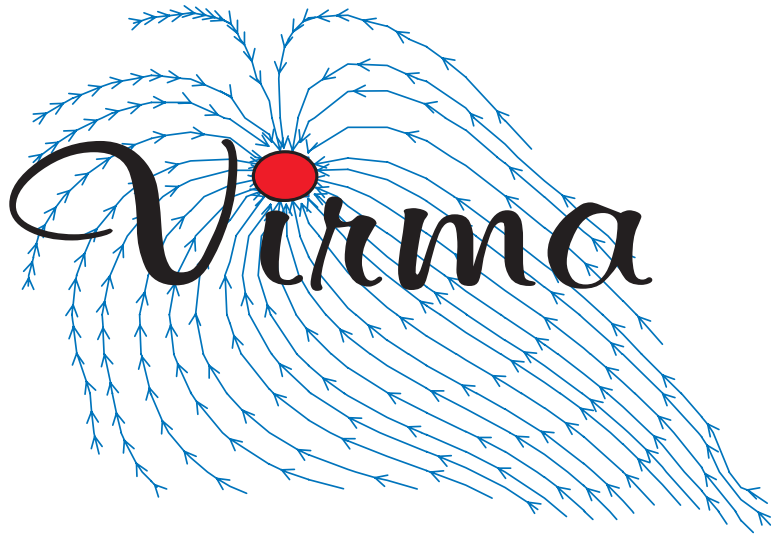




LUONTO JA
LUONNONVARAT

Mikko Seppälä ja Sirkku Tuominen

Pohjaveden virtauksen mallintaminen



Mikko Seppälä ja Sirkku Tuominen

Pohjaveden virtauksen mallintaminen

HELSINKI 2005

ISBN 952-11-2014-2
ISBN 952-11-2015-0 (PDF)
ISSN 1238-8602

Kannen logo: Mikko Seppälä
Taitto: Liisa Lamminpää
Paino: Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala 2005

Sisällys

1 Johdanto	5
2 VIRMA-projekti	6
3 Pohjaveden virtauksen mallintaminen.....	8
4 MODFLOW-käyttöliittymät ja oheisohjelmat.....	11
5 Virtausmallin laatiminen	13
5.1 Mallin laatimisen vaiheet	13
5.2 Virtausmalliin tarvittavat lähtötiedot	14
5.3 Maastotutkimukset.....	17
5.4 Konseptuaalinen malli	19
5.5 Tietojen siirtäminen PMWin-ohjelmaan.....	20
5.6 MODFLOW-paketit.....	26
5.7 Mallin kalibrointi.....	29
5.8 Validointi	30
5.9 Herkkyystarkastelu.....	30
5.10 Ennusteajot	31
6 Hyvä virtausmalli	32
7 Virtausmallin käyttömahdollisuuksia	33
7.1 Steady-state virtausmalli	33
7.2 Transient-virtausmalli	36
7.3 Visualisointi.....	36
8 Käytännön esimerkki.....	37
9 Aineen kulkeutumisen mallinnus	40
10 Pohjaveden virtausmallin käytännön sovelluksia	43
11 Tiedostojen hallinta.....	45
11.1 Hakemistorakenteet	45
11.2 Tiedostojen nimeäminen.....	45
12 Raportointi	46
13 Mallin käyttöoikeudet	47

Sanastoa	48
Lähteet	52
Linkkejä	59
Kuvailulehdet	60
Kuvailulehti, suomi	60
Kuvailulehti, ruotsi	61
Kuvailulehti, englantia.....	62

Johdanto

ATK:n kehittyminen viime vuosina on voinut erilaisten tietokoneella tehtävien ympäristösovelluksien kehitystä nopeaa vauhtia eteenpäin. Tietyt perusyhtälöt säilyvät ja kyse on mm. pohjaveden virtausmallinnuksessa erilaisten tietokoneohjelmien käyttösovelluksista. Tietotekniikan kehitys on ennen muuta nopeuttanut ja helpottanut tiedon syöttöä ja käsittelyä laskentaohjelmien käytettäväksi. Tämä pätee hyvin mm. MODFLOW-koodin kohdalla, joka on maailmalla yleisimmin käytetty pohjavesivirtauksen ratkaisukoodi. Erilaiset käyttöliittymät ovat viime vuosien aikana muuttaneet ja nopeuttaneet ratkaisevasti asioiden käsittelyä. Toisaalta tämä on vaatinut pohjavesitutkijalta ja vaatii edelleen hyvien hydrologisten ja geologisten tietojen lisäksi perehtymistä tietotekniikkaan ja myös tulosten visualisointiin.

Pohjavesiesiintymän perustiedot saadaan karttatarkasteluilla, maastokokeilla ja mittauksilla, mutta malleja tarvitaan pohjaveden virtauksen, laadun ja lika-aineiden ja lämmön kulkeutumisen kuvaamiseen sekä toimenpiteiden vaikutusten arviointiin. Mallien avulla voidaan myös ohjata mittauksia tutkittavan ongelman kannalta oleellisiin kohteisiin. Pohjavesimallinnuksen onnistumisen edellytyksenä on, että tunnetaan tutkittavaan ongelmaan liittyvät tieteelliset periaatteet, käytettävät matemaattiset menetelmät ja tutkittavan alueen geologia. Mallia voidaan pitää luotettavana, jos siihen sisältyvät kuvaukset ovat tieteellisesti perusteltuja ja sitä on testattu käyttäen riippumatonta, kalibroinnin ulkopuolelle jätettyä aineistoa.

Tämän oppaan tarkoitus on yleisellä tasolla selvittää pohjaveden virtausmallin laatimista Suomen olosuhteissa kirjoittajien käytännön kokemusten pohjalta. Opas ei ole mallinnuksen oppikirja, vaan antaa vain yleiskuvan mallinnustyöstä. Oppaassa tarkastellaan käytännön laatimistyön lisäksi mm. malliin tarvittavia tietoja sekä mallin käyttömahdollisuuksia erilaisissa ympäristöselvityksissä. Näin opas voi toimia myös ohjeena virtausmalleja teettäville tahoille kuten vesilaitoksille siitä, mitä eri vaiheita mallinnustyö pitää sisällään ja miten siitä tulisi raportoida.

Virtausmallin käyttömahdollisuuksien kartoitus on vasta alussa. Perinteisten ympäristövaikutusten arviointien lisäksi matemaattinen "elävä" malli antaa lukuisia erilaisia tarkastelumahdollisuuksia oli sitten kyseessä soranotto, vedenotto, haitta-aineiden kulkeutuminen jne. Tilanteita voidaan simuloida yhtä hyvin ajallisesti taakse kuin eteenkin päin. Monien ristiriitailanteiden ratkominen voi nyt olla helpompaa, kun asiantuntijat voivat verrata omia päätelmiään koneen laskemaan tulokseen.

2

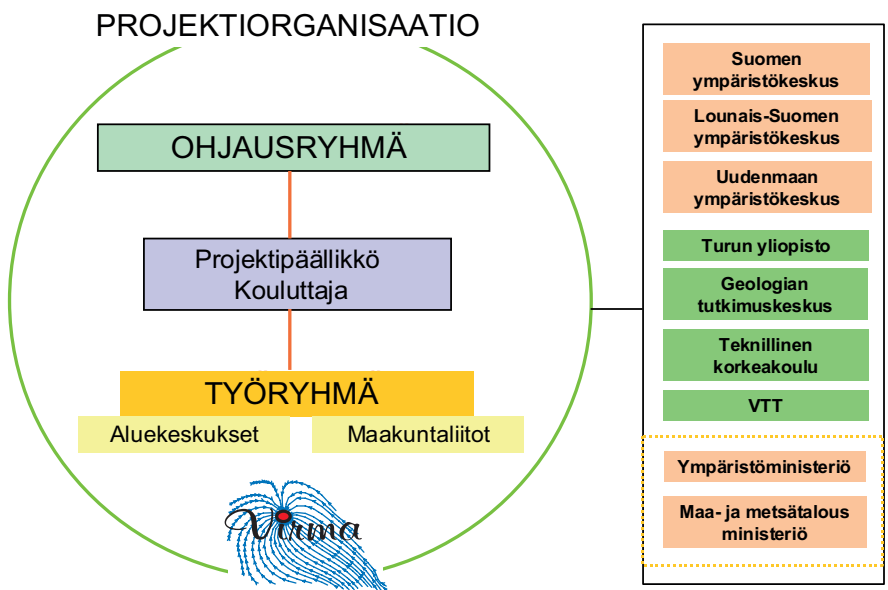
VIRMA-projekti

Suomessa pohjaveden virtausmalleja ja lika-aineen kulkeutumismalleja on tehty sekä konsulttitoimistojen että pohjavesistä vastaavien viranomaisten toimesta. Tarjonta on kuitenkin ollut melko vaihtelevaa mallien laadun ja ohjelmien yhteensopivuuden kannalta tarkasteltuna. Vuosina 1999-2004 toteutettiin ympäristöhallinnossa VIRMA-projekti (Pohjaveden virtausmallit vedenhankinnassa ja pohjaveden suojelussa), joka koulutti ympäristökeskusten asiantuntijoita käyttämään sen hetkistä tietotekniikkaa hyväksi pohjavesitutkimuksessa ja tutkimustiedon soveltamisessa niin vedenhankinnassa kuin maankäytön suunnittelussa. Koulutus vaikutti myös koko maassa tehtävien pohjavesitutkimusten laatuun ja vertailukelpoisuuteen. Projektin tutkimuksellisista tavoitteista vastasivat mm. Suomen ympäristökeskus, Lounais-Suomen ympäristökeskus, Turun yliopisto, Teknillinen korkeakoulu ja Geologian tutkimuskeskus. Projektin ohjausryhmän puheenjohtajana oli professori Veli-Pekka Salonen Helsingin yliopistosta ja projektityöryhmän puheenjohtajana toimi Esa Rönkä Suomen ympäristökeskuksesta. Tämän oppaan kirjoittajista Mikko Seppälä Lounais-Suomen ympäristökeskuksesta toimi projektissa pääkouluttajana ja Sirkku Tuominen Suomen ympäristökeskuksesta projektipäällikkönä.

Koulutus tapahtui jonkin käytännön tutkimuskohteen pohjalta. Alueena oli yleensä vedenhankinnan kannalta tärkeä pohjavesialue, jolla oli selvä tarve mallinnukseen. Esimerkkeinä voi mainita (tilanne keväällä 2003) mm. seuraavat:

- Hämeen ympäristökeskus / Pernunnummi (Forssan ja neljän naapurikunnan yhteinen vedenhankinta)
- Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus / Kourinkangas (Kalajokilaakson vedenhankinta)
- Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus / Oulun yliopisto / Vihanti (Vihannin ja Raahan kaupungin vedenhankinta)
- Kaakkois-Suomen ympäristökeskus / Ampumaradankangas (Lappeenrannan ja Imatran vedenhankinta)
- Pohjois-Karjalan ympäristökeskus / Porokylä (Nurmeksen vedenhankinta + likaantumisongelmat)
- Pohjois-Savon ympäristökeskus / Linnaharju-Mammonkangas (Vieremän vedenhankinta)
- Uudenmaan ympäristökeskus / Nummela (Vihdin vedenhankinta + likaantumisongelmat)
- Lounais-Suomen ympäristökeskus / Äyräsnummi (Someron vedenhankinta)

Usean tutkimuslaitoksen ja viraston yhteinen VIRMA-projekti loi myös uusia yhteistyömuotoja, joiden tavoitteena on ollut yhtenäistää pohjaveden virtausmallinnus Suomessa ja luoda edellytykset mallien tehokkaaseen käyttöön. Internetillä ja yleensäkin tietotekniikalla oli merkittävä osa projektissa. Kyseessä oli tavallaan pohjavesialueiden täydennyskartoitus, jolla pyrittiin luomaan kolmiulotteinen kuva pohjavesimuodostumasta. Mallinnus antoi mahdollisuuden käyttää uutta työkalua elävänä mallina. Käyttäjä itse saattoi kokeilla mitä tapahtuu kun esimerkiksi vedenottamon vedenottoa lisätään tai miten lähdevirtaamat pienenevät vedenoton kasvaessa. Projekti keskittyi ensisijaisesti merkittäviin ja esimerkiksi vedenhankinnan kannalta ongelmallisiin alueisiin.



Kuva 1. VIRMA-projektin organisaatiokaavio.

Mallisovelluksia laadittaessa havaittiin tarvittavan yhä tarkempaa tietoa pohjavesimuodostumien sisäisestä rakenteesta ja maa-aineksen kolmiulotteisesta vaihtelusta sekä näiden vaikutuksesta hydraulisten ominaisuuksien alueelliseen vaihteluun. Tämä antoi sysäyksen sedimentologiaprojektille.

VIRMAssa kehittyntä, useita eri instansseja käsittänyttä, mallinnusta ja pohjavesimuodostumien rakenteen kartoitusta koskevaa yhteistyötä on jatkettu laatimalla yhteinen tavoiteohjelma.

3

Pohjaveden virtauksen mallintaminen

Virtausmallilla kuvataan yhden tai useamman nesteen virtausta huokoisessa (maaperä) tai rakoilleessa väliaineessa (kallioperä). Mallinnuksen kohteina voivat olla vesi ja vesiliukoiset aineet, veteen liukenemattomat nesteet kuten öljy sekä eri tiheydelliset vesikerrokset kuten esimerkiksi makean veden altaaseen tunkeutunut merivesi. Virtausmallien avulla lasketaan hydraulisten korkeuksien tai paineiden muutoksia, virtauksen suuntaa ja suuruutta, kulkeutumisaikoja sekä toisistaan erottuvien nesteiden rajapintoja.

Useimmat pohjavesimallit kuvaavat pohjaveden virtausta maaperässä, jolloin voidaan käyttää jatkuvan huokoisen väliaineen konseptuaalista mallia. Veden virtausta kallioperän raoissa ja ruhjeissa voidaan kuvata kolmella erilaisella konseptuaalisella mallilla: kalliota vastaavan huokoisen väliaineen mallilla, rakomallilla tai kaksoishuokoisuuden mallilla.

Matemaattinen malli on matemaattinen kuvaus pohjavesisysteemissä tapahtuvista prosesseista. Nämä matemaattiset yhtälöt voidaan ratkaista analyttisesti tai numeerisesti. Numeerisessa mallissa ratkaisu saadaan korvaamalla todelliset yhtälöt tarkoitukseen sopivilla yksinkertaisemmilla likiarvoyhtälöillä. Tietokonehallilla tarkoitetaan mallinnuksessa käytettävän tietokoneohjelman ohjelmakoodia. Simulaatiomallilla tarkoitetaan tietokoneohjelman avulla tehtäviä ennusteajoja.

Yksinkertaistettuna pohjaveden virtausmallin laatiminen tapahtuu seuraavasti: Tarkasteltava alue jaetaan geologian ja aluetta rajaavien muiden tekijöiden perusteella hila- tai elementtiverkkoon. Rajauksessa otetaan huomioon pohjavesialtaiden rajat ja valuma-alueen vedenjakajat. Reunaehdot ja laskentaparametrit määritetään. Jokaiselle mallin osalle annetaan lähtötietoja esimerkiksi vedenjohtavuudesta, kerrospaksuuksista ja akviferin täydentymisestä. Mallia kalibroitaessa lasketaan pohjaveden korkeus ja verrataan laskettuja ja havaittuja arvoja toisiinsa. Mallialueen kuvausta ja kertoimia tarkennetaan kunnes mallilla lasketut tulokset vastaavat maastossa havaittuja todellisia arvoja.

Pohjaveden virtausmallinnus perustuu lähtökohtaisesti Darcyn lakiin (v. 1856). Darcyn laki voidaan yksinkertaistettuna esittää virtausnopeuden avulla seuraavasti:

$$q = K J$$

q = virtausnopeus (m s^{-1})

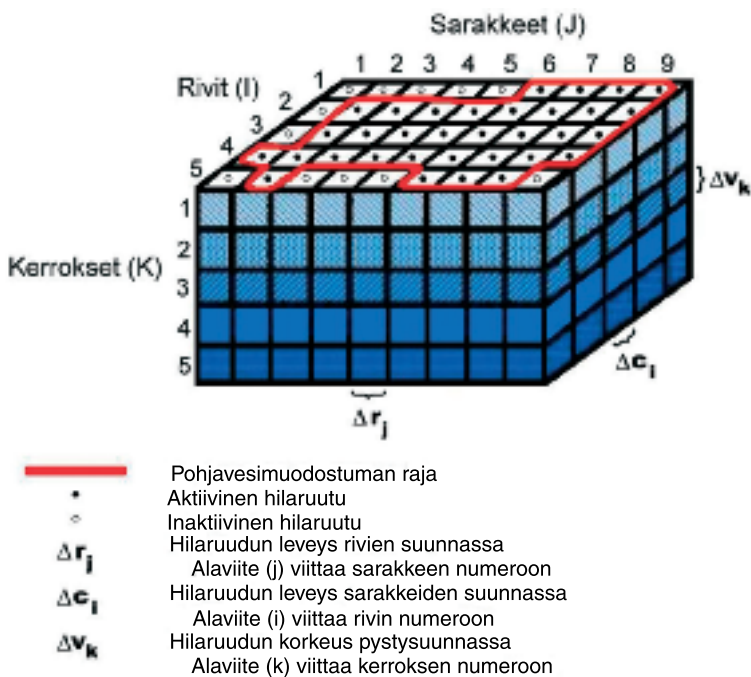
K = vedenjohtavuus (m s^{-1})

J = hydraulinen gradientti.

Yleisimmin käytössä olevat pohjaveden virtausmallinnuksessa käytetyt koodit perustuvat joko differenssi- tai elementtimenetelmään. Differenssimenetelmässä tarkasteltava alue jaetaan säännölliseen, suorakulmaiseen differenssi- eli hilapisteverkkoon. Differenssimenetelmään perustuvia pohjaveden virtausmallinnuskoodeja ovat mm. MOC, MODFLOW ja HST3D. Differenssimenetelmä on helppotajuinen ja yleensä differenssi-laskentaverkon laatimiseen tarvitaan vähemmän lähtötietoja kuin elementtimenetelmässä. Toisaalta elementtimenetelmässä voidaan paremmin käsitellä mm. epäsäännöllisen muotoiset reunaehdot sekä mallinnusalueen sisäiset epäjatkuvuuskohdat. FEMWATER ja FEFLOW ovat elementtimenetelmään perustuvista pohjavesimallinnuskoodeista varsin yleisesti käytettyjä.

VIRMA-projektin yhteydessä käytettäväksi mallinnuskoodiksi valittiin MODFLOW, joka on kirjoitettu FORTRAN 77 ohjelmalla ja näin se voidaan ajaa useimmilla tietokoneilla. Ohjelman ovat kirjoittaneet amerikkalaiset Michael G. McDonald ja Arlen W. Harbaugh jo vuonna 1984 Fortran 66:lle ja muuntaneet sen 1988 Fortran 77:lle. Koodi perustuu vuonna 1975 U.S. Geological Survey'ssa kehitettyyn 2- ja 3-dimensionaaliseen differenssimenetelmään (Trescott 1975).

MODFLOW-koodi rakentuu moduuleista, jotka voivat toimia itsenäisinä yksikköinä. Tällaisia yksiköitä ovat mm. recharge (imeytyminen), wells (kaivomoduuli), drains (ojamoduuli) jne. Nykyisin käytössä olevan MODFLOW-koodin ensimmäinen versio on vuodelta 1988, ja siihen on



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

tehty jälkeenpäin useita lisämoduuleja. Viimeisin koodi-versio on vuodelta 2000.

