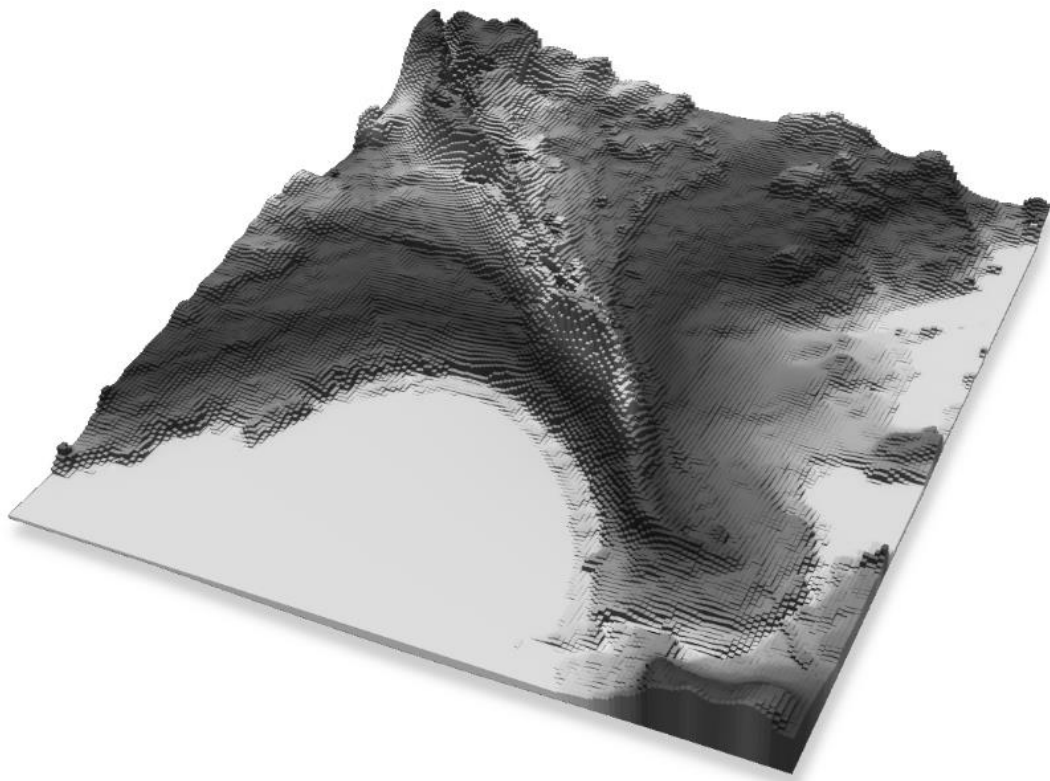


Tavase Oy

Tuotantoalue TUA3 (Pälkäne)

Pohjaveden virtausmallin päivittäminen ja tekopohjavesilaitoksen toiminnan vaikutusten arviointi



Loppuraportti

Tekijä: Lassi Warsta, TkT
Yritys: Gain Oy
Päivämäärä: 15.03.2019



Kannen kuva: Kolmiulotteinen visualisointi tuotantoalueelta TUA3 ja sen ympäristöstä.

Tiivistelmä

Tavase Oy:n tekopohjavesilaitoksen tuotantoalue TUA3 sijoittuu Pälkäneen kunnassa sijaitsevalle Isokankaan-Syrjänharjun -harjualueelle. Osa harjualueella muodostuvasta pohjavedestä purkautuu Mallasveden rannalla sijaitsevalle Keiniänrannan Natura-alueelle. Harjualueen ominaisuuksia on selvitetty lukuisten tutkimusten ja selvitysten avulla. Alueella toteutettiin muun muassa vuosina 2009–2010 laaja imeytys- ja merkkiainekoe.

Alueen pohjaveden virtauskuvan esittäminen tietokonepohjaisilla pohjavesimalleilla on ollut haasteellista alueen keskivaiheilla sijaitsevan kynnyksen vuoksi, koska se patoaa pohjavettä osittain kynnyksen pohjoispuolelle. Vuonna 2011 alueelle tehtiin kolmiulotteinen virtausmalli, jolla kynnyksen patoava vaikutus pystyttiin kuvaamaan. Ohjelmana käytettiin Yhdysvaltain geologian tutkimuskeskuksen kehittämää MODFLOW 2000 -mallia. Vuoden 2011 mallin kuvaus jäi kuitenkin epävarmaksi mallinnettavan alueen reuna-alueilla. Keiniänrannan Natura-alue sijaitsee mallialueen reunaosassa.

Pohjavesimallin päivittämisen tavoitteena oli tarkentaa virtausmallin toimintaa alueen reuna-alueilla niin, että sillä voidaan arvioida tekopohjaveden tuotannon aiheuttamia vaikutuksia varsinkin Keiniänrannan Natura-alueelle. Vuoden 2019 malliin tehdyt tarkennukset perustuvat alueella tehtyihin uusiin sedimentologisiin selvityksiin ja niiden perusteella tehtyihin tulkintoihin sekä hydrogeologisiin tulkintoihin imeytys- ja merkkiainekokeen tuloksista. Virtausmalliin tehtiin tarkennuksia pohjaveden virtauskuvaan etenkin alueen reunaosiin, Taustialantien kynnykselle sekä harjuytimen alueelle. Vuoden 2019 virtausmalliin tehtiin sedimentologisten selvitysten perusteella huonosti vettä johtava kynnys Keiniänrantaan, pohjavedenpinnan yläpuolelle ulottuva kallioalue Syrjänharjun lounaisreunalle sekä pienipiirteisiä moreeniselänteitä muodostuman reuna-alueille. Lisäksi vuoden 2019 virtausmallin harjuytimen johtavuutta nostettiin, jonka seurauksena imeytys- ja merkkiainekokeessa mitatut alenemat kaivoalueilla toteutuivat mallisimuloinnissa saman suruisina kuin kokeen aikana luonnossa mitatut alenemat.

Vuoden 2019 mallin kalibroinnissa käytettiin aineistoina alueella mitattuja luonnontilaisia pohjaveden pinnankorkeuksia sekä imeytys- ja merkkiainekokeessa mitattuja ylenemiä ja alenemia imeytys- ja kaivoalueilla. Luonnossa mitattujen ja virtausmallilla mallinnettujen luonnontilaisten pohjaveden pinnankorkeuksien erot eli residuaalit pienenevät merkittävästi Keiniänrannan Natura-alueen läheisyydessä sekä muualla alueella verrattuna vuoden 2011 mallin tuloksiin. Tämä tarkoittaa sitä, että mallin tarkkuus parani merkittävästi aikaisemmasta. Vuoden 2019 mallilla simuloitiin onnistuneesti tutkimusalueella tehdyssä imeytys- ja merkkiainekokeessa todetut pohjavedenpinnan ylenemät ja alenemat. Vuoden 2019 mallin toiminta validoitiin toisintamalla sillä merkkiainekokeessa mitatut viipymät alueella. Mallinnetut viipymät vastasivat hyvin imeytys- ja merkkiainekokeessa mitattuja viipymiä eli vuoden 2019 virtausmallin validointi onnistui hyvin.

Tekopohjaveden tuotannon vaikutuksia tuotantoalueen TUA3 alueella tarkasteltiin erilaisilla tuotantoskenaarioilla, joissa jälleenimeytettävän vesimäärän sekä vedenottomäärän painotuksia muutettiin eri alueiden välillä. Raakavesi imeytetään kaikissa skenaarioissa alueen luoteiskulmassa sijaitsevalle imeytysalueelle. Pohjavesi ja tekopohjavesi siirretään Taustialantien kynnyksen yli pumppaamalla vesi ensin ylös kynnyksen luoteispuolella olevalta kaivoalueelta ja jälleenimeyttämällä se kahdelle jälleenimeytysalueelle kynnyksen kaakkoispuolella. Tekopohjavesi otetaan kynnyksen kaakkoispuolella sijaitsevilta kolmelta kaivoalueelta.

Mallilla laskettujen tuotantoskenaarioiden mukaan alueella voidaan tuottaa 12 000 m³/d tekopohjavettä niin, että virtaamat Keiniänrannan avo-ojissa pienenevät vain noin 4 % ja pohjavedenpinnan alenemat Keiniänrannan alueella ovat selvästi alle 0,2 m. Viipymät alueen luoteiskulmassa sijaitsevalta imeytysalueelta Taustialantien kynnyksen kaakkoispuolella sijaitseville kaivoalueille ovat noin 60 päivää. Skenaariossa, jossa on mukana 2 000 m³/d yli-imeytys, muutos Keiniänrannan avo-ojien virtaamisissa on vain 1 %.

Skenaarioiden mukaan tekopohjavedentuotannon vaikutukset Keiniänrannan Natura-alueen vedenlaatuun, virtaamiin tai pohjaveden pinnankorkeuksiin ovat vähäisiä. Imeytys- ja kaivoalueiden sijoittelu takaa riittävän viipymän ja mahdollistaa hyvälaatuisten tekopohjaveden tuottamisen.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Sisällysluettelo	4
1. Johdanto	7
2. Lähtötiedot ja menetelmät.....	8
2.1 Yleistä	8
2.2 Tutkimusaineistot ja selvitykset.....	8
2.3 MODFLOW 2000 -malli	8
2.4 Vuoden 2011 pohjaveden virtausmalli	9
2.5 Mallin käyttöönotto.....	9
2.6 Vuoden 2019 pohjaveden virtausmalli	9
2.6.1 Yleistä	9
2.6.2 Keiniänranta	11
2.6.3 Taustialantien kynnys ja alueen itäreuna	11
2.6.4 Harjuydin	12
2.6.5 Vuoden 2019 mallin kalibrointi, validointi ja tulosten vertaaminen mittauksiin.....	12
3. Tulokset.....	13
3.1 Yleistä	13
3.2 Luonnontilan kuvaaminen vuoden 2019 mallilla.....	13
3.3 Imeytys- ja merkkiainekokeen kuvaaminen vuoden 2019 mallilla.....	17
3.4 Tuotantoskenaariot.....	19
3.4.1 Tuotantoskenaarioiden toteutus	19
3.4.2 Tuotantoskenaario A (lisäkaivo luonnonsuojelualueen luoteispuolella).....	20
3.4.3 Tuotantoskenaario B (lisäkaivo luonnonsuojelualueen kaakkoispuolella)	22
3.4.4 Tuotantoskenaario C (2000 m ³ /d tuotantoon kynnykseltä).....	24
3.4.5 Tuotantoskenaario D (2000 m ³ /d yli-imeytys).....	26
4. Yhteenveto ja johtopäätökset	29
5. Kirjallisuusviitteet.....	31
Liite 1. Vuoden 2011 mallin simulaatiotulokset	32
Liite 2. Viipymät Keiniänrannassa.....	39
Liite 3. Imeytys- ja merkkiainekokeessa todetut pohjavedenpinnan ylenemät ja alenemat	40

Kuvat

Kuva 1. Alueet, joiden kuvausta on tarkennettu sedimentologisten selvitysten perusteella. Siniset alueet kuvaavat huonosti vettäjohtavia moreenimaita, vihreät alueet huonosti johtavia silttialueita, keltaiset alueet hyvin johtavia alueita ja punaiset alueet inaktiivisia alueita. Aukko kynnyksessä -kohtaa tarkennettiin uusien selvitysten perusteella.....	10
Kuva 2. Muutokset mallin vedenjohtavuusarvoissa (neljäs kerros). Mustalla merkittyjen alueiden johtavuutta on laskettu ja keltaisten nostettu.	11

Kuva 3. Vuoden 2019 mallilla simuloitu pohjaveden pinnankorkeus (m) alueella luonnotilassa. Havaintoputket ja yksityiskaivot on esitetty sinisillä ympyröillä ja avo-ojien mittapadot sinisillä kolmioilla. Keiniänrannan Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.....	13
Kuva 4. Mitatut ja vuoden 2019 mallilla simuloidut pohjaveden pinnankorkeudet (m) luonnotilassa. Kuvaajassa on esitetty mitattu ja mallinnettu pohjaveden pinnankorkeus (m) eri havaintopisteissä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe on 0,30 m koko tutkimusalueen havaintopisteissä. Punaisella katkoviivalla rajatut havaintopisteet on esitetty tarkemmin kuvassa 5. .	14
Kuva 5. Mitatut ja vuoden 2019 mallilla simuloidut pohjaveden pinnankorkeudet (m) luonnotilassa Keiniänrannan Natura-alueen läheisyydessä. Kuvaajassa on esitetty mitattu ja mallinnettu pohjaveden pinnankorkeus (m) eri havaintopisteissä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe on 0,45 m Keiniänrannan lähistöllä olevissa mittauspisteissä.	15
Kuva 6. Mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeustulosten välinen ero (m) luonnotilassa vuoden 2019 mallissa. Keiniänrannan Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla ja sen läheisyydessä olevat havaintopisteet on rajattu punaisella viivalla. Negatiivinen arvo (keltainen) = mallin laskema pohjaveden pinnankorkeus on alempana kuin luonnossa mitattu pinnankorkeus. Positiivinen arvo (sininen) = mallin laskema tulos ylempänä kuin mittaustulos.	16
Kuva 7. Mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeustulosten välinen ero (m) luonnotilassa vuoden 2019 mallissa. Taustialantien kynnyksen läheisyydessä olevat havaintopisteet on rajattu punaisella viivalla. Negatiivinen arvo (keltainen) = mallin laskema pohjaveden pinnankorkeus on alempana kuin luonnossa mitattu pinnankorkeus. Positiivinen arvo (sininen) = mallin tulos ylempänä kuin mittaustulos.	17
Kuva 8. Imeytys- ja merkkiainekoe. Kaivojen sijainnit sekä imeytys- ja pumppausmäärät. Kokeessa imeytettiin enintään 7 000 m ³ /d vettä alueen luoteispäähän (imeytyskaivot IK1–IK3) ja pumpattiin yhteensä enintään 7 000 m ³ /d vettä kaivoilta K3 ja K4. Keiniänrannan Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.	18
Kuva 9. Imeytys- ja merkkiainekoe simuloituna vuoden 2019 mallilla. Kokeen aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat pohjaveden päävirtausreittejä. Viipymät imeytys- ja vedenotto-kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Kuvassa on myös esitetty mallinnetut viipymät havaintoputkille 370, 273, 340 ja 130.	19
Kuva 10. Tuotantoskenaario A. Kaivojen sijainnit sekä imeytys- ja vedenottomäärät. Skenaariossa imeytetään 12000 m ³ /d raakavettä alueen luoteispäähän (IA4.1) ja otetaan 12000 m ³ /d tekopohjavettä kaivoalueilta KA3.2 ja KA3.3. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.....	21
Kuva 11. Tuotantoskenaario A. Tuotannon aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat veden päävirtausreittejä. Viipymät kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Pinnankorkeudet laskevat Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat noin 4 %.....	22
Kuva 12. Tuotantoskenaario B. Kaivojen sijainnit sekä imeytys- ja vedenottomäärät. Skenaariossa imeytetään 12000 m ³ /d raakavettä alueen luoteispäähän (IA4.1) ja otetaan 12000 m ³ /d tekopohjavettä kaivoalueilta KA3.2–KA3.4. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.....	23
Kuva 13. Tuotantoskenaario B. Tuotannon aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat veden päävirtausreittejä. Viipymät kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Pinnankorkeudet laskevat Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat noin 4 %.....	24
Kuva 14. Tuotantoskenaario C. Kaivojen sijainnit ja imeytys- ja vedenottomäärät. Skenaariossa imeytetään 12000 m ³ /d raakavettä alueen luoteispäähän (IA4.1) ja otetaan 12000 m ³ /d tekopohjavettä kaivoalueilta KA3.1, KA3.2 ja KA3.3. Skenaariossa johdetaan 2000 m ³ /d talousvedeksi kaivoalueelta KA3.1. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.	25
Kuva 15. Tuotantoskenaario C. Tuotannon aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat veden päävirtausreittejä. Viipymät kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Pinnankorkeudet laskevat Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat noin 3 %.....	26

Kuva 16. Tuotantoskenaario D. Kaivojen sijainnit ja imeytys- ja vedenottomäärät. Skenaariossa yli-imeytetään 14000 m ³ /d raakavettä alueen luoteispäähän (IA4.1) ja otetaan 12000 m ³ /d tekopohjavettä kaivoalueilta KA3.2 ja KA3.3. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.....	27
Kuva 17. Tuotantoskenaario D. Tuotannon aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat veden päävirtausreittejä. Viipymät kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Pinnankorkeudet laskevat Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat noin 1 %.	28

1. Johdanto

Tavase Oy:n tekopohjavesilaitoksen tuotantoalue TUA3 sijoittuu Pälkäneen kunnassa sijaitsevalle Isokankaan-Syrjänharjun -harjualueelle. Harju sijaitsee Pälkäneen kunnan luoteispuolella kannaksella, joka rajoittuu koillispuolella Pälkäneveteen ja lounaispuolella Mallasveteen. Osa harjussa muodostuvasta pohjavedestä purkautuu Mallasveden rannalla sijaitsevalle Keiniänrannan Natura-alueelle.

Harjun toimintaa on kuvattu aikaisemmin kahdella kaksiulotteisella virtausmallilla vuosina 1998–2001 sekä 2002–2003 (Tuominen 2001 ja Pöyry 2003). Kaksiulotteisen mallintamisen haasteeksi nousi alueen keskivaiheilla Taustialantien kohdalla sijaitseva kynnyks (esim. Pöyry 2011, Mäkinen ym 2017), jonka kuvaaminen näillä malleilla oli haastavaa. Vuonna 2011 alueelle tehtiin kolmiulotteinen virtausmalli (Artimo ym. 2011), jolla kynnyksen patoava vaikutus pystyttiin kuvaamaan. Mallin toiminta jäi kuitenkin epävarmaksi sen reuna-alueilla (Artimo ym. 2011).

Tämän pohjavesimallin päivityksen tavoitteena oli tarkentaa vuonna 2011 alueella tehtyä monikerroksista virtausmallia ja vähentää mallin tulosten sisältämää epävarmuutta tekopohjavesilaitoksen toiminnan vaikutuksista Keiniänrannan Natura-alueen olosuhteisiin. Tuotantoalueella TUA3 tehtiin vuoden 2018 lopulla uusia maatulokaluotauksia (Geo-Work Oy 2019), joiden perusteella alueen maaperän rakenneselvitystä tarkennettiin (Mäkinen 2019). Vuoden 2011 mallia tarkennettiin uuden rakenneselvityksen perusteella.

Vuoden 2019 mallin toimivuus varmistettiin kalibroituvaiheessa tarkastelemalla, pystyykö malli toisintamaan alueella havaintoputkista ja yksityiskaivoista mitatut luonnontilaiset pohjaveden pinnankorkeudet. Mallin toiminta tuotantotilanteessa varmistettiin kalibroituvaiheessa simuloimalla mallilla alueella vuosina 2009–2010 toteutetussa laajassa imeytys- ja merkkiainekokeessa todetut alenemat kaivoalueilla (Pöyry 2011). Malli validoitiin aineistolla, jota ei käytetty mallin kalibroinnissa, ja siihen kuului merkkiainekokeessa (Pöyry 2011) mitattujen viipymien toisintaminen havaintopisteissä ja kaivoilla.

Kun mallin toimivuus oli varmistettu luonnontilassa ja tuotantotilanteessa (imeytys- ja merkkiainekoe), voitiin sitä käyttää erilaisten tuotantoskenaarioiden simulointiin. Tuotantoskenaarioissa imeytettiin 12 000–14 000 m³/d raakavettä imeytysalueella ja tuotettiin 12 000 m³/d tekopohjavettä tuotantokaivoilta. Malliskenaarioiden avulla arvioitiin erilaisten tuotantotilanteiden vaikutukset alueen pohjaveden pinnankorkeuksiin sekä Keiniänrannan Natura-alueen olosuhteisiin.

Tietokonepohjaiset pohjavesimallit mahdollistavat erityyppisten mittausaineistojen, kuten pohjavedenpinnan korkeuksien, maaperän rakennetietojen ja hydraulisten ominaisuuksien sekä muun muassa avouomavirtaamien, yhdistämisen. Malli kuvaa numeerisesti tutkittavalla alueella tapahtuvia pohjaveden virtaukseen liittyviä prosesseja ja sillä voi tutkia erilaisten toimenpiteiden, kuten tekopohjaveden tuotannon, vaikutuksia alueen vesitaseeseen.

Mallinnustyö tehtiin yhteistyönä eri alojen asiantuntijoiden kanssa:

- TkT Lassi Warsta, mallintamisen asiantuntija, Gain Oy
- FT, Dos. Joni Mäkinen, sedimentologi, Turun yliopisto
- FM Jaana Mäki-Torkko, hydrogeologi, Ramboll Finland Oy
- FM Esa Kallio, hydrogeologi, Sitowise Oy

Lisäksi koko hankkeen työryhmä osallistui raportin kirjoittamiseen.

