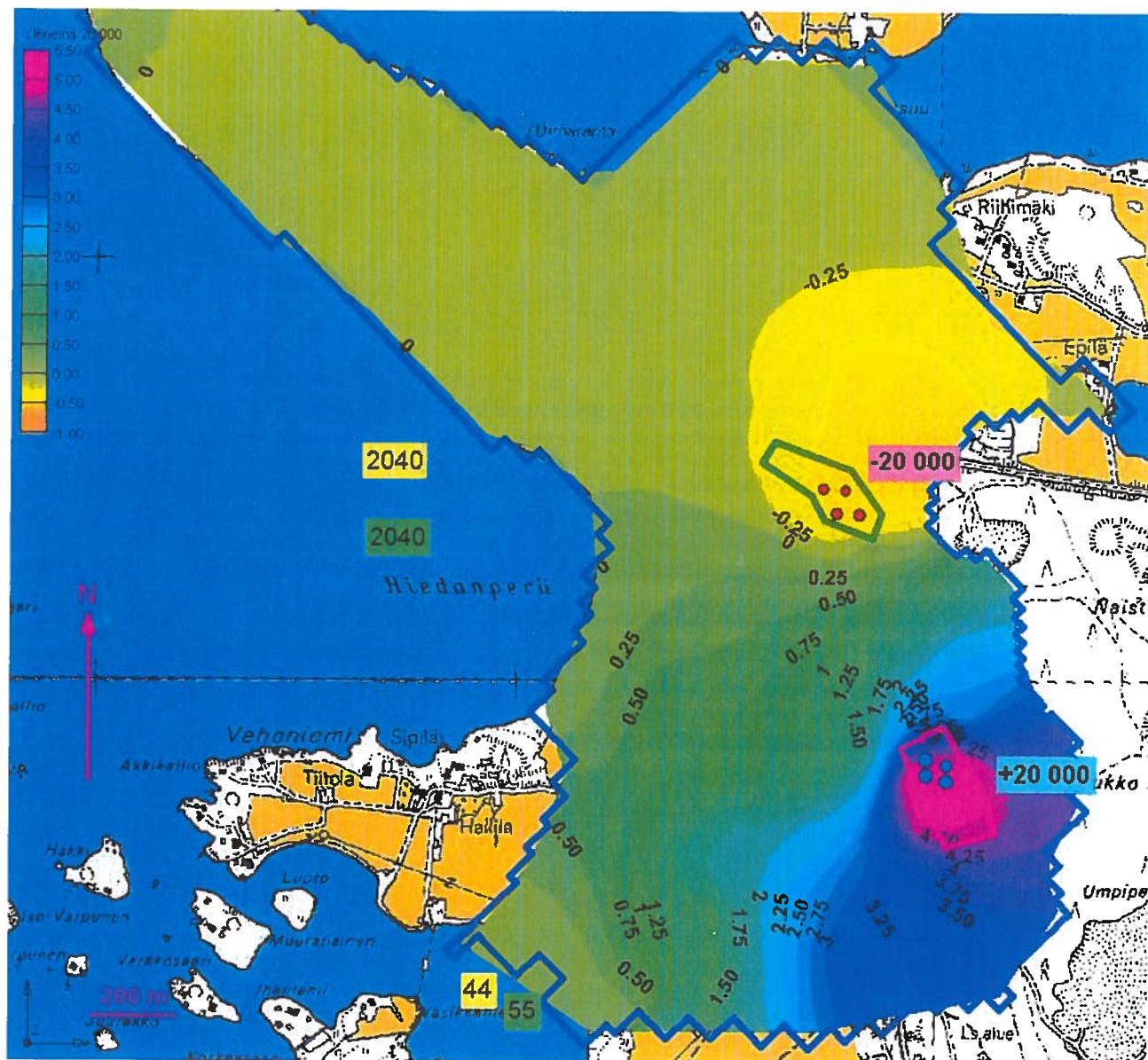
Ennustejot tehtiin pumppaus- ja imeytysmäärillä $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ja $22\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$. Kuvassa 12 on esitetty mallin laskema pohjavedenpinta tuotannon ollessa $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ sekä Hiedanperän ja Vehoniemenkylän kohdalla järveen purkautuvan pohjaveden määrä luonnontilassa (keltainen) ja tuotantotilanteessa (vihreä). Purkautuvan veden määrässä ei tapahdu juuri muutoksia. Myöskään virtaussuunnat eivät muutu merkittävästi. Tuotantomäärällä $22\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ tulokset ovat lähes samantyyppiset kuin $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ -ajossa.



RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:		
STORAGE	=	0.0000
CONSTANT HEAD	=	0.14103E-04
WELLS	=	0.23148
DRAINS	=	0.0000
RECHARGE	=	0.32339E-01
TOTAL IN	=	0.26383
OUT:		
STORAGE	=	0.0000
CONSTANT HEAD	=	0.30700E-01
WELLS	=	0.23148
DRAINS	=	0.25826E-02
RECHARGE	=	0.0000
TOTAL OUT	=	0.26476
IN - OUT	=	-0.92915E-03
PERCENT DISCREPANCY	=	-0.35

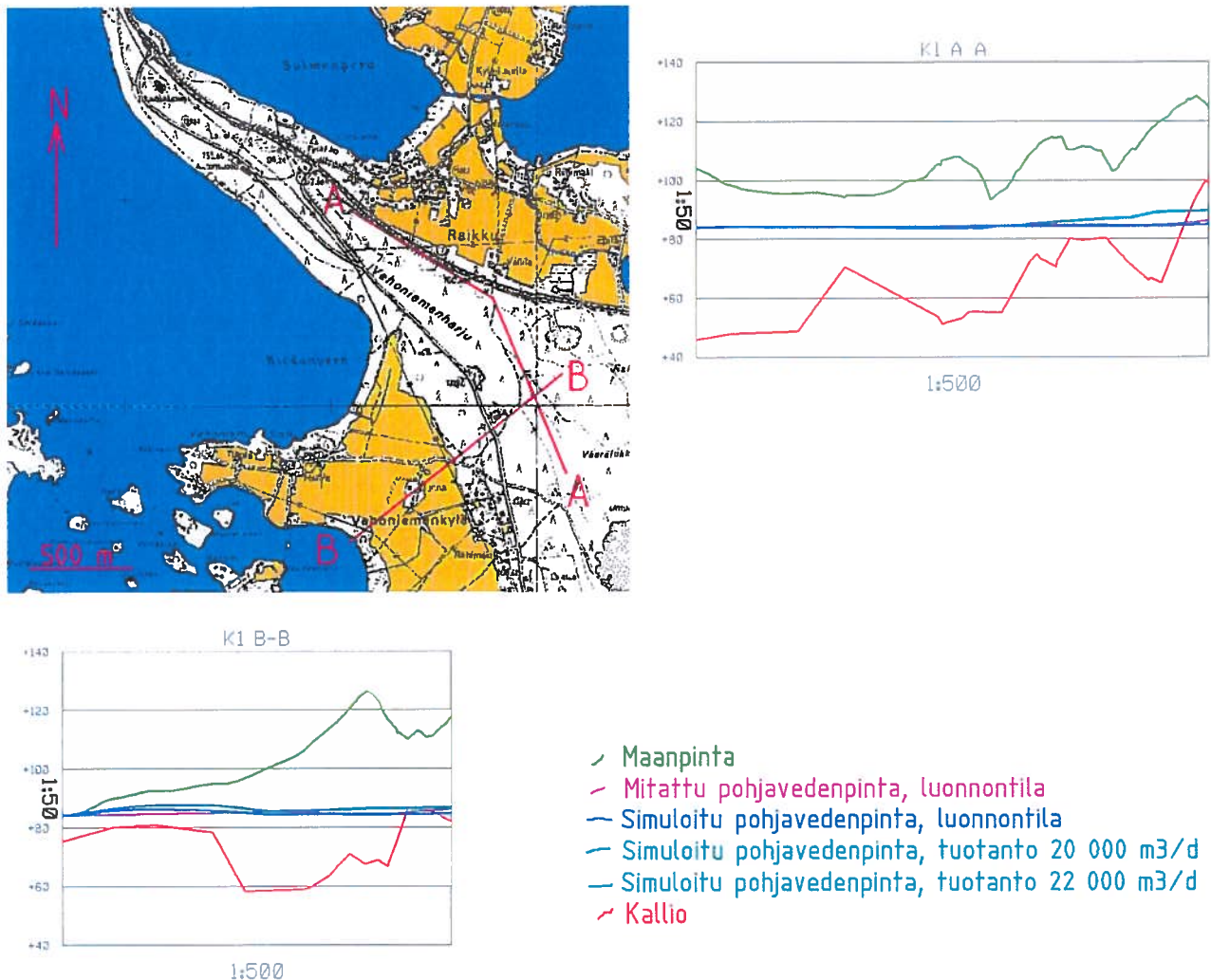
Kuva 12. Kaivo 1: pohjavedenpinnankorkeus [m mpy] ja mallin vesitase [m^3s^{-1}] pumppauksen ja imeytyksen ollessa $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$. Mallin itäistä, kallionvastaista reunaa myöten malliin syötetään $330\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ vettä inaktiiviselta alueelta.

Pohjavesipinnan suurin ylenemä $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ -tuotantosimuloinnissa on 5,13 m ja suurin alenema 0,72 m (kuva 13). Alenemaa voi pitää varsin pienenä. Yli 4 m ylenemä muodostaa varsin paikallisen ylenemäkartion. Suurimman ylenemän kohdalle jää ylenemästä huolimatta noin 20-30 m paksuinen kyllästymätön vyöhyke.



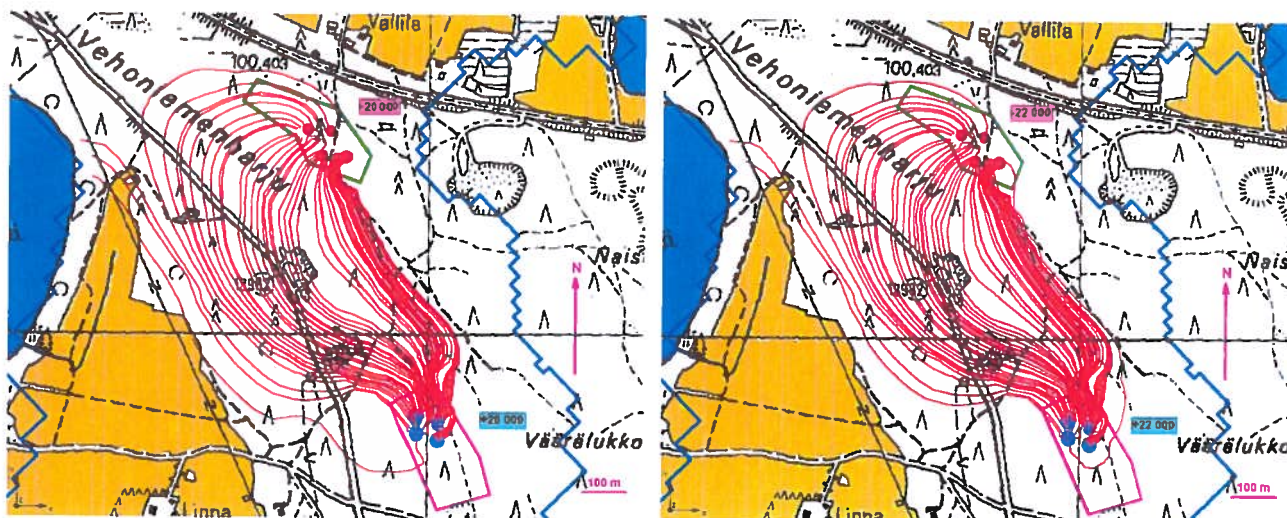
Kuva 13. Kaivo 1: pohjavedenpinnan korkeuden muutos [m] tuotannon ollessa $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Poikkileikkauskuvista (kuva 14), nähdään, että suhteessa maakerrosten paksuuteen pohjavedenpinnan korkeuden muutokset ovat varsin pieniä.



Kuva 14. Kaivo 1: poikkileikkauskuvat luonnontilan ja tuotantotilanteiden simuloinnista. Pystysuunnan mittakaava on kymmenkertainen verrattuna vaakasuuntaan. Korkeusasemat [m mpy].

Veden virtausreitit laskettiin sekä 20 000 m³d⁻¹ että 22 000 m³d⁻¹ -tuotantotilanteissa (kuva 15). Partikkelit laitettiin liikkeelle imeytysalueelta ja niiden etenemistä seurattiin myötävirtaan. Partikkelien kulkureitit ovat näissä kahdessa simuloinnissa lähes samat.



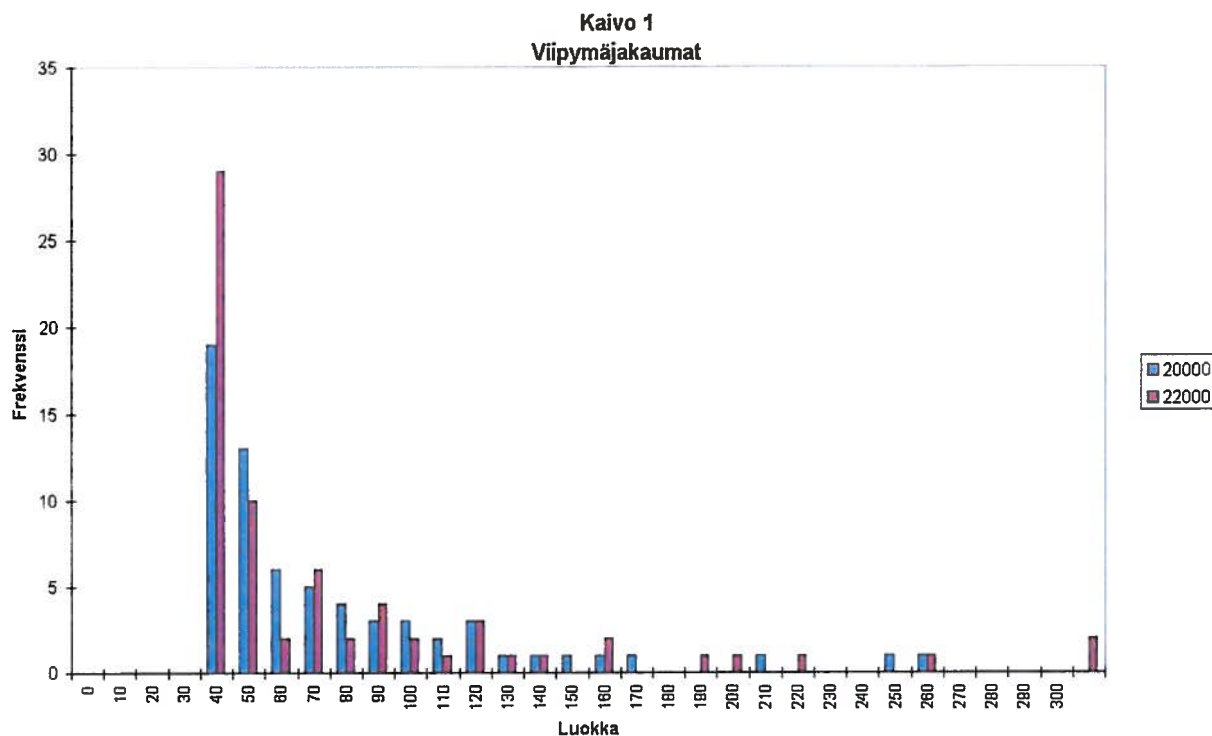
Kuva 15. Kaivo 1: imeytetyn veden kulkureitti tuotannon ollessa 20 000 m³d⁻¹ ja 22 000 m³d⁻¹.

Viipymäärät pumppaus- ja imeytysmäärillä 20 000 m³d⁻¹ ja 22 000 m³d⁻¹ on esitetty taulukossa 2. Vertailun vuoksi taulukossa on esitetty myös aiemmalla mallilla (Vanha) lasketut viipymät laskettuna sekä aiemmin käytetyllä huokoisuuden (n) arvolla 35% että nyt käytetyllä arvolla 25%. Vanhalla mallilla lasketut viipymät poikkeavat hieman aiemmin raportoiduista tuloksista, sillä nämä simuloinnit tehtiin uudella partikkelilukumäärällä 64 kpl (1998 raportoiduissa ajoissa oli enimmillään 24 kpl). Uudella mallilla laskettaessa partikkeleita laitettiin imeytysalueelta liikkeelle 71 kpl.

Taulukko 2. Kaivo 1: viipymät [d].

