



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Rikastushiekkojen ja peittomateriaalien vedenpidätysominaisuuksien tutkiminen ja hyödyntäminen kaivannaisjätealueiden sulkemisratkaisuissa

Teemu Mölsä

Maaperägeologia

Pro gradu -tutkielma

Laajuus: 30 op

24.8.2025

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck –järjestelmällä

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maaperägeologia

Tekijä: Teemu Mölsä

Otsikko: Rikastushiekkojen ja peittomateriaalien vedenpidätysominaisuuksien tutkiminen ja hyödyntäminen kaivannaisjätealueiden sulkemiskäytöksissä

Ohjaajat: Eila Hietaharju, Teemu Karlsson, Muhammad Muniruzzaman

Sivumäärä: 60 sivua + liitteet 5 sivua

Päivämäärä: 24.8.2025

Sulfidimalmehin liittyvän kaivostoiminnan suurimpia haasteita ovat sulfidimineraalien hapettuminen ja niistä aiheutuvat happamat valumavedet, joita syntyy tyypillisesti kaivosten rikastushiekka-alueilla. Sopivien peittomateriaalien valinta on avainasemassa, kun halutaan ehkäistä kaivostoiminnasta aiheutuvia haitallisia ympäristövaikutuksia. Sekundääriset peittomateriaalit edistävät kestävästä kiertotaloudesta mallia, kun primääristen materiaalien käyttötarve vähenee.

Tutkimuksen taustalla ovat Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) SMARTT (2021-2024, GTK:n omarahoitteinen hanke), KAIVASU (2019-2021, Euroopan aluekehitysrahaston hanke A75259) ja SuWa (2024-2027, GTK:n omarahoitteinen hanke) -projektit. Näissä projekteissa on kehitetty ja kehitetään osaamista kaivannaisjätealueiden peittorakennetutkimuksissa, sekä niissä on pilotoitu erilaisten sekundääristen raaka-aineiden soveltuvuutta kaivannaisjätteen peittomateriaaliksi lysimetrikokein Särkiniemen ja Hituran kaivosalueilla. SMARTT-projektin yhteydessä Geologian tutkimuskeskukselle hankittiin HYPROP-2 ja KSAT-laitteistot vedenpidätys- ja -johtavuusominaisuuksien tutkimiseksi.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin Hituran kaivoksen rikastushiekan ja peittomateriaaleina käytetyn moreenin sekä sekundääristen kuitusavien vedenpidätys- ja vedenjohtavuusominaisuuksia HYPROP-2 ja KSAT-laitteistoilla. Tutkimuksen tarkoituksena oli arvioida laitteistojen soveltuvuutta peittorakennetutkimuksiin sekä kerätä tietoa tutkimuksessa mukana olleiden näytteiden hydrologisista ominaisuuksista. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että laitteistot soveltuvat peittorakennetutkimuksiin sekä eri materiaalien hydrologisten ominaisuuksien määrittämiseen. Laitteistojen käytössä korostui erityisesti niissä käytettävän veden laatu sekä HYPROP-2-laitteen onnistunut ilmaus.

Laitteistoilla kerätyn datan perusteella voitiin myös todeta, että Hituran rikastushiekka-alueella käytetyt peittomateriaalit soveltuvat mahdollisesti happea tuottavan rikastushiekan peittämiseen rajoittamalla hapen kulkeutumista rikastushiekkakerrokseen. Kuitusavista toinen jäi vedenjohtavuudeltaan alle vaaditun rajan alhaisen virtaaman peitoissa, mutta toimisi vettä pidättävänä kerroksena OPA-sakan tavoin korkean vedenpidätyskyvyn johdosta. Myös tutkimuksessa mukana ollut Hituran ulkopuolelinen orgaaninen aines soveltuisi hydrologisilta ominaisuuksiltaan peittorakenteeksi, korkean vedenpidätyskyvyn ja alhaisen vedenjohtavuuden johdosta. Lisäksi tutkimuksessa laitteistoilla kerättyä dataa pystyy hyödyntämään sellaisenaan hydrologisessa mallinnuksessa esimerkiksi HYDRUS-1D mallinnussovelluksessa.

Avainsanat: happamat suotovedet, peittomateriaalit, vedenpidätys, vedenjohtavuus, HYPROP-2, KSAT

Sisällys

1.	JOHDANTO	1
2.	HAPPAMAT KAIVOSVEDET JA PEITTORAKENTEET	2
2.1.	Happaman kaivosvaluman muodostuminen	2
2.2.	Happaman kaivosvalunnan ehkäisy ja hallinta	4
3.	AIEMMAT TUTKIMUKSET	6
4.	TUTKIMUSAINEISTO	8
4.1.	Hitura	8
4.2.	Näytteet	10
5.	TUTKIMUSMENETELMÄT	11
5.1.	Hyprop-2	11
5.1.1.	Veden valmistelu	11
5.1.2.	Näytteiden valmistelu ja saturointi	12
5.1.3.	Tensiometrien ja sensoriyksikön ilmaaminen	16
5.1.4.	Sensoriyksikön kalibrointi ja tensiometrien kiinnitys	20
5.1.5.	Sensoriyksikkö ja näyte	24
5.1.6.	Mittauksen aloitus	26
5.1.7.	Kuivapainon määrittäminen	27
5.2.	KSAT	28
5.2.1.	Laitteiston valmistelu	28
5.2.2.	Näytteiden ja huokoslevyn kyllästäminen	29
5.2.3.	Mittausyksikön kalibrointi	31
5.2.4.	Mittauksen aloitus	32
5.2.5.	Mittaus kapillaariputkea käyttäen	34
6.	TULOKSET JA TULOSTEN TULKINTA	34
6.1.	Raekokojakauman määrittäminen	34
6.2.	Rikastushiekan ja peittomateriaalien mittauskäyrät	35
6.2.1.	Rikastushiekka, häiriintymätön	37

6.2.2.	OPA-sakka	38
6.2.3.	Lysimetrien päällä oleva moreeni	39
6.2.4.	Kuitusavi	40
6.2.5.	Rikastushiekka peittämättömän lysimetrin sisältä	40
6.2.6.	Orgaaninen aines.....	41
6.3.	Optimointirutiini	42
6.4.	Rikastushiekan ja peittomateriaalien vedenpidätyskäyrät ja van Genuchten mallin α ja n parametrit	44
6.5.	Rikastushiekan ja peittomateriaalien vedenjohtavuusominaisuudet.....	47
6.5.1.	KSAT	47
6.5.2.	Rikastushiekka 1	47
6.5.3.	OPA-sakka	47
6.5.4.	Moreeni	48
6.5.5.	Kuitusavi	48
6.5.6.	Rikastushiekka 2	49
6.5.7.	Orgaaninen aines.....	49
6.6.	Vedenjohtavuuskäyrät ja laskennalliset K-arvot	50
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	53
8.	KIITOKSET.....	55
	KIRJALLISUUS.....	56
	LIITTEET	

1. JOHDANTO

Sulfidimalmeihin liittyvän kaivostoiminnan aiheuttamat haitalliset ympäristövaikutukset liittyvät useimmiten kaivannaisjätealueisiin, kuten rikastushiekka-altaisiin ja sivukivikasoihin. Näiltä alueilta usein muodostuvat happamat kaivosvalumat ovat seurausta sulfidimineraalien hapettumisesta. Oikein hoidettuna happamien kaivosvesien muodostumista voidaan ehkäistä esimerkiksi erilaisten peittoratkaisuiden muodossa. Peittorakenteiden ensisijaisena tarkoituksena on ehkäistä hapen ja veden kulkeutumista kaivannaisjätteeseen, joka puolestaan vähentää happaman kaivosvalunnan muodostumista. Peittorakenteilla pyritään myös ehkäisemään kaivannaisjätealueen pölyämistä, joka vaikuttaa ympäristön ilmanlaatuun ja maaperään.

Sopivien peittorakenteiden ja peittomateriaalien valinta on avainasemassa kaivosten sulkemiskäytöksissä, kun tavoitteena on pienentää kaivannaisjätteiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Sekundääristen peittomateriaalien käyttö vähentää primääristen raaka-aineiden tarvetta ja edistää näin kestävästi kierrätettyä kierrätettyä mallia.

Suunniteltaessa ja arvioitaessa peittorakenteiden toimivuutta, rakenteen ominaisuuksien mallinnus on keskeisessä roolissa. Hydrologisessa mallinnuksessa peittorakenteissa käytettyjen materiaalien vedenjohtavuus- ja vedenpidätysominaisuuksia ei usein mitata, ja malleissa käytetään arvoja kirjallisuudesta. Etenkin sekundääristen peittoainesten tapauksessa niiden vedenjohtavuus- ja vedenpidätysominaisuuksille ei välttämättä löydy kirjallisuutta, jolloin arvoja joudutaan mittaamaan.

Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena on selvittää Hituran kaivoksen rikastushiekan, sekä rikastushiekka-alueen peittomateriaaleina käytettyjen moreenin ja sekundääristen kuitusavien vedenpidätys- ja vedenjohtavuusominaisuuksia. Vertailun vuoksi tutkimuksessa tarkasteltiin myös täysin orgaanisesta aineksestä koostuvaa näytettä, joka ei liittynyt Hituran kaivokseen. Lisäksi tarkasteltiin yleisesti HYPROP-2 ja KSAT-laitteistojen soveltuvuutta tämän kaltaisiin tutkimuksiin. Työssä on kuvattu sekä HYPROP-2 että KSAT-laitteistojen käyttö ja arvioitu niillä saatujen tulosten soveltuvuutta peittorakennetutkimuksiin ja vedellä kyllästymättömien peittorakenteiden mallinnukseen.

Tutkimuksen taustalla ovat Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) SMARTT (2021–2024, GTK:n omarahoitteinen hanke), KAIVASU (2019–2021, Euroopan aluekehitysrahaston hanke A75259) ja SuWa (2024-2027, GTK:n omarahoitteinen hanke) -projektit. Näissä projekteissa on kehitetty osaamista kaivannaisjätealueiden peittorakennetutkimuksissa, sekä niissä on pilotoitu erilaisten sekundääristen raaka-aineiden soveltuvuutta kaivannaisjätteen peittomateriaaliksi lysimetrikokein Särkiniemen ja Hituran kaivosalueilla. SMARTT-projektissa Geologian

tutkimuskeskukselle hankittiin HYPROP-2 ja KSAT laitteistot ainesten vedenpidätysominaisuuksien tutkimiseksi. KAIVASU-projekti keskittyi erityisesti Hituran rikastushiekka-alueen peittorakenteiden tutkimiseen.

2. HAPPAMAT KAIVOSVEDET JA PEITTORAKENTEET

2.1. Happaman kaivosvaluman muodostuminen

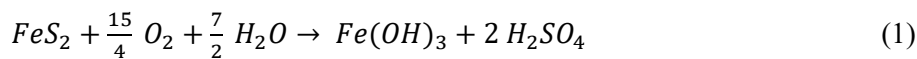
Sulfidimineraaleja ja niihin liittyviä malmiesiintymiä on hyödynnetty Suomessa jo ainakin 500 vuoden ajan (Toropainen 2006). Sulfidimineraalien louhintaan liittyviä ympäristövaikutuksia ei ole kuitenkaan osattu ottaa huomioon kuin vasta viimeisen vuosisadan aikana (Heikkinen 2009). Tornivaaran *et al.* (2020) mukaan puutteellisen lainsäädännön ja vanhanaikaisten käytäntöjen takia vanhoilla kaivos- ja jätealueilla etenkin sulkemistoimenpiteet on useimmiten toteutettu puutteellisesti tai niitä ei ole toteutettu ollenkaan, joka on puolestaan lisännyt haitallisia ympäristövaikutuksia.

Kaivosteollisuuden ja etenkin sulfidimalmeihin liittyvän kaivostoiminnan suurimpia haasteita ovat happamat suotovedet, joita muodostuu tyypillisesti kaivosalueen rikastushiekka-alueilla ja sivukivikasoissa sulfidien hapettumisen seurauksena (Hudson-Edwards *et al.* 2011). Sulfidien hapettuminen on luonnollinen prosessi, jota tapahtuu hiljalleen, kun eroosion seurauksena sulfidimineraaleja sisältävä kallioperä rapautuu ja altistuu ilmakehän hapettaville olosuhteille. Kaivostoiminta kuitenkin kiihdyttää prosessia merkittävästi, kun sulfidimineraaleja sisältävää kiviainesta louhitaan ja rikastetaan (Lottermoser 2017). Rikastusprosessin seurauksena syntyvä rikastushiekka läjitetään useimmiten kaivoksen läheisyyteen rikastushiekka-alueille. Rikastuksesta huolimatta, rikastushiekkaan jää useimmiten merkittäviäkin määriä sulfidimineraaleja, jotka alkavat tuottamaan happoa altistuessaan ilmakehän hapettaville olosuhteille (Toropainen 2006). Rikastushiekan lisäksi kaivostoiminnassa syntyy myös sivukiveä, jonka mineraalipitoisuus ei ole riittävä taloudellisen hyödyn kattamiseksi, jolloin se läjitetään useimmiten kaivosalueelle omiin kasoihinsa. Sulfidimalmikaivoksilla syntyvät sivukivet sisältävät yhtä lailla sulfidimineraaleja, ja ovat potentiaalisesti happamia kaivosvesiä tuottavia (Lottermoser 2009).

Sulfidimalmeihin liittyviltä kaivosalueilta peräisin olevista haitallisista suotovesistä on yleisesti käytetty termejä AMD (*acid mine drainage*) tai ARD (*acid rock drainage*) (Lottermoser 2009; Salomons 1995; Signer & Strumm 1970). Termi viittaa erityisesti sulfidimalmikaivosten kaivannaisjätealueilla, kuten rikastushiekka-altailla syntyvään happamaan valumaan, joka johtuu sulfidien hapontuottopotentialista. Happamat kaivosvedet sisältävät yleensä myös muita haitta-aineita, kuten raskasmetalleja, puolimetalleja ja suoloja. Happamuutensa seurauksena hapan kaivosvaluma edesauttaa metallien liukenemistä myös ympäröivistä kivistä (Kauppila *et al.* 2013). Yleisimpiä hapanta kaivosvalumaa aiheuttavia sulfidimineraaleja ovat erityisesti rikkikiisu

(FeS_2) ja magneetikiisu ($Fe_{0,83-1}S$), joita esiintyy lähes jokaisessa sulfidimalmikaivoksessa. (Salomons 1995; Morin & Hutt 2001; Kauppila *et al.* 2013; Karlsson *et al.* 2018;).

Happaman kaivosvalunnan muodostumiseen vaikuttavat monet tekijät, mutta pääasiallisena edellytyksenä voidaan pitää sitä, että happoa tuottavia mineraaleja (sulfidit) on suhteessa enemmän happoa neutraloiviin mineraaleihin, kuten karbonaatti- tai herkemmin rapautuviin silikaattimineraaleihin. (Salomons 1995; Lottermoser 2009). Tämän lisäksi merkittävänä tekijänä voidaan pitää myös saatavilla olevan hapen ja veden määrää. Nordströmin & Alpersin (1999) mukaan sulfidien ja erityisesti rikkikiisun hapettuminen ja rikkihapon muodostuminen voidaan esittää yksinkertaistettuna seuraavan reaktioyhtälön (1) mukaisesti, jossa rikkikiisun hapettumisen seurauksena syntyy ferrihydroksidia ja rikkihappoa.

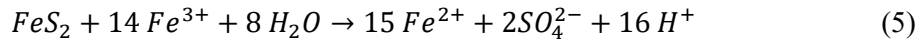
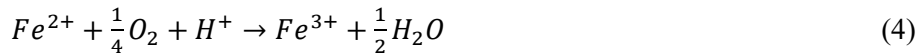
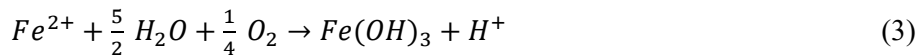
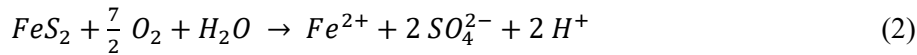


Reaktio 1. Yksinkertaistettu reaktioyhtälö rikkikiisun (FeS_2) hapettumisesta ja rikkihapon (H_2SO_4) muodostumisesta. Nordström & Alpers 1999.

Signerin ja Strummin (1970) sekä Kleinmanin *et al.* (1981) mukaan sulfidien hapettuminen on kuitenkin monivaiheinen sarja eri reaktioita, joihin vaikuttavat muun muassa saatavilla olevan hapen ja vapaiden Fe^{3+} -ionien määrä sekä liuoksen happamuus ja sähkönjohtavuus. Hapen voidaan kuitenkin olettaa toimivan reaktion käynnistävänä tekijänä hapettaessaan rikkikiisun muodostaen sulfaatteja (SO_4^{2-}) ja vapaita Fe^{2+} -ioneja (Reaktio 2). Kun reaktio on käynnistynyt vapaat Fe^{2+} -ionit hapettuvat edelleen muodostaen Fe^{3+} -ioneja. Tämän seurauksena rikkikiisu puolestaan pelkistää muodostuneita Fe^{3+} -ioneita takaisin alemmalle hapetustasolle tuottaen Fe^{2+} -ioneja ja happamuutta (H^+).

Heikkisen (2009) mukaan lähes neutraaleissa olosuhteissa liuoksen pH:n ollessa 6,5–7,5 hapen läsnäolon tärkeys hapettavana tekijänä korostuu, jolloin Fe^{3+} -ionit tyypillisesti saostuvat hydrolyysin seurauksena ferrihydroksideiksi ($Fe(OH)_3$), kuten götiitiksi, eivätkä enää osallistu sulfidien hapettamiseen (Reaktio 3). Tämä näkyy kaivosalueen ympäristöissä esiintyvissä vesissä esimerkiksi värjäytyminä ja ruosteisen värisinä saostumina.

Liuoksen pH:n laskiessa alle kolmen, raudan liukoisuus lisääntyy ja ferrihydroksidien saostuminen vähenee, jolloin Fe^{3+} -ioneiden määrä liuoksessa lisääntyy ja niistä muodostuu sulfidien pääasiallinen hapettava tekijä. Tällöin myös hapontuotto on korkeimmillaan (Reaktio 5).



Reaktio 2-5. Sarja yksinkertaistettuja reaktioita, joissa rikkikiisun hapettuminen ja hapon muodostuminen on kuvailtu yksityiskohtaisemmin. Signer & Strumm 1970, Kleinman et al. 1981.

Kauppilan *et al.* (2013) ja Lottermoserin (2009) mukaan kaivannaisjätealueet voidaan jakaa niiden hapontuottopotentiaalilin perusteella karkeasti kahteen luokkaan. Mikäli happoa tuottavia mineraaleja on suhteessa enemmän happoa neutraloiviin mineraaleihin, voidaan kaivannaisjätealue luokitella happoa tuottavaksi. Kun taas happoa neutraloivia mineraaleja on enemmän, kaivannaisjäte voidaan luokitella happoa tuottamattomaksi tai jopa alkaliseksi. Riippuen kaivannaisjätealueen mineralogiasta, suotovedet voivat kuitenkin sisältää ympäristöä kuormittavia haitta-aineita happamuudesta huolimatta. Tällöin käytetään usein termiä NMD (*neutral mine drainage*).

2.2. Happaman kaivosvalunnan ehkäisy ja hallinta

Kaivannaisjätealueilla muodostuvien happamien kaivosvaluntojen yhtenä merkittävimmistä ympäristövaikutuksista voidaan pitää pinta- ja pohjavesien pilaantumista. Vaikka kaivostoiminnan vaikutukset ovat suhteellisen paikallisia, happamien kaivosvesien kulkeutuminen esimerkiksi pintavesiä pitkin voi koskettaa laajojakin alueita (Salomons 1995). Päättyessään vesistöön, hapan kaivosvaluma vaikuttaa negatiivisesti muun muassa lähialueen eliöstöön ja kasvillisuuteen sekä lisää haitta-ainepitoisuuksia, jolloin esimerkiksi vesienkäyttöä voidaan joutua rajoittamaan. Tästä johtuen oikeanlaisten menetelmien käyttö on avainasemassa kaivannaisjätealueiden sulkemistratkeisissa.

Kivipellon *et al.* (2020) mukaan Suomessa kaivostoimintaa ja siitä aiheutuvia ympäristövaikutuksia ohjaa nykyään muun muassa Euroopan unionin kaivannaisjätedirektiivi, kaivoslaki, ympäristölainsäädäntö ja ympäristölupamenettely, jolloin esimerkiksi kaivostoiminnasta aiheutuvien kaivannaisjätealueiden sijainti ja rakenteet tulee ottaa huomioon jo ennen kaivoksen rakentamista. Heikkisen *et al.* (2008) mukaan kaivostoiminnan päätyttyä, ympäristönsuojelulain mukaisesti kaivosalue ja erityisesti kaivannaisjätealueet tulee sulkea menetelmillä, jotka muun muassa estävät haitallisten suotovesien muodostumisen ja päätyminen ympäristöön.

synteettisiä. Synteettisiin aineksiin lukeutuvat muun muassa erilaiset polyeteenivalmisteet, joita voidaan käyttää yhdessä bentoniitin kanssa.

Kaivannaisjätteiden peittämiseen voidaan vaihtoehtoisesti käyttää myös märkä- tai vesipeittoja. Vesipeittoa käytettäessä, kaivannaisjäte peitetään kokonaisuudessaan vedellä, jolloin hapen kulkeutuminen kaivannaisjätteeseen vähenee. Lottermoserin (2009) mukaan vesipeiton toimintatapa perustuu hapen alhaiseen liukoisuuteen vedessä, joka on kolme kertaa ilmakehän olosuhteita pienempi. Kun saatavilla oleva happi on kulutettu loppuun, muodostuu käytännössä täysin hapeton kerros, joka eristää kaivannaisjättemateriaalin ja ehkäisee sulfidimineraalien hapettumisen. Vesipeitot ovat erinomainen keino ehkäistä myös kaivannaisjätteen eroosiota. Kivipellon *et al.* (2020) mukaan vesipeiton ollessa matalampi, kaivannaisjäte voidaan vielä peittää esimerkiksi hienoainesmoreenilla. Haitallinen kaivannaisjäte voidaan myös peittää märkäpeitolla vesipeiton tavoin. Märkäpeitossa kaivannaisjäte kyllästetään vedellä, jonka jälkeen muodostuneen vesikerroksen pinnalle lisätään orgaanista ainesta happea kuluttavan kuivapeiton tapaisesti, joka vähentää kaivannaisjätteeseen päätyvän hapen määrää. Vesipeiton haasteina on kuitenkin se, etteivät ne sovellu sivukivikasojen tai vettä suotavien rikastushiekka-alueiden peittämiseen.

3. AIEMMAT TUTKIMUKSET

Mahdollisten peittokerrosten ja niissä käytettävien materiaalien hydrologisia ominaisuuksia arvioitaessa suurimpana ongelmana on usein datan vähyys, jolloin joudutaan käyttämään arvoja kirjallisuudesta. Etenkin veden virtausta mallinnettaessa vaihtelevasti kyllästyneissä maa-aineksissa van Genuchtenin mallin α ja n parametrien (Yhtälö 6) määrittäminen on usein hankalaa datan niukkuuden vuoksi. Peche *et al.* (2024) ovat esitelleet tutkimuksessaan matemaattisen mallin, joka arvioi van Genuchtenin muuttujien α ja n arvot pelkästään kyllästetyn hydraulisen johtavuuden K -arvon perusteella. Tutkimuksessa matemaattinen malli kehitettiin olemassa olevan datajoukon perusteella, jolloin mallin tuottamat tulokset viittasivat tarkkoihin arvoihin α ja n -parametrien keskiarvoista. Jotta matemaattisen mallin käytön sovellus helpottuisi, malli integroitiin ilmaiseen HYPAGS-sovellukseen, joka mahdollistaa $\alpha:n$ ja $n:n$ laskemisen mitatun K -arvon perusteella.

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_r - \theta_s}{[1 + (ah)^n]^{1-1/n}} \quad (6)$$

Yhtälö 6. Van Genuchtenin yhtälö, jossa θ_s kyllästynyt vesimäärä, θ_r jäännösveden määrä, h kapillaarivoima, a ja n mallin istuvuusparametrejä, jotka useimmiten joudutaan määrittämään mittauksilla. (van Genuchten *et al.* 1991)

Usowicz *et al.* (2024) ovat puolestaan tutkineet van Genuchten –mallin soveltuvuutta maaperän vedenpidätyskyvyn ja hydrologisten ominaisuuksien ennustamiseen eri maaperätyypeissä.

Tutkimuksessa kerättiin ja analysoitiin yhteensä 100 maaperänäytettä eri puolilta keski- ja kaakkois-Puolaa, jotka edustivat syntyvalttaan kahdeksaa eri maaperätyyppiä. Van Genuchten mallin soveltamiseksi kerätyille maaperänäytteille määritettiin vedenpidätyskäyrät (SWCR, *soil water retention curve*) ja vedenjohtavuuden K-arvot. Tutkimuksessa kävi ilmi, että maaperänäytteiden tekstuurilla oli maaperän syntytapaa suurempi vaikutus van Genuchten –mallin parametreihin. Hydrauliset parametrit olivat merkittävästi suurempia hienopirakeisissa maaperänäytteissä. Tutkimuksen perusteella van Genuchten –mallia voidaan käyttää mitatun vedenpidätyksen kanssa, jolloin malli pystyy ennustamaan vedenpidätyskäyrän eri maaperätyypeille.