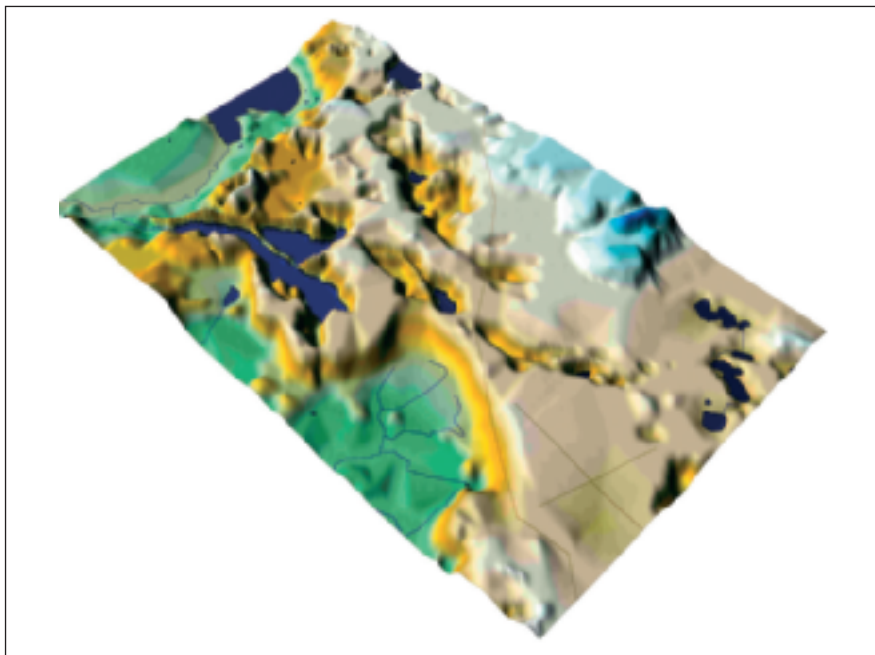
Pohjaveden virtauksen mallinnus luo myös pohjan pohjaveden likaantumistapausten selvittelylle. Ennen kuin voidaan arvioida likaantumisriskiä ja -määriä on yleensä mallinnettava ko. alueen pohjaveden virtauskuva. Vasta tämän jälkeen voidaan tehdä arvioita erillisellä aineen kulkeutumismallilla. Tässä oppaassa keskitytään kuitenkin lähinnä pohjaveden virtauksen mallinnukseen.

MODFLOW-käyttöliittymät ja oheisohjelmat

4

Windows-ympäristö on antanut mahdollisuuden kehittää tehokkaita ja käyttäjäystävällisiä syöttö- ja tulostusohjelmia laskentaohjelmien avuksi. Näistä ensimmäisiä oli PM (Processing Modflow), josta ensiversion jälkeen pian tuli todellinen Windows-versio PMWin. Tämä MODFLOW-koodin käyttöliittymä on valittu ympäristöhallinnon käyttöön sopivimmaksi ja siksi tässä oppaassa käsitellään ensisijaisesti PMWINohjelmaa. PMWin:n viimeisin versio on nimeltään PMWin Pro.

PMWINiin sisältyy myös mm. PMPATH, jolla kuvataan pohjaveden virtausreittejä ja -nopeuksia ja MT3D, joka on aineen kulkeutumisen mallinnuskoodi. PMWin on mallin laatimisohjelma, jossa malliruudukko kehitetään ja siihen syötetään tarvittavat tiedot. Osaa tuloksista voidaan tarkastella suoraan PMWin:ssä, mutta ohjelman yhteensopivuus mm. SURFER-ohjelman kanssa antaa erinomaiset tulosten visualisointimahdollisuudet. Myös PMPATH on yhteensopiva SURFER:in kanssa. MT3D toimii omana moduulina PMWin:ssä ja sen tulosten tarkastelu tapahtuu myös



Kuva 3. SURFER-ohjelmalla tehty maanpinnan 3D-kuva Kiikalannummen alueelta.

sekä PMWinissä ja SURFER:ssä. GRAPHER on grafiikkaohjelma, jonka avulla voidaan mm. SURFER -ohjelmassa tehdyistä sama-arvokäyristä piirtää poikkileikkauksia.

Muita PMWINin tapaan yleisesti käytettyjä MODFLOW -käyttöliittymiä ovat mm. Visual Modflow ja GMS. Ohjelmien kehitys kulkee kohti monipuolisempaa ja näyttävämpää suuntaa. MODFLOW:n lisäksi kullakin käyttöliittymällä voi yleensä käyttää erilaisia valikoimia muita mallinnusohjelmia ja tämän vuoksi saattaakin olla tarpeen opiskella useamman kuin yhden käyttöliittymän käyttö.

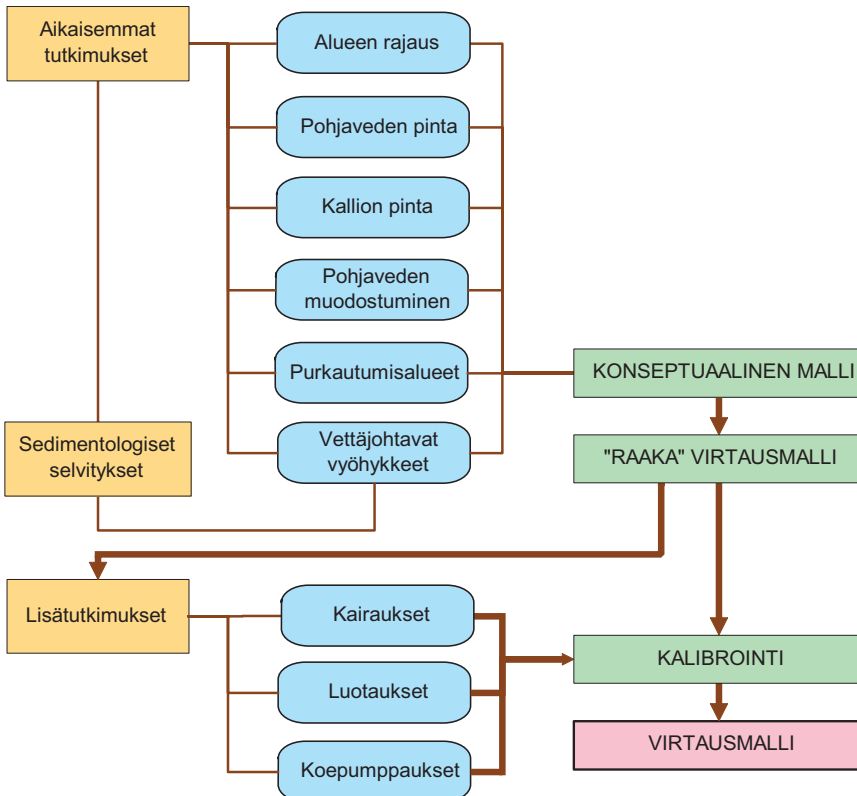
Tietotekniikka antaa koko ajan lisämahdollisuuksia myös visuaalisella puolella, joka toki onkin tärkein näkyvä mallinnustyön tulos. Vaikka itse mallin laatiminen ja laskenta on monimutkaista ja vaativaa, on tulokset voitava esittää mahdollisimman yksiselitteisinä ja selvinä ts. ensisijaisesti kuvina. Tutkimusten ja tutkimusmenetelmien yksityiskohtainen ja laaja esittely ei liene kovin kiinnostavaa vaan kysymykset keskittyvät yleensä mallinnustyön tuloksista puhuttaessa saatavan veden määrään ja vedenoton ympäristövaikutuksiin.

Virtausmallin laatiminen

5

5.1 Mallin laatimisen vaiheet

Pohjavesiesiintymän mallintamisen vaiheita ovat ongelman määrittely ja aineiston valmistelu, mallin kalibrointi ja ongelman ratkaisu eli ennuste-ajot. Alkuvaiheessa kerätään tutkittavaan pohjavesiesiintymään liittyvät tiedot. Mallinnettavasta esiintymästä muodostetaan konseptuaalinen malli, joka sisältää tietoja alueen hydrogeologiasta sekä veden määrään ja laatuun vaikuttavista tekijöistä. Tässä yhteydessä määritellään myös mallintamisen tavoitteet ja tehdään alustava päätös mallintamisen tasosta. Mitä monimutkaisempi malli on ja mitä useampia prosesseja se kuvaa, sitä enemmän se vaatii lähtötietoja ja tietokoneaikaa.



Kuva 4. Virtausmallin laatimisvaiheet.

Yleisesti ottaen malli on yksinkertaistettu kuvaus olemassa olevasta fyysisestä systeemistä. Pohjavesimalleja voidaan jakaa eri tyyppeihin menetelmän ja käyttötarkoituksen mukaan. Kukin malli voi olla yksi-, kaksi- tai kolmiulotteinen, muuttumatonta tai muuttuvaa virtausta kuvaava.

5.2 Virtausmalliin tarvittavat lähtötiedot

Pohjavesimalli on korkeintaan niin hyvä ja tulokset niin oikeita kuin malliin syötetyt lähtötiedotkin. Mallinnustuloksen tarkkuus on yleensä suoraan verrannollinen lähtötietojen tarkkuuteen. Erityisen tärkeää on maastotutkimusten kohdentaminen mallinnuksen kannalta oleellisimmille alueille. Jokainen mallinnettava alue on oma tapauksensa ja onkin oivallettava, mitkä tutkimukset ja tulokset juuri kyseisellä alueella ovat tärkeimmät ja käyttökelpoisimmat.

Mallin laatiminen alkaa aina lähtötietojen kokoamisella. Tässä vaiheessa ratkaistaan myös mitä tietoja otetaan mukaan ja kriittinen suhtautuminen lähtöaineistoihin on paikallaan. Esimerkiksi jokainen yksittäinen pohjavedenpinnan havainto vaikuttaa mallinnettavaan virtauskuvaan ja yksikin virheellinen mittaustulos saattaa vääristää alueen hydrogeologista tulkintaa. Lähtötietojen jäsentely, tulkinta ja dokumentointi ovatkin oleellinen osa pohjavesimallin soveltamistyötä. Lähtötietoja hankitaan ja täsmennetään ongelman määrittelyn, aineiston valmistelun ja mallin kalibroinnin yhteydessä. Tutkittavan alueen geologia vaikuttaa tarvittavien lähtötietojen määrään. Mallin laatimiseen tarvittavat tutkimukset ovat pääosin samoja kuin vedenottoaikan tutkimukset. On kuitenkin huomattava, että vedenottoaikkaa haettaessa useimmiten tehdään tutkimuksia varsin suppealla alueella ja itse muodostuman rakenne ja synty jäävät sivuseikaksi. Tavallista on, että tutkimukset keskittyvät vedenottamoiden lähialueille ja valuma-alueen reunoilta on hyvin vähän tietoja. Tällainen menettely johtaa kuitenkin helposti väärin johtopäätöksiin mm. saatavissa olevista vesimääristä. Mallinnuksen tavoite on aina lähteä geologisesta kokonaisuudesta ja sitä kautta vasta päätyä yksityiskohtien tarkasteluun.

Alueen maa- ja kallioperän heterogeenisuus voi vaikuttaa mallin tarkkuuteen. Monimutkaisesta geologiasta aiheutuvia epätarkkuuksia voidaan vähentää lisäämällä maastotutkimuksia ja tihentämällä hilaverkkoa. Tarvittavien lähtötietojen määrään vaikuttaa myös se, minkä tasoisesta mallinnuksesta on kyse. Tavoiteltaessa suurta ennusteiden tarkkuutta tarvitaan enemmän lähtötietoja kuin suuntaa-antavan mallin teossa. Vaikka käytävissä olisi runsaasti lähtötietoja, reunaehtoihin ja akviferin ominaisuuksiin jää väistämättä aina jonkin verran epävarmuutta, mikä tulee huomioida mallin tuloksia arvioitaessa.

Pohjavesimallin kalibroinnin kannalta lähtötietoja, esimerkiksi kalliista pohjavesiputkista saatavia pohjavedenpinnan havaintoja, on aina liian vähän. Valmiina oleva tieto on usein kerätty ennen mallintamisen aloittamista. Lähtötietoja tarkennetaan tarvittaessa maastotutkimuksilla, laboratoriomäärityksillä ja kirjallisuudesta saatavilla parametreilla. Lähtötietoja joudutaan arvioimaan, jos mitattuja tietoja ei ole tai niitä ei pystytä hankkimaan. Niukoilla lähtötiedoilla mallinnettavaa aluetta voidaan tulkita usealla eri tavalla

ja silti saavuttaa kohtuullinen vastaavuus mittausten ja mallin tulosten välillä. Tässä subjektiivisessa ja työläässä mallinnuksen vaiheessa on tärkeää, että mallintajalla on hydrologista perustietoa ja kokemusta.

Lähtötietoja voidaan käyttää tehokkaimmin stokastisilla menetelmillä (esim. Monte Carlo - simulointi) ja geostatistisilla menetelmillä (esim. Kriging-menetelmä). Kun lähtötietoja on runsaasti, aineistoa voidaan luokitella ja käsitellä tilastollisesti. Visualisointi ja erilaiset interpolointimenetelmät ovat keskeisiä työkaluja lähtöaineiston arvioinnissa. Tämä työvaihe on merkittävä, jotta virheellinen tieto pystytään tunnistamaan ja korjaamaan.

Erityisesti on oltava tarkkana mm. havaintoputkien ja muiden mittastusajon korkeuslukemien oikeellisuudesta. Useimmiten on parasta uudelleen kaikki mukaan tulevat kohteet. Sama koskee sijaintitietoa. Esimerkiksi pelkkä kartalta digitointi ei ole suositeltavaa vaan parempi on tehdä vaikkapa GPS -paikannus maastossa.

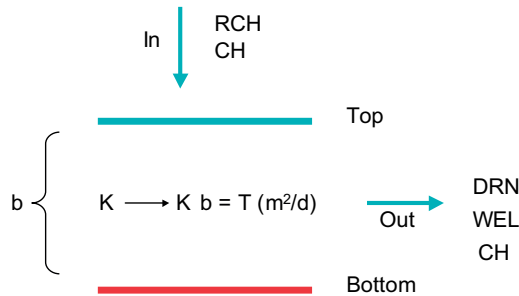
Tavoite tulee olla, että läpi koko mallinnusprosessin tietojen tarkkuus ja luotettavuus ovat kautta linjan samaa tasoa. Toisin sanoen esimerkiksi hilaruudun koon tulee olla oikeassa suhteessa tietojen määrään ja laatuun. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota tietojen dokumentointiin. On kyettävä helposti mallinnuksen jälkeenkin selvittämään, mitä tietoja eri parametrien pohjana on, mitkä ovat arvioita ja mitkä mitattuja tietoja. Mm. kairaustiedoissa on tärkeää tietää onko kalliovarmistus tehty, pohjavesihavainnosta tarvitaan aina päivämäärät jne.

Tärkeää lähtötietojen keruussa on muistaa, että malli kuvaa pohjavesiakviferia eli pohjaveden pinnasta tiiviiseen pohjaan saakka ulottuvaa pohjaveden täyttämää tilaa.

Seuraavassa luettelona ne lähtötiedot, jotka lähes aina tarvitaan mallia varten:

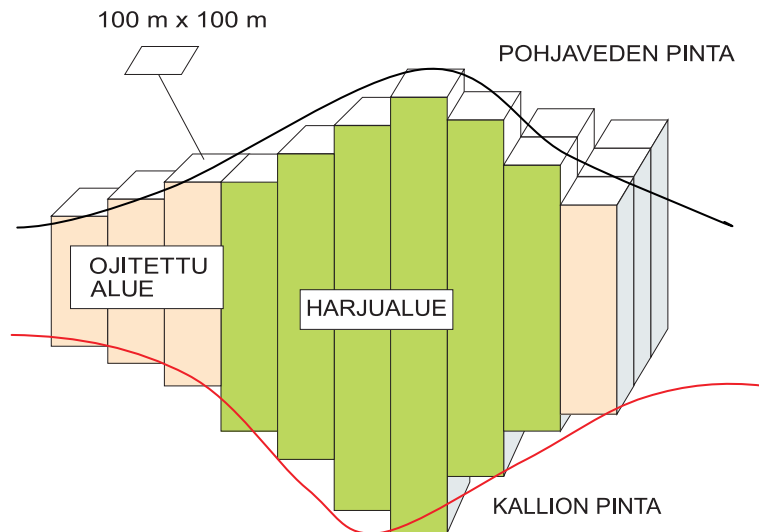
- pohjaveden pinnan korkeus
- kalliopinnan korkeus
- vedenjohtavuusvyöhykkeet (K-arvot)
- maanpinnan korkeus
- imeytymisen määrä (sadanta, haihdunta)
- lähteet (sijainti, virtaama)
- ojitetut alueet (ojien tasot, pohjan johtavuudet)
- vedenottamot (sijainti ja ottomäärät)
- pintavesistöt, jotka ovat yhteydessä akviferiin
- havaintoputket (sijainti ja pinnat)
- muut pohjavesihavaintokohteet
- varastokerroin

Kaaviokuva (kuva 5) selvittää malliin tarvittavia yleisimpiä parametreja. In = pohjavettä tulee malliin imeytymisen (RCH) ja mahdollisesti pintavesiyhteyden kautta (CH). Mallista poistuu vettä (Out) mahdollisen pintavesiyhteyden kautta sekä lähteiden ja ojien kautta (DRN) ja tietenkin vedenoton kautta (WEL). Näiden lisäksi on oltava tiedot akviferin kerrospaksuudesta (b) sekä kerrosten vedenjohtavuudesta (K), joiden avulla lasketaan vedenjohtokyky T. Kerrospaksuuksien määrittämiseen on tiedettävä akviferin yläpinta (useimmiten pohjavedenpinta) ja alapinta (ehjän kallion tai tiiviin maalajin yläpinta).



Kuva 5. Yleisimmät pohjavesimallinnuksessa tarvittavat tiedot. Lyhenteet: katso teksti.

Kolmiulotteisena tarkasteltuna ja harjualueeseen sovitettuna tilanne näyttää kuvan 6 mukaiselta, jossa 100 m x 100 m ruutukokoon jaettu harju muodostuma on eroteltu itse harjuyttimeen ja reunoilla oleviin ojitettuihin alueisiin (yleisimmin pelto/suoalueita). On huomattava että kyse on nimenomaan akviferista eli pohjaveden kyllästämästä vyöhykkeestä.



Kuva 6. Periaatekuva mallin laatimisesta harjualueelle.

5.3 Maastotutkimukset

Kairaukset

Suosittelavimpia ovat porakonekairaukset, joiden yhteydessä voidaan rekisteröidä kairausvastus ja saada näin selville maakerrosten rajat. Myös kalliopinnan varmistus onnistuu varmasti. Yleensäkin kairaukset tulisi aina tehdä läpäisemättömään pohjaan saakka, jolloin Suomen olosuhteissa kyse on tavallisimmin kallion pinnasta.

Kairauksilla haetaan pohjaveden muodostumisalueen rajoja eli akviferin pohjaa ja pintaa. Kairausten määrään vaikuttavat tietenkin alueen laajuus ja muiden lähtötietojen määrä. Sedimentologiset havainnot ovat tarpeen kairauspisteitä määrittäessä. Porakonekairauksilla voidaan myös varmistaa mm. painovoimamittausten ja muiden luotausten tietoja. Myös muilla kairaustavoilla saadaan arvokasta tietoa ja erityisesti maanäytteistä voidaan varmentaa maalajit.

Pohjavesihavainnot

Malliin on suositeltavaa käyttää samaan aikaan havaittuja pintoja. Jos havaintoja on kaikista kohteista pitkältä ajalta, on syytä analysoida ensin ovatko mm. minimi-maksimivaihtelut samansuuntaisia kaikissa käytettävissä putkissa ja mitkä putket edustavat varsinaista pohjavesimuodostumaa ja mitkä ovat hyvin vettä johtavassa vyöhykkeessä. Eri havaintopisteiden väliset gradientit (pohjaveden pinnan kaltevuus) on hyvä tarkistuskohde, jolloin jo alkuvaiheessa saadaan karsittua pois virheelliset havainnot. Havaintoputkien ja muiden mittauskohteiden korkeustasojen tarkistus tulee aina kuulua yhtenä osana tietojen oikeellisuuden varmistukseen.

Lähdevirtaamamittaukset

Lähdevirtaamamittauksia koskee sama kuin yleensäkin pohjavesihavaintoja, havaintojen tulisi olla yhtä aikaa tehtyjä ja siis samaan aikaan kuin havaintoputkien havainnot. Mittapatojen kunto tulee tarkastaa ohivuotojen varalta. Mittaustuloksissa tulee selvittää pintavalunnan osuus.

Koepumppaukset

Koepumppaustietojen käyttö liittyy ensisijaisesti vedenjohtokyvyn eli T-arvojen ja vedenjohtavuuden eli K-arvojen määrittämiseen sekä mallin vastaavien parametrien tarkistamiseen. Pumppauksen aikana mitataan vedenpinnan alenemat tietyllä ajanjaksolla ja tätä kautta saadaan laskettua T-arvot, joita sitten verrataan mallin laskemiin arvoihin.