Pumppaus [m³d⁻¹]	Imeytys [m³d⁻¹]	Vanha nopein n = 35% (n = 25%)	Vanha keskiarvo aritm. / geom. / harm. n = 35% (n = 25%)	Vanha mediaani n = 35% (n = 25%)	Uusi nopein	Uusi keskiarvo aritm. / geom. / harm.	Uusi mediaani
16000	14000	54 (39)	187 / 127 / 100 (134 / 91 / 71)	106 (61)			
20000	18000	43 (31)	154 / 104 / 81 (110 / 74 / 58)	86 (62)			
20000	20000				37	83 / 65 / 56	51
22000	22000				33	79 / 60 / 52	47
24000	22000	36 (26)	134 / 88 / 68 (96 / 63 / 48)	73 (52)			
28000	26000	31 (22)	119 / 77 / 58 (85 / 55 / 42)	63 (45)			
32000	30000	27 (19)	107 / 68 / 51 (76 / 48 / 37)	56 (40)			
36000	34000	24 (17)	98 / 61 / 46 (70 / 44 / 33)	51 (36)			
40000	38000	22 (16)	77 / 47 / 36 (64 / 39 / 30)	40 (33)			

Verrattaessa viipymäarvojen jakaumaesitystä (kuva 16) ja lukuarvoja taulukossa 2 Kaivo 1:n tapauksessa keskimääräistä viipymää kuvaavat parhaiten harmoninen keskiarvo ja mediaani. Simuloiduissa tuotantotilanteissa minimiviipymä on noin 35 ja keskimääräinen viipymä noin 50 vuorokautta.



Kuva 16. Kaivo 1: viipymäjakaumat [d] tuotantotilanteissa $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ja $22\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

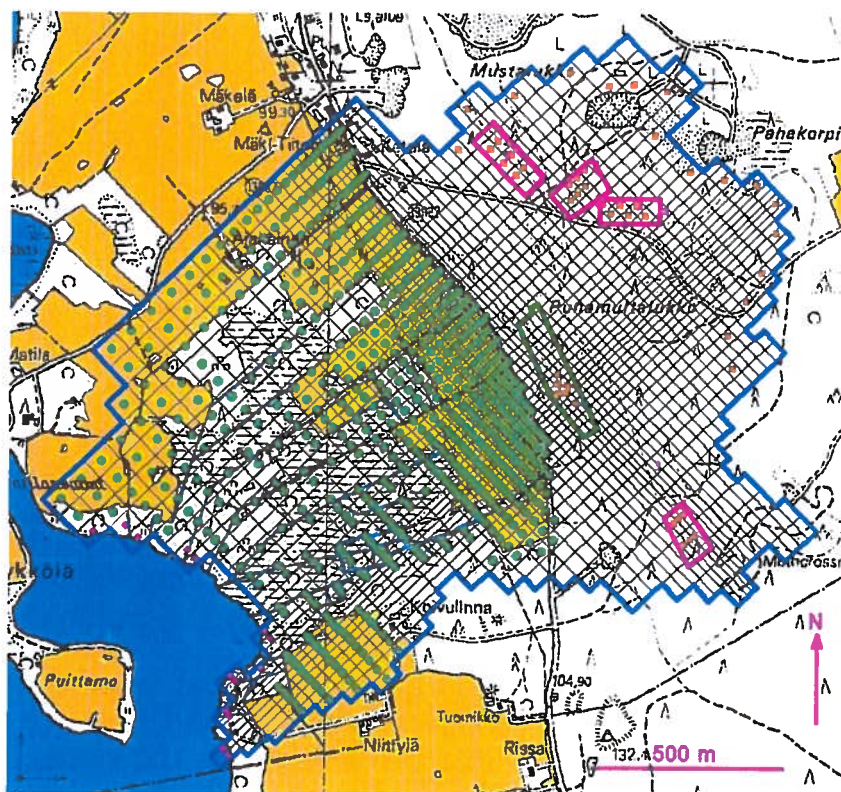
Herkkyystarkastelu

Vedenjohtavuuden muutoksilla on merkittävä vaikutus tuotantotilanteen laskentatulokseen. Kymmenkertaisilla vedenjohtavuuksilla laskettaessa pohjavedenpinta on lähes vaakasuora. Pienennettäessä vedenjohtavuudet kymmenenteen osaan saadaan tulokseksi 6 m suuremmat alenemat kaivoalueella ja imeytysalueella 48 m suuremmat ylenemät kuin varsinaisessa ennustejossa.

7. Kaivo 2

Lähtötiedot ja kalibrointi

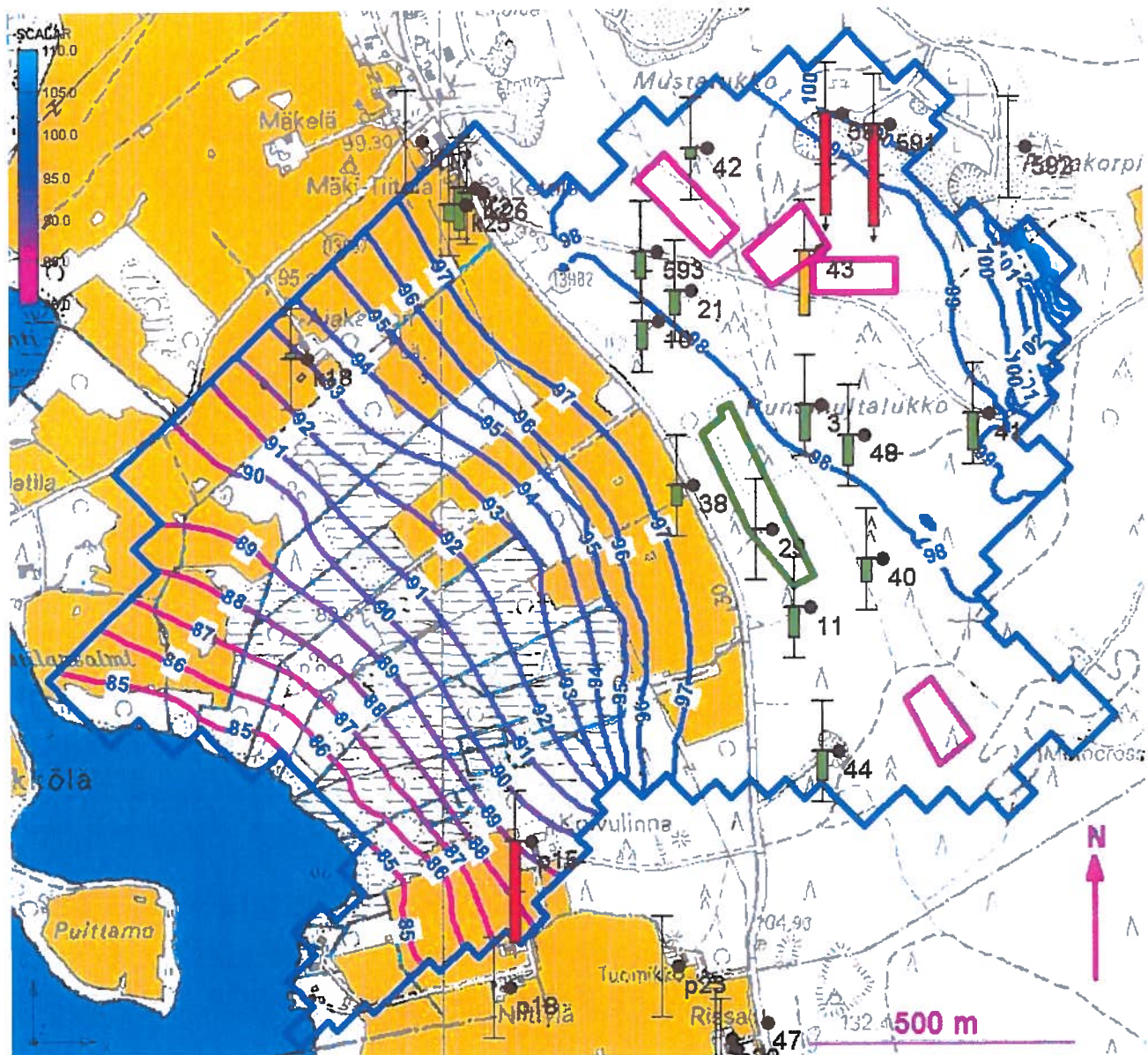
Kaivo 2:n mallin rajaus (kuva 17) on jokseenkin sama kuin edellisellä kierroksella lukuun ottamatta imeytysalueen 3 ympäristöä, jota on aktivoitu entistä laajemmin. Lisäksi imeytysalueen 2 vieressä ollut inaktiivinen alue on voitu aktivoida uusien pohjavedenpinnankorkeustietojen nojalla.



Kuva 17. Kaivo 2:n mallinnusalueen hilaruudukko.
Sininen raja: aktiivisen alueen reuna.
Vihreä pallo: ojitettu alue.
Purppuraneliö: pysyvän pohjavedenpinnan reunaehdortu.
Oranssi neliö: imeytys- tai pumppauskaivon sisältävä ruutu (mallinnusalueen pohjoisella ja itäisellä reunalla olevat neliöt: veden syöttö inaktiiviselta alueelta, yhteensä $1500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$).
Vihreä raja: kaivokenttä.
Purppurarajaus: imeytysalue

Vedenjohtavuusarvot on kalibroitu erityisesti luonnontilaa kuvaavien mittaustulosten avulla. Myös pumppaus- ja imeytyskokeita on simuloitu, mutta pohjavedenpinnan korkeushavaintoja ei ole käytetty vertailuarvoina sellaisenaan, johtuen siitä, ettei kokeiden aikana ole saavutettu tasapainotilaa. Vertailuarvot kunkin imeytysosa-alueen kokeen kohdalla relevanttien havaintoputkien osalta on arvioitu jatkuvatoimisten pohjavedenpinnan korkeusmittareiden tuloksista.

Luonnontilan laskenta-ajossa (kuva 18) kaikkien muiden havaintoputkien kohdalla päästään hyvään kalibrointitulokseen, paitsi putken 43 (keltainen pylväs), 590 ja 591 (punaiset pylväät) sekä talousvesikaivon P15 kohdalla. Punaiset pylväät sijaitsevat kaikki sellaisissa kohdissa, joissa jyrkkä gradientti vaikeuttavaa mallin laskeman pohjavedenpinnankorkeuden saamista samaksi kuin putkesta tehty mittaushavainto. Nyt käytetyllä vedenjohtavuusvyöhykejaolla ei mallinnusalueen pohjoisnurkassa saada pohjavedenpintaa nousemaan riittävän jyrkästi – tässä mielessä suuret residuaalit havaintoputkissa 43, 590 ja 591 liittyvät toisiinsa.



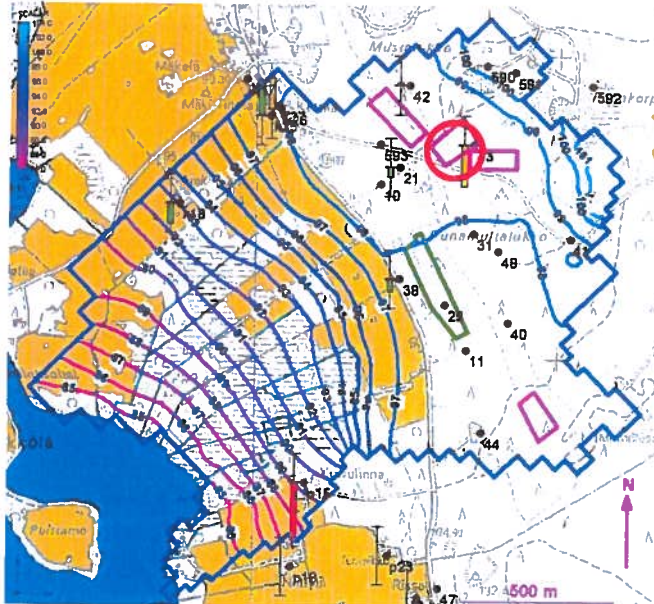
RATES FOR THIS TIME STEP

L**3/T

IN:	
STORAGE	= 0.0000
CONSTANT HEAD	= 0.0000
WELLS	= 0.17000E-01
DRAINS	= 0.0000
RECHARGE	= 0.16963E-01
TOTAL IN	= 0.33963E-01
OUT:	
STORAGE	= 0.0000
CONSTANT HEAD	= 0.33868E-02
WELLS	= 0.0000
DRAINS	= 0.30660E-01
RECHARGE	= 0.0000
TOTAL OUT	= 0.34047E-01
IN - OUT	= -0.83454E-04
PERCENT DISCREPANCY	= -0.25

Kuva 18. Kaivo 2, luonnontila: mallin laskema pohjavedenpinta [m mpy] & residuaalipylväät (vertailujana = ± 1 m) sekä laskenta-ajon vesitase [m^3s^{-1}].
Mallinnusalueen pohjoisella ja itäisellä reunalla tapahtuu veden syöttöä inaktiiviselta alueelta yhteensä $1500 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Kuvassa 19 on esitetty imeytysalueen 2 osa-alue 1:n pumppaus- ja imeytyskokeen kalibrointiajon tulos. Tälle kokeelle merkittävät vertailuarvot arvioitiin havaintoputkien 21, 38 ja 43 mittauksista. Putkien 21 ja 38 kohdalla kalibrointitulos on hyvä, mutta putken 43 kohdalla vain tyydyttävä aivan vastaavasti kuin luonnontilan simuloinninkin kohdalla.



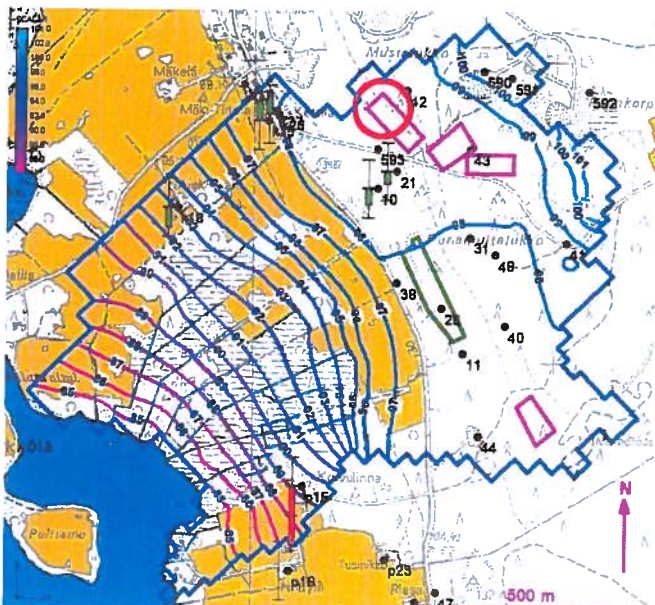
RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:		

STORAGE	=	0.0000
CONSTANT HEAD	=	0.0000
WELLS	=	0.17000E-01
DRAINS	=	0.0000
RECHARGE	=	0.73375E-01
TOTAL IN	=	0.90375E-01
OUT:		

STORAGE	=	0.0000
CONSTANT HEAD	=	0.33867E-02
WELLS	=	0.56700E-01
DRAINS	=	0.30355E-01
RECHARGE	=	0.0000
TOTAL OUT	=	0.90445E-01
IN - OUT	=	-0.70669E-04
PERCENT DISCREPANCY	=	-0.08

Kuva 19. Kaivo 2, pumppaus- ja imeytyskoe, imeytysalueen 2 osa-alue 1 (punainen ympyrä): mallin laskema pohjavedenpinta [m mpy] & residuaalipylväät (vertailujana = ± 1 m) sekä laskenta-ajon vesitase [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]. Mallinnusalueen pohjoisella ja itäisellä reunalla tapahtuu veden syöttöä inaktiiviselta alueelta yhteensä $1500 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$.

Kuvassa 20 on esitetty imeytysalueen 2 osa-alue 5:n ja kuvassa 20 imeytysalueen 3 pumppaus- ja imeytyskokeen kalibrointiajon tulokset. näille kokeelle merkittävät vertailuarvot arvioitiin edelliseen havaintoputkien 10 ja 21 ja jälkimmäiseen putkien 11 ja 44 mittauksista. Näiden putkien kohdalla kalibrointitulos on hyvä.