Mallin alkuperäiset kehittäjät ovat:

- FT Aki Artimo, mallintamisen asiantuntija, Turun Seudun Vesi Oy
- FM Sami Saraperä, Turun Seudun Vesi Oy
- FM Osmo Puurunen, Turun Seudun Vesi Oy

2. Lähtötiedot ja menetelmät

2.1 Yleistä

Alueen mallintamisessa lähtötietoina toimivat alueelta kerättyt mittausaineistot ja menetelmänä alueelle kehitetty alkuperäinen monikerroksinen malli (vuoden 2011 malli) (Artimo ym. 2011) ja siitä tässä hankkeessa tehty tarkennettu virtausmalli (vuoden 2019 malli).

2.2 Tutkimusaineistot ja selvitykset

Tavase Oy on tutkinut tuotantoaluetta TUA3 monipuolisesti hankkeen aikana. Alueen kalliopinnan korkeusasemaa on selvitetty geofysikaalisella painovoimamittausmenetelmällä. Maaperän rakennetta ja kalliopinnan korkeusasemaa on tutkittu laajamittaisten maatulkuutausten avulla. Alueelle on asennettu 75 havaintoputkea ja niiden kairauksista on saatu runsaasti tietoa maaperäolosuhteista. Suurin osa pisteistä on kalliovarmistuksia ja näin on saatu myös tarkkaa tietoa kallioperän korkeusasemasta näissä pisteissä. Kairautietojen, maatulkuutausten ja painovoimamittausten perusteella alueella on tehty useita sedimentologisia rakenneselvityksiä.

Alueella on tehty yksityiskaivokartoituksia ja havaintopisteistä on seurattu säännöllisesti pohjaveden pinnankorkeuksia. Havaintoputkista on tehty vedenjohtavuusmittauksia. Pohjaveden purkautumista on seurattu Keiniänrannan Natura-alueella useissa mittauspisteissä. Pohjaveden purkautumispisteitä on paikannettu lämpökameralla helikopterista käsin. Keiniänrannassa on mitattu avovesipintoja ja seurattu vedenlaatua kuudesta seurantapistestä, jotka ovat lähteitä, avovesipintoja sekä laskuojia.

Tuotantoalueella TUA3 toteutettiin vuosina 2009–2010 laaja imeytys- ja merkkiainekoe (Pöyry 2011). Kokeessa vesi imeytettiin alueen luoteispäässä sijaitsevalle imeytysalueelle (noin 7 000 m³/d) ja harjun läpi virrannut vesi pumpattiin ylös alueen eteläpäässä olevista kaivoista (noin 7 000 m³/d). Koe toteutettiin kierrätyskokeena eli kaivoista pumpattu pohjavesi johdettiin putkilinjoja pitkin imeytysalueelle, josta se virtasi takaisin kaivoille. Kokeen aikana mitattuja imeytyksestä johtuvia pohjaveden pintojen ylenemisiä ja pumppauksesta johtuvia alenemisiä on esitetty liitteessä 3 esitetyissä kuvissa. Imeytyskokeen aikana tehtiin merkkiainekoe, jossa imeytysveteen sekoitettiin vesiliukoista merkkiainetta, jonka kulkeutumista seurattiin havaintoputkista, yksityiskaivoista ja pumppauskaivoista tehdyillä näytteenotoilla (Pöyry 2011). Alueella on toteutettu myös aikaisempi imeytyskoe vuosina 1999–2000 (Pöyry 2011).

Tässä tutkimuksessa käytettävissä olleet uudet tulokset tuotantoalueelta TUA3 ovat:

- Maatulkuutukset Keiniänrannan läheisyydessä 40 MHz:n antennilla (Geo-Work Oy, 2019)
- Lahdentien varrella tehty uusi maatulkuutus 40 MHz:n antennilla (Geo-Work Oy, 2019)
- Pälkäneen Aapiskukon jakeluasemaa koskeva julkisesti saatavilla oleva aineisto (Mäkinen 2016)
- Sedimentologiset rakenneselvitykset uusien mittausten pohjalta (Mäkinen 2019)

2.3 MODFLOW 2000 -malli

Pohjaveden virtauksen mallinnusohjelmana käytettiin Yhdysvaltain geologian tutkimuskeskuksen (USGS) kehittämää MODFLOW 2000 -mallia. Malli on ilmainen ja sen lähdekoodi on avoin. MODFLOW on yksi maailman käytetyimmistä pohjavesimalleista.

Mallin numeerisessa ratkaisussa alue jaetaan yksi-, kaksi- tai kolmiulotteisella hilaverkolla osiin. Verkon hilat ovat muodoltaan laatikkomaisia ja niiden tilavuudet voivat vaihdella alueellisesti. Pohjavesiyhtälö ratkaistaan alueellisesti differenssimenetelmällä verkon hiloissa (Harbaugh ym. 2000). Globaali ratkaisu hilaverkossa ratkaistaan iteroimalla ratkaisua verkon hilojen yli. Mallin reunaehtoina käytetään esimerkiksi vakiovedenpintaehto, hydraulisesta korkeudesta riippuvaa ehtoa (General head boundary - GHB), imeyntä sekä avo-uoma- ja kaivoehtoja. Mallilla on mahdollista kuvata sekä tasapainotilannetta että ajan suhteen muuttuvaa tilannetta alueella.

Mallin perusajatuksena on modulaarisuus, eli käyttäjä voi lisätä malleihinsa erilaisia ominaisuuksia, kuten reunaehdoja tai numeerisia ratkaisumenetelmiä.

2.4 Vuoden 2011 pohjaveden virtausmalli

Alkuperäinen Pälkäneen Syrjäharjun malli tehtiin vuonna 2011 (Artimo ym. 2011). Malli on kolmiulotteinen ja sen hilajakso x-, y- ja z-suunnissa on 250, 198 ja 7. Hilakoko on ylhäältä päin katsottuna 25 m × 25 m. Laskentamallissa käytetty hilaverkko on KKJ2-koordinaatistossa (EPSG:2392). Mallin kalliopinta määritettiin kairaustietojen, painovoimamittausten sekä maatutkaluotausten perusteella (Artimo ym. 2011). Avovesipintoja kuvattiin mallissa GHB-reunaehdolla (luku 2.2), ojitetuille alueille asetettiin ylimpään kerrokseen ojareunaehto ja mallin sisään tuleva imeyntä arvioitiin pitkänajan päivittäisenä keskiarvona. Mallilla tehdyt simulaatiot kuvasivat tasapainotilanteita.

Imeynnän määräksi harjualueella asetettiin 0.001055 m/d eli noin 385 mm/v. Mallasveden pinnankorkeudeksi asetettiin mallissa 83,85 m mpy.

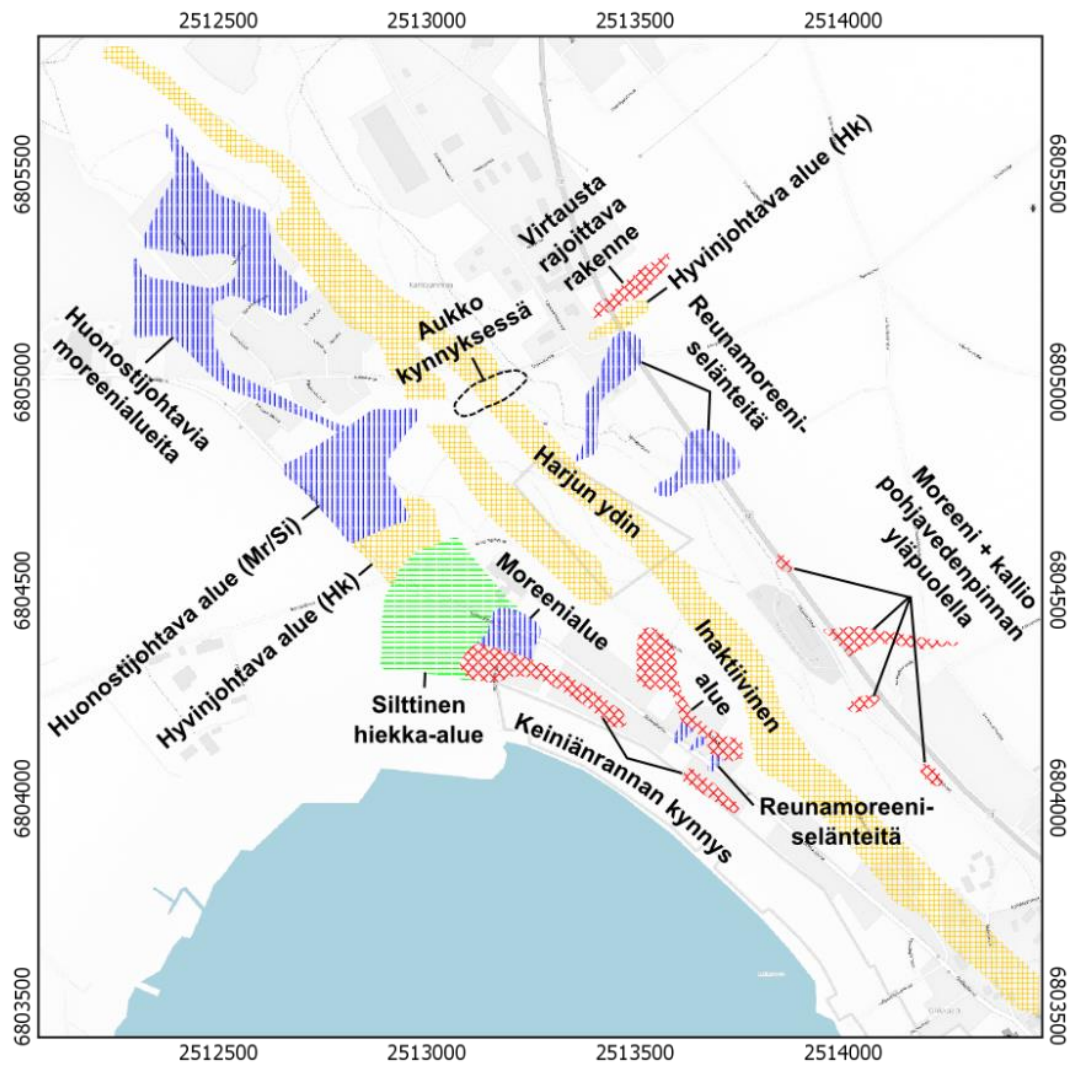
2.5 Mallin käyttöönotto

Vuoden 2011 mallilla tehtiin tässä tutkimuksessa ensin samat simulaatiot, jotka on esitetty Artimo ym. (2011) raportissa. Vuoden 2011 mallilla tämän selvityksen yhteydessä lasketut tulokset on esitetty liitteessä 1. Artimo ym. (2011) raportoidut tulokset vastaavat tämän selvityksen yhteydessä laskettuja tuloksia vuoden 2011 mallilla.

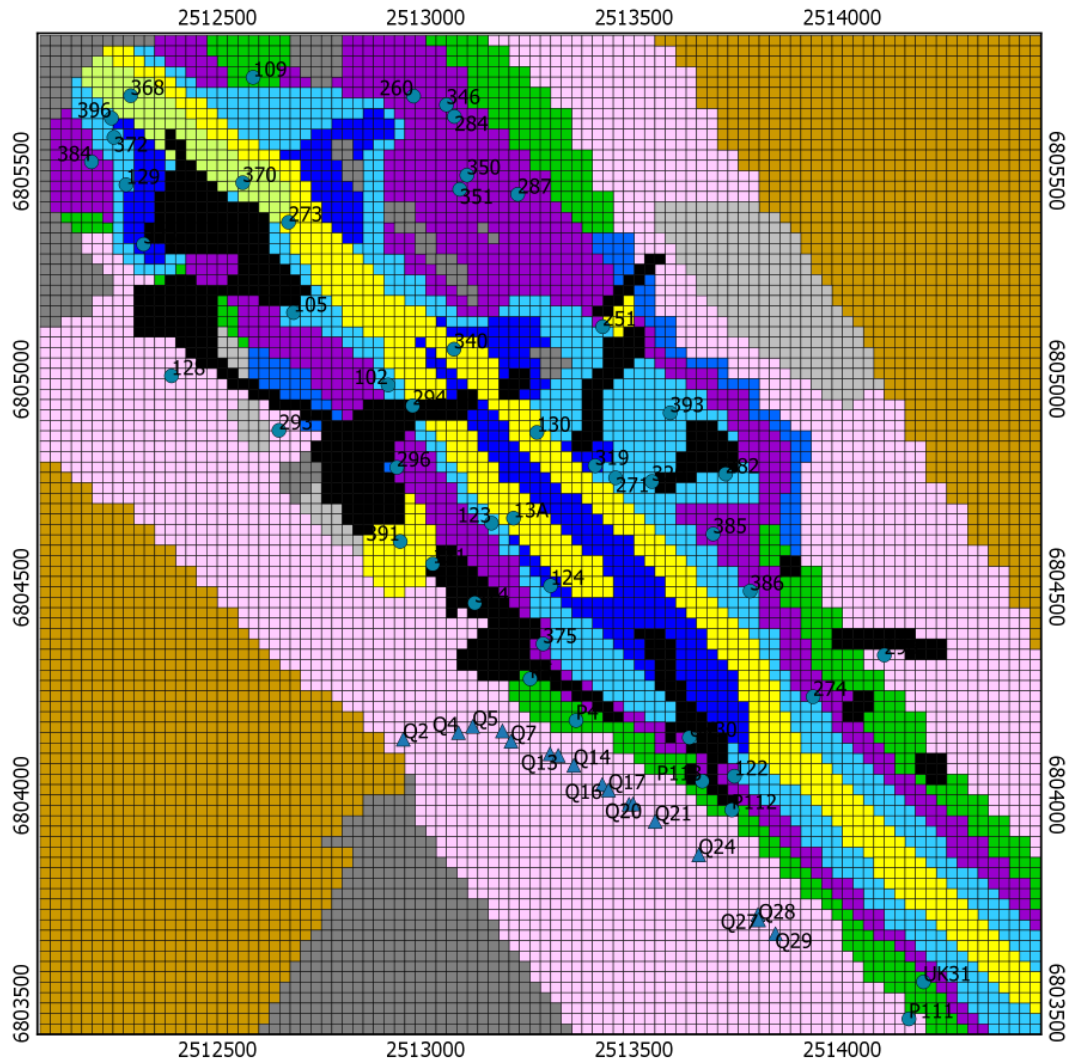
2.6 Vuoden 2019 pohjaveden virtausmalli

2.6.1 Yleistä

Pohjavesimallin päivitys perustuu alueella tehtyihin sedimentologisiin selvityksiin (Mäkinen 2016, 2019) sekä imeytys- ja merkkiainekokeen tulosten perusteella tehtyihin hydrogeologisiin johtopäätöksiin (kuva 1). Niiden perusteella tehtiin muutoksia mallin vedenjohtavuuksiin etenkin alueen reunaosiin, Taustialantien kynnykselle sekä harjuytimen alueelle. Mallin laskentahilaan tehdyt muutokset on esitetty kuvassa 2. Mustalla värillä merkittyjen alueiden johtavuuksia on alennettu mallissa ja keltaisten alueiden johtavuuksia on kasvatettu (kuva 2).



Kuva 1. Alueet, joiden kuvausta on tarkennettu sedimentologisten selvitysten perusteella. Siniset alueet kuvaavat huonosti vettäjohtavia moreenimaita, vihreät alueet huonosti johtavia silttialueita, keltaiset alueet hyvin johtavia alueita ja punaiset alueet inaktiivisia alueita. Aukko kynnyksessä -kohtaa tarkennettiin uusien selvitysten perusteella.



Kuva 2. Muutokset mallin vedenjohtavuusarvoissa (neljäs kerros). Mustalla merkittyjen alueiden johtavuutta on laskettu ja keltaisten nostettu.

2.6.2 Keiniänranta

Pohjavesimallin 2019 tärkein tarkennuskohde oli Keiniänrannan Natura-alue, jonka aikaisemmissa mallinnetuissa (vuoden 2011 malli) pohjaveden pinnankorkeuksissa oli selviä eroja mitattuihin pinnankorkeuksiin verrattuna (liite 1). Virtauskuvaa päivitettiin tarkentamalla mallissa Keiniänrannassa sijaitsevaa reunaehto sekä lisäämällä uusien maatutkaluotausten tuloksiin perustuvien maaperän rakenneselvitysten tulokset malliin. Keiniänrannan reunaehto vaihdettiin GHB-reunaehdosta vakiovedenpinnankorkeus -reunaehtoon, koska se kuvaa paremmin alueen olosuhteita. Keiniänrantaan lisättiin mallissa huonosti vettäjohtava kynnys ja Syrjänharjun lounaisreunalle pohjavedenpinnan yläpuolelle ulottuva kallioalue sekä pienipiirteisiä, harjuun nähden poikittaisia moreeniselänteitä (kuva 1) (Mäkinen 2019). Lisäykset tehtiin sedimentologiseen rakenneselvitykseen perustuen.

2.6.3 Taustialantien kynnys ja alueen itäreuna

Aikaisemmassa, vuoden 2011 pohjavesimallissa, tuotantoalueen TUA3 keskivaiheilla sijaitsevan Taustialantien kynnyksen pohjoisreunalla olevien havaintoputkien mallinnetut pohjavedenpinnan korkeudet olivat alempana luonnossa mitattuihin pinnankorkeuksiin verrattuna. Uuden sedimentologisen selvityksen (Mäkinen 2019) perusteella harjuytimen kulkureitti kynnyksen yli kapenee ytimen läntisen haaran kohdalla ja kynnyksen korkeusasema nousee tällä kohdin (aukko kynnyksessä kuva 1). Kynnyksen länsiosaan lisättiin moreenialue, joka patoaa vettä aikaisempaa enemmän kynnyksen pohjoispuolelle. Lisäksi tuotantoalueen luoteisosaan lisättiin suuri, pohjaveden virtausta ohjaava moreenialue.

Kynnyksen eteläpuolelle alueen itäosaan lisättiin moreeniselänteitä sekä pohjaveden pinnan yläpuolelle ulottuvia kallioalueita, jotka rajaavat ja ohjaavat pohjavesivirtauksia. Osa näistä lisäyksistä perustuu Pälkäneen Aapiskukon jakeluaseman ympäristössä tehtyjen tutkimusten julkisiin aineistoihin (Mäkinen 2016).

2.6.4 Harjuydin

Aikaisemmissa mallinnustuloksissa (Artimo ym. 2011, liite 1) imeytys- ja merkkiainekokeen alenemat olivat Taustialantien kynnyksen eteläpuolella olevilla kaivoalueilla suurempia verrattuna kokeen aikana mitattuihin tuloksiin (Pöyry 2011). Imeytys- ja merkkiainekokeen aikana mitatut ylenemät ja alenemat tuotantoalueella TUA3 on esitetty liitteessä 3 (Pöyry 2011). Liitteen 3 kuvassa C oleva kokeen tilanne vastaa parhaiten tasapainotilannetta alueen virtausolosuhteissa. Kokeessa (Pöyry 2011) saavutettiin osittainen tasapainotilanne ja tästä voidaan päätellä, että alenemat olisivat vielä pienentyneet kaivojen ympäristössä, jos koetta olisi jatkettu.

Uusien tutkimustulosten ja johtopäätösten perusteella vuoden 2019 mallissa harjuytimen johtavuus asetettiin Taustialantien kynnyksen pohjoispuolella kolminkertaiseksi ja eteläpuolella viisinkertaiseksi, jolloin mallin laskemat alenemat vastaavat hyvin imeytys- ja merkkiainekokeessa todettuja alenemia kaivoalueilla. Harjuytimen johtavuus oli vuoden 2011 mallissa 800 m/d. Muutos ytimen johtavuuteen tehtiin imeytys- ja merkkiainekokeessa imeytysalueella ja kaivoalueilla mitattujen ylenemien ja alenemien perusteella sekä sedimentologisten selvitysten perusteella.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu, että harjun ytimen hydrauliset johtavuudet vaihtelevat yleensä 860–8640 m/d välillä (Mälkki 1999). Vuoden 2019 mallissa käytetyt harjuytimen johtavuudet kynnyksen pohjois- ja eteläpuolella ovat esitetyn vaihteluvälin sisällä.

2.6.5 Vuoden 2019 mallin kalibrointi, validointi ja tulosten vertaaminen mittauksiin

Vuoden 2019 malli on toteutettu, kalibroitu ja validoitu Seppälän ja Tuomisen (2005) esittämän oppaan mukaisesti. Malli kalibroitiin mitatun luonnontilaisen pohjaveden pinnankorkeusaineiston sekä imeytys- ja merkkiainekokeessa mitattujen ylenemien ja alenemien avulla (Pöyry 2011). Mallin validointi tehtiin riippumattomalla aineistolla, jota ei käytetty kalibroinnissa. Validointiaineistona toimi merkkiainekokeen aikana (Pöyry 2011) mitatut viipymät havaintoputkille ja kaivoille. Merkkiaineen kulkeutumisnopeusaineiston toisintaminen mallilla on haastavampaa kuin pinnankorkeusaineiston toisintaminen, koska pohjaveden virtausnopeuksien alueellinen vaihtelu on huomioitava mallinnetuissa tuloksissa. Malliin syötettävien vedenjohtavuusarvojen sekä hydraulisen gradientin on vastattava muodostuman arvoja, jotta mallin laskemat viipymät vastaavat merkkiainekokeessa todettuja viipymiä.