Gorakhki ja Bareither (2017) ovat tutkineet kokonaishaihduntaan perustuvia vesitasepeittoja, joissa peittorakenteiden hypoteettisina materiaaleina käytettiin kaivosteollisuudessa syntyvää rikastushiekkaa ja sivukiveä. Tutkimuksen oletuksena oli kuitenkin se, että peittorakenteessa käytettävät materiaalit eivät itsessään aiheuta esimerkiksi metallien liukenemistä. Tutkimuksessa peittorakenteen tarkoituksena oli toimia vettä pidättävänä kerroksena, joka estää sadeveden ja hapen suotautumisen jätekerrokseen. Tutkimuksessa mallinnettiin jo olemassa olevan normaalin vesitasepeiton ja teoreettisen rikastushiekasta ja sivukivestä koostuvan peittokerroksen hydrologisia ominaisuuksia yksiulotteisella numeerisella mallilla. Hypoteettisen peiton koostumuksesta luotiin kolme mallia, joissa yhdessä vesitasekerros korvattiin pelkästään rikastushiekalla. Toisessa mallissa peittokerros koostui rikastushiekasta ja sivukivestä, jolloin arvioitiin sivukiven lisäyksen vaikutusta peittomateriaalin vedenpidätysominaisuuksiin. Kolmannessa mallissa toisen mallin paksuutta säädeltiin vastaamaan alkuperäisen jo olemassa olevan vesitasepeiton vettä pidättävän kerroksen hydrologisia ominaisuuksia.

Gorakhin ja Bairetherin (2017) tutkimuksessa kävi ilmi, että pelkästään rikastushiekkaa sisältävä peittokerros vastasi alkuperäisen luonnollisen peittokerroksen vuotuista suotautumisnopeutta ja suotautumisnopeus oli jopa pienempi, kun rikastushiekan savipitoisuus oli korkeampi ja vedenjohtavuus alhaisempi. Vedenjohtavuuden kasvaessa suotautuvan veden määrä kasvoi, mutta toisaalta myös kokonaishaihdunta oli suurempi. Sivukiven lisääminen rikastushiekasta koostuvaan peittorakenteeseen lisäsi veden suotautumista, kun peittorakenteen paksuus oli muuttumaton, jolloin vettä pidättävän osuuden tilavuus pieneni. Tätä kompensoitiin mallinnuksessa nostamalla sivukiveä sisältävän peittorakenteen paksuutta, jolloin sen hydrologiset ominaisuudet vastasivat pelkästään rikastushiekkaa sisältävää peittorakennetta. Tutkimuksen perusteella rikastushiekkaa ja sivukiveä olisi mahdollista käyttää vesitasepeittorakenteissa etenkin kuivilla ja puolikuivilla alueilla, jolloin kaivosteollisuudessa syntyvää jätettä pystyttäisiin hyötykäyttämään.

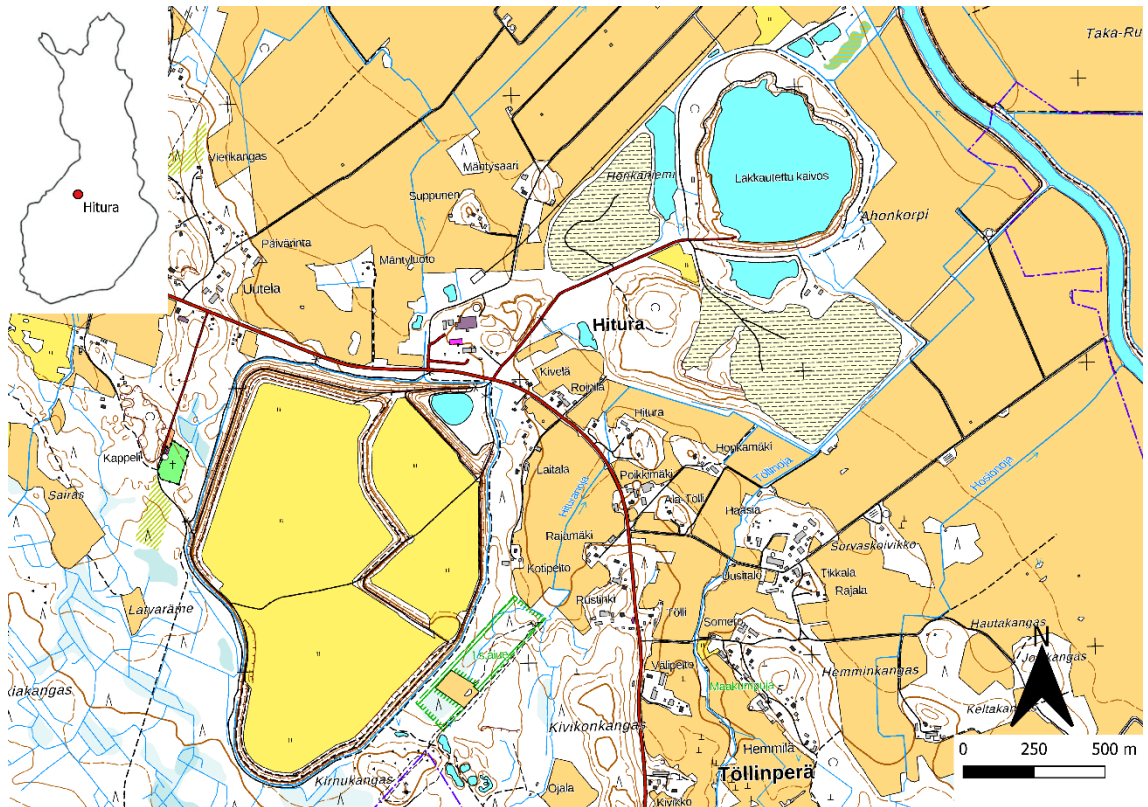
Argunhan-Atalay ja Yazicigil (2017) ovat tutkineet ja mallintaneet erilaisten peittoratkaisuiden soveltuvuutta Kışladağın kultakaivoksen sivukivialueelle Turkissa. Tutkimuksessa käytettiin ilmaisia SEEP/W ja VADOSE/W mallinnussovelluksia mallintamaan veden virtausta kyllästymättömissä ja kyllästyneissä maa-aineksissa ja arvioitiin eri peittorakenteiden käyttäytymistä. Peittorakenteet koostuivat niin sanotusta *store-and-release* peitosta, jonka tarkoitus on pidättää vettä sateisina kausina ja vapauttaa vettä haihtumisen muodossa kuivempina kausina. Tämän lisäksi tutkimuksessa mallinnettiin yksi- ja kaksikerros kapillaaripeittojen käyttäytymistä kyllästymättömissä olosuhteissa. Kaivoksen sivukivialueen pohjana toimii kallioperä, jolloin tutkimuksessa mallinnettiin ensin sivukiven läpi suotautuvan veden määrää ilman peittorakenteita. Tutkimuksessa huomattiin, että suotautuvan veden määrä oli merkittävä, jolloin iso osa siitä päätyi kallioperän kautta pohjaveteen. Jokaisen mallinnetun peittorakenteen kuitenkin huomattiin ehkäisevän merkittävästi sivukiveen suotautuvan veden määrää. Tutkimuksen perusteella kaikki mallinnetut peittorakenteet soveltuisivat sivukiven peittämiseen, mutta tutkimusalueella olevien saatavien materiaalien perusteella *store-and-release* tyylinen peittoratkaisu oli soveliaain.

Aiempien tutkimusten perustella voidaan todeta hydrologisen mallinnuksen olevan keskeisessä roolissa etenkin silloin, kun suunnitellaan kaivannaisjätealueiden peittoratkaisuja. Mallinnukseen vaadittavien van Genuchten mallin α ja n -parametrien määrittäminen korostuu etenkin silloin, kun sulkemistarkaisuihin suunniteltujen sekundääristen peittomateriaalien hydrologisista ominaisuuksista ei välttämättä löydy tietoa kirjallisuudesta.

4. TUTKIMUSAINEISTO

4.1. Hitura

Hituran suljettu kaivos sijaitsee Nivalassa, Pohjois-Pohjanmaalla (Kuva 1). Elinkaarensa aikana, kaivokselta louhittiin päätuotteina nikkeliä ja kuparia ultramafisesta sulfidimalmiosta. Kaivoksen historia ulottuu 1970-luvulle, jolloin kaivostoiminta alkoi avolouhoksena ja siirtyi 1990-luvun alkupuolella hiljattain maanalaiseen louhintaan (Tornivaara *et al.* 2018). Historiansa aikana, kaivos oli useassa omistuksessa, kunnes viimeinen kaivosyhtiö julistettiin konkurssiin vuonna 2015, jolloin kaivoksen lopullinen sulkeminen aloitettiin (Karlsson *et al.* 2017).



Kuva 1. Hituran kaivosalue. Kartassa rikastushiekka-alue sijaitsee lounaaseen varsinaisesta kaivoksesta. Maanmittauslaitos 04/2025.

Toimintansa aikana, Hituran kaivokselta louhittiin malmia kokonaisuudessaan 17,2 Mt. Sivukiveä toiminnan aikana syntyi noin 7 Mt, joka on sijoitettu kahteen erilliseen kasaan, kivilajien rikki- ja sulfidimineraalipitoisuuksien perusteella. Sivukiven lisäksi rikastushiekkaa syntyi noin 15 Mt, joka on puolestaan läjitetty kaivoksen lounaispuolelle omaan kasaansa (Tornivaara *et al.* 2018). Toropaisen ja Heikkisen (2006) mukaan rikastushiekka sisältää joissain määrin happoa tuottavia sulfidimineraaleja, mutta myös raskasmetallipitoisia sulfidimineraaleja.

Vuonna 2016, Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus otti vastuulleen kaivoksen sulkemisen valmistelun. Sulkemissuunnitelman keskeisin osa oli rikastushiekka-aldaiden peittäminen, jolla pyrittiin estämään sadevesien suotautuminen sulfidipitoisen rikastushiekkan läpi. (ELY-keskuksen tiedote 2016). Sulkemistöiden ensimmäisessä vaiheessa vuosina 2017–2018 rikastushiekka-alueesta peitettiin osa. Sulkemisvaiheen toinen osa toteutettiin vuosina 2019–2022, jolloin peitettiin loput rikastushiekka-alueesta (Tornivaara *et al.* 2018).

Sulkemisen yhteydessä, vuosina 2019–2021 toteutettiin Oulun yliopiston, Geologian tutkimuskeskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen yhteistyönä toteuttama EAKR-rahoitteinen KAIVASU-hanke. Osana hanketta oli tarkoitus tutkia sekundääristen raaka-aineiden hyötykäyttöä sulkemistratkeisissa, esimerkiksi peittorakenteiden muodossa (Oulun yliopisto 2018). Tästä syystä Hituran rikastushiekka-alue on valikoitunut myös tämän tutkielman kohteeksi.

4.2. Näytteet

Näytteenotto suoritettiin Geologian tutkimuskeskuksen erikoistutkija Teemu Karlssonin toimesta marraskuussa 2022. Tutkimusaineisto kerättiin Hituran kaivoksen rikastushiekka-alueen materiaaleista. Häiriintymättömiä näytteitä varten näytteenotossa käytettiin HYPROP-2 laitteiston mukana tulleita näytesylintereitä, jotka painettiin haluttuihin materiaaleihin (Kuva 2). Rikastushiekka-altaan moreenista ei saatu otettua häiriintymätöntä näytettä sen kivisyyden vuoksi, jolloin näyte kerättiin irtonaisena pussiin HYPROP-näytesylinterin myöhempää manuaalista täyttämistä varten.

Rikastushiekkaa kerättiin myös lysimetrien sisältä. Tämän lisäksi tutkimusta varten näytteitä kerättiin Hituran rikastushiekka-alueella käytetyistä OPA-sakasta ja Ääneskosken kuitusavesta. Vertailun vuoksi, Hituran näytteiden lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin täysin orgaanisesta aineksestä koostuvaa näytettä, joka oli peräisin energiantuotannon sivuvirroista.



Kuva 2. Rikastushiekka-altaan reunalta kerätty häiriintymätön näyte rikastushiekasta. Kuva: Teemu Karlsson GTK

5. TUTKIMUSMENETELMÄT

5.1. Hyprop-2

Tutkimuksessa ensimmäinen mukana olleista mittauslaitteista oli Meter Group GmbH valmistama mittausjärjestelmä HYPROP-2, (*Hydraulic Property Analyzer*), joka on tarkoitettu maaperänäytteiden vedenpidätyskyvyn ja hydraulisen johtavuuden mittaamiseen vedenjännityksen ja vesipitoisuuden funktiona (Meter Group Hyprop-Manual 2024). Mittausjärjestelmän toimintatapa perustuu haihdutusmenetelmään, jossa laitteiston kaksi tensiometriä mittaavat vedellä kyllästetyn näytteen vedenpainetta ja vesipitoisuutta suhteessa aikaan, jolloin mittauksissa kerätyn datan perusteella voidaan tuottaa vedenpidätyskäyriä eri materiaaleille (Shokrana & Ghane 2020).

Mittausjärjestelmä ja sen käyttöön liittyvät yksiköt koostuvat kokonaisuudessaan neljästä instrumentista ja vaa'asta (Kuva 3). Kun instrumentit kytketään yhteen, muodostuu laitteen käyttöönottoon vaadittava kokonaisuus. Tässä tutkimuksessa HYPROP-2 mittalaitteistolla oli tarkoitus tutkia näytteiden vedenpidätysominaisuuksia, joiden perusteella kullekin näytteelle määritettiin van Genuchten mallin α ja n muuttujat.



Kuva 3. HYPROP-2 mittausjärjestelmän instrumentit. Kuvassa vasemmalta oikealle, vakuumpullo ja manometri, dekanteriyksikkö, joissa suoritetaan tensiometrien ilmaus, varsinainen sensoryyksikkö ja siinä kiinni oleva täyttöadapteri ilmausta varten, vaaka sekä suuritehoinen vakuumpumppu. Tutkimukseen hankittiin myös ajastimella toimiva kytkin, joka kontrolloi vakuumpumpun toimintaa. Kuva: Teemu Mölsä

5.1.1. Veden valmistelu

Jotta mittausjärjestelmä toimii oikealla tavalla ja saatavat tulokset olisivat mahdollisimman luotettavia ja yhdenmukaisia, tulee laitteiston käytön aikana käyttää tislattua vettä. On tärkeää, että mittaukseen käytettävässä vedessä olisi mahdollisimman vähän liuenneita kaasuja kuten happea. Tätä varten tutkimuksessa käytössä oli 5000 millilitran dekanterilasi, joka täytettiin tislatulla vedellä. Ylimääräisen liuennon hapen poistamiseksi, vettä keitettiin yksinkertaisen keittolevyn päällä, kunnes vesi oli kiehunut 10 minuutin ajan (Kuva 4). Tämän jälkeen veden annettiin jäähtyä lähelle huoneenlämpöä. Tutkimuksen mittausten ajankohta osui talvelle, jolloin

veden jäähtymiseen pystyttiin hyödyntämään lumihankea, johon dekanterilasi asetettiin jäähtymään. Laitteiston käyttöohjeista ei käynyt ilmi sitä, kuinka paljon vettä laitteiston käyttämiseen vaadittiin. Tutkimuksen perusteella onkin suositeltavaa, että vettä valmistellaan kerralla tarpeeksi, sillä näytteiden määrästä riippuen, näytteiden kyllästämiseen kuluu melko runsaasti vettä. Tutkimuksessa näytteitä oli yhteensä kuusi kappaletta, joista jokaista näytettä varten valmisteltiin 5000 ml tislattua vettä. Tutkimuksen aikana tämän määrän todettiin olevan riittävä.



Kuva 4. Tislattua vettä keitettiin 10 minuutin ajan 5000 millilitran dekanterilasissa liuenneen hapen poistamiseksi ja sen annettiin jäähtyä huoneenlämpöiseksi. Kuva: Teemu Mölsä.

5.1.2. Näytteiden valmistelu ja saturointi

Kun tarvittava vesi oli valmisteltu, seuraavana työvaiheena oli ajankäytön kannalta suositeltavaa valmistella näytteet ja niiden kyllästämisen. Näytteiden valmisteluun on kaksi tapaa. Tässä tutkimuksessa, osa näytteistä oli jo näytteenottovaiheessa täytetty valmiiksi niille tarkoitettuihin näytesylintereihin. Mikäli näyte asetetaan näytesylinteriin manuaalisesti vasta näytteenoton jälkeen, tulisi se tehdä seuraavaksi. Alla olevan taulukon (Taulukko 1) perusteella voidaan arvioida, kuinka kauan tietynlaisen materiaalin saturointi kestää ja kuinka paljon aikaa tulee varata kyllästämiseen.

Taulukko 1. Tutkimuksessa havaittuja saturointiaikoja eri näytteille. Muokattu: Meter Group HYPROP-manual 2024.

Materiaali	Saturoitunut
Rikastushiekat	Noin 15 minuuttia
OPA-sakka	Noin 24 tuntia
Moreeni	Noin 48 tuntia
Kuitusavi	Noin 10 tuntia
Orgaaninen aines	Noin 23 tuntia

Mittauksen kannalta ei ole merkitystä, onko näyte jo valmiina näytesylinterissä vai lisätäänkö se manuaalisesti vasta jälkikäteen. Molemmissa tapauksissa on kuitenkin tärkeää, että näytesylinteri on täynnä ja sylinterissä olevan näytteen molemmat pinnat, sekä ylä- ja alapuoli, ovat tasaisia, sillä kaikki mittausjärjestelmän suorittamat laskutoimitukset perustuvat näytesylinterin tunnettuun tilavuuteen.

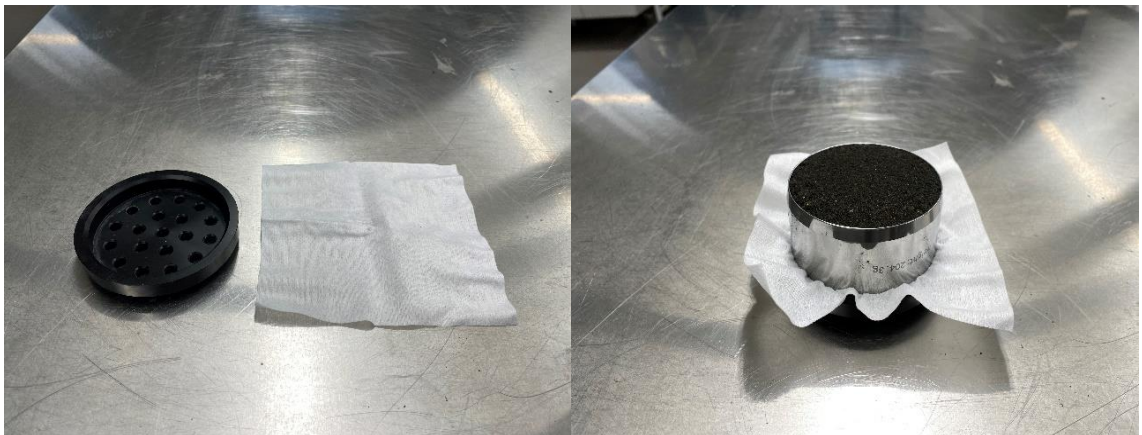
Osa tutkimuksessa käytetyistä näytteistä täytettiin manuaalisesti näytesylintereihin käsin, jolloin kyseessä oli häiriintynyt näyte. Kun näytteitä valmistellaan manuaalisesti, on tärkeää, ettei täyttövaiheessa kerrosten väliin jäisi ilmataskuja. Tutkimuksessa tämä vältettiin täyttämällä näytesylinterit vaiheittain pienissä osissa. Täyttöjen välissä sylinterissä olevan materiaalin pintaa rikottiin, jotta näyte olisi mahdollisimman homogeeninen. Tässä tutkimuksessa näytesylinterit täytettiin viidessä kerroksessa, tiivistäen näytettä jokaisen kerroksen välissä, kunnes näytesylinteri oli täynnä.

Näytteen pinnat tasoitettiin muurauslastan avulla siten, että näytteen pinta oli tasainen sylinterin molemmin puolin (Kuva 5). Pintoja tasoittaessa, tulisi käyttää varovaisuutta siinä mielessä, etteivät näytteen pinnat häiriinny, jolloin näytteen pintojen huokosrakenne pysyisi mahdollisimman luonnollisena. Tutkimuksessa käytetty muurauslasta osoittautui tähän käyttötarkoitukseen liian leveäksi ja tylpäksi ja pintojen tasoittamiseen olisikin suositeltavaa käyttää kapeampaa sahalaitaista veistä.



Kuva 5. Häiriintyneet näytteet valmistettiin identtisin tavoin, täyttämällä näytesylinterit vaiheittain viidessä kerroksessa tiivistäen ja pinnat tasoitettiin varovasti muurauslastan avulla. Kuva: Teemu Mölsä

Kun näytteet oli valmisteltu, seuraavana vaiheena oli niiden kyllästäminen vedellä. Saturointia varten, mittauslaitteiston mukana tuli kyllästämiseen tarkoitettu saturointilevy. Näytesylinterin ja saturointilevyn väliin asetettiin palanen kuitukangasta estämään näytteen valumista pois näytesylinteristä (Kuva 6). Näyte tuli asettaa saturointilevyyn siten, että näytesylinterin terävä puoli osoittaa ylöspäin. Tämä yksinkertaistaa sensoriyksikön asettamista näytesylinteriin myöhemmin.



Kuva 6. Tutkimuksessa saturointilevyn kanssa käytettiin normaalia tavarataloista saatavaa vettä läpäisevää kuitukangasta. Kuva: Teemu Mölsä

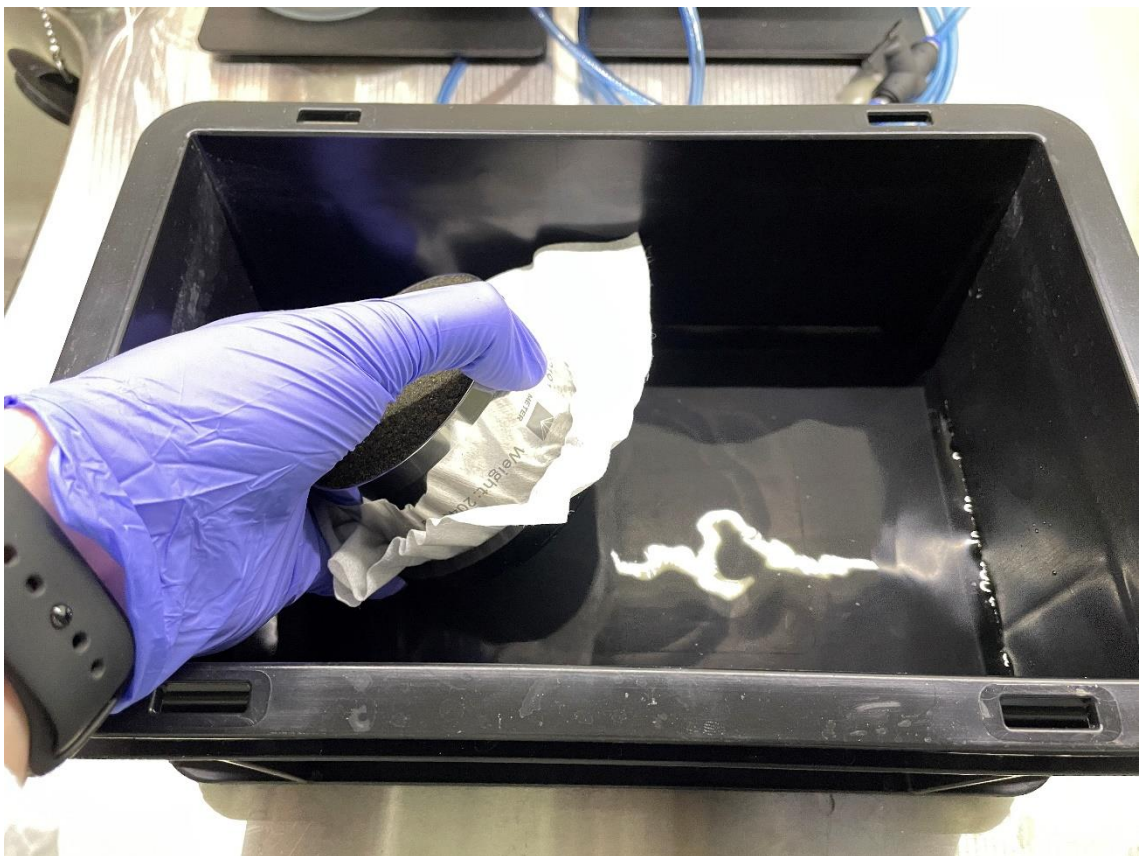
Laitevalmistaja on päivittänyt mittausjärjestelmän käyttöohjeita mittausajankohdan jälkeen siten, että mikäli tutkittava materiaalin rakenne sisältää epätasaisuuksia, kuten kiviä, tulisi niiden viemä tilavuus ottaa huomioon. Tätä ei kuitenkaan otettu mittausajankohtana huomioon. Toisaalta tutkittavista materiaaleista moreeninäyte oli ainoa, joka oli vähemmän homogeeninen.

Saturointia varten, tutkimuksessa käytettiin mittausjärjestelmän mukana tullutta muoviastiaa (Kuva 7). Astialla tai sen koolla ei tutkimuksen kannalta ole merkitystä. Tärkeintä oli, että näyte pystyttiin asettamaan ja poistamaan astiasta ongelmitta. Mikäli näytteitä halutaan saturoida useampi kerrallaan, käyttöön olisi suositeltavaa varata mahdollisimman suuri astia, johon

saturointia varten valmistellut näytteet mahtuvat. Laitteiston mukana tulleeeseen astiaan mahtui korkeintaan kaksi näytettä samanaikaisesti.