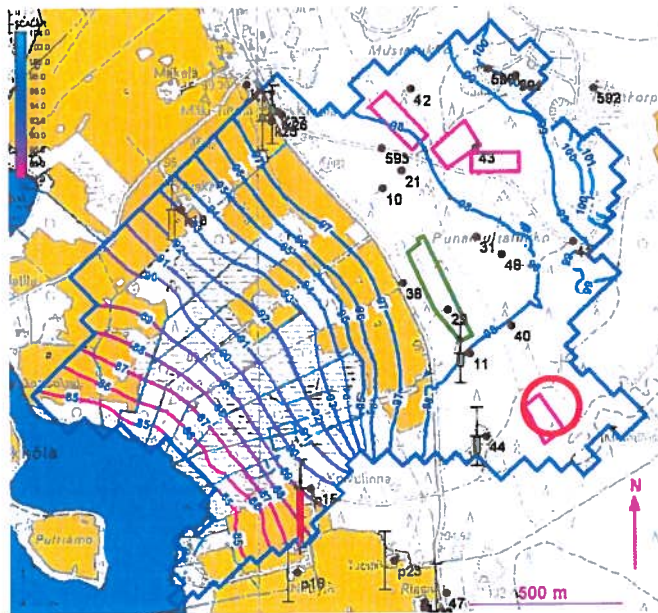


RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:		

STORAGE	=	0.0000
CONSTANT HEAD	=	0.0000
WELLS	=	0.17000E-01
DRAINS	=	0.0000
RECHARGE	=	0.73375E-01
TOTAL IN	=	0.90375E-01
OUT:		

STORAGE	=	0.0000
CONSTANT HEAD	=	0.33870E-02
WELLS	=	0.56700E-01
DRAINS	=	0.30355E-01
RECHARGE	=	0.0000
TOTAL OUT	=	0.90442E-01
IN - OUT	=	-0.67480E-04
PERCENT DISCREPANCY	=	-0.07

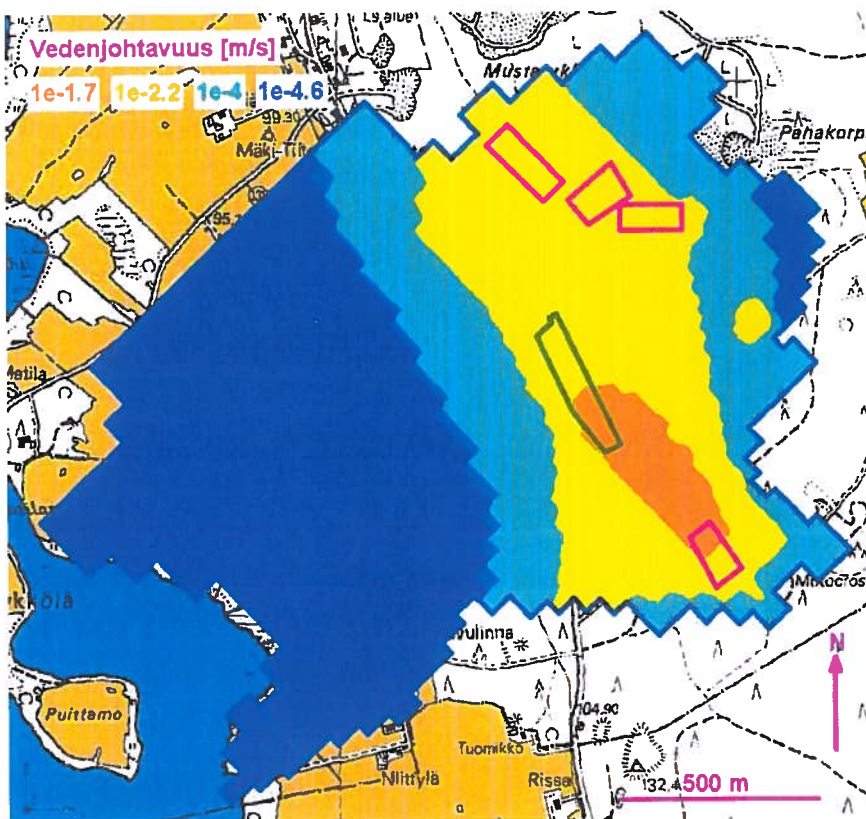
Kuva 20. Kaivo 2, pumppaus- ja imeytyskoe, imeytysalueen 2 osa-alue 5 (punainen ympyrä): mallin laskema pohjavedenpinta [m mpy] & residuaalipylväät (vertailujana = ± 1 m) sekä laskenta-ajon vesitase [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]. Mallinnusalueen pohjoisella ja itäisellä reunalla tapahtuu veden syöttöä inaktiiviselta alueelta yhteensä $1500 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$.



RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:		
STORAGE	=	0.0000
CONSTANT HEAD	=	0.0000
WELLS	=	0.17000E-01
DRAINS	=	0.0000
RECHARGE	=	0.70012E-01
TOTAL IN	=	0.87012E-01
OUT:		
STORAGE	=	0.0000
CONSTANT HEAD	=	0.33963E-02
WELLS	=	0.53200E-01
DRAINS	=	0.30439E-01
RECHARGE	=	0.0000
TOTAL OUT	=	0.87026E-01
IN - OUT	=	-0.13605E-04
PERCENT DISCREPANCY	=	-0.02

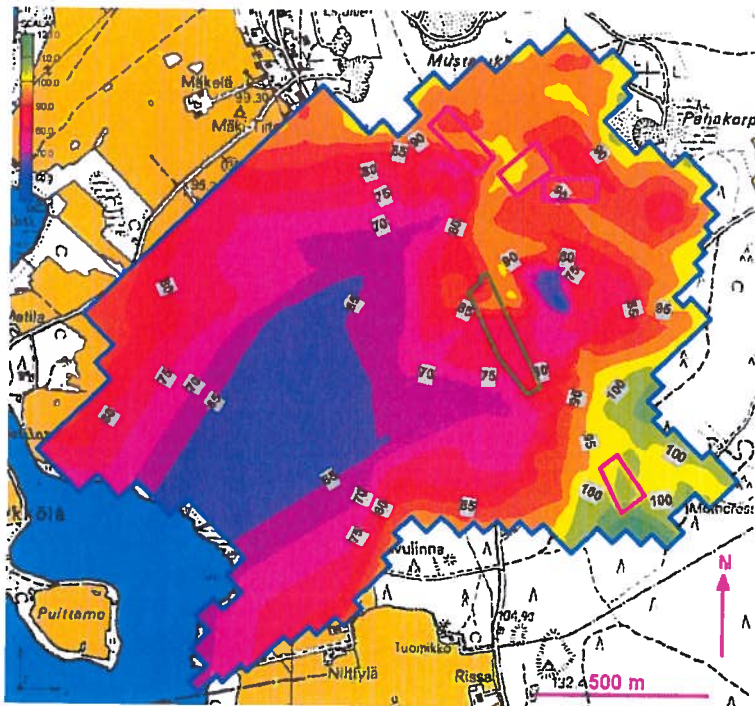
Kuva 21. Kaivo 2, pumppaus- ja imeytyskoe, imeytysalueen 3 osa-alue 3 (punainen ympyrä): mallin laskema pohjavedenpinta [m mpy] & residuaalipylväät (vertailujana = ± 1 m) sekä laskenta-ajon vesitase [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]. Mallinnusalueen pohjoisella ja itäisellä reunalla tapahtuu veden syöttöä inaktiiviselta alueelta yhteensä $1500 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$.

Kaivo 2:n mallinnuksessa saavutettu kalibrointitase on sekä luonnontilassa että aktiivitilanteessa varsin hyvä: residuaalit ovat suurimmaksi osaksi kohtuullisen pieniä. Kalibroinnin myötä muotoutunut vedenjohtavuusarvojen jakauma on esitetty kuvassa 22. Vedenjohtavuudet vaihtelevat $2,3 \times 10^{-5}$ - $0,0173 \text{ ms}^{-1}$ (2 - 1500 md^{-1}).



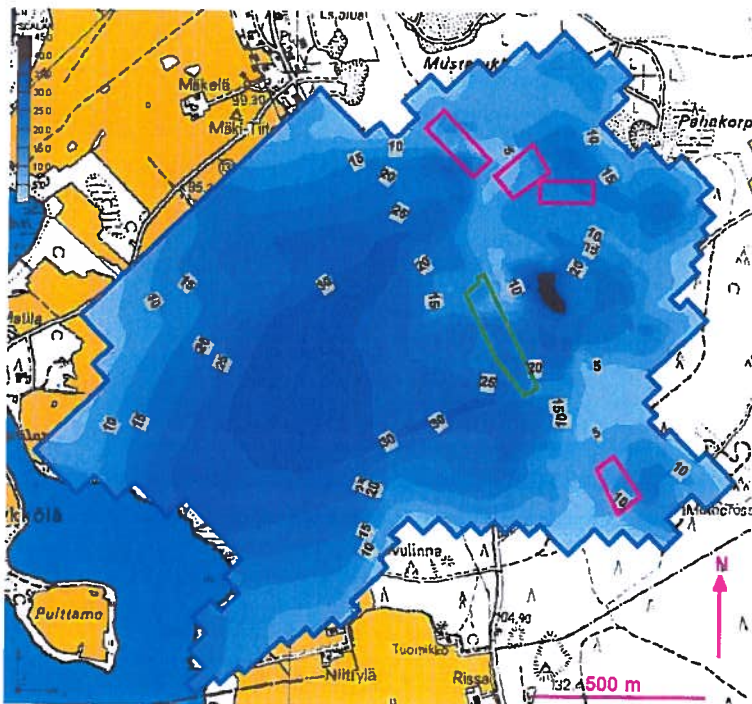
Kuva 22. Kaivo 2: vedenjohtavuusvyöhykkeet [ms^{-1}].

Pohjavesikerroksen pohja voi olla kallio tai tiivis maalaji. Tässä mallissa pohjavesikerroksen alapintana käytettiin kallionpintaa (kuva 23).

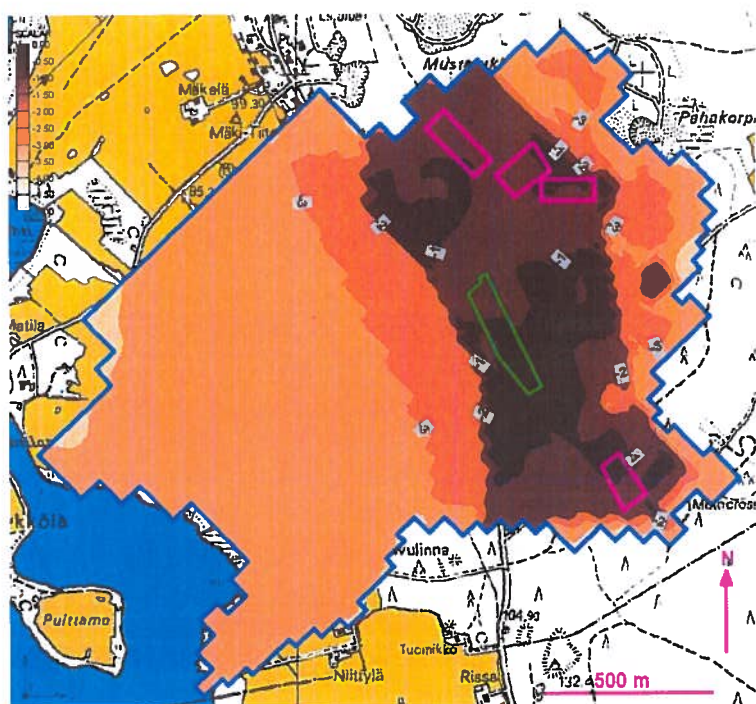


Kuva 23. Kaivo 2: kallionpinta [m mpy].

Kyllästyneen vyöhykkeen eli mallinnetun kerroksen paksuus (kuva 24) on laskettu mallinnuskerroksen yläpinnan (pohjavedenpinta) ja alapinnan (kallio) erotuksena.



Kuva 24. Kaivo 2: kyllästyneen vyöhykkeen paksuus [m].

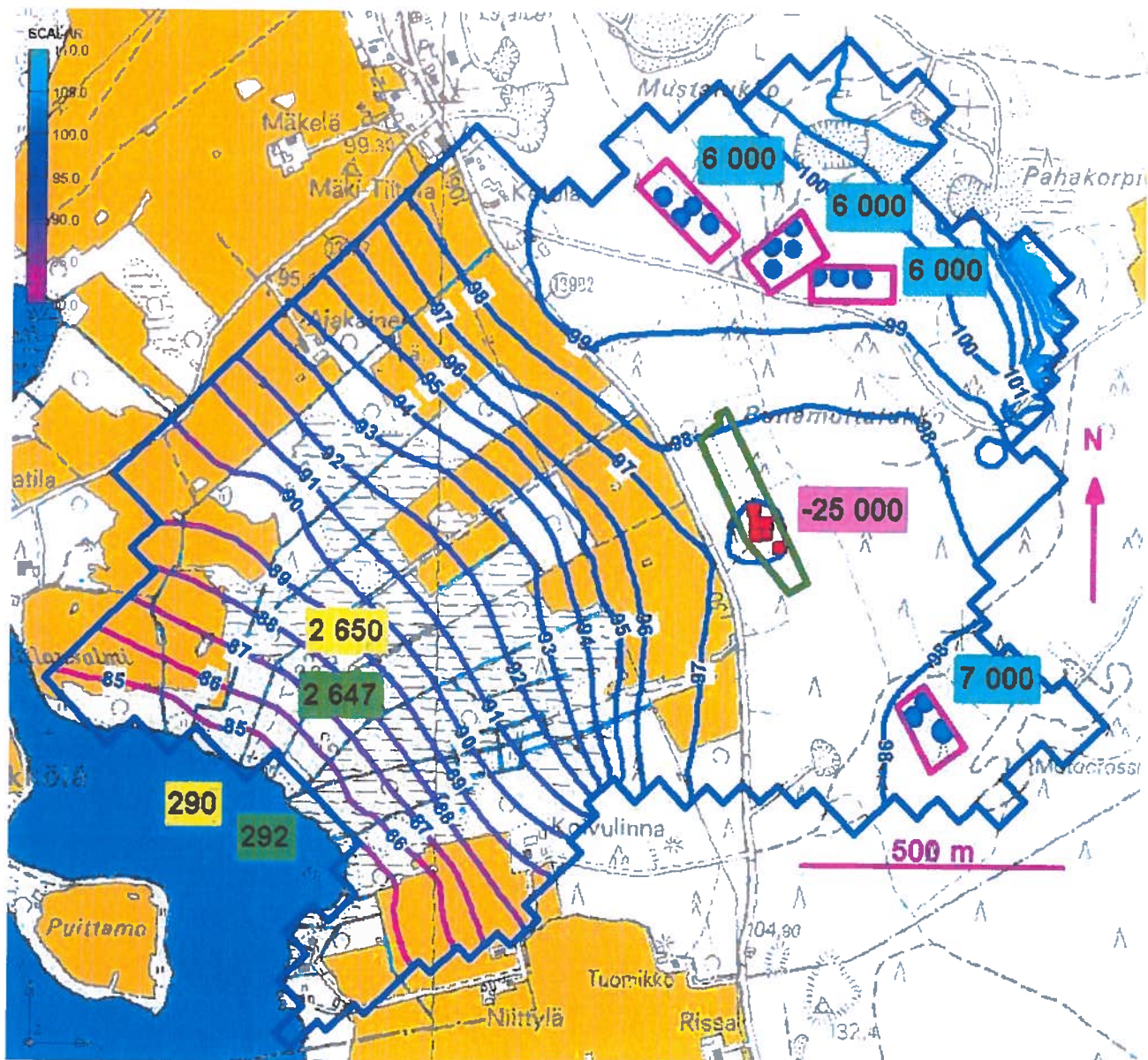


Ennusteajot

Taulukko 3. Kaivo 2:n ennustejojen pumppaus- ja imeytysyhdistelmät.

Pumppaus [m ³ d ⁻¹]	Imeytysalue 2 [m ³ d ⁻¹]	Imeytysalue 3 [m ³ d ⁻¹]
25 000	18 000	7 000
28 000	21 000	7 000

Kuvassa 26 on esitetty mallin laskema pohjavedenpinta tuotannon ollessa $25\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ sekä järveen ja salaojiin purkautuvan pohjaveden määrä luonnontilassa (keltainen) ja tuotantotilanteessa (vihreä). Purkautuvan veden määrä pysyy samana eivätkä virtaussuunnat muutu merkittävästi kuin vain vedenottoaivon ympärillä. Tuotantomäärällä $28\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ tulokset ovat lähes samanlaiset kuin $25\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ -simulaatiossa: mm. järveen ja ojiin purkautuvan veden määrässä on vain $10\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ eroavaisuus.