Mallin laskemien pohjaveden pinnankorkeuksien ja mitattujen pinnankorkeuksien eroja arvioitiin absoluuttisen keskivirheen avulla. Keskimääräinen absoluuttinen virhe (mean absolute error, MAE) on yleinen tapa esittää mitatun ja mallinnetun havaintopistejoukon kokonaisvirhettä yhden luvun avulla. Mitä lähempänä nollaa MAE on, sitä tarkempi simulaation tulos on verrattuna mittauksiin. MAE saadaan laskemalla yhteen mallinnus- ja mittaustulosten erotusten itseisarvot ja jakamalla tämä summa tarkasteltavien pisteiden määrällä:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}$$

, jossa n on tarkasteltavien pisteiden lukumäärä, y_i on mallinnettu pohjaveden pinnankorkeus (m) pisteessä i ja x_i on mitattu pohjaveden pinnankorkeus (m) pisteessä i .

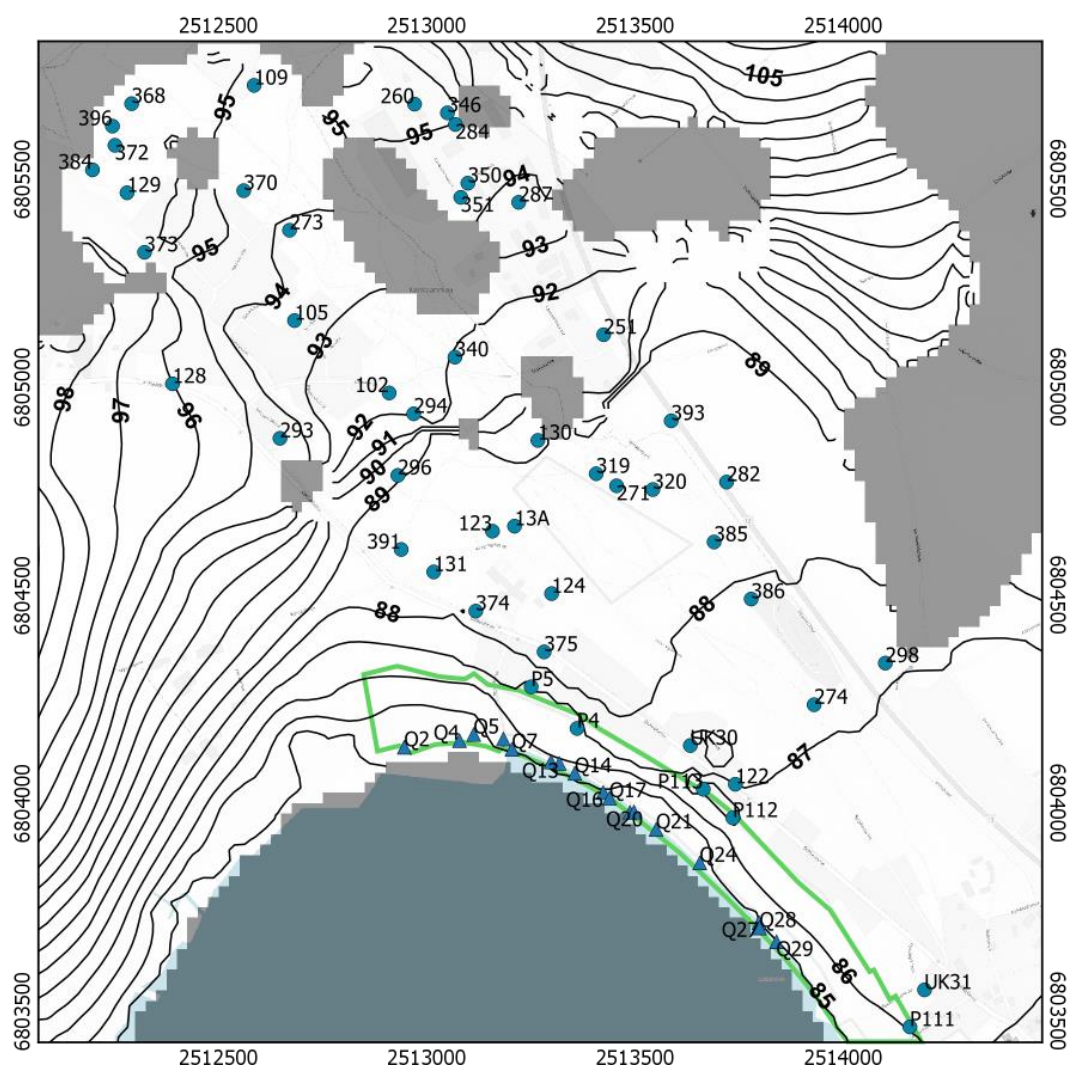
3. Tulokset

3.1 Yleistä

Tuloksissa tarkastellaan sitä, kuinka hyvin mallin laskemat tulokset vastaavat luonnossa mitattuja tuloksia. Vuoden 2019 mallin kalibroinnissa käytettiin luonnontilaisia, mitattuja pohjaveden pinnankorkeuksia sekä imeytys- ja merkkiainekokeessa todettuja ylenemisiä ja alenemisiä imeytys- ja kaivoalueilla. Tuloksissa esitetään lisäksi mallin validointiin käytetyt vuoden 2019 mallilla tosinnetut merkkiainekokeen viipymät havaintopisteillä ja kaivoilla. Lopuksi kalibroidulla ja validoidulla mallilla simuloitiin neljä tekopohjaveden tuotantoskenaariota ja tarkasteltiin erilaisten tuotantoskenaarioiden vaikutuksia alueen pohjaveden pinnankorkeuksiin sekä Keiniänrannan Natura-alueen olosuhteisiin.

3.2 Luonnontilan kuvaaminen vuoden 2019 mallilla

Kuvassa 3 on esitetty vuoden 2019 mallin laskema pohjaveden pinnankorkeus tuotantoalueella TUA3 luonnontilassa. Pohjaveden pinnankorkeus simuloituna vuoden 2011 mallilla on esitetty liitteen 1 kuvassa 1.

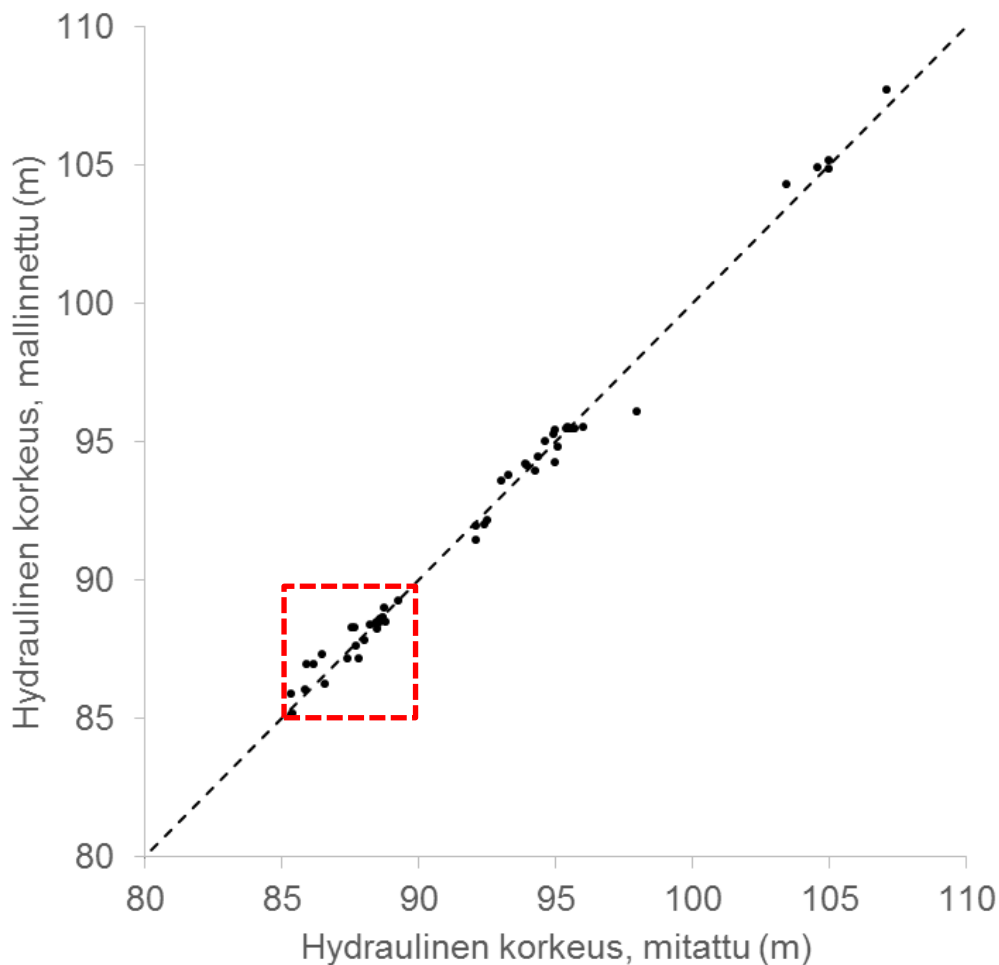


Kuva 3. Vuoden 2019 mallilla simuloitu pohjaveden pinnankorkeus (m) alueella luonnontilassa. Havaintoputket ja yksityiskaivot on esitetty sinisillä ympyröillä ja avo-ojen mittapadot sinisillä kolmioilla. Keiniänrannan Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.

Kuvassa 4 on esitetty mitatut (x-akseli) ja vuoden 2019 mallin laskemat (y-akseli) pohjaveden pinnankorkeudet luonnontilassa koko mallinnetulla alueella. Pinnankorkeudet on mitattu alueen

havaintoputkista ja yksityiskaivoista samana ajankohtana. Jos mallin laskemat pinnankorkeudet vastaisivat täydellisesti mitattuja pohjaveden pinnankorkeuksia, ryhmittyisivät pisteet tarkalleen kuvassa esitetylle 45 asteen katkoviivalle. Pisteiden jäädessä katkoviivan alapuolelle, ovat mallin laskemat pohjaveden pinnankorkeudet alempana kuin mitatut pohjaveden pinnankorkeudet. Pisteiden jäädessä katkoviivan yläpuolelle ovat mallin laskemat pinnankorkeudet ylempänä kuin mitatut pinnankorkeudet.

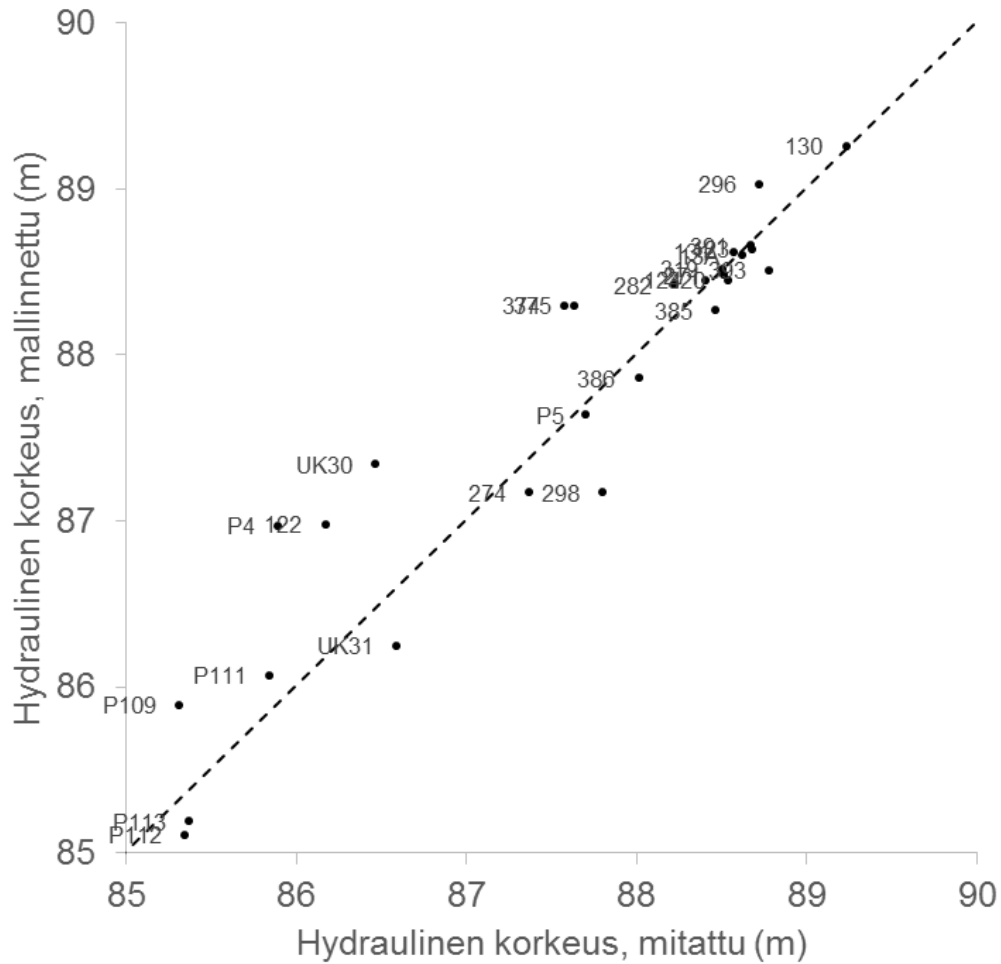
Vuoden 2019 mallin laskemien pohjaveden pinnankorkeuksien keskimääräinen absoluuttinen virhe (MAE) on 0,30 m, kun tarkastelussa on mukana kaikki mallin lähtöaineistona käytetyt pinnankorkeusmittaukset havaintoputkista ja yksityiskaivoista. Vuoden 2011 mallin laskemien tulosten vastaava arvo (MAE) oli 0,52 m (liite 1, kuva 2). Vuoden 2019 mallin laskemien tulosten keskimääräinen absoluuttinen virhe on lähes kaksi kertaa pienempi kuin vuoden 2011 mallin MAE.



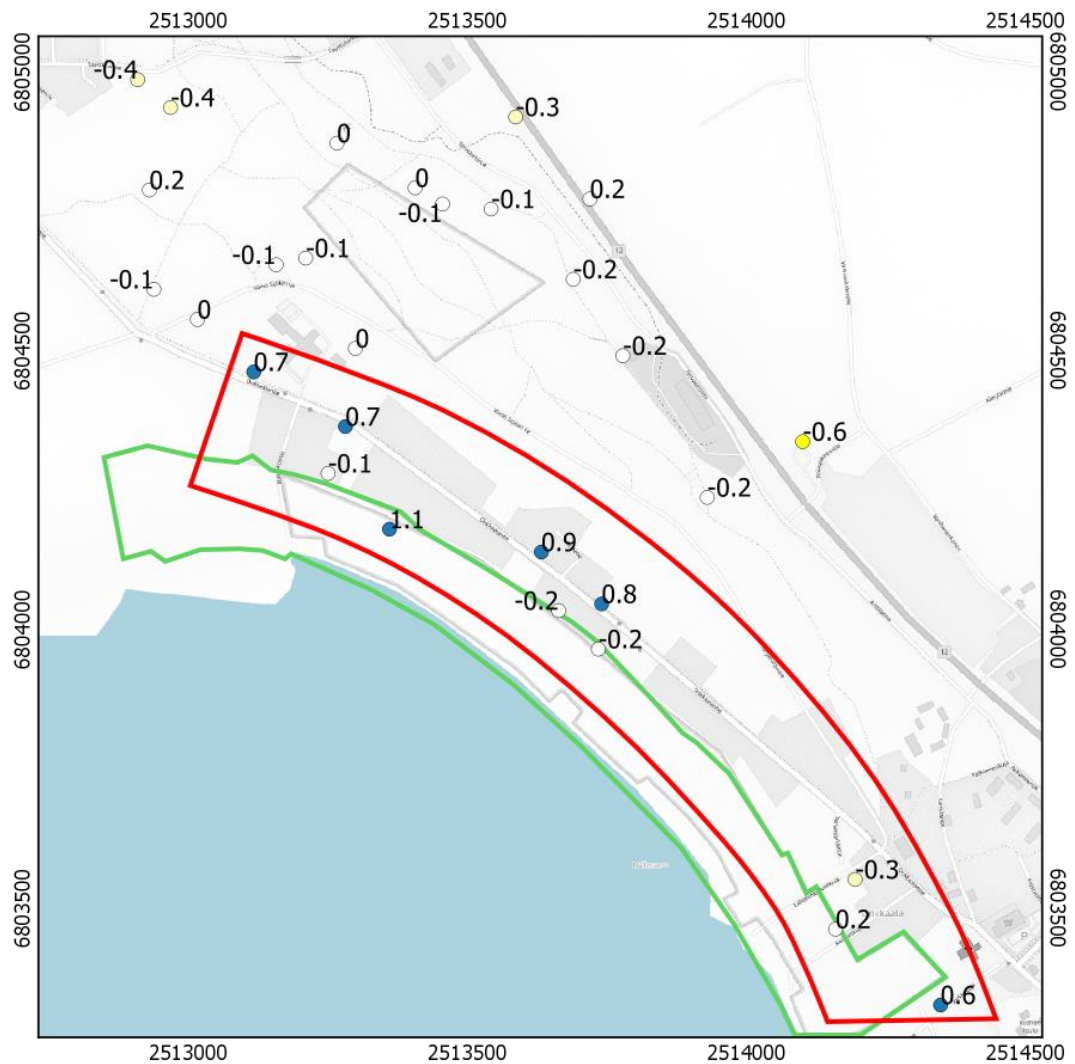
Kuva 4. Mitatut ja vuoden 2019 mallilla simuloidut pohjaveden pinnankorkeudet (m) luonnontilassa. Kuvaajassa on esitetty mitattu ja mallinnettu pohjaveden pinnankorkeus (m) eri havaintopisteissä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe on 0,30 m koko tutkimusalueen havaintopisteissä. Punaisella katkoviivalla rajatut havaintopisteet on esitetty tarkemmin kuvassa 5.

Kuvassa 5 on esitetty kuvassa 4 punaisella katkoviivalla rajatut havaintopisteet suurennettuna. Kuvassa näkyy tarkemmin muun muassa Keiniänrannan läheisyydessä olevien havaintopisteiden tulokset. Kuvaan 5 on lisätty havaintopisteiden tunnuksia ja havaintopisteiden sijainnit on esitetty kuvassa 3. Vuoden 2019 mallilla laskettu MAE on 0,45 m, kun tarkastellaan ainoastaan Keiniänrannan Natura-alueen läheisyydessä olevia havaintopisteitä. MAE on 1,09 m, kun vertailussa käytetään tuloksia, jotka on laskettu vuoden 2011 mallilla (liite 1, kuva 3). Vuoden 2019 mallin MAE on Keiniänrannan Natura-alueen läheisyydessä lähes kaksi ja puoli kertaa pienempi kuin vuoden 2011 mallin laskemista tuloksista laskettu MAE.

Kuvissa 6 ja 7 on esitetty mitattujen ja vuoden 2019 mallilla simuloitujen pohjaveden pinnankorkeuksien väliset erot kartalla. Positiiviset erot tarkoittavat sitä, että mallinnetut pohjavedenpinnat ovat ylempänä kuin mitatut havainnot ja negatiiviset alempana. Kuvassa 6 Keiniänrannan Natura-alueen läheisyydessä olevat havaintopisteet on rajattu punaisella viivalla. Vuoden 2011 mallin erot mitattujen ja mallinnettujen pohjavedenpintojen välillä on esitetty liitteen 1 kuvissa 4 ja 5.

