



GEOLOGINEN INFORMAATIO TEKOPOHJAVESIANKKEEN TOTEUTTAMISESSA

**Pohjavesitutkimukset
Virttaankankaalla**



Aki Artimo • Osmo Puurunen • Sami Saraperä • Iikka Ylander



**GEOLOGINEN INFORMAATIO
TEKOPOHJAVESIHANKKEEN
TOTEUTTAMISESSA**

**Pohjavesitutkimukset
Virttaankankaalla**

Turun Seudun Vesi Oy:n julkaisu

ISBN 978-951-9253-08-4

© Turun Seudun Vesi Oy ja tekijät
Julkaisija: Turun Seudun Vesi Oy

Kirjoittajat: Aki Artimo, Osmo Puurunen,
Sami Saraperä, Iikka Ylander

Taitto ja kannen grafiikka:
Mainostoimisto Dimmi Oy
Paino: Painoprisma Oy, Lieto

Tilaukset: Turun Seudun Vesi Oy,
Maariankatu 1, 20100 Turku
Puh. (02) 277 7650

www.turunseudunvesi.fi

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	6
1 JOHDANTO	8
2 AINEISTO	12
2.1 Kartta-aineisto	12
2.2 Maaperäkairaukset	12
<i>Maaperänäytteet</i>	13
<i>Karbonaattitutkimukset</i>	14
<i>Vedenjohtavuusmittaukset</i>	15
<i>Pohjavesiputkien videokuvaus</i>	16
2.3 Sedimentologiset tutkimukset	16
2.4 Geofysikaaliset tutkimukset	17
<i>Seismiset refraktioluotaukset</i>	17
<i>Painovoimamittaukset</i>	18
<i>Maatutkaluotaukset</i>	18
2.5 Pohjaveden pinnan seuranta	19
<i>Käsi- ja automaattimittaukset</i>	19
<i>Lähteiden ja arteesisten kaivojen virtaamamittaukset</i>	20
<i>Sadantatiedot</i>	20
2.6 Imeytyskokeet	23
2.7 Pohjaveden laadun seuranta	24
<i>Seurantaohjelmat</i>	24
<i>Näytteenotto</i>	24
<i>Vedenlaadun kenttämittaukset</i>	25
<i>Isotooppiseuranta</i>	27
<i>TOC-tutkimukset</i>	27
2.8 Isotooppitutkimukset	27
<i>Happi ja vety</i>	27
<i>Tritium</i>	28
<i>Hiili ja strontium</i>	28
<i>Tritium - helium ja CFC-yhdisteet</i>	29
3 TUTKIMUSMENETELMÄT	30
3.1 Perinteiset pohjavesigeologiset tutkimukset	30
<i>Pohjavesikartoitus</i>	30
<i>Maaperäkairaukset ja pohjavesiputkien asentaminen</i>	30
<i>Pohjavesiputkista tehtävät mittaukset</i>	31
<i>Lähdevirtaamamittaukset</i>	31
<i>Geofysikaaliset mittaukset</i>	32
<i>Merkkiainekoe</i>	34
<i>Koejärjestely</i>	35
<i>Näytteenotto</i>	36

<i>Tutkimusten raportointi</i>	36
3.2 Pohjaveden virtauksen mallintaminen	36
<i>Pohjaveden virtausmallit 1990-luvulla</i>	37
<i>Pohjaveden virtausmallit 2000-luvun alussa</i>	38
3.3 Uudet tutkimusmenetelmät	38
<i>Tietokantasovellukset</i>	40
<i>Tiedon hallinta</i>	41
<i>Pohjavedenpinta-animaatioiden generointi</i>	47
<i>Muodostuman kolmiulotteisen rakenteen kuvaus ja mallinnus</i>	48
<i>Kolmiulotteisen hydrogeologisen mallin generointi</i>	49
<i>Monikerroksinen pohjaveden virtausmalli</i>	52
<i>Virtausmallin generointi</i>	52
4 TULOKSET	56
4.1 Tutkimusalueen rakenne	56
4.2 Merkkiainekokeen tulokset	59
4.3 Pohjaveden pinnan muutokset	62
<i>Pohjaveden pintojen aikasarjat</i>	62
<i>Pohjavedenpinta-animaatiot</i>	64
4.4 Pohjaveden muodostuminen, virtaus, määrä ja ikä	66
<i>3D-virtaus</i>	66
<i>Isotoopit ja rakennetulkinta</i>	69
<i>Merkkiainekoe ja virtausmallin simulaatiot</i>	70
<i>Tritium - helium- ja CFC-mittaukset ja pohjaveden viipymän mallinnus</i>	71
4.5 Pohjaveden laatu	72
4.6 Tekopohjaveden tuotantosimulaatiot	76
5 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET	77
5.1 Kaivojen rakentaminen ja kaivoalueiden sijoittamiseen liittyvät kysymykset	77
5.2 Imeytysalueiden sijoittamiseen liittyvät kysymykset	78
5.3 Pohjaveden virtausyhteydet	79
5.4 Pohjaveden ikä ja viipymä	81
5.5 Tekopohjavesilaitoksen toteutus ja geologinen informaatio	81
<i>Alueiden käytön ohjaus</i>	81
<i>Tuotannon ohjaus</i>	81
<i>Tekopohjaveden tuotannon vaikutukset Virttaankankaan alueella</i>	83
<i>Luontaisten tekijöiden vaikutus pohjaveden pintoihin Virttaankankaan alueella</i>	84
5.6 Jatkotutkimustarve ja tekopohjaveden tuotannon seuranta	86
LÄHDELUETTELO	88
SANASTO	92
LIITTEET (CD)	98



ALKUSANAT

Tekopohjaveden valmistaminen ei ole uusi keksintö. Tekopohjavettä on tehty Suomessa jo vuosikymmeniä. Ensimmäinen nykyaikainen toiminnassa oleva tekopohjavesilaitos aloitti toimintansa vuonna 1972 Lappeenrannassa. Keski-Euroopassa ja Ruotsissa tekopohjaveden käytön historia on paljon pidempi – siellä tekopohjavettä on tuotettu menestyksekkäästi jo yli sadan vuoden ajan. Tekopohjaveden muodostamisen pioneerina pidetty ruotsalaisinsinööri J. G. Richert (1857-1934) suunnitteli vuonna 1898 Göteborgiin allasimeytykseen perustuvan tekopohjavesilaitoksen, joka otettiin käyttöön 1901.

Tekopohjavesitutkimuksia on kuitenkin tehty Suomessa jo ennen 1970-lukua. Suomen ensimmäiset tekopohjavesitutkimukset tehtiin myös Richertin johdolla vuosina 1901-1903 Vaasassa. Myös Vantaan Tikkurilanharjulla tehtiin varhaisia tekopohjaveden imeytyskokeita vuosina 1912-1914. Richertin vuosina 1901-1903 tekemät tekopohjaveden imeytyskokeet eivät kuitenkaan johtaneet tekopohjaveden valmistukseen 1900-luvun alkuvuosina muun muassa rahoitussyistä. Varsinainen tekopohjaveden tuotanto aloitettiin ensimmäistä kertaa vuonna 1929 Vaasassa.

Suomessa vesilaitosten jakamasta vedestä noin 12 prosenttia on nykyään tekopohjavettä. Ruotsissa vastaava osuus on jo yli 20 prosenttia. Turun seudun kaupunkien ja kuntien juomavesihuollon turvaamiseen tähtäävä Virttaankankaan vesihanke on suurin Suomessa suunniteltu tekopohjaveden tuottamiseen tähtäävä hanke, jolla tullaan turvaamaan noin 285 000 asukkaan puhtaan veden tarve. Hankkeen laajuus ja merkittävyys ovat edellyttäneet monipuolisten ja kattavien tutkimusten tekoa koko hankkeen toiminta- ja vaikutusalueella.

Myös Euroopan Unionin vesipuitedirektiivi edellyttää kattavien tutkimusten ja selvitysten tekoa, jotta direktiivin tarkkaan määritellyt tavoitteet saavutetaan muun muassa pohjavesien laadun ja pohjavesien ympäristön kuvauksen osalta koko Suomessa. Vesipuitedirektiivi luo uusia haasteita sekä maaperäkartoitukselle että pohjavesialuekartoitukselle pohjavesiesiintymien kuvauksen osalta. Vesipuitedirektiivin tavoitteiden saavuttaminen edellyttää tarkan kolmiulotteisen kuvan muodostamista pohjavesiesiintymien geologisesta rakenteesta. Rakenne puolestaan vaikuttaa pohjaveden muodostumiseen ja kerrostuneisuuden sekä kontrolloij pohjaveden purkautumista pintavesistöihin. Perinteiset tutkimusmenetelmät ja tutkimusten tiedonhallinta ovat pääsääntöisesti riittämättömiä direktiivin tavoitteiden saavuttamiseen.

Virttaankankaalla tehdyt pohjavesitutkimukset vastaavat vesipuidedirektiivin asettamiin tavoitteisiin. Tässä kirjassa kuvataan Virttaankankaan tekopohjavesihankkeeseen liittyvien geologisten tutkimusten merkitystä ja käyttöä tekopohjavesilaitoksen toimintojen suunnittelussa ja laitoksen tulevassa käytössä.

Kirjassa keskitytään erityisesti uusien tietokantasovellusten sekä niiden tueksi kehitettyjen pohjavesigeologisten tutkimusmenetelmien ja geologisen tiedonhallinnan työkalujen kuvaamiseen. Kyseinen seikka näkyy myös kirjan rakenteessa: Osa geologisista tutkimuksista on esitetty lähes kokonaisuudessaan Aineisto-luvussa, vaikka muissa yhteyksissä kyseisten tutkimusten perusteet ja tulokset olisivat luettavissa Menetelmät- tai Tulokset-luvuissa. Uusi tietokantapohjainen lähestymistapa mallinnustyökaluineen ei kuitenkaan kategorisoi käytettäviä aineistoja perinteellisellä tavalla - yhden tutkimuksen tulokset ovat toisen tutkimusmenetelmän lähtöaineistoa. Kirjassa on erityisesti keskitytty kuvaamaan uusia tutkimusmenetelmiä ja niiden tuottamaa hyötyä Virttaankankaan tekopohjavesihankkeen toteuttamiselle.

Kirjassa esitettyjen tutkimusmenetelmien käyttö Virttaankankaan tekopohjavesihankkeen toteuttamisessa ja mahdollisesti myös muissa tulevissa pohjavesitutkimuksissa mahdollistaa monipuolisen karttatuotteiden, kolmiulotteisten geologisten mallien ja pohjaveden virtausmallien tuottamisen siten, että tutkimusten tulokset ovat mahdollisimman laajan käyttäjäkunnan käytettävissä. Näiden tutkimusmenetelmien käyttö palvelisi paitsi vesihuollon, myös esimerkiksi kaupunkisuunnittelun ja luonnonvarojen hallinnan tarpeita ja toisi helposti omaksuttavaa geologista tietoa yhteiskunnan eri tasoilla tapahtuvan päätöksenteon tueksi.

Turussa 7.5.2007

Aki Artimo
Osmo Puurunen
Sami Saraperä
Ilkka Ylander



1 JOHDANTO

Turun seutu on toistuvasti kärsinyt raakaveden riittämättömyydestä ja sen huonosta laadusta. Aina 1900-luvun alkuun saakka Turussa käytettiin yksityisistä ja yleisistä kaivoista saatua pohjavettä. Aurajoen veden mekaanista ja kemiallista puhdistusta yritettiin jo 1800-luvun lopulla mutta veden laatua ei saatu tarpeeksi parannettua käytössä olleilla menetelmillä. Turun kaupunginvaltuustossa tehtiin päätös ryhtyä etsimään kunnallisen vesihuoltohankkeen toteuttamiseen soveltuvia pohjavesialueita.



*Kuva 1. Kaarningon vedenottamo 1930-luvulla.
Kuva: Turun Vesilaitos.*

Ensimmäinen kunnallinen vesilaitos perustettiin Kaarningon pohjavesialueelle lähelle Turun ja Kaarinan rajaa 1903 (Kuva 1). Kaarningosta saatavilla olleen veden määrä osoittautui nopeasti liian pieneksi. Päätös Aurajoen vettä käyttävän Halisten kemiallisen vedenpuhdistuslaitoksen rakentamisesta tehtiin vuonna 1922. Laitos aloitti toimintansa vuonna 1923 (Kuva 2).

Turun kaupunki on edelleen kärsinyt lähinnä Aurajoen veden vähydestä johtuvista vesiongelmissa ja välttävästä raakaveden laadusta (Lounais-Suomen ympäristökeskus 2006, internetsivu). Turun Seudun Vesi Oy (TSV) perustettiin 1974 selvittämään koko Turun seutukunnan nykyisten vesihuoltoratkaisujen korvaamista. Ratkaisuksi ehdotettiin tekopohjaveden tuottamista Virttaankankaalla. Raakavetenä oli tarkoitus käyttää Pyhäjärven vettä. Hanke kaatui Turun kaupunginvaltuuston päätökseen vuonna 1993.

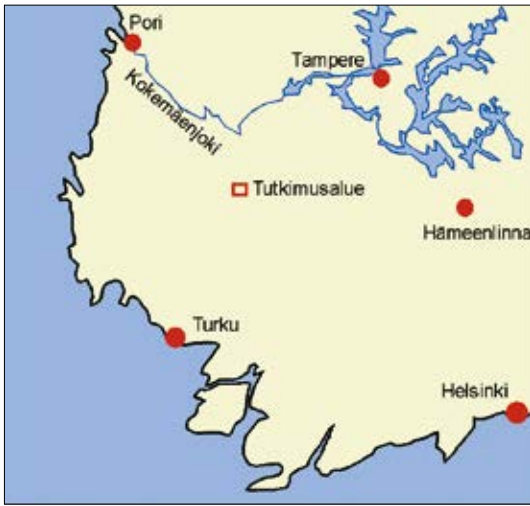


*Kuva 2. Halisten vesilaitoksen pato.
Kuva: Turun Vesilaitos.*

Turun Seudun Vesi Oy rakennutti tekopohjavesihankkeen kaatumisesta huolimatta ns. Virttaa-Littoinen –syöttövesijohdon, jota pitkin toimitetaan Virttaankankaalta ja Oripäänkankaalta pohjavettä Kaarinaan, Liettoon, Piikkiöön ja Paimioon yhteensä noin 10 000 kuutiometriä vuorokaudessa. Pumpatusta pohjavedestä toimitetaan myös pieni osa Turun pohjoisimmille alueille.



Kuva 3. Virttaa-Littoinen -johtolinjan ja uuden tekopohjavesihanketta varten rakennettavan johtolinjan sijainnit.



Kuva 4. Tutkimusalueen sijainti Lounais-Suomessa.

Virttaa-Littoinen –järjestelmä otettiin käyttöön 15.12.1998.

Tekopohjavesihankkeen kaatuminen 1990-luvulla jätti Turun seudun ilman yhtenäistä ja keskitettyä vesihuoltojärjestelmää. Hanke herätettiin uudelleen henkiin vuosituhannen vaihteessa. Hankkeen ympäristövaikutusten arviointiselostuksessa (Jaakko Pöyry Infra 2001) tarkasteltiin eri toteutusvaihtoehtoja koko Turun seudun vesihuollon keskittämiseksi. Arvioinnissa esitetyistä vaihtoehdoista päädyttiin Virttaankankaalla toteutettavaan tekopohjavesilaitokseen, jonka raakaveden lähteeksi valittiin Pyhäjärven sijasta Kokemäenjoki (Kuva 3 ja Liite 1). Valmistuessaan tekopohjavesihankkeen avulla tuotetaan puhdas juomavesi Turun, Raision, Naantalın, Kaarinan, Paimion ja Paraisten kaupunkeihin sekä Liedon ja Piikkiön kuntiin.

Varsinaisen tekopohjavesilaitoksen sijaintipaikkaa ei ollut tarpeellista arvioida uudelleen, vaikka raakavesilähde perustellusti vaihtuikin. Virttaankangas on osa lounaisen Suomen suu-

rinta harjujaksoa. Säskylänharju, Virttaankangas ja Oripäänkangas edustavat näkyvintä ja mittasuhteiltaan laajinta osaa kyseisestä harjujaksosta. Virttaankangas on pääosin melko loivapiirteisistä mäntymetsävaltaista hiekkakangasta, joka länsiosiltaan alkaa kohota kohti Säskylänharjun jyrkkäpiirteisiä rinteitä. Alue soveltuu laajuudeltaan, rakenteeltaan ja pinnanmuodoiltaan hyvin tekopohjaveden tuottamiseen. Virttaankangas on Oripäänkankaan ohella ainoa alue lounaisessa Suomessa, jossa suunnitellun kokoisen tekopohjavesilaitoksen voi toteuttaa.

Tässä kirjassa esitetyt tutkimukset ja niiden tulosten perusteella tehdyt mallit rajoittuvat yhteensä 80 neliökilometrin alueelle, joka kattaa varsinaisen harjualueen lisäksi harjun lievealueita, soita, peltoja ja avokallioalueita (kuvat 4 ja 5). Tutkimusalueen laaja rajaus on tarpeellista pohjaveden muodostumisalueiden sekä varsinaisen pohjavesialueen ja sen reuna-alueiden välillä esiintyvien pohjaveden virtausyhteyksien kuvauksessa.

Tekopohjavesihanke on edennyt ympäristövaikutusten arviointi- ja suunnitteluvaiheesta jo osittain toteuttamisvaiheeseen. Länsi-Suomen ympäristölupavirasto myönsi kaikki tekopohjavesihankkeeseen liittyvät ympäristöluvat 30.12.2005. Samalla Turun Seudun Vesi Oy sai luvan töiden aloittamiseen ennen päätösten lainvoimaiseksi tuloa. Länsi-Suomen ympäristölupaviraston päätöksen mukaan Virttaankankaan tekopohjavesilaitokselle määrättiin suoja-alue, jonka rajaus on esitetty liitteessä 2. Lupapäätöksistä jätettyjen valitusten jälkeen asian käsittely siirtyi Vaasan hallinto-oikeuteen, joka antoi päätöksensä asiasta 7.3.2007. Vaasan hallinto-oikeus hylkäsi kaikki hankkeesta tehdyt valitukset ja täsmensi joitakin tekopohjavesilaitoksen toimintaan liittyviä lupamääräyksiä. Vaasan hallinto-oikeuden päätös sisälsi myös luvan töiden ja toiminnan aloittamiseen määrättyiltä osin ennen luvan lainvoimaiseksi tuloa.

Edellä mainituissa päätöksissä on esitetty puitteet tekopohjavesilaitoksen toiminnalle ja ympäristön tilan seurannalle sekä Kokemäenjoen että Virtaankankaan alueilla. Geologinen informaatio tekopohjavesilaitoksen tuotantoalueen sisäisestä rakenteesta, pohjaveden muodostumiseen, liikkeeseen ja laatuun vaikuttavista tekijöistä sekä tekopohjaveden imeyttämisen ja pumppaamisen

vaikutuksista muodostavat tekopohjavesilaitoksen toiminnan ja käytön ytimen.

Tässä kirjassa on esitetty kattavasti ja monipuolisesti kaikki tutkimukset, tutkimuksista saadut tulokset ja niiden pohjalta kehitetyt sovellukset, jotka mahdollistavat tekopohjavesihankkeen toteuttamisen Virtaankankaalla.



Kuva 5. Virtaankankaan tutkimus- ja mallialueen rajaus.

2 AINEISTO

2.1 Kartta-aineisto

Tutkimusalue ulottuu kolmen 1:20 000-mittakaavaisen peruskarttalehden alueelle (2111 03, 2111 06 ja 2111 02). Virttaankankaan tekopohjavesilaitoksen toiminnot sijoittuvat ensiksi mainitun karttalehden alueelle. Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) maaperäkartta-aineisto (1:20 000 tai 1:50 000 –mittakaavassa) on saatavissa numeerisessa muodossa koko tutkimusalueelta. Kallioperäkartta-aineisto on saatavissa 1:100 000 –mittakaavassa sekä painettuna että numeerisessa muodossa (Geologian tutkimuskeskus, internetsivu).

2.2 Maaperäkairaukset

1960-luvulta lähtien on Virttaankankaan tutkimusalueella tehty pohjavesitutkimuksiin liittyen heijari- ja porakonekairauksia, joista porakonekairauksen yhteydessä tehtyyn kairareikään on yleensä asennettu myös pohjavesiputki (Kuva 6 ja Liite 2). Valtaosa kairauksista ajoittuu 1990- ja 2000-luvulle. Suurin osa asennetuista pohjavesiputkista eli 192 kappaletta on sisähalkaisijaltaan 52 mm muoviputkia (PVC, PEH), mutta vanhempien pohjavesiputkien joukossa esiintyy myös 32 mm tai 50 mm rautaputkia (136 kpl). Vuodesta 2005 lähtien Virttaankankaalle on asennettu ainoastaan läpinäkyvästä PVC-muovista tehtyjä pohjavesiputkia. 2000-luvulla tehdyt kairaukset on pääsääntöisesti kairattu kalliioon saakka. Pohjavesiputkiin on asennettu siivilä koko pohjavesiputjan paksuudelta lukuun ottamatta hienoja vä-



Kuva 6. Porakonekairauskalustoa. Kuva: Juha Kääriä.

likerroksia. Varsinaisten pohjavesiputkien lisäksi alueelle on asennettu myös orsivesiputkia, joissa kairaus on lopetettu orsivettä pidättävään siltistä ja savesta koostuvaan kerrokseen. Lisäksi alueella on paikallisten asukkaiden asentamia putkikaivoja, joissa pohjaveden painetaso yltää maan pintaan saakka ulottuvan vettä pidättävän kerroksen yläpuolelle. Näitä arteesisia pohjavesiputkia käytetään talous-veden tuottamiseen lähinnä Virttaankankaan pohjoispuolella. Arteesisia pohjavesiputkia kutsutaan paikallisesti lirikaivoiksi. Maaperäkairaukset ovat olleet luotettavin tapa saada tietoa eri maaperäkerroksista, niiden paksuuksista sekä kallionpinnan tasosta.

Kairauksen kulusta on kirjattu perinteisesti reikäraportti, josta selviää kairaajan syvyystietoihin sidotut maaperähavainnot sekä mahdolliset muut havainnot ja kairauksen aikaiset tapahtumat.



Kuva 7. Kairauspisteet, joista on olemassa jatkuvat maanäytesarjat.

Reikään asennetusta pohjavesiputkesta on puolestaan laadittu putkikortti, johon kirjataan siivilä- ja umpiputken sijaintitiedot. Vuodesta 2005 alkaen putki- ja reikäraporttitiedot on toimitettu Turun Seudun Vesi Oy:lle suoraan tietokantaan tallennettavassa muodossa Excel-taulukoina. Esimerkit perinteisestä reikäraportista ja putkikortista ovat liitteinä 3 ja 4.

Maaperänäytteet

Kairausten yhteydessä otetut maaperänäytteet ovat olleet ensisijaisen tärkeitä kolmiulotteisen kuvan muodostamiseksi harjun rakenteesta. Jotta eri sedimenttiyksiköiden ja niistä tulkittujen hydrogeologisten yksiköiden rajat on voitu kairauksen yhteydessä määrittää mahdollisimman

tarkasti, on 2000-luvulla tehdyissä kairauksissa pääsääntöisesti noudatettu ns. jatkuvaa maanäytteenottoa, joka tarkoittaa näytteenottoa puolen- toista metrin välein maanpinnalta kallioon saakka. Jatkovaa maanäytesarjaa on otettu kaikkiaan 57 kairauspisteestä, jotka kattavat tasaisesti koko Virttaankankaan muodostuman. Kuvassa 7 on esitetty karttakuva jatkuvan näytteenoton pisteistä.

Tietokantaan on tallennettu noin 500 maanäytteen seulontatiedot. Maanäytteet on varastoitu siten, että jokaisen maanäytteen sijaintitiedot löytyvät tietokannasta näytelaatikon tarkkuudella (sijainti ilmoitetaan muodossa: huone, hylly, hyllyväli ja laatikon numero). Näytteet ovat siten helposti ja nopeasti löydettävissä (Kuva 8). Arkis-

toitujen maanäytteiden avulla kairaajan tekemät maalajihavainnot on voitu tarvittaessa tulkita uudelleen. Arkistoituja maanäytteitä on jälkepäin tarvittu myös maaperän mineralogisia tutkimuksia ja rakeisuusanalysejä varten.



Kuva 8. Laakkarin kalliosäiliön maanäytevarasto.

Karbonaattitutkimukset

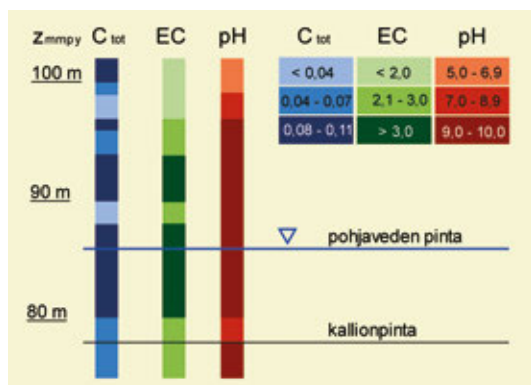
Pohjaveden pH-arvo on Virttaankankaan alueella harvinaisen korkea verrattuna useimpien muiden suomalaisten harjuakviferien pohjaveden pH-arvoihin. Päämuodostuman pohjaveden pH on 8 – 9 ja jopa yli 9 pH-arvoja esiintyy paikoin. Pohjavesi ei kuitenkaan ole tasaisesti emäksistä Virttaankankaallakaan muodostuman kaikissa osissa. Esimerkiksi orsiveden ja sivuharjun vesien pH on alle 7.

Pohjaveden luontainen emäksisyys, maaperän alkalointikyky ja sen alueellinen vaihtelu ovat tulevan tekopohjavesilaitoksen suunnittelun kannalta tärkeitä tekijöitä, jotka tulee tietää mahdollisimman tarkasti. Mikäli imeytetyn tekopohjaveden pH-arvo nousee riittävän emäksiseksi, ei kulutukseen lähtevälle vedelle tarvitse järjestää erikseen alkalointikäsitelyä. Niinpä pohjaveden emäksisyyden aiheuttajan, eli kalsiitin (karbonaattimineraali, CaCO_3) esiintymistä haluttiin tutkia (Lindqvist ja Lallukka 2002 sekä Tiljan-

der ja muut 2004). Tutkimusten tavoitteena oli selvittää kalsiittia sisältävien kerrosten sijainti ja laajuus sekä arvioida maaperässä luontaisesti esiintyvän kalsiitin määrä ja laatu. Monilla suomalaisilla pohjavesi- ja tekopohjavesilaitoksilla veden pH-arvoa joudutaan säätämään emäksisemmäksi ennen veden johtamista putkistoon. Näissä tapauksissa veden pH-arvon nostamiseen käytetään usein kalsiittia. Kalsiitin esiintyminen Virttaankankaalla saattaa poistaa tekopohjaveden jälkikäsitelytarpeen veden pH-arvon säätämisen osalta.

Karbonaattimineraalien esiintymistä selvitetiin kartoittamalla emäksisen pohjaveden alueet kenttämittarilla mittaamalla pohjaveden pH kerroksittain suoraan pohjavesiputkesta. Sen lisäksi harjuytimestä tai harjuydintä lähellä olevasta vyöhykkeestä otettiin maanäytteitä yhteensä 19 kairanreiästä metrin välein jatkuvana näytesarjana maanpinnalta kallioon saakka. Näytteistä tutkittiin GTK:n laboratoriossa kokonaishiilen määrä LECO-analysaattorilla (GTK:n menetelmä 811L) olettaen, että maannoskerroksen alapuolisen maa-aineksen hiili on epäorgaanista ja epäorgaaninen hiili on pääasiassa karbonaattia. Sen lisäksi näytteistä uutetusta vedestä tutkittiin pH ja sähköjohtavuus sekä osasta näytteitä määritettiin mineraalikoostumus röntgendiffraktiomenetelmällä (XRD). Lisäksi näytteistä löydettyjen kalsiittirakeiden isotooppikoostumusta verrattiin tunnettuihin karbonaattiesiintymiin kalsiitin alkuperän selvittämiseksi.

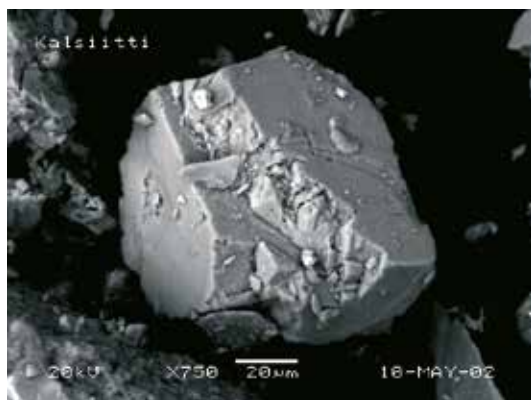
Tutkimustulosten mukaan karbonaattia esiintyy tasaisesti tutkimusalueella lukuun ottamatta maan pintaosien uudelleen kerrostunutta ranta-hiekkakerrostumaa, jonka paksuus on noin 0–20 metriä. Tässä kerroksessa karbonaattia ei esiinny lainkaan tai sitä on hyvin niukasti. Laboratorio-olosuhteissa tehdyt sähkönjohtavuus-, pH- ja kokonaishiilipitoisuusmääritykset korreloivat keskenään suhteellisen hyvin, kun jätetään huomiotta maannoskerroksen orgaanisen aineksen



Kuva 9. Kokonaishiili (C_{tot}), sähköjohtavuus (EC) ja pH havaintoputkessa 473 (Tiljander ja muut 2004).

vaikutus kokonaishiilen määrään. Kuvasta 9 nähdään kuinka korkea pH-arvo korreloi sähköjohtavuuden ja kokonaishiilen määrän kanssa.

Karbonaatin esiintyminen todennettiin XRD-menetelmällä ja elektronimikroskopisilla tutkimuksilla, jossa löydetty kalsiitirakeet olivat keskimäärin noin 0,1 mm suuruisia (Kuva 10). Muodostuman karbonaattipitoisuus jää alle 1 %:n, mutta hienorakeisella kalsiitilla on runsaasti reaktiopinta-alaa, jolloin pienetkin kalsiittimäärät nostavat pohjaveden pH-arvoa. Tutkimuksen tulokset eivät antaneet varmaa käsitystä kalsiitin alkuperästä, mutta myöhemmissä GTK:n



Kuva 10. Elektronimikroskopikuvaa kalsiitirakeesta (Lindqvist ja Lallukka 2002).

selvityksissä on voitu osoittaa kalsiumkarbonaatin olevan mannerjäätikön irrottamaa ja kuljettamaa ainesta, joka on peräisin Satakunnan alueella esiintyvistä jotunihiekkakivestä.

Vedenjohtavuusmittaukset

Virtaankankaan pohjavesiputkista on vuosien saatossa tehty erilaisia *in situ* -vedenjohtavuustutkimuksia, joiden avulla on pyritty määrittämään maaperän eri kerrosten vedenjohtokykyä (K-arvoa) ja vedenjohtokyvyn vaihtelua harjun eri osissa. 1990-luvun alussa tehtiin erityyppisiä putkivirtausmittauksia (Reijonen 1991a) ja 2000-luvulla tehdyissä vedenjohtavuustutkimuksissa on käytetty Pöyry Environment Oy:n kehittämää niin kutsuttua K-testerimenetelmää (Hakoniemi ja Ikäheimo 2004).

Kuvassa 11 on esitetty K-testerilaitteisto. Tällä menetelmällä voidaan mitata maaperän kerrosten vedenjohtavuutta määrävälein suoraan pohjavesiputkista pohjaveden pinnan alapuoliselta osalta. Menetelmässä tulvilla suljettuun havaintoputken siiviläosaan johdetaan vettä mitatun samalla vedenpaineen muutosta. Mitatun vesimäärän ja vedenpaineen muutoksen tuloksista saadaan määritettyä erityisellä laskentakaavalla kerroksen vedenjohtavuus. Mitä suurempi on vesimäärä ja



Kuva 11. Kuva K-testeristä.

Kuva: Jukka Ikäheimo, Pöyry Environment Oy.

mitä pienempi on vastaava vedenpaineen nousu, sitä suurempi on siivilän ulkopuolisen maakerroksen vedenjohtavuus.

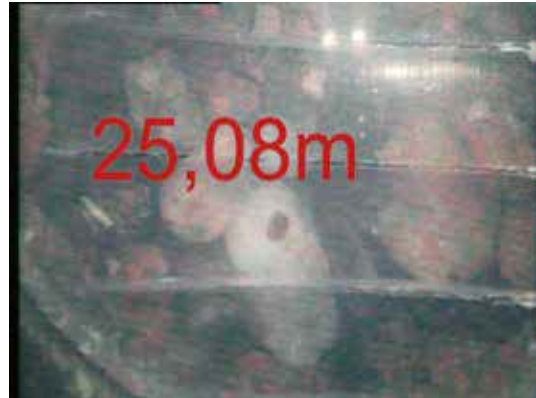
Virttaankankaan tutkimuksissa käytettiin yhden metrin mittausväliä ja mittaukset suoritettiin koko siivilän osuudelta. Virttaankankaalla K-testerimitaustuloksia ja niistä johdettuja vedenjohtavuuden K-arvoja on käytetty hyväksi mm. kaivonpaikkojen määrittelyssä ja kaivojen alustavissa mitoituksissa.

Pohjavesiputkien videokuvaus

Uusimmissa Virttaankankaalle asennetuissa läpinäkyvissä pohjavesiputkissa on käytetty videokuvaustekniikkaa eri maaperäkerrostumien määrittämiseksi. Menetelmän ideoi ja putket toimitti Maa ja Vesi Oy (nyk. Pöyry Environment Oy). Pohjavesiputkeen mahtuvalla videokameralla voidaan kuvata pohjaveden pinnan alapuolelta sedimenttikerrosten sijaintia ja raekojakaumaa (Kuva 12 ja Kuva 13). Menetelmän avulla kairauksen yhteydessä otettavaa maanäytteenottoa voidaan vähentää, minkä ansiosta kairaustyö nopeutuu ja kairauskustannukset pienenevät. Videokuvaus on todettu hyväksi menetelmäksi esimerkiksi kaivonpaikkatutkimuksissa, jossa maa-aineksen vaihtelusta saadaan yksityiskohtai-



Kuva 12. Pohjavesiputken videokuvauslaitteisto. Kuvassa vasemmalla maassa näkyy videokamera, joka lasketaan reikään kuvassa oikealla näkyvän laskulaitteen avulla.



Kuva 13. Stillkuva putkivideosta.

sempi kuva ja kerrosrajat voidaan määrittää tarkemmin kuin normaalisti kairauksen yhteydessä otetuista maanäytteistä. Lisäksi videokuvaamalla saadaan määritettyä yhtenäinen kerrossarja koko maaperäkerrostuman paksuudelta, kun taas edustavia maaperänäytteitä ei välttämättä aina saada kaikista kerroksista.

2.3 Sedimentologiset tutkimukset

Virttaankankaalla on tehty useita sedimentologisia selvityksiä 1950-luvulta alkaen alueen kerrostumishistorian tulkitsemiseksi. Vuonna 2004 valmistui alueen sedimentologista historiaa käsittelevä väitöskirja (Mäkinen 2004). Tutkimuksen yhteydessä kaikista alueen hiekkakuopista ja muista maaperärakenteiden leikkauksista tehtiin sedimentologiset kuvaukset, joiden perusteella voitiin identifioida seuraavat kerrostumisvaiheet:

- harjuytimen tunneli- ja railovaiheet
- glasilakustrinen vaihe
- rantahiekkojen uudelleenkerrostuminen
- piilosuppien muodostuminen

Sedimentologisia havaintoja tulkittiin yhdessä alueelta tehtyjen kairaushavaintojen sekä geofyysikaalisten tutkimustulosten, erityisesti maatum-

kahavaintojen kanssa kerrostumisyksiköiden rakenteen kuvaamiseksi. Alueen sedimentologisen historian selvittämiseksi tutkittiin havaittujen maaperän kerrossarjojen suhteita ja yhteyksiä toisiinsa. Maaperän rakenteita verrattiin alueen kallioperän tasoon sekä mannerjään reunan asemaan eri kerrostumisajankohtina.

Erilaiset kerrossarjat ja niiden sisältämän maa-aineksen ominaisuuksien vaihtelu kuvastaa ko. maa-aineksen kerrostumisen aikaansaaneen geologisen prosessin muutoksia. Tästä johtuen samaan kerrostumistapahtumaan liittyen voi kerrostua ominaisuuksiltaan ja kerrostumissuunniltaan suuresti poikkeavia maa-aineksia, toisaalta taas erilaiset prosessit voivat kerrostaa samankaltaisia maa-aineksia. Alueen sedimentologisen mallin perusteella voidaan yhdistää eri alueilta ja korkeustasoilta kerätyt havainnot toisiinsa geologisesti järkevällä tavalla. Samalla voidaan sulkea pois kerrostumistapahtumia, jotka eivät sovi alueen sedimentologiseen malliin.

Vuoden 2004 jälkeen käytössä olleilla maa-ainesten ottoalueilla on käyty täydentämässä sedimentologisia havaintoja, kun kaivun seurauksena on paljastunut uusia kerrosrakenteita. Aktiivisimmilla soranottoalueilla rakenteet ovat esillä vain lyhyitä aikoja, jonka jälkeen ne maanoton myötä tuhoutuvat. Myös uusien kairaustulosten tulkintaa helpottaa kairaustuloksen vertailu sedimentologiseen malliin. Sedimentologisen mallin avulla voidaan selittää Virttaankankaan alueelle tyypillisten kerrostumien piirteitä. Näitä ovat muun muassa rantahiekkakerrostuman pohjalla esiintyvä kivistä soraa sisältävä kerros, häiriintyneet supparakenteet, tai karkean harjuaineksen pohjakerroksissa esiintyvät epäyhtenäiset siltilinssit. Ilman sedimentologista mallia kyseisten kerrosten esiintyminen aiheuttaisi suuria ongelmia kairaustulkintaan.

Alueen sedimentologisten selvitysten ja pohjavesitutkimusten perusteella Virttaankankaan maaperästä erotettiin viisi hydrogeologista yksik-

köä, joiden perusteella aluetta kuvaavat rakenne-mallit ja virtausmallit on tehty. Hydrogeologiset yksiköt yhdistävät sedimentologiset havainnot pohjaveden virtaukseen siten, että ne kuvaavat kerrostumisprosessien seurauksena syntyneitä vedenjohtavuusominaisuuksiltaan yhtenäisiä ja jatkuvia maaperän suurrakenteita. Tämän hydrogeologisen tulkinnan avulla alueelta kerättyä yksityiskohtaista maaperän rakennetietoa on voitu jäsenellä muotoon, joka ottaa pohjaveden virtauksen kannalta oleelliset maaperän ominaisuuden vaihtelut huomioon. Pohjaveden liikkeitä analysoimalla on voitu tarkentaa hydrogeologisten yksiköiden muotoa alueilla, joiden rakenteen kuvaaminen sedimentologisten havaintojen avulla ei ole ollut mahdollista. Näitä alueita ovat esimerkiksi harjun reuna-alueet, joilla ei ole maanottoa sekä syvällä esiintyvät harjun rakenteet, joita ei voida havaita maanpinnalta.

2.4 Geofysikaaliset tutkimukset

Seismiset refraktioluotaukset

Seismisissä tutkimuksissa mitataan räjäyttämällä tai mekaanisesti lyömällä tuotettujen täryaaltojen etenemisnopeutta maa- ja kallioperässä. Seismisten aaltojen etenemisnopeus riippuu väliaineen ominaisuuksista kuten maalajista, maalajin tiiveydestä ja vesipitoisuudesta. Seismiset täryaallot tahtuvat kimmoisilta ominaisuuksiltaan poikkeavien aineiden rajapinnoilta. Tahtuviin aaltoihin perustuvaa mittausta sanotaan refraktioluotaukseksi. Menetelmässä maaperään asennetaan linja geofoneja, jotka rekisteröivät seismiset aaltoliikkeet seismogrammiksi. Seismogrammin perusteella piirretään aika-matkakuvaaja, josta voidaan määrittää maaperän kerrospaksuudet. Menetelmän avulla voidaan määrittää maapeitteen kokonaispaksuus, pohjaveden pinnan sijainti ja kalliopinnan asema sekä myös eri maaperäkerrosten paksuuksia mikäli ne seismisiltä ominaisuuksiltaan riittävästi poikkeavat toisistaan ja ovat riittävän paksuja.

Virttaankankaalla seismisiä luotauksia ovat tehneet Maa ja Vesi Oy (1972) Maa ja Vesi Oy ja Suunnittelukeskus Oy (1975) ja Suomen Pohjavesitekniikka Oy (1991). Seismisiä mittausrinjoja on tehty Virttaankankaalla yli 20 kilometriä.

Painovoimamittaukset

Painovoimamittauksen eli gravimetrinen mittauksen avulla voidaan tutkia tiheydeltään ympäristöstä poikkeavien muodostumien paksuutta. Koska maapeitteen tiheys on kallioperän tiheyttä huomattavasti pienempi, voidaan painovoimamittauksia käyttää maapeitteen paksuuden arviointiin edellyttäen, että maapeitteen paksuusvaihtelut ovat riittävän suuria. Painovoimaa mitataan gravimetrillä, joka on tarkka putoamiskiihtyvyyden mittalaite eli periaatteessa erittäin herkkä ja tarkka jousivaaka (Kuva 14).