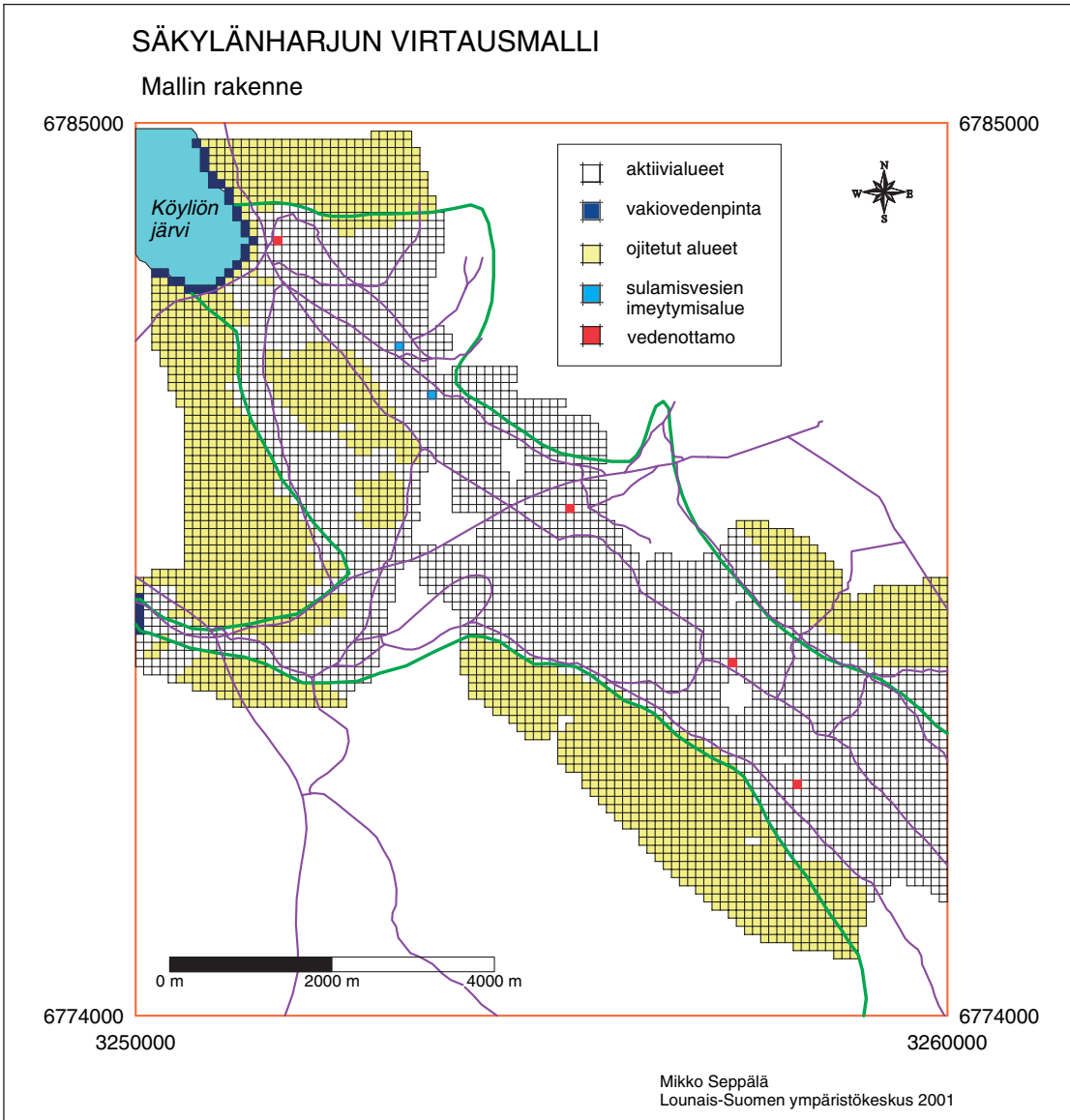
Pumppausaika voi olla lyhytkin, vain muutamia päiviä tai vain tuntejakin, kunhan saadaan selvät alenemat esille. Parasta olisi käyttää automaattisia pohjaveden pinnan rekisteröintilaitteita, jolloin saadaan samanaikaiset alenemat. Varsinkin lyhytaikaisessa pumppauksessa tämä on tärkeää. Toisaalta pitkäaikaisessa, useita kuukausia kestävässä pumppauksessa saadaan tarkastettua myös valuma-alueen laajuus ainakin osittain.

Koepumppauksen tietojen pohjalta voidaan tehdä valmiiksi kalibroidulla steady state –mallilla testiajo, jolloin oikein toimivassa mallissa alene-

mat ja aleneman laajuus vastaavat koepumppauksen tuloksia. On kuitenkin huomattava, että tasapainotilanteen saavuttaminen voi joskus viedä jopa vuosia. Mikäli on epäilyksiä, ettei tasapainotilaa ole koepumppauksessa saavutettu, on testiajo syytä tehdä muuttuvaa tilannetta kuvaavana transienttina.

Geofysikaaliset mittaukset

Painovoimamittaukset ovat mallinnuksen kannalta varsin käyttökelpoisia. Menetelmä on edullinen ja nopea ja riittävän luotettava, mikäli tarkistukset



Kuva 7. Esimerkki pohjavesimallin hilaruudukosta.

tehdään porakonekairauksin. Tavoitteena on selvittää ensisijaisesti akviferin läpäisemätön pohja (tavallisimmin kallion pinta) ja näin saadaan selville akviferin paksaus.

Gravimetristen mittausten avulla ei kuitenkaan saada tietoa irtaimen maapeitteen sisäisistä rakenteista. Seismisillä tutkimuksilla saadaan tietoa maa- ja kallioperän ominaisuuksista, kerrosrajojen ja pohjavesipinnan sijainnista. Maatutkaluotauksilla saadaan selville maaperän rakenteeseen ja pohjaveden pinnan tasoon liittyviä yksityiskohtia, mm. orsivesialueita. Useimmiten maatutkaluotauksen syvyysulottuvuus jää kuitenkin alle 20 metriin.

Maastotarkastukset

Maastotarkastus tehdään viimeistään "karkean" mallin valmistuttua. Huomio tulee kiinnittää purkautumispaikkojen hakuun ja yleensäkin muodostuman reunojen paikallistamiseen. Havaintoputkien paikkojen sijaintitiedot on syytä tarkistaa samoin kuin putkien päiden korkeudet.

Geostatistiikka

Geostatistiikassa tutkitaan ilmiöiden tai muuttujien alueellista riippuvuutta ja kehitetään matemaattisia menetelmiä, joilla muuttujan arvoja voidaan arvioida tutkittavan alueen halutuissa kohdissa. Tällaisia alueellisia pohjaveden virtauskentän kuvaamiseen liittyviä muuttujia ovat mm. pohjaveden korkeus, akviferin johtokyky, varastokerroin ja kerrospaksaus. Stokastisessa mallissa muuttujat, reuna- ja alkuehdot ym. parametrit ilmaistaan todennäköisyysjakauman avulla ja tulokset ovat tilastollisia jakaumia.

Tilastolliset laskentamenetelmät ovat tarpeen, kun arvioidaan esimerkiksi havaintoputkien määrän riittävyttä ja niiden sijainnin edustavuutta. Lisätietoja tilastollisten menetelmien käytöstä muun muassa Isaaks & Srivastava: Applied Geostatistics.

Sedimentologia

Konseptuaalista mallia luotaessa hyödynnetään sedimentologista tutkimusaineistoa pohjavesiesiintymästä. Sedimentologisen kerrostumismallin avulla voidaan sitoa yhteen muilla tutkimusmenetelmillä saadut tulokset. Lisäksi voidaan kartoittaa niitä tekijöitä, jotka ovat vaikuttaneet pohjavettä sisältävän geologisen muodostuman syntyyn ja rakenteeseen.

5.4 Konseptuaalinen malli

Konseptuaalinen malli kuvaa olemassa olevaa käsitystä mallinnettavan alueen pohjavesioloista ja geologisesta ympäristöstä. Se toimii pohjana tietokoneelle tehtävän mallin rakennetta ja reunaehtoja määritettäessä. Asiantunteva sedimentologinen tulkinta on ratkaisevassa asemassa laadittaessa konseptuaalista mallia. Sitä kautta saadaan rajattua eri geologiset yksiköt ja voidaan arvioida näiden vedenjohtavuuksien keskinäistä suhdetta. Lisäksi tarvitaan tietoja alueen hydrologiasta, kuten pohjaveden luonnollisesta täydentymisestä, haihdunnasta sekä pinta- ja pohjavesien välisestä yhteydestä.

Konseptuaalisen mallin sisältämä tulkinta tutkittavan alueen geologiasta on erityisasemassa mallin automaattista kalibrointia ajatellen, koska kalibrointiohjelmassa tulee rajata ne geologiset yksiköt, joiden sisällä malliin syötetyt parametreja arvioidaan.

Konseptuaalista mallia laadittaessa on hyvä ottaa huomioon mm. seuraavat asiat:

- Onko saatavilla riittävästi tietoja kuvaamaan alueen hydrogeologisia olosuhteita?
- Miten moneen suuntaan pohjavesi virtaa?
- Voidaanko pohjaveden virtaus tai haitta-aineen kulkeutuminen kuvata yksi-, kaksi- vai kolmiulotteisesti?
- Onko pohjavesimuodostuma koostunut useammasta kuin yhdestä akviferista ja onko pohjaveden vertikaalinen virtaus näiden akviferien välillä merkittävää?
- Mistä vesi imeytyy akviferiin (sadannasta, joista, ojista, järvistä tai jotenkin muuten)?
- Miten vesi poistuu akviferista (tihkumalla jokeen tai järveen, ojien kautta tai vedenoton seurauksena)?
- Ovato hydrogeologiset ominaisuudet samankaltaiset koko akviferissa, vai vaihtelevatko ominaisuudet suuresti paikasta toiseen.
- Miten reunaehdot on mallialueen reunoilla määritetty ja onko niillä hydrogeologiset tai geokemialliset perusteet?
- Pysyykö pohjaveden virtaus tai haitta-aineen päästölähteen olosuhteet vakiona vai vaihtelevatko ne ajallisesti?

5.5 Tietojen siirtäminen PMWin-ohjelmaan

Seuraavassa on selvitetty mallin laatimisvaiheet siten kuin ne etenevät PMWin-ohjelmassa ja samalla viitataan kyseiseen ohjelmakohtaan. Tämä ei kuitenkaan ole PMWIN-ohje, vaan sen osalta on syytä seurata varsinaista manuaalia ja käydä läpi ensimmäiseksi manuaalin kohta 2. "Your First Groundwater Model with PMWin".

Mallin rajat ja koordinaatisto

Rajat määritellään kohdassa Grid -> Mesh Size. Peruskartalta valitaan koordinaattipisteet, joiden sisään mallinnettava alue jää. On syytä valita "tasaluku" -koordinaatit ts. vähintään kaksi viimeistä numeroa ovat nolliä (koordinaatit metrin tarkkuudella). Tämä helpottaa tietojen siirtoa PMWin:n ja Surfer:n välillä. Koordinaatistona on hyvä käyttää yhtenäiskoordinaatistoa, jolloin ei synny ongelmia, jos mallinnusalueeseen sisältyy peruskarttakoordinaatistossa kaistan vaihtuminen.

Pääperiaate on ottaa mukaan mallialueeseen koko pohjaveden muodostumisalue. Keskelle mallialuetta sijoitetaan mallinnuksen kannalta mielenkiintoisin alue, eli se alue, jota varten malli tehdään.

Hilaruudukko

Hilaruutujen koko tulee suhteuttaa mallinnettavan alueen laajuuteen. Esimerkiksi mikäli mallinnusalueen koko on useampia kilometrejä suuntaansa, voidaan ruudun kooksi valita 100 m x 100 m. Mitä suurempi ruutukoko valitaan, sitä yksinkertaisempi ja yleispiirteisempi virtausmallista tulee. Toisaalta, mitä pienempiä ruutuja käytetään, sitä enemmän saadaan yksityiskohtia mukaan malliin ja sen laskemiin tuloksiin. Hilaruutujen koon valinnassa ja sitä myöten sijoittumisessa yleispiirteisyys-yksityiskohtaisuus-akselille tulee huomioida myös lähtötietojen määrä, kattavuus ja yksityiskohtaisuus. Kalibrointia ajatellen kannattaa pyrkiä siihen, että kuhunkin hilaruutuun sijoittuu korkeintaan yksi hydrogeologinen havaintopiste (esim. havaintoputki).

Hilaruutujen ei tarvitse olla kaikkien keskenään saman levyisiä. Usein halutaankin tiuhentaa ruudukkoa mallin keskialueelta eli sieltä, mistä halutaan saada tarkempi ja yksityiskohtaisempi kuva pohjaveden virtauksesta. Jyrkän gradientin kohdalla on tarpeen tiuhempi hilaruudukko kuin loivan gradientin alueella.

Harjualueita kuvaavat mallit on tähän mennessä laadittu useimmiten yksikerroksisiksi, mikä on helpoin tapa käsitellä kyseessä olevan tyyppisiä harjuja, jotka purkavat pohjavedensä harjualueen reunoille. Kuvassa 6 on esitetty mallin laatimisperiaate, jossa harjualueen vettäjohtavan kerroksen yläpinta on sama kuin pohjaveden pinta ja alapinta sama kuin kalliion pinta.

On selvää ja tunnettua, että näiden tasojen välissä on lukuisia vedenjohtavuudeltaan erilaisia maakerroksia, jotka ovat syntyneet harjun kerrostuessa. Kuitenkin on perusteltua käyttää yksikerroksista mallia, kun akviferin paksuus on huomattavan pieni suhteessa sen laajuuteen, jolloin virtauskuva on käytännössä kaksiulotteinen. Tästä yleistyksistä johtuen esimerkiksi vedenjohtavuudet kuvassa 6 olevissa "pilareissa" edustavat keskimääräistä vedenjohtavuutta pohjaveden pinnan ja kalliopinnan välillä.

Mikäli mallinnettavalla alueella on mahdollista esiintyä myös pystysuuntaista virtausta eli virtauskuva on kolmiulotteinen, tulee malli jakaa useampaan kerrokseen. Erityisesti jos kohteessa on useita akvitardien erottamia akvifereja päällekkäin tai orsivesiä ja näin ollen myös useita pohjaveden painetasoja, tulee kukin akviferi, akvitardi ja orsivesi kuvata vähintään yhtenä omana laskentakerroksenaan.

Monikerrossmallissa tulee kutakin hydrogeologisesti erityyppistä kerrosta kuvata vähintään kahdella, mieluummin kolmella kerroksella, jotta partikkelikulkeutumislaskelmissa (MODPATH, PMPATH) vältetään vääristymiltä virtausreiteissä ja viipymäajoissa. Mahdolliset vääristymät johtuvat siitä, että kuljettaessa erilaisen vedenjohtavuuden (K) omaavien laskentaruutujen välillä MODFLOW käyttää näistä K-arvoista laskettua keskiarvoa. Mikäli virtausta tapahtuu pystysuuntaan ja kutakin hydrogeologista yksikköä kuvataan vain yhdellä laskentakerroksella, ei vertikaalisen virtausreitien ja viipymän laskennassa käytetä lainkaan "aitoja" K-arvoja.

Jos virtausmallin pohjalta tehdään liuenneen aineen kulkeutumismallinnusta, on hilaruudukon koolla ja kerrosten lukumäärällä vaikutusta

aineen leviämiskuvaan numeerisen dispersion myötä. Näin ollen myös 2-ulotteisen virtauksen, jonka virtausmallintamiseen riittää yksi kerros, kohdalla saatetaan tarvita useita kerroksia siinä vaiheessa, kun mallinetaan aineen kulkeutumista. Tarvittava kerroslukumäärä ja hilaruutujen koko selviää kokeilemalla: jos liuenneen aineen levinneisyyskuva ei enää muutu, kun kerroksia lisätään tai hilaruutujen kokoa pienennetään, on hilaruudukko riittävän tiuha. Jos mallissa on xy-suunnassa eri levyisiä hilaruutuja, tulee ruudukko tiuhentaa koko mallinnettavan lika-aineenan alalta samalla tavalla, jotta vanan kohdalle saadaan mahdollisimman tasakokoiset ruudut.

Hilaruudukko joudutaan yleensä asettamaan johonkin muuhun asentoon kuin pohjois-eteläsuuntaan. Tällöin on pyrkimyksenä saada joko hilaruudukon rivit tai sarakkeet saman suuntaiseksi kuin pohjaveden määräävin virtaussuunta. Tämä on tärkeää erityisesti silloin, kun virtausmallin pohjalta tehdään myös liuenneen aineen kulkeutumismalli ja halutaan välttää numeerista dispersiota.

Kerroksen tyyppi (Type)

Kohdassa Grid -> Layer Type määritellään mallinnuskerroksen tyyppi. Vaikka harjut yleensä edustavat todellisuudessa vapaapintaista eli "Unconfined"-tyyppiä, voidaan kerrostyypiksi valita myös paineellinen pohjavesi eli "Confined", mikäli eri laskentatilanteissa ei ole odotettavissa suuria vaihteluita pohjavedenpinnan korkeuksissa suhteessa pohjavesikerroksen paksuuteen. Näin siksi, että "Confined"-laskenta on yleensä vakaampaa kuin "Unconfined"-tapauksissa.

MODFLOW-laskennassa itse asiassa käytetään laskentapisteen välillä johtavuustermiä C ("branch conductance"):

$$C = K A/L = K b W/L = T W/L$$

K = vedenjohtavuus (hydraulic conductivity)

T = vedenjohtokyky (transmissivity)

A = laskentaruutujen välisen seinän pinta-ala = b W

b = laskentaruudun korkeus, yksikerroksmallissa vettä johtavan kerroksen paksuus

W = laskentaruutujen välisen seinän leveys (width)

L = laskentapisteen välinen etäisyys

confined:

- C ei muutu laskennan aikana, vaikka pohjavedenpinta vaihtelisi kuinka paljon. Tämä johtuu siitä, että kerrospaksuus pidetään confined-laskennassa vakiona, jolloin myös T-arvo ($T = K b$) säilyy muuttumattomana pohjavedenpinnan muutoksista huolimatta.

unconfined:

- C voi vaihdella laskennan aikana tai erilaisissa laskentatilanteissa sekä eri iterointikiirroksilla. Tämä johtuu siitä, että kerrospaksuus b vaihtelee sen mukaan, miten pohjavedenpinta vaihtelee. Kerrospaksuuden myötä vaihtelee myös T-arvo eri tilanteissa.

- K-arvot kussakin laskentaruudussa ovat aina lopulliset ja muuttumattomat
- unconfined-laskennassa syötetään "lopulliset arvot"
- confined-laskennassa voidaan kullekin laskentaruudulle laskea K-arvo T-arvoista b:n avulla
- T & b vakio -> K myös vakio

Samalla kun valitaan akviferin tyyppi merkitään kohtaan "Transmissivity" Calculated eli T-arvot lasketaan edellä mainitulla tavalla.

Reunaehto (Boundary Condition)

Reunaehdot määritetään kohdassa Grid - Boundary condition. MODFLOW:ssa oletusreunaehtona on ns. no-flow -reuna, jolloin minkäänlaista virtausta ei tapahdu reunan läpi. Noflow-reunan sisältävissä ruuduissa mahdollinen virtaaminen tapahtuu silloin reunan suuntaisesti.

Pohjavesisysteemiä rajoittavat vertikaalisuunnassa akviferin ylä- ja alapinta, jotka tavallisesti ovat pohjaveden pinta ja kallion pinta. Horisontaalisuunnassa rajoittavat pohjavesimuodostumaa purkautumisalueet. Käytännössä nämä ovat tihkupintoja, ojitettuja pelto- tai suoalueita tai vesistöjä kuten jokia ja järviä.

Jos pohjaveden pinta yhtyy pintaveteen, esimerkiksi pohjavettä purkautuu järveen, merkitään tällainen rajapinta malliin vakiovedenpinnaksi = Constant head. Jokainen Constant head -ruutu merkitään arvolla -1. Pinnan korkeus annetaan kohdassa "Parameters -> Initial Hydraulic Heads.

Pitkittäisharjuissa voidaan joutua tilanteisiin, jossa harjusysteemi halutaan katkaista. Tällöin katkaisukohdaksi tulee valita alue, jonka pohjaveden pinnan korkeus olisi mahdollisimman hyvin tiedossa. Tämä alue asetetaan yleensä constant head -alueeksi (ruudut merkitään -1), jossa vedenpinta säilyy kaikissa tilanteissa aina samana. On hyvä pyrkiä saamaan tällainen raja mahdollisimman etäälle keskusalueesta (vrt. edellä), jolloin reuna-alueen vaikutukset jäävät vähäisiksi.

