

KALLIOPOHJAVESITASE, ALENEMAKARTIO JA ALUSTAVA VEDENLAATU KELIBER OY:N RAPASAAREN KAIVOKSELLE

Anniina Kittilä, Muhammad Muniruzzaman, Arto Pullinen, Jouni Lerssi, Antti
Pasanen

Tämä on käännös. Ristiriitatilanteissa tulee käyttää alkuperäistä, englanninkielistä, raporttia: Bedrock groundwater balance, depression cone and preliminary water quality for Keliber Oy Rapasaari mine.

29.10.2020

GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS

Kuvailulehti

29.10.2020 / GTK/799/03.04.19/2020

Tekijät Anniina Kittilä, Muhammad Muniruzzaman, Arto Pullinen, Jouni Lerssi, Antti Pasanen		Raportin laji Asiakasraportti	
		Toimeksiantaja Keliber Oy	
Raportin nimi Kalliopohjavesitase, alenemakartio ja alustava vedenlaatu Keliber Oy: Rapasaaren kaivokselle			
Tiivistelmä Tämän tutkimuksen aikana kerätty geofysikaalinen ja hydrogeologinen data vietiin numeeriseen malliin pohjavesitaseen ja alenemakartion laajuuden arvioimiseksi suunnitellulla Rapasaaren louhoksella. Tulokset antoivat veden pohjaveden virtaaman louhokseen arvioksi noin 80 m ³ /d 10 vuoden jälkeen. Alenemakartio on hyvin paikallinen, paitsi avolouhoksen läpi kulkevaa ruhjevyydyhettä pitkin. Vaikutusta läheiseen Natura 2000 suojeltuun suohon ei tutkimuksessa havaittu. Pohjaveden laatuun vaikutti pääasiassa sähkönjohtavuus (suolaisuus), jonka korkein havaittu arvo oli noin 3000 µS/cm. Cl, Ca, ja Na ovat korkean sähkönjohtavuuden vesien pääionit.			
Avainsanat Kalliopohjavesi, pohjavesivirtaama, alenemakartio, veden laatu			
Maantieteellinen alue Kaustinen, Ullava			
Karttalehti			
Muuta			
Report serial		Arkistokoodi	
Sivut 25 + 5 liitettä	Kieli Suomi	Hinta	Julkisuus Luottamuksellinen
Yksikkö Vesiratkaisut (VER)		Projektikoodi 50401-10372	
Allekirjoitus/nimen selvennys  Eeva Käpyaho, Yksikön päällikkö		Allekirjoitus/nimen selvennys  Anniina Kittilä, Tutkija	

Sisällysluettelo**Kuvailulehti**

1	Johdanto	1
2	Menetelmät	1
2.1	VLF-R mittaukset	1
2.2	Sähkönjohtavuus- (EC) ja lämpötilaprofilointi (T)	2
2.3	Slug-testit	3
2.4	Pumppauskokeet	3
2.5	Vesinäytteenotto ja kemialliset analyysit	3
2.6	Numeerinen mallinnus	4
3	Tulokset	5
3.1	VLF-R	5
3.2	EC ja T profiilit	6
3.2.1	Yleiset havainnot	6
3.2.2	Korrelaation geoteknisen tutkimuksen kanssa	8
3.3	Slug-testit	9
3.4	Pumppauskokeet	10
3.5	Vesikemia	13
3.6	Numeerinen malli	16
4	Keskustelu	19
5	Johtopäätökset	21
Liite A	Profiilien 2-kerros inversiotulokset ja tulkinnat	22
Liite B	Sähkönjohtavuus- ja lämpötila profiilit	26
Liite C	Slug-testien tulokset kaikilta kairareijistä	41
Liite D	Pumppauskokeiden tulokset	61
Liite E	Vesikemian analyysien tulokset	67

29.10.2020

1 JOHDANTO

Tämä raportti kuvaa projektin aikana tehdyt geofysiikan kenttätyöt, hydrogeologiset kenttäkokeet ja kalliopohjaveden geokemialliset analyysit, joilla selvitettiin kalliopohjaveden tasetta, alenemakartiota ja alustavaa vedenlaatua Rapasaaren suunnitellulla kaivoksella. Lisäksi tulkittiin suunnitellun Rapasaaren louhoksen vaikutusta läheiseen Natura 2000 suojelualueeseen.

Kalliopohjavesitase mallinnettiin numeerisesti suunnitellulle monimutkaiselle Rapasaaren louhokselle, jossa on avolouhos ja maanalainen louhos. Mallinnus tehtiin FeFlow[®] mallinnusohjelmalla ja mallin geometria sisältää suunnitellun louhoksen (avolouhos ja maanalaiset alueet, Keliberin toimittamien suunnitelmien mukaan), louhokseen vaikuttavat ruhjevyöhykkeet ja heterogeeniset hydrauliset parametrit perustuen mitattuihin ja kalibroituihin arvoihin. Numeerisen mallinnuksen pääetu verrattuna Syväjärvellä tehtyyn analyttiseen mallinnukseen on se, että mallissa voidaan ottaa huomioon hydraulisten ominaisuuksien heterogeeninen jakautuminen sekä vähentää tarvetta arvioida tuntemattomia ominaisuuksia. Näin saadaan paljon realistisemmat tulokset. Ruhjevyöhykkeet sisällytetään malliin ehjää kallioperää suuremman hydraulisen johtavuuden rakenteina. Louhoksen monimuotoisuutta voidaan myös käsitellä paremmin numeerisella kuin analyttisellä mallintamisella.

Tämän tutkimuksen tavoitteet olivat:

1. mallintaa kallioperän pohjavedestä **louhokseen virtaavan veden virtaama**,
2. **määrittää alenemakartion säde** ja sen **mahdollinen vaikutus läheiseen Natura 2000 suojeltuun suohon** ja,
3. **määrittää alustava pohjaveden laatu** ja varsinkin korkean sähkönjohtavuuden veden esiintyminen, kuten Syväjärven louhosalueella havaittiin.

2 MENETELMÄT

2.1 VLF-R mittaukset

Sähkömagneettinen VLF ominaisvastus (VLF-R) menetelmä käyttää kaukaisesta radiolähettimestä (15 – 25 kHz) lähetettyä tasoaaltoa signaalinaan. Tämä menetelmä on erityisen sopiva heikkojen johtimien ja ruhjevyöhykkeiden kartoittamiseen matalan sähkönjohtavuuden maankamarassa. Menetelmän syvyysulottuvuus on myös hyvä, hyvissä olosuhteissa jopa 300 m, suomalaisissa kallioperäolosuhteissa noin 100 m. Kaikki VLF-R mittaukset tehtiin kanadalaisella GEONICS EM 16-R systeemillä käyttäen lähetasemana pohjoisessa Saksassa sijaitsevaa DHO38 (23.4 kHz) asemaa. DHO38 sijaitsee optimaalisessa suunnassa ruhjevyöhykkeiden mittaamiseen Suomessa. Aineiston tulkinnassa käytettiin kaksikerrosinversiota perinteisten ominaisvastus- ja vaihe-erokarttojen lisäksi.

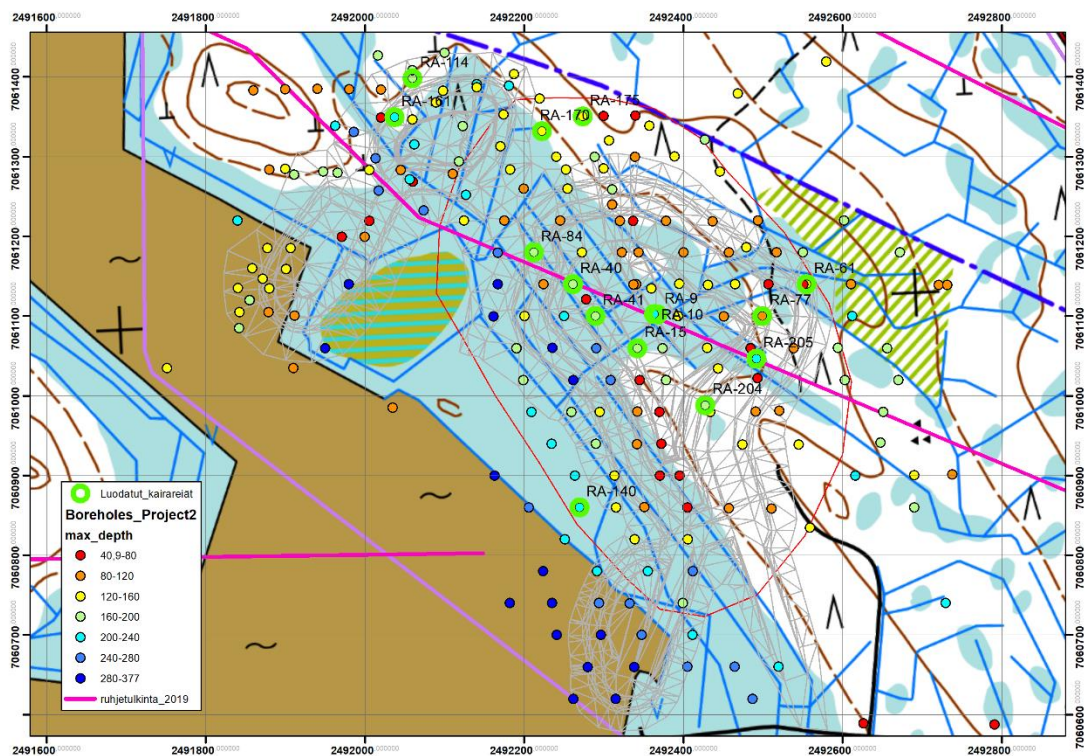
29.10.2020

VLF-R mittausten tarkoitus oli parantaa olemassa olevaa tulkintaa ruhjevyöhykkeistä ja ohjata seuraavia tutkimusvaiheita. Tässä tutkimuksessa mitattiin marraskuussa 2019 seitsemän (7) 2 km pituista, I-L suuntaista profiilia (Kuva 3) Rapasaaren alueella.

2.2 Sähkönjohtavuus- (EC) ja lämpötilaprofilointi (T)

EC ja T profiilien saamiseksi kairareitistä, kairareikään lasketaan hitaasti laite, joka mittaa näitä parametrejä. Äkilliset muutokset, varsinkin EC:ssä, viittaavat siihen, että hydraulisesti aktiivinen ruhje leikkaa kairareikää. Vähittäiset muutokset taas viittaavat siihen, että reiässä on vertikaalista nesteen virtausta.

EC ja T profiilit otettiin 15 kairareistä (Kuva 1), jotka valittiin 3D kairareikäineiston ja niiden geoteknisen luokittelun perusteella. Tarkoituksena oli tutkia kairareikiä, jotka mahdollisesti leikkasivat VLF-R mittauksista tulkittua, suunnitellussa avolouhoksessa sijaitsevaa ruhjevyöhykettä. Lisäksi valittiin muutama kairareikä suunnitellun avolouhoksen ulkopuolelta edustamaan tausta-arvoja. Valinnat kohdistettiin pääasiassa matalien RQD-arvojen kairareikiin, sillä hypoteesilla että ruhjeisempi kallio sisältää enemmän hydraulisesti aktiivisia rakenteita. EC ja T profiilit mitattiin 11.-19.12.2019.



Kuva 1. Tutkitut (EC ja T-profiilit sekä slug-testit) kairareitit tutkimusalueella, merkattuna vihreillä ympyröillä. Avolouhoksen ääriiviivat on merkitty harmailla viivoilla. Myös VLF-R mittauksista tulkittu ruhjevyöhykkeet on merkitty kuvaan tumman pinkillä.

29.10.2020

2.3 Slug-testit

Slug-testien tavoitteena oli määrittää kallioperän hydraulinen johtavuus ja sen spatiaalinen jakautuminen ja varmentaa mahdolliset ruhjevyöhykkeet. Avoimissa kairarei'issä tehdyt slug-testit antavat arvion jokaiselle kairareiälle sen keskimääräisestä hydraulisesta johtavuudesta. Kairareiät, jotka leikkaavat korkean johtavuuden ruhjeita reagoivat nopeasti vedenpinnan muutokseen slug-testin aikana. Slug-testien tulokset voidaan korreloida kairasydämistä tunnistettujen ruhjevyöhykkeiden kanssa ja näin voidaan tunnistaa mahdolliset merkittävät ruhjevyöhykkeet, joiden kautta voi kulkeutua vettä suunniteltuun louhokseen. Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että korrelaatiota kairasydämissä havaitun rikkonaisuuden ja ruhjevyöhykkeiden hydraulisten ominaisuuksien välillä ei aina ole olemassa.

Slug-testit tehtiin samoille 15 kairareiälle kuin mistä EC ja T profiilit mitattiin (Kuva 1). Testaus tehtiin 20.-22.12.2019, 21.-22.1.2020 ja 29.1.2020.

2.4 Pumppauskokeet

Pumppauskokeiden tarkoitus oli varmentaa slug-testien tulokset ja tutkia kairareikien välisiä hydraulisia yhteyksiä. Pitkäaikaiset pumppauskokeet voivat antaa tarkempaa tietoa hydraulisista johtavuuksista. Slug-testit havaitsevat vain tutkitun kairareiän välittömän läheisyyden hydrauliset ominaisuudet, kun taas pumppauskokeilla voidaan tutkia, onko kahden erillisen kairareiän välillä hydraulista yhteyttä. Lisäksi veden pinnan muutokset monitoroiduissa kairarei'issä indikoivat yhteyden muodostavien ruhjevyöhykkeiden hydraulista johtavuutta. Näin merkittävien, suunniteltuun louhokseen vettä kuljettavien ruhjevyöhykkeiden verkosto voidaan kartoittaa isolla mittakaavalla. Tulokset voivat myös auttaa arvioimaan suunnitellun louhoksen aiheuttaman alenemakartion kokoa ja sen vaikutusta läheiseen luonnonsuojelualueeseen.

Pumppauskokeet suoritettiin kahdessa kairareiässä, RA-40 ja RA-205 (Kuva 1) 23.-27.1.2020 ja 30.1.-1.2.2020, pumppaustahdin ollen 0.18 l/s. Veden pinnan tasoa, sähkönjohtavuutta ja lämpötilaa seurattiin RA-40 pumppauksessa kairarei'istä RA-10, RA-41, RA-45 ja RA-84 (Kuva 58) ja RA-205 pumppauksessa rei'istä RA-10, RA-13, RA-15 ja RA-20 (Kuva 64).

2.5 Vesinäytteenotto ja kemialliset analyysit

Kalliopohjaveden kemiallisia analyyseja varten vesinäytteet kerättiin 27.-30.4.2020 kairarei'istä RA-10, RA-41, RA-61, RA-77, RA-84, RA-161, ja RA-170 (Kuva 1). Kerätyt näytteet analysoitiin alkuaineiden liuenneiden ja kokonaispitoisuuksien määrittämiseksi käyttäen ICP-OES ja ICP-MS tekniikoita (SFS-EN ISO 11885, SFS-EN ISO 17294-2, SFS-EN ISO 15587-2), ja anionipitoisuudet määritettiin ionikromatografialla (SFS-EN ISO 10304-1). Lisäksi määritettiin Fe²⁺ pitoisuus spektrofotometrillä, liuennut orgaaninen hiili (DOC) sekä orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC) pyrolyyttisellä menetelmällä (SFS-EN 1484), ja liukoinen kiintoaine gravimetrisellä menetelmällä (SFS-3008). Myös pH ja

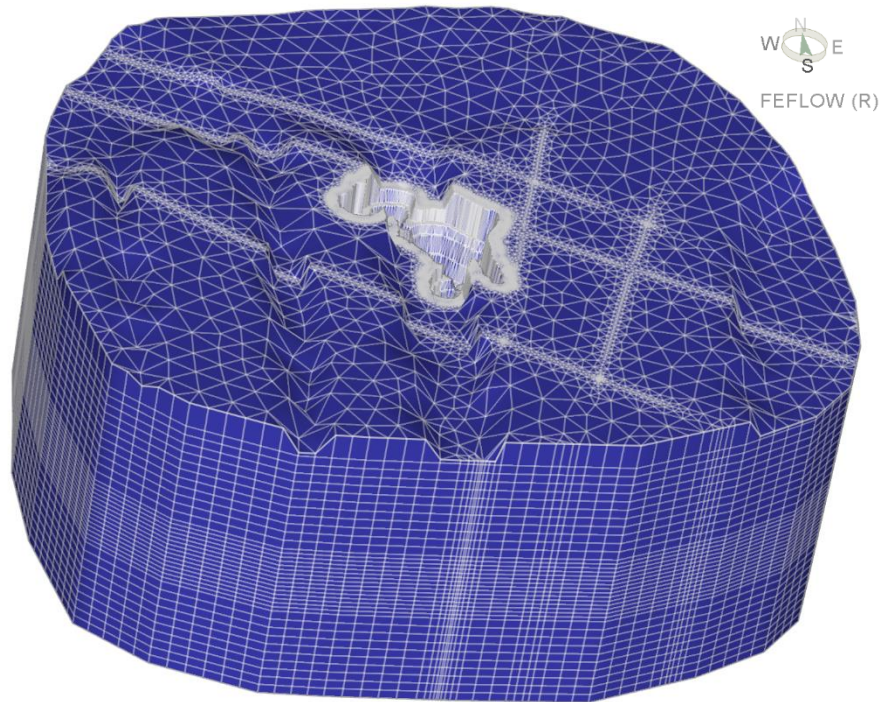
29.10.2020

sähkönjohtavuus (SFS 3021, SFS-EN 2788), alkaliniteetti (SFS 3005), kemiallinen hapenkulutus ja veden väri (SFS-EN ISO 7887) mitattiin ja määritettiin.

2.6 Numeerinen mallinnus

Numeerisen mallinnuksen tavoitteena oli määrittää kallioperästä louhokseen purkautuvan pohjaveden tase, sekä alenemakarttion säde ja sen mahdolliset vaikutukset lähellä olevaan Natura 2000 suohon, joka sijaitsee noin 2 km itään suunnitellusta avolouhoksesta.

Numeerinen mallinnus tehtiin tässä tutkimuksessa FeFlow[®] mallinnusohjelmalla. Mallinnusalue muodostuu ympyränmuotoisesta alueesta, jonka reunat ovat n. 1.5 km päässä avolouhoksen reunoista. Kaikki mahdolliset VLF-R menetelmällä tunnistetut ruhjevyöhykkeet otettiin huomioon siten, että virtausta jokaisessa ruhjevyöhykkeessä pystyttiin käsittelemään yksilöllisesti. Mallinnusverkko sisälsi 37 kerrosta, noin 0.5 miljoonaa solmukohtaa ja noin miljoonaa elementtiä (Kuva 2).



Kuva 2. Mallinnusverkko, jossa näkyy tiheämpi verkko lähellä ruhjevyöhykkeitä ja avolouhosta. Tunnelit ja maanalaiset louhokset sisällytettiin malliin "Hagen-Poiseuillen" kaavan mukaisesti, joka käsittelee näitä rakenteita putkivirtauksena ja on hydraulisessa yhteydessä kallioperään. Mallinnusalueen vertikaalinen ulottuvuus on tässä viisinkertaisesti liioiteltu.

Vain lopullinen louhosvaihe huomioitiin mallissa. Tämä tarkoittaa, että kaivuuvaiheita ei otettu huomioon ja tämä todennäköisesti johtaa liioitteluun lyhyen aikavälin (<1 päivä) veden virtaamisissa. Avolouhoksen reunoille asetettiin "Free seepage" reunaehto, joka kiinnittää hydraulisen paineen vastaamaan reunasolmujen korkeusarvoa ja kuvaa pintavaluntaa avolouhokseen. Ruhjeverkosto simuloitiin diskreetteinä elementteinä, jolloin laskennassa käytetään Darcy-virtausta. Hydrauliseksi johtavuudeksi määritettiin

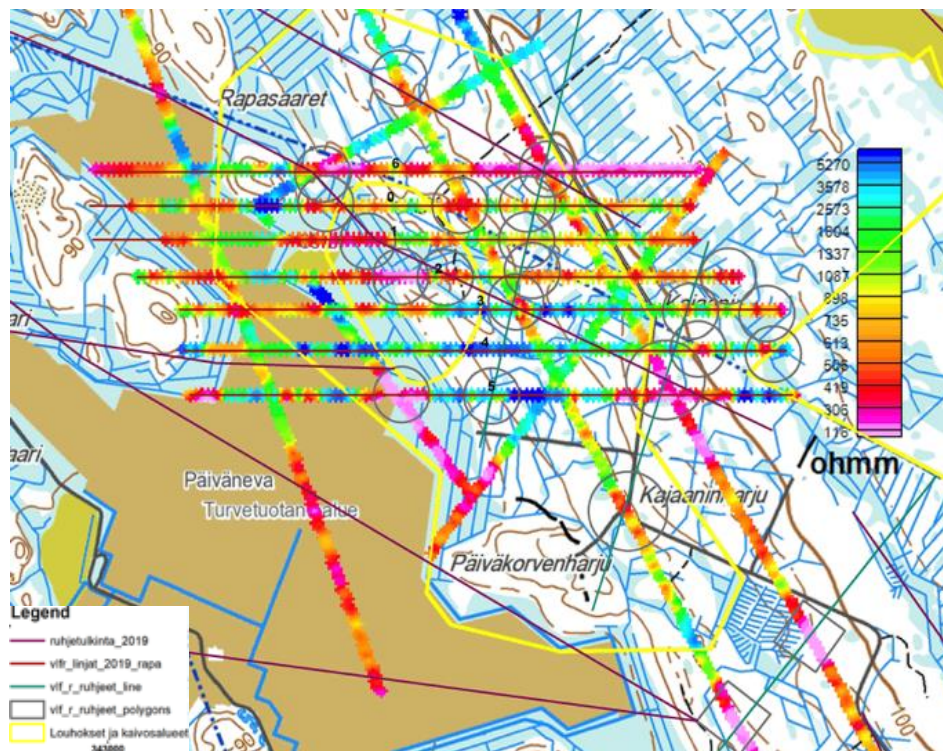
29.10.2020

kallioperälle 1.0×10^{-10} m/s, avolouhusta leikkaaville ruhjevyöhykkeille 5.0×10^{-7} m/s ja avolouhusta leikkaamattomille ruhjevyöhykkeille 1.0×10^{-7} m/s. Rakojen arvot valittiin tässä tutkimuksessa tehtyjen kenttätutkimusten, eli slug-testien ja pumppauskoekiden, perusteella.

3 TULOKSET

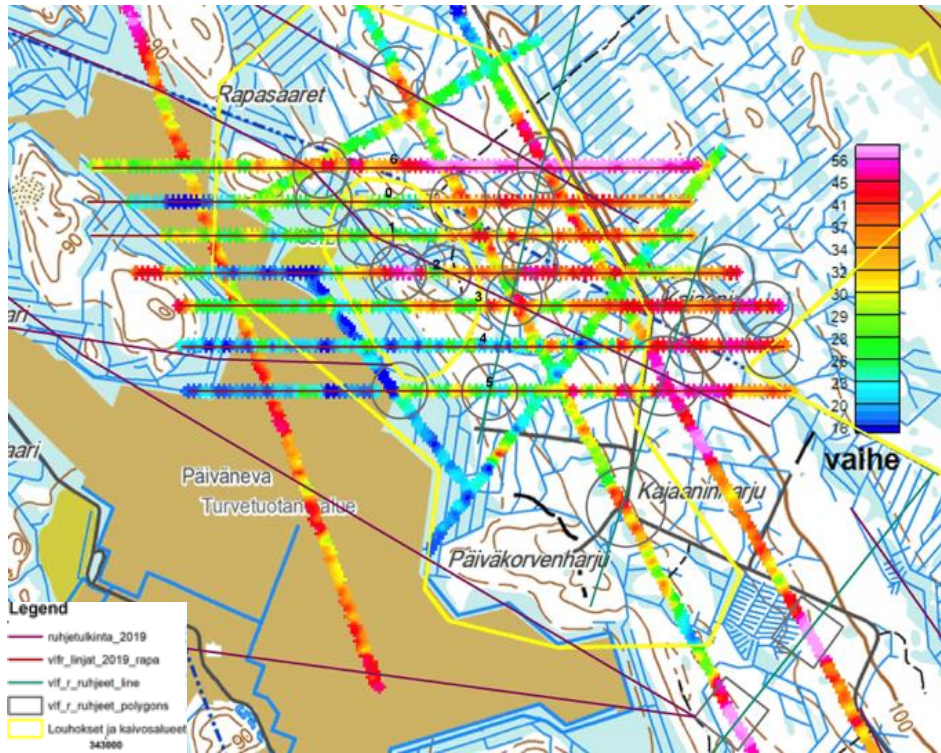
3.1 VLF-R

Mittausten aikana esiintyi hieman ongelmia VLF signaalin heikosta signaalista johtuen, jonka seurauksena mitatun datan häiriötaso voi olla merkittävää joissain kohdissa profiileja. Kuva 3 esittää VLF-R mittausten näennäisen ominaisvastuksen tulokset tästä tutkimuksesta (itä-länsi-suuntaiset linjat, numeroitu 0-6) ja edeltävistä tutkimuksista (pohjoisluode-eteläkaakko- ja koillis-lounas-suuntaiset linjat), sekä nykyisten tulosten tulkinnat. Alhaisemmat ominaisvastusarvot voivat viitata mahdollisiin ruhjevyöhykkeisiin ja/tai hyviin johteisiin kallioperässä. Kuva 4 esittää tulokset ja tulkinnat vaihekulmista. Korkeammat vaihekulmat voivat viitata mahdollisiin ruhjevyöhykkeisiin ja/tai syvempiin johteisiin. Tulkitut ja potentiaaliset ruhjevyöhykkeet mitatuissa profiileissa on merkattu ympyröillä molempiin kuviin ja mustat sekä vihreät linjat ovat tulkittuja ruhjevyöhykkeitä. 2-kerrosinversion tulokset ja tulkinnat on esitetty Liite A.



Kuva 3. Näennäinen ominaisvastus kartta ja tulosten tulkinta seitsemältä itä-länsi suuntaiselta linjalta. Esitetyt tulokset sisältävät myös aikaisempia tutkimuksia Rapasaaren alueelta.

29.10.2020



Kuva 4. Vaihekulmakartta tämän tutkimuksen tulosten tulkinta seitsemältä itä-länsi suuntaiselta linjalta. Esitetyt tulokset sisältävät myös aikaisempia tutkimuksia Rapasaaren alueelta.

