



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**MAAPERÄN HYDRAULISEN JOHTAVUUDEN  
KUSTANNUSTEHOKAS MÄÄRITTÄMINEN  
POHJAVESIPUTKISTA LAPIN ALUEELLA**

Riku Sanaksenaho

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Toukokuu 2019



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**MAAPERÄN HYDRAULISEN JOHTAVUUDEN  
KUSTANNUSTEHOKAS MÄÄRITTÄMINEN  
POHJAVESIPUTKISTA LAPIN ALUEELLA**

Riku Sanaksenaho

Ohjaaja: P. Rossi

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Toukokuu 2019

# TIIVISTELMÄ

## OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Ympäristötekniikan koulutusohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Sanaksenaho, Riku		Työn ohjaaja yliopistolla Rossi P., TkT	
Työn nimi Maaperän hydraulisen johtavuuden kustannustehokas määrittäminen pohjavesiputkista Lapin alueella			
Opintosuunta Vesi- ja yhdyskuntatekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika Toukokuu 2019	Sivumäärä 60 s., 1 liite
<b>Tiivistelmä</b> <p>Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia slug-testin käyttämistä pohjavesimuodostuman hydraulisen johtavuuden määrittämiseen koepumppauksen korvikkeena. Slug-testissä muutetaan pohjavesiputken pinnankorkeutta poistamalla tai lisäämällä vettä. Hydraulinen johtavuus voidaan määrittää vedenpinnan palautumisnopeudesta. Pohjavesimuodostuman hydraulisen johtavuuden avulla voidaan määrittää muodostuman transmissiviteetti, joka on olennainen tieto määrittäessä muodostuman potentiaalia vedenottoon. Työn tavoitteena oli perehtyä slug-testin suorittamiseen liittyviin epävarmuustekijöihin ja tutkia, onko mahdollista määrittää Lapin geologisissa olosuhteissa erityyppisille pohjavesiakvifereille selkeitä enimmäispaksuuksia, joissa slug-testiä on mahdollista käyttää hydraulisen johtavuuden määrittämiseen. Lisäksi työssä tutkittiin slug-testin käyttökelpoisuutta määrittäessä akviferin soveltuvuutta vedenottoon.</p> <p>Työtä varten toteutettiin kesän 2018 aikana 41 slug-testin sarja havaintoputkilla, jotka asennettiin eri puolilla Lappia sijaitseviin pohjavesimuodostumiin Geologian tutkimuskeskuksen ja Lapin liiton toimesta POSKI-hanketta varten. Hydraulinen johtavuus saatiin määritettyä 18 havaintoputkesta. Testeistä saatuja tuloksia verrattiin havaintoputkien asennusten yhteydessä tehtyjen maaperähavaintojen perusteella tehtyihin arvioihin maaperän hydraulisesta johtavuudesta.</p> <p>Slug-testi on koepumppaukseen verrattuna nopea ja edullinen. Slug-testin voi toteuttaa muutamissa minuuteissa, kun koepumppaus kestää muutamasta päivästä useisiin viikkoihin. Testi voidaan toteuttaa yhden ihmisen voimin ja kalustoa tarvitaan huomattavasti vähemmän kuin koepumppauksen toteuttamiseen. Slug-testillä on kuitenkin useita heikkouksia koepumppaukseen verrattuna. Slug-testin vaikutusalue on pieni, joten testejä pitää suorittaa alueilla useita. Lisäksi se on herkkä paikallisille muuttujille pohjavesiputkien läheisyydessä. Yleinen slug-testiin liittyvä ongelma on havaintoputken suodatinosan ympärille putken asennuksen yhteydessä kerääntyvä muodostuman maa-ainesta hienempi maa-aines, joka vääristää tuloksia. Suurin heikkous on koepumppaukseen verrattuna kuitenkin se, että slug-testin avulla ei välttämättä voida määrittää hydraulista johtavuutta, kun pohjavesimuodostuman transmissiviteetti on suuri.</p> <p>Sora-akvifereissä toteutettujen testien tulokset olivat pääsääntöisesti maaperähavaintojen perusteella tehtyjen arvioiden alapuolella tai vain hieman niiden yläpuolella. Hiekka-akvifereissä tulokset olivat arvioiden mukaisia ja moreeniakvifereissä tulokset olivat arvioiden ylärajoja korkeampia. Soravaltaisissa akvifereissä toteutettujen testien määrä oli rajallinen vaikeuttaen vertailua maaperäanalyysiin.</p> <p>Soravaltaisissa pohjavesimuodostumissa havaittiin, että selvää rajaa sille, miten paksussa muodostumassa slug-testi toimii, oli vaikea määrittää. Tämä johtui luultavasti soran koostumuksen ja raekokojakauman vaihtelusta koekohteilla. Testien perusteella voitiin kuitenkin todeta, että noin 3-4 metriä paksuissa ja sitä matalammissa sora-akvifereissä testi todennäköisesti onnistui. Hiekka-akvifereissä vaihtelua oli vähemmän. Hydraulinen johtavuus saatiin määritettyä noin 15 metriä paksusta hiekkamuodostumasta. Kyseinen akviferi oli vedenjohtokyvyltään riittävän suuri, että sitä voitaisiin hyödyntää vedenottoon. Slug-testiä oli siis mahdollista käyttää määrittämään akviferin käyttöpotentiaalia vedenoton suhteen: mikäli hydraulista johtavuutta ei saada määritettyä slug-testillä, on akviferillä vähintään kohtalainen käyttöpotentiaali. Tarkempia tuloksia varten tulee kuitenkin käyttää koepumppausta.</p>			
Muita tietoja			

# ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Environmental Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Sanaksenaho, Riku		Thesis Supervisor Rossi P., Postdoctoral Researcher	
Title of Thesis Cost-effective determination of soil hydraulic conductivity from groundwater pipes in Lapland			
Major Subject Water Resources and Civil Engineering	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date April 2019	Number of Pages 60 p., 1 App.
<p><b>Abstract</b></p> <p>The purpose of this thesis was to examine the use of slug test as a replacement for pumping tests to define hydraulic conductivity of the soil in groundwater aquifers in Lapland region. Slug test is conducted by altering the water level in a groundwater pipe by removing or adding water. Hydraulic conductivity can be defined from the change in hydraulic head. Hydraulic conductivity of soil can be used to define transmissivity of the aquifer, which is an important parameter in determining aquifer potential for water intake. The objective was to research uncertainties involved in slug tests and whether it is possible to determine maximum thicknesses of different kinds of aquifers where slug test can be conducted in geological circumstances prevailing in Lapland. In addition, the usefulness of the slug test to determine the suitability of the aquifer for water abstraction was examined.</p> <p>For this thesis a series of 41 slug tests were conducted during summer 2018 utilizing observation wells installed by Geological Survey of Finland and Regional Council of Lapland for POSKI-project. Hydraulic conductivity was possible to determine from 18 wells. Results were compared to approximations based on soil composition observations made during well installations.</p> <p>Slug test is quick and cost-effective compared to pumping tests. Slug test can be conducted in minutes, whereas pumping test can take from a few days to several weeks. Slug test can be performed by one person and it requires notably less equipment than pumping tests. However, slug test has multiple weaknesses compared to pumping tests. Area of effect is much smaller in slug tests, which means multiple tests must be conducted in same area. It is also quite sensitive to local variables near the groundwater well. A common problem involved in slug tests is accumulation of fine soil material around the filter of observation well. This fine material is originated from installation of the well and it causes distortions in results. However, the biggest weakness of slug test is that it can't be used to determine hydraulic conductivity when transmissivity of the aquifer is high.</p> <p>Results of slug tests conducted in gravel aquifers were mainly below or barely inside approximations. Results of tests conducted in sand aquifers were inside approximations and results of tests conducted in till aquifers were above the upper limit of approximations. The number of tests conducted in gravel aquifers were limited which made it difficult to compare test results with soil analysis.</p> <p>It was observed that especially in gravel aquifers clear maximum thickness of an aquifer where hydraulic conductivity can be measured by using slug test was difficult to define. This was probably a result of variances in gravel composition and in grain size distribution in test areas. However, based on tests it was observed that hydraulic conductivity could be determined when gravel aquifer was maximum 3-4 meters thick. There was less variance in sand aquifers. The thickest sand aquifer where hydraulic conductivity was determined was 15 meters thick. This aquifer has transmissivity high enough that it could be considered as a potential aquifer for water intake. This means that it is possible to use slug test to determine aquifer potentiality. If hydraulic conductivity can't be determined, transmissivity is likely high enough that the aquifer could be considered to have an adequate potentiality. For more accurate results and exact information about the potentiality pumping test is still required.</p>			
Additional Information			

# ALKUSANAT

Tämä työ on toteutettu Oulun yliopiston vesi- ja ympäristötekniikan osastolla yhteistyössä Geologian tutkimuskeskuksen kanssa toukokuun 2018 ja toukokuun 2019 välisenä aikana. Haluan kiittää Pekka Rossia työn aiheesta ja ohjauksesta, Geologian tutkimuskeskusta työn mahdollistamisesta sekä Juho Kupilaa yhteistyöstä ja työn tarkastamisesta. Maa- ja vesitekniikan tuki ry:tä haluan kiittää työni rahoittamisesta.

Kiitokset kuuluvat myös vanhemmilleni ja isovanhemmilleni saamastani tuesta ja kannustuksesta. Haluan myös kiittää opiskelutovereitani mukavasta opiskeluaajasta ja hyvistä muistoista. Erityiskiitokset haluan osoittaa avovaimolleni Johannalle.

Oulussa 1.5.2019

Riku Sanaksenaho

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	7
2 Pohjaveden hydrologia ja varastot .....	8
2.1 Akviferit .....	11
2.2 Pohjaveden virtaus ja akviferien parametrit.....	14
2.3 Menetelmät hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi.....	18
2.3.1 Koepumppaus .....	18
2.3.2 Slug-testi .....	22
2.3.3 Raekokoanalyysi.....	24
3 Tutkimusmenetelmät.....	27
3.1 Slug-testin suunnittelu ja suorittaminen.....	31
3.2 Tulosten analysoiminen Bouwerin ja Ricen metodilla .....	35
3.3 Epävarmuustekijät.....	40
4 Tulokset ja tulosten käsittely.....	46
4.1 Hydraulinen johtavuus .....	47
4.2 Transmissiviteetti .....	50
5 Johtopäätökset.....	54
6 Yhteenveto .....	56
Lähteet.....	58

## **Liiteluettelo**

Liite 1. Lista havaintoputkista, joista hydraulista johtavuutta ei saatu määritettyä

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	maakerroksen poikkipinta-ala [m <sup>2</sup> ]
b	akviferin paksuus [m]
D	vedenpinnan korkeus akviferin pohjasta mitattuna [m]
d	kaivon siivilän pituus [m]
dh	hydraulisen korkeuden muutos [m]
dL	virtaustien pituus [m]
dz <sub>1</sub> , dz <sub>2</sub> ...	akviferin kerrosten paksuudet [m]
d <sub>10</sub>	efektiivinen raekoko [mm]
d <sub>60</sub>	seulakoko, jonka 60% näytteestä läpäisee [mm]
g	putoamiskiihtyvyys [m/s <sup>2</sup> ]
H	veden alla olevan putken osan pituus [m]
h	vedenpinnan alenema [h]
h <sub>0</sub>	vedenpinnan korkeus ajanhetkellä t <sub>0</sub> = 0 [m]
h <sub>t</sub>	vedenpinnan korkeus ajanhetkellä t > t <sub>0</sub> [m]
Hk	hiekkä
K	hydraulinen johtavuus [m/s]
k	permeabiliteetti [m <sup>2</sup> ]
KiSr	kivinen sora
Mr	moreeni
n	huokoisuus
Q	virtaama [m <sup>3</sup> /s]
r <sub>c</sub>	sen putken osan säde, missä ei ole siivilää [m]
R <sub>e</sub>	slug-testin efektiivinen vaikutussäde [m]
r <sub>w</sub>	horisontaalinen etäisyys kaivon keskipisteestä häiriintymättömään akviferiin [m]
SiHk	Silttinen hiekkä
Sr	sora
T	transmissiviteetti [m <sup>2</sup> /s]
v	kinemaattinen viskositeetti [m <sup>2</sup> /s]
μ	nesteen viskositeetti [kg/s m]
ρ	nesteen tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]

# 1 JOHDANTO

Pohjavesiakviferin hydraulinen johtavuus kuvaa pohjaveden liikkumisedellytyksiä. Akviferin hydraulinen johtavuus on hyödyllinen tieto määrittäessä esimerkiksi akviferin kykyä välittää vettä ja haitta-aineiden leviämisenopeuksia akviferissä. Hydraulinen johtavuus voidaan määrittää esimerkiksi koepumppauksen, raekokoanalyysin tai slug-testin avulla.

Tässä työssä tutkittiin slug-testin käyttämistä pohjavesimuodostuman ominaisuuksien määrittämisessä Lapin olosuhteissa. Slug-testi on kustannustehokas ja nopea vaihtoehto koepumppaukselle ja raekokoanalyysille, mutta sen käyttämiseen liittyy rajoituksia. Se ei välttämättä ole sopiva menetelmä, jos muodostuma on paksu ja se koostuu hyvin vettä johtavasta maa-aineksesta. Tavoitteena oli löytää Lapin alueella raja-arvot pohjavesimuodostuman paksuudelle ja koostumukselle, missä slug-testi on käyttökelpoinen. Lisäksi tavoitteena oli tutkia, miten käyttökelpoinen slug-testi on määrittäessä pohjavesimuodostuman soveltuvuutta vedenottoon.

Työtä varten toteutettiin slug-testejä POSKI-hanketta (Pohjaveden suojelun ja kiviaineshuollon yhteensovittaminen) varten asennetuilla havaintoputkilla eri puolilla Lappia. POSKI-hankkeen tavoitteena on turvata kiviainesten ja pohjaveden saanti yhdyskuntien tarpeisiin. Havaintoputket asennettiin Geologian tutkimuskeskuksen ja Lapin liiton toimesta vuosina 2013-2018. Testejä toteutettiin yhteensä 41 kappaletta Kemin, Tornion, Tervolan, Rovaniemen, Posion, Kemijärven, Pelkosenniemen, Kolarin, Muonion, Kittilän, Enontekiön, Sodankylän ja Inarin alueilla. Kaikki testit toteutettiin kesän 2018 aikana.

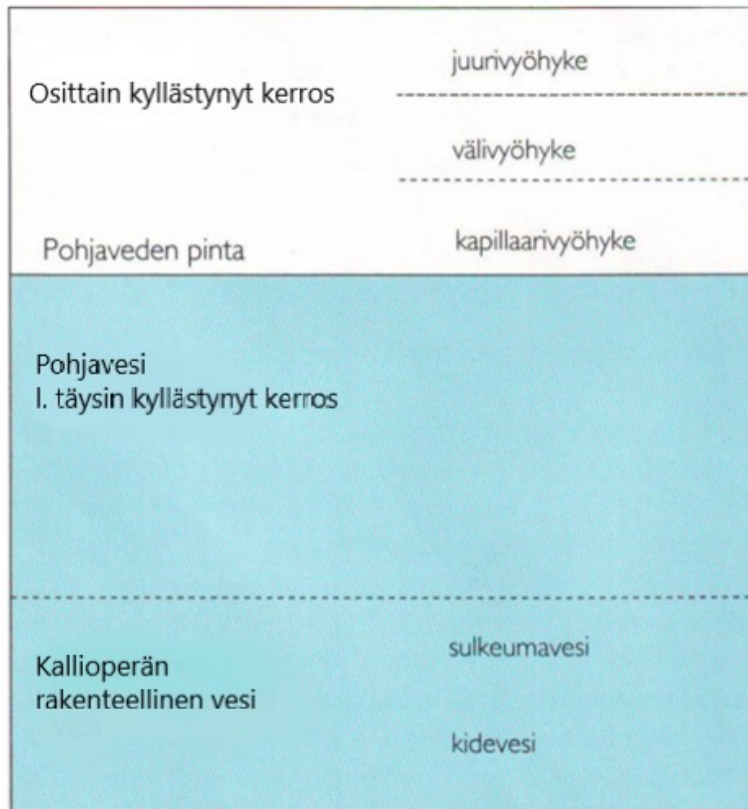
Havaintoputkien kairauksista saatuja maaperätietoja käytettiin arvioitaessa toteutettujen mittausten paikkansapitävyyttä. Maaperätietojen avulla saatiin myös kuva siitä, millaisilla pohjavesimuodostumilla menetelmää voidaan käyttää hydraulisen johtavuuden määrittämiseen.

