

SEISMINEN MENETELMÄ POHJAVESIVAROJEN ARVIOINTIIN

Timo Lähivaara¹, Jari P. Kaipio^{1,2}, Nicholas F. Dudley Ward³ ja Tomi Huttunen^{1,4}

¹ Itä-Suomen yliopisto, Sovelletun fysiikan laitos
PL 1627, 70211 Kuopio
timo.lahivaara@uef.fi

² Aucklandin yliopisto, Matematiikan laitos
Auckland, Uusi-Seelanti
jari@math.auckland.ac.nz

³ Otago Computational Modelling Group Ltd.
Dunedin, Uusi-Seelanti
nick@ocmo.co.nz

⁴ Kuava Ltd.
PL 1188, 70211 Kuopio
tomi.huttunen@uef.fi

Tiivistelmä

Tutkimuksessa kehitetään numeerisia menetelmiä, joita voidaan soveltaa pohjavesien arvioinnissa. Uusi menetelmä hyödyntää mikromaanjärityksistä (maanjäritys, joka on magnitudiltaan kaksi tai pienempi Richterin asteikolla mitattuna) havaittavia seismisiä signaaleja, jotka rekisteröidään maanpinnalle asetetuilla seismografeilla. Maanjärityksestä syntynyt mekaaninen aalto etenee pohjavesikerrosten (akviferi) läpi ja näin ollen maan pinnalla havaittu signaali sisältää tietoa huokoisen väliaineen ominaisuuksista. Tutkimuksessa käytetään korkea-asteista spektraalielementtimenetelmää (engl. spectral element method) aikariippuvien seismisten aaltokenttien simulointiin huokoisessa väliaineessa (suora ongelma). Työhön liittyvä käänteisongelma ratkaistaan Bayesilaisittain tilastollisen inversion keinoin. Tutkimuksessa käytetään uusien laskentamenetelmien lisäksi tehokkaita laskentaympäristöjä. Esitetyt laskentaesimerkit on laskettu Tieteen tietotekniikka keskuksen (CSC) superlaskentatietokoneella Louhi.

1 JOHDANTO

Pohjavedellä tarkoitetaan maan pinnan alaista vettä. Pohjavesi varastoituu huokoisessa väliaineessa (akviferi), jota voi olla esimerkiksi kivi, sora tai hiekka. Akviferit voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: rajoittamaton ja rajoitettu. Rajoitetussa pohjavesivarastossa veden pinta rajoittuu vettä huonosti läpäisevään kerrokseen toisin kun rajoittamattomassa akviferissä, jossa veden pinta voi vapaasti muuttua. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan rajoittamattomia pohjavesialueita.

Pohjavesivarantojen tärkeydestä huolimatta, niiden ominaisuuksista tiedetään yleensä melko vähän. Perinteiset menetelmät pohjavesimuodostumien kartoittamiseen ovat liian

aikaa vieviä ja kalliita suuren mittakaavan sovelluksissa. Yleinen arviointimenetelmä perustuu porakaivojen käyttöön. Ko. menetelmässä pumpataan vettä yhdestä kaivosta ja veden pinnan muutoksia havainnoidaan muissa porakaivoissa. Mitattujen muutosten perusteella voidaan tarkasteltavan akfiverin tilavuutta arvioida. Valitettavasti saavutettu tarkkuus on usein käyttökelvottoman huono.

Seismisesti aktiivisilla alueilla pohjavesien monitorointiin voidaan käyttää seismisiä mittauksia. Seismiset signaalit etenevät maaperässä huokoisten pohjavesikerrosten läpi (väliaine vuorovaikuttaa aaltokenttään) ja näin ollen havaittavista signaaleista saadaan tietoa huokoisen väliaineen ominaisuuksista. Mitattaessa lukuisista havaintopisteistä pohjavesialueen ympärillä (tässä tapauksessa vain yläpuolella), voidaan estimoida pohjavesialueen muutoksia.

Suora ongelma (*engl. forward problem*)

Esitettävissä yksinkertaistetuissa kaksi-dimensionaalisissa esimerkeissä pohjaveden pinnankorkeutta estimoidaan seismisten signaalien avulla. Matemaattisena mallina huokoiselle väliaineelle käytetään Biotin mallia [1] ja elastiselle väliaineelle Navierin yhtälöä [2]. Simulointityökaluna seismisille aaltokentille käytetään spektraalielementtimenetelmää (SPECFEM-2D ver 7 [3, 4]). SE-menetelmä sisältää lukuisia ominaisuuksia, jotka tekevät siitä soveltuvan suuren-skaalan aaltosimulointeihin. Menetelmä sisältää elementtimenetelmälle tyypillisiä etuja (geometrinen joustavuus ja laskennallinen tarkkuus) ja hyödyntää tehokkaasti rinnakkaistettuja laskentaympäristöjä. SE-menetelmää on perinteisesti käytetty virtauslaskennan sovelluksissa [5], mutta on viime vuosina yleistynyt myös seismisten aaltoilmiöiden simuloinnissa [3, 4, 6].