3.2 EC ja T profiilit

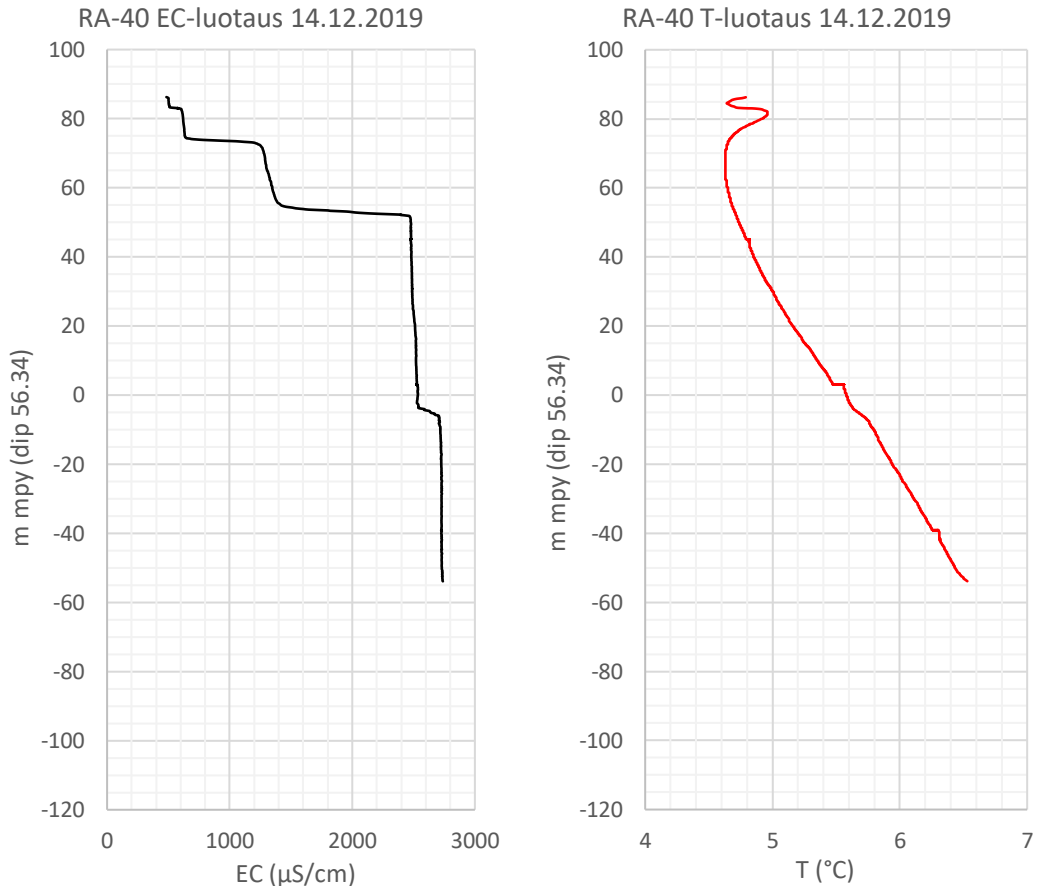
3.2.1 Yleiset havainnot

Kairareiän RA-40 sähkönjohtavuus (EC) ja lämpötila (T) profiilit esitetään esimerkkinä Kuva 5. Kaikki mitatut EC ja T profiilit on esitetty Liite B. Profiilit on esitetty korkeutena metriä meren pinnan yläpuolella (mpy) ja kairareikien keskimääräiset kaateet ilmoitetaan y-akselin otsikossa. Alueen korkein havaittu sähkönjohtavuusarvo oli noin 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ja 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ylittäviä sähkönjohtavuuksia havaittiin kairarei'issä RA-9, RA-10, RA-40, RA-41, ja RA-170 (Kuva 1).

Suunnitellun avolouhoksen alueelle ja lähelle ruuhjevyöhykettä ovat kairanreiät RA-84, RA-40, RA-41, RA-15, RA-9 ja RA-10 (Kuva 1). Lähellä kairanreiän RA-84 yläpäättä tapahtuu jyrkkä kasvu, jossa EC saavuttaa noin 1460 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Vielä alempana tapahtuu lievää kasvua ja sitten taas jyrkempi kasvu niin, että EC saavuttaa melkein 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Kuva 30 Liite B). RA-41-kairareiässä tapahtuu myös jyrkkä kasvu reiän yläpäässä, jonka jälkeen EC on noin 1600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ seuraavat 75 vertikaalimetriä. Tässä tapahtuu seuraava jyrkkä kasvu, jossa EC saavuttaa noin 2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Kuva 27). RA-40-reiässä on kaksi kohtalaista EC:n kasvua ensimmäisen 30 vertikaalimetrin aikana. Sen jälkeen on vahvempi kasvu 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ asti ja sitten toinen pienempi kasvu 2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ asti (Kuva 5 ja Kuva 26). RA-15 reiässä EC kasvaa tasaisin välimatkoin, kunnes se saavuttaa noin 2300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ kairareiän pohjalla (Kuva 25). Reiässä RA-9 EC kasvaa kohtalaisesti ensimmäisten 50 vertikaalimetrin ajan, jonka jälkeen on kaksi jyrkempää kasvua, joissa

29.10.2020

EC saavuttaa melkein 2100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jo reiän keskivaiheilla (Kuva 23). Reiässä RA-10 on jyrkkä kasvu 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ asti jo hyvin lähellä reiän yläpäättä, jonka jälkeen on vielä toinen kasvu noin 2900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Kuva 24). Tutkimuksessa havaittiin, että sähkönjohtavuus saavuttaa melko korkeita arvoja näissä lähellä tulkittua ruhjevyöhykettä sijaitsevilla kairareillä.



Kuva 5. Sähkönjohtavuus (EC) ja lämpötila (T) profiilit kairareistä RA-40.

Myös kairareitit RA-204 ja RA-205 sijaitsevat lähellä samaa ruhjevyöhykettä. Niiden sähkönjohtavuus on kuitenkin hyvin matala, alle 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ RA-204-reiässä (Kuva 36) ja alle 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$ RA-205-reiässä (Kuva 37). EC kuitenkin nousee noin 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ asti aivan RA-205-reiän pohjalla. Matala EC näissä kairareissa voi olla jäännös niiden kairaamisesta, sillä ne asennettiin vain muutama kuukausi ennen EC-profiilien mittaamista.

RA-204 ja RA-205-rei'istä pohjoiseen sijaitsevat kairareitit RA-61 ja RA-77 (Kuva 1). Niiden EC-profiilit ovat keskenään samankaltaiset (Kuva 28 ja Kuva 29). EC saavuttaa noin 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ jo aivan kairareian alussa ja pysyy samalla tasolla koko reiän syvyyden. Näiden reikien EC-profiilit ovat kuitenkin hyvin erilaiset kuin muilla ruhjevyöhykkeen lähellä olevilla rei'illä (ts. kairareitit RA-84, RA-40, RA-41, RA-15, RA-9 ja RA-10). Tämä viittaa siihen, että RA-61 and RA-77 eivät ehkä ole yhteydessä ruhjevyöhykkeeseen.

29.10.2020

Etelään ruhjevyöhykkeestä, suunnitellun avolouhoksen reunalla, sijaitsee kairanreikä RA-140, joka valittiin yhdeksi taustaolosuhteita edustavaksi kairanreiäksi (muut valitut reiät olivat RA-61, RA-170 ja RA-175). Reiän EC-profiili on käytännössä suora viiva koko kairareian syvyydeltä, ollen noin $350 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Kuva 32). Tämä viittaa siihen, että kairareikää ei leikkaa aktiivisia ruhjevyöhykkeitä tai suuria halkeamia, tai ainakaan sellaisia, joissa olisi korkea sähkönjohtavuus.

Suunnitellun avolouhoksen luoteisalueella, hieman pohjoiseen tulkitusta ruhjevyöhykkeestä sijaitsevat kairareivät RA-161 ja RA-114 (Kuva 1). Maantieteellisesti nämä reiät sijaitsevat lähellä toisiaan, mutta niiden välillä on selkeitä eroja EC-profiileissa: RA-114-reiässä vedellä on matalat EC arvot, alle $250 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Kuva 31), kun taas RA-161-reiän EC arvot kasvavat jyrkästi syvyydestä +15 m mpy, $240 \mu\text{S}/\text{cm}$:stä $1600 \mu\text{S}/\text{cm}$:iin ja sen yli (Kuva 33).

Kaksi tausta-arvoja edustaviksi valittua kairareikää, RA-170 ja RA-175, sijaitsevat koilliseen ruhjevyöhykkeestä, suunnitellun avolouhoksen ulkopuolella (Kuva 1). Sähkönjohtavuus on melko korkea molemmissa näissä kairareikäissä. RA-170-reiässä EC kasvaa vähitellen läpi koko syvyyden, viitaten, että reiässä on vertikaalista virtausta, joka sekoittaa sen vesiä (Kuva 34). EC saavuttaa melkein $2900 \mu\text{S}/\text{cm}$ reiän pohjalla. RA-175-reiässä EC kasvaa yhtäkkiä noin +70 m mpy syvyydellä arvoon $1300 \mu\text{S}/\text{cm}$, josta se vähitellen kasvaa $1950 \mu\text{S}/\text{cm}$ asti (Kuva 35).

3.2.2 Korrelaatio kairasydänloggauksen kanssa

Kaikki jyrkimmät kasvut kairareikien EC-profiileissa on esitetty Taulukko 1, yhdessä geoteknisestä tutkimuksesta saatujen RQD-arvojen kanssa. Useiden jyrkkien EC:n kasvujen ja matalien RQD-arvojen syvyyksien välillä on korrelaatiota. Toisaalta on myös kohtia, joissa RQD-arvo on yli 75, eikä näin ollen indikoi ruhjeista kalliota eikä mahdollisia hydraulisesti aktiivisia rakoja. On kuitenkin tärkeä ottaa huomioon, että hydraulisesti aktiivisia rakoja voi myös esiintyä ehjemmässä kalliassa. Tällainen monitulkintaisuus on ominaista ruhjeiselle kallioperälle.

29.10.2020

Taulukko 1. Lista jyrkkien EC kasvujen syvyyksistä ja niitä vastaavat RQD arvot. Kaikki syvyydet on annettu metreinä pitkin kairareikää. Tausta-arvoja edustavat kairareivät on merkattu sinisellä fontilla.

Kairareikä	EC kasvun syvyys	RQD arvon "mistä"	RQD arvon "mihin"	RQD arvo
RA-9	57	55.1	61.9	31
	82	79.9	84.3	31
RA-10	15	12.25	15.7	4
	78	77.65	78.25	38
RA-15	60	58.3	60.05	78
	134	129.75	137.1	76
	143	142.55	144.2	78
	187	186.5	187.2	93
RA-40	16.2	16.2	17	0
	41	39.9	41.55	30
	110	109.1	110.5	0
RA-41	11.8	11.8	13.1	45
	109	94.05	121.5	77
RA-61	10.5	10.2	10.9	14
RA-77	9	8.5	13.3	3
RA-84	21.3	21.15	23.6	4
	121.5	121.15	122.85	5
RA-114	27	24.55	33.6	14
	62	54	63.5	36
RA-140	210	205.25	214.7	94
RA-161	106	104.6	108.05	99
	132	130.9	133.1	28
RA-170	11	7.1	11.55	18
	34	22.35	42.65	86
	99	92.4	107.5	93
	130	128.8	130.9	95
RA-175	25.5	23.5	26.85	39
RA-204	n/a			
RA-205	n/a			

3.3 Slug-testit

Slug-testien tulokset, eli hydrauliset johtavuudet, on tiivistetty Taulukko 2. Kaikki slug-testien tulokset ja tulkinnat, Daganin menetelmää käyttäen, on annettu Liite C. Yleisesti, taustareikien ja lähellä ruhjevyöhykettä olevien kairareikien K-arvojen välillä ei ole suuria eroja. On hyvä huomioda, että slug-testit tehtiin avoimissa kairareissä, eli ei pakkereilla eristettynä. Tällöin tuloksia ei voi kiinnittää tiettyihin syvyyksiin, vaan ne ovat kaikkien kairareikää leikkaavien hydraulisesti aktiivisten ruhjeiden ja halkeamien

29.10.2020

yhteinen tulos. Avoimen kairareiän slug-testi indikoi siis kaikkien reikää leikkaavien ruhjeiden keskimääräistä hydraulista johtavuutta.

Taulukko 2. Tiivistelmä slug-testeillä saaduista hydraulista johtavuuksista. Summary of the hydraulic conductivity values obtained from the slug-tests. Tausta-arvoja edustavat kairareiät on merkattu sinisellä fontilla Kairareikä ID sarakkeessa. K-arvojen väriteema esittää matalimmat arvot punaisella, mediaaniarvot valkoisella ja korkeimmat arvot tumman vihreällä taustaväriillä.

Laskettu käyttäen Daganin menetelmää			
Kairareikä	Testi-1	Testi-2	Testi-3
ID	K (m/s)	K (m/s)	K (m/s)
RA-9	2.68E-07		
RA-10	9.80E-08		
RA-15	1.95E-07		
RA-40	2.32E-07		
RA-41	6.13E-07		
RA-61	1.18E-07		
RA-77	2.02E-07		
RA-84	1.31E-07		
RA-114	4.60E-07	1.57E-07	
RA-140	1.42E-06	1.29E-06	1.23E-06
RA-161	1.46E-07		
RA-170	1.54E-07		
RA-175	1.88E-07		
RA-204	3.89E-07	4.24E-07	
RA-205	7.84E-07	7.33E-07	

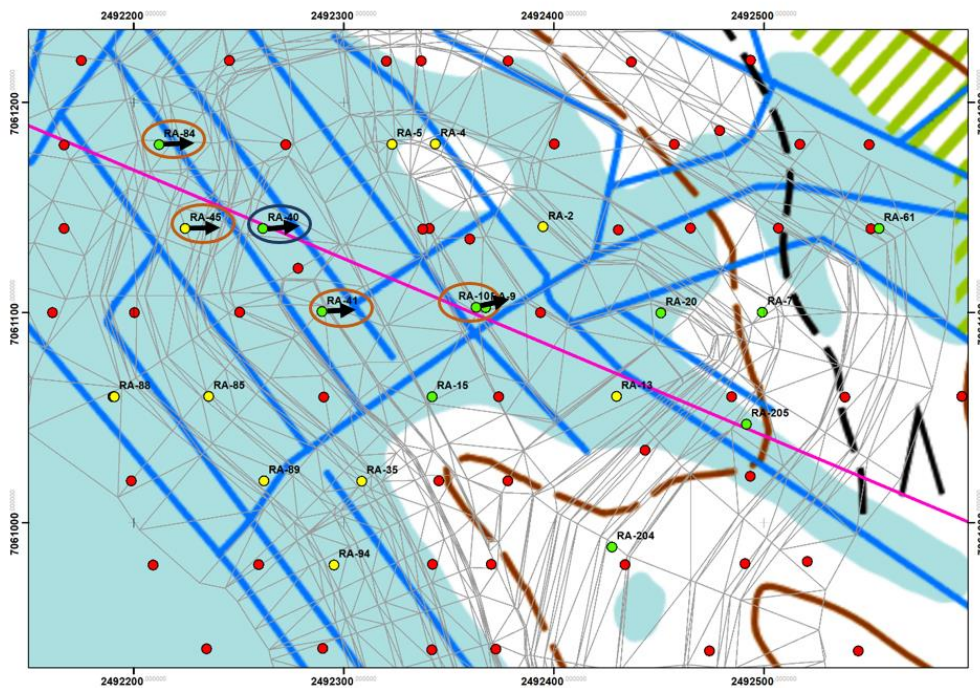
Liite C esitetyt graafiset tulokset slug-testeistä antavat kairareikien reaktioajan (sekunneissa, x-akseli) yhdelle metrille veden vertikaalista siirtymää (y-akseli). Tyypillinen reaktioaika alueella oli suurin piirtein 1000 s, mikä on tyypillistä ruhjeisessa kalliperässä, ja hydraulista johtavuudesta saatu keskiarvo $4.62E-07$ m/s, on myös tyypillistä ruhjeiselle kallioperälle¹.

3.4 Pumppauskokeet

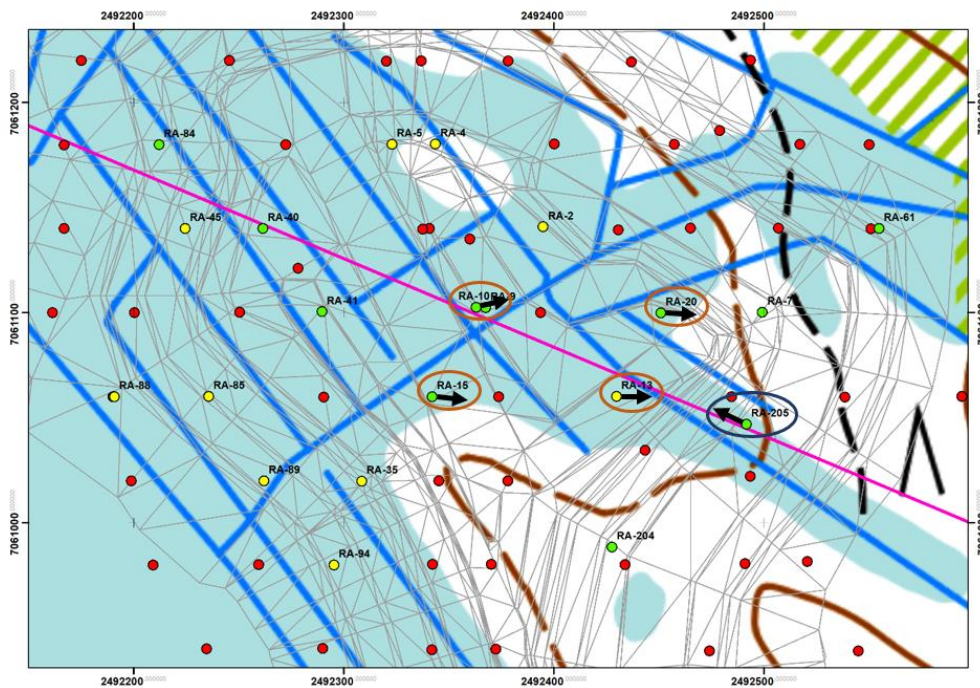
Kaikki tulokset pumppauskokeista, mukaan lukien vedenpinta- ja sähköjohtavuushavainnot pumppaus- ja monitorointikaivoista, sekä kartat pumppaus- ja monitorointikaivojen sijainnista on esitetty Liite D. Kuva 6 ja Kuva 7 näyttävät pumppaus- ja monitorointikaivot RA-40 ja RA-205-reikien pumppauskokeille.

¹ Karro, E. and Lahermo, P. 1999. Occurrence and chemical characteristics of groundwater in Precambrian bedrock in Finland. Geologian tutkimuskeskus, Special Paper 27, 85-96.

29.10.2020



Kuva 6. Pumppauskaivo RA-40 ja monitorointikaivot RA-84, RA-45, RA-41 ja RA-10.

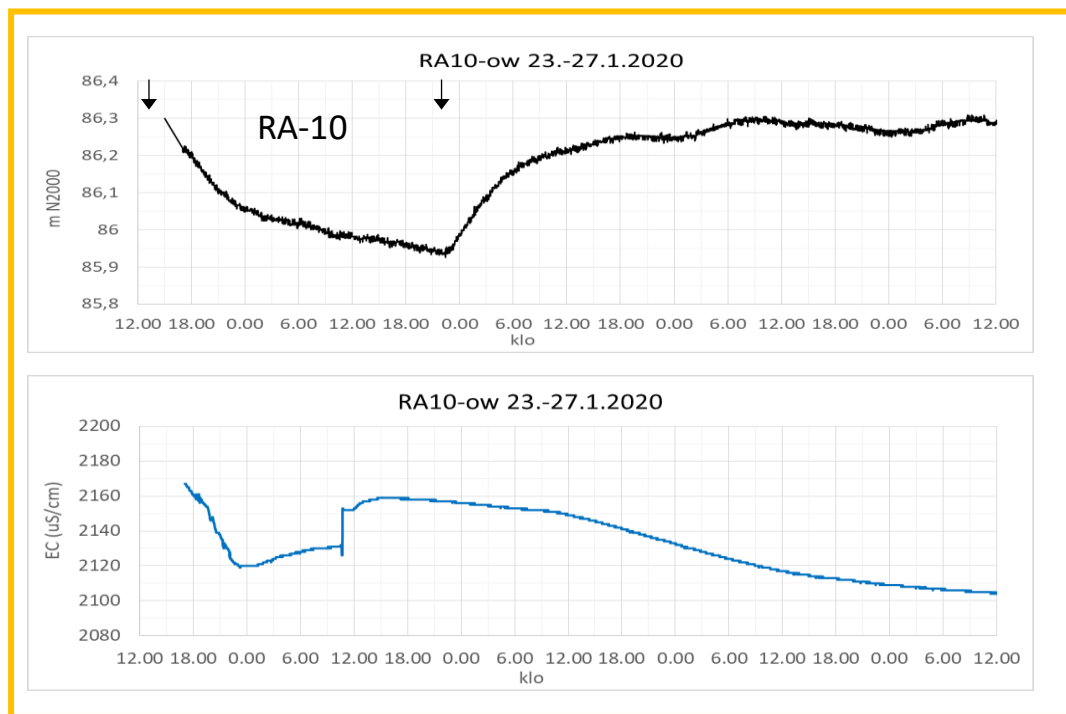


Kuva 7. Pumppauskaivo RA-205 ja monitorointikaivot RA-10, RA-15, RA-13 ja RA-20.

Kuva 8 on esimerkkinä pumppauskokeiden tuloksia monitorointikaivosta RA-10, kun pumppaus tapahtui reiässä RA-40. Pumppauksen aikana tapahtui 12 m vedenpinnan

29.10.2020

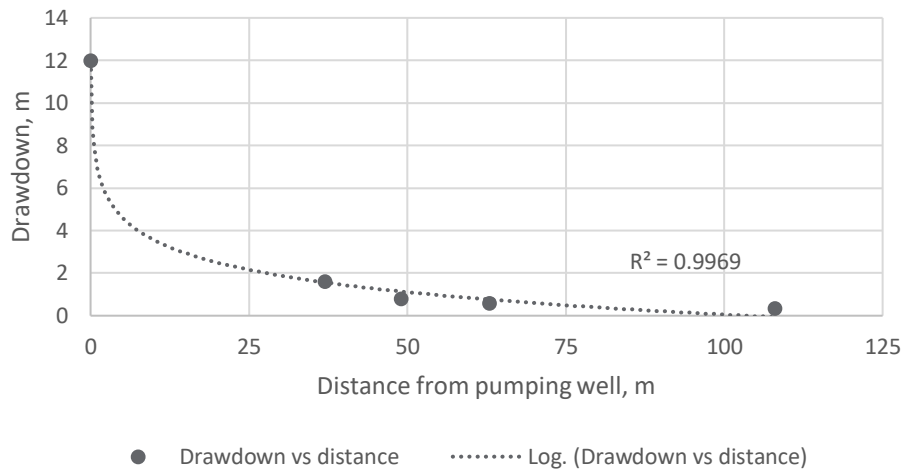
alenema ja kaikissa monitorointikaivoissa (RA-10, RA-41, RA-45 ja RA-84, Kuva 59-Kuva 63). havaittiin selkeä hydraulinen reaktio. Pumpppausta reiässä RA-40 jatkettiin noin 30 h, ja tämän ajan aikana suurin havaittu alenema reiässä RA-10 oli noin 0.35 m, reiässä RA-41 noin 0.80 m, reiässä RA-45 noin 1.60 m, ja reiässä RA-84 noin 0.60 m. Kuva 9 esittää logaritmisen sovituksen alenema-arvoihin verrattuna etäisyyteen pumpppauskaivosta RA-40. Kuvaaja näyttää, että reiässä RA-40 tapahtunut pumpppaus sai aikaan voimakkaimman aleneman pumpppauskaivon välittömässä läheisyydessä ja että etäisyyden kasvaessa alenema pienenee nopeasti. Alenemahavaintojen lisäksi havaittiin myös muutoksia sähkönjohtavuudessa, vaikka vedenpinnan korkeudessa ei olisi tapahtunut merkittäviä muutoksia. Tämä johtuu todennäköisesti hydraulisen paineen muutoksen aikaansaamasta eriaikaisesta aktivaatiosta eri vettä tuottavissa raoissa.



Kuva 8. Esimerkki pumpppauskokeen tuloksista monitorointikaivossa RA-10, kun pumpppaus tapahtui kaivossa RA-40. Vedenpinnan korkeuden mittaukset on esitetty ylemmässä kuvaajassa ja sähkönjohtavuus alemmassa kuvaajassa. Pumpppauksen aloitus ja lopetus RA-40-reiässä on esitetty mustilla nuolilla vedenpinnan korkeuden kuvaajassa.

29.10.2020

Drawdown vs distance



Kuva 9. Alenema pumppauskaivossa RA-40 ja monitorointikaivoissa on esitetty suhteessa etäisyyteen pumppauskaivosta.

Kun pumpattiin reiässä RA-205, hydraulinen reaktio monitorointikaivoissa (RA-10, RA-13, RA-15 ja RA-20, Kuva 65-Kuva 69) oli huomattavasti hitaampi ja heikompi kuin RA-40 pumppauskokeessa, ja monitorointikaivossa RA-20 ei ollut ollenkaan hydraulista reaktiota. RA-20 kuitenkin sijaitsee kauempana tulkitusta ruhjevyyöhykkeestä ja on myös suuntautunut pois päin siitä (Kuva 64). Pumppaus RA-205:ssä synnytti 2.80 m aleneman. Pumppausta jatkettiin noin 44 h. Tänä aikana suurin havaittu alenema monitorointikaivoissa oli noin 0.24 m RA-10-reiässä, noin 0.23 m reiässä RA-13, ja noin 0.30 m reiässä RA-15. Alenemat näissä kairareijissä (Liite D, Kuva 66-Kuva 68) eivät kuitenkaan saavuttaneet tasapainotilaa tämän pumppauskokeen aikana, joten niitä ei voitu analysoida sen enempää.

3.5 Vesikemia

Taulukko 3 on yhteenveto otetuista näytteistä. Se esittää muun muassa näytteenotto syvyyden ja kentällä mitatun sähkönjohtavuuden. Näytteiden keruussa oli tarkoitus saada näyte sähkönjohtavuuden jyrkän kasvun alapuolelta. Näytteenotossa priorisoitiin kairareikiä, joissa oli ylipäättään korkeampi sähkönjohtavuus, koska tarkoituksena oli pääasiassa määrittää suolaisemman veden kemiallinen koostumus. Suolainen vesi voi vaatia lisäkäsittelyä tai erilaisia vesienhallintaratkaisuja kuin louhokseen virtaava makeampi vesi.