## 2 POHJAVEDEN HYDROLOGIA JA VARASTOT

Pohjavesi on maa- ja kallioperään varastoitunutta vettä. Pohjaveden syntyyn tarvitaan maankamaran avoin tila, jota kutsutaan huokostilaksi, sekä tiivis pohja, jota vesi ei läpäise ja jonka päälle vesi kerrostuu. Huokostila voi olla rakeisen kivimassan rakeiden välissä tai yksittäinen rako tai onkalo. (Mälkki 1999, 23)

Maaperän kokonaishuokoisuus on maaperässä olevan huokostilan suhde maaperän kokonaistilavuuteen. Tehokas huokoisuus tarkoittaa maaperän yhdistyneen rakosysteemin kokonaistilavuuden suhdetta maa-aineksen kokonaistilavuuteen. Pohjaveden virtaukselle tehokas huokoisuus on olennaisempi tekijä kuin kokonaishuokoisuus, sillä kokonaishuokoisuuteen voi kuulua huokostiloja, jotka ovat erillään rakosysteemeistä, joissa pohjavesi kulkee. (Schwartz & Zhang 2002, 42, 44)

Kaikki maaperässä oleva vesi ei ole pohjavettä, vaan pohjavedeksi kutsutaan vettä, joka sijaitsee maaperässä kokonaan veden kyllästämällä alueella. Saturoituneen alueen yläpuolella olevaa vesikerrosta kutsutaan osittain kyllästyneeksi kerrokseksi. Osittain kyllästyneellä alueella sijaitsee juurivyöhyke, välivyöhyke ja kapillaarivyöhyke. Maanalaisten vesien vyöhykkeet on esitetty kuvassa 1. Juurivyöhyke on maakerros, johon kasvien juuret ulottuvat. Välivyöhyke on juurivyöhykkeen ja kapillaarivyöhykkeen välissä ja siinä sijaitsee vapaata vettä ja adsorptiovettä. Välivyöhykkeen ja varsinaisen pohjavesivyöhykkeen välissä sijaitsee kapillaarivyöhyke, joka on osittain tai kokonaan saturoitunut vyöhyke, jossa vesi pysyy kapillaarivoimien ansiosta. Kapillaarivyöhykkeen paksuus riippuu maaperän hienojakoisuudesta, mitä hienojakoisempi maalaji, sitä korkeampi kapillaarivyöhyke. (Korkka-Niemi & Salonen 1996, 35-36)



Kuva 1. Maanalaisten vesien vyöhykkeet. (mukailtu Korkka-Niemi & Salonen 1996, 36)

Pohjavesi muodostuu yleensä sadevedestä ja sulavasta lumesta (Mälkki 1999, 22). Kaikki sadevesi ei luonnollisesti päädy pohjavedeksi. Osa vedestä haihtuu suoraan ilmakehään ja osa vedestä haihtuu kasvien kautta transpiraationa. Lisäksi osa vedestä päätyy erityisesti lumensulamiskautena pintavaluntana esimerkiksi järviin ja jokiin. Keskimäärin noin puolet sateesta imeytyy maaperään ja siitä vain pieni osa päätyy pohjaveteen (Korkka-Niemi & Salonen 1996, 26).

Sadeveden suotautuminen pohjavedeksi riippuu useista maaperän ja maaston ominaisuuksista. Korkka-Niemen & Salosen (1996, 26) mukaan suotautumiseen vaikuttaa ennen kaikkea maaperän vedenjohtavuus. Myös maaston muoto, kasvillisuuden tyyppi ja määrä sekä sateen määrä ja kesto vaikuttavat osaltaan suotautumiseen. Lisäksi rakennetuilla alueilla suotautumiseen vaikuttaa asfaltointi.

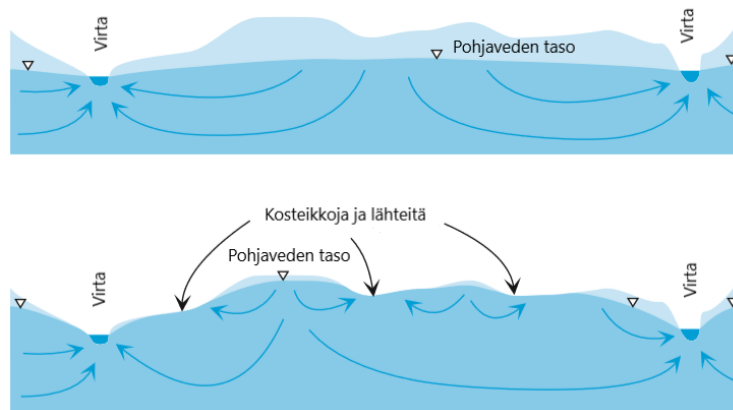
Sadevesi suotautuu parhaiten suurirakeiseen materiaaliin kuten soraan. Suomessa sorasta koostuvaan maaperään on mitattu suotautuvan jopa 60-75% sadannasta.

Moreenimaihin imeytyminen ja suotautuminen vaihtelee hyvin paljon paikallisesti. Niihin vaikuttavat mm. kasvipeite sekä moreenin rakenne ja tiiviys. Moreenimailla sadevedestä voi suotautua näistä ominaisuuksista riippuen yli 50% sadevedestä, mutta määrä voi olla huomattavasti pienempi, jopa ainoastaan 10% luokkaa. Hienorakenteisilla mailla, kuten siltti- ja savimailla, suurin osa sadevedestä poistuu pintavalumana. (Korkka-Niemi et al. 1996. 26)

Pohjavesi on jatkuvassa liikkeessä ja pinnankorkeus jatkuvassa muutostilassa. Pohjavesi virtaa muodostuma-alueilta jatkuvasti painovoiman vaikutuksesta purkautumisalueita kohti. Purkautuminen voi tapahtua keskitetysti yhdellä suppealla alueella tai pidemmällä reuna-alueella. Vesi voi purkautua joko tiukumalla maan pinnalle laajalla alueella tai purkautumispaikka voi olla rajattu. Purkautumista tapahtuu runsaasti myös suoalueilla ja vesistöihin pintaveden pinnan alapuolelta. (Airaksinen 1978, 51-52)

Purkautuvan ja muodostuvan pohjaveden määrä on vuositasolla tarkasteltuna likimain yhtä suuri, vaikka muodostuminen on jaksottaista. Pohjaveden muodostuminen on Suomessa suurimmillaan keväällä lumensulamiskautena, mutta purkautuminen ei kasva samassa määrin, joten pohjaveden pinta nousee. Tämä muutos tasoittuu kuivina aikoina, kun purkautuminen pysyy pidemmällä reuna-alueilla samana, vaikka uutta pohjavettä muodostuu vähemmän. (Mälkki 1999, 48-50)

Pohjaveden pinta voi nousta pohjaveden muodostumisjaksoina runsaastikin. Pinnannousua tapahtuu erityisesti alueilla, joissa maaperän vedenjohtokyky on heikko (Fitts 2013, 128). Kuvassa 2 on kuvattu tilanne, jossa pohjavedenpinta nousee ja synnyttää maaston mataliin kohtiin tilapäisiä kosteikkoja ja pohjavesilähteitä.



Kuva 2. Pohjaveden noususta johtuva uusien purkautumispisteiden muodostuminen (mukailtu Fitts 2013, 128)

## 2.1 Akviferit

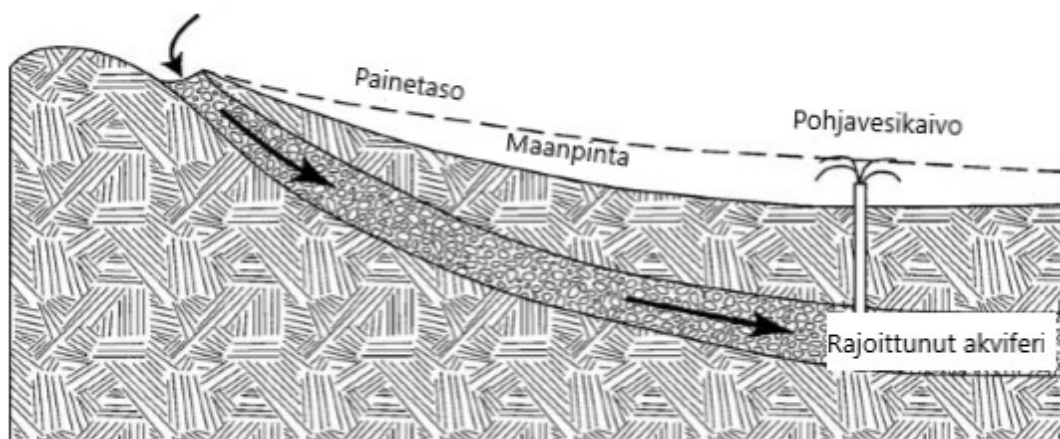
Termi ”akviferi” on määritelty luonnolliseksi maanalaiseksi geologiseksi muodostumaksi, jossa on niin paljon vettä, että sen tuotolla on taloudellista merkitystä. Tämä on kuitenkin varsin monella tavalla tulkittava määritelmä, sillä jo pieni pohjavesimuodostuma voi olla riittävä esimerkiksi yhden kotitalouden tai pienen mökkiyhteisön tarpeisiin (Delleur 2007, 2-25 – 2-26). Akviferi voidaan määritellä myös muodostumaksi, joka on veden kyllästämä ja jolla on tyydyttävä hydraulinen johtavuus. Varsinaista raja-arvoa tälle vähimmäisjohtavuudelle ei ole, mutta Mälkki (1999, 37) mainitsee, että alarajan arvona voidaan pitää esimerkiksi hienohkon hiekan hydraulista johtavuutta (s. 17), eli  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  m/s.

Akvitardi on kerros, jossa vesi pääsee kulkemaan jossain määrin. Tyypillisiä akvitardeja ovat mm. savi- ja hiesukerrokset. Krusemanin & de Ridderin (1994, 13) mukaan akvitardit ovat kykeneviä välittämään vettä pitkällä ajanjaksolla ja suurella pinta-alalla tarkasteltuna, mutta välityskyky on kuitenkin niin pieni, että esimerkiksi vedenottoaivoa ei pystytä alueelle sijoittamaan.

Kerrosta, jonka läpi vesi ei pääse kulkemaan, kutsutaan akvikludiksi. Akvikludi rajoittaa akviferiä alhaalta ja joskus myös ylhäältä. Metamorfinen kivi on tyypillinen akvikludi Suomessa. Metamofrisia kivilajeja ovat mm. gneissi ja kiilleliuske. Täysin vettä läpäisemätön kerros on todellisuudessa harvinainen, käytännössä kaikki kerrokset

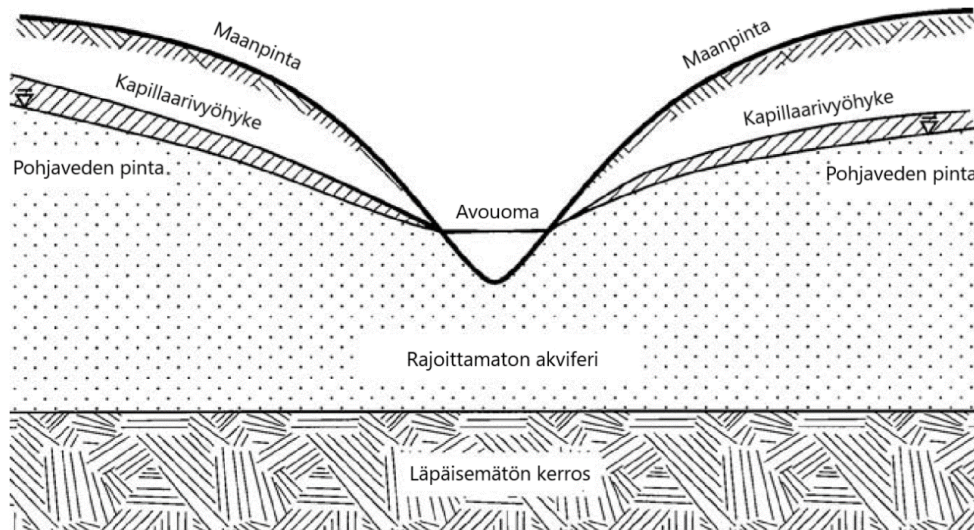
läpäisevät vettä ainakin jonkun verran (Kruseman & de Ridder 1994, 13). Mikäli akviferissä on yläpuolella akvitardi ja alapuolella akvikludi tai molemmat rajoittavat kerrokset ovat akvitardeja, kutsutaan akviferiä vuotavaksi (Kruseman & de Ridder 1994, 14).

Akviferejä on kolmenlaista perustyyppiä: rajoittunutta, rajoittumatonta ja vuotavaa. Rajoittunut eli paineellinen akviferi sijoittuu kahden vettä huonosti läpäisevän kerroksen väliin. Jotta akviferiä voidaan kutsua rajoittuneeksi, pitää lisäksi läpäisemättömien kerrosten väliin jäävä tila olla saturoitunut (Delleur 2007, 2-25). Rajoittuneen akviferin ylä- ja alapuolella olevat läpäisemättömät kerrokset aiheuttavat vedelle ympäristöä korkeamman painetasen kuvan 3 mukaisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että mikäli akviferiin puhkaistaan kaivo, nousee vedenpinta itsestään kaivossa painetasoa vastaavaan korkeuteen. Mikäli vedenpaine on niin korkea, että vesi nousee kaivosta itsestään maanpinnan yläpuolelle, kutsutaan akviferiä arteesiseksi (Airaksinen 1978, 48).



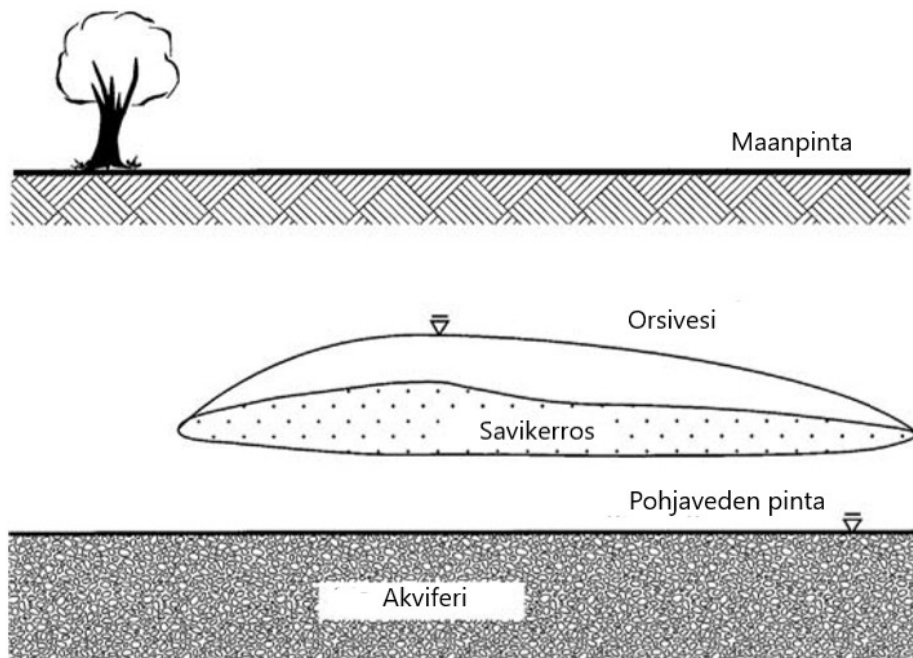
Kuva 3. Paineellinen akviferi (mukailtu Delleur J.W. 2007. 2-26)

Rajoittamattomalla eli vapaalla akviferillä, jollainen on esitetty kuvassa 4, ei ole rajoittavaa kerrosta yläpuolella. Tällöin veden painetaso vastaa ympäristön painetasoa. Tällaisissa akvifereissä vedenpinta muodostaa akviferin ylärajan. Vapaisiin akvifereihin asennettujen havaintoputkien pinnankorkeus vastaa likimain akviferin pinnankorkeutta. (Schwartz & Zhang 2002, 69)



Kuva 4. Vapaa akviferi (mukailtu Delleur 2007, 2-26)

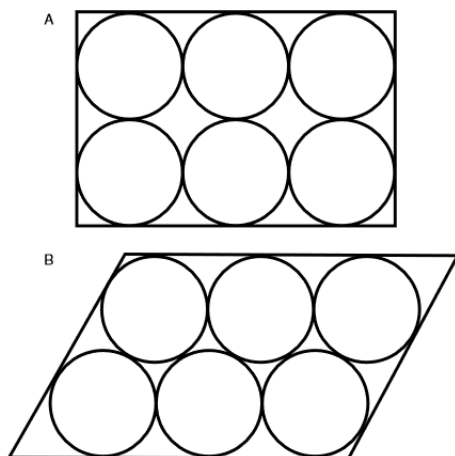
Vesi voi myös kerrostua varsinaisen pohjavesimuodostuman yläpuolelle kuvan 5 mukaisesti. Tällaista muodostumaa kutsutaan orsivedeksi. Mälkin (1999, 32-33) mukaan orsivesi muodostuu maaperään imeytyvän veden kohdatessa huonosti tai ei lainkaan vettä johtavan kerroksen, kuten savirikasta moreenia. Orsivesi saattaa muodostua tilapäisesti myös lumensulamiskauden yhteydessä, kun maaperän eri kerrokset sulavat eri tahtia.