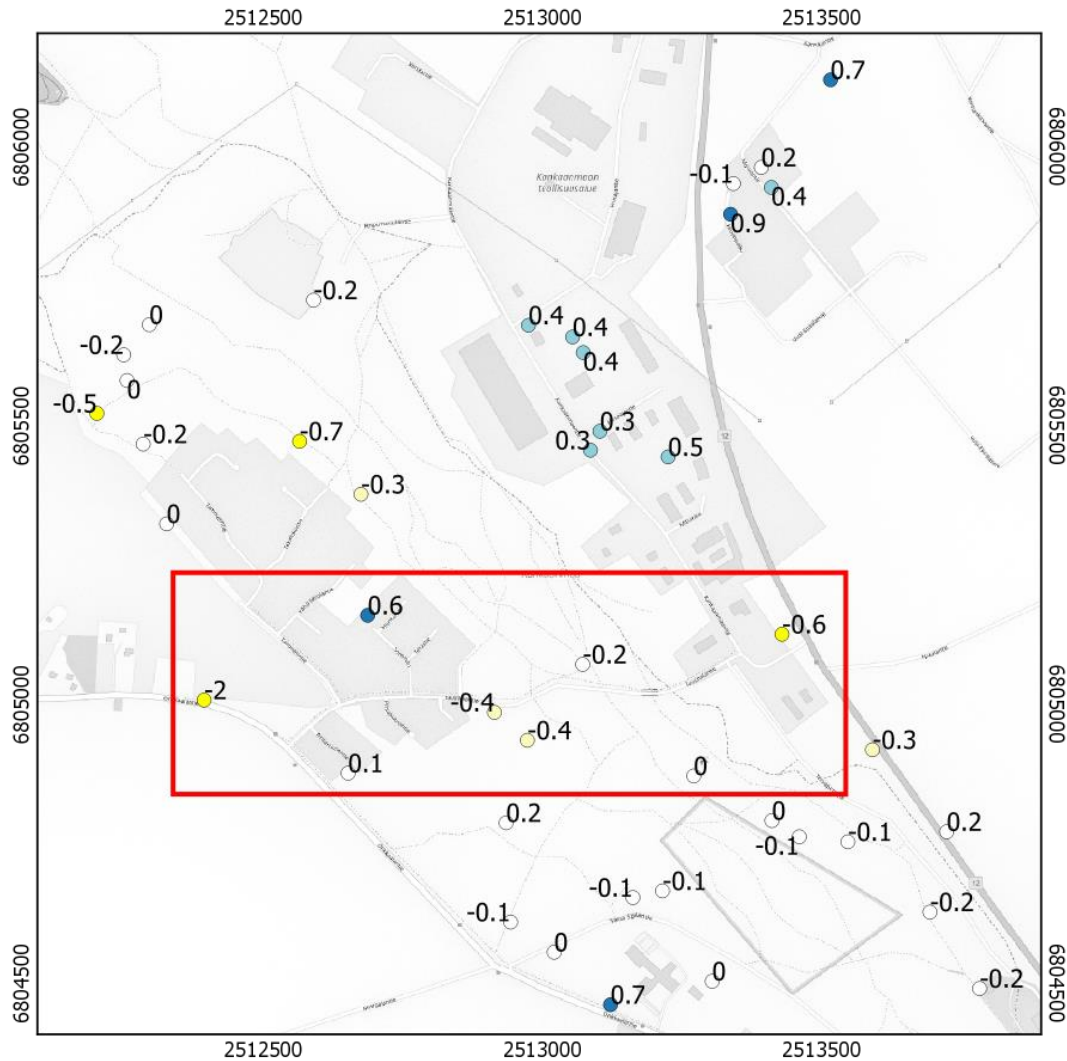


Kuva 5. Mitatut ja vuoden 2019 mallilla simuloidut pohjaveden pinnankorkeudet (m) luonnontilassa Keiniänrannan Natura-alueen läheisyydessä. Kuvaajassa on esitetty mitattu ja mallinnettu pohjaveden pinnankorkeus (m) eri havaintopisteissä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe on 0,45 m Keiniänrannan lähistöllä olevissa mittauspisteissä.



Kuva 6. Mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeustulosten välinen ero (m) luonnontilassa vuoden 2019 mallissa. Keiniänrannan Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla ja sen läheisyydessä olevat havaintopisteet on rajattu punaisella viivalla. Negatiivinen arvo (keltainen) = mallin laskema pohjaveden pinnankorkeus on alempana kuin luonnossa mitattu pinnankorkeus. Positiivinen arvo (sininen) = mallin laskema tulos ylempänä kuin mittaustulos.

Kuvassa 7 on esitetty mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeuksien väliset erot (residuaalit) Taustialantien kynnyksen ympäristössä. Kynnyksen kuvausta tarkennettiin uuden sedimentologisen selvityksen perusteella (luku 2.5.3). Kynnyksen läheisyydessä olevat havaintopisteet on rajattu kuvassa 7 punaisella viivalla. Vuoden 2011 mallin laskemat pinnankorkeudet ovat tarkentuneet useissa putkissa yli 0,5 m. Vuoden 2019 mallin laskemista tuloksista laskettu MAE on Taustialantien kynnyksen ympäristön havaintopisteissä 0,57 m, kun vuoden 2011 mallilla laskettu vastaava arvo oli 1,23 m, eli noin kaksi kertaa suurempi.



Kuva 7. Mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeustulosten välinen ero (m) luonnontilassa vuoden 2019 mallissa. Taustialantien kynnyksen läheisyydessä olevat havaintopisteet on rajattu punaisella viivalla. Negatiivinen arvo (keltainen) = mallin laskema pohjaveden pinnankorkeus on alempana kuin luonnossa mitattu pinnankorkeus. Positiivinen arvo (sininen) = mallin tulos ylempänä kuin mittaustulos.

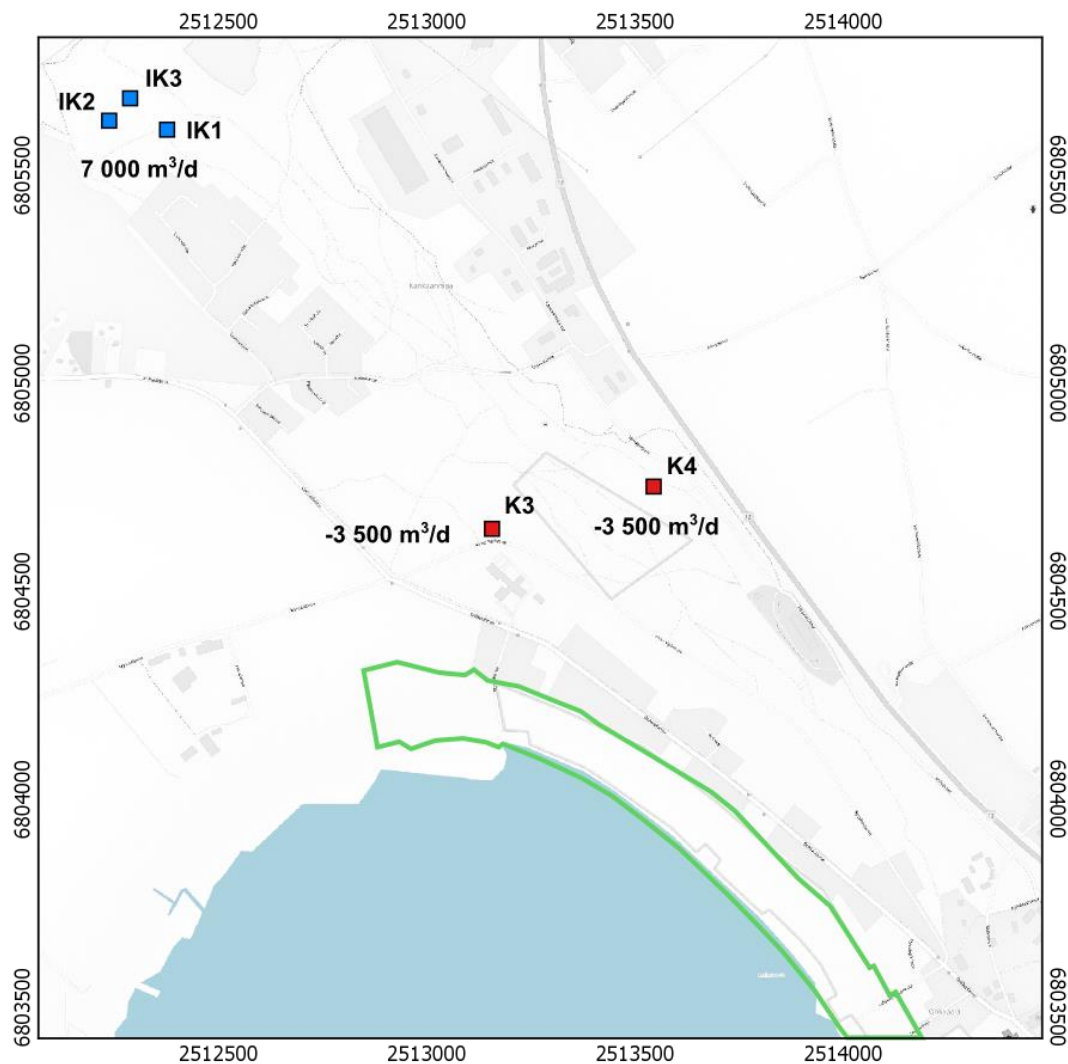
Vuoden 2019 mallin laskema luonnontilassa Keiniänrannassa purkautuvan pohjaveden määrä (virtaama) koko Keiniänrannan alueella on noin 1700 m³/d. Luku kuvaa koko Keiniänrannan alueella tapahtuvaa pohjaveden purkautumista, eikä ainoastaan niissä pisteissä, joissa virtaamia on päästy maastossa mittaamaan. Mitatut virtaamat Keiniänrannan mittapadoilla (kuva 3) olivat yhteensä noin 1070 m³/d vuonna 2008 ja 1100 m³/d vuonna 2009. Mallin laskemien ja luonnossa mitattujen arvojen väliset erot johtuvat siitä, että koko Keiniänrannan alueella purkautuvaa pohjavesimäärää ei pystytä saamaan kiinni mittapadoilla. Lisäksi maanomistajat ovat kieltäneet joidenkin avo-ojien virtaamien mittaamisen, joka puolestaan vähentää mitatun virtaaman kokonaismäärää. Näiden seikkojen perusteella voidaan mallin laskemien ja luonnossa mitattujen Keiniänrannan virtaamien vastaavan hyvin toisiaan eli vuoden 2019 mallia voidaan pitää myös tältä osin luotettavana.

3.3 Imeytys- ja merkkiainekokeen kuvaaminen vuoden 2019 mallilla

Vuoden 2019 mallin toimivuutta tuotantotilanteessa tarkasteltiin simuloimalla vuosina 2009–2010 toteutettu imeytys- ja merkkiainekoe (Pöyry 2011) mallilla. Imeytys- ja merkkiainekokeessa imeytettiin imeytyskaivoille IK1-IK3 enimmillään (luku 2.5.4) 7 000 m³/d ja kaivoilta K3 ja K4 pumpattiin yhteensä enimmillään 7 000 m³/d (kuva 8).

Kuvassa 9 on esitetty punaisella värillä mallin laskemat alenemat imeytys- ja merkkiainekokeen tasapainotilanteessa ja ylenemät on esitetty sinisellä värillä. Mallin laskemat alenemat tuotantokaivojen ympärillä olivat noin 0,6 m (kuva 9) ja ne vastasivat mitattuja alenemia imeytyskokeen loppuvaiheessa. Imeytyskokeessa saavutettiin osittainen tasapainotilanne (kuva C liitteessä 3) ja alenemat kaivojen ympäristössä olisivat pienentyneet vielä lisää, jos koetta olisi jatkettu. Mallin laskemat ylenemät imeytysalueella (IK1-IK3) olivat noin 2,0 m eli noin 0,5 m pienemmät kuin mitatut ylenemät alueella (kuva 9). Mallin laskemat alenemat ja ylenemät vastasivat näin ollen hyvin kokeen loppuvaiheessa mitattuja alenemia ja ylenemiä ja tämän perusteella voidaan arvioida vuoden 2019 virtausmallin olevan luotettava myös tuotantotilanteessa.

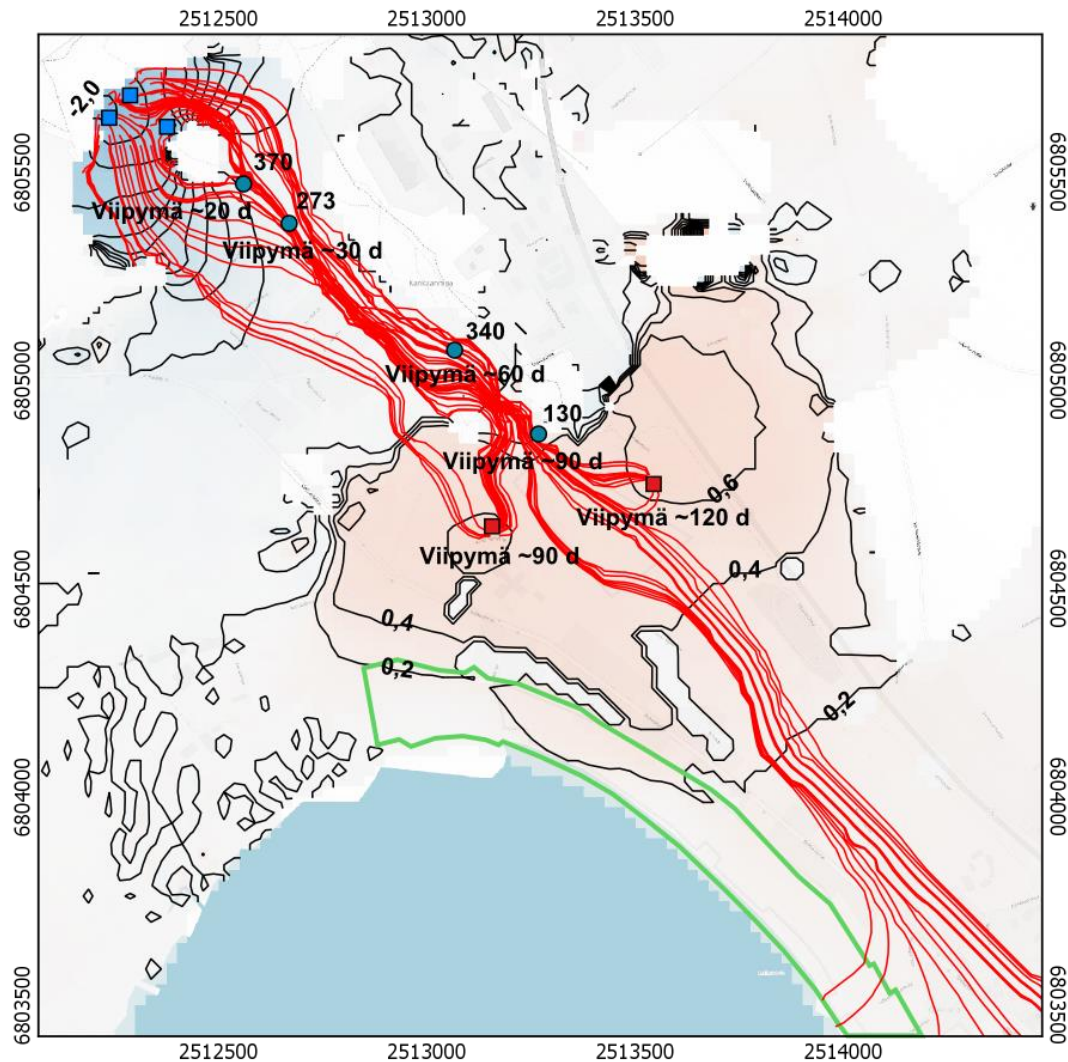
Vuoden 2011 mallilla simuloiduissa tuloksissa alenemat tuotantokaivojen ympäristössä (K3 ja K4) olivat noin 2,6 m eli noin 2 m liian suuria (liite 1, kuva 7), eivätkä näin ollen kuvanneet kokeen tasapainotilannetta.



Kuva 8. Imeytys- ja merkkiainekoe. Kaivojen sijainnit sekä imeytys- ja pumppausmäärät. Kokeessa imeytettiin enintään 7 000 m³/d vettä alueen luoteispäähän (imeytyskaivot IK1–IK3) ja pumpattiin yhteensä enintään 7 000 m³/d vettä kaivoilta K3 ja K4. Keiniänrannan Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.

Vuoden 2019 malli validoitiin merkkiainekokeessa mitattujen viipymien avulla. Tätä aineistoa ei käytetty mallin kalibroimisessa. Imeytys- ja merkkiainekokeessa todettu keskimääräinen viipymä imeytysalueelta kaivolle K3 oli 81 päivää ja kaivolle K4 104 päivää. Vuoden 2019 mallilla lasketut vastaavat lyhimmat viipymät olivat noin 90 ja 120 päivää. Mallinnetut lyhimmat viipymät havaintoputkille 370, 273, 340 ja 130 olivat noin 20, 30, 60 ja 90 päivää. Mitatut viipymät havaintoputkille 370, 273, 340 ja 130 olivat noin 10, 24, 47 ja 81 päivää.

Mallin laskemat viipymät perustuvat malliin syötettyihin vedenjohtavuusarvioihin, jotka ovat yleistys alueen olosuhteista. Luonnossa vedenjohtavuudet ovat heterogeenisempiä ja vedellä on kahden pisteen välillä nopeampia ja hitaampia reittejä. Simuloidut viipymät havaintoputkille ja kaivoille vastasivat hyvin kokeessa mitattuja viipymiä. Mallin hyvän validointituloksen perusteella voidaan myös todeta, että vuoden 2019 malli on luotettava tuotantotilanteessa.



Kuva 9. Imeytys- ja merkkiainekoe simuloituna vuoden 2019 mallilla. Kokeen aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat pohjaveden päävirtausreitit. Viipymät imeytys- ja vedenottoaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Kuvassa on myös esitetty mallinnetut viipymät havaintoputkille 370, 273, 340 ja 130.

3.4 Tuotantoskenaariot

3.4.1 Tuotantoskenaarioiden toteutus

Suunniteltua tekopohjaveden tuotantomäärää on pienennetty tuotantoalueella TUA3 aikaisemmasta 20 000 m³/d arvoon 12 000 m³/d ja tämän vuoksi tuotannon toteutussuunnitelma poikkeaa aikaisemmasta (esim. Pöyry 2011). Vuoden 2019 mallilla simuloitiin lukuisia tekopohjaveden tuotantoskenaariota, joissa jälleenimeytettävän vesimäärän sekä vedenottomäärän painotuksia muutettiin eri alueiden välillä. Skenaarioista valittiin neljä (A, B, C ja D), joissa vaikutukset Keiniänrannan Natura-alueelle purkautuvaan vesimäärään ovat alle 5 %. Tällöin varmistutaan siitä, että Natura-alueen olosuhteet eivät muutu ajan kuluessa laitoksen toiminnan vuoksi. Skenaarioissa esitetyt viipymät ovat lyhimpiä mallin laskemat viipymät esitetyille kaivoille, keskimääräiset viipymät ovat pidempiä. Laskentamallissa ei

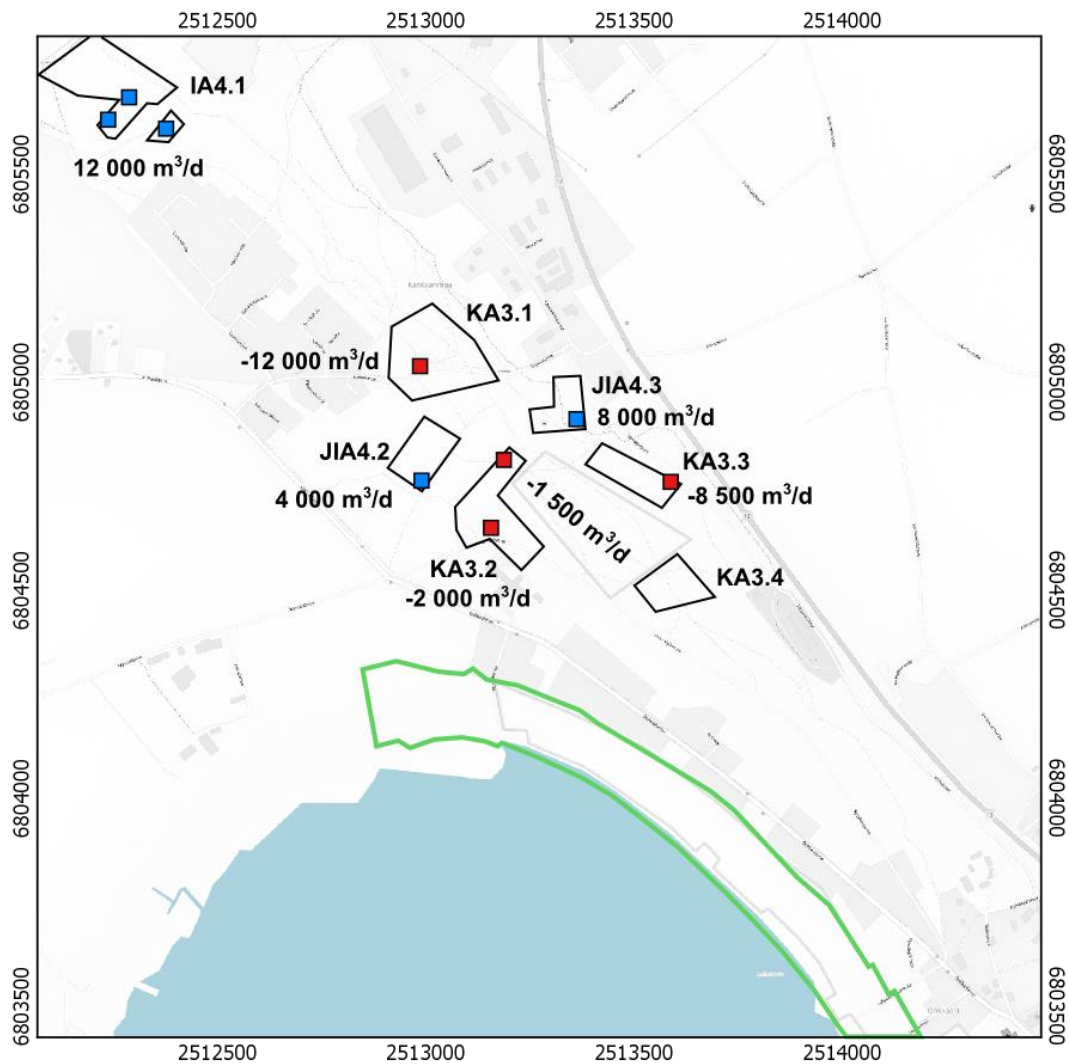
kuvata orsiveden liikkeitä, eikä tekopohjavesilaitoksen toiminta vaikuta orsiveden määrään tai liikkeisiin.