29.10.2020

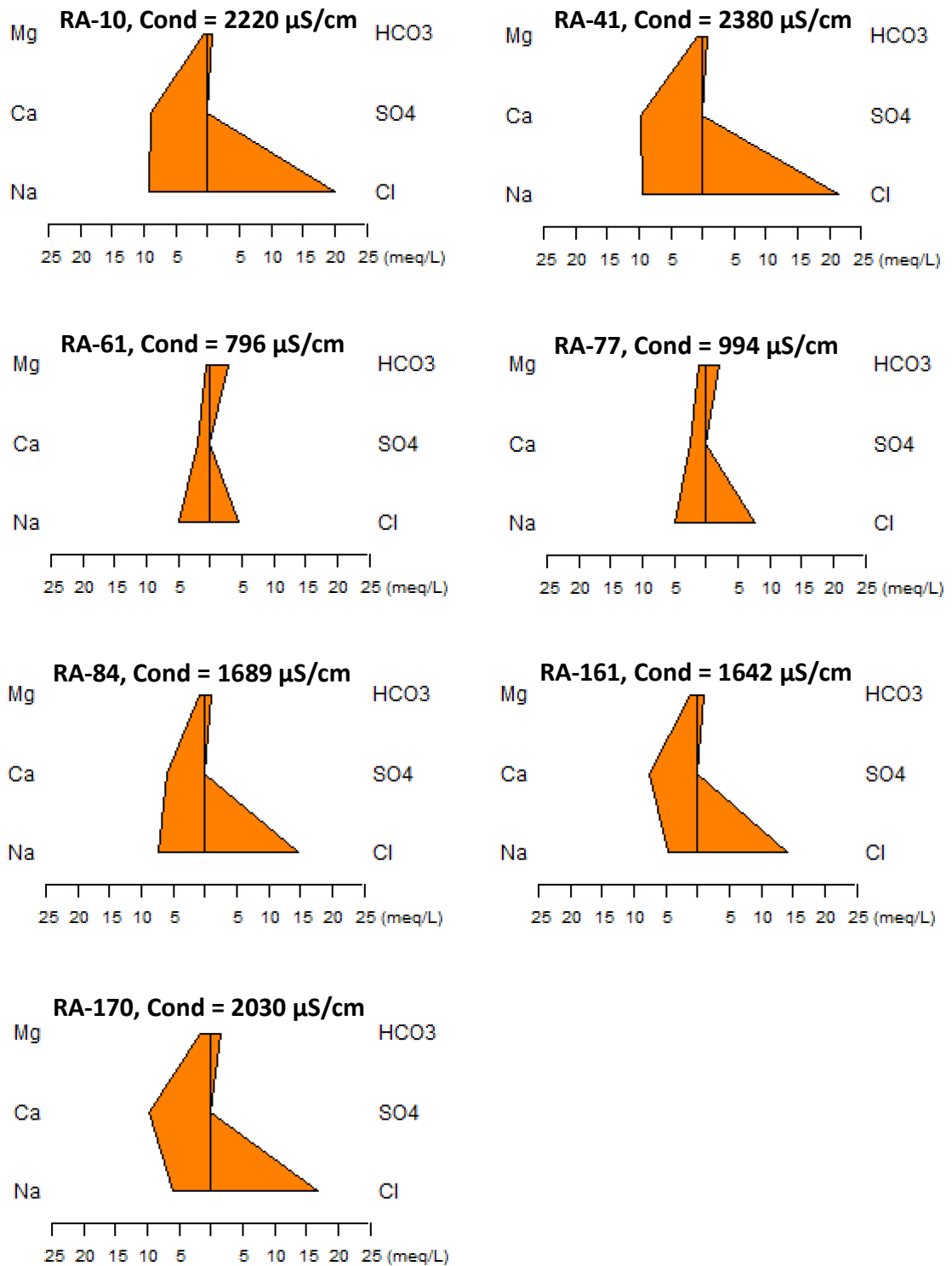
Taulukko 3. Yhteenveto otetuista näytteistä, sisältäen päivämäärän, näytesyvyydet ja joitain fysikaalisia parametreja.

Kairareikä ID	RA-10	RA-41	RA-61	RA-77	RA-84	RA-161	RA-170
Päivämäärä	28.4.2020	30.4.2020	27.4.2020	28.4.2020	30.4.2020	29.4.2020	29.4.2020
Näytesyvyys, m	50-92	100-142	20-62	40-82	100-142	98-140	80-122
T (°C)	4.3	8.2	5.2	4.8	9.8	6.3	5.9
pH	8.2	8	7.8	8.2	8.2	7.95	8.05
EC (µS/cm)	2220	2380	796	994	1689	1642	2030
O ₂ (mg/l)	4.5	4.4	6.9	3.5	5.3	4	5.4

Kuva 10 esittää pääalkuaineiden ionipitoisuudet Stiffin diagrammeissa milliekvivalentteina per litra ($\text{meq/L} = \frac{\text{mg/L}}{\text{ekvivalentti paino}}$) tutkituille kairareille.

Pääalkuaineiden jakauma on hyvin samanlainen rei'issä RA-10, RA-41, RA-84, RA-161, ja RA-170, joissa kloridin, Cl, ionipitoisuus on korkea ja kalsium, Ca, sekä natrium, Na, vuorottelevat pääkationeina. Tosin rei'issä RA-61 ja RA-77 näiden kolmen alkuaineen ionipitoisuudet ovat selvästi matalammat ja bikarbonaatin, HCO₃⁻, pitoisuus korkeampi. Tällainen jakautuminen kahteen ryhmään on havaittavissa myös näytteiden sähkönjohtavuuksien suhteen, jotka on annettu jokaisen kuvaajan yllä Kuva 10. Rei'issä RA-61 ja RA-77 sähkönjohtavuus on suurin piirtein puolet pienempi kuin muissa tutkituissa kairareissä.

29.10.2020

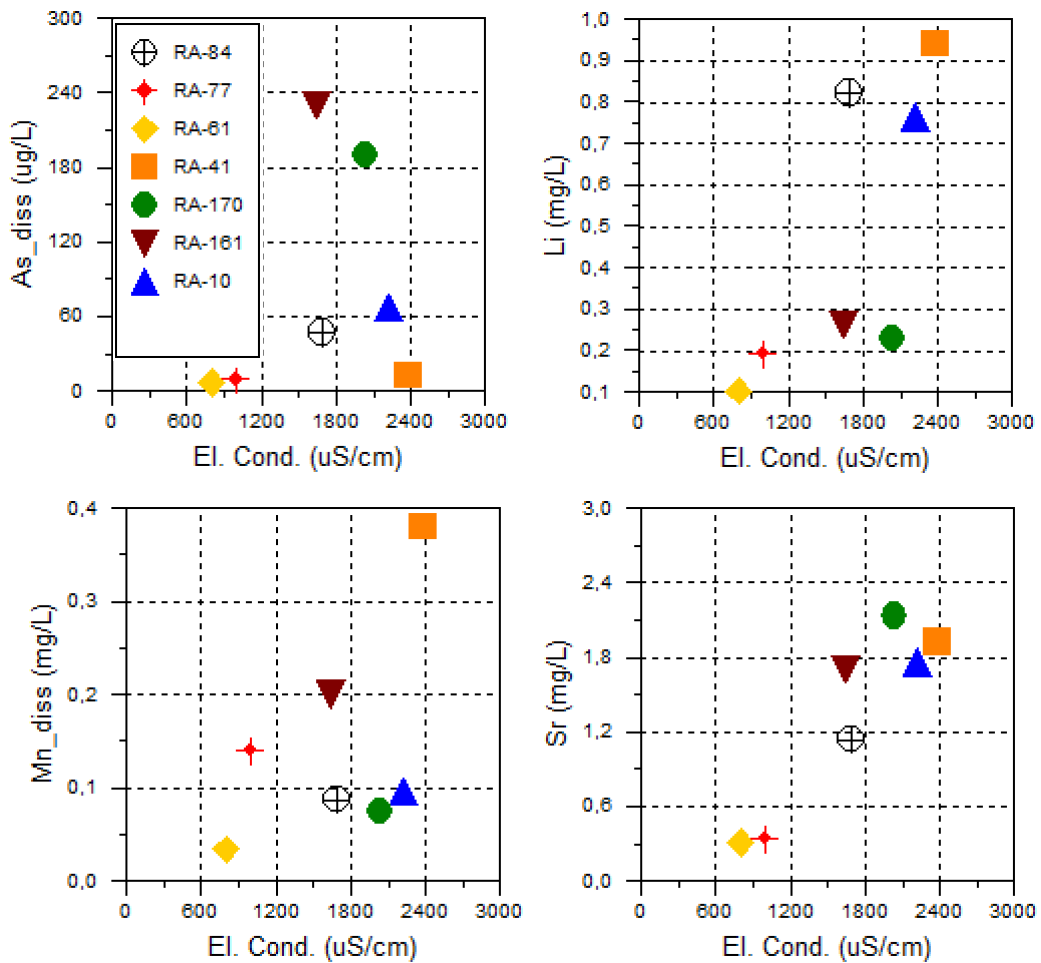


Kuva 10. Stiffin diagrammit pääalkuaineista tutkituissa kairareijissä.

Kuva 11 on esitetty arseenin, litiumin, mangaanin ja strontiumin pitoisuudet suhteessa näytteiden sähkönjohtavuuksiin. Varsinkin litiumilla ja strontiumilla on voimakas

29.10.2020

positiivinen korrelaatio sähkönjohtavuuden kanssa, mutta arseenilla ja mangaanilla on myös heikko korrelaation.



Kuva 11. Liuenneiden As, Li, Mn ja Sr pitoisuuksien suhde näytteiden sähkönjohtavuuteen.

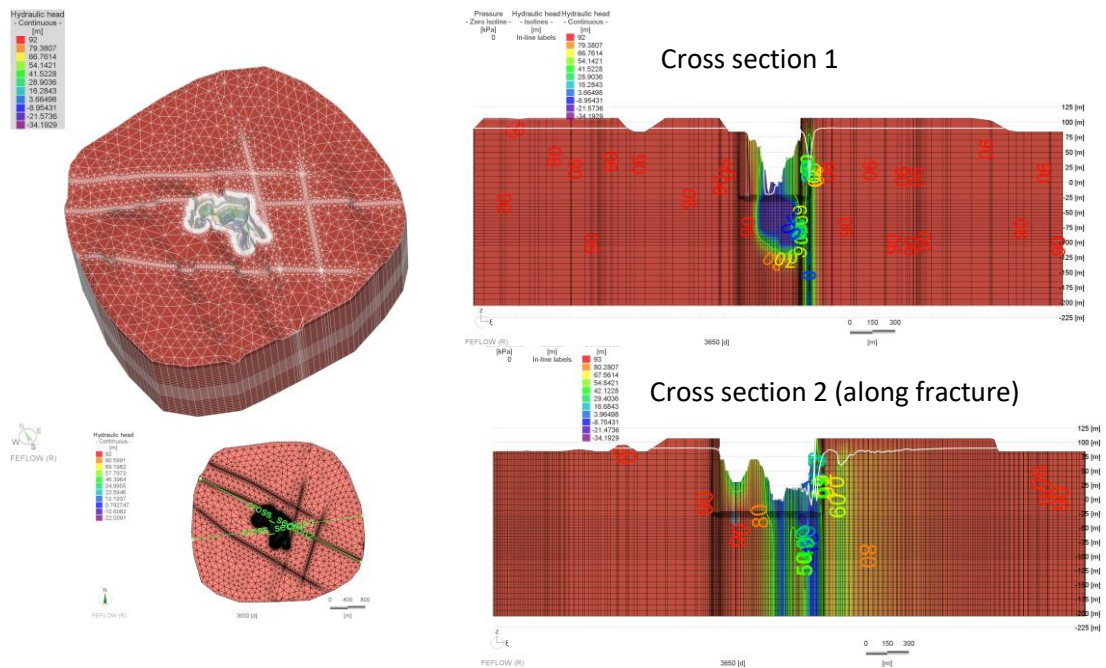
3.6 Numeerinen malli

Ruhjeiden käyttäytymistä ja merkitystä veden virtaukseen louhokseen tutkittiin mallinnusskenaarioiden avulla. Esimerkiksi yhdessä skenaariossa huomioitiin kaikki mallinnusalueella sijaitsevat ruhjeet ja toisessa skenaariossa vain avolouhoksen leikkaava ruhje huomioitiin. Näiden kahden skenaarion tulosten vertailu osoitti, että avolouhosta leikkaamattomat ruhjeet vaikuttavat vain vähän louhokseen tapahtuvaan veden virtaukseen.

Kuva 12 esittää hydraulisen paineen jakautumisen transienttisimulaatiosta, jossa mallinnusalueen reunoille määritettiin "no flow" -reunaehto ja malli otti huomioon vain koillinen-lounas suuntaisen louhosta leikkaavan raon. Tässä mallissa käytettiin $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ arvoa veden luovutuskyvylle (specific storage). Kuva 13 on 2D näkymä ylhäältäpäin hydraulisen paineen jakautumisesta avolouhoksessa ja sen ympärillä. Tämä kuva havainnollistaa alenemakartion laajuutta 10 vuoden jälkeen. Alenemakartion laajuus on

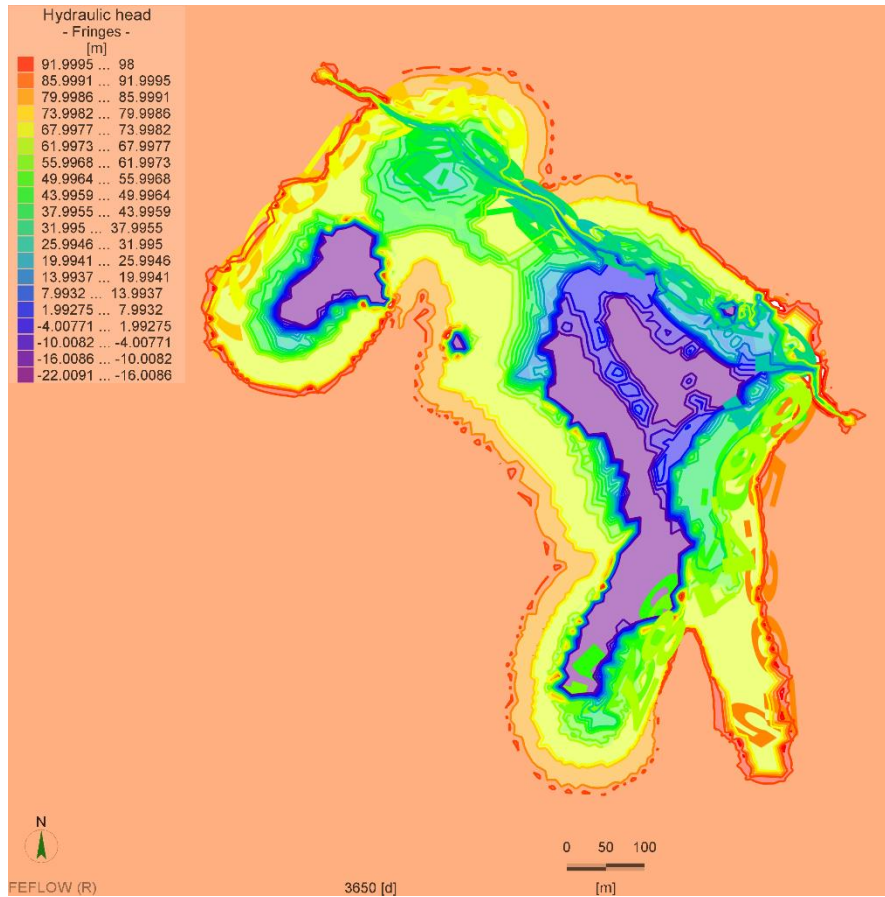
29.10.2020

hyvin paikallista ja pääasiassa avolouhoksen läheisyydessä, kun taas koillinen-lounas suuntaisessa ruhjevyyhykkeessä vaikutus ulottuu noin 100 m päähän avolouhoksesta.



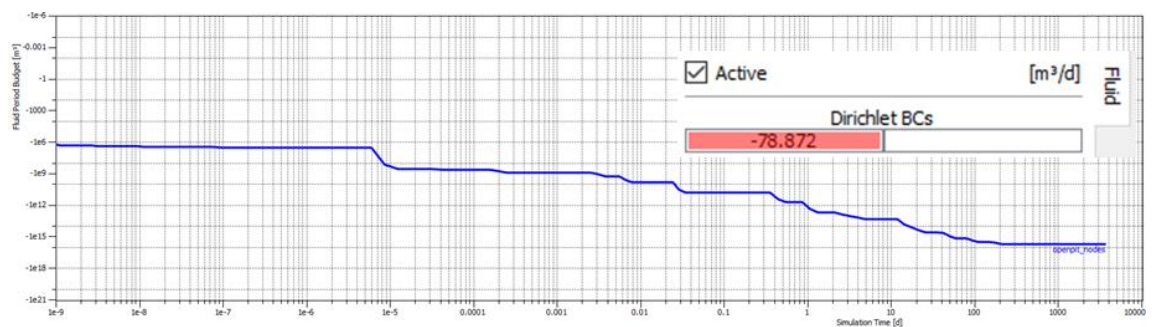
Kuva 12. Hydraulisen paineen jakautuminen transienttimallinnus skenaariossa (TR3) 10 vuoden kuluttua.

29.10.2020



Kuva 13. Hydraulinen paine avolouhoksen ympärillä, havainnollistaen alenemakarttion laajuutta 10 vuoden jälkeen.

Kuva 14 esittää pohjaveden virtaaman louhokseen ajan funktiona, 0 päivästä 10 vuoteen. Alussa, eli <1 päivä, virtausnopeus louhokseen on korkea tässä mallissa, mikä johtuu siitä, että numeerinen malli ottaa huomioon ainoastaan louhoksen lopullisen vaiheen, eikä louhoksen kaivuuvaiheita. Loppuajan veden virtaus louhokseen, eli >1 vuosi, on suurin piirtein 80 m³/d.

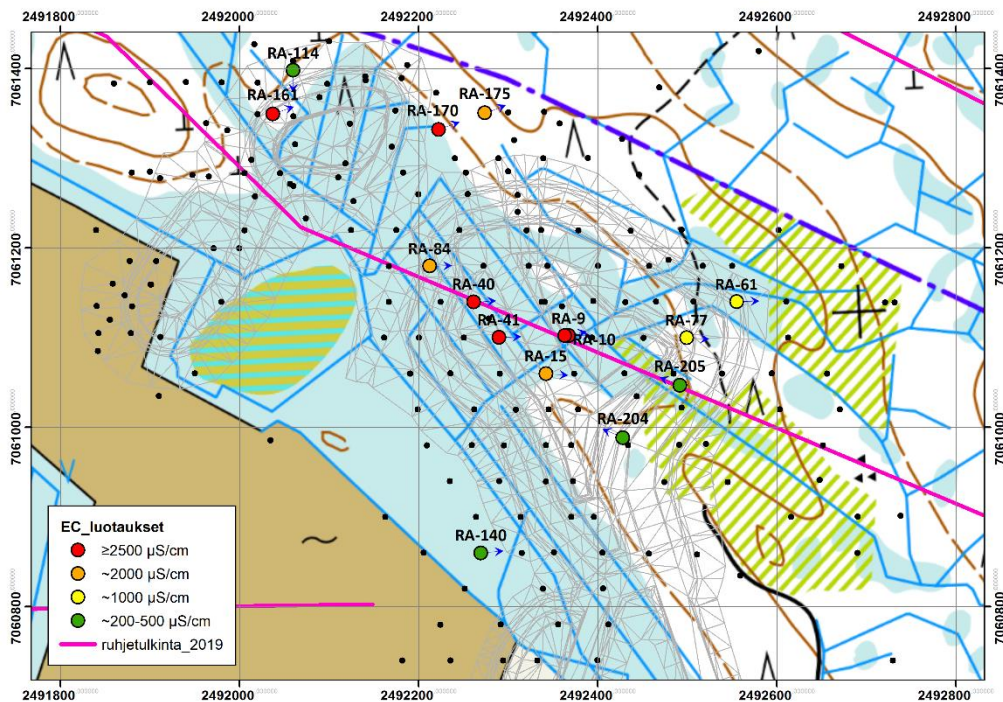


Kuva 14. Virtaama louhokseen ajan funktiona. X-akselilla on aika päivissä 10 vuoteen saakka. Y-akselilla on vesitase (m³).

29.10.2020

4 KESKUSTELU

Geofysikaalisilla VLF-R mittauksilla onnistuttiin havainnoimaan todennäköisimmät ruhjevyöhykkeiden kulut tutkimusalueella. Tätä tietoa käytettiin valitsemaan yli 200 olemassa olevasta kairareistä 15 reikää, joista mitattiin sähkönjohtavuus- (EC) ja lämpötila- (T) profiilit sekä tehtiin slug-testit. Kuten EC-profiilit osoittavat, alueelta ei löytynyt läheisen Syväjärven alueeseen ($EC_{max} = 7690 \mu S/cm$) verrattavia korkean sähkönjohtavuuden vesiä. Korkeimmat löydetyt sähkönjohtavuudet olivat noin puolet Syväjärvellä havaituista arvoista, suurin piirtein $3000 \mu S/cm$. Kuva 15 on esitettyä korkeimpien sähkönjohtavuuksien jakautuminen Rapasaaren alueella, jaettuna neljään kategoriaan. Korkeimmat sähkönjohtavuudet ovat ryhmittyneet lähelle tulkittua ruhjevyöhykettä, poikkeuksena RA-170. Toisaalta reikien RA-161 ja RA-114 korkeimpien sähkönjohtavuuksien välillä on suuri ero, vaikka ne sijaitsevat lähellä toisiaan. Tämä korostaa heterogeenisyyttä, joka johtuu todennäköisesti hydrogeologisista piirteistä (kuten pohjaveden ikä ja vaihtuvuus). Nykyisien tulosten perusteella on epävarmaa kiittääkö korkean sähkönjohtavuuden vesi raoissa, vai esiintyykö se eristäytyneinä taskuina kallioperässä. Korkean sähkönjohtavuuden vedet vaikuttavat kuitenkin olevan paikallisia tai esiintymiseltään rajattuja, mutta tätä tulkintaa ei voida vahvistaa nykyisellä datalla.



Kuva 15. Kairareißissä havaittujen sähkönjohtavuuksien maksimiarvojen jaottelu. Kairareikien suunta on esitetty sinisillä nuolilla.

Pääalkuainekoostumusten perusteella (Kuva 10), RA-61 ja RA-77 eivät ole hydraulisesti yhteydessä toisiinsa lähellä oleviin ja tulkittuun ruhjevyöhykkeen lähellä oleviin kairareikiin. Tämä tukee edellisiä viitteitä siitä, että hydrauliset yhteydet ovat pääasiassa koillis-

29.10.2020

lounas-suuntaisia ruhjevyöhykettä pitkin, eikä kohtisuoraan siihen, kuten havaittiin reiän RA-205 pumppauskokeessa veden pinnan muutoksista reiässä RA-20 (Liite D, Kuva 69), ruhjevyöhyke on, ainakin paikallisesti, melko kapea.

Numeerinen malli rakennettiin saatavilla olevan aineiston perusteella, joihin lukeutui avolouhos, tunnelit ja maanalainen louhos, sekä VLF-R tutkimuksesta tulkitut ruhjevyöhykkeet, joita käsiteltiin mallissa vertikaalisina rakenteina. Numeerisen mallinnuksen tuloksista näkyy, että alenemakartio ei näytä kohtuullisessa ajassa (10 vuotta) yltävän kovin kauas avolouhoksesta, ja että suurin osa merkittävästä vedenpinnankorkeuden muutoksesta tapahtuu avolouhosta leikkaavassa koillis-lounas suuntaisessa ruhjevyöhykkeessä. Tämä viittaa, että numeerisen mallin perusteella alenemakartio louhoksen ympärillä ei vaikuttaisi läheiseen Natura 2000 suojeltuun suohon, kuten Pasanen et al. 2017² oli aiemmin päätellyt.

Sekä alenemakartion laajuus, että arvioitu louhokseen virtaavan veden määrä riippuvat numeerisessa mallissa käytetyistä hydraulisen johtavuuden arvoista. On huomioitava, että ehjälle kalliolle käytetty hydraulisen johtavuuden arvo oli melko matala, minkä takia arvioitua virtaamaa on todennäköisesti hieman aliarvioitu. Tämä tarkoittaa sitä, että pientä ja paikallista rakoilua kalliassa ei ole huomioitu numeerisessa mallissa. Kunnan edustava arvio kallion hydraulisesta johtavuudesta, sisältäen pienimmätkin raot, vaatisi lisää slug- ja pumppauskokeita ja/tai merkkiainekokeita. Pienimpien rakojen hydraulisesta luonteesta johtuen tämä olisi todennäköisesti hyvin aikaa vievää ja hidasta.

Ruhjevyöhykkeiden hydraulinen johtavuus arvioitiin alueella tehtyjen slug- ja pumppauskokeiden perusteella. Slug-testianalyysi antaa arvon hydrauliselle johtavuudelle (K), kun taas pumppauskokeesta saadaan transmissiviteetti (T, $T=Km$, jossa m on akviferin paksuus). Jotta transmissiviteetit saadaan muunnettua hydraulisiksi johtavuuksiksi, pitää arvioida akviferin paksuus. Tämä on vaikeaa ruhjeisessa kalliopesässä käyttäen avoimia kairareikiä, ja tästä aiheutuu epävarmuutta. Kun ruhjepaksuudeksi arvioidaan 140 m (approksimaatio kairareikien keskimääräisestä vertikaalisesta syvyydestä), pumppauskokeista saadut hydrauliset johtavuudet vaihtelivat välillä $1.00E-07$ m/s - $1.00E-08$ m/s, mediaanina noin $5.00E-07$ m/s. Numeerisessa mallissa avolouhoksen läpikulkevalle ruhjeelle käytetty hydraulinen johtavuus, $5.00E-07$ m/s, oli siis slug-testien keskiarvo ja pumppauskokeiden mediaani. Koska pumppauskokeista saaduilla arvoilla oli suuri vaihteluväli, on mahdollista, että ruhjevyöhykkeessä on yksittäisiä rakoja, joilla on korkeampi hydraulinen johtavuus. Jos tällaiseen ruhjevyöhykkeeseen osutaan avolouhoksen kaivuvaiheessa, veden virtaus louhokseen voi olla suurempaa kuin numeerisessa mallissa ennustettiin

² Pasanen, A., Lerssi, J., Pullinen, A. 2017. Discharge and Flow of Bedrock Groundwater from Vionneva Natura 2000 Area to Rapasaari Quarry. Geologian tutkimuskeskus GTK/585/00.03.12/2016.

29.10.2020

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämä tutkimus koostui peräkkäisistä kenttätöistä ja kenttäkokeista, jotka täydensivät toisiaan, ja lopulta louhokseen virtaavan veden taseen ja alenemakartion säteen ennustamiseksi tehdystä numeerisesta mallista. Myös vesinäytteitä kerättiin kairareijistä pohjaveden laadun määrittämiseksi.

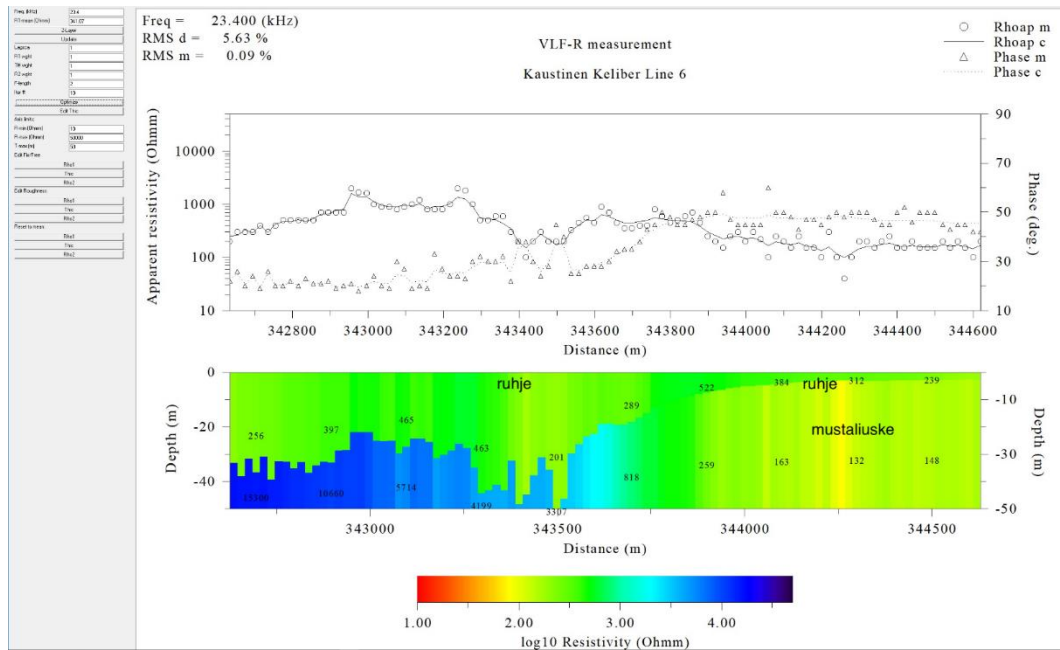
Arvioimme, että alenemakartio ei yllä kauas avolouhoksesta, ja että merkittävin vedenpinnan alenema tapahtuu koillis-lounas-suuntaisessa ruhjevyyhykkeessä, jonka paikannusta parannettiin tämän tutkimuksen VLF-R mittauksilla. Tulokset myös näyttävät, ettei alenemakartio yllä läheisellä Natura 2000 suojellulle suolle. Veden virtaus louhokseen on arviolta 80 m³/d 10 vuoden jälkeen.

