

Lapin POSKI2 – hankkeen erillisselvitys: Yleinen ohjeistus Slug – testin toteuttamiseen

Riku Sanaksenaho, Pekka Rossi

Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikkö, Oulun yliopisto



Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Slug-testin suunnittelu ja suorittaminen	2
3	Tulosten analysoiminen Bouwerin ja Ricen metodilla	7
4	Epävarmuustekijät	13
5	Viitteet	

1 JOHDANTO

Slug-testi on yksi yleisimmin käytetyistä menetelmistä maaperän horisontaalisen hydraulisen johtavuuden määrittämisessä. Se perustuu pohjaveden pinnankorkeuden muuttamiseen havaintoputkessa joko lisäämällä, poistamalla tai syrjäyttämällä vettä ja mittaamalla pinnankorkeuden palautumisnopeus. Palautumisnopeuden ja akviferin sekä havaintoputken geometrian perusteella saadaan määritettyä akviferin keskimääräinen hydraulinen johtavuus. Menetelmän kehitti Mikael Juul Hvorslev vuonna 1951 ja menetelmästä sekä tulosten analysoinnista on myöhemmin kehitetty useita erilaisia variaatioita. (Schwartz & Zhang 2002)

Slug-testin suorittamiseen ei tarvita pumppausta eikä pinnankorkeuden seuranta etäällä koepisteestä toisesta pohjavesiputkesta. Testiä varten tarvitaan pohjavesiputken lisäksi vain laite, jolla seurataan pohjaveden pinnankorkeuden muutosta ja joko kiinteä kappale veden syrjäyttämistä varten tai baileri riippuen testin suoritustavasta. Baileri on yksinkertainen laite, jolla pohjavesiputkesta saadaan nostettua tietty määrä vettä. Baileri koostuu putkesta, jonka toisessa päässä on reikä ja reiän peittävä kuula. Kun baileri lasketaan narun avulla veteen, reiän peittona oleva kuula väistyy ja vesi pääsee putkeen. Kun baileria aletaan nostamaan ylös, kuula peittää reiän ja vesi pysyy putkessa.

Yksinkertaisimmillaan veden pinnankorkeuden muutoksen seuranta voidaan suorittaa manuaalisesti mittaamalla, mutta tarkempi tulos saadaan esimerkiksi automaattisella pinnankorkeuden mittarilla (Kruseman & de Ridder 1994). Testi voidaan suorittaa nopeimmillaan minuuteissa, mikä on edullisuuden lisäksi suurin etu koepumppaukseen verrattuna.

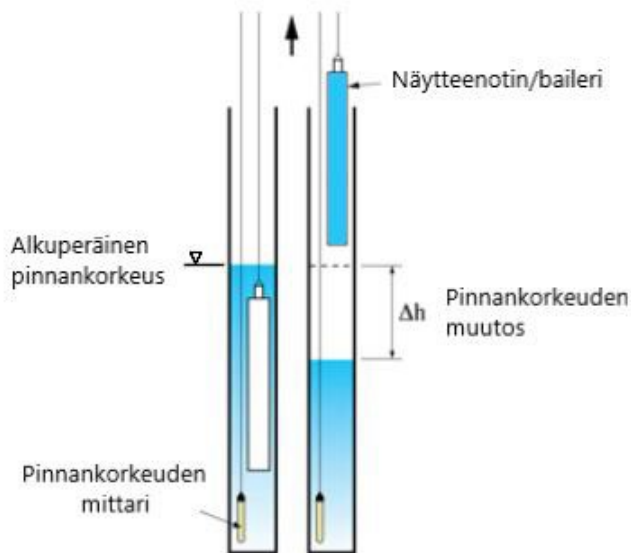
Tulosten analysoimiseen voidaan käyttää useita eri laskentamalleja. Rajoitetuissa akvifereissa käytetään yleensä Hvorslevin mallia (Hyder et al. 1994). Hvorslevin malli sisältää muotokertoimen, joka riippuu slug-testissä käytettävän havaintoputken muodosta ja asennustavasta. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. se, ulottuuko havaintoputki kairatun reiän pohjaan saakka ja onko havaintoputken päässä suojakartio vai ei. Tästä syystä mallin käyttämiseen ei riitä pelkästään putkikorteissa tavallisesti ilmoitetut tiedot, kuten putken pituus ja siiviläosan pituus. Toisaalta Suomessa

asennetuissa muovisissa havaintoputkissa on yleensä suojakartiollinen havaintoputki, joka ulottuu kairatun reiän pohjaan saakka.

Vapaissa akvifereissa käytetään usein Bouwerin ja Ricen mallia, joka on kehitetty vuonna 1976. Mallia pystytään käyttämään hydraulisen johtavuuden määrittämiseen sekä täysin että osittain akviferin läpäisevästä putkesta. Malli eroaa Hvorslevin mallista siinä, että se ottaa huomioon havaintoputken ominaisuuksista vain siiviläosan pituuden ja sen, kuinka paljon putkea on akviferin alueella. Lisäksi malli ottaa huomioon slug-testin efektiivisen säteen, joka määritetään dimensiottomien parametrien A, B ja C avulla, jotka saadaan Bouwerin ja Ricen määrittämistä käyristä, kun havaintoputken säde ja putken pituus akviferissa tiedetään. (Schwartz & Zhang 2002). Fabbrin et al. (2012) suorittamien kokeiden perusteella Hvorslevin menetelmä antaa yleensä lopputuloksena hieman korkeamman hydraulisen johtavuuden kuin Bouwerin ja Ricen menetelmä, mutta molemmat menetelmät tuottivat suhteellisen tarkan tuloksen, kun tuloksia verrattiin koepumppauksista saatuihin tuloksiin.

2 SLUG-TESTIN SUUNNITTELU JA SUORITTAMINEN

Testissä poistetaan tai lisätään nopeasti pieni määrä vettä pohjavesiputkesta (Kuva 1). Mikäli joudutaan putken suuren koon tai akviferin suuren tuottoisuuden vuoksi poistamaan suurempi määrä vettä kuin mikä on helppo poistaa nopeasti, voidaan veden poistamisen sijaan käyttää kiinteää kappaletta. Kiinteä kappale syrjäyttää vettä, mikä aiheuttaa muutoksen pinnan korkeudessa. Joko veden poistamisen, lisäämisen tai kiinteän slugin aiheuttama muutos pinnan korkeudessa ja siitä seuraavaan palautumiseen kuluva aika mitataan. Vedenpinnan muutoksella pyritään saamaan aikaan samankaltainen alenemasuppilo kuin koepumppauksessa, mutta pienemmässä mittakaavassa. (Fitts 2013)



Kuva 1. Vettä poistamalla suoritettu slug-testi.