Kuva 5. Orsivesi varsinaisen pohjavesimuodostuman yläpuolella. (mukailtu Delleur 2007, 2-27)

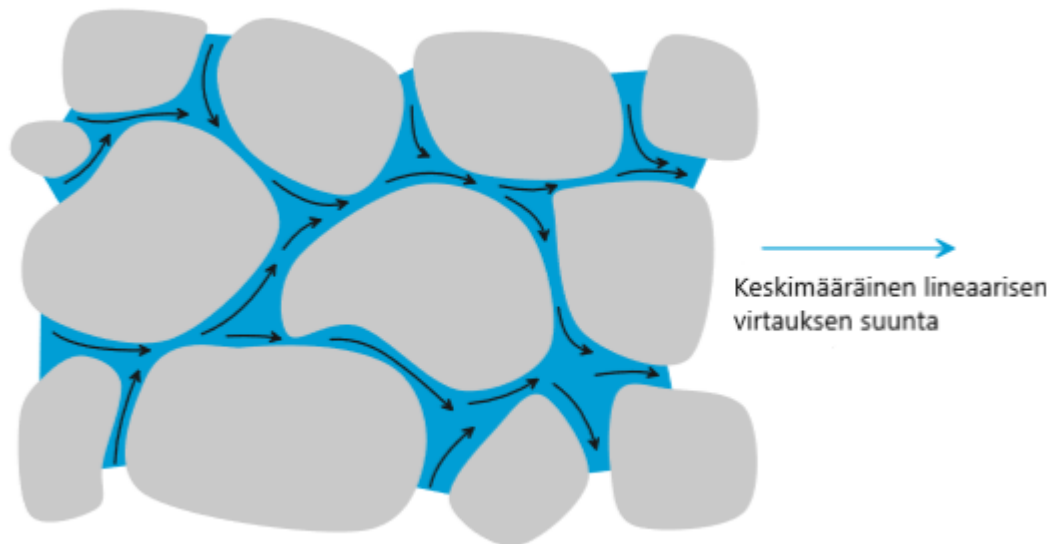
## 2.2 Pohjaveden virtaus ja akviferien parametrit

Pohjavesien virtausnopeuksissa on suuria eroja eri maalajien välillä. Savimaissa virtausnopeus voi olla käytännössä nolla, silttimaissa liikettä on jo jonkun verran. Raekoon kasvaessa virtausnopeus kasvaa. Soramaa on tyypillinen hyvin vettä johtava maalaji. Mälkin (1999, 39) mukaan raekokojakauma on raekoon ohella ratkaiseva tekijä pohjaveden virtausnopeudessa ja hydraulisessa johtavuudessa. Lisäksi Airaksinen (1978, 67) mainitsee, että veden virtausnopeuteen ja vedenjohtavuuteen vaikuttavat lisäksi huokoisuus, huokoskoostumus, rakeiden ja huokosten muoto ja pinta-ala sekä huokoisten mutkaisuus. Kuvassa 6 on kuvattu esimerkki kahdesta erilaisesta rakeiden asettumistavasta. Raekoko on molemmissa tilanteissa sama, mutta huokoskoot ja vedenjohtavuudet ovat erisuuruisia.



Kuva 6. Kaksi tilannetta, joissa raekoot ovat yhtä suuria, mutta huokoskoot eri kokoisia. Ylemmässä kuvassa vedenjohtavuus on parempi. (Delleur 2007, 2-11)

Pohjaveden virtaus ei ole akviferissä suoraviivaista. Maaperän rakojärjestelmät ovat usein monimutkaisia, joten virtauksen nopeus ja suunta vaihtelee todellisuudessa kuvan 7 mukaisesti (Fitts 2013, 57). Puhuttaessa pohjaveden virtausnopeudesta käytetään veden keskimääräistä lineaarista virtausnopeutta ja -suuntaa.



Kuva 7. Todelliset virtauspolut huokoisessa väliaineessa (mukaiilu Fitts 2013, 57)

Pohjaveden virtaus ei yleensä ole sama jokaisessa akviferin kohdassa. Vaihtelua tapahtuu sekä vertikaalisesti että horisontaalisesti. Korkka-Niemen & Salosen (1996, 44) mukaan kerrostumien epäjatkuvuudet ja maaperän heterogeenisuus aiheuttavat paikallista vaihtelua. Lisäksi Korkka-Niemi & Salonen (1996, 44) mainitsevat, että akviferit ovat usein anisotrooppisia, eli akviferin heterogeenisuus aiheuttaa virtausominaisuuksien vaihtelua jossain suunnassa. Anisotrooppisuus johtuu useimmiten akviferin kerroksellisuudesta. Usein akviferissä on päällekkäin useita eri maa-aineksesta koostuvia kerroksia, ja tästä syystä pohjaveden virtaus ja hydraulinen johtavuus on usein parempi vaakasuunnassa kuin pystysuunnassa.

Yksi yleisimmistä pohjaveden liikettä kuvaavista yhtälöistä on Darcyn yhtälö. Henry Darcy osallistui vuonna 1856 projektiin, jossa tutkittiin hiekkakerroksen käyttämistä veden suodattamiseen (Fitts. 2013. 48). Tähän liittyen Darcy toteutti kokeen (kuva 8), jonka tuloksena oli empiirinen yhtälö 1, joka toimii laminaarisen pohjavesivirtauksen kuvaamisen perustana. Turbulenttisessa virtauksessa yhtälö ei siis päde. Laminaarinen virtaus on suoraviivaista ja hidasta, turbulenttinen virtaus on nopeaa ja kaoottista. Virtauksen turbulenttisuutta voidaan kuvata Reynoldsin luvun avulla. Tässä muodossa

yhtälö pätee vain yksiulotteisessa virtauksessa isotrooppisessa väliaineessa (Airaksinen 1978, 62).

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{dh}{dL} \quad (1)$$

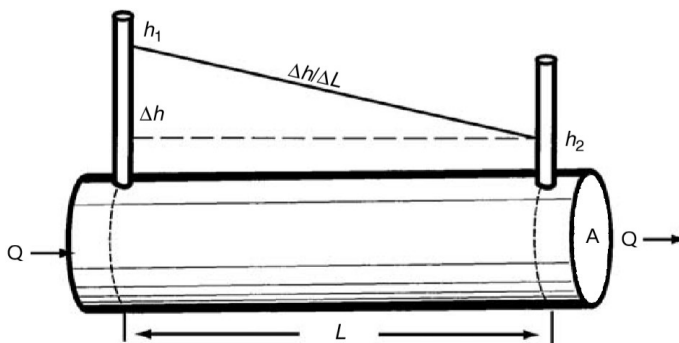
missä  $Q$  on virtaama [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$K$  on hydraulinen johtavuus [ $\text{m/s}$ ]

$A$  on maakerroksen poikkipinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$dh$  on hydraulisen korkeuden muutos [ $\text{m}$ ]

$dL$  on virtaustien pituus [ $\text{m}$ ]



Kuva 8. Darcyn kokeen koejärjestely. Darcyn lain mukaan huokoisen aineen läpi kulkevan veden virtaama on suoraan verrannollinen tarkasteltavaan poikkipinta-alaan ja vedenpaine-eroon ( $h_1 - h_2$ ) ja kääntäen verrannollinen kuljettuun matkaan ( $L$ ) (mukailtu Delleur 2007, 2-20)

Darcyn koe osoitti, että pohjaveden virtausta varten tulee olla olemassa painekorkeuksien ero eli hydraulinen gradientti. Hydraulinen gradientti tarkoittaa virtauksen suuntaan mitattua kokonaisenergian vähenemää pituusyksikköä kohti. Hydraulisen gradientin suuruudesta voidaan päätellä väliaineen hydraulista johtavuutta. Mälkin (1999, 39) mukaan yleensä Suomen olosuhteissa alle promillen hydraulinen

gradientti viittaa hyvään hydrauliseen johtavuuteen ja yli viiden promillen gradientin arvot viittaavat heikkoihin hydraulisiin olosuhteisiin.

Hydraulinen johtavuus eli vedenläpäisevyys kuvaa nesteen virtaamisen helppoutta huokoisessa väliaineessa. Väliaineen vedenläpäisevyys on väliaineelle ominainen ja riippuu kerroksen raejakaumasta ja maaperän rakenteesta (Delleur 2007, 2-20). Vedenläpäisevyyden dimensio on nopeus, yleensä joko cm/s tai m/d.

Hydraulinen johtavuus  $K$  voidaan laskea kaavalla

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (2)$$

missä  $k$  on permeabiliteetti [ $\text{m}^2$ ]

$\rho$  on nesteen tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  on putoamiskiihtyvyys ja [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$\mu$  on nesteen viskositeetti [ $\text{kg}/\text{s m}$ ]

Hydraulinen johtavuus ottaa siis huomioon sekä väliaineen että väliaineessa kulkevan nesteen ominaisuudet.

Tärkeimpiin akviferien parametreihin kuuluvat hydraulisen johtavuuden transmissiviteetti, varastokerroin, ominaisantisuus ja ominaispidättyminen. Transmissiviteetti kuvaa pohjavesiesiintymän kykyä kuljettaa vettä, mikä on oleellinen tieto määrittäessä pohjavesialueen antoisuutta. Transmissiviteetti lasketaan kaavalla

$$T = Kb \quad (3)$$

missä  $K$  on akviferin keskimääräinen hydraulinen johtavuus [ $\text{m}/\text{s}$ ] ja

$b$  on akviferin paksuus [ $\text{m}$ ]

Pohjavesimuodostuman ominaisantoisuudella kuvataan sitä veden määrää, joka valuu pois maaperästä pelkän painovoiman vaikutuksesta. Tällaista maaperästä vapaasti pois virtaavaa vettä kutsutaan vapaaksi vedeksi. Vettä, joka jää huokostilaan, kutsutaan pidättyneeksi vedeksi. Tätä huokostilaan jäävää vettä kutsutaan ominaispidättymiseksi. Kokonaishuokoisuus on siis ominaisantoisuuden ja -pidättymisen summa. Ominaisantoisuus on suuri, kun maa-aines on suurihuokoista, kuten hyvin lajittunut karkea hiekka. (Mälkki 1999, 24-25)

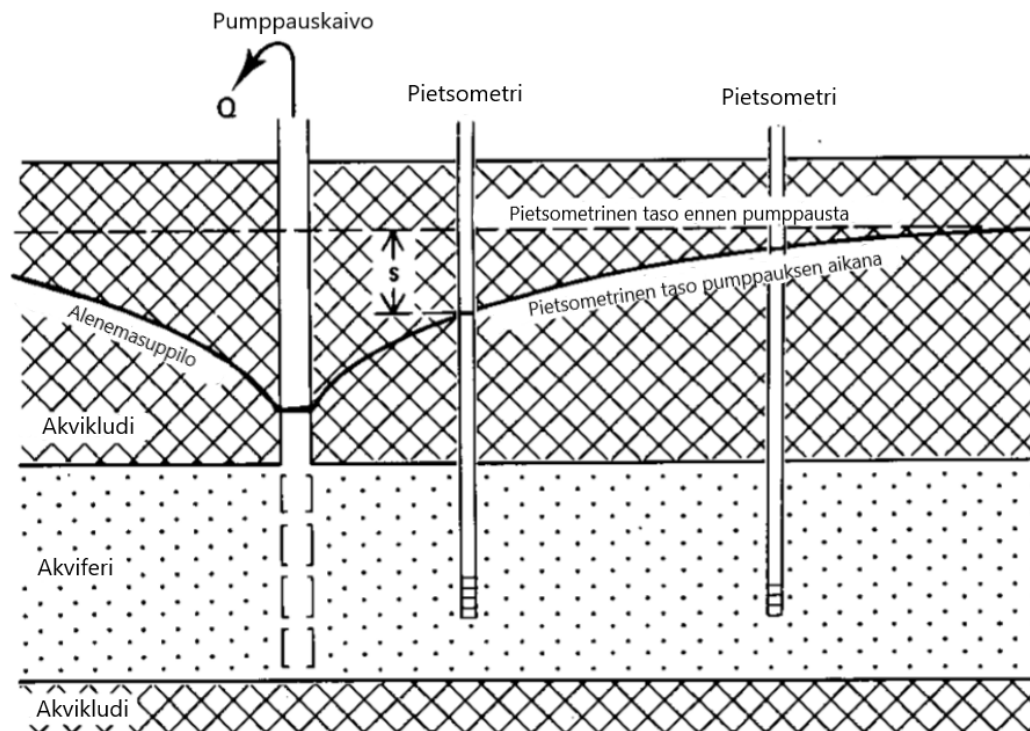
Varastokerroin kuvaa sitä vesimäärää, joka poistuu tai tulee akviferiin, kun pohjavedenpintaa alennetaan tai nostetaan yhden pituusyksikön verran. Varastokerroin on ominaisantoisuuden kanssa likimain yhtä suuri, kun kyseessä on vapaa akviferi. (Airaksinen 1978, 49)

## **2.3 Menetelmät hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi**

Hydraulinen johtavuus on olennainen tieto arvioitaessa pohjavesialueen käyttökelpoisuutta esimerkiksi talousveden ottoon. Tietoa maaperän hydraulisesta johtavuudesta voidaan myös käyttää arvioitaessa haitallisten aineiden leviämisenopeutta pohjavesimuodostumassa.

### **2.3.1 Koepumppaus**

Koepumppaus voidaan suorittaa joko yhdellä tai useammalla kaivolla. Usean kaivon koepumppaus tuottaa tuloksen, joka kuvaa parhaiten kokeen vaikutusalueen hydraulisia ominaisuuksia. Usean kaivon kokeessa yhdestä kaivosta pumpataan vettä ja muita kaivoja tai pietsometrejä käytetään veden pinnankorkeuden muutoksen havainnointiin. Pumppauskaivolla mitataan pumpatun veden virtausnopeutta ja lähistöllä olevilla kaivoilla tai pietsometreillä seurataan veden tason muutosta. Kuvassa 9 on esitetty veden pinnankorkeuden tason muutos koepumppauksessa rajoitetussa akviferissa. (Strickland & Korleski 2006, 4-11)



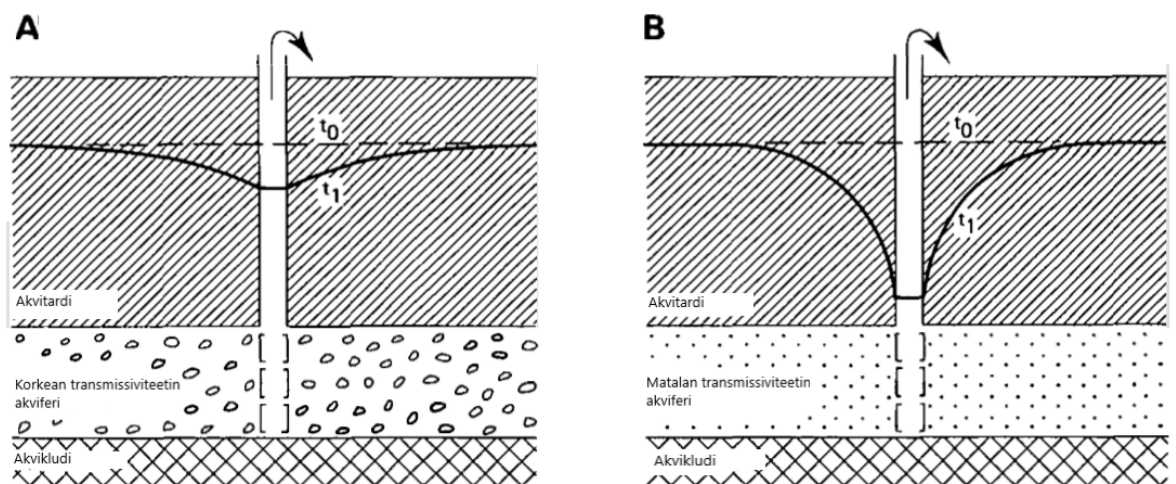
Kuva 9. Pohjaveden pinnan aleneminen rajoitetussa akviferissä koepumppauksen yhteydessä. (mukaiiltu Kruseman & De Ridder 1994, 27)

Ennen koepumppauksen suorittamista tulee tiettyjä alueen ominaisuuksia olla tiedossa, kuten akviferin tyyppi, paksuus ja rajoittuneisuus. Vertikaalisten rajojen lisäksi tulee tietää horisontaaliset rajat. Pohjavesiesiintymä saattaa rajoittua peruskallion lisäksi vesistöön, kuten jokeen, kanavaan, järveen tai mereen. Vesistöistä saattaa virrata vettä pohjaveteen. Samoin maanalaiset geologiset ominaisuudet ja poikkeavuudet, kuten kivenlohkareet tai onkalot, jotka voivat vaikuttaa pohjaveden virtaukseen, tulee selvittää. Pumppauskaivo tulisi valita siten, että se ei sijaitse pohjavesialueen reunojen välittömässä läheisyydessä. (Kruseman & de Ridder 1994, 27-28)

Koska koepumppaus häiritsee pohjavesialueen luonnollista tilaa, tulee kohteen ympäristö ottaa huolellisesti huomioon koepumppauksen suunnittelussa. Mikäli pohjavesiesiintymä on talouksien käytössä, tulee varmistua siitä, että korvausvettä on saatavilla, mikäli pohjavesiesiintymässä olevien talouskaivojen antoisuus tippuu koepumppauksen seurauksena ratkaisevasti. Lisäksi jos pohjavesiesiintymän lähistöllä sijaitsee alueita, joiden maaperä voi mahdollisesti olla saastunutta, pitää tämä ottaa

pumppauksessa huomioon. Saastuneilta maa-alueilta voi kulkeutua haitallisia aineita pohjaveteen koepumppauksen seurauksena. (Kinnunen 2005, 25-26)

Pietsometriä riittävä määrä ja vähimmäisetäisyys toisistaan riippuu siitä, miten tarkkoja ja luotettavia mittaustulosten tulee olla. Kattavan tuloksen saamiseksi pietsometrit tulee asentaa vaihtelevin välimatkoin havaintoputken ympärille (Delleur 2007, 10-12). Krusemanin & de Ridderin mukaan (1994, 34) sopiva pietsometrin etäisyys pumppauskaivosta riippuu mm. maaperän transmissiviteetistä. Alenemasuppilo on korkean transmissiviteetin akviferissä matalampi ja leveämpi (kuva 10, tilanne A) kuin matalan transmissiviteetin akviferissä (kuva 10, tilanne B). Kun alenemasuppilo on leveä, voidaan pietsometrit sijoittaa kauemmas pumppauskaivosta.