Painovoimamittauksessa kunkin mittauspisteen korkeusasema (metriä merenpinnan yläpuolella) tulee tietää. Maapeitteen paksuutta määrittäessä mittausrinjat sijoitetaan maastoon siten, että niiden alku- ja loppupäät ovat kalliopaljastumilla tai pisteillä, joissa maapeitteen paksuus tunnetaan tarkasti. Näin voidaan arvioida painovoiman alueellinen vaihtelu, joka on perustasona maapeitteen paksuustulkinnalle. Kun maapeitteen ja kalliion tiheusero tunnetaan, voidaan painovoimamittaus tulosten perusteella laskea maapeitteen paksuus.

Painovoimamittauksen avulla ei voida määrittää maaperän eri kerroksia tai pohjaveden pinnan korkeutta, mutta näitä tietoja voidaan käyttää hyväksi tulkittaessa kalliopinnan asemaa. Painovoimamittaus ei ole kovin tarkka menetelmä maapeitteen paksuuksien tulkittamiseen.

Geologian tutkimuskeskus on tehnyt painovoimamittauksia Virttaankankaalla ja sen ympäristössä neljänä eri vuonna (Geologian tutkimuskeskus 1992, Elo 1998, Geologian tutkimuskeskus 2003 ja Geologian tutkimuskeskus 2006). Paino-



Kuva 14. Kuvassa painovoimamittausta Virttaankankaalla elokuussa 2003. Kuvassa näkyvä mittalaite on gravimetri. Kuva: Juba Kääriä.

voimamittauslinjoja on tehty Virttaankankaalla yli 70 kilometriä.

Maatutkaluotaukset

Maatutka lähettää antenniyksikkönsä avulla sähkömagneettisia aaltoja lyhyinä pulsseina maaperään. Kun aaltorintama kohtaa sähköiseltä ominaisuudeltaan muuttuvan väliaineen rajapinnan niin osa lähetetystä aaltoenergiasta heijastuu takaisin. Takaisin palautuneen aaltoenergian voimakkuus ja edestakaiseen matkaan kulunut aika rekisteröidään ja peräkkäiset luotaukselokset piirretään jatkuvana maatutkaprofiilina. Maatutkaprofiilista voidaan erottaa sellaisia rajapintoja kuten kallio, pohjaveden pinta sekä osin kerrosjärjestyksestä riippuen yleensä maalajien vaihtelun pääpiirteet, kuten hiekassa ja sorassa esiintyvät hienot silttiset tai saviset välikerrokset. Edellytyksenä kuitenkin on, että maakerrokset ovat maatutkan syvyysulottuvuuden päässä.

Maatutkan syvyysulottuvuus riippuu valitusta taajuudesta ja maaperässä tapahtuvan signaalin vaimenemisesta. Korkeammilla taajuuksilla syvyysulottuvuus on pienempi, kuin matalilla taajuuksilla, mutta mittauksen resoluutio on parempi. Maatutkan syvyysulottuvuus on kuivassa hiekka-soramaassa korkeintaan noin 30 metriä. Lisäksi maatutkan avulla voidaan tunnistaa isoja viistokerroksellisia kerrostumisrakenteita ja suuria häiriörakenteita kuten kuvassa 15 näkyvä piilosuppa. Maatutkauksessa käytettävä taajuusalue vaihtelee yleensä n. 50 MHz:n ja 1,5 GHz:n välillä.

Virttaankankaalla maatutkaluotauksia on tehnyt Geologian tutkimuskeskus (1989), Geo-Work Oy (1988, 1990, 2002, 2003 ja 2005) sekä Turun yliopisto (julkaisematon 2002, 2003). Maatutkalinjoja on tehty Virttaankankaalla yli 80 kilometriä.

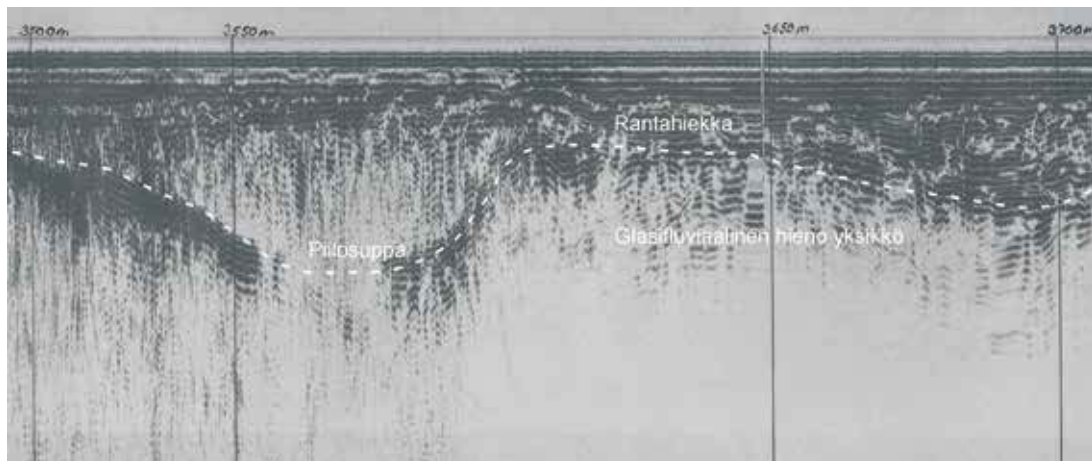
2.5 Pohjaveden pinnan seuranta

Käsi- ja automaattimittaukset

Pohjaveden pinnan korkeutta seurataan nykyisen vedenottoluvan edellyttämän seurantavelvoitteen

lisäksi vapaaehtoisen seurantaohjelman mukaisesti. Normaalin seurannan lisäksi vedenpintojen mittauspisteiden määrää ja mittaustaajuutta säädelään vallitsevan tutkimustarpeen, esimerkiksi imeytyskokeiden toteuttamisen mukaisesti. Vuoden 2006 aikana Virttaankankaan tutkimusalueella vähintään kerran kuussa mitattavia pohjavesiputkia oli noin 180 kpl. Näistä automaattisessa vedenpinnanmittauksessa oli 18 pohjavesiputkea ja loput mittauksista on tehty sähköisellä pohjavedenpintamittarilla käsin mitaten (Kuva 16 ja Kuva 17).

Automaattimittarit lähettävät kerran vuorokaudessa mitaamansa vedenpinnan korkeuslukemat GSM-datapuheluin valvomo-ohjelmaan, josta tiedot tallentuvat automaattisesti tietokantaan. Modeemiyhteyden avulla automaattimittareiden toimintaa, kuten esimerkiksi mittaustaajuutta voidaan säädellä toimistolta käsin etäyhteyden kautta. Käsimittauksella mitatut vedenpintaloket syötetään tietokantaan erillisellä syöttöohjelmalla, jota voidaan myös käyttää etäyhteyden kautta. Vedenpintojen syöttöohjelma tarkastaa mittaustietojen oikeellisuuden vertaamalla pinoista tehtyjä havaintoja tietokannassa jo oleviin mittaushavaintoihin ennen tietokantaan tallentamista.



Kuva 15. Maatutkaprofiilikuva Virttaankankaalta.

Maatutkaprofiilissa näkyy sedimenttikerrostuman häiriörakenteena erottuva piilosuppa.



Kuva 16. Pohjaveden pinnan korkeuden automaattimittari ja datansiirtoyksikkö.



Kuva 17. Vedenpintojen käsimittausta. Mittaajana Turun Seudun Vesi Oy:n kenttäimestari Jorma Paavola.

Lähteiden ja arteesisten kaivojen virtaamamittaukset

Mittapatoja on rakennettu Virttaankankaalle suurimpiin lähteisiin ja niiden virtaamahavaintoja on tallennettuna TSV:n tietokannassa alkaen vuodesta 1995. Lähteiden purkuoihin on asennettu Thompsonin kolmiomittapadot, joiden avulla lähteiden virtaamamäärät voidaan mitata (Kuva 18). Seurattavia lähteitä on yhteensä 5 kappaletta, joista merkittävimmät ovat Alastaron Myllylähte ja Kankaanrannan lähde usean tuhannen kuutiometrin vuorokausivirtaamallaan. Lähteiden virtaamamittaukset tehdään noin kerran kuussa.

Virttaankankaan pohjoispuolella Harjunkylässä sekä Alastaron Myllylähteen ympäristössä (Kuva 5) esiintyy paineellisen pohjaveden alueita, joissa on kymmeniä yksityiskaivoina toimivia arteesisia kaivoja eli ns. lirikaivoja. Kahteen Harjunkylän lirikaivoon on asennettu magneettiset virtaamamittarit, joiden mittaustulokset lähetetään automaattisesti GSM-datana kerran vuorokaudessa TSV:n tiedonhallintajärjestelmään. Alueen muiden lirikaivojen virtaamaa mitataan tarvittaessa mittakannun ja sekuntikellon avulla.

Sadantatiedot

Pohjaveden pinnan seurannan kannalta tärkeät sadantatiedot saadaan aluetta lähinnä sijaitsevilta Oripään Teinikiven ja Vampulan Sallilan sääasemilta. Päivittäiset sadantatiedot ovat kuukausittain noudettavissa FTP-palvelimelta, josta ne siirretään tietokantaan. Tietokannassa on tallennettuna päivittäiset sadantatiedot vuodesta 1999 lähtien.

Taulukossa 1 on esitetty Oripään Teinikiven ja Vampulan Sallilan sääasemien yhteenlasketut keskiarvot kuukausittaisesta sadannasta (millimetreinä) vuosilta 2001 - 2006. Samassa yhteydessä on verrattu kuukausittaisen sadannan poikkeamaa millimetreissä vuosien 1971 - 2000 kolmen Virttaankangasta lähimpänä sijaitsevan



Kuva 18. Alastaron Myllylähteelle asennettu Thompsonin mittapato.

sääaseman lasketusta kuukausittaisesta keskiarvosta (Oripään Teinikivi, Vampulan Sallila, Turun lentoasema). Taulukossa on korostettu punaisella kuukaudet, joiden aikana sadanta on jäänyt alle pitkäaikaisen keskiarvon.

2.6 Imeytyskokeet

Virttaankankaalla tehtiin imeytyskokeita jo 1990-luvun alussa. Aiempien imeytyskokeiden tulokset ovat olleet käytettävissä myös tekopohjavesihankkeen nykyisessä toteutusvaiheessa. Aiemmista imeytyskokeista kirjoitetut raportit eivät valitettavasti sisällä kaikkia yksityiskohtia imey-

Taulukko 1. Sadanta vuosina 2001-2006 verrattuna keskimääräiseen kuukausittaiseen sadantaan. Alastaron keskimääräinen kuukausisadanta ajalta 1971-2000. Keskiarvo on laskettu kolmen lähimmän sadeaseman mukaan. Vuoden 2006 sadanta on laskettu kahden lähimmän sadeaseman mittausten perusteella (Vampulan Sallila ja Oripään Teinikivi).

Huomattavaa on erityisesti se, että pitkän aikavälin keskiarvoa pienemmät sademäärät (erotus-sarakkeen negatiiviset arvot) ajoittuvat vuosina 2002-2005 pääosin niihin kuukausiin, jolloin pohjavettä muodostuu. Tästä johtuen pohjaveden pinnat laskivat voimakkaasti kyseisinä vuosina.

Taulukko on laadittu Ilmatieteen Laitoksen toimittaman aineiston pohjalta.

Copyright: Ilmatieteen Laitos.

Kuukausi	Keskimääräinen sadanta mm/kk	2001	Erotus	2002	Erotus	2003	Erotus
tammi	44	32,4	-11,6	89,8	45,8	56,3	12,3
helmi	32	37,7	5,7	59,6	27,6	9,1	-22,9
maalis	35	32,2	-2,8	42,7	7,7	7	-28
huhti	35	53,5	18,5	3,1	-31,9	22,1	-12,9
touko	34	35,4	1,4	20,6	-13,4	97,8	63,8
kesä	57	25,9	-31,1	95,6	38,6	38,4	-18,6
heinä	77	88,7	11,7	84,1	7,1	40,2	-36,8
elo	78	52	-26	24,2	-53,8	48,8	-29,2
syys	63	139,1	76,1	12,5	-50,5	5,5	-57,5
loka	64	95,7	31,7	25,5	-38,5	72,6	8,6
marras	62	48,2	-13,8	45,1	-16,9	53,2	-8,8
joulu	51	31,6	-19,4	8,4	-42,6	91,1	40,1
Yhteensä	632	672,4	40,4	511,2	-120,8	542,1	-89,9

Kuukausi	Keskimääräinen sadanta mm/kk	2004	Erotus	2005	Erotus	2006	Erotus
tammi	44	39,2	-4,8	89,9	45,9	30,7	-13,3
helmi	32	42,2	10,2	23,8	-8,2	20,1	-11,9
maalis	35	22,8	-12,2	8,3	-26,7	28,7	-6,3
huhti	35	14,1	-20,9	15,3	-19,7	52,9	17,9
touko	34	28,9	-5,1	30,7	-3,3	41,2	7,2
kesä	57	92,1	35,1	51,3	-5,7	35	-22
heinä	77	90,8	13,8	48,5	-28,5	21,9	-55,1
elo	78	54,8	-23,2	145,2	67,2	70,5	-7,5
syys	63	81	18	16,3	-46,7	52,7	-10,3
loka	64	24,9	-39,1	47,6	-16,4	151,85	87,85
marras	62	51,3	-10,7	99,7	37,7	67,7	5,7
joulu	51	105,1	54,1	41,6	-9,4	82,7	31,7
Yhteensä	632	647,2	15,2	618,2	-13,8	655,95	23,95

tyskokeiden toteuttamisesta, kuten esimerkiksi imeytettyjen alueiden tarkkoja koordinaatteja. Imeytettyjen alueiden rajat on arvioitu ja tarvittaessa digitoitu raporteissa esitetyistä kartoista.

Imeytyskokeet aloitettiin uudestaan Virttaankankaalla 2000-luvulla (Taulukko 2). Näistä kokeista on saatavilla tarkat tiedot, jotka sisältävät mm. imeytyskokeiden aloitus- ja lopetuspäivämäärät, tarkat imeytys- ja pumppausmäärätiedot,

imeytetyn alueen koordinaatit sekä monipuoliset havainnot pohjaveden pintojen muutoksista vedenotto- ja imeytysalueilla. Imeytyskokeiden aiheuttamista muutoksista pohjavedenpintoihin on tehty myös animaatioita, joista on nopeasti nähtävissä imeytyksen vaikutukset ja vaikutusalueen laajuudet.

Taulukko 2. Virttaankankaalla 2000-luvulla suoritettavat kokeet.

Alueen tunnus	Alku pvm	Loppu pvm	Kaivo	Määrä (m ³ /d)	Kesto (vrk)
IA300	14.7.2003	29.7.2003	VIK21	5712	16
IA300	29.7.2003	15.8.2003	VIK21	5800	17
IA300	15.8.2003	24.8.2003	VIK21	5990	9
IA301	3.10.2006	4.12.2006	VIK42	5920	63
IA301	4.12.2006	29.1.2007	VIK42	4392	56
IA302	29.9.2004	18.10.2004	VIK41	5960	19
IA302	19.10.2004	11.11.2004	VIK41	6039	23
IA302	12.11.2004	25.11.2004	VIK41	5504	14
IA303	19.9.2003	7.10.2003	VIK41	5997	18
IA303	8.10.2003	28.11.2003	VIK41	5884	9
IA400	16.2.2004	27.2.2004	VIK41	4059	11
IA400	27.2.2004	9.3.2004	VIK41	6482	9
IA400	9.3.2004	15.3.2004	VIK41	5812	6
IA400	15.3.2004	23.3.2004	VIK41	5387	8
IA400 Vanha	5.10.2000	19.10.2000	VIK41	5205	14
IA401	18.6.2004	7.7.2004	VIK41	5897	19
IA401	7.7.2004	22.7.2004	VIK41	5861	15
IA401	23.7.2004	6.8.2004	VIK41	5586	15
IA500	12.6.2002	24.6.2002	VIK41	5731	12
IA500	26.6.2002	10.7.2002	VIK41	5606	14
IA500	10.7.2002	25.7.2002	VIK41	5998	14
IA500 Merkkiainekoe	7.10.2002	7.8.2003	VIK41	6134	298
IA501	25.7.2002	8.8.2002	VIK41	5964	14
IA501	8.8.2002	16.8.2002	VIK41	5937	8
IA501	16.8.2002	23.8.2002	VIK41	6037	7
IA502	3.6.2005	14.7.2005	VIK52	3726	41
IA502	14.7.2005	18.8.2005	VIK52	3543	32
IA502	18.8.2005	12.9.2005	VIK52	4677	24
IA503 (IAS500)	9.11.2005	23.12.2005	VIK52	4931	44

2.7 Pohjaveden laadun seuranta

Seurantaohjelmat

Vuodesta 1999 lähtien on Virttaankankaan vedenottamalla K51 ollut voimassa vedenlaadun jatkuva seuranta nykyisen vedenottoluvan edellyttämää velvoitetarkkailuohjelmaa noudattaen. Tätä aikaisemmin TSV:n vedenlaatu näytteiden otto on ollut satunnaista, liittyen lähinnä yksittäisten tutkimusten tarpeisiin.

Tekopohjavesilaitoksen suunnittelun käynnistyttyä syntyi tarve vedenlaadun laajemmalle seurannalle. Ennen varsinaisen toiminnan aloittamista tarvitaan vedenlaadun tausta-aineistoa. Tätä varten laadittiin omaehtoinen vedenlaadun seurantaohjelma, jonka seurantapisteverkosto kattaa kokonaisuudessaan tulevan tekopohjavesilaitoksen mahdolliset vaikutusalueet. Ennen laitostoinnin alkua tehtävän seurannan tarkoituksena on, että mahdolliset vedenlaadun muutokset voidaan luotettavasti erottaa vedenlaadun luonnon-tilaisesta vaihtelusta. Lisäksi laaja, koko alueen kattava vedenlaatuaineisto tuo lisäinformaatiota tutkittavan alueen hydrogeologiasta.

Säännöllinen pohjavedenlaadun seuranta pohjavesiputkista, lähteistä, Kankaanjärvestä ja yksityiskaivoista aloitettiin Virttaankankaalla vuonna 2002. Näytteenottokierroksia on neljä kertaa vuodessa. Näytteenottoajankohdat valittiin siten, että saatavat näytteet edustaisivat mahdollisimman hyvin luonnollisia vuodenaikaisvaihteluista riippuvia pohjaveden laadun muutoksia. Näytepisteiden määrä on vaihdellut hieman vuosittain. Taulukossa 3 on esitetty näytepisteiden lukumäärät vuonna 2006.

Näytteenotto

Vapaaehtoiseen seurantaohjelmaan liittyviä vesinäytteitä otetaan 3 kertaa vuodessa: helmi-maaliskuussa, heinä-elokuussa ja loka-marraskuussa.

Toukokuun näytekierroksella tehdään ainoastaan vedenlaadun kenttämittauksia pohjavesiputkeen mahtuvalla vedenlaadun moniparametrimittarilla (Kuva 19). Näytteenoton suorittavat TSV:n sertifioidut näytteenottajat.

Taulukko 3. Näytepisteiden lukumäärä vuonna 2006.

*toukokuun näytekierroksella tehdään ainoastaan vedenlaadun kenttämittauksia.

Näytekierros	Näytepisteet kpl		
	Pohjavesiputki	Lähde tai järvi	Yksityiskaivo
Helmi-maaliskuu	25	5	1
Toukokuu*	25	0	1
Heinä-elokuu	35	5	27
Loka-marraskuu	14	0	0

Pohjavesiputkista näytteet otetaan uppopumpulla pumpaamalla. Jotta näyte edustaisi pohjavesiputken ulkopuolella vapaasti virtaavan veden laatua, näytettä pumpataan kunnes vesi havaintoputkessa on vaihtunut 3-5 kertaa. (Mäkelä ja muut 1992). Seurantaan on valittu ainoastaan hyvin toimivia muoviputkia. Lähteiden ja kaivojen vesinäytteenotossa käytetään pullonoudinta.

Seurantaluontoisessa näytteenotossa on vertailukelpoisuuden kannalta tärkeää, että näytteenotto toteutetaan aina samalla menetelmällä ja samalla tavalla. Näytteenotto-ohjelmassa on määrätty kunkin pohjavesiputken pumppausvyvyys ja pumpattavan veden virtausnopeus. Näytteiden otto ja käsittely suoritetaan laboratorion antamien ohjeiden mukaisesti.

Pohjavesiputkista otetuista näytteistä määritetään laboratoriossa taulukossa 4 esitetyt parametrit. Lisäksi lähteistä ja yksityiskaivoista otetaan bakteerinäytteet ja lähteistä myös kiintoainesnäyte.



Kuva 19. Suoraan pohjavesiputkesta tapahtuvaan vedenlaadun mittaukseen soveltuva vedenlaadun moniparametrimittari.



Kuva 20. Pohjaveden laadun mittausta moniparametrimittarilla putkesta 365.
Kuva: Jorma Paavola.

Vedenlaadun kenttämittaukset

Pohjavesinäytteenoton yhteydessä on tehty vedenlaatumäärytyksiä kenttämittarilla suoraan pohjavesivyöhykkeestä. Moniparametrimittari lasketaan pohjaveteen, jossa vedenlaatu mitataan siiviläosasta kerroksittain alkaen pohjavedenpinnasta putken pohjaan asti. (Kuva 20) Näin voidaan määrittää pohjavedenlaadun pystyprofiilit *in situ*-mittauksena. Pohjavesiputkista mitataan pohjaveden lämpötila, pH, hapen määrä, sähkönjohtavuus ja *redox*-potentiaali.

Vedenlaatumittaukset on tehty pohjavesiputkista ennen niiden pumppaamista, jotta pohjavesivyöhykkeestä saataisiin häiriintymätön vedenlaatu-profiili. Edellä kuvattu mittaustapa poikkeaa tavanomaisesta tavasta (Suomen Vesiyhdistys r.y. 2005), jonka mukaan havaintoputkista tehtävät kenttämittaukset tulee tehdä vasta kun putkista on pumpattu riittävästi vettä. Mittaustapaa testattiin Virttaankankaalla mittaamalla kenttämittarilla vedenlaatua 14 eri pohjavesiputkesta ennen pumppausta ja 20 minuutin pumppaamisen jälkeen pumpatusta vedestä. Koetuloksen mukaan toimivissa muoviputkissa vedenlaatu ei mainittavissa määrin muuttunut pumppauksen yhteydessä (Taulukko 5).

Pohjavesiputkien kenttämittauksia on tehty neljä kertaa vuodessa vapaaehtoisen seurannan yhteydessä taulukon 3 mukaisesti. Lisäksi noin 130 muovista pohjavesiputkea on mitattu vedenlaadun moniparametrimittarilla kattavan kolmiulotteisen geokemiallisen kuvan saamiseksi tutkimusalueesta.

Isotooppiseuranta

Vuodesta 2000 lähtien ovat Virttaankankaan pohjaveden ja Kokemäenjoen veden hapen ja vedyn isotoopit olleet jatkuvan seurannan kohteena. Seurannan tarkoituksena on ollut sekä ajallisesti että alueellisesti kattavan hapen ja vedyn

Taulukko 4. Laboratoriossa vesinäytteistä tehtävät analyysit.

Pohjavesiputkista otetuista näytteistä tehtävät analyysit:				
Happi (kenttä)	pH	Sähkönjohtavuus	Kloridi	CODMn
TOC	NH ₄	NO ₃	Kokonaistyyppi	Rauta (suodatettu)
Mangaani (suod.)	FNU	Kalsium	Magnesium	Kokonaisfosfori
PO ₄ - P	Alkaliniteetti	Kovuus		

Kerran vuodessa 26 pohjavesiputken näytteistä määritetään seuraavat raskasmetallit:				
Arseeni	Kadmium	Kupari	Lyijy	Nikkeli
Alumiini	Elohopea			

Taulukko 5. Vertailu pohjavesiputkista mitatuista pohjaveden laatuparametreista ennen pumppausta (in situ) sekä 20 minuutin pumppauksen jälkeen maan pinnalle pumpatusta vedestä (pumpattu). In situ -mittaustulos on keskiarvo pohjavesiputken vedenlaadun syvyysprofiililuotauksesta. Erotussarakkeessa on esitetty in situ -mittausten ja pumpatusta vedestä mitattujen vedenlaatu tulosten välinen ero.

Näytepiste:	Temp (°C)	Ero	Sp Cond (mS/cm)	Ero	DO Conc (mg/l)	Ero	pH	Ero
7	in situ	5,66	0,07	0,00	8,08	0,29	8,95	0,04
	pumpattu	6,13	0,07		7,78		8,91	
25	in situ	5,49	0,08	0,00	10,56	0,50	8,94	0,01
	pumpattu	6,11	0,08		11,06		8,95	
58	in situ	5,69	0,08	0,00	2,57	0,82	7,72	0,11
	pumpattu	6,52	0,08		3,39		7,83	
468	in situ	7,04	0,06	0,00	6,99	1,42	5,71	0,06
	pumpattu	8,11	0,05		8,41		5,77	
550	in situ	6,02	0,11	0,00	12,20	1,81	8,78	0,12
	pumpattu	7,37	0,11		14,01		8,66	
551	in situ	5,90	0,07	0,00	8,24	1,50	9,01	0,03
	pumpattu	6,57	0,07		9,74		8,98	
552	in situ	7,55	0,12	0,02	11,60	0,98	8,61	0,06
	pumpattu	8,06	0,10		10,62		8,67	
554	in situ	5,78	0,10	0,02	10,36	0,87	8,97	0,00
	pumpattu	6,48	0,12		9,49		8,97	
557	in situ	5,96	0,14	0,02	6,38	4,05	8,28	0,00
	pumpattu	6,73	0,13		10,43		8,28	
565	in situ	5,70	0,16	0,03	9,32	0,13	8,56	0,17
	pumpattu	6,33	0,13		9,45		8,73	
566	in situ	5,81	0,08	0,00	11,80	0,07	8,97	0,03
	pumpattu	5,91	0,08		11,87		8,94	
567	in situ	6,16	0,09	0,01	12,34	0,55	8,96	0,12
	pumpattu	5,82	0,10		12,89		8,84	
850	in situ	5,51	0,10	0,00	0,15	1,18	8,75	0,04
	pumpattu	6,08	0,11		1,33		8,71	
850A	in situ	5,30	0,04	0,01	9,57	1,07	7,03	0,28
	pumpattu	5,78	0,04		10,64		6,75	

isotooppien tausta-aineiston kokoaminen. Vuotuisen sekä vuodenaikaisvaihtelun seuraamiseksi on isotooppinäytteitä otettu alussa kahden kuukauden välein ja myöhemmin kerran kuukaudesta tulevasta raakavesilähteestä Kokemäenjoesta sekä Virttaankankaan nykyisestä tuotantokai- vosta K51. Tämän lisäksi isotooppiseurantaan on otettu mukaan muutamia Virttaankankaan tutkimusalueen pohjavesiputkia, joista näytteen- ottoa on ollut neljä kertaa vuodessa. Vuonna 2006 isotooppinäytteitä otettiin Kokemäenjoen ja kaivo K51:n lisäksi yhdeksästä eri pisteestä neljä kertaa vuodessa samassa rytmisissä vapaaehtoisen seurannan vesinäytteenoton kanssa.

TOC - tutkimukset

Turun Seudun Vesi Oy teetti vuonna 2000 yhteistyössä Rauman kaupungin kanssa tutkimuksia, joiden tarkoituksena oli selvittää Virttaankankaan tekopohjavesilaitoksen raakaveden esikäsittelytarvetta sekä veden virtausta ja laatua hiekkakolonnissa. Suomessa tekopohjaveden muodostamisen päätavoite on vähentää imeytet- tävän pintaveden luonnontilaista orgaanista ai- netta. Noin puolet orgaanisen aineksen määrästä on orgaanista hiiltä (TOC, total organic carbon). Tutkimukset liittyivät TEMU –tutkimushank- keeseen (Helmisaari ja muut 2003). Kokemäen- joen veden esikäsittelykokeissa kokeiltiin kahta eri esikäsittelymenetelmää, jonka jälkeen tehtiin hidassuodatus-, maaperäsuodatus- ja hiekk- kolonnikokeita orgaanisen aineksen poistuman selvittämiseksi.

Tampereen teknillisessä yliopistossa aloitettiin 2000-luvun alussa tutkimukset, joiden tarkoituk- sena on selvittää raakaveden laadun ja ympäristö- olosuhteiden vaikutusta raakaveden orgaanisen aineksen poistumiseen sekä orgaanisen aineksen käyttäytymiseen talousveden valmistusprosessin aikana. Kyseisiin tutkimuksiin liittyen valmistui diplomityö (Keränen 2006), jonka tarkoituksena oli tutkia paikallisten olosuhteiden vaikutusta

orgaanisen aineksen poistumisasteeseen sekä ver- rata erilaisten maa-ainesten kapasiteettia poistaa vedestä liukoista orgaanista ainesta. Tutkimuk- sessa käytettiin muun muassa Virttaankankaalta kairausten yhteydessä otettuja maanäytteitä.

2.8 Isotooppitutkimukset

Happi ja vety

Alkuaineiden isotooppeja voidaan käyttää pohja- vesitutkimuksissa luonnon omana merkkiaine- na. Alkuaineen isotooppien välisestä massaerosta johtuen luonnon erilaiset kemialliset ja fysikaali- set prosessit suosivat joko alkuaineen kevyempää tai raskaampaa isotooppia. Esimerkiksi hapen ja vedyn isotooppien suhteita muuttavat prosessit luonnonvesissä ovat haihdunta ja sadanta. Ne aiheuttavat pinta- ja pohjavesien välille huomata- van isotooppikoostumuseron. Pohjavesien iso- tooppikoostumus on peräisin sadannasta, jossa hapen ja vedyn kevyempiä isotooppeja on suh- teessa enemmän. Pintavesissä isotooppien suhde on päinvastainen. Haihdunnan vuoksi raskaam- mat hapen ja vedyn isotoopit ovat rikastuneet suhteessa kevyempiin.

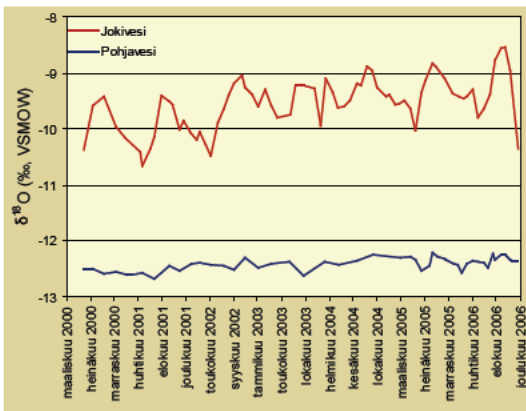
Isotooppikoostumuksen vaihtelut esitetään del- ta-arvoina, mikä kuvaa mitatun näytteen iso- tooppisuhteen promillepoikkeamaa kansainvä- lisen merivesistandardin (VSMOW) vastaavasta isotooppisuhteesta. Lähtövesien isotooppikoos- tumuseron ollessa riittävän suuri, voidaan mene- telmän avulla laskea eri vesien määräsuhteet esi- merkiksi tekopohjavesilaitoksella muodostetussa seosvedessä (Kortelainen 2002).

Useita vuosia jatkuneen isotooppiseurannan perusteella voidaan todeta, että Kokemäenjoen veden ja Virttaankankaan pohjaveden välinen isotooppikoostumusero hapen ja vedyn osalta on riittävän suuri, jotta imeytetyn raakaveden ja luontaisesti muodostuneen pohjaveden se-

koitussuhteet voidaan määrittää suhteellisen tarkasti tekopohjavesilaitoksen käyttöönoton jälkeen. Kuvassa 21 nähdään Kokemäenjoen jokiveden ja Virttaankankaan pohjaveden hapen isotooppikoostumusten ero. Lisäksi kuvaajasta nähdään, että isotooppikoostumuksen vuodenaikaisvaihtelu on selvästi suurempaa jokivedessä kuin Virttaankankaan pohjavedessä. Tuntemalla lähtövesien isotooppikoostumuksen vuodenaikaisvaihtelu mahdollisimman tarkasti voidaan sekoitussuhteen määritystarkkuutta parantaa.

Tritium

Luonnossa vedyn lyhytikäistä isotooppia tritiumia (T eli ^3H) syntyy pieniä määriä ilmakehässä luonnollisen kosmisen säteilyn vaikutuksesta



Kuva 21. Virttaankankaan pohjaveden ja Kokemäenjoen veden hapen isotooppikoostumusvaihtelut kuuden vuoden seurannassa.

(puoliintumisaika 12,32 vuotta). Pohjavesien tritiumpitoisuus periytyy sadannasta. Ilmakehässä tehtyjen ydinkokeiden seurauksena 1950- ja 1960-luvuilla ilmakehän tritiumpitoisuus kasvoi hetkellisesti 10-100 -kertaiseksi ja tritium kulkeutui sateen mukana myös tuona aikana syntyneisiin pohjavesiin. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli pohjavedestä tavataan korkeampia tritiumpitoisuuksia kuin nykyisessä sadannassa, on pohjavesimuodostumassa vielä mukana 1950-1960

-lukujen sadannasta sinne suotaunut vettä (Kortelainen 2002). Tritiumin avulla Virttaankankaalla on pystytty erottelemaan erityyppiset pohjaveden muodostumisalueet toisistaan ja saatu arvokasta tietoa veden luonnollisista virtausnopeuksista muodostumien eri osissa.

Hiili ja strontium

Hiilen (^{12}C , ^{13}C) ja strontiumin (^{88}Sr , ^{87}Sr , ^{86}Sr , ^{84}Sr) isotooppeja on käytetty hyväksi pohjavesigeokemiallisena tutkimusvälineenä määrittäessä Virttaankankaan harjumuodostuman hydrogeologisia yksiköitä ja näiden eri yksiköiden rajoja. Esimerkiksi hiili-isotooppikoostumuksen avulla voidaan geokemiallisesti mallintamalla arvioida muun muassa kuinka pohjavesi on kylästynyt kalsiitin suhteen. Kun Virttaankankaan muodostuman mineralogia (Lindqvist ja Lallukka 2002, Tiljander ja muut 2004), mineralogian yhteys kerrostumishistoriaan (Mäkinen 2004) sekä muodostuman hydrogeologisten yksikköjen kolmiulotteinen rakenne (Artimo ja Mäkinen 2001, Artimo ja muut 2003a, 2003b) tunnetaan, voidaan isotooppisuhteiden avulla määrittää pohjaveden muodostumisalueita ja pohjaveden virtausreittejä ja -yhteyksiä.

Pohjaveden $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -suhde heijastaa veden ja siihen kontaktissa olevan kiviaineksen välistä reaktiohistoriaa ja veden virtausreittejä. Strontiumia vapautuu pohjaveteen kemiallisen rapautumisen kautta, ja täten pohjavesi perii virtausreitiltään maaperän kiviaineksen $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -suhteen, johon vaikuttaa lisäksi myös eri mineraalien erilainen liukoisuus. Strontiumisotooppianalyysiä käytetään maailmalla paljon selvitetessä eri vesien lähdealueita ja vesimassojen sekoittumista.

Tritium - helium ja CFC-yhdisteet

Turun Seudun Vesi Oy tilasi Helsingin Yliopistolta vuonna 2006 tutkimuksen, jonka tarkoi-

tuksena oli selvittää Virttaankankaan eri vesiyksiköiden ikäsuhteita. Ikämäärittäykseen käytettiin kahta rinnakkaista menetelmää, joilla kummallakin pystytään määrittämään tarkasti pohjaveden absoluuttinen ikä. Myös CFC-yhdisteistä tehdyt ikämäärittäykset on sisällytetty Isotooppitutkimukset-otsikon alle, koska kyseistä menetelmää on käytetty yhdessä isotooppitutkimuksiin liittyvän menetelmän kanssa.

Tritium - helium –menetelmässä määritetään vedessä havaitun tritiumin ja tritiogeenisen heliumin pitoisuuksien suhde ($^3\text{H}/^3\text{He}$), jonka perusteella voidaan laskea vesinäytteen ikä. Tritiumpäästöjen huippu eli ns. ”pommipiikki” ajoittuu 1960-luvun puoliväliin, jonka jälkeen ^3H -pitoisuudet ovat laskeneet. Radioaktiivinen tritium (^3H) hajooa helium-3:ksi (^3He) tunnetulla nopeudella. Menetelmä soveltuu hyvin nuorten pohjavesien imeytymisajankohdan ikämäärittäykseen, mutta tritiumnäytteenotto- ja analyysimenetelmät ovat vaativia suorittaa. Siksi tritiumiänmäärittäyksiä käytetään vain erikoistapauksissa.

Klooratut hiilivedyt eli CFC -yhdisteet ovat ihmistoiminnan kautta ilmakehään ja sieltä sateen mukana pohjavesiesiintymiin kulkeutuvia aineita, jotka eivät muutu tai reagoi maaperässä. Virttaankankaalla, kuten muuallakin Suomessa, esiintyy CFC-yhdisteitä erittäin pieninä pitoisuuksina pohjavedessä. CFC -yhdisteiden pitoisuusmittauksia tehtiin kolmesta eri yhdisteestä, CFC-11 (freoni-11), CFC-12 (freoni -12), CFC-113 (triklooritrifluorietaani). Näiden yhdisteiden käyttöönottovuosi tunnetaan tarkasti, joten yhdisteen esiintyminen pohjavedessä kertoo pohjaveden muodostuneen myöhemmin kuin yhdisteen käytön aloitusvuosi. Määrittämällä CFC -yhdisteiden keskinäisten pitoisuuksien suhde voidaan tarkemmin laskea näytteen ikä. Virttaankankaalla määritettiin pohjavesinäytteen ikä yhdeksässä havaintopisteessä. Näytteenottopisteet edustivat harjuytimen pohjavettä, orsivettä ja paineellista pohjavettä.



3 TUTKIMUSMENETELMÄT

3.1 Perinteiset pohjavesigeologiset tutkimukset

Pohjavesikartoitus

Pohjavesien kartoitusta on Suomessa perinteisesti tehty kaupunkien ja kuntien, ympäristökusten ja Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) toimesta. Kunnalliset tutkimukset ovat useissa tapauksissa suunniteltu ja toteutettu ns. kaivonpaikkatutkimuksina vedenhankintaa varten. GTK:n ja ympäristökusten kartoitukset on usein tehty laajemmassa mittakaavassa – niissä on selvitetty pohjavesialueiden rajoja sekä pohjaveden muodostumiseen ja esiintymiseen vaikuttavien geologisten muodostumien rakennetta.

Perinteinen pohjavesigeologinen perusselvitys tutkittavasta alueesta sisältää alueen pintamaalajien maaperäkartoituksen, havainnot maanpinnan topografiasta, avokallioista, lähteiden ja ojitettujen alueiden sijainnista ja korkeustasosta sekä lähdevirtaamista. Näillä tiedoilla voidaan muodostaa yleiskuva pohjaveden muodostumisalueiden koosta, alueella muodostuvan ja alueelta purkautuvan pohjaveden määrästä sekä virtausuunnista. Geologista tulkintaa tutkimusalueen syntytavasta ei tavallisesti voida tehdä ilman pidemmälle vietyjä tutkimuksia. Pohjaveden virtausta estävien maakerrosten alla esiintyvien hyvin vettä johtavien kerrosten kartoittaminen sekä muu kolmiulotteinen havainnointi vaatii perusteellisempaa geologista tutkimusta ja tulkintaa alueen rakenteesta.

Maaperäkairaukset ja pohjavesiputkien asentaminen

Maaperäkairaukset ja niihin liittyvät pohjaveden havaintoputkien asennukset ovat Suomessa eniten käytetty pohjavesigeologinen tutkimusmenetelmä. Virttaankankaan alueella on tehty paino-, heijari-, täry- ja porakonekairauksia. Kaikki TSV:n teettämät maaperäkairaukset on tehty käyttäen raskasta porakonekalustoa koska porakonekairaus kykenee tunkeutumaan kaikkien maakerrosten läpi aina peruskallioon saakka. Kallionpinnan ja irtolohkareiden erottamiseksi rakenneselvityskairauksia on jatkettu kolme metriä kallion sisään. Kevyemmällä kairausmenetelmällä ei ole mahdollista läpäistä kivisiä kerroksia tai yksittäisiä lohkarkeitä, mikä on eräissä tapauksissa johtanut virheellisiin maa-aineskerrosten paksuustulkintoihin.

Kairauksen päättymistavan huolellinen raportointi vähentää virhetulkinnan mahdollisuutta. On erittäin tärkeää erottaa toisistaan merkinnät ”EPS” – ei päästy syvemmälle ja ”EKS” – ei kairattu syvemmälle. Usein kairauspöytäkirja päättyy myös merkintään ”Ki tai Ka” – kivi tai kallio. Vain muutamissa Virttaankankaan uusissa porakonekairauksissa on kairaus lopetettu määräsyytyteen. Näitä kairauksia ovat tuotantokaivojen paikkojen löytämiseen tarkoitetut kairaukset,

jotka on tehty kallioon asti kairattujen putkien välittömään läheisyyteen.

Kairausten tuloksena syntyvä maalajitulkinta perustuu kairaajan havaintoihin kairauksen kulusta, sekä maanäytteiden ottoon ja tulkintaan. Näytteenotto on joko jatkuvaa, määrävälein tapahtuvaa tai kairaajan havaintoihin perustuvaa, jolloin näyte otetaan aina maalajin vaihtuessa. Näytteet otetaan joko kairareistä nousevan huuhteluveden mukana kulkeutuvasta aineksestä tai erikseen putkeen laskettavalla näytteenottimella.