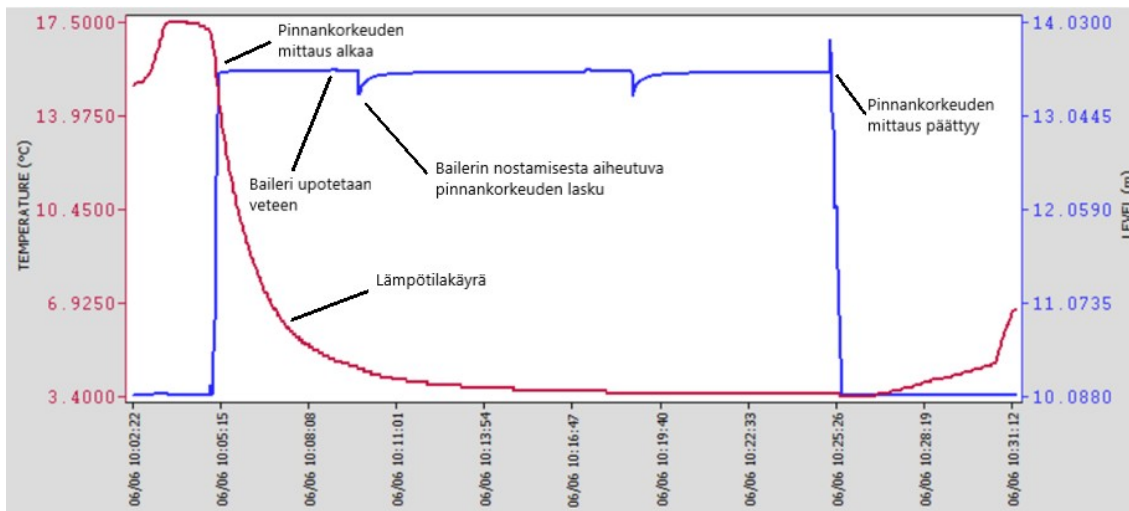
Slug-testin suorittamista varten tulee olla tiedossa putken fyysiset ominaisuudet. Olennaisia tietoja ovat putken pituus, putken halkaisija, suodatinosan pituus sekä suodattimen reikien koko ja etäisyys toisistaan. Lisäksi tulee olla tiedossa, onko putki osittain vai täysin akviferin läpäisevä ja onko akviferi rajoittunut vai vapaa. Putken siiviläosan pituudella on suuri merkitys kokeen onnistumiselle. Siiviläosan tulisi olla kutakuinkin koko pohjavesivyöhykkeen mittainen, jotta saadaan arvioitua koko kerroksen keskimääräinen hydraulinen johtavuus. Transmissiviteetin, joka on oleellinen tieto pohjavesialueen käyttökelpoisuuden määrittämisessä, määrittämisessä tulee siiviläosan olla koko pohjavesimuodostuman mittainen. Lisäksi testiä suunniteltaessa tulee ottaa huomioon, että slug-testi ei välttämättä ole soveltuva menetelmä, jos tutkimuskohde on halkeillutta kalliota tai vettä hyvin johtavaa maa-ainesta, kuten soraa. (Strickland & Korleski 2006)

Putken mitat vaikuttavat slug-testin tuloksiin. Teoriassa Bouwerin ja Ricen slug-testi toimii millä tahansa putken mitoilla, mutta mitä suurempi on putken paksuus ja siiviläosan leveys, sitä suuremmalta akviferin osalta hydraulinen johtavuus saadaan määritettyä. Toisaalta kerrostuneissa akvifereissa lyhyempi siiviläosa on tulosten kannalta parempi, ja suorittamalla alueella useita kokeita eri syvyydellä olevista putkista saadaan kattavampi kuva. Tällöin luonnollisesti kokeen kustannukset

kasvavat huomattavasti. Myös erittäin kapeista putkista on mahdollista saada hyviä tuloksia, mutta tällöin testin vaikutusalue on pienempi ja tulokset ovat alttiita paikallisille vaihteluille. (Bouwer 1989)