RATES FOR THIS TIME STEP

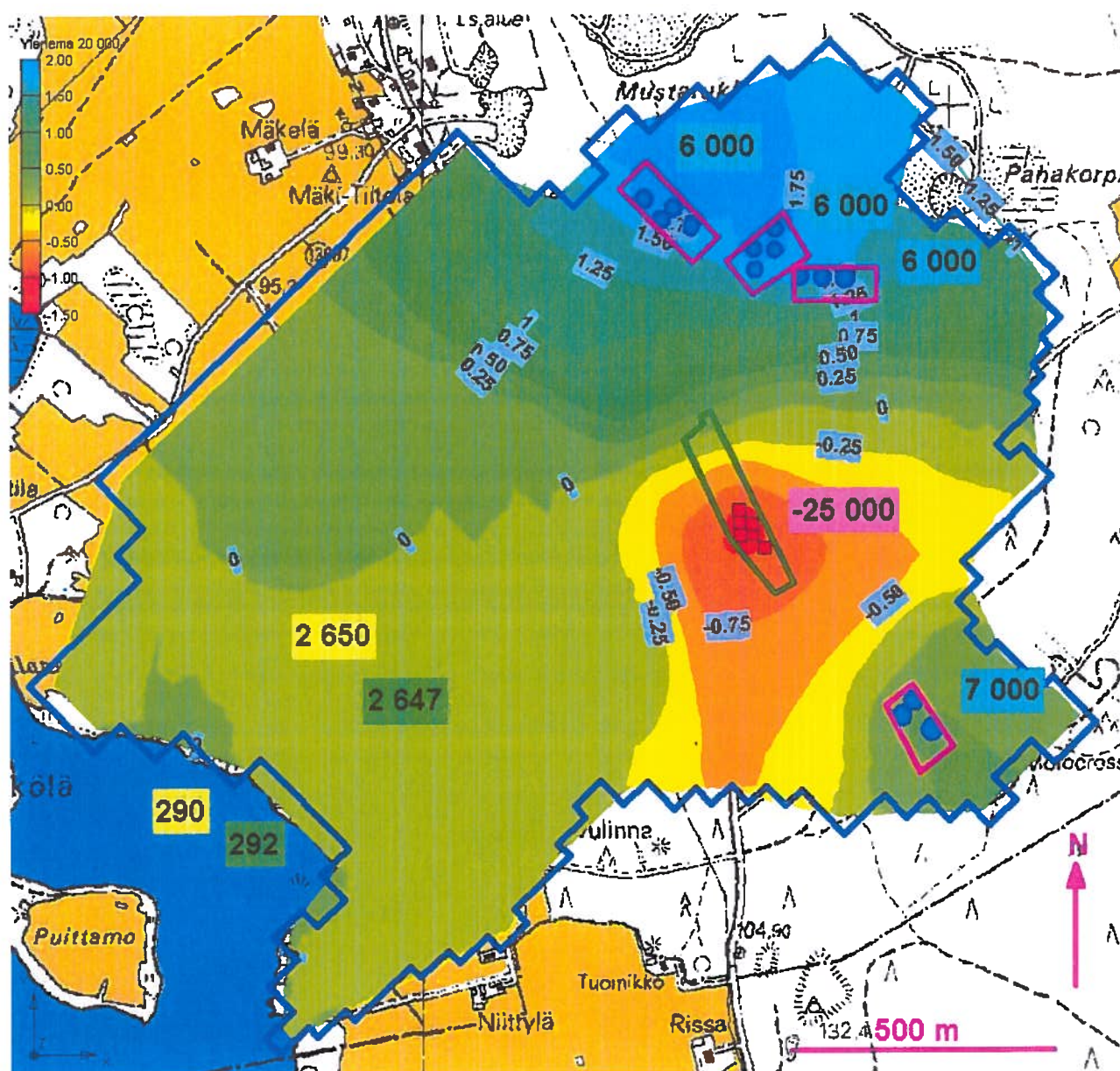
L**3/T

IN:	
STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.0000
WELLS =	0.30635
DRAINS =	0.0000
RECHARGE =	0.16963E-01
TOTAL IN =	0.32331
OUT:	
STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.33861E-02
WELLS =	0.28935
DRAINS =	0.30796E-01
RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	0.32353
IN - OUT =	-0.21902E-03
PERCENT DISCREPANCY =	-0.07

Kuva 26. Kaivo 2: pohjavedenpinnankorkeus [m mpy] ja mallin vesitase [m^3s^{-1}] pumppauksen ollessa $25\,000\,\text{m}^3\text{d}^{-1}$ ja imeytyksen ollessa $18\,000\,\text{m}^3\text{d}^{-1}$ imeytysalueella 2 ja $7\,000\,\text{m}^3\text{d}^{-1}$ imeytysalueella 3.

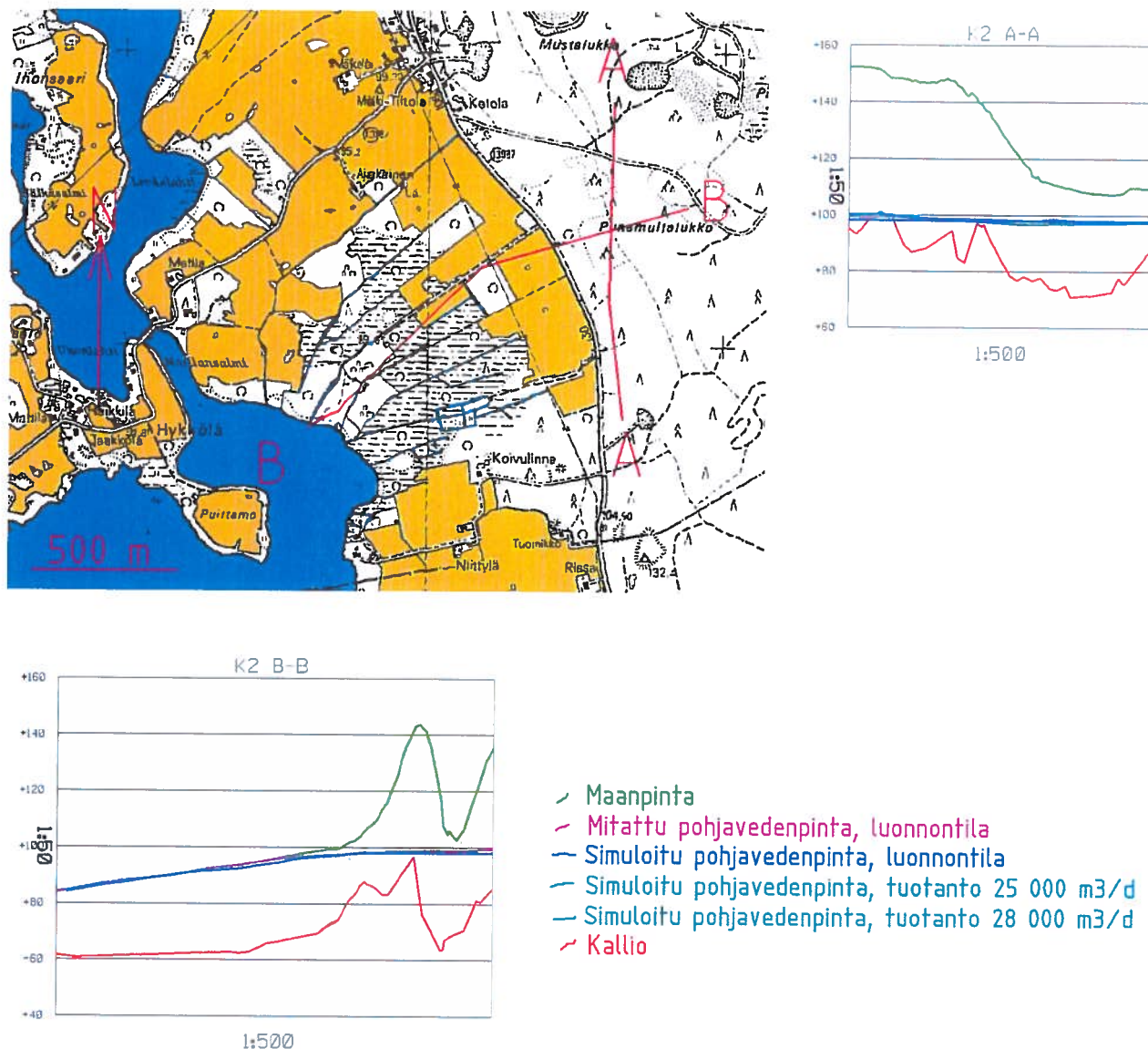
Mallimusalueen pohjoisella ja itäisellä reunalla tapahtuu veden syöttöä inaktiiviselta alueelta yhteensä $1\,500\,\text{m}^3\text{d}^{-1}$.

Pohjavesipinnan suurin ylenemä $25\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ -tuotantosimuloinnissa on 2 m ja suurin alenema 1,14 m (kuva 27). Suurimman ylenemän kohdalle jää ylenemästä huolimatta noin 20-40 m paksuinen kyllästymätön vyöhyke. Alenemakartio on selkeärajainen eikä sen vaikutusalueella ole talousvesikaivoja.



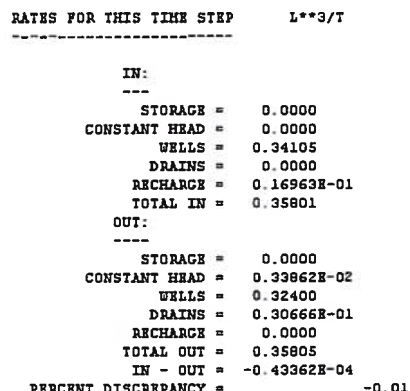
Kuva 27. Kaivo 2: pohjavedenpinnankorkeuden muutos [m] pumppauksen ollessa $25\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ja imeytyksen ollessa $18\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ imeytysalueella 2 ja $7\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ imeytysalueella 3.

Poikkileikkauksista (kuva 28), nähdään, että suhteessa maakerrosten paksuuteen pohjavedenpinnan korkeuden muutokset ovat varsin pieniä. Poikkileikkauksesta B-B nähdään, että pohjavedenpinta on peltoalueella myös luonnontilassa hyvin lähellä maanpintaa.

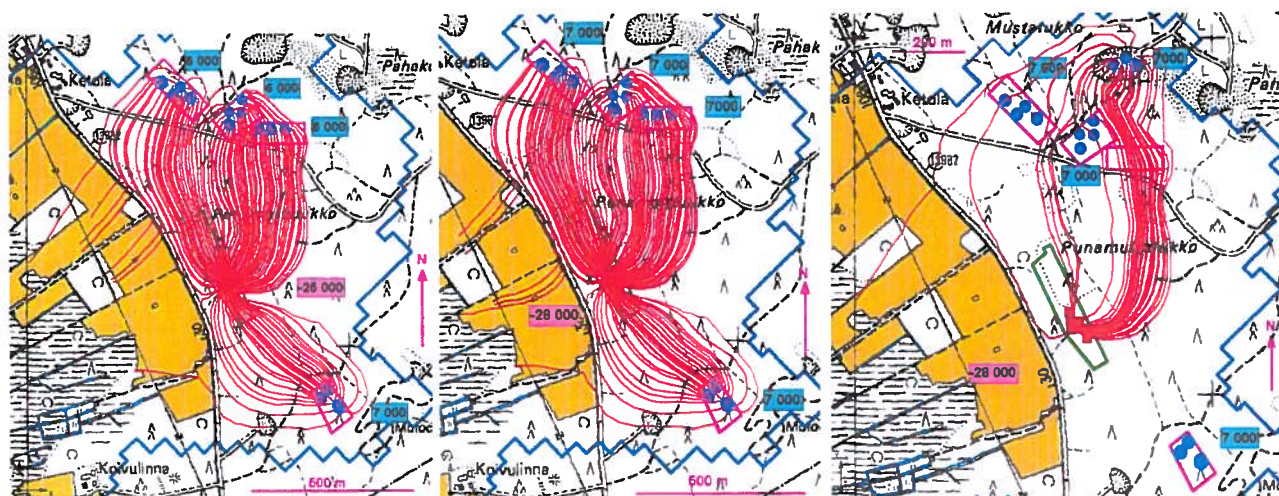


Kuva 28. Kaivo 1: poikkileikkaukset luonnontilan ja tuotantotilanteiden simuloinnista. Pystysuunnan mittakaava on kymmenkertainen verrattuna vaakasuuntaan. Korkeusasetat [m mpy].

28 000 m³ d⁻¹ tuotantomäärällä tehtiin myös simulaatio, jossa osa imeytysalueelle 2 imeytettävästä vedestä imeytetäänkin mallin maa-alueen pohjoisnurkassa sijaitsevaan sorakuoppaan (kuva 29). Mallin laskeman pohjavedenpinnan muoto poikkeaa kuvan 26 esittämästä tuloksesta sikäli, että sorakuopan kohdalle tulee suurehko ylenmä, mikä johtuu siitä, että mallissa sorakuoppa sijaitsee pienemmän vedenjohtavuuden vyöhykkeellä kuin muut imeytysalueet.



Veden virtausreitit laskettiin sekä 25 000 m³d⁻¹ että 28 000 m³d⁻¹ -tuotantotilanteissa (kuva 30). Partikkelit laitettiin liikkeelle imeytysalueelta ja niiden etenemistä seurattiin myötävirtaan. Partikkeleiden kulkureitit ovat näissä kahdessa simuloinnissa lähes samat. Kuvassa 30 on esitetty myös imeytetyn veden virtausreitti sorakuopalta kaivolle.



Kuva 30. Kaivo 2: imeytetyn veden kulkureitit tuotannon ollessa 25 000 m³ d⁻¹ ja 28 000 m³ d⁻¹.

Viipymäärät pumpppaus- ja imeytysmäärillä $25\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ja $28\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ on esitetty taulukoissa 4-6. Vertailun vuoksi taulukossa on esitetty myös aiemmalla mallilla (Vanha) lasketut viipymät laskettuna sekä aiemmin käytetyllä huokoisuuden (n) arvolla 35% että nyt käytetyllä arvolla 25%. Vanhalla mallilla lasketut viipymät poikkeavat hieman aiemmin raportoiduista tuloksista, sillä nämä simuloinnit tehtiin uusilla partikkelilukumäärillä: 54 kpl imeytysalueelta 2 (1999 raportoiduissa ajoissa 36 kpl) ja 31 kpl imeytysalueelta 3 (1999 raportoiduissa ajoissa 22 kpl). Uudella mallilla laskettaessa partikkeleita laitettiin liikkeelle 63 kpl imeytysalueen 2 osa-alueilta 1-4, 34 kpl imeytysalueen 2 osa-alueelta 5 ja 27 kpl imeytysalueelta 3. Sorakuopalta laitettiin liikkeelle 36 partikkelia.

Taulukko 4. Kaivo 2: viipymät [d] imeytysalueelta 2.

Pumppaus [m^3d^{-1}]	Imeytys (yht.) [m^3d^{-1}]	Vanha nopein n = 35% (n = 25%)	Vanha keskiarvo aritm. / geom. / harm. n = 35% (n = 25%)	Vanha mediaani n = 35% (n = 25%)	Uusi nopein osa-alue: 1-4 5	Uusi keskiarvo aritm. / geom. / harm. osa-alueilta 1-4 osa-alueelta 5	Uusi mediaani osa-alue: 1-4 5
10000	5000 (8000)	49 (35)	77 / 73 / 70 (55 / 52 / 50)	66 (47)			
15000	9000 (13000)		53				
20000	13000 (18000)	24 (17)	42 / 39 / 36 (30 / 28 / 26)	35 (25)			
25000	15000 (23000)	20 (14)	38 / 34 / 32 (27 / 25 / 23)	30 (21)			
25000	18000 (25000)				42 60	59 / 56 / 54 93 / 89 / 86	49 90
28000	21000 (28000)				37 52	56 / 51 / 49 78 / 75 / 73	46 76
30000	19000 (28000)		89				
35000	23000 (33000)		110				
40000	25000 (38000)		62				
45000	29000 (43000)		55				

Taulukko 5. Kaivo 2: viipymät [d] Sorakuopalta.

Pumppaus [m^3d^{-1}]	Imeytys (yht.) [m^3d^{-1}]	Vanha nopein n = 35% (n = 25%)	Keskiarvo aritm. / geom. / harm. n = 35% (n = 25%)	mediaani n = 35% (n = 25%)	Uusi nopein	Keskiarvo aritm. / geom. / harm.	mediaani
28000	7000 28000				69	95 / 89 / 86	79

Taulukko 6. Kaivo 2: viipymät [d] imeytysalueelta 3.