Joskus tunnetaan tai voidaan arvioida mallinnusalueen jollakin reunalla tapahtuva virtaus. Tällainen tunnetun virtauksen reunaehto voidaan mallissa toteuttaa mm. kaivopakotin avulla. Kun käytetään kaivoja kuvaamaan tunnetun virtauksen reunaehto, merkitään malliin sisään tulevan virtauksen kohdalla pumppausmäärä positiiviseksi ja ulosmenevän kohdalla negatiiviseksi.

Usein malleissa esiintyy reunoja, joissa kallionpinta nousee pohjavedenpinnan yläpuolelle. Tällaisilla "kuivillakin" alueilla muodostuu pohjavettä, joka voidaan syöttää malliin kallionvastaisen reunan lähetyville sijoitettujen kaivojen avulla tai vaihtoehtoisesti tekemällä tällaisen reunan lähetyville vyöhyke, jolla imeyntä on "kuivilta" alueilta tulevan veden verran suurempi kuin muissa osissa aktiivista mallinnusaluetta.

PMWin-ohjelmaa ja MODFLOW-laskentakoodia käytettäessä malli-alue rajataan suorakulmaiseksi, josta osa aluetta on mallilaskennan kannalta aktiivista ja osa inaktiivista aluetta. Yksikertaisimmillaan malli koostuu gridistä, jossa kaikki ruudut ovat aktiivisia eli osallistuvat laskentaan. Käytännössä kuitenkin mukana on myös inaktiiviruutuja ja usein myös jo edellä

mainittuja constant head -ruutuja. Inaktiiviruudut ovat sellaisia, joissa kalliion (akviferin läpäisemättömän pohjan) pinta nousee pohjaveden pinnan yläpuolelle. Käytännön mallinustyössä yksikerrosmallissa nämä alueet selvitetään vähentämällä yläpinnasta (top) alapinta (bottom), jolloin negatiivisen arvon saavat ruudut ovat inaktiivisia. Monikerrosmallissa verrataan kunkin kerroksen yläpintaa kalliionpintaan.

Inaktiivisia alueita voivat olla myös sellaiset ruudut, jotka ovat yhteydessä aktiivialueeseen pysyvän pohjavedenpinnan reunaehtoruutujen kautta. Tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi silloin, kun mallinusalue-rajauksen suorakaiteenomaisen muodon takia siihen tulee sisältyneeksi järvioluetta. Useimmiten mallissa järvestä tarvitaan vain pohjavesimuodostumaa vasten oleva ranta pysyvän pohjavedenpinnan ruuduiksi ja muu osuus järvestä on ikään kuin ylimääräistä. Tällöin tämä muu järviolue voidaan merkitä inaktiiviseksi.



Kuva 8. Mallialueen rakenne. Laskentaan osallistuva aktiivinen alue on valkoinen, harjuaalue vaalean vihreä ja harmaa alue laskennan ulkopuolinen inaktiivinen alue. CH= pysyvän vedenpinnan alue

Kerroksen ylä- ja alapinta (Top & Bottom)

Hyvin usein käytetään pohjaveden pintaa määrittäessä mallin ylimmäisen laskentakerroksen yläpintaa. Joissakin tapauksissa yläpintana voi olla myös maanpinta.

Yleensä alimman laskentakerroksen alapintana käytetään ehjän kalliopintaa. Painovoimamittauksilla saadaan laaja kokonaiskuva kalliopinnan tasosta, joka tarkistetaan porakonekairauksin. Avokallioita käytetään lopullisen kalliopinnan interpoloinnin tukena. Usein on lisäksi tarpeen muokata pintaa jälkikäteen esimerkiksi ruhjeiden alueella.

Mallin pohjana voidaan käyttää myös tiiviin, vettä huonosti johtavan maakerroksen yläpintaa. Esimerkiksi toisinaan on tapauksia, joissa kalliopinnan päällä on erittäin tiivis moreeni, joka kannattaa tällä tavalla "poistaa laskuista". Monikerrosmaalleissa kerrosten väliset rajapinnat on määriteltävä tapauskohtaisesti. Yleensä tähän käytetään erityyppisten maakerrosten välisiä rajapintoja.

Aika (Time)

Aikayksikkönä käytetään tavallisesti päivää (d), mutta PMWinissä on aikayksikkövaihtoehtoja aina vuodesta sekuntiin saakka.

Pohjavedenpinnan alkuarvo (Initial Hydraulic Head)

Pohjavedenpinnan alkuarvolla on erityistä merkitystä Constant Head -ruuduissa, joiden vedenpinta määritetään tässä osiossa. Muualla aktiivialueella vedenpinnan alkuarvoksi voi laittaa mitä vain kunhan se aktiivialueella on laskentakerroksen pohjaa korkeammalla. Laskennan nopeuttamiseksi voi käyttää interpoloitua pohjaveden pintaa eli samaa pintaa kuin käytetään Top of Layersia määrittäessä. Kun halutaan tarkastella muuttuvia (transient) virtaustilanteita, tulee lähtövedenpinnaksi asettaa aina se pinta johon laskennan tuloksia halutaan verrata. Esimerkiksi tarkasteltaessa vedenoton vaikutuksia vedenpinnan alenemaan, laitetaan lähtövedenpinnaksi mallin laskema viimeinen pinta ennen vedenoton lisäämistä, jolloin saadaan laskettua lisävedenoton aiheuttama alenema.

K-arvot eli vedenjohtavuus ja T-arvot eli vedenjohtokyky (Horizontal Hydraulic Conductivity, Transmissivity)

Akviferin vedenjohtokyky eli T-arvo saadaan lopulliseen mallin kalibroinnin tuloksena. Sedimentologisen tulkinnan pohjalta on malliin määriteltävä akviferin hyvin vettäjohtavat alueet ja jaoteltu ne vyöhykkeisiin ja annettu näille vyöhykkeille vedenjohtavuusarvot (K-arvo, $m\ d^{-1}$) siten, että eri vyöhykkeitten vedenjohtavuusarvot ovat keskenään suhteellisia. Kalibroinnin kautta saadaan sitten lopulliset T-arvot ($m^2\ d^{-1}$), joka on yhtä kuin vedenjohtavuus kerrottuna akviferin paksuudella. Toisin sanoen näillä T-arvoilla vedenpinta asettuu havaintoputkien välillä siihen kaltevuuteen kuin se on luonnossakin. Vedenjohtavuuden lisäksi vedenpintaan vaikuttavat muut mallin reunaehdot, mm. oijen taso ja johtavuus sekä imeytymisen määrä. Mallissa kuten luonnossakin muodostuvan ja purkautuvan pohjaveden määrät ovat keskimäärin yhtä suuret.

Tehokas huokoisuus (Effective Porosity)

Tämä on dimensioton suhdeluku, joka kuvaa tehokkaan huokostilan suhdetta kokonaistilavuuteen. Lukuarvona tehokkaalle huokoisuudelle harjuaalueilla on yleensä käytetty arvoa 0,2...0,25. Tätä arvoa tarvitaan mallilaskennassa, kun lasketaan PMPATHohjelmalla keskimääräistä virtausnopeutta huokoisen aineen läpi.

Varastoparametrit (Specific Storage, Storage coefficient)

Transient -simuloinnilla analysoidaan aikaan sidottuja muutoksia mallissa. Malli voi sisältää useita ajanjaksoja, joiden aikana esimerkiksi vedenottomäärät muuttuvat. Malli laskee jokaiselle jaksolle oman vedenpinnan. Tällöin malliin on lisättävä vesivaraston muutoksia kuvaavat parametrit.

Malli laskee varastokertoimen (Storage coefficient) seuraavasti:

Specific Storage (1/L) x kerrospaksuus (L)

Specific Storage on se tilavuus vettä, joka poistuu akviferin vesivarastosta pohjaveden pinnan alentumisen takia. Arvo vaihtelee $3,3E-6 \text{ m}^{-1}$ (kallio) ... $2,0E-2 \text{ m}^{-1}$ (savi). Esimerkiksi Säskylänharjun virtausmallissa on käytetty harjuaalueella arvoa $0,005 \text{ m}^{-1}$, joka kirjallisuustietojen mukaan vastaa hiekaista soraa. Tällä arvolla varastokerroin vaihtelee ko. mallialueella välillä $0...0,35 \text{ m}^{-1}$.

5.6 MODFLOW-paketit

PMWin:ssä kohdan "Models" valikosta löytyvät käyttöliittymään sisältyvät mallinnuskoodit, kuten MODFLOW, MOC, MT3D. MODFLOW:n valikosta taas löytyvät ne mallinnusparametrit, jotka voivat muuttua eri tilanteissa. Muut edellä mainitut parametrit pysyvät samoina kaikissa tilanteissa. Muuttuvia parametreja käytetään yleisimmin mm. well (kaivot), recharge (imeytyminen), drain (purkautumisalueet), river (joki) ja general head boundary (kaukainen pintavesiyhteys) -pakettien yhteydessä, jotka esitetään seuraavassa.

Kaivot (Well)

Vedenottamoiden ja talousvesikaivojen ottomäärät merkitään Well-pakettiin miinusmerkkisinä ja samoissa yksiköissä kuin muutkin mallin parametrit, esimerkiksi $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$. Jos lukema annetaan plusmerkkisenä, ko. kohdasta imeytetään malliin vettä.

Imeytyminen (Recharge)

Recharge, eli pohjaveden imeytymis- (muodostumis-) paketin avulla simuloidaan mallialueella tapahtuvaa pohjaveden muodostumista. Tätä vesimäärää arvioidaan ottamalla huomioon sadannan, haihdunnan ja pintavalunnan yhteisvaikutus.

Mallia laadittaessa annetaan jokaiseen aktiiviseen grid-ruutuun RCH-arvo Recharge-paketissa. Arvo on sadannasta pohjavedeksi imeytyvän

vesimäärän suuruus. Määrä merkitään siinä mittayksikössä, jossa kaikki muutkin malliin syötetyt arvot ovat. Esimerkiksi jos vedenjohtavuus on merkitty $m\ d^{-1}$ on imeytyminen merkittävä myös metreissä.

Imeytymisen määrittämiseen on olemassa maastokoemenetelmiä, mutta useimmiten imeytymispaketissa mallinnusalueen jako erilaisen imeytymisprosentin omaaviin vyöhykkeisiin tapahtuu kätevimmin tarkastelemalla pintamaalajeja esimerkiksi maaperäkartalta. Imeytymismäärät lasketaan käyttämällä mahdollisimman läheltä mallinnettavaa aluetta saatavia sadantatietoja sekä kullekin maalajityypille tyypillisiä imeytymisprosentteja. Imeytymisen arvioinnissa voidaan tässä vaiheessa ottaa huomioon myös haihdunta ja kasvien käyttämä vesi, jollei ole erityistä tarvetta käyttää niitä varten omaa pakettia (Evapotranspiration). Mikäli mallinnettavan kohteen pintamaalajeissa ei ole kovin suuria vaihteluita ja mallinnus tehdään yleispiirteisenä, voidaan laajalla tutkimusalueella yksinkertaisuuden vuoksi käyttää koko mallin alueella samaa imeytymismäärää.

Purkautumisalueet (Drain)

Maanpinnan korkeustieto on tarpeen määritettäessä reuna-alueiden purkautumistasoja, jollaisia ovat muun muassa ojitetut alueet. Maanpinnasta vähentämällä keskimääräinen ojitussyvyys (0,3...0,5 m) saadaan drain -soluihin vaadittava purkaustaso. Lähteiden kohdalla tulisi käyttää mitattuja tasoja. Maaston jyrkkäpiirteisyys voi olla joskus ongelma, jos hilaverkon ruutukoko on esimerkiksi 100 m x 100 m. Tällöin ruudun keskelle tuleva korkeuslukema voi poiketa paljonkin todellisesta korkeudesta.

Ojitetuille alueille annetaan jokaiseen ruutuun kaksi arvoa:

- ojan hydraulinen johtavuus = $C_d [L^2 T^{-1}]$

- keskimääräinen ojan pohjan korkeustaso = $d [L]$

Kun pohjaveden pinta (h) on oja-ruudussa korkeammalla kuin ojan pohja (d), vesi virtaa ojaan ja pois mallialueelta. Veden virtaus ojan kautta ulos mallista on nolla, kun pohjaveden pinta jää mallin laskemana alemmaksi kuin ojan pohjan korkeustaso. Purkautumisen määrä drain-solusta lasketaan seuraavasti:

$$Q_d = C_d (h - d)$$

jossa $C_d = KL$

L = ojien yhteenlaskettu pituus drain-solussa

K = ojan pohjan vedenjohtavuus, johon vaikuttaa maaperän maalaji ja ojan luonne (avo-oja, salaoja)

Useimmiten C_d :n arvo on tuntematon ja se joudutaan kalibroimaan.

Esimerkiksi $C_d = 300$ on saatu laskettua siten, että ojien johtavuus on $1\ m\ d^{-1}$ ja ojien yhteenlaskettu pituus 300 m (ojat 10 m välein $50\ m \times 50\ m$ ruudussa eli $6 \times 50\ m = 300\ m$). Jos tällaisessa ojan kohdalla pohjaveden pinta on $0,5\ m$ korkeammalla kuin ojan pohja, virtaa ruudusta vettä ulos $300\ m^2\ d^{-1} \times 0,5\ m = 150\ m^3\ d^{-1}$.

Joki (River)

Jokipaketissa tarvitaan kolme arvoa: joen pohjan ja vedenpinnan korkeus-asetmat sekä joen pohjan hydraulinen johtavuus. Kun mallin laskema pohjavedenpinta asettuu korkeammalle kuin samassa laskentaruutuun sijoitetun joen vedenpinta, alkaa vettä virrata mallista ulos. Tässä tilanteessa jokipaketti on hyvin samankaltainen kuin oja-paketti, vertailuarvona jokipaketissa vain on joen vedenpinta eikä uomien pohja, kuten oja-paketissa.

Eroavaisuus löytyy sellaisen tapauksen kohdalta, jossa mallin laskema pohjavedenpinta asettuu joen vedenpinnan alapuolelle: tällöin vettä alkaa virrata joesta sisälle malliin. Sisään virtaavan veden määrä kasvaa pohjavedenpinnan alentuessa ja saavuttaa suurimman arvonsa, kun pohjavedenpinta laskeutuu joen pohjan tasolle. Virtausmäärä ei sen jälkeen enää kasva vaikka pohjavedenpinta laskisi joen pohjaa alemmas vaan säilyy saman suuruisena kuin jos pohjavedenpinta olisi juuri joen pohjan tasolla.

Kaukainen pintavesiyhteys, GHB (General Head Boundary)

GHB-paketilla kuvataan mallinnusalueen ulkopuolella olevan, tunnetun vedenpinnankorkeuden omaavan suuren pintavesimassan - yleensä järven - vaikutusta mallin vedenpintoihin. Näin menetellen mallinnusalueetta ei tarvitse turhaan venyttää esimerkiksi järven rantaan asti. Samalla saadaan vietyä pysyvän pohjavedenpinnan reunaehdon aiheuttamat vääristymät kauemmas mallinnusalueesta. GHB-ruuduissa pohjavedenpinta voi vaihdella laskennan aikana toisin kuin pysyvän pohjavedenpinnan (constant head) ruuduissa, joissa se on koko laskennan ajan vakio.

GHB:ta voi verrata Drain ja River paketteihin sikäli, että kaikissa näissä mallin ja ulkoisen lähteen/nielun välillä tapahtuva veden virtaus on suorassa suhteessa mallin laskeman pohjavedenpinnan korkeuden ja ko. pakettiin liittyvän vertailukorkeuden väliseen eroon. Virtaus Q_b lasketaan GHB-solun johtavuuden C_b sekä GHB-solun vedenpinnan h_b ja akviferin vedenpinnan h välisen eron tulona:

$$Q_b = C_b (h_b - h)$$

Johtavuus C_b edustaa virtausvastusta pintavesilähteen ja mallinnusalueen reunan välillä ja se lasketaan seuraavasti:

$$C_b = (K A) / L$$

jossa

C_b = johtavuus

K = vedenjohtavuus

A = laskentasuolan sen seinän pinta-ala, jonka kautta GHB-pakettiin liittyvä virtaus tapahtuu

L = etäisyys mallin ulkoiseen pintavesimassaan.

5.7 Mallin kalibrointi

Mallin kalibroinnilla tarkoitetaan mallin säätämistä yhteneväiseksi sen fyysisen systeemin kanssa, jota malli kuvaa. Mallia kalibroitaessa verrataan mallin laskemia tuloksia maastohavaintoihin. Ainakin vähintään seuraavat vertailut tulisi tehdä:

- Pohjaveden pinnan korkeus
- Pohjaveden virtaussuunta
- Pohjaveden pinnan gradientti
- Vesitase (imeytyminen, purkautuminen)

Nämä vertailut tulee esittää raportissa karttoina, taulukkoina tai kuvina. Erityisen havainnollisia ovat kuvat, joissa on esitetty residuaalit eli maastossa havaittujen ja mallin laskemien pohjavedenpintojen korkeuksien erotukset.

Mallialueen kuvausta ja kertoimia tarkennetaan kunnes mallilla lasketut tulokset vastaavat havaittuja arvoja. Tässä vaiheessa lähtötietoja joudutaan usein ongelmakohdissa arvioimaan uudelleen ja tarkentaman aikaisempaa näkemystä ja konseptuaalista mallia. Konseptuaalisen mallin sisältämä tulkinta tutkittavan alueen geologiasta on erittäin tärkeä mallin kalibroinnin kannalta, koska kalibroitaessa tulee mallialue jakaa yksiköihin, joiden sisällä malliin syötettyjä parametreja arvioidaan.

Yleensä kalibrointi aloitetaan tekemällä nykytilaa tai luonnontilaa kuvaavien tilanteen simulointeja. Lisäksi simuloidaan erilaisia maastokokeita, esimerkiksi koepumppauksia ja -imeytyksiä. Mallin tulee mahdollisimman hyvin vastata koetoimintaa ennen kuin laitosmittakaavan ennusteita laaditaan.

Useimmiten kalibrointi tehdään steady state -ajoina. Jos pohjavedenpinnoissa on havaittu suuria vuodenaikaisvaihteluita, on syytä harkita myös transient-ajoja. Mikäli mallilla on myöhemmin tarkoitus tehdä muuttuvan tilanteen ennusteita eli seurata muutosten nopeutta, tulee malli myös kalibroida transientina. Transient-kalibrointia varten tarvitaan eri ajankohtina tehtyjä havaintoja vertailuarvoiksi.

Jokaisen mallin laatijan ja tulkitsijan pitää käyttää omaa harkintakykyänsä arvioidessaan mallin kalibroinnin tuloksia, sillä ei ole olemassa mitään yleisesti hyväksyttyä kriteeriä, joka kävisi kaikkiin tapauksiin. Kalibroinnin tulokset tulee suhteuttaa alueen kokoon ja niihin lähtötietoihin, joita on käytettävissä. Esimerkiksi, jos tehdään koko vuotta kuvaava steady state -ajo, voidaan hyväksyttävänä residuaaleina pitää sellaisia, jotka ovat korkeintaan vuotuisen vaihtelun suuruisia.

Kalibrointi voidaan tehdä joko perinteisellä yritys-erehdys-tekniikalla, joka on subjektiivinen ja hidas, tai tietokoneohjelmalla automaattisesti, mikä vaatii sopivan tietokoneohjelman. Yritys-erehdystekniikkaa voidaan käyttää, kun pohjavesiolosuhteet ovat yksinkertaiset tai kun virtausmallissa on voitu tehdä runsaasti yleistyksiä. Myös datan määrä vaikuttaa: mitä vähemmän dataa sitä yksinkertaisempi malli, joka on helpommin kalibroitavissa yritys-erehdys-menetelmälläkin.

Estimointiohjelmia on syytä käyttää mm. silloin, kun halutaan testata erilaisia hypoteeseja tai kun halutaan tietää korreloivatko eri parametrit keskenään. Estimointiohjelmista on suurta hyötyä myös herkkyysohjelmissä.

Automaattikalibrointi

Pohjaveden virtaussysteemejä kuvaavia numeerisia malleja voidaan kalibroida myös parametrien (muuttujien) estimointiohjelmien avulla. Esimerkiksi MODFLOWP -nimisessä ohjelmassa kalibrointi tapahtuu epälineaarisen regression avulla, missä mallia itsessään käytetään määrittämään muutokset muuttujien arvoissa. Ohjelmallisesti tapahtuvaa kalibrointiä kutsutaankin myös käänteiseksi mallintamiseksi. Yleisimmin käytettyjä parametrien estimointiohjelmia ovat jo mainitun MODFLOWP:n lisäksi UCODE ja PEST.