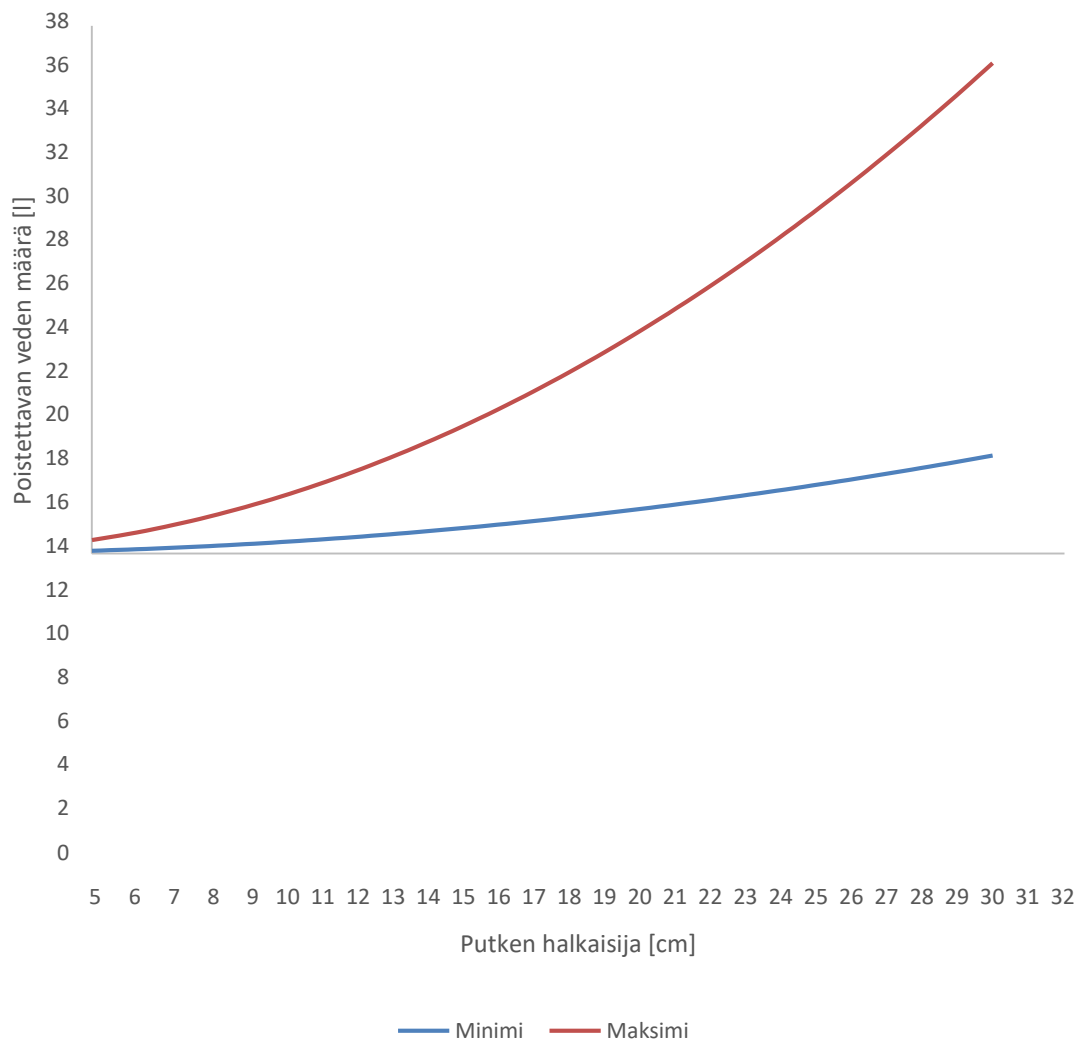
Slug-testi suoritetaan määrittämällä ensin veden taso putkessa. Samoin akviferin syvyys tulee mitata. Tämän jälkeen poistetaan pieni määrä vettä kaivosta. Vedenpinnan tason nousua veden poistamisen jälkeen seurataan. Vedenpinnan tason palautumisnopeuden avulla voidaan selvittää hydraulinen johtavuus ja veden välityskyky. Slug-testi voidaan suorittaa myös lisäämällä vettä havaintoputkeen. Tällä tavalla suoritettu testi on vettä poistamalla suoritettua testiä käyttökelpoisempi esimerkiksi tilanteissa, joissa akviferi on niin matala, että näytteenotin ei mahdu kokonaan vedenpinnan alle. Veden lisäämisen jälkeen seurataan vedenpinnan tason palautumista samalla tavalla kuin vettä poistettaessa. Kiinteän kappaleen slug-testissä kiinteä painava sylinteri upotetaan veteen ja odotetaan vedenpinnan tason stabiloitumista. Tämän jälkeen sylinteri nostetaan pois vedestä ja seurataan vedenpinnan tason palautumista.

Veden tason palautumisnopeuden mittaaminen voidaan suorittaa manuaalisesti tarkoitukseen soveltuvaa mittanauhaa käyttäen, mutta automaattinen mittaaminen automaattista pinnankorkeuden mittaria käyttämällä on huomattavasti tarkempaa ja helpompaa, varsinkin jos alue on hyvätuottoinen. Tässä ohjeessa käytetään esimerkkinä Solinstin valmistamaa Levelogger 3001 LT F15/M5 -laitetta. Laite mittaa veden lämpötilaa ja vedenpinnan korkeutta. Laitteen tarkkuus pinnankorkeuden mittauksessa on $\pm 0,3$ cm. Kuvassa 2 nähdään esimerkki Leveloggerin tuottamasta käyrästä Solinstin ohjelmistossa.



Kuva 2. Esimerkki Levelloggerin tuottamasta käyrästä Solinstin ohjelmistosta. Sininen käyrä kuvastaa vedenpinnan korkeutta ja punainen kuvastaa veden lämpötilää.

Poistettava vesimäärä tulee olla niin iso, että pinnankorkeuden palautuminen kyetään havaitsemaan riittävällä tarkkuudella. Se ei kuitenkaan saa olla niin iso, että sen poistaminen vaikuttaa merkittävästi saturoituneen kerroksen paksuuteen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vettä syrjäyttävää kiinteää kappaletta. Vesimäärän poistamisesta tai syrjäyttämistä seuraava veden tason lasku tulisi olla 10-50 cm (Strickland & Korleski 2006). Kuvassa 3 on esitetty tarvittava poistettava vesimäärä erikokoisille putkille. Ylempi käyrä edustaa veden tason putoamista 50 senttimetrillä ja alempi käyrä 10 senttimetrillä, joten sopiva poistettu määrä sijoittuu näiden käyrien väliin. Sopivaa vesimäärää määrittäessä tulee kuitenkin ottaa huomioon alueen tuottoisuus. Hyvätuottoisella alueella joudutaan mahdollisesti poistamaan isompi vesimäärä, joka voi olla haastavaa tehdä riittävän nopeasti. Mikäli putken koko tai alueen suuri tuottoisuus vaatii suuren vesimäärän poistoa, jotta slug-testi toimisi halutulla tavalla, voidaan harkita vaihtoehtoisia menetelmiä hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi.



Kuva 3. Poistettavan veden määrä suhteessa putken halkaisijaan. (Strickland & Korleski 2006)

3 TULOSTEN ANALYSOIMINEN BOUWERIN JA RICEN METODILLA

Hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi vapaassa akviferissä Bouwer ja Rice esittivät metodin, joka perustuu Thiemin kaavaan. Bouwerin ja Ricen kaavaa käytettiin kaikkien tulosten määrittämiseen.