Ennen näytteen asettamista, muoviasiaan tuli kaataa aiemmin valmisteltua vettä siten, että veden pinta oli noin kaksi senttimetriä astian pohjasta. Tähänkin laitevalmistaja oli päivittänyt käyttöohjeitaan siten, että saturointiin voi halutessa käyttää huoneenlämpöistä hanavettä, mutta liuennon ilman poisto on silti suoritettava. Tässä tutkimuksessa seurattiin kuitenkin sen aikaisia ohjeita ja saturointiin käytettiin tislattua vettä.

Kun astia oli täytetty ohjeiden mukaisesti kahden senttimetrin verran pohjasta vedellä, voitiin varsinainen näyte asettaa saturoitumaan. Näyte tuli asettaa astiaan kallellaan saturointilevy edellä kuvan 7 mukaisesti. Tämä esti ilmakuplien jäämisen saturointilevyn alle. Oli myös tärkeää huomioida, ettei näytteen pinta kastunut asetettaessa näytettä astiaan, koska saturointi perustui kapillaari-ilmiöön. Jos näytteen pinta kastuu, on mahdollista, että huokosrakenteiseen näytteeseen jää ilmataskuja, eikä näyte saturoidu täysin. Olisi myös tärkeää huomioida, että jos kyllästettävä materiaali on ominaisuuksiltaan helposti turpoavaa, voi näytteen päälle asettaa painon, joka estää näytteen liiallista turpoamista ja estää näytteen mahdollisen kellumisen tai kaatumisen. Tässä tutkimuksessa painoa ei käytetty sillä näytteiden ei havaittu turpoavan.



Kuva 7. Näytteet asetettiin varovasti saturointiasiaan kallellaan, jolla ehkäistiin ilmakuplien jääminen saturointilevyn alle. Kuva: Teemu Mölsä

Kun näyte oli asetettu onnistuneesti saturointiastiaan, voitiin astiaan lisätä loput vedestä. Astia täytettiin vedellä siten, että vedenpinta yltyi noin 5 millimetriä näytesylinterin terävästä yläreunasta (Kuva 8). Tutkimuksessa huomattiin, että hyvänä merkinä veden pinnan nostolle, voidaan käyttää hyväksi kohtaa näytesylinterissä, josta leikkaava reuna alkaa. Täyttövaiheessa käytettiin myös varovaisuutta, ettei näytteen pinta kastunut. Tämän tutkimuksen mittaukset suoritettiin pimeässä huoneessa laboratorio-olosuhteissa, vakiolämpötilassa (20 °C), jolloin veden haihtuminen ei ollut ongelma. On kuitenkin huomioitava, mikäli mittaus suoritetaan ympäristössä, jossa lämpötila on korkeampi, tulisi saturointiastia peittää veden haihtumisen minimoimiseksi. Erityisesti näytteille, joiden saturointi-aika on pitkä.



Kuva 8.. Näyte on kyllästynyt onnistuneesti, kun näytteen pinta on kiiltävä. Haihtumisen ehkäisemiseksi näytteen päälle asetettiin varovasti näytesylinterin muovinen kansi. Kuva: Teemu Mölsä

5.1.3. Tensiometriä ja sensoriyksikön ilmaaminen

Onnistunutta mittausta varten oli tärkeää, että molemmat tensiometrit ja sensoriyksikkö oli ilmattu täydellisesti. Tutkimuksessa laitteiston ja tensiometriä ilmaus epäonnistui pariin otteeseen, jolloin ilmaus täytyi suorittaa kokonaisuudessaan uudestaan. Tämä lisäsi merkittävästi mittaukseen käytettävää aikaa, sillä ilmaukseen olisi suositeltavaa varata aikaa vähintään 12 tuntia. Tutkimuksen perusteella laitteiston ilmaaminen olisi ajankäytön kannalta hyödyllisintä aloittaa välittömästi, kun näytteet oli asetettu saturoitumaan. Näin voitiin tehostaa mittauksiin käytettyä aikaa.

Laitteiston tensiometrit ovat sinisiä läpikuultavia muovisia putkenomaisia varsia, joissa on keraaminen huokoinen pää. Tämä huokoinen materiaali mahdollistaa tensiometreissä ja näytteessä olevan veden yhdistymisen (Meter Group Hyprop-manual 2024). Tensiometrit mittaavat näytteen matriisipotentiaalia yhdessä sensoriyksikön kanssa. Jotta paine liikkuu tensiometriä ja sensoriyksikön välillä tasaisesti, oli mittausjärjestelmässä käytettävän veden oltava lähes täysin ilmatonta.

Ilmauksen voi laitevalmistajan mukaan suorittaa kahdella tapaa: 1. käyttämällä laitteiston mukana tulevaa vakuumpumppua ja kartiomaista sensoriyksikköön kiinnitettävää täyttöadapteria tai 2. manuaalisesti käsin käyttämällä annosruiskuja. Tässä tutkimuksessa, laitteen ilmaus suoritettiin kaikille mittauksille vakuumpumpun ja täyttöadapterin avulla, sillä näitä käyttämällä ilmaus onnistuu todennäköisesti parhaiten ja se on myös laitevalmistajan suositus. Mikäli mittausjärjestelmää halutaan käyttää ilman vakuumpumppua, löytyvät ilmausohjeet laitevalmistajan kotisivuilta. Kyseistä menetelmää ei käytetty tässä tutkimuksessa. Laitevalmistajan mukaan annosruiskuja käytettäessä ilmauksen epäonnistumisen riski kasvaa merkittävästi, sillä ilmaus tapahtuu täysin manuaalisesti käsivoimin.

Tensiometrien ja sensoriyksikön ilmaaminen aloitettiin kasaamalla täyttöyksikön laitekokonaisuus (Kuva 1). Tätä varten käytössä oli laitteiston mukana tullut suuritehoinen vakuumpumppu. Kyseinen pumppu kykeni muodostamaan noin 0,85–0,9 baarin vakuumin, joka riittää laitevalmistajan mukaan ilmaamaan sekä tensiometrit että sensoriyksikön samanaikaisesti (Meter Group Hyprop-manual 2024). Vakuumpumppu sijoitettiin ilmausvaiheessa lattialle, jolloin sen tehokkuus oli suurimmillaan. Täyttöyksikkö koostui vakuumpumpun lisäksi kolmesta muusta instrumentista. Vakuumpumppu yhdistettiin vakuumiyksikköön, joka koostui manometrasta ja vakuumpullosta. Vakuumpullon tarkoitus oli kerätä ja estää veden kulkeutuminen vakuumpumppuun ilmauksen aikana. Manometrasta voitiin tarkkailla ilmauksen aikana systeemissä vallitsevan vakuumin voimakkuutta. Mikäli laitteisto ei muodosta alipainetta tai paine nousee nopeasti vakuumpumpun käynnistyttyä, on syynä todennäköisesti vuoto jossain kohtaa laitteistoa.

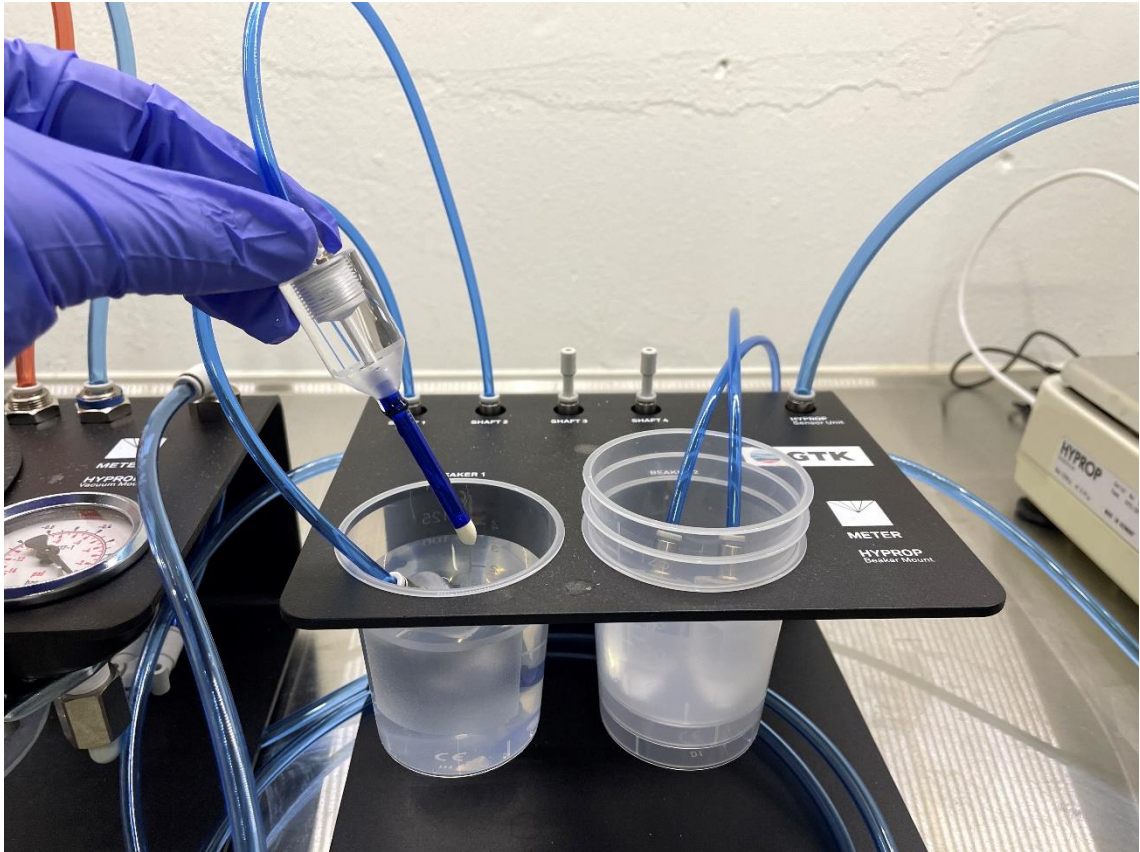
Vakuumiyksikkö yhdistettiin dekantteriyksikköön, jossa tapahtui tensiometrien ilmaus. Dekantteriyksikössä oli mahdollista ilmata yhteensä neljä tensiometriä samanaikaisesti. Tutkimuksessa huomattiin, että tensiometrejä olisi hyvä ilmata aina neljä kappaletta, vaikka tarve olisi vain kahdelle. Tämä lisää ilmauksen onnistumista, sillä mikäli jonkun tensiometrin ilmaus ei onnistu, on kuitenkin mahdollista, että kolmen muun ilmaus on onnistunut. Tutkimuksessa ilmaus suoritettiin kuitenkin jokaista mittausta varten vain kahdelle tensiometrille kerrallaan. Mikäli tensiometrejä ilmataan vain kaksi kerrallaan, tulee dekantteriyksikön tyhjiin aukkoihin asettaa tulpat. Ensimmäisten käyttökertojen yhteydessä huomattiin, ettei ilmaus välttämättä onnistunut ensimmäisellä kerralla, jolloin täydellinen ilmausprosessi jouduttiin toistamaan. Tämä puolestaan lisäsi mittauksiin käytettävää aikaa merkittävästi.

Viimeisenä täyttöyksikköön liitettiin varsinainen sensoriyksikkö (Kuva 9). Sensoriyksikön päälle kiinnitettiin akryylistä valmistettu kartiomainen täyttöadapteri. Ennen adapterin kiinnittämistä, sensoriyksikön kaksi tensiometreille tarkoitettua porttia täytettiin varovasti aiemmin valmistellulla hapettomalla vedellä kuvan 9 mukaisesti. Adapteri kiinnitettiin sensoriyksikköön siinä olevien kiinnitysvarsien avulla, jotka myöhemmin pitivät myös varsinaisen näytteen kiinni yksikössä. Täyttöadapteriin lisättiin tämän jälkeen 23 millilitraa hapetonta vettä annosruiskun avulla kuvan 9 mukaisesti. Laitteiston käyttöohjeista ei käynyt ilmi, miksi vettä täytyi lisätä juuri 23 millilitraa, mutta tutkimuksen havaintojen perusteella sen voidaan olettaa vastaavan täyttöadapterin tilavuutta.



Kuva 9. Sensoriyksikön portit täytettiin valmistetulla vedellä annosruiskun avulla. Kuva: Teemu Mölsä

Ennen varsinaisen ilmauksen aloittamista, tensiometrit tuli kiinnittää niille kuuluviin paikkoihin dekanteriyksikössä kuvan 10 mukaisesti. Tensiometrejä käsiteltäessä laitevalmistajan mukaan olisi hyvä käyttää suojaavia käsineitä, sillä esimerkiksi sormista irtoava rasva voi tukkia tensiometrien huokoisen rakenteen, jolloin tensiometrit eivät toimi halutulla tavalla. Dekanterit täytettiin aiemmin valmistellulla vedellä siten, että molemmat tensiometrit adaptoreineen olivat kokonaisuudessaan veden alla ilmauksen aloitusvaiheessa (Kuva 10).



Kuva 10. Tensiometrit kiinnittyvät dekanteriyksikköön kiertämällä ne kiinni adaptereihin. Tensiometrejä on mahdollista ilmata neljä yhtäaikaisesti. Tutkimuksessa tensiometrejä ilmattiin vain kaksi kerrallaan, jolloin taustalla oleviin portteihin asetettiin tulpat, jotta laitteisto oli ilmatiivis. Kuva: Teemu Mölsä

Kun ilmaukseen vaadittava laitekokoisuus oli kasattu, tensiometri- ja sensoriyksikön ilmaaminen aloitettiin. Instrumenttien lisäksi tutkimukseen hankittiin ajastimella toimiva kytkin, jonka tarkoituksena oli kontrolloida vakuumpumpun toimintaa. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että ajastimen käyttö on erittäin suositeltavaa mittausjärjestelmää operoidessa, koska laitteiston ilmauksen voi täten suorittaa yön yli, sitä varsinaisesti valvomatta. Tämä helpotti prosessia huomattavasti. Systemin tiiveys oli kuitenkin hyvä tarkistaa etenkin ilmauksen aloitusvaiheessa vakuumiyksikön manometrin avulla. Tutkimuksessa ajastin asetettiin toimimaan siten, että vakuumpumppu oli kerrallaan 5 minuuttia päällä ja 55 minuuttia pois päältä. Tätä sykliä toistettiin kokeesta riippuen aina 24 tuntiin asti, aina kuitenkin vähintään 12 tuntia.

Laitevalmistajan mukaan ilmaukseen tulisi varta aikaa vähintään 12 tuntia. Tutkimuksessa huomattiin, että 12 tuntia ei aina riittänyt ilmaukseen, joten aikaa pidennettiin joissain tapauksissa 24 tuntiin. Ilmauksen onnistuminen voitiin päätellä vakuumiyksikön manometrin perusteella ja ennen kaikkea läpinäkyvien tensiometri- perusteella. Ilmauksen aikana tensiometrit täytyivät vakuumin seurauksena vedellä. Onnistuneessa ilmauksessa tensiometri- sisällä ei tulisi olla ilmakuplia. Tutkimuksessa kuitenkin havaittiin, että ilmaus ei ollut onnistunut jokainen kerta tensiometreissä olleiden ilmakuplien perusteella. Näissä tapauksissa ilmaus suoritettiin

kokonaisuudessaan uudestaan veden valmistelusta lähtien. On vaikea arvioida, mistä ilmauksen epäonnistuminen johtui, mutta ongelma kuitenkin hävisi, kun ilmaus suoritettiin uudelleen ja ilmausaikaa pidennettiin. Tutkimuksessa huomattiin myös, että dekanteriyksikössä kiinni oleva muovinen venttiili (kuva 11) särkyi osittain, jolloin sen sulkemiseen täytyi kiinnittää erityisen tarkkaa huomiota. Särkymisestä huolimatta, venttiilin havaittiin olevan ilmatiivis, sillä laitteisto pystyi pidättämään vakuumin.

5.1.4. Sensoriyksikön kalibrointi ja tensiometrien kiinnitys

Kun ilmaus oli suoritettu onnistuneesti, aloitettiin varsinaisen mittaussyksikön kokoonpanon kasaaminen. HYPROP-2 mittaussyksikkö koostuu sensoriyksiköstä, siihen kiinnitetyistä tensiometreistä ja vaa'asta. Tämän lisäksi mittauksia ja kalibrointia varten tarvittiin tietokone. Jotta kalibrointi ja varsinaiset mittaukset voitiin suorittaa, tuli tietokoneelle ladata ja asentaa laitevalmistajan sivuilta ilmainen *LABROS Soilview and Soilview-Analysis* -ohjelmisto (HYPROP-2 2025).

Ennen mittauksen aloitusta, sensoriyksikkö kalibroitiin. Täyttöyksikön purkaminen aloitettiin avaamalla dekanteriyksikön venttiili varoen. Laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti venttiilin avauksessa noudatettiin varovaisuutta, sillä liian nopea venttiilin avaus ja siitä johtuva paineen nousu mahdollisesti pystyi vahingoittamaan keraamisia tensiometrejä ja sensoriyksikön sensoreita. Kun paine oli laskenut tasaisesti normaaliin ilmanpaineeseen, voitiin sensoriyksikön päällä oleva täyttöadapteri irrottaa. Myös adapterin irrottamisessa täytyi käyttää varovaisuutta, sillä sen sisällä oleva vesi tuli pysyä sensoriyksikön pinnalla vielä tässä vaiheessa.



Kuva 11. Täyttöadapteri ilmauksen jälkeen poistettuna sensoriyksikön päältä. Veden tulee pysyä sensoriyksikön päällä, jotta sensorit eivät altistu ilmalle. Taustalla oleva muovinen venttiili särkyi osittain tutkimuksen aikana. Kuva: Teemu Mölsä

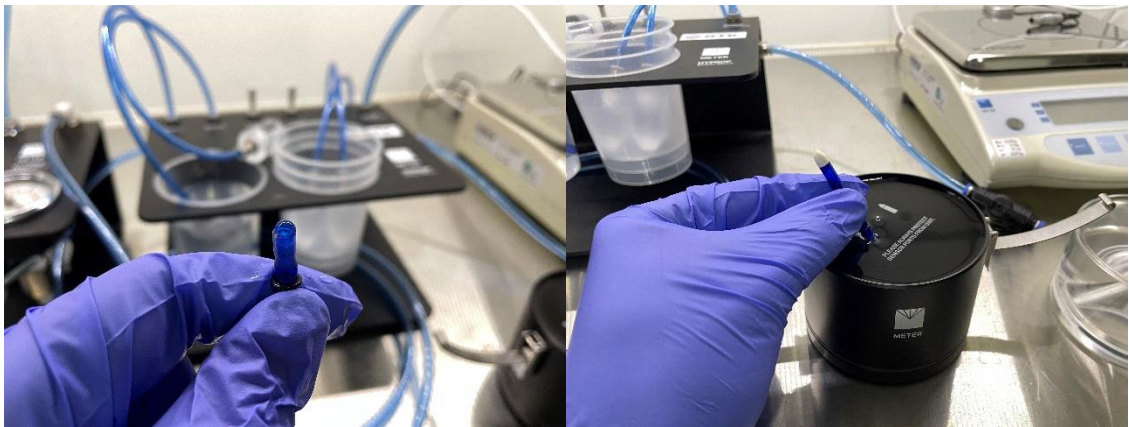
Kun täyttöadapteri oli poistettu, voitiin aloittaa sensoriyksikön kalibrointi. Kalibroinnilla varmistettiin, että sensoriyksikkö oli varmasti nolapisteessä ennen mittauksen aloittamista. Sensoriyksikkö kiinnitettiin tietokoneeseen laitteiston mukana tulleella USB-kaapelilla. Tutkimuksessa havaittiin, että kaapelin kiinnittäminen oli hyvä tehdä ennen täyttöadapterin poistamista. Kaapelin pystyy kiinnittämään sensoriyksikköön vain yhdensuuntaisesti, joka vaatii sensoriyksikön liikuttelua. Kaapelin kiinnittäminen ei ollut hankalaa, mutta liittäminen ennen adapterin poistoa vähensi riskiä siitä, että sensoriyksikön päällä oleva vesi olisi valunut pois.

Kalibroinnin jälkeen voitiin aloittaa tensiometrien kiinnitys sensoriyksikköön. Toimenpide aloitettiin irrottamalla tensiometrit dekantteriyksikön adaptereista. Tämä vaihe oli mittauksen onnistumisen kannalta tärkeä tehdä huolellisesti. Tensiometrit ja etenkin niiden keraamiset päät tuli pitää kosteana koko asennuksen ajan. Tätä varten käytettiin laitteiston mukana tulleita silikonimyssyjä, jotka täytettiin myös aiemmin valmistetulla vedellä. Mikäli tensiometrien keraamiset päät olisivat päässeet kuivumaan, on mahdollista, että ilma olisi päässyt kulkeutumaan tensiometriin sisälle, jolloin ilmaus täytyisi suorittaa uudestaan.

Tensiometrejä oli kaksi ja ne ovat eripituiset. Sensoriyksikön pintaan oli piirretty kuvat helpottamaan tensiometrien kiinnittämistä, siitä kumpaan porttiin kumpikin tensiometri tulee.

Tensiometrien kiinnitys oli suositeltavaa tehdä yksi kerrallaan siten, että toinen tensiometreistä oli kiinni dekanteriyksiön adapterissa, kun toista kiinnitettiin sensoryyksikköön. Tämä varmisti sen, ettei tensiometreihin päässyt ilmaa missään vaiheessa toimenpidettä. Kiinnittämistä varten oli myös hyvä varata annosruisku, jolla voitiin tarvittaessa kastella tensiometrien keraamisia päitä. Lisäksi tensiometrejä käsiteltäessä oli hyvä muistaa käyttää suojaavia käsineitä.

Ennen tensiometrin kiinnittämistä sensoryyksikköön, tensiometrin kiinnityspäähän oli hyvä muodostaa vesilinssi esimerkiksi annosruiskun avulla kuvan 12 mukaisesti. Tämän jälkeen tensiometrit kiinnitettiin sensoryyksikköön varovaisuutta käyttäen. Sensoryyksikkö oli koko toimenpiteen ajan kytkettynä tietokoneeseen. Asennus ja mittausohjelmasta voitiin seurata reaaliaikaisesti sensorien havaitsemaa painetta. Tensiometrejä kiinnittäessä oli erityisen tärkeää huomioida, ettei paine ylittänyt 3000 hPa, sillä laitevalmistajan mukaan tämä voi rikkoa sensoryyksikön herkäät paineanturit. Laitevalmistajan ohjeiden mukaan tensiometri on tarpeeksi tiukalla sensoryyksikössä yhdeksän kierretyn kierroksen jälkeen. Tutkimuksessa huomattiin, että kierrosten tarkkaa määrää on melko vaikea laskea, joten tensiometrit kiinnitettiin tarkkailemalla tietokoneelta painesensorien antamia lukemia, jolloin lukema ei ylittänyt missään vaiheessa 3000 hPa:n ylärajaa. Kun ensimmäinen tensiometri oli kiinnitetty, suoritettiin toiselle vastaava toimenpide.