Esitetyissä skenaarioissa raakavesi imeytetään alueen luoteisosassa sijaitsevalle imeytysalueelle (IA4.1). Pohjaveden pinnankorkeuden tulee pysyä imeytysalueen IA4.1 luoteispuolella sijaitsevan kynnyksen kallionpinnan alapuolella, jolloin imeytetty vesi ei virtaa Kinnalan vedenottamoa kohti. Kairausaineiston sekä pohjaveden pintahavaintojen perusteella on laskettu, että pohjaveden pinnankorkeus imeytysalueella IA4.1 saa nousta aina noin tasolle +105 m mpy ilman, että imeytettyä vettä kulkeutuu Kinnalan vedenottamon suuntaan kalliokynnyksen yli. Tuotantoskenaarioissa on tarkasteltu vedenpinnan korkeutta imeytysalueella ja pinnankorkeutta tullaan seuraamaan pohjaveden pinnankorkeuksien tarkkailun avulla.

Vesi siirretään Taustialantien kynnyksen yli pumpaamalla se ensin ylös kynnyksen luoteispuolella kaivoalueella KA3.1 ja imeyttämällä se jälleenimeytysalueille JIA4.2 ja JIA4.3 kynnyksen kaakkoispuolella. Näin varmistetaan riittävä hydraulinen yhteys imeytysalueen IA4.1 ja kaivoalueiden välillä ja estetään veden patoutumista Taustialantien kynnyksen taakse. Kaivoalueet KA3.1 KA3.2 ja KA3.4 on sijoitettu kokonaan tai osittain harjuyttimeen, mutta muut imeytys- ja kaivoalueet on sijoitettu harjuytimen ulkopuolelle. Imeytys- ja kaivoalueet on sijoitettu paikkoihin, jotka on määritetty sedimentologisin ja hydrogeologisin perustein. Tämä takaa tekopohjavesilaitoksen toimivuuden ja hyvälaatuisen tekopohjaveden tuottamisen Syrjänharjun luonnonsuojelun luoteis- ja kaakkoispuolille sijoitetaan kaivoja, joilla voidaan säädellä harjun ytimessä virtaavan pohjaveden määrää.

3.4.2 Tuotantoskenaario A (lisäkaivo luonnonsuojelun luoteispuolella)

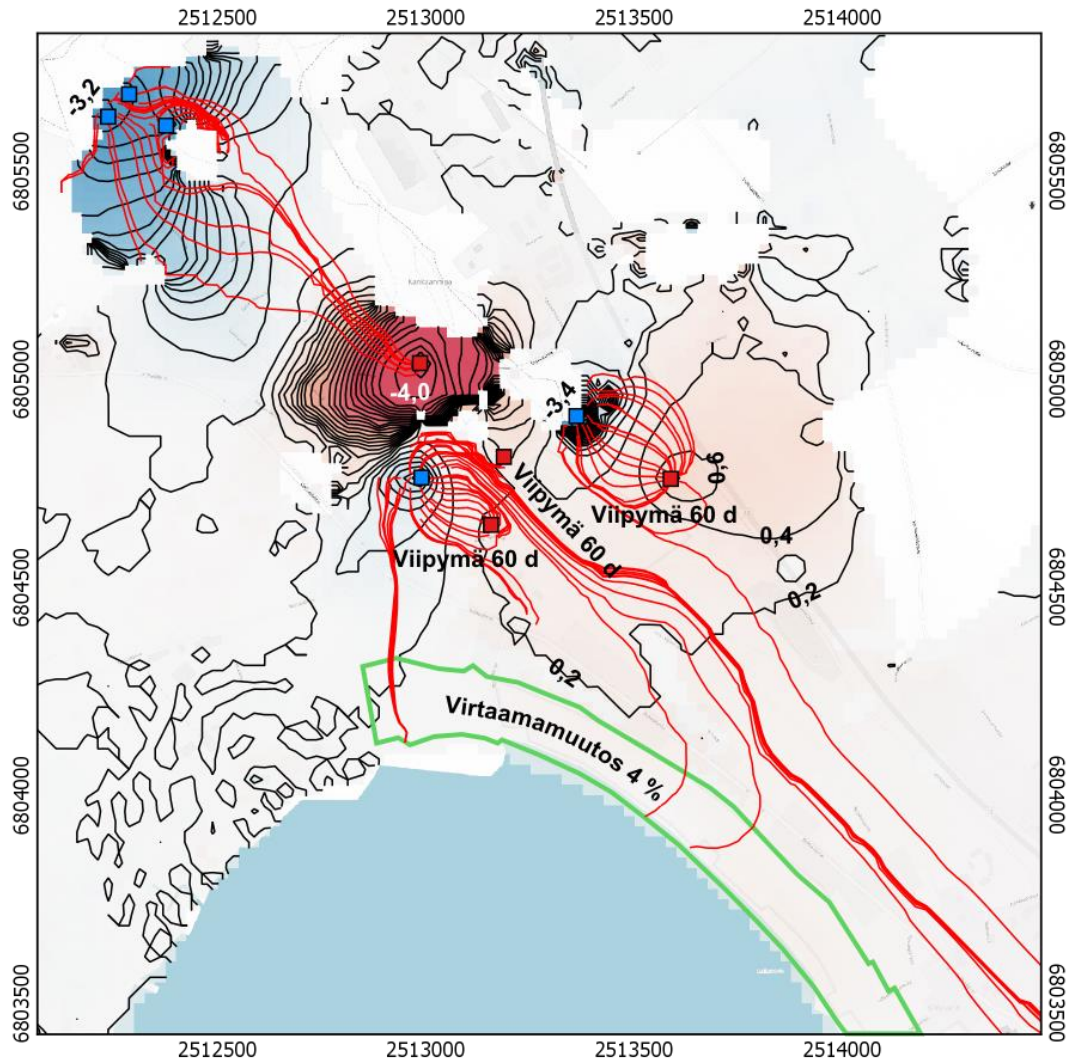
Tuotantoskenaariossa A imeytetään 12 000 m³/d raakavettä imeytysalueelle IA4.1 (kuva 10). Sama vesimäärä pumpataan ylös Taustialantien kynnyksen pohjoispuolella kaivoalueella KA3.1 ja siitä 4 000 m³/d imeytetään jälleenimeytysalueelle JIA4.2 ja 8 000 m³/d jälleenimeytysalueelle JIA4.3. Tekopohjavettä otetaan kaivoalueelta KA3.2 yhteensä 3 500 m³/d. Määrään sisältyy 1 500 m³/d vedenotto kaivoalueella KA3.2 luonnonsuojelun luoteispuolella sijaitsevasta kaivosta. Suurin vesimäärä (8 500 m³/d) pumpataan kaivoalueelta KA3.3.



Kuva 10. Tuotantoskenaario A. Kaivojen sijainnit sekä imeytys- ja vedenottomäärät. Skenaariossa imeytetään 12000 m³/d raakavettä alueen luoteispäähän (IA4.1) ja otetaan 12000 m³/d tekopohjavettä kaivoalueilta KA3.2 ja KA3.3. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.

Ylenmä imeytysalueella IA4.1 on noin 3,2 m ja jälleenimeytysalueella JIA4.3 noin 3,4 m. Pohjavedenpinta imeytysalueella IA4.1 pysyy skenaariossa selvästi tason +105 m alapuolella, jolloin imeytettyä vettä ei virtaa Kinnalan vedenottamolle. Tuotantoskenaariossa A pohjavedenpinta laskee Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat pienenevät noin 4 % (kuva 11).

Veden viipymät imeytysalueelta IA4.1 kaivoalueelle KA3.1 ovat noin 30 päivää. Viipymät jälleenimeytysalueelta JIA4.2 kaivoalueelle KA3.2 ovat yli 20 päivää ja viipymät jälleenimeytysalueelta JIA4.3 kaivoalueelle KA3.3 ovat noin 30 päivää. Viipymät jälleenimeytysalueelta JIA4.2 kaivoalueelle KA3.2 luonnonsuojelualan luoteispuolella sijaitsevalla kaivolle on yli 20 päivää. Kokonaisviipymä, noin 60 päivää, koostuu virtausreittien viipymien summasta.



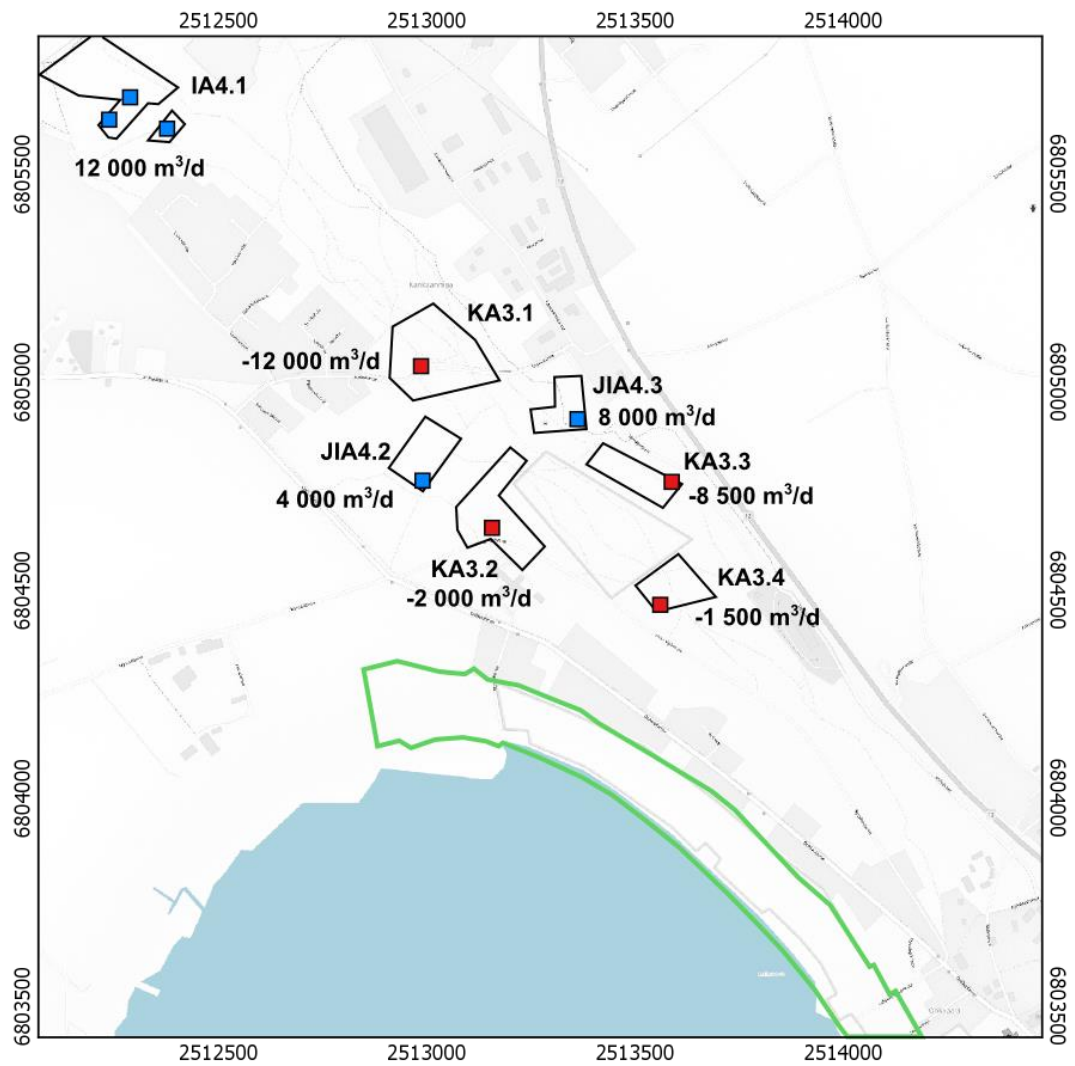
Kuva 11. Tuotantoskenaario A. Tuotannon aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat veden päävirtausreittejä. Viipymät kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Pinnankorkeudet laskevat Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat noin 4 %.

3.4.3 Tuotantoskenaario B (lisäkaivo luonnonsuojelualan kaakkoispuolella)

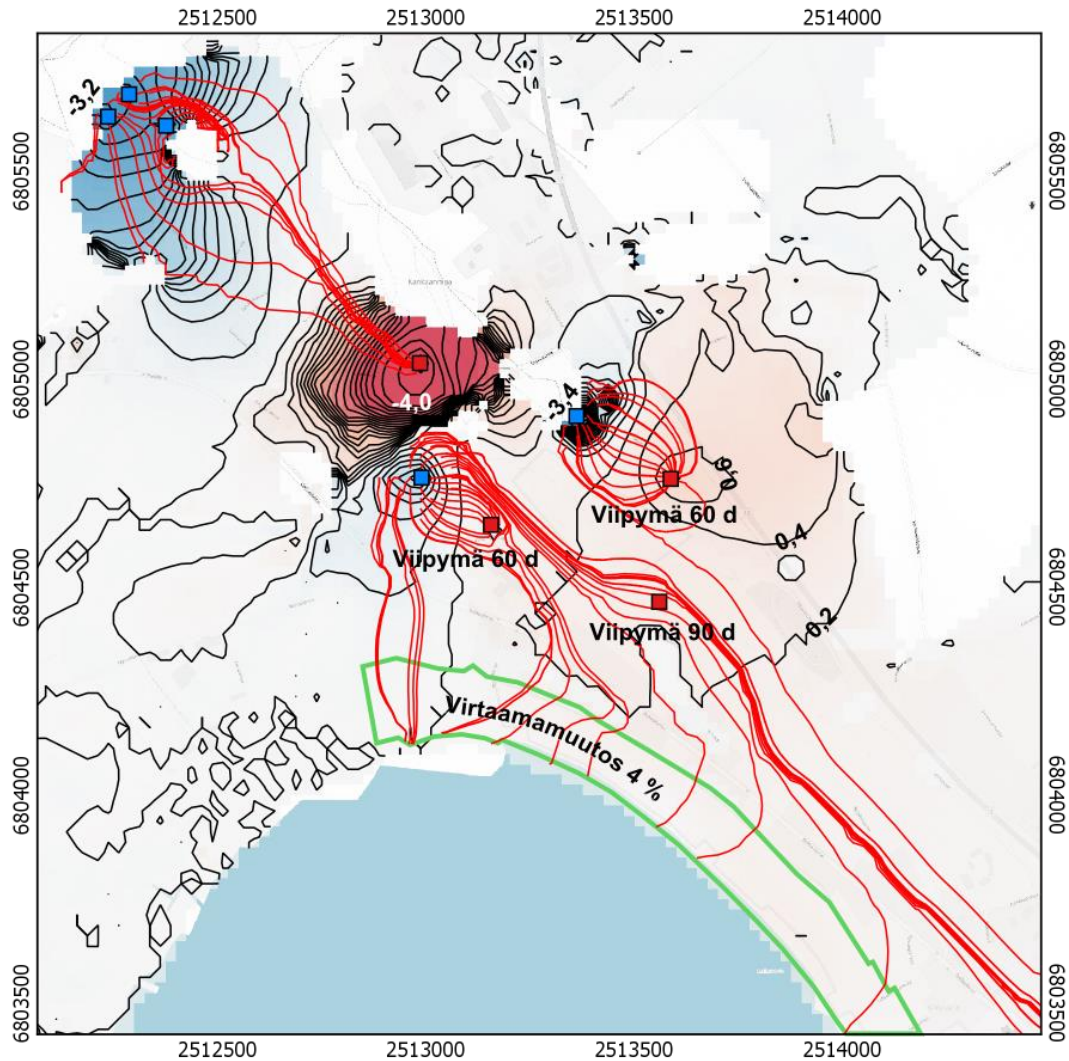
Tuotantoskenaariossa B imeytetään 12 000 m³/d raakavettä imeytysalueelle IA4.1 (kuva 12). Sama vesimäärä pumpataan ylös Taustialantien kynnyksen pohjoispuolella kaivoalueelta KA3.1 ja siitä 4 000 m³/d imeytetään jälleenimeytysalueelle JIA4.2 ja 8 000 m³/d jälleenimeytysalueelle JIA4.3. Tekopohjavettä otetaan kaivoalueelta KA3.2 2 000 m³/d. Luonnonsuojelualan kaakkoispuolella kaivoalueella KA3.4 sijaitsevalta harjuyttimeen sijoitetulta kaivolta otetaan tekopohjavettä 1 500 m³/d. Suurin vesimäärä (8 500 m³/d) pumpataan kaivoalueelta KA3.3.

Ylenemät imeytysalueella IA4.1 ovat noin 3,2 m ja jälleenimeytysalueella IA4.3 noin 3,4 m. Pohjavedenpinta imeytysalueella IA4.1 pysyy skenaariossa selvästi tason +105 m alapuolella, jolloin imeytettyä vettä ei virtaa Kinnalan vedenottamolle. Tuotantoskenaariossa B pohjavedenpinta laskee Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat pienenevät noin 4 % (kuva 13).

Veden viipymät imeytysalueelta IA4.1 kaivoalueelle KA3.1 ovat noin 30 päivää. Viipymät jälleenimeytysalueelta JIA4.2 kaivoalueelle KA3.2 ovat yli 20 päivää ja viipymät jälleenimeytysalueelta JIA4.3 kaivoalueelle KA3.3 ovat noin 30 päivää. Viipymät imeytysalueelta JIA4.2 luonnonsuojelualan kaakkoispuolen lisäkaivolle kaivoalueella KA3.4 ovat noin 60 päivää. Kokonaisviipymät koostuvat virtausreittien viipymien summasta ja ovat tässä tapauksessa noin 60 päivää kaivoalueille KA3.2 ja KA3.3 ja 90 päivää kaivoalueelle KA3.4.



Kuva 12. Tuotantoskenaario B. Kaivojen sijainnit sekä imeytys- ja vedenottomäärät. Skenaariossa imeytetään 12000 m³/d raakavettä alueen luoteispäähän (IA4.1) ja otetaan 12000 m³/d tekopohjavettä kaivoalueilta KA3.2–KA3.4. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.