Virtaus putkeen veden poiston jälkeen voidaan esittää kaavalla

$$Q = 2\pi KD \frac{h}{\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}$$

missä

K	on hydraulinen johtavuus [m/s]
D	on akviferin paksuus [m]
h	on vedenpinnan alenema [m]
R_e	on testin efektiivinen vaikutussäde [m]
r_w	on horisontaalinen etäisyys kaivon keskipisteestä häiriintymättömään akviferiin [m]

Veden tason nousunopeus dh/dt voidaan ilmaista

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q}{\pi r_c^2}$$

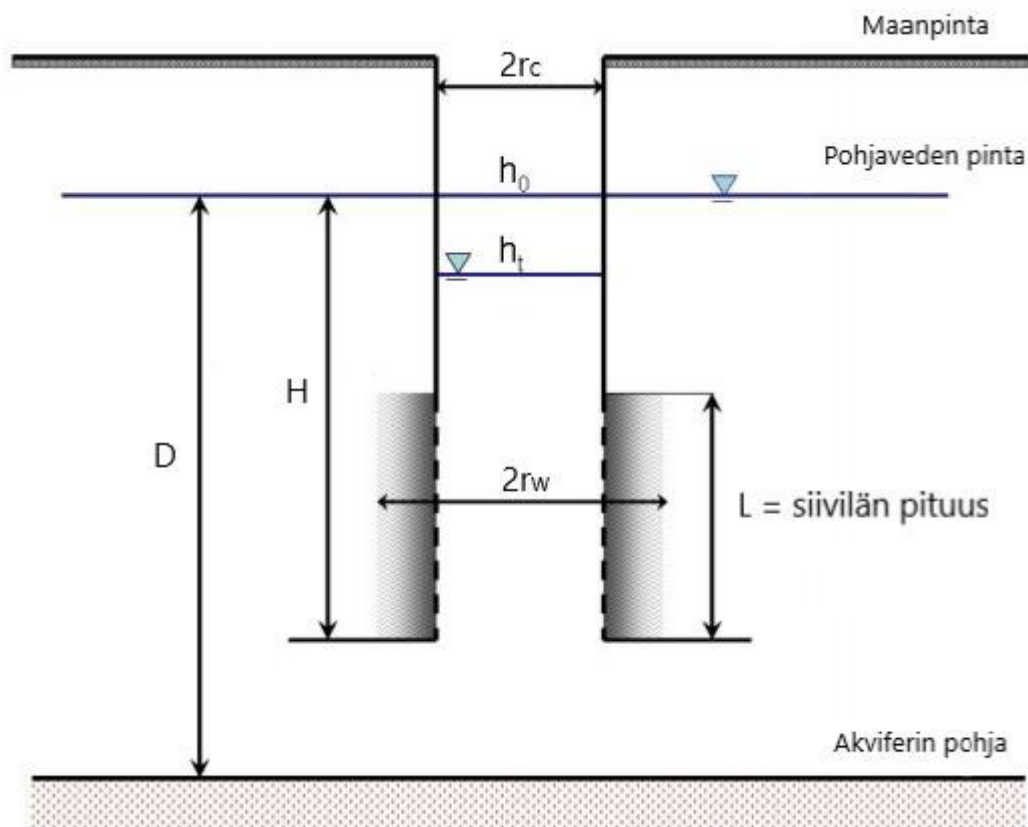
Yhdistämällä kaavat, integroimalla ja ratkaisemalla K:n suhteen saadaan

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2d} - \frac{1}{t} \ln\left(\frac{h_0}{h_t}\right)$$

missä

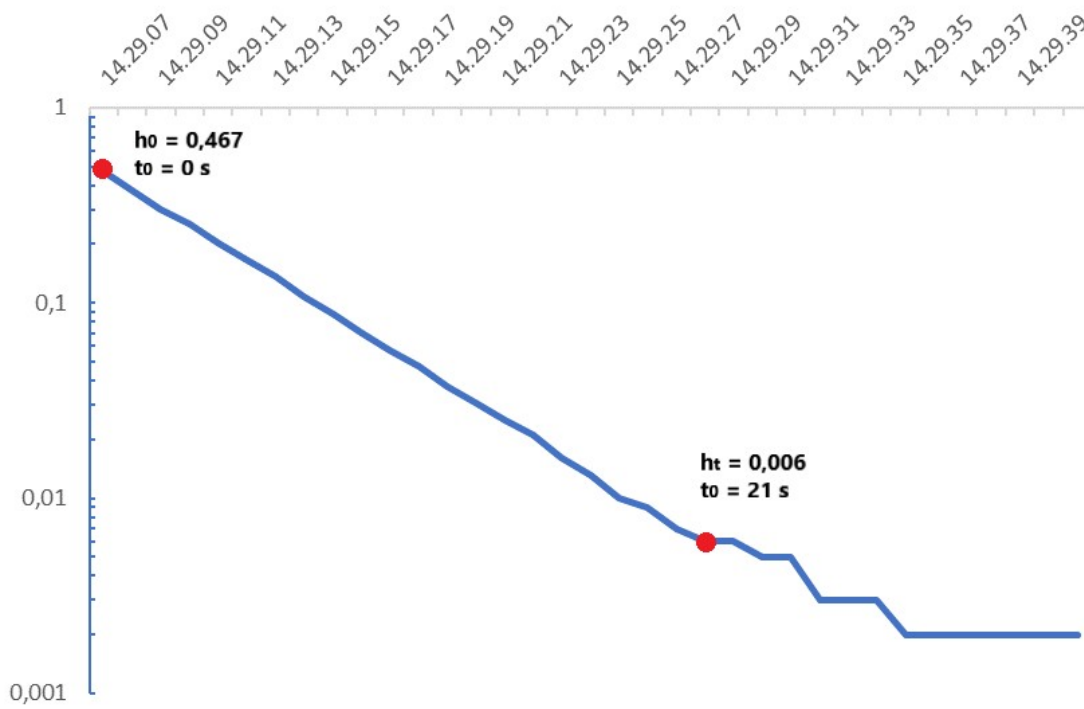
r_c	on sen putken osan säde, missä ei ole siivilää [m]
d	on kaivon siivilän pituus [m]
h_0	on vedenpinnan korkeus ajanhetkellä $t_0 = 0$ [m]
h_t	on vedenpinnan korkeus ajanhetkellä $t > t_0$ [m]

Havaintoputken profiili ja Bouwerin ja Ricen metodissa käytetyt parametrit on esitetty kuvassa 3.