Alueella 15 kairareijästä havaitut sähkönjohtavuusarvot olivat korkeimmillaan 3000 µS/cm, mikä on noin puolet Syväjärvellä havaituista suurimmista sähkönjohtavuusarvoista. Korkean sähkönjohtavuuden vesissä Cl on pääioni ja Ca sekä Na vuorottelevat pääkationeina. Korkeiden sähkönjohtavuuksien kanssa esiintyy myös korkeammat As ja Li pitoisuudet.

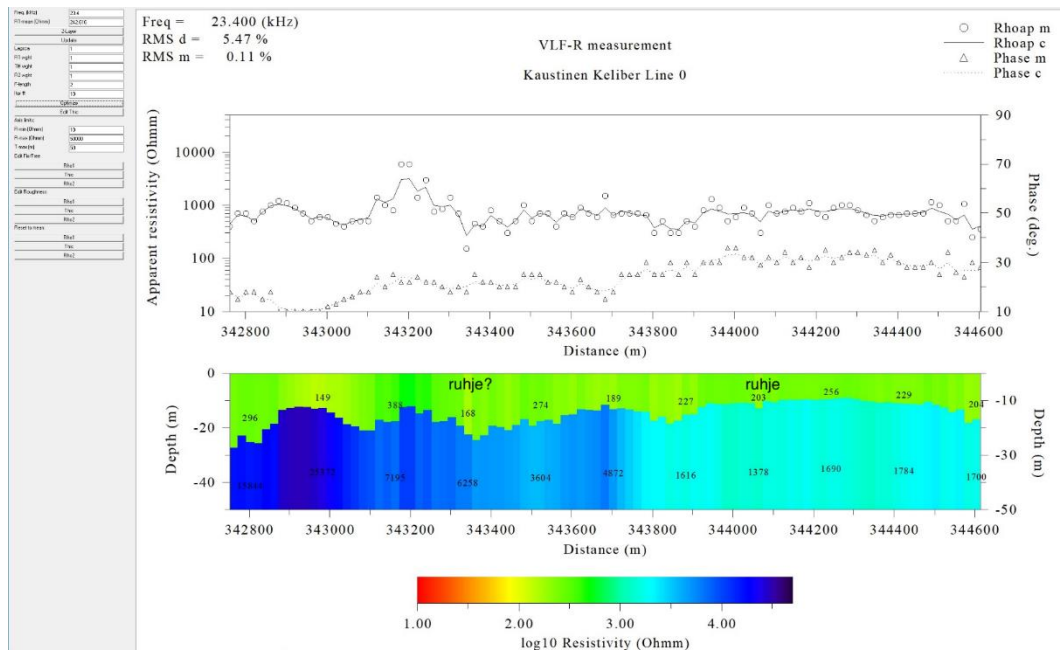
Korkean sähkönjohtavuuden pohjaveden esiintymistä, pääasiassa esiintyykö se eristyneinä taskuina vai virtaako se raoissa, ei pystytty määrittämään tässä tutkimuksessa. Lisäkysymys on korkean sähkönjohtavuuden pohjaveden mahdollinen sekoittuminen ja laimeneminen muiden vesityyppien kanssa ja sen vaikutus veden purkautumiseen tai kierrätykseen.

29.10.2020

LIITE A VLF-R PROFILIEN 2-KERROS INVERSIOTULOKSET JA TULKINNAT

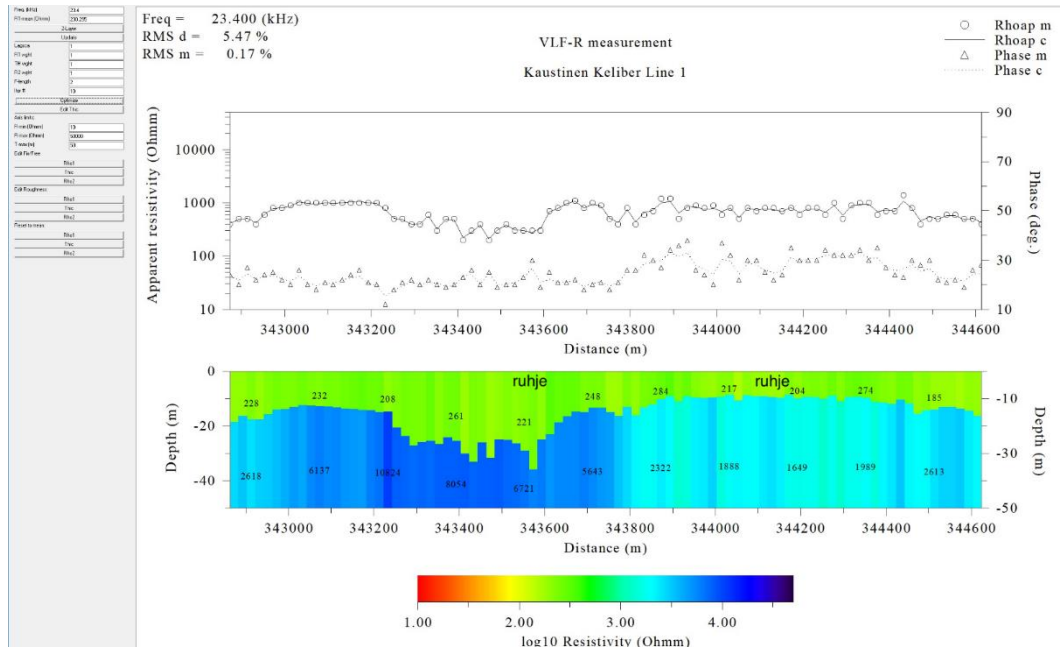


Kuva 16. VLF-R Linja 6 tulkinta, pohjoisin profiili Kuva 3 ja Kuva 4.

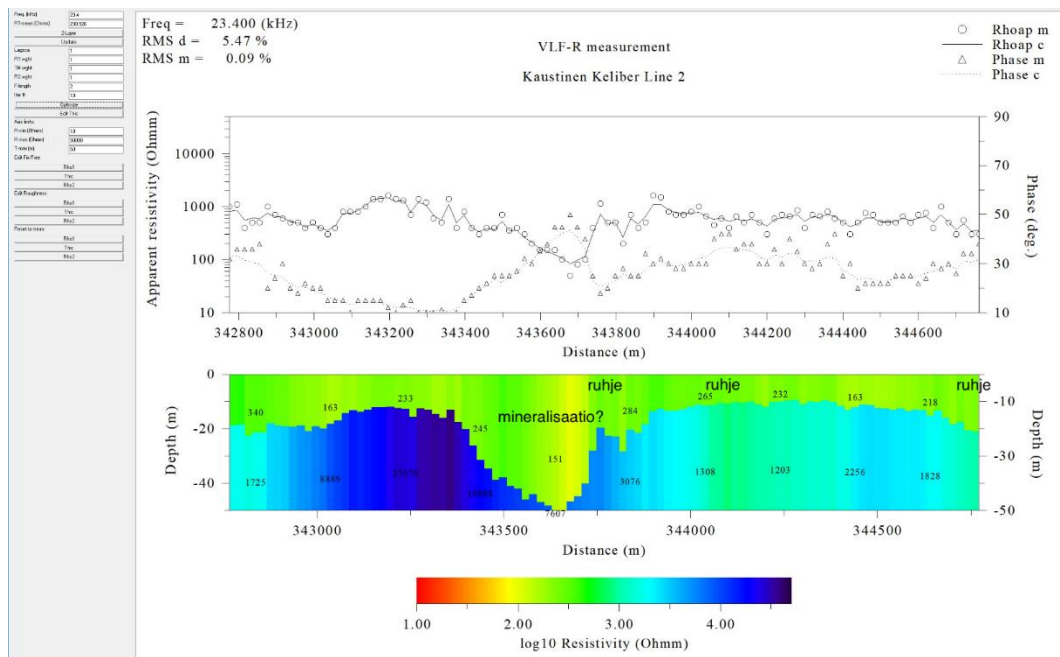


Kuva 17. Tulkinta linjasta 0.

29.10.2020

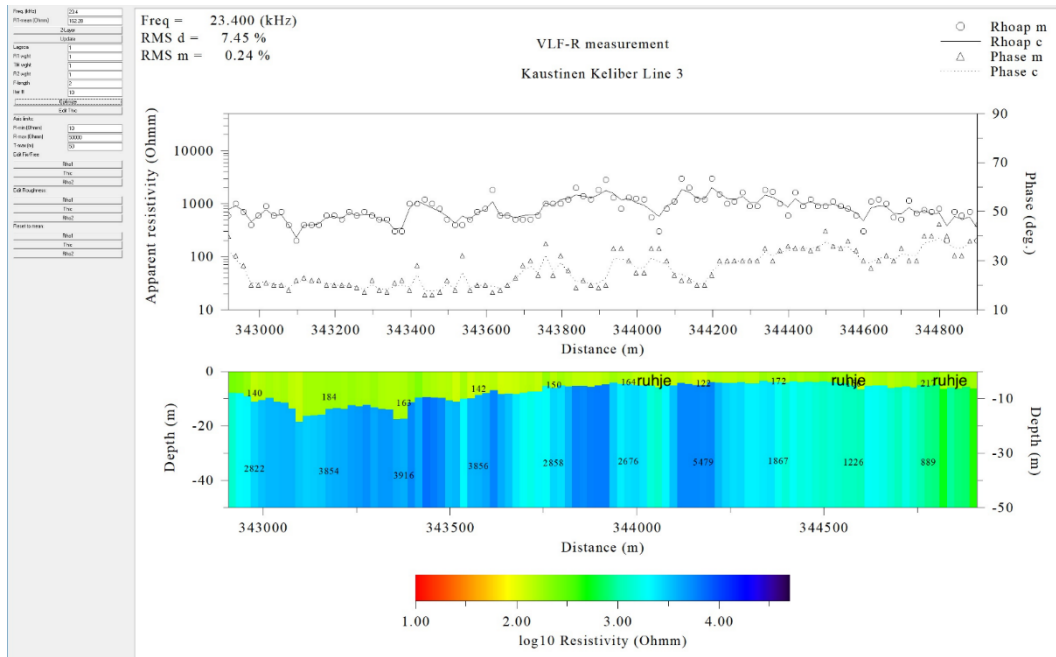


Kuva 18. Tulkinta linjasta 1.

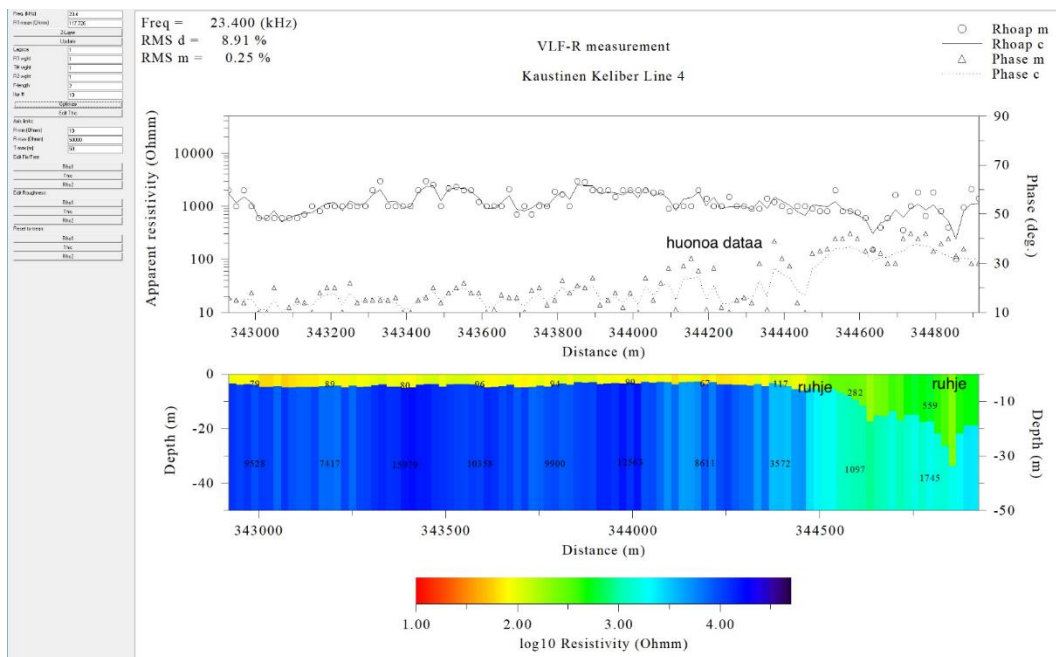


Kuva 19. Tulkinta linjasta 2.

29.10.2020

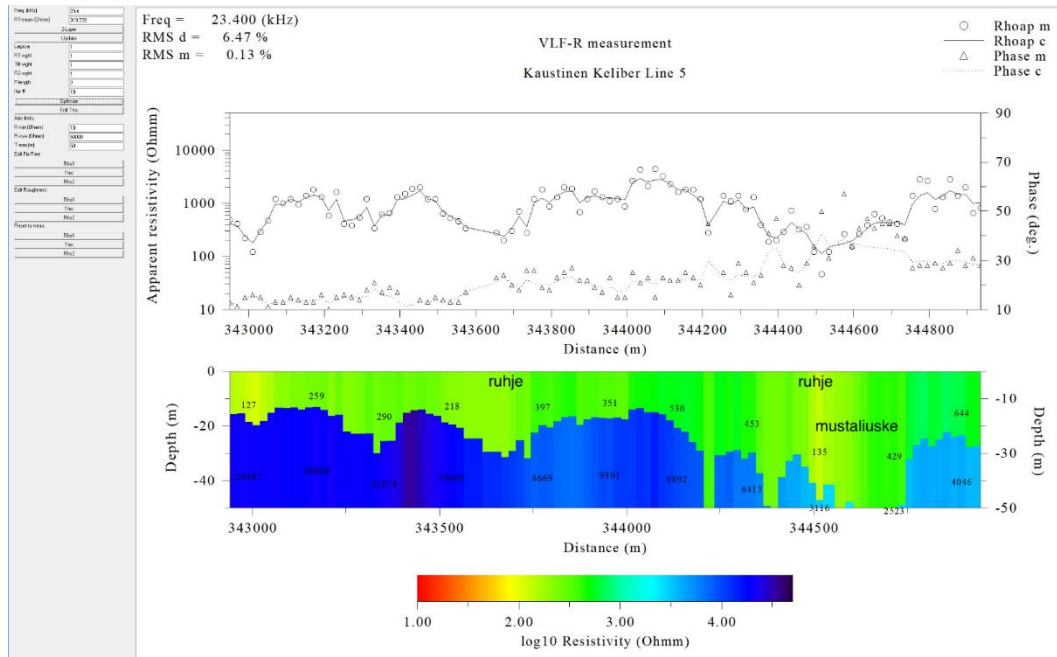


Kuva 20. Tulkinta linjasta 3.



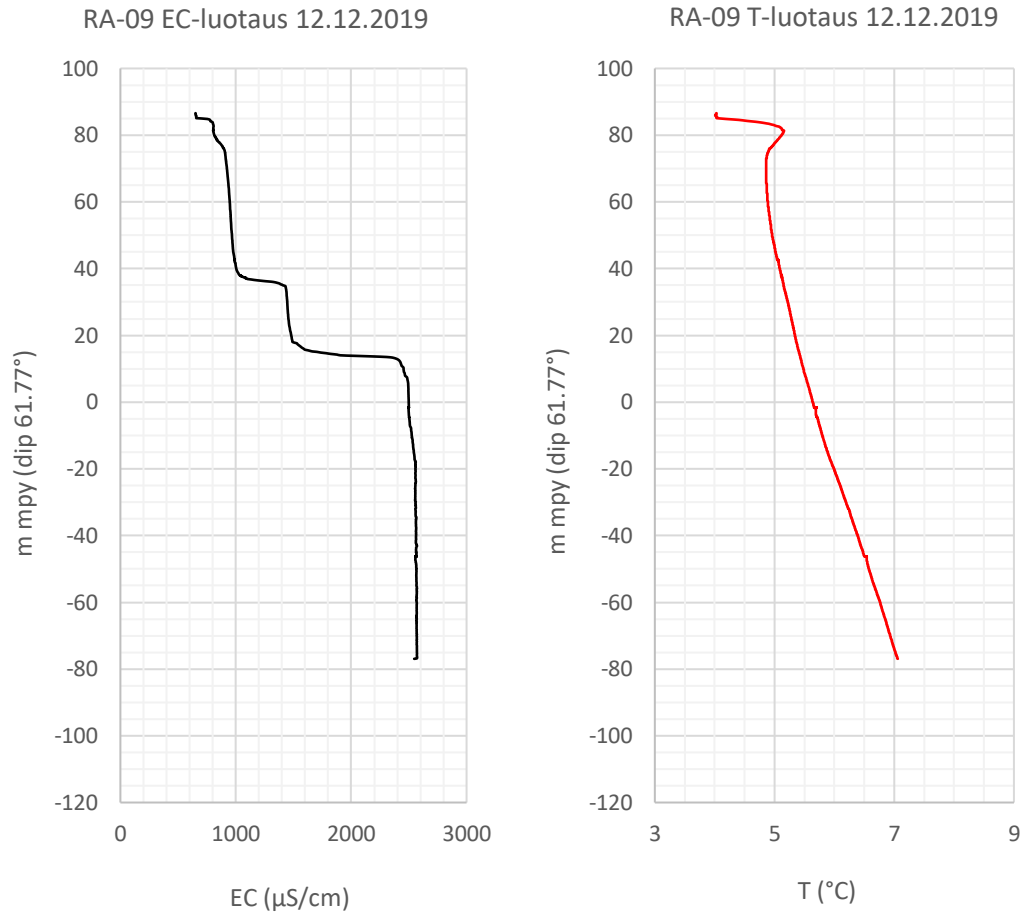
Kuva 21. Tulkinta linjasta 4.

29.10.2020



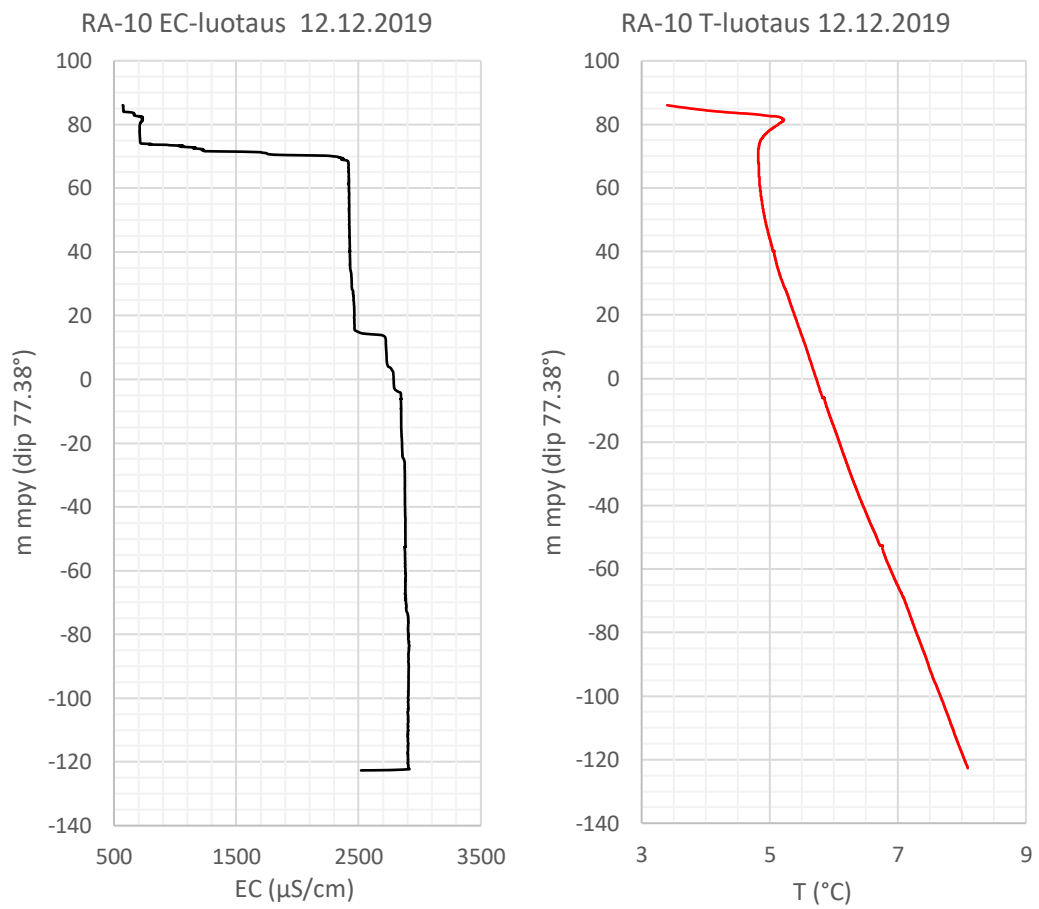
Kuva 22. Tulkinta linjasta 5.

29.10.2020

LIITE B SÄHKÖNJOHTAVUUS- JA LÄMPÖTILA PROFILIT

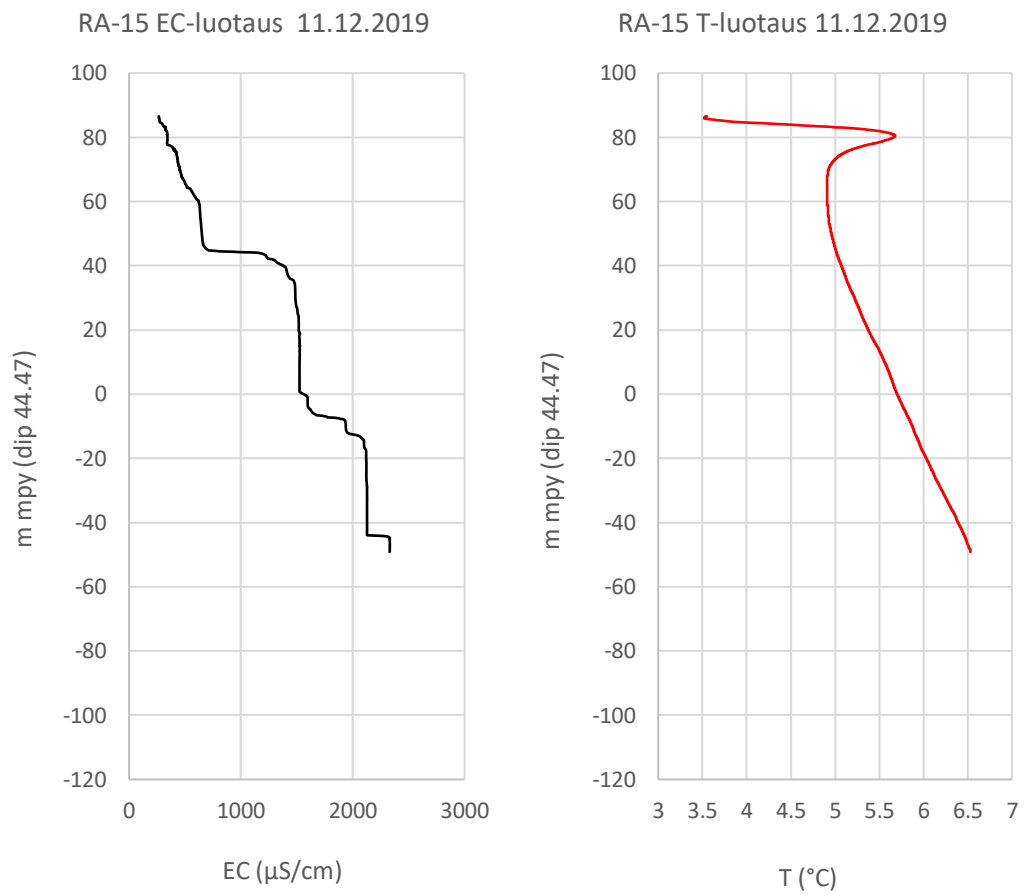
Kuva 23. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-9.

29.10.2020



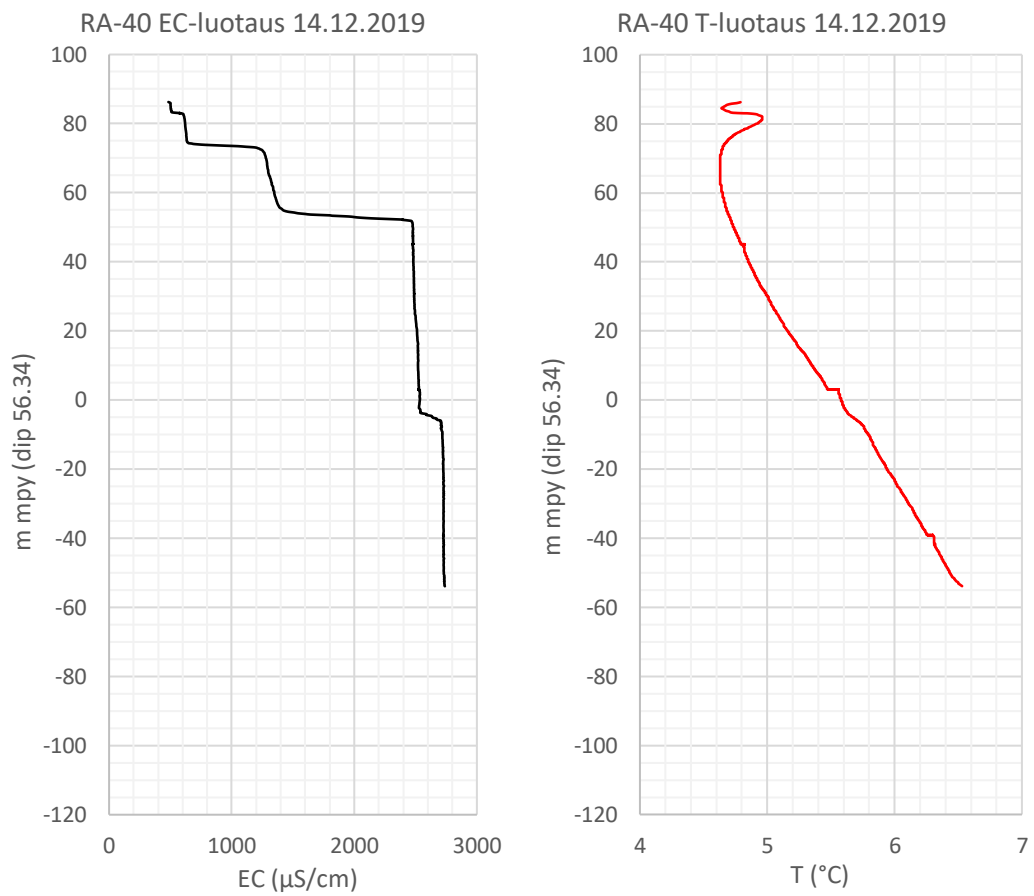
Kuva 24. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-10.