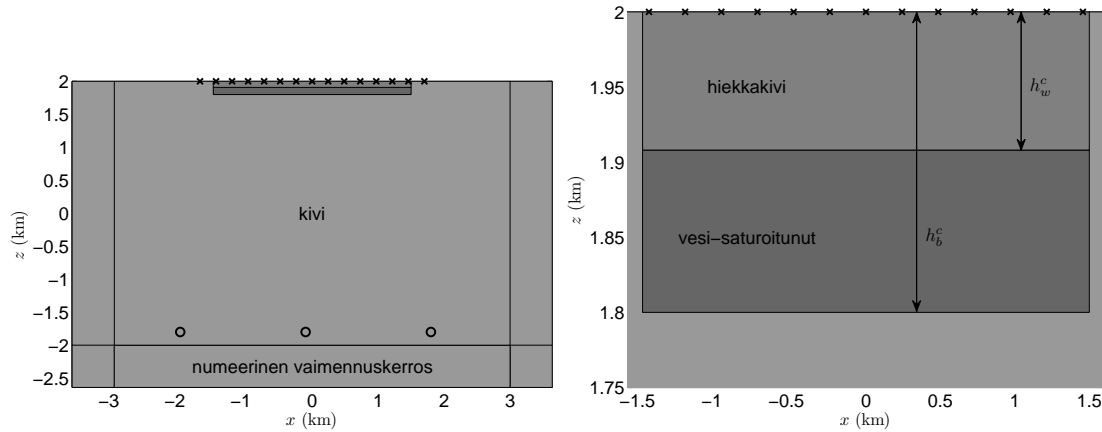
Inversio-ongelma (*engl. inverse problem*)

Tehokkaan simulointityökalun lisäksi tutkimuksessa hyödynnetään tilastollisen inversion tekniikoita inversio-/käänteis-ongelman tarkempaan ratkaisuun. Käytettävä menetelmä hyödyntää *a priori* tiedon pohjavesikerroksen paksuudesta ja veden pinnan korkeudesta. Tämä tieto saadaan esimerkiksi kaivomittausten perusteella. *a priori* tiedon lisäksi hyödynnetään approksimaatiovirhemallia [7], jonka avulla voidaan mallin epävarmuuksia huomioida entistä tarkemmin. Tässä tutkimuksessa epävarmuuksia liittyy esimerkiksi väliaineen fysikaalisiin parametreihin ja lähdeparametreihin (sijainti / tyyppi). Tämän lisäksi approksimaatiovirhemallia käytetään diskreetointivirheen kontrollomiseksi. Diskreetointivirheellä tarkoitetaan tässä yhteydessä laskentaongelman hiloituksesta syntyvää mallinnusvirhettä. Tavoitteena on käyttää mahdollisimman epätarkkoja (harvoja) verkkoja inversio-ongelman laskentaan. Tällä tavoin laskenta-aikaa voidaan säästää merkittävästi.

2 VEDENPINNAN KORKEUDEN ESTIMOINTI

Kuvassa 1 on esitetty tarkasteltavan ongelman geometria. Ongelma on jaettu kolmeen alueeseen: kivi, hiekkakivi (kuiva) ja vesi-saturoitunut hiekkakivi. Näistä kaksi ensiksi mainittua aluetta mallinnetaan elastisena väliaineena ja viimeksi mainittu huokoisena

väliaineena. Lisäksi kuvasta havaitaan, että alueen ulkoreunalle on sijoitettu numeerinen vaimennuskerros (*engl. perfectly matched layer* [8]). Vaimennuskerros vaimentaa tehokkaasti reunoille (vasen, oikea ja ala) asetetusta absorpoivasta reunaehdosta syntyvät ei-halutut heijastukset. Yläreunalla käytetään vapaan pinnan reunaehtoa (*engl. traction free*) reunaehtoa. Väliaineen absorptio on jätetty laskennassa huomioimatta.