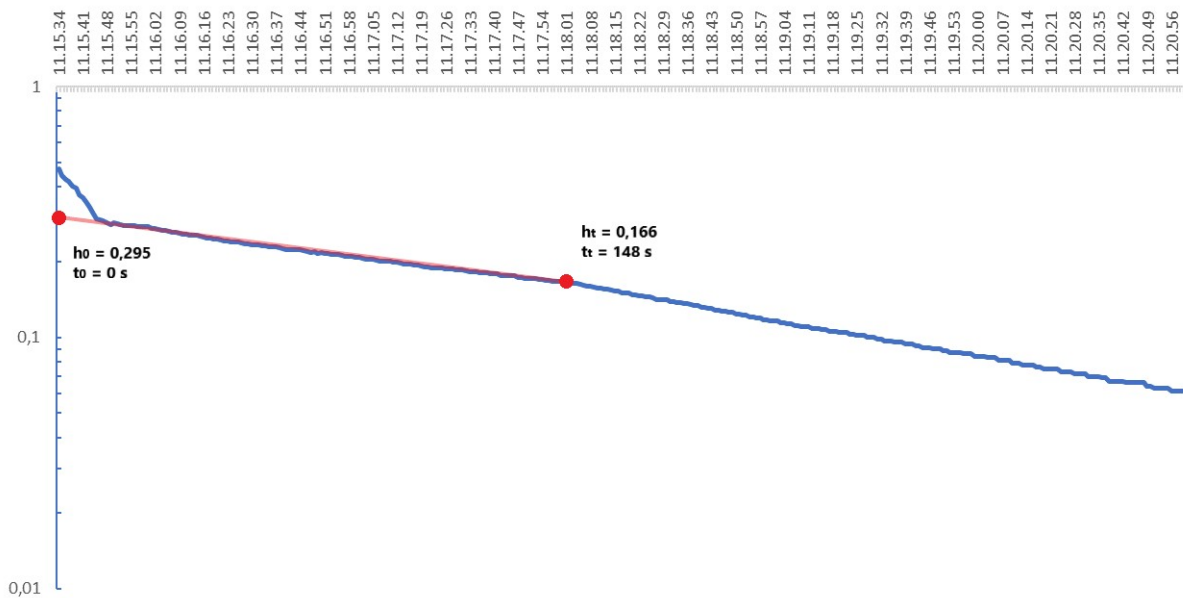
Kuva 4. Bouwerin ja Ricen metodissa käytetyt havaintoputken ja pohjavesiakviferin parametrit.

Ajanhetki t ja vedenpinnan korkeus h_t valitaan piirtämällä kaavio vedenpinnan alentumasta ajan suhteen ja muuntamalla y-akseli logaritmiseksi. Tässä vaiheessa käyrän pitäisi olla joko kokonaan tai osittain suora. Käyrästä approksimoidaan suora osa tarkasteluun kuvan 5 mukaisesti. Suoran alusta saadaan h_0 , h_t ja t voidaan ottaa mistä tahansa suoran pisteestä.



Kuva 5. Esimerkki arvojen h_t ja t valinnasta. Veden alenema on y-akselilla ja aika x-akselilla.

Mikäli käyrä ei ole alusta asti suora, jatketaan käyrän suoraa osuutta ajanhetkeen $t = 0$ asti ja luetaan h_0 y-akselilta kuvan 6 mukaisesti.



Kuva 6. Esimerkki suoran jatkamisesta ajanhetkeen $t = 0$ asti.

R_e voidaan määrittää seuraavien laskukaavojen/nomogrammien avulla. Osittain akviferin läpäisevälle putkelle Bouwer ja Rice määrittivät laskukaavan

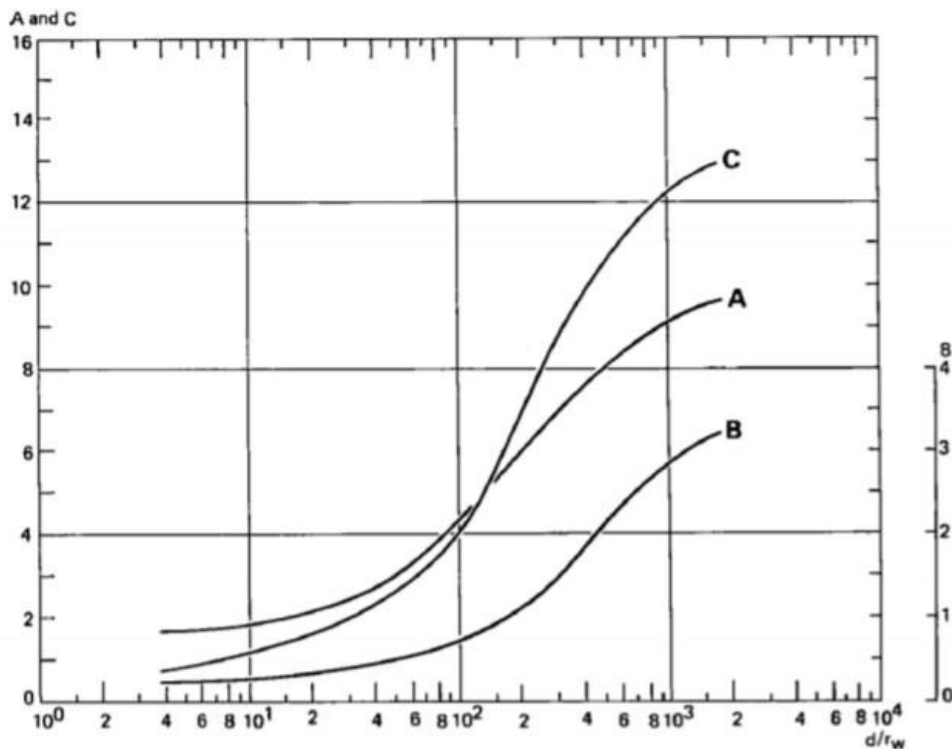
$$\ln\left(\frac{R}{r_w}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln\left(\frac{H}{r_w}\right)} + \frac{A+B\ln\left(\frac{D-H}{r_w}\right)^{-1}}{\frac{d}{r_w}} \right]$$

missä

H on veden alla olevan putken osan pituus [m]

D veden pinnan korkeus akviferin pohjasta mitattuna [m]

Kun d/r_w tiedetään, vakioiden A ja B arvot saadaan kuvassa 7 esitetyn kuvaajan avulla.



Kuvaaja 7. Bouwerin ja Rican menetelmässä käytettyjen parametrien A, B ja C määrittämiseen käytettävä käyräsarja.

Täysin akviferin läpäisevälle putkelle Bouwer ja Rice määrittivät laskukaavan

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln\left(\frac{H}{r_w}\right)} + \frac{C}{\frac{d}{r_w}} \right]^{-1}$$

Missä C saadaan kuvaajasta 7, kun d/r_w tiedetään.