29.10.2020



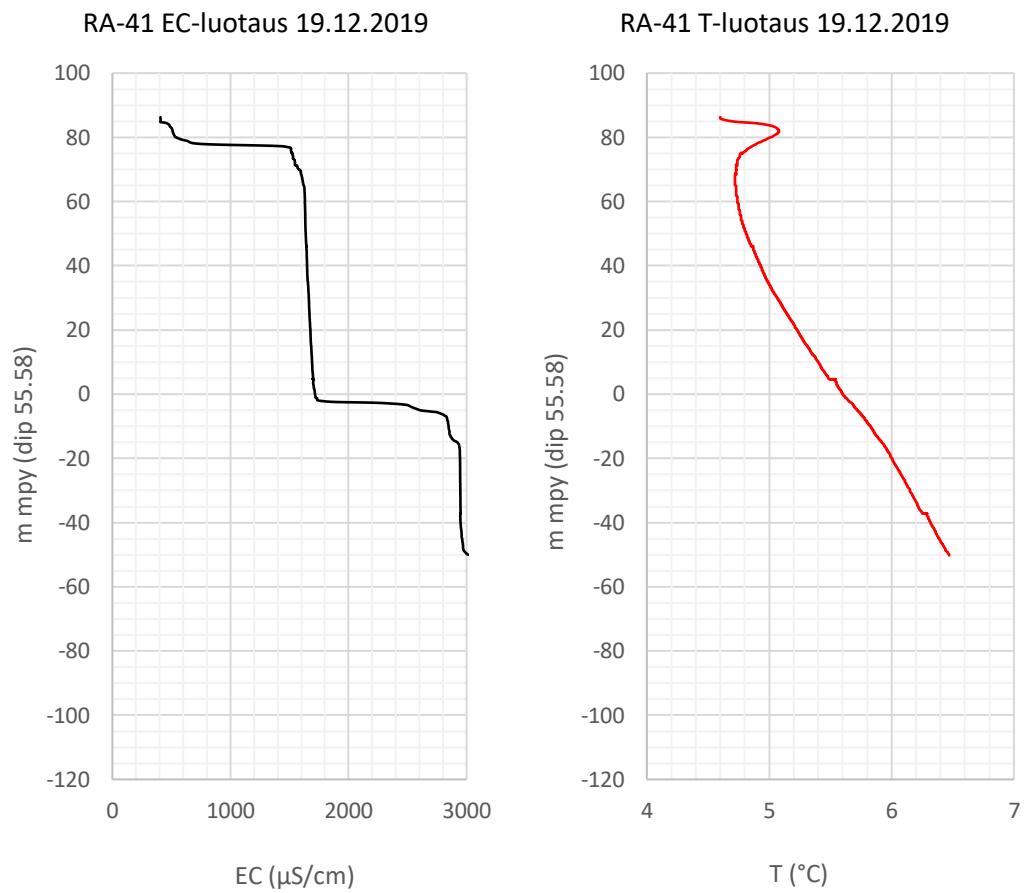
Kuva 25. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-15.

29.10.2020



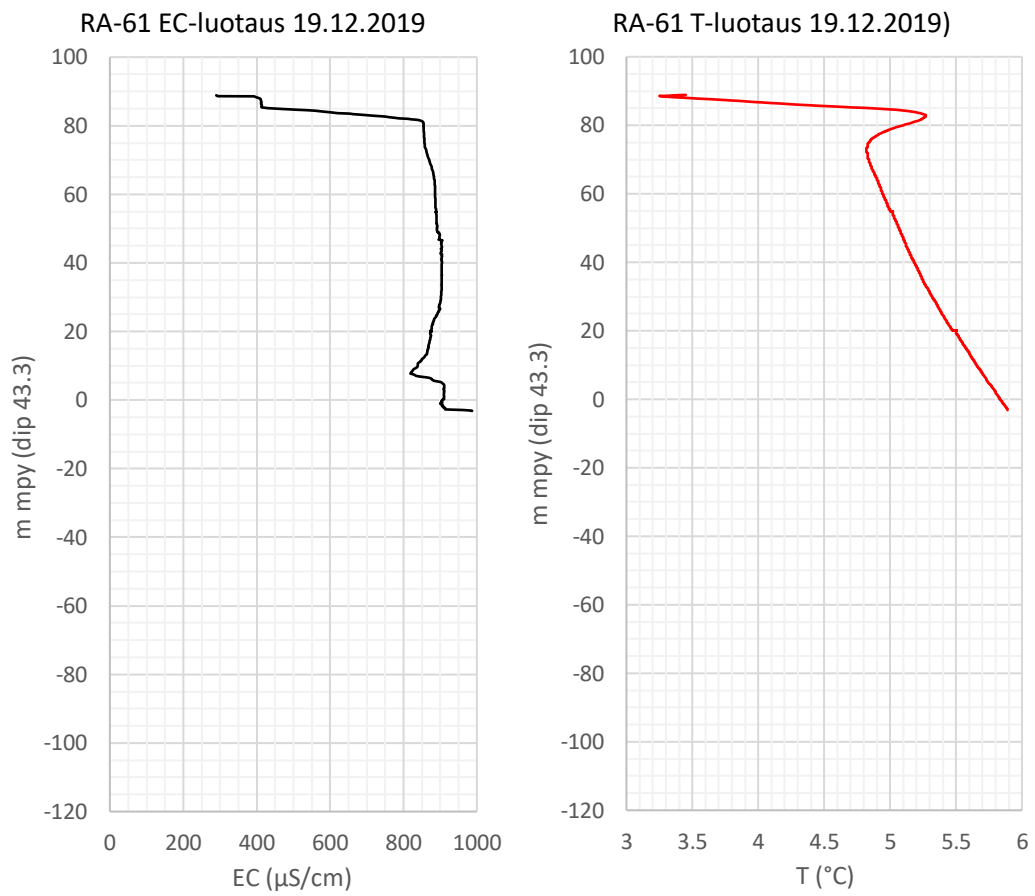
Kuva 26. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-40.

29.10.2020



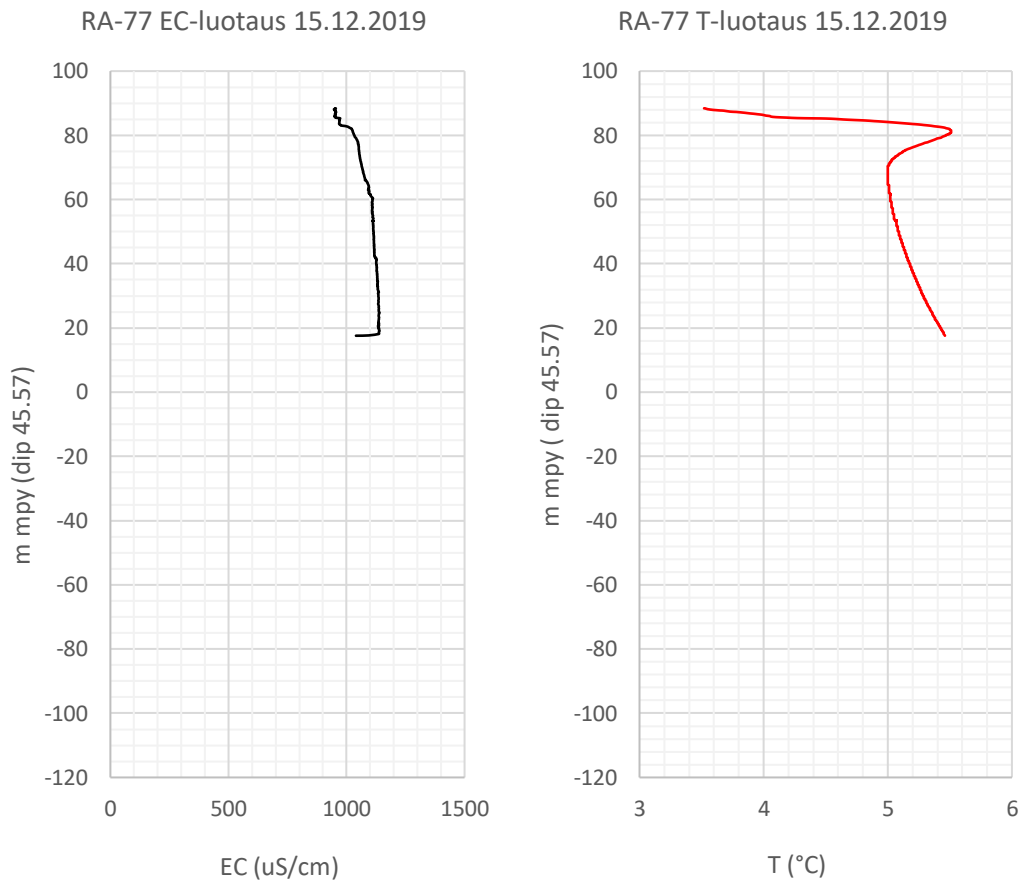
Kuva 27. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-41.

29.10.2020



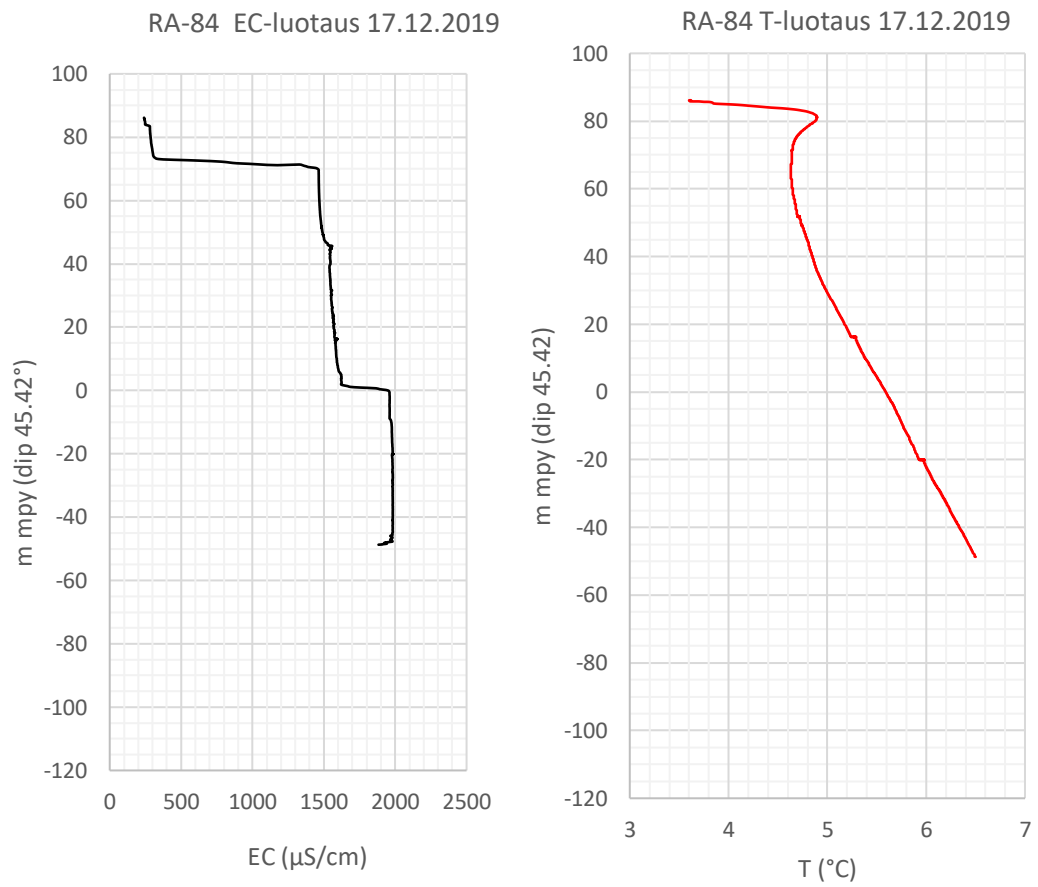
Kuva 28. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-61.

29.10.2020



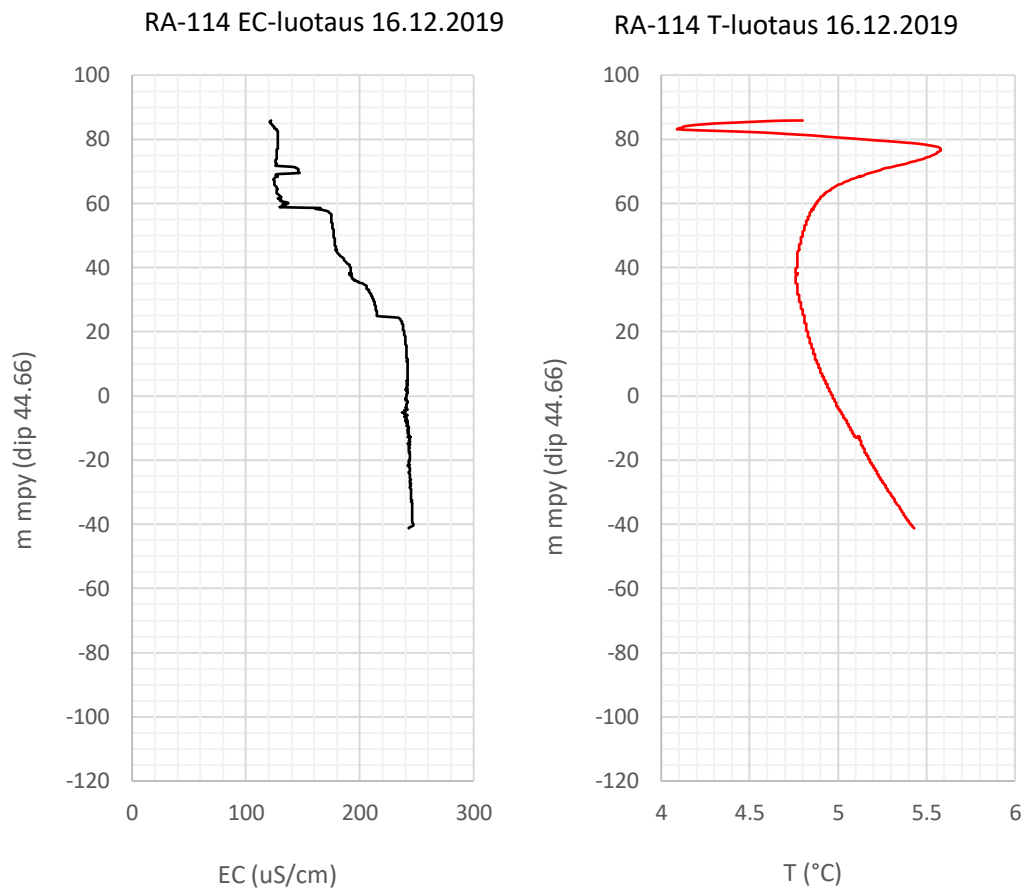
Kuva 29. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-77.

29.10.2020



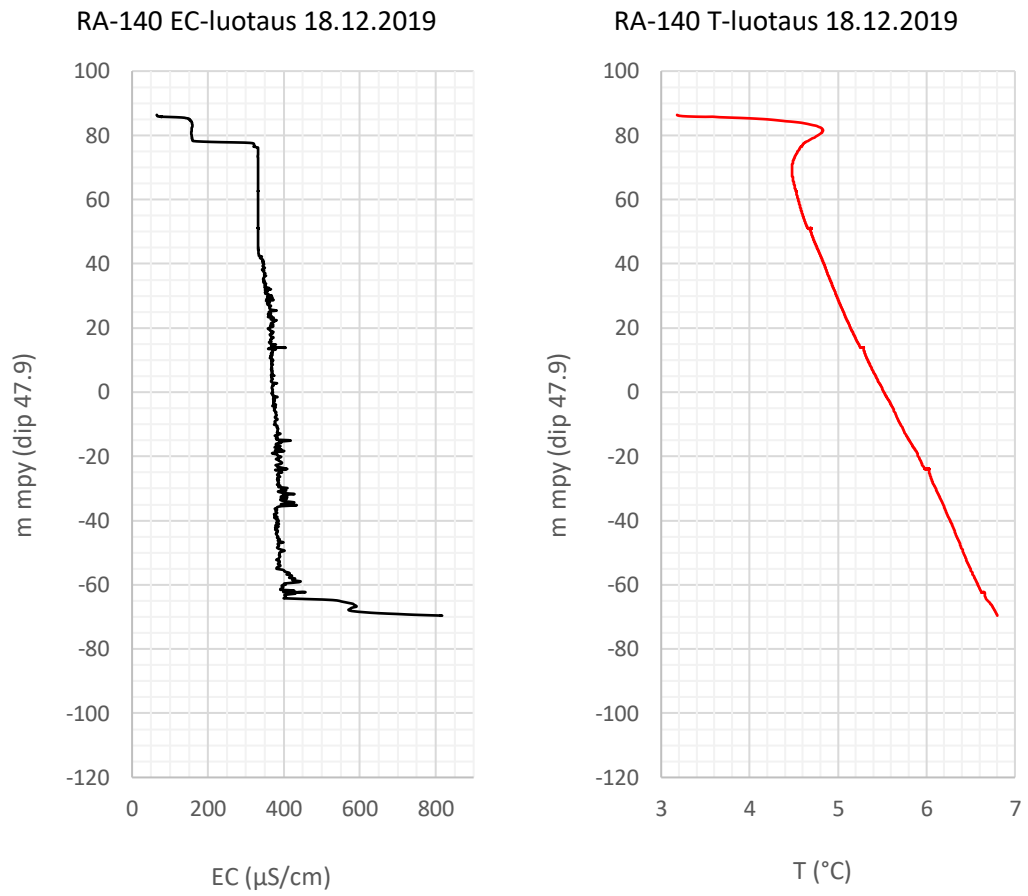
Kuva 30. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-84.

29.10.2020



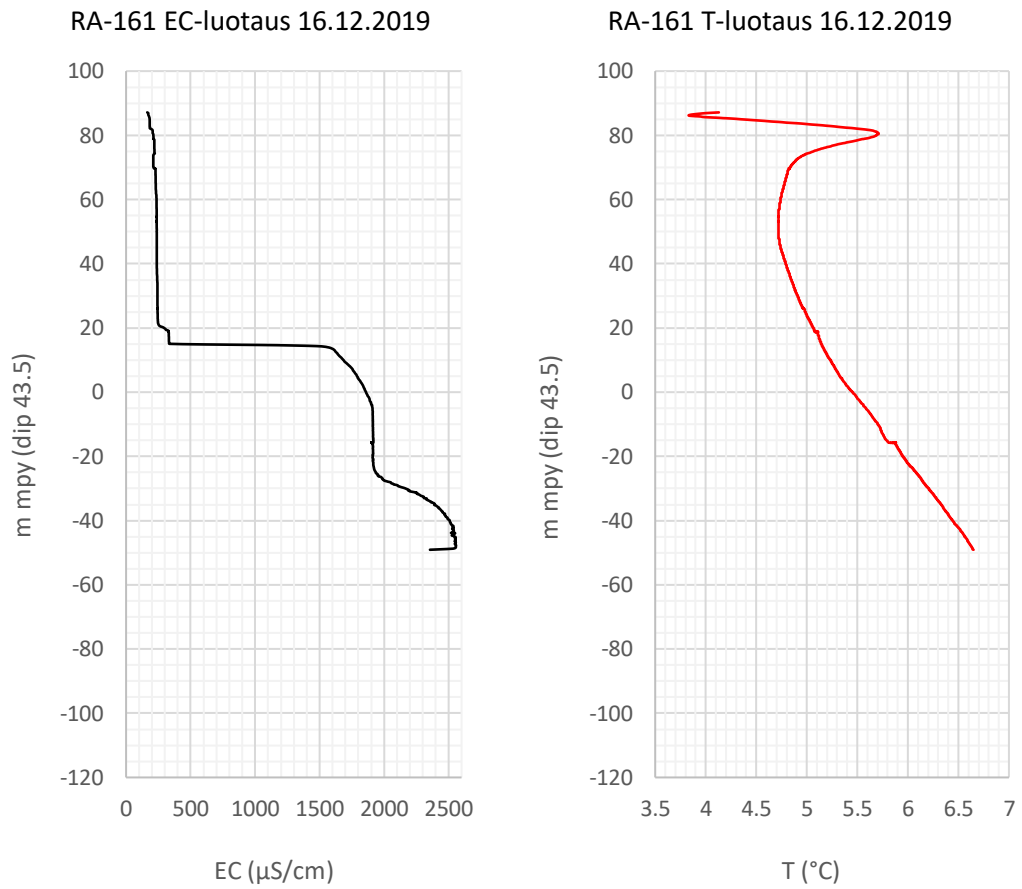
Kuva 31. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-114.

29.10.2020



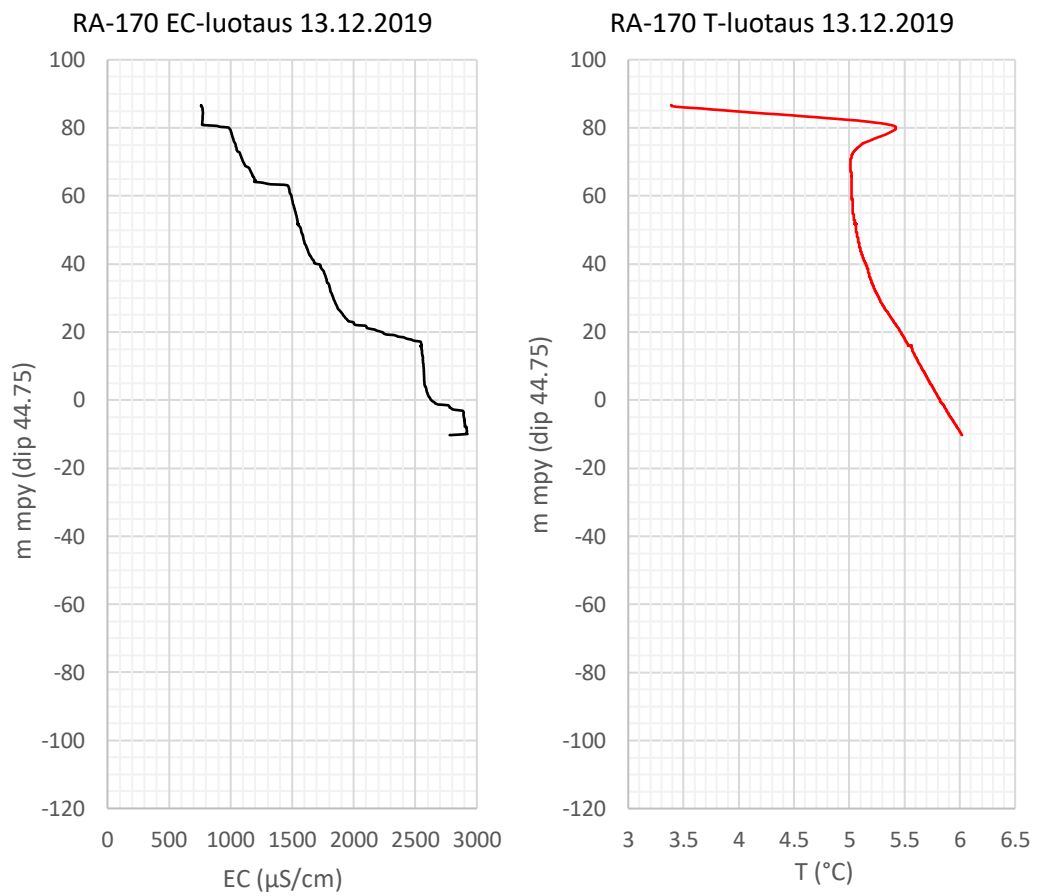
Kuva 32. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-140.

29.10.2020



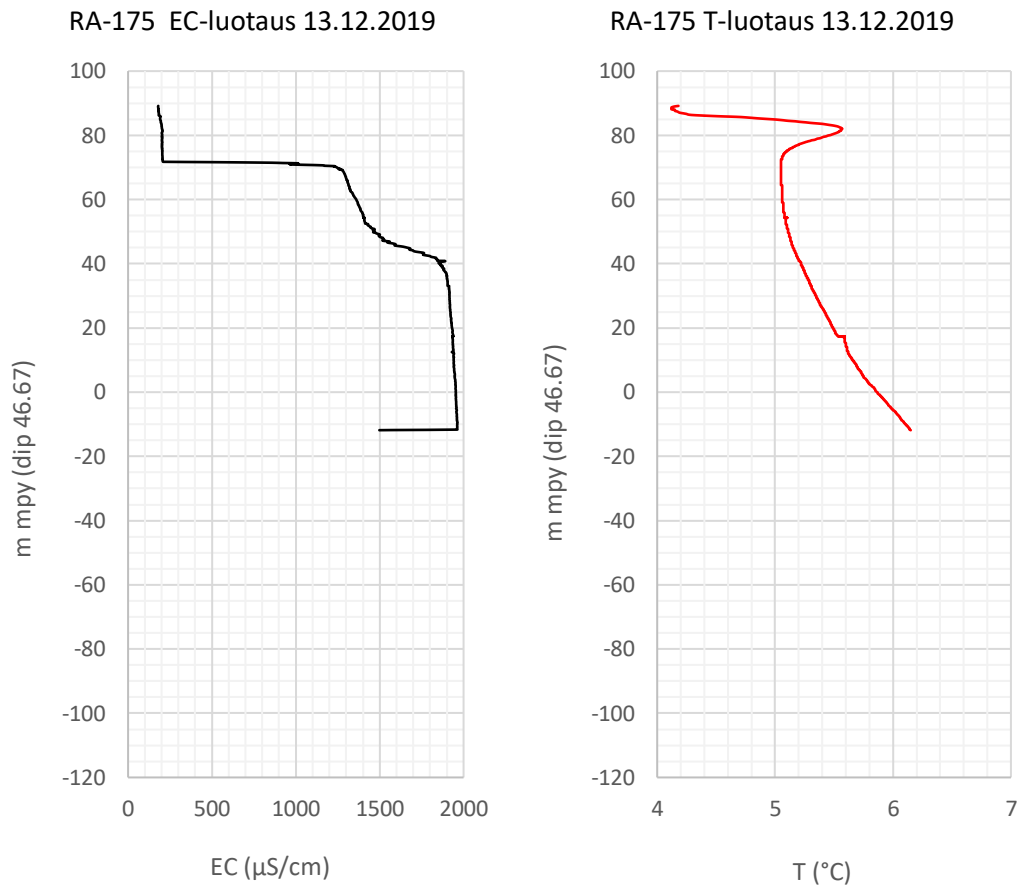
Kuva 33. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-161.

29.10.2020



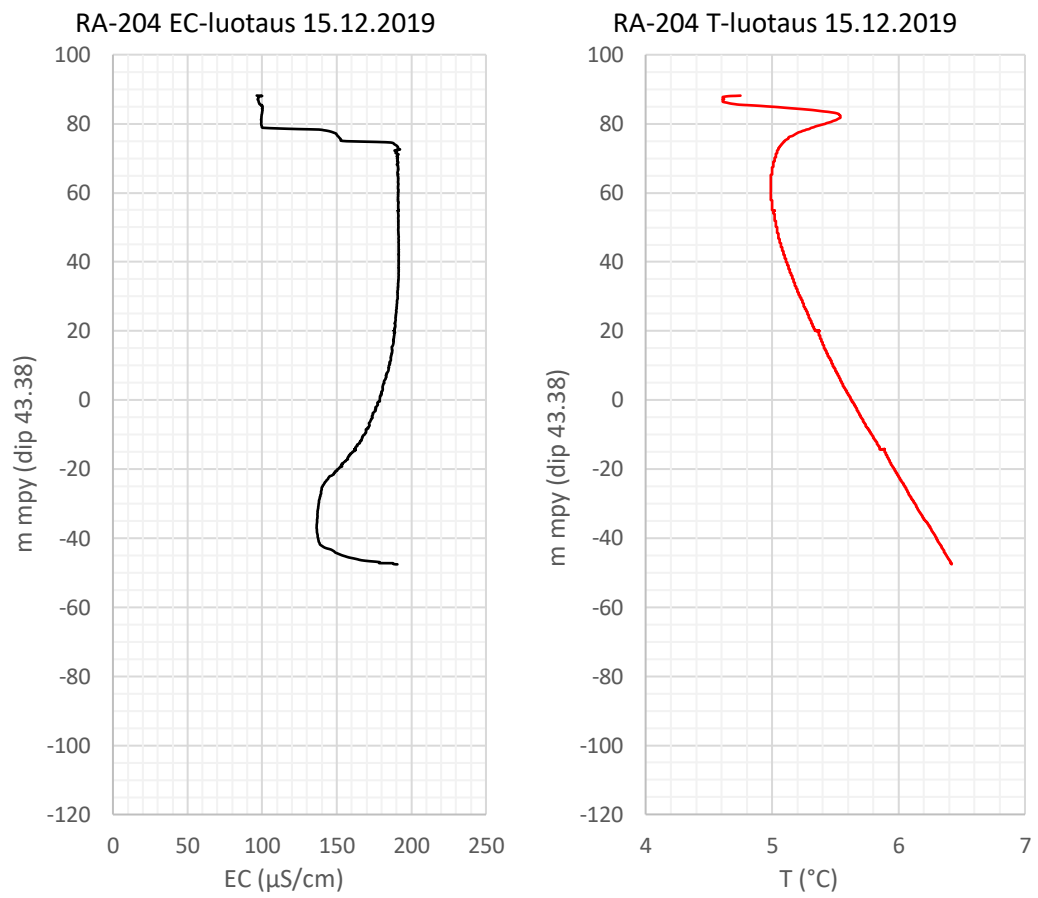
Kuva 34. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-170.