Pumppaus [m ³ d ⁻¹]	Imeytys (yht.) [m ³ d ⁻¹]	Vanha nopein n = 35% (n = 25%)	Vanha keskiarvo aritm. / geom. / harm. n = 35% (n = 25%)	Vanha mediaani n = 35% (n = 25%)	Uusi nopein	Uusi keskiarvo aritm. / geom. / harm.	Uusi mediaani
10000	3000 (8000)	60 (43)	85 / 80 / 77 (61 / 57 / 55)	69 (49)			
15000	4000 (13000)		62				
20000	5000 (18000)	31 (22)	49 / 45 / 43 (35 / 32 / 31)	38 (27)			
25000	8000 (23000)	21 (15)	31 / 29 / 28 (22 / 21 / 20)	26 (18)			
25000	7000 (25000)				27	84 / 60 / 47	44
28000	7000 (28000)				27	80 / 58 / 46	43
30000	9000 (28000)		25				
35000	10000 (33000)		22				
40000	13000 (38000)		18				
45000	14000 (43000)		19				

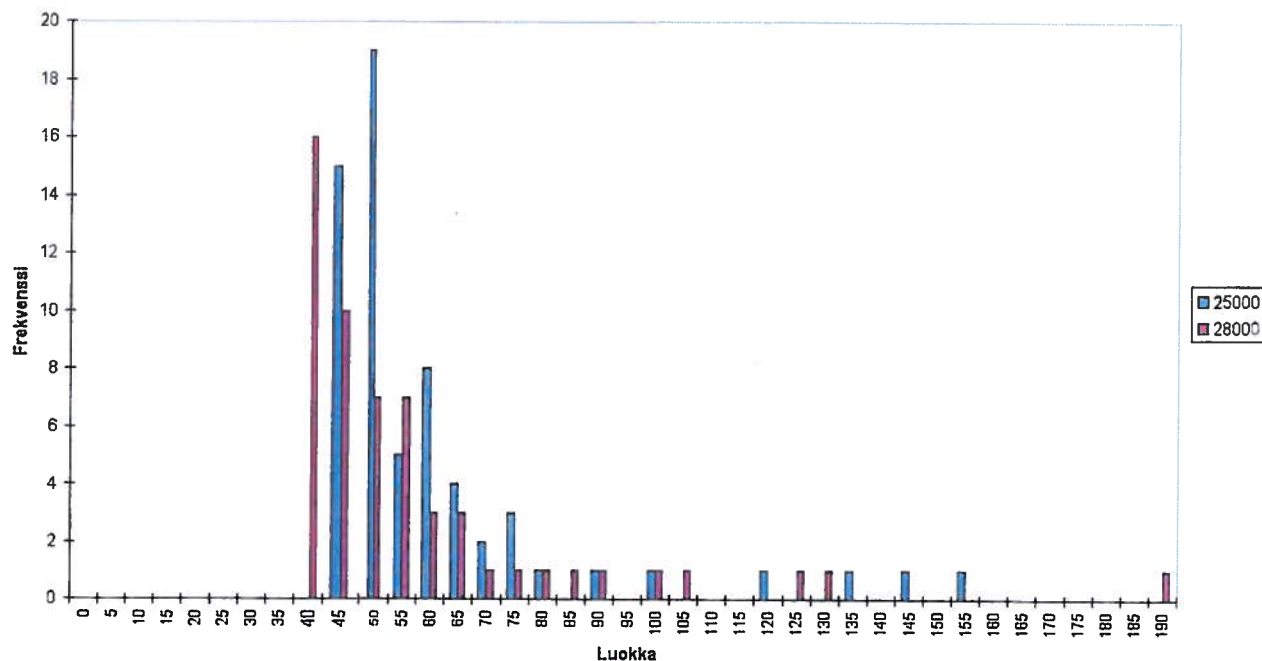
Verrattaessa viipymäärojen jakaumaesityksiä (kuvat 31-34) ja lukuarvoja taulukoissa 4-6 Kaivo 2:n tapauksessa keskimääräistä viipymää kuvaavat parhaiten harmoninen keskiarvo ja mediaani lukuun ottamatta imeytysalueen 2 osa-alueella 5, jonka viipymäjakauma on niin tasainen, että kaikki taulukossa 5 esitetyt keskimääräistä viipymää kuvaavat arvot ovat hyvin lähellä toisiaan.

Simuloiduissa tuotantotilanteissa ovat seuraavat viipymät: imeytysalueen 2 osa-alueilta 1-4 minimi noin 40 ja keskimääräinen noin 50 vuorokautta; imeytysalueen 2 osa-alueella 5 minimi noin 55 ja keskimääräinen 80-90 vuorokautta; sorakuopalta minimi noin 70 ja keskimääräinen 80 vuorokautta; imeytysalueelta 3 minimi noin 27 ja keskimääräinen noin 45 vuorokautta. Sorakuoppaan imeyttäminen näiden laskelmien mukaan tuottaisi noin 30 vuorokautta lisää viipymää; arvio lienee hiukan liian optimistinen johtuen samasta syystä kuin korkea ja terävä ylenemäkin sorakuoppa-ajossa eli siitä, että maa-aines on mallia laadittaessa arvioitu hiukan todellista hienojakoisemmaksi.

Herkkyystarkastelu

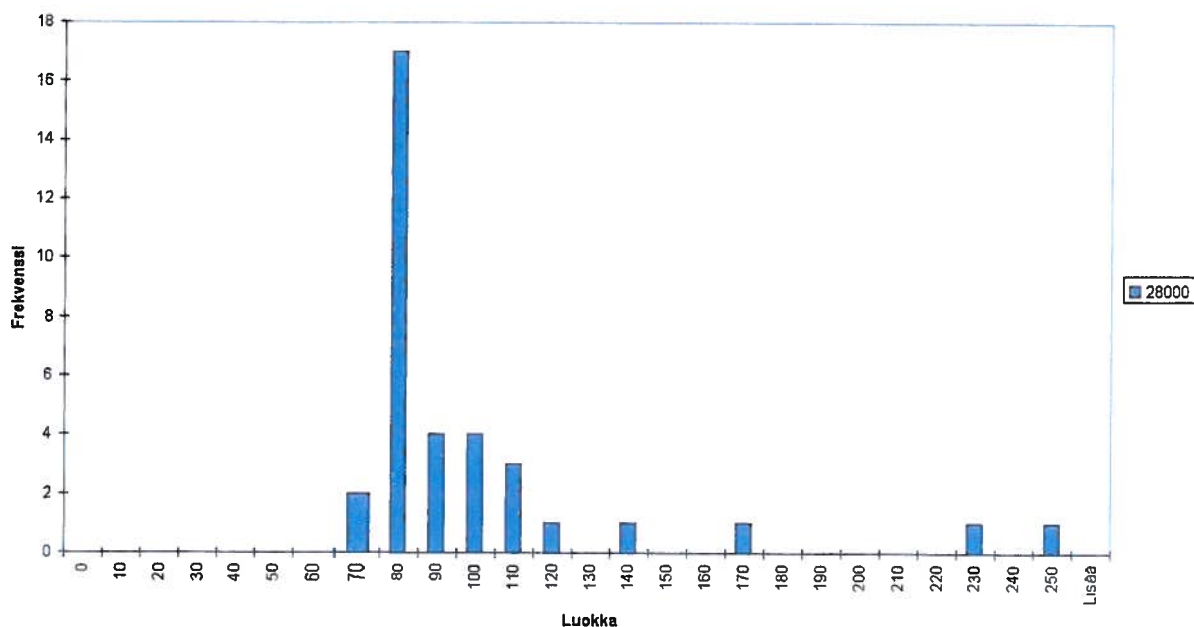
Vedenjohtavuuden muutoksilla on merkittävä vaikutus tuotantotilanteen laskentatulokseen. Kymmenkertaisilla vedenjohtavuuksilla laskettaessa pohjavedenpinta viettää samaan suuntaan kuin varsinaisessa simuloinnissakin, mutta pinnan kaltevuus (gradientti) on huomattavasti pienempi. Pienennettäessä vedenjohtavuudet kymmenenteen osaansa alenemat suurenevat kaivoalueella 15 m, ylenemät suurenevat imeytysalueella 2 15 m ja imeytysalueella 3 2 m.

Kaivo 2
Viipymäjakaumat, imeytysalueen 2 osa-alueet 1-4



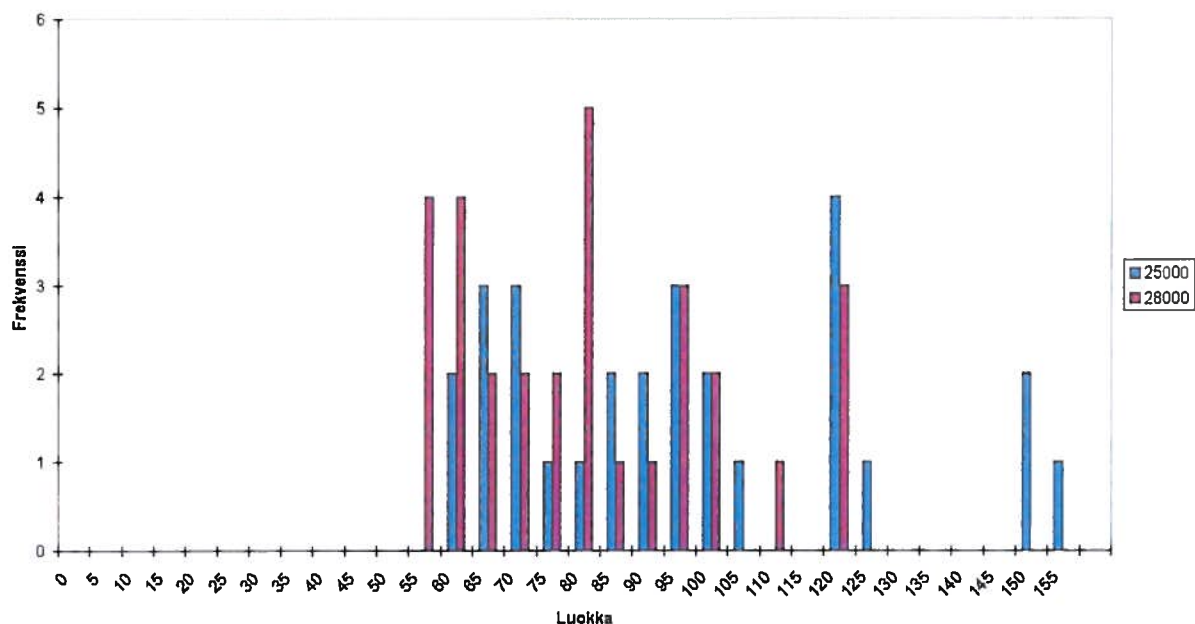
Kuva 31. Kaivo 2: imeytysalueen 2 osa-alueilta 1-4 matkaan lähteneiden vesipartikkeleiden viipymäjakaumat [d] tuotannon ollessa $25\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ja $28\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Kaivo 2
Viipymäjakauma, sorakuoppa



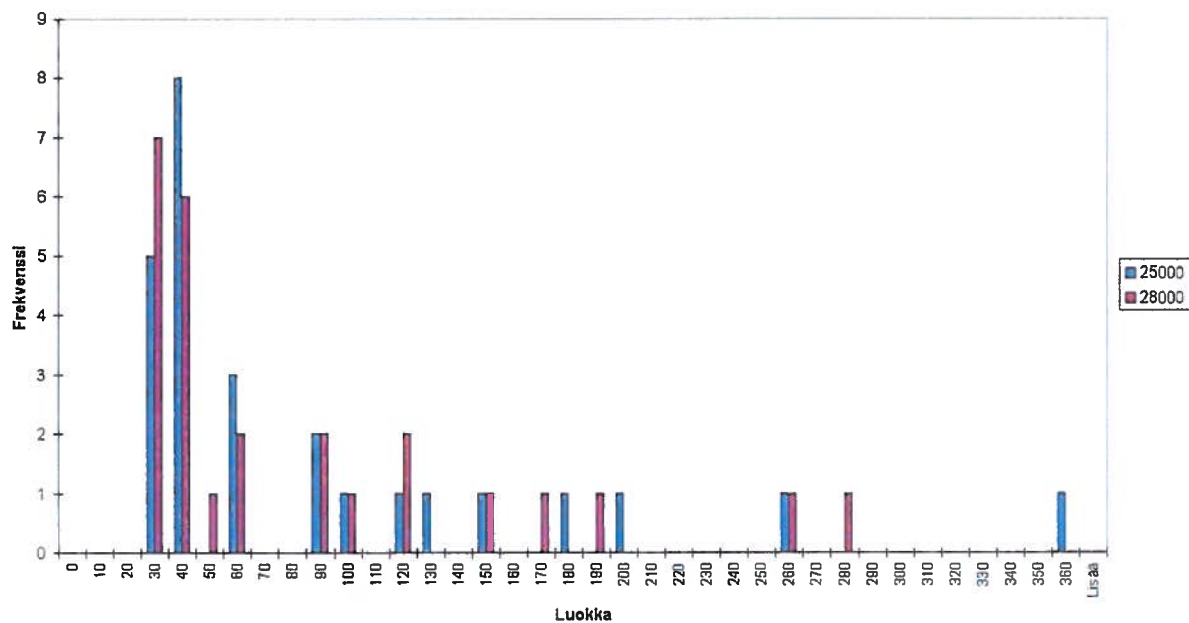
Kuva 32. Kaivo 2: sorakuopalta matkaan lähteneiden vesipartikkeleiden viipymäjakauma [d] tuotannon ollessa $28\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Kaivo 2
Viipymäjakaumat, imeytysalueen 2 osa-alue 5



Kuva 33. Kaivo 2: imeytysalueen 2 osa-alueelta 5 matkaan lähteneiden vesipartikkeleiden viipymäjakaumat [d] tuotannon ollessa $25\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ja $28\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Kaivo 2
Viipymäjakaumat, imeytysalue 3

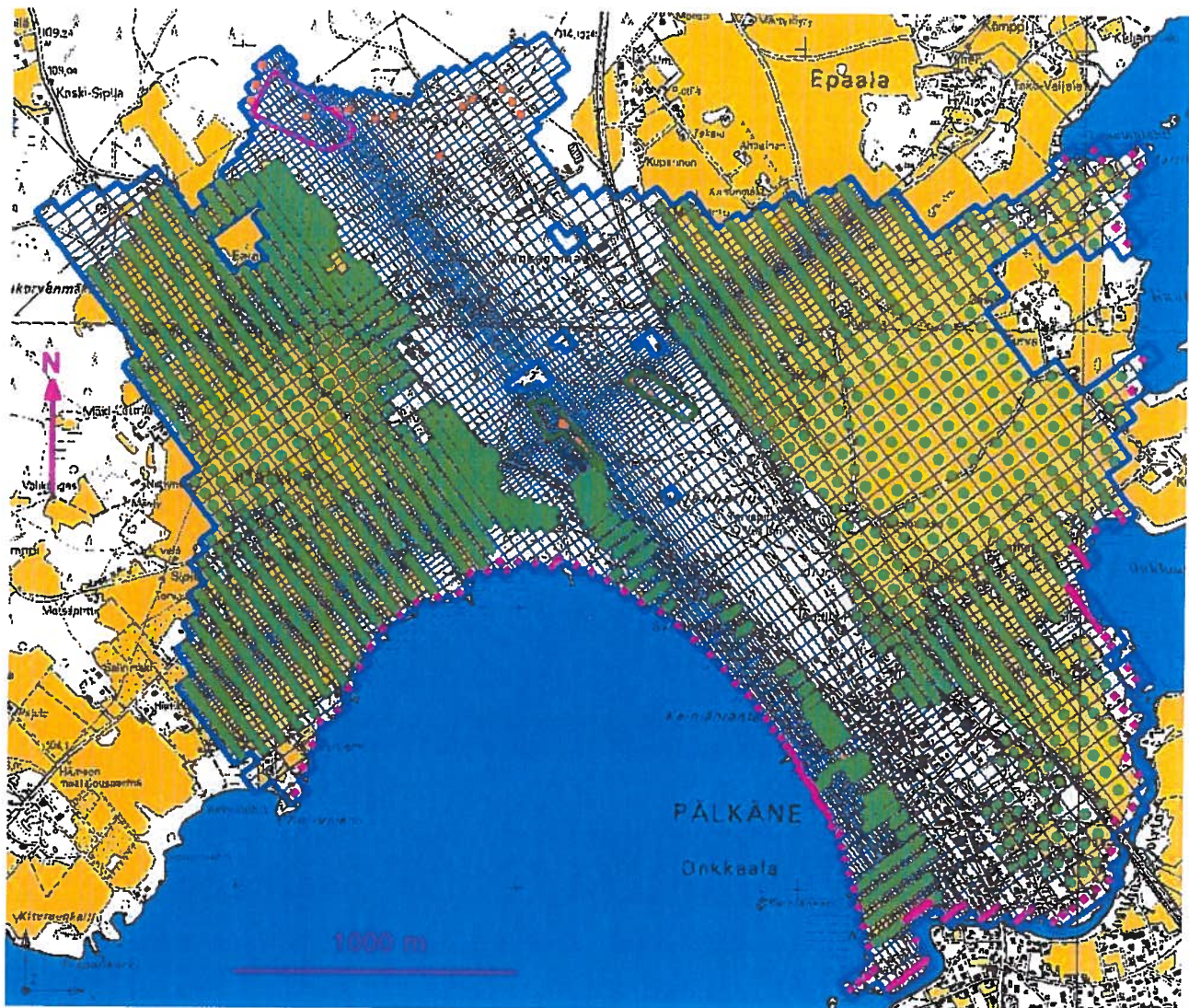


Kuva 34. Kaivo 2: imeytysalueelta 3 matkaan lähteneiden vesipartikkeleiden viipymäjakaumat [d] tuotannon ollessa $25\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ja $28\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