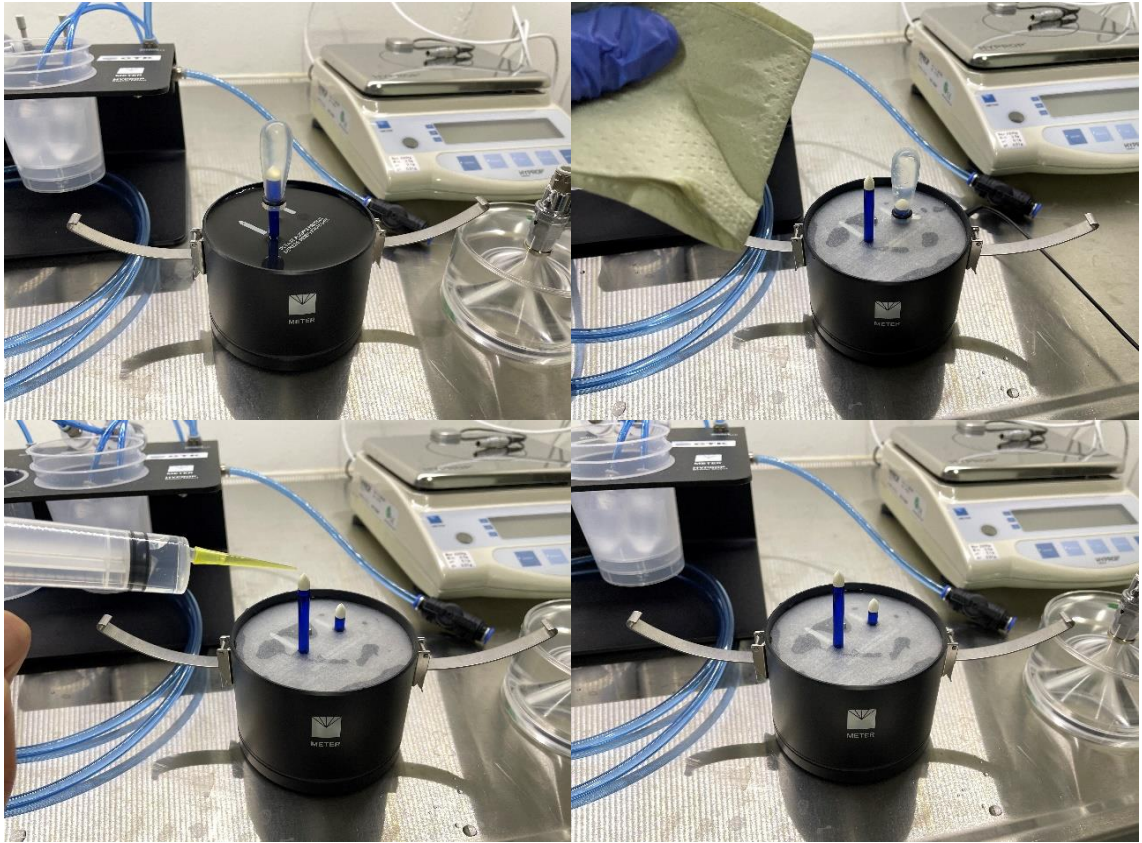
Kuva 12. Tensiometrien kiinnityspuolelle muodostettiin vesilinssi ja ne kiinnitettiin sensoryyksikköön. Kuva: Teemu Mölsä

Kun molemmat tensiometrit oli kiinnitetty, varmistettiin niiden toimivuus. Kun tensiometrit olivat kosteita, ohjelmiston antama painelukema oli lähellä nollaa, kuten ohjeiden mukaaan kuului olla. Tutkimuksessa käytettiin kuivaustekniikkaa, jossa tensiometrin keraaminen pää kuivattiin hetkellisesti samalla tarkkailemalla sensorien painetta. Tensiometrin pää kuivattiin paperinpalalla. Paperia heiluteltiin tensiometrin keraamisen pään läheisyydessä, jotta muodostui pieni ilmavirta ja pää kuivui hetkellisesti. Kun tensiometrin pää altistuu ilmavirralle, sensorien antama lukema alkoi nousemaan nopeasti kohti vallitsevaa ilmanpainetta. Toimivuutta testatessa, ilmanpaine tensiometreissä ei saisi ylittää 2000hPa, sillä tämä tarkoitti sitä, että vesi oli alkanut

haitumaan tensiometrien sisältä. Kun havaittiin, että paine sensoreissa lähti nopeasti nousemaan, tensiometrillä pää kasteltiin välittömästi vedellä ja silikonihuput asetettiin takaisin paikoilleen. Painesensorien lukemat palautuivat tällöin lähelle nollaa, joka merkitsi, että tensiometrit ja sensoriyksikkö toimivat halutulla tavalla.

Kun molemmat tensiometrit oli kiinnitetty, ja niiden toimivuus tarkastettu, sensoriyksikön kaapeli irrotettiin. Tässä vaiheessa silikonihuput oli vielä hyvä pitää paikoillaan. Seuraavana sensoriyksikköön lisättiin laitteistoon kuuluva silikonilevy kuvan 13 mukaisesti. Tämän levyn tarkoitus oli estää ylimääräisen lian päätymistä sensoriyksikön portteihin. Tensiometreissä oli myös kumiset o-renkaat tätä varten ja niiden tuli olla alhaalla sensoriyksikön portin pinnassa muodostamassa tiiviin rakenteen tensiometrien ja sensoriporttien välille.

Silikonilevyn asettamista varten silikonihuput täytyi poistaa hetkellisesti tensiometreistä, jotta levyn sai pujotettua sensoriyksikön pinnalle. Tässäkin vaiheessa oli hyvä pitää lähellä vedellä täytettyä annosruiskua, jolla pystyi tarvittaessa kastella tensiometrien keraamiset päät. Kun silikonilevy oli asetettu paikoilleen, silikonihuput asetettiin takaisin paikoilleen tensiometrien päihin.



Kuva 13. Kun molemmat tensiometrit on kiinnitetty sensoriyksikköön, sen pinnalla oleva vesi voitiin kaataa pois ja asettaa silikonilevy paikoilleen. Kuvassa näkyvät silikonihuput on hyvä pitää paikoillaan siihen saakka, kunnes näyte asetetaan sensoriyksikköön. Kuva: Teemu Mölsä

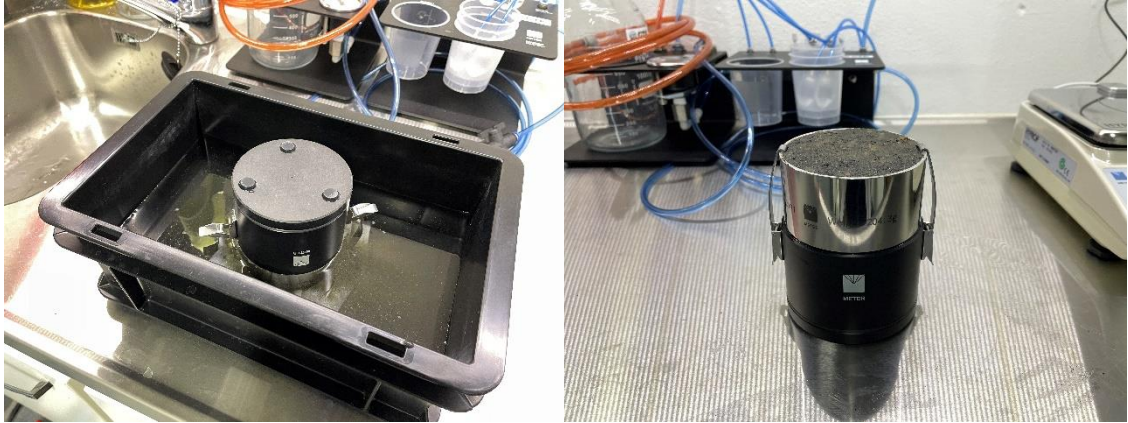
Sensoriyksikkö ja tensiometrit olivat tämän jälkeen valmiita mittausta varten. Edellä mainittu toimenpide suoritettiin jokaiselle näytteelle mahdollisimman yhtenevästi. Osittain laboratorion tilanpuutteen vuoksi, jokainen mittaus tehtiin yksittäisenä kokeena erillään toisistaan, jolloin laitteiston käytön rutinoituminen tuli tutuksi ja mahdollisten virheiden havaitseminen helpottui.

5.1.5. Sensoriyksikkö ja näyte

Kun näyte oli saturoitunut ja sensoriyksikkö ilmattu, voitiin aloittaa näytteen kiinnittäminen sensoriyksikköön. Näytesylinteri ja siinä oleva näyte oli suositeltavaa pitää saturointiastiasa niin kauan, kunnes oltiin varmoja, että laitteiston muut osat olivat valmiina mittausta varten. Etenkin karkearakeisempien näytteiden kohdalla, joiden vedenpidätyskyky on oletettavasti alhaisempi. Vesi valuu helpommin pois karkearakeisemmasta materiaalista ja jos näyte olisi poistettu saturointialtaasta liian varhaisessa vaiheessa, oli mahdollista, ettei näyte olisi enää ollut täysin kyllästynyt mittausta aloittaessa.

Tutkimuksessa sensoriyksikkö kiinnitettiin näytteeseen, näytteen vielä ollessa saturointiastiasa. (Kuva 14) Tällä varmistettiin, että näyte pysyi täysin kyllästyneenä mittauksen aloitusvaiheeseen asti. Ennen sensoriyksikön kiinnittämistä näytteeseen porattiin kaksi reikää tensiometrejä varten laitteiston mukana tulleella pienoisaugerilla. Reikien tekoa varten käytössä oli myös adapteri

ohjaamaan pienois-augeria, jotta reiät tulivat oikeisiin kohtiin. Adapteri suunnattiin näyterinkulaan siten, että pienempi reikä oli kohtisuorassa näyterinkulaan kirjattuun massa-nähdän.



Kuva 14. Vasemmalla sensoriyksikkö asetettuna ylösalaisin näyterinkulaan saturointialtaassa. Oikealla sensoriyksikkö puhdistettuna ja oikein päin käännettynä. Kuva: Teemu Mölsä

Reikiä tehdessä oli mahdollista, että näytteen sisälle olisi päätynyt ilmakuplia. Riski ilmakuplien päätyemisestä näytteen sisälle, eliminoitiin täyttämällä reiät hapettomalla vedellä annosruiskua käyttäen ennen näytteen asettamista. Tämän jälkeen oltiin valmiita kiinnittämään sensoriyksikkö näytteeseen.

Ennen sensoriyksikön kiinnittämistä, tensiometrien päissä olevat silikonihuput poistettiin. Sensoriyksikkö käännettiin ylösalaisin ja painettiin varovasti näytteen päälle siten, että tensiometrit kohtasivat niille poratut reiät. Seuraavaksi sensoriyksikkö ja näytesylinteri voitiin nostaa pois saturointiastiasta. Koska näyte ei vielä tässä vaiheessa ollut kunnolla kiinni sensoriyksikössä, oli tärkeää, että sensoriyksikkö ja näytesylinteri nostettiin kokonaisuudessaan, molemmista osista tiukasti kiinni pitäen. Kun kokonaisuus oli nostettu saturointialtaasta, voitiin se kääntää pöydälle oikein päin. Tämän jälkeen näytesylinterin päällä oleva saturointilevy ja kuitukangas poistettiin varoen ja näytesylinteri kiinnitettiin sensoriyksikköön kiinnitysvarsilla. Näyte oli näin valmis mittausta varten.

Tutkimuksessa huomattiin, että etenkin rikastushiekan tapauksissa, tutkittava materiaali oli helposti veden mukana leviävää, päätyi sitä miltei väkisin pieniä määriä näytesylinterin ulkopinnoille, jolloin sensoriyksikkö on melko sotkuinen. Ennen mittauksen aloitusta sensoriyksikkö ja siinä oleva näytesylinteri kuivattiin ja pyyhittiin paperilla, jotta ulkopinnat olivat puhtaita.

5.1.6. Mittauksen aloitus

Kun näyte oli asetettu onnistuneesti sensoriyksikköön, voitiin se asettaa vaa'alle. Ennen tätä vaaka tuli kuitenkin kalibroida. Vaakaa käytettäessä tuli myös varmistaa, että alusta oli mahdollisimman tasainen. Tutkimusten ajan vaaka sijaitsi samalla pöydällä ja samassa sijainnissa jokaisen mittauksen ajan. Tutkimuksessa käytetyssä vaa'assa oli ruuvattavat jalat ja vatupassi, jolla vaaka saatiin suoraan. Vaa'an tasaisuus tarkastettiin ennen jokaisen mittauksen aloitusta ja säädettiin vatupassin avulla, mikäli oli tarve.

Vaaka kalibroitiin laitteiston mukana tulleen manuaalin ohjeiden perusteella. Tämän jälkeen sensoriyksikkö asetettiin vaa'alle ja kiinnitettiin siihen kuuluva kaapeli (Kuva 15). Vaaka yhdistettiin vielä tietokoneeseen laitteiston mukana tulleella valkoisella USB-kaapelilla.

Mittaus ja datankeruu suoritettiin *LABROS Soilview and Soilview-Analysis* -ohjelmistolla. Ohjelmistosta pystyi halutessaan muokata matriisipotentiaalimittauksen taajuutta, joko harvemmaksi tai tiheämmäksi. Ohjelmiston oletustaajuus oli 10 minuuttia ja sitä käytettiin tämän tutkimuksen jokaisessa mittauksessa.

Ennen mittauksen aloitusta, ohjelmistoon syötettiin näytesylinterin paino, joka on kirjattu jokaisen näytesylinterin kylkeen. Jokainen näytesylinteri oli hieman eripainoinen, joten oli tärkeä muistaa syöttää sylinterin varsinainen paino, jotta ohjelmiston laskemat tulokset olivat oikeita.

Riippuen näytteen materiaalista, mittaukset kestivät kuitenkin useamman vuorokauden. Tutkimuksessa näytteiden mittausaika vaihteli kolmesta neljääntoista vuorokauteen ja ohjelmistosta voitiin tarkkailla reaaliaikaisesti mittauksen etenemistä, jolloin mittaus pystyttiin lopettamaan halutussa pisteessä.



Kuva 15. Vaa'an pintaan on piirretty kaavio, missä asennossa sensoriyksikkö tulisi asettaa vaa'alle. Vaa'assa kiinni oleva musta kaapeli kiinnitettiin sensoriyksikköön ja valkoinen USB-kaapeli vaa'asta tietokoneeseen. Kuva: Teemu Mölsä

5.1.7. Kuivapainon määrittäminen

Mittausten jälkeen määritettiin näytteiden kuivapaino. Kuivapainon avulla näytteille määritettiin näytteessä olevan veden tilavuus, perustuen siihen kuinka paljon näyte menetti vettä haihtumisen johdosta.

Kuivapainon määrittäminen aloitettiin irrottamalla näyte sensoriyksiköstä. Tutkimuksessa huomattiin, että irrottamisessa kannattaa käyttää erityistä varovaisuutta, sillä joissain tapauksissa näytesylinteri oli jumittunut melko tiukasti sensoriyksikköön. Tensiometrit ovat muovisia ja yksikin liian voimakas liike saattoi hajottaa ne.

Kuivapaino määritettiin asettamalla näytesylinteri tavanomaiseen alumiiniseen astiaan, jonka massa oli mitattu etukäteen. Tutkimuksessa huomattiin myös se, että näytesylinterin irrottaminen on suositeltavaa suorittaa alumiiniastian päällä. Tällöin näytesylinteristä variseva materiaali päätyi astiaan, eikä näytteisiin tullut häviötä. Joissain tapauksissa näytettä oli myös tarttunut näytesylinterin sisäpinnoille ja sen irrottaminen ei olisi onnistunut ilman näytesylinterin pesua. Näissä tapauksissa näytesylinteri asetettiin alumiiniastiaan yhdessä näytteen kanssa.

Näytteet kuivattiin kuivatusuunissa 105 °C lämpötilassa 24 tunnin ajan. Tämän jälkeen kuivattu näyte punnittiin uudelleen ja kokonaismassasta vähennettiin alumiiniastian tiedetty massa, sekä näytesylinterin massa mikäli tarpeellista.

5.2. KSAT

Tutkimuksessa toinen mukana olleista mittauslaitteista oli Meter Group GmbH valmistama KSAT (Kuva 16). Laitteiston nimi tulee englanninkielisestä termistä *Saturated Hydraulic Conductivity*. Tutkimuksessa laitteistolla oli tarkoitus mitata kerättyjen näytteiden vedenjohtavuusominaisuuksia.

Laitteiston toimintatapa perustuu täysin vedellä kyllästettyihin maaperänäytteisiin, jotka läpäistään kohtisuoraan poikkileikkaukseensa nähden huoneenlämpöisellä kaasuttomalla vedellä. Laitteisto mittaa virtauksen nopeuden hydraulisen gradientin maaperänäytteessä. (KSAT-Manual 2021).



Kuva 16. KSAT-laitteisto ja siihen kuuluvat osat. Kuva: Teemu Mölsä

5.2.1. Laitteiston valmistelu

Laitteiston valmistelu mittauksia varten aloitettiin valmistamalla tarvittava määrä vettä. Toisin kuin HYPROP:in kanssa, mittauksissa käytettiin tavallista hanavettä tislatun veden sijasta laitevalmistajan suositusten mukaisesti. Käytössä oli sama 5000 millilitran dekantterilasi, jossa

vettä keitettiin 10 minuutin ajan liuenneiden kaasujen poistamiseksi, jonka jälkeen veden annettiin jäähtyä huoneenlämpöiseksi. Tässä vaiheessa oli hyvä huomioda, että vettä valmistettiin jälleen runsaasti, sillä vettä tarvittiin sekä laitteiston toimintaan että näytteiden ja laitteiston osien kyllästämiseen. Tutkimuksessa huomattiin, että 10 litraa valmisteltua vettä riitti kolmen näytteen kyllästämiseen ja mittaamiseen.

5.2.2. Näytteiden ja huokoslevyn kyllästäminen

KSAT-laitteisto käytti toiminnassaan samoja näytesylintereitä kuin HYPROP-2. Tutkimuksessa osa näytteistä täytettiin näyterinkuloihin vasta mittausten yhteydessä. Sylintereitä täytettäessä, pyrittiin noudattamaan jo aiemmin mainittua mahdollisimman yhdenmukaista täyttöprotokollaa, jolloin myös näytteet olisivat mahdollisimman yhdenmukaisia. Laittevalmistajan mukaan suurin ongelma KSAT-laitteistoa käytettäessä on näytesylintereihin mahdollisesti jäävä rako näytteen ja näytesylinterin seinämän välille (KSAT-Manual 2021). Tutkimuksessa raon muodostuminen pyrittiin estämään täyttämällä näytesylinterit vaiheittain, keskeltä reunoille tiivistäen, kunnes näytesylinteri oli täynnä.

Näytteiden kyllästäminen mittauksia varten suoritettiin, kuten kappaleessa 5.1.2 on esitetty. Tällä kertaa käytössä oli kuitenkin tilavuudeltaan suurempi astia, jolloin näytteitä pystyttiin kyllästämään useampi kerrallaan (Kuva 17). Rajana oli kuitenkin saturointilevyjen määrä, joita



Kuva 17. Käytössä oli suurempi astia, jolloin näytteitä pystyttiin saturoimaan useampi kerrallaan. Kuvassa moreeni- ja kuitusavinäytteet. Kuva: Teemu Mölsä

oli yhteensä kolme kappaletta, jolloin näytteitä pystyttiin kyllästämään enintään kolme kerrallaan. Viitteenä saturointiaikoihin voi käyttää aiemmin mainittua taulukkoa (Taulukko 1).

Saturointivaiheessa huomattiin, että näytteiden kyllästäminen, etenkin heikosti vettä johtavilla materiaaleilla, kesti huomattavasti pidempään kuin aiemmalla kerralla. Todennäköisenä syynä tähän voidaan pitää sitä, että suurin osa näytteistä asetettiin ja tiivistettiin näytesylintereihin manuaalisesti. Tästä syystä mittaustuloksissa tulisi myös ottaa huomioon se, että näissä tapauksissa tulokset eivät vastaa niin sanottuja *in situ* vedenjohtavuuksia. Tutkimuksessa mittaukset suoritettiin jokaiselle näytteelle vain kerran, osittain tilojen ja ajan rajallisuuden vuoksi, mutta myös näytteiden rajallisuuden takia. Jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia, laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti mittaus tulisi suorittaa 5–10 kertaa näytettä kohden etenkin silloin, kun kyseessä on häiriintynyt näyte.

Näytteiden saturoinnin yhteydessä kyllästettiin myös mittaukseen tarvittava huokoslevy, jonka laitevalmistajan ilmoittama vedenjohtavuus on 14 000 cm/d (KSAT-Manual 2021). Tutkimuksessa huomattiin, että näytteitä saturoitaessa, materiaalia irtoaa näytesylinteristä väistämättä aina jonkin verran, jolloin irtautunut materiaali kulkeutuu saturointiasian pohjalle. Mittauksen onnistumisen kannalta oli tärkeää, että huokoslevy oli täysin puhdas. Tästä syystä huokoslevyn saturointi suoritettiin erillisessä astiassa.

Huokoslevyn kyllästämistä varten tutkimuksessa oli käytössä pienempi 500 millilitran dekanterilasi, joka täytettiin aiemmin valmistetulla vedellä. Astialla tai sen koolla ei ole muuta merkitystä kuin se, että huokoslevyn pystyi asettamaan ja poistamaan astiasta vaakatasossa ja se, että huokoslevy oli kokonaisuudessaan upotettuna veteen. Tutkimuksessa huomattiin, että kyllästäättömänä huokoslevy kellui veden päällä. Jotta huokoslevy saatiin pysymään veden alla vaakatasossa, asetettiin sen päälle paino. Huokoslevy oli saturoitunut, kun se ei enää noussut pintaan. Tutkimuksessa huokoslevyn annettiin saturoitua näytteiden kanssa yhtä pitkän ajan.

Näytteiden täysin kyllästyttyä vedellä, valmistelussa siirryttiin seuraavaan vaiheeseen. Toisin kuin HYPROP:ia käytettäessä, näytteet tuli kyllästäamisen jälkeen upottaa kokonaisuudessaan veden alle. Tätä varten saturointiasian vedenpintaa nostettiin siten, että näytteet olivat kokonaisuudessaan upoksissa. Veden pinta tuli olla tässä vaiheessa niin korkealla, että näytteen pystyi kääntämään veden alla kokonaisuudessaan ilman, että se nousi veden pinnan yläpuolelle. Ennen näytteen kääntämistä kyllästetty huokoslevy kiinnitettiin punaisen tiivistekumin kanssa näytesylinterin tasaisen reunan puolelle. Tämän jälkeen näytesylinteri käännettiin veden alla ylösalaisin siten, että huokoslevy oli näytesylinterin alapuolella. Saturointilevy ja kuitukangas voitiin tämän jälkeen poistaa näytesylinterin toisesta päästä. Tässä vaiheessa näytteet olivat edelleen veden alla.

5.2.3. Mittausyksikön kalibrointi

Ennen mittausten aloitusta varsinainen mittausyksikkö kalibroitiin. Tätä varten tietokoneelle asennettiin laitekohtainen *KSAT-view* -ohjelmisto, joka oli *LABROS Soilview and Soilview-Analysis* -ohjelmiston tapaan ilmainen ja ladattavissa laitevalmistajan kotisivuilta (KSAT 2025).

Kalibrointi aloitettiin täyttämällä laitteiston mukana tullut viiden litran tilavuinen muovikanisteri aiemmin valmistetulla hapettomalla vedellä (Kuva 18). Vaikka kanisteri oli melko ilmatiivis, oli kuitenkin epäselvää, kuinka paljon happea oli sitoutunut takaisin veteen, sillä vesi oli kanisterissa useamman päivän ajan ennen mittausten aloitusta. Kanisteri sijoitettiin mittausyksikön yläpuolelle, jolloin vesi kulki painovoiman vaikutuksesta laitteiston läpi. Tutkimuksessa kanisteri sijoitettiin noin 40 cm laitteiston yläpuolella sijalle tasolle, jonka havaittiin olevan tarpeeksi korkealla. Tämän jälkeen sininen vesiletku kytkettiin mittausyksikköön.



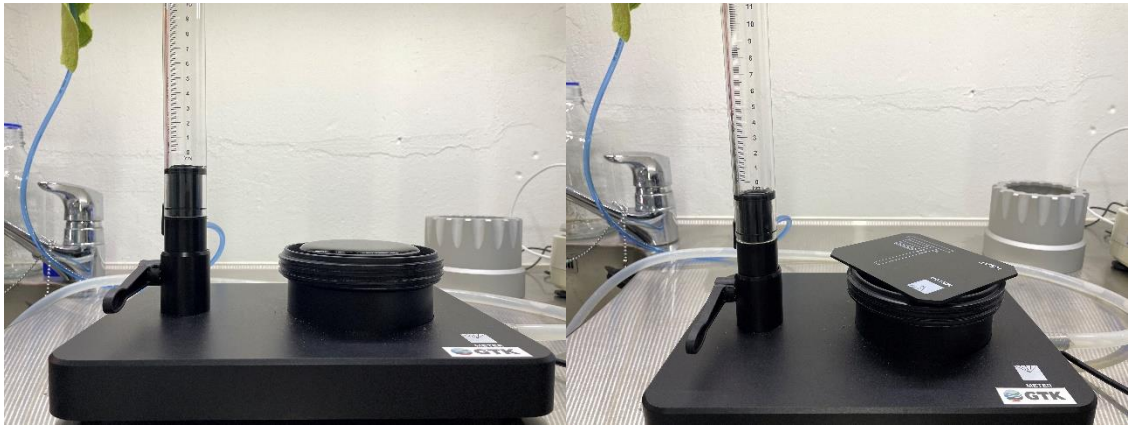
Kuva 18. Viiden litran kanisteri sijoitettiin laitteen yläpuolelle, josta vesi pääsi virtaamaan mittausyksikköön. Kuva: Teemu Mölsä

Kun vesikanisteri oli kytketty mittausyksikköön, voitiin aloittaa mittausyksikön nollapisteen kalibrointi. Tätä varten mittausyksikön byretti täytettiin avaamalla byretin täyttöhana (kuva 19), kunnes byretti oli täynnä. Tämän jälkeen mittauskupoli täytettiin vedellä avaamalla pienempi kupolin täyttöhana. On huomioitavaa, että tässä vaiheessa hanoja oli hyvä operoida vain yksi

kerrallaan, sillä jos molemmat hanat olivat auki samanaikaisesti, vesi virtasi mittausyksikön läpi jatkuvana virtana niin kauan kunnes vesikanisteri oli tyhjä.

Mittauskupoli täytettiin vedellä siten, että kupolin yläreunalle muodostui vesilinssi. Tämän jälkeen vesilinssi poistettiin liu'uttamalla pyyhinlevy varovasti mittauskupolin yli siten, että veden pinta oli tasassa mittauskupolin reunojen kanssa (Kuva 19).

Kalibrointia seurattiin tietokoneelta *KSAT view* -ohjelmiston avulla. Ohjelmiston ilmoittaman nollapisteen arvon tuli olla -6,9 cm, sillä mittausyksikön asetelma oli 6,9 cm korkea. Tutkimuksessa vedenjohtavuutta mitattiin yhdellä kertaa useammalle näytteelle, jolloin kalibrointi suoritettiin jokaiselle näytteelle yksityiskohtaisesti ennen mittauksen aloittamista. Kun kalibrointi oli suoritettu onnistuneesti, voitiin aloittaa mittauksen valmistelu.