29.10.2020



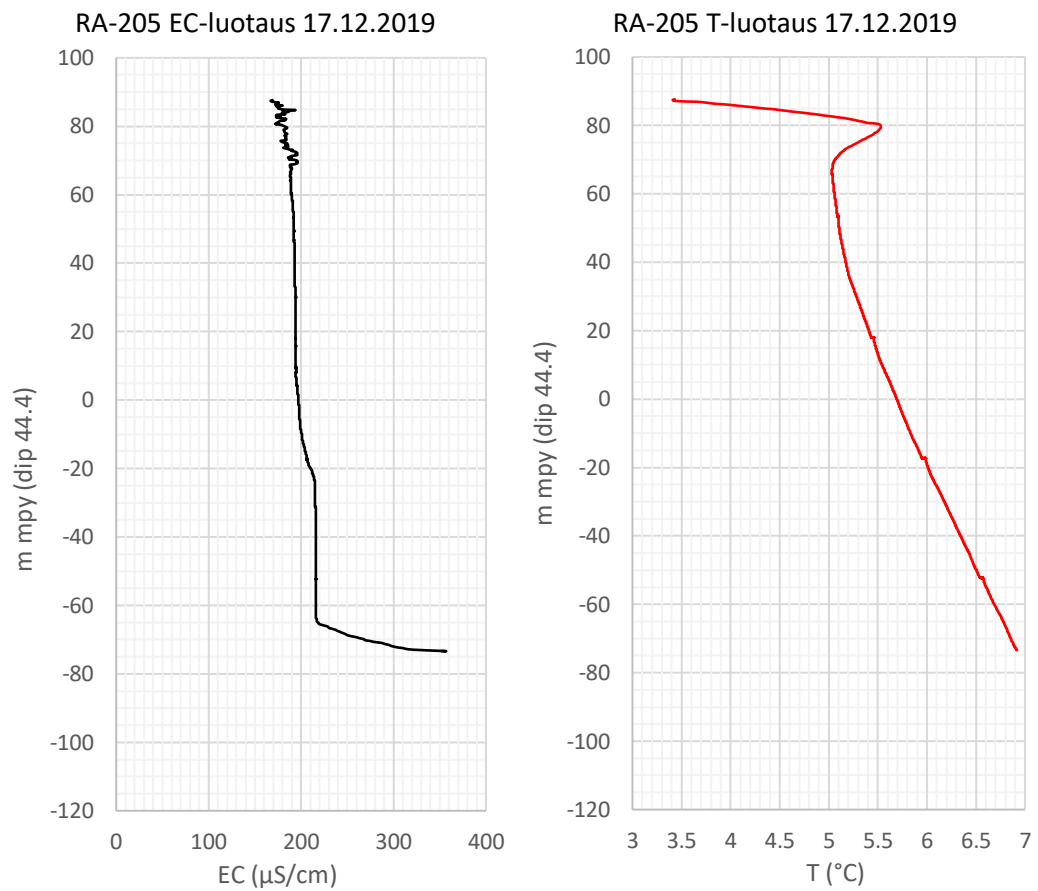
Kuva 35. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-175.

29.10.2020



Kuva 36. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-204.

29.10.2020



Kuva 37. EC (vasen) ja T (oikea) profiilit kairareistä RA-205.

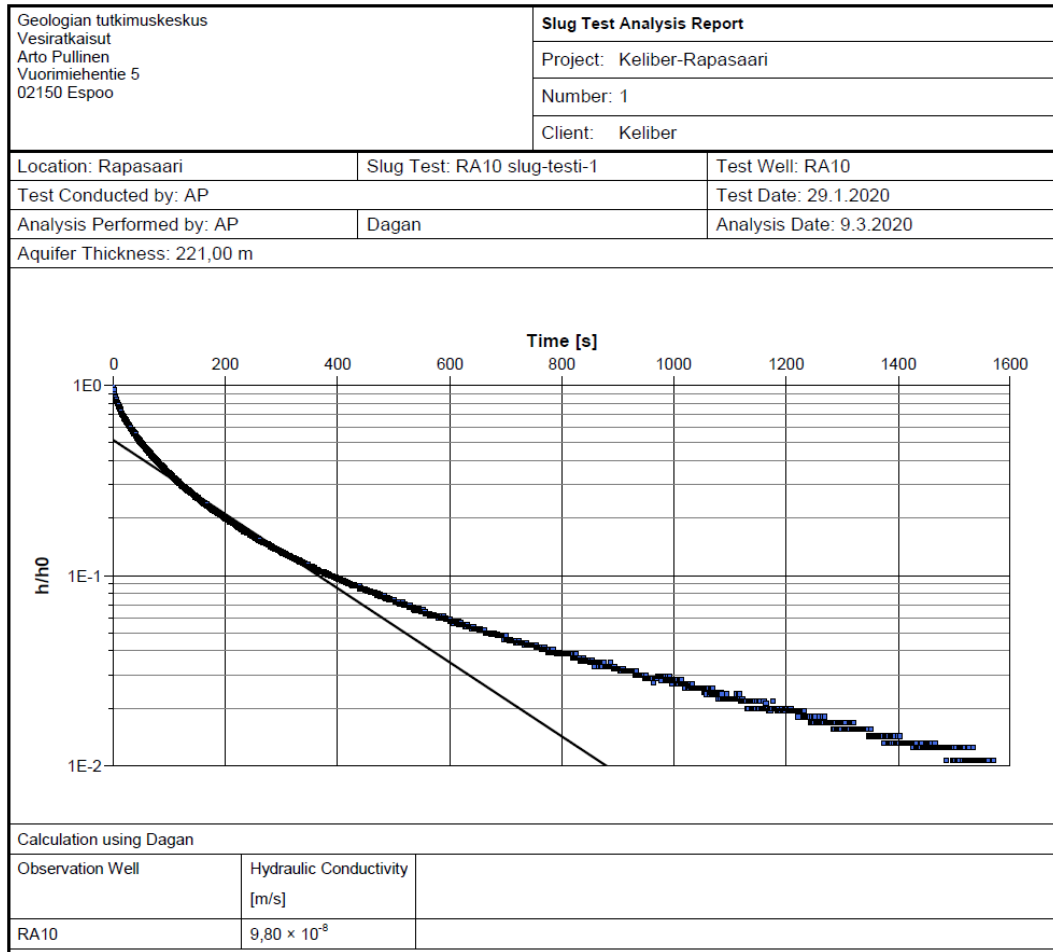
29.10.2020

LIITE C SLUG-TESTIEN TULOKSET

Geologian tutkimuskeskus Vesiratkaisut Arto Pullinen Vuorimiehentie 5 02150 Espoo		Slug Test Analysis Report	
		Project: Keliber-Rapasaari	
		Number: 1	
		Client: Keliber	
Location: Rapasaari	Slug Test: RA9 slug-testi-1	Test Well: RA9	
Test Conducted by: AP		Test Date: 29.1.2020	
Analysis Performed by: AP	Dagan	Analysis Date: 9.3.2020	
Aquifer Thickness: 156,00 m			
Calculation using Dagan			
Observation Well	Hydraulic Conductivity [m/s]		
RA9	$2,68 \times 10^{-7}$		

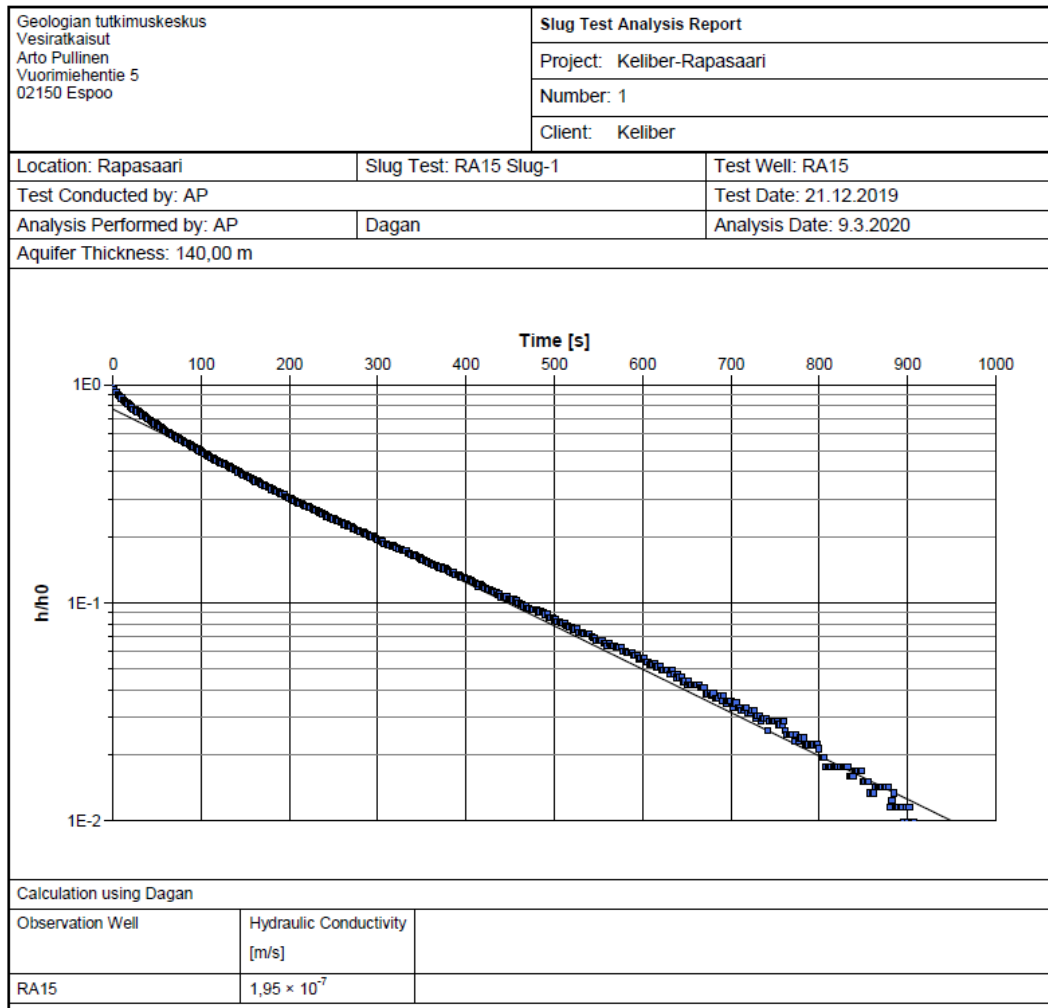
Kuva 38. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareistä RA-9.

29.10.2020



Kuva 39. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-10.

29.10.2020



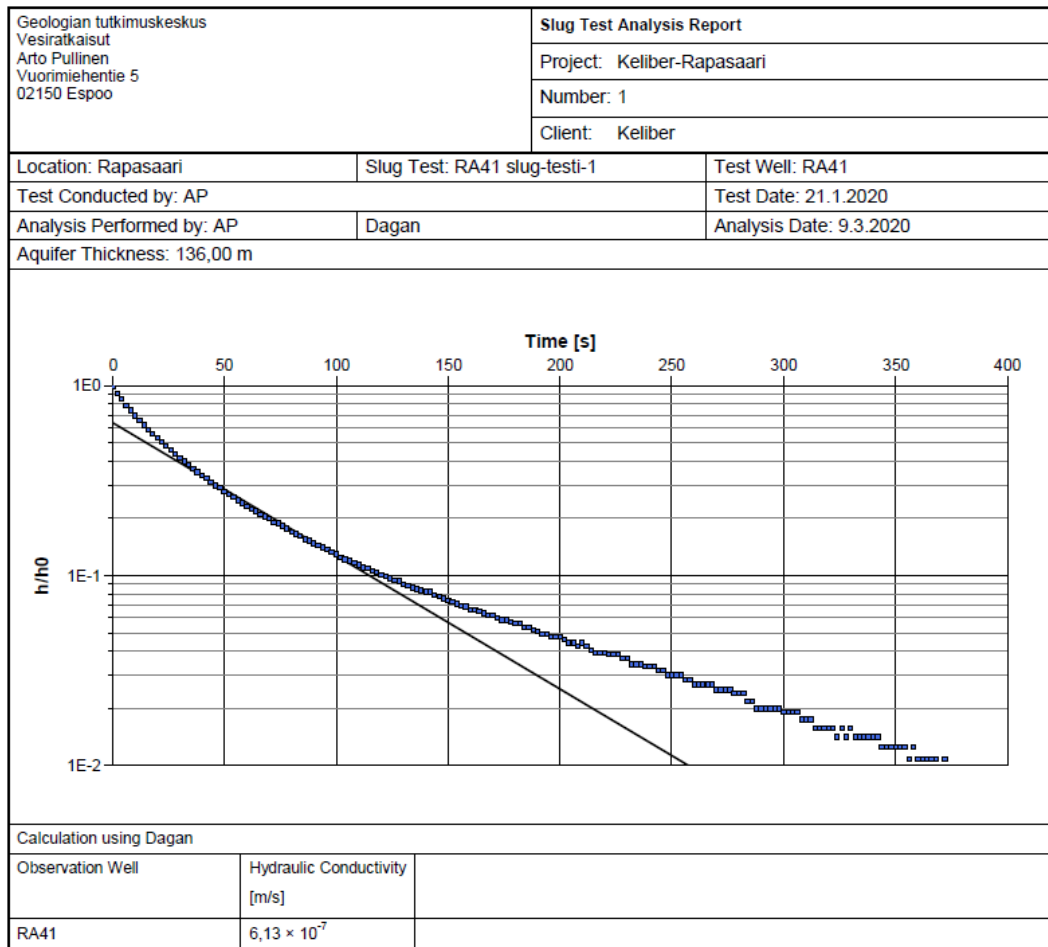
Kuva 40. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-15.

29.10.2020

Geologian tutkimuskeskus Vesiratkaisut Arto Pullinen Vuorimiehentie 5 02150 Espoo		Slug Test Analysis Report	
		Project: Keliber-Rapasaari	
		Number: 1	
		Client: Keliber	
Location: Rapasaari	Slug Test: RA40 slug-testi-1	Test Well: RA40	
Test Conducted by: AP		Test Date: 21.1.2020	
Analysis Performed by: AP	Dagan	Analysis Date: 10.3.2020	
Aquifer Thickness: 140,00 m			
Calculation using Dagan			
Observation Well	Hydraulic Conductivity [m/s]		
RA40	$2,32 \times 10^{-7}$		

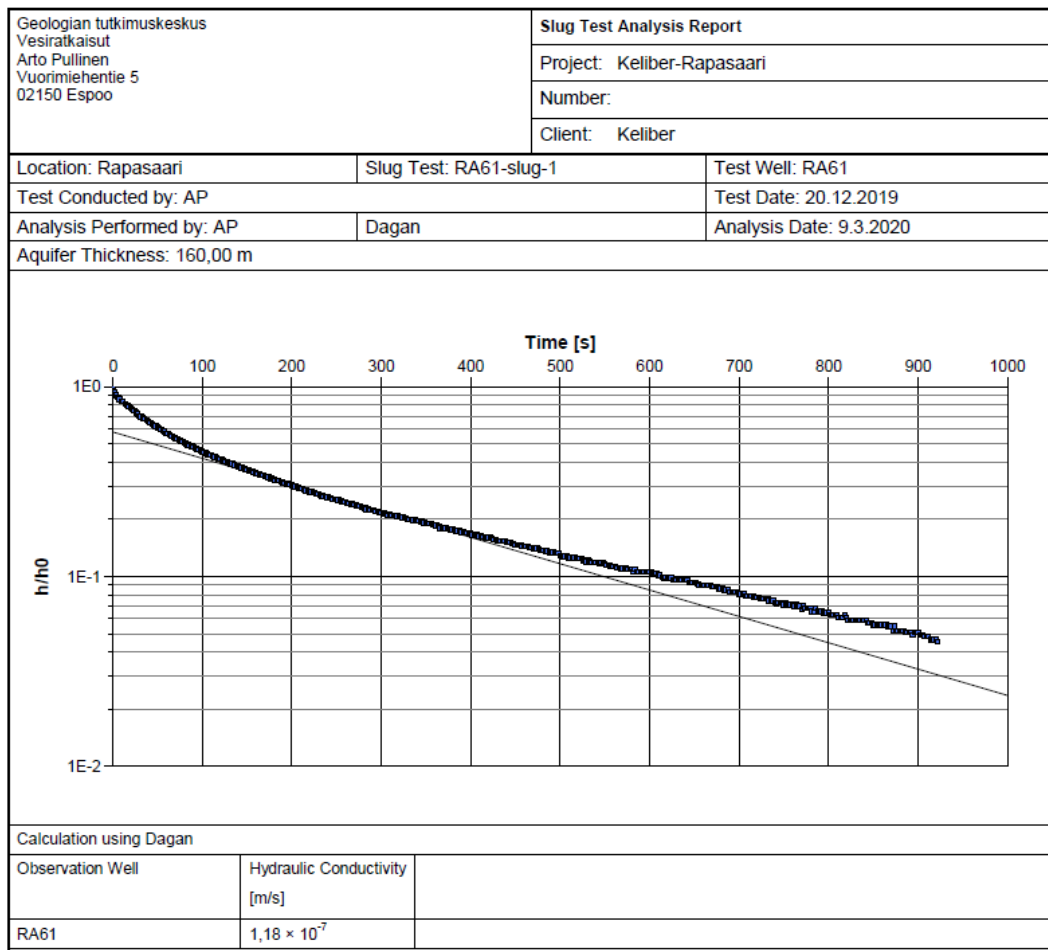
Kuva 41. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-40.

29.10.2020



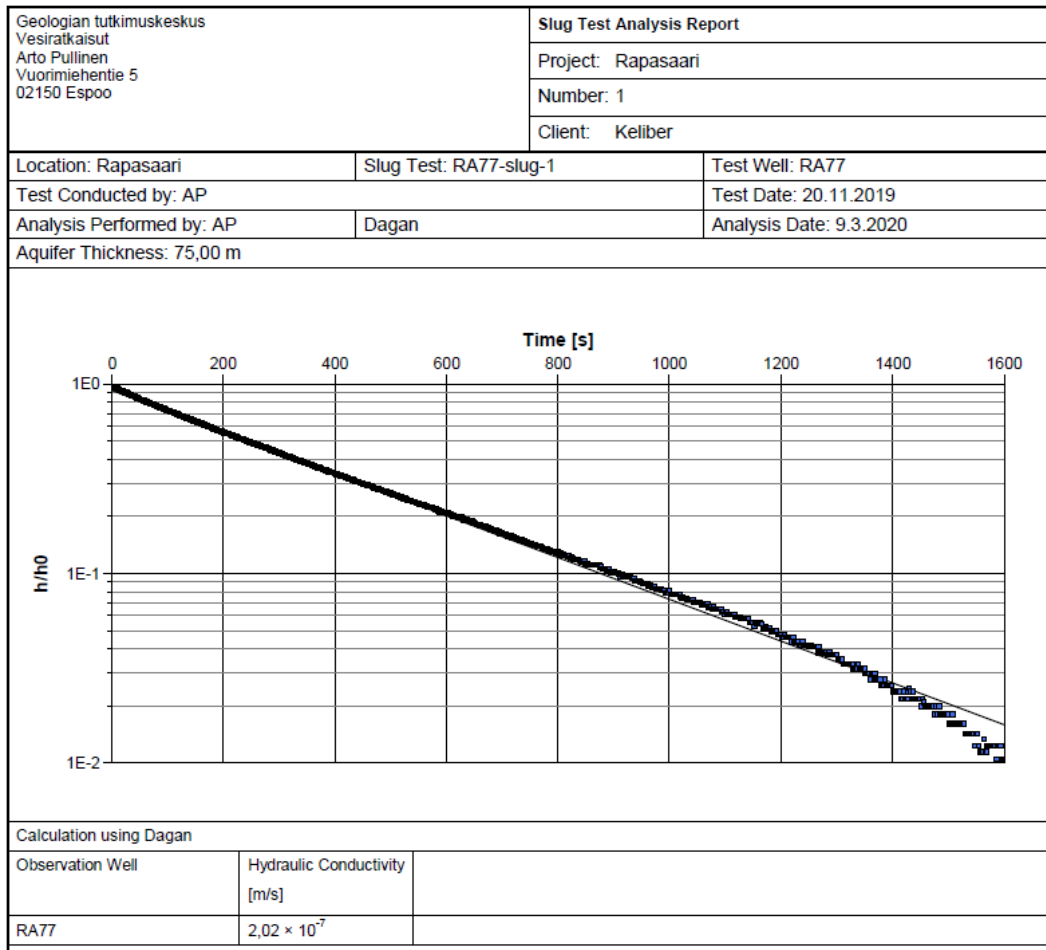
Kuva 42. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareistä RA-41.

29.10.2020



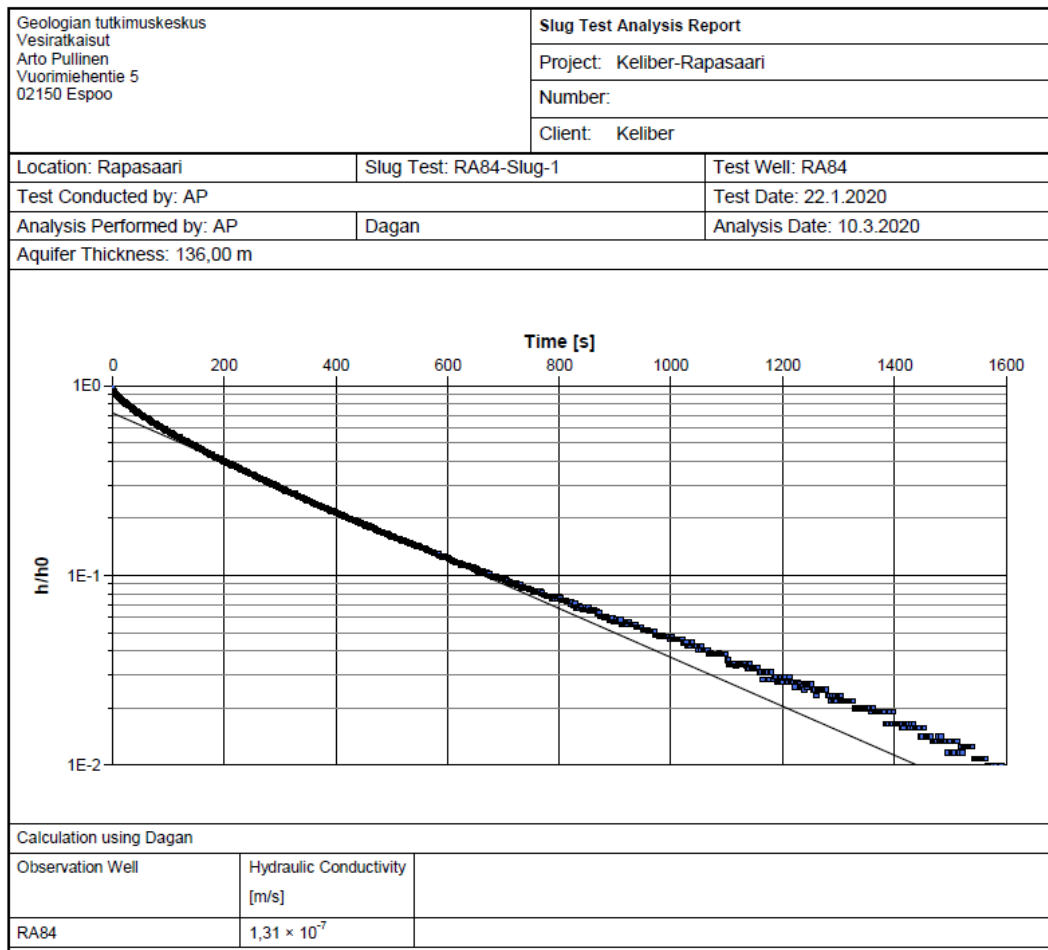
Kuva 43. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareistä RA-61.

29.10.2020



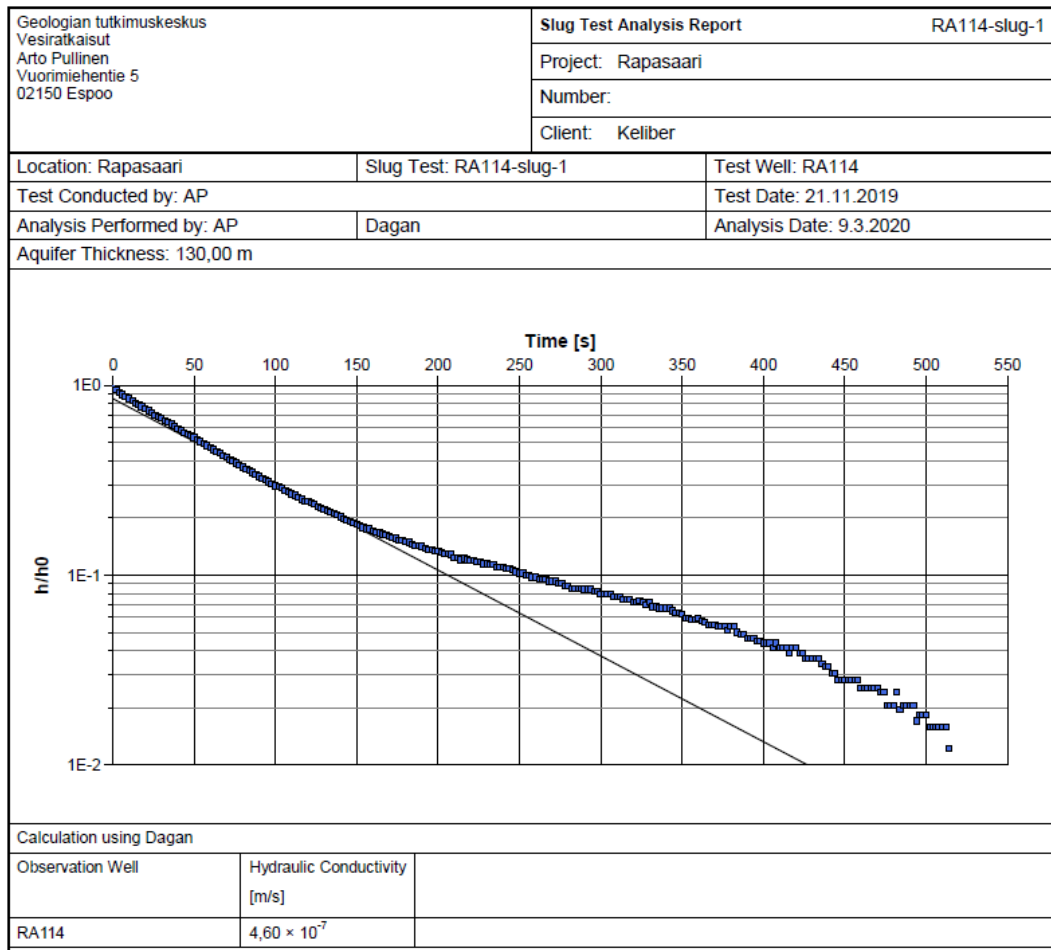
Kuva 44. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareistä RA-77.

