

MITTAUSJÄRJESTELMÄT KAIVANNAISJÄTTEIDEN KUIVAPEITTOJEN TOIMIVUUDEN SELVITYKSISSÄ

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Pekka Forsman	
Työn nimi Mittausjärjestelmät kaivannaisjätteiden kuivapeittojen toimivuuden selvityksissä	
Päiväys 18.11.2019	Sivumäärä/Liitteet 41/1
Ohjaaja(t) Pasi Pajula, yliopettaja	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Geologian tutkimuskeskus	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Kaivostoiminnan seurauksena syntyy suuria jätevirtoja, kuten rikastushiekkaa ja sivukiveä. Kun jäteaines pääsee kosketuksiin ilmakehän hapen ja sadevesien kanssa, sen sisältämät sulfidimineraalit saattavat hapettua ja muodostaa haitta-ainepitoista hapanta valumaa. Happamat ja metallipitoiset valumavedet voivat aiheuttaa suurta haittaa ympäristölle vuosikymmenien ajan. Haitallisen valuman muodostumisen minimoimiseksi kaivannaisjätteet tulisi peittää oikealla menetelmällä sadevesien ja hapen diffuusion ehkäisemiseksi.</p> <p>Geologian tutkimuskeskuksella käynnissä olevan budjettirahoitteen TUMMELI-projektin ensimmäisessä työpaketissa kehitetään osaamista kaivannaisjätealueiden peittorakennetutkimuksissa ja mallinnuksessa. Opinnäytetyöni