Kuva 19. Vesilinssi poistettiin mittauskupolin päältä yksinkertaisella muovisella pyyhinlevyllä. Byretin alapäässä, sijaitseva suurempi hana täyttää byretin ja taustalla oleva pienempi hana mittauskupolin. Kuva: Teemu Mölsä

5.2.4. Mittauksen aloitus

Kun halutut näytteet oli kyllästetty vedellä ja mittausyksikkö kalibroitu, voitiin aloittaa mittaus. Käyttäjä pystyi halutessaan valita mittausmenetelmän *KSAT-view* -ohjelmistosta, jolloin tämän tutkimuksen kaikki mittaukset suoritettiin muuttuvapaineisella vedenläpäisykokeella (*Falling Head Permeability*).

Ennen mittauksen aloitusta näyte tuli asettaa mittausyksikköön. Tätä varten byretti täytettiin vedellä ja tyhjennettiin mittauskupoliin kokonaisuudessaan, siten että byretin pinnalle jäi vesilinssi. Näytesylinteri ja siinä kiinni oleva huokoslevy nostettiin varoen saturointialtaasta, ja asetettiin pienessä kulmassa mittauskupolin päälle, jottei mittauskupolin ja huokoslevyn väliin jäänyt ilmataskuja. Tutkimuksessa huomattiin, että huokoslevy ja näyterinkula eivät varsinaisesti lukittautuneet mittauskupolin päälle vaan kokonaisuus tuli asettaa silmämääräisesti keskelle mittauskupolia. Huokoslevyyn oli kiinnitetty kolme jalkaa liimalla, joista yksi irtosi jo ensimmäisen mittauksen aikana, joka sen sijaan aiheutti pieniä vaikeuksia jälkikäteen. Kun

jalkoja oli kaksi, näytteen asettaminen keskelle mittauskupolia vaikeutui. Vaikutusta mittaustuloksiin jalan puuttumisella ei kuitenkaan havaittu olevan.

Kun näytesylinteri oli asetettu onnistuneesti mittauskupolin päälle, seuraavaksi voitiin kiinnittää ylempi huokoslevy. Laitteiston mukana tuli kaksi erilaista suodatinta, joiden käyttö tulisi valita tutkittavan materiaalin perusteella. Tutkimuksessa todettiin, että etenkin helposti erodoituville materiaaleille, kuten rikastushiekalle ja moreenille olisi suositeltavaa käyttää tiheämpää huokoslevyä. Konsolidoituneimmille tai vähemmän erodoituville materiaaleille verkkomainen metallinen suodin oli riittävä. Tutkimuksessa huomattiin, että huokoslevyn käyttäminen vähensi kuitenkin materiaalin kulkeutumista mittausjärjestelmän läpi, mikä sen sijaan helpotti myös laitteiston puhdistamista. On myös huomioitava, mikäli mittauksessa käytetään huokoslevyä ylempänä suodattimena, tulee myös se kyllästä ennen mittausta.

Kun ylempi suodin oli asetettu sinisen kumitiivisteiden kanssa näytesylinterin päälle, voitiin kokonaisuus kiinnittää mittauskupoliin alumiinisella kiinnityskannella. Tässä vaiheessa huomattiin, että mikäli näytesylinteri ei ollut täysin keskellä mittauskupolia, oli kiinnityskannen kiinnittäminen hankalaa. Näissä tilanteissa näytesylinteriä liikuteltiin varovasti nostamatta, kunnes se oli silmämääräisesti täysin keskellä mittauskupolia, jolloin alumiininen kiinnityskansi meni vaivata paikalleen. Tämän jälkeen mittaus voitiin aloittaa.

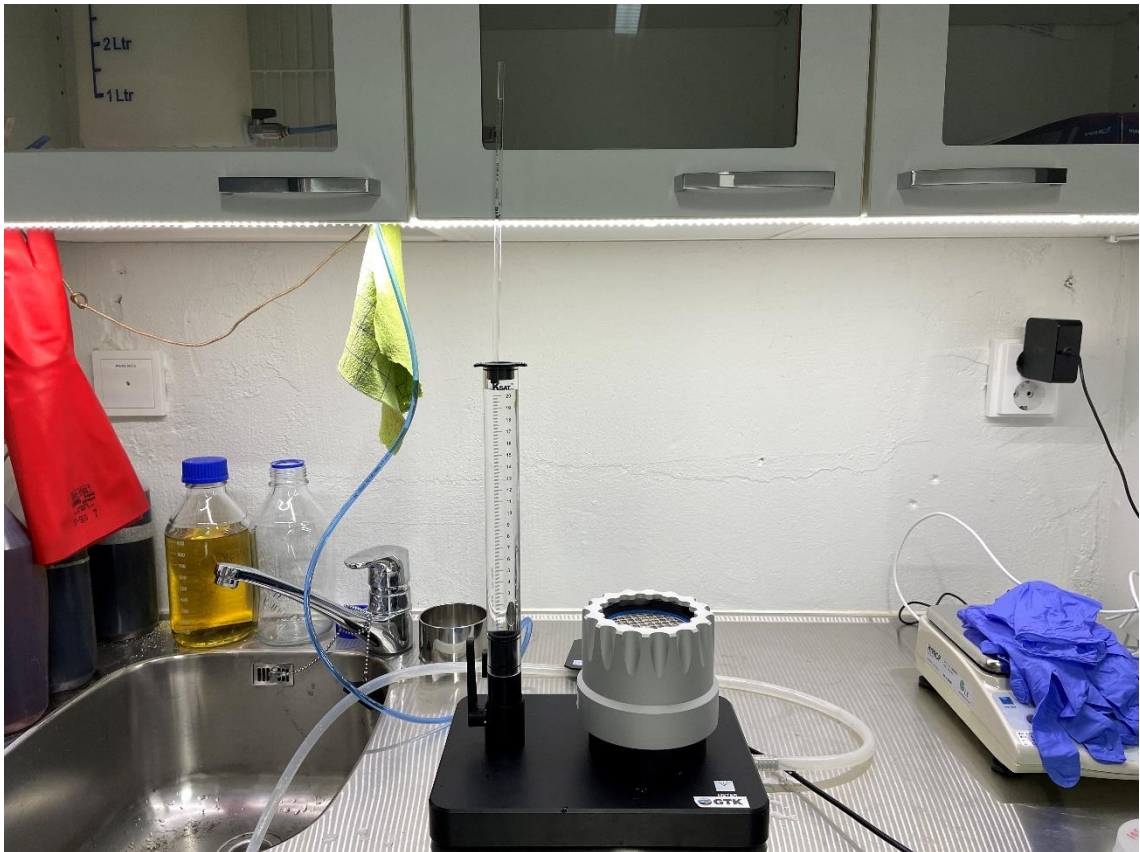
Mittaukset aloitettiin täyttämällä byretti vedellä viiden senttimetrin korkeuteen, jonka jälkeen mittaus käynnistettiin tietokoneelta. Mittauksen aloituksen jälkeen byretin hana avattiin, jotta vesi pääsi virtaamaan vapaasti näytteen läpi. Ohjelmisto suoritti mittauksen täysin automaattisesti ja pysäytti sen myös kokeen päätyttyä.



Kuva 20. Näytesylinteri asetettiin mittauskupolin päälle ja siihen kiinnitettiin ylempi suodin sinisen tiivisteiden kanssa. Kuvassa mittauksissa käytetty metallinen verkko. Taustalla hopeanvärinen alumiininen kiinnityskansi. Kuva: Teemu Mölsä

5.2.5. Mittaus kapillaariputkea käyttäen

Joidenkin näytteiden kohdalla niiden vedenjohtavuusominaisuudet havaittiin erittäin alhaiseksi mittausvaiheessa. Näissä tilanteissa mittaaminen suoritettiin laitteen mukana tulleen kapillaariputken avulla. Laitevalmistajan mukaan kapillaariputken tarkoitus oli nopeuttaa mittausaikaa näytteille, joiden vedenjohtavuus on hyvin alhainen. Kapillaariputken käyttö ei vaikuttanut laitteiston valmisteluun muulla tapaa kuin siten, että byretin jatkoksi kiinnitettiin lasinen kapillaariputki mustaa tiivistettä käyttäen. Erona normaalimittaukseen oli kuitenkin se, että veden pinta byretissä nostettiin kapillaariputken yläpäähän saakka (Kuva 21).



Kuva 21. KSAT -mittalaitteisto valmiina. Kuvassa laitteisto kapillaariputken kanssa. Normaalitilanteessa kapillaariputkea ei ole, jolloin laitteiston käyttäjä voi valita vesipilarin korkeuden vapaavalintaisesti. Mittalaitteesta lähtevä vaalea putki johdatti näytteen läpi kulkeutuneen veden viemäriin.

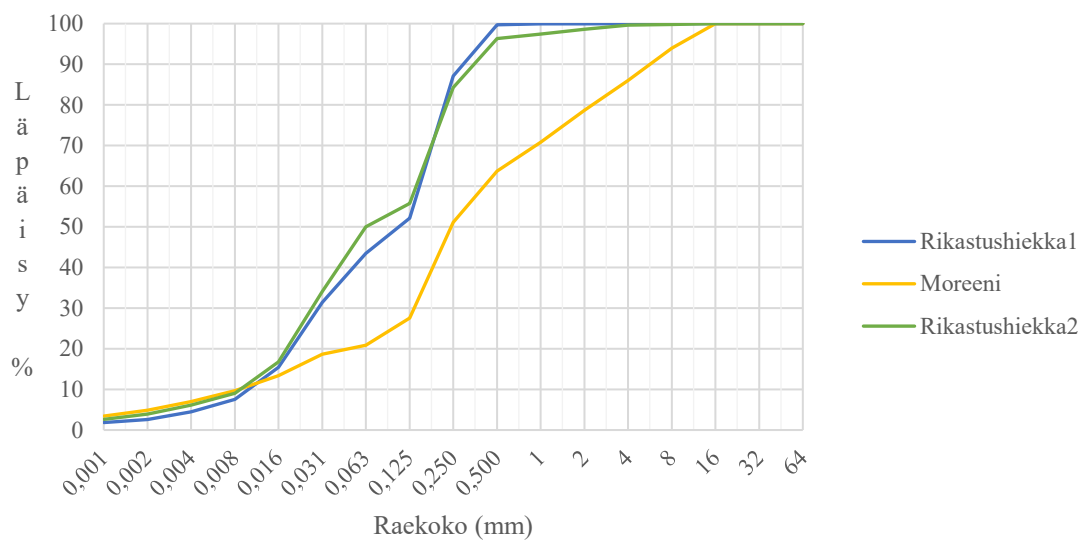
6. TULOKSET JA TULOSTEN TULKINTA

6.1. Raekokojakauman määrittäminen

Tutkimuksen näytteistä rikastushiekoille ja moreenille suoritettiin tavanomainen kuivaseulonta yli 63 μ m hiukkasille. Rakeisuusmäärittäystä varten rikastushiekoja punnittiin 0,5 kg ja moreenia yksi kg ja kuivatettiin kuivauskaapissa 60 asteen lämpötilassa 16 tunnin ajan. Rakeisuusmäärittäystä ei suoritettu OPA-sakalle ja kuitusavelle korkean orgaanisen aineksen

pitoisuuden takia. Hienoaineksen raekoot rikastushiekoissa ja moreenissa analysoitiin sedigrafianalyysillä.

Kuivaseulonnan perusteella hienoaineksen (<0,063 mm) osuus rikastushiekkänäytteissä oli 43,5 % ja 49,9 %. Moreenilla vastaava luku oli 20,7 %. Kuvaajan (Kuva 22) perusteella voidaan todeta molempien rikastushiekköjen raekokojakauman vastaavan suhteellisen hyvin toisiaan, kun taas moreeni erottui karkeampien raekokojen osuudessa selkeästi. Hienoaineksen raekokojakauma oli sen sijaan suhteellisen samankaltainen kaikilla kolmella näytteellä. Näytteiden d_{50} -luvut olivat 117 μ m ensimmäiselle rikastushiekkänäytteelle, 248 μ m moreenille ja 62 μ m toiselle rikastushiekkänäytteelle.

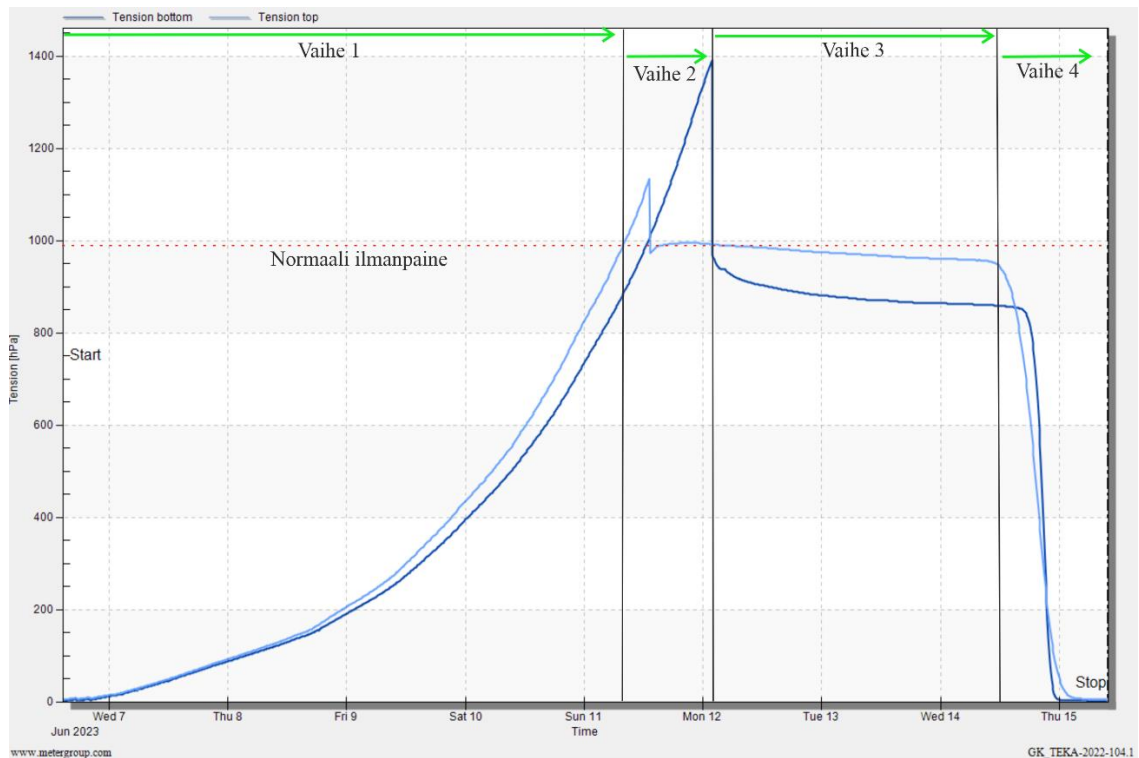


Kuva 22. Rikastushiekköjen ja moreenin kumulatiivinen läpäisyprosentti.

6.2. Rikastushiekan ja peittomateriaalien mittauskäyrät

Optimaalisten mittaustulosten saavuttamiseksi, etenkin hienorakeisten materiaalien mittaus kestää normaaliolosuhteissa useamman vuorokauden (Schindler *et al.* 2010). Tutkimuksessa näytteiden mittausaika vaihteli kolmesta neljääntoista vuorokauteen, jolloin saavutettiin sekä optimaalisia että suboptimaalisia mittaustuloksia. Schindlerin *et al.* (2010) mukaan optimaalisen mittaustuloksen saavuttaminen voi kuitenkin olla usein hankalaa, joka huomattiin myös tässä tutkimuksessa. Syyksi tähän voitiin olettaa, etteivät mittaussäätöjärjestelmän tensiometrit olleet täysin ilmattuja mittauksen aloitusvaiheessa, vaikka silmämääräisesti tensiometreissä ei havaittu ilmakuplia. Suboptimaalinen mittaustulos ei kuitenkaan tarkoita, että mittaus olisi epäonnistunut, mittaussäätöjärjestelmässä ei vain tällöin saavutettu optimaalisen mittauskäyrän mukaista *boiling delay* vaihetta, jolloin mittaustulos ei ole yhtä laaja (Shokrana & Ghane 2020).

HYPROP-2 -laitteiston muodostama optimaalinen mittauskäyrä koostuu yhteensä neljästä vaiheesta kuvan 23 mukaisesti. Käyrän ensimmäinen vaihe kuvastaa mittauksen normaalialuetta, jossa vedenjännitys näytteessä kasvaa, kunnes paine tensiometreissä on saavuttanut ympäristön ilmanpaineen. Mikäli tensiometrit on ilmattu täydellisesti, mittauskäyrässä voidaan saavuttaa toinen vaihe, jolloin paine kasvaa ilmanpainetta korkeammaksi. Suboptimaalisessa mittauksessa tätä vaihetta ei saavuteta, koska paine tensiometreissä ei nouse missään vaiheessa ilmanpainetta korkeammalle. Mittauksen kolmannessa vaiheessa, kavitaatioissa, tensiometreissä muodostuu vesihöyryä haihtumisen seurauksena, jolloin paine laskee nopeasti takaisin ympäröivän ilmanpaineen tasolle. Neljännessä vaiheessa paine tensiometreissä laskee jälleen nopeasti, tällä kertaa lähelle nollaa, kun veden pinta näytteessä on laskenut ja tensiometriä keraamiset päät ovat täysin altistuneena ilmalle (Meter Group Hyprop-Manual 2024).

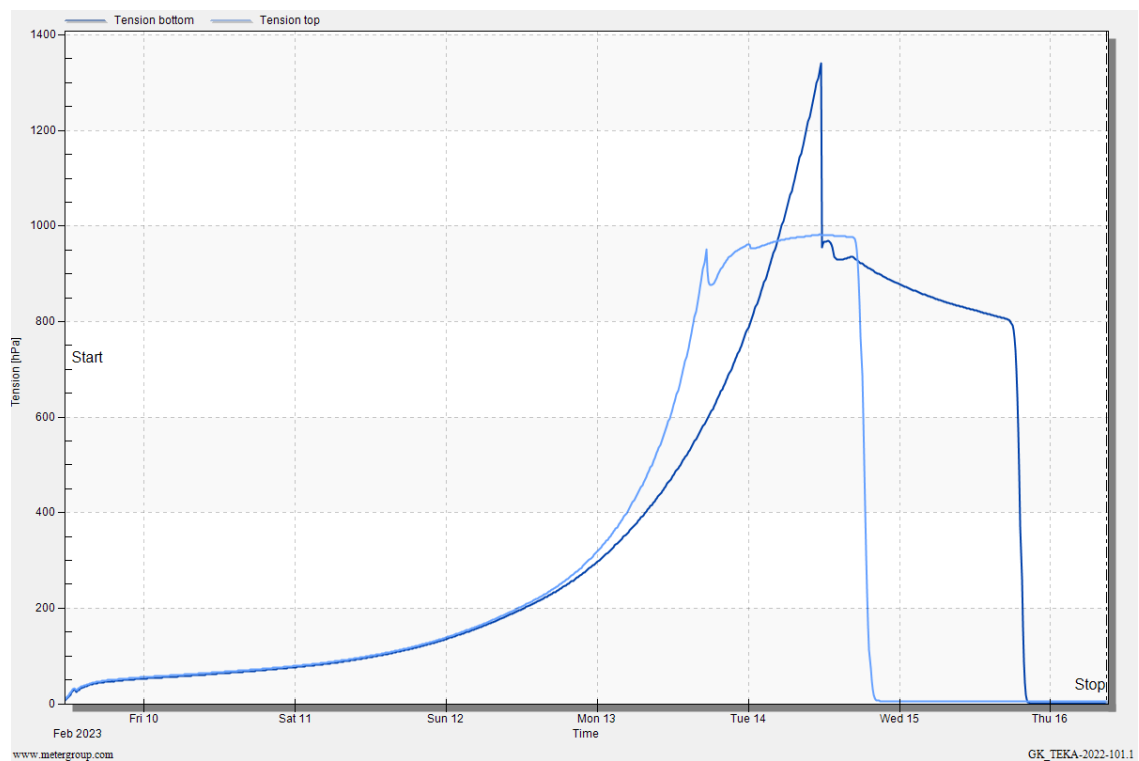


Kuva 23. Kuitusavesta mitattu optimaalinen mittauskäyrä. Lähde: Muokattu Hyprop Manual 2024.

Koska tensiometrejä on kaksi, eri korkeuksilla, muodostui mittauskäyriä aina kaksi kappaletta. Tutkimuksessa ensimmäisen häiriintymättömän rikastushiekkänäytteen ja moreenin vedenpidätyskykyä mitattaessa, tensiometreistä ylempi ei saavuttanut mittauksen toista vaihetta. Muissa mittauksissa toinen vaihe saavutettiin molemmilla tensiometreillä.

6.2.1. Rikastushiekka, häiriintymätön

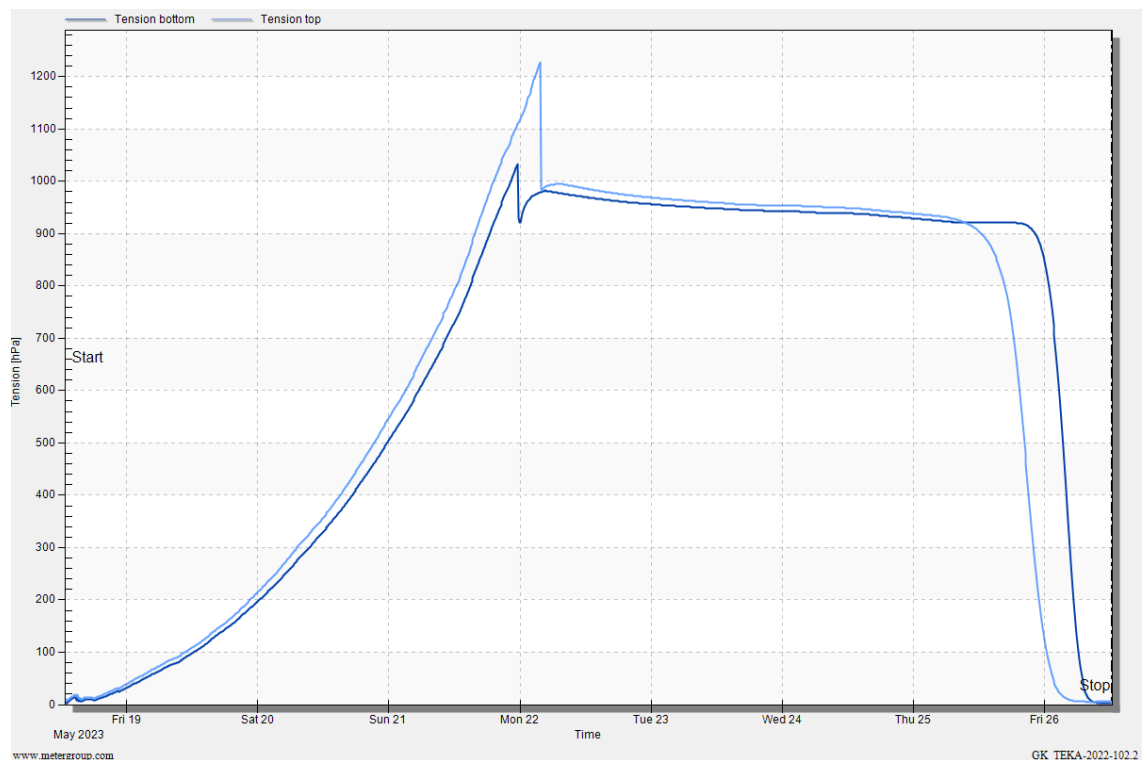
Näytteistä mittaus suoritettiin ensimmäisenä häiriintymättömälle rikastushiekkänäytteelle. Mittaus kesti kokonaisuudessaan seitsemän vuorokautta. Paine nousi tasaisesti molemmissa tensiometreissä kolmen vuorokauden ajan, jolloin paineissa ei havaittu suurta eroa (Kuva 25). Kolmen vuorokauden jälkeen paine tensiometreissä kohosi jyrkemmin, jolloin ero tensiometrien välillä kasvoi. Tensiometreistä ylempi saavutti kavitaatiovaiheen mittauksen neljäntenä vuorokautena, mutta ei koskaan saavuttanut *boiling delay* vaihetta. Tämä johtui mitä luultavimmin epäonnistuneesta ilmauksesta. Sen sijaan alempi tensiometri saavutti *boiling delay* vaiheen mittauksen viidentenä vuorokautena. Näyte oli tässä vaiheessa menettänyt noin 25 % vettä haihtumisen seurauksena. Tensiometreistä ylempi altistui ilmalle viiden vuorokauden jälkeen ja alempi kuuden. Paine tensiometreissä laski nolnaan, jonka jälkeen mittaus lopetettiin.



Kuva 25. Häiriintymättömän rikastushiekkänäytteen suboptimaalinen mittauskäyrä.

6.2.2. OPA-sakka

OPA-sakan mittaus kesti yhteensä kuusi vuorokautta. Paine-erot tensiometrien välillä havaittiin jo yhden vuorokauden mittauksen jälkeen, jonka jälkeen paine nousi tasaisesti molemmissa tensiometreissä kahden vuorokauden ajan, kunnes kolmen vuorokauden jälkeen molemmat tensiometrit siirtyivät kavitaatiovaiheeseen (Kuva 26). Molemmat tensiometreistä saavuttivat *boiling delay* vaiheen, joka viittasi ilmauksen onnistumiseen. Tämän jälkeen paine tensiometreissä laski nopeasti normaalin ilmanpaineen tasolle, jossa se pysyi seuraavan kolmen päivän ajan. Tässä vaiheessa näyte oli menettänyt noin 15 % vettä haihtumisen seurauksena. Kuudennen vuorokauden jälkeen paine tensiometreissä laski nollaan ja mittaus lopetettiin.