4 EPÄVARMUUSTEKIJÄT

Slug-testin heikkouksiin pumppaustestiin verrattuna kuuluu erityisesti se, että slug-testillä määritetyt maaperän ominaisuudet pätevät vain havaintopisteen läheisyydessä. Testin paikallisesta luonteesta johtuen maaperän koostumuksesta poikkeavat olosuhteet pohjavesiputken suodattimen välittömässä läheisyydessä voivat aiheuttaa virheellisiä tuloksia. Tällainen poikkeavuus voi olla esimerkiksi akviferissä oleva onkalo, suuri kivi tai pohjavesiputken asennuksen yhteydessä syntynyt ympäröivää maaperää hienompi aines. Suodattimen ympärille levinnyt hienompi aines voi aiheuttaa virheitä analyysissä, kuten todellista hydraulista johtavuutta pienemmän hydraulisen johtavuuden arvon. (Strickland & Korleski 2006, 4-2)

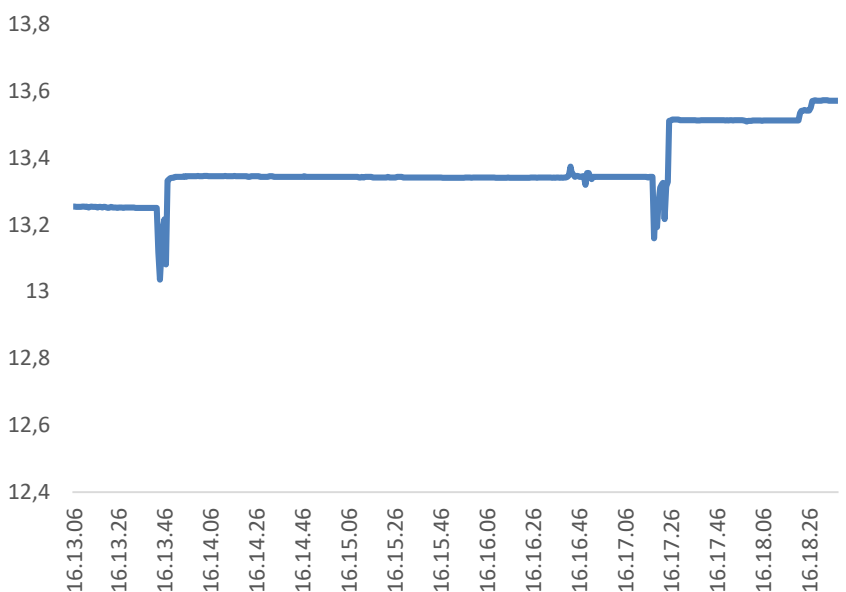
Suorittamalla useita slug-testejä alueella voidaan saada kattavampi kuva alueen hydraulisesta johtavuudesta. Schollin & Christensonin (1998, 4) mukaan laajallakaan alalla suoritettut testit eivät kuitenkaan välttämättä kerro koko totuutta pohjavesialueen hydrologisista ominaisuuksista, koska testi on herkkä pohjavesialueen paikallisille vaihteluille.

Fittsin mukaan (2013, 316) slug-testi voi antaa virheellisiä tuloksia, mikäli havaintoputken asennuksen yhteydessä siivilän ympärille on jäänyt hienoa maa-ainesta. Tällä hienolla maa-aineksella voi olla ympäröivää ainesta huonompi vedenjohtavuuskyky, jolloin se vääristää tuloksia. Lisäksi hieno maa-aines saattaa lähteä liikkeelle testien vuoksi, jolloin testien tuloksissa voi olla keskenään eroavuuksia.

Kansain geologisen tutkimuslaitos on tutkimuksissaan tehnyt suuren määrän slug-testejä (Butler & Healey. 1998), joiden perusteella voitiin arvioida, että hienon maa-aineksen jääminen siiviläosan ympärille asennuksen yhteydessä on erittäin yleistä. Tutkimusten mukaan häiritsevän hienon maa-aineksen läsnäolo on ennemminkin sääntö kuin poikkeus, ellei putken asennuksessa kiinnitetä asiaan erityistä huomiota. Bouwerin ja Ricen (1976) ja Hvorslevin (1951) menetit hydraulisen johtavuuden arviointiin ovat erityisen alttiita hienon maa-aineksen aiheuttamille tulosten vääristymille. Hienon maa-aineksen jääminen siivilän ympärille voidaan estää huuhtelemalla havaintoputki huolellisesti. Huuhtelu suoritetaan liittämällä pohjavesipumppuun vesiletku ja työntämällä pumppu havaintoputken pohjaan

saakka, jonka jälkeen pumppu käynnistetään (Kinnunen 2005). Vesiletkusta lasketaan samalla vettä havaintoputkeen ja pumppausta jatketaan niin kauan, että ylös nouseva vesi on kirkasta.

Kuvassa 8 on esitetty korkean hydraulisen johtavuuden pohjavesiakviferissa suoritettun slug-testin käyrä. Käyrässä nähdään ensin bailerin upottamisen aiheuttama hetkellinen nousu, minkä jälkeen nähdään veden poistamisesta aiheutuva pinnan aleneminen. Tämän jälkeen vedenpinta alkaa palautumaan nopeasti, mutta odotuksien vastaisesti vedenpinta nousee alkuperäistä tasoa korkeammalle. Sama toistuu toisessa mittauksessa. Tämä virhe saattaa johtua putken ympärillä olevasta hienosta maa-aineksesta, joka vaikuttaa veden virtaamiseen siivilän läpi. Slugin poistosta aiheutuva veden liikehdintä liikuttaa maa-ainesta, jolloin vettä pääsee virtaamaan putkeen hieman enemmän.



Kuva 8. Mittauksessa esiintynyt häiriö. Vedenpinta nousee jokaisen vedenpoiston jälkeen.

Mikäli tehdään useita peräkkäisiä slug-testejä, mikä on tulosten luotettavuuden kannalta olennaista, on tärkeää odottaa testien välillä niin kauan, että veden pinta on palautunut ennalleen. Yksittäisen testin kannalta vedenpinnan täydellinen palautuminen ei ole välttämätöntä hydraulisen johtavuuden laskemisessa, mutta perättäisissä testeissä palautumisen odottaminen on tärkeää, jotta tulokset olisivat luotettavia.

Automaattista pinnankorkeuden mittaria käytettäessä tulee ottaa huomioon mittarin sijoitus. Laite tulee

asettaa tarpeeksi syväälle, jotta laite pysyy pinnan alla myös veden poistamisen jälkeen. Mikäli akviferi on huomattavan matala, on syytä suorittaa slug-testi lisäämällä vettä veden poistamisen sijaan, sillä huomattavan matalat akviferit aiheuttavat hankaluuksia bailerin käytössä.