VIRMA -projektissa on käytetty MODFLOWP-kalibrointi-ohjelmaa. Kyse on parametrien estimoinnista, jolla tarkastetaan malliin syötettyjen parametrien keskinäisiä suhteita ja arvoja, joilla mallin ratkaisu parhaiten toteutuisi annetuilla arvoilla. Tarkastelukohteena voivat olla kaikki MODFLOW:n muuttuvat parametrit mm. imeytyminen, vedenjohtavuus, ojien johtavuudet jne. Kalibrointi on välttämätöntä, jotta malli saadaan vastaamaan todellisia olosuhteita mahdollisimman hyvin.

Lisätietoja hyvästä ja onnistuneesta kalibroinnista saa mm. MODFLOW-P-ohjelman tekijän Mary C. Hill:n oppaasta "Methods and Guidelines for Effective Model Calibration", U.S. Geological Survey 1998, jossa hän esittää 14 peruseriaa kalibroinnista.

5.8 Validointi

Validoinnissa simuloidaan sellaisia tilanteita, joista on olemassa dataa, jota ei ole käytetty kalibroinnissa. Se, miten hyvin validointiajossa laskettu tulos vastaa mitattuja havaintoja, kertoo siitä, miten hyvin mallilla voidaan ennustaa vastaavia tilanteita.

Niin tarpeellista kuin validointi onkin, ei se aina ole mahdollista. Esimerkiksi, jos mallilla halutaan tehdä useita satoja vuosia käsittävää ajanjaksoa kuvaava ennusteajo, ei vastaavaa validointiajtoa varten luonnollisestikaan ole saatavissa tarvittavaa vertailudataa. Validoinnin osalta tuleekin mallinnsdokumentissa tuoda ilmi, miltä osin malli voidaan katsoa validoiduksi (alueellinen ja ajallinen laajuus).

5.9 Herkkyysohjelmissä

Perinteisin tapa tehdä herkkyysohjelmissä on etsiä paras mahdollinen parametrijakso ja poikkeuttaa kutakin parametria vuorollaan. Useimmiten ei kuitenkaan ole olemassa yhtä ainoaa oikeaa mallia, vaan kullekin parametrille on yleensä löydettävissä jokin tietty arvoalue, joka tuottaa yhtä hyviä kalibrointituloksia. Automaattisen kalibroinnin yhteydessä on erityis-erhdys-tekniikkaan verrattuna helpompi selvittää kullekin parametrille sallittavissa oleva vaihtelu.

5.10 Ennusteajot

Kalibroinnin jälkeen mallilla tehdään varsinaiset ennusteajot, joiden avulla arvioidaan esimerkiksi lisääntyvän vedenoton vaikutusta akviferin virtauskenttään, lika-aineiden kulkeutumista pohjavedessä tai tarvittavia suoja-alueita.

Ennusteiden luotettavuus

Mallinnuksen tulosten tarkasteluun liitetään aina arvio tulosten luotettavuudesta. Luotettavuutta voidaan tarkastella esimerkiksi vertailemalla mallin herkkyyttä eri parametrien muutoksille. Varsin hankalia ovat sellaiset tilanteet, joissa ko. arvoalueen parametriarvot tuottavatkin toisistaan suuresti poikkeavia ennusteita, vaikka kalibrointilanteissa ei vaihtelua esiintyisikään.

6

Hyvä virtausmalli

Hyvän virtausmallin tuntomerkkejä ovat:

Mallinnukselle on määritelty jokin tavoite

Mallin taso akselilla yleispiirteinen-yksityiskohtainen määräytyy tavoitteen mukaan: tarvitaanko monimutkainen 3D-malli vai selviäväkö tutkittava asia riittävän hyvin jo yksinkertaisella 2D-mallilla?

Lähtötiedon määrä on sopivassa suhteessa mallin tasoon

Mallinnuksessa tarvitaan kahdenlaisia tietoja: syöttötietoja ja hydrologisia havaintoja. Syöttötietojen, esimerkiksi vedenjohtavuuden, huokoisuuden, reunaehtojen jne., avulla laskentaohjelmalle kuvataan mallinnettavaa kohdetta. Mallin laskemia tuloksia verrataan hydrologisiin havaintoihin. Useimmiten lähtötietojen määrä vaikuttaa riittämättömältä mallinnukseen, mutta on muistettava, että lisäys datassa tuottaa myös lisäyksen kalibroinnin haasteellisuudessa. Lisädatan tarpeellisuutta tulee harkita suhteessa mallinnuksen tavoitteisiin. Maastotutkimusohjelmia täsmennettäessä tulee hyödyntää virtausmallia.

Konseptuaalisen mallin laatiminen on iteroituva prosessi

Konseptuaaliseen malliin kerätään kaikki saatavilla oleva tieto kohteesta ja sen avulla päätellään, mistä dataa ei vielä ole riittävästi. Konseptuaalisen mallin laatiminen aloitetaan mahdollisimman aikaisessa tutkimusten vaiheessa ja mallia tarkennetaan sitä mukaa kuin kohteesta saadaan lisää tietoa.

Malli on sekä kalibroitu että validoitu

Mikäli tarkoitukseen sopivaa dataa on riittävästi käytettävissä, voidaan siitä osa jättää kalibroituvaiheessa huomiotta ja käyttää validointiin. Hyödyllisintä olisi tehdä validointi niin, että simuloitavat tilanteet olisivat vastaavan tyyppisiä kuin varsinaiset ennusteajotkin tulevat olemaan.

Mallinnustulosten yhteydessä esitetään arvio niiden luotettavuudesta

Arvio voi perustua validoinnin tai herkkyysanalyysin tuloksiin. Tulosten luotettavuuden arviointimenetelmän tulee tulla ilmi mallinnusdokumentista.

Virtausmallin käyttömahdollisuuksia

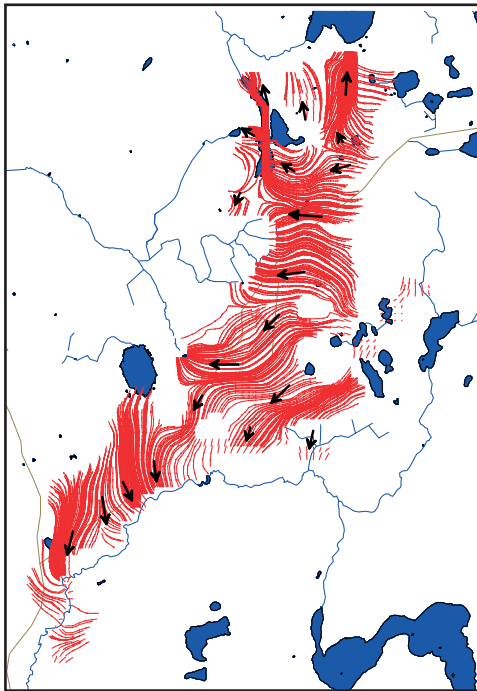
7

Kun malli on kalibroitu ja saatu toimimaan asetettujen tavoitteiden mukaisesti, voidaan sillä arvioida ja simuloida erilaisia tilanteita, joita seuraavassa esitellään.

7.1 Steady-state virtausmalli

PMWinin sisältämä PMpath -ohjelma laskee pohjaveden virtausreitit valituista mallialueen hilaruuduista käyttäen hyväksi MODFLOW –koodilla aiemmin valmistetun pohjaveden virtausmallin tietoja. Ohjelmaan voidaan syöttää halutun mittaisia ajanjaksoja, joiden aikana tapahtuvan pohjaveden virtauksen PMPath -ohjelma kuvaa graafisesti. Virtausreitit voidaan tarkastella joko päältä päin xy-tasossa tai poikkileikkauksista.

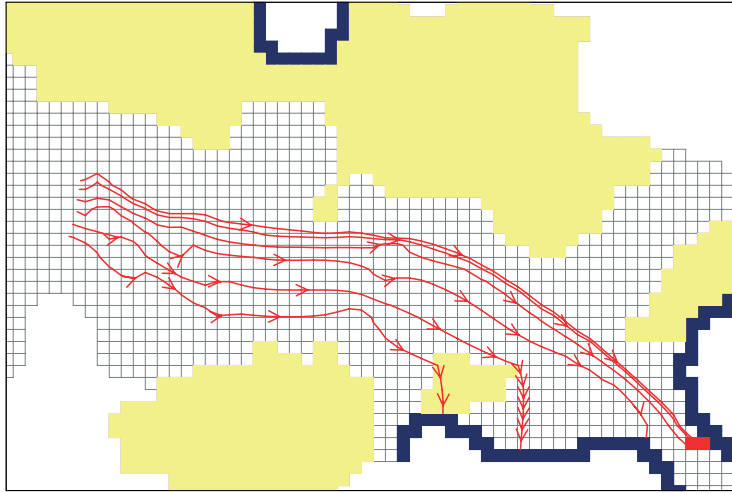
Jokaisesta hilaruudun pisteestä voidaan katsoa, mihin vesipartikkeli kulkeutuu edelleen ja mistä se on tullut. Lähtö- ja tulopiste voi olla ruudun sisällä tai ruudun sivuseinällä. Lisäksi on mahdollista asettaa useita partikkeleita em. kohtiin.



Kuva 9. PMPath-ohjelman piirtämät pohjaveden virtausreitit ja suunnat Kiikalannummella.

Virtausnopeudet

Virtausreitteihin voidaan merkitä myös kulkeutumisaika, jonka aikayksikkö voidaan valita vapaasti.



Kuva 10. Pohjaveden virtausnopeus Porokylän virtausmallissa. Nuolten väli on yksi vuosi.

Valuma-alueen rajojen määrittäminen

Pohjaveden virtausreittien avulla voidaan hakea vedenjakajat ja määrittää näin esimerkiksi vedenottamon valuma-alueen laajuus

Purkautumisalueiden sijainti

Virtausreittien ja valuma-alueiden perusteella voidaan selvittää pohjaveden pääpurkautumiskohdat ja tihkuvyöhykkeet.

Purkautumisen määrä

Pohjaveden purkautumismäärät selviävät kuten imeytymisen määrä, vesitaseesta. Tuloksia voidaan tarkastella ruuduittain, vyöhykkeinä tai koko mallialueella. Näin esimerkiksi yksittäisen lähdealueen purkautumismäärä voidaan selvittää ja verrata saatua tulosta luonnossa tehtyihin mittauksiin. Tämä onkin yksi mallin toimivuuden tarkistuskeinoja. Jos koko alueelle on laitettu vakio imeytymismäärä, osa purkautumisesta saattaa kuvata pintavaluntaa.

Alueellinen vesitase

Mallialueelta voidaan rajata ne alueet joiden vesitase halutaan selvittää.

Water budget of the whole model domain:

FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
STORAGE	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
CONSTANT HEAD	1.6691500E+04	4.7712305E+03	1.1920270E+04
WELLS	0.000000E+00	5.5010000E+03	-5.5010000E+03
DRAINS	0.000000E+00	7.1689055E+04	-7.1689055E+04
RECHARGE	6.5267996E+04	0.000000E+00	6.5267996E+04
ET	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
RIVER LEAKAGE	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
HEAD DEP BOUNDS	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
STREAM LEAKAGE	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
INTERBED STORAGE	0.000000E+00	0.000000E+00	0.000000E+00
SUM	8.1959500E+04	8.1961281E+04	-1.7812500E+00
DISCREPANCY [%]	0.00		

Taulukko 1. Virtausmallin waterbudget-tiedostosta saadaan mm. koko mallialueen vesitase. Määrät on ilmoitettu $m^3 d^{-1}$

Imeytymisen määrä (RCH)

Mallin laskemasta vesitaseesta voidaan suoraan lukea imeytymisestä muodostuneen pohjaveden kokonaismäärä. Erillisellä "työkalulla" voidaan lisäksi määrittää mikä tahansa mallialueen kohta, josta halutaan tarkastella imeytymisen määrää.

Antoisuuden määrittäminen

Vesitaseesta saadaan koko pohjavesialueen antoisuus eli muodostuvan pohjaveden määrä. Kun virtausreitien avulla on määritetty valuma-alueen rajat, voidaan valuma-alue tai sen osa rajata vesitaselaskennassa omaksi alueeksi ja näin saadaan tietää mm. muodostuvan pohjaveden määrä ko. alueella.

Vedenottopaikkojen määrittäminen

Virtausreitien määrittäminen ja sitä kautta purkautumisalueiden sijainnin selvitys auttaa hakemaan parhaat vedenottopaikat. Lisäksi on mahdollista selvittää, miten pohjavesiolosuhteet muuttuvat, kun vedenotto aloitetaan; riittääkö vesi tarpeeseen ja mitkä ovat vedenoton ympäristövaikutukset.

Vedenoton vaikutusten arviointi

Vedenoton muutokset on selkeästi suurin pitkällä aikavälillä pohjavesioloihin vaikuttava tekijä. Aikaisemmin onkin ollut vaikeaa arvioida, miten tietyn suuruisen vedenoton lisääminen vaikuttaa mm. lähdevirtaamiin. Virtausmalliin voidaan antaa tarkastelujakson pituus haluttuna aikayksikkönä, jolloin voidaan tarkastella muutosta ajan suhteen tai sitten tarkastellaan muutosta steady-state tilanteessa vain ottomäärän lisäyksenä.

Muodostuman rakenteen selvitys

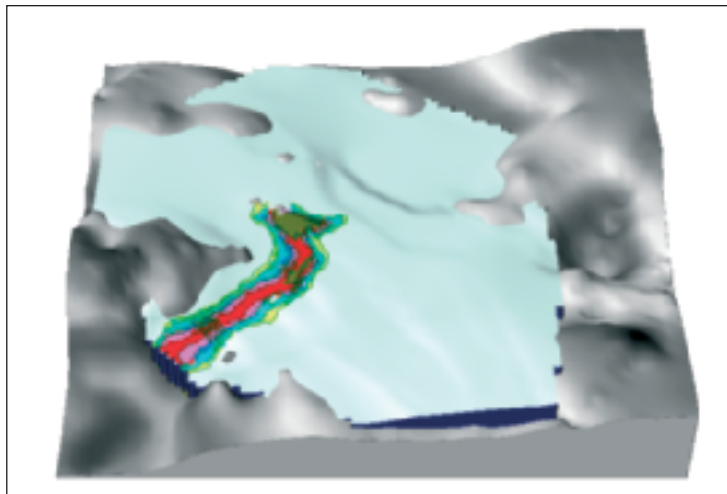
Mallia laadittaessa ja ennen muuta kalibrointivaiheessa voidaan tehdä päätelmiä muodostuman geologisesta rakenteesta. Tällöin ensisijaisesti kiinnostaa hyvin vettäjohtavien kerrosten sijainti ja taso. Lisäksi saadaan selville pohjaveden purkautumisalueet, jotka myös kertovat muodostuman rakenteen muuttumisesta tällä kohdalla. Näin esimerkiksi harjun ydin- ja reunaosat saadaan määriteltyä. On huomattava, että vain kalibroidulla virtausmallilla voidaan riittävällä tarkkuudella osoittaa ko. alueet.

7.2 Transient-virtausmalli

Muuttuvia tilanteita, esimerkiksi vuodenaikoihin liittyvistä imeynnän vaihteluista tai vedenotosta johtuvia muutoksia, on ollut aikaisemmin vaikea arvioida. Transient-mallinnuksella saadaan kuva siitä, miten nopeasti pohjavedenpinnat muuttuvat ja kuinka kauan kestää saavuttaa tasapainotila erilaisten olosuhdemuutosten jälkeen. Transient-mallinnuksessa voidaan kaikkiin kyseisessä mallissa käytettäviin paketteihin sisällyttää ajallinen vaihtelu. Tällöin mallille ilmoitettu laskenta-aika jaetaan jaksoihin ja kuhunkin jaksoon voi sisältyä erilaiset laskenta-arvot, esimerkiksi kaivopakettissa eri suuruiset pumppausmäärät kussakin jaksossa tai imeyntäpaketissa erilaiset imeynnän määrät eri aikajaksoissa.

7.3 Visualisointi

Nykyiset atk-ohjelmat antavat oivan apuvälineen myös mallin tulosten tarkasteluun ja esittämiseen kuvina, mikä lisää selvästi informaatiota. 3D-kuvat sekä animaatiot kuvaruudulla antavat aivan uusia mahdollisuuksia tarkastella tuloksia.



Kuva 11. Aineen leviämisen visualisointi Nummelan alueella. Kuva on tehty SURFER-ohjelmalla.

Käytännön esimerkki

Seuraavassa tarkastellaan PMWin-ohjelmaa hyväksi käyttäen Varsinais-Suomessa sijaitsevan Virttaa-Oripää välisen harjujakson pohjavesioloja ja alueelle suunnitellun vedenhankinnan vaikutuksia.

Lähtötiedot

Ko. alueelle on tehty virtausmalli, joka on kooltaan 7 km x 12 km. Alue on jaettu 100 m x 100 m ruutuihin.

Waterbudget -työkalulla saadaan selville, että harjujakson keskiosalla sijaitsevan Myllylähteen virtaama on noin 6000 m³ d⁻¹ (kohta in-out taulukossa 2). Tämä vastaa varsin hyvin lähteen pitkäaikaista keskivirtaamaa.

TIME STEP 1 OF STRESS PERIOD 1			
ZONE = 1 LAYER = 1			
FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
DRAINS	0.0000000E+00	5.9763965E+03	-5.9763965E+03

Taulukko 2. Virtausmallin waterbudget-tiedostosta saadaan tarkasteltavan osa-alueen vesitase. Määrät ilmoitettu on m³ d⁻¹.

Alueella on käytössä Oripään kunnan vedenottamo, josta keskimääräinen vedenotto on noin 500 m³ d⁻¹. Lisäksi Turun Seudun Vesi Oy:llä on alueella lupa ottaa 5000 m³ d⁻¹ ja vielä Virttaan kylän läheisyyteen on rakennettu koekaivo, josta on tehty koepumppaus teholla 8700 m³ d⁻¹, joka määrä voitaisiin mahdollisesti ottaa ko. paikasta.

Myllylähde kuuluu arvokkaisiin pienvesistöihin ja on Natura-kohte. Lisäksi Virttaan kylässä on yksityinen pohjavesilammikko, jonka ylivirtaama on noin 500 m³ d⁻¹ ja mallin laskemana sama. Virttaan kylässä on useita talousvesikaivoja, joissa vesipesän syvyys on vain muutamia kymmeniä senttimetrejä.

Oletetaan, että vesioikeus olisi määrännyt vedenottolupaa antaessaan, että vedenottajan tulee huolehtia siitä, että Myllylähteen virtaama tulee olla vähintään 5000 m³ d⁻¹.

Lupaa varten selvitettävät asiat

1. Vedenoton vaikutukset edellä mainittuihin lähdevirtaamiin.
2. Vedenoton vaikutukset kaivojen vedenpintoihin.
3. Voidaanko esimerkiksi tekopohjavettä muodostamalla korvata haitalliset alenemat.
4. Millä alueella tekopohjavettä kannattaa muodostaa.

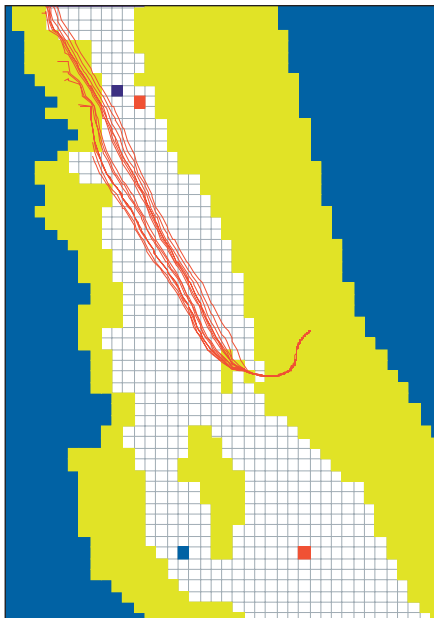
Työvaiheet

1. Lisätään mallin well-pakettiin Turun Seudun Vesi Oy:n kaivo Ori-päänkankalla ja merkitään sen ottomääräksi $5000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Ajetaan MODFLOW ja katsotaan Waterbudget:ista vedenoton vaikutus Myllylähteeseen (taulukko 3). Lähteen virtaama on nyt $4500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ eli virtaama pieneni $1500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

TIME STEP 1 OF STRESS PERIOD 1			
ZONE = 1 LAYER = 1			
FLOW TERM	IN	OUT	IN-OUT
DRAINS	0.000000E+00	4.5195366E+03	-4.5195366E+03

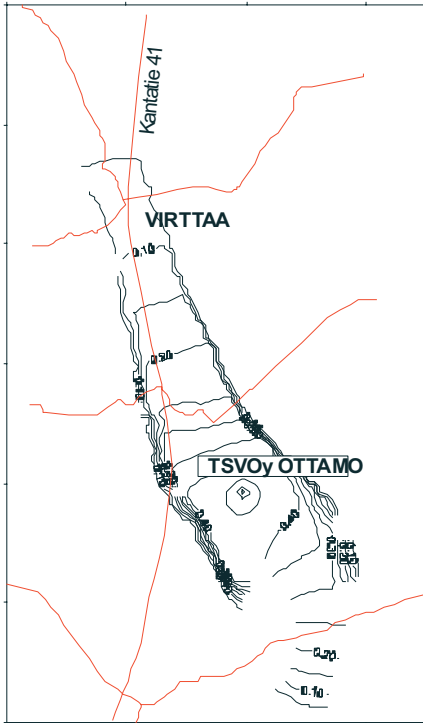
Taulukko 3. Virtausmallin waterbudget-tiedostosta saadaan tarkasteltavan osa-alueen vesitase. Määrät on ilmoitettu $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$.