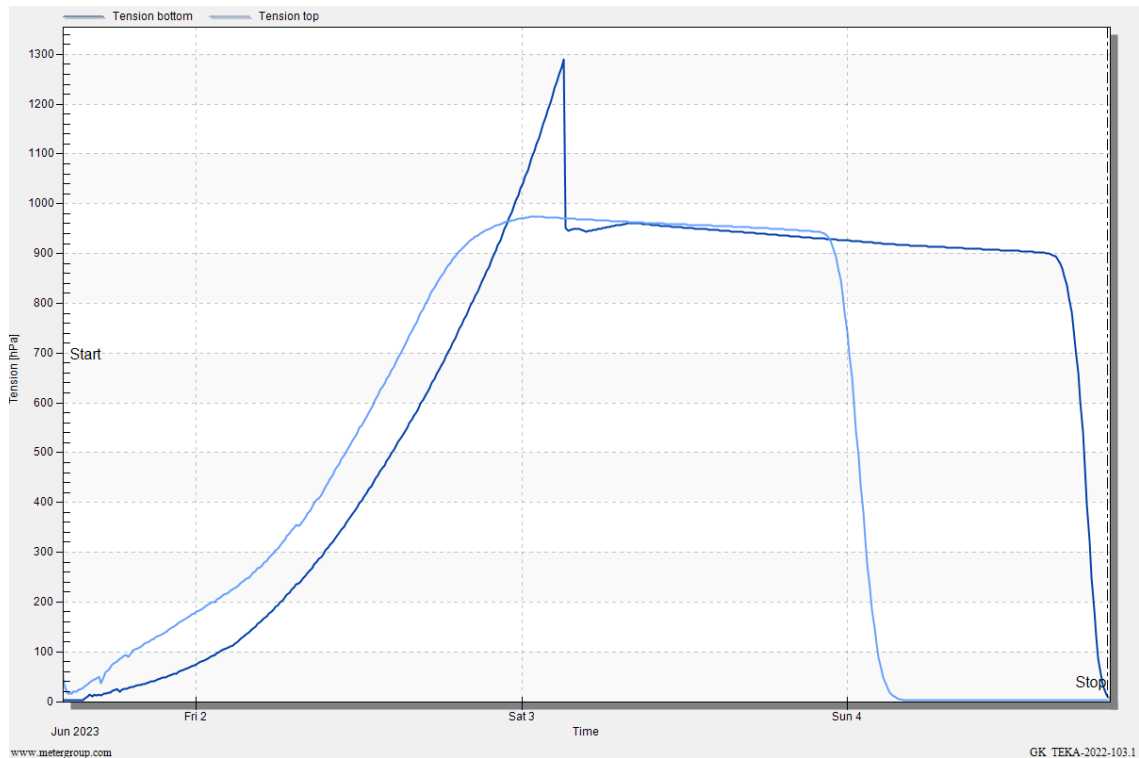


Kuva 26. OPA-sakasta mitattu optimaalinen mittauskäyrä.

6.2.3. Lysimetrien päällä oleva moreeni

Aiemmista näytteistä poiketen moreeninäytettä ei oltu asetettu näytesylinteriin näytteenottovaiheessa. Ennen saturointia näyte sullottiin näyterinkulaan viidessä kerroksessa, kunnes näyterinkula oli täynnä ja tuntui tiiviiltä. Koska moreenin *in situ* tiiveydestä ei ollut tietoa, on vaikea arvioida vastasiko käsin tehty sullonta varsinaista tiiveyttä. Huomioksi on myös mainittava, että moreeninäytteestä poistettiin suurimmat kivet, jolla on luultavasti vaikutusta mittaustuloksiin.

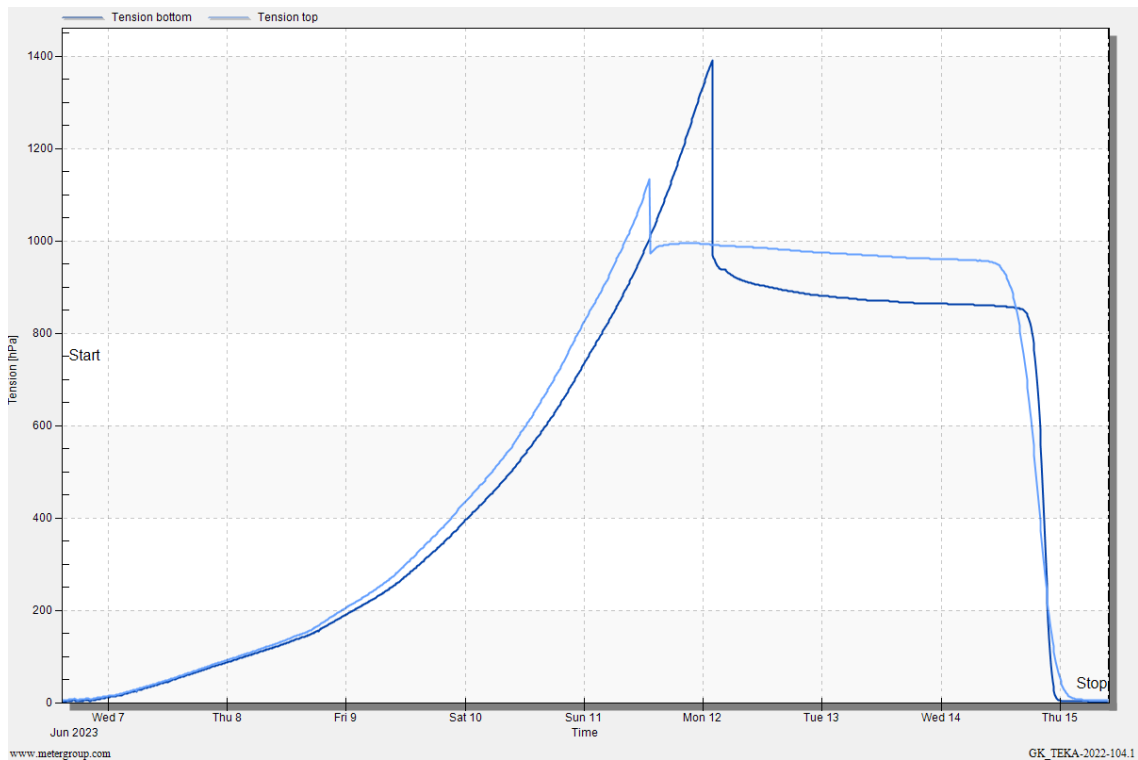
Moreeninäytteen mittaus kesti yhteensä kolme vuorokautta. Jo mittauksen aloitusvaiheessa huomattiin, että ylempi tensiometreistä ei ollut ilmaantunut täydellisesti, jolloin tensiometri paine-erot olivat helposti eroteltavissa (Kuva 27). Paine tensiometreissä kohosi kuitenkin tasaisesti noin vuorokauden ajan, jonka jälkeen mittaus siirtyi kavitaatiovaiheeseen. Tensiometreistä ylempi ei saavuttanut *boiling delay* vaihetta, jolloin tuloksena oli suboptimaalinen mittauskäyrä. Alempi tensiometri sen sijaan saavutti *boiling delay* vaiheen, jonka jälkeen paine laski nopeasti normaalin ilmanpaineen tasolle. Näyte oli tässä vaiheessa menettänyt noin 5 % vettä haihtumisen seurauksena. Paine tensiometreissä pysyi tasaisena vielä noin 36 tunnin ajan, jonka jälkeen paine laski nolnaan ja mittaus lopetettiin.



Kuva 27. Moreenista mitattu suboptimaalinen mittauskäyrä.

6.2.4. Kuitusavi

Tutkimuksessa kuitusaven mittausaika oli yhteensä kahdeksan vuorokautta. Mittauksen aikana paine tensiometreissä kohosi aluksi maltillisesti kahden päivän ajan (Kuva 28). Kolmantena vuorokautena paine-ero tensiometriä välillä oli jo huomattavissa. Mittauksessa molemmat tensiometrit saavuttivat *boiling delay* vaiheen noin viiden vuorokauden mittauksen jälkeen, joka puolestaan viittasi siihen, että tensiometriä ilmaus oli onnistunut. Tässä vaiheessa näyte oli menettänyt vettä noin 25 % haihtumisen seurauksena. Tämän jälkeen paine tensiometreissä laski nopeasti ja pysyi vakiona kahden ja puolen vuorokauden ajan, jonka jälkeen paine laski nolnaan ja mittaus lopetettiin.

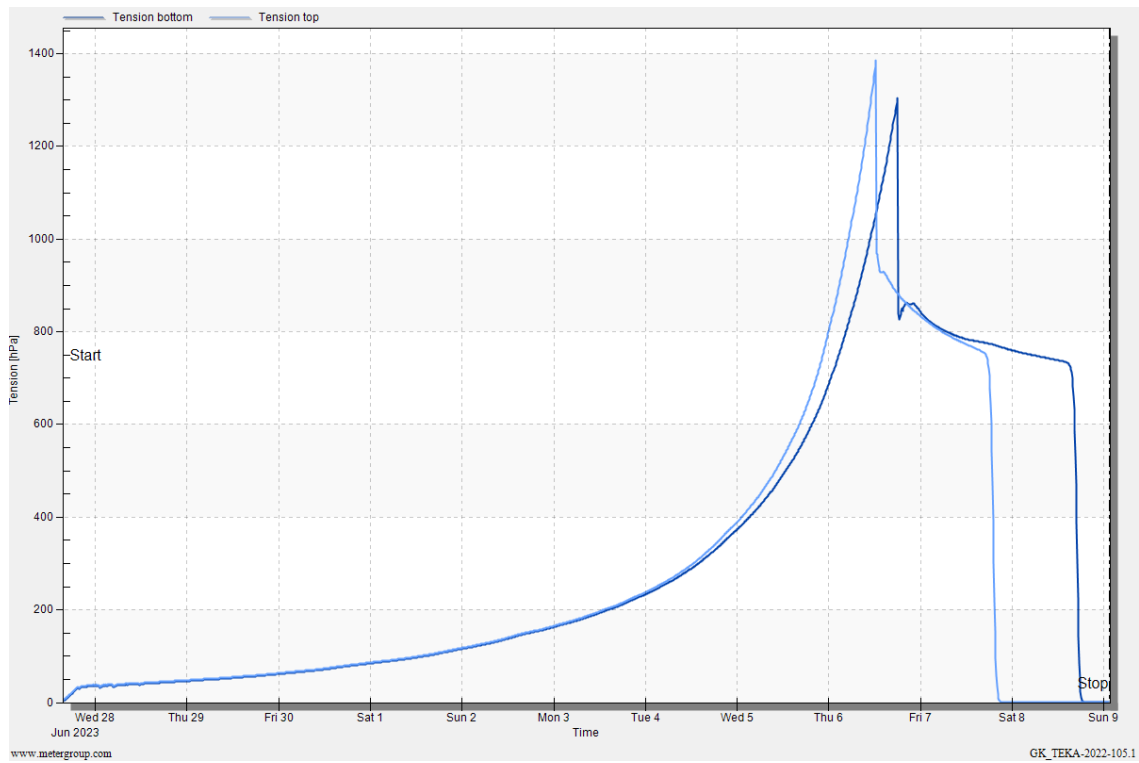


Kuva 28. Kuitusavesta mitattu optimaalinen mittauskäyrä.

6.2.5. Rikastushiekka peittämättömän lysimetrin sisältä

Tutkimuksessa oli mukana kaksi rikastushiekkanäytettä, joista jälkimmäinen oli häiriintynyt näyte. Mittauksen aloitusvaiheessa näyte oli valmiina näytesyliinterissä, jolloin sille ei suoritettu tiivistystä. Hieman yllättäen toisen rikastushiekkanäytteen mittaus kesti yhteensä yksitoista päivää, joka oli neljä päivää häiriintymätöntä rikastushiekkanäytettä pidempi. Paine molemmissa tensiometreissä kohosi yhtenevästi miltei seitsemän vuorokauden ajan, kunnes paine-erot tensiometreissä oli havaittavissa. Molemmat tensiometrit saavuttivat *boiling delay* vaiheen, jonka jälkeen paine laski syystä tai toisesta selvästi normaalin ilmanpaineen alapuolelle (Kuva 29).

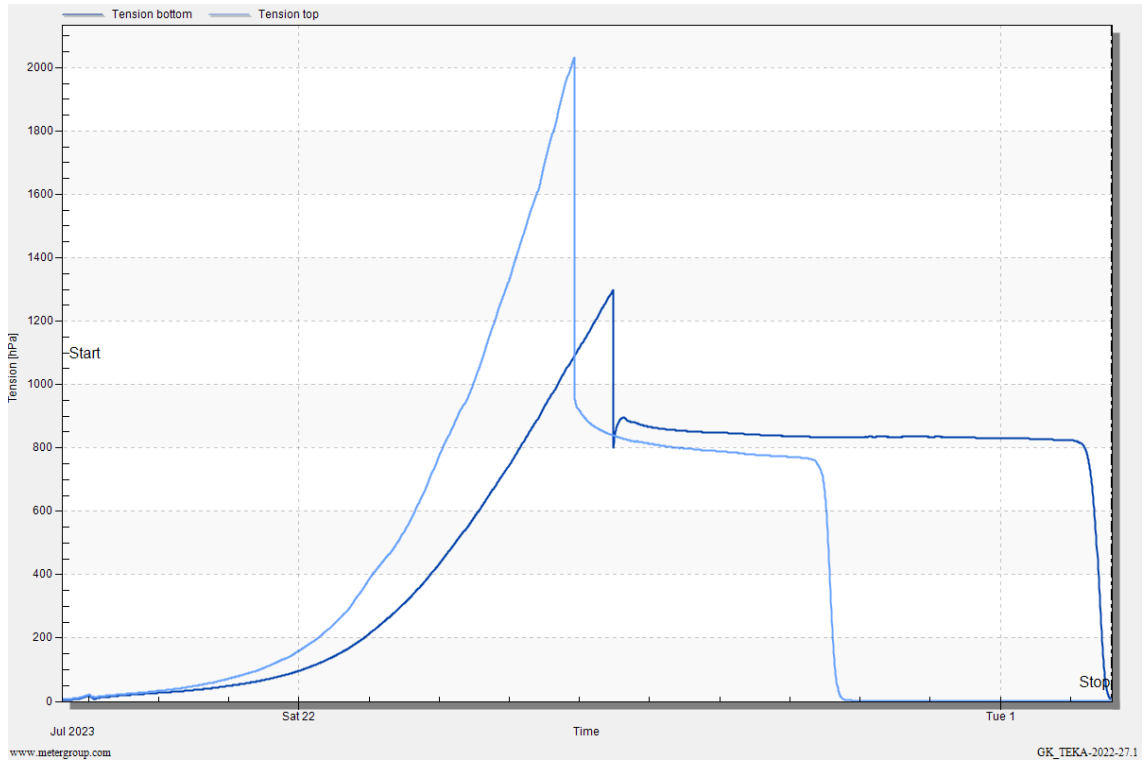
Näyte oli menettänyt tässä vaiheessa noin 21 % vettä haihtumisen seurauksena. Paine tensiometreissä laski maltillisesti noin puolentoista päivän ajan alle 800 hPa:n, jonka jälkeen paineessa tapahtui jyrkkä lasku nolnaan ja mittaus lopetettiin.



Kuva 29. Häiriintyneen rikastushiekkänäytteen optimaalinen mittauskäyrä.

6.2.6. Orgaaninen aines

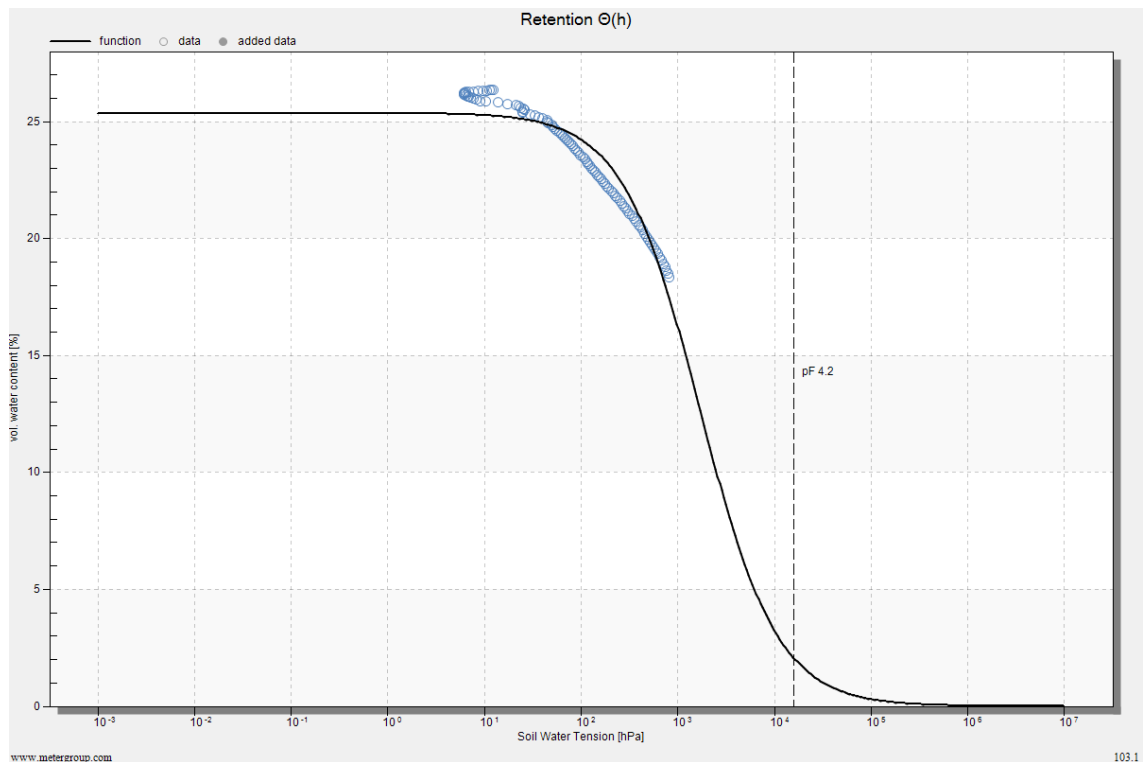
Tutkimuksessa orgaanisen aineksen mittausaika oli tutkimuksessa mukana olleista näytteistä pisin, jolloin mittausaika oli yhteensä 14 vuorokautta. Näyte ei ollut ennen mittausta näytesylinterissä, jolloin sille suoritettiin aiempaa moreeninäytettä vastaava sullonta. Paine tensiometreissä nousi tasaisesti kahden vuorokauden ajan, jonka jälkeen paine-ero oli havaittavissa (Kuva 30). Tämän jälkeen paine kohosi jyrkästi, kunnes molemmat tensiometrit saavuttivat *boiling delay* vaiheen. Näyte oli menettänyt tässä vaiheessa noin 31 % vettä haihtumisen seurauksena. Paine tensiometreissä pysyi tämän jälkeen vakiona normaalissa ilmanpaineessa vielä usean vuorokauden ajan, jonka jälkeen paine laski nolnaan ja mittaus lopetettiin.



Kuva 30. Orgaanisesta aineksesta mitattu optimaalinen mittauskäyrä.

6.3. Optimointirutiini

Mittausten valmistuttua, käyttäjä pystyi halutessaan käsitellä mitattua dataa suoraan laitevalmistajan *LABROS Soilview and Soilview-Analysis* -ohjelmistolla, jolla pystyi tuottamaan muun muassa vedenpidätyskäyriä. Laitteiston keräämän datan pystyy myös halutessaan viemään ohjelmiston ulkopuolelle Excel-tiedostomuodossa. Tutkimuksessa mittaustuloksia tarkasteltiin ensin laitevalmistajan ohjelmistolla ja vedenpidätysdataan sovitettiin van Genuchtenin malli. Mallin istuvuus ei kuitenkaan ollut osalle näytteistä kovin hyvä. Tutkimuksessa havaittiin, että mittauspisteet harhailivat mittauksen alku- ja loppuvaiheissa, joka mahdollisesti vääristi mallin istuvuutta (Kuva 24). Mittauksen alkuvaiheen mittauspisteet harhailivat todennäköisesti siitä syystä, että tutkimuksessa näytteen ei annettu asettua tarpeeksi pitkään ennen mittauksen aloitusta kyllästyneessä tilassa. Mittauksen loppuvaiheella kuivissa olosuhteissa mittauspisteiden harhailu johtui todennäköisimmin laitteiston mittausalueen laajuudesta. Tästä johtuen data vietiin sovelluksen ulkopuolelle ja käsiteltiin Matlab – ohjelmistolla istuvuuden parantamiseksi.



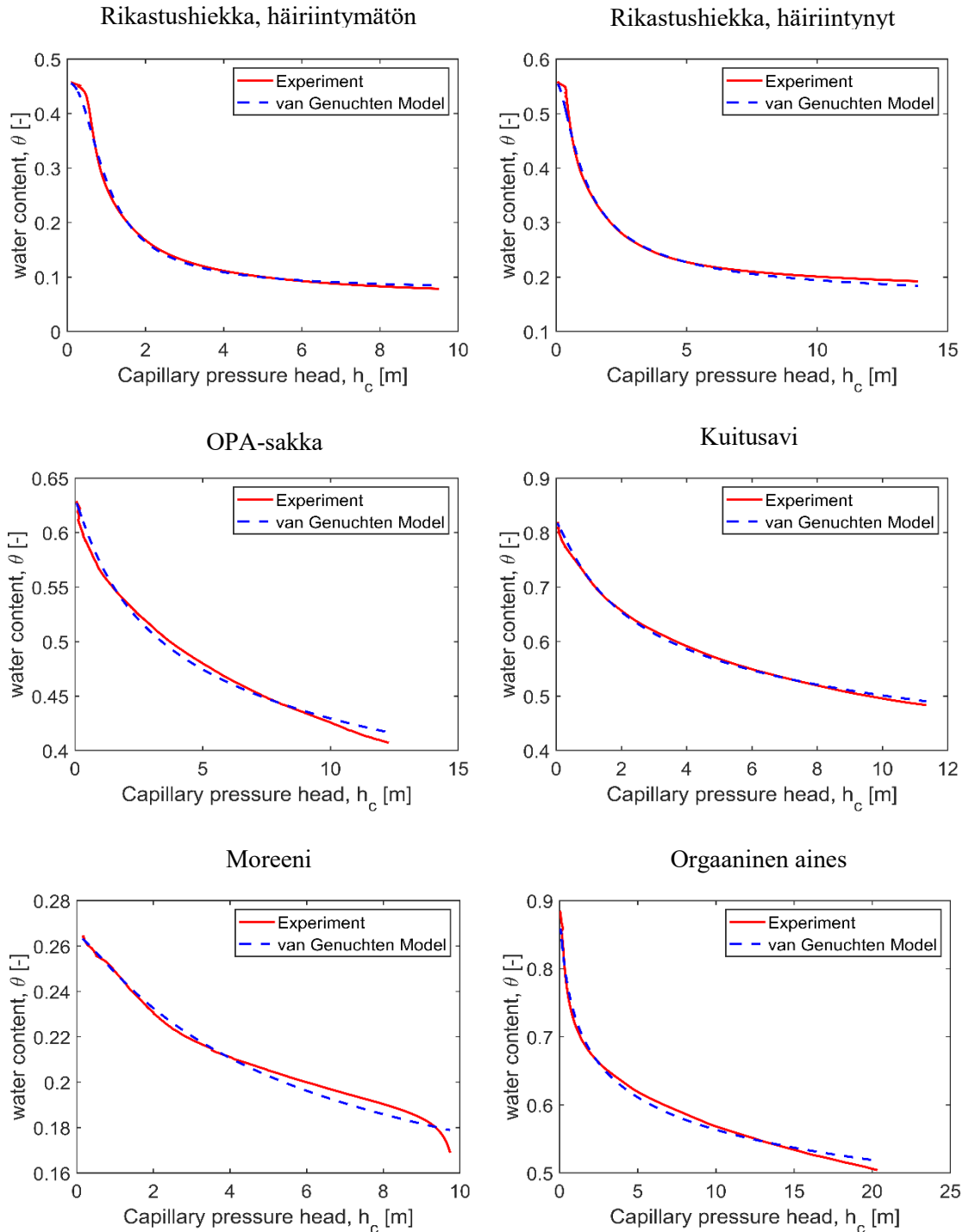
Kuva 24. Tutkitun moreeninäytteen mittausdataan sovitettu van Genuchten malli LABROS Soilview and Soilview-Analysis -ohjelmistossa. Mittauspisteet harhailivat etenkin mittauksen alku- ja loppupäässä, joka mahdollisesti vaikutti mallin istuvuuteen. Kuvassa mittauksen loppuvaiheelta on karsittu pois harhailevat mittauspisteet, jolla mallin istuvuus saatiin kohtuulliseksi, muttei kuitenkaan optimaaliseksi.