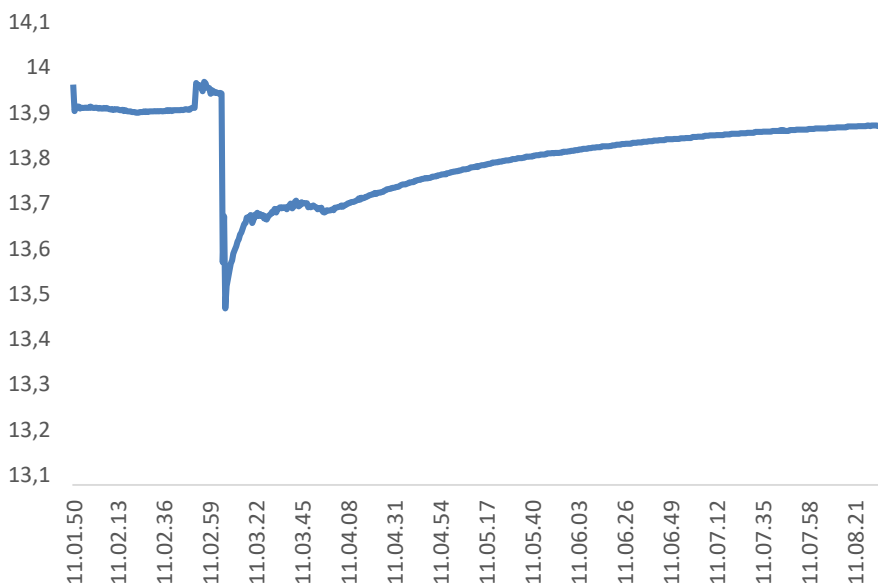
POSKI2-hankkeessa tehdyissä testeissä yleisin käytännön ongelma oli bailerin takertuminen pinnankorkeuden mittarin vaijeriin (kuva 9). Ongelma oli sitä yleisempi mitä syvempi kaivo oli. Takertumista pystyi ehkäisemään teippaamalla vaijeri putken ulkopuolella kiinni siten, että vaijeri olimahdollisimman lähellä reunaa. Vaijerin takertumisen mahdollisuutta voidaan myös pienentää teippaamalla bailerin köyden solmu. Syvissä kaivoissa takertumista ei täysin pystynyt estämään. Pinnankorkeuden mittarin vaijerin takertuminen ei sinänsä näy mittaustuloksissa, mikäli mittari pysyy vedenpinnan alapuolella. Toisaalta mittarin vaijerin irrottaminen bailerista saattaa johtaa veden roiskumiseen bailerin yläosasta takaisin pohjavesiputkeen, jolloin mittaustulos vääristyy.



Kuva 9. Pinnankorkeuden mittarin vaijeriin takertunut baileri. (Kuva: Riku Sanaksenaho)

Häiriötä mittauksessa voi aiheuttaa myös vuotava baileri. Vuotava baileri aiheuttaa kuvan 10 mukaisen häiriön mittaukseen. Kyseisessä mittauksessa baileri pääsi vuotamaan noin 0,5-1 desilitraa. Baileri saattaa vuotaa veden epäpuhtauksien vuoksi. Testeissä huomattiin, että baileri vuoti useimmin silloin, kun vesi oli savista. Vedessä olevat partikkelit estävät kuulan asettumisen paikoilleen tiiviisti, jolloin vettä pääsee vuotamaan ulos. Bailerin vuotamisen voi aiheuttaa myös epätasainen nostaminen. Bailerin tulisi vetää ylös tasaista vauhtia. Nytkähtelevä nosto voi aiheuttaa bailerin suuaukon tukkivan kuulan

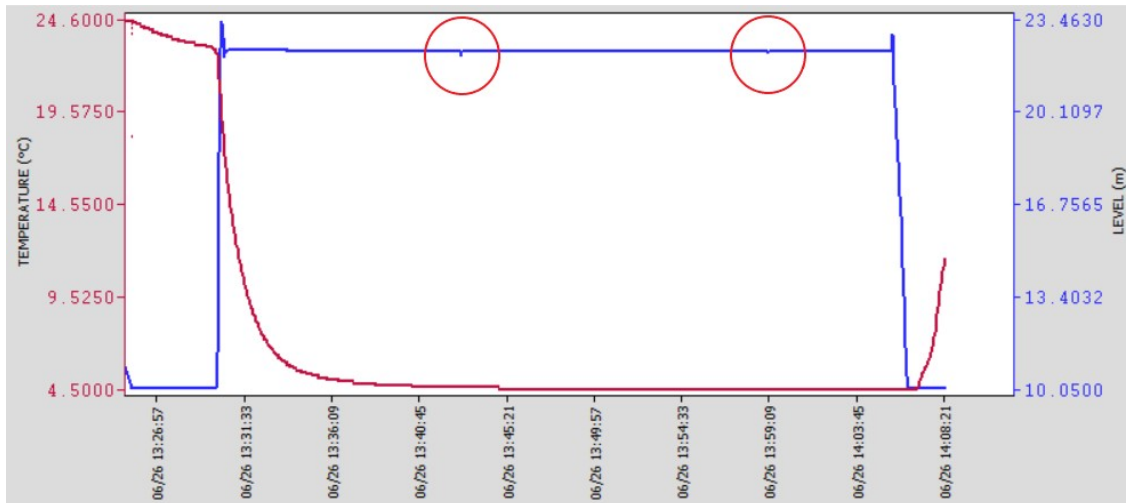
liikahtamisen, jolloin vesi pääsee vuotamaan ulos. Ennen bailerin nostoa tulee varmistua siitä, että kuula on vajonnut bailerin pohjalle ja tukkinut pohjassa olevan aukon. Baileri tulee nostaa vedestä yhdellä ripeällä liikkeellä, jotta kuula lukkiutuu pohjaan kunnolla. Vuotava baileri saattaa aiheuttaa virheen tuloksissa ja hidastaa testin suorittamista, sillä testi joudutaan uusimaan. Ennen testin uusimista joudutaan odottamaan, että veden pinta on palautunut ennalleen.



Kuva 10. Vuotavan bailerin aiheuttama häiriö. Häiriö näkyy ajassa 11.04.02-11.05.08.