Kairaushavaintojen tekemiseen liittyy aina epävarmuutta. Kevyillä kalustoilla tehtyjen kairausten perusteella on usein mahdollista erottaa vain hienot ja karkeat maalajit toisistaan. Porakonekairauksiin liittyvän näytteenoton avulla voidaan saada näytteitä irtaimista maalajeista. Näissäkin tapauksissa on otettava huomioon näytteenotomenetelmän vaikutus näytteen edustavuuteen. Esimerkiksi huuhtelunäytteen hienoainesta on vaikea saada talteen, karkeat maalajit tarttuvat huonosti tai eivät mahdu näytteenottimeen jne. Lisäksi eri kairaajilla voi olla erilaiset tavat luokitella tai kirjata maa-aineshavaintoja.

Epävarmuustekijöiden minimoimiseksi kairausten raportointia on kehitetty Turun Seudun Veden teettämien tutkimusten osalta siten, että kaikki kairauksen yhteydessä tehdyt havainnot sidotaan yksiselitteiseen syvyyteen jo kairauksen tekohetkellä. Maanäytteet merkitään huolellisesti kestävillä merkkilapuilla ja viedään säilytykseen systemaattisesti siten, että näytteiden massa punnitaan ja näytteet sijoitetaan omille paikoilleen varastoon myöhempää käyttöä varten. Näytteet myös numeroidaan ja näytettä koskevat tiedot tallennetaan tietokantaan.

Pohjavesiputkista tehtävät mittaukset

Vanhimmat kairareikiin asennetut pohjavesiputket Virttaankankaalla ovat rautaputkia, halkaisijaltaan 32 mm tai 50 mm. Rautaputkien ongelmana on kuitenkin niiden korroosio- ja tukkeutumisherkyys sekä putkimateriaalin mahdollinen vaikutus putkesta pumpattavan pohjaveden kemiallisiin ominaisuuksiin. Tästä syystä kaikki TSV:n uudet pohjavesiputket on valmistettu PVC tai PEH -muovista (sisähalkaisija 52 mm). Pohjavesiputket on asennettu siten, että putken siiviläosuudet on sijoitettu karkeimpiin maa-ainekerroksiin, ja hienojen kerrosten kohdalle on asennettu umpiputkea. Pohjavesiputkien yläpään korkeudet Virttaankankaalla on vaaittu yhden senttimetrin tarkkuudella.

Pohjavesiputkista saadaan mitattua pohjaveden pinnan korkeus käyttäen käsimittaria tai automaattimittalaitetta. Yhdistämällä vähintään kolmen pohjaveden pinnan korkeushavaintoa voidaan määrittää vedenpinnan kaltevuus eli gradientti sekä pohjaveden virtaussuunta. Vertaamalla eri ajanjaksolla tehtyjä mittauksia saadaan tietoa pohjavesimuodostumassa tapahtuvista muutoksista. Pisimmät jatkuvat aikasarjat pohjaveden pinnan mittauksista Virttaankankaalta alkavat vuodesta 1988. Pohjavesiputkista voidaan suorittaa pohjavesinäytteenottoa sekä *in situ* -mittauksia.

Lähdevirtaamamittaukset

Pohjavesialueiden ympäristössä esiintyy pohjaveden purkautumisalueita, joita ovat esimerkiksi kosteikot ja suoalueet, ojitetut peltoalueet sekä lähteet. Suoalueille sekä salaojitetuille alueille tapahtuvaa pohjaveden purkautumisen määrää on vaikea mitata perinteisin keinoin, vaikka nämä saattavatkin useissa tapauksissa johtaa vettä pois merkittäviä määriä pohjavesialueelta. Sen sijaan lähteistä ja yksittäisistä ojista tapahtuva virtaa-

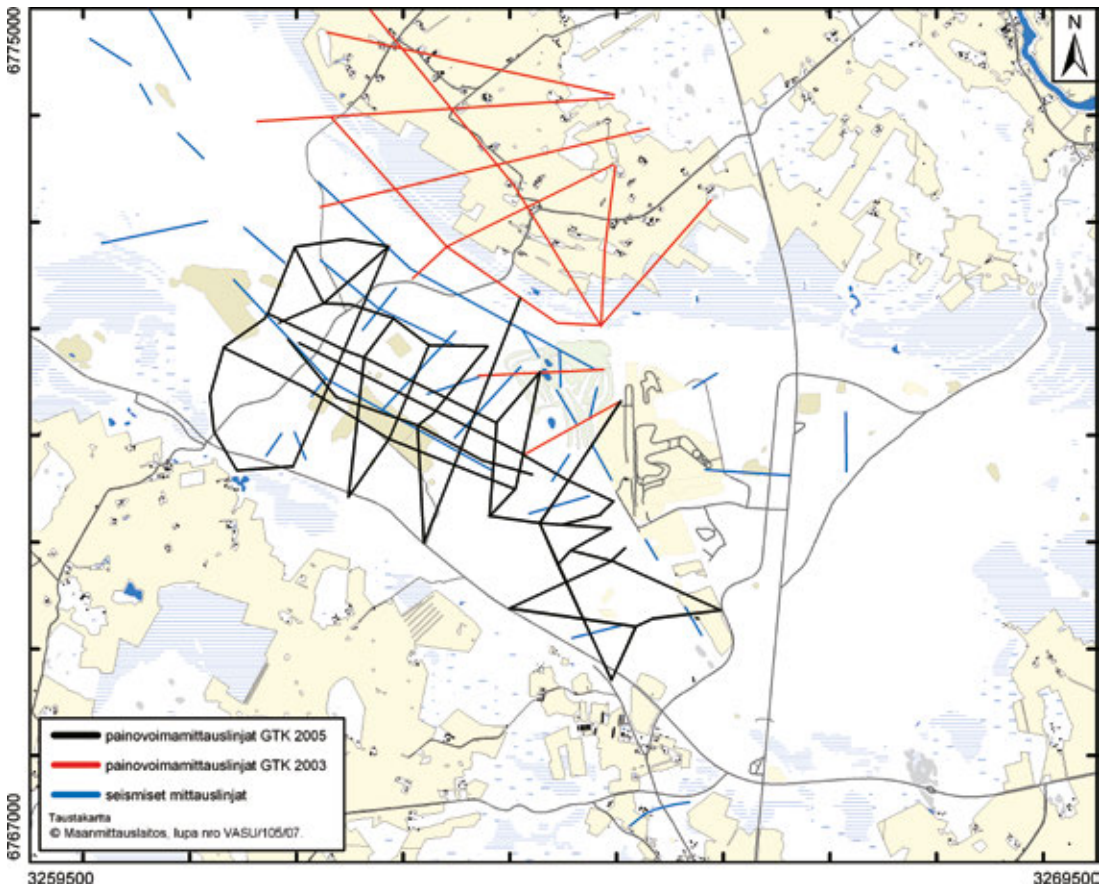
ma voidaan mitata johtamalla purkautuvat vedet mittapadon lävitse.

Geofysikaaliset mittaukset

Virttaankankaan pohjavesitutkimuksissa on käytetty monia geofysikaalisia mittausten menetelmiä alueen rakenteen sekä pohjavesiolosuhteiden selvittämiseen. Niiden avulla on mahdollista saada tietoa geologisista rakenteista tutkimuslinjoilta, ja kartoittaa laajoja alueita sekä vähentää näin kairaustarvetta. Geofysikaaliset mittaukset soveltuvat erityisesti alueille, joiden rakenteiden jatkuvuudesta tarvitaan tietoa, sekä alueille, joiden rakenteen selvittäminen muilla keinoin on hidas-

ta. Mittauksia voidaan tehdä myös alueilla, joiden kairaaminen aiheuttaisi riskin pohjavesiolosuhteiden muuttumiselle, kuten Virttaankankaan pohjoispuolella Harjunkylässä paineellisen pohjaveden esiintymisalueella.

Maaperäkairaus- ja avokalliohavaintojen perusteella muodostettua kalliopinnan korkeuden kuvaa on tarkennettu käyttäen erilaisia aerogeofysikaalisia mittauksia (Elo ja muut 1992). Niissä on kartoitettu ja tulkittu koko tutkimusalueen kallioperän ruuhjeyöhykkeet lentokoneesta tapahtuvalla maankamaran magneettikentän mittauksella. Tästä aineistosta käy ilmi ainoastaan ruuhjeiden sijainti, ei niiden syvyyttä. Sen vuoksi



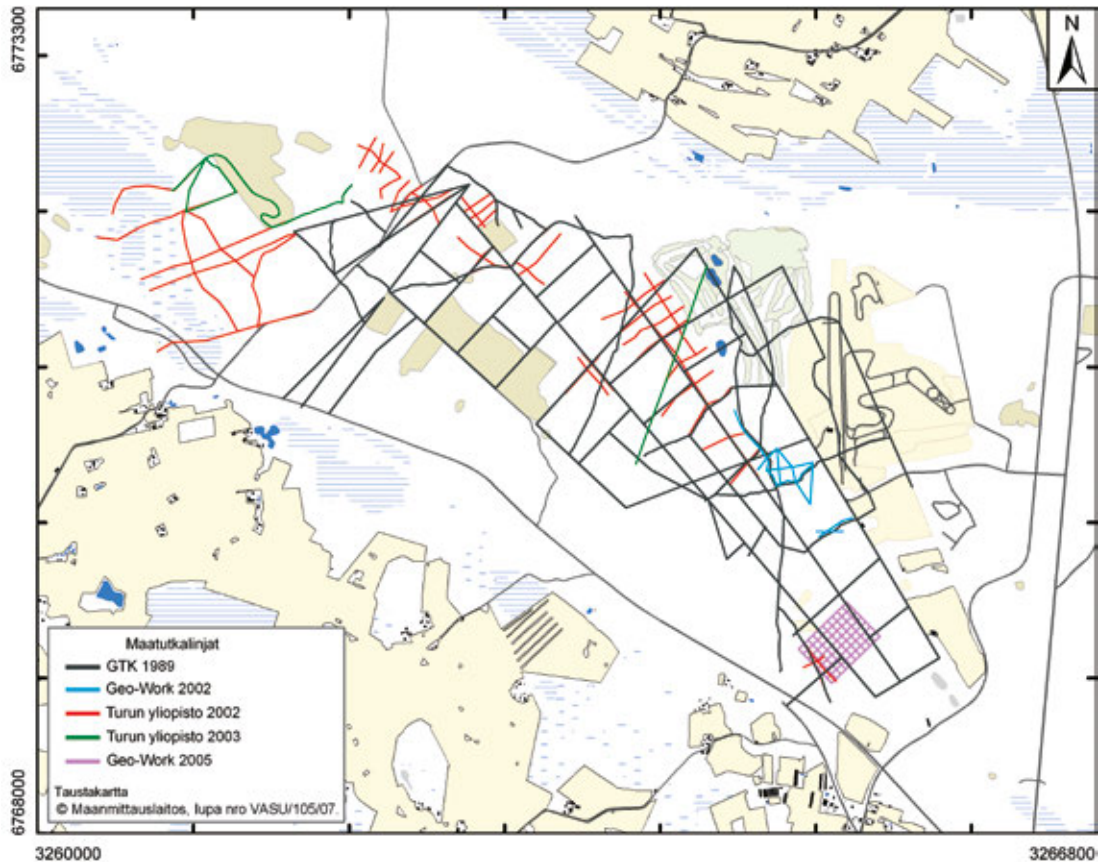
Kuva 22. Painovoimamittauslinjojen ja seismisten luotauslinjojen sijainnit Virttaankankaalla. Kuvasta puuttuu ennen 2000-lukua tehtyjen painovoimamittauslinjojen sijainnit.

em. aineistoja on täydennetty teettämällä alueelle painovoimamittauksia (Geologian tutkimuskeskus 1992, Elo 1998, Geologian tutkimuskeskus 2003 ja 2006), jotka on sijoitettu kulkemaan tunnettujen pisteiden kautta esimerkiksi oletettujen kallion ruhjelaaksojen yli (Kuva 22). Painovoimamittausten avulla voidaan tulkita irtomaalajien paksuutta tutkimuslinjan suunnassa. Virttaankankaan alueella painovoimamittausten tuloksia on käytetty lähinnä suuntaa-antavina, koska tulosten tulkintaan liittyy paljon virhelähteitä.

Sedimenttirakenteiden tulkitsemiseksi Virttaankankaalle on tehty maatulkatutkimuslinjoja (mm. Geologian tutkimuskeskus 1989; Turun yliopisto 2002, 2003 (julkaisematon); Geo-Work

Oy 1988, 1990, 2002, 2003 ja 2005), joiden avulla on mahdollista saada kuvaa maakerrosten ylimmästä 30 metristä (Kuva 23). Maatulkan avulla erottuu hiekan ja soran välissä mahdollisesti esiintyvä vettä pidättävä kerros, orsi- tai pohjaveden pinta sekä muita geologisia rakenteita, mutta menetelmän avulla ei ole helppoa saada tarkkaa tietoa havainnon absoluuttisesta syvyydestä. Useissa tapauksissa maatulkuoikeuksien syvyysoikeus on jäänyt Virttaankankaalla alle 15 metriin.

Maatulalla on tarkasteltu yleisen geologisen rakenteen lisäksi imeytysalueiden soveltuvuutta tekopohjaveden imeyttämiseen ja orsivesialueen laajuutta, erityisesti sen reunan sijaintia. Näissä yksityiskohtaisissa maatulkuoikeuksissa on käy-



Kuva 23. Maatulkatutkimuslinjojen sijainnit Virttaankankaalla. Kartassa on esitetty laajuudeltaan kattavimmat tutkimukset.

tetty antennija, joiden syvyysulottuvuudet ovat olleet suhteellisen pieniä, mutta niillä havaitut rakennekuvat ovat vastaavasti olleet tarkempia.

Merkkiainekoe

Merkkiainetutkimusten avulla voidaan määrittää pohjaveden virtausnopeutta, -suuntaa ja -yhteyksiä akviferissa. Saatavaa tietoa voidaan käyttää hyväksi tekopohjavesilaitoksen imeytys- ja kaivoalueiden suunnittelussa sekä imeytys- ja pumppauskapasiteettien määrittämisessä. Merkkiainekokeen avulla voidaan suhteellisen luotettavasti määrittää virtausaika imeytysalueen ja kaivoalueen välillä. Tämä on tärkeä tieto, sillä veden viipymällä on ratkaiseva merkitys raaka-veden laadun parantumisen kannalta, etenkin humuksen poistumisessa (Helmisaari ja muut 2003). Lisäksi tulosten avulla voidaan tarkentaa alueelle laadittua pohjavesimallia.

Virttaankankaalla suoritettiin merkkiainekoe-tutkimus (16.10.2002 – 7.8.2003) imeytysalueella IA500 (Kuva 24). Tutkimuksen tarkoituksena oli määrittää viipymäaika imeytysalueen IA500 ja kaivoalueen VO50 välillä, sekä määrittää olemassa olevan tuotantokaivon K51 saantoprosentti merkkiaineen suhteen.

Imeytysalue IA500 sijaitsee harjuytimen itäpuolella, kohdassa jossa harjuydin asettuu kallioruhjeeseen ja kääntyy etelään. Imeytysalueen kohdalla harjukerrostuman paksuus on 22-23 metriä, josta pohjaveden pinnan yläpuolista vajovesivyöhykettä on noin 19 metriä. Kaivo K51 sijaitsee 640 metriä imeytysalueelta IA500 etelään ja sijaitsee aivan harjuytimen länsilaidassa (Kuva 24).

Tutkimuksessa merkkiaineena käytettiin jodidi-onia, joka imeytettiin maaperään natriumjodidina (NaI) (CAS-numero: 7681-82-5). Jodidi on luonnossa hyvin vesiliukoinen ja heikosti maahan pidättyvä ioni ja sen luontainen pitoisuus Virttaankankaan pohjavedessä on hyvin alhainen

(2 µg/l – 4 µg/l) (Gustafsson ja muut 2002).

Jodidin katsottiin soveltuvan parhaiten merkkiaineeksi Virttaankankaalla, koska jodidin määrittäysraja on alhainen (n. 1 µg/l) (Nordqvist ja muut 2004) ja se on suurinakin pitoisuuksina haitaton ihmisille ja eläimille. Jodidin saantisuositus on vähintään 150 µg vuorokaudessa (Valtion ravitsemusneuvottelukunta 1998). WHO:n mukaan pitkäaikaisella altistuksella korkeille (1000 µg/l) juomaveden jodidipitoisuuksille ei ole haitallisia terveysvaikutuksia, jonka vuoksi WHO ei ole antanut juomavedestä saatavalle jodille terveysperusteisia suositusarvoja (WHO 1996a, 1996b).

Tutkimuksessa käytettävän merkkiaineen haittomuus ihmisille ja eläimille oli tärkeä merkkiaineen valintaperuste, koska tuotantokaivosta K51 kokeen aikana pumpattu vesi toimitettiin Kaarinaan, Lietoon, Piikkiöön ja Paimioon sekä Turun pohjoisosiin lähes 40 000 kuluttajan tarpeisiin. Vedenottamolta kuluttajille lähtevä vesi laimeni 50 % kun siihen sekoittui toisesta Oripäänkankaalla sijaitsevasta vedenottamosta pumpattu vesi. Vaikka jodidi on suurinakin pitoisuuksina terveydelle haitaton, niin jodidilla on suhteellisen alhainen makukynnys (150 µg/l – 200 µg/l). Koska talousvedessä ei saa esiintyä epätavallisia haju- tai makumuutoksia, merkkiaineen annostelu laskettiin niin, että missään olosuhteissa kulu-tukseen menevän veden jodidipitoisuus ei ylittäisi arvoa 100 µg/l. Tutkimuksen ajan kuluttajille toimitetun talousveden jodidipitoisuus tutkittiin kaksi kertaa viikossa ja tiedot toimitettiin terveys-suojeluviranomaisille.

Koejärjestely

Yhdeksän päivää ennen merkkiainekokeen alkua (7.10.2002 - 16.10.2002) imeytysalueella IA500 aloitettiin imeytys sadettamalla Virttaankankaan omaa vettä kaivosta K41. Noin 3000 m² kokoiselle alueelle imeytettävä vesimäärä oli 6000 m³ vuoro-



Kuva 24. Merkkiainekokeessa käytetyn imeytysalueen (IA 500) ja vedenottokaivojen sijainnit subteessa harjuyttimeen.

kaudessa. Esi-imeytyksen tarkoitus oli saada tasainen veden virtaus vajovesivyohtykykeeseen sekä saada imeytysalueen ja kaivoalueen välinen pohjaveden pinnan gradientti asettumaan kokeen aikaiseen tasapainoonsa ennen merkkiaineen syöttämistä. Imeytystä jatkettiin tauotta koko merkkiainekokeen ajan.

Merkkiaineena käytettyä natriumjodidia liuotettiin 40 kg yhteensä 500 litraan vettä. Merkkiaineliuos syötettiin maaperään sadetusimeytysalueen keskelle erikseen asennettuja putkistoja pitkin (Kuva 25). Merkkiaineen imeytysputkisto oli asennettu niin, että merkkiaineen syöttö tapahtui 1,5 metrin syvyyteen humuskerroksen

alapuolelle. Tällä tavalla haluttiin ehkäistä mahdollinen jodidi-ionin adsorptoituminen maanoskerroksen humukseen. Merkkiaineen syöttö maaperään kesti 20,5 tuntia. Koko imeytysvesimäärään sekoittuneena merkkiaineen laskennallinen lähtökonsentraatio oli 6,8 mg/l.

Näytteenotto

Merkkiaineen pitoisuutta pohjavedessä seurattiin kokeen aikana kaikkiaan 21 eri pohjavesiputkesta, kolmesta tuotantokaivosta sekä neljästä yksityiskaivosta. Lisäksi kulutusvesinäytteitä otet-



Kuva 25. Merkkiaineen imeytysputkisto.

Kuva: Juba Kääriä.

tiin Laakkarin vesisäiliöstä. Pohjavesiputkista ja yksityiskaivoista näytteet otettiin näytteenotto-pumpulla suorittamalla 20 minuutin pumppaus ennen näytteen ottamista. Tuotantokaivoista näytteet otettiin hanasta. Koko merkkiaineko-keen ajan alueella oli kattava pohjavedenpintojen seuranta.

Tutkimusten raportointi

Perinteisten pohjavesigeologisten tutkimusten tuloksia on julkaistu erillisinä tutkimusraportteina, karttoina ja kuvaajina, joiden uudelleenkäyttö ja hyödyntäminen on usein työlästä. Valitettavasti on tilanteita, jolloin vanhaa ja arvokasta tutkimustietoa on muuttunut käyttökelvottomaksi tai kadonnut. Työraporteissa, kuvaajissa tai tuloksia sisältävissä tiedostoissa on puuttunut oleellisia tutkimustulosten uudelleenkäytön mahdollistavia tietoja, kuten esimerkiksi tutkimuksen sijaintikartta, koordinaattitieto täydellisenä tai tiedot tutkimuksen tuloksissa käytetyistä symboleista tai syvyystiedoista. Myös alkuperäisten mittaus-tulosten – ei ainoastaan niiden perusteella laske-tun tuloksen – ilmoittaminen on tärkeää.

Hyvin raportoidun tutkimuksen tekeminen vaatii tarkkaa suunnittelua ja ohjausta, jotta kaikki oleellinen tieto saadaan kerättyä muistiin. Esi-

merkiksi pohjaveden havaintoputken asennukseen liittyvän kairauksen tiedoista tulee käydä ilmi vähintään seuraavat tiedot: Kairauspisteen koordinaatit täydellisinä, maanpinnan korkeus-taso, kairauksen syvyys ja päättymisen syy, tie-to kairauksen aikaisista havainnoista sidottuna yksiselitteisesti havainnon korkeustasoon, näytteenoton kuvaus, näytteenottotapa, pohjaveden pinnan taso tai tasot, asennetun pohjavesiputken materiaali sekä tekniset tiedot, umpiputken ja siiviläosuusien pituudet ja siivilän aukkokoko ja putken pään korkeus maanpinnasta. Lisäksi tie-doista tulee käydä ilmi kairauksesta mahdollisesti otettujen näytteiden tiedot ja tiedot maalajeista.

Koska tutkimusraporteissa vaadittujen tietojen määrä on usein suuri ja erilainen joka tutkimusmenetelmälle, on Virttaankankaan tutkimusten koordinoinnissa erityisesti painotettu tutkimus-tulosten raportoinnin tarkkuutta. Samalla on luotu omia raportointikäytäntöjä erilaisille hank-keeseen liittyville pohjavesigeologisen tutkimuk-sen aloille. Näin tavallisimpien tutkimusten, ku-ten pohjaveden pinnankorkeuksien mittauksen, maaperäkairausten ja vesinäytteenoton tulokset saadaan vaivattomasti kontrolloitua ja siirrettyä tietokantaan. Harvemmin käytettyjen tutkimus-menetelmien tulosten digitointi ja siirto tietokan-taan on tehtävä käsin.

3.2 Pohjaveden virtauksen mallintaminen

Virttaankankaan tekopohjavesihankkeen eri to-teuttamisvaiheiden yhteydessä on laadittu usei-ta alueen pohjaveden virtausta kuvaavia malleja. Vaikka virtausmalleissa tapahtuneet muutokset kuvaavat toisaalta tietotekniikan ja virtausmal-linnusohjelmistojen kehitystä, tärkeämpänä syy-nä mallien kehittymiselle on kuitenkin alueelta kerätyn geologisen tutkimustiedon ja ymmärryk-sen lisääntyminen ja geologian soveltamismah-dollisuuksien kehittyminen jokapäiväisen tutki-mustyön avuksi.

Pohjaveden virtausmallinnusta voidaan tehdä joko yksi-, kaksi- tai kolmiulotteisena riippuen tutkittavasta ongelmasta. Yksiulotteiset mallit ovat usein teoreettisia pohjaveden liikkeiden ja siihen liittyvien ilmiöiden malleja. Kaksi- ja kolmiulotteisten mallien avulla voidaan mallintaa todellisia pohjavesimuodostumia. Virttaankankaan tekopohjavesihankkeen tutkimuksiin liittyvien pohjaveden virtausmallien perusajatuksena on ollut laatia mahdollisimman tarkasti tutkimusalueen geologisia rakenteita kuvaavia malleja. Kaikissa Virttaankankaan pohjaveden virtausmalleissa on kuvattu vähintään pohjavedenpinta, kallionpinta, sekä pohjaveden pinnan alaisten maa-ainesten vedenjohtavuusarvojen vaihtelu siten, että virtausmallin laskema vedenpinta kuvaa mahdollisimman tarkasti luonnosta tehtyjä havaintoja.

Kaikki ennen vuotta 2006 tehdyt Virttaankankaan virtausmallit on toteutettu yksikerrosmalleina, joissa vedenjohtavuusvyöhykkeiden matriisin arvo jokaisessa mallin solussa kuvaa kaikkien pohjaveden pinnan ja kallionpinnan välisten maa-aineshavaintojen keskiarvoa. Näiden mallien maalajien ominaisuuksia kuvaavalle matriisille on määritetty ylä- ja alapinta. Mallin tuloksina syntyvä vedenpinnan korkeustiedot saadaan matriisina, johon sisältyy sekä x-, y-, että z-suunnan sijaintitieto. Yksikerroksiset virtausmallit eivät kuitenkaan ole aidosti kolmiulotteisia, sillä yhdellä virtausmallikerroksella ei ole mahdollista kuvata maa-aineksen vertikaalisuunnassa tapahtuvaa vedenjohtavuusominaisuuksien vaihtelua. Vain aidosti kolmiulotteisen useampikerroksisen virtausmallin avulla on mahdollista kuvata virtaus-suuntien ja virtausnopeuden vaihtelua pohjavesikerroksen eri korkeustasoilla, virtauksen määrää vertikaalisuunnassa, paineellista pohjaveden virtausta sekä orsivesien muodostumista.

Pohjaveden virtausmallit 1990-luvulla

1990-luvun alkupuolella Virttaankankaan alueesta valmistui kaksi erilaista pohjaveden virtausmallia, joista aikaisempi (Reijonen 1991b) on laskettu differenssimenetelmällä, missä mallialue on jaettu suorakulmisiin vaihtelevan paksuisiin soluihin. Sama menetelmä on ollut käytössä myös kaikissa uudemmissa virtausmalleissa. Lähes samanaikaisesti laadittiin alueesta myös elementtimenetelmällä laskettu malli (Saijonmaa ja Ikäheimo 1991), jossa laskenta perustuu vaihtelevan kokoisiin kolmioprisman muotoisiin soluihin. Molemmat mallit keskittyivät Kankaanrannan lähteiden, Kankaanjärven ja Säskyläntien välisen alueen kuvaamiseen, vaikka mallinnettujen alueiden kattamat alueet eroavatkin toisistaan.

Ensimmäisiä Virttaankankaan mallinnustöitä vaikeutti puutteellinen tieto alueen rakenteesta - erityisesti orsivesiesiintymää ei osattu erottaa varsinaisesta pohjavesivyöhykkeestä. Sen vuoksi molempien mallien lähtöaineistoissa oli yhdistetty orsiveden pinnan havaintoja pohjaveden pinnan havaintoihin, mikä aiheutti molempien mallien tuloksiin selkeästi liian korkealle kuvautuvan vedenpinnan Kankaanjärven alueella. Kyseisellä alueella esiintyy todellisuudessa kaksi erillistä vesipintaa noin kahdeksan metrin tasoerolla. Alueen kairaustuloksista kerätyt maalajihavainnot eivät riittävästi kuvastu mainittujen mallien vedenjohtokykyarvoissa, sillä Virttaankankaan geologisten rakenteiden muotoa ja syntytapaa ei myöskään tunnettu riittäväällä tarkkuudella mallien tekohetkellä.

Pohjaveden virtausmallit 2000-luvun alussa

Noin kymmenen vuoden kuluttua edellisten mallinnustöiden jälkeen valmistuivat Virttaankankaan ja Oripäänkankaan alueiden (Seppälä 1999, Ikäheimo ja Mäki-Torkko 2001) virtaus-

mallit, joiden laatimiseen oli käytettävissä huomattavasti enemmän lähtötietoja kuin aiemmissa töissä (Kuva 26). Molempien mallinnustöiden tekemiseen käytettiin yhä käytössä olevaa Processing Modflow for Windows (PMWIN) –virtausmallinnusohjelmaa, jonka sisältämä MODFLOW-virtausmallinnusohjelmisto kuuluu United States Geological Survey'n (USGS) vapaasti jaettavissa oleviin open source –ohjelmistoihin.

2000-luvun alun virtausmallien suurin parannus aikaisempiin virtausmalleihin (Reijonen 1991b, Saijonmaa ja Ikäheimo 1991) verrattuna oli alueen pohjavesiolosuhteiden kuvaustapa, alueen orsivesiyksikön esiintyminen tunnettiin ja orsivesihavainnot voitiin erottaa pohjaveden havainnoista. Silti myös 2000-luvun alun virtausmallit laadittiin yksikerroksisina, mikä ei mahdollistanut orsiveden esiintymisen kuvaamista. Varsinaisen pohjaveden pinnan yläpuolella esiintyvän orsiveden kuvaaminen pohjaveden virtausmallinnuksen keinoin edellyttää vähintään kaksikerroksisen mallin luomista, koska virtausmallinnusohjelma ei voi muuten kuvata kahta eri pintaa samaan virtausmallin soluun. Tämän seurauksena orsivesialueet on yksikerroksisissa malleissa kuvattu inaktiivisina eli kuivina, laskentaan osallistumattomina alueina. Yksikerroksisilla virtausmalleilla ei myöskään ole mahdollista kuvata oikein Virttaankankaan harjualueen reunoilla esiintyvän paineellisen pohjaveden virtausta tai muita vastaavia mallin reunaehdoja. Reunaehdoilla tarkoitetaan virtausmallin reuna-alueilla voimassaolevia yhtälöitä, joilla muun muassa määritellään millä ehdoilla ja paljonko mallin reunojen tai kerrosten ylä- ja alapintojen läpi virtaa vettä.

3.3 Uudet tutkimusmenetelmät

Perinteisesti maaperän rakennetta kuvaavien 3D-mallien ja pohjaveden virtausmallien tietojenhallinta ei ole ollut reaaliaikaista ja dynaamista

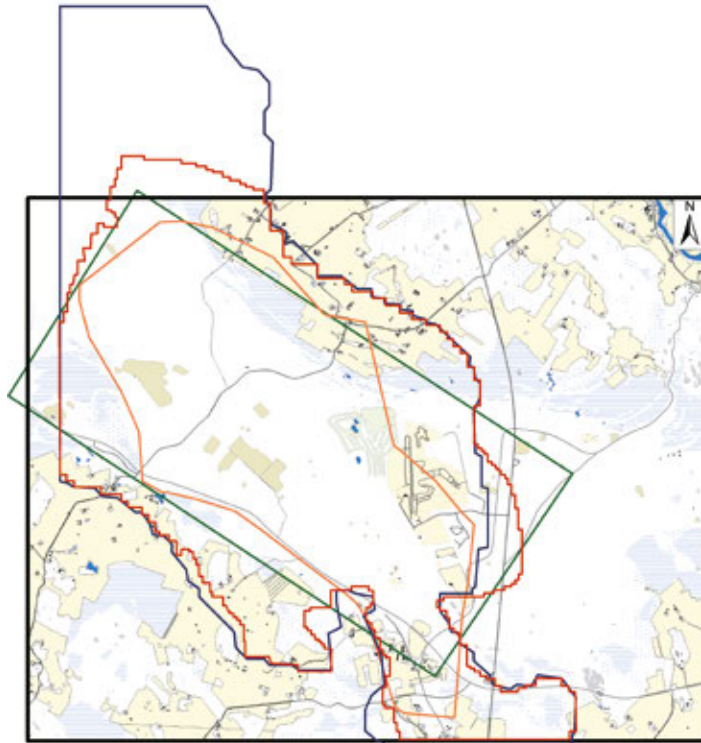
(kappale 3.1 ja 3.2). Maaperän kairaustiedot ja vedenpintojen korkeustiedot on useimmiten kerätty lukuisiin Excel -taulukoihin, joiden perusteella on tehty ensin karkea maaperän konseptuaalinen geologinen malli, jonka pohjalta on tehty pohjaveden virtausmalli. Tämä on ratkaisuna aivan toimiva, mikäli tutkittava alue on geologisesti yksinkertainen ja mallissa käytettävä aineisto on kooltaan pieni ja tiedoltaan staattinen, eikä tarvetta konseptuaalisen geologisen mallin ja virtausmallin päivittämiselle ole. Virttaankankaan

*Taulukko 6. TSV:n tietokannan eri taulujen tietuemääriä. *vedenlaadun moniparametrimittarilla mitattua aineistoa on lämpötila, sähköjohtavuus, happikylläisyys prosentteina, hapen määrä mg/l, syvyys, pH ja Redox –potentiaali. ** 531 näytteestä on tehty 9483 määrittystä. Eri määrittelyt ovat taulukossa 6. Taulukon tilanne on vuoden 2006 joulukuun tilanne. Taulukosta puuttuvat mm. automaattimittareilla varustettujen lirikaivojen virtaamatiedot.*

Tiedon tyyppi	Lukumäärä
"Dumypisteet" (3D –malli)	5968
"Dumypisteet" (pohjaveden pinta)	194
Kairaustulkintoja (503 pistettä)	3340
Talletetut maaperänäytteet	2929
Sademäärätiedot (2 asemaa)	4265
YSI –mittaustulokset*	1491
Lirikaivojen & mittapatojen virtaamat	1036
Kemialliset analyysit	531**
Vedenpintatiedot	91774

hydrogeologinen rakenne on kuitenkin monimutkainen, tutkimusaineisto on erittäin laaja (Taulukko 6) ja aineisto laajenee lähes reaaliaikaisesti tuoden jatkuvasti lisää tietoa Virttaankankaan geologisesta rakenteesta sekä pohjaveden esiintymisestä, virtauksesta ja laadusta.

Virttaankankaan hydrogeologisen rakenteen monimutkaisuuden takia oli tarpeen luoda tarkka kuva alueen tärkeimmistä hydrogeologisista yksiköistä (Artimo ja muut 2003 a,b). Tätä kolmiulotteista (3D) hydrogeologista mallia oli alus-



Kartan alue 10 km x 8 km

- Turun Seudun Vesi Oy 2006
- Maa ja Vesi Oy 2001
- Lounais-Suomen ympäristökeskus 1999
- Maa ja Vesi Oy 1991
- Suomen pohjavesitekniikka 1991

Kuva 26. Virtaankankaan ja Oripäänkankaan alueilta tehtyjen pohjaveden virtausmallien rajat.

ta saakka tarkoitus käyttää myös uuden monikerroksisen pohjaveden virtausmallin rakenteen kuvauksessa (Artimo ja Mäkinen 2001). Edellä mainittuja malleja käsitellään tarkemmin tämän kappaleen seuraavissa osissa. Lisääntyvän tutkimusaineiston mukanaan tuoman uuden informaation vuoksi Virttaankankaan 3D-hydrogeologinen malli ja monikerroksinen pohjaveden virtausmalli ovat muuttuneet useaan kertaan. Perinteisesti virtausmallin lähtöaineiston kokoaminen ja lähtötietojen pitäminen ajan tasalla on ollut työläs, paljon käsityötä vaativa ja siten myös hyvin virhealtis tehtävä.

Turun Seudun Vesi Oy:lle on tehty useita pohjaveden virtausmalleja ja kaikissa niissä on virheellistä ja epätäydellistä geologista dataa. Lisäksi kyseisten mallien geologisen ja hydrogeologisen rakenteen kuvaus on ollut puutteellista (Luku 3.2). Virheellisenä datana voidaan pitää esimerkiksi kairauksen lähtöpisteen korkeusaseman vaatusvirhettä, virheellistä pohjavesiputken siivilän sijaintitietoa, väärää putkimateriaalia, väärää putken halkaisijaa, väärin kirjoitettua maalajin nimeä, tai vaikkapa ihan yksinkertaista inhimillistä ”näppäilyvirhettä”, joka voi olla esimerkiksi virheellinen kairauksessa oleva syvyysinformaatio. Epätäydellisenä datana voidaan pitää esimerkiksi syystä tai toisesta puuttuvaa havaintopistettä. Mikäli tiedot saadaan yhtenäistettyä ja siirrettyä paremmin tietokoneen ymmärtämään muotoon, on varsin helppo tarkistaa ja korjata suuri osa edellisistä virheistä ja pitää jatkossa huoli siitä, että järjestelmään ei saa syötettyä virheellistä aineistoa. Näistä syistä johtuen TSV:ssä luotiin uusi tietokantapohjainen keskitetty tiedonhallintajärjestelmä.

Tietokantasovellukset

Laajan ja jatkuvasti kasvavan tutkimusaineiston hallintaan ja maaperägeologisen tiedon käsitteilyyn lähdettiin kehittämään tietokantapohjaista ratkaisua, johon voitaisiin tallettaa käytännössä

katsoen kaikki pohjaveden laatuun, -määrään, maaperän hydrogeologiseen 3D-malliin ja virtausmalliin liittyvä tutkimusaineisto. Ratkaisun tuli olla myös sellainen, että siinä olevaa dataa olisi helppo muokata, sinne olisi helppo lisätä uutta tietoa ja järjestelmässä olevasta tiedosta olisi helppo ja nopea tehdä muutoksia maaperän 3D-malliin ja generoida automaattisesti myös lähtötiedot pohjaveden virtausmalliin. Myöhemmässä vaiheessa järjestelmän ja siihen tehtyjen räätälöityjen sovellusten tulisi osaltaan toimia myös geologisen päättelyn apuna tekopohjavesilaitoksen käyttöönotossa, tuotannossa ja tuotannon ohjauksessa.

Tietokantapalvelimeksi valittiin tunnetun valmistajan luotettavaksi havaittu Oracle 10 G osittain myös siksi, että se oli entuudestaan käytössä Turun Seudun Vesi Oy:llä.

Ensimmäiset maaperäkairaukset on tehty Virttaankankaalla jo 1970-luvun alussa (Kuva 27). Tällöin ei ymmärrettävästi tietoja kerätty relaatiotietokantaan, vaikka Coddin kehittämä relaatiomalli olikin jo keksitty (Codd 1970). Alkuaikojen kairaustuloksia on säilytetty paperimuodossa aina 2000-luvun alkupuolelle saakka, jolloin niitä skannattiin PDF-tiedostoiksi ja kirjoitettiin puhtaaksi Excel-taulukoiksi ensimmäisen kerran Maa ja Vesi Oy:n toimesta. Vaikka nämä PDF ja Excel -tiedostot eivät suoranaisesti olleet käyttökelpoisia siinä muodossa joihin niitä nyt käytetään, niiden tiedot oli mahdollista, vaikkakin työlästä yhtenäistää. Yhtenäistetut tiedot oli helppo siirtää tietokantaan.

Tietokantaan tallennettuja pohjaveden pintatietoja on vuodesta 1988 alkaen. Näiden tietojen (kts. myös Taulukko 6) vuosittainen jakauma näkyy kuvassa 28. Alunperin vedenpintatiedot on luonnollisesti kirjattu paperille, josta ne erinäisten vaiheiden jälkeen on ensin siirretty Exceliin ja tietomäärän lisääntyttyä epäkäytännöllisen suureksi kahden eri tietokantaratkaisun kautta nykyiseen Oracle-tietokantaan.

PAINEILMAKAIRAUS, REIKÄRAPORTTI

Päivämäärä 26 - 31.10 - 72 Työ n:o 89275

Pisteen paikka Z

Maan-/vedenpinnan korkeus M. kiviintyt. pöytä 18,50 m
(3/100 kts 10.00)

Kairaaja UR TRJ

Syvyys m	Maalaji	Vastuskairaus				Myytteet	Täydentäviä merkintöjä (esim.: kivet, lohkaaret, kallion rakoilu, kovuus...)
		Painuma cm	Aika s	Kair. vastus s/20cm	Syöttö- paine kg/cm ²		
0,00							
10,00	Hk						
21,50	Ki.Hk	Maanpäällisiä olette				21,50	- 35,00 m
23,00	"					6 kpl	
15,00	"					5 "	
						11 kpl	
		MÄRKÄTÄ HAVAINNOSTUKKAA					06,30
		30 TA SYVÄÄN					16,00

Kuva 27. Osittainen kopio vuonna 1972 kairatun pohjaveden havaintoputken 7 reikäraportista. Kuvassa esitetyn reikäraportin tiedot ovat hankalasti hyödynnettävässä muodossa.