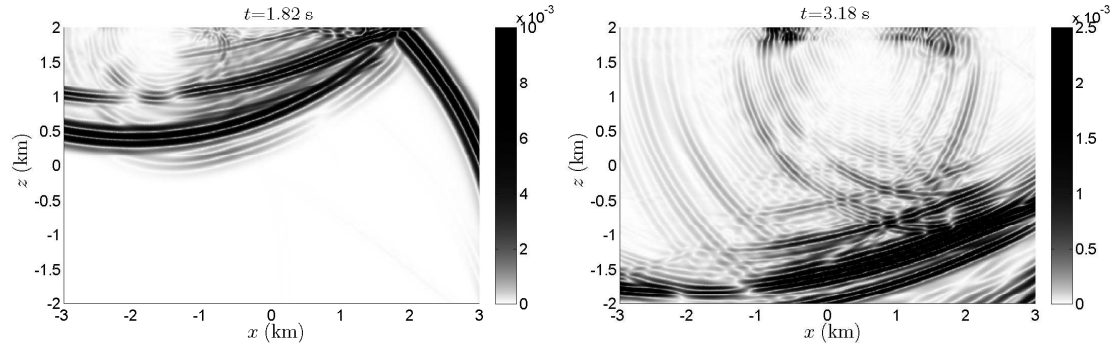
Kuva 1: *Ongelman geometria.* *x-symbolit* kuvaavat vastaanotinpisteitä ja vastaavasti *o-symbolit* ovat lähdekoordinaatteja.

Laskennassa käytetään Newmark-aikaintegrointi menetelmää. Aika-askelen pituus kiinnitetään Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) lukua [9] käyttäen. CFL luku määritellään hilaparametrin h_{\min} (pienin etäisyys kahden solmupisteen välillä), äänennopeuden c (väliaineen suurin äänen nopeuskomponentti) ja aika-askelen pituuden δ_t avulla seuraavasti: $\text{CFL} = c\delta_t/h_{\min}$. Laskennassa CFL-luku kiinnitetään arvoon 0.4. Laskentamallissa kantafunktioina käytetään korkea-asteisia Lagrangen polynomeja, joka huomioidaan myös skaalaamalla hilaparametria h_{\min} . Tulokset on laskettu käyttäen neljännen asteen kantafunktioita. Tutkittava aikaikkuna on $t \in [0, 5]$ s.

Kuva 2 havainnollistaa pistelähteestä syntynyttä aaltokenttää kahdella ajanhetkellä. Kuvissa on esitetty kokonaisnopeuskenttä $\|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$. Ajanhetkistä ensimmäinen $t = 1.82$ s kuvaa tilannetta, jossa pistelähteestä tuleva aaltorintama on saavuttanut pohjavesikerroksen ja siitä heijastunut aalto on syntynyt. Toisaalta kuvasta havaitaan ilmakivi rajapinnasta heijastunut aaltorintama. Toinen ajanhetki $t = 3.18$ s havainnollistaa pohjavesialueessa syntyviä moninkertaisia heijastuksia. Molempien kuvien perusteella voidaan myös todeta, että käytetty vaimennuskerros toimii hyvin.

Tutkimuksessa tarkastellaan vain simuloituja tuloksia. Mittausten generointiin käytetään merkittävästi tiheämpää laskentaverkkoa kun inversio-ongelmaa ratkaistaessa. Inversiorikos estetään käyttämällä eri tiheyksisiä laskentaverkkoja tutkimuksen eri vaiheissa [7]. Taulukossa 1 on listattu laskennassa käytettyjä laskentaverkkoja. Simuloituun mittaussignaaliin lisätään valkoista kohinaa ($e \sim \mathcal{N}(0, \Gamma_e)$), missä Γ_e on kohinan kovarianssimatriisi). Kohinatasoiksi valittiin kolme hajonnan σ_e arvoa (1, 2, 3)%, joita kerrotaan komponenteittain mittausdatan maksimilla $[|v_x|_{\max}, |v_z|_{\max}]$.

Kuvassa 3 on esitetty todennäköisyystiheysfunktio: vasemmalla tapaus, jossa approksimaatiivirheitä ei ole huomioitu. Kuten havaitaan, approksimaatiivirhemalli parantaa



Kuva 2: Kokonaisaaltokenttä $\|\vec{v}\|$ kahdella ajanhetkellä kuvattuna. Tutkittava ajanhetki on esitetty kuvien otsikoissa.

Taulukko 1: Laskennassa käytettyjä verkkoja: nelikulmioelementtien lukumäärä N_n , solmupisteiden lukumäärä N_e , suurin ja pienin etäisyys kahden solmupisteen välillä h_{\min} ja h_{\max} .

käyttö	N_n	N_e	h_{\min} (m)	h_{\max} (m)
mittaus	104412	105336	4.5	47.3
tarkka malli	73696	74467	5.4	56.4
harva malli	20460	20853	10.8	112.8