Kuva 10. Alenemasuppilon muoto korkean transmissiviteetin akviferissä (A) ja matalan transmissiviteetin akviferissä (B). (mukailtu Kruseman & de Ridder 1994, 34)

Vapaan akviferin koepumppaus poikkeaa rajoitetun akviferin koepumppauksesta. Rajoitetun akviferin koepumppauksessa pohjaveden pietsometrinen korkeus laskee ja akviferissä oleva vesi laajenee sekä akviferin raematriisi puristuu kokoon (Schwartz & Zhang. 2002, 73). Vapaan akviferissa pumppaus laskee itse pohjavedenpinnan korkeutta. Tämä johtuu siitä, että vapaasta akviferistä pumpatessa koko tehollinen huokostilavuus tyhjenee vedenpinnan alenemisen myötä. Schwartzin & Zhangin (2002, 73, 258) mukaan vapaan akviferin koepumppauksen alkuvaiheessa tilanne muistuttaa rajoitettua akviferia, kun vedenpinta pysyy hetkellisesti samana veden laajentumisen ja raematriisin kokoonpuristumisen vuoksi. Pumppauksen edetessä muodostuu

alenemasuppilo, joka rajoitetusta akviferista poiketen laskee pohjaveden pintaa ja tästä johtuen akviferin paksuus ja transmissiviteetti pienenee. Rajoitetussa akviferissä ei vedenpinta normaalisti laske, mutta mikäli vettä pumpataan runsaasti voi vedenpinnan taso laskea rajoittavan kerroksen alareunan alapuolelle, jolloin akviferistä tulee vapaa (Mälkki 1999, 37).

Koepumppaus voidaan suorittaa joko lyhytkestoisena tai pitkäkestoisena. Lyhytkestoista pumppausta käytetään yleensä akviferin transmissiviteetin ja varastokertoimen määrittämiseen ja se suoritetaan yleensä vakiovirtaamalla (Airaksinen 1978, 186). Kun akviferin paksuus on tiedossa, voidaan transmissiviteetista laskea akviferin hydraulinen johtavuus. Airaksisen (1978, 186) mukaan lyhytkestoinen koepumppaus kestää yleensä 1-3 päivää. Pinnankorkeuden mittausvälin tulee olla korkeintaan 1/10 ajasta, joka on kulunut mittauksen aloittamisesta (Korkka-Niemi & Salonen 1996, 117). Mittausvälin vaaditun tiheyden vuoksi seurannassa on syytä käyttää automaattista mittaria.

Pitkäkestoista koepumppausta käytetään erityisesti vedenhankintatutkimuksissa. Tutkimusten tavoitteena on selvittää akviferin vähimmäisantoisuus. Vähimmäisantoisuus tarkoittaa saatavissa olevaa pohjavesivirtaamaa vuoden kuivimpana aikana (Korkka-Niemi & Salonen 1996, 117). Tästä syystä pumppauksen tulisi tapahtua vuodenaikana, jolloin uuden pohjaveden muodostuminen on vähäisintä. Yleensä koepumppaukset suoritetaan keskikesällä, mutta Kinnusen (2005, 26) mukaan myös keskellä talvea suoritetuista koepumppauksista voidaan saada hyviä tuloksia, mutta pumppauksen suorittaminen on talvella selvästi hankalampaa kuin kesällä.

Pumppauksen kesto riippuu useista seikoista, kuten akviferista tavoiteltavasta vedenottomäärän suuruudesta ja siitä, kuinka nopeasti tasapainotila saavutetaan. Korkkaniemen & Salosen (1996, 117) mukaan koepumppauksessa pumpattu vesimäärä tulee olla vähintään yhtä suuri kuin arvioitu vedenottotarve ja yleensä pumppausta jatketaan ainakin niin kauan, että vedenpinnan aleneminen akviferissa pysähtyy. On kuitenkin suositeltavaa, että tämän jälkeen pumppausta jatketaan 1-2 viikkoa, sillä Krusemanin & de Ridderin (1994, 43) mukaan vedenpinnan aleneminen saattaa hetkellisesti pysähtyä ennen kuin vedenpinta on todellisesti stabiloitunut. Huomionarvoista on kuitenkin, että Stricklandin et al. (2006, 4-16) mukaan kaikissa

akvifereissa vedenpinta ei saavuta tasapainotilaa koskaan. Pumppaus kestää yhteensä tavallisesti 3-6 kuukautta.

Airaksisen (1978, 183-184) mukaan pitkäkestoisessa pumppauksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota siihen, että pumpattua vettä ei päästetä maahan pohjavesimuodostuman alueella. Muodostumaan palaava vesi vääristää tuloksia. Usein vesi joudutaan johtamaan altaaseen tai säiliöön, mikäli veden johtaminen maahan pohjavesimuodostuman ulkopuolelle on etäisyyden vuoksi epäkäytännöllistä. Airaksinen (1978, 184) mainitsee toisaalta myös, että laskemalla vesi altaaseen tai säiliöön voidaan määrittää pumpatun veden määrä.

Pitkäkestoisessa pumppauksessa vedenpinnan korkeutta ei pidä seurata yhtä tiheään kuin lyhytkestoisessa pumppauksessa. Airaksisen (1978, 184) mukaan pumppauksen ensimmäisen vuorokauden aikana havaintoputkien vedenpinnat tulee mitata kahden tunnin välein ja pumppauskaivosta kauimpana sijaitsevista havaintoputkista vedenpinnan korkeus mitataan kaksi kertaa vuorokaudessa. Ensimmäisen vuorokauden jälkeen pinnankorkeudet mitataan 1-2 kertaa vuorokaudessa. Kun pumppaus on lopetettu, mitataan vedenpinnan korkeudet ensimmäisen vuorokauden aikana kahden tunnin välein, seuraavan viikon aikana kaksi kertaa vuorokaudessa ja lopulta kerran viikossa, kunnes pohjaveden pinta on samalla tasolla pumppausta edeltäneeseen tilanteeseen verrattuna.

Koepumppauksen suurin heikkous pitkän keston lisäksi on vaadittavan laitteiston määrä. Kokeen suorittaminen on käytännössä pakko suorittaa useamman henkilön voimin, koska kohde voi olla kaukana tiestöstä ja laitteistoa saatetaan tarvita paljon. Lisäksi laitteistoa varten tarvitaan sähköä, ja yleensä se tuotetaan aggregaatilla. Myös tilapäisen sähköliittymän käyttö on mahdollista.

### **2.3.2 Slug-testi**

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, 273)

Slug-testi soveltuu erityisen hyvin tilanteisiin, joissa maastotutkimuksia tehdään alueella, jossa epäillään pohjaveden saastumista (Luoma & Pullinen 2011, 4). Slug-testin vaikutusalue on pieni verrattuna koepumppaukseen, joten testi aiheuttaa ylimääräistä pohjaveden liikettä vain pienellä säteellä. Näin kontaminanttien leviämistä ei edesauteta tahattomasti. Lisäksi havaintoputkesta testin yhteydessä nostettava vesimäärä on pieni, joten saastuneen veden hävittäminen ei tuota suuria ongelmia. Slug-testiä on käytetty esimerkiksi Oskarshamnin ydinvoimalaitoksen ympäristössä Ruotsissa (Johansson & Göransson, 2006) määrittäessä alueen hydrologisia ominaisuuksia haitallisen aineen leviämisen varalta.

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, 237). Testi voidaan suorittaa nopeimmillaan minuuteissa, mikä on edullisuuden lisäksi suurin etu koepumppaukseen verrattuna.

Tulosten analysoimiseen voidaan käyttää useita eri malleja. Rajoitetuissa akvifereissa käytetään yleensä Hvorslevin mallia (Hyder et al. 1994, 2945). Hvorslev havaitsi, että muuttaessa havaintoputken vedenpinnan korkeutta tasapainotilan palautuminen tapahtuu

eksponentiaalisesti (Schwartz & Zhang 2002, 276). Tämä tarkoittaa sitä, että pinnankorkeuden palautuminen on aluksi nopeaa, mutta hidastuu ajan kuluessa. 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, 280-281)

Fabbrin et al. (2012, 5) 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. Kummassakaan edellä mainituissa analyysimetodissa ei oteta huomioon veden eikä havaintoputken inertiaa.

### **2.3.3 Raekokoanalyysi**

Raekokoanalyysissä maaperän hydraulinen johtavuus määritetään selvittämällä maaperästä otetun näytteen raekokojakauma laboratoriossa. Raekokojakauman yhteys maaperän hydraulisen johtavuuteen on ollut tiedossa jo pitkään. Odongin (2007, 1-2) mukaan korrelaatio vaikuttaa suoraviivaiselta, mutta yhtä menetelmää hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi raekokojakaumasta, joka toimii kaikenlaisilla raekokojakaumilla ja ottaa huomioon kaikki mahdolliset muuttujat, ei toistaiseksi ole olemassa. Odong (2007, 1) mainitsee myös, että huokoskokojakauma kertoo maa-

aineksen hydrologisista ominaisuuksista paljon raekokojakaumaa enemmän, mutta se on vaikeampi määrittää kuin raekokojakauma.

Raekokojakauman määrittäminen on yksinkertaista. Määrittämistä varten maaperästä otetaan mahdollisimman hyvin maaperää edustava näyte. Yleensä seulontaa varten tarvitaan noin kilogramma maa-ainesta. Suurirakeiselle maa-ainekselle voidaan käyttää kuivaseulontaa, joka suoritetaan seulasarjalla. Seulasarjassa on päällekkäin aina edellistä tiheämpiä seuloja, joita tärytetään yleensä koneellisesti. Kuivaseulonnan onnistumisen edellytyksenä on alle 10% hienoainespitoisuus. (Rantamäki et al. 1992, 73)

Mikäli näytteessä on niin suuri hienoainespitoisuus, että se vaikeuttaa kuivaseulontaa, voidaan suorittaa pesuseulonta ennen tavallista kuivaseulontaa. Vaikka pesuseulontaa käytettäisiin kuivaseulonnan lisäksi, tulee hienoainespitoisuuden silti olla alle 10%. Pesuseulonnassa näyte sekoitetaan veteen, johon on lisätty pesuainetta pintajännityksen rikkomiseksi. Näytettä hämmennetään, kunnes maakokkareet ovat hajonneet. Tämän jälkeen näyte siivilöidään käyttämällä 0,074 mm seulaa. Seulonnassa hieno aine valuu pesuveden mukana pois. Pesu toistetaan, kunnes pesuvesi on kirkasta. Tämän jälkeen kuivaseulonta suoritetaan jäljelle jääneelle maa-ainekselle normaalisti. (Rantamäki et al. 1992, 73-74)

Areometriketta käytetään hienorakeisen maa-aineksen raekokojakauman määrittämisessä. Kokeessa pieni määrä näytettä lietetään veteen ja jätetään laskeutumaan. Maarakeet laskeutuvat vedessä Stokesin lain mukaisesti. Stokesin lain mukaan kappaleen laskeutumisenopeus nesteessä on suoraan verrannollinen rakeen keskimääräisen läpimitan neliöön. Kun maarakeet laskeutuvat, pienenee astian yläosassa olevan lietteen tiheys. Tätä tiheyttä mitataan tietyin aikaväleihin hydrometrillä, jolloin saadaan selville rakeiden laskeutumisenopeudet ja niistä rakeiden koot ja suhteelliset määrät. (Rantamäki et al. 1992, 75)

Hydraulisen johtavuuden määrittämiseen raekokojakaumasta on johdettu useita empiirisiä kaavoja. Odongin (2007, 2) mukaan Kozeny-Carmanin yhtälö (yhtälö 4) on laajimmin hyväksytty ja käytetty. Yhtälö toimii maalajeille, jotka eivät ole savisia ja

joiden efektiivinen raekoko on alle 3 mm. Efektiivinen raekoko tarkoittaa sitä rakeen läpimittaa, jonka alle jää 10% maa-aineksessa olevista rakeista.

$$K = \frac{g}{v} \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \left( \frac{n^3}{(1-n)^2} \right) d_{10}^2 \quad (4)$$

missä  $g$  on putoamiskiihtyvyys [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $v$  on kinemaattinen viskositeetti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]  
 $n$  on huokoisuus ja  
 $d_{10}$  efektiivinen raekoko eli seulakoko, jonka 10% näytteestä läpäisee [mm]

Näytteen huokoisuus saadaan määritettyä kaavasta

$$n = 0,255(1 + 0,83^U) \quad (5)$$

missä  $U$  on rakeiden yhdenmukaisuuskerroin, joka saadaan kaavasta

$$U = \left( \frac{d_{60}}{d_{10}} \right) \quad (6)$$

missä  $d_{60}$  on seulakoko, jonka 60% näytteestä läpäisee [mm]

### 3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Työtä varten toteutettiin sarja slug-testejä Lapin alueella. Testit toteutettiin pohjavesien havaintoputkilla, jotka asennettiin Lapin POSKI-projekteja varten. POSKI (Pohjavesien suojelun ja kiviaineshuollon yhteensovittaminen) on valtakunnallinen hankekokonaisuus, jonka tavoitteena on turvata laadukas pohjavesi, varmistaa maa- ja kiviaineksen saatavuus sekä osoittaa vesihuoltoon ja kiviainesten ottoon soveltuvat alueet. Hanketta varten asennettiin havaintoputkia eri puolille Lappia. Hankkeen toteuttajina toimivat Lapin liitto, Geologian tutkimuskeskus, Luonnonvarakeskus, Suomen ympäristökeskus ja Oulun yliopisto. Rahoitus koostui Lapin ja Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskuksen myöntämästä Euroopan aluekehitysrahaston tuesta, hankealueen kuntien, toteuttajien sekä alueella toimivien kiviainesyritysten osuuksista. (Geologian tutkimuskeskus, 2019)

Suoritettujen slug-testien on esitetty kartalla kuvassa 11. Jokaisesta havaintoputkesta otettiin pohjavesinäyte ennen slug-testin suorittamista. Kartassa esitettyjen kohteiden lisäksi testejä toteutettiin Savukoskella ja Sallassa, mutta näitä mittauksia ei käytetty hydraulisen johtavuuden määrittämiseen, sillä havaintoputket oli asennettu mittasyvyyteen eikä akviferin pohjan syvyys ollut tiedossa.



Kuva 11. Toteutetut slug-testit. (Kuva: Olli Rönkä 2019)

Taulukossa 1 on esitetty kuvan 11 kartassa esitettyjen havaintoputkien koodit, sijaintikunnat ja pohjavesialueiden nimet sekä havaintoputkien koordinaatit ETRS-TM35FIN-koordinaattijärjestelmässä.

Taulukko 1. Havaintoputket, joilla slug-testit toteutettiin.

Havaintoputki	Kunta	Alue	Koordinaatit (ETRS-TM35FIN)
HP2118	Pelkosenniemi	Kiemunki	7435867, 530125
HP2816	Enontekiö	Muotkajärvi	7586088, 352661
HP3016	Kemijärvi	Vuostimojärvi	7428119, 515548
HP3116	Kemijärvi	Purnukangas	7388921, 544320
HP3416	Kittilä	Pokka	7561333, 449615
HP3516	Kolari	Sadinkankaanlampi	7482093, 365651
HP3716	Kolari	Pikku Karijärvi	7448306, 383726
HP3816	Kolari	Pikku Karijärvi	7447017, 384262
HP4016	Kolari	Hourukoskenoja	7493549, 366347
HP4118	Sodankylä	Utsamonvaara	7486596, 472066
HP4216	Posio	Jalankankaat	7325257, 544596
HP4316	Posio	Saarilamminkangas	7324979, 543152
HP4416	Posio	Isokangas	7325515, 547061
HP4516	Posio	Isokangas	7325798, 545637
HP4616	Posio	Peräkangas	7326010, 547184
HP4716	Posio	Koirakangas	7311892, 525542
HP5116	Kittilä	Pokka	7562102, 448328
HP5316	Kolari	Kivikkopalo	7485923, 368248
HP5318	Inari	Pahtavaara	7640067, 502128
HP5416	Kolari	Taporova	7492023, 363010
HP5816	Muonio	Mustijärvi	7499041, 357471
HP5916	Enontekiö	Ahvenjärven kangas	7594386, 330817
HP6016	Muonio	Mustijärvi	7499202, 358139
HP6216	Kemijärvi	Lapalionkangas	7387712, 488054
HP6416	Tornio	Mellasalo	7316813, 370265
KP11-1	Kemi	Sotisaari	7297020, 386610
KP11-2	Kemi	Sotisaari	7296914, 386521
KP26-2	Kemi	Ristikangas	7295821, 389779
KP26-3	Kemi	Ristikangas	7295704, 390490
KP45-1	Rovaniemi	Mellalampi	7394456, 426116
KP45-2	Rovaniemi	Mellalampi	7395838, 425719
KP48-1	Rovaniemi	Tavivaara	7368887, 442078
KP48-2	Rovaniemi	Tavivaara	7368651, 442512
KP63-3	Tervola	Törmävaara	7336241, 396452
KP63-4	Tervola	Törmävaara	7336164, 396314

Kaikissa mittauksissa käytettiin automaattista pinnankorkeuden mittaria ja näytteenotinta, jonka vetoisuus on yksi litra. Porausten yhteydessä maaperän koostumusta arvioitiin silmämääräisesti kairaajien toimesta. Arvioita maaperän

koostumuksesta käytettiin arvioitaessa suoritettujen slug-testien paikkansapitävyyttä. Näitä tietoja ja eri maa-ainesten keskimääräistä hydraulista johtavuutta (taulukko 2) käyttäen kerrostuneiden akviferien keskimääräinen hydraulinen johtavuus saatiin laskettua käyttämällä kaavaa 7.

$$K_x = \frac{K_1 dz_1 + K_2 dz_2 + \dots + K_n dz_n}{dz_1 + dz_2 + \dots + dz_n} \quad (7)$$

missä

$K_x$  on akviferin keskimääräinen hydraulinen johtavuus [m/s]  
 $K_1, K_2 \dots K_n$  ovat kerrosten hydrauliset johtavuudet [m/s]  
 $dz_1, dz_2 \dots dz_n$  ovat kerrosten paksuudet [m]

Mittausten perusteella jokaiselle pohjavesiputkelle laskettiin hydraulinen johtavuus. Transmissiviteetti määritettiin niille kohteille, joiden pohjavesiputkissa oli riittävän pitkä siivilä. Jokaiselle pohjavesiputkelle laskettiin myös maaperän oletettu hydraulinen johtavuuden ylä- ja ala-arvot kairaajien ilmoittamien maaperätietojen ja taulukossa 1 esitettyjen hydraulisen johtavuuden arvojen perusteella.