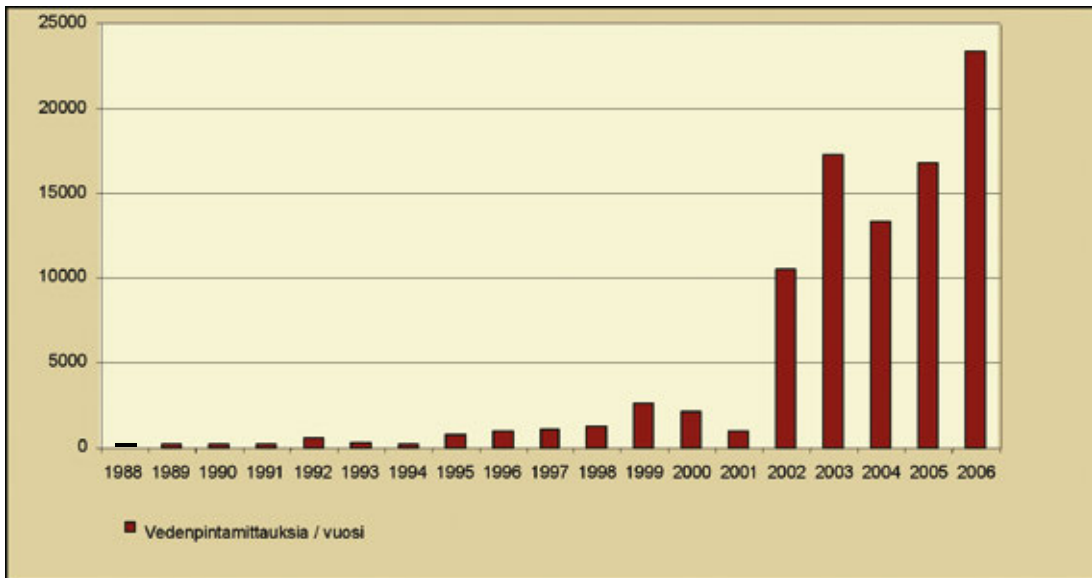
Tiedon hallinta

Uusi tutkimustiedon ja myöhemmin osittain myös käytönaikaisen valvonnan hallintajärjestelmä on esitetty kuvissa 29 ja 30.

Tietokantaan on talletettu ja talletetaan jatkuvasti mm. seuraavaa tietoa:

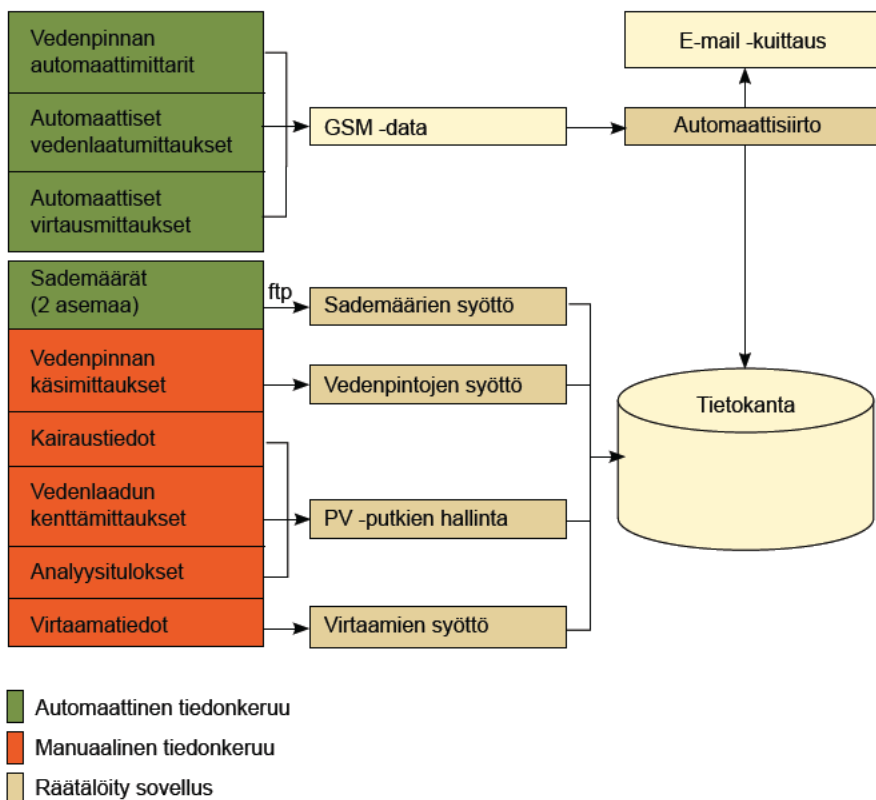
- 3D-mallin kallionpinnan tulkinnassa käytettyjen gravimetristen mittausten tulkittua syvyysinformaatiota pistemäisenä datana (X, Y, Z).
- 3D-mallin hydrogeologisten yksiköiden pintojen tulkinnassa käytetyistä maatulkinnoista tulkitut pisteet (X, Y, Z) sekä linkit vanhoihin paperilta skannattuihin maatulkinnoihin.

- Perinteiset pohjavesiputkien ”putkikortit” on korvattu tietueilla tietokannassa. Kairauspisteet, joihin kuuluu porakonekairauksena tehdyt pohjaveden ja orsiveden tarkkailuputket sekä heijarikairaukset, on talletettu tietokantaan. Kairauspisteistä talletetaan sijainti ja tunnistiedon lisäksi mm. kairauksen tyyppi. Mikäli kairauksen yhteydessä on asennettu pohjavesiputki, talletetaan myös tieto putken halkaisijasta ja materiaalista.
- Kairauspisteistä raportoidut kairaustulkinnat. Tulokset on talletettu sekä kairaajalta saatuna alkuperäisenä datana että geologin tulkitsemana yhtenäistettynä tietona. Näihin kairaustuloksiin liitetään tulkinta hydrogeologisesta yksiköstä, jolloin näistä tiedoista saadaan automaattisesti generoitua Virttaankankaan 3D-malli.

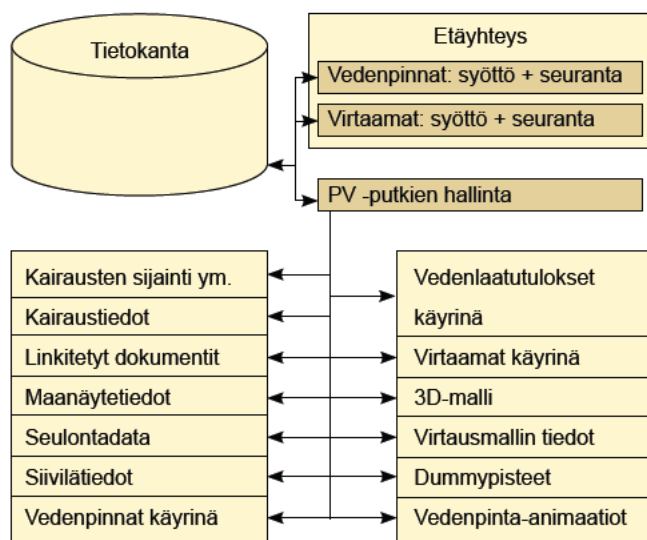


Kuva 28. Kuvassa on esitetty vedenpintojen tarkkailupisteistä tehtyjen pohjaveden pinnankorkeusmittausten lukumäärä vuosina 1988-2006. Kuvassa näkyy tutkimusaineiston määrän voimakas kasvu viimeisen viiden vuoden aikana. Vuoden 2003 suuren aineiston määrän selittävät osittain sinä vuonna suoritettu tavallista suurempi vapaaehtoinen tarkkailu ja osittain samana vuonna tehty merkkiainekoe.

- Siivilöiden tiedot pohjavesien tarkkailuputkista. Tämä tieto (samoin kuin putken materiaali) on välttämätön tietää otettaessa näytteitä vesianalyysia varten.
- Linkit tiedostoihin kaikesta vanhasta tutkimusaineistosta, myös tietokantaan jo vietyistä aineistoista. Tähän aineistoon kuuluvat mm. vanhat kairaukset, maatulkinjat, putkikortit ja putkivirtausmittaukset. Koska kaikkea vanhaa aineistoa ei ole järkevää tai kustannustehokasta siirtää tietokantaan, kannattaa vanhat käsikirjoitetut dokumentit skannata ja tallentaa, jotta niiden sisältämä aineisto on tarvittaessa helppo löytää.
- Maaperänäytteet ja niiden täsmällinen sijaintitieto TSV:n Laakkarin kalliosäiliön varastossa. Laakkarin varastoon on talletettu lähes 3000 maaperänäytettä. Jotta on mahdollista löytää sieltä näytteitä myös tulevaisuudessa myös näytteiden sijaintitiedot (huone-> hylly-> laatikko hyllyllä) oli tallennettava tietokantaan.
- Maaperänäytteiden seulontatiedot. Turun Seudun Vesi Oy on teettänyt 33 kairauksesta 471 näytteen seulotut raekokojakaumat, jotka on talletettu tietokantaan. Raekokojakauma muun muassa antaa viitteitä näytteen ja kyseisen maalajin vedenjohtavuudesta.
- Kokemäenjoen virtaamatiedot. Tekopohjavesilaitoksen tulevaa käyttöä varten tietokantaan on talletettu myös runsaasti virtaamätietoa Kokemäenjoesta.
- Pohjavesiputkien huoltotiedot. Pohjavesiputket voivat hitaasti täyttyä hienoaineksella. Tämä on ongelmana etenkin orsivesiputkissa, jotka on asennettu vettäpidättävän hienojakoisen maakerroksen pintaan saakka ja joissa on hyvin ohut orsivesikerros. Tämän



Kuva 29. Kaavio tutkimustiedon lähteistä, tiedonsiirtomenetelmistä ja tietojen tallennuksesta tietokantaan.



Kuva 30. Kaavio tietokannan tietoja käyttävistä sovelluksista (tummemmat laatikot) ja PV-putkien hallintasovelluksesta saatavista ja ylläpidettävistä tiedoista.

vuoksi vedenpinnan korkeusmittaukset voivat olla epäluotettavia. Lisäksi sekä vedenlaadun moniparametrimittarilla tehtävät analyysit että osa varsinaisista laboratorioanalyysistä saattavat antaa virheellisiä tuloksia. Pohjavesiputkien huoltohistoriasta on helppo seurata putkien kuntoa ja tehdä päätöksiä putken huoltotarpeesta.

- Sademäärätiedot. Yleisin käyttö on seurata sademääriä ja verrata niitä pohjaveden pintojen muutoksiin. Tämä antaa jo nopeasti silmämääräisen arvion pohjaveden ja orsiveden pintojen mahdollisista muutoksista lähitulevaisuudessa. Lisäksi alueen sademäärä on tarpeen tietää virtausmallin teossa. Tästä kerrotaan enemmän luvussa 3.3 / Monikerroksinen pohjaveden virtausmalli / Virtausmallin generointi. Sademäärätiedot saadaan Ilmatieteen laitokselta, joka lähettää ne Turun kaupungin FTP -palvelimelle, josta ne haetaan ja tallennetaan tietokantaan pohjavesiputkien hallintaohjelman avulla.
- Pohjaveden pintatiedot. Pohjaveden ja orsiveden pintoja mitataan Virttaankankaalla jatkuvasti ja tiedot tallennetaan tietokantaan. Tietoja onkin kertynyt jo melko kattavasti (Taulukko 6). Tällä hetkellä vielä suurimmasta osasta pohjavesiputkia vedenpinnat mitataan käsin (Kuva 17) ja tiedot syötetään mittauskierroksen jälkeen (eli lähes päivittäin) etäyhteyden yli suoraan tietokantaan. Tietoja mitataan säännöllisesti useasta putkesta. Mittausten määrä ja mittaustiheys/putki vaihtelee runsaasti mm. sen mukaan, onko jossain koeimeytys käynnissä.

Osa mittaustiedoista saadaan ohjelmoitavilta pinnankorkeuden automaattimittareilta, jotka lähettävät tiedot kerran vuorokaudessa GSM-datana TSV:n tietokoneelle, jossa on GSM-laite datan vastaanotolle (Kuva 16). Tältä tietokoneelta pintatiedot siirtyvät au-

tomaattisesti kerran vuorokaudessa tietokantaan.

Pohjaveden pinnankorkeuden automaattimittareita on tällä hetkellä 18 kappaletta mutta niiden määrää on tarkoitus lisätä lähitulevaisuudessa. Automaattimittareiden mittausväli saadaan räätälöityä halutuksi ja mikäli tarvetta ilmenee, myös tiedonsiirto- ketju Automaattimittari – GSM – Datan vastaanotto – Tietokantapalvelimen tietokanta on helppo muuttaa reaaliaikaiseksi. Tällöin kaikilta automaattimittareilta saadaan pohjaveden pinnankorkeus reaaliaikaisena. Pintojen muutokset ovat kuitenkin niin hitaita, että aivan reaaliaikaiseen tiedonsiirtoon tuskin on tarvetta, mutta imeytyskokeiden aikana on syytä varautua tavallista nopeampiin pinnankorkeuden muutoksiin ja täten säätää automaattimittareiden mittausväli tavallista (1 vedenpintatieto / vuorokausi) lyhyemmäksi, esimerkiksi neljäksi tunniksi.

- Vedenlaadun moniparametrimittareiden tulokset. TSV:llä on kolme moniparametrimittaria. Mittarit on varustettu käyttötarkoituksesta riippuen erilaisilla mitta-antureilla. Turun Seudun Vedellä on käytössä lämpötilan, sähkönjohtavuuden, hapen määrän (mg/l ja kylläisyysprosentti), syvyyden, pH:n, Redox –potentiaalinen, turbiditeetin (veden sameuden) ja klorofyllin mitta-anturit. Kaksi mittareista on kiinteästi asennettu Kokemäenjokeen. Toinen mittareista on Äetsän voimalaitoksen patoaltaassa ja toinen mittareista on Huittisissa Karhiniemen sillan kupeessa olevassa mittauskaivossa. Molempiin mittareihin on yhdistetty samanlainen tiedonsiirtoautomaattikka, kuin vedenpinnan automaattimittareihin: tiedot siirtyvät GSM-datana TSV:n toimistolle, jossa ne tallentuvat automaattisesti tietokantaan kerran vuorokaudessa. Kolmatta mittaria käytetään kenttämittarina (Kuva 19). Kenttämittarilla

tehdään laajoja mittauskierroksia, joissa mitataan pohjaveden laatua ennalta määrättyistä pohjavesiputkista kattavasti koko syvyysprofiilin matkalta.

- Tiedot mittapadoista ja lirikaivoista sekä niiden virtaamista. Turun Seudun Vesi Oy:llä on veloitettarkkailussa 5 lähettä, joiden virtaamaa seurataan mittapatojen avulla. Tietokantaan on tallennettu virtaamatietoja 11 Virttaankankaan alueen lähteestä. Mittapadot ovat Thompsonin mittapadon tyyppisiä (RIL 187-1990) eikä niiden virtaamamittaus ole automatisoitua. Kuvassa 31 on Kankaanrannan lähteen mittapato. Tietokannassa on lisäksi virtaamatietoja 15 lirikaivosta.
- Lirikaivojen automaattimittarit (Kuva 32). Manuaalisen virtausmittauksen lisäksi TSV mittaa kahdesta lirikaivosta virtaamaa automaattisesti virtausmittarilla. Tiedot siirtyvät TSV:n tietokantaan samalla tavoin kuin YSI-automaattimittareilta tai vedenpinnan korkeusmittareilta. Mittapatojen ja lirikaivojen virtaamamittaustietojen integroiminen samaan järjestelmään muun tutkimusaineiston



Kuva 31. Kankaanrannan lähteen mittapato.

kanssa helpottaa mahdollisten poikkeavuuksien selvittämisessä virtausmäärissä tai pohjaveden pinnankorkeuksissa.

- Laboratorioanalyysien tulokset. Vedenlaadun moniparametrimittarilla tehtävien mittausten ohella Turun Seudun Vesi Oy suorittaa kattavaa vesinäytteenottoa ja toimittaa näytteet analysoitavaksi akkreditoituun laboratorioon. Taulukossa 7 on nähtävillä kaikki vedestä tehtävät määritykset. Kaikkia määrityksiä ei tehdä jokaiselle näytteelle. Nykyisen analyysiohjelman mukaiset näytteenottovälit ja eri kerroilla tehtävät määritykset on määritetty havaintopistekohtaisesti. Lisäksi taulukossa on esitetty käytettyjen analyysimenetelmien tiedot ja käytetty tutkimuslaitos.

Tekopohjavesilaitoksen tutkimusvaiheessa kerätävän tiedon lisäksi tulevaisuudessa, tekopohjavesilaitoksen käytön optimointivaiheessa ja myöhemmin laitoksen käytön aikana tietokantaan on tarkoitus tallettaa lisäksi jatkuvatoimisesti mm. imeytysalueiden imeytysmääriä ja kaivojen ottomääriä. Tämä helpottaa omalta osaltaan laitok-



Kuva 32. Lirikaivoon asennettu automaattinen virtaamamittari ja datansiirtoyksikkö.

Taulukko 7. Tietokantaan tallennetut pohjavesinäytteistä tehdyt määritykset, analyysimenetelmien tiedot ja tutkimuslaitokset. Taulukon tilanne edustaa vuoden 2006 joulukuun tilannetta.

Määritys	Määritysstandardi tai -menetelmä	Laboratorio
Alkaliteetti	Sis T02, Standard Methods... 20th ed. Method 2320	TL27
Alumiini (Al)	SFS 5074:1990, 5502:1990	TL27
Alustavat enterokokit	SFS-EN ISO 7899-2:2000	TL27
Ammonium (NH ₄)	SFS 3032:1976	TL27
Ammoniumtyppi (NH ₄ -N)	SFS 3032:1976	TL27
Antimoni	Sisäinen menetelmä M11	TL49
Arseeni (As)	SFS 5074:1990	TL27
Asiditeetti	SFS 3005:1981	TL27
Boori	Sisäinen menetelmä M11	TL49
COD (Mn)-arvo (hapettuvuus)	SFS 3036	TL27
Elohopea (Hg)	INSTA-VH 93	TL27
Escherichia coli	SFS 3016:2001, SFS 3950:1979, SFS 4088:2001	TL27
Fluoridi (F)	SFS-EN ISO 10304-1:1995, 10304-2:1997	TL27
Fosfaattifosfori (PO ₄ -P)	Sis A14, Lachat QuicChem method 31-115-01-1-I	TL27
Haju	Haju	TL27
Happi	Sis T17, perustuu kumottuun SFS 3040:1990	TL27
Heterotrofinen pesäkeluku 22 °C	SFS-EN ISO 6222:1999	TL27
Hiilidioksidi (CO ₂)	SFS 3005:1981	TL27
Kadmium (Cd)	SFS 5074:1990, SFS-EN ISO 5961:1994	TL27
Kalium (K)	SFS 3044:1980, 3017:1982	TL27
Kalsium (Ca)	SFS 3044, 3018 N ₂ O-liekki	TL27
Kiintoaine 0.4 Nuclepore	Sisäinen menetelmä T32	TL27
Kloorifenolit	Sisäinen menetelmä G01	TL49
Kloridi (Cl)	SFS-EN ISO 10304-1:1995, 10304-2:1997	TL27
Kokonaisfosfori	Sis A15, Lachat QuickChem method 10-115-01	TL27
Kokonaiskovuus	SFS 3003:1987	TL27
Kromi (Cr)	SFS 5074:1990, SFS-EN 1233:1997	TL27
Kupari (Cu)	SFS 3044:1980, SFS 3047:1980	TL27
Liukoinen orgaaninen hiili (DOC)	SFS-EN 1484	TL25
Liuttimet (hal)	GC/MSD	TL49
Lyijy (Pb)	SFS 5074:1990, SFS 5502:1990	TL27
Magnesium (Mg)	SFS 3044, 3018 N ₂ O-liekki	TL27
Maku	Maku	TL27
Mangaani (Mn)	SFS 3044, 3048	TL27
Natrium (Na)	SFS 3044:1980, 3017:1982	TL27
Nikkeli (Ni)	SFS 5074:1990, SFS 5502:1990	TL27
Nitraatti (NO ₃)	SFS-EN ISO 13395:1997	TL27
Nitraattityppi (NO ₃ -N)	SFS-EN ISO 13395:1997	TL27
Nitriitti (NO ₂)	SFS-EN ISO 13395:1997	TL27
Nitriittityppi (NO ₂ -N)	SFS-EN ISO 13395:1997	TL27
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä, TOC	Alihankinta, SFS-EN 1484:1997	TL25
PAH-yhdisteet	Sisäinen menetelmä G22	TL49
pH (25 °C)	SFS 3021:1974	TL27
Rauta (Fe)	SFS 3044:1980, SFS 3047:1980	TL27
Sameus	SFS-EN ISO 7027:2000	TL27
Seleeni	SFS 5074	TL27
Sulfaatti (SO ₄)	SFS-EN ISO 10304-1:1995, 10304-2:1997	TL27
Syanidi	Sisäinen menetelmä V28	TL49
Sähkönjohtavuus (25 °C)	SFS-EN 27888:1994	TL27
Torjunta-aineet (pestisidit)	Sisäinen menetelmä G09	TL49
Varmistetut koliformiset bakteerit	SFS 3016:2001, SFS 3950:1979	TL27
Väri (visuaalinen)	SFS-EN ISO 7887:1995, osa 4	TL27
Tutkimuslaitostiedot		
Tunnus	Tutkimuslaitoksen nimi	
TL25	Kokemäenjoen vesistön vesiensuojeluyhdistys ry	
TL27	Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy	
TL49	Lahden tutkimuslaboratorio	

sen käyttöönottoa ja käyttöä, koska geologisen tietojärjestelmän avulla on helppo generoida uusi virtausmalli käytön aikaisen todellisen tilanteen perusteella ja uuden virtausmallin simulaatioita voidaan verrata toteutuneisiin pohjaveden pintoihin ja imeytys-pumppausmääriin (Kuva 33). Virtausmallia voidaan siis päivittää ja kalibroida todellisia havaintoja paremmin vastaavaksi tuotannon edetessä.

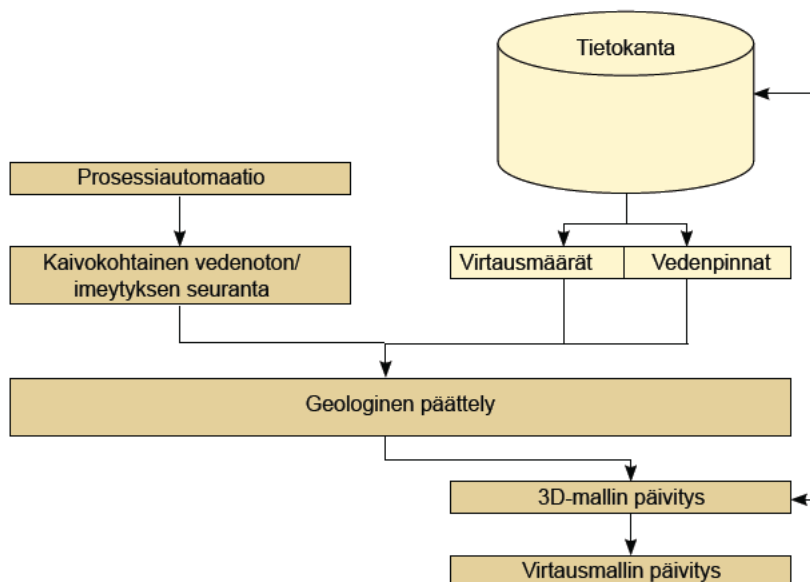
Pohjavedenpinta-animaatioiden generointi

Eräs tärkeä työkalu pohjaveden pinnanmuutosten seurannassa on pohjaveden interpoloitujen pintojen vaihtelusta tehtävät animaatiot. Animaatio on karttapohjalla ajan funktiona tapahtuva väritetty sama-arvokäyräesitys veden pinnan vaihtelusta halutulla alueella valitun ajanjakson aikana. Animaatio ei ennusta tulevaa pinnankorkeutta vaan se saa lähtötietonsa tietokannassa olevista mitatuista pohjaveden pinnoista. Animaatioilla voidaan tarkastella pidemmän ajanjakson aikana tapahtuneita muutoksia tai

lyhyempiä imeytyskokeiden aikaisia muutoksia pohjaveden pinnoissa.

Vedenpinta-animaatioita varten kehitettiin laskurutiinit, joilla animaatioiden teko käy helposti. Vedenpintojen interpoloinnissa ja interpoloitujen pintojen animoinnissa tarvitaan seuraavat tiedot:

- Tieto animaation aloitus- ja lopetuspäivästä sekä animaation ruutujen aikavälistä (päivinä).
- Tieto vedenpintojen interpolointiin käytettävistä pohjavesiputkista ja niiden sijainnista.
- Vedenpintojen interpoloinnissa käytettävä interpolointimenetelmä ja sen asetukset.
- Tieto siitä, käytetäänkö vedenpintojen interpoloinnissa apupisteitä, eli ”dummypisteitä”. Mikäli näitä käytetään, niin silloin tarvitaan kyseisten pisteiden koordinaatit ja kullekin pisteelle annettu vakiovedenpinta.



Kuva 33. Periaatteellinen esitys tekopohjavesilaitoksen käyttöönottoaiheen aikaisesta hydrogeologisen tiedon ballinnasta ja 3D-geologisen mallin sekä pohjaveden virtausmallin päivityksestä.

- Animoitavan alueen geometriatiedot (X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , tulosmatriisin solukko)
- Tieto siitä, halutaanko animaation tulokset esittää absoluuttisena korkeustasona, vai poikkeamana (+ tai -senttimetriä) animaation aloituspäivästä.

Laskenta on suoraviivainen ja suhteellisen yksinkertainen ja se etenee seuraavalla tavalla:

- Luetaan kaikkien interpolointiin osallistuvien pohjavesiputkien kaikki mitatut vedenpinnat animaation halutun aloitus- ja lopetuspäivän välillä päivittäin. On huomattava, että animaation aikajakson tulisi olla riittävän pitkä. Tarkkuuden lisäämiseksi jokaisesta putkesta tulee saada valitulle aikavälille ainakin kaksi pohjaveden pinnankorkeutta.
- Koska vedenpinnan korkeutta ei mitata kaikista putkista päivittäin, interpoloidaan puuttuvat vedenpintatiedot lineaarisesti (jokaiseen putkeen, jokaiselle animaation aikavälille yksi vedenpinta). Lineaarinen interpolointi on tässä yhteydessä perusteltua, koska vedenpintojen muutos on melko suoraviivaista tarkkailtavalla aikajaksolla ja lisäksi vedenpinnan muutoksen määrä ei yleensä ole kovin suuri.
- Interpoloidaan valitulla menetelmällä animaatioajan jokaiselta päivältä sama-arvokartta vedenpinnoista (hyvä tulos saadaan esimerkiksi krigingillä).
- Yhdistetään sama-arvokartat animaatioksi ja tallennetaan tieto halutussa tiedostomuodossa (avi, mpeg).

Muodostuman kolmiulotteisen rakenteen kuvaus ja mallinnus

Virtaankankaan alueen tutkimusten perusteella tutkimusalueesta on laadittu kolmiulotteinen (3D) rakennemalli, jonka avulla voidaan koota yhteen alueelta kerätty rakennetieto helposti esitettävään muotoon. Malli koostuu kuudesta tulkitusta hydrogeologisesta yksiköstä, jotka ovat alhaalta ylöspäin lukien:

- Kallio (Ka)
- Moreeni (Mr)
- Karkea glasifluviaalinen harjuaines (GfK)
- Hieno glasifluviaalinen / glasilakustrinen harjuaines (GfH)
- Siltti-savi (SiSa)
- Rantahiekka (RaHk)

Nämä yksiköt on mahdollista identifioida maaperätutkimustietojen ja maaperänäytteiden perusteella ja kaikilla niillä on oma vaikutuksensa alueen pohjavesien esiintymiseen. Yksiköiden sisäinen vedenjohtavuusominaisuuksien vaihtelu on pienempää kuin eri yksiköiden välinen ominaisuuksien vaihtelu. Malli ei siis kuvaa sellaisenaan alueen stratigrafiaa, sedimentologisia kerrostumisvaiheita tai raekokojakaumia, vaan näistä kaikista tekijöistä koostuvaa hydrogeologista ympäristöä, minkä vuoksi mallia kutsutaan kolmiulotteiseksi hydrogeologiseksi malliksi. Hydrogeologinen ympäristö vaikuttaa alueen pohjavesien esiintymiseen, muodostumiseen ja liikkeisiin, toisaalta myös mallin yksikköjako on alusta asti suunniteltu käytettäväksi pohjaveden virtauksen mallinnuksen lähtökohtana.

Virtaankankaan kolmiulotteinen hydrogeologinen rakennemalli on kooltaan kymmenen kilometriä kertaa kahdeksan kilometriä. Mallissa kuvattujen yksiköiden alimpien ja ylimpien tasojen korkeusero on 179 metriä. Rakennemalli

koostuu hydrogeologisten yksiköiden yläpintoja kuvaavista matriiseista, joiden muoto perustuu geologiisiin havaintoihin ja tulkintaan yksiköiden muodosta ja jatkuvuudesta. Rakennemallin matriisit leikkaavat toisiaan yksiköiden tulkittujen rajapintojen kohdalla siten, että ylemmän matriisin määrittämä yksikkö täyttää päällekkäisten matriisien väliin jäävän tilan. Malli kootaan yksiköiden ikäjärjestyksessä alimmasta yksiköstä eli kalliosta ylöspäin siten, että alempien matriisien päälle sijoittuvat seuraavan, ylemmän yksikön pinnat jäävät voimaan, ja loput leikkaantuvat pois. Yksikön paksuus määrittyy samoin matriisien tasoerojen perusteella, jos tiettyä yksikköä ei esiinny tarkasteltavalla alueella, yksikön yläpintaa kuvaava matriisi yhtyy olemassa olevan alemman yksikön pintaan.

Kolmiulotteisen hydrogeologisen mallin generointi

Virtaankankaan tutkimusalueen maaperän monikerroksinen kolmiulotteinen hydrogeologinen malli (kaikkien hydrogeologisten yksiköiden toisiaan leikkaamattomat ylä- ja alapinnat sekä kallion pinta koko mallinnetulla alueella) saadaan laskettua tietokannassa olevien lähtötietojen perusteella automaattisesti.

Laskenta on melko monimutkainen ja vaatii lähtötietoina seuraavat tiedot:

- Jokaisesta kairauksesta paikkatiedon (X, Y, kairauksen alkupisteen Z) lisäksi alku- ja loppusyvyyden jokaisen kairauksen jokaiselle kairauksen lävistämälle hydrogeologiselle yksikölle.
- Tiedon kaikista mallialueella olevista hydrogeologisista yksiköistä (RaHk, SiSa, GfH, GfK, Mr, Ka). Laskentaproseduuria ei ole rajoitettu toimimaan ainoastaan Virtaankankaan aineistoilla - sitä on helppo soveltaa

myös muihin vastaaviin aineistoihin.

- Kairaustiedon lisäksi paikkatiedon jokaisesta 3D-mallin interpoloinnissa käytettävästä ”Dummypisteestä” yksiköittäin (katso taulukko 6).
- Tiedot mallialueen geometriasta (Xmin-Xmax, Ymin-Ymax ja solukoko).

Edellä mainitut tiedot saadaan automaattisesti tietokannasta. Näiden lisäksi tarvitaan tiedot myös:

- Maanpinnan korkeudesta ASCII-matriisina. Maanpinnan korkeusaineistona voidaan käyttää esimerkiksi maanmittauslaitoksen korkeusaineistosta interpoloitua matriisia tai tarkempaa aineistoa haluttaessa esimerkiksi laserkeilauksen aineistoa. On kuitenkin huomattava, että virtausmallin solukoko asettaa omat rajoituksensa sille, kuinka tarkkaa aineisto on mielekästä käyttää.
- Maanpinnan maalajista (eli maanpinnan hydrogeologinen kartta, josta käy ilmi kunkin hydrogeologisen yksikön alueellinen jakauma maanpinnassa koko mallialueella). Myös tämä informaatio tarvitaan ASCII-matriisina.
- Mallin laskennassa käytettävästä interpolointimenetelmästä ja käytettävistä interpolointiparametreista (esimerkiksi etsintäsäde tai etsintäellipsin suunta).

Laskentarutiinit on integroitu Turun Seudun Vesi Oy:n käyttämään kairausten/pohjavesiputkien (ja tekopohjavesilaitoksen käytön aikaisen geologisen valvonnan) hallintajärjestelmään. Sovellukset ovat TSV:n omaa tuotantoa ja ne on ohjelmoitu osittain Microsoftin Visual Basic 6:lla ja osittain Microsoftin VB.NET 2005:illä.

3D-mallin laskenta etenee seuraavalla tavalla:

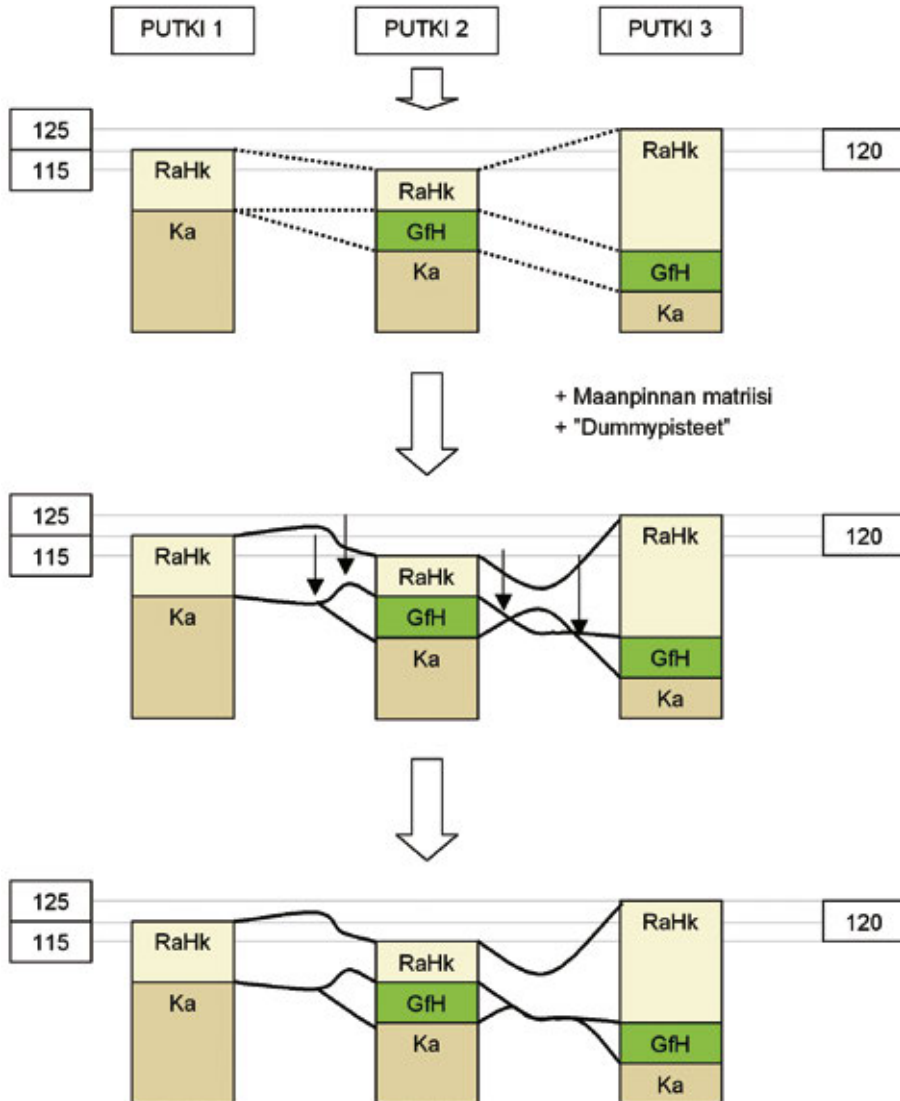
- Luetaan kairauksittain jokaisen yksikön tulkittu yläpinta ja lisätään tähän tietoon yksiköittäin ”Dummpiste” –informaatio.
- Kirjoitetaan tiedot tekstitiedostoiksi (X, Y, Z, hydrogeologinen yksikkö).
- Interpoloidaan valitulla menetelmällä edellisen vaiheen tiedot ja talletetaan ne ASCII-grideiksi. Virttaankankaan 3D-mallissa käytetty interpolointimenetelmä on kriging.
- Kallion pinnanmuodon interpolointi aiheuttaa sen, että suuren korkeusgradientin muutoksen alueella (pääruhjeen pohja-osa ja reunat) interpolointiin tulee virhettä, joka korjataan laskemalla tunnettujen pisteiden avulla jäännöspinta, joka vielä vähennetään kallion pinnasta. Tämä toimenpide toistetaan kallion pinnan matriisille vain kerran.
- Mallin ylemmät kerrokset eivät saa leikata alempia, aiemmin määritettyjä kerroksia. Siksi laskennassa pidetään huoli siitä, että ylemmän yksikön alapinta ei koskaan esiinny alemman yksikön sisällä tai sen alapuolella.
- Lasketaan yksiköittäin gridit, jossa maanpinnalle tuleva hydrogeologinen yksikkö merkitään arvolla 1 silloin, kun se on maanpinnassa. Muulloin se merkitään arvolla 0.
- Määritetään hydrogeologisten yksiköiden alueellinen jakauma maanpinnassa.
- Tarkistetaan kaikki gridit, että ne eivät jatku maanpinnan yläpuolelle. Maanpinnan yläpuolelle mahdollisesti jatkuvien gridien osat leikataan pois ja yhdistetään maanpintaan.
- Lasketaan hydrogeologisten yksiköiden paksumudet.

3D-mallin laskenta lähtötiedoista on myös esitetty periaatteellisesti kuvassa 34. Kuvassa on ensin esitetty tietokannasta haettava kairaustieto (hydrogeologiset yksiköt ja paikkatiedot). Kuvan kolmivaiheinen poikkileikkaus kuvaa kolmea eri vaihetta 3D-mallin laskennassa. Ensimmäisessä poikkileikkauksessa esitetään kolmen putken leikkausta kairaustietojen mukaan interpoloituina. Seuraavassa poikkileikkauksessa kuvaan on lisätty ”Dummpisteet” (nuolten osoittamiin paikkoihin) sekä maanpinnan korkeustasoa kuvaava matriisi. Tämä on aiheuttanut sen, että alla oleva kerros leikkaa interpoloinnin jälkeen päällä olevaa kerrosta. Viimeisessä poikkileikkauksessa virhe on korjattu leikkaamalla alemman kerroksen yläpinta ylemmän kerroksen alapinnalla.

Monikerroksinen pohjaveden virtausmalli

Lisääntynyt tutkimusaineisto, sen järjestelmällinen käyttö uusien tiedonhallintaratkaisujen avulla sekä sedimentologisten ja kolmiulotteisten rakenneselvitysten ja rakennemallin tuottama ymmärrys Virttaankankaan alueen geologisesta rakenteesta mahdollistavat kompleksisen Modflow-virtausmallin tekemisen ja päivittämisen. Vuonna 2006 valmistui ensimmäinen versio tietokantaratkaisuihin integroidusta monikerroksisesta pohjaveden virtausmallista. Mallinnuksessa käytettiin uusinta MODFLOW-2000 virtausmallinsohjelmistoa (Harbaugh ja muut 2000), joka sisältyy jo luvussa 3.2 mainittuun PMWIN-ohjelmaan. Virtausmallissa kuvataan jokainen 3D-rakennemallin hydrogeologinen yksikkö omana kerroksenaan. Tällä tavalla saadaan mallialueen hydrogeologisten yksiköiden rakene kuvattua kolmiulotteisena siten, että virtausmallin soluihin määritetyt parametrit kuvastavat hydrogeologisen yksikön sisäisiä ominaisuuksia. Yksikerroksisessa virtausmallissa solun parametrit kuvaavat kaikkien pohjaveden pinnan alaisten maakerrosten ominaisuuksien perusteella tulkitua keskiarvoa (Kuva 35).

Tunnus	Sijainti (alku)	Alkusyvyys	Yksikkö
PUTKI 1	6772000, 3265000, 120	0	RaHk
PUTKI 1	6772000, 3265000, 120	15	Ka
PUTKI 2	6772000, 3265200, 115	0	RaHk
PUTKI 2	6772000, 3265200, 115	10	GfH
PUTKI 2	6772000, 3265200, 115	20	Ka
PUTKI 3	6772000, 3265400, 125	0	RaHk
PUTKI 3	6772000, 3265400, 125	30	GfH
PUTKI 3	6772000, 3265400, 125	40	Ka



Kuva 34. Kaaviossa on esitetty edellä kuvatun laskennan mukaisesti etenevä 3D-mallin rakenteen prosessointi kolmen kuvitteellisen kairauspisteen avulla. Dummypisteet on esitetty kaaviossa nuolilla.

Virtausmallin rakenne noudattaa kolmiulotteisessa rakennemallissa kuvattujen hydrogeologisten yksiköiden muotoa siten, että rakennemalli on jaettu pohjaveden ja siltti-savi –yksikön yläpinnan tasojen perusteella pohjavedellä kyllästyneeseen osaan ja pohjaveden pinnan yläpuoliseen osaan. Ylempiä mallikerroksia käytetään alueen orsiveden kuvaamiseen. Virtausmallin resoluutio eli yhden laskentason koko on sama kuin rakennemallissa (50 metriä x 50 metriä). Modflow –malliin syötettävien matriisien kerrosten tulee olla ehjiä ja jatkuvia koko mallialueella. Siksi osia mallin kerroksista on tehty ”läpinäkyviksi”. Läpinäkyvät kerrokset sijoittuvat alueille, jossa ei esiinny virtausmallikerroksen mukaista hydrogeologista yksikköä. Läpinäkyvien alueiden ominaisuudet on kopioitu alapuolella esiintyvien todellisten kerrosten perusteella ja niiden kerrospaksuus on yksi senttimetri. Näin syntyvä pohjaveden virtausmalli koostuu kymmenestä koko mallialueella esiintyvistä jatkuvasta kerroksesta. Mallin yläpintana on yksikerrosmalleista poiketen maanpinnan korkeustaso (Kuva 36).