Tutkimuksen kaikille vedenpidätys- ja vedenjohtavuusmittauksille suoritettiin yhdenmukainen optimointirutiini. Optimointirutiinissa vedenpidätysmittauksissa kerättyä dataa muokattiin Excel-tiedostona ja datasta poistettiin poikkeavat mittauspisteet mittauksien alku- ja loppupuolilta. Tämän jälkeen Excel tiedoston data syötettiin Matlab-ohjelmistoon, johon oli kirjoitettu tutkimusta varten yksinkertainen ja helppokäyttöinen koodi (Liite 1), jonka tarkoituksena oli optimoida van Genuchten mallin istuvuus sekä tuottaa laskennalliset van Genuchten mallin α ja n arvot. Koodiin syötettiin mittauksissa kullekin näytteelle kerätyt θ_s ja θ_r -arvot riveille 23 ja 34 (Liite 1) ja koodi tuotti automaattisesti optimoidun vedenpidätyskäyrän sekä van Genuchten mallin α ja n arvot.

Optimointirutiini suoritettiin myös vedenjohtavuusmittauksille, joille oli kirjoitettu Matlabiin vastaavanlainen koodi (Liite 2). Koodiin syötettiin KSAT-laitteiston tuottamat a , b ja c parametrit riville 38 (Liite 2) excel tiedostosta, jonka jälkeen koodi tuotti vedenjohtavuuskäyrän ja laskennalliset K -arvot kullekin näytteelle.

6.4. Rikastushiekan ja peittomateriaalien vedenpidätyskäyrät ja van Genuchten mallin α ja n parametrit

Tutkituille näytteille muodostettiin mitatun datan perusteella vedenpidätyskäyrät ylempään tensiometrin tuottaman datan perusteella, joihin sovitettiin van Genuchtenin malli (Kuva 31). Mallin istuvuus vedenpidätyskäyriin saatiin sopivaksi aiemmin mainitulla optimointirutiinilla. Mallin avulla tutkimuksen näytteille muodostettiin laskennalliset van Genuchten mallin α ja n parametrit, jotka on koottu talukoon 2.



Kuva 31. Tutkittujen näytteiden vedenpidätyskäyrät punaisella, joihin on sovitettu van Genuchten malli sinisellä katkoviivalla.

Vedenpidätyskäyrien perusteella voitiin todeta, että rikastushiekkojen keskinäiset vedenpidätysominaisuudet ja molempien kuitusavien (OPA-sakka ja kuitusavi) vedenpidätysominaisuudet vastasivat karkeasti toisiaan. Hillelin (2006) mukaan moreenin vedenpidätyskäyrä on tyypillinen sekalajitteiselle maalajille, sekä orgaanisen aineksen korkea vesipitoisuus tyypillinen runsaasti orgaanista ainesta sisältävälle materiaalille. Smith *et al.* (2001) ovat tutkineet näytteen tiiveyden vaikutusta vedenpidätyskäyrään ja ovat todenneet, että tiiviimmän materiaalin vedenpidätyskäyrä on useimmiten tasaisempi, joka selittäisi etenkin myös tässä tutkimuksessa mitatun moreenin vedenpidätyskäyrän tasaisuuden.

Tutkimuksessa mitattujen rikastushiekkänäytteiden vedenpidätyskäyrissä oli havaittavissa jyrkkä lasku vesipitoisuudessa alhaisessa vedenpaineessa, joka viittaisi myös materiaalin suhteellisen alhaiseen vedenpidätyskykyyn (Hillel 2006). Häiriintynyt rikastushiekkänäyte pystyi pidättämään vettä häiriintymätöntä näytettä hieman enemmän, joka selittyy mitä luultavimmin näytteiden keskinäisten tiiveyksien erolla makrohuokosrakenteissa. Kuivaseulonnan ja sedigrafianalyysin perusteella, häiriintyneessä rikastushiekkänäytteessä saven ja siltin osuus oli myös häiriintymätöntä näytettä hieman korkeampi (kuva 21), jolla on todennäköisesti vaikutusta materiaalin vedenpidätyskykyyn, sekä matriisipotentiaaliin. Laitteistolla mitatun häiriintymättömän rikastushiekkänäytteen datan perusteella materiaalin vesipitoisuus täysin kyllästyneenä oli 0,46 sekä jäännösveden määrä näytteessä 0,07. Van Genuchten mallin α ja n parametreiksi näytteessä saatiin 1,30 ja 2,46.

Häiriintyneen rikastushiekkänäytteen kyllästynyt vesimäärä näytteessä oli sen sijaan 0,56 ja jäännösveden määrä 0,08. Van Genuchten mallin parametreiksi saatiin $\alpha=1,53$ ja $n=1,81$.

OPA-sakan vedenpidätyskäyrässä oli havaittavissa loiva asteittainen lasku, joka viittasi siihen, että se pystyi pidättämään vettä selvästi rikastushiekkvoja kauemmin (Benson *et al.* 2014) Tämän lisäksi materiaalin vedenpidätyskyky oli rikastushiekkvoihin verrattuna suhteellisen korkea myös korkeammassa kapillaaripaineessa. Tutkimuksessa OPA-sakan raekokojakaumasta ei ollut tietoa, mutta vedenpidätyskäyrän perusteella voidaan olettaa olevan rikastushiekkvoja selvästi hienorakeisempi. Korkeampi vesipitoisuus selittyy myös todennäköisesti näytteen orgaanisen aineksen pitoisuudella.

Tutkimuksessa OPA-sakan vesipitoisuus täysin kyllästyneenä oli 0,63 ja jäännösveden määrä näytteessä oli 0,09. Van Genuchten mallin α ja n arvoiksi saatiin 1,00 ja 1,19. Rikastushiekkvoja alhaisemmat α ja n arvot viittaisivat myös parempaan vedenpidätyskykyyn (Benson *et al.* 2014).

Kuitusaven vedenpidätyskäyrän perusteella voidaan tulkita, että sen vedenpidätysominaisuudet vastasivat OPA-sakkaa. Kuitusaven vesipitoisuus oli kuitenkin OPA-sakkaa korkeampi täysin kyllästyneenä, joka on seurausta luultavasti korkeammasta orgaanisen aineksen pitoisuudesta. OPA-sakan tavoin kuitusavi pystyi pidättämään vettä myös suhteellisen korkeassa

kapillaaripaineessa, joka viittaisi näytteen korkeaan kapillaarivoimaan ja vahvaan vedenpidätyskykyyn.

Kuitusaven kyllästynyt vesimäärä oli 0,82 ja jäännösveden määrä 0,12. Van Genuchten mallin parametreiksi saatiin $\alpha=1,23$ ja $n=1,24$.

Moreenin vedenpidätyskäyrä eroaa muista tutkituista näytteistä selvästi ja on tyypillinen materiaaleille, joiden raekokojakauma on sekalainen (Saxton & Rawls 2006). Vedenpidätyskäyrän perusteella, moreeni pystyi pidättämään vettä rikastushiekkoja enemmän, mutta ei kuitenkaan saavuttanut kuitusavien vedenpidätysominaisuuksia. Täysin kyllästyneenä, moreeninäyte pystyi myös pidättämään vettä näytteistä vähiten. Kuivaseulonnan ja sedigrafianalyysin sekä huomattavasti alhaisemman α -arvon perusteella sekalajitteisen moreenin rakenne sisältää todennäköisesti mikrohuokosia, jotka pystyvät pidättämään vettä ja makrohuokosia jotka pystyvät johtamaan vettä (Benson *et al.* 2014).

Moreenille mitatun datan perusteella kyllästynyt vesimäärä näytteessä oli 0,27 ja jäännösveden määrä 0,08. Van Genuchten mallin α ja n parametreiksi saatiin 0,59 ja 1,27.

Tutkimuksessa orgaanisen aineksen koostumuksesta ei ollut tarkkaa tietoa, mutta se pidätti näytteistä ylivoimaisesti eniten vettä, myös korkeassa vedenpaineessa. Tämä on tyypillistä kaikelle orgaaniselle ainekselle (Saxton & Rawls 2006). Tiiviinä rakenteena orgaanisen aineksen mikrohuokokset pystyvät pidättämään suuriakin määriä vettä painoonsa nähden.

Orgaanisen aineksen kyllästynyt vesipitoisuus oli 0,88 ja jäännösveden määrä näytteessä oli 0,13. Van Genuchten mallin parametreiksi saatiin $\alpha=3,97$ ja $n=1,12$.

Taulukko 2. Tutkittujen maaperänäytteiden ominaisuuksia. Taulukossa θ_s kyllästynyt vesimäärä, θ_r jäännösveden määrä, α ja n van Genuchten mallin laskennalliset parametrit.

Näyte	θ_s	θ_r	Laskennallinen vG α , 1/m	Keskihajonta α , +/-	n	Keskihajonta , n
Rikastushiekka , häiriintymätön	0,46	0,07	1,30	0,001628	2,46	0,002215
OPA-sakka	0,63	0,09	1,00	0,014910	1,19	0,001432
Moreeni	0,27	0,04	0,59	0,011054	1,27	0,003165
Kuitusavi	0,82	0,12	1,23	0,011792	1,24	0,001171
Rikastushiekka , häiriintynyt	0,56	0,08	1,53	0,003035	1,81	0,001329
Orgaaninen aines	0,88	0,13	3,97	0,036456	1,12	0,000370

6.5. Rikastushiekan ja peittomateriaalien vedenjohtavuusominaisuudet

6.5.1. KSAT

Kaikkien näytteiden vedenjohtavuusmittaukset suoritettiin laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti mahdollisimman yhteneväisesti muuttuvapaineisella kokeella, jotta mittaustulokset olivat mahdollisimman yhteneväisiä keskenään. Vesipilarin korkeus byretissä jokaiselle näytteelle oli 5 cm, pois lukien näytteet, jotka mitattiin kapillaariputkimenetelmällä. Lämpötila laboratoriossa pysyi vakiona (20 °C) mittausten ajan.. Mittauksissa käytettiin myös laitevalmistaja suositusten mukaan keitettyä hanavettä, joka on mittausten ajan ollut saman lämpöistä kuin laboratorion lämpötila. On kuitenkin mainittava, että joidenkin näytteiden kohdalla saturointi kesti useamman vuorokauden, joten on vaikea sanoa kuinka paljon ilmaa on sitoutunut takaisin veteen ennen mittauksen aloitusta.

6.5.2. Rikastushiekka 1

Ensimmäinen rikastushiekanäyte täytettiin manuaalisesti näytesylinteriin. Tiivistys suoritettiin aiempien menetelmien tavoin, jossa näytesylinteri täytettiin viidessä kerroksessa, kunnes materiaalia ei enää mahtunut näytesylinteriin. Näyte kyllästettiin vedellä saturointialtaassa noin 15 minuutin ajan, kunnes näytteen pinta oli kiiltävä. Mittauksen aloitusvaiheessa laitteistossa näytesylinterin yläpuolella käytettiin ensin metallista verkkoa, joka kuitenkin osoittautui rei'iltään liian suureksi, jolloin näytettä pääsi erodoitumaan veden virtauksen mukana. Metallinen verkko vaihdettiin tästä syystä tiheämpään huokoslevyyn, jolla pystyttiin rajoittamaan materiaalin erodoitumista. Rikastushiekan mittausta kesti kokonaisuudessaan viisi minuuttia, jolloin laitteiston mittaamaksi vedenjohtavuudeksi saatiin, taulukon 3 mukaisesti $K = 1,50 \times 10^{-5} \text{ m/s}$.

6.5.3. OPA-sakka

Rikastushiekanäytteen tavoin OPA-sakkanäyte tiivistettiin näytesylinteriin viidessä kerroksessa reunoilta keskelle painellen, jonka jälkeen näyte asetettiin vesialtaaseen saturoitumaan. OPA-sakan yhteydessä kyllästettiin samanaikaisesti myös moreeni- ja kuitusavinäytteet mittausten nopeuttamiseksi. OPA-sakan vedenjohtavuusominaisuudet todettiin erittäin alhaisiksi jo saturointivaiheessa. Näyte ei ollut kyllästynyt vedellä vielä viikon jälkeenkään. Mittaus aloitettiin kahdeksan vuorokauden kyllästämisen jälkeen. Oletetun alhaisen vedenjohtavuuden takia, mittauksessa käytettiin KSAT-laitteen mukana tulevaa kapillaariputkea, jonka tarkoituksena on nopeuttaa mittausta aineksille, joiden vedenjohtavuus on erittäin alhainen. Tällä menetelmällä vesipilarin teoreettinen korkeus byretissä oli 44 cm, viiden senttimetrin sijasta. Mittaus kesti yhteensä 3,5 tuntia ja laitteistolla mitatun OPA-sakan vedenjohtavuudeksi saatiin tällöin $K = 4,36 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.

Näytteelle suoritettiin kokeilun vuoksi myös toinen mittaus ilman kapillaariputkea. Tämä mittaus kuitenkin keskeytettiin 18 tunnin jälkeen, kun veden pinta byretissä oli laskenut 0,36 cm, sillä laitteiston arvioima mittausaika olisi ollut kohtuuttoman pitkä (yli 12 vuorokautta). Vedenjohtavuudeksi OPA-sakalle tässä mittauksessa saatiin $K = 2,76 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, joka kuitenkin vastaa myös kapillaariputkimenetelmällä suoritettua mittausta.

Koska OPA-sakka asetettiin näytesylinteriin vasta mittausvaiheessa, näytteen varsinainen tiiveys jäi epäselväksi. Oletettavasti tiiveys vastasi kuitenkin muita näytteitä, jotka valmisteltiin vastaavin menetelmin. Materiaali oli irtonaisena hyvin paakkuista, jolloin on mahdollista, että varsinainen näyte ei ollut täysin homogeeninen huolellisesta tiivistyksestä huolimatta.

6.5.4. Moreeni

Näyte tiivistettiin aikaisempien näytteiden tapaan viidessä kerroksessa reunoilta keskelle painellen, kunnes näytettä ei saanut enää lisättyä näytesylinteriin käsivoimin. Huomioksi on myös lisättävä, että tiivistysvaiheessa moreeninäytteestä poistettiin suurimmat paakut, jotka olisivat vieneet kohtuuttomasti tilaa näytesylinteristä. Tiivistyksen jälkeen näyte asetettiin saturoitumaan vesialtaaseen. Aiemmasta moreeninäytteen kyllästämistä poiketen, tällä kertaa saturointivaiheessa havaittiin, että hyvin tiivistetty moreeninäyte ei käytännössä läpäise vettä, sillä näyte ei ollut kyllästynyt edes viikossa. Vedenjohtavuuskokeessa todettiin, että hyvin tiivistetyn moreeninäytteen saturointi ei onnistunut pelkällä vesialtaalla, vaan saturoinnissa olisi ollut hyvä käyttää paineistusta. Vaihtoehtoisesti saturointiaikaa olisi voitu jatkaa ilman paineistusta siihen saakka, kunnes näyte olisi ollut silmämääräisesti kyllästynyt vedellä, joka olisi kuitenkin vienyt tutkimuksen kannalta kohtuuttoman paljon aikaa.

Moreeninäytteen mittaus aloitettiin kuitenkin, kun näyte oli saturoitunut 10 vuorokautta. Tässä vaiheessa oltiin epävarmoja näytteen kylläisyydestä, sillä ennen laitteeseen asettamista, näytteen pinta ei ollut täysin kostea, joka viittasi siihen, ettei näyte ollut täysin vedellä kyllästynyt.

Mittauksessa käytettiin OPA-sakan tavoin kapillaariputkimenetelmää, jotta mittausaika oli kohtuullinen. Tällä menetelmällä mittaus kesti yhteensä 24 tuntia, jolloin moreenin vedenjohtavuusarvoksi saatiin $K = 6,18 \times 10^{-10} \text{ m/s}$.

6.5.5. Kuitusavi

Kuitusavinäyte oli valmiiksi näytesylinterissä, joten tiivistystä ei suoritettu. Näyte oli kyllästynyt noin kymmenessä tunnissa, jolloin mittaus voitiin aloittaa. Näytteen mittaus kesti hieman alle kuusi vuorokautta, jolloin kuitusaven vedenjohtavuudeksi saatiin $K = 1,14 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. Kuitusaven tuottajan, Metsä Tissue Oyj:n (RT 38715, 2015) mukaan kuitusaven vedenjohtavuus vaihtelee kuitenkin välillä $K = 1,10 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ - $K = 1,10 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, jolloin tässä tutkimuksessa mitatun kuitusaven vedenjohtavuus oli noin 10 kertaa suurempi. Syynä tähän

voidaan luultavasti pitää sitä, ettei näytettä ei ollut tiivistetty tarpeeksi, jotta se olisi vastannut niin sanottua *in situ* tiiveyttä.

6.5.6. Rikastushiekka 2

Näyte oli valmiiksi näytesylinterissä, joten tiivistystä ei suoritettu. Näyte saturoitiin vesialtaassa ja mittaus aloitettiin, kun näyte oli kyllästynyt vedellä. Ensimmäisen rikastushiekkänäytteen tavoin, myös toinen rikastushiekkänäyte oli kyllästynyt vedellä noin 15 minuutin jälkeen. Näytteen mittaus kesti yhteensä seitsemän minuuttia, jolloin rikastushiekan vedenjohtavuudeksi saatiin $K = 1,12 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, joka vastasi myös ensimmäisen rikastushiekan mitattua vedenjohtavuutta.

6.5.7. Orgaaninen aines

Orgaanisen aineksen näyte ei myöskään ollut näytesylinterissä, jolloin se valmisteltiin aiempien näytteiden tapaan täyttämällä näyterinkula viidessä kerroksessa tiivistäen jokaisen kerroksen välillä, kunnes näyterinkula oli täynnä. Näytteen vedenjohtavuutta mitattiin muuttuvapaineisella menetelmällä rikastushiekkänäytteiden tapaan ilman kapillaariputkea 17 tuntia, jonka jälkeen mittaus lopetettiin. Tässä vaiheessa veden pinta byretissä oli laskenut vain 0,3 cm ja laitteiston antama arvio mittausajalle olisi ollut kaksi viikkoa. Näytettä yritettiin mitata myös aiemmin mainitulla kapillaarimenetelmällä siinä kuitenkaan onnistumatta. Ilman kapillaariputkea keskeytetyssä kokeessa orgaanisen aineksen vedenjohtavuudeksi saatiin $K = 4,46 \times 10^{-9} \text{ m/s}$. Mittauksen aikana huomattiin myös, että orgaaninen aines värjäsi voimakkaasti mittalaitteessa käytettyjä huokoslevyjä ja väriä oli lähes mahdoton saada pois huolellisesta pesusta huolimatta.

Taulukko 3. Mittauksissa kerättyjen maaperänäytteiden vedenjohtavuuksia. Taulukossa OPA-sakan sekä moreenin K -arvot ovat mitattu kapillaariputkimenetelmällä. Alkuperäinen vedenjohtavuusarvo on laitteiston ilmoittama arvo ja optimoitu arvo laskennallinen matemaattisen mallin tuottama vedenjohtavuusarvo.

Näyte	Alkuperäinen $K_{sat}, \text{m/s}$	Laskennallinen $K_{sat}, \text{m/s}$	Laskennallisen arvon keskihajonta +/-
Rikastushiekka 1	$1,50 \times 10^{-5}$	$1,27 \times 10^{-5}$	$8,58 \times 10^{-7}$
OPA-sakka	$4,36 \times 10^{-9}$	$3,36 \times 10^{-7}$	$1,51 \times 10^{-8}$
Moreeni	$6,18 \times 10^{-10}$	$4,92 \times 10^{-8}$	$2,04 \times 10^{-9}$
Kuitusavi	$1,14 \times 10^{-7}$	$1,51 \times 10^{-7}$	$5,58 \times 10^{-9}$
Rikastushiekka 2	$1,12 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-5}$	$6,42 \times 10^{-7}$
Orgaaninen aines	$4,46 \times 10^{-9}$	$5,59 \times 10^{-9}$	$1,01 \times 10^{-7}$

6.6. Vedenjohtavuuskäyrät ja laskennalliset K-arvot

KSAT-laitteiston vedenjohtavuusmittauksille suoritettiin vedenpidätysmittauksia vastaava optimointirutiini, jossa mitattuun dataan sovitettiin matemaattinen malli ja jonka avulla mittauksille saatiin laskennalliset vedenjohtavuuden K-arvot (Taulukko 3). Vedenjohtavuuskäyrissä (Kuva 32) sinisellä olevan matemaattisen mallin yhtälössä $y = a \times \exp(-b \times t) + c$, arvo y on mitatun kapillaarivoiman arvo senttimetreissä (sama kuin vesipilarin korkeus byretissä) ja t aika sekunneissa. Arvot a , b ja c ovat mittauksissa kerättyjä parametrejä, jotka vaihtelevat eri tutkituilla materiaaleilla.

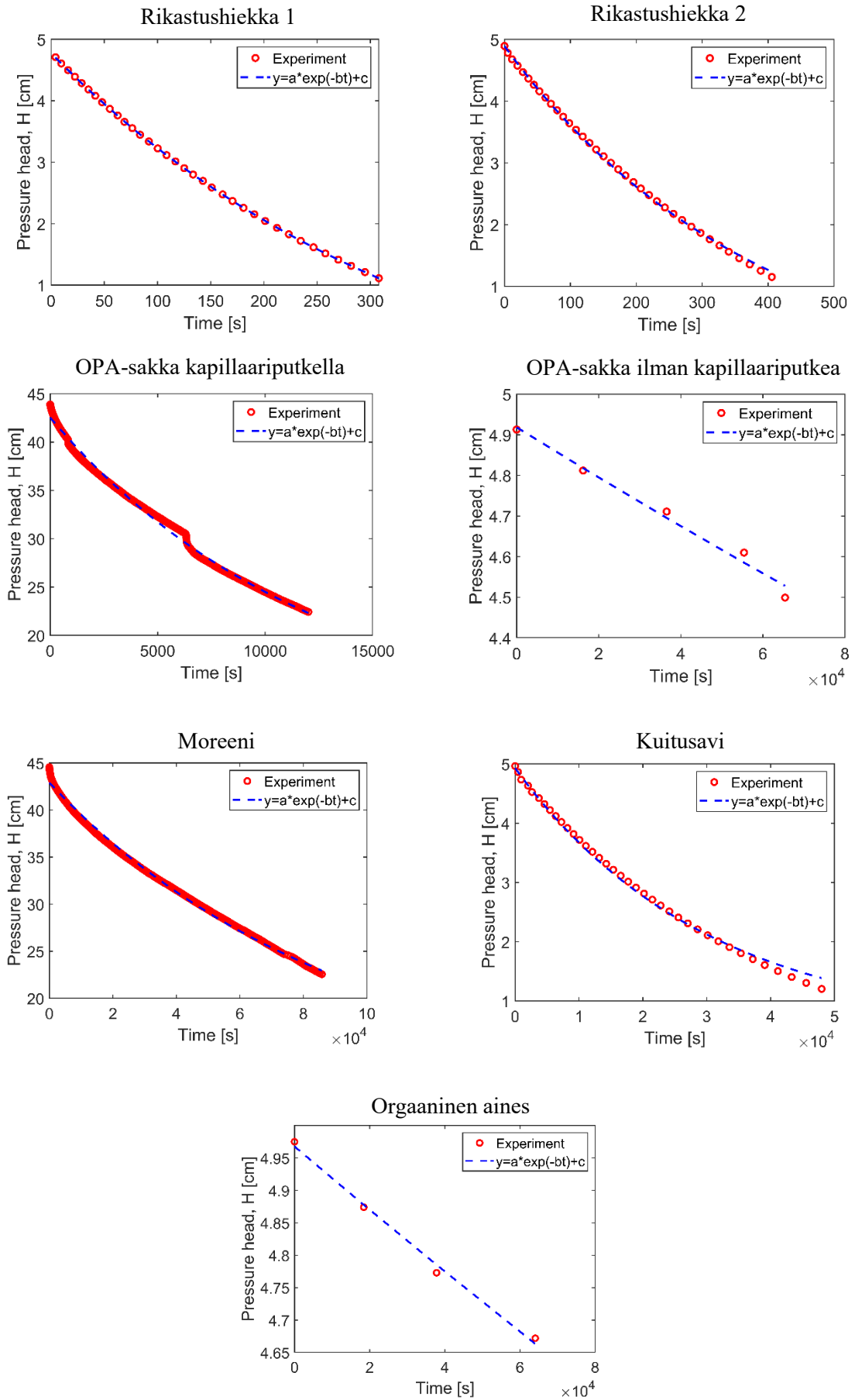
Kuvan 32 perustella voidaan tulkita, että mallin istuvuus mitattuun dataan saatiin sopivaksi optimointirutiinilla. Molempien rikastushiekkänäytteiden vedenjohtavuuden voidaan todeta vastaavan toisiaan ja suurimpana eroavaisuutena näytteillä oli mittauksen kesto. Taulukon 3 mukaisesti, optimointirutiinilla ensimmäisen rikastushiekkänäytteen laskennalliseksi K-arvoksi saatiin $K = 1,27 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Tutkimuksessa toisen rikastushiekkänäytteen laskennalliseksi vedenjohtavuusarvoksi saatiin $K = 1,18 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Laskennallisten vedenjohtavuusarvojen voidaan todeta vastaavan toisiaan ja ero arvoissa oli hyvin pieni. Taulukon 3 perusteella voidaan myös todeta, että laskennalliset arvot vastaavat KSAT-laitteiston antamaa alkuperäistä K-arvoa.