8. Kaivo 3

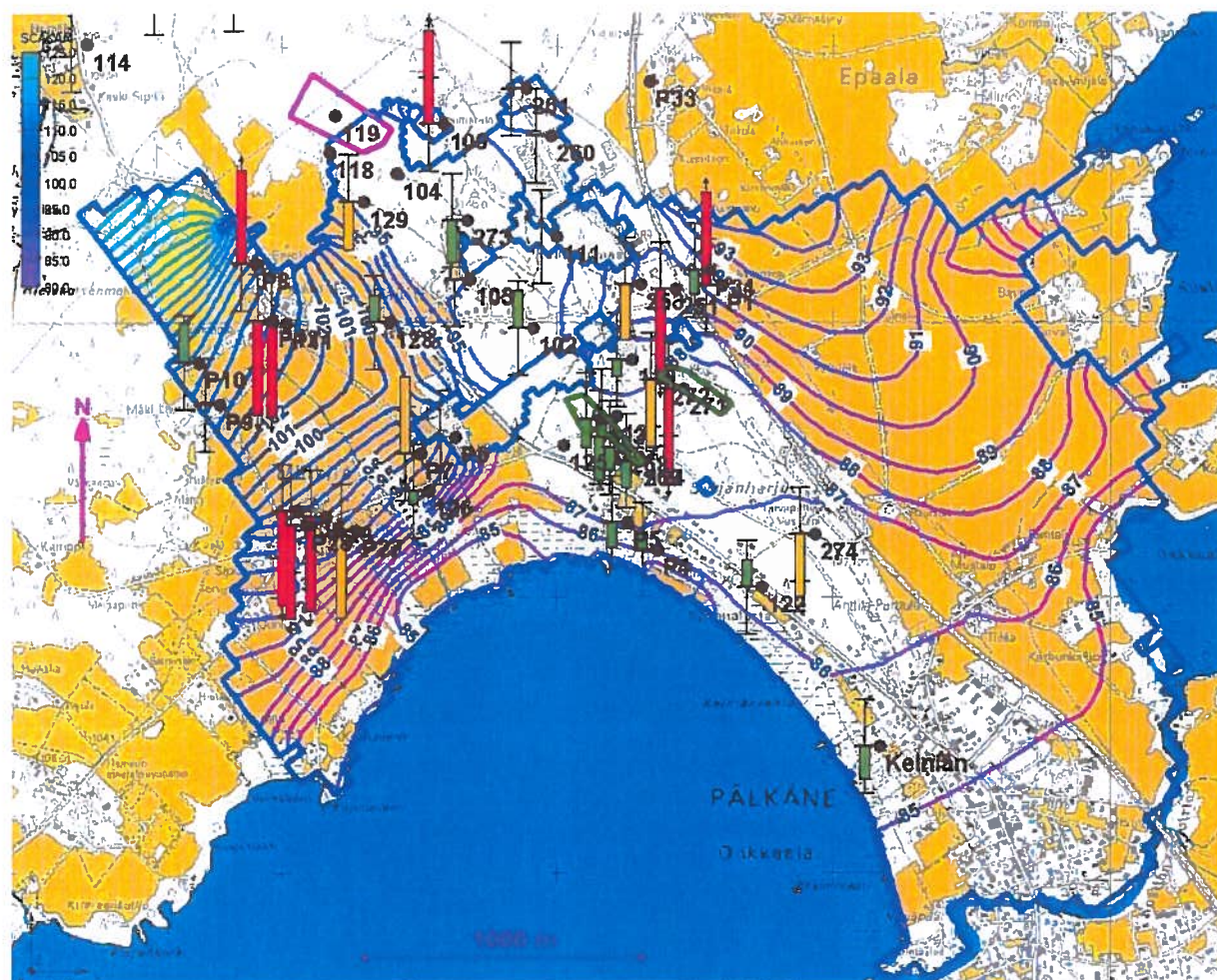
Lähtötiedot ja kalibrointi

Kaivo 3:n mallia on levitetty itään siten, että Kankaanmaan ja Kuulialanlahden välinen alue on otettu mukaan. Kankaanmaan pohjoispuolinen alue on jätetty pois johtuen siellä tehtyjen pohjavedenkorkeusmittausten osoittautumisesta orsivesihavainnoiksi. Kuvassa 35 on esitetty tuotantotilanteessa käytetty hilaruudukko. Luonnontilan sekä pumppaus- ja imeytyskokeiden laskenta-ajoissa käytetyissä ruudukoissa on enemmän inaktiivista aluetta imeytysalueen ja Kankaanmaan vaiheilla kuin tuotantotilanteessa. Tämä johtuu siitä, että luonnontilassa pohjavedenpinta on alempana kuin tuotantotilanteessa näillä alueilla.



Kuva 35. Kaivo 3:n mallinnusalueen hilaruudukko. Sininen raja: aktiivisen alueen reuna. Vihreä pallo: ojitettu alue. Purppuraneliö: pysyvän pohjavedenpinnan reunaehdoruutu. Oranssi neliö: imeytys- tai pumppauskaivon sisältävä ruutu. Purppurajaus: imeytysalue. Vihreä raja: kaivokenttä. Mallin kallionvastaisilla reunoilla pohjoisessa ja lännessä syötetään $700 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ vettä inaktiiviselta alueelta.

Luonnontilan laskenta-ajossa (kuva 36) mallinnusalueen keskivaiheilla päästään melko hyvään kalibrointitulokseen, mutta laita-alueilla mallin laskemat pohjavedenpinnan korkeudet poikkeavat suuresti mitatuista arvoista. Punaisten pylväiden osoittamat residuaalit ovat luokkaa 3 m paitsi talousvesikaivojen P11 ja P12 kohdalla, missä ne ovat 7 – 8 m. Mallin antama tulos viittaa siihen, että kaivot P11 ja P12 ovat orsivesikaivoja, mikä tulee varmistaa kairauksin ja asentamalla havaintoputki. Punaista pylväistä useimmat sijaitsevat sellaisissa kohdissa, joissa gradientti on jyrkkä. Kuvassa 36 nähdään luonnontilan laskennassa käytetty mallinnusalueen raja, joka poikkeaa tuotantotilanteesta käytetystä rajauksesta.



RATES FOR THIS TIME STEP

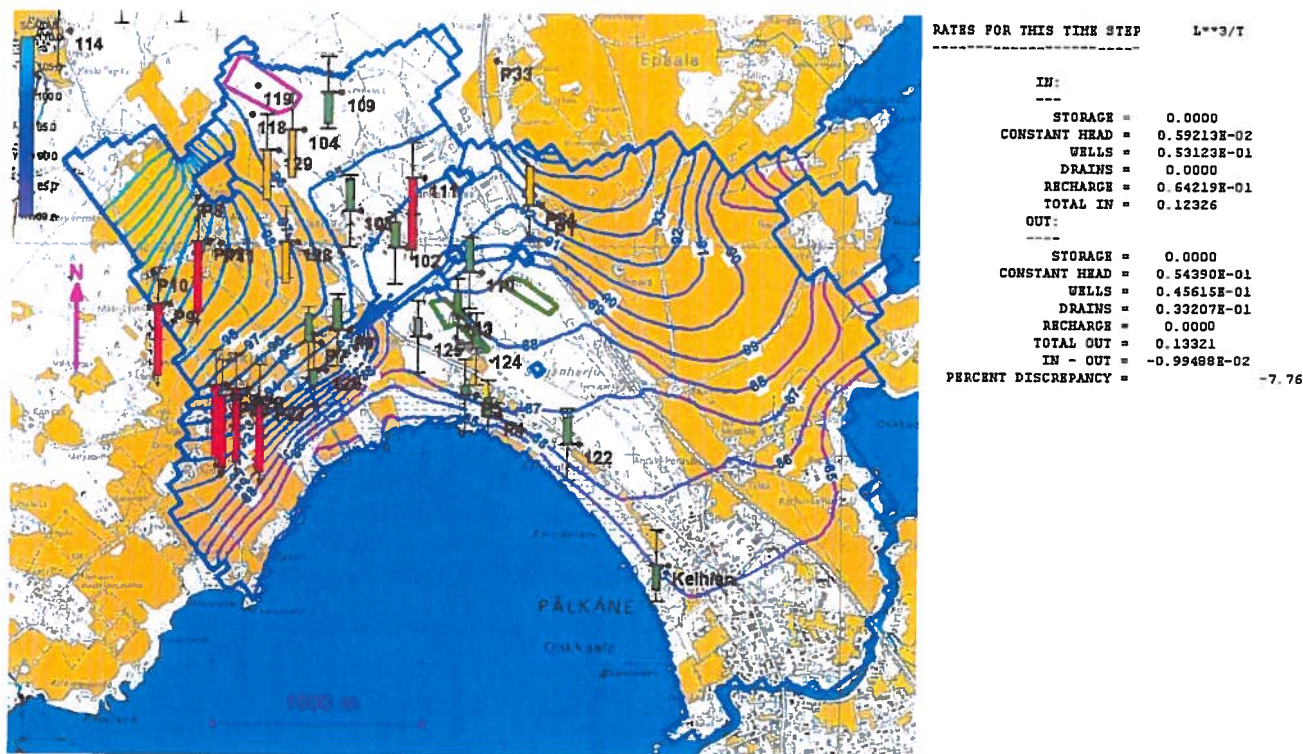
L**3/T

IN:	
STORAGE	= 0.0000
CONSTANT HEAD	= 0.31569E-01
WELLS	= 0.75231E-02
DRAINS	= 0.0000
RECHARGE	= 0.59626E-01
TOTAL IN	= 0.97718E-01
OUT:	
STORAGE	= 0.0000
CONSTANT HEAD	= 0.46720E-01
WELLS	= 0.0000
DRAINS	= 0.53700E-01
RECHARGE	= 0.0000
TOTAL OUT	= 0.10042
IN - OUT	= -0.27013E-02
PERCENT DISCREPANCY	= -2.73

Kuva 36. Kaivo 3, luonnontila: mallin laskema pohjavedenpinta [m mpy] & residuaalipylväät (vertailujana = ± 1 m) sekä laskenta-ajon vesitase [$m^3 s^{-1}$].

Mallin kallionvastaisilla reunoilla pohjoisessa ja lännessä syötetään $700 m^3 d^{-1}$ vettä inaktiiviselta alueelta.

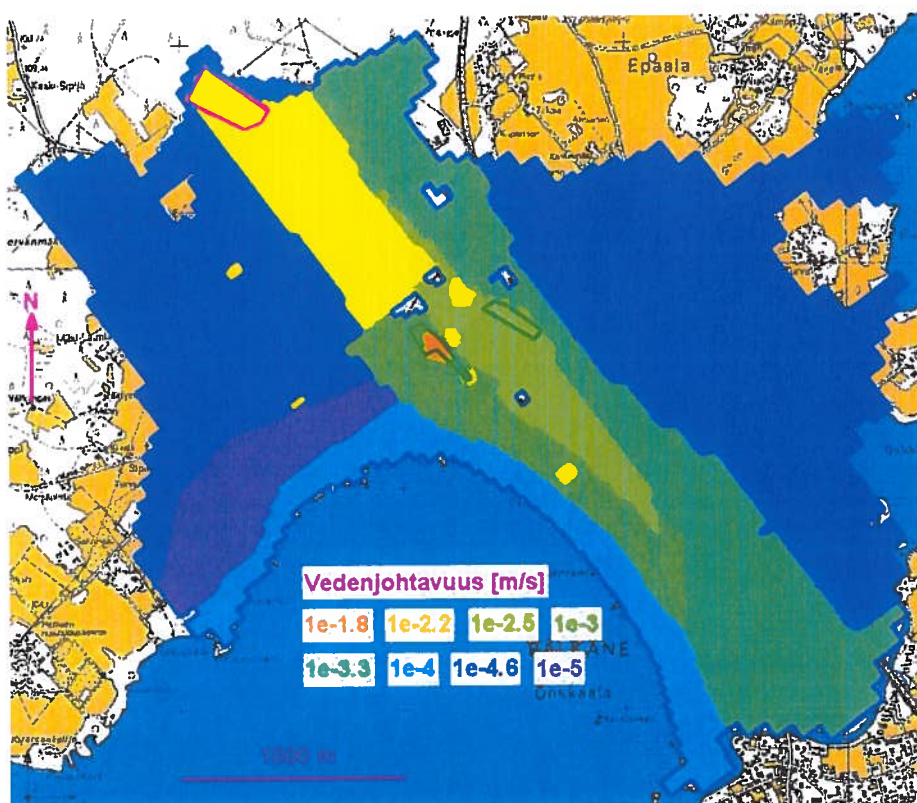
Kuvassa 37 on esitetty imeytysalueen 4 osa-alue 1:n pumppaus- ja imeytyskokeen kalibrointiajon tulos. Mallinnusalueen keskiosassa on enemmän aktiivista aluetta kuin luonnontilan mallissa, mutta vähemmän kuin tuotantotilanteiden simuloinneissa. Myös imeytyskokeen simuloinnissa päästään parhaimpaan tulokseen (vihreät pylväät) mallinnusalueen keskivaiheilla ja suurimmat residuaalit (punaiset pylväät) liittyvät jyrkän gradientin alueisiin. Punaisten pylväiden osoittamat residuaalit ovat samaa luokkaa kuin luonnontilan kalibrointiajossa.



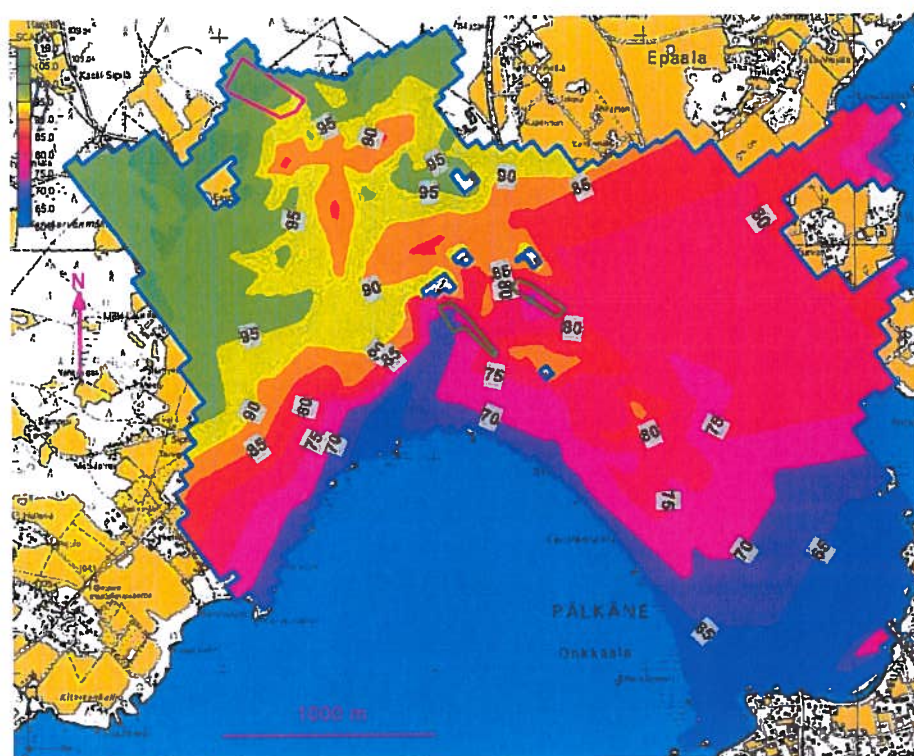
Kuva 37. Kaivo 3, pumppaus- ja imeytyskoe: mallin laskema pohjavedenpinta [m mpy] & residuaalipylväät (vertailujana = ± 1 m) sekä laskenta-ajon vesitase [$m^3 s^{-1}$].
Mallin kallionvastaisilla reunoilla pohjoisessa ja lännessä syötetään $700 m^3 d^{-1}$ vettä inaktiiviselta alueelta.

Kaivo 3:n mallinnuksessa saavutettua kalibrointitasoa sekä luonnontilassa että aktiivitilanteessa voidaan pitää lähinnä tyydyttävänä. Mallinnusalueen keskivaiheilla residuaalit ovat kyllä suurimmaksi osaksi kohtuullisen pieniä, mutta yli metrin suuruisia residuaaleja (keltaiset pylväät) on enemmän kuin on suotavaa. Punaiset pylväät sijoittuvat kyllä lähinnä kalibrointiteknisesti hankalille jyrkän gradientin alueille.

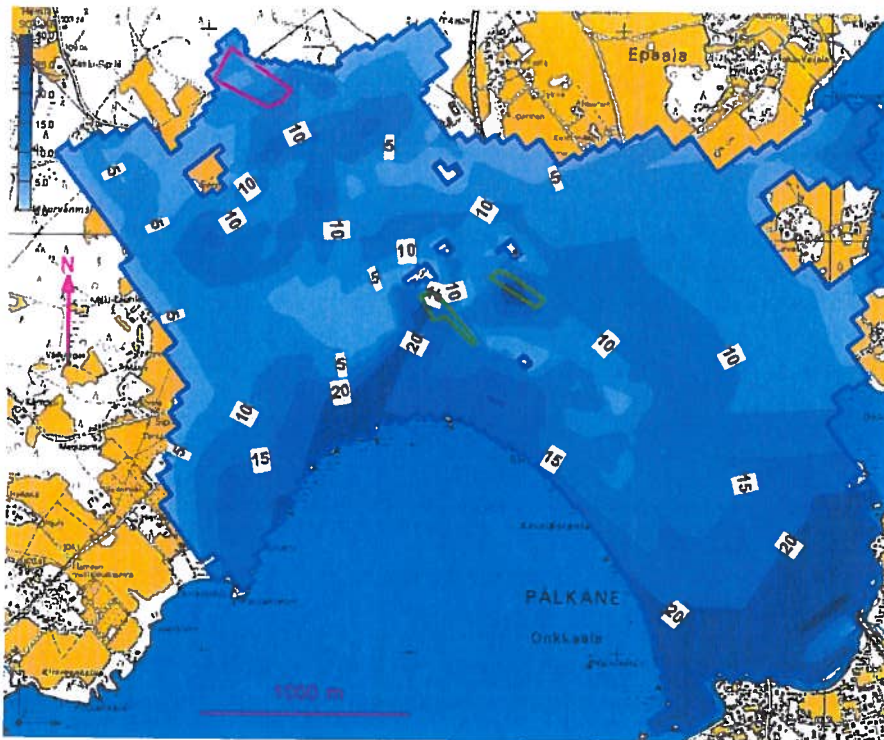
Kalibroinnin myötä muotoutunut vedenjohtavuusarvojen jakauma on esitetty kuvassa 38. Vedenjohtavuudet vaihtelevat $1e-5 - 0,018 ms^{-1}$ ($1 - 1555 md^{-1}$). Pohjavesikerroksen pohja voi olla kallio tai tiivis maalaji. Tässä mallissa pohjavesikerroksen alapintana käytettiin kallionpintaa (kuva 39). Kyllästyneen vyöhykkeen eli mallinnetun kerroksen paksuus (kuva 40) on laskettu mallinnuskerroksen yläpinnan (pohjavedenpinta) ja alapinnan (kallio) erotuksena.