2. Katsotaan PMPATH-ohjelman avulla, mistä päin vesi virtaa Myllylähteeseen vedenottotilanteessa. (Kuva 12)

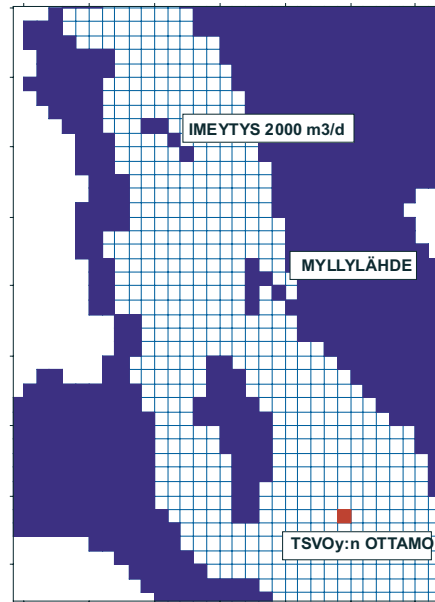


Kuva 12. Pohjaveden virtausreitit harjualueen reunalla olevaan Myllylähteeseen. TSV Oy:n ottamo on punainen ruutu alareunassa.

3. Selvitetään PMWin:issä, mikä on aleneman suuruus ja siirretään tiedot SURFER-ohjelmaan sama-arvokäyrien piirtämiseksi. Oteetaan erityisesti Virtaan kylän alueen alenemat lähempään tarkasteluun. (Kuva 13)
4. Sijoitetaan virtausviivojen kohdalle neljään ruutuun kaivo, josta imeytetään jokaiseen ruutuun $500 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ eli yhteensä $2000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Ajetaan MODFLOW. (Kuva 14)



Kuva 13. Pohjaveden pinnan alenemat vedenoton vaikutuksesta (cm). Ottomäärä on $5000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$



Kuva 14. Imeytysruutujen sijainti.

5. Katsotaan waterbuget:in avulla, mikä on nyt Myllylähteen virtaama. Virtaama on $5090 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Näin vesioikeuden vaatimukseen tällä järjestelyllä toteuttaa.
6. Katsotaan vielä alenemien suuruus PMWin:istä, kun imeytys on käynnissä, ja verrataan sitä tilanteeseen, jossa ei imeytystä ollut.

9

Aineen kulkeutumisen mallinnus

Aineen kulkeutumismallilla ennustetaan vesiliukoisten aineiden liikkumista ja konsentraatiota. Aiemmin mainitun partikkelikulkeutumismallin MOD-PATH:in (PMPATH) avulla voidaan arvioida advektion vaikutusta liuenneen aineen kulkeutumiseen. Partikkelikulkeutumismallilla ei voida arvioida liuenneen aineen pitoisuuksia, sillä malli ei ota huomioon dispersiota eikä myöskään mitään aineeseen mahdollisesti liittyviä reaktioita. Kuitenkin partikkelikulkeutumismallia voidaan käyttää käteväenä välivaiheena siirryttäessä virtausmallinnuksesta liuenneen aineen kulkeutumismallinnukseen.

Liuenneen aineen mallinnuksessa lähtötietona tarvitaan virtausmallista saatu pohjaveden korkeuksien jakauma. Huomioimalla hydrodynaaminen dispersio eli liuenneiden aineiden leviäminen virtausta vastaan kohtisuorassa suunnassa, voidaan pohjaveden virtausnopeuden perusteella laskea aineen kulkeutuminen. Yksittäisiä kemiallisia reaktioita voi myös olla mallissa mukana.

Liuenneen aineen kulkeutumiseen liittyvien yhtälöiden ratkaisuun on olemassa useita eri koodeja, mm. MT3D, MOC3D, MOC, MT3DMS ja HST3D. Kulkeutumismallin valmistaminen on erittäin vaativaa ja mallin tuloksiin kannattaa suhtautua kriittisesti. Toisaalta liuenneet aineet toimii tahattomana merkkiaineena, jonka avulla saadaan tarkempi kuva virtausnopeuksista. Tällöin on paremmat mahdollisuudet löytää myös virtausmalliin yksikäsitteinen ratkaisu.

Kulkeutumismallin yhteydessä voidaan harjoittaa teleskooppimallinnusta eli "leikata" alkuperäisestä virtausmallista erilleen se osuus, jota nimenomaisesti halutaan tarkastella. Näin laskenta-aikaa saadaan huomattavasti lyhennettyä. Vaihtoehtoisesti voidaan tihentää "leikatun" alueen hilaruudukkoa tai jakaa useampiin kerroksiin ja näin saada samassa laskenta-ajassa entistä tarkempi kuva pohjaveden virtauksesta ja aineen kulkeutumisesta.

PMWin sisältää HST3D:tä lukuun ottamatta kaikki edellä mainitut laskentakoodit ja mahdollisuuden syöttää tiedot kulkeutumismalliin, jolloin virtausmallin tietoja täydennetään päästölähteen tiedoilla, joita ovat mm. sijainti, pohjaveteen joutuvan aineksen määrä ja aineen ominaisuudet ja mahdolliset kemialliset reaktiot. Aineen liikkuminen pohjavedessä voi olla hyvinkin erilaista veteen verrattuna. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. advektio eli aineen liikkuminen maaperässä, dispersio eli aineen hajaantuminen, sorptio eli aineen pidäytyminen sekä aineen biohajoaminen. Näitä kaikkia ominaisuuksia voidaan tarkastella toimivan kulkeutumismallin avulla.

Tavallisimmin tarkastellaan kulkeutumista ajan suhteen muuttuvana eli transient- mallina, mutta virtausmallissa on käytännön syistä käytettävä

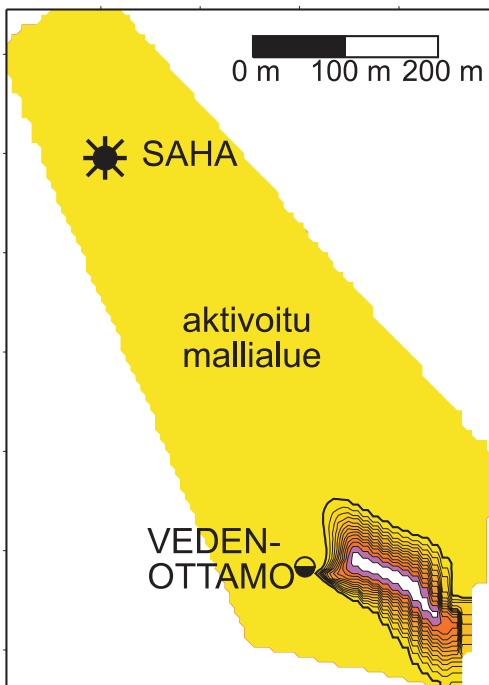
steady state -tilannetta kulkeutumismallin pohjana. Tällöin virtauskuva sekä kaikki pohjaveden muodostumiseen ja purkautumiseen vaikuttavat tekijät pysyvät vakioina, mutta aineen pitoisuudet ja levinneisyys pohjavedessä muuttuvat ajan myötä. Jos laskenta tehdään niin, että sekä pohjaveden virtauskuva että aineen kulkeutuminen muuttuvat ajan funktiona, tulee varautua erittäin pitkiin laskenta-aikoihin.

Esimerkkinä MT3D-käytöstä voidaan mainita kokeilu eräällä mallialueella, jossa on suunniteltu ottaa käyttöön vedenottamo. Ottamoon nähden ylävirran puolella on ollut saha, jonka toiminta on päätynyt noin 30 vuotta sitten. Sahalla on käytetty kloorifenoleja, lähinnä Ky5-sinistykseenestoinetta. Aineen kulkeutumismalliin syötettiin arvioidut päästömäärät ja annettiin edellä mainitut ominaisuustiedot, joista pääosa saatiin suoraan kirjallisuudesta ja osa jouduttiin laskemaan.

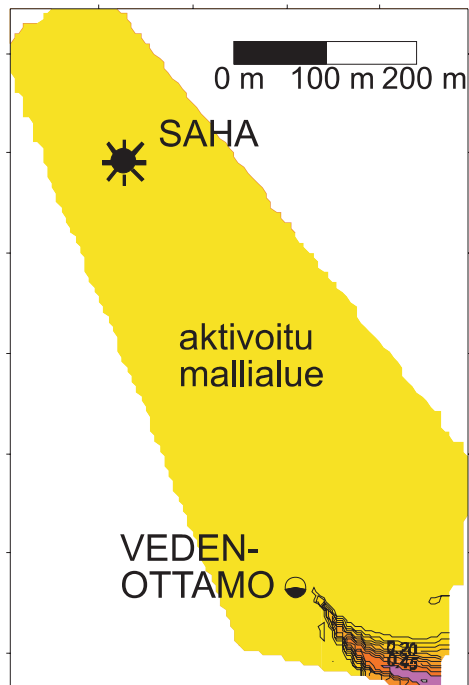
Mallilla tarkasteltiin seuraavia tilanteita:

1. Saha toimi vuosina 1950-70 eli 20 vuoden ajan; mikä oli kloorifeonolipitoisuus pohjavedessä toiminnan päättyttyä ja miten laajalle aine oli levinnyt.
2. Miten tilanne ja päästö oli liikkunut 10 vuoden kuluttua toiminnan päättymisestä.
3. Missä päästö oli nyt n. 50 vuotta toiminnan alusta ja mikä oli pitoisuus.
4. Miten vaikutti kaivon käynnistäminen 50 vuoden kuluttua toiminnan aloittamisesta.
5. Mikä oli tilanne kun kaivo oli ollut toiminnassa 5 vuotta.
6. Mikä oli tilanne kun kaivo oli ollut toiminnassa 10 vuotta.

Normaalioloissa, kun kaivo ei ole käytössä, kestää pohjaveden virtaus sahan alueelta ottamoalueelle noin 1,5 vuotta (etäisyyttä on noin 1 km). Kuitenkin haitta-ainevana oli liikkunut 10 vuoden kuluttua toiminnan päättymisestä vasta n. 200 m. 30 vuoden kuluttua eli nykyhetkellä vana lähestyy juuri kaivoaluetta ja alkaa poistua harjualueen reunalla olevien lähteiden kautta. Kaivon käyttöönotto käänsi vanaa kohti kaivoa ja lika-aine oli havaittavissa vielä 10 vuoden kuluttua kaivon käyttöönotosta.



Kuva 15. Kulkeutumismallin MT3D antama kuva kloorifenolin liikkumisesta ja leviämisestä. Kokonaissimulaatioaika 55 vuotta, josta saha on toiminut 20 vuotta, sen jälkeen ei ole ollut toimintaa 30 vuoden ajan ja seuraavaksi on vedenotto käytössä 5 vuoden ajan.



Kuva 16. Kuvan 15 tilanteen jälkeen vedenotto on jatkunut 5 vuotta. Kokonaissimulaatioaika 60 vuotta. Kloorifenoli alkaa poistua harjunalueen reunojen lähteistä.

Pohjaveden virtausmallin käytännön sovelluksia

10

Kt 41 suojaus

Turun tiepiirin toimeksiannosta Lounais-Suomen ympäristökeskus selvitti virtausmallin avulla ne tiealueet kantatie 41:llä, joilta pohjavesi virtaa kohti tulevia vedenottamoja. Mallin avulla voitiin tarkastella sitä tilannetta, jossa ottamot ovat käytössä. Näin voitiin simuloida tulevia tilanteita ja arvioida varsin luotettavasti, miten virtausreitit muuttuvat vedenoton vaikutuksesta. Samoin voitiin arvioida virtausnopeuksien muuttumista.

Köyliön Kuninkaanlähteen virtaamat

Köyliön Kankaanpään kylässä on vuosikymmenet oltu eri mieltä vedenoton vaikutuksista Kuninkaanlähteen virtaamaan. Asiaa on käsitelty kahdessa katselmustoimituksessa ja viimeisimmän päätöksen on antanut vesiylioikeus, jossa Kuninkaanlähteen virtaama määriteltiin siksi, mitä se oli ollut ennen vedenoton aloittamista. Silloisen virtaamamittausmenetelmän oikeellisuudesta on esitetty epäilyjä.

Virtausmallin avulla voitiin tarkastella mm. harjun reuna-alueen ojituksen vaikutusta lähdevirtaamaan ja myös Säskylänharjulla tapahtuvan vedenoton vaikutuksia. Asian tarkastelua vaikeuttaa Kuninkaanlähteen ja vedenottamoiden välisen harjujakson hyvin vaihteleva geologinen rakenne. Virtausmallin laatimisessa hyödynnettiin alueelta tehtyä sedimentologian väitöskirjaa ja myös päinvastoin eli väitöskirjaan on saatiin uutta ja sedimenttitulkintoja tukevaa tietoa.

Virttaan kaivon rakentaminen ja koepumppauksen haittojen ennakointi

Virtausmallin avulla on määritetty Virttaan kylän alueelle uusi kaivonpaikka, josta on tarkoitus hakea lupa vedenottomäärälle $5000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Ko. paikalle rakennettiin siiviläputkikaivo, josta tehtiin kesällä 1997 koepumppaus teholla $8700 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Pumppauksen aiheuttamia vedenpinnan alenemia verrattiin virtausmallin alenemiin. Erot olivat muutamia cm ja vaikutusalueen todellinen laajuus yhteneväinen virtausmallin laskeman alueen kanssa. Koepumppauksesta saatujen alenemiin avulla laskettiin Thiemin menetelmällä harjuakviferin T-arvot ja ne olivat hyvin samanlaisia kuin mallin laskemat (n. $22\,000 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ kaivoalueella). Laskenta tehtiin Adept-ohjelmalla, joka toimii Mathcadohjelman alla.

Eurajoen kaatopaikan haitallisuuden arvio

Eurajoen kunnan vanha kaatopaikka on ollut peitettynä useiden vuosien ajan. Kaatopaikka sijaitsee pitkittäisharjussa, jolta kunta ottaa vettä kahdesta ottamosta, joista toinen on noin 1 km päässä ja toinen noin 1,5 km päässä kaatopaikasta. Mallitarkastelun avulla päädyttiin tulokseen, että toiselle ot-

tamolle ei ole hydraulista yhteyttä kaatopaikalta ja toiselle ottamolle veden kulkeutuminen kaatopaikka-alueelta kestää noin 1 vuoden. Aineen kulkeutumismallia ei laadittu. Mutta on tiedossa, että useimpien haitta-aineiden kulkeutumisaika on huomattavasti veden kulkeutumisaikaa pidempi. Mallilla selvitettiin myös kaatopaikan vesitasetta eli miten paljon vettä tulee kaatopaikalle ja miten paljon sitä poistuu.

Lopputuloksena oli, että kaatopaikka aiheuttaa ilmeisen riskin vedenottamolle ja kaatopaikka siirrettiin pois Lounais-Suomen ympäristökeskuksen ja kunnan yhteistyönä.

Valtatie 8:n rakentamisen vaikutukset Maskun pohjavesialueeseen

Virtausmallin avulla tarkasteltiin uusien tielinjauksien vaikutuksia pohjavesioloihin. Uusi tie kulkee nelikaistaisena pohjavesialueen keskellä olevien lammikoitten päältä. Lammikot täytettäisiin tien rakentamisen yhteydessä. Mallilla voitiin selvittää pohjaveden pintojen muutokset alueella olevilla kahdella vedenottamalla eri vedenottomäärillä sekä erilaisilla täyttömateriaaleilla.

Tekopohjaveden muodostamisen optimointi ja ympäristövaikutusten arviointi

TAVASE-projektissa (Tampereen ja Valkeakosken seudun kuntien vedenhankinta) tehtiin kolmelle eri pohjavesialtaalle (koekaivot 1,2 ja 3) kullekin oma virtausmallinsa. Kunkin mallinnusalueen kohdalla löytyi sellaiset imeytyksen ja pumppauksen määrät, että viipymät ovat pienimmillään yli kuukauden luokkaa, jolloin ne ovat riittävät tekopohjaveden muodostamiseen etenkin ottaen huomioon imeytykseen tarkoitettun veden hyvän laadun. Simulointien perusteella kaivojen 1 ja 2 alueilla ei ole odotettavissa kovin suuria ylenemiä ja imeytysalueidenkin kohdalla tulee jäämään 20-40 m kyllästymätöntä vyöhykettä. Kaivon 3 alueella sitä vastoin on odotettavissa merkittävämpiä ylenemiä johtuen kalliokynnyksestä, joka imeytetyn veden täytyy ylittää matkallaan kohti pumppauskaivoa. Mallinnustuloksia on hyödynnetty TAVASE-hankkeen YVA-selvityksessä.

Tiedostojen hallinta

Mallin laatimisessa käytettyjen tietojen dokumentointi on olennainen osa mallinnustyötä. Erilaisia tiedostoja syntyy satoja ja niiden hallinta on mahdollista ilman selkeää tietojenhallintajärjestelmää. On tärkeää, että myös muut kuin itse mallintaja löytää tarvittavat tiedostot ja saa myös selvää niiden sisällöstä.

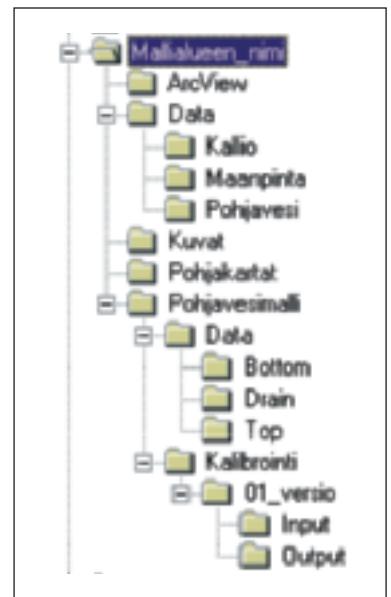
Ensimmäinen tehtävä dokumentoinnissa on luoda looginen hakemistorakenne kaikelle tallennettavalle tiedolle. Käytännön mallinnustyössä on jo löydetty tietyt vakiintuneet kaavat, joita suositellaan käytettäväksi. Yhteinen systeemi on kaikkien etu. Myös päivittäinen varmuuskopioiden teko tulee olla itsestään selvyyttä.

11.1 Hakemistorakenteet

Perusrungon mallinnuksen hakemistorakenteelle tulisi olla oheisen esimerkin mukainen. Tätä voi pitää minimivaatimuksena. Usein on tarpeen tehdä lisää alihakemistoja mm. Kuvat- ja Data -hakemistoihin. Virtausmalleja saattaa olla erilaisia versioita ja näitä varten tarvitaan omat hakemistot jne. Hakemistojen nimeämisessä olisi hyvä noudattaa oheisen kuvan 17 mukaista menettelyä.

11.2 Tiedostojen nimeäminen

Jos hakemistorakenne on tärkeä, on vielä tärkeämpää nimenä tiedostot loogisesti ja yhteisesti hyväksytyllä tavalla tai ainakin noudattaen yhtenäistä linjaa kautta koko mallinnuksen. Päivämäärän lisääminen on hyvä keino pysyä mukana eri versioiden tulvassa. Tärkeää on myös poistaa tarpeettomat tiedostot, joita myös syntyy kymmeniä ellei satojakin mallinnusprosessin aikana. Yksityiskohtaisempia ohjeita ei juuri ole mahdollista antaa ja jokainen joutuukin itse usein kantapään kautta opiskelemaan, kuinka tärkeää edellä mainitut asiat ovat ja miten tulee menetellä.



Kuva 17. Esimerkki pohjavesimallinnuksessa käytettävästä hakemistorakenteesta.