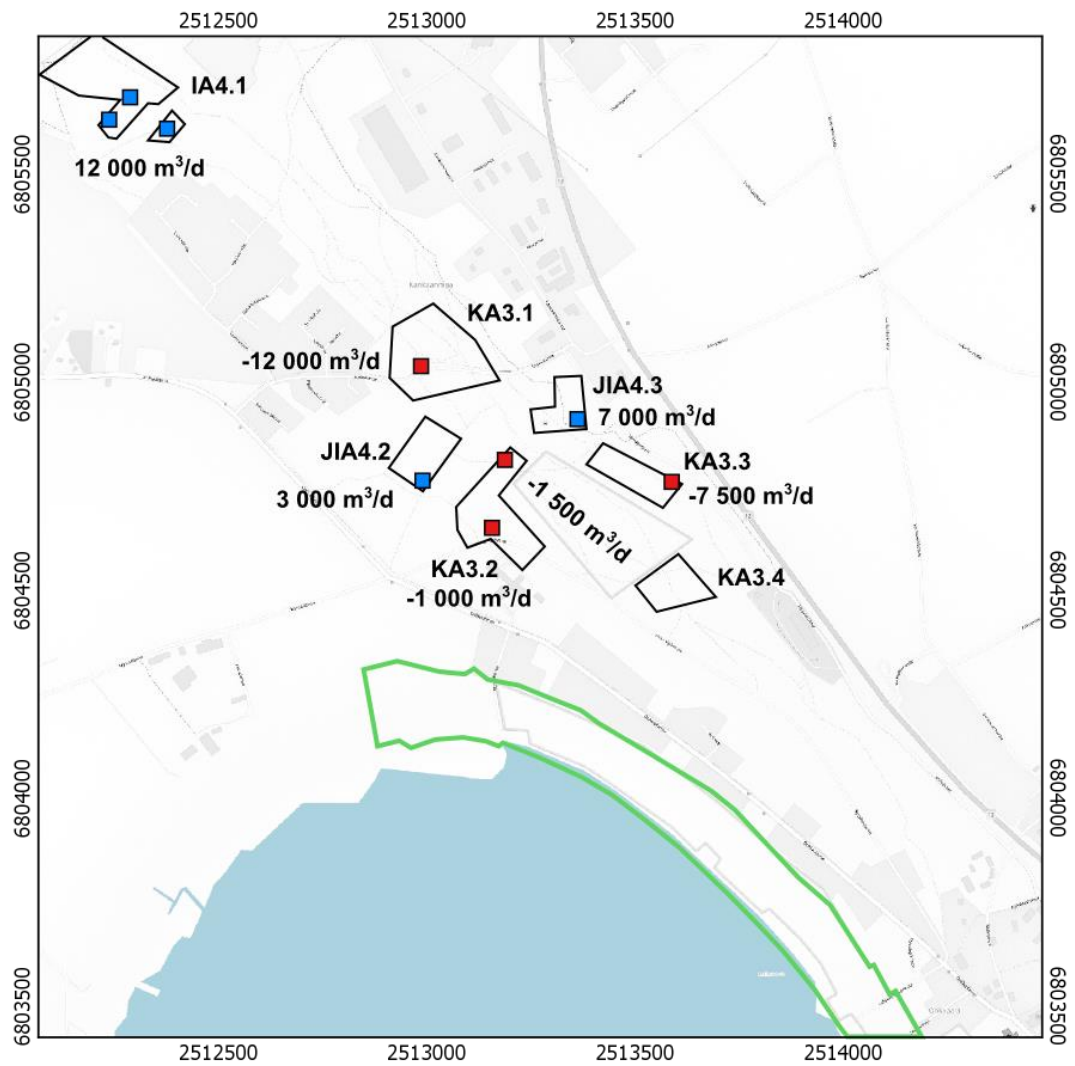
Kuva 13. Tuotantoskenaario B. Tuotannon aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat veden päävirtausreittejä. Viipymät kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Pinnankorkeudet laskevat Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat noin 4 %.

3.4.4 Tuotantoskenaario C (2000 m³/d tuotantoon kynnykseltä)

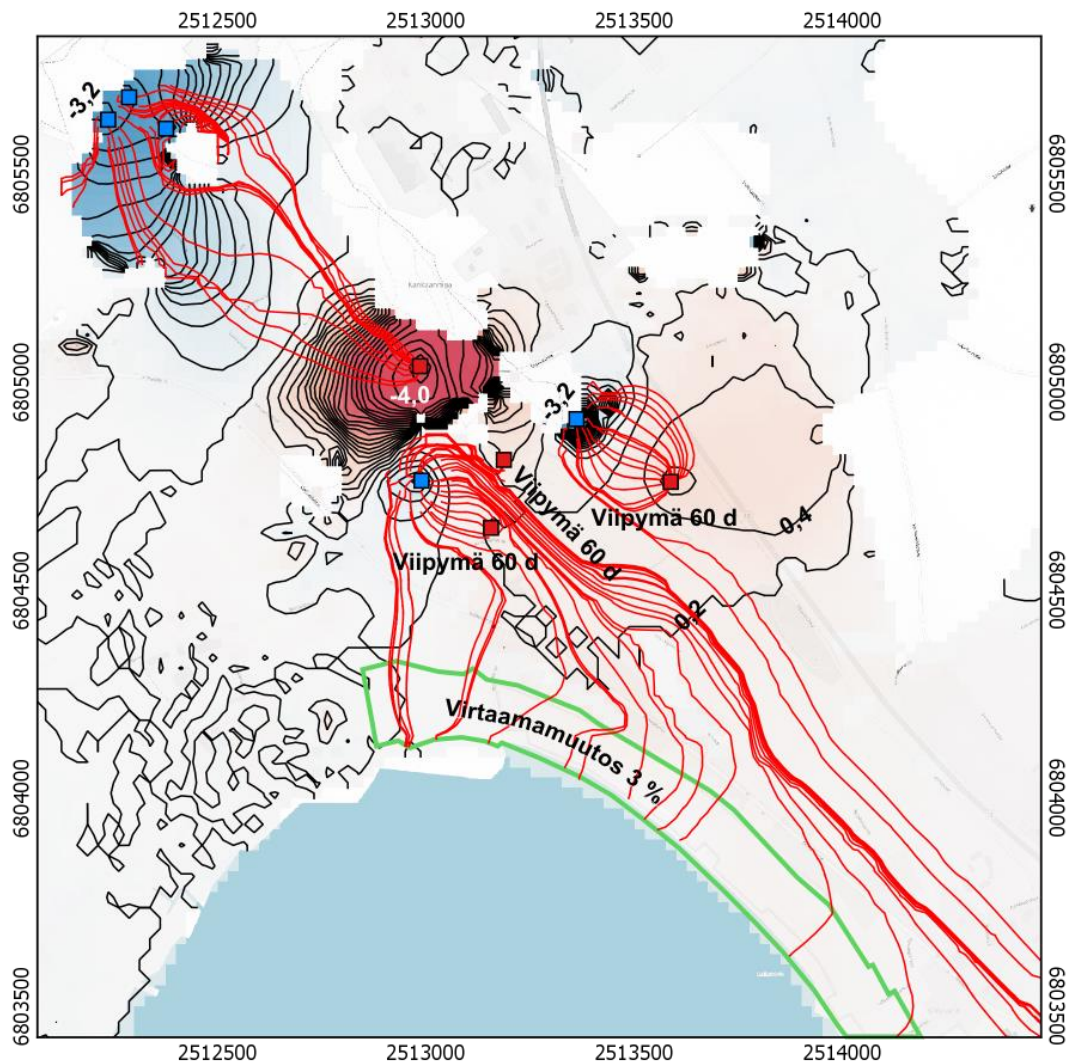
Tuotantoskenaariossa C imeytetään 12 000 m³/d raakavettä imeytysalueelle IA4.1 (kuva 14). Taustialantien kynnyksen pohjoispuolella kaivoalueella KA3.1 pumpataan ylös 12 000 m³/d, josta 2 000 m³/d johdetaan tuotantoon ja 10 000 m³/d jälleenimeytetään jälleenimeytysalueille JIA4.2 (3 000 m³/d) ja JIA4.3 (7 000 m³/d). Tekopohjavettä otetaan kaivoalueelta KA3.2 yhteensä 2 500 m³/d. Määrään sisältyy 1 500 m³/d vedenotto kaivoalueella KA3.2 luonnonsuojelualan luoteispuolella sijaitsevasta kaivosta, joka asennetaan harjuyttimeen. Suurin vesimäärä (7 500 m³/d) pumpataan kaivoalueelta KA3.3.

Ylenemät imeytysalueilla IA4.1 ja JIA4.3 ovat noin 3,2 m. Pohjavedenpinta imeytysalueella IA4.1 pysyy skenaariossa selvästi tason +105 m alapuolella, jolloin imeytettyä vettä ei virtaa Kinnalan vedenottamolle. Tuotantoskenaariossa C pohjavedenpinta laskee Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat pienenevät noin 3 % (kuva 15).

Veden viipymät imeytysalueelta IA4.1 kaivoalueelle KA3.1 ovat noin 30 päivää. Viipymät jälleenimeytysalueelta JIA4.2 kaivoalueelle KA3.2 ja jälleenimeytysalueelta JIA4.3 kaivoalueelle KA3.3 ovat alle 30 päivää. Viipymät jälleenimeytysalueelta JIA4.2 kaivoalueen KA3.2 lisäkaivolle ovat yli 20 päivää. Kokonaisviipymä koostuu virtausreittien viipymien summasta ja on tässä tapauksessa noin 60 päivää.



Kuva 14. Tuotantoskenaario C. Kaivojen sijainnit ja imeytys- ja vedenottomäärät. Skenaariossa imeytetään 12000 m³/d raakavettä alueen luoteispäähän (IA4.1) ja otetaan 12000 m³/d tekopohjavettä kaivoalueilta KA3.1, KA3.2 ja KA3.3. Skenaariossa johdetaan 2000 m³/d talousvedeksi kaivoalueelta KA3.1. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.



Kuva 15. Tuotantoskenaario C. Tuotannon aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat veden päävirtausreittejä. Viipymät kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Pinnankorkeudet laskevat Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat noin 3 %.

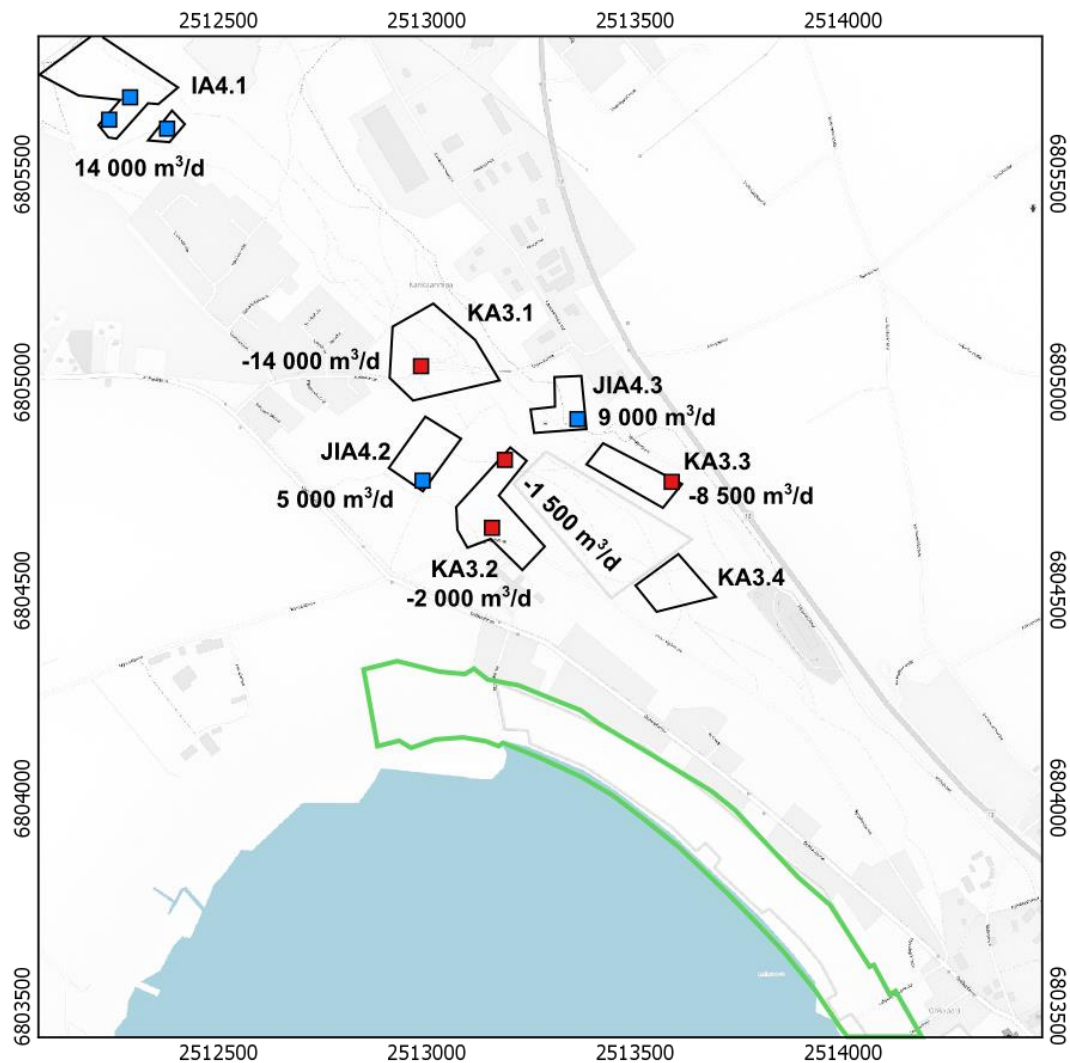
3.4.5 Tuotantoskenaario D (2000 m³/d yli-imeytys)

Tuotantoskenaariossa D imeytetään 14 000 m³/d (sisältää 2 000 m³/d yli-imeytyksen) raakavettä imeytysalueella IA4.1 ja tuotetaan yhteensä 12 000 m³/d tekopohjavettä kaivoalueilla KA3.2 ja KA3.3 (kuva 16). Imeytettävä vesimäärä (14 000 m³/d) pumpataan ylös Taustialantien kynnyksen luoteispuolella kaivoalueella KA3.1 ja siitä 5 000 m³/d imeytetään jälleenimeytysalueelle JIA4.2 ja 9 000 m³/d jälleenimeytysalueelle JIA4.3. Tekopohjavettä otetaan kaivoalueelta KA3.2 yhteensä 3 500 m³/d. Määrään sisältyy 1 500 m³/d vedenotto kaivoalueella KA3.2 luonnonsuojelun luoteispuolella sijaitsevasta kaivosta, joka asennetaan harjuyttimeen. Suurin vesimäärä (8 500 m³/d) pumpataan kaivoalueelta KA3.3.

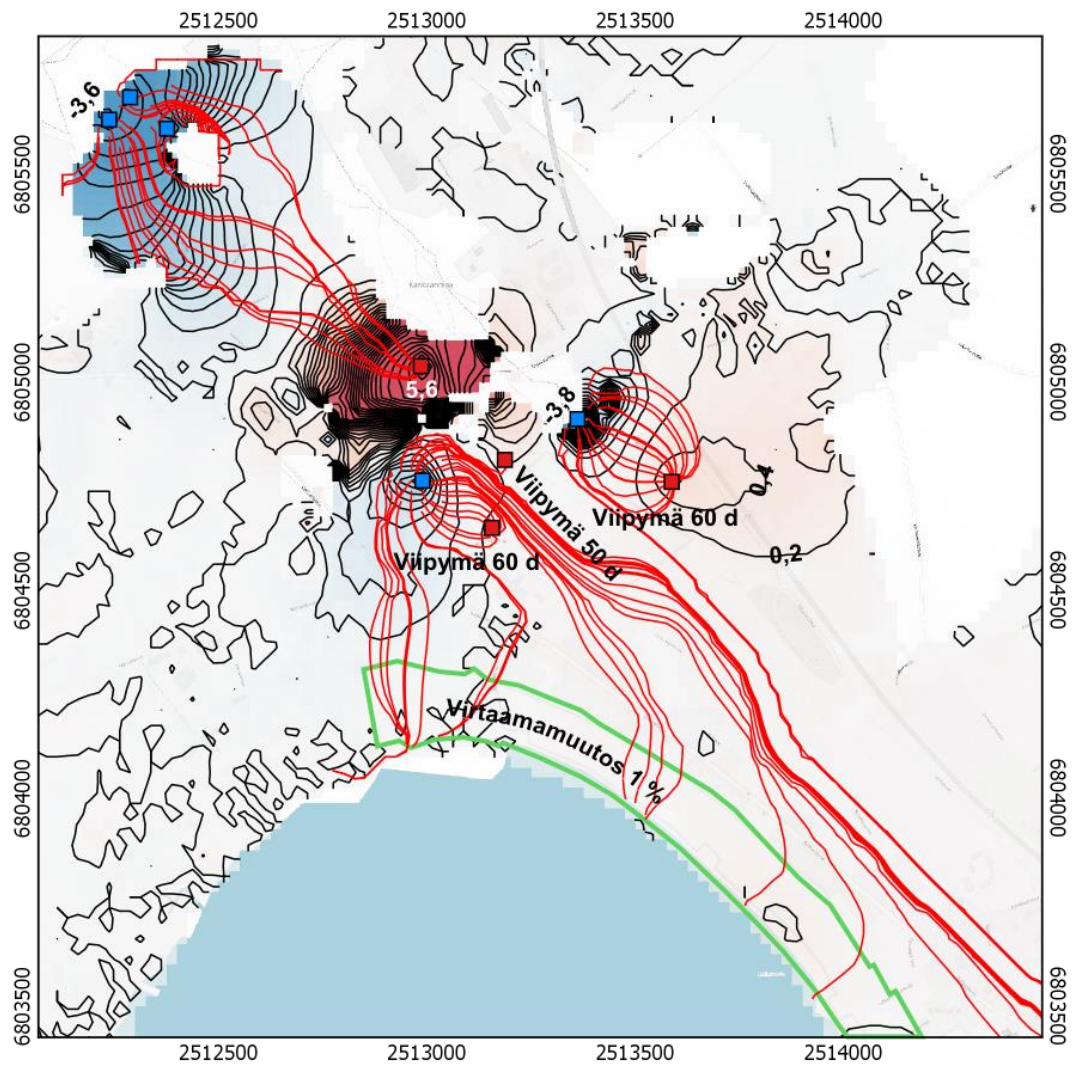
Ylenemät imeytysalueella IA4.1 ovat noin 3,6 m ja imeytysalueella JIA4.3 noin 3,8 m. Pohjavedenpinta imeytysalueella IA4.1 pysyy skenaariossa selvästi tason +105 m alapuolella, jolloin imeytettyä vettä ei virtaa Kinnalan vedenottamolle. Tuotantoskenaariossa D pohjavedenpinta laskee Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat pienenevät noin 1 % (kuva 17).

Veden viipymät imeytysalueelta IA4.1 kaivoalueelle KA3.1 ovat noin 30 päivää. Viipymät jälleenimeytysalueelta JIA4.2 kaivoalueelle KA3.2 ja jälleenimeytysalueelta JIA4.3 kaivoalueelle KA3.3 ovat alle 30 päivää. Viipymät imeytysalueelta JIA4.2 kaivoalueen KA3.2 lisäkaivolle ovat yli 20 päivää. Kokonaisviipymä koostuu virtausreittien viipymien summasta ja on tässä tapauksessa noin 50 tai 60 päivää.

Mallilla laskettiin myös kokonaisviipymiä imeytysalueelta IA4.1 Keiniänrantaan (Liite 2, kuva 1) tuotantoskenaariossa D. Virtausreitti koostuu matkasta imeytysalueelta IA4.1 kaivoalueelle KA3.1 ja jälleenimeytysalueelta JIA4.2 Keiniänrannan Natura-alueen rajalle. Lyhimmät viipymät tuotantotilanteessa ovat noin 280 päivää.



Kuva 16. Tuotantoskenaario D. Kaivojen sijainnit ja imeytys- ja vedenottomäärät. Skenaariossa yli-imeytetään 14000 m³/d raakavettä alueen luoteispäähän (IA4.1) ja otetaan 12000 m³/d tekopohjavettä kaivoalueilta KA3.2 ja KA3.3. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.



Kuva 17. Tuotantoskenaario D. Tuotannon aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Punaiset viivat kuvaavat veden päävirtausreittejä. Viipymät kaivojen välillä on esitetty päivinä (d). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla. Pinnankorkeudet laskevat Keiniänrannassa alle 0,2 m ja virtaamat noin 1 %.

4. Yhteenveto ja johtopäätökset

Vuonna 2011 laaditun pohjaveden virtausmallin (Artimo ym. 2011) toimintaa tarkennettiin onnistuneesti uusien mittausten sekä sedimentologisten ja hydrogeologisten selvitysten perusteella. Vuoden 2019 mallin laskemat luonnontilan pohjaveden pinnankorkeudet vastaavat luonnontilassa mitattuja pohjaveden pinnankorkeuksia ja mallin laskemat imeytys- ja merkkiainekokeen alenemat ja ylenemät vastaavat kokeen aikana luonnossa mitattuja alenemia ja ylenemiä. Tällä perusteella vuoden 2019 virtausmallin kalibrointitulokset on hyvä. Lisäksi vuoden 2019 mallin validointi on onnistunut, koska mallin laskemat viipymät vastaavat imeytys- ja merkkiainekokeessa mitattuja viipymiä. Vuoden 2019 mallilla laskettujen tulosten vertaaminen vuoden 2011 mallilla laskettuihin tuloksiin osoittaa, että mallin toimintaa on tarkennettu merkittävästi. Vuoden 2019 malli toimii koko alueella ja erityisesti mallin reuna-alueilla sekä Taustialantien kynnyksen kohdalla paremmin kuin alkuperäinen vuoden 2011 malli. Tulosten mukaan vuoden 2019 malli on riittävän tarkka tekopohjaveden tuotantoskenaarioiden tekemiseen ja tekopohjaveden tuotannon vaikutusten arvioimiseen tutkimusalueella TUA3.

Luonnossa mitattujen ja virtausmallilla mallinnettujen luonnontilan pohjaveden pinnankorkeuksien erot eli residuaalit pienenevät merkittävästi Keiniänrannan Natura-alueen läheisyydessä. Vuoden 2011 mallissa ero mitattujen ja mallinnettujen pohjaveden pinnankorkeuksien välillä Keiniänrannassa oli keskimäärin 1,1 m (13 vertailupistettä) kun taas vuoden 2019 mallissa ero oli keskimäärin 0,5 m (13 vertailupistettä).