Taulukko 2. Viitteelliset hydraulisen johtavuuden arvot erilaisille maalajeille. (Delleur 2007, 2-12)

Maalaji	Hydraulinen johtavuus (m/s)
Sora	$10^{-4} - 10$
Hiekka	$10^{-6} - 10^{-2}$
Siltti	$10^{-9} - 10^{-3}$
Moreeni	$10^{-12} - 10^{-6}$
Savi	$10^{-12} - 10^{-9}$

Transmissiviteetti voidaan laskea jokaiselle pohjavesiputkelle käyttäen aiemmin laskettua hydraulista johtavuutta ja muodostuman paksuutta. Koska transmissiviteetti ottaa huomioon sekä muodostuman hydraulisen johtavuuden että muodostuman paksuuden, voidaan sitä tarkastelemalla määrittää, millaiselle muodostumalle slug-testi sopii ja millaiselle ei. Taulukkoa 3 (Şen 2014, 66) käyttämällä voidaan alustavasti arvioida jokaisen muodostuman merkittävyys muodostuman käyttöpotentiaalin

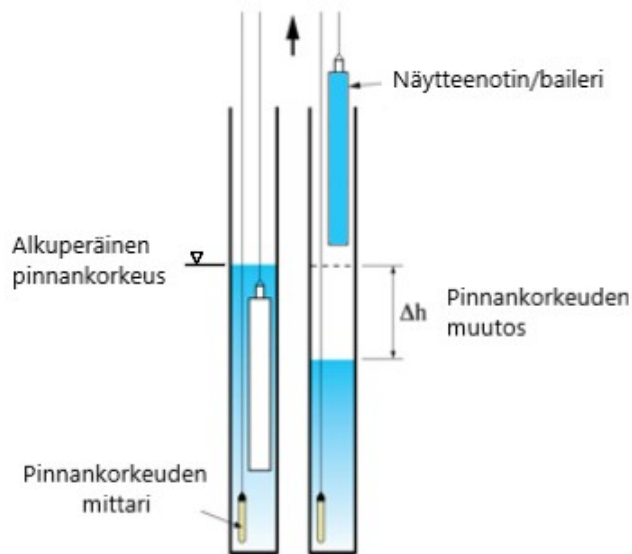
kannalta. Käyttöpotentiaali ilmaisee akviferin sopivuutta vedenottoon. Korkeampi transmissiviteetti tarkoittaa korkeampaa käyttöpotentiaalia.

Taulukko 3. Yleisesti hyväksytyt pohjavesimuodostuman käyttöpotentiaalın raja-arvot. (mukailtu Şen 2014, 66)

Transmissiviteetti m <sup>2</sup> /d	Potentiaali
$T < 5$	Ei potentiaalia
$5 < T < 50$	Heikko potentiaali
$50 < T < 500$	Kohtalainen potentiaali
$T > 500$	Korkea potentiaali

### 3.1 Slug-testin suunnittelu ja suorittaminen

Testissä poistetaan (kuva 12) tai lisätään nopeasti pieni määrä vettä pohjavesiputkesta. 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, 306-307)



Kuva 12. Vettä poistamalla suoritettu slug-testi (mukailtu In-Situ Europe 2018)

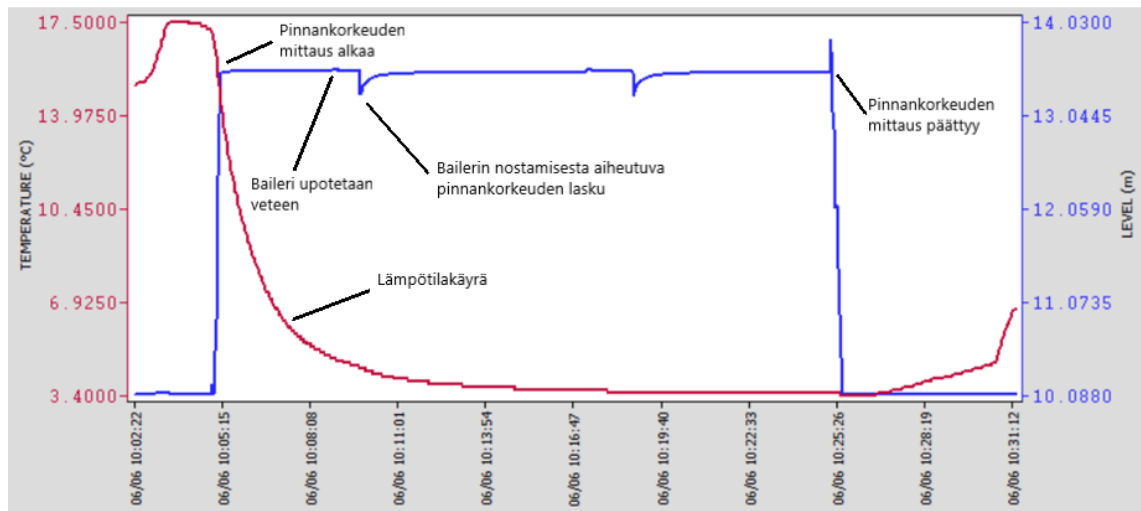
Slug-testin suorittamista varten tulee olla tiedossa putken fyysiset ominaisuudet. Olennaisia tietoja ovat putken pituus, putken halkaisija, suodatinosan pituus sekä suodattimen reikien koko ja etäisyys toisistaan. Lisäksi tulee olla tiedossa, onko putki osittain vai täysin akviferin läpäisevä ja onko 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 maaperä on halkeillutta kalliota tai vettä hyvin johtavaa maa-ainesta, kuten soraa. (Strickland & Korleski 2006, 4-2)

Putken mitat vaikuttavat slug-testin tuloksiin. Teoriassa Bouwerin ja Ricon 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 alttiimpia paikallisille vaihteluille. (Bouwer 1989, 308)

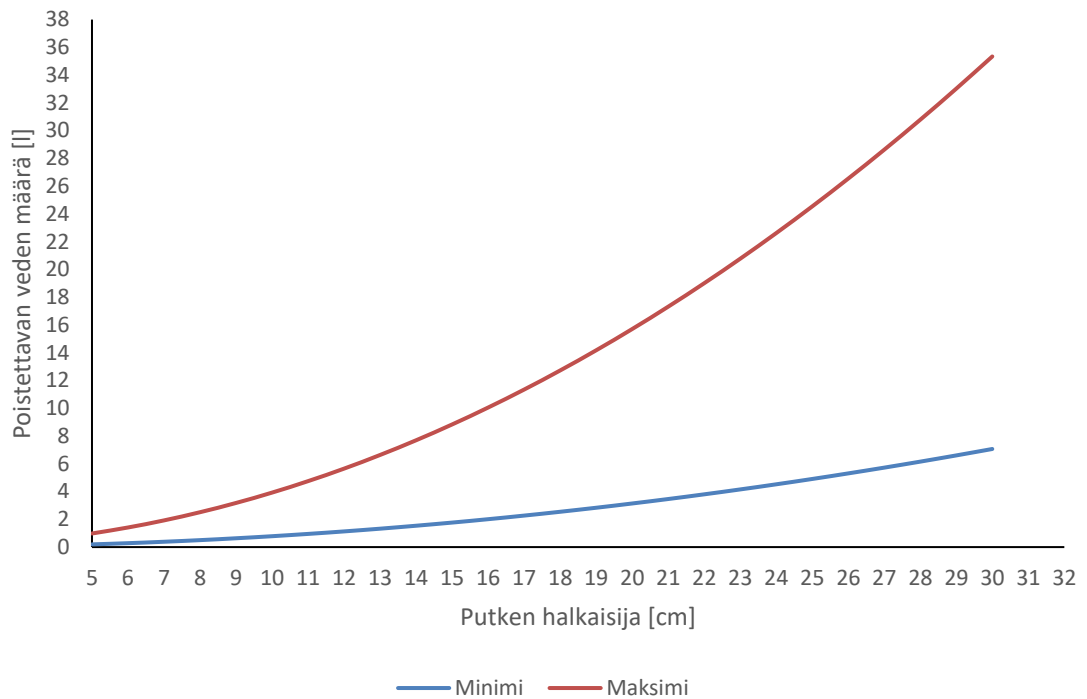
Slug-testi suoritetaan määrittämällä ensin veden taso putkessa. Samoin akviferin syvyys tulee mitata. Tämän jälkeen poistetaan pieni määrä vettä kaivosta. Vedenpinnan tason nousua veden poistamisen jälkeen seurataan. Vedenpinnan tason palautumisnopeuden avulla voidaan selvittää hydraulinen johtavuus 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. Työssä käytettiin 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 13 nähdään esimerkki Leveloggerin tuottamasta käyrästä Solinstin ohjelmistossa.



Kuva 13. Esimerkki Leveloggerin tuottamasta käyrästä Solinstin ohjelmistosta. Sininen käyrä kuvastaa vedenpinnan korkeutta ja punainen kuvastaa veden lämpötilaa.

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, 4-4). Kuvassa 14 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 määritettäessä 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 14. Poistettavan veden määrä suhteessa putken halkaisijaan. (Strickland & Korleski 2006, 4-4)

### 3.2 Tulosten analysoiminen Bouwerin ja Ricen metodilla

Kaikki työssä tehdyt slug-testit suoritettiin vapaissa akvifereissä. 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

$$Q = 2\pi KD \frac{h}{\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)} \quad (8)$$

missä

K on hydraulinen johtavuus [m/s]

D	on akviferin paksuus [m]
h	on vedenpinnan alenema [m]
R <sub>e</sub>	on testin efektiivinen vaikutussäde [m]
r <sub>w</sub>	on horisontaalinen etäisyys kaivon keskipisteestä häiriintymättömään akviferiin [m]

Veden tason nousunopeus dh/dt voidaan ilmaista

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q}{\pi r_c^2} \quad (9)$$

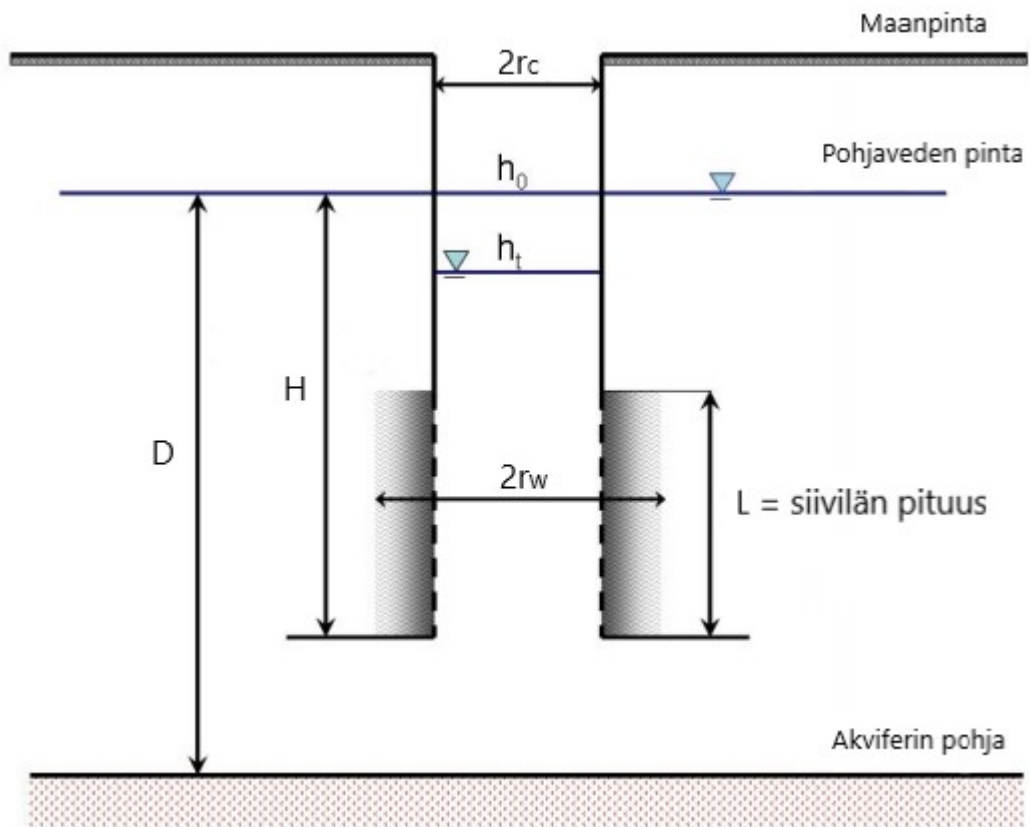
Yhdistämällä kaavat 1 ja 2, integroimalla ja ratkaisemalla K:n suhteen saadaan

$$K = \frac{r_c^2 \ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right)}{2d} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{h_0}{h_t}\right) \quad (10)$$

missä

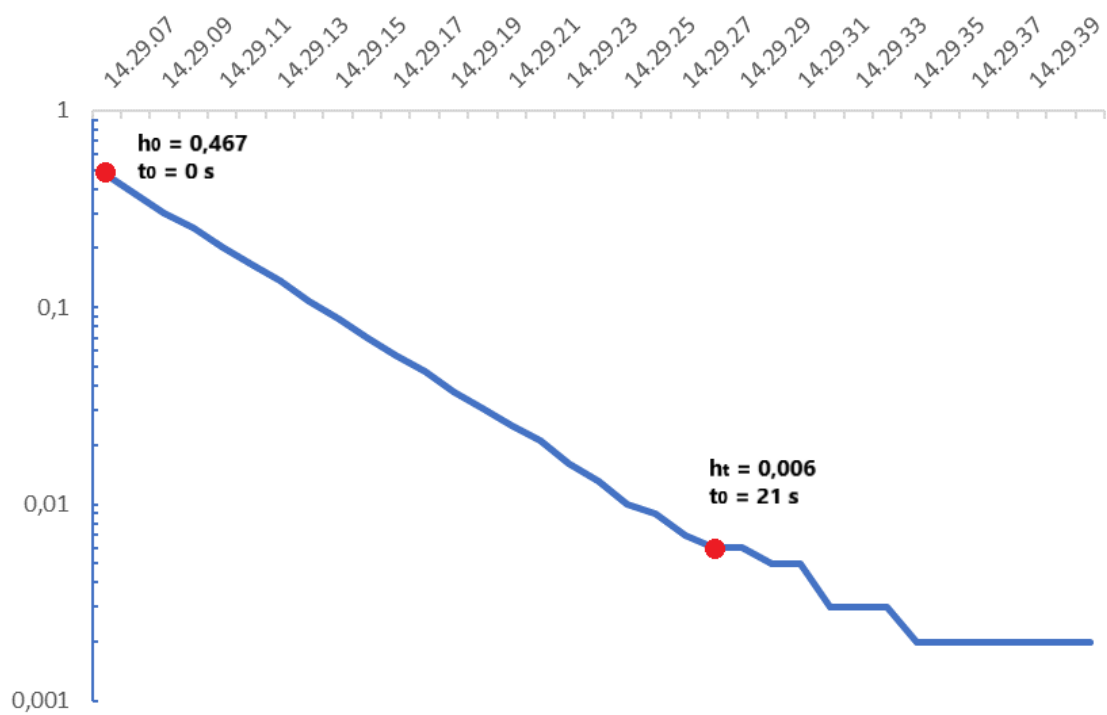
r <sub>c</sub>	on sen putken osan säde, missä ei ole siivilää [m]
d	on kaivon siivilän pituus [m]
h <sub>0</sub>	on vedenpinnan korkeus ajanhetkellä t <sub>0</sub> = 0 [m]
h <sub>t</sub>	on vedenpinnan korkeus ajanhetkellä t > t <sub>0</sub> [m]

Havaintoputken profiili ja Bouwerin ja Ricen metodissa käytetyt parametrit on esitetty kuvassa 15.



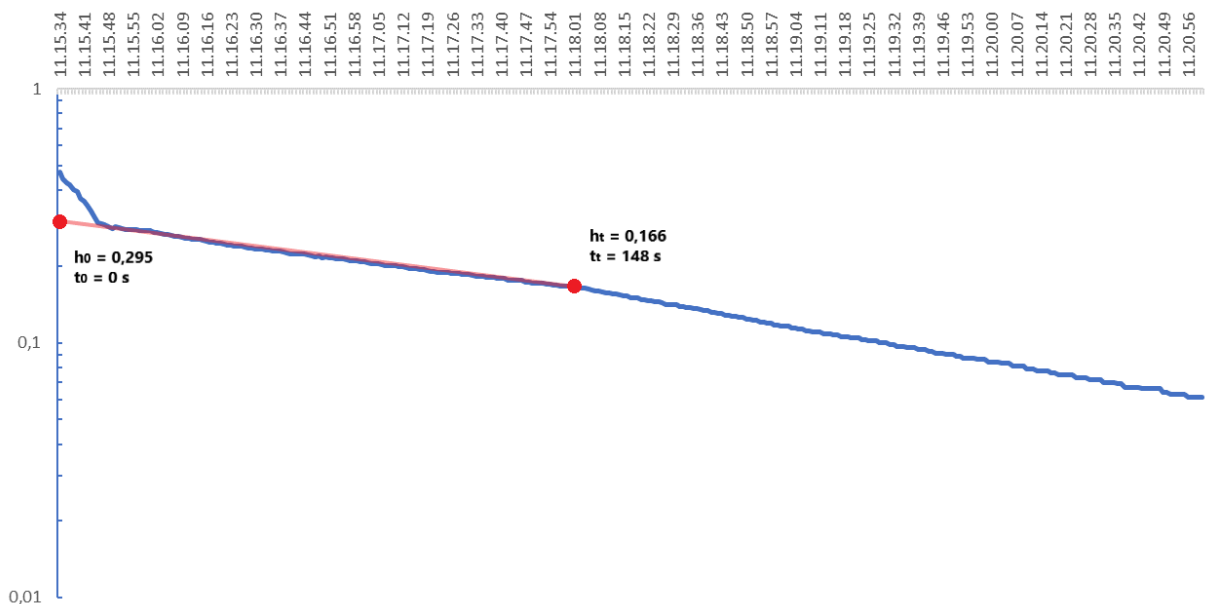
Kuva 15. Bouwerin ja Rican metodissa käytetyt havaintoputken ja pohjavesiakviferin parametrit (mukailtu Luoma & Pullinen 2011, 4)

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 16 mukaisesti. Suoran alusta saadaan  $h_0$ ,  $h_t$  ja  $t$  voidaan ottaa mistä tahansa suoran pisteestä.