29.10.2020



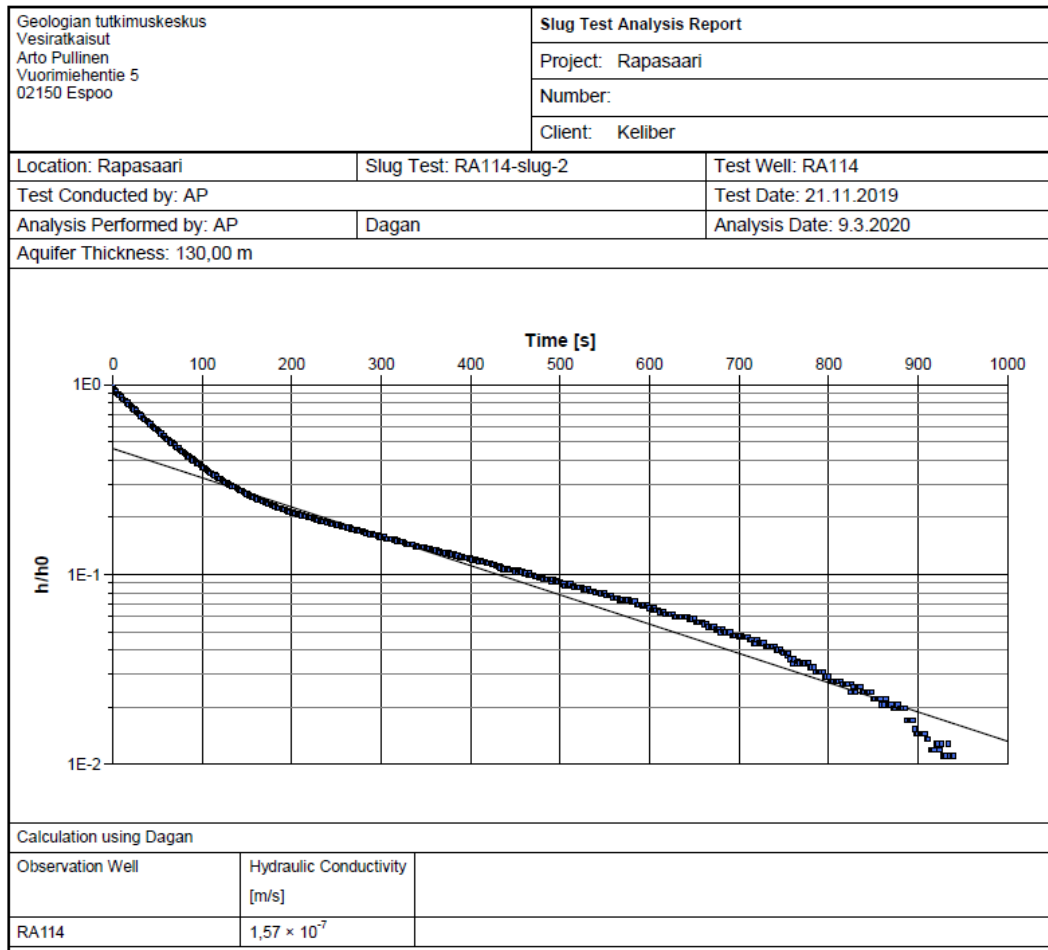
Kuva 45. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-84.

29.10.2020



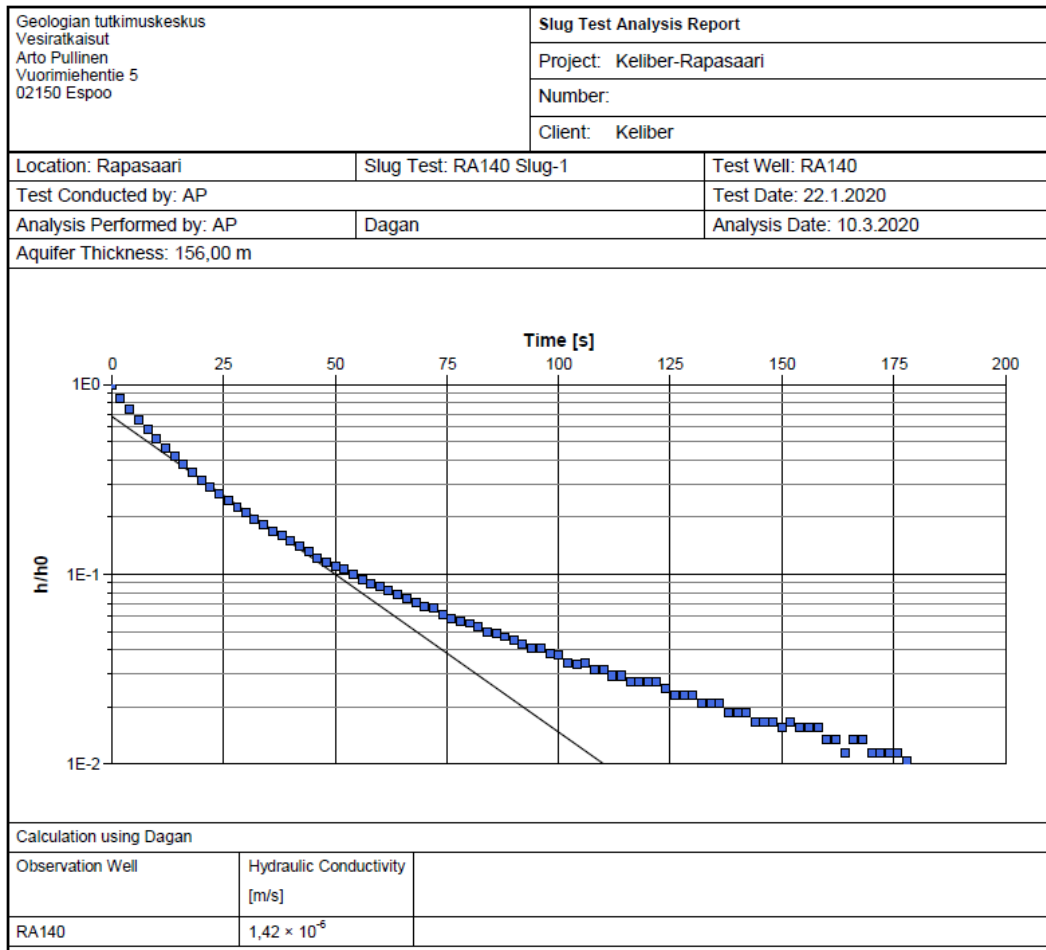
Kuva 46. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-114 (testi #1).

29.10.2020



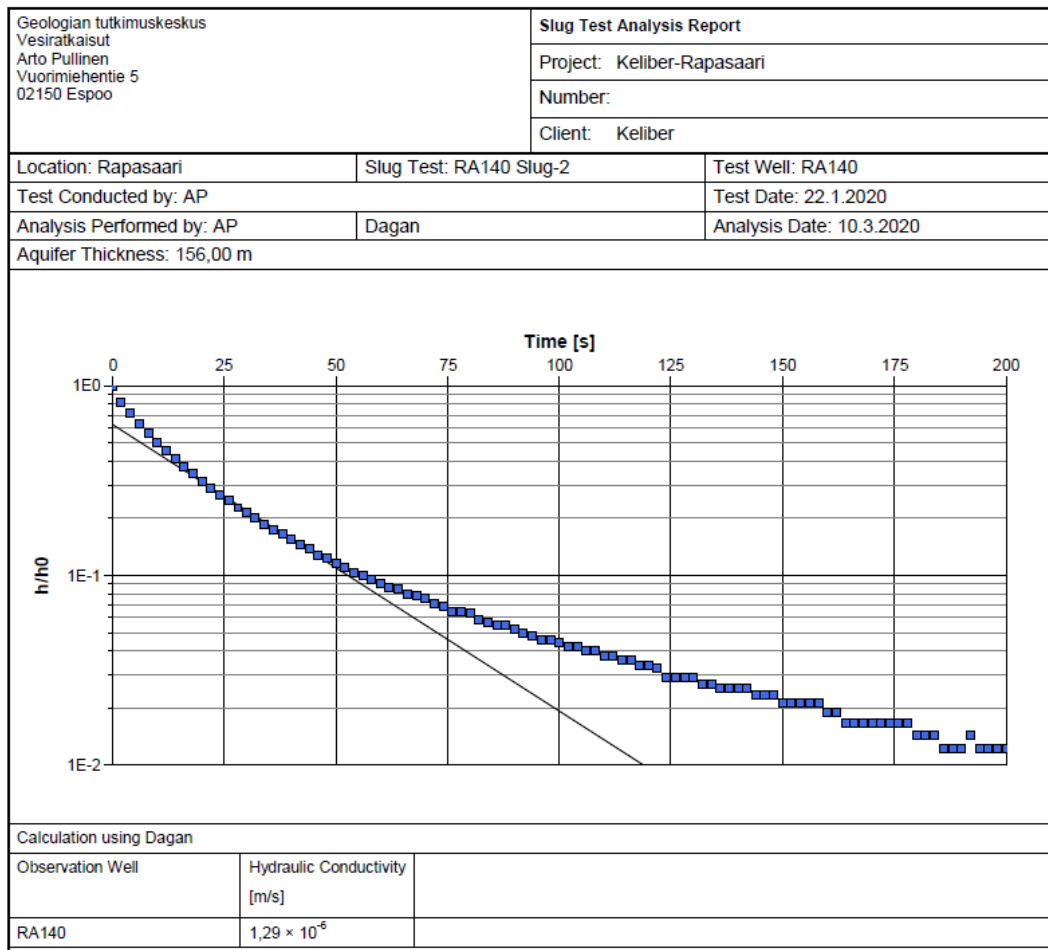
Kuva 47. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareistä RA-114 (testi #2).

29.10.2020



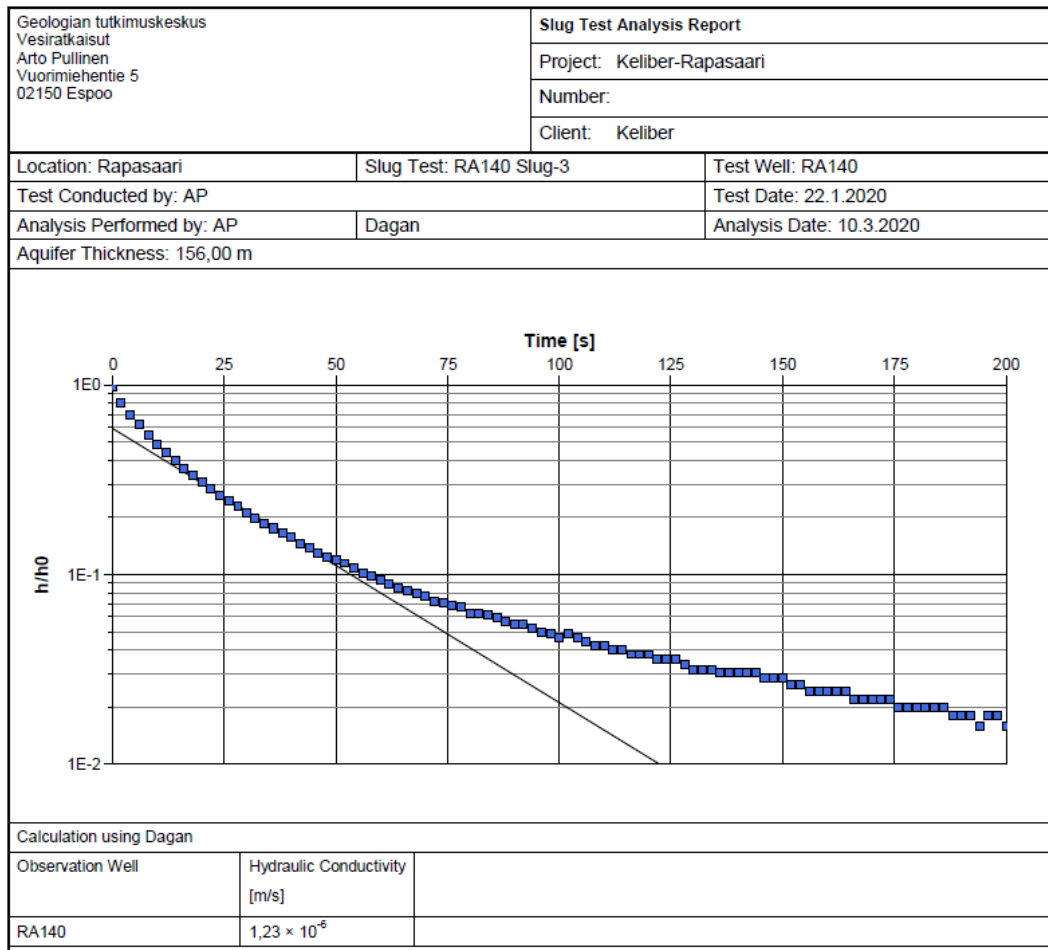
Kuva 48. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-140 (testi #1).

29.10.2020



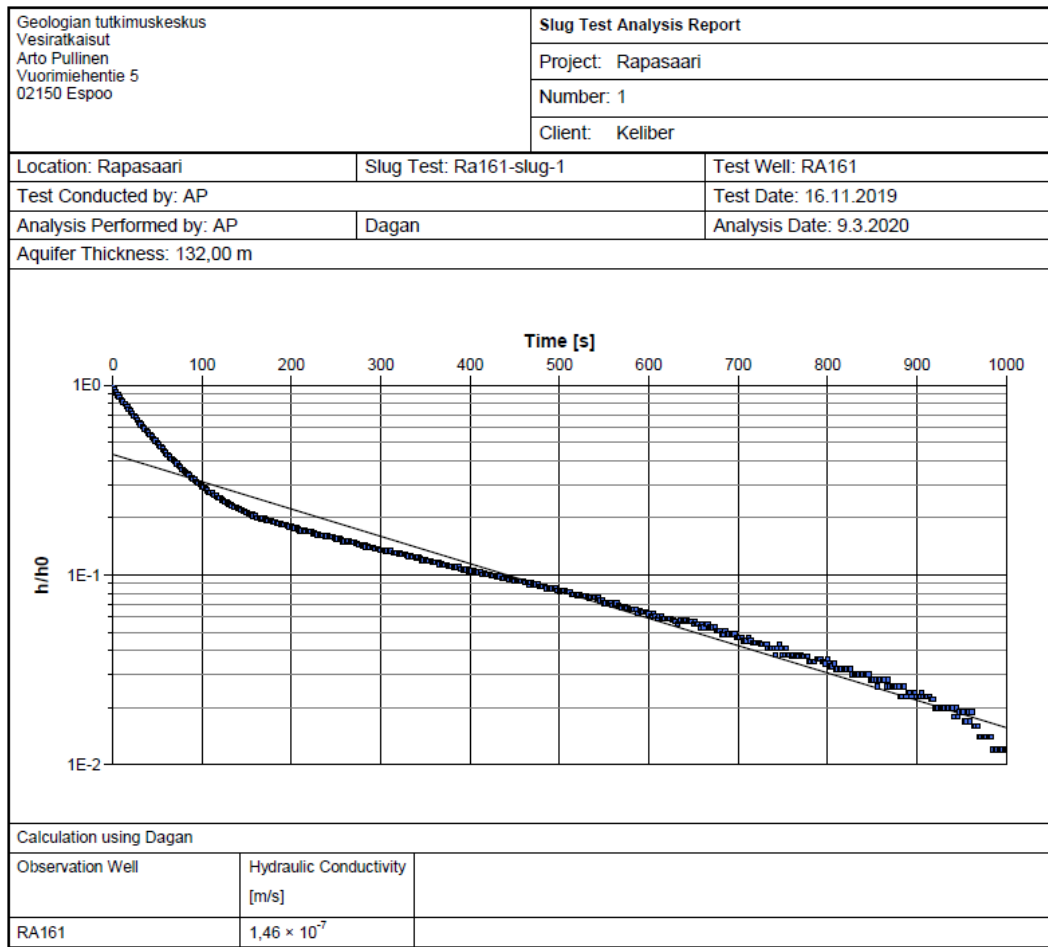
Kuva 49. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-140 (testi #2).

29.10.2020



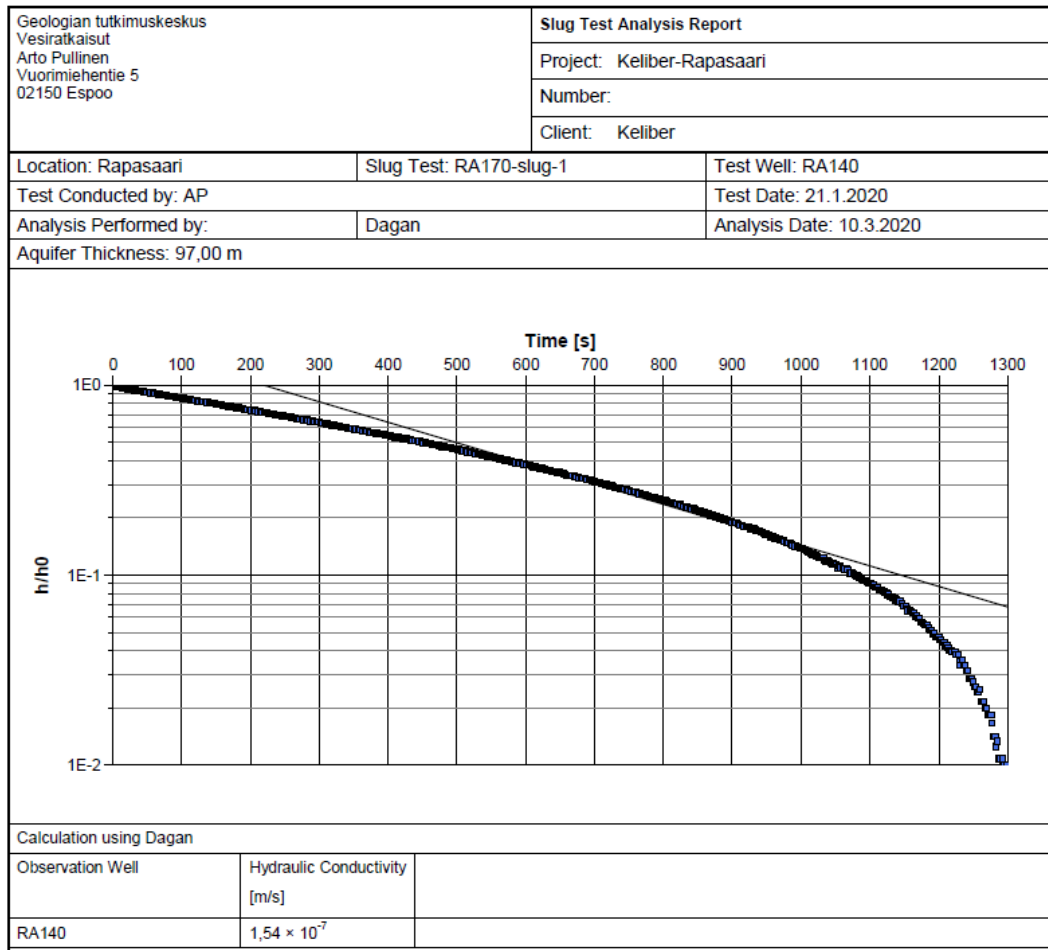
Kuva 50. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareistä RA-140 (testi #3).

29.10.2020



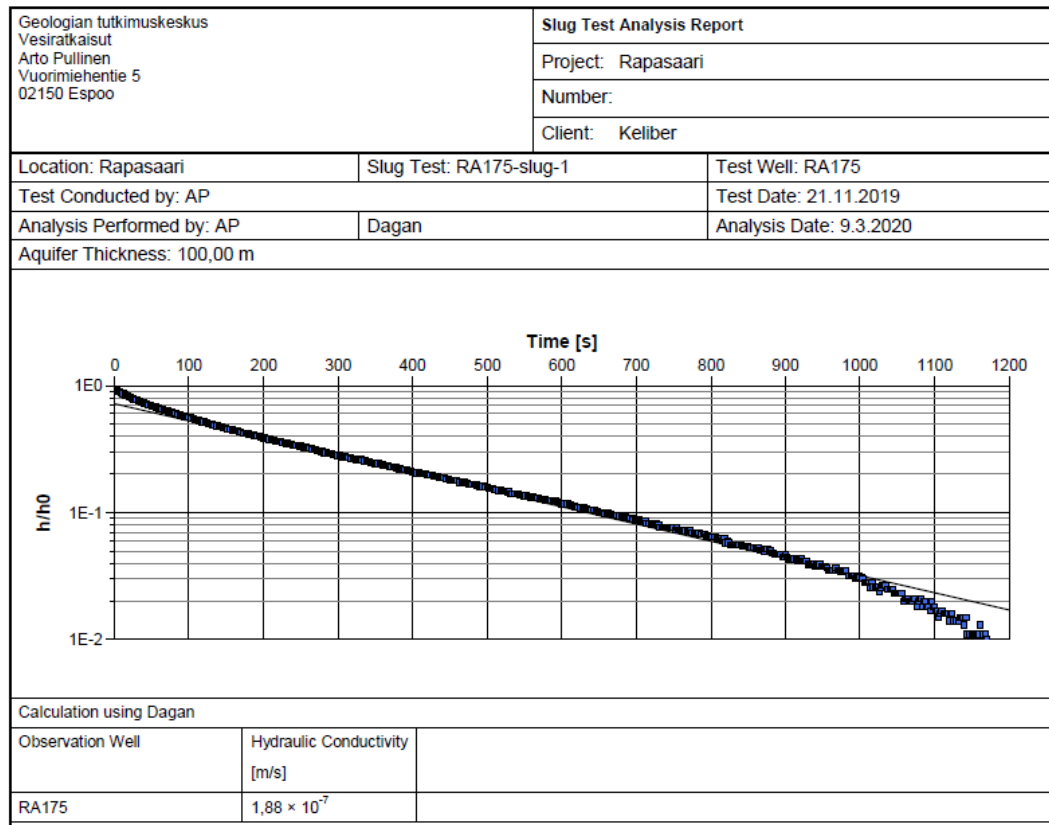
Kuva 51. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-161.

29.10.2020



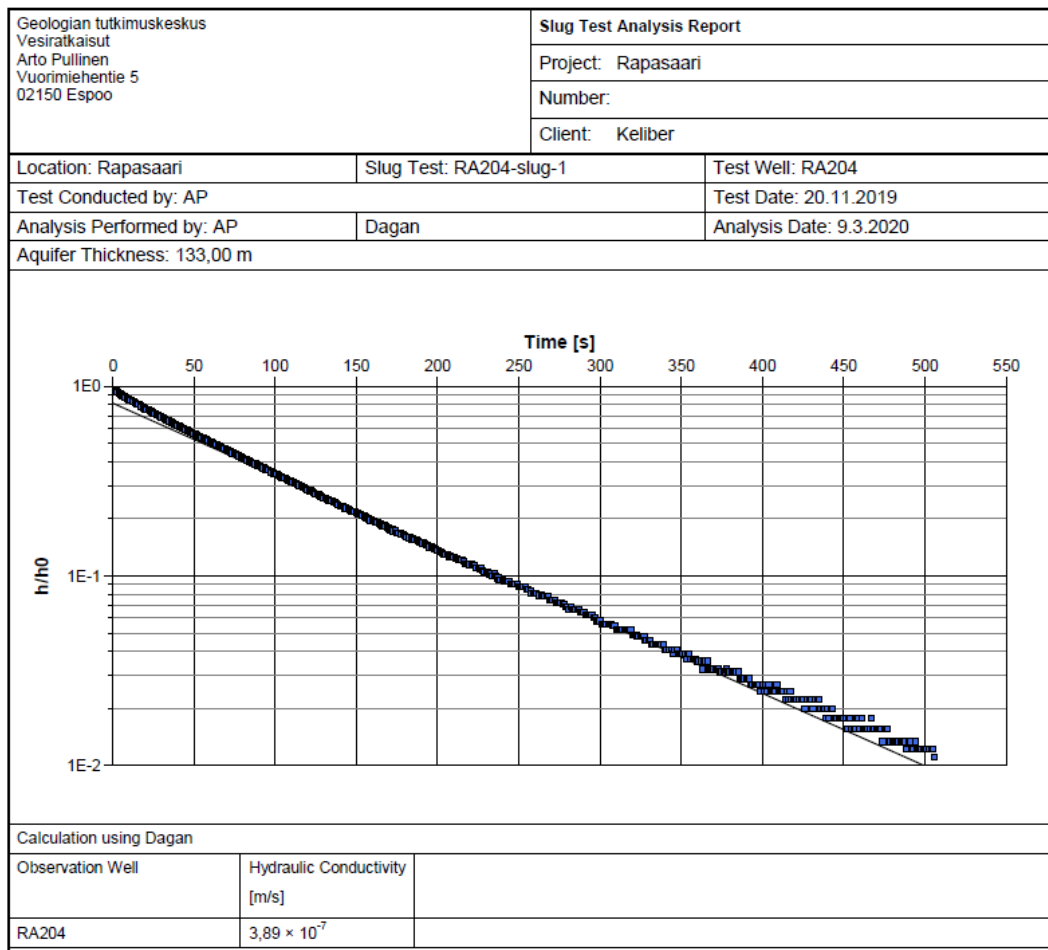
Kuva 52. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareistä RA-170.