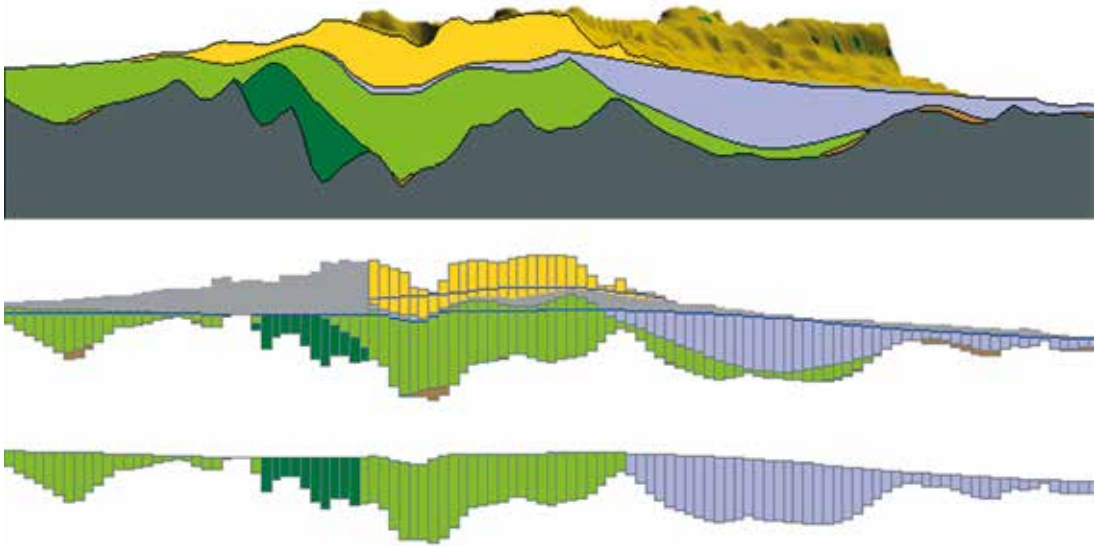
3D-rakennemallin yksiköiden sisäisten ominaisuuksien vaihtelusta tehdään tulkintoja sedimentologisen mallin sekä maaperänäytteiden perusteella. Näitä tietoja voidaan viedä pohjaveden virtausmalliin matriiseina, jotka sidotaan automaattisesti virtausmallin kerrosrakenteeseen. Tämän menetelmän avulla voidaan kuvata esimerkiksi karkean harjuytimen eri tavoilla kerrostuneiden osa-alueiden vedenjohtavuuksien vaihtelua aiemmin kuvattujen hydrogeologisten yksiköiden sisällä.

Virtausmallin generointi

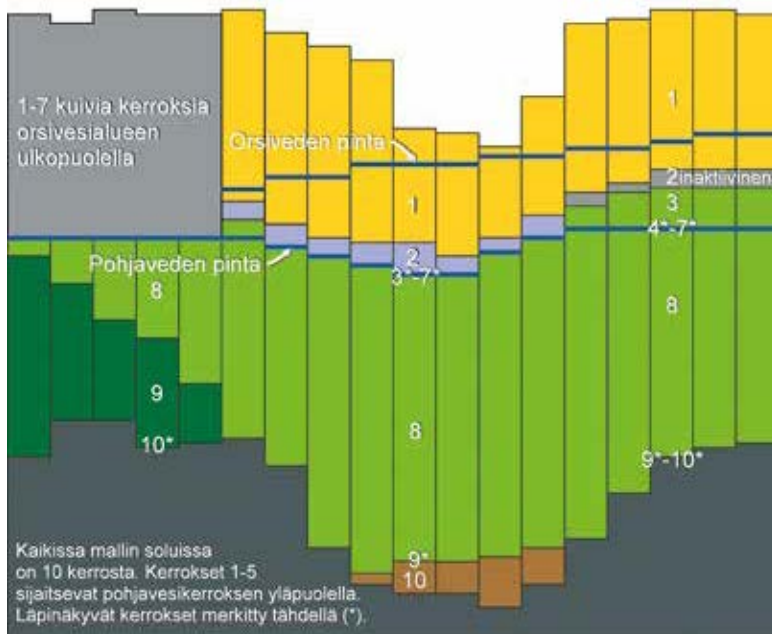
Suuri osa monikerroksisen pohjaveden virtausmallin lähtötiedoista voidaan luoda automaattisesti 3D-rakennemallin matriisien ja muiden tietokannasta saatavien aineistojen avulla. Perinteisesti virtausmallinnuksen lähtötietoja varten käsin tehtävien matriisien ja taulukoiden suuri

määrä on tehnyt lähtötietojen päivittämisestä erittäin työlästä. Tämän takia kehitettiin täysin automatisoidut laskurutiinit, jotka ovat erittäin monimutkaisia ja vaativat lähtötietoina seuraavat yksittäiset tiedot:

- Pohjaveden pinnankorkeuden lähtötason interpoloitu matriisi. Tämä tieto saadaan automatisoiduista laskurutiineista, joilla lasketaan myös vedenpinnan korkeustasoa kuvaavat animaatiot (katso luku 4.1).
- Orsiveden pinnankorkeuden lähtötason interpoloitu matriisi. Tämä matriisi voidaan tehdä samoin, kuin edellinenkin (katso luku 4.1).
- Orsiveden esiintymisalueen maski. Kyseinen matriisi osoittaa ne alueet, joilla esiintyy orsivettä ja ne, joilla orsivettä ei esiinny.
- Tieto maanpinnan maalajista (eli maanpinnan hydrogeologinen kartta, josta käy ilmi kunkin hydrogeologisen yksikön alueellinen jakauma maanpinnassa koko mallialueella). Tämä on sama matriisi, joka tarvitaan myös 3D-hydrogeologisen mallin laskennassa.
- Matriisit jokaisen 3D-mallin hydrogeologisen yksikön ylä- ja alapinnan korkeustasosta.
- HHC- ja VHC-matriisit (horisontaalinen ja vertikaalinen vedenjohtavuus) jokaiselle virtausmallin vedellä kyllästyneelle ja vedellä kyllästymättömälle kerrokselle. Matriisit voivat olla kerroskohtaisia vakioarvoja, käsin muokattuja matriiseja tai erikseen laskettuja K-arvomatriiseja, jotka lasketaan erikseen kyseisessä yksikössä esiintyvien kairauksissa tulkittujen maalajien vedenjohtavuuksien perusteella. Laskennassa huomioidaan kaikki yksittäiset maalajitulkinnot ja niiden suhteelliset paksuudet kyseessä olevan hydrogeologisen yksikön sisällä kussakin erillisessä kairauspisteessä.



Kuva 35. Kuva 3D-hydrogeologiseen malliin (ylhäällä) perustuvasta monikerroksisesta pohjaveden virtausmallista (keskellä). Kuvasa alimpana on esitetty poikkileikkaus yksikerroksisesta pohjaveden virtausmallista, joka perustuu samaan geologiseen rakenteeseen. Yksikerrosmallin avulla ei ole mahdollista kuvata orsivesiyksikköä. Paineellisen, savikon alaisen pohjaveden virtauksen kuvaus ei myöskään onnistu yksikerrosmallilla. Lisäksi mallin reunaehtojen kuvaus voi jäädä yksikerrosmallilla puutteelliseksi etenkin orsiveden tai paineellisen pohjaveden esiintymisalueilla.



Kuva 36. Osasuurennos kuvassa 35 esitetystä monikerroksisen pohjaveden virtausmallin rakenteesta.

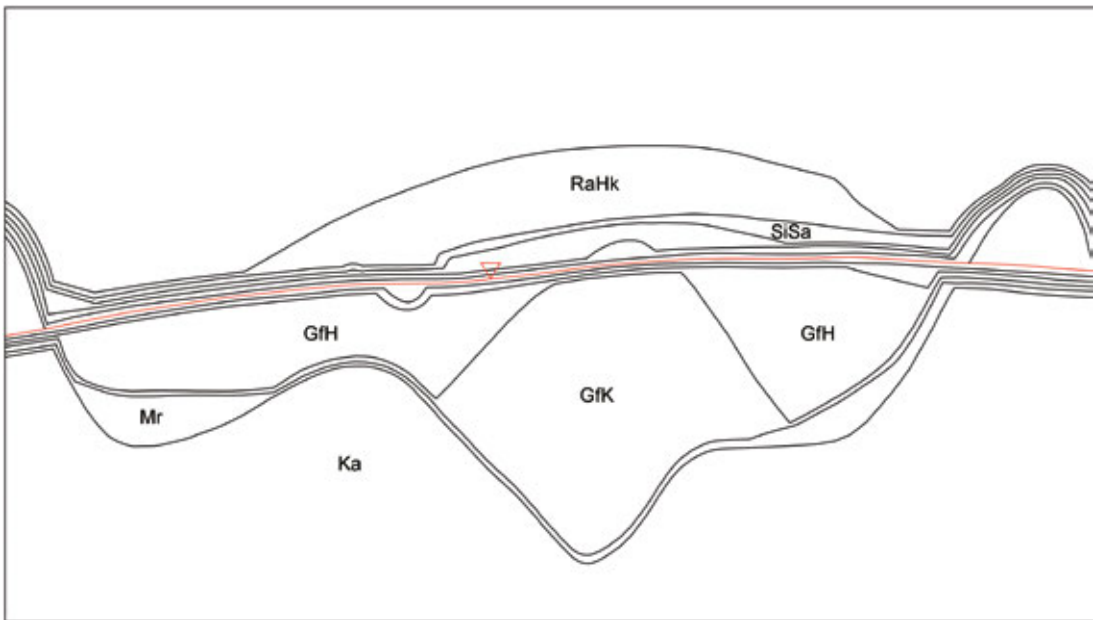
- GHB (General Head Boundary). Valituille virtausmallikerroksille voidaan antaa vakiovedenpinta-arvo ja kyseisiin mallisoluihin liittyvät vedenjohtavuusarvot.
- EFFPOR (Effective Porosity). Jokaiselle virtausmallin vedellä kyllästyneelle ja vedellä kyllästymättömälle kerrokselle määritetään tehokkaan huokoisuuden arvo.
- RCH (Recharge). Jokaiselle maanpinnassa esiintyvälle virtausmallin todelliselle tai ”läpinäkyvälle” kerrokselle annetaan prosentuaalinen arvo siitä, kuinka suuri osa sadannasta imeytyy maahan. Sadantatiedot voidaan syöttää käsin tai hakea automaattisesti tietokannasta.

Edellä mainittujen tietojen lisäksi tarvitaan myös automaattisesti tietokannasta saatavat tiedot:

- Mallialueen geometriatiedot (X_{min} , X_{max} , Y_{min} , Y_{max} , Z_{min} , Z_{max} ja solukoko).
- Tiedot vedenotto-kaivojen sijainneista ja pumppausmääristä.

Monikerroksisen pohjaveden virtausmallin laskenta etenee seuraavalla tavalla:

- Haetaan tietokannasta mallialueen geometriainformaatio.
- Mikäli tehdään well.dat -tiedosto, haetaan tietokannasta valittujen kaivo- ja imeytysso-lujen otto- ja imeytysmäärät ja tehdään niistä mallialueen kokoiset matriisit kaikille mallin kymmenelle kerrokselle.
- Matriisien ylä- ja alapinnat. Leikataan kaikki 3D-mallin yksiköt pohjaveden pinnalla, jolloin lopputuloksena saadaan sekä pohjave-



Kuva 37. Havainnekuva pohjaveden virtausmallin kerroksista suhteessa kolmiulotteiseen geologiseen rakennemalliin. Kuvassa esitetyt yksiköt edustavat kaikkia Virtaankankaan alueen tulkittuja hydrogeologisia yksiköitä, jotka puolestaan muodostavat pohjaveden virtausmallin 10 kerrosta. Kuva ei edusta todellista mallin poikkileikkausta.

dellä kyllästyneiden että kyllästymättömien hydrogeologisten yksiköiden pinnat. On huomattava, että lähtötietona käytettävän pohjaveden lähtötason pinnan muuttuessa myös virtausmallin rakenne muuttuu.

- Muokataan edellä mainittuja hydrogeologisten yksiköiden pintoja niin, että yksikön ylä- ja alapinnat yhdistettäessä syntyvän yksikön paksuus on kaikkialla vähintään edellä määritelty minimipaksuus (Kuva 37).
- Määritetään horisontaalinen ja vertikaalinen vedenjohtavuus (HHC ja VHC) jokaiselle virtausmallin kerrokselle käyttäen hyväksi ennalta annettuja vedenjohtavuuden arvoja (kairauspisteissä yksikkökohtaisesti havaituille maalajeille) ja virtausmallimatriisien ylä- ja alapintoja.
- Lasketaan General Head Boundary (GHB) jokaiselle yksikölle kertomalla yksikön paksuus sen vedenjohtavuudella ja GHB-maskilla.
- Tehokas huokoisuus määritellään erikseen jokaiselle hydrogeologista yksikköä vastaavalle virtausmallikerrokselle. On huomattava, että tehokkaan huokoisuuden ja vedenjohtavuusarvojen määrittämisessä voidaan käyttää eri arvoja kutakin hydrogeologista yksikköä vastaavan mallikerroksen vedellä kyllästyneelle ja vedellä kyllästymättömälle osalle.
- Annetaan arvo RCH-matriisille maanpinnassa olevan maalajin pohjaveden muodostumisprosentin mukaan. Tämä prosenttiosuus kerrotaan käsin syötettävällä tai tietokannasta haettavalla sademäärän arvolla. Imeytymisen määrittämiseen mallissa käytetään optiota, jossa vesi imeytyy ylimpään aktiiviseen mallisoluun.



4 TULOKSET

4.1 Tutkimusalueen rakenne

Virttaankankaan harjukompleksi on jaettu 3D-rakennemallissa kuvattujen hydrogeologisten yksiköiden avulla viiteen pohjaveden virtaus-ominaisuudeltaan toisistaan eroavaan yksikköön. Nämä yksiköt ovat kerrostuneet vettä johtamattoman kallion päälle järjestyksessä:

- Moreeni (Mr)
- Karkea glasifluviaalinen harjuaines (GfK)
- Hieno glasifluviaalinen / glasilakustrinen harjuaines (GfH)
- Siltti-savi (SiSa)
- Rantahiekka (RaHk)

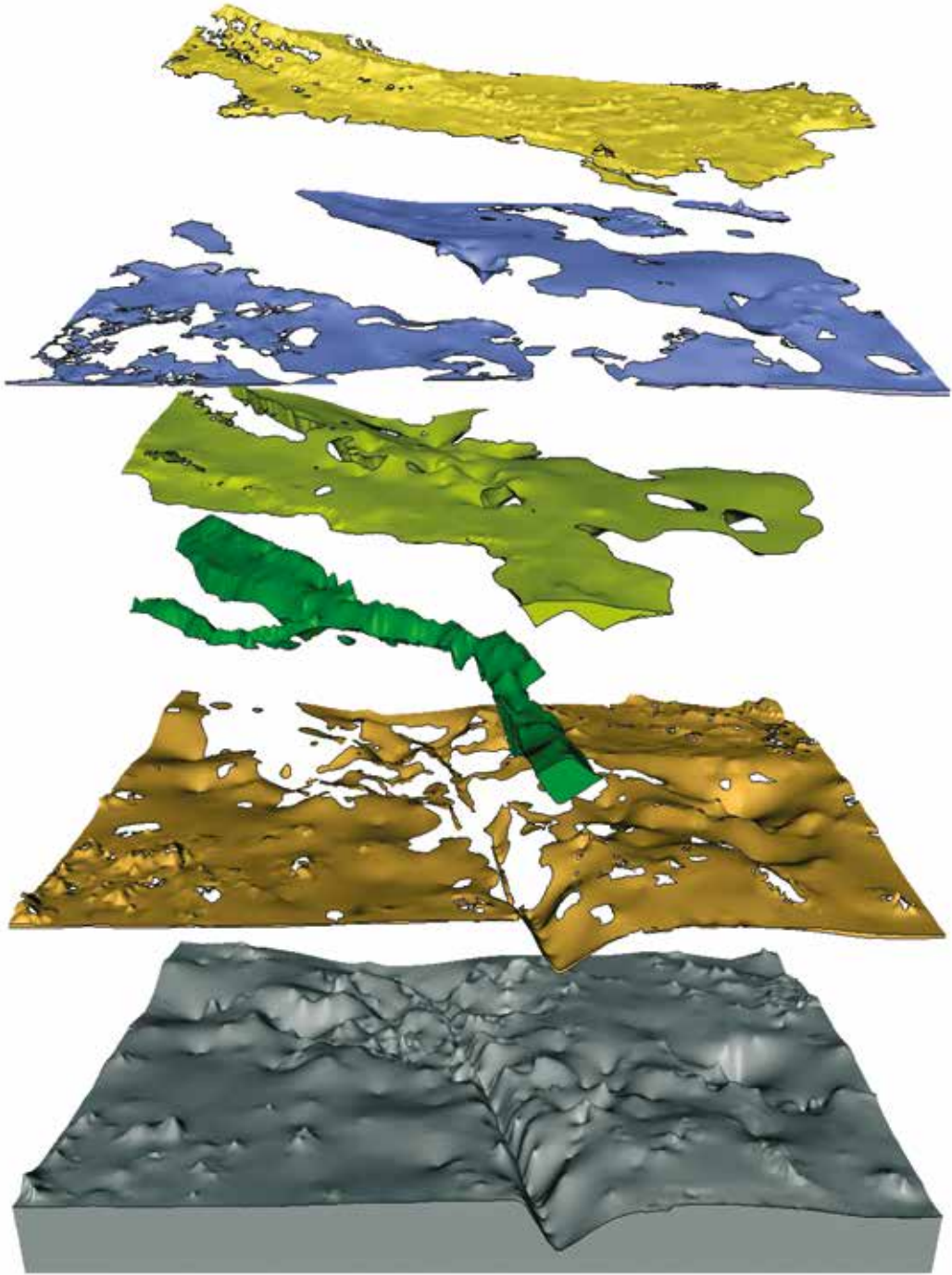
Virttaankankaan hydrogeologinen malli esitetään kuvissa 38a ja 38b.

Moreeniyksikkö koostuu diamiktonista, joka voi olla synnyltään joko pohja-, sulamisablaatio- tai valumismoreenia. Moreeniyksikköön on kuvattu myös mahdollisesti ruhjeen pohjalla esiintyvät irtaimet, heikosti lajittuneet maa-ainekset, joita ei ole pystytty maanäytteiden perusteella erottamaan moreenista. Moreeniyksikön merkitys tekopohjaveden muodostukselle Virttaankankaalla on vähäinen. Vaikka moreeni on suurelta osin kyllästynyt vedellä niin veden virtaus ohuessa moreeniyksikössä on erittäin hidasta (moreenin K-arvo on noin: 10^{-8} – 10^{-6} m/s). Moreeniin rakennetut talousvesikaivot voivat olla antoisuudeltaan riittäviä kotitalouskäyttöön, vaikka moreenialueiden pohjavesi reagoi voimakkaammin

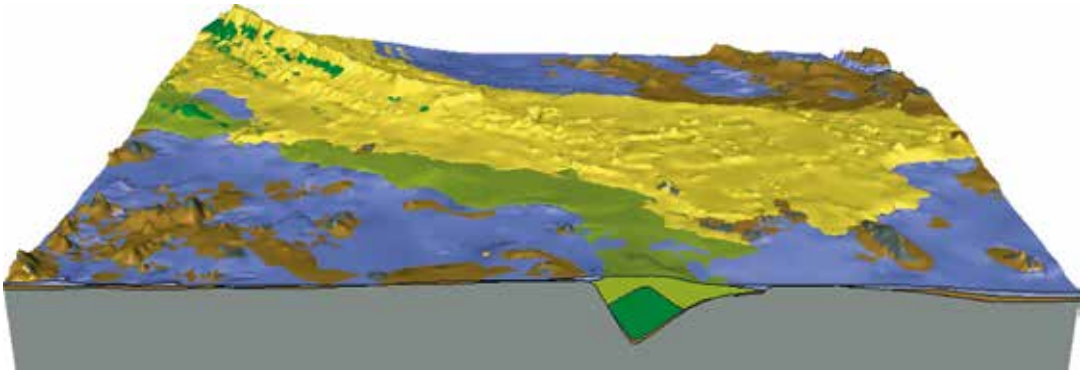
sademäärän vaihteluihin kuin paremmin vettä johtavilla alueilla.

Glasifluviaalinen karkea yksikkö koostuu pääasiassa karkeasta hiekasta ja sorasta, jotka ovat kerrostuneet jäätikön pohjalla sijainneen voimakkaasti virtaavan sulamisvesikanavan sisälle ja sen etumaastoon. Harjuytimen kerrostumisvaiheiden aikana muodostui myös paikallisia hienompia kerroksia, jotka on silti sisällytetty mallissa glasifluviaaliseen karkeaan yksikköön. Karkean yksikön ominaisuudet, kuten hyvä vedenjohtavuus ja suuri tehokas huokoisuus mahdollistavat suurten pohjavesimäärien virtaamisen, minkä takia tekopohjavesihankkeen keskeiset toiminnot sijoittuvat karkean yksikön alueelle tai sen lähiympäristöön.

Glasifluviaalinen ja -lakustrinen hieno yksikkö kerrostui rauhallisemmissa virtausoloissa kuin karkea harjuaines. Hienon yksikön vedenjohtavuus pienenee kun etäisyys harjuyttimeen kasvaa. Hieno glasifluviaalinen yksikkö ympäröi karkeaa harjuainesta tekopohjavesilaitoksen toiminta-alueella, ja osa imeytettävästä vedestä tulee liikumaan myös hienossa yksikössä. Hieno yksikkö muodostaa myös hydraulisen yhteyden harjun ja sen reuna-alueiden välille. Veden tuotantokaivot pyritään sijoittamaan mahdollisimman karkeaan ainekseen, glasifluviaalisen karkean yksikön hienoaineesta vapaisiin osiin. Hienoon harjuainekseen ei ole mahdollista rakentaa suurituottoisia kaivoja.



Kuva 38a. 3D-hydrogeologisen rakennemallin yksiköt.



Kuva 38b. Edellisen kuvan yksiköt koottuna yhteen.

Itämeri peitti alleen koko Virttaankankaan alueen mannerjään vetäytyttyä alueelta. Siltti-savi –yksikkö kerrostui harjun kerrostumien päälle rauhallisissa oloissa merenpohjaan. Siltti-savi –yksikkö toimii vettä pidättävänä kerroksena, joka erottaa toisistaan orsiveden ja pohjaveden. Kankaanjärven alueella, Harjunkylässä sekä Palokankaan keskiosissa siltti-saven pohjan taso on pohjaveden painekorkeuden alapuolella. Näillä alueilla pohjavesi on paineellista. Siltti-saven vedenjohdavuus on erittäin pieni, ja siihen sitoutunut vesi liikkuu hyvin hitaasti, K-arvon ollessa suuruusluokkaa 10^{-11} – 10^{-7} m/s. Siltti-savi yksikön läpi tapahtuva tihkuminen tapahtuu pääsääntöisesti siltti-saven rakosysteemejä (engl. preferential flowpath) pitkin. Mainitun kaltainen ilmiö on havaittavissa Harjunkylän alueella, joissa savikon läpi tihkuva pohjavesi muodostaa pieniä lähteiköjä alueen peltojen pintaan (Kuva 39).

Rantahiikkakerros on Virttaankankaan harjualueen ylin yksikkö, joka esiintyy maanpinnassa lähes koko harjualueella. Rantahiikka on uudelleen kerrostunutta harjuainesta, joka syntyi rantavoimien eroosion, kuljetuksen ja kerrostumisprosessien vaikutuksesta harjun kohotessa merenpinnan yläpuolelle jääkauden jälkeen. Rantahiikkayksikkö koostuu keskikarkeasta ja sitä karkeammasta hiekasta ja sorasta. Useilla alueilla yksikölle on tyypillistä huuhtoutunut kivinen

pohjataso, jonka päälle on kerrostunut ylöspäin karkenevia kerrossarjoja. Yksikkö on paksuimmillaan Virttaankankaan ja Palokankaan pohjoisreunalla, jossa sen paksuus on tyypillisesti noin 15 metriä.

Rantahiikkayksikköön on sisällytetty myös



Kuva 39. Savikon läpi maanpintaan tihkuvaa pohjavettä paineellisen pohjaveden esiintymisalueella Harjunkylässä.

alueella esiintyvien piilosuppien sisältämä maa-aines, joka sisältää usein jonkin verran muuta rantahiekkaa hienompia välikerroksia. Rantahiekan vedenjohtavuus sijoittuu hienon ja karkean harjuaineksen väliin. Rantahiekkakerros on kyllästynyt vedellä ainoastaan orsivesialueilla, joten tekopohjaveden hyödyntämismahdollisuuksien kannalta rantahiekkään ei voida tehdä kaivoja. Tekopohjavesilaitoksen toiminta-alueilla rantahiekkakerroksessa ei esiinny pohjavettä. Rantahiekkayksikkö on kuitenkin tärkeä tekopohjaveden tuotannolle, sillä sen kyky läpäistä imeytettävä vesi on suuri, minkä johdosta imeytysalueille ei tule muodostumaan lammikoita.

4.2 Merkkiainekokeen tulokset

Selkeä merkkiainepilven läpivirtaus voitiin havaita kolmessa eri tutkimuspisteessä, pohjavesiputkissa 550 ja 25 sekä tuotantokaivossa K51. Merkkiainetta saatiin kiinni ensimmäisen keran pohjavesiputkella 550 yhdeksäntoista päivää merkkiaineen syöttämisen jälkeen. Pohjavesiputki 550 sijaitsee 160 metriä imeytysalueelta lounaaseen (Kuva 24).

Putkessa tapahtui jyrkkä merkkiainekonsentraation nousu ja lasku. Viikon aikana otetusta kahdesta näytteestä määritettiin koko merkkiainekokeen korkeimmat jodidipitoisuudet 1400 µg/l ja 1600 µg/l, mutta noin puoleltoista kuukauden kuluttua joulukuun puolessa välissä jodidipitoisuus oli jo tausta-arvon tuntumassa. Reilun neljän kuukauden kuluttua kokeen aloittamisen jälkeen merkkiaineen saapuminen havaittiin melkein samanaikaisesti pohjavesiputkella 25 sekä tuotantokaivossa K51. Kaivo K51 on 640 metriä ja pohjavesiputki 25 on 510 metriä merkkiaineen imeytysalueelta IA500 etelään. Näytepisteiden 550, 25 ja K51 lisäksi merkkiainepitoisuuden nousu voitiin havaita kiistattomasti ainoastaan putkella 554 (5 µg/l - 6 µg/l). Kulutusveden jodidipitoisuus oli maksimissaan noin 10 µg/l, joten merkkiaineella ei ollut vaikutusta juomaveden käyttökelpoisuuteen.

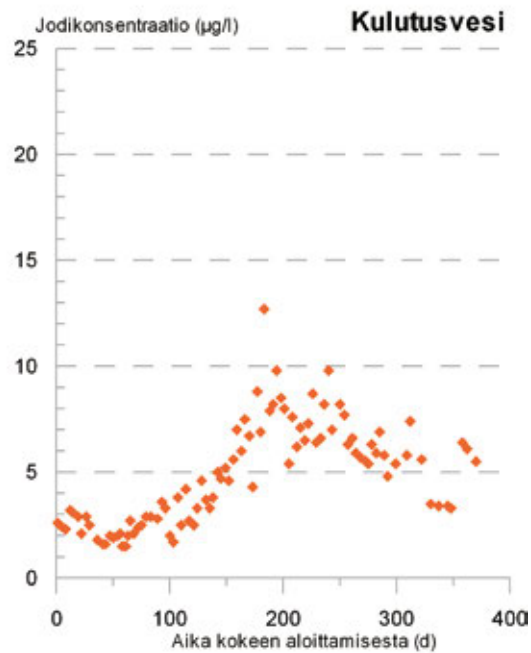
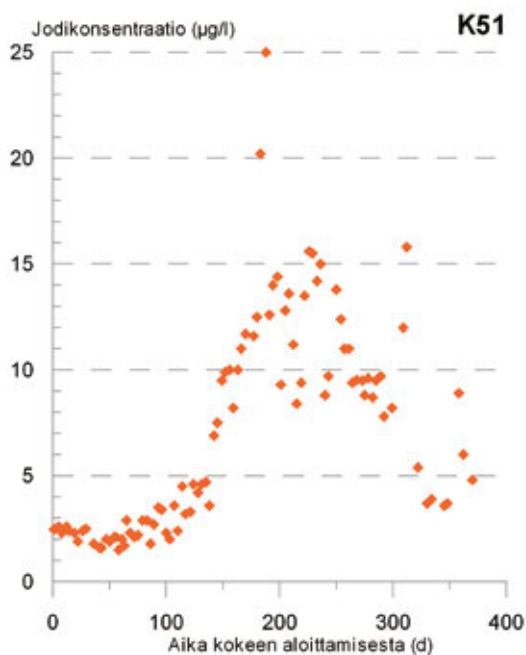
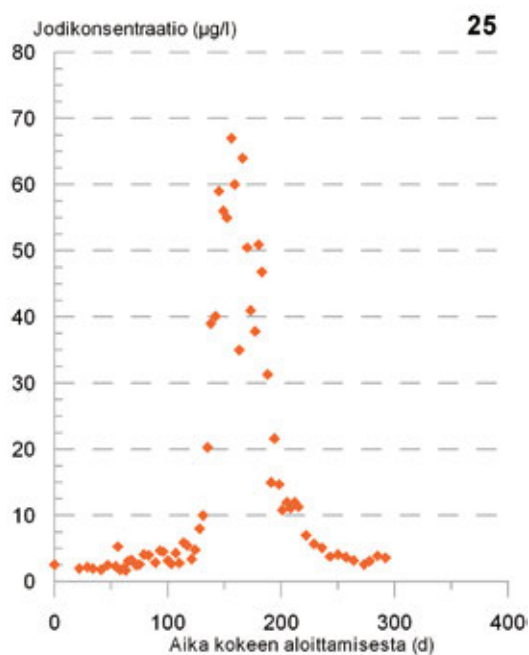
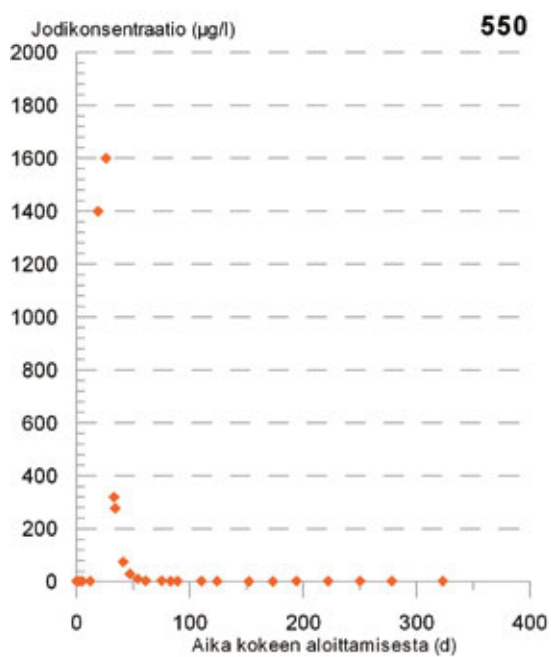
Pisteiden 550, 25 ja K51 tulokset sovitettiin 1-ulotteiseen advektio-dispersio-malliin (Maloszewski 2000), josta saatiin määritettyä keskimääräinen virtausnopeus, viipymä ja dispersiviteetti imeytysalueelta kullekin pisteelle (Taulukko 8), sekä malliin sovitettua ns. ”breakthrough-käyrät”. Kuvan 40 breakthrough-käyrästä nähdään merkkiaineen eteneminen havaintopisteiden kautta vedenottokaivolle.

Taulukko 8. Veden keskimääräinen virtausnopeus, viipymä ja dispersiviteetti.

Piste	Etäisyys (m)	Virtausnopeus ka (m/d)	Keskimääräinen viipymä (d)	Dispersiviteetti (m)
550	160	6,7	24	3,2
25	510	3,1	162	3,5
K51	640	2,7	235	20,1

Merkkiainekokeen tulosten mukaan pohjaveden virtausnopeus oli suurin imeytysalueen ja pohjavesiputken 550 välillä. Tämä oli seurausta pohjaveden pinnan jyrkästä gradientista imeytysalueen läheisyydessä. Etäämmällä imeytysalueesta, harjuytimen alueella pohjavesiputken 550 ja kaivon K51 välillä pohjaveden gradientti oli loivempi ja virtausnopeus hitaampi kuin imeytysalueen läheisyydessä.

Merkkiainepilven etenemisessä voidaan nähdä dispersion vaikutus. Lähimpänä imeytysaluetta sijaitsevalla havaintopisteellä 550 merkkiainepilvi oli vielä suhteellisen kapea ja jodidin huippukonsentraatio oli suuri. Kuljetusmatkan kasvaessa putkelle 25 merkkiainepilvi oli venynyt jo hieman pidemmäksi ja samalla merkkiainepitoisuus oli laimentunut. Sen sijaan kaivolla K51 merkkiaineen konsentraatio oli lähes kertaluokkaa pienempi kuin pohjavesiputkissa. Suuri ero selittyy sillä, että kaivoon tuleva vesi on kooste laajalta alalta eri virtausreittejä kulkeneista vesistä. Kaivoon tulee vesiä myös merkkiainekokeen vaikutusalueen ulkopuolelta, kun taas pohjavesiputkesta mitattu



Kuva 40. Merkkiaineen eteneminen imeytysalueelta kaivolle K51. (Jylhä-Ollila 2004).

natriumjodidin konsentraatio edustaa vain yhtä kapeaa merkkiaineen vaikutusalueella esiintyvää pohjaveden virtausreittiä.

Tutkimuksessa merkkiaineen keskimääräinen viipymä imeytysalueelta kaivolle K51 oli hieman alle 8 kuukautta. Kokeessa määritetty veden viipymä on lähes kolme kertaa pidempi kuin teko-pohjavesilaitoksen suunnittelussa tavoitteeksi asetettu 12 viikon keskimääräinen viipymäaika imeytys- ja kaivoalueiden välillä. Tulevalla teko-pohjavesilaitoksella veden viipymäajat tulevat kuitenkin olemaan selvästi merkkiainekokeen tuloksen mukaisia viipymiä lyhyempiä. Tuotantotilanteen mukaiset virtaamat ovat selvästi suurempia kuin tehdyn imeytyskokeen aikaiset pohjaveden virtaamat. Tämän vuoksi pohjaveden pinnan gradientit kasvavat tehdyn merkkiainekokeen alueella ja veden viipymäajat tulevat sen johdosta lyhenemään.

Tuotantokaivosta K51 pumpattiin ylös merkkiainetta 26 % maahan imeytetyn merkkiaineen kokonaismäärästä. Merkkiaineen saantoprosentin pienuus selittyy pääasiassa sillä, että kaivo K51 sijaitsee harjuytimen laidassa merkkiaineen imeytysalueeseen nähden harjuytimen toisella puolella, eikä vedenottokaivoja ollut kokeen aikana kattamaan koko harjuytimen leveyttä. Pienet merkkiainepitoisuudet harjuytimen toisessa laidassa pohjavesiputkella 554, antavat viitteitä siitä, että merkkiainetta on kulkeutunut jossain määrin myös harjuytimen muissa osissa. Merkkiaineen saantoprosenttia pienensi myös se että vedenotto K51:llä oli kokeen ajan keskimäärin 5000 m³/d kun samanaikaisesti imeytysvesimäärä oli 6000 m³/d. Lisäksi osa imeytetystä vedestä on voinut kokeen aikana virrata kohti kaivoa K41, joka on luonnostaan ylävirran puolella, mutta kokeen kuluessa pohjaveden pinnan gradientit taasoittuivat ja kääntyivät osittain kohti kaivoa K41.

4.3 Pohjaveden pinnan muutokset

Virttaankankaan alueen luontaisissa pohjavesien korkeuksissa on ollut laskeva trendi vuodesta 1989 alkaen (Kuva 41). Sama ilmiö on ollut havaittavissa sekä Virttaankankaan pohjavedessä että orsivedessä. Orsivesiyksikön tilavuus on paljon pohjaveden tilavuutta pienempi, mistä johtuen orsivesi reagoi sademäärien ja muiden olosuhteiden muutoksiin voimakkaammin kuin varsinainen pohjavesi. Erityisesti Kankaanjärven alue on herkkä sademäärän muutoksille. Virttaankankaan pohjavesiesiintymä on tilavuudeltaan huomattavan suuri verrattuna moniin muihin suomalaisiin akvifereihin, mistä johtuen se reagoi hitaasti muutoksiin. Vuonna 2005 ja 2006 useissa Lounais-Suomen harjuakvifereissa pinnat nousivat, samanaikaisesti vesipintojen muutos Virttaankankaalla oli kuitenkin yhä hidasta.

Pohjaveden pintojen aikasarjat

Turun Seudun Vesi Oy:n tietokannassa on pohjaveden pinnankorkeustietoa kerättyä järjestelmällisesti vuodesta 1988 lähtien (Kuva 28). Pinnankorkeusaineistosta voidaan tätä tarkoitusta varten tehtyjen tiedonhallintaohjelmien avulla helposti valita mittaustuloksia halutuista pohjavesiputkista määritetyllä aikavälillä. Mittaus-tuloksia voidaan hakea tietokannasta kahdella eri tavalla; mittaustuloksia voidaan hakea täsmällisesti havaintopiste kerrallaan, jolloin saadaan kerralla näkyviin kaikki kyseistä mittausta koskeva tieto. Eräissä tapauksissa on kuitenkin tarpeen hakea tietyn alueen sisältä kerättyjä mittaustuloksia valitun ajanjakson sisällä. Näissä tapauksissa tietojen kokoaminen tietokoneen ymmärtämään muotoon visualisointia varten on usein työlästä ilman tarkoitukseen tehtyjä sovellusohjelmia, sillä pohjaveden pinnan havainnot on useilta ajankohdilta lukuisissa pisteissä. Usein myös mittaustuloksia on vaihteleva määrä havaintopisteiden välillä. Näissä tapauksissa tiedonhal-

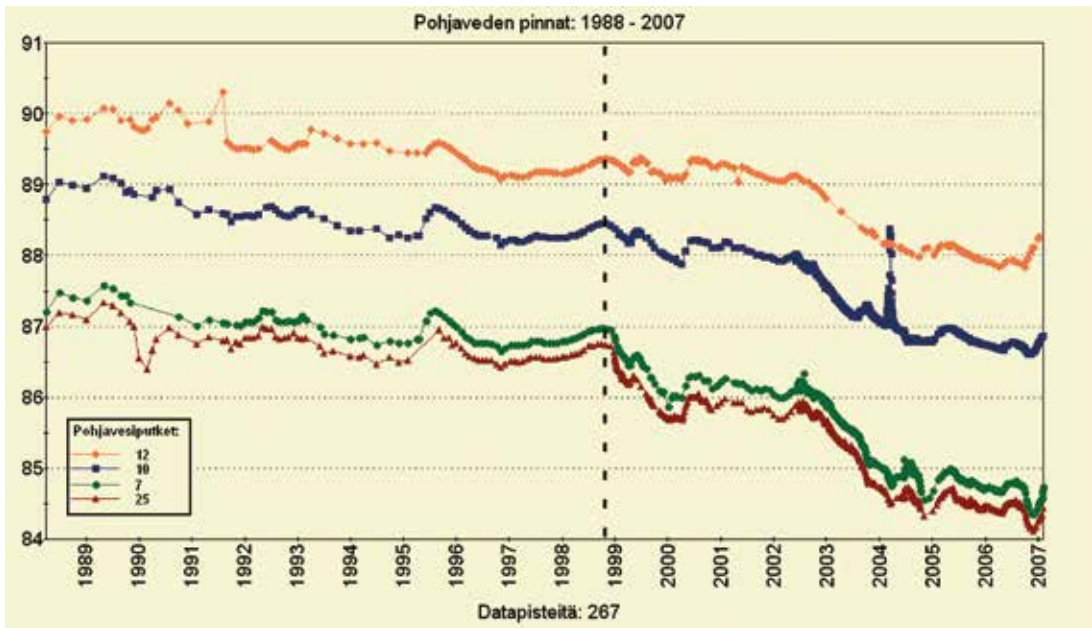
lintatyökalujen avulla on mahdollista vaivatta yhdistää eri mittausajankohtien tuloksia yhteen ja luoda alueellisia tarkasteluja pohjavesipintojen kehityksestä.

Vuotta 1988 vanhempaa pohjavedenpintatietoa löytyy useista vanhoista työraporteista ja putkien asennukseen liittyvistä dokumenteista. Vanhoista raporteista löytyvien pohjaveden pinnan mittaustietojen lisäämiseen tietokantaan ei ole tarvetta, sillä aineisto on varsin harvaa ja usein epämääräisesti ja epäluotettavasti dokumentoitua.

Pohjavedenpintojen mittaustuloksista voidaan räättälöityjen sovellusten avulla hakea vapaamittaisia aikasarjoja, joita voidaan vaivattomasti esittää sekä kuvaajina (Kuva 42), pistejoukkoina sekä pistejoukoista interpoloituina sama-arvokäyrinä (Kuva 43). Kuvaajien avulla voidaan esittää ja tarkastella yksittäisiä mittaustuloksia sekä tarvittaessa korjata tietokannassa olevia virheellisiä tietoja.