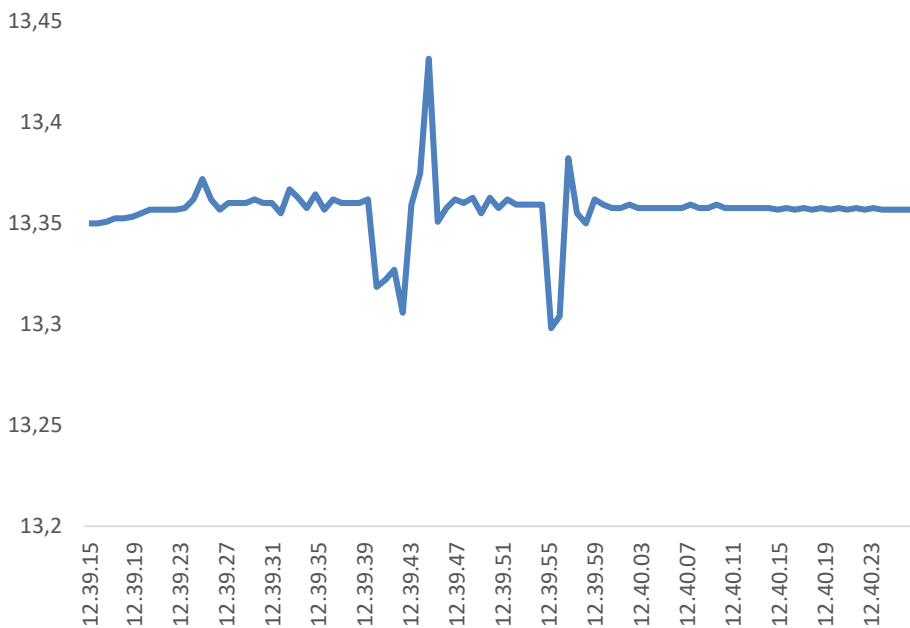
Kaikki pohjavesiakviferit eivät ole soveltuvia slug-testin suorittamiseen. Mikäli akviferi johtaa vettä todella hyvin, saattaa vedenpinnan palautuminen olla lähes välitöntä, jolloin luotettavaa tulosta hydraulisen johtavuuden määrittämiseen on vaikeaa saada. Fabbrin et al. (2012, 6) mukaan pohjaveden korkea virtausnopeus lisää slug-testin epävarmuutta, sillä se aiheuttaa turbulenssia

pohjavesiputkessa. Kuvassa 22 nähdään esimerkki tapauksesta, jossa akviferin johtavuus on todella korkea. Kyseinen pohjavesiputki sijaitsi kerrostuneessa akviferissä. Akviferi oli paksuudeltaan noin 27 metriä ja koostumukseltaan pääosin hiekkaa ja soraa, hiekan ja soran välissä kerros moreenia.



Kuva 11. Hyvin vettä johtavassa akviferissä suoritettuja slug-testejä. Mittaus alkaa ajassa 13.31.33 ja suoritettut slug-testit on ympyröity. Veden poistamisen aiheuttamat poikkeamat eivät ole tarpeeksi suuria hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi.

Bouwerin ja Ricen metodi ei ota huomioon veden ja havaintoputken inertiaa. Heikosti tai kohtuullisesti vettä johtavissa akvifereissä inertia ei juuri vaikuta, mutta hyvin vettä johtavissa akvifereissä inertia alkaa vaikuttamaan ja vedenpinta saattaa alkaa oskilloimaan havaintoputkessa kuvan 12 mukaisesti. Tällaisessa tilanteessa vedenpinnan palautuminen ei ole eksponentiaalista, vaan vedenpinta palautuu nopeasti ja nousee alkuperäisen korkeuden yläpuolelle ja laskee sen jälkeen alkuperäisen korkeuden alapuolelle. Tämä voi toistua useita kertoja, ennen kuin vedenpinnan korkeus on asettunut alkuperäiselle tasolle. Tällaisessa tilanteessa Bouwerin ja Ricen metodia ei voida käyttää. Useita metodeja tällaisen vasteen analysoimiseksi on kehitetty, mutta näiden metodien heikkous on se, että transmissiviteettiä ei voida niiden avulla selvittää, ellei tiedossa ole testin kohteena olevan akviferin varastokerroin. (Kruseman & de Ridder 2000, 237)



Kuva 12. Vedenpinnan oskillointi testin suorittamisen aikana hyvin vettä johtavassa akviferissä sijaitsevassa havaintoputkessa.

5 VIITTEET

Bouwer H. 1989. The Bouwer and Rice Slug Test – An Update. *Ground Water* Vol. 27 No 3.

Butler J.J. Jr, Healey J.M. 1998 Relationship Between Pumping-Test and Slug-test Parameters: Scale Effect or Artifact? *Ground Water* Vol. 36 No. 2. 8s.

Fabbri P., Ortombina M., & Piccinini L. 2012. Estimation of Hydraulic Conductivity Using the Slug Test Method in a Shallow Aquifer in the Venetian Plain (NE, Italy). *AQUA mundi* 3. 125-133

Fitts, C.R. 2012. *Groundwater Science* (Second edition). Waltham, MA: Elsevier. 692 s. ISBN 978-0-12-384705-8.

Hyder Z., Butler, J. J. Jr., McElwee C. D. & Liu W. 1994 Slug tests in partially penetrating wells. *Water Resources Research*, vol 30. no. 11.

Kruseman, G. P., Ridder, N.A.D. & Verweij J.M. 1990. *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. 2. painos. (completely rev.). edn, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI) Publication 47. Wageningen, The Netherlands. 377 s. ISBN 90 70754 207.

Schwartz F. W. & Zhang H., 2002. *Fundamentals of Ground Water*. New York: John Wiley & Sons Inc., 583 s. ISBN 0-471-13785-5.

Scholl M. A., Christenson S. 1998. *Spatial Variation in Hydraulic Conductivity Determined by Slug Tests in the Canadian River Alluvium Near the Norman Landfill, Norman, Oklahoma*. *Water-Resources Investigations Report* 97-4292.

Strickland T., Korleski C. 2006. *Technical Guidance Manual for Ground Water Investigations, Chapter 4 Pumping and Slug Tests*. Columbus, OH: Ohio Environmental Protection Agency, Division of Drinking and Ground Waters. 45 s.