Mallilla tehtyjen skenaarioiden mukaan tuotantoalueella TUA3 voidaan tuottaa 12 000 m³/d tekopohjavettä niin, että virtaamat Keiniänrannan avo-ojissa pienenevät vain noin 4 % ja pohjavedenpinnan alenemat Keiniänrannan alueella ovat selvästi alle 0,2 m. Imeytysalueet on sijoitettu parhaiten vettäjohtavan harjuytimen ulkopuolelle, mutta niin, että maaperä on imeytykseen sopivaa. Näin saadaan kasvatettua viipymiä imeytysalueilta kaivoalueille. Myös osa kaivoalueista sijaitsee harjuytimen ulkopuolella, joka myös kasvattaa viipymää. Osa kaivoalueista sijoittuu harjuyttimeen, jolloin myös ydintä pitkin virtaava vesi saadaan johdettua tuotantoon. Imeytys- ja kaivoalueiden sijoittelu takaa riittävän viipymän ja mahdollistaa hyväläatuisten tekopohjaveden tuottamisen.

Vuoden 2019 virtausmallilla tehdyissä skenaarioissa pohjavesi ja tekopohjavesi siirretään Taustialantien kynnyksen yli pumpaamalla vesi kaivoalueelta KA3.1, johtamalla se putkilinjaa pitkin Taustialantien kynnyksen yli ja jälleenimeyttämällä vesi jälleenimeytysalueilla. Näin varmistetaan riittävä hydraulinen yhteys imeytysalueen IA4.1 ja kaivoalueiden KA3.2–KA3.4 välillä ja estetään veden patoutumista Taustialantien kynnyksen taakse. Vedenottoa painotetaan skenaarioissa harjuytimen koillispuolelle kaivoalueelle KA3.3, mikä pienentää vedenoton vaikutusta Keiniänrannan Natura-alueeseen. Virtausmallilla tehdyssä skenaariossa, jossa on mukana 2 000 m³/d yli-imeytys (kokonaisimeytismäärä on 14 000 m³/d), muutos Keiniänrannan avo-ojien virtaamisissa on vain 1 %.

Tekopohjavesilaitoksen toiminnan kannalta laitoksen kustannustehokkaimmat ajotavat ovat skenaariot A–C, joissa pohjavettä ja tekopohjavettä siirretään Taustialantien kynnyksen yli 12 000 m³/d 14 000 m³/d:n sijaan. Tekopohjaveden tuotannon vaikutuksia Keiniänrannan Natura-alueelle voidaan minimoida skenaarion D kaltaisella yli-imeytysratkaisulla esimerkiksi tilanteissa, joissa laitoksen ajotapaa säätämällä ei saavuteta riittäviä virtaamia Keiniänrannan Natura-alueelle. Tekopohjavesilaitosta voidaan käyttää niin, että Keiniänrannan Natura-alueen olosuhteet pysyvät stabiilina myös muuttuvassa ilmastossa, koska imeytys- ja tuotantomääriä voidaan säätää tarpeen mukaan.

Vuoden 2019 virtausmallinnuksen johtopäätökset ovat:

- Mallin toimintaa tarkennettiin uusien mittausten ja tehtyjen selvitysten perusteella
- Virtausmallilla lasketut tulokset vastaavat alueella tehtyjä luonnontilan pohjavedenpinnan korkeusmittauksia sekä imeytys- ja merkkiainekokeen tuloksia
- Tarkennuksien jälkeen malli toimii luotettavasti myös mallin reuna-alueilla sekä Taustialantien kynnyksen kohdalla
- Mallilla tehtyjen tuotantoskenaarioiden mukaan alueella voidaan tuottaa 12 000 m³/d hyväläatuista tekopohjavettä

- Tuotantotilanteessa Keiniänrannan avo-ojien virtaamat pienenevät alle 5 % ja pohjaveden pinnankorkeudet alenevat alle 0,2 m
- Imeytys- ja kaivoalueet on sijoitettu paikkoihin, jotka on määritetty sedimentologisin ja hydrogeologisin perustein. Tämä takaa tekopohjavesilaitoksen toimivuuden ja hyvälaatuisen tekopohjaveden tuottamisen

5. Kirjallisuusviitteet

Artimo, A., Saraperä, S. Puurunen, O. (2011). Pälkäneen Syrjänharjun monikerroksinen pohjaveden virtausmalli – Raportti. 18.3.2011.

Geo-Work Oy, 2019. Pälkäneen maatulokaluotausprofiilit 13.1.2019.

Mäkinen, J., 2016. Pälkäneen Aapiskukon alueen maatulokaluotauksen (Geo-Work 26.09.2016) rakennetulkinta. Raportti 01.12.2016. Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto.

Mäkinen, J., Kallio, E., Jokela, P., 2017. Managed aquifer recharge and sedimentological characterization within the complex esker deposits in Pälkäne, Finland. Sustain. Water Resour. Manag. DOI 10.1007/s40899-017-0195-3.

Mäkinen, J., 2019. Tavase Oy:n Pälkäneen tekopohjavesialueen TUA3 - tarkennettu rakennetulkinta. Maantieteen ja geologian laitos, Turun yliopisto.

Mälkki, E., 1999. Pohjavesi ja pohjaveden ympäristö. Tammi, 304s.

Pöyry, 2011. Imeytys- ja merkkiainekoe Pälkäneellä, loppuraportti, Tavase Oy, 106 s.

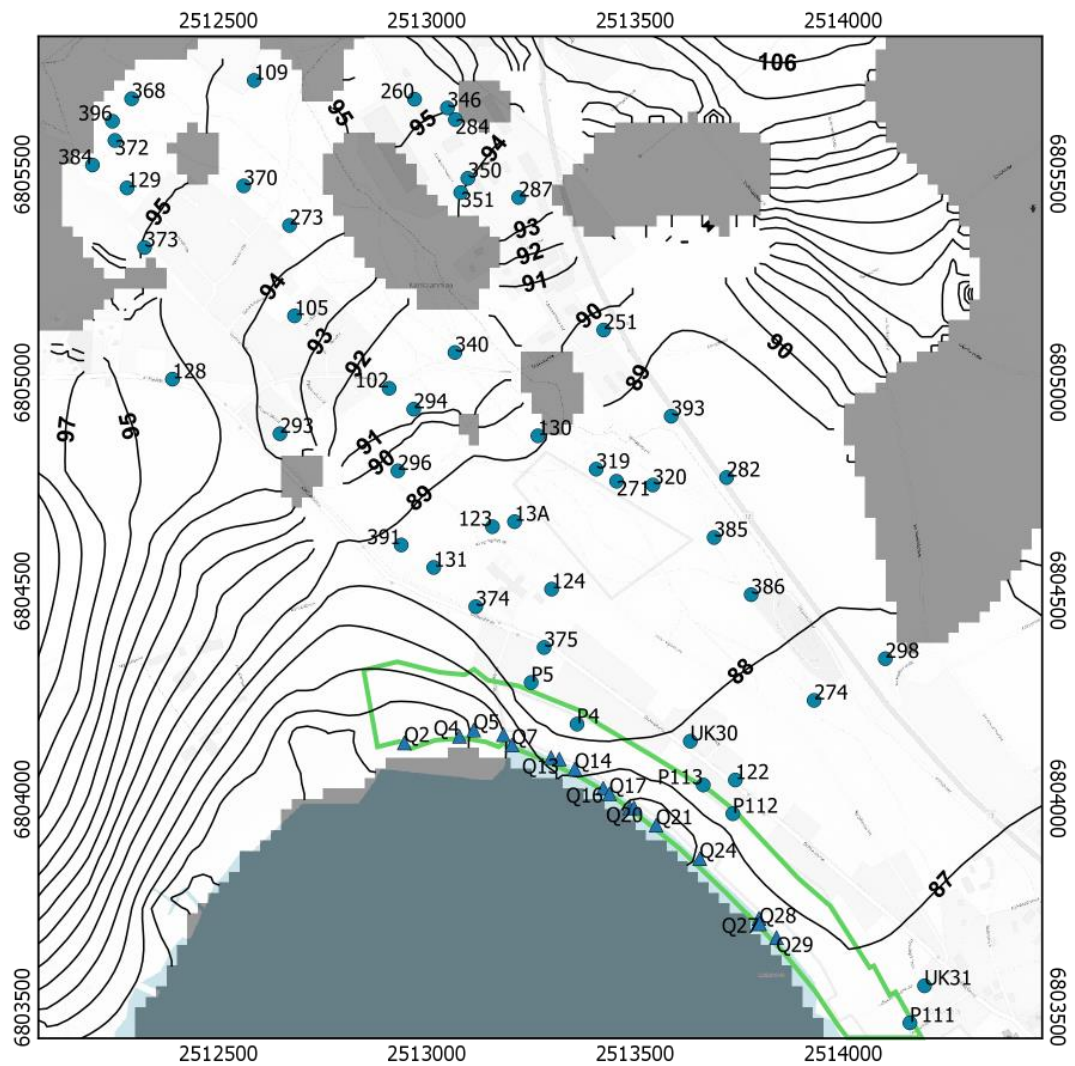
Seppälä, M., Tuominen, S., 2005. Pohjaveden virtauksen mallintaminen. Ympäristöopas 121, Suomen ympäristökeskus, 65 s.

Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., McDonald, M.G., 2000. MODFLOW-2000, the U.S. geological survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the ground-water flow process. Open-File Report 00-92, U.S. Geological Survey.

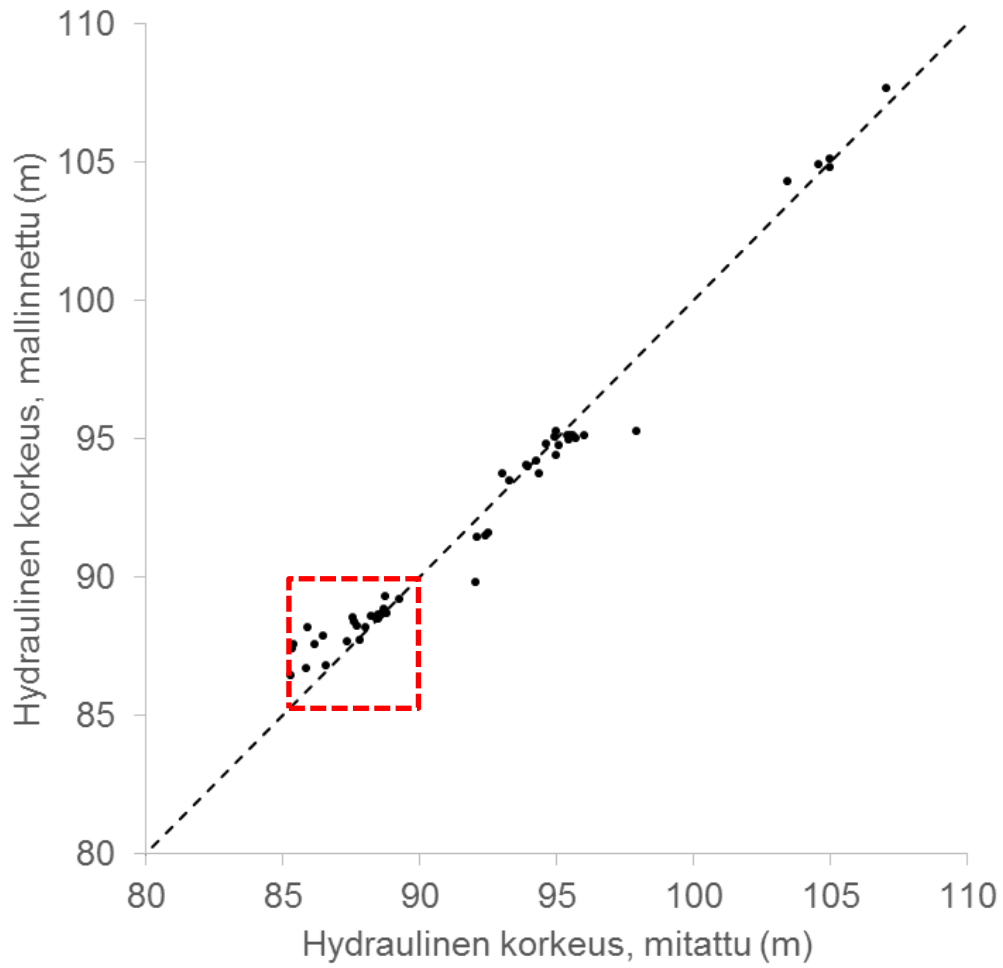
Vehoniemenharjun tekopohjavesimallinnus, kaivo 3, Pälkäne, Isokangas. TAVASE Eteläinen työryhmä. Suomen ympäristökeskus, Sirkku M. Tuominen 7.2.2001.

Vehoniemen Isokankaan yleispiirteiset pohjaveden virtausmallit Tampereen Vesi. Jaakko Pöyry Infra, Maa ja Vesi 67025149WR 12.6.2003.

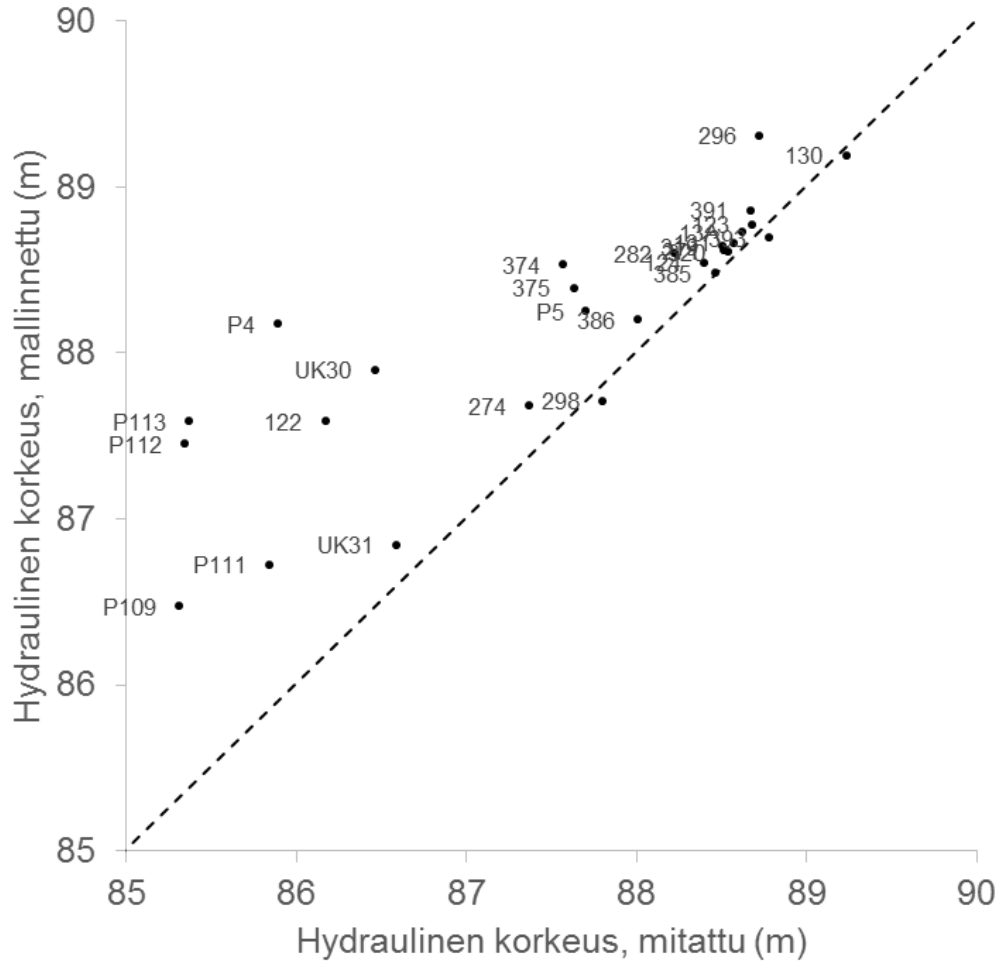
Liite 1. Vuoden 2011 mallin simulaatiotulokset



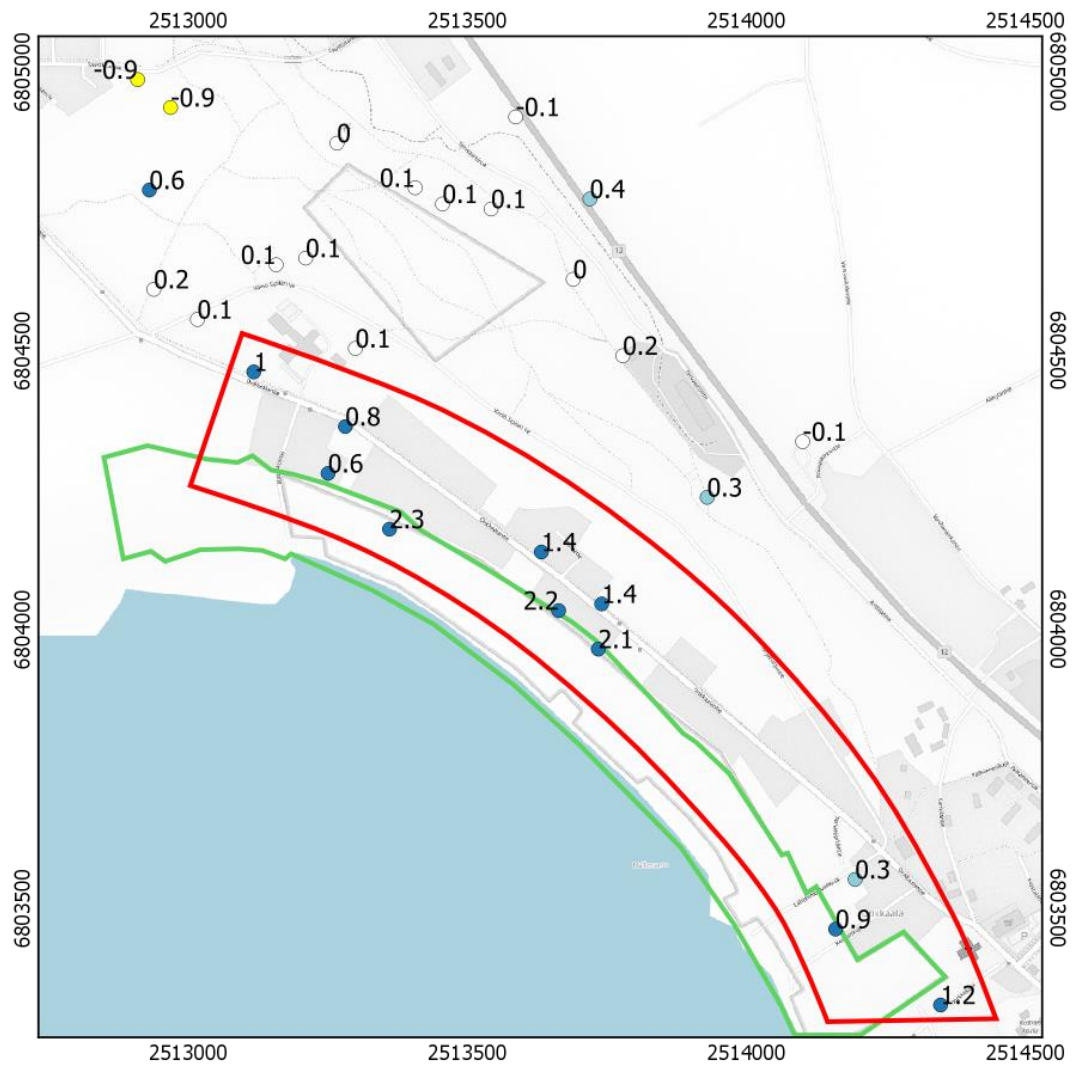
Kuva 1. Vuoden 2011 mallilla simuloitu pohjaveden pinnankorkeus (m) alueella luonnontilassa. Havaintoputket ja yksityiskaivot on esitetty sinisillä ympyröillä ja avo-ojien mittapadot sinisillä kolmioilla. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.