Pohjavedenpinta-animaatiot

Tekemällä pohjaveden pintojen muutoksista animaatioita ajan suhteen on mahdollista saada helposti selkeä kokonaiskuva vedenpinnan muutoksista halutulla alueella haluttuna aikavälinä (Kuva 44). Vedenpintojen alueelliset muutokset saadaan automaattisesti interpoloitua sama-arvokäyriksi ja sama-arvokäyräkuvat saadaan helposti yhdistettyä kartta-animaatioiksi. Animaatiossa voidaan lisäksi säätää vedenpintojen sama-arvokäyrien väliä, jolloin pienetkin muutokset vedenpintojen korkeuksissa on helppo havaita (Liite 5). Pohjavedenpinta-animaatiot voidaan esittää absoluuttisina pinnankorkeuksina tai pintojen suhteellisena muutoksen verrattuna aloituspäivään. Absoluuttisia pinnankorkeuksia tarkastellessa on helppo verrata vedenpintojen muutoksia pidemmällä aikajaksolla ja laajemmalla alueella. Vedenpintojen suhteelliset muutokset verrattuna vedenpinta-animaation aloituspäivään antavat



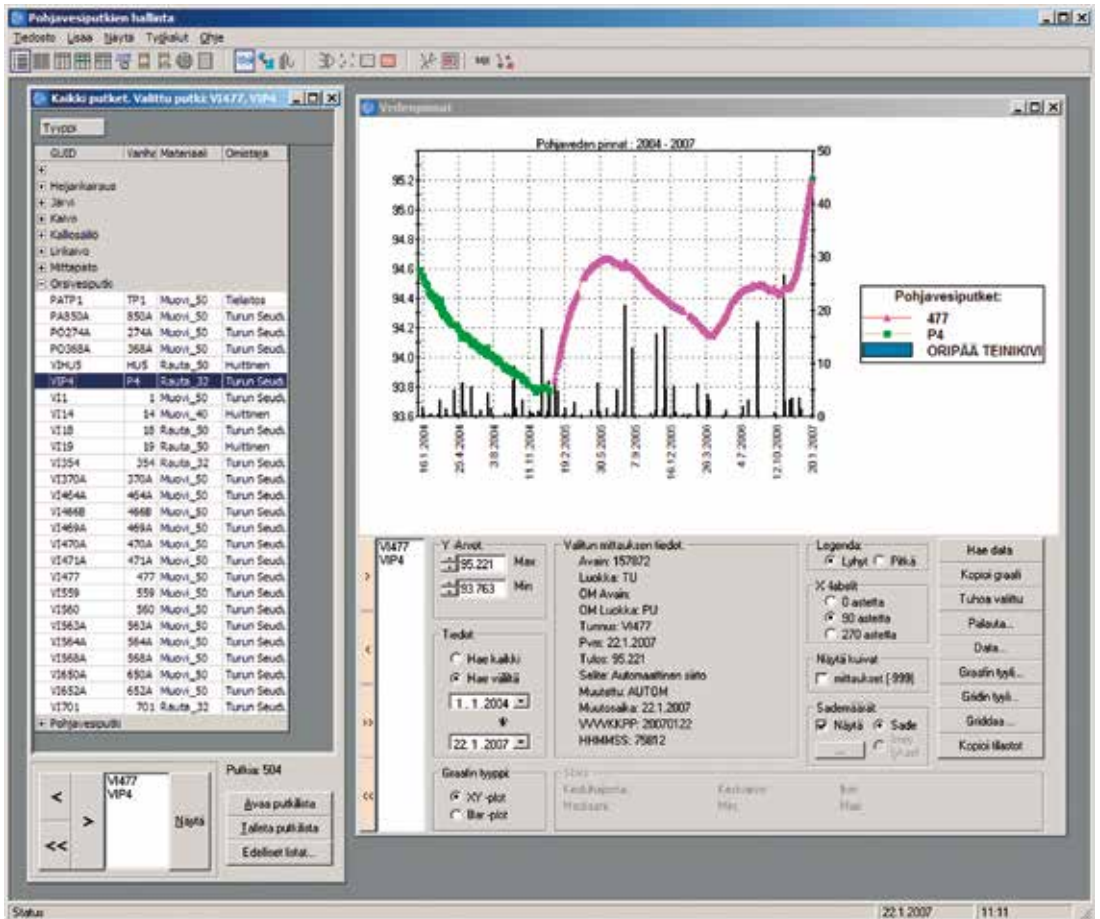
Kuva 41. Pohjaveden pinnankorkeusmittauksia on tallennettuna TSV:n tietokantaan vuodesta 1988 alkaen. Koko mittausjaksolla on havaittavissa laskeva trendi. Virttaankankaan vedenotto kaivosta K51 alkoi 15.12.1998. Vedenoton vaikutukset näkyvät putkissa 7 ja 25.

hyvän työkalun tarkkailla pintojen nopeampia ja pieni-alaisempia muutoksia, esimerkiksi imeytyskokeiden aikana. Imeytyskokeiden aikaisista havainnoista käy hyvin ilmi pohjaveden pinnan korkeustason muutos kokeen seurauksena sekä imeytys- tai alenemakartion koko ja muoto. Myös mitattuihin pohjavedenpintoihin perustuvien animaatiotulosten ja 3D-rakennemallin välillä on selkeä yhteys, pohjaveden pintojen vaihtelun suuruus ja suunta vastaavat tulkittujen hydrogeologisten yksikköjen muotoa.

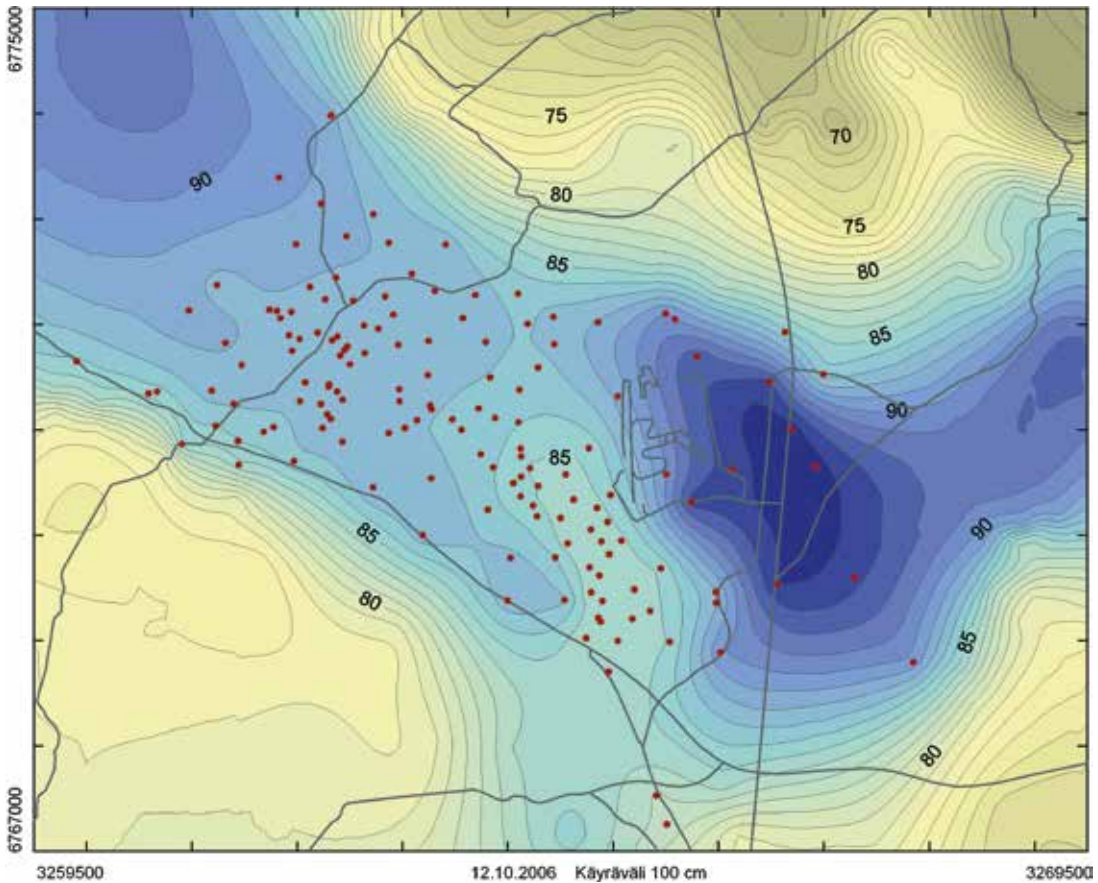
4.4 Pohjaveden muodostuminen, virtaus, määrä ja ikä

3D-virtaus

Maahan satavasta vedestä pohjavedeksi ei imeydy se osuus sadevedestä, joka kulkeutuu ojiin, lammitoituu tai jää lumena maanpintaan, haihtuu lämpimässä säässä (evaporaatio) tai poistuu maaperästä kasvien haihduttamana (transpiraatio). Imeytyvä vesi vajoaa maanpinnalta alaspäin vajovesivyöhykkeen läpi ja lopulta saavuttaa poh-



Kuva 42. Kuva Pohjavesiputkien hallinta -ohjelmasta. Kuvassa on graafinen esitys kahdesta pohjavesiputkesta mitatuista pohjaveden pinnoista vuoden 2004 alusta vuoden 2007 alkuun ulottuvalla mittausjaksolla.



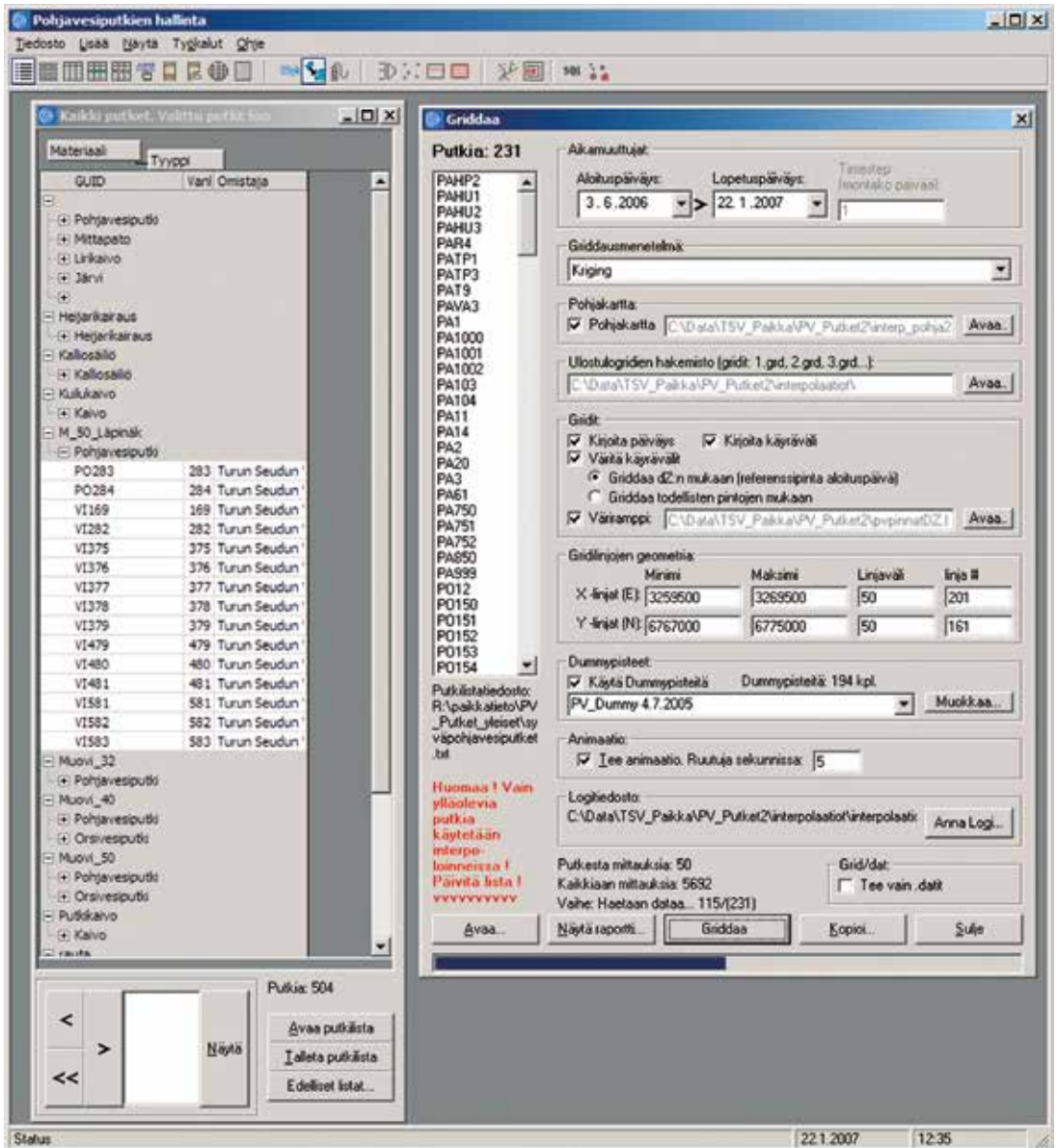
Kuva 43. Pohjavesiputkien ballinta -ohjelmassa tehty sama-arvokäyräkartta pohjaveden pinnoista tutkimusalueella.

javeden pinnan, eli sen tason, jossa maaperän maa-ainesten rakeiden väliset huokokset ovat täysin veden kyllästämiä. MODFLOW-virtausmalliohjelmisto kuvaa vain pohjavedellä kyllästyneen maa-aineksen veden virtauksen. Edellä lueteltujen maanpinnassa ja vajovesivyöhykkeessä vaikuttavien tekijöiden huomioon ottamiseksi malliin on määritetty imeytymiskertoimet eri alueille. Imeytymiskertoimet vaihtelevat mallialueella viidestä prosentista 65 prosenttiin sadannasta.

Pohjavesikerroksessa vesi virtaa pohjaveden muodostumisalueilta kohti pohjaveden purkautumisalueita. Virtauksen määrään vaikuttavat kaksi

päättekijää – aineksen raekokojakauma sekä pohjaveden pinnan kaltevuus eli gradientti. Kuvassa 45 esitetään kaksi erilaista raekokokäyrää. Suurin osa pohjaveden virtauksesta tapahtuu karkean harjuytimen sisällä. Eri hydrogeologisten yksiköiden sisällä tapahtuvan pohjaveden virtauksen määrässä ja virtausnopeuksissa on suuria eroja.

Monikerroksisen virtausmallin avulla voidaan analysoida pohjaveden pinnan alla esiintyvien hydrogeologisten yksiköiden sisäistä pohjaveden virtausta sekä virtausta eri hydrogeologisten yksiköiden välillä. Virtaankankaan tutkimusalueelta tehdystä virtausmallissa orsivettä kuvataan



Kuva 44. Pohjavesiputkien hallinta –ohjelman näkymä pohjavedenpinta-animaation tekemiseen käytettävästä dialogi-ikkunasta.

virtausmallissa viidellä ylimmällä mallikerroksella ja pohjaveden virtaus tapahtuu viidessä alimassa virtausmallikerroksessa. Orsivesikerrosten alapuolella voi pohjaveden horisontaalinen virtausuunta poiketa huomattavasti ylempien

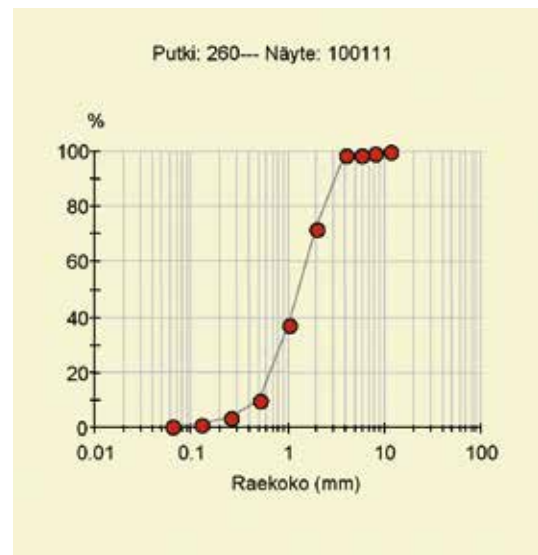
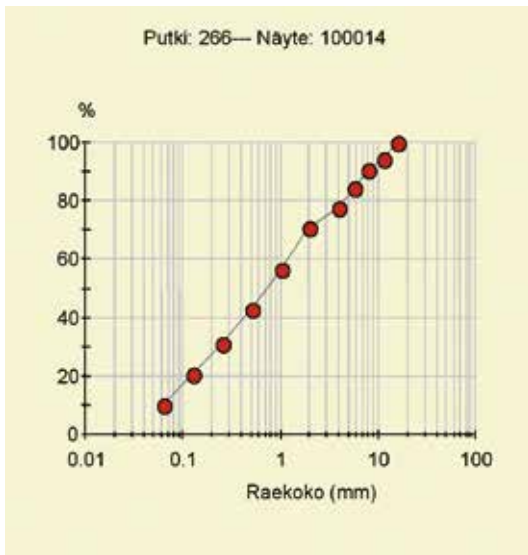
virtausmallitasojen suunnista. Pohjaveden horisontaalinen virtausuunta eri kerrosten välillä on likipitään sama eri virtausmallitasoilla. Virtausnopeus sen sijaan vaihtelee voimakkaasti siten, että karkea harjuydin muodostaa nopean vir-

tauskanavan, jonka alapuolella moreenissa sekä yläpuolella hienossa harjuaineksessa virtaus on hidasta. Virtausmallin avulla saadaan tietoa myös vertikaalisuunnassa tapahtuvasta virtauksesta (Kuva 46).

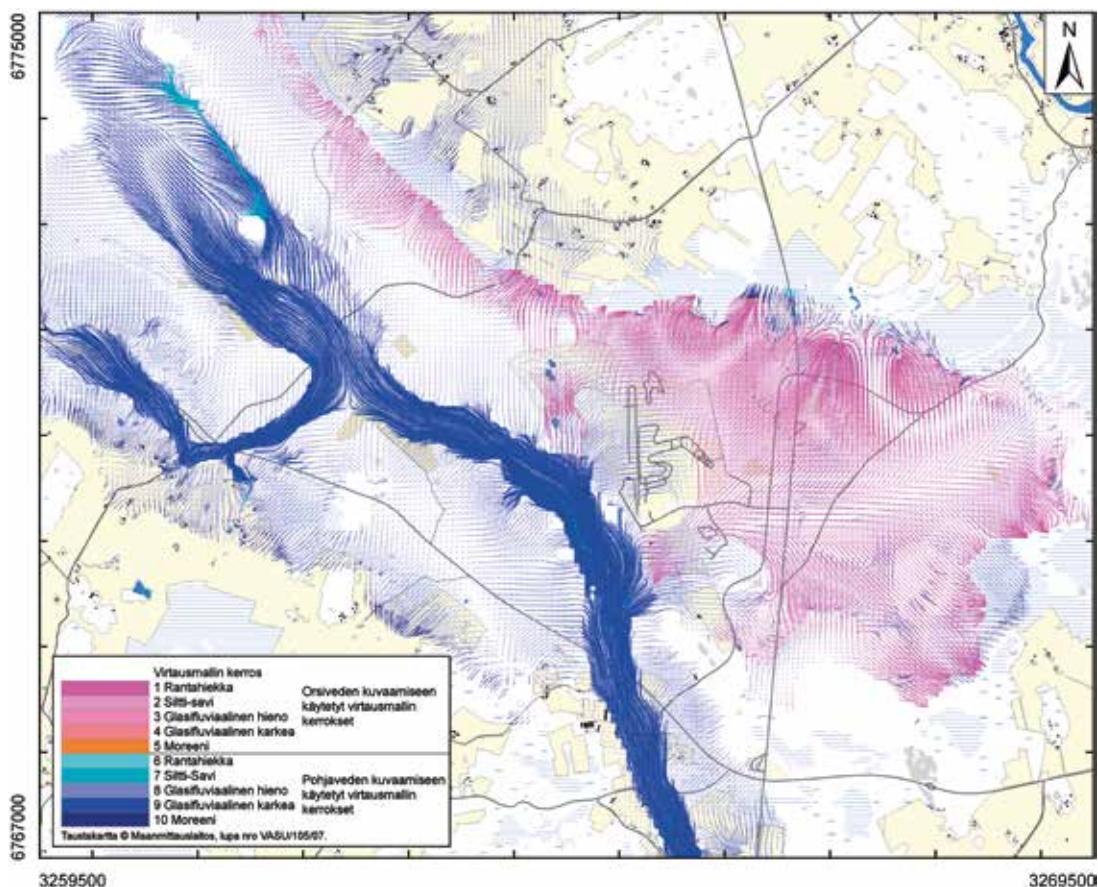
MODFLOW-virtausmallin tuloksena syntyviä virtausreittejä ja -suuntia voidaan tarkastella joko virtausviivojen avulla, matriisimuodossa tai vektorikarttina MODPATH-lähdekoodiin (Pollack 1994) perustuvaa PMPATH-ohjelmaa sekä Surfer®-ohjelmaa hyödyntämällä (Liite 6). PMPATH-ohjelman avulla virtauksia tarkasteltaessa mallin geometrisesta rakenteesta voidaan esittää ainoastaan kaksiulotteisia leikkauskuvaajia. Jos virtausreittien ja 3D-rakennemallin yhteyksiä halutaan tarkastella monipuolisemmin, voidaan virtausmallista tallennetut virtaustulokset esittää muilla visualisointiohjelmilla, kuten Surferin, tai Kitwaren Paraviewin avulla. Samaan kuvaan voidaan yhdistää myös muuta tietoa, esimerkiksi kaivojen sijainti ja syvyys. Erilaisten ongelmien

ratkaisemiseksi on syytä käyttää erilaisia visualisointitapoja. 2D-visualisointien (esim. Surfer) koostaminen on usein nopeampaa ja tulokset ovat helpommin ymmärrettävissä kuin 3D-esityksissä. Toisaalta 3D-visualisointien (esim. Paraview) avulla saadaan kuvattua geologisten rakenteiden ja virtaussysteemien välisiä yhteyksiä, joita on vaikea hahmottaa 2D-poikkileikkausten perusteella (Kuva 47). Myös monimutkaisten virtaussysteemien esittäminen kaksiulotteisina poikkileikkauksina on mahdotonta. Animaatioiden avulla on lisäksi mahdollista esittää virtauksen suuntaa ja virtausnopeuden suhteita.

PMWIN-virtausmallinnusohjelmalla voidaan tehdä vesitasetarkasteluja luontaisesti muodostuvan pohjaveden sekä imeytettävän tekopohjaveden määristä. Ohjelmalla voidaan tarkastella koko mallialueen vesitasetta tai valita tarkasteltava alue hilaruudun ja mallikerroksen tarkkuudella. Tarkastelun kohteena voi olla muodostuvan veden määrä, veden virtaus mallin eri solujen välillä tai



Kuva 45. Kuvassa on kahden eri näytteen seulontakäyrät. Ensimmäinen seulontakäyrä on näytteestä, jossa on melko tasaisesti raekooltaan erilaisia maa-aineksia (morenimäinen näyte) ja jonka vedenjohtavuus on huono. Jälkimmäinen seulontakäyrä on kivisestä hiekasta, jossa karkeampien maa-ainesten rakeiden välejä täyttävää hienoainesta ei juurikaan ole. Tällaisen maa-aineksen vedenjohtavuus on selvästi suurempi kuin edellisen.

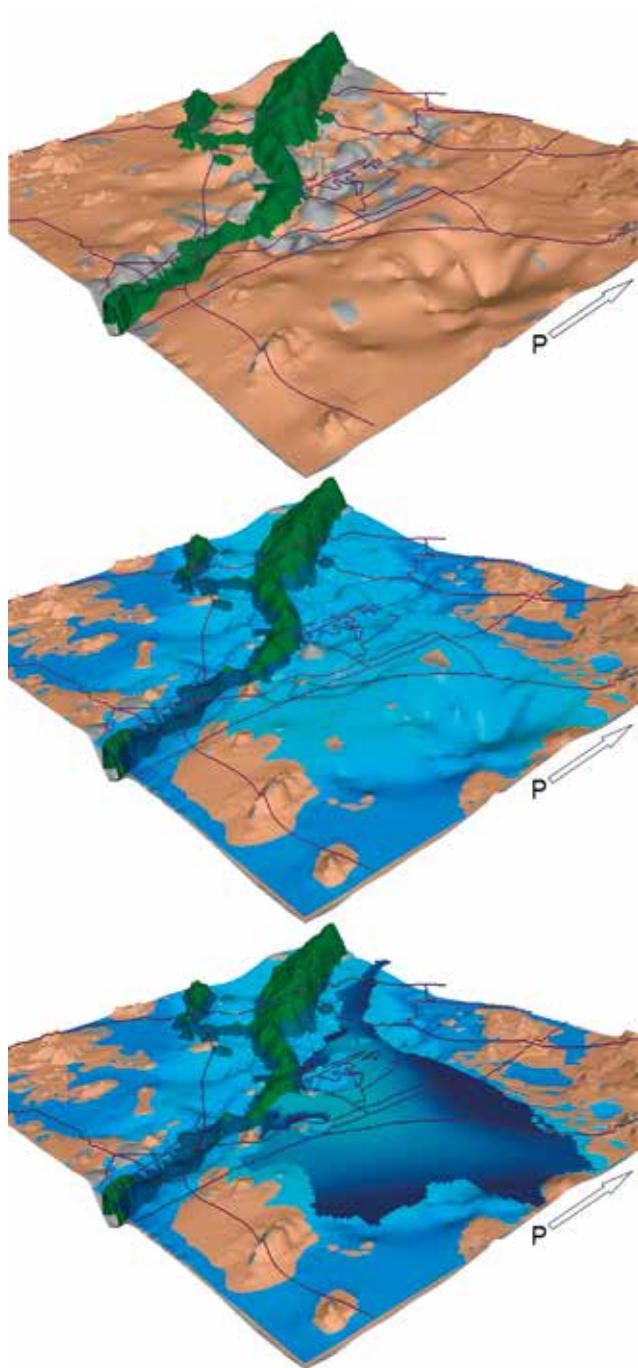


Kuva 46. Virtausmallin avulla lasketut virtausreitit PMPATH-ohjelmasta. Virtausreitiviivat kuvaavat kahden vuoden aikana tapahtuvaa pohjaveden virtausta. Reittien lähtöpisteet on sijoitettu seuraaviin yksiköihin: Rantahiekka (virtausmallin kerros 1), glasifluviaalinen hieno (8) ja glasifluviaalinen karkea (9). Yksittäisestä virtausreitivektorista ei käy ilmi kyseistä reittiä virtaavan veden määrä. Pohjaveden virtaama on suurimmillaan alueilla, joilla virtausreitiviivat ovat tiheässä. Virtausmallin kerrokset 1-5 ovat osittain orsivedellä kyllästyneitä. Kerrokset 6-10 sijaitsevat pohjavedellä kyllästyneessä vyöhykkeessä. Vertaa kuvat 37 ja 53.

pohjaveden purkautumisen määrä lähdealueiden tai ojitettujen alueiden soluista. Koko mallialueella luontaisesti muodostuvan pohjaveden määrä on noin 43 000 m³/d. Karkean harjuaineksen (GfK) alueella pohjavettä muodostuu noin 6000 m³/d ja hienon harjuaineksen (GfH) alueella noin 16 000 m³/d. Yksiköiden sisältämän pohjaveden määrä, eli mainittujen yksiköiden varastotilavuudet ovat puolestaan 32 500 000 m³ (GfK) ja 114 500 000 m³ (GfH).

Isotoopit ja rakennetulkinta

Happi-vetyisotooppimenetelmää tullaan käyttämään hyväksi seuraavassa tutkimusvaiheessa, kun Kokemäenjoen vettä ryhdytään imeyttämään Virttaankankaalle. Pohjaveden happi-isotooppikoostumuksen ($\delta^{18}\text{O}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) sekä vetyisotooppikoostumuksen (D/H) avulla on mahdollista seurata pohjaveden liikettä maaperässä, sillä pohjaveden happi- tai vetyisotooppisuhde ei



Kuva 47. Ylimmässä kuvassa on esitetty hydrogeologiset yksiköt kallio, moreeni ja karkea barjuaines 3D-mallista (z-suuntaa korostettu kymmenkertaiseksi). Keskimmäiseen kuvaan on lisätty virtausmallin tuloksena laskettu pohjavesikerros. Alimmassa kuvassa on esitykseen lisätty virtausmallinnuksen tuloksena saatu orsivesikerros. Virtausmalli on laadittu 14.3.2006 vedenpintatietojen perusteella.

muutu imeytyneen veden virratessa maaperässä. Pintavesien eli järvi- ja jokivesien $\delta^{18}\text{O}$ –pitoisuus vaihtelee haihdunnan seurauksena, minkä vuoksi eri alueiden pohjavesien happi-isotooppisuhteita vertaamalla voidaan erottaa toisistaan sadevedestä ja haihtuneiden pintavesien imeytymisen kautta syntyneet pohjavedet (Kortelainen ja Gustavsson 2003).

Orsivesien isotooppikoostumuksessa on havaittu pientä vuodenaikaisvaihtelua orsiveden reuna-alueiden havaintoputkissa. Vaihtelu on suurinta orsivesialueen niillä osa-alueilla, joissa orsiveden pinta on lähellä maanpintaa. Vastaavasti vaihtelu tasaantuu kun vajovesikerroksen paksaus kasvaa. Orsivesialue voidaan jakaa isotooppikoostumuksensa perusteella kolmeen osa-alueeseen, joita ovat: Pohjoisreunan alue (368A, 469A), Kankaanjärven osa-alue (471, 1, 568A) sekä Palokankaan lounaisosan osa-alue (560) (Kortelainen 2005a). Pohjaveden happi-isotooppikoostumus pääharjulla on lähes homogeeninen (Kortelainen ja Gustavsson 2003, Kortelainen 2005a), vaikka monivuotisen seurannan tuloksena voidaan sekä orsiveden että pohjaveden isotooppikoostumusvaihteluiden noudattavan vuodenaikaista systematiikkaa (Kortelainen 2006a).

Happi-isotooppien perusteella pintavesistä pohjavedeksi imeytyviä vesiä saattaa esiintyä Virttaankankaan alueella pieniä määriä ainoastaan Isosuon ympäristössä sivuharjun alueella. Sivuharjun vedet ovat yleisesti heterogeenisempia kuin pääharjulla, lisäksi sivuharjun isotooppikoostumuksessa on selvää vuodenaikaisvaihtelua, jota pääharjun pohjavesissä ei ole. Sivuharjun vesi muistuttaa siten isotooppikoostumukseltaan orsivettä (Kortelainen 2005b). Sivuharjun maanaines on kalsiitin suhteen selvästi köyhempää kuin pääharjulla, mikä aiheuttaa eron myös pääharjun ja sivuharjun vesien kemiallisiin ominaisuuksiin (Tiljander ja Kortelainen 2003, Kortelainen 2005b). Jokiveden imeyttämisen alettua voidaan happi-isotooppien avulla erottaa jokivedestä pe-

räisin oleva tekopohjavesi ja alueen luontainen pohjavesi, sekä määrittää eri vesien seossuhteita (Kortelainen ja Gustavsson 2003).

Hiilen isotooppikoostumuksen ($\delta^{13}\text{C}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) perusteella voidaan erottaa toisistaan epäorgaaninen hiili eli maaperän mineraaleista liuennut karbonaatti sekä orgaaninen hiili, joka on peräisin kasvien hajoamisesta (Kortelainen 2001). Liuenneen epäorgaanisen hiilen pitoisuuksien perusteella Alastaron Myllylähteestä purkautuva vesi on täysin peräisin pääharjulta (Tiljander ja Kortelainen 2003, Kortelainen 2005b). Kankaanrannan lähteen vesi edustaa seosvettä: Havaintoputki 165:n vesi on pääosin peräisin Löytäneen sivuharjulta, mutta osa Kankaanrannan lähteen vedestä on peräisin myös pääharjulta, sillä havaintoputki 169:n vesi edustaa sivu- ja pääharjun vesien sekoitusta (Kortelainen 2006b). Samaa tulokseen päädyttiin myös virtausmallisimulaatioiden avulla.

Maaperän kalsiitin alkuperän selvittämiseksi on pohjavesistä tehty myös strontiumisotooppiselvityksiä ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), nämä tulokset tukevat happi- ja vetyisotooppitutkimusten tuloksia. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ –suhde on korkeimmillaan silikaattirikkaissa kivilajeissa. Tällaisia ovat mm. hiekkakivet, mistä Virttaankankaan maaperäainekin on suurelta osin peräisin. Virttaankankaan päämuodostuman $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ –suhde on korkea, tutkimusten perusteella 0,739 ja Alastaron Myllylähteestä purkautuvan pohjaveden $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ –suhde (0,740) vastaa täysin Virttaankankaan päämuodostuman pohjavettä, mikä on vahva lisäosoitus siitä, että Myllylähteestä purkautuu ainoastaan Virttaankankaan päämuodostuman pohjavettä (Kortelainen 2005b).

Merkkiainekoe ja virtausmallin simulaatiot

Vuonna 2002 – 2003 suoritetun merkkiainekokeen tuloksena määritettiin keskimääräiseksi vir-

tausajaksi imeytysalueelta IA500 kaivolle K51 kahdeksan kuukautta. Samassa kokeessa saatiin imeytetystä merkkiaineesta takaisin vain 26 %, minkä perusteella suuri osa imeytetystä vedestä virtasi kaivon K51 ohi. Tulos oli odotettu yksikerroksisella pohjaveden virtausmallilla (Ikäheimo ja Mäki-Torkko 2001) tehtyjen simulaatioiden perusteella.

Merkkiainekoe simuloitiin jälkikäteen myös monikerroksisella pohjaveden virtausmallilla syöttämällä malliin merkkiainekokeen aikaiset imeytys- ja pumppausmäärät. Mallin simulaatiotulokset vastaavat hyvin imeytyskokeesta saatuja tuloksia. Simuloitu virtausaika on sama kuin kokeessa havaittu. Imeytysalueelta lähtevän veden virtaus-suuntaa ja -nopeutta tarkasteltiin simuloimalla vesipartikkeleita virtausmallin imeytystä kuvaaviin soluihin. Nopeinta virtausta tapahtuu harjuytimen alueella ja vesipartikkeleiden simuloidut virtausreitit ohittavat kaivon K51 itäpuolelta, mikä selittää merkkiainekokeessa havaittua alhaista merkkiaineen takaisinsaantoa (Kuva 48).

Tritium - helium- ja CFC- mittaukset ja pohjaveden viipymän mallinnus

Paineellisen pohjaveden CFC-tulosten perusteella laskettu ikä on havaintoputkessa 368 yli 40 vuotta ja lirikaivossa L1613 hieman alle 40 vuotta. Tritium-helium -menetelmällä saadut iät vastaavista putkista olivat noin 39 vuotta ja 35 vuotta (Karhu, J. 2006, 2007 julkaisematon). Putken 368 etäisyys karkeasta harjuytimestä on alle puolet lirikaivon L1613 etäisyydestä harjuyttimeen. Tulokset vaikuttivat aluksi ristiriitaiselta, etenkin kun molemmat putket sijaitsevat samassa hydrogeologisessa yksikössä eli hienossa harjuaineksessa. Virtausmallin avulla lasketut virtausajat kuitenkin täsmäivät ikämääritysten kanssa. Loiva gradientti siltti-saven alaisen havaintoputken 368 ja pohjaveden muodostumisalueen välillä aiheuttaa pitkän virtausajan putkelle 368.

Virtaus pääharjulta lirikaivolle L1613 tapahtuu kallioperän ruhjetta pitkin, mitä kautta veden virtausnopeus on yli kaksinkertainen putken 368 alueeseen verrattuna. Myös muiden näytesteiden ikämääritysten osalta saavutettiin hyvä vastaavuus pohjaveden virtausmallin laskemien viipymien osalta.

Kaikki tritium-helium -näytteistä saadut ikätulokset täsmäsivät melko hyvin CFC-tuloksien kanssa. Tritium-helium -menetelmä toimii myös nuoremmille vesille CFC -menetelmästä poiketen. Sen takia orsivesiputkista tehdyt CFC -yhdisteisiin perustuvat ikämääritykset eivät ole luotettavia. Orsivesiputkista 368A otetun näytteen ikämääritys onnistui tritium-helium -menetelmällä. Orsiveden iäksi saatiin mittauksessa 2,5 vuotta. Toisen orsivesinäytteen T^3He -määritys epäonnistui.

4.5 Pohjaveden laatu

Virtaankankaan muodostuman pohjavedestä on kerätty vuosien saatossa koepumppausten ja imeytyskokeiden sekä velvoitetarkkailun ja erilaisten vapaaehtoisten seurantojen yhteydessä runsas vedenlaadun seuranta-aineisto (luku 2.7. Pohjaveden laadun seuranta). Aineisto kattaa hyvin pohjavedenlaadun ajallisen ja alueellisen vaihtelun tutkimusalueella.

Yleispiirteeltään Virtaankankaan päämuodostuman pohjavesi on poikkeuksellisen emäksistä, kovuudeltaan pehmeää ja se sisältää vain niukasti suoloja ja orgaanista ainetta. Haitallisia metallipitoisuuksia, liuottimia ja torjunta-aineita ei ole. Vesi täyttää kaikki talousvedelle asetetut kemialliset mikrobiologiset laatuvaatimukset (Mälkki 2003).

Virtaankankaan muodostumassa esiintyy kuitenkin sisäistä vedenlaadun vaihtelua. Harjun reuna-alueilla yleensä sekä orsivesialueella, Harjunkylän paineellisen pohjaveden alueilla ja Löy-



Kuva 48. Pohjaveden virtausmallilla tehty simulaatio merkkiainekokeen aikaisesta pohjaveden imeytys- ja pumppaustilanteesta. Virtausmallilla on laskettu pohjaveden virtausmäärät, -nopeudet ja -reitit merkkiainekokeen vaikutusalueella, Kankaanrannan lähteistä purkautuvat vesimäärät sekä pohjaveden virtausmäärät Harjunkylän ja Virttaan kylän suuntiin.

täneen sivuharjussa vedenlaatu poikkeaa harjun ydinvyöhykkeen vedenlaadusta. Orsivesialueella ja Löytäneen sivuharjussa veden pH on neutraali tai lievästi hapan. Orsivesialueella niin ikään sähkönjohtavuus ja alkaliteetti ovat alhaisempia kuin varsinaisessa pohjavesivyöhykkeessä. Harjunkylän paineellisen pohjaveden alueella pohjaveden happipitoisuus on harjun muita osia alhaisempi.

Vedenlaadun vaihtelu Virttaankankaalla vastaa hyvin harjun hydrogeologisessa mallissa kuvattujen yksiköiden alueellista ulottuvuutta ja

niiden suhdetta toisiinsa. Vedenlaatuhavainnot korreloivat hyvin myös isotooppitutkimuksista (luku 2.8) ja karbonaattitutkimuksista (2.2) saatujen tulosten kanssa. Keväällä 2007 on alkanut yhteistyöprojekti Turun yliopiston kanssa, jossa tullaan tarkastelemaan aiemmin kerättyä pohjaveden laatuparametreihin liittyvää aineistoa ja sen yhteyttä alueen hydrogeologiseen rakenteeseen ja maaperän geokemiaan.

Kuvissa 49, 50 ja 51 on karttaesitykset pohjaveden laadun vaihtelusta Virttaankankaalla pH:n, hapen ja sähkönjohtavuuden osalta. Vedenlaadun kartoittaminen on tehty kenttämittarilla mittaamalla vedenlaatu suoraan pohjavesiputkesta. Vedenlaatu on mitattu kustakin pohjavesiputkesta pystyprofiilina pohjaveden pinnasta putken pohjaan asti.