Kuva 16. 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 17 mukaisesti.



Kuva 17. Esimerkki suoran jatkamisesta ajanhetkeen  $t = 0$  asti.

$R_e$  on määritetty empiirisesti vastuskenttäänalogian avulla. Osittain akviferin läpäisevälle putkelle Bouwer ja Rice määrittivät laskukaavan

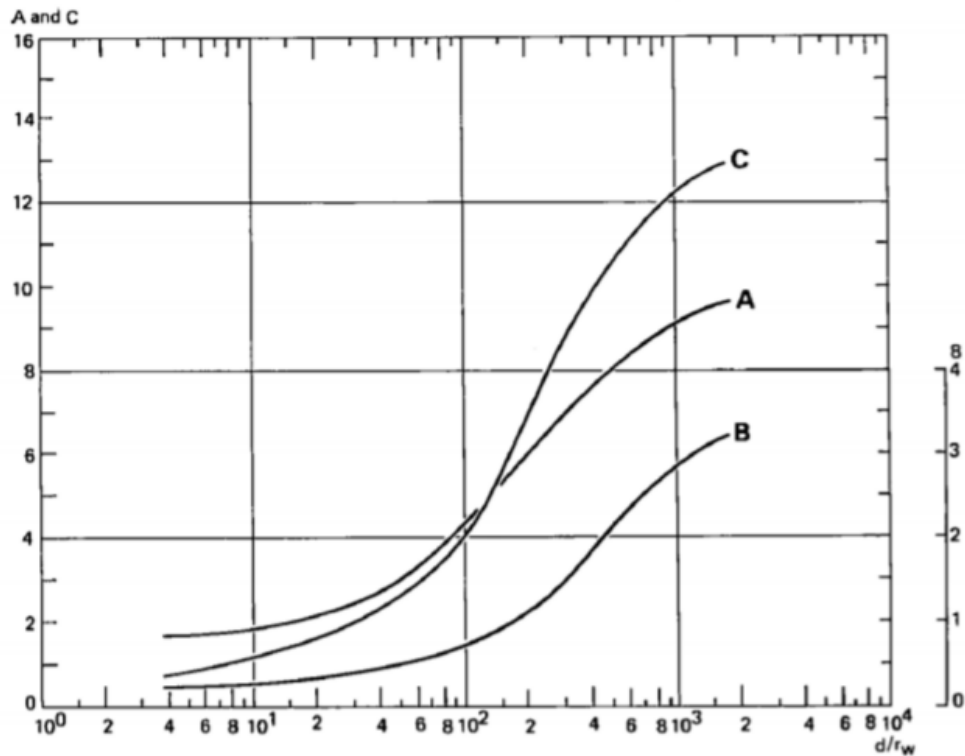
$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[ \frac{1.1}{\ln\left(\frac{H}{r_w}\right)} + \frac{A+B\ln\left(\frac{D-H}{r_w}\right)}{\frac{d}{r_w}} \right]^{-1} \quad (11)$$

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 18 esitetyn kuvaajan avulla.



Kuva 18. Bouwerin ja Rican menetelmässä käytettyjen parametrien A, B ja C määrittämiseen käytettävä käyräsarja. (Kruseman & de Ridder 1994, 245)

Täysin akviferin läpäisevälle putkelle Bouwer ja Rice määrittivät laskukaavan

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[ \frac{1.1}{\ln\left(\frac{H}{r_w}\right)} + \frac{C}{r_w} \right]^{-1} \quad (12)$$

Missä C saadaan kuvaajasta x, kun  $d/r_w$  tiedetään.

### 3.3 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 hienempi aines. Suodattimen ympärille levinnyt hienempi aines voi aiheuttaa virheitä analyysissä, kuten todellista hydraulista johtavuutta pienemmän hydraulisen johtavuuden arvon. (Strickland & Korleski 2006, 4-2)

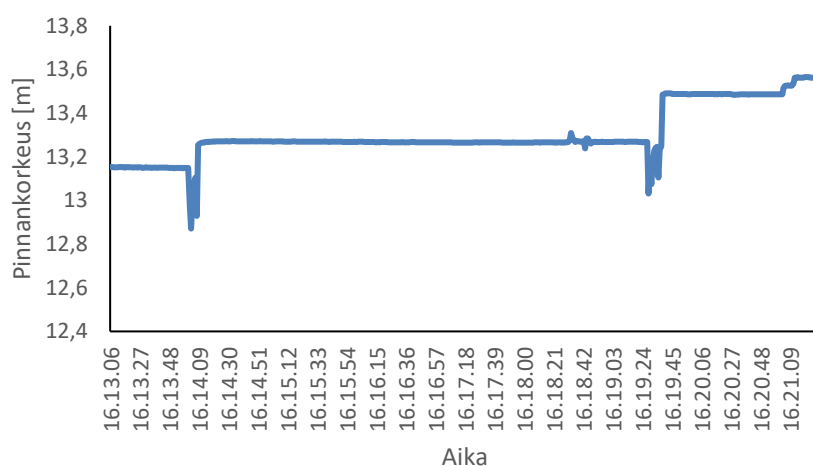
Suorittamalla useita slug-testejä alueella voidaan saada kattavampi kuva alueen hydraulisesta johtavuudesta. Schollin & Christensonin (1998, 4) mukaan laajallakaan alalla suoritettut testit eivät kuitenkaan välttämättä kerro koko totuutta pohjavesialueen hydrologisista ominaisuuksista, koska testi on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

Kansas Geology Survey teki suuren määrän slug-testejä (Butler & Healey. 1998. 308), 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) menetöt 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 Kinnusen (2005, 91) mukaan liittämällä pohjavesipumppuun vesiletku ja työntämällä pumppu havaintoputken pohjaan saakka, jonka jälkeen pumppu käynnistetään. Vesiletkusta lasketaan samalla vettä havaintoputkeen ja pumppausta jatketaan niin kauan, että ylös nouseva vesi on kirkasta. Tämän työn slug-testit tehtiin POSKI1- ja POSKI2-hankkeiden havaintoputkilla. POSKI2-hankkeen havaintoputkia ei ole huuhdeltu, POSKI1-hankkeen havaintoputkista ei kyseistä tietoa ollut saatavilla.

Kuvassa 19 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 19. 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.

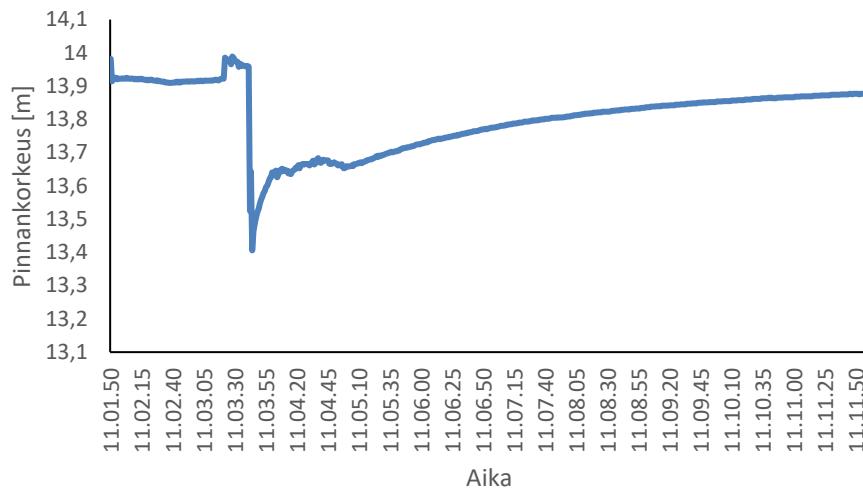
Automaattista pinnankorkeuden mittaria käytettäessä tulee ottaa huomioon mittarin sijoitus. Laite tulee asettaa tarpeeksi syvälle, jotta laite pysyy pinnan alla myös veden poistamisen jälkeen. Mikäli akviferi on huomattavan matala, on syytä suorittaa slug-testi lisäämällä vettä veden poistamisen sijaan, sillä huomattavan matalat akviferit aiheuttavat hankaluuksia bailerin käytössä. Tässä työssä käytetty baileri oli noin metrin mittainen, joten mikäli akviferi ei ole metriä syvempi, ei baileri uppoa kokonaan pinnan alle. Tällaisessa tilanteessa olisi vaikea varmistua, että testiä toistettaessa otettu veden määrä on aina sama. Tällöin on järkevämpää suorittaa testi lisäämällä putkeen tietty vesimäärä. Tässä tutkimuksessa slug-testi suoritettiin toistettavuuden takaamisen vuoksi vain vettä poistamalla.

Tässä työssä tehdyissä testeissä yleisin käytännön ongelma oli bailerin takertuminen pinnankorkeuden mittarin vaijeriin (kuva 20). Ongelma oli sitä yleisempi mitä syvempi kaivo oli. Takertumista pystyi ehkäisemään teippaamalla vaijeri putken ulkopuolella kiinni siten, että vaijeri oli mahdollisimman 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.



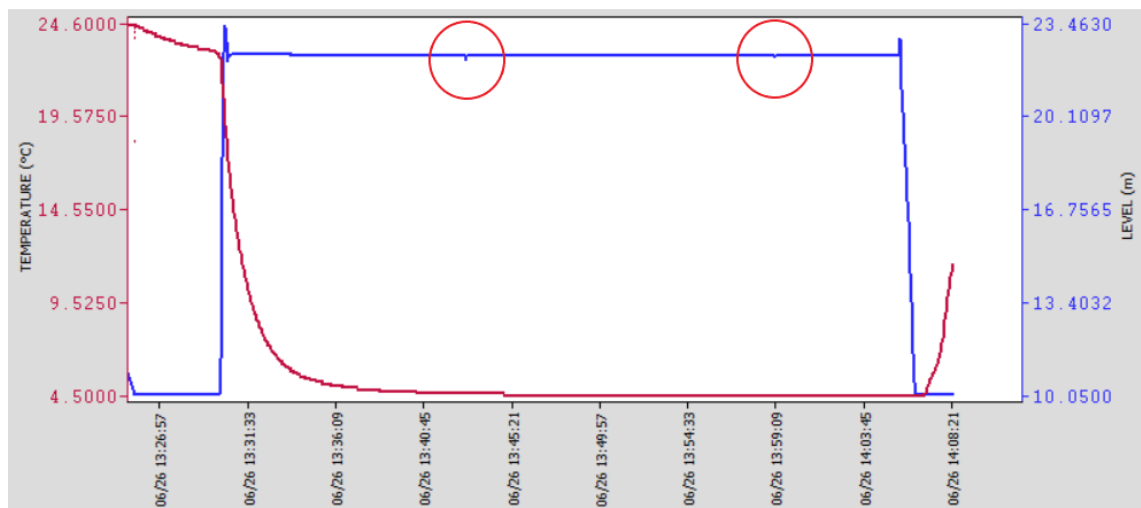
Kuva 20. Pinnankorkeuden mittarin vaijeriin takertunut baileri. (Kuva: Riku Sanaksenaho)

Häiriöitä mittauksessa voi aiheuttaa myös vuotava baileri. Vuotava baileri aiheuttaa kuvan 21 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. Baileri 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.



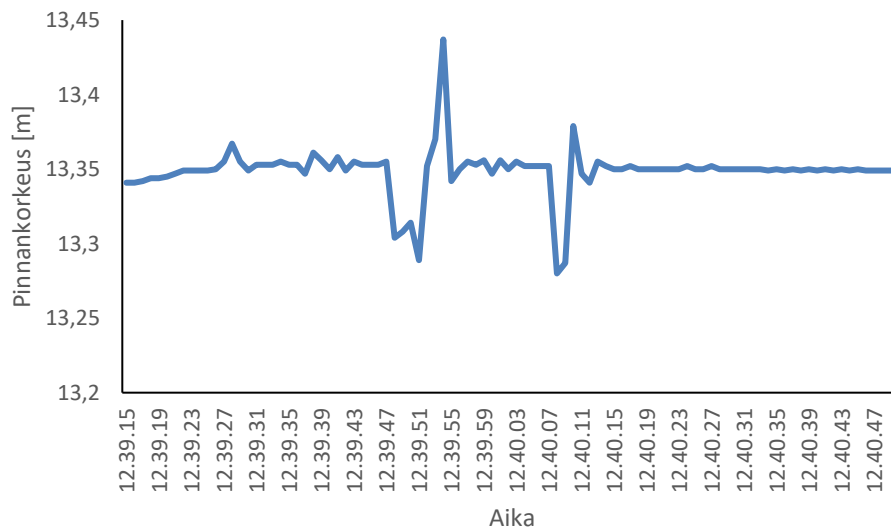
Kuva 21. Vuotavan bailerin aiheuttama häiriö. Häiriö näkyy ajassa 11.04.02-11.05.08.

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 sijaitti kerrostuneessa akviferissä. Akviferi oli paksuudeltaan noin 27 metriä ja koostumukseltaan pääosin hiekkaa ja soraa, hiekan ja soran välissä kerros moreenia.



Kuva 22. Hyvin vettä johtavassa akviferissä suoritettuja slug-testejä. Mittaus alkaa ajassa 13.31.33 ja suoritettujen slug-testien on ympyröity. Veden poistamisen aiheuttamat poikkeamat eivät ole tarpeeksi suuria hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi.

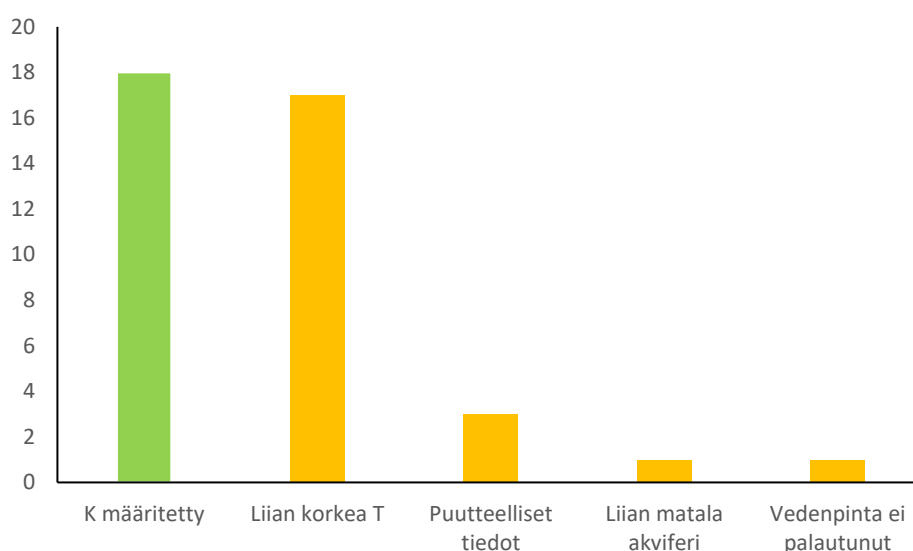
Bouwerin ja Ricen metodi ei ota huomioon veden ja havaintoputken inerttia. Heikosti tai kohtuullisesti vettä johtavissa akvifereissä inerttia ei juuri vaikuta, mutta hyvin vettä johtavissa akvifereissä inerttia alkaa vaikuttamaan ja vedenpinta saattaa alkaa oskilloimaan havaintoputkessa kuvan 23 mukaisesti. 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 metodologia 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 23. Vedenpinnan oskillointi testin suorittamisen aikana hyvin vettä johtavassa akviferissä sijaitsevassa havaintoputkessa.

## 4 TULOKSET JA TULOSTEN KÄSITTELY

Tavoitteena oli toteuttaa testejä 50 putkella, loppujen lopuksi testejä saatiin toteutettua kaikkiaan 40 putkella. Putket oli asennettu kolmessa erässä kolmen eri yhtiön toimesta ja asennukset tapahtuivat saman kaavan mukaisesti. Ainoa poikkeavuus oli muutamiin putkiin asennettu suodatinsukka, mutta sen ei havaittu vaikuttavan testituloksiin. Testi suoritettiin jokaisella putkella kolme kertaa. Hydraulinen johtavuus saatiin määritettyä 18 testissä, 22 testissä määrittäminen ei onnistunut (lista kohteista Liitteessä 1). Syyt siihen, miksi hydraulista johtavuutta ei saatu määritettyä, on eritelty kuvassa 24.