Kuva 38. Kaivo 3:
vedenjohtavuusvyöhykkeet [ms^{-1}].

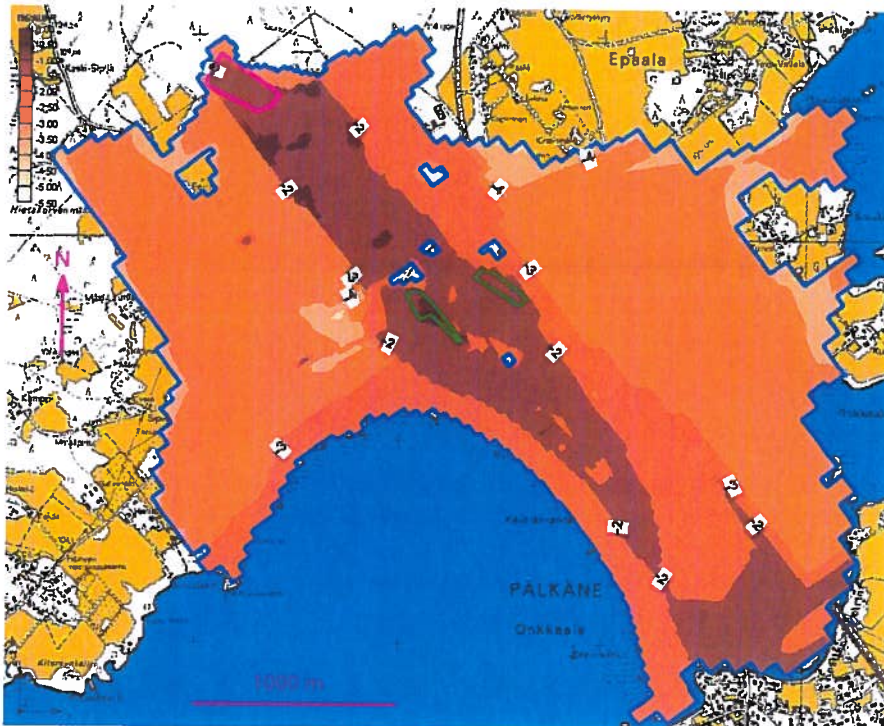


Kuva 39. Kaivo 3:
kallionpinta [m mpy].



Kuva 40. Kaivo 3: kyllästyneen vyöhykkeen paksuus [m].

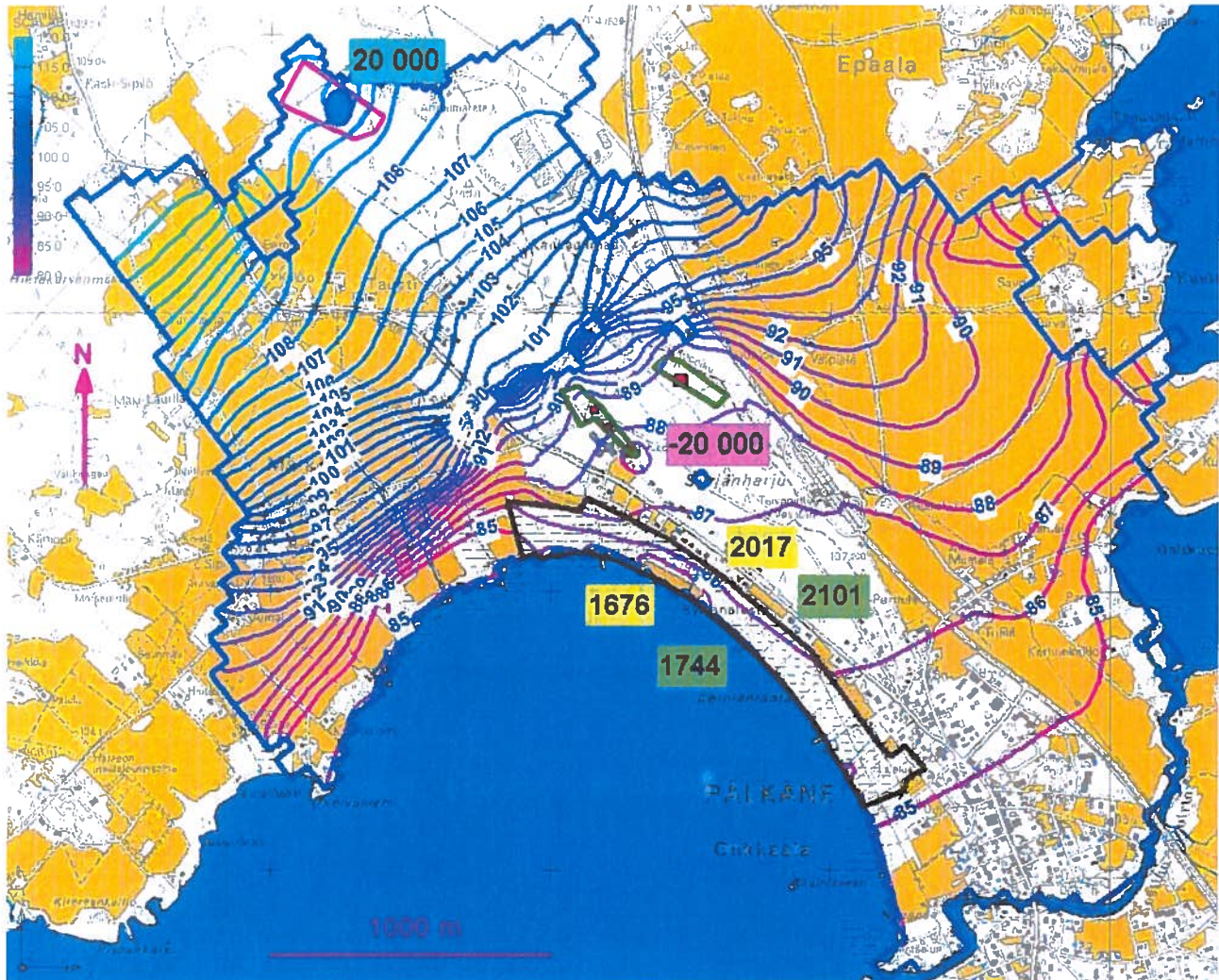
Pohjaveden virtausolosuhteita kuvaa vedenjohtavuuden ja mallinnuskerroksen paksuuden tulo eli vedenjohtokyky (T). Koskapa T-arvot voivat vaihdella useiden dekaadien verran, ne on kuvassa 41 esitetty logaritmiarvoina eli varsinainen T-arvo saadaan kohottamalla luku kymmenen käyrien osoittamaan potenssiin.



Kuva 41: Kaivo 3:
Vedenjohtokyvyn vaihtelu,
logaritminen esitys [$\log(m^2 s^{-1})$].

Ennusteajot

Ennusteajo tehtiin pumppaus- ja imeytysmäärällä $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$. Kuvassa 42 on esitetty mallin laskema pohjavedenpinta sekä Natura-alueen kohdalla järveen ja ojiin purkautuvan pohjaveden määrä luonnontilassa (keltainen) ja tuotantotilanteessa (vihreä).



RATES FOR THIS TIME STEP

L**3/T

IN:	

STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.31557E-01
WELLS =	0.23752
DRAINS =	0.0000
RECHARGE =	0.64279E-01
TOTAL IN =	0.33336
OUT:	

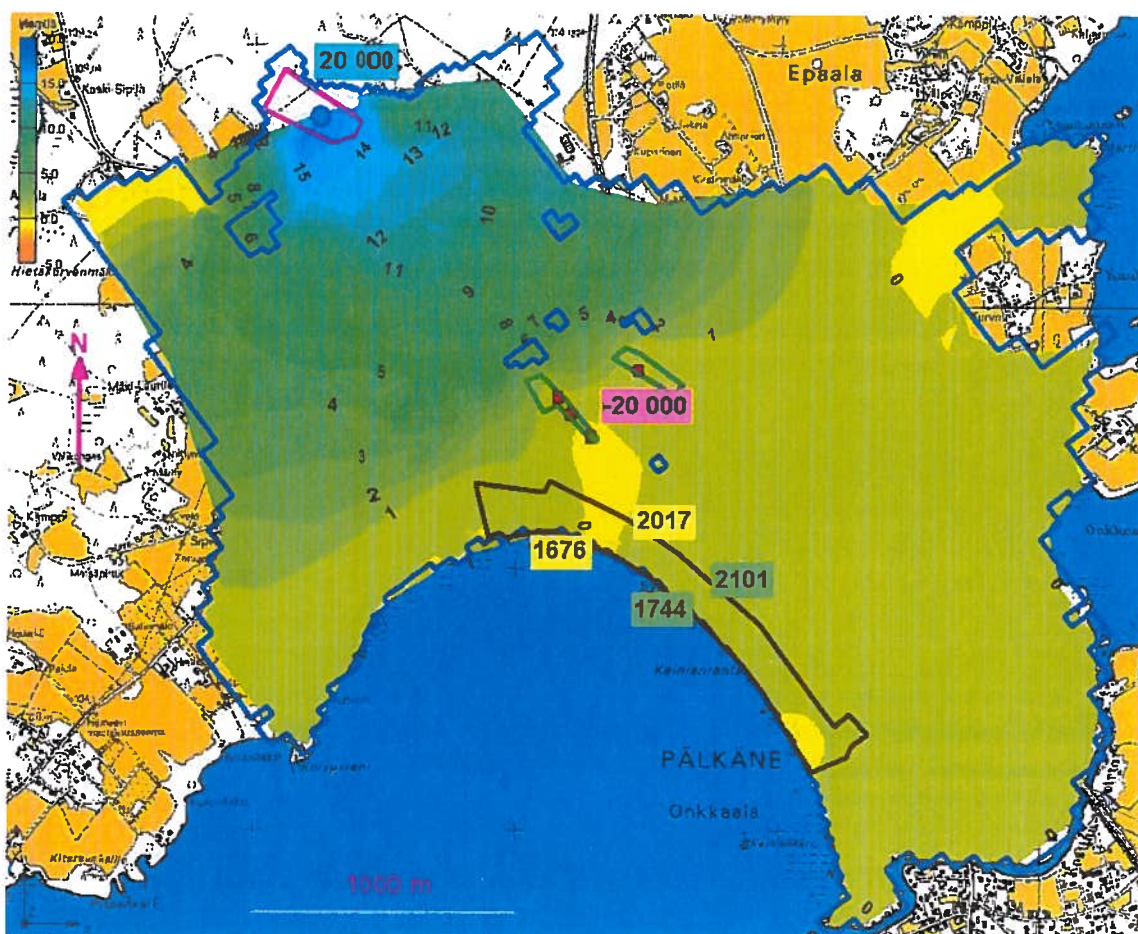
STORAGE =	0.0000
CONSTANT HEAD =	0.48005E-01
WELLS =	0.23150
DRAINS =	0.79416E-01
RECHARGE =	0.0000
TOTAL OUT =	0.35892
IN - OUT =	-0.25557E-01
PERCENT DISCREPANCY =	-7.38

Kuva 42. Kaivo 3: pohjavedenpinnankorkeus [m mpy] ja mallin vesitase [m^3s^{-1}] pumppauksen ja imeytyksen ollessa $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$. Mallin kallionvastaisilla reunoilla pohjoisessa ja lännessä syötetään $700\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ vettä inaktiiviselta alueelta.

Tuotantoajossa Natura-alueella purkautuvan veden määrä pysyy lähes samana kuin luonnontilankin ajossa: muutos on alle 5%. Virtaussuunnat eivät muutu merkittävästi. Ylenemät sitä vastoin ovat huomattavasti suurempi kuin Kangasalan virtausmalleissa (kaivot 1 ja 2).

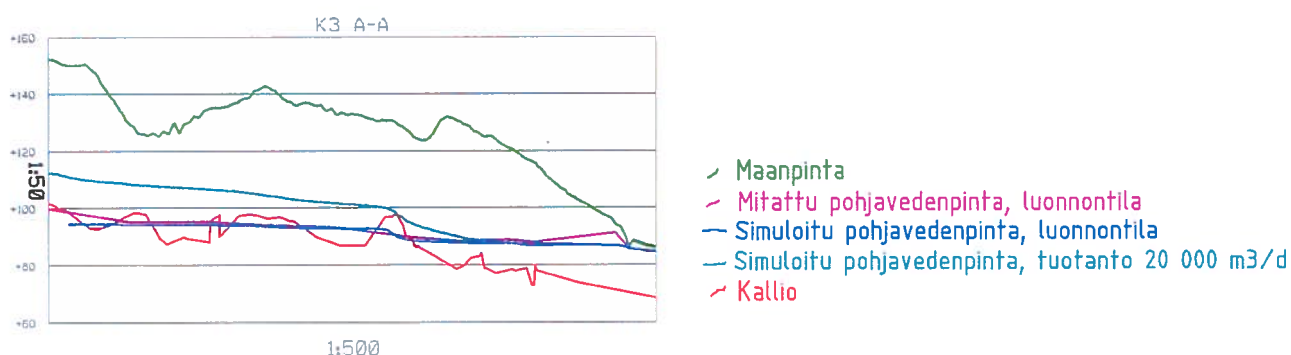
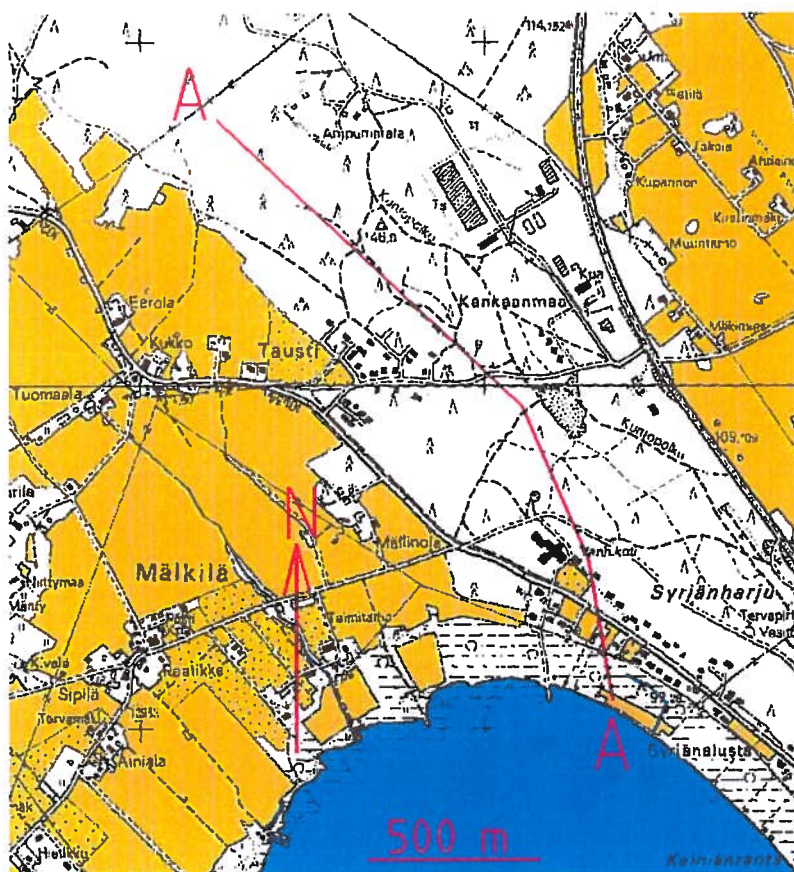
Pohjavesipinnan suurin ylenemä $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ –tuotantosimuloinnissa on 16 m ja sijaitsee imeytysalueen kohdalla (kuva 43). Ylenemäalueella sijaitsevien peltojen vaiheilla kyllästymättömän vyöhykkeen paksuus on tuotantotilassakin vähintään 5 m lukuun ottamatta Mäki-Laurilan ja Kukon välistä aluetta, jossa etäisyys maanpinnasta tuotantotilanteen pohjavesipintaan jää mallin laskeman tuloksen mukaan vain runsaaseen metriin. Tässä kohden lienee kyse mallialueen reunan vaikutuksesta laskentatulokseen. Toisaalta, juuri tällä alueella on nykyisen pohjavedenpinnan korkeudessa vielä epäselvyyttä: pohjavedenpinnan korkeustietoja on tällä kohtaa vain talousvesikaivoista, jotka eivät välttämättä edusta varsinaista pohjavesiesiintymää vaan mahdollisesti orsivettä. Yksi osasy syy mallin antamiin varsin suuriin ylenemiin lienee se, ettei mallissa ole huomioitu kyllästyneen vyöhykkeen mahdollista laajenemista mallissa nyt käytetyn rajauksen ulkopuolelle.