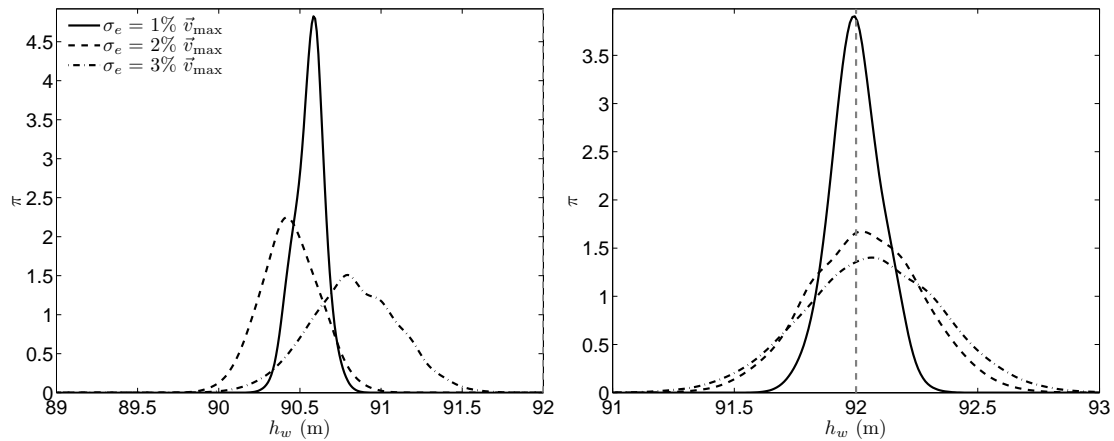
estimaattia huomattavasti. Tämän lisäksi tulee huomata, että tulosten perusteella saamme estimaatit myös ratkaisujen luotettavuudelle, sen sijaan että saavutettaisiin pelkästään todennäköisin arvio. Tämä on ratkaisevan tärkeää käytännön sovellusten kannalta.

3 POHDINTA

Tutkimuksessa kehitetään uusia menetelmiä pohjavesivarojen arviointiin. Tässä työssä ongelmaa lähestyttiin kaksi-dimensionaalisen approksimaationa, jossa väliaineen absorptio jätettiin huomioimatta. Tulosten perusteella voidaan todeta, että laskentakapasiteetin tarvetta voidaan ratkaisevasti vähentää approksimaativirhemallin avulla (mm. harvat laskentaverkot, fysikaaliset parametrien epävarmuudet ja lähteisiin liittyvät epävarmuudet). Tämä on ratkaisevan tärkeää kolmi-dimensionaalisissa sovelluksissa. Tuloksista havaittiin, että seismisiin signaaleihin perustuvat pohjavesiarvioinnit voivat olla mahdollisia. Jatkotutkimuksissa menetelmää tullaan arvioimaan lähempänä todellisuutta olevin simuloinnein ja käyttäen kokeellista mittausdataa. Kaikki esitetyt numeeriset esimerkit simuloitiin Tieteen tietotekniikka keskuksen (CSC) superlaskentatietokoneella Louhi.

KIITOKSET

Tutkimusta on rahoittanut Suomen Akatemia (projektit 250215 ja 257372). Laskenta suoritettiin CSCn superlaskentakoneilla – Grand Challenge projekti otsikolla “New approaches for estimating groundwater resources”. Nicholas F. Dudley Ward ja Jari P.



Kuva 3: Todennäköisyysfunktio. Oikealla ratkaisu, jossa approksimaatiovirhe on huomioitu. Eri viivatyypeillä esitetyt käyrät kuvaavat eriasteista virhetasoa. Lisäksi harmaasävyllä piirretty pystyviiva tarkoittaa vedenpinnan korkeutta, jota on käytetty mittausdataa simuloidessa.

Kaipio toimivat hankkeessa, jota rahoittaa “New Zealand Ministry of Science and Innovation”.

VIITTEET

- [1] BIOT M, Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I. Low frequency range, *J. Acoust. Soc. Am.*, **28** (1956), 168–178.
- [2] LEVEQUE R, *Finite Volume Method for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, 2002.
- [3] TROMP J, TAPE C, & LIU Q, Seismic tomography, adjoint methods, time reversal and banana-doughnut kernels, *Geophys. J. Int.*, **160** (2005), 195–216.
- [4] KOMATITSCH D & TROMP J, Introduction to the spectral element method for three-dimensional seismic wave propagation, *Geophys. J. Int.*, **139** (1999), 806–822.
- [5] PATERA A, A spectral element method for fluid dynamics - Laminar flow in a channel expansion, *J. Comput. Phys.*, **54** (1984), 468–488.
- [6] TROMP J, KOMATITSCH D, & LIU Q, Spectral-element and adjoint methods in seismology, *Commun. Comput. Phys.*, **3** (2008), 1–32.
- [7] KAIPIO J & SOMERSALO E, *Statistical and Computational Inverse Problems*, Springer-Verlag, 2005.
- [8] KOMATITSCH D & MARTIN R, An unsplit convolutional Perfectly Matched Layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation, *Geophysics*, **72** (2007), SM155–SM167.
- [9] DE MOURA C A & KUBRUSLY C S, editors, *The Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) Condition*, Birkhäuser, 2013.