12

Raportointi

Mallinnustyön raportointi voisi noudattaa yhtenäistä kaavaa, jolloin raportista olisi aina löydettävissä oleelliset tiedot. On selvää, että jokainen malli ja raportti sisältävät erilaisia tavoitteita ja tuloksia, mutta alla on esitetty yksi käytännössä hyväksi koettu sisällys raportille:

Sisällys

Yleistä

Maastotutkimukset

- Yleistä
- Sedimentologia
- Painovoimamittaukset
- Maatutkimukset
- Seismiset mittaukset
- Kairaukset
- Pohjaveden pinnan korkeuden seuranta

Kohteen geologia & hydrologia

- Morfologia
- Sedimentologia
- Hydrologia

Pohjavesimallin laatiminen

- Käytetty mallikoodi ja muut tietokoneohjelmat
- Lähtötiedot
- Mallialueen rajausta (Ibound)
- Koordinaatisto
- Aika ja muut mittayksiköt
- Vettä johtava kerros (Top of Layer)
- Kalliopinnan taso (Bottom of Layer)
- Vedenjohtavuus (Horizontal Hydraulic Conductivity) ja vedenjohtokyky (Transmissivity)
- Tehokas huokoisuus (Effective Porosity)
- Ojitetut alueet ja lähteet (Drain)
- Imeytyminen (Recharge)
- Vedenottamot (Wells)

Mallin kalibrointi

Pohjavesimallin tuloksia

- Pohjavesialueen rajausta
- Pohjaveden pinta
- Pohjaveden määrä, vesitase
- Pohjaveden virtausreitit
- Pohjaveden virtausnopeus
- Pohjaveden purkautuminen

Arvio mallin luotettavuudesta

Virtausmallin edelleen kehittäminen

Kirjallisuus

Liitekartat

Mallin käyttöoikeudet

Mallin käyttämistä kaupallisiin tarkoituksiin suojaa tekijänoikeuslaki. Jatkossa malleja tullaan siirtelemään sekä mallin alkuperäiseltä laatijalta tilaajalle että eteenpäin seuraavalle mallintajalle edelleen kehitettäviksi. Tällöin tulisi aina erikseen sopia ehdoista, joilla kukin mallia työstänyt tai muuten mallin tietoja tarvitseva taho saa käyttöönsä viimeisimmän version jatkokehitetyistä mallista.

Samoin kuin pohjavesialuekarttojen pitäisi myös virtausmallien olla käytettävissä, kun uusissa hankkeissa kootaan aiempia tietoja. Tulevaisuudessa, kun malleja alkaa olla yhä useammasta alueesta ja yhä useamman tekijän tekemänä, syntyy tilanteita, joissa viranomaisen joutuu tekemään päätöksiä "vanhentuneiden" tietojen pohjalta. Se, miten tämä vältetään, tulisi ratkaista pikaisesti. Yhtenä ratkaisuna on, että viranomaiset ovat mukana mallinnuksessa aina, kun se vain on mahdollista.

Sanastoa

advektio	Liuenneen aineen liikkuminen pohjavesivirtauksen mukaisesti.
aktiivialue akviferi	Se osa hilaruudukosta, joka on mukana laskennassa. Pohjaveden kyllästämä ja vettä hyvin johtava maa- tai kallioperän muodostuma. Se on hydraulisesti yhtenäinen muodostuma, joka voi antaa käyttökelpoisia määriä vettä. Akvifereja sisältyy mm. yhtenäisiin hiekka- ja sorakerrostumiin ja ruhjeisiin kallioalueisiin. Akviferi voi olla vapaa tai paineellinen.
akviferin yläpinta akviferin pohja	Pohjavedenpinta tai salpaavan kerroksen alapinta. Vettäjohtavan kerroksen alapuolella olevan tiiviin kerroksen yläpinta, esimerkiksi ehjä kallio tai tiivis moreeni.
differenssimenetelmä	Pohjaveden virtausta kuvaavat osittaisdifferentiaaliyhtälöt korvataan likiarvoyhtälöillä, jotka muodostetaan approksimoimalla derivaattoja.
dispersio	Liuenneen aineen hajaantuminen pohjaveden virtauksen suunnassa ja sivulle päin sekä samanaikainen pitoisuuden pieneneminen.
FEFLOW	Finite Element subsurface FLOW system, pohjaveden virtauksen ja aineen sekä lämmön kulkeutumisen mallinnukseen käytetty tietokoneohjelma.
FEMWATER	Finite-Element Groundwater Modeling, pohjaveden virtauksen ja aineen kulkeutumisen mallinnukseen käytetty tietokoneohjelma.
GIS grid hilaverkko	Geographic Information System, paikkatietojärjestelmä. Mallinnuksessa käytetty hila- eli laskentaruudukko. Numeerisissa malleissa mallinnettava alue diskretoidaan eli jaetaan osiin laskentaa varten. Elementtimenetelmässä käytetään vapaamuotoista elementtiverkkoa, differenssimenetelmässä suorakulmaista laskentaruudukkoa.
hilaruutu	Hilaruudukon osa, laskentapiste. Laskennassa kunkin ruudun kohdalla käytetään siihen ruutuun syötettyjen parametrien arvoja.
HST3D	Heat- and Solute-Transport Program, pohjavesivirtauksen sekä aineen ja lämmön kulkeutumisen mallinnukseen käytetty tietokoneohjelma.
huokoisuus	Maarakeiden väliin jäävän huokostilan suhde maamassan kokonaistilavuuteen.
hydraulinen johtavuus hydrogeologia	Katso K-arvot. Luonnontiede, joka tutkii pohjaveden ja sen geologisen ympäristön vuorovaikutussuhteita ja pohjavesi-ilmiöitä, erityisesti geologisten tekijöiden vaikutusta pohjaveden fysikaaliseen käyttäytymiseen ja kemialliseen koostumukseen.

inaktiivialue input	Se osa hilaruudukosta, joka ei ole mukana laskennassa. Malliin syötetyt tiedot. Mallinnusohjelma lukee laskennassa tarvitsemansa tiedot input- eli syöttötiedostoista. MODFLOWn tapauksessa syöttötiedostot laaditaan kätevimmin graafisen käyttöliittymän, kuten PMWin, avulla.
kalibrointi	Mallin kalibroinnilla tarkoitetaan mallin säätämistä yhteneväiseksi tutkittavan fyysisen systeemin kanssa.
K-arvo	Hydraulinen johtavuus (K) kuvaa huokoisen väliaineen (esim. maa-aineksen) läpi kulkevan veden virtausvastusta. Darcyn kaavan ($Q = K A dh/dl$) määrittelemä vedenläpäisevyys, jonka suuruus riippuu huokoisen väliaineen ja veden ominaisuuksista. Ilmoitetaan matkan yksiköissä aikaa kohti.
konseptuaalinen malli	Konseptuaalinen malli kuvaa olemassa olevaa käsitystä mallinnettavan alueen pohjavesioloista ja geologisesta ympäristöstä. Konseptuaalisen mallin sisältämä tulkinna tutkittavan alueen hydrogeologiasta on erityisasemassa pohjaveden virtausmallin automaattisen kalibroinnin kannalta, koska kalibrointiohjelmaan tulee kuvata ne geologiset yksiköt, joiden sisällä malliin syötettyjä parametreja arvioidaan.
Kriging	Tilastollinen interpolointimenetelmä, jolla painokertoimet valitaan tilastollisen kriteerin mukaan mallintamalla alueellinen riippuvuus. Jotta krigingä voidaan käyttää, tulee havaintojen välinen alueellinen riippuvuus mallintaa eli tarvitaan funktio joka kuvaa miten lähekkäiset havaintoarvot riippuvat toisistaan. Tähän useimmiten käytetään empiiristä semivariogrammia, jota varten lasketaan havaintopisteiden pareittaiset etäisyydet ja niihin liittyvät havaintopisteiden arvojen neliöidyt erotukset. Kriging on optimaalinen interpolointimenetelmä, mutta vain jos variogrammi on 'oikea'.
lähtötiedosto matemaattinen malli	Katso input. Matemaattinen kuvaus pohjavesisysteemissä tapahtuvista prosesseista. Nämä osittaisdifferentiaaliyhtälöt voidaan ratkaista analyyttisesti tai numeerisesti.
MOC	Method of Characteristics, pohjavesivirtauksen ja aineen kulkeutumisen mallinnukseen käytetty tietokoneohjelma.
MODFLOW	Modular Three-dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model, pohjavesivirtauksen mallinnukseen käytetty tietokoneohjelma.
MODPATH	Particle-tracking postprocessor model for MODFLOW, partikkelien kulkeutumisen mallinnukseen käytetty tietokoneohjelma.
MT3D	Modular three-dimensional Transport model, aineen kulkeutumisen mallinnukseen käytetty tietokoneohjelma.

MT3DMS	Modular three-dimensional Multi-Species Transport model, aineen kulkeutumisen mallinnukseen käytetty tietokoneohjelma.
muuttuva virtaus	Katso transientti.
numeerinen dispersio	Laskennassa tapahtuva liuenneen aineen tahaton ylimääräinen hajaantuminen, joka johtuu yleensä joko siitä, että tilan tai ajan diskretointi eli jakaminen osiin ei ole onnistunut tai siitä, että hilaruudukon ja sitä myöten laskennan suuntaus ei ole todellisen virtauksen mukainen.
output	Mallinnusohjelman tuottamat tulokset ja tulostiedostot, joita voidaan käsitellä graafisen käyttöliittymän avulla tai tarkastella itsenäisinä tiedostoina esimerkiksi käyttämällä tekstieditoria.
parametri	Jotain tiettyä ominaisuutta kuvaavan suureen arvo tietyssä paikassa tai tilanteessa.
permeabiliteetti	Katso K-arvot.
PMPATH	Katso MODPATH.
pysyvä virtaus	Katso steady state.
PMWIN	Processing Modflow for Windows, graafinen käyttöliittymä mallinnusohjelmaan.
residuaali	Maastossa havaittujen ja mallin laskemien pohjavedenpintojen korkeuksien erotus.
reunaehto	Tunnetaan reunan kautta malliin tulevan tai siitä purkautuvan veden tai aineiden määrä. Vaihtoehtoisesti, tunnetaan vedenpinnan korkeus tai aineen pitoisuus reunan kohdalla.
sedimentologia	Sedimentologisen tutkimuksen tavoitteena on systemaattista maaperäkerrosten kuvausta ja luokittelua käyttäen tulkitta muodostuman syntyyn vaikuttaneet prosessit ja erilaiset kerrostumisympäristöt sekä laatia muodostuman syntyä ja rakennetta kuvaava kerrostumismalli.
sensitiivisyys	Herkkyysanalyysin avulla selvitetään, millaiset vaikutukset parametriarvoille sallittavalla vaihtelulla on kalibroidun mallin antamiin tuloksiin.
stationaari virtaus	Katso steady state.
Steady state	Pysyvässä eli stationaarissa virtauksessa virtaustekijät pysyvät ajan suhteen muuttumattomina.
stokastinen malli	Stokastisessa mallissa muuttujat, reuna- ja alkuehdot ym. parametrit ilmaistaan todennäköisyysjakauman avulla ja tulokset ovat tilastollisia jakaumia.
syöttötiedosto	Katso input
T-arvo	Transmissiviteetti eli vedenjohtokyky riippuu muodostuman dimensioista ja kerrosten hydraulisesta johtavuudesta. Se tarkoittaa siis kerrosten kykyä kuljettaa vettä ja sen symboli on T. Transmissiviteetti voidaan laskea kertomalla hydraulinen johtavuus K vettä johtavan patsaan paksuudella b eli $T = K b$. Ilmoitetaan matkan toisen potenssin yksiköissä aikaa kohti.

tehokas huokoisuus	Tehokkaiden, toisiinsa yhteydessä olevien huokosten ja maamassan koko tilavuuden suhde. Virtauksen kannalta merkittävä huokoisuus.
tehoton huokostila	Toisesta päästä suljetut umpiperät ja kuolleet taskut sekä huokostilan pinnoille sitoutuneen veden täyttämä tilavuus.
transient	Muuttuva eli transientti virtaus on veden virtauslaji, jossa virtaustekijät muuttuvat ajan mukana. Tilavuusalkion vesivarasto joko suurenee tai pienenee tarkasteltavana aikavälinä.
Transmissiviteetti	Katso T-arvo.
tulostiedosto	Katso output
validointi	Validoinnilla tarkoitetaan sellaisten tilanteiden simuloimista, joista on olemassa mittaushavaintoja, joita ei ole käytetty kalibroinnissa.
vedenjohtokyky	Katso T-arvo.
vesitase	Kuvaus kohteeseen (luonnossa akviferi tai sen osa, laskennassa malli tai sen osa-alue) sisään tulevista ja ulos menevistä vesimääristä eri siirtymistavoittain (imeytyminen sadannasta, pumppaus, tihkuminen, purkautuminen ojiin jne.).
waterbudget	Katso vesitase.

Lähteet

- Akin, H. & Siemes, H. 1988. *Praktische Geostatistik*. Springer-Verlag Berlin.
- Akkanen, H. 1988. Pohjaveden numeeriset mallit ja niiden käyttö Suomessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Vesi- ja ympäristötekniikan laitos. 114 s.
- Anderman, E. R. & Hill, M. C. 2000. The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Flow Model - Documentation of the Hydrogeologic_Unit (HUF) Package. USGS Open-File Report 00-0342. 89 s.
- Andersen, P. F. 1993. A manual of instructional problems for the U.S.G.S. MODFLOW model. Scientific Software Group, Washington, DC.
- Anderson, M. P. 1979. Using models to simulate the movement of contaminants through ground water flow systems. *Critical Reviews in Environmental Control* 9(2), s. 97-156.
- Anderson, M. P. 1984. Movement of contaminants in groundwater: Groundwater transport - advection and dispersion. In: *Groundwater Contamination*. Washington, DC, National Academy Press. S. 37-45.
- Anderson, M. P. & Woessner W. W. 1992. *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. San Diego, Academic Press. 381 s. ISBN 0-12-059485-4.
- Artimo, A. 1997: Maskun harjualueen pohjavesien virtausmalli. Pro gradu -tutkielma. Turun yliopisto, Geologian laitos, Maaperägeologian osasto. 59 s., 6 liites.
- Artimo, A. & Mäkinen, J. 2001. Three-dimensional geologic modeling and visualization of the Virttaankangas aquifer - A new framework for groundwater flow models. In: Seo, H. S., Poeter E., Poeter O. & Chunmiao Z. (toim.). MODFLOW 2001 and other modeling odysseys, Proceedings Volume I. International Ground Water Modeling Center (IGWMC), Colorado School of Mines, and the U.S. Geological survey. S. 256-262.
- Artimo, A. 2003. Three-dimensional geologic modeling and numerical groundwater modeling of Finnish aquifers: a new approach for characterization and visualization. *Turun yliopiston julkaisuja*. Sarja A. II. *Biologica-Geographica-Geologica* 168. 62 s.
- Ashcraft, C.C. & Grimes, R.G. 1988. On vectorizing incomplete factorization and SSOR preconditioners. *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*, v. 9, no. 1, s. 122-151.
- Baetsle, L. H. 1967. Computational methods for the prediction of underground movement of radionuclides. *J. Nuclear Safety* (8)6, s. 576-588.
- Bear, J., 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. New York, American Elsevier Pub. Co.
- Bear, J., 1979. *Hydraulics of Groundwater*. New York, McGraw-Hill. 569 s.
- Bear, J. & Verruijt, A. 1987. *Modeling groundwater flow and pollution, theory and applications of transport in porous media*. Dordrecht, Holland, D. Reidel Publishing Company. 414 s. ISBN 1-55608-015-8.
- Behie, A. & Forsyth, P. Jr., 1983, Comparison of fast iterative methods for symmetric systems. *IMA J. of Numerical Analysis* (3), s. 41-63.

- Berg, R.C. & Thorleifson, L.H. 2001. Geological models for groundwater flow modeling. Geological Society of America North-Central Section, Workshop Extended Abstracts, Illinois State Geological Survey, Open File Series 2001-1. 62 s.
- Cheng, X. & Anderson, M. P. 1993. Numerical simulation of ground-water interaction with lakes allowing for fluctuating lake levels. *Ground Water*, v. 31, no. 6, s. 929-933.
- Chiang, W.-H. & Kinzelbach, W. 1993. Processing Modflow (PM), Pre- and postprocessors for the simulation of flow and contaminants transport in groundwater system with MODFLOW, MODPATH and MT3D.
- Chiang, W.-H., 1994, PMPATH for Windows. User's manual. Scientific Software Group. Washington, DC.
- Chiang, W.-H., Kinzelbach, W. & Rausch, R. 1998, Aquifer Simulation Model for Windows - Groundwater flow and transport modeling, an integrated program. Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart, ISBN 3-443-01039-3.
- Chiang, W.-H. & Kinzelbach, W. 1998. Processing Modflow. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution. PMWIN –ohjelman ohjekirja. 325 s.
- Chunmiao Z. & Bennett G. D. 1995. Applied Contaminant Transport Modeling, Theory and Practice. Van Nostrand Reinhold, The United States of America. 440 s.
- Clement, T. P. 1997. RT3D - A modular computer code for simulating reactive multi-species transport in 3-dimensional groundwater systems. Battelle Pacific Northwest National Laboratory Research Report, PNNL-SA-28967. Richland, Washington. 59 s.
- Cooper, H. H. Jr., & Rorabaugh, M. I. 1963. Ground-water movements and bank storage due to flood stages in surface streams. USGS Water-Supply Paper 1536-J. 23 s. ISSN 0886-9308.
- Coster de, A., Granlund, K. & Soveri, J. 1993. Tiesuolan pohjavesivaikutusten mallintaminen Joutsenonkankaalla. Tielaitoksen selvityksiä 33/1993. Tielaitos, Helsinki. 53 s.
- Davis, J. C. 1973. Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons, Inc.
- Doherty, J. 1990. MODINV - Suite of software for MODFLOW pre-processing, post-processing and parameter optimization. User's manual. Australian Centre for Tropical Freshwater Research.
- Doherty, J., Brebber, L. & Whyte, P. 1994. PEST - Model-independent parameter estimation. User's manual. Watermark Computing. Australia.
- Domenico, P. A. 1972, Concepts and Models in Groundwater Hydrology, N.Y., McGraw-Hill. 405 s.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. New York, John Wiley & Sons. 824 s.
- Englund E. & Sparks, A. 1991. User's guide of GEO-EAS - Geostatistical environmental assessment software, EPA 600/8-91/008.
- Fenske, J. P., Leake, S. A., & Prudic, D. E. 1996. Documentation of a computer program (RES1) to simulate leakage from reservoirs using the modular finite-difference ground-water flow model (MODFLOW). USGS Open-File Report 96-364, 51 s. ISSN 0196-1497.
- Fetter, C. W. 1994. Applied Hydrogeology, 3rd Edition. New York, Macmillan College, 691 s.

- Franke, R. 1982. Scattered data interpolation: Tests of some methods. *Mathematics of computation* (38)157, s. 181-200.
- Freeze, R. A. & Cherry, J. A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall. 604 s.
- Frenzel, H. 1995. A field generator based on Meija's algorithm. Institut für Umweltp Physik, University of Heidelberg, Germany.
- Gelhar, L. W. & Collins, M. A. 1971. General analysis of longitudinal dispersion in nonuniform flow. *Water Resources Research* 7(6), s. 1511-1521.
- Gelhar, L. W., Mantoglou, A., Welty, C. & Rehfeldt, K. R. 1985. A review of field-scale physical solute transport processes in saturated and unsaturated porous media. EPRI Report EA-4190, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- Gelhar, L. W., Welty, C. & Rehfeldt, K. R. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research* 28(7), s. 1955-1974.
- Granlund, K. & Nystén, T. 1991. Pohjavesimallit ja niiden soveltaminen. Helsinki, Vesi- ja ympäristöhallituksen monistesarja 286, 30 s. ISBN 951-47-4108-0, ISSN 0783-3288.
- Hantush, M. S. & Jacob, C. E. 1955. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer, *Trans. Am. Geophys. Un.* 36(11), s. 95-100.
- Harbaugh, A. W. 1995. Direct solution package based on alternating diagonal ordering for the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. USGS Open-File Report 95-0288. 46 s. ISSN 0196-1497.
- Harbaugh, A. W. & McDonald, M. G. 1996a. User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. USGS Open-File Report 96-0485. ISSN 0196-1497.
- Harbaugh, A. W. and M. G. McDonald, 1996b. Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite difference ground-water flow model. USGS Open-File Report 96-0486. ISSN 0196-1497.
- Higgins, G. H. 1959. Evaluation of the groundwater contamination hazard from underground nuclear explosives. *J. Geophys. Res.* (64), s. 1509-1519.
- Hill, M. C. 1990a. Preconditioned Conjugate-Gradient 2 (PCG2), A computer program for solving groundwater flow equations. USGS Water-Resources Investigations Report 90-4048. 43 s. ISSN 0092-332X.
- Hill, M. C. 1990b. Solving groundwater flow problems by conjugate-gradient methods and the strongly implicit procedure, *Water Resources Research*, 26(9), s. 1961-1969. ISSN 0043-1397.
- Hill, M. C. 1992. A computer program (MODFLOWP) for estimating parameters of a transient, three-dimensional, groundwater flow model using nonlinear regression. USGS Open-file report 91-0484. 358 s. ISSN 0196-1497.
- Hill, M. C. 1998. Methods and guidelines for effective model calibration. USGS Water-Resources Investigations Report 98-4005. 90 s. ISSN 0092-332X.
- Hoschek J. & Lasser, D. 1992. *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*, B. G. Teubner Stuttgart, Germany.
- Hsieh, P. A. 1986. A new formula for the analytical solution of the radial dispersion problem, *Water Resources Research*, 22(11), s. 1597-1605. ISSN 0043-1397.
- Hsieh P. A. & Freckleton, J. R. 1993. Documentation of a computer program to simulate horizontal-flow barriers using the U. S. Geological Survey's modular three-dimensional finite-difference ground- water flow model. USGS Open-File Report 92-0477. 32 s. ISSN 0196-1497.