Kaivokentällä suurin alenema on 0,8 m. Mallin luoteisnurkassa on muutaman metrin alenema, joka aiheutuu mallialueen rajauksen eroavaisuuksista luonnontilan ja tuotantotilan mallien välillä. Kuvassa 43 esitetty pohjavedenpinnan muutosta kuvaavan käyrästön peittämä alue rajautuu luonnontilan mallin aktiivisen alueen rajauksen mukaisesti.



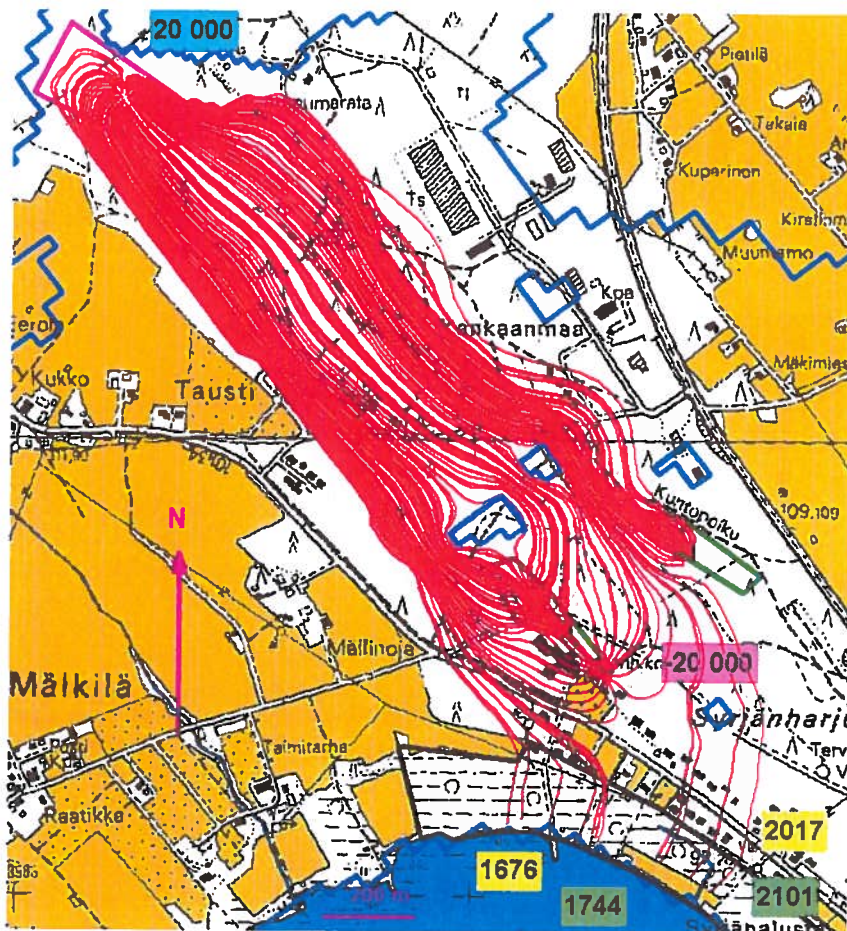
Kuva 43. Kaivo 3: pohjavedenpinnan korkeuden muutos [m] tuotannon ollessa $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Kalliokynnyksen ja imeytyspaikan välisellä alueella ylenemä on huomattavasti suurempi kuin kaivojen 1 ja 2 tapauksissa (kuva 44). Ylenemä on suuri osin sen takia, että veden täytyy nousta riittävän korkealle voidakseen virrata kalliokynnyksen yli.



Kuva 44. Kaivo 1: poikkileikkauskuva luonnontilan ja tuotantotilanteen simuloinnista. Pystysuunnan mittakaava on kymmenkertainen verrattuna vaakasuuntaan. Korkeusasetat [m mpy].

Veden virtausreitit laskettiin $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ -tuotantotilanteessa (kuva 45). Partikkelit laitettiin liikkeelle imeytysalueelta ja niiden etenemistä seurattiin myötävirtaan.



Kuva 45. Kaivo 3: vesipartikkelien kulkureitit tuotannon ollessa $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$.

Viipymäärät pumppaus- ja imeytysmäärällä $20\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ ja $22\,000\text{ m}^3\text{d}^{-1}$ on esitetty taulukossa 7. Vertailun vuoksi taulukossa on esitetty myös aiemmalla mallilla (Vanha) lasketut viipymät sekä aiemmin käytetyllä huokoisuuden (n) arvolla 35% että nyt käytetyllä arvolla 25%. Vanhalla mallilla simuloinnit tehtiin partikkelilukumäärällä max 15 kpl (sama kuin 2001 raportoiduissa ajoissa).

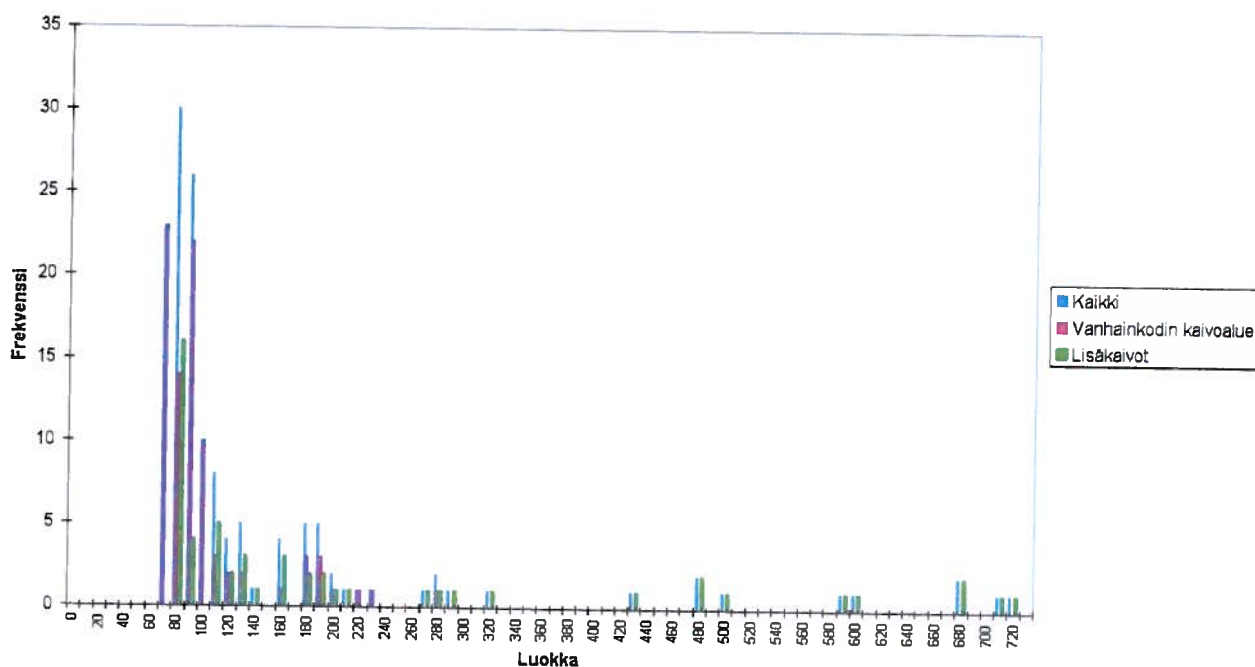
Uudella mallilla laskettaessa partikkeleita laitettiin liikkeelle 156 kpl. Osa partikkeleista kulkeutuu vanhainkodin läheisyydessä sijaitsevalle kaivoalueelle, jolla on jo olemassa oleva koekaivo 3. Osa partikkeleista kulkeutuu harjun toisella puolella olevalle ns. lisäkaivojen kaivoalueelle. Taulukossa 7 on esitetty paitsi koko partikkelimäärän viipymäjakauman tunnusluvut myös edellä mainittuihin kahteen eri kaivoalueeseen päätyvien partikkelien viipymäjakaumat.

Taulukko 7. Kaivo 3: viipymät [d].

Pumppaus [m ³ d ⁻¹]	Imeytytys [m ³ d ⁻¹]	Vanha nopein n = 35% (n = 25%)	Vanha keskiarvo aritm. / geom. / harm. n = 35% (n = 25%)	Vanha mediaani n = 35% (n = 25%)	Uusi nopein kaikki (V.koti / lisäkaivot)	Uusi keskiarvo aritm. / geom. / harm. (Vanhainkoti / lisäkaivot)	Uusi mediaani (V.koti / lisäkaivot)
10000	10000	82		88			
15000	15000	68		73			
20000	20000	59 (42)	69 / 68 / 67 (50 / 49 / 48)	63 45	62 (62 75)	140 / 110 / 97 (96 / 90 / 86 210 / 154 / 124)	87 (85 118)
25000	25000	54 (38)	67 / 64 / 63 (48 / 46 / 45)	58 41			
30000	30000	50		54			
35000	35000	45		49			
40000	40000	43		46			

Verrattaessa viipymäarvojen jakaumaesitystä (kuva 46) ja lukuarvoja taulukossa 7 Kaivo 3:n tapauksessa keskimääräistä viipymää kuvaa parhaiten mediaani. Simuloidussa tuotantotilanteessa minimiviipymä on noin 60 ja keskimääräinen viipymä 85-115 vuorokautta.

Kaivo 3
Viipymäjakaumat



Kuva 46. Kaivo 3: viipymäjakaumat [d] tuotantotilanteessa 20 000 m³d⁻¹.

Herkkyystarkastelu

Vedenjohtavuuden muutoksilla on selkeä vaikutus tuotantotilanteen laskentatulokseen. Kymmenkertaisilla vedenjohtavuuksilla laskettaessa tuloksena on lähes vaakasuora pohjavedenpinta. Pienennettäessä vedenjohtavuudet kymmenenteen osaansa alenemat suurenevat kaivoalueella 85 metriin ja ylenemät suurenevat imeytysalueella 140 metriin.

9. Yhteenveto

Päivitettyillä malleilla saatiin pohjaveden virtauskuvien ja viipymien suhteen hyvin samansuuntaiset tulokset kuin SYKEN aikaisemmilla sekä yleispiirteisillä (Maa ja Vesi Oy) malleilla. Viipymät nyt raportoiduissa simuloinneissa ovat pienimmillään yli kuukauden luokkaa, joten ne ovat riittävät tekopohjaveden muodostamiseen etenkin ottaen huomioon imeytykseen tarkoitettun veden hyvän laadun.

Mallit osoittautuivat erittäin herkiksi vedenjohtavuusparametrin vaihteluille. Tämä selittää osaltaan mallien kalibroinnin suurta työmäärää. Erityisesti Pälkäneen (Kaivo 3) virtausmallin laatiminen osoittautui vaikeaksi ja siihen jäi selvästi enemmän epävarmuutta kuin Kangasalan malleihin (Kaivot 1 ja 2). Kalliokynnyksen sijainti ja suuruus tulisi tarkentaa lisätutkimuksin, jotta myös mallin tuloksiin suuresti vaikuttavat mallialueen keskivaiheilla sijaitsevat inaktiiviset alueet eri simulointitilanteissa voitaisiin rajata todenmukaisemmin. Lisäksi mahdollinen orsivesi Mäki-Laurilan – Kukon välisellä alueella tulisi selvittää kairauksin ja asentamalla pohjaveden havaintoputki.

10. Jatkotoimenpiteet

Mallisovellukset siirretään tarpeen mukaan Pirkanmaan ympäristökeskuksen ja/tai muulle soveliaalle tietokoneelle Tavasen käyttöön.

Maa ja Vesi Oy:n yleispiirteisten mallien raportissa on esitetty lisätutkimusehdotuksia, jotka voidaan myös tässä raportissa esiteltyjen mallien valossa katsoa tarpeellisiksi.

Helsingissä 12.12.2003



Sirkku Tuominen

Vanhempi tutkija

Kirjallisuutta

- Brigham Young University, Environmental Modeling Research Laboratory 1999. GMS Reference Manual.
- Maa ja Vesi Oy 1995, Kaivokartoitus ja lähteiden virtaamamittaukset Pälkäneen Isokankaanharjulla ja Syrjänharjulla sekä Kangasalan Vehoniemenharjulla, 13.9.1995.
- McDonald, M.G. & Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A1, 583 s.
- Pollock, D.W. 1989. Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water model, 177 s.
- Vehoniemen-Isokankaan harjualueen hydrogeologisia olosuhteita koskevat tutkimukset ja selvitykset sekä tekopohjavesilaitossuunnitelmat
- Pälkäneen Isokankaan ja Kangasalan Vehoniemenharjun aerogeofysikaalinen ruhjetulkinta. 1994. Geologian tutkimuskeskus. 15.12.1994.
- Kaivokartoitus ja lähteiden virtaamamittaukset Pälkäneen Isokankaalla ja Syrjänharjulla sekä Kangasalan Vehoniemenharjulla. 1995. Maa ja Vesi Oy. 13.9.1995.
- Seismiset luotaukset Kangasalan Vehoniemenharjulla. 1995. Geologian tutkimuskeskus. 18.12.1995.
- Pälkäneen Isokankaan ja Kangasalan Vehoniemenharjun gravimetriset tutkimukset. 1995. Geologian tutkimuskeskus, loppuraportti 14.2.1995.
- Kangasalan Vehoniemen geofysikaaliset tutkimukset 1994-1996. 1996. Geologian tutkimuskeskus. 4.10.1996.
- Kangasalan kunnan pohjavesialueiden suojelusuunnitelma 1997. Hämeen ympäristökeskus Tampere. Ympäristölautakunta 11.3.1997. Tekninen lautakunta 4.3.1997. Kunnanhallitus 17.3.1997.
- Vehoniemenharjun pohjavesi- ja tekopohjavesitutkimus Alue 1, TAVASE Eteläinen työryhmä. 1998. Maa ja Vesi Oy Jaakko Pöyry Group. 10.3.1998.
- Tuominen, S. M. ja Sarkkila J. 1998. Vehoniemenharjun tekopohjavesimallinnus Kaivo 1, TAVASE Eteläinen työryhmä. Suomen Ympäristökeskus. 15.9.1998.
- Täydentävät painovoimamittaukset Kangasalan Vehoniemenharjulla 1998. 1998. Geologian tutkimuskeskus. 30.11.1998.
- Pohjaveden tarkkailuohjelma Haaviston maa-ainesten ottoalueella. 1998. Maa ja Vesi Oy, 14.5.1998.
- Vesiasetuksen 69 §:n mukainen selvitys Kangasalan kunnan Vehoniemen pohjavedenottamon lupahakemukseen. 1999. Maa ja Vesi Oy. Vantaa, 28.6.1999.
- Vehoniemenharjun pohjavesi- ja tekopohjavesitutkimus Alue 2. 1999. Maa ja Vesi Jaakko Pöyry Group. Vantaa, 10.2.1999.
- Vehoniemenharjun tekopohjavesilaitoksen kustannusarvio, TAVASE Eteläinen työryhmä. 1999. Maa ja Vesi Oy Jaakko Pöyry Group. Helmikuu 1999.

Tuominen S. M. 1999. Vehoniemenharjun tekopohjavesimallinnus Kaivo 2, TAVASE Eteläinen työryhmä. Suomen ympäristökeskus. 20.10.1999.

Kangasalan Vehoniemenharjun pohjavesi- ja tekopohjavesitutkimus, TAVASE Eteläinen työryhmä. 2000. Jaakko Pöyry Infra Maa ja Vesi. Vantaa 3.10.2000.

Vehoniemenharjun tekopohjavesilaitos, kustannusarvion päivitys. 2001. Jaakko Pöyry Infra Maa ja Vesi Oy. Loppuraportti 17.4.2001.

Pälkäneen Isokankaan pohjavesi- ja tekopohjavesitutkimus, TAVASE Eteläinen työryhmä. 2001. Jaakko Pöyry Infra Maa ja Vesi. Loppuraportti 20.4.2001.

Tuominen S. M. 2001. Vehoniemenharjun tekopohjavesimallinnus Kaivo 3, Pälkäne, Isokangas, TAVASE Eteläinen työryhmä. Suomen ympäristökeskus. 7.2.2001.

Pälkäneen Isokankaan pohjavesi- ja tekopohjavesitutkimus, TAVASE Eteläinen työryhmä. 2001. Maa ja Vesi Oy, 7.2.2001.

Vehoniemen-Isokankaan harjualueen pohjavesitutkimukset 2002 – 2003. Maa ja Vesi Oy, 6.5.2003.

Vehoniemen-Isokankaan harjualueen tekopohjavesilaitoksen yleissuunnitelma. Maa ja Vesi Oy, 15.4.2003.

Vehoniemen Isokankaan yleispiirteiset pohjaveden virtausmallit. Maa ja Vesi Oy, 12.6.2003.