Kuvassa 32 toisella rivillä olevat kuvaajat kuvastavat OPA-sakasta muodostettuja vedenjohtavuuskäyriä. Käyristä vasemmanpuoleinen on OPA-sakan mittaus kapillaariputkimenetelmällä ja oikeanpuoleinen ilman kapillaariputkea. Kapillaariputkella mitatussa käyrässä voidaan havaita kaksi notkahdusta. Syy notkahduksiin ei käynyt ilmi mittauksen aikana, mutta voidaan olettaa, että aiemmin mainitun näytteen paakkuisuuden takia näytteen rakenteessa on ollut tekijöitä, jotka ovat vaikuttaneet äkilliseen vedenjohtavuuden nousumiseen. Taulukon 3 perusteella kapillaariputkimenetelmällä mitattu optimointirutiinin laskennallinen arvo ($K = 3,26 \times 10^{-7} \text{ m/s}$) poikkeaa kuitenkin merkittävästi laitteiston alkuperäisestä mitatusta vedenjohtavuusarvosta ja selittyy todennäköisesti notkahduksella mittauskäyrässä, sillä *KSAT view* -ohjelmistossa mallin istuvuutta ei saatu optimaaliseksi. Ilman kapillaariputkea suoritettun mittauksen pitkän keston takia, varsinaisia mittauspisteitä muodostui vain viisi kappaletta, jolloin sekä taulukon 3 mukainen alkuperäinen että laskennallinen K-arvo ($K = 2,76 \times 10^{-9} \text{ m/s}$) ei välttämättä ole täysin luotettavia, mutta vastaavat puolestaan toisiaan.

Kuvan 32 mukaan vedenjohtavuuskäyrä kolmannella rivillä vasemmalla kuvastaa moreenista mitattua vedenjohtavuuskäyrää. Tämän tutkimuksen perusteella moreenin vedenjohtavuusarvo oli näytteistä alhaisin, jopa hieman yllättäen. OPA-sakan tavoin, taulukon 3 mukaan moreenin laskennallinen vedenjohtavuusarvo poikkesi kuitenkin merkittävästi laitteiston alkuperäisestä vedenjohtavuusarvosta. Tämä johtui mitä luultavimmin siitä, että mallin istuvuutta ei saatu optimaaliseksi *KSAT view* -ohjelmistossa. Kuten aiemmin mainittiin, moreeninäytteestä

poistettiin myös suurimmat paakut, jolla on mitä luultavimmin ollut myös jonkin verran vaikutusta mitattuihin vedenjohtavuusarvoihin. Lisäksi epävarmuus näytteen kylläisyydestä mittauksen aloitusvaiheessa luo epävarmuutta mittaustulokseen. Optimointirutiinilla moreenin laskennalliseksi vedenjohtavuusarvoksi saatiin taulukon 3 mukaisesti $K = 4,92 \times 10^{-8} \text{ m/s}$.

Kuvassa 32 kuvaaja f kuvastaa kuitusaven vedenjohtavuuskäyrää. Mittaus suoritettiin rikastushiekköjen tapaan ilman kapillaariputkea jolloin veden korkeus byretissä oli 5 cm. Tutkimuksessa matemaattisella mallilla kuitusaven laskennalliseksi vedenjohtavuusarvoksi saatiin taulukon 3 mukaisesti $K = 1,51 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, joka vastasi myös laitteiston alkuperäistä vedenjohtavuusarvoa. Kuitusaven vedenjohtavuusarvo vastasi myös OPA-sakan vedenjohtavuutta.



Kuva 32. Tutkimuksessa vedenjohtavuuskäyriin sovitettiin matemaattinen malli, jolla näytteille määritettiin optimoidut vedenjohtavuusarvot. Kuvaajissa OPA-sakka-, moreeni-, kuitusavi ja orgaanisen aineksen aika on ilmaistu potenssissa mittausten keston vuoksi.

Kuvassa 32 alin kuvaaja kuvastaa orgaanisen aineksen vedenjohtavuuskäyrää. Mittauksen epävarmuudesta ja osittaisesta epäonnistumisesta johtuen, orgaanisen aineksen mittaustuloksiin on hyvä suhtautua hieman kriittisesti mittauspisteiden vähyyden vuoksi. Optimointirutiinilla orgaanisen aineksen vedenjohtavuusarvoksi saatiin $K = 5,59 \times 10^{-9} \text{ m/s}$, joka vastasi myös alkuperäistä laitteiston antamaa vedenjohtavuutta taulukon 3 mukaisesti.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksessa käytetyt laitteet mahdollistavat useiden maaperänäytteiden vedenpidätys- ja vedenjohtavuusominaisuuksien tutkimisen suhteellisen helposti. Tässä tutkimuksessa laitteita käytettiin ensimmäistä kertaa ja etenkin tutkimuksen alkuvaiheessa aikaa kului laitteiden käytön opettelemiseen sekä rutiinien muodostumiseen. Jo tutkimuksen alkuvaiheessa kävi kuitenkin ilmi, että laitteissa käytettävän veden laatu ja sensorien onnistunut ilmaus olivat avainasemassa mittausten onnistumisen kannalta. Tutkimuksen rajallisen ajan sekä rajallisten näytteiden määrän takia jokainen näyte analysoitiin vain kerran. Vertailukelpoisen datan vähyyden vuoksi tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että tutkittavia materiaaleja olisikin hyvä mitata useampaan otteeseen. Myös optimaalisten tulosten saamiseksi mittauksissa olisi suositeltavaa käyttää häiriintymättömiä maaperänäytteitä. Tutkimuksessa useat näytteet olivat häiriintyneitä ja niiden varsinainen tiiveys jäi epäselväksi, kun näytesylintereitä täytettiin manuaalisesti. Tästä huolimatta laitteiden avulla saatiin selvitettyä materiaalien vedenpidätys- ja vedenjohtavuusominaisuuksia, jotka ovat hyödyllisiä, kun tutkitaan sekundääristen peittomateriaalien käyttömahdollisuutta. Laitteiden voidaan todeta soveltuvan vastaavanlaisiin tutkimuksiin myös tulevaisuudessa.

Laitteistojen mukana tulleet ohjelmistot aiheuttivat hieman epävarmuutta, kun vedenpidätys- ja vedenjohtavuusdataan sovitettiin matemaattista mallia. Mallin istuvuus ei aina ollut optimaalinen, jolloin istuvuutta jouduttiin parantamaan ohjelmistojen ulkopuolella.

Tutkimuksessa kerättyjen vedenpidätys- ja vedenjohtavuusarvojen perusteella voidaan todeta, että Hituran rikastushiekka-alueen peittorakenteissa käytetty moreeni, sekä sekundääriset kuitusavet soveltuvat hydrologisilta ominaisuuksiltaan peittomateriaaleiksi. Vaikka tutkimuksessa toinen kuitusavista ei täyttänyt vedenjohtuvuusarvoltaan läpäisemättömän alhaisen virtaaman peiton vaatimuksia voidaan sen kuitenkin olettaa toimivan hyvin vettä pidättävänä kerroksena ja vähentävän hapen kulkeutumista rikastushiekkakerrokseen moreenin ja OPA-sakan tavoin. Myös Hituran kaivoksen ulkopuoleinen orgaaninen aines soveltuisi tutkimuksen perusteella hydrologisilta ominaisuuksiltaan peittorakenteissa käytettäväksi.

Tutkimuksessa laitteistoilla kerättyjä arvoja vedenpidätyksestä ja vedenjohtavuudesta on mahdollista käyttää sellaisenaan hydrologisessa mallinnuksessa ja soveltuvat hyvin käytettäväksi esimerkiksi HYDRUS-1D mallinnussovelluksen kanssa.

8. KIITOKSET

Tämän tutkimuksen ovat mahdollistaneet useat henkilöt ja haluaisin kiittää kaikkia siinä mukana olleita. Geotalon henkilökunnasta haluaisin kiittää erityisesti graduohjaajani Eila Hietaharjua, jolta olen saanut apua viiveettä tutkielman suorittamisessa aina kun olen sitä tarvinnut. Lisäksi haluaisin kiittää Esa Heilimoa tutkielman aiheen esittelemisestä. Geologian tutkimuskeskukselta haluaisin kiittää toista graduohjaajaani, erikoistutkija Teemu Karlssonia, joka on myös tukenut tutkielman edistymistä parhain mahdollisin tavoin. Lisäksi haluan välittää kiitokset Tommi Kauppilalle, sekä Muhammad Muniruzzamanille, joka tarjosi omalla osaamisellaan tutkielmassa käytetyn Matlab-koodin.

KIRJALLISUUS

Argunhan-Atalay, C., Yazicigil, H. (2018). Modeling and Performance Assessment of Alternative Cover Systems on a Waste Rock Storage Area. *Mine Water Environment* 37(1), 106–118. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0476-y>

Benson, C. & Chiang, I. & Chalermyanont, T. & Sawangsuriya, A. (2014). Estimating van Genuchten Parameters α and n for Clean Sands from Particle Size Distribution Data. Geotechnical Special Publication. 410-427. 10.1061/9780784413265.033.

ELY-keskuksen tiedote. (2016). ELY-keskuksen tiedote 26.9.2016. <http://www.ely-keskus.fi/web/ely/-/pohjoispohjanmaan-ely-keskus-valmisteleehituran-kaivoksen-sulkemistatnivalassa-pohjois-pohjanmaa-#.WFpAIDi7peg>

Garbarino, E., Orveillon, G., Saveyn, H., Barthe, P. and Eder, P. (2018). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industriesin accordance with Directive 2006/21/EC, EUR 28963 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-77178-1, doi:10.2760/35297, JRC109657. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC109657>

Gorakhki, M. H., & Bareither, C. A. (2017). Sustainable Reuse of Mine Tailings and Waste Rock as Water-Balance Covers. *Minerals*, 7(7), 128. <https://doi.org/10.3390/min7070128>

Heikkinen, P. (2009). Active sulphide mine tailings impoundments as sources of contaminated drainage: controlling factors, methods of characterisation and geochemical constraints for mitigation. Väitöskirja. Turun yliopisto, Geologian laitos. 38 s

Heikkinen, P.M., Noras, P. & Salminen, R. (eds) (2008). Mine Closure Handbook. Environmental Techniques for the Extractive Industries. Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala. 169 p. ISBN 978-952-217-042-2

Hillel, D. (2003). Introduction to environmental soil physics. Elsevier. 511 p.
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/kutu/reader.action?docID=297052&ppg=4>

Hudson-Edwards, K. A., Jamieson, H. E., & Lottermoser, B. G. (2011). Mine wastes: past, present, future. *Elements*, 7(6), 375-380. <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/elements/article-abstract/7/6/375/137902/Mine-Wastes-Past-Present-Future>

HYPROP-2. (2025) *LABROS Soilview and Soilview-Analysis* -ohjelmisto
<https://metergroup.com/products/hyprop/>

Karlsson, T., Kauppila, P., & Lehtonen, M. (2017). Assessment of the effects of mine closure activities to waste rock drainage quality at the Hitura Ni-Cu mine, Finland. In *Submitted to the Proceedings of the 13th International Mine Water Association Congress- "Mine Water & Circular Economy–A Green Congress*. 80-87.

Karlsson, T., Räisänen, M.L., Lehtonen, M. & Alakangas, L. (2018). Comparison of static and mineralogical ARD prediction methods in the Nordic environment. *Environmental Assessment and Monitoring* 190(12). 719. doi.org/10.1007/s10661-018-7096-2

Kauppila, P., Räisänen, M. L., & Myllyoja, S. (2013). Best environmental practices in metal ore mining. *Finnish environment* 29en, 222. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/40006>

Kivipelto, J., Nieminen, S., Jokiranta, T., Nurmi, H., Koivuhuhta, A., Kauppila, P., Karlsson, T., Tornivaara, A., & Kauppila, T. (2020). Opas kaivannaisjätteiden hallinnan MWEI BREF -vertailuasiakirjan parhaita käyttökelpoisia tekniikoita koskevien päätelmien soveltamiseen. 250 s.

Kleinmann, L., P., Crerar, A. & Pacelli, R. (1981). Biogeochemistry of Acid Mine Drainage and a Method to Control Acid Formation. *Mining Engineering*, March 1981, 300–305.

KSAT. (2025). Ksat-view -ohjelmisto. Saatavilla: <https://metergroup.com/products/ksat/>

Lohiniva, E., Mäkinen, T. & Sipilä, K. (2001). Lietteiden käsittely: Uudet ja käytössä olevat tekniikat. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tiedotteita - Meddelanden - Research Notes No. 2081 <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2001/T2081.pdf>

Lottermoser B.G. (2009). Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts, 3rd edn. Springer, Berlin 400 s. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-12419-8>

Lottermoser, B. G. (2017). Environmental Indicators in Metal Mining. Springer. 412 s. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-42731-7>

Meter Group. (2024). Hyprop-Manual. 115 s. Saatavilla: <https://metergroup.com/products/hyprop/>

Meter Group. (2021). KSAT-Manual. 46 s. Saatavilla: https://metergroup.com/products/ksat/#support_faq

Metsä Tissue Oyj. (2015). Finncao-kuitusavi, RT38715 tuotetieto. Saatavilla: <https://keskisavonymparistotoimi.fi/wp-content/uploads/2020/02/2017.4.28-Finncao-kuitusavi-1.pdf> haettu 1.4.2025

Morin, K. A., & Hutt, N. M. (2001). Environmental geochemistry of minesite drainage: Practical theory and case studies, Digital Edition. 349 p. MDAG Publishing (www. mdag. com), Surrey, British Columbia.

Nordstrom, D. K. & Alpers, C. N. (1999). Geochemistry of acid mine waters. In: Plumlee, G. S. & Logsdon, M. J. (eds) The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: Processes, Techniques, and Health Issues. Reviews in Economic Geology, Vol. 6A, 133–160

Oulun yliopisto (2018). Kaivoksen sulkeminen – Vaikutukset ja uudet mahdollisuudet. KAIVASU. <https://www.oulu.fi/fi/projektit/kaivoksen-sulkeminen-vaikutukset-ja-uudet-mahdollisuudet>

Peche, A., Houben, G. and Altfelder, S. (2024), Approximation of van Genuchten Parameter Ranges from Hydraulic Conductivity Data. *Groundwater*, 62: 469-479. <https://doi.org/10.1111/gwat.13365>

Salomons, W. (1995). Environmental impact of metals derived from mining activities; processes, predictions, prevention. *Journal of Geochemical Exploration* 52, 5–23.

Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.

Schindler, U., von Unold, G., Durner, W., Müller, L., (2010). Evaporation method for measuring unsaturated hydraulic properties of soils: extending the range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74, 1071–1083. DOI: 10.2136/sssaj2008.0358.

Singer, P. C., & Stumm, W. (1970). Acidic mine drainage: the rate-determining step. *Science*, 167(3921), 1121-1123.

Smith, C., Johnston, M., and Lorentz, S. (2001). The Effect of Soil Compaction on the Water Retention Characteristics of Soils in Forest Plantation. *South African Journal of Plant and Soil*, 18(3), 87-97.

Shokrana, M. S. B., & Ghane, E. (2020). Measurement of soil water characteristic curve using HYPROP2. *MethodsX*, 7, 100840. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100840>.

Tornivaara, A., Turunen, K., Lahtinen, T., Heino, N., Pasanen, A., Reinikainen, J., Jouttijärvi, T., Häkkinen, J., Karjalainen, N., & Viitasalo, M. (2020). Suljettujen ja hylättyjen kaivannaisjätealueiden kunnostustarpeen arviointi. 193 s.

Tornivaara, A., Räisänen, M. L., Kovalainen, H., & Kauppi, S. (2018). Suljettujen ja hylättyjen kaivosten kaivannaisjätealueiden jatkokartoitus (KAJAK II). Suomen ympäristökeskuksen raportteja; 12/2018. 162 s.

Toropainen, V. (2006). Yhteenveto sulfidimalmikaivostoiminnasta Suomessa ja toiminnassa muodostuvista sivutuotteista sekä niiden ympäristövaikutuksista. Geologian tutkimuskeskus. 52 s.

Toropainen, V. & Heikkinen, P. (2006). Pyhäsalmen, Hituran, Talvivaaran ja Ihalaisen kaivosten sivukivien ja rikastushiekköjen mineraloginen ja kemiallinen koostumus. Geologian tutkimuskeskus 45 s.

Usowicz, B., Lipiec, J., & Siczek, A. (2024). Fitting the van Genuchten model to the measured hydraulic parameters in soils of different genesis and texture at the regional scale. *International Agrophysics*, 38(4), 373-382.

van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 4, 892-898.

LIIITEET

Liite 1

```
1 % THIS SCRIPT OPTIMIZES WATER-RETENTION CURVE OBTAINED FROM HYPROP
2 % MEASUREMENTS
3 % INPUT: 1) CAPILLARY PRESSURE HEAD, hc (m)
4 %          2) VOLUMETRIC WATER CONTENT, theta (-)
5 %
6 % OUTPUT: BEST FIT VALUES FOR VAN GENUCHTEN ALPHA AND N
7 %
8 % MUHAMMAD MUNIRUZZAMAN (md.muniruzzaman@gtk.fi)
9 %-----
10
11 clear all % clear all variables
12 clc      % clear the command window
13
14 % LOAD THE DATA FROM EXCEL -> capillary pressure (hc) and water content
15 % (theta)
16 data=xlsread('WRC_analysis_Teemu.xlsx','tentionTop_waterContent','A2:B1938'
17 );
18 theta_data = data(:,2); % volumetric water content (-)
19 hc         = data(:,1); % capillary pressure head (m)
20
21 % NOTE: these values can also be estimated, if needed but I feel like it
22 % is the best we can use these values as a known priori
23 theta_s = 0.457; % saturated water content (-)
24 theta_r = 0.075; % residual water content (-)
25
26
27 % PLOT THE WATER RETENTION CURVE
28 figure(1)
29 plot(hc,theta_data,'r-','LineWidth',2) % measured profile
30 hold on
31 h1=plot(hc,theta_data,'b--','LineWidth',2); % simulated profile
32 hold off
33 legend('Experiment','van Genuchten Model')
34 ylabel('water content, \theta [-]')
35 xlabel('Capillary pressure head, h_c [m]')
36 set(gca,'FontSize',16,'Linewidth',1)
37
38 % STARTING VALUES OF THE PARAMETERS FOR OPTIMIZATION
39 %-- first parameter: van Genuchten alpha (1/m)
40 %-- second parameter: van Genuchten n (-)
41 start = [5.4, 1.3];
42
43 % UPPER AND LOWER BOUND OF THE PARAMETERS TO BE ESTIMATED
44 % note: you may want to use a smaller range if you want to for a certain
45 % parameter within a range
46 lb = [1 , 0.1];
47 ub = [10 , 3 ];
48
```

```

49 % OPTIMIZARION WITH LSQNONLIN=====
50 % note: lsqnonlin solver is preferable as it provides us uncertainty
51 % p --> is the best fit parameters
52 % options = optimset('Display','Iter');
53 options = optimoptions(@lsqnonlin,'Algorithm','levenberg-
marquardt','TolX',1E-15,'TolFun',1E-
15,'MaxFunEval',100000,'Display','Iter','MaxIter',1000);
54[p,resnorm,residual,exitflag,output,lambda,jacobian]=lsqnonlin(@fun_retenti
on_lsq,start,lb,ub,options,theta_data,hc,theta_s,theta_r,h1)
55
56
57% OPTIMIZATION WITH FMINSEARCH=====
58 % note: fminsearch can be used as an initial try, if lsqnonlin encounters
59 % troubles
60 % options = optimset('Display','Iter','TolX',1E-12,'TolFun',1E-12);

61p=fminsearch(@fun_retention,start,options,theta_data,hc,theta_s,theta_r,h1
)
62
63
64% CALCULATION OF UNCERTAINTY=====
65 J=jacobian; % Jacobian Matrix

66 % Cyy REFERS TO THE MEASUREMENT UNCERTAINTY OF Y-PARAMETER (THETA here)...
67 % I roughly considered 1% = 0.01, but you can replace this value with the
68 % accuracy of the device, if such information is given
69 Cyy= (0.01)^2; % Measurement Uncertainty -->
70 Cpp= inv(J*(inv(Cyy))*J); % Covariance of Estimated Parameters
71 SD = sqrt(diag(Cpp)); % Standard Deviations of Estimated Parameters
72
73
74 % DISPLAY THE FINAL RESULTS IN THE COMMAND WINDOW
75disp(sprintf('=====
'))
76 disp(sprintf('ESTIMATED PARAMETERS:'))
77 disp(sprintf(' van Genuchten alpha [1/m]: %1.2f +/- %1.6f',p(1),
SD(1)))
78 disp(sprintf(' van Genuchten n [-]: %1.2f +/- %1.6f',p(2),
SD(2)))
79disp(sprintf('=====
'))

```

Liite 2

```
1 % THIS SCRIPT OPTIMIZES WATER-RETENTION CURVE OBTAINED FROM HYPROP
2 % MEASUREMENTS
3 % INPUT: 1) TIME, t (s)
4 %           2) PRESSURE HEAD, H (cm)
5 %
6 % OUTPUT: BEST FIT VALUES FOR COEFFICIENTS a, b, and c (Ksat is calculated
7 % from b)
8 %
9 % MUHAMMAD MUNIRUZZAMAN (md.muniruzzaman@gtk.fi)
10 %-----
11
12
13 clear all % clear all variables
14 clc      % clear the command window

15 % LOAD THE DATA FROM EXCEL -> capillary pressure (hc) and water content
16 % (theta)
17         data           =           xlsread('KSAT_measurementGK_TEKA-
18         2022_101.2_001.xlsx','KSAT_Measurement','C59:D93');
19 t = data(:,1); % time (s)
20 H = data(:,2); % pressure head, H(t) (cm)
21
22
23 % PLOT PRESSURE HEAD VS TIME CURVE
24 figure(1)
25 plot(t,H,'ro','LineWidth',2) % measured profile
26 hold on
27 h1=plot(t,H,'b--','LineWidth',2); % simulated profile
28 hold off
29 legend('Experiment','y=a*exp(-bt)+c')
30 xlabel('Time [s]')
31 ylabel('Pressure head, H [cm]')
32 set(gca,'FontSize',16,'LineWidth',1)
33
```

```

34 % STARTING VALUES OF THE PARAMETERS FOR OPTIMIZATION
35 %-- first parameter: a [cm]
36 %-- second parameter: b [1/s]
37 %-- third parameter: c [cm]
38 start = [5.83, -3.29e-3, 1]; % a, b, c
39
40 % UPPER AND LOWER BOUND OF THE PARAMETERS TO BE ESTIMATED
41 % note: you may want to use a smaller range if you want to for a certain
42 % parameter within a range
43 lb    = [4, 1e-10, -10];
44 ub    = [7, 5, 10];
45
46 % OPTIMIZARION WITH LSQNONLIN =====
47 % note: lsqnonlin solver is preferable as it provides us uncertainty
48 % p --> is the best fit parameters
49 options = optimset('Display','Iter');
50 options = optimoptions(@lsqnonlin,'Algorithm','levenberg-
marquardt','TolX',1E-15,'TolFun',1E-
15,'MaxFunEval',100000,'Display','Iter','MaxIter',1000);
51[p,resnorm,residual,exitflag,output,lambda,jacobian]=lsqnonlin(@fun_retenti
on_Ksat_lsq,start,lb,ub,options,t,H,h1)
52
53
54 % OPTIMIZATION WITH FMINSEARCH=====
55 % note: fminsearch can be used as an initial try, if lsqnonlin encounters
56 % troubles
57 % options = optimset('Display','Iter','TolX',1E-12,'TolFun',1E-12);
58 % p=fminsearch(@fun_retention_Ksat,start,options,t,H,h1)
59
60
61 % CALCULATION OF Ksat=====
62 A_bur = 4.524; % burrette cross sectional area [cm^2]
63 A_sample = 50; % sample cross sectional area [cm^2]
64 L= 5; % sample height [cm]
65 b = p(2); % best fit value of b [1/s]
66

```

```

67 % calculation of saturated hydraulic conductivity
68 Ks_cms = (A_bur/A_sample)*L*b      % Ksat in [cm/s]
69 Ks_cmd = Ks_cms*86400             % Ksat in [cm/d]
70 Ks_ms  = Ks_cms*1e-2              % Ksat in [m/s]
71
72

73 % CALCULATION OF UNCERTAINTY=====
74 J=jacobian; % Jacobian Matrix
75
76 % Cyy REFERS TO THE MEASUREMENT UNCERTAINTY OF Y-PARAMETER (THETA here)...
77 % I roughly considered 1% = 0.01, but you can replace this value with the
78 % accuracy of the device, if such information is given
79 Cyy = 0.01;                       % Measurement Uncertainty [1%]
80 iCyy= 1/(Cyy)^2;                  % inverse of measurement variance
81 Cpp= inv(J'*(iCyy)*J);            % Covariance of Estimated Parameters
82 SD = sqrt(diag(Cpp));             % Standard Deviations of Estimated Parameters (a,
b, and c)
83
84 sd_Ksat_cms = SD(2)*(A_bur/A_sample)*L % sd of Ks in [cm/s]
85 sd_Ksat_ms  = sd_Ksat_cms*1e-2      % sd of Ks in [m/s]
86
87 % DISPLAY THE FINAL RESULTS IN THE COMMAND WINDOW
88disp(sprintf('=====
====='))
89 disp(sprintf('ESTIMATED PARAMETERS:'))
90 disp(sprintf('          Saturated hydraulic conductivity, Ks [m/s]: %1.3g +/-
%1.3g',Ks_ms, sd_Ksat_ms))
91disp(sprintf('=====
====='))

```