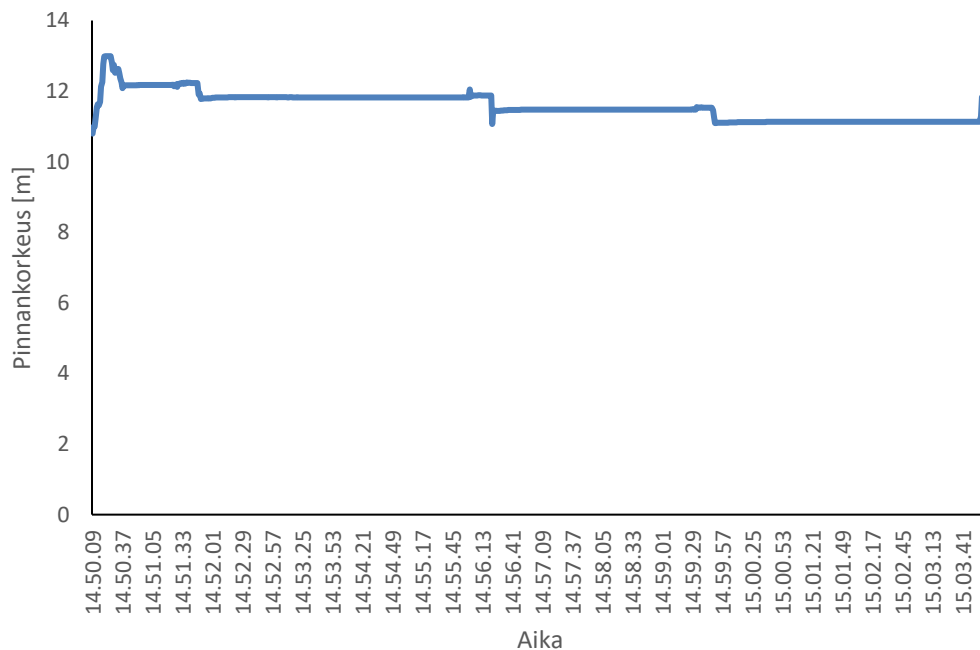
Kuva 24. Suoritetut testit ja niiden lopputulemat eriteltyinä.

Viidestä havaintoputkesta hydraulista johtavuutta ei saatu määritettyä havaintoputkien puutteellisten tietojen vuoksi. Nämä putket oli kairattu mittasyvyYTEEN, kun kaikki muut putket oli kairattu kallioon asti. MittasyvyYTEEN kairattujen putkien tapauksissa akviferin pohjan syvyys ei ollut tiedossa, joten hydraulista johtavuutta ei voitu määrittää Bouwerin ja Rican menetelmällä.

Kahdessa putkessa veden alenema oli riittävä, mutta palautumiseen kului jokaisella mittauskerralla ainoastaan yksi sekunti. Automaattisen vedenpinnan korkeuden mittarin lyhyin mittausväli on yksi sekunti, joten logaritmista käyrää ei saatu muodostettua. Esimerkiksi 0,2 sekunnin mittausvälillä logaritminen käyrä olisi voinut muodostua, jolloin data olisi ollut käyttökelpoista. Nyt kuitenkin nämä mittaukset jouduttiin

jättämään pois tarkastelusta. Lisäksi parempia tuloksia olisi mahdollisesti voitu saada poistamalla suurempi määrä vettä, tosin halkaisijaltaan 6 cm putkesta tulee slug-testissä Stricklandin & Korleskin (2006, 4-4) mukaan poistaa 0,2 – 1,4 litraa vettä. Parempia tuloksia olisi myös voitu saada suorittamalla testit lisäämällä vettä putkeen.

Putkessa KP26-1 vedenpinta ei palautunut. Poistaessa vettä vedenpinta putosi noin 45 senttiä, jonka jälkeen vedenpinta nousi noin 5 senttiä (kuva 25). Tämä toistui kaikissa mittauksissa.



Kuva 25. Havaintoputkessa KP26-1 toteutettu slug-testi, jossa vedenpinta ei palautunut.


## 4.1 Hydraulinen johtavuus


Jokaisen pohjavesiputken muodostumalle laskettiin maaperähavaintojen perustella arvioitu hydraulinen johtavuus, joita verrattiin mittauksiin. Näihin arvioihin liittyy useita epävarmuustekijöitä. Maaperän koostumus on arvioitu silmämääräisesti kairaaajien toimesta maastossa eikä raekokoanalyysellä ole tehty. Tästä syystä arviot pohjavesimuodostumien geometriasta eivät välttämättä täysin vastaa todellisuutta. Ilmoitetut kerrosten paksuudet eivät ole tarkkoja ja maa-aineksen koostumuksen arvioinneissa voi itsessään olla virheitä.


Seitsemässä putkessa mittauksien tulokset jäivät alarajan alle ja neljässä putkessa mittaukset ylittivät arvioidun ylärajan. Seitsemässä putkessa tulokset olivat arvioiden mukaisia. Arvioiden mukaiset tulokset olivat usein lähellä arvioitua alarajaa. Tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Mitattujen K-arvojen vertailu maaperän tyypistä arvioituihin K-arvoihin. K:n yksikkö on m/s, Sr on sora, Mr on moreeni, Hk on hiekka, KiSr on kivinen sora ja SiHk on silttinen hiekka.

Putki	K keskiarvo	K arvioitu ala-arvo	K arvioitu yläarvo	Akviferin koostumus	Akviferin paksuus [m]
HP2816	2,10E-05	8,45E-05	8,45E-01	Sr 2,7m Hk 0,5m	3,2
HP3116	2,49E-06	4,01E-06	4,01E-02	Mr 12,5 Hk 2,5m Sr 0,6m	15,6
HP3416	1,43E-06	1,00E-12	1,00E-06	Mr 8,3m	8,3
HP3516	1,03E-04	5,83E-07	5,83E-03	Hk 7m Mr 5m	12
HP3716	2,64E-05	1,00E-12	1,00E-06	Mr 9,73m	9,73
HP3816	1,54E-04	1,00E-06	1,00E-02	Hk 15,2m	15,2
HP4016	1,57E-06	9,50E-07	9,50E-03	Hk/Sr 9,5m Mr 0,5m	10
HP4516	2,60E-05	1,00E-12	1,00E-06	Mr 14,2m	14,2
HP4616	3,28E-05	7,56E-07	7,56E-03	Hk 9,3m Mr 3m	13,3
HP4716	4,65E-06	1,31E-05	1,31E-01	Mr 27,1m Sr 4,1m	31,3
HP5116	6,60E-07	1,83E-05	1,83E-01	Mr 8,9m Sr 2m	10,9
HP5318	1,38E-04	1,00E-04	1,00E+00	Sr 2,2m KiSr 1,15m	3,35
HP5416	4,05E-05	1,00E-04	1,00E+00	Sr 9,6m	9,6
HP6216	1,00E-04	1,00E-04	1,00E+00	Sr 0,7m	0,7
HP6416	7,50E-06	1,00E-12	1,00E-06	Mr 8,2m	8,2
KP26-2	1,45E-04	1,00E-04	1,00E+00	Sr 1,55m	1,55
KP63-3	2,33E-06	5,71E-05	5,71E-01	Mr/Sr 5,9m Mr 2,5m	8,5
KP63-4	1,26E-05	3,57E-07	3,57E-03	Mr 4,5m SiHk 2,5m	7

Mittaustulos arvion alapuolella 

Mittaustulos arvion mukainen 

Mittaustulos arviota korkeampi 

Tulosten jääminen arvioiden alapuolelle oli yleistä. Syitä voivat olla esimerkiksi virhe mittauksessa, virhe maaperän koostumuksen määrittämisessä tai hienon aineksen kertyminen siiviläosan ympärille. Arvioitua hydraulista johtavuutta matalammat tulokset on neljä kertaa seitsemästä saatu moreenivaltaisista akvifereistä. Loput kolme akviferiä ovat soravaltaisia. Mittauksissa ollut hajonta oli niin pientä, että tämän kokoluokan poikkeamat tuskin johtuvat siitä. Virhe maaperän määrittämisessä on mahdollinen, sillä määrittäminen tehtiin silmämääräisesti kairauksen yhteydessä. Lisäksi yksi mahdollinen syy poikkeamille on siiviläosan ympärille kerääntynyt hieno maa-aines. Butler & Healey (1998, 308) mainitsevat, että hienon aineksen

kerääntyminen siiviläosan ympärillä on erittäin yleistä, varsinkin jos putken asennuksessa ei ole kiinnitetty asiaan erityistä huomiota. Kaikki putket olivat uusia eikä niistä ole aikaisemmin otettu näytteitä tai tehty pumppauskokeita. Putkia ei myöskään huuhdeltu asennuksen yhteydessä, joten hienon aineksen kerääntyminen on todennäköistä. Hieno aines voi aiheuttaa todellista pienemmän mittaustuloksen.

Neljässä kohteessa mittaustulos oli yli arvioidun ylärajan. Kyseisissä kohteissa akviferin koostumus oli kokonaan moreenia. Nämä olivat tässä työssä tutkituista kohteista ainoat, joiden koostumus oli kokonaan moreenia. Arvioitua korkeammat tulokset johtunevat siitä, että moreenin seassa on ollut huokoisempaa ainetta, joka aiheuttaa puhdasta moreenia paremman hydraulisen johtavuuden. Arvioiden ylitykset olivat kahdessa putkessa (HP3416 ja HP6416) kuitenkin suhteellisen pieniä.

Paksuin pelkästä sorasta koostuva akviferi, josta hydraulinen johtavuus saatiin määritettyä, oli 9,6 metriä paksu (HP5416). Tämä ei kuitenkaan ole selkeä testin toimivuuden yläraja soravaltaisen akviferin paksuudelle, sillä mitattu hydraulinen johtavuus on selkeästi matalampi kuin arvioitu soramaan hydraulisen johtavuuden alaraja. Mitattu hydraulinen johtavuus oli  $4,052 \cdot 10^{-5}$  m/s kun arvioidun johtavuuden alaraja on  $10^{-4}$  m/s, eli arvio on noin 2,5 kertaa suurempi. Tässä tapauksessa soran seassa saattaa olla hienompaa maa-ainesta tai hienoa ainesta on kerääntynyt havaintoputken suodattimen ympärille. Pelkästä sorasta koostuvia akviferejä ei kohteissa ollut montaa, joten soran koostumuksen vaihteluiden ohella tästä syystä tarkkaa maksimipaksuutta oli vaikea arvioida. Matalin sora-akviferi, jossa hydraulinen johtavuus oli liian korkea, oli 3,3 metriä paksu ja paksuin, jossa johtavuus saatiin määritettyä, oli 1,55 metriä paksu. Kerrostuneissa soraa sisältävistä akvifereissä johtavuus saatiin määritettyä esimerkiksi havaintoputkesta HP2816, jossa oli 2,7 metriä soraa ja 0,5 metrin kerros hiekkaa soran päällä ja havaintoputkesta HP4816, jossa oli 27,1 metriä moreenia ja 4,1 metriä soraa.

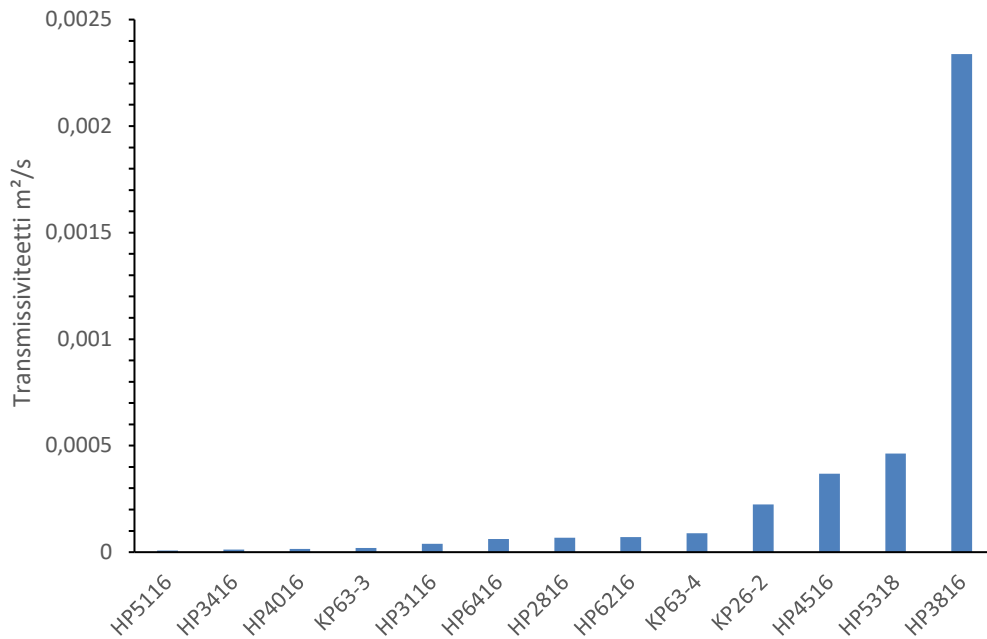
Hiekkamaissa testi toimi sora-akviferejä paremmin. Hydraulinen johtavuus määritettiin onnistuneesti 15,2 metriä paksusta hiekka-akviferistä. Akvifereissä, joissa hiekan osuus oli tätä matalampi ja joissa hiekan lisäksi oli vain huonommin johtavia kerroksia, hydraulinen johtavuus saatiin määritettyä joka kerta.

## 4.2 Transmissiviteetti

Pohjavesiputket oli käytännössä aina porattu osittain kallioon. Yleensä porattu matka oli varsin pieni, alle metrin. Pisin kallioon porattu matka oli 2,6 metriä. Tämä aiheutti ongelmia transmissiviteettien määrittämisessä, sillä kallion sisällä oleva putki on siiviläosaa. Tästä syystä monilla putkilla siiviläosan pituus oli lopulta pienempi kuin akviferin paksuus, jolloin transmissiviteettiä ei saatu täysin luotettavasti määritettyä. Tarkasteluun on kuitenkin otettu myös sellaisia putkia, joissa siiviläosa on liian lyhyt, sillä tässä työssä täysin tarkkoja tuloksia tärkeämpää on tulosten kokoluokka. Tarkastelusta on jätetty pois putket, jossa siivilä on huomattavasti liian lyhyt akviferin kokonaispaksuuteen nähden.

Transmissiviteettien vertailuun valittiin 13 mittaustulosta. Näistä putkista siiviläosa oli eniten vajaa putkissa HP4016 (2,0 m vajaa) ja HP3816 (3,2 m vajaa). Siiviläosa oli liian lyhyt myös kolmessa muussa putkessa, mutta huomattavasti vähemmän vajaa kuin aiemmin mainituissa putkissa (0,9 m vajaa putkessa HP5116, 0,8 m vajaa putkessa HP6416 ja 0,15 m vajaa putkessa KP26-2). Näiden putkien osalta tuloksissa on virheitä, mutta virheet ovat niin pieniä, että tulokset voidaan ottaa mukaan vertailuun. Liian lyhyen siiviläosan vuoksi tulokset ovat hieman todellista pienempiä. Siivilä oli riittävän pitkä muissa putkissa.

Näistä putkista korkein transmissiviteetti määritettiin putkessa HP3816,  $0,0023 \text{ m}^2/\text{s}$ . Mittaustulokset on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Mitatut transmissiviteetin arvot.

Stricklandin ja Korleskin (2006, 4-1) mukaan slug-testiä ei voida suorittaa, mikäli  $T = 0,003 \text{ m}^2/\text{s}$  tai isompi. Lähelle tätä arvoa päästiin onnistuneissa mittauksissa vain havaintoputkella HP3816, jossa mitattiin transmissiviteetin arvo  $0,0023 \text{ m}^2/\text{s}$ . Kyseinen havaintoputki sijaitsee alueella, jossa akviferi on kokonaan hiekkaa ja on 15,2 m paksu. Tämä oli ainoa kohde, jossa määritetty transmissiviteetti viittaa Şenin (2014) mukaisen määrityksen mukaan kohtalaiseen käyttöpotentiaaliin. Taulukosta 5 nähdään, että muissa kohteissa käyttöpotentiaali oli Şenin (2014) arviointiperusteiden mukaan vähäinen. Päivätasolla tarkasteltuna alle  $5 \text{ m}^2/\text{d}$  viittaa mitättömään käyttöpotentiaaliin,  $5\text{-}50 \text{ m}^2/\text{d}$  heikkoon ja  $50\text{-}500 \text{ m}^2/\text{d}$  kohtalaiseen. Stricklandin ja Korleskin esittämä transmissiviteetin raja-arvo ( $0,003 \text{ m}^2/\text{s}$  eli  $259,2 \text{ m}^2/\text{d}$ ) slug-testin toimivuudelle vastaa kohtalaista käyttöpotentiaalia, joten pohjavedenottoa suunnitellessa slug-testillä ei saada eroteltua kohtalaista ja hyvää käyttöpotentiaalia.

Taulukko 5. Pohjavesialueiden käyttöpotentiaali transmissiviteetin perusteella pohjavesiputkien kohdalla. (mukailtu Şen 2014, 66)

Havaintoputki	Akviferin koostumus	Akviferin paksuus [m]	T [m <sup>2</sup> /d]	Potentiaali
HP5116	Mr 8,9m Sr 2m	10,9	0,62	Ei potentiaalia
HP3416	Mr 8,3m	8,9	1,03	Ei potentiaalia
HP4016	Hk/Sr 9,5m Mr 0,5m	10	1,35	Ei potentiaalia
KP63-3	Mr/Sr 5,9m 2,5m Mr 12,5m Hk 2,5m	8,5	1,71	Ei potentiaalia
HP3116	Sr 0,6m	15,6	3,36	Ei potentiaalia
HP6416	Mr 8,2m	8,2	5,28	Heikko potentiaali
HP2816	Sr 2,7m Hk 0,5m	3,2	5,81	Heikko potentiaali
HP6216	Sr 0,7m	0,7	6,05	Heikko potentiaali
KP63-4	Mr 4,5m SiHk 2,5m	7	7,62	Heikko potentiaali
KP26-2	Sr 1,55m	1,55	19,39	Heikko potentiaali
HP4516	Mr 14,2m	14,2	31,86	Heikko potentiaali
HP5318	Sr 2,2m KiSr 1,15m	3,35	39,94	Heikko potentiaali
HP3816	Hk 15,2m	15,2	202,04	Kohtalainen potentiaali

Lapin ELY-keskus on suorittanut antoisuuspumppauksia osalla POSKI-hankkeen putkista. Antoisuuspumppauksia ei tehty havaintoputkilla, joiden mittaustulokset otettiin mukaan transmissiviteettivertailuun. Hydraulinen johtavuus määritettiin kuitenkin kolmesta havaintoputkesta (HP3016, HP3516 ja HP4616), joissa suoritettiin antoisuuspumppaukset. Transmissiviteettivertailuun näitä havaintoputkia ei valittu, sillä niiden siiviläosat olivat liian lyhyet, mutta näistä tuloksista (taulukko 6) saadaan kuitenkin arvio transmissiviteetin ja antoisuuden suhteesta alueen olosuhteissa. Tämän suhteen perusteella voitiin arvioida millaisia antoisuuksia transmissiviteettivertailussa mukana olevilla alueilla on.