4.6 Tekopohjaveden tuotantosimulaatiot

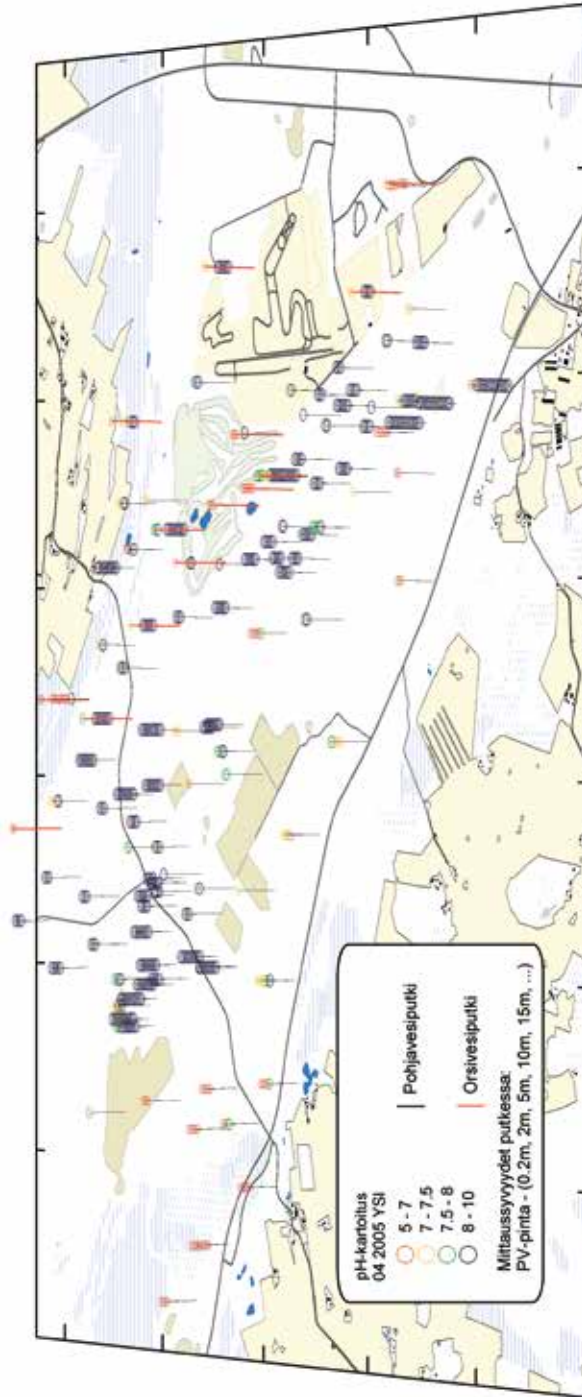
Tekopohjaveden tuottaminen edellyttää akviferista päivittäin otettavan veden määrän nostamista nykyisestä ottomäärästä (5000 m³/d) tasolle 120 000 m³/d täyden mittakaavan tuotantotilanteessa. Näin suuren virtaamamuutoksen aikaansaaminen siten, että virtauksien suuntaa ja imeytetyn veden viipymää voidaan kontrolloida, vaatii virtausmallilla tehtyjä simulaatioita akviferin toiminnasta. Nykytilanteeseen kalibroйдun virtausmallin avulla tehtiin tekopohjaveden tuotantoalueen itäisen osan alustavien tuotantosuunnitelmien perusteella simulaatioita, joissa vaihdeltiin veden imeyttämisen- ja ottomääriä ennalta määrättyjen ja tutkittujen imeytys- ja kaivoalueiden sisällä. Simuloinneissa otettiin huomioon eri alueille määritetty imeytettävän veden pintakuorman maksimiarvot, joiden perusteella yksittäisen imeytysalueen maksimi imeytyskapasiteetti on 15 000 m³/d. Simuloitujen, toistaiseksi rakentamattomien kaivojen pumppausmäärät perustuivat kokemuksiin alueella jo käytössä olevien tuotantokaivojen vedentuottokapasiteetista sekä kaivonpaikkatutkimuksien yhteydessä tehtyihin maalajihavaintoihin ja läpinäkyvistä pohjavesiputkista tehtyihin videokuvauksiin.

Simulaatioiden avulla pyrittiin optimoimaan tekopohjaveden tuotannon alkuvaiheen vaatima veden imeytyksen (69 000 m³/d) ja vedenoton (68 500 m³/d) yhteisvaikutus itäisellä laitosalueella. Simuloimalla erilaisia veden imeytys-otto-skenaarioita pyrittiin tilanteeseen, jossa imey-

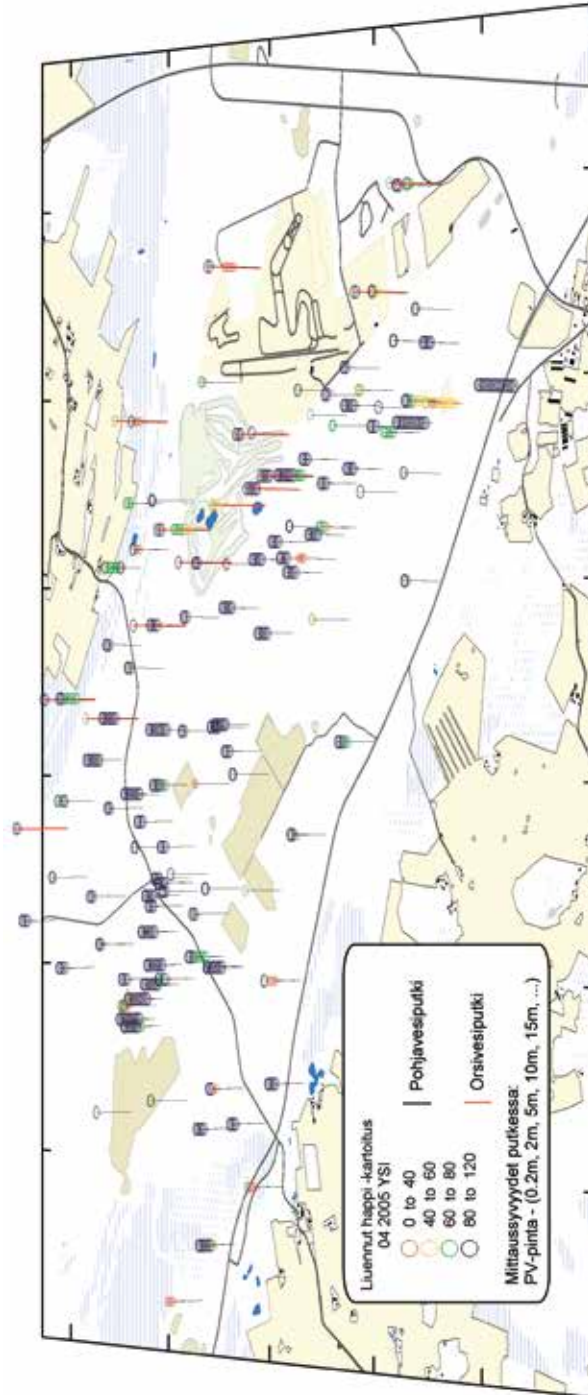
tetyn veden viipymä akviferissa on 12 viikkoa, mitä pidetään riittävänä aikana veden sisältämän orgaanisen hiilen riittäväksi poistumiseksi (Helmisaari ja muut 2003). Tavoitteena oli myös, että pohjavesipintojen muutos ja alueelta ulos virtaavan veden määrä pysyvät mahdollisimman luonnontilaisina.

Virtausmallin simulaatiotulosten perusteella todettiin, että pohjaveden viipymäaika imeytysalueilta kaivoille on merkittävin tuotantoalueiden kapasiteettia rajaava tekijä, sillä liian suurilla imeytysmäärillä viipymät jäävät liian lyhyiksi. Samalla todettiin myös, että niillä imeytysalueilla, joiden käyttö kääntää pohjaveden pinnan gradientin luontaisen suunnan vastaiseksi, voidaan imeyttää suurempia määriä vettä kuin myötävirtaan imeytettäessä viipymän pysyessä yhä halutuissa rajoissa. Tämä voidaan lisäksi toteuttaa siten, etteivät gradienttimuutokset vaikuta pohjaveden virtaussuuntiin tai -määriin tekopohjavesilaitoksen toiminta-alueen ulkopuolella.

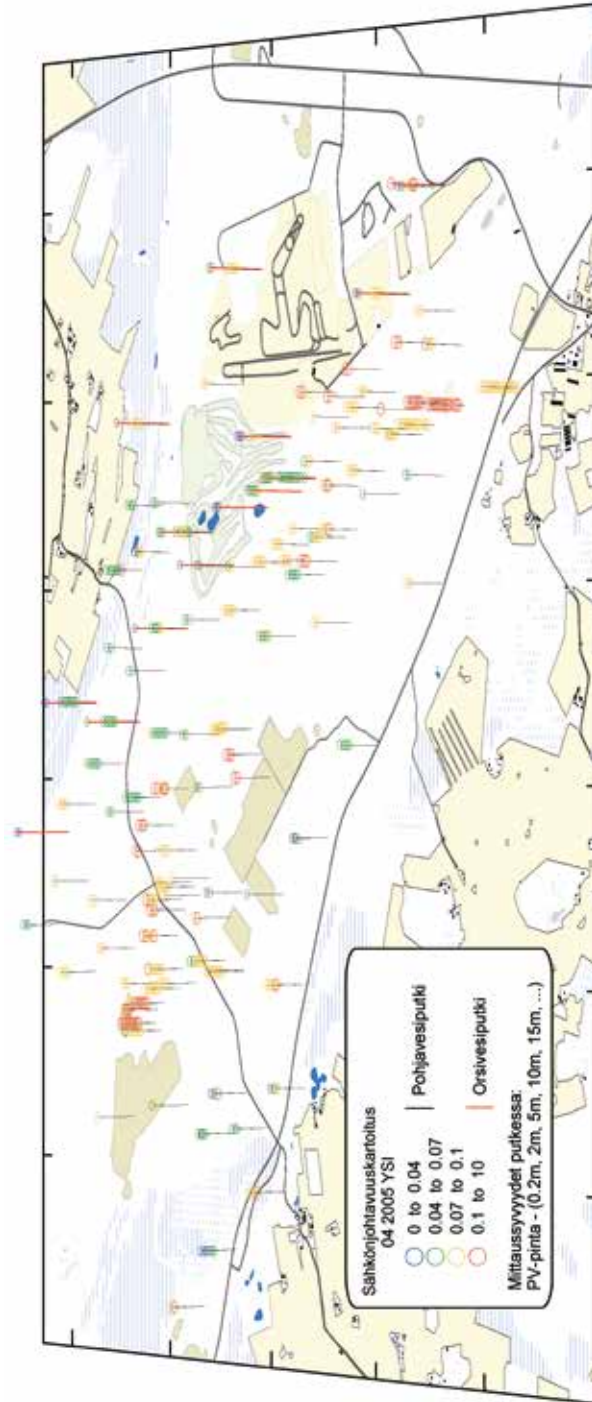
Virtausmallisimulaatioiden tuloksena päästiin tilanteeseen, jossa saadaan imeytettyä ja otettua tarvittavat vesimäärät viipymän ollessa lyhimmillään yli 11 viikkoa. Simulaation tulosten perusteella saadaan tieto harjualueelta pois virtaavien vesien määrän muutoksesta nykytilanteeseen verrattuna (Taulukko 9). Nämä muutokset ovat vähäisiä verrattuna alueen luontaiseen virtaamavaihteluun. Alastaron Myllylähteen ja Kankaanrannan lähteiden negatiiviset virtaamamuutokset voidaan poistaa kokonaan imeytysalueella IAS100 tehtävällä suojaimeytyksellä.



Kuva 49. Pohjaveden laadun kartoituksessa käytettyjen pohjavesi- ja orsivesiputkien sijainnit ja putkista mitatut pH-arvot eri syvyyksiltä.



Kuva 50. Pohjaveden laadun kartoituksessa käytettyjen pohjavesi- ja orsivesiputkien sijainnit ja putkista mitatut liuenneen hapen arvot eri syvyyksiltä.



Kuva 51. Pohjaveden laadun kartoituksessa käytettyjen pohjavesi- ja orsivesiputkien sijainnit ja putkista mitatut sähköjohtavuuden arvot eri syvyyksiltä.

Taulukko 9. Virtausmallilla lasketut pohjaveden virtaamat tarkastelualueilla sekä virtaamien muutos simuloidun tuotantotilanteen ja mallin perustilan välillä.

Tarkasteltava alue	Tuotantotilanne (m ³ /d)	Perustila (m ³ /d)	Muutos (m ³ /d)
Harjualueelta Virttaan kylään	5851	5777	+74
Virttaankankaalta Harjunkylään	1440	1250	+190
Alastaron Myllylähde	2112	2174	-62
Kankaanrannan lähde	2446	2518	-72

5 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Kaivojen rakentaminen ja kaivoalueiden sijoittamiseen liittyvät kysymykset

Vuoden 2005 alkuun mennessä Virttaankankaalle oli rakennettu TSV:n toimesta neljä siiviläputkikaivoa. Kaivo K51 on kaivoista vanhin ja on toiminut Virttaa-Littoinen syöttövesijohdon tuotantokaivona vuodesta 1998 lähtien. Muut kaivot ovat toimineet koekaivoina, mutta ne voidaan kaikki ottaa käyttöön myöhemmin tekopohjaveden tuotantovaiheessa. Kaivot K21, K41 ja K27 valmistuivat vuosina 1989, 2000 ja 2003. Kaivoja K21 ja K41 on käytetty Virttaankankaalla suoritettujen imeytyskokeiden yhteydessä.

Turun Seudun Vesi Oy rakennutti vuonna 2005 kaksi uutta koe- / tuotantokaivoa (Kuva 52). Kyseisenä vuonna tehtiin uusien kaivonpaikkojen selvittämiseksi kattava hydrogeologinen tarkastelu aiemmissa luvuissa esitettyjen uusien tutkimusmenetelmien avulla saatujen tulosten pohjalta. Kolmiulotteisen hydrogeologisen mallin, sedimentologisten tulkintojen, aiempien kairaushavaintojen ja pohjavedenpinnoista tehtyjen animaatioiden ja käyrien avulla valittiin alustavat kaivonpaikat, joihin tehtiin porakonekairaukset. Kairauksen yhteydessä otettiin maanäytteitä ja kairauspisteisiin asennettiin pohjavesiputket. Kahden uuden siiviläputkikaivon rakentaminen alkoi joulukuussa 2004 kairauksin varmistettuihin pisteisiin ja kaivot K52 ja K42 valmistuivat



Kuva 52. Kaivonrakennustyömaa Virttaankankaalla.

kevään 2005 aikana. Molempien kaivojen antoisuudet ovat erittäin hyviä, noin 10 000 m³/d ja 14 000 m³/d ja niiden sijaintiin liittyvät tekijät suhteessa muihin olemassa oleviin kaivoihin ja pohjaveden päävirtaussuuntiin ja -reitteihin on otettu huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Lisäksi kaivoista otettavan pohjaveden nostokorkeus on minimoitu.

Pohjavesiesiintymän kolmiulotteisen rakenteen ja tärkeimpien pohjaveden virtausyhteyksien tunteminen ja visualisointimahdollisuudet luovat optimaaliset puitteet parhaimpien kaivonpaikkojen löytämiselle ja kaivojen toimivuuden varmistamiselle.

Vuoden 2006 kesän aikana tehdyt kairaukset tehtiin lähes pelkästään uusien kaivonpaikkojen selvittämiseksi. Uutena kaivonpaikkojen tutkimusmenetelmänä käytettiin jo vuonna 2005 testattua pohjavesiputkien videokuvausta (luku 2.2). Kairaukset suunniteltiin ja ohjattiin etukäteen aiemmin mainittujen menetelmien perusteella ja tehtyjä suunnitelmia tarkennettiin reaaliaikaisesti sitä mukaa kun valmiista kairauksista saatiin videokuva-aineistoa (Liite 7). Menetelmän toimivuudesta kertoo se, että noin kahteen kolmasosaan tutkituista kairauspisteistä tullaan tekemään uudet tuotantokaivot vuoden 2007 aikana.

Videokuvan perusteella tehtyä tulkintaa verrattiin kairauksen aikana tehtyihin havaintoihin maaperän laadusta sekä kairauksen yhteydessä otettuihin maanäytteisiin. Videokuvatulkinta, kairauksen havainnot sekä maanäytteet olivat osassa tutkimuspisteitä tuloksiltaan keskenään ristiriitaisia. Kairauspisteissä, joissa videokuvan perusteella esiintyi kaivomaaksi hyvin sopivia erittäin kivisiä ja karkearakeisia maakerroksia, ei kairauksen yhteydessä saatu maanäytettä joko lainkaan tai näytettä oli hyvin vähän ja sekin hienorakeista maa-ainesta. Kairauksien perusteella näytti siltä, että edellä mainitut pisteet eivät luultavasti ole soveliaita kaivon paikkoja. Videokuvatulkinta puolestaan osoitti, että tutkimus-

pisteet ovat tutkituista pisteistä todennäköisesti parhaat kaivonpaikat.

Videokuvaa käytettiin hyväksi myös määritettäessä kaivon alustavassa mitoituksessa kaivon siiviläosan tulevaa sijaintia. Oletuksena on, että videokuvan avulla voidaan määrittää vettä johtavien kerrosten ja kaivon siivilän sijainti perinteistä maanäytteenottoa tarkemmin ja luotettavammin. Kesällä 2006 tutkittuihin kairauspisteisiin rakennetaan 6 tuotantokaivoa kevään ja kesän 2007 aikana. Tutkimustulosten ja alustavien kaivonmitoituslaskelmien perusteella voidaan olettaa, että kaikkien uusien kaivojen tuotto tekopohjaveden tuotantotilanteessa tulee olemaan minimissään noin 6000 m³ – 8000 m³ vuorokaudessa.

Vuonna 2007 valmistuvat kaivot mukaan lukien Turun Seudun Vesi Oy:llä on valmiina 12 tuotantokaivoa eri puolilla tekopohjaveden tuotantoaluetta. Monikerroksisella pohjaveden virtausmallilla on laskettu valmiiden ja rakenteilla olevien kaivojen muodostamien kaivoalueiden tuotantomääriä suhteessa imeytysalueilla imeytettäviin vesimääriin. Mallinnustulosten avulla on pystytty tekemään alustavia simulaatioita tekopohjavesilaitoksen toiminnasta ja tuotannon painottumisesta Virttaankankaan eri osa-alueille.

5.2 Imeytysalueiden sijoittamiseen liittyvät kysymykset

Virttaankankaalla on tehty imeytyskokeita jo tekopohjavesihankkeen aikaisemmissa vaiheissa 1990-luvulla. Nykyisen vaiheen yhteydessä on tehty vuodesta 2000 lähtien yhteensä 10 imeytyskoetta (luvut 2.6, 4.2 ja 4.3). Imeytyskokeiden tekeminen on perinteinen ja hyvä tapa saada tietoa maa-aineksen kyvystä vastaanottaa imeytettävää vettä. Menetelmän hitaus ja joissain tilanteissa hankaluudet imeytysten toteuttamisessa saattavat vaikeuttaa lopullisten imeytyspaikkojen löytämistä.

Nykyisessä tutkimusvaiheessa TSV:llä on käytössään lukuisia keinoja arvioida ja löytää uusia imeytykseen sopivia alueita sekä tarkentaa olemassa olevien alueiden rajausta. Maaperän kolmiulotteisen rakenteen kuvaamiseen soveltuvat työkalut yhdistettynä pohjaveden virtausmallinukseen luovat vankan pohjan tekopohjaveden tuotannon hallinnalle imeytysalueiden tarkan sijoittamisen ja imeytettävän veden määrän suhteen.

Imeytysalueiden ja kaivoalueiden keskinäiset sijainnit sekä imeytetyn ja pumpatun veden määrät ovat maaperän koostumuksen ja rakenteen ohella tekijöitä, jotka määräävät tekopohjaveden viipymääjan tuotantotilanteessa. Tuotannon suunnittelussa on ensiarvoisen tärkeää, että kaikki mainitut tekijät voidaan huomioida samanaikaisesti. Tässä kirjassa esitetyt tiedonhallinnan menetelmät integroituna mallinnustyökaluihin antavat parhaat mahdolliset edellytykset imeytysalueiden ja kaivoalueiden sijoittelulle.

5.3 Pohjaveden virtausyhteydet

Pohjaveden virtausmallin avulla lasketut pohjaveden ja orsiveden virtaussuunnat virtausmallin perustilassa, jossa on käytetty 13.4.2006 mitattuja vedenpinnan korkeustietoja, on esitetty kuvassa 53. Orsiveden virtaussuunnat on merkitty kuvaan violeteilla nuolilla ja pohjaveden suunnat sinisillä nuolilla. Virtaussuuntanuolet eivät kuvaa eri alueilla virtaavan veden määrää tai virtausnopeutta. Virtaus on nopeinta karkeassa harjuytimessä sekä orsivesialueella rantahiekkakerroksessa. Suurin osa mallialueen pohjavesien virtauksesta tapahtuu harjuytimen alueella. Hienompien yksiköiden sisällä sekä virtaamat että virtausnopeudet ovat huomattavasti pienempiä.

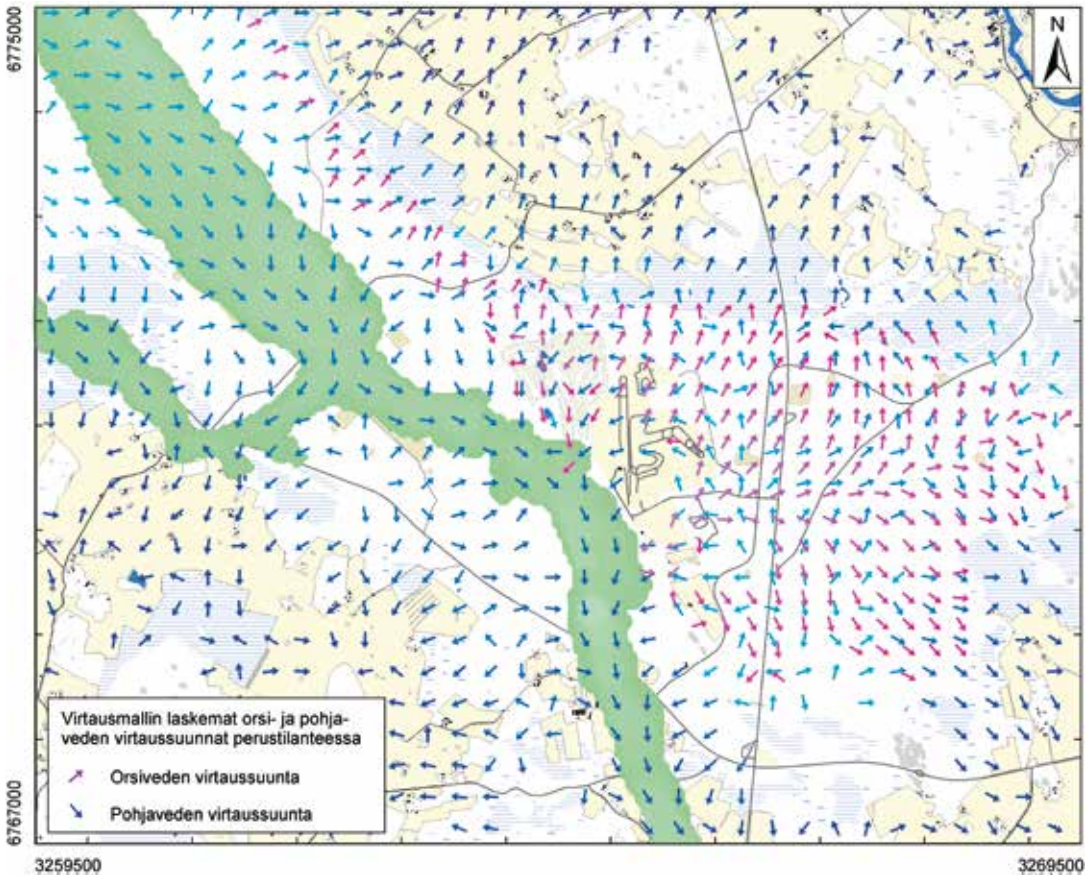
Pääosa orsivesialueella muodostuvista vesistä kulkeutuu kohti Virttaankankaan ja Palokankaan pohjois- ja itäreunaa, jossa orsivesi purkautuu pelto-ojiin ja kosteikoille. Merkittävin hydraulinen

yhteys orsivedestä pohjaveteen on golfkentän lounaisosissa sijaitsevalla Kankaanjärven muodostuma-alueella. Tämän orsivesialueen osan kaikki vedet virtaavat suoraan harjuytimen välittömään läheisyyteen. Osa vesistä virtaa orsivettä pidättävän siltti-savi –kerroksen eteläreunan yli, osa tihkuu akvikludin läpi. Toinen, vähemmän merkittävä virtausyhteys orsiveden ja harjuytimen välillä on Palokankaan alueen länsireunalla, taimitarhan alueella.

Pohjaveden virtaus noudattelee luonnontilassa karkean harjuytimen kulkua siten, että pääharjulta virtaa vettä kohti Virttaan kylää sekä sivuharjun kautta Alastaron Myllylähteelle. Harjualueelta on myös hydraulinen yhteys kohti Harjunkylää hienon glasifluviaalisen yksikön kautta, mikä aiheuttaa paineellisen pohjaveden esiintymisalueen Virttaankankaan pohjoisreunalle sekä Harjunkylään. Paineellista pohjavettä esiintyy myös Palokankaan alueella, jossa pohjaveden painekorkeus on useilla alueilla vettä pidättävän siltti-savi –yksikön sisällä tai jopa yläpuolella. Palokankaan paineellisen pohjaveden alue aiheutuu moottoriradan alueen siltti-savi –yksikössä olevan reiän alueella muodostuvasta pohjavedestä. Kuvassa 53 paineellisen pohjaveden muodostuminen näkyy pohjaveden virtaussuunnista, jotka kohdistuvat harjualueelta kohti salpa-alueita.

5.4 Pohjaveden ikä ja viipymä

Pohjaveden isotooppitutkimusten, CFC-mittausten ja merkkiainekokeen perusteella on ollut mahdollista saada melko tarkka käsitys Virttaankankaan pohjavesien (ja osittain myös orsivesien) iästä ja virtausnopeuksista. Näillä tiedoilla on erityisen paljon merkitystä pohjaveden virtausmallin kalibroinnin kannalta. Virtausmallin osalta ei riitä pelkkä hyvä vastaavuus mitattujen pohjaveden pintojen osalta. Todellisen pohjavesiesiintymän kuvauksessa pohjaveden määrä ja viipymä ovat pintojen ohella tärkeitä indikaattoreita virtausmallin ja sen kuvaaman todellisuuden vastaavuuksista.



Kuva 53. Pohjaveden ja orsiveden virtaussuunnat mallin perustilaa kuvaavassa simulaatiossa. Violetit nuolet kuvaavat orsivettä, joka virtaa pohjaveden yläpuolella rantabiekkassa siltti-savi -kerroksen yläpuolella. Siniset nuolet kuvaavat pohjavettä.

Pohjaveden ikämääriytyksiin soveltuvia menetelmiä olisi syytä kehittää ja ottaa laajemmin käyttöön pohjavesi- ja tekopohjavesitutkimuksissa. CFC-menetelmän käytön osalta hankaluudeksi muodostui se, että analyysit jouduttiin teettämään Saksassa, koska kyseiseen analytiikkaan erikoistuneita laboratorioita on erittäin vähän.

5.5 Tekopohjavesilaitoksen toteutus ja geologinen informaatio

Alueiden käytön ohjaus

Virttaankankaan tekopohjavesitutkimuksien yhteydessä on saatu paljon tietoa Virttaankankaan ja sen ympäristön geologisesta rakenteesta, pohjaveden esiintymisestä ja virtauksesta sekä eri vesiyksiköiden sisäisistä laadun vaihteluista. TSV:n toimesta on lisäksi tehty koko Virttaankankaan alueen pohjaveden likaantumisherkkyttä kuvaava kartta – niin sanottu vulnerability map, joka on esitetty kuvassa 54.

Tässä kirjassa esitetyt aineistot ja sovellukset muodostavat merkittävän tietopankin Virttaankankaan alueesta, jota olisi mahdollista käyttää hyväksi alueiden käytön suunnittelussa ja ohjauksessa myös viranomaistasolla. Kaavoitusta, pohjaveden suojelua sekä maa-ainesvarojen inventointia on mahdollista suunnitella ja suorittaa nykyistä huomattavasti tehokkaammin, kun hyödynnetään edellä kuvattua jo olemassa olevaa ja monipuolista (hydro)geologista aineistoa. Jo nykyäänkin Virttaankankaalla esiintyy toimintoja, jotka eivät luonteeltaan sovi lähelle toisiaan. Alueiden käytön paineet ovat kuitenkin kovia, eikä viranomaistahoilla välttämättä ole tarpeeksi tutkimustietoa päätöksentekonsa pohjaksi.

Yleisesti voisi sanoa, että Virttaankankaan tutkimusten osalta hyväksi havaitut menetelmät geologisen luonnon kuvaamiseen tärkeillä pohja-

vesialueilla edistäisivät pohjaveden suojelun, pohjaveden oton ja maa-ainesten hyödyntämisen yhteensovittamista myös valtakunnallisella tasolla.

Tuotannon ohjaus

Kuten luvussa 4.4 esitetystä pohjaveden virtausmallilla tehdystä tekopohjavesilaitoksen tuotantosimulaatiosta havaitaan, on TSV:llä jo nyt käytössä olevilla sovellusohjelmilla helppo ohjata ja hallita tekopohjaveden tuotantoa. Kolmiulotteinen rakennemalli ja monikerroksinen virtausmalli tulevat lisäksi jatkuvasti päivittymään tekopohjavesialueelta kerättävän uuden tiedon myötä. Tuotantotilanteessa on helppo verrata todellisiin pohjaveden pinnan mittauksiin pohjautuvan animaation ja virtausmallisimulaation vastaavuutta toisiinsa nähden. Käytössä olevat sovellukset mahdollistavat imeytysten ja vedenoton tarkan kohdentamisen tekopohjavesilaitoksen alueella.

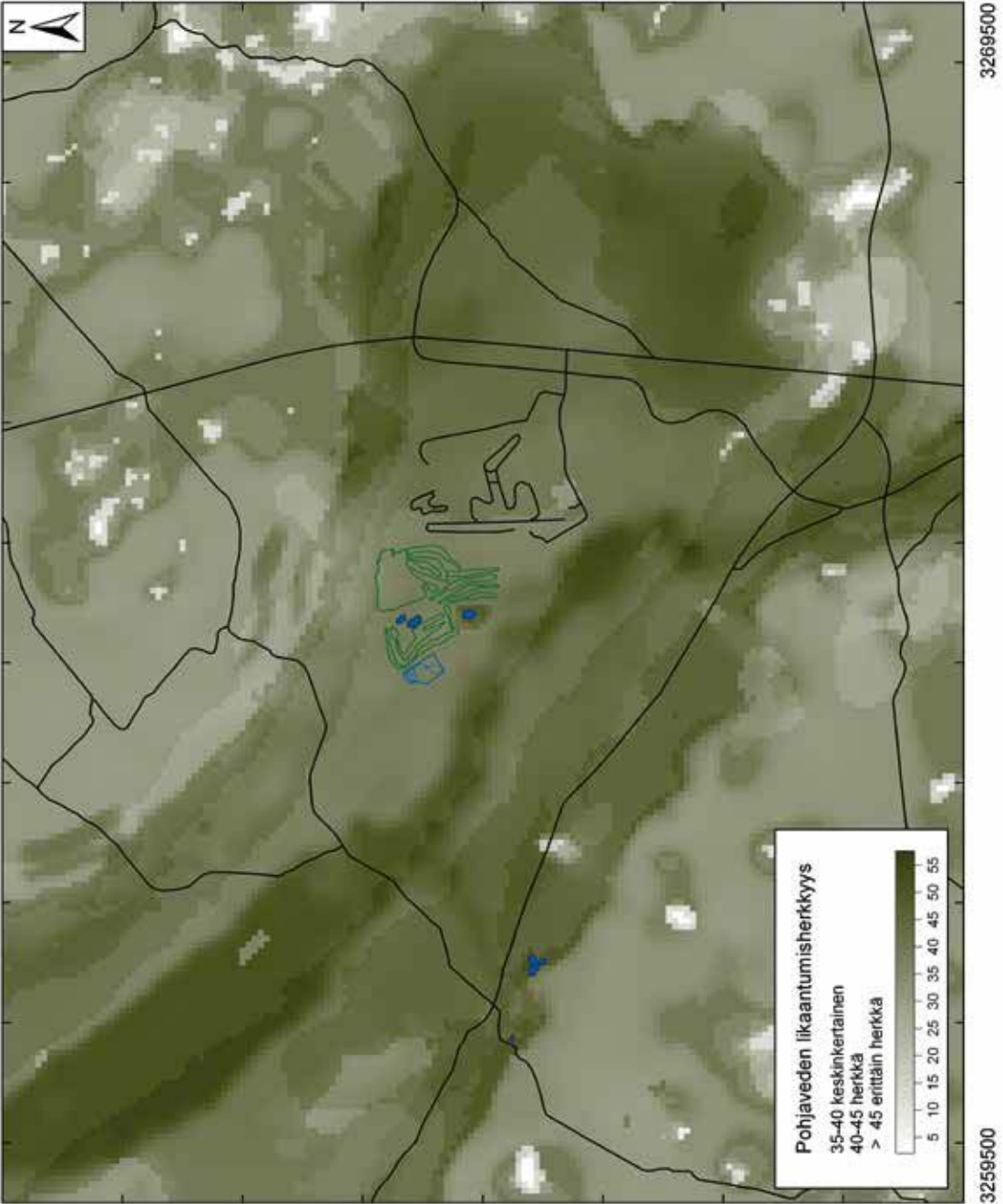
Tekopohjaveden tuotannon vaikutukset Virttaankankaan alueella

Tekopohjaveden tuotantotilanteessa pääharjun alueelle muodostuu useita vedenjakajia, jotka muuttavat harjualueen virtaussuuntia tekopohjaveden imeytysalueilta kaivoalueille. Pohjaveden virtausmallia on käytetty tuotannon suunnitteluun siten, että muutokset luontaisiin pohjaveden purkautumismääriin harjualueen ulkopuolelle on saatu pidettyä erittäin pieninä. Hienon glasi-fluviaalisen yksikön kautta harjun reuna-alueille tapahtuvaan virtaukseen ei tekopohjaveden muodostamisella ole mallisimulaatioiden perusteella merkittävää vaikutusta. Orsivesialueelle ei tulla sijoittamaan imeytys- tai vedenottoalueita.

Edellä esitetyn ja kappaleessa 4.4 esitetyn perusteella voidaan jo tutkimusten tässä vaiheessa tehdä arvioita tekopohjaveden tuotannon vaikutuksista tekopohjaveden tuotantoalueella ja sen

6775000

6767000



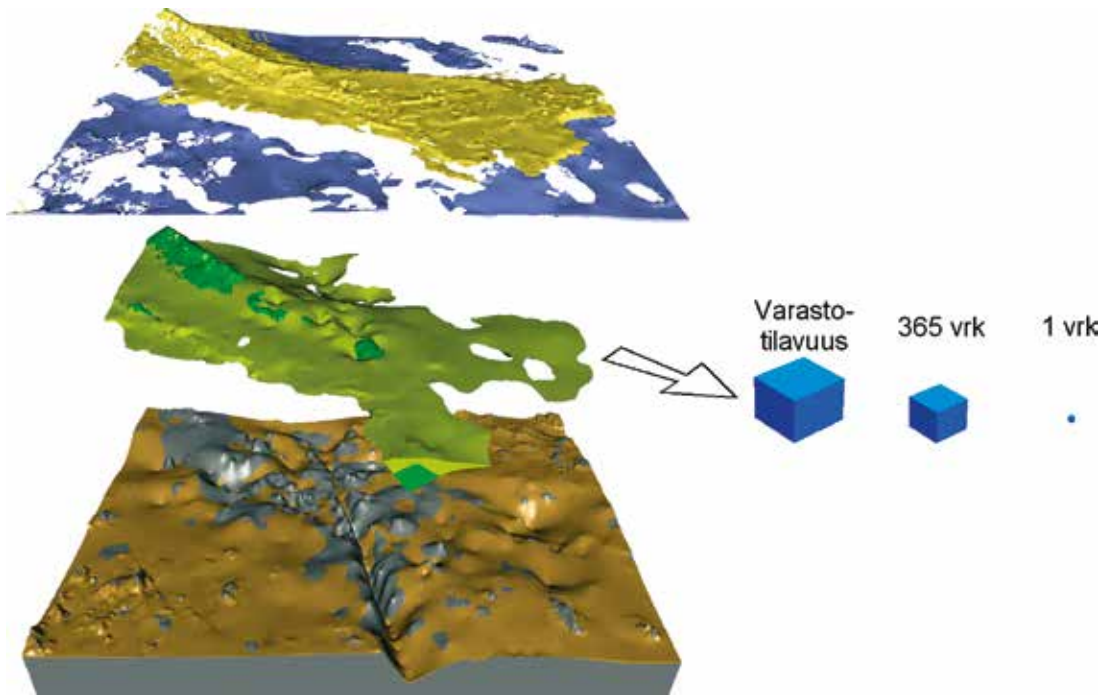
Kuva 54. Virtaankankaan alueelta tehty pohjaveden likaantumisherkyyttä kuvaava kartta.

ympäristössä. Tekopohjaveden tuotannon mitta-
kaavaa suhteessa alueella luontaisesti esiintyvän
pohjaveden määrään nähden on havainnollistet-
tu kuvassa 55.

*Luontaisten tekijöiden
vaikutus pohjaveden
pintoihin Virttaankankaan
alueella*

Pohjavedenpinnat ovat luonnossa jatkuvassa
muutostilassa. Sademäärien vaihtelu on tärkein
pohjaveden pinnan tasoon vaikuttava tekijä. Sa-

devedestä pohjavedeksi imeytyvän veden määrä
on suurimmillaan sulan maan aikaan kasvien
kasvukauden ulkopuolella. Näiden kuukausien
sademäärillä on suurin merkitys pohjaveden pin-
nan muutokseen. Pohjaveden geologinen ympä-
ristö vaikuttaa pohjaveden pinnan tasoihin
usealla tavalla. Laajan yhtenäisen vesialtaan pinta
muuttuu hitaammin kuin kapean ja pienitila-
vuuksisen. Veden virtausyhteydet pohjavesiesiinty-
mään eri osien välillä, sekä paineellisen pohjave-
den esiintyminen vaikuttavat pohjaveden pinnan
korkeuteen.



Kuva 55. Kuvassa on esitetty Virttaankankaan alueen kahden tärkeimmän pohjavettä sisältävän hydrogeologisen yksikön (glasifluviaalinen karkea ja glasifluviaalinen hieno) sisältämän pohjaveden määrä eli varastotilavuus kuutiona, jonka tilavuus on noin 147 miljoonaa kuutiometriä. Tehokkaan huokoisuuden arvona on käytetty edellä mainituille yksiköille arvoja 0,25 ja 0,27. Keskimääräisenä pohjaveden pinnan tasona on käytetty arvoa 88 m mpy. Kabdella muulla kuvassa esitetyllä kuutiolla on kuvattu yhden vuoden ja yhden vuorokauden aikana imeytettävän tekopohjaveden määrää tuotannon maksimitilanteessa (imeytys 120 000 m³/d). Kaikki kuvan komponentit on esitetty samassa mittakaavassa, jossa z-suuntaa on liioiteltu kymmenkertaisesti x- ja y-suuntiin verrattuna.

Useiden suomalaisten pohjavesiesiintymien pintojen tasoissa ja lähteiden virtaamisissa on ollut epävirallisten seurantatietojen mukaan havaittavissa hidasta laskua 1950-luvulta lähtien. Luotettavia pohjaveden pintojen mittaussarjoja on kerätty esimerkiksi Suomen ympäristökeskuksen tietokantoihin vasta 1970-luvulta alkaen. Pintojen laskuun merkittävänä syynä ovat vähitellen tapahtuneet harjujen reuna-alueiden soiden ojitus ja kuivatus. Lisäksi myös peltojen raivaus ja salaojittaminen aiheuttaa harjun reunojen vettä purkavien alueiden tason laskua, mikä heijastuu pitkällä aikavälillä koko pohjavesiesiintymän vedenpintoihin. Tämän vaikutuksen määrää on vaikea mitata, koska esimerkiksi salaojiin purkautuva pohjavesi ei näy maanpinnalla lainkaan. Ojitetujen alueiden pinta-alat ovat usein kuitenkin hyvin suuria, ja näin ollen myös niille purkautuvat vesimäärät ovat merkittäviä.

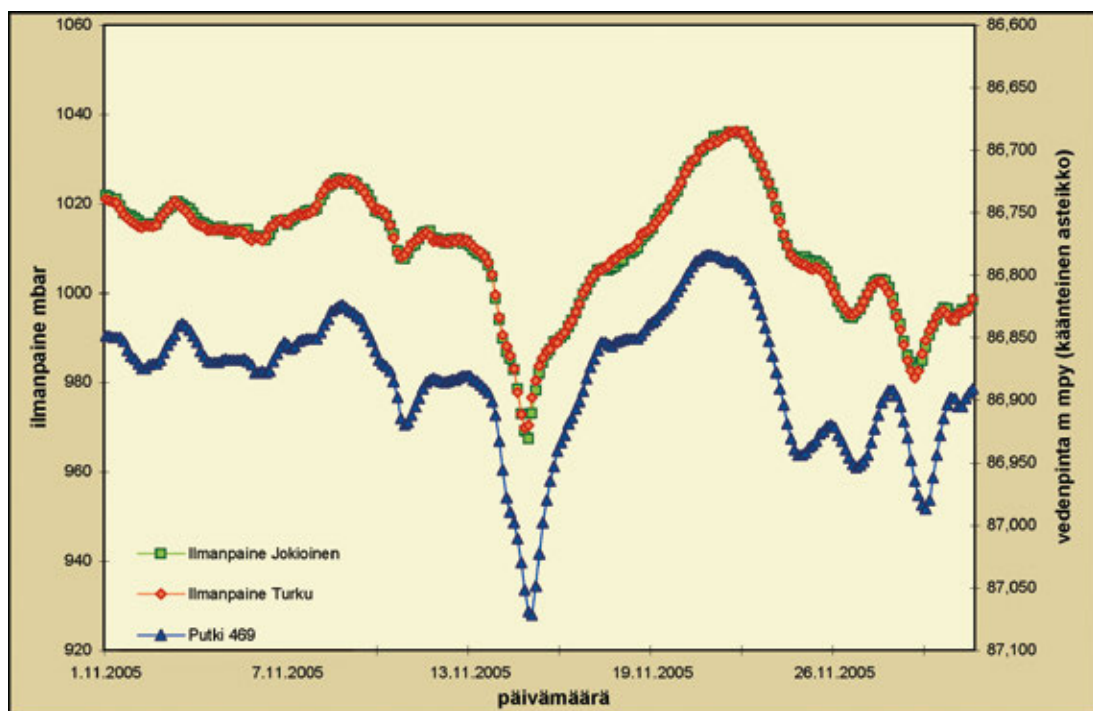
Lähteiden läheisyydessä tehtävien rakennus- ja maanrakennustöiden vaikutus pohjaveden purkautumismekanismiin ja –tasoihin on suuri. Virttaankankaan alueen lähteet eivät ole enää luonnontilaisia. Pohjaveden tärkein purkautumispaikka, Alastaron Myllylähde, on padottu ja lähteen purkutasoa on mahdollisesti muutettu mahdollisesti jo 1800-luvulla. Myös Löytäneen sivuharjun pohjavesiä purkava Kankaanrannan lähde on padottu.