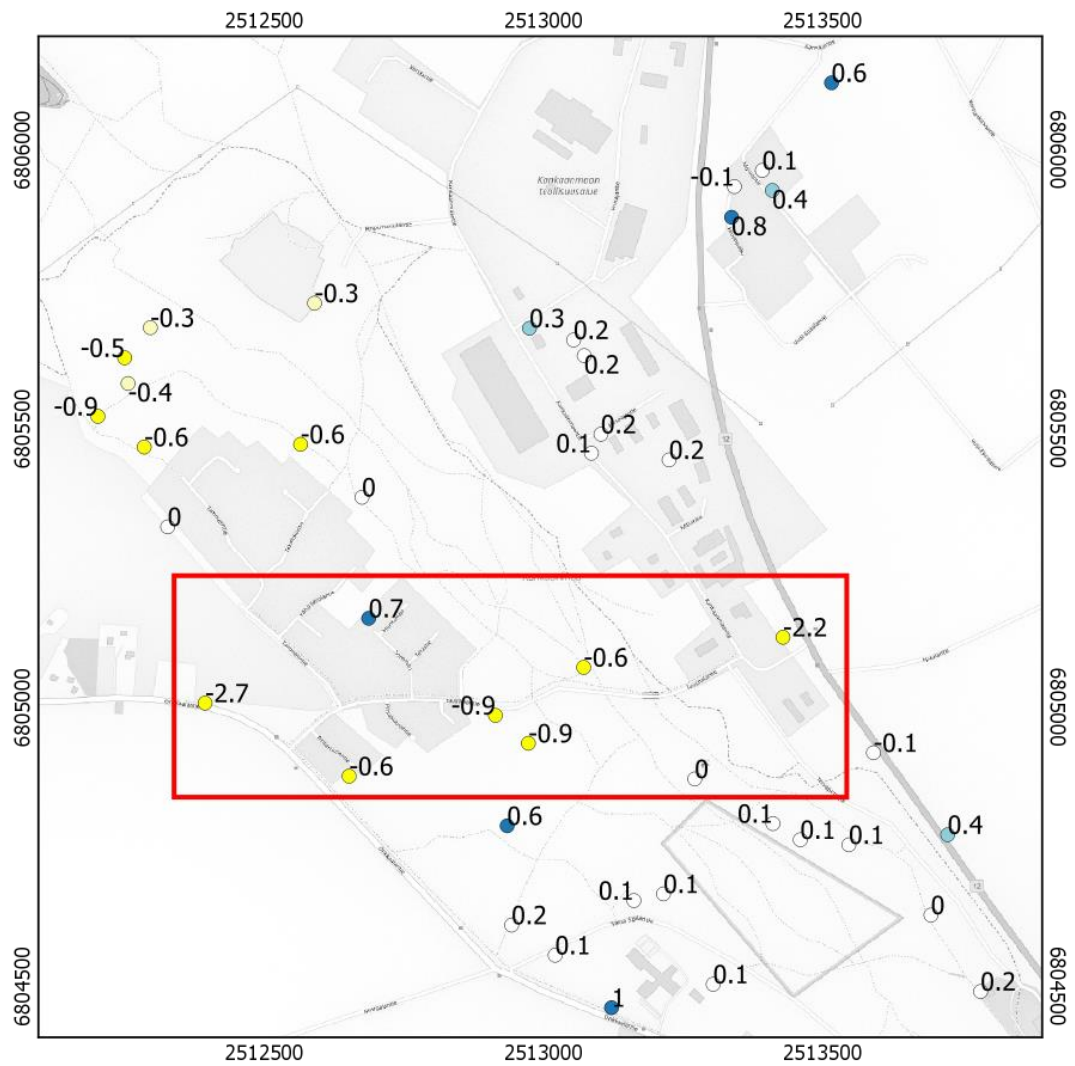
Kuva 2. Mitatut ja vuoden 2011 mallilla simuloidut pohjaveden pinnankorkeudet (m) luonnontilassa. Kuvaajassa on esitetty mitattu ja mallinnettu pohjaveden pinnankorkeus (m) eri havaintopisteissä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe on 0,52 m koko tutkimusalueen havaintopisteissä. Punaisella katkoviivalla rajattu alue on esitetty liitteen 1 kuvassa 3.



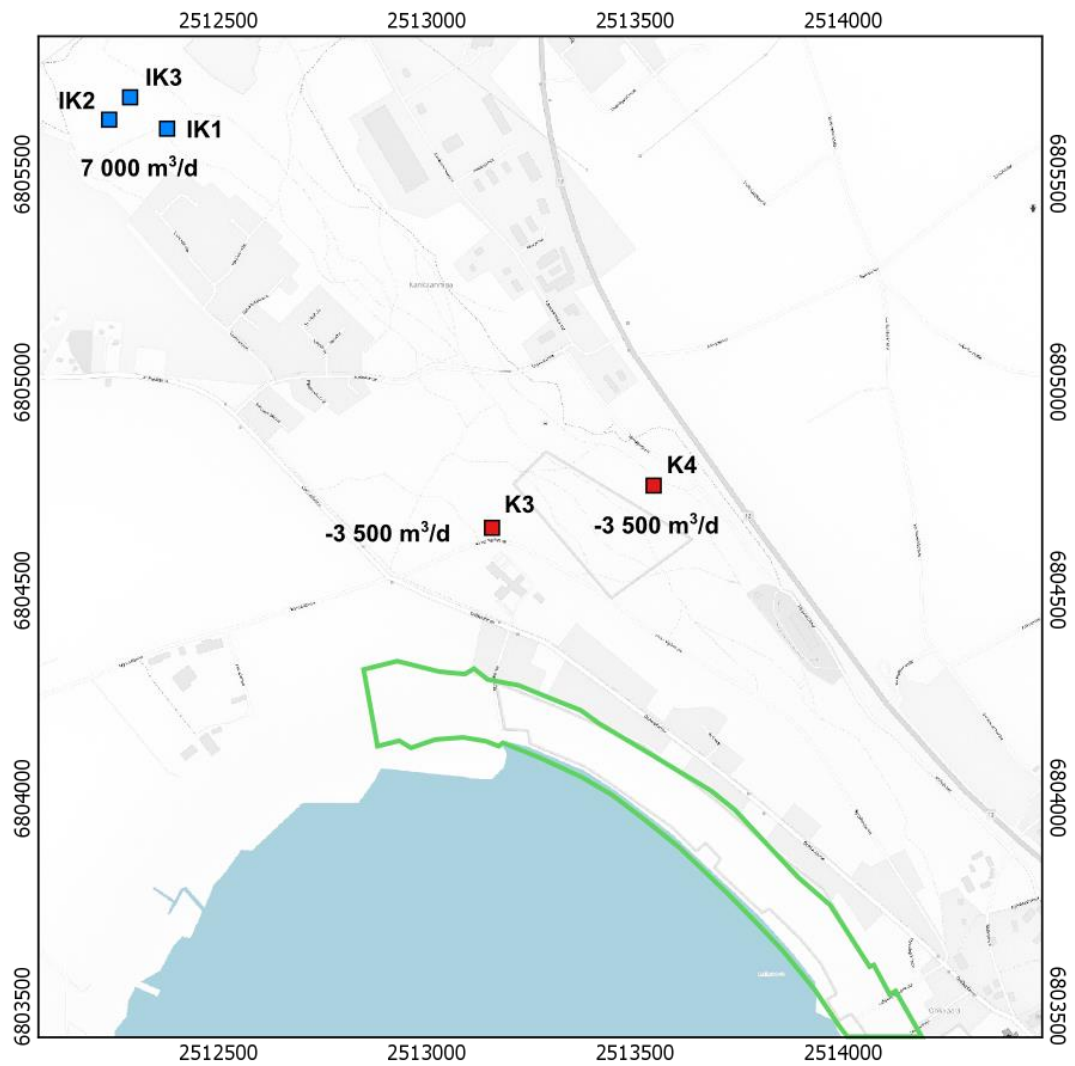
Kuva 3. Mitatut ja vuoden 2011 mallilla simuloidut pohjaveden pinnankorkeudet (m) luonnontilassa Keiniänrannan Natura-alueen läheisyydessä. Kuvaajassa on esitetty mitattu ja mallinnettu pohjaveden pinnankorkeus (m) eri havaintopisteissä. Keskimääräinen absoluuttinen virhe on 1,09 m Keiniänrannan lähistöllä olevissa havaintopisteissä.



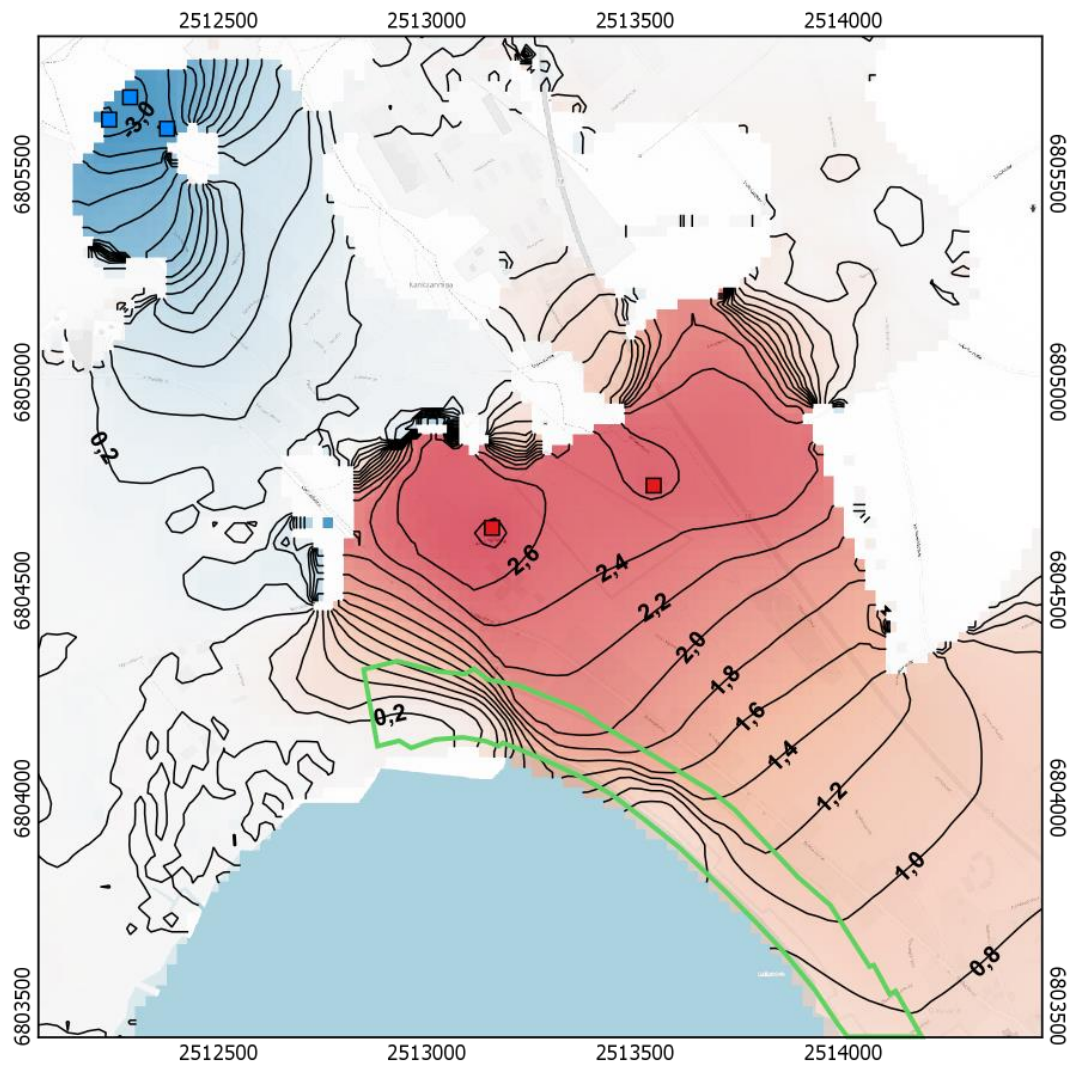
Kuva 4. Mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeustulosten välinen ero (m) luonnontilassa vuoden 2011 mallissa. Keiniänrannan Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla ja sen läheisyydessä olevat havaintopisteet on rajattu punaisella viivalla. Negatiivinen arvo (keltainen) = mallin laskema pohjaveden pinnankorkeus on alempana kuin luonnossa mitattu pinnankorkeus. Positiivinen arvo (sininen) = mallin laskema tulos ylempänä kuin mittaustulos.



Kuva 5. Mitattujen ja mallinnettujen pinnankorkeustulosten välinen ero (m) luonnontilassa vuoden 2011 mallissa. Taustialantien kynnyksen läheisyydessä olevat havaintopisteet on rajattu punaisella viivalla. Negatiivinen arvo (keltainen) = mallin laskema pohjaveden pinnankorkeus on alempana kuin luonnossa mitattu pinnankorkeus. Positiivinen arvo (sininen) = mallin tulos ylempänä kuin mittaustulos.

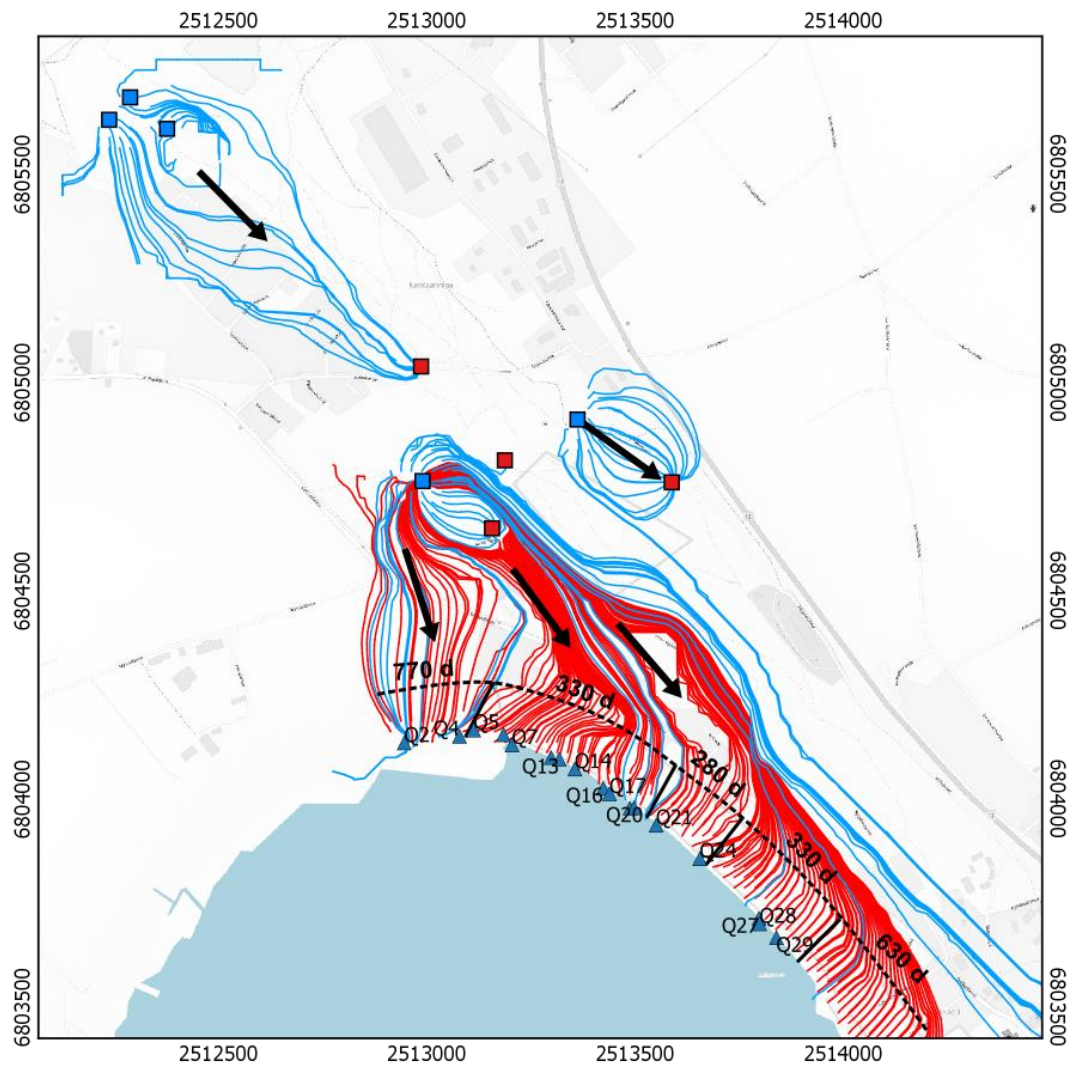


Kuva 6. Imeytys- ja merkkiainekoe. Kaivojen sijainnit ja imeytys- ja pumppausmäärät. Kokeessa imeytetään enintään 7 000 m³/d raakavettä alueen luoteispäähän (IK1–IK3) ja pumpataan yhteensä enintään 7 000 m³/d vettä kaivoilta K3 ja K4. Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.



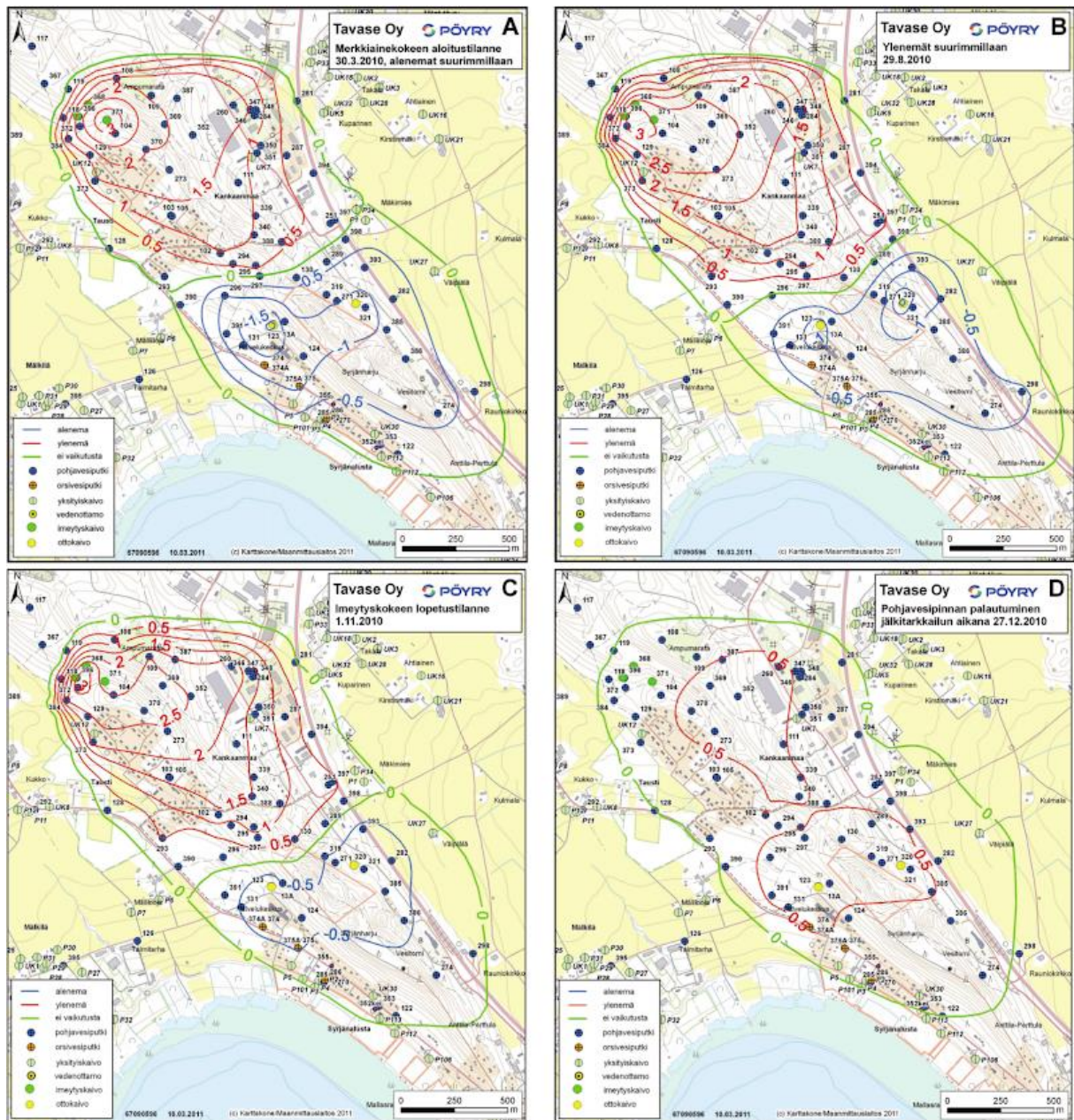
Kuva 7. Imeytys- ja merkkiainekoe simuloituna vuoden 2011 mallilla. Kokeen aikaiset pohjaveden pinnan ylenemät (sininen väri) ja alenemat (punainen väri) (m). Natura-alue on rajattu vihreällä viivalla.

Liite 2. Viipymät Keiniänrannassa



Kuva 1. Mallinnetut viipymät tuotantotilanteessa (yli-imeytys 14 000 m³/d ja tuotanto 12 000 m³/d) Keiniänrannan Natura-alueen rajalla sen eri kohdissa. Siniset virtausreitit on mallinnettu eteenpäin ja punaiset taaksepäin simulaatioilla.

Liite 3. Imeytys- ja merkkiainekokeessa todetut pohjaveden pinnan ylenemät ja alenemat



Kuva 1. Pälkäneen imeytys- ja merkkiainekokeen aikaisia pohjaveden alenema- ja ylenemäkäyriä. A) Merkkiainekokeen aloitustilanne 30.3.2010, alenemat suurimmillaan. B) Ylenemät suurimmillaan 29.8.2010. C) Imeytyskokeen lopetustilanne 1.11.2010. D) Pohjaveden pinnan palautuminen jälkitarkkailun aikana 27.12.2010. (Pöyry 2011).