Taulukko 6. Antoisuuspumppausten tulokset

Havaintoputki	Transmissiviteetti [m <sup>2</sup> /d]	Antoisuus [m <sup>3</sup> /d]	Antoisuus/Transmissiviteetti
HP3016	170,3	172	1,01
HP3516	107,21	110	1,03
HP4616	37,36	50	1,34

Antoisuuden ja transmissiviteetin suhde on keskimäärin 1,126. Tätä lukua käyttämällä voitiin arvioida karkeasti muiden akviferien antoisuuksia. Oulun alueella asukkaiden keskimääräinen veden ominaiskulutus on 167 l/as/d (Oulun Vesi 2017, 30). Näiden tietojen perusteella voitiin arvioida monelleko asukkaalle akviferistä voitaisiin näistä pisteistä ottaa päivittäin vettä (taulukko 7).

Taulukko 7. Pohjavesiputkien arvioidut antoisuudet suhdeluvun 1,126 perusteella ja asukkaiden enimmäismäärä, jolle akviferistä voitaisiin ottaa vettä.

Havaintoputki	Transmissiviteetti [m <sup>2</sup> /d]	Arvioitu antoisuus [m <sup>3</sup> /d]	Asukkaat/kaivo
HP5116	0,62	0,69812	4
HP3416	1,03	1,15978	6
HP4016	1,35	1,5201	9
KP63-3	1,71	1,92546	11
HP3116	3,36	3,78336	22
HP6416	5,28	5,94528	35
HP2816	5,81	6,54206	39
HP6216	6,05	6,8123	40
KP63-4	7,62	8,58012	51
KP26-2	19,39	21,83314	130
HP4516	31,86	35,87436	214
HP5318	39,94	44,97244	269
HP3816	202,04	227,49704	1362

Taulukosta nähdään, että myös heikoimmin vettä kuljettavista akvifereistä voitaisiin näistä pisteistä ottaa vettä esimerkiksi yksittäisten talouksien tai mökkikylien tarpeisiin. Akviferistä, jossa havaintoputki HP3816 voitaisiin ottaa vettä jopa pienen kunnan tarpeisiin.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kohteissa ei ole suoritettu koepumppauksia hydraulisen johtavuuden määrittämiseksi, joten slug-testien luotettavuuden vertailu perustuu ainoastaan maaperähavaintojen perusteella tehtyihin arvioihin. Niiden perusteella ja ottaen huomioon maa-ainesten silmämääräisen arvioinnin epävarmuudet, voidaan todeta slug-testin olevan riittävän luotettava, kun tavoitteena on selvittää hydraulisen johtavuuden ja transmissiviteetin kokoluokka.

Onnistuneissa sora-akviferien hydraulisen johtavuuden määrittämisissä kaikki tulokset olivat joko hieman arvioitun hydraulisen johtavuuden alarajan yläpuolella tai sen alapuolella. Hiekka-akvifereissä tulokset olivat arvioihin verrattuna keskimäärin korkeampia kuin sora-akvifereissä. Pelkkää moreenia sisältävissä akvifereissä tulokset olivat kaikki arvioituja arvoja korkeampia. Nämä havainnot olivat johdonmukaisia, mutta mittauksen määrä oli liian vähäinen, jotta voitaisiin todeta tulosten edustavan alueellista keskimääräisiä oloja. Sora-akviferien matalat tulokset voivat johtua maaperän koostumuksen arvioinnista tapahtuneista virheistä tai havaintoputken suodatinosan ympärille kertyneestä hienosta maa-aineksestä.

Soraa sisältävissä akvifereissä slug-testillä saatiin määritettyä hydraulinen johtavuus kahta poikkeusta lukuun ottamatta, kun sorakerrosten paksuus oli alle 4,1 metriä (havaintoputki HP4716). Putken HP4716 muodostumassa oli kuitenkin soran lisäksi 27 metrin kerros moreenia, joka laskee keskimääräistä hydraulista johtavuutta huomattavan paljon. Lisäksi testi ei toiminut kahdessa sora-akviferissä, missä sorakerroksen paksuus oli noin 3 metriä. Yksiselitteistä sorakerroksen paksuuden ylärajaa on vaikea määrittää, mutta slug-testi vaikuttaa silti varteenotettavalta vaihtoehdolta, kun sorakerroksen paksuus on 3-4 metrin luokkaa.

Paksuin hiekka-akviferi, jossa ei ollut soraa ja jonka hydraulinen johtavuus saatiin määritettyä, oli 15,2 metriä paksu ja täysin hiekasta koostuva akviferi (havaintoputki HP3816). Juuri tätä paksummasta hiekka-akviferistä tuskin saadaan hydraulista johtavuutta määritettyä, sillä kyseisen akviferin transmissiviteetti oli  $0,0023 \text{ m}^2/\text{s}$  mikä on lähellä Stricklandin & Korleskin määrittämää mahdollista slug-testin toimivuutta

rajoittavaa maksimitransmissiviteettiä  $0,003 \text{ m}^2/\text{s}$ . Tällainen akviferi on käyttöpotentiaaliltaan kohtalainen. Karkeiden arvioiden perusteella akviferin vedenvälityskyky riittäisi 1362 asukkaan tarpeisiin. Antoisuusarvioissa todettiin myös, että myös heikoimmin vettä välittävät akviferit voisivat riittää esimerkiksi yksittäisten talouksien, mökkien tai mökkikylien tarpeisiin.

Slug-testi on siis käyttökelpoinen tutkittaessa akviferin kelpoisuutta vedenottoon, mikäli akviferin geometria on tiedossa. Erityisesti Lapin alueella asukaskeskittymät ovat usein pieniä, jolloin pienetkin pohjavesimuodostumat voivat olla arvokkaita vedenhankinnan suhteen. Suorittamalla useampia testejä alueella voidaan saada riittävän tarkkaa tietoa alueen hydrologisista ominaisuuksista. Tarkkoja tuloksia voidaan saada vain akvifereistä, joiden transmissiviteetti on alle  $0,003 \text{ m}^2/\text{s}$ , mutta mikäli akviferin transmissiviteetti on niin korkea, ettei slug-testillä voida määrittää hydraulista johtavuutta, on akviferi todennäköisesti soveltuva vedenottoon. Tämän jälkeen tulee kuitenkin vielä suorittaa koepumppaus, ennen kuin päätöksiä vedenotosta tehdään.

## 6 YHTEENVETO

Pohjavesimuodostuman hydraulinen johtavuus on olennainen tieto pohjavesitutkimuksissa. Sen avulla voidaan määrittää muodostuman transmissiviteetti eli vedenvälityskyky, jolla voidaan määrittää muodostuman soveltuvuus vedenottoon. Lisäksi muodostuman hydraulinen johtavuus on arvokas tieto tilanteissa, joissa haitallista ainetta on päässyt pohjaveteen, koska hydraulisen johtavuuden avulla voidaan arvioida aineen leviämisenopeutta.

Hydraulisen johtavuuden määrittämiseen on olemassa useita erilaisia menetelmiä, kuten raekokoanalyysi, koepumppaus ja slug-testi. Raekokoanalyysi suoritetaan laboratoriossa, koepumppaus ja slug-testi suoritetaan maastossa ja niitä varten tarvitaan ainakin yksi havaintoputki. Lyhytkestoinen koepumppaus kestää yleensä 1-3 päivää ja pitkäkestoinen 3-6 kuukautta. Koepumppaukseen kuluva aika on sen vaatiman kaluston määrän ohella menetelmän merkittävin heikkous. Slug-testi on huomattavasti nopeampi, sillä sen voi suorittaa jopa minuuteissa. Slug-testin heikkouksia ovat kuitenkin muun muassa testin paikallinen luonne ja korkeisiin hydraulisiin johtavuuksiin liittyvät rajoitteet.

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia kustannustehokkaan slug-testin käyttöä kalliin ja aikaa vievän koepumppauksen korvikkeena hydraulisen johtavuuden määrittämiseen. Työssä tutkittiin slug-testin luotettavuutta ja pyrittiin selvittämään, voidaanko Lapin olosuhteissa määrittää selkeää ylärajaa erilaisten akviferien paksuuksille sekä perehdyttiin slug-testiin liittyviin epävarmuustekijöihin.

Sora-akvifereissä tehdyissä testeissä havaittiin, että matalissa akvifereissä, joissa hydraulinen johtavuus saatiin määritettyä, tulos oli usein alle tai vain hieman yli maaperätutkimusten perusteella tehtyjen hydraulisten johtavuuksien arvioiden. Tämä saattaa johtua havaintoputken siiviläosan ympärille kerääntyneestä hienosta maa-aineksesta tai soran seassa olevasta hienommasta maa-aineksesta, kuten hiekasta. Hiekka-akvifereissä mittaustulokset ylittivät arvioiden alarajat selvemmin ja olivat usein lähempänä ylä- kuin alarajoja. Moreeniakvifereissä tulokset ylittivät arviot. Syynä on todennäköisesti moreenin seassa oleva paremmin vettä johtava maa-aines.

Akviferien enimmäispaksuuksia slug-testin toimivuuden kannalta ei pystytty tarkkaan määrittämään, mutta vallinneissa olosuhteissa sora-akvifereissä enimmäispaksuus oli 3-4 metrin luokkaa. Hiekka-akvifereissä paksuin akviferi, josta hydraulinen johtavuus saatiin määritettyä, oli noin 15 metriä paksu. Tämän akviferin mitattu transmissiviteetti oli lähellä arvioitua maksimia, joten vallinneissa olosuhteissa tätä paksummista hiekka-akvifereistä ei todennäköisesti saada hydraulista johtavuutta määritettyä.

Vedenoton mahdollisuutta tutkittaessa slug-testillä voidaan määrittää transmissiviteetti akvifereistä, jotka ovat riittäviä pienten kuntien tarpeisiin. Korkein määritetty transmissiviteetti viittasi antoisuuteen, joka olisi riittävä noin 1300 asukkaan tarpeisiin. vedenottoon. Mikäli akviferi johtaa vettä niin hyvin, että hydraulista johtavuutta ei saada slug-testillä määritettyä, on akviferillä todennäköisesti vähintään kohtalainen käyttöpotentiaali vedenottoon.

## LÄHTEET

Airaksinen J., 1978. Maa- ja pohjavesihydrologia. Oulu: Kustannusosakeyhtiö Pohjoinen, 248 s. ISBN 951-9099-73-5

Bouwer H. 1989. The Bouwer and Rice Slug Test – An Update. Ground Water Vol. 27 No 3. Saatavissa:  
[https://www.csus.edu/indiv/h/hornert/geol\\_210\\_summer\\_2012/week%203%20readings/bouwer%201989.pdf](https://www.csus.edu/indiv/h/hornert/geol_210_summer_2012/week%203%20readings/bouwer%201989.pdf)

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.

Geologian tutkimuskeskus. Lapin POSKI-hanke. [verkkodokumentti] Saatavissa:  
[http://www.gtk.fi/asiantuntijapalvelut/maankaytto/kiviaines/Lapin\\_poski.html](http://www.gtk.fi/asiantuntijapalvelut/maankaytto/kiviaines/Lapin_poski.html) [viitattu 28.3.2019]

Delleur, J.W. 2007. The Handbook of Groundwater Engineering. Second Edition. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group. 1320 s. ISBN 978-0-8493-4316

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

In-Situ Europe. 2016. 3-part Well Slugs. [verkkodokumentti]. Saatavissa:  
<https://www.in-situ-europe.com/index.php/products/accessories/well-slugs/3-part-well-slugs.html> [viitattu 20.3.2019]

Johansson T. & Göransson M. 2006. Oskarshamn site investigation, Slug tests in groundwater monitoring wells SSM000222-SSM000230 in soil. Tukholma: Svens

Kärnbränslehantering AB. 40 s. ISSN 1651-4416. Saatavissa: <http://www.skb.com/publication/1234061/P-06-149.pdf>

Kinnunen T., 2005. Pohjavesitutkimusopas. Vammala: Suomen vesiyhdistys ry. 194 s. ISBN 952-9606-73-7

Korkka-Niemi K., Salonen V-P., 1996. Maanalaiset vedet – pohjavesigeologian perusteet. Vammala: Turun yliopiston täydennyskoulutuskeskus, 181 s. Turun yliopiston täydennyskoulutuskeskuksen julkaisuja A:50, ISBN 951-29-0825-5

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

Luoma & Pullinen 2011. Field Investigation and Estimates of Hydraulic Conductivity from Slug Tests in the First Salpausselkä formation in the Santala area, Hanko, south Finland. Saatavissa: [http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/13\\_2011.pdf](http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/13_2011.pdf)

Mälkki E. 1999. Pohjavesi ja pohjaveden ympäristö, Helsinki. 304 s. ISBN 951-26-4515-7

Odong J. 2008. Evaluation of Empirical Formulae for Determination of Hydraulic Conductivity based on Grain-Size Analysis. The Journal of American Science 4(1), 2008. ISSN 1545-1003. Saatavissa: [http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/0401/01\\_0287\\_JustineOdong\\_Evaluation\\_am0401.pdf](http://www.jofamericanscience.org/journals/am-sci/0401/01_0287_JustineOdong_Evaluation_am0401.pdf)

Oulun Vesi 2017. Vuosikertomus 2017. 32 s. Saatavissa: [http://www.e-julkaisu.fi/oulunvesi\\_vuosikertomus\\_2017/mobile.html#pid=1](http://www.e-julkaisu.fi/oulunvesi_vuosikertomus_2017/mobile.html#pid=1)

Rantamäki M., Jääskeläinen R. & Tammirinne M., 1992. Geotekniikka. Hämeenlinna: Otatieto Oy. ISBN 951-672-157-5

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

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

Şen Z., 2014. Practical and Applied Hydrogeology. Elsevier, 424 s. ISBN 9780128005811

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. Saatavissa: [https://www.epa.state.oh.us/portals/28/documents/TGM-04\\_final1206W.pdf](https://www.epa.state.oh.us/portals/28/documents/TGM-04_final1206W.pdf)

Zafar Hyder, James J. Butler, Jr., Carl D. McElwee & Wenzhi Liu. 1994 Slug tests in partially penetrating wells. Water Resources Research, vol 30. no. 11. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/6e7d/bc802ab642e1e7a2e597b8ad35c50132e430.pdf>

## Lista havaintoputkista, joista hydraulista johtavuutta ei saatu määritettyä

Havaintoputki	Kunta	Kohde	Koordinaatit	Syy
HP1018	Salla	Kursunkangas	7402379,551817	Korkea transmissiviteetti, puuttuvat tiedot
HP1118	Salla	Pitkälampi	7402266,555850	Korkea transmissiviteetti, puuttuvat tiedot
HP1218	Salla	Kuolpuna	7407659,563085	Puuttuvat tiedot
HP2118	Pelkosenniemi	Kiemunki	7435867,530125	Lian matala akviferi
HP3018	Savukoski	Sillankorva	7457104,561744	Korkea transmissiviteetti, puuttuvat tiedot
HP3118	Savukoski	Saarivaara	7481665,526011	Puuttuvat tiedot
HP4118	Sodankylä	Utsamonvaara	7486596,472066	Korkea transmissiviteetti, puuttuvat tiedot
HP4216	Posio	Jalankankaat	7325257,544596	Korkea transmissiviteetti
HP4218	Sodankylä	Kaunisvaara	7459099,491717	Puuttuvat tiedot
HP4316	Posio	Saarilamminkangas	7324979,543152	Korkea transmissiviteetti
HP4416	Posio	Isokangas	7325515,547061	Korkea transmissiviteetti
HP5316	Kolari	Kivikkopalo	7485923,368247	Korkea transmissiviteetti
HP5816	Muonio	Mustijärvi	7499041,357471	Korkea transmissiviteetti
HP5916	Enontekiö	Ahvenjärven kangas	7594386,330817	Korkea transmissiviteetti
HP6016	Muonio	Mustijärvi	7499202,358139	Korkea transmissiviteetti
KP11-1	Kemi	Sotisaari	7297022,386610	Korkea transmissiviteetti
KP11-2	Kemi	Sotisaari	7296916,386522	Korkea transmissiviteetti
KP26-1	Kemi	Ristikangas	7296093,390024	Vedenpinta ei palautunut
KP26-3	Kemi	Ristikangas	7295706,390491	Korkea transmissiviteetti
KP45-1	Rovaniemi	Mellalampi	7394474,426176	Korkea transmissiviteetti
KP45-2	Rovaniemi	Mellalampi	7395838,425719	Korkea transmissiviteetti
KP48-2	Rovaniemi	Tavivaara	7368653,442514	Korkea transmissiviteetti