29.10.2020



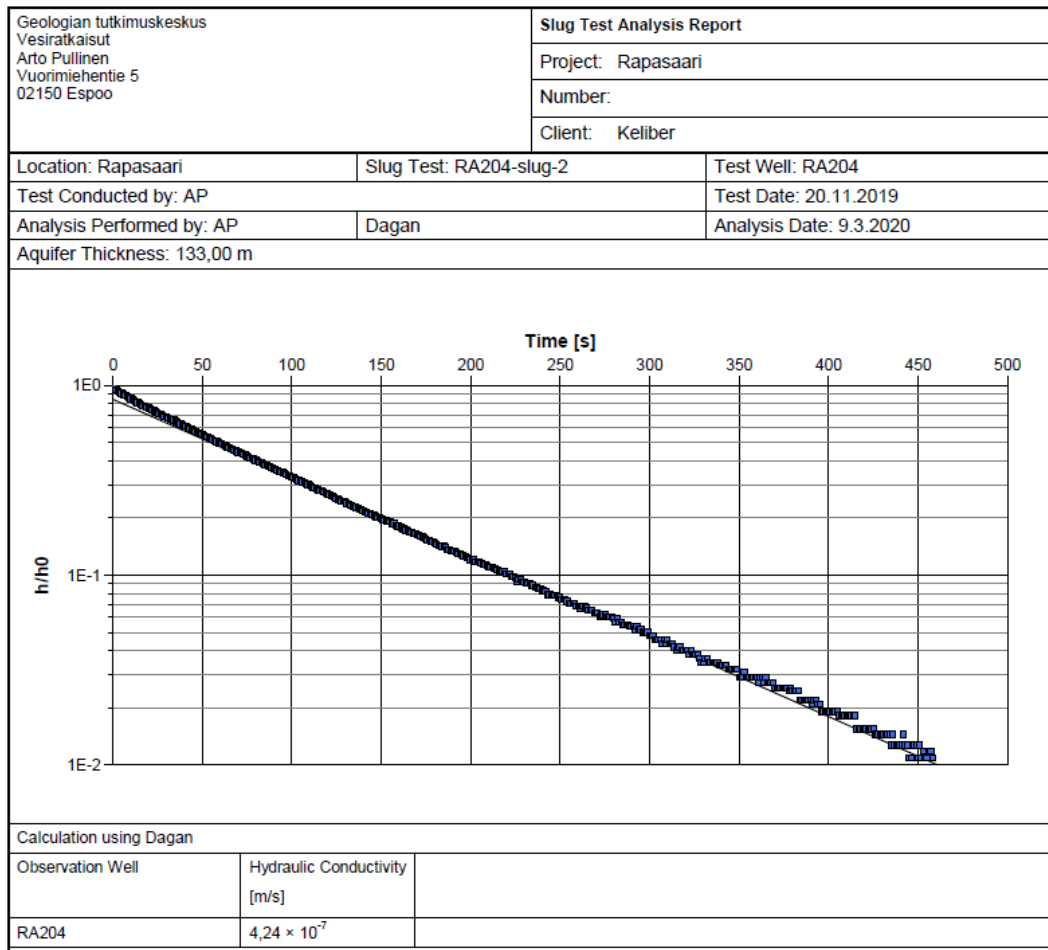
Kuva 53. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-175.

29.10.2020



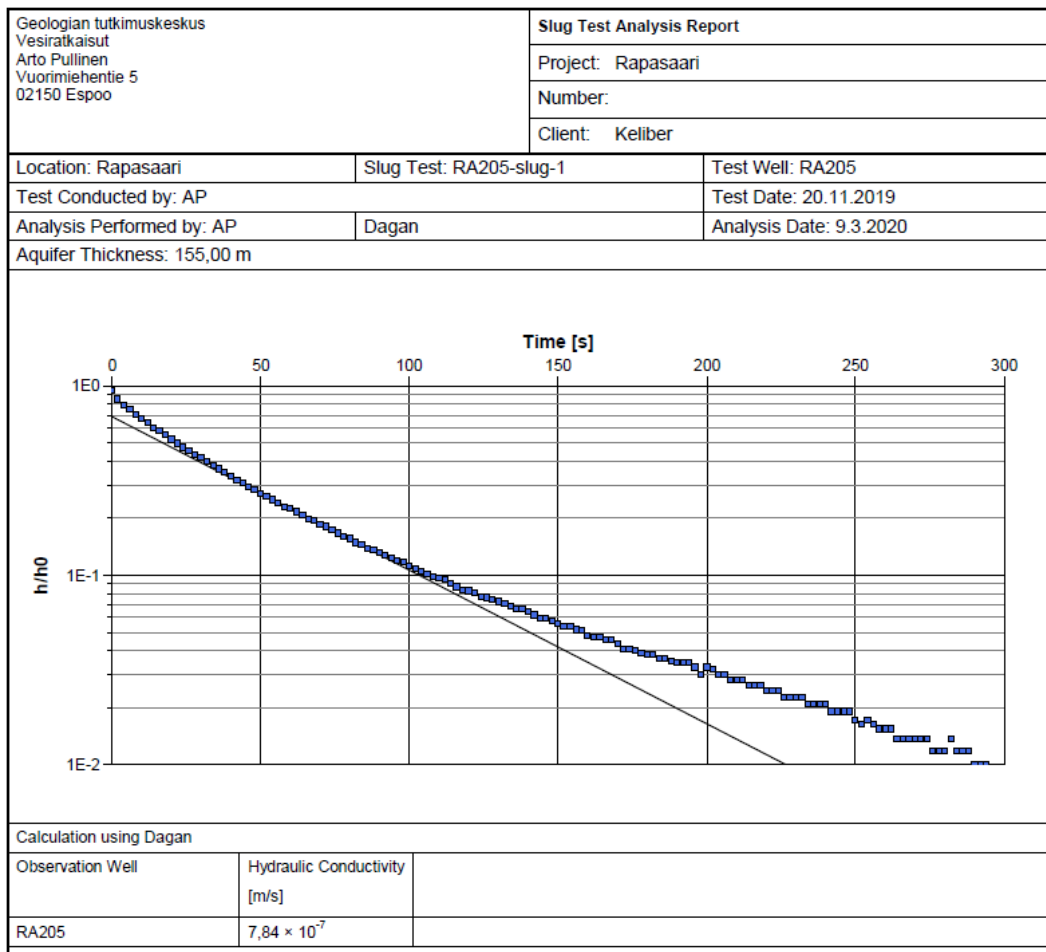
Kuva 54. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-204 (testi #1).

29.10.2020



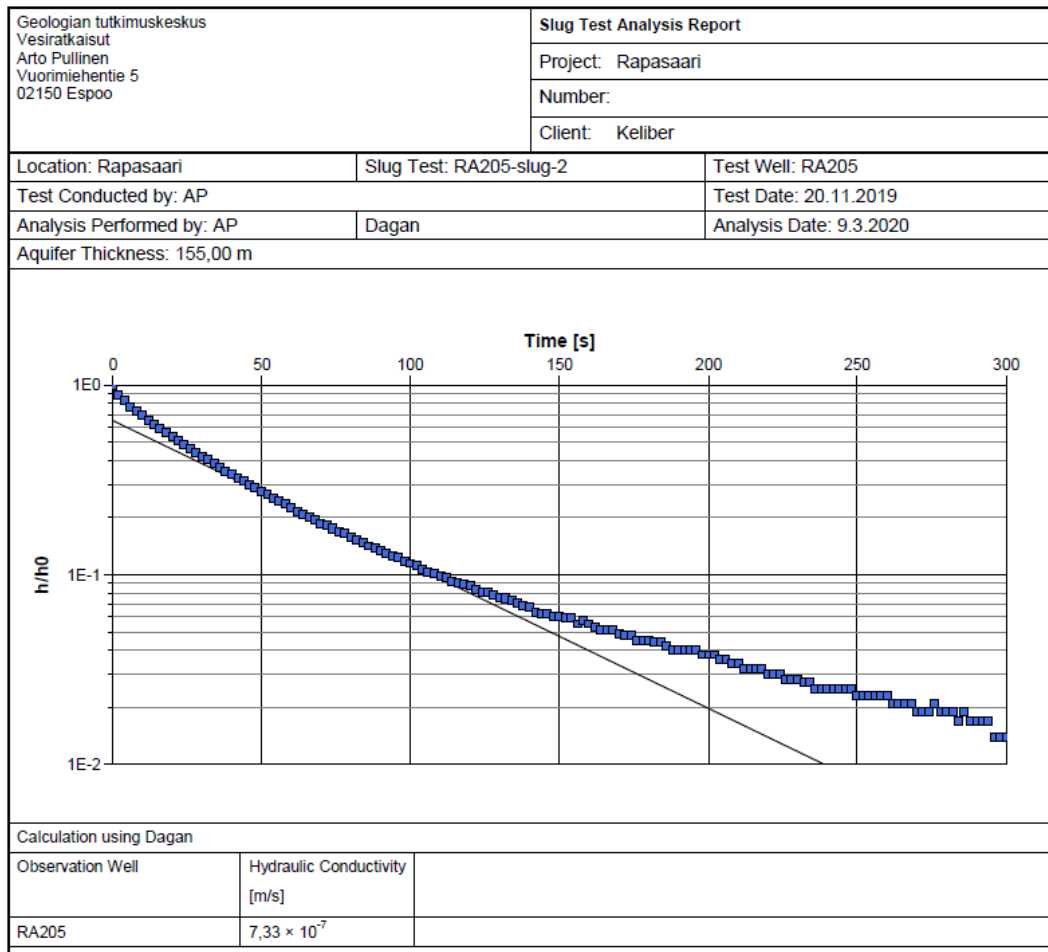
Kuva 55. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-204 (testi #2).

29.10.2020



Kuva 56. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareistä RA-205 (testi #1).

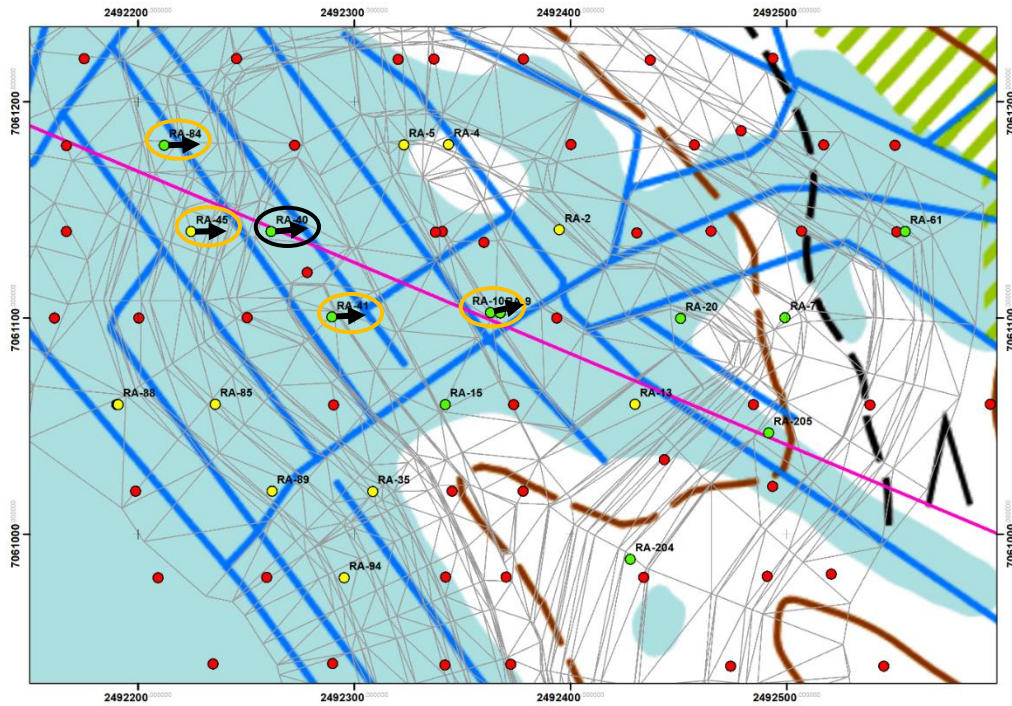
29.10.2020



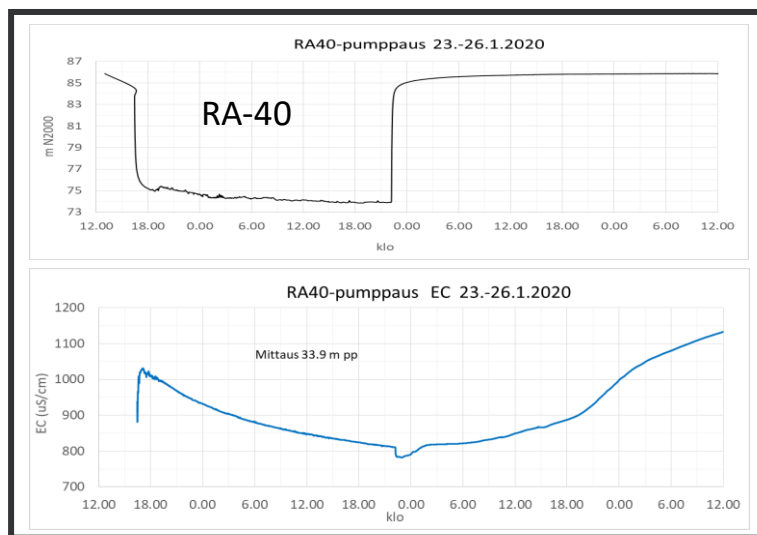
Kuva 57. Slug-testin tulokset ja K-arvon tulkinta kairareikästä RA-205 (testi #2).

29.10.2020

LIITE D PUMPPAUSKOKEIDEN TULOKSET

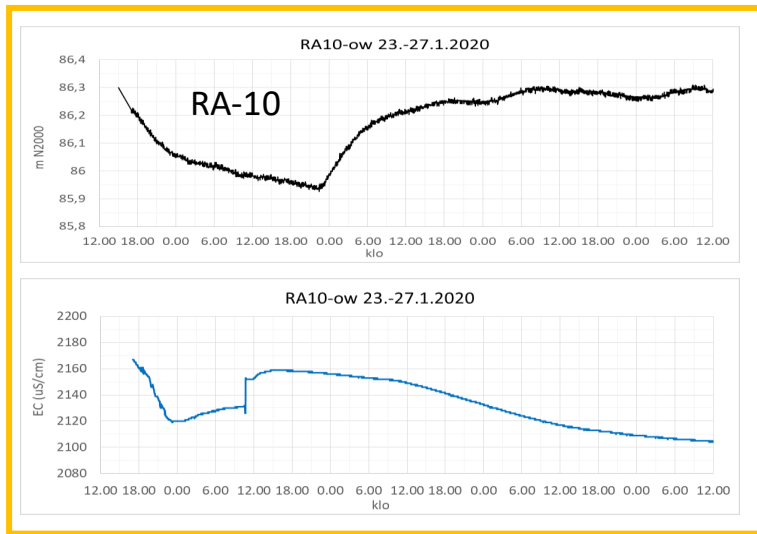


Kuva 58. Pumppauskoe kairareissä RA-40 (merkattu mustalla ympyrällä), monitorointi rei'issä RA-10, RA-41, RA-45 ja RA-84 (merkattu oransseilla ympyröillä). Kairareian inkliinaatio on esitetty nuolilla. Ruhjeyvyöhyke, VLF-R mittauksiin perustuen, on esitetty vaalean violetilla viivalla kuvan läpi.

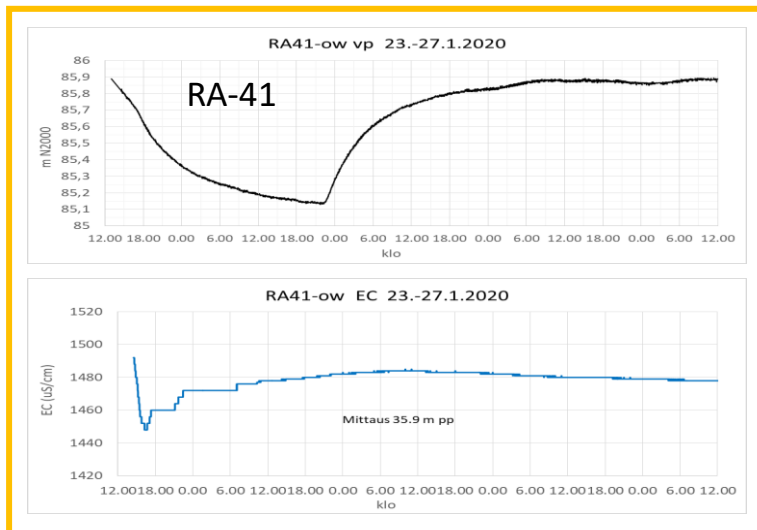


Kuva 59. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot pumppauskaivossa, RA-40.

29.10.2020

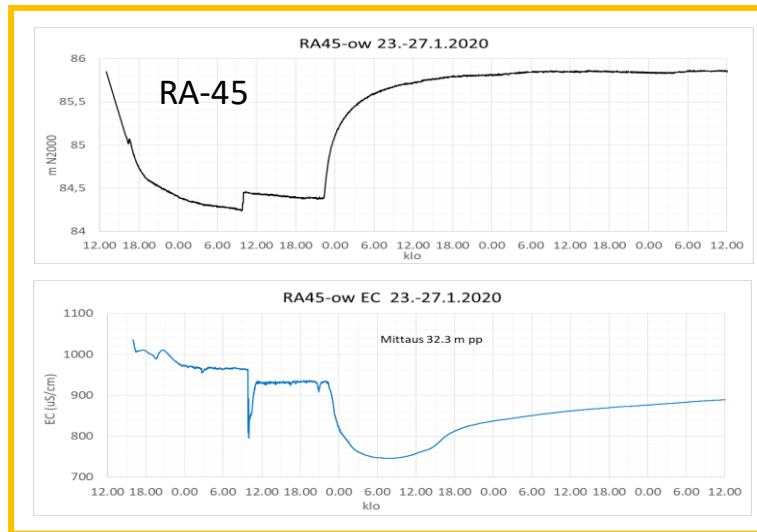


Kuva 60. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot monitorointikaivossa RA-10.

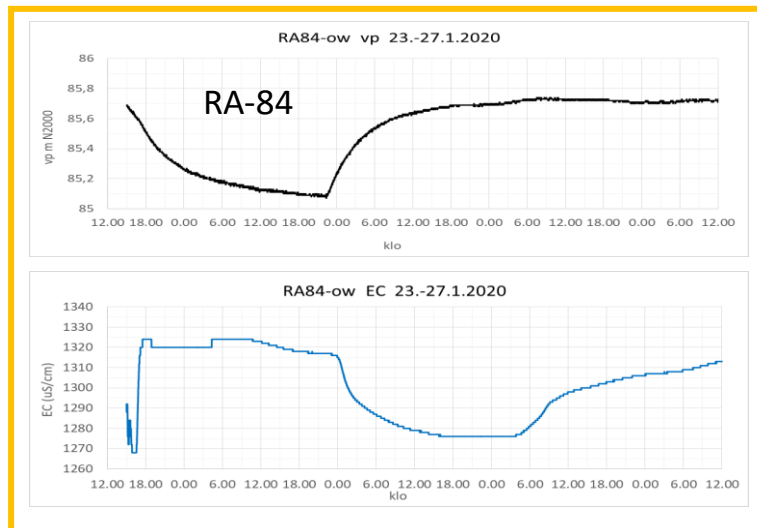


Kuva 61. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot monitorointikaivossa RA-41.

29.10.2020

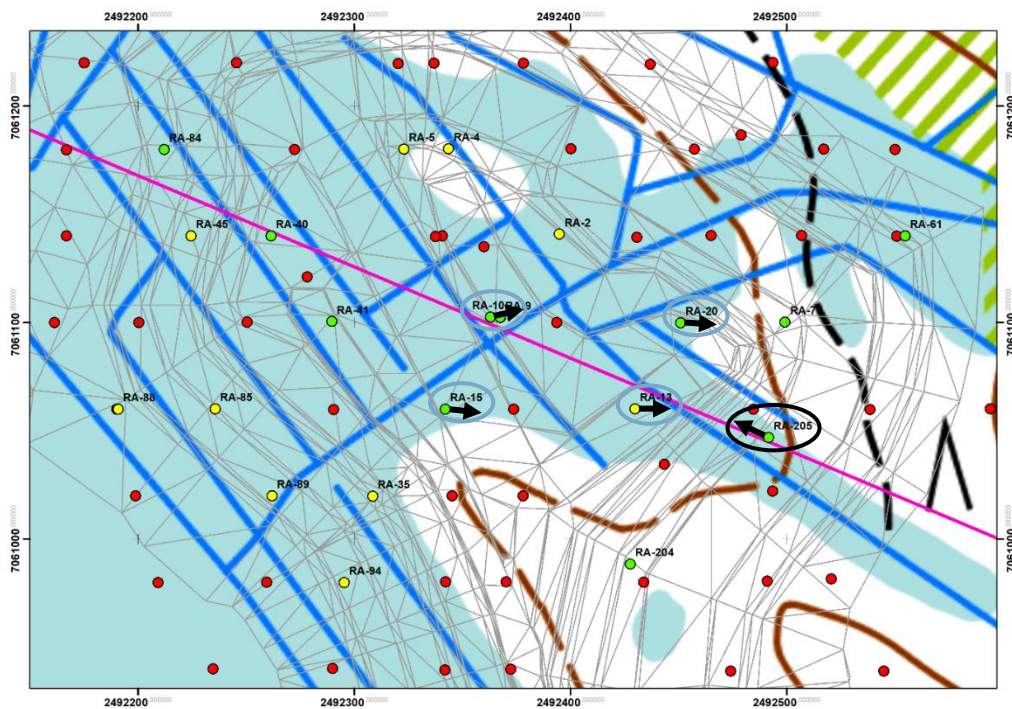


Kuva 62. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot monitorointikaivossa RA-45.

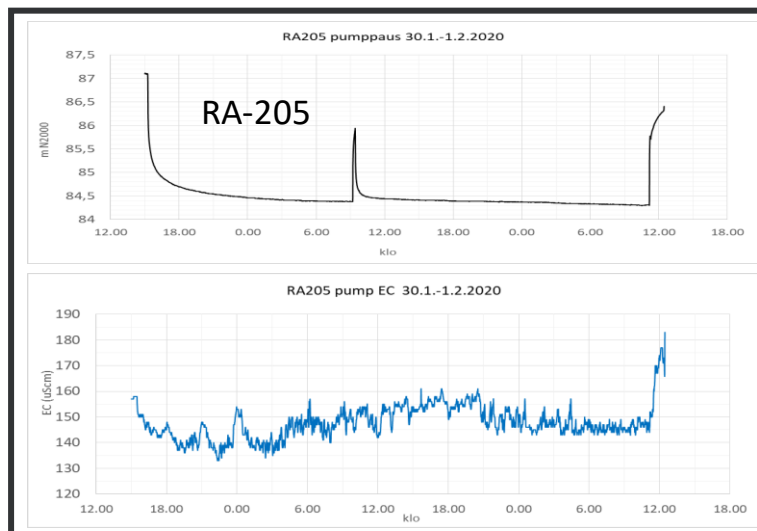


Kuva 63. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot monitorointikaivossa RA-84.

29.10.2020

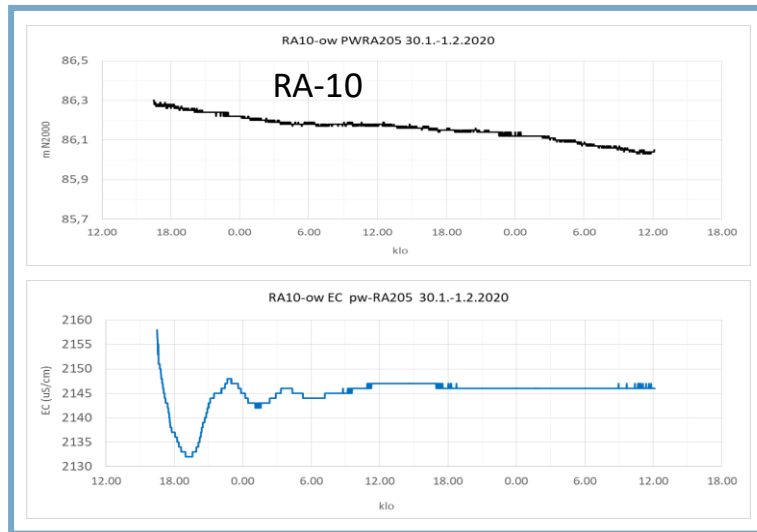


Kuva 64. Pumppauskoe kairareissä RA-205 (merkattu mustalla ympyrällä), monitorointi rei'issä RA-10, RA-15, RA-13 ja RA-20 (merkattu harmailla ympyrillä). Kairareiden inkliinaatio on esitetty nuolilla. Rujevyöhyke, VLF-R mittauksiin perustuen, on esitetty vaalean violetilla viivalla kuvan läpi.

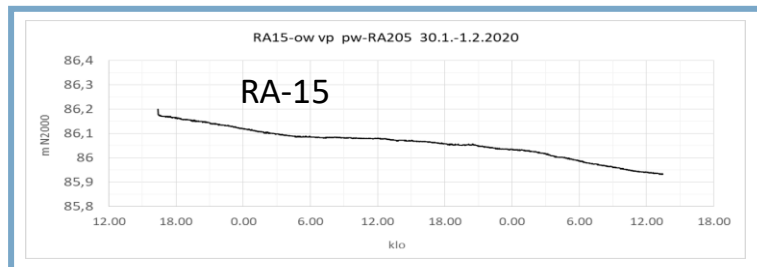


Kuva 65. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot pumppauskaivossa, RA-205.

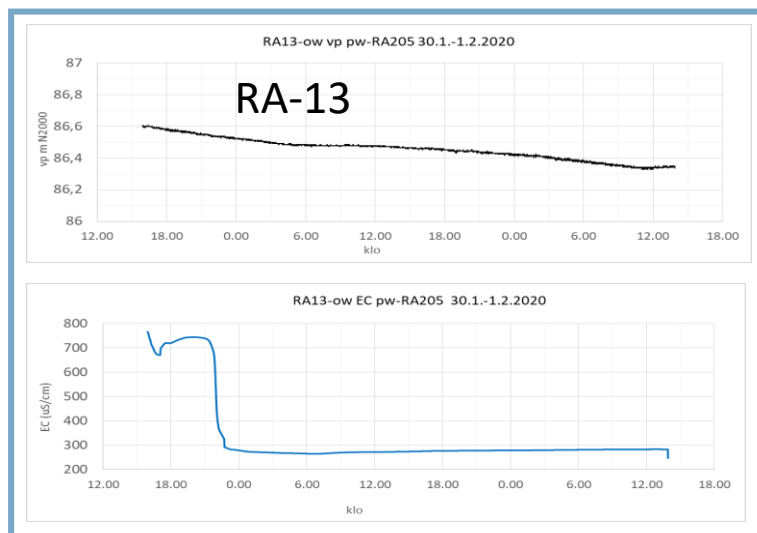
29.10.2020



Kuva 66. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot monitorointikaivossa RA-10.

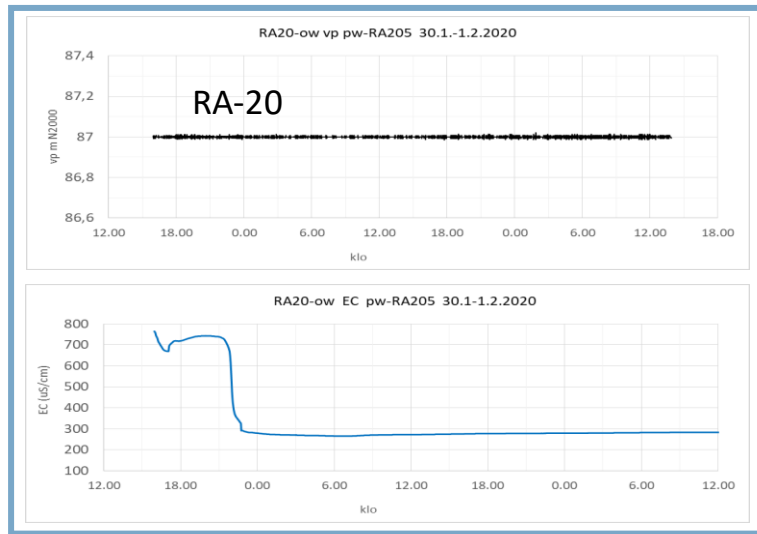


Kuva 67. Vedenpintahavainnot monitorointikaivossa RA-15. Sähkönjohtavuusmittauksia ei ollut saatavilla.



Kuva 68. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot monitorointikaivossa RA-13.

29.10.2020



Kuva 69. Vedenpinta- ja sähkönjohtavuushavainnot monitorointikaivossa RA-20.

29.10.2020

LIITE E VESIKEMIAN ANALYYSIEN TULOKSET

Vesikemian analyysien tulokset on annettu erillisessä excel-tilukossa 'Rapasaari water chemistry.xlsx'.