Harjunkylän paineellista pohjavettä hyödyntävät lirikaivot toimivat paineellisen pohjaveden purkureittinä. Lirikaivoalueella onkin syytä välttää uusien tahattomien veden purkausreittien puhkaisemista siltti-saveen. Orsiveden purkautumispaikoista Hosihaudan lähteen, Kotasuon lähteen ja Huittisten vedenottamon läheisen lähteikön välittömään läheisyyteen on rakennettu vedenotamat, jotka vähentävät lähteiden virtaamia. Harjunkylän Naturalälhteen yhteyteen on rakennettu patoallas, mutta Naturalälhteen ympäristössä ei toistaiseksi harjoiteta laajempaa vedenottoa.

Virttaankankaalla on havaittu paineellisten pohjavesiputkien pinnoissa jopa kymmenien senttimetrien vaihtelua viikossa, minkä on todettu olevan suoraa seurausta ilmanpaineen vaihtelusta. Matalapaineen vallitessa pinnat nousevat paineellisessa ympäristössä olevissa pohjavesiputkissa, korkeapaineella pinnat vastaavasti laskevat. Nämä pinnanmuutokset eivät kuvasta koko salpa-akviferissa tapahtuvaa vesitilavuuden tai vedenpinnan muutosta, vaan kyseessä on tilanne, jossa havaintoputken sisällä vedenpinnan taso vaihtelee ilmanpaineen muutoksen aiheuttaman salpa-akviferin painetason muutoksen mukaan. Tämä ilmiö on nähtävissä kuvassa 56.

Pohjavedenpinnat Virttaankankaalla ovat olleet selvässä laskussa 2000-luvun alusta lähtien vuoden 2006 syksyyn saakka. Tämä on seurausta näiden vuosien pienistä sademääristä etenkin kevät- ja syyskausina, kuten taulukosta 1 on nähtävissä. Vuoden 2006 syksyllä, etenkin lokakuussa, satoi huomattavasti normaalia enemmän, minkä seurauksena pohjaveden pinnat Virttaankankaalla ovat jälleen lähteneet nousemaan vuosia kestäneen laskun jälkeen.

Erityisen herkkä sademäärän muutoksille on Kankaanjärven alueen laajaan piilosuppaan muodostunut orsivesialue, joka on pinta-alaltaan pieni ja jyrkkäreunaisten siltti-savikerrosten rajaama. Alueen herkkyyteen vaikuttaa vielä se, että piilosuppa on täyttynyt rantahiekalla, joka on hyvä pohjaveden johde, minkä takia orsiveden taso voi vaihdella nopeasti. Kankaanjärven vuonna 2002 alkanut pinnan lasku herätti paljon keskustelua tekopohjavesihankkeen vaikutuksista harjuympäristöön, vaikkei kyseisellä ilmiöllä ollutkaan mitään tekemistä esimerkiksi koeimeytysten ja –pumppausten kanssa. Tosin aiemmin, vuonna 2000 tehtiin epäonnistunut imeytyskoe, joka hetkellisesti nosti Kankaanjärven pintaa. Koska suunniteltu tekopohjaveden muodostaminen ja vedenotto toteutetaan kokonaisuudessaan orsive-



Kuva 56. Kuvassa on nähtävissä paineellisen pohjaveden alueilla olevien pohjavesiputkien vedenpinnan korkeuden muutoksen erittäin selvä korrelaatio vallitsevaan ilmapaineeseen.

sialueen ulkopuolella, sillä ei tule olemaan vaikutuksia orsiveden pinnan tasoon.

Pitkäaikaiset seurantatiedot pohjaveden pinnoista ja sademääristä antavat tietoon pohjautuvan käsityksen pohjaveden pintojen luonnollisista muutoksista harjualueilla. Virttaankankaan osalta myös pohjaveden virtausmallisimulaatiot ovat selvästi osoittaneet tarpeen kalibroida malli tarkasti luonnollisten vaihtelujen määräämään tilaan. Pitkäaikaisia sadannan keskiarvoja käytettäessä virtausmallin lähtötilaa ei saada kuvattua tarpeeksi tarkasti, mikä aiheuttaa virheitä mallilla kuvattuihin muutoksiin pohjavesiympäristössä.

5.6 Jatkotutkimustarve ja tekopohjaveden tuotannon seuranta

Virttaankankaan tekopohjavesitutkimukset jatkuvat vielä vuosien ajan tekopohjavesilaitoksen suunnittelu- ja rakennusvaiheiden läpi aina hankkeen tuotantovaiheeseen saakka. Vuonna 2000 alkanut pohjaveden geokemiallisen laadun tutkimus ja seuranta tulevat kehittymään merkittävästi vuonna 2007 ja sen jälkeen. Seurannan merkitys kasvaa etenkin tekopohjaveden tuotantovaiheeseen siirryttäessä.

Monipuolista ja tarkkaa kuvaa Virttaankankaan pohjaveden ja orsiveden geokemiallisista ympäristöistä ja niiden muodostumisesta ja niissä havaittaviin reaktioihin vaikuttavista tekijöistä ei ole ollut mahdollista luoda ennen tässä kirjassa

esitettyjen tiedonhallinnan sovellusten valmistumista. Jatkotutkimustarve tulee painottumaan entistä enemmän pohjaveden luontaisiin reaktioihin maaperässä, tekopohjaveden tuotannon vaikutukseen harjualueen geokemiallisiin piirteisiin sekä tekopohjaveden puhdistumisprosesseihin Virttaankankaan maaperässä. Mainittujen jatkotutkimusten yhteydessä voidaan hyödyntää jo aiemmin tehtyjä selvityksiä muun muassa orgaanisen aineksen poistumasta Virttaankankaan maaperässä.

Jatkotutkimusten tavoitteena on pystyä kuvaamaan jo nyt selvitettyjen harjun kolmiulotteisen rakenteen, pohjaveden pintojen muutoksen, virtauksen, virtausnopeuden sekä pohjaveden muodostumisen, määrän ja siihen vaikuttavien tekijöiden lisäksi myös imeytetyn veden prosesseja maaperässä esimerkiksi orgaanisen aineksen poistuman osalta. Se edellyttää veden puhdistumiseen vaikuttavien prosessien; adsorption, biotuhon ja kemiallisten reaktioiden välisten suhteiden tarkastelua Virttaankankaan geologisen, hydrogeologisen ja geokemiallisen rakenteen suhteen.

Tässä kirjassa esitetyt tiedonhallinnan ratkaisut sekä tietokantasovellusten, että erillisten sovellusohjelmien suhteen on suunniteltu siten, että niitä kaikkia voidaan käyttää tekopohjaveden tuotannon seurannassa ja ohjauksessa. Osa sovelluksista ja tiedonhallinnan ratkaisuihin saa lopullisen sisältönsä vasta tekopohjaveden tuotannon aloittamisen jälkeen.



Maj ja Tor Nesslingin säätiö on tukenut Virttaankankaan 3D-hydrogeologiseen mallinnukseen ja pohjaveden virtausmallinnukseen liittyvää tutkimusta Sami Saraperälle maksetun apurahan muodossa. Nesslingin säätiö on lisäksi myöntänyt rahallista tukea Aki Artimon ja Sami Saraperän muodostamalle tutkimusryhmälle tutkimukseen liittyvien yleiskustannusten osalta vuosina 2004-2007. Rahoitus liittyy Turun yliopistossa suoritettavaan väitöskirjatyöhön.

Haluamme lisäksi kiittää FM Jukka Ikäheimoa kirjan oikoluvusta ja hyvistä parannusehdotuksista.



LÄHDELUETTELO

- Artimo, A. ja Mäkinen, J. 2001. Three-dimensional geologic modeling and visualization of the Virttaankangas aquifer - A new framework for groundwater flow models. Teoksessa: Seo, S., Poeter, E., Zheng, C., Poeter, O. (toim.) MODFLOW 2001 and Other Modeling Odysseus, September 11-14, 2001. Proceedings, Volume I. International Ground Water Modeling Center (IGWMC), Colorado School of Mines, and the U.S. Geological Survey. 256-262.
- Artimo, A., Mäkinen, J., Abert, C.C., Berg, R.C. ja Salonen, V.-P. 2003a. Three-dimensional geologic modeling and visualization of the Virttaankangas aquifer, southwestern Finland. *Hydrogeology Journal*, 11:378-386.
- Artimo, A., Berg, R.C., Abert, C.C. ja Mäkinen, J. 2003b. Constructing a three-dimensional geological model of the Virttaankangas aquifer, southwestern Finland: Methods applicable to Illinois. *Illinois State Geological Survey Circular* 562.
- Bradbury, K.R. ja Muldoon, M.A. 1990. Hydraulic conductivity determinations in unlithified glacial and fluvial materials. Teoksessa: *Ground Water and Vadose Zone Monitoring, ASTM Special Technical Publication 1053*, D.M. Nielson and A.I. Johnson, Eds., p. 138-151.
- Codd, E. F. 1970. A relational model of data for large shared data banks. *Communications of the ACM*, vol. 13, issue 6. ss. 377-387.
- Elo, S., Kurimo M., Mattson A., Niemelä, J. ja Salmi, M. 1992: Kosken TL – Köyliön välisen harjujakson geologiset selvitykset. GTK 1992.
- Elo, S. 1998. Säskylän-Köyliön harjujakson gravimetriset tutkimukset. Raportti 19.2.1998. Geologian tutkimuskeskus.
- Geologian tutkimuskeskus 1989. Maatutkaluotaus Virttaankankaalla.
- Geologian tutkimuskeskus 1992. Virttaankankaan-Oripäänkankaan-Sulajoen harjujakson geofysikaaliset ja geologiset tutkimukset 1992.
- Geologian tutkimuskeskus 2003. Virttaankankaan kallionpintaselvitykset painovoimamittauksia käyttäen. Raportti 12.9.2003.
- Geologian tutkimuskeskus 2006. Pohjavesialueen kallionpinnan tason määrittäminen painovoimamittausten avulla Virttaankankaalla. Tutkimusraportti 13.1.2006.
- Geo-Work Oy 1988. Tutkimusraportti Virttaankangas Oripää tila 4:22/1.
- Geo-Work Oy 1990. Maatutkaluotaustutkimusraportti tila 5:41, Virttaankangas, Alastaro.
- Geo-Work Oy 2002. Maatutkaluotaus Alastarolla, 8.4.2002, Virttaankangas.

- Geo-Work Oy 2003. Maatutkaluotaus Alastarolla 7.11.2003, Virttaankangas.
- Geo-Work Oy 2005. Maatutkaluotaus Alastarolla 23.3.2005, Virttaankangas.
- Gustafsson, E. Nordqvist, R. ja Holmqvist, M. 2002. Project plan. Investigation of residence times and retrieval of infiltration water by tracer tests at Virttaankangas, Finland. Geosigma report.
- Hakoniemi, R. ja Ikäheimo, J. 2004. Virttaankankaan putkivirtausmittaukset. Tutkimusraportti. Maa ja Vesi Oy.
- Helmisaari, H-S, Illmer, K. Hatva, T., Lindroos, A-J., Miettinen, I., Pääkkönen, J. ja Reijonen, R. (toim.) 2003. Tekopohjaveden muodostaminen: imeytystekniikka, maaperäprosessit ja veden laatu. TEMU-tutkimushankkeen loppuraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 902, 2003.
- Ikäheimo, J. ja Mäki-Torkko J. 2001. Raportti Virttaankankaan ja Oripäänkankaan pohjaveden virtausmallin käytöstä. 9.8.2001. Jaakko Pöyry Infra / Maa ja Vesi 2001.
- Jaakko Pöyry Infra 2001. Turun Seudun Vesi Oy, Turun seudun tekopohjavesihanke – Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Turun Seudun Vesi Oy, Jaakko Pöyry Infra / Maa ja Vesi, SCC Viatek.
- Jylhä-Ollila, M. 2004. Merkkiaineet tutkimusmenetelmänä Virttaankankaan tekopohjavesihankeessa. Pro gradu –tutkielma, Helsingin yliopisto.
- Keränen, M. 2006. Orgaanisen aineen sorptio maa-ainekseen tekopohjaveden muodostuksessa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- Kortelainen, N. 2001. Pohjaveden geokemialliset erityispiirteet ja hiili-isotooppikoostumuksen vaihtelut Virttaankankaan pohjavesimuodostumassa. Tutkimusraportti 31.12.2001. GTK 2001.
- Kortelainen, N. 2002. Virttaankankaan isotooppitutkimukset. Julkaisussa: Turun seudun tekopohjavesihanketta koskeva tutkimusseminaari. Turun Seudun Vesi Oy:n julkaisu 1/2002.
- Kortelainen, N. ja Gustavsson, N. 2003. Virttaankankaan pohjaveden ja Kokemäenjoen joki-veden hapen ja vedyn isotooppikoostumusseuranta: Tulokset kesäkuusta 2000 toukokuuhun 2003; Seossuhteiden virhetarkastelu simuloinneilla. Tutkimusraportti 27.8.2003. GTK 2003.
- Kortelainen, N. 2005a. Virttaankankaan pohjaveden ja Kokemäenjoen veden hapen ja vedyn isotooppikoostumuksen jatkoseuranta (2003 – 2004). Tutkimusraportti 14.3.2005. GTK 2005.
- Kortelainen, N. 2005b. Virttaankankaan Myllylähteen alueen isotooppitutkimus. Tutkimusraportti 31.5.2005. GTK 2005.
- Kortelainen, N. 2006a. Virttaankankaan pohjaveden ja Kokemäenjoen veden hapen ja vedyn isotooppikoostumuksen seuranta 2005: vuosi-
raportti. Tutkimusraportti 18.1.2006. GTK 2006.
- Kortelainen, N. 2006b. Isotooppihydrologinen selvitys Kankaanrannan lähdealueella Virttaankankaalla. GTK 2006.
- Lindqvist, K. ja Lallukka, H. 2002. Virttaankankaan maaperän mineralogiasta. Tutkimusraportti. Geologian tutkimuskeskus.
- Maa ja Vesi Oy 1972. Harjukson Säkyliä-Oripää-Mellilä pohjavesivarojen inventointi ja tekopohjavesitutkimukset Virttaankankaalla. Seismiset tutkimukset Virttaankankaalla.

- Maa ja Vesi Oy ja Suunnittelukeskus Oy 1975. Säkylänharjun-Virttaankankaan pohjavesiselvitys, väliraportti, piirustukset.
- Maloszewski, P. 2000. Program Field. Dispersion model to determine mean water velocity, mean transit time and dispersivity. Julkaisematon.
- Mäkelä, A., Antikainen, S., Mäkinen, I., Kivinen J. ja Leppänen, T. 1992. Vesitutkimusten näytteenottomenetelmät. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja, Sarja B no. 10. Vesi- ja ympäristöhallitus. Helsinki.
- Mäkinen, J. 2004. The sedimentology and depositional history of the Säkylänharju – Virttaankangas interlobate glaciofluvial complex in SW Finland. Turun yliopiston julkaisuja, osa 173.
- Mälkki, E. 2003. Virttaankankaan ja sen lähialueiden pohjavesigeologiset olosuhteet, perusselvitys. Asiantuntijalausunto, osa 1.
- Nordqvist, R., Gustafsson, E. ja Tammela P.-T. 2004. Investigation of residence times and retrieval of infiltration water by a tracer test at Virttaankangas, Finland. Geosigma AB, final report.
- Reijonen, R. 1991a. Virttaankankaan tekopohjavesitutkimukset. Putkivirtausmittaukset ja koe-kaivot. Suomen Pohjavesiteknikka Oy 1991.
- Reijonen, R. 1991b. Virttaankankaan tekopohjavesitutkimukset. Pohjavesimallin hyödyntäminen. Suomen Pohjavesiteknikka Oy 1991.
- RIL 187-1990 1990. Sovellettu hydromekaniikka. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. ISBN 951-758-237-4. s. 123.
- Saijonmaa, L. ja Ikäheimo, J. 1991. Pohjavesialueen hydraulinen tulkinta ja toiminnallinen tarkastelu pohjavesimallilla. Maa ja Vesi Oy 1991.
- Seppälä, M. 1999. Pohjaveden virtausmalli Virttaankangas – Oripäänkangas. Lounais-Suomen ympäristökeskus 1999.
- Suomen Pohjavesiteknikka Oy 1991. Porsaanharjun seismiset linjat.
- Suomen Vesiyhdistys r.y. 2005. Pohjavesitutkimusopas – käytännön ohjeita. Vammalan Kirjapaino Oy.
- Tiljander, M. ja Kortelainen, N. 2003. Hiili-isotooppitutkimus Virttaankankaan Myllylähteen ympäristössä. GTK 2003.
- Tiljander, M., Lallukka, H., Gustavsson, N. Lehtinen, M. J. ja Kortelainen, N. 2004. Karbonaatin esiintyminen Virttaankankaan maaperänäytteissä – tutkimusraportti. Geologian tutkimuskeskus.
- Valtion ravitsemusneuvottelukunta, 1998. Suomalaiset ravitsemussuositukset, komiteamietintö 1998:7. Edita, Helsinki.
- WHO, 1996a. Guidelines for drinking water quality. 2nd ed. Vol 1 Recommendations. World Health Organization, Geneva.
- WHO, 1996b. Guidelines for drinking water quality. 2nd ed. Vol 2 Health criteria and other supporting information. World Health Organization, Geneva.

Ohjelmien lähdekoodien viittaukset

MODFLOW-2000 (alkuperäisdokumentaatio):
Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C. ja 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: U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 s.

MODPATH (alkuperäisdokumentaatio):
Pollock, D.W. 1994. User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 94-464, 6 ch.

Internet-viittaukset

Geologian tutkimuskeskus. Informaatiopalvelut, Kartat. <http://www.gtk.fi/palvelut/info/kartat/index.htm>

Lounais-Suomen ympäristökeskus 19.4.2006: Pintavesien laatu Lounais-Suomessa 2000-2003. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=29259&lan=fi>



SANASTO

ADSORPTIO • Atomien, molekyylien, hiukasten tms. kiinnittyminen aineen pintaan, kuten kiinnittyminen sähköisesti varautuneisiin kohtiin maahiukkasten pinnoilla.

ADVEKTIO-DISPERSIO-MALLI • 1-, 2- tai 3-ulotteinen malli aineen kulkeutumisesta advektion ja dispersion vaikutuksesta. Merkkiainekokeessa mallin avulla määritetään pohjaveden keskimääräinen virtausnopeus, viipymä ja dispersiiviteetti imeytysalueelta kullekin pisteelle.

ADVEKTIO • Advektio on skalaarisen, säilyvän suureen siirtymistä vektorikentässä. Pohjavesigeologiassa advektiolla ymmärretään aineen jonkun ominaisuuden kulkeutumista esim. pohjaveden virtauksen mukana.

AKVIFERI • Pohjaveden tuotannon kannalta hyödyntämiskelpoinen pohjavesiesiintymä.

AKVIKLUDI • Akviferin eri osien välissä sijaitseva veden virtausta rajoittava kerros.

ARTEESINEN KAIVO • Arteesisella kaivolla tarkoitetaan kaivoa, jossa veden painetaso sijaitsee vettäjohtavan kerroksen yläpinnan tason yläpuolella. Jos pohjaveden painekorkeus ylittää maanpinnan korkeustason, kyseessä on arteesin virtaava kaivo. Vertaa lirikaivo.

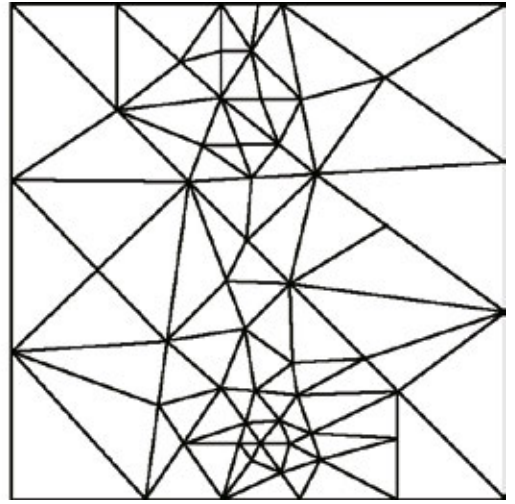
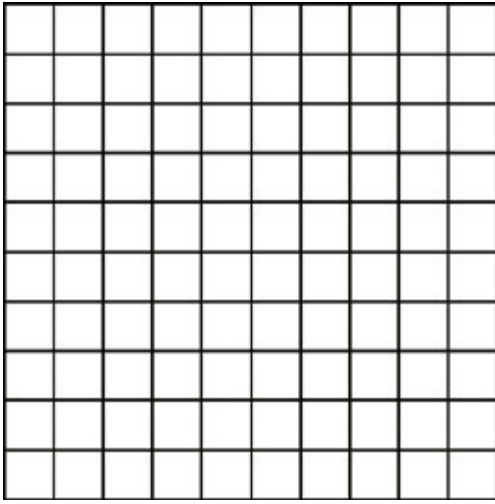
AVOIN AKVIFERI • Paineeton pohjavesiesiintymä, jossa pohjaveden pinnan taso vaihtelee vapaasti ilmanpaineen muutosten vaikutuksesta. (Pohjaveden pinnan yläpuolella ei ole pinnan korkeutta rajoittavaa akvikludia).

BREAKTHROUGH-KÄYRÄ • Tässä yhteydessä: Breakthrough-käyrä esittää merkkiaineen etenemisen havaintopisteen kautta. Mitatut merkkiainekonsentraatiot esitetään usein ajan funktiona xy-diagrammissa.

CAS-NUMERO • Chemical Abstract Service (CAS) on Yhdysvaltalainen kemikaalien tunnistenumerojärjestelmä, jolla pyritään helpottamaan kemikaalien ja yhdisteiden tunnistamista sekä tietokanta- ja internethakuja ilman monimutkaisia kemiallisia nimiä.

CFC-YHDISTE • (engl. CFC, chlorine-fluorine-carbon) Kemiallinen yhdiste, joka muodostuu kloorista, fluorista ja hiilestä (hiilivedyistä). Kloorattu ja fluorattu hiilivety on molekyyliä pienempänä yhdisteenä kaasumainen (esimerkiksi freonit), pidempänä ketjuna nestemäinen tai vahamainen ja pitkänä polymeerina muovi (esimerkiksi teflon). CFC-yhdisteille yhteistä on se, että ne ovat hyvin inerttejä aineita, jotka eivät helposti reagoi muiden kemikaalien kanssa ja ovat turvallisia myös ihmiselle.

DEUTERIUM • Vedyin isotooppi (^2H tai D), jossa vetyatomien ytimessä on protonin lisäksi yksi neutroni. Deuteriumia kutsutaan myös raskaaksi vedyksi.



Kuva 57. Periaatteellinen esitys differenssimallin (vasemmalla) ja elementtimallin eroista.

DIAMIKTONI • Moreenin kaltainen huonosti lajittunut maa-aines, jonka syntytapaa ei ole erikseen määritetty.

DIFFERENSSIMENETELMÄ • Differenssimenetelmä (finite difference method) on matemaattinen menetelmä, jossa laskettava funktio esitetään sen arvoina tietyin tasavälein sijaitsevilla pisteillä. Pohjaveden virtausmallinnuksessa finiitti-differenssi -virtausmallin matriisit koostuvat neliöprisman muotoisista vaihtelevan paksuisista soluista (Kuva 57). Vertaa elementtimenetelmää.

DISPERSIO • Dispersiota syntyy kun huokoisessa väliaineessa kulkeva virtaus vaihtelee nopeudeltaan ja suunnaltaan paikallisesti. Pohjavesigeologiassa dispersio tarkoittaa veden mukana kulkeutuvan aineen pitoisuuden asteittaista leviämistä pohjaveden virtauksen mukana. Aine leviää sekä pituus- että poikittaissuunnassa kulkureittiinsä nähden ja sekoittuu samalla yhä suurempaan vesitilavuuteen. Ilmiön suuruuteen vaikuttavat sekä aineen ominaisuudet että pohjaveden virtausolosuhteet.

ELEKTRONIMIKROSKOOPPI • Mikroskooppi, jossa käytetään näkyvän valon sijasta elektronisuihkua. Tämä mahdollistaa tavallista valomikroskooppia huomattavasti pienempien yksityiskohtien havaitsemiseen.

ELEMENTTIMENETELMÄ • Elementtimenetelmä (finite element method) on matemaattinen menetelmä, jossa osittaisdifferentiaaliyhtälöille tai integraaliyhtälöille pyritään löytämään ap-proksimoitua arvoja jakamalla laskenta-alue pieniin alueisiin (2D-tapauksessa esim. kolmioihin tai neliöihin). Pohjaveden virtausmallinnuksessa finiitti-elementti -virtausmallin matriisien solut koostuvat vaihtelevan kokoisista kolmioprismoista. Vertaa differenssimenetelmää.

EPÄORGAANINEN • Elottoman luonnon prosessien synnyttämä. Epäorgaanisia hiilen esiintymismuotoja Virttaankankaalla ovat esim. kalsiumkarbonaattimineraali eli kalsiitti (CaCO_3) sekä veteen liuenneet hiilidioksidi ($\text{CO}_2(\text{aq.})$), bikarbonaatti-ioni (HCO_3^-) ja karbonaatti-ioni (CO_3^{2-}).

EVAPORAATIO • Ilmiö, jossa maanpinnalla oleva vesi höyrystyy eli haihtuu maanpinnalta. Vertaa transpiraatio.

FTP-PALVELIN • FTP on lyhenne sanoista File Transfer Protocol. FTP on TCP-protokollaa käyttävä tiedostonsiirtomenetelmä kahden tietokoneen välille. FTP-yhteys toimii asiakas-palvelin periaatteella. Yleensä asiakas (client) ottaa yhteyttä palvelimeen (server), joka tarjoaa FTP-palvelun.

GEOFONI • Geofoni on mittalaite, joka muuttaa mitatun maankamaran liikkeen sähköimpulsseiksi. Seismisissä mittauksissa maankamaran mekaaninen liike aiheutetaan iskuvasaralla tai räjäytyksellä. Yleisin geofonin tyyppi on sähkömagneettinen geofoni.

GLASIFLUVIAALINEN • Jäätikön sulamisvesivirtojen muodostama, jäätikköjokisyn-tyinen.

GLASILAKUSTRINEN • Jäätikön reunal- la sijaitsevaan järveen, ts. jääjärveen kerrostunut sedimentti.

GRADIENNTTI • Tässä yhteydessä: mitattujen pisteiden välinen pohjaveden pinnan kaltevuus.

HOMOGEENINEN • Tasalaatuinen.

HORISONTAALINEN • Vaakasunnassa tapahtuva. Vertaa vertikaalinen.

HUOKOISUUS n (%) • $100 * (V_v/V_t)$ (huokostila / huokoisen aineen koko tilavuus prosentteina).

HYDRAULINEN YHTEYS • Merkityksellisen pohjaveden virtauksen mahdollistava geologinen rakenne akviferin osa-alueiden välillä. Eri alueiden välillä ei välttämättä ole merkittävää hydraulista yhteyttä, vaikka niiden välinen maa-aines olisikin pohjavedellä kyllästynyt.

HYDROGEOLOGIA • Pohjavesigeologia.

IN SITU - TUTKIMUS • Maastossa tapahtuva tutkimus, jossa mitattavaa tietoa mitataan suoraan kohteesta, kuten maaperästä tai pohjavedestä.

INTERPOLAATIO • Interpolaatiolla tarkoitetaan matemaattista menetelmää, jossa tunnettujen pisteiden välille luodaan uusia pisteitä. Interpolaatiomenetelmiä on useita erilaisia ja niitä voidaan soveltaa joko yksi- tai useampiulotteiselle pistejoukolle.

ISOTOOPPI • Saman alkuaineen atomit, jotka eroavat toisistaan ytimessä olevien neutronien lukumäärän suhteen. Mitä enemmän neutroneja atomin ytimessä on, sitä raskaampi isotooppi on kyseessä. Lähes kaikilla alkuaineilla esiintyy luonnossa useita isotooppeja. Kevyillä alkuaineilla esiintyy sekä pysyviä että radioaktiivisia isotooppeja. Radioaktiiviset isotoopit hajoavat ajan kuluessa, mistä johtuen eri isotooppien pitoisuus- suhteiden perusteella voidaan määrittää pohjaveden ikä.

JOTUNIHIEKKAKIVI • Jotuni on geologinen ajanjakso noin 1400 – 1200 miljoonaa vuotta sitten Fennoskandiassa. Jotunikaudella kerrostuivat mm. Satakunnan ja Selkämeren alueen sekä Muhoksen ja Perämeren alueen hiekkakivet.

K-ARVO • Pohjavesigeologiassa K-arvo on materiaalin (maalajin) vedenjohtavuuden arvo. K-arvon yksikkö on m/s. K-arvolle ei voida määrittää absoluuttista, maalajikohtaista arvoa, sillä maalajin mitattu K-arvo suurenee kun kokeen mittakaava kasvaa (Bradbury ja Muldoon 1990). Vertaa T-arvo.

KONSENTRAATIO • Kemiassa käytetty suure, joka ilmoittaa liunneen aineen pitoisuuden liuoksessa. Konsentraatio on ainemäärä tilavuusyksikössä ja siitä riippuu liuoksen kemiallinen väkevyys.

LATERAALINEN • Sivulla oleva, sivu-, reuna-, laita-. Esimerkiksi lateraalinen virtaus on sivusuunnassa tapahtuvaa virtausta.

LECO • GTK:lla käytössä oleva näytteen hiilipitoisuuden analysointilaitte on LECO Corporationin (<http://www.leco.com>) valmistama mittalaitte. Hiilipitoisuuden mittaauksessa GTK käyttää omaa menetelmäänsä 811L. Menetelmässä näyte poltetaan keraamisessa näytelaitteessa 1370°C:ssa happiatmosfäärissä. Kosteus ja epäpuhtaudet poistetaan kuivausputkien ja filttereiden avulla. Hiilidioksidi mitataan infrapunakennolla. Hiilipitoisuus tulostuu laitteelta painoprosentteina.

LIRIKAIVO • Säkyänharju – Virttaankankaan alueella käytetty nimitys arteesiselle kaivolle, jonka veden painekorkeus ylittää maanpinnan tason. Lirikaivosta pohjavesi virtaa omalla paineellaan. Harjunkylän lirikaivot on rakennettu painamalla yläpäästään avoin noin tuuman halkaisijaltaan oleva alapäästään rei'itetty metalliputki läpi maanpinnalla esiintyvistä heikosti vettä johtavasta siltti-savi –kerroksesta paremmin vettä johtavaan glasifluvialiseen hienoon yksikköön. Vertaa arteesinen kaivo.

MATRIISI • Tässä yhteydessä: Virtausmalleissa ja rakennemalleissa käytetty suorakulmaisen muotoinen taulukko, joka koostuu samankokoisista soluista. Matriisiin soluihin voidaan sisällyttää erityyppistä ominaisuustietoa. Matriisitieto voidaan yhdistää paikkatietoon määrittämällä matriisiin kulmapisteet käyttäen karttakoordinaatteja. Sedimentologiassa matriisilla tarkoitetaan maa-aineksen karkeimpien rakeiden välejä täyttävää hienompaa maa-ainesta.

mg/l • Mikrogrammaa litrassa. Mikrogramma on gramman miljoonasosa.

mg/l • Milligrammaa litrassa. Milligramma on gramman tuhannesosa.

MODFLOW • MODFLOW on United States Geological Survey'n kehittämä virtausmallinnusohjelmisto, jonka avulla voidaan laskea pohjaveden virtausta käyttäen hyväksi differenssimenetelmää. MODFLOW:n rakenne on modulaarinen, eli se koostuu lähes 50 erilaisesta virtausmallinnuksessa käytettävästä laskentarutiinista (paketista), joita voidaan ottaa käyttöön tarpeen mukaan. MODFLOW:sta on julkaistu useita eri versioita, tässä yhteydessä kuvattu virtausmalli on laadittu MODFLOW-2000 –ohjelmalla, joka mahdollistaa automaattisen virtausmallin kalibroinnin.

MODPATH • MODPATH on ohjelma, jolla voidaan tarkastella pohjaveden virtausreitit ja viipymäaikoja, jotka on laskettu MODFLOW –ohjelmiston avulla.

MOREENI • Jäätikön kerrostama heikosti lajittunut maa-aines. Eri moreenityypit eroavat ominaisuuksiltaan riippuen moreenin kerrostumistavasta. Tavallisimmat moreenityypit ovat tiivis pohjareeni, löyhä pintareeni (ablaatiomoreeni) sekä erilaisten massaliikuntojen seurauksena syntyneet aiempia lajittuneemmat valumimoreenit. Vertaa diamiktoni.

ORGAANINEN • Kasvi- tai eliötoiminnan seurauksena syntynyt. Pintavesissä esiintyviä orgaanisia hiiliyhdisteitä on tuhansia erilaisia. Orgaaniset hiiliyhdisteet poistuvat pohja- ja tekopohjavedestä sekä sitoutumalla maaperään, hajoamalla että bakteeritoiminnan seurauksena, kun veden viipymä maaperässä on riittävän pitkä. Vertaa epäorgaaninen.

ORSIVESI • Orsivesi on pohjavettä, joka on muodostunut vettä pidättävän maakerroksen päälle ja sijaitsee varsinaisen pohjavesikerroksen yläpuolella. Orsivesikerroksen alla saattaa olla vedellä kyllästymätöntä maa-ainesta ennen varsinaista pohjavesikerrosta.

PAINEELLINEN POHJAVESI • Pohjavedettä, joka sijaitsee vettä läpäisemättömän kerroksen alla siten, että vedenpinnan painetaso on vettä pidättävän kerroksen alapintaa ylempänä.

PIILOSUPPA • Myöhemmin kerrostuneiden maa-ainesten, yleensä rantakerrostumien peittävä ja tasoittama aiemmin syntynyt supparakenne. Vertaa suppa.

REDOX-POTENTIAALI • Redox-potentiaali eli hapettumis-pelkistymis-potentiaali kertoo, vallitsevako pohjavesiesiintymässä hapettavat vai pelkistävät olosuhteet.

RUHJE • Kallioperän heikkousvyöhyke, joka on usein kulunut ympäristöönsä alemmalle tasolle.

RÖNTGENDIFFRAKTIO • Röntgendiffraktiota (XRD) käytetään muun muassa mineraalien ja kemiallisten yhdisteiden tunnistamisessa sekä uusien materiaalien rakenteen tutkimuksessa. Menetelmässä röntgensäteily heijastuu kiteestä. Säteilyn sirontakulma riippuu heijastavien tasojen välimatkasta. Siten röntgendiffraktiomenetelmällä saadaan tietoa kiteisten aineiden atomitason järjestyksestä eli kiderakenteesta.

SAANTOPROSENTTI • Tässä yhteydessä: Tekopohjavedeksi imeytetyn veden takaisinsäannon määrää kaivossa ilmaistaan saantoprosenttina.

SALPA-AKVIFERI • Pohjavesialueen osa, jossa vesipinta on kahden virtausta rajoittavan maa-aineskerroksen välissä ja veden paine voi olla suurempi kuin vallitseva ilmanpaine. Vertaa avoin akviferi, paineellinen pohjavesi.

SEDIMENTOLOGIA • Maa-aineskerrostumien syntytapaa ja rakenteita tutkiva tieteenala.

SEDIMENTTI • Maa-aines, joka on syntynyt veden, tuulen, jäätikön tai vulkaanisen toiminnan kerrostamana.

SILTTEI • Hienorakeinen mineraalimaa-aines, joka sijoittuu raekooltaan hiekan ja saven väliin. Hieta = karkea siltti, hiesu = hieno siltti. Katso liite 8.

STRONTIUM • Strontium on alkuaine, jonka kemiallinen merkki on Sr. Se on maa-alkalimetalleihin kuuluva metalli, jota esiintyy runsaasti maankuoressa. Strontiumilla on useita stabiileja isotooppeja joista ⁸⁶Sr:a ja ⁸⁷Sr:a ja niiden keskinäistä suhdetta käytetään tutkittaessa veden reaktiohistoriaa ympäröivän mineraaliaineksen kanssa. Hiekkakivet sisältävät runsaasti Rubidium-pitoisia mineraaleja ja radioaktiivisen ⁸⁷Rb:n hajotessa syntyy stabiilia ⁸⁷Sr:a. Myös kiven ikä vaikuttaa siihen, kuinka paljon Rb-87 on hajonnut Sr-87:ksi. Vastaavasti alhainen ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr -suhde muodostuu mm. mereen saostuviin karbonaatteihin, joiden ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr -suhde vastaa kyseisenä aikana vallinneen meriveden ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr -suhdetta ollen noin 0,708 - 0,709.

SUPPA • Maa-ainesten sisään hautautuneen jäälohkareen sulaessa syntynyt painanne tai muu maljamainen muoto. Vertaa piilosuppa.

T-ARVO • Pohjavesigeologiassa T-arvo on tietyn paksuisen vedellä kyllästyneen maa-aineskerroksen vedenjohtokyvyn arvo. T-arvon yksikkö on m²/d, joka saadaan kaavasta T = maakerroksen paksuus * vedenjohtavuus (K-arvo).

TEHOKAS HUOKOISUUS (n_e) • Pohjaveden virtaukseen tehokkaasti osallistuva huokoisuus, joka on pienempi kuin maa-aineksen totaalihuokoisuus, sillä osa huokosista on muodoltaan sen kaltaisia umpiperiä, ettei virtausta

päase tapahtumaan. Osa huokosista on myös niin pieniä, että vesi sitoutuu (adsorptoituu) hygroskoopisesti maa-ainesrakeiden pintaan eikä osallistu virtaukseen. $n_c = n - (n_{umpi} + n_{hyg})$

TEKOPOHJAVESI • Tekopohjavesi on pohjavettä, jota tehdään lisäämällä pohjavesiesiintymän luontaista antoisuutta imeyttämällä pohjavesiesiintymään käsittelemätöntä tai esikäsiteltyä pintavettä.

THOMPSONIN MITTAPATO • V-aukkoinen kolmiomittapato, jonka purkautumisaukon kulma on 90° . Mitattaessa padosta veden pinnan korkeus voidaan määrittää padon virtaama laskukaavan avulla: $Q=0,533 * \mu * (2g * h^{5/2})^{1/2}$, jossa:

$$Q = \text{virtaama (m}^3/\text{s)}$$
$$h = \text{vedenkorkeus (m)}$$

purkautumiskerroin μ riippuu

vedensyvyydestä:

$$h=0,05 \quad \mu=0,597$$

$$h=0,1 \quad \mu=0,590$$

$$h=0,15 \quad \mu=0,586$$

$$h=0,2 \quad \mu=0,584$$

$$h=0,25 \quad \mu=0,582$$

Usein Thompsonin padon virtaama lasketaan yksinkertaisemmalla kaavalla: $Q=1,4 * h^{2,5}$, jolloin purkautumiskerroin μ oletetaan vakioksi: $\mu=0,593$.

TOPOGRAFIA • Maan pinnanmuoto.

TRANSPIRAATIO • Kasvien käyttämän veden haihtuminen kasvien maanpäällisistä osista.

TRITIUM • Merkinnältään ^3H tai T. Tritium on vedyn radioaktiivinen isotooppi, jonka puoliintumisaika on 12,32 vuotta. Tritium on vetyä, jossa atomin ytimessä on protonin lisäksi kaksi neutronia.

VAJOVESI • Vedellä kyllästymättömässä vyöhykkeessä painovoiman vaikutuksesta alaspäin liikkuva vesi.

VERTIKAALINEN • Pystysuunnassa tapahtuva. Vertaa horisontaalinen.

VSMOW • Vienna Standard Mean Ocean Water. Keskimääräistä meriveden isotooppikoostumusta kuvaava vesistandardi, joka määritettiin vuonna 1968 pidetyn kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) kokouksessa.



LIITE 1.

(yleiskartta.tif) Kartassa on esitetty tekopohjavesihankkeen yhteydessä rakennettavien Kokemänselän-Turku ja Kaarina-Parainen –syöttövesijohtojen sekä nykyisin toiminnassa olevan Virttaa-Littoinen –syöttövesijohdon sijainnit.

LIITE 2.

(Virttaankangas kartta.pdf) Virttaankankaan tutkimus- ja mallialueen kartta.

LIITE 3.

(Reikäraportti.pdf) Perinteinen reikäraportti.

LIITE 4.

(Putkikortti.pdf) Perinteinen putkikortti.

LIITE 5.

(Vedenpinta-animaatio.mov) Animaatio pohjavedenpintojen muutoksesta imeytyskokeen aikana.

LIITE 6.

(Tuotantotilanneanimaatio.mov) Virtausreittianimaatio tekopohjavesilaitoksen itäisen alueen tuotantotilanteen simulaatiosta.

LIITE 7.

(Pohjavesiputkivideo putki 480.mpg) Videokuva läpinäkyvästä pohjavesiputkesta.

LIITE 8.

(GEO_ja_RT_maalajit.pdf) Mineraalimaalajit geoteknisen (GEO) luokituksen sekä rakennusteknisen (RT) luokituksen mukaan. GEO-luokitus on käytössä esimerkiksi rakennustekniikassa, RT-luokitusta käytetään yleisesti maa- ja metsätaloudessa.