- Hunt, B. 1983. *Mathematical analysis of groundwater resources*. Butterworths, Cambridge.
- Isaaks, E. H. & Srivastava R. M. 1990. *Applied geostatistics*, Oxford University Press. 592p.
- Javandel, I., Doughty, C. & Tsang, C. F. 1984. *Groundwater transport: Handbook of mathematical models*. American Geophysical Union. 228 s.
- Jorgensen, D. G. 1980. Relationships between basic soils-engineering equations and basic groundwater flow equations. USGS Water-Supply Paper 2064. 40 s. ISSN 0083-1131.
- Kinzelbach, W., Marburger, M. & Chiang, W.-H. 1992. Determination of catchment areas in two and three spatial dimensions. *J. Hydrology*, 134, s. 221-246.
- Kinzelbach, W., Ackerer, P., Kauffmann, C., Kohane, B. & Möller, B. 1990. FINEM, Numerische Modellierung des zweidimensionalen Strömungs- und Transportproblems mit Hilfe der Methode der finiten Elemente. Programmdokumentation Nr. 89/23 (HG 111), Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart.
- Kipp, K. L. 1987. HST3D: A computer code for simulation of heat and solute transport in three-dimensional groundwater systems. USGS Water Resources Investigations Report 86-4095. 517 s.
- Kipp, K. L., Konikow, L. F. & Hornberger, G. Z. 1998. An implicit dispersive transport algorithm for the U.S. Geological Survey MOC3D Solute-Transport Model MOC3D. USGS Water-Resources Investigations Report 98-4234. 54 s. ISSN 0092-332X.
- Kling, T., Niemi, A. & Pirhonen, V. 1993. Tiesuolan pohjavesivaikutukset - kulkeutumismekanismien moni-ilmiömallinnus. Tielaitoksen selvityksiä 65/1993. Tielaitos, Helsinki. 74 s.
- Konikow, L. F. & Bredehoeft, J. D. 1978. Computer model of two-dimensional solute transport and dispersion in ground water. USGS Water Resources Investigations. Book 7, Chapter C2. 90 s.
- Konikow, L. F., Goode, D. J. & Hornberger, G. Z. 1996. A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D). USGS Water Resources Investigations report 96-4267. 97 s. ISSN 0092-332X.
- Kuiper, L. K. 1981. A comparison of the incomplete Cholesky conjugate gradient method with the strongly implicit method as applied to the solution of two-dimensional groundwater flow equations, *Water Resources Research*, 17(4), s. 1082-1086. ISSN 0043-1397.
- Kuiper, L. K. 1987. Computer program for solving ground-water flow equations by preconditioned conjugate gradient method. USGS Water-Resources Investigations Report 87-4091. 34 s. ISSN 0092-332X.
- Laukkanen, R., Saijonmaa, L. & Niini, S. 1991. Pohjavesimallitus päätöksenteon pohjana, Osa I: mallin kalibrointi. *Vesitalous*, n:o 2. s. 19-27.
- Leake, S. A. & Prudic, D. E. 1991. Documentation of a computer program to simulate aquifer-system compaction using the modular finite-difference groundwater flow model. USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, Chapter A2. 68 s.
- Leonard, B. P. 1979. A stable and accurate convective modeling procedure based on quadratic upstream interpolation. *Computer Methods Appl. Mech. Engng.*, 19, s. 59.

- Leonard, B. P. 1988. Universal Limiter for transient interpolation modeling of the advective transport equations: the ULTIMATE conservative difference scheme, NASA Technical Memorandum 100916 ICOMP-88-11.
- Leonard, B. P. & H. S. Niknafs. 1990. Costeffective accurate coarse-grid method for highly convective multidimensional unsteady flows, NASA Conference Publication 3078: Computational Fluid Dynamics Symposium on Aeropropulsion, April 1990.
- Leonard, B. P. and H. S. Niknafs. 1991. Sharp monotonic resolution of discontinuities without clipping of narrow extrema, *Computer & Fluids*, 19(1), s. 141-154.
- Mathéron, G. 1963. Principles of geostatistics, *Economic Geology* (58), s. 1246-1266.
- McDonald, M. G. & Harbaugh A. W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, Chapter A1. 586 s.
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., Orr, B. R. & Ackerman, D. J. 1991. A method of converting no-flow cells to variable-head cells for the U.S. Geological Survey Modular Finite- Difference Groundwater Flow Model. USGS Open-File Report 91-0536. 99 s. ISSN 0196-1497.
- Mejia and Rodriguez-Iturbe, 1974. On the synthesis of random field sampling from the spectrum: An application to the generation of hydrologic spatial processes. *Water Resources Research*, 10(4), s. 705-711.
- Moench, A. F. & Ogata, A. 1981. A numerical inversion of the Laplace transform solution to radial dispersion in a porous medium. *Wat. Res. Res.*, 17(1), s. 250-253.
- Neuman, S. P. 1984. Adaptive Eulerian-Lagrangian finite element method for advection- dispersion. *Int. J. Numerical Method in Engineering* (20), s. 321-337.
- Niini, H. & Niini, S. 1995. *Vesigeologia: Hydrogeologia*. Teknillinen korkeakoulu, Espoo. 176 s.
- Nystén, T. 1993. Kärkölen likaantuneen pohjavesialueen geologia ja matemaattinen mallintaminen. Helsinki, Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja -sarja A 135. 86 s. ISBN 951-47-7164-8. ISSN 0786-9592.
- Nystén, T., Granlund, K., Kivimäki, A.-L. & Tuominen, S. 1995. Tiesuolan pohjavesivaikutusten mallintamistutkimukset Miekkämäen alueella. Tielaitoksen selvityksiä 29/1995. 116 s. + liit. 19. ISBN 951-726-067-9, ISSN 0788-3722, TIEL 3200307.
- Oakes, B. D. & Wilkinson, W. B. 1972. Modeling of ground water and surface water systems: I - Theoretical relationships between ground water abstraction and base flow. Reading, Great Britain, Reading Bridge House, Water Resources Board, no. 16. 37 s.
- Pannatier, Y. 1996. *Variowin, Software for spatial data analysis in 2D*, Springer. ISBN 0-387-94679-9.
- Poeter, E. P. & Hill, M. C. 1997. Inverse Models: A Necessary Next Step in Ground-Water Modeling. *Ground Water*, Vol.35, No. 2, s. 250-260. ISSN 0017-467X.
- Poeter E. P. & Hill, M. C. 1998. Documentation of UCODE, a computer code for universal inverse modeling. USGS Water-Resources Investigations Report 98-4080. 116 s. ISSN 0092-332X.
- Pollock, D. W. 1988. Semianalytical computation of path lines for finite difference models. *Ground Water* (26)6, s. 743-750. ISSN 0017-467X.

- Pollock, D. W. 1989. Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U. S. Geological Survey modular three-dimensional finite-difference ground-water model. USGS Open-file report 89-0381. 188 s. ISSN 0196-1497.
- 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 groundwater flow model. USGS Open-file report 94-0464. 249 s. ISSN 0196-1497.
- Prudic, D. E. 1988. Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite-difference, ground-water flow model. USGS Open-File Report 88-0729. 113 s. ISSN 0196-1497.
- Refsgaard, J.C. & Henriksen, H.J. 2004. Modelling guidelines - terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources* 27 (2004), s. 71-82.
- Renka, R. J. 1984b. Algorithm 624: Triangulation and interpolation at arbitrarily distributed points in the plane. *ACM Transactions on Mathematical Software* (10), s. 440-442.
- Saad, Y. 1985. Practical use of polynomial pre-conditionings for the conjugate gradient method. *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*, 6(4), s. 865-881.
- Schaars F. W. & van Gerven, M. W. 1997. Density package, Simulation of density driven flow in MODFLOW. KIWA-report SWS 97.511, ISBN 90-74741-42-8. KIWA Research & Consultancy, Nieuwegein. The Netherlands.
- Schäfer, D., Schäfer, W. & Therrien, R. 1997. TBC - An efficient simulator for three dimensional groundwater flow + multispecies transport + reactions in porous formations. Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg.
- Shepard, D. 1968. A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data. *Proceedings 23rd. ACM National Conference*, s. 517-524.
- Stone, H. L. 1968. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations, *SIAM J. Numer. Anal.* (5), s. 530-558.
- Sun, N.-Z., 1995. *Mathematical modeling of groundwater pollution*. Springer. 377 s.
- Travis, C. C. 1978. *Mathematical description of adsorption and transport of reactive solutes in soil: A review of selected literature*. Oak Ridge Natl. Lab. ORNL-5403.
- Trescott, P.C., 1975, *Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional ground-water flow: U.S. Geological Survey Open-File Report 75-438*, 32 p.
- Trescott P. C. & Larson, S. P. 1977. Comparison of iterative methods of solving two-dimensional groundwater flow equations. *Water Resources Research* 13(1), s. 125-136.
- Tuominen, S. 1995. Geologisiin ja geofysikaalisiin tutkimuksiin ja koepumppaukseen perustuva Leppävirran vedenhankintaan liittyvä kalliopohjaveden matemaattinen mallintaminen. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Materiaali- ja kalliotekniiikan laitos, Espoo. 80 s.
- Tuominen, S. M. 1999. Tekopohjaveden ja rantaimetytmisen matemaattinen mallintaminen Kangasalan Vehoniemenharjulla. *Lisensiaattityö, Teknillinen korkeakoulu, Materiaali- ja kalliotekniiikan laitos, Espoo*. 24 s. + liitt.

- Watson, D. F. 1992. Contouring - A guide to the analysis and display of spatial data (with programs on diskette). Pergamon, ISBN 0-08-040286-0.
- Verruijt, A. 1982. Theory of groundwater flow. The Macmillan Press Ltd, Hong Kong. 144 s.
- Wexler, E. J. 1992. Analytical solutions for one-, two- and three-dimensional solute transport in groundwater systems with uniform flow. USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 3, Chapter B7, 190 s.
- Wilson, J. L. & Miller, P. J. 1978. Two-dimensional plume in uniform ground-water flow. J. Hyd. Div., ASCE(4), s. 503-514.
- Zheng, C. & Bennett, G. D. 1995. Applied contaminant transport modeling: Theory and practice. New York, Van Nostrand Reinhold. 440 s.
- Zheng, C. 1990. MT3D, a modular three-dimensional transport model, S.S. Papadopoulos & Associates, Inc., Rockville, Maryland.
- Zheng, C., 1993. Extension of the method of characteristics for simulation of solute transport in three dimensions. Ground Water 31(3), s. 456-465.

Linkkejä

Pohjavesimallinnukseen liittyviä internetlinkkejä on tuhansia. Tässä muutamia, joista löytyy linkkejä eteenpäin:

- <http://water.usgs.gov/software/modflow.html>
- <http://www.scisoftware.com/>
- <http://www.waterloohydrogeologic.com/>
- <http://www.groundwater.com/>
- <http://www.goldensoftware.com/>
- <http://spider.nitg.tno.nl:80/eng/index.shtml>
- <http://www.mindspring.com/~rbwinston/rbwinsto.htm>
- <http://www.argusint.com/>
- <http://www.ems-i.com/>

Kuvailulehti

Julkaisija	Suomen ympäristökeskus	Julkaisu-aika Elokuu 2005	
Tekijä(t)	Mikko Seppälä ja Sirkku Tuominen		
Julkaisun nimi	Pohjaveden virtauksen mallintaminen		
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut	Julkaisu on saatavana myös internetistä: http://www.ymparisto.fi/julkaisut		
Tiivistelmä	<p>Vuosina 1999-2004 toteutettiin ympäristöhallinnossa VIRMA-projekti (Pohjaveden virtausmallit vedenhankinnassa ja pohjaveden suojelussa). Projektissa koulutettiin ympäristökeskusten asiantuntijoita käyttämään sen hetkistä tietotekniikkaa pohjavesitutkimuksessa ja tutkimustiedon soveltamisessa niin vedenhankinnassa kuin maankäytön suunnittelussa. Tämän oppaan tarkoitus on yleisellä tasolla selvittää pohjaveden virtausmallin laatimista Suomen olosuhteissa kirjoittajien omien mallinnuskokemusten pohjalta. Oppaassa tarkastellaan käytännön laatimistyön lisäksi mm. malliin tarvittavia tietoja sekä mallin käyttömahdollisuuksia erilaisissa ympäristöselvityksissä.</p>		
Asiasanat	pohjavesi, mallintaminen, vedenhankinta, pohjavedensuojelu		
Julkaisusarjan nimi ja numero	Ympäristöopas 121		
Julkaisun teema	Luonto ja luonnonvarat		
Projektihankkeen nimi ja projektinumero	Pohjaveden virtausmallit vedenhankinnassa ja pohjaveden suojelussa (VIRMA)		
Rahoittaja/ toimeksiantaja	Maa- ja metsätalousministeriö		
Projektiryhmään kuuluvat organisaatiot	Suomen ympäristökeskus, alueelliset ympäristökeskukset, Geologian tutkimuskeskus, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Turun yliopisto, Helsingin yliopisto, Teknillinen korkeakoulu		
	ISSN 1238-8602	ISBN 952-11-2014-2	ISBN 952-11-2015-0 (PDF)
	Sivuja 62	Kieli Suomi	
	Luottamuksellisuus Julkinen	Hinta 19 €	
Julkaisun myynti/ jakaja	Edita Publishing Oy, Asiakaspalvelu, PL 800, 00043 Edita puh. 020 450 05, telefax 020 450 2380 Sähköposti: asiakaspalvelu@edita.fi , http://www.edita.fi/netmarket		
Julkaisun kustantaja	Suomen ympäristökeskus, PL 140, 00251 Helsinki		
Painopaikka ja -aika	Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala 2005		

Presentationssblad

Utgivare	Finlands miljöcentral	Datum	Augusti 2005
Författare	Mikko Seppälä och Sirku Tuominen		
Publikationens titel	Pohjaveden virtauksen mallintaminen (Grundvattenmodellering)		
Publikationens delar/ andra publikationer inom samma projekt	Publikationen finns tillgänglig också på internet: http://www.ymparisto.fi/julkaisut		
Sammandrag	<p>År 1999-2004 genomfördes projektet VIRMA (Grundvattenmodellering för vattenansaffning och grundvattenskydd) i statens miljöförvaltning. Experter i de regionala miljöcentralerna undervisades att nyttja aktuell datateknik för grundvattensundersökning och att tillämpa forskningsdata både för vattenansaffning och planering av markanvändning. Syftet med denna handbok är att i stora drag presentera hur finska grundvattenområden modelleras. Guiden baserar sig på författarnas egna erfarenheter av modellering. Handboken behandlar modellering i praktiken och vilka data som krävs för modellering och modellernas användningsmöjligheter i olika miljöutredningar.</p>		
Nyckelord	grundvatten, modellering, vattenförsörjning, grundvattenskydd		
Publikationsserie och nummer	Miljöhandledning 121		
Publikationens tema	Natur och naturtillgångar		
Projektets namn och nummer	Grundvattenmodellering i vattenansaffning och i grundvattenskydd		
Finansiär/ uppdragsgivare	Jord- och skogsbruksministeriet		
Organisationer i projektgruppen	Finlands miljöcentral, de regionala miljöcentralerna, Geologiska forskningscentralen i Finland, Statens tekniska forskningscentral, Åbo universitet, Helsingfors universitet, Tekniska högskolan		
	ISSN 1238-8602	ISBN 952-11-2014-2	ISBN 952-11-2015-0 (PDF)
	Sidantal 62	Språk Finska	
	Offentlighet Offentlig	Pris 19 €	
Beställningar/ distribution	Edita Publishing Ab, PB 800, FIN-00043 Edita, Finland, växel +358 20 450 00 Postförsäljningen: Telefon +358 20 450 05, telefax +358 20 450 2380 Internet: www.edita.fi/netmarket		
Förläggare	Finlands miljöcentral, PB 140, FIN-000251 Helsingfors, Finland		
Tryckeri/ tryckningsort och -år	Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala 2005		

Documentation page

Publisher	Finnish Environment Institute	Date August 2005	
Author(s)	Mikko Seppälä and Sirkku Tuominen		
Title of publication	Pohjaveden virtauksen mallintaminen (Modeling groundwater flow)		
Parts of publication/ other project publications	The publication is available in the internet: http://www.ymparisto.fi/julkaisut		
Abstract	<p>In the VIRMA project (Flow models in groundwater management and protection in Finland) in 1999-2004, authorities in the regional environment centres were supervised to use the state of the art computer methods in groundwater investigations and in applying groundwater data in water resources management and land use planning. The purpose of this guidebook is to describe phases of groundwater modeling, based on experience gathered during a variety of modeling cases. In addition to general aspects on groundwater modeling, a detailed description on field studies and input data required in groundwater modeling is provided. Moreover, applications in a range of environmental studies are discussed.</p>		
Keywords	groundwater, modeling, water supply, groundwater protection		
Publication series and number	Environmental Guide 121		
Theme of publication	Nature and natural resources		
Project name and number, if any	Flow models in groundwater management and protection in Finland (VIRMA)		
Financier/ commissioner	Ministry of Agriculture and Forestry		
Project organization	Finnish Environment Institute, Regional Environment Centres, Geological Survey of Finland, Technical Research Centre of Finland, University of Turku, University of Helsinki, Helsinki University of Technology		
	ISSN 1238-8602	ISBN 952-11-2014-2	ISBN 952-11-2015-0 (PDF)
	No. of pages 62	Language Finnish	
	Restrictions Public	Price 19 EUR	
For sale at/ distributor	Edita Publishing Ltd., P.O. Box 800, FIN-00043 Edita Finland, Phone +358 20 450 00 Mail orders: Phone +358 20 450 05, telefax +358 20 450 2380 Internet: www.edita.fi/netmarket		
Financier of publication	Finnish Environment Institute, BOX 140, FIN-00251 Helsinki, Finland		
Printing place and year	Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala 2005		

**LUONTO JA
LUONNONVARAT****Pohjaveden virtauksen mallintaminen**

Tämä opas antaa vastauksia kysymyksiisi pohjaveden virtausmalleista. Oppaan tarkoitus on yleisellä tasolla kuvata pohjaveden virtausmallin laatimista. Oppaassa tarkastellaan malliin tarvittavia tietoja, mitä eri vaiheita mallinnustyö pitää sisällään ja miten siitä tulisi raportoida. Lisäksi esitetään mallin käyttömahdollisuuksia erilaisissa ympäristöselvityksissä. Opas toimii ohjeena paitsi pohjavesimallintajille myös pohjaveden virtausmalleja teettäville ja arvioiville tahoille.

Julkaisu on saatavana myös Internetissä:

<http://www.ymparisto.fi/julkaisut>

ISBN 952-11-2014-2

ISBN 952-11-2015-0 (PDF)

ISSN 1238-8602

Myynti:

Edita Publishing Oy
PL 800, 00043 EDITA, vaihe 020 450 00
ASIAKASPALVELU
puhelin 020 450 05, faksi 020 450 2380
Edita-kirjakauppa Helsingissä:
Annankatu 44, puhelin 020 450 2566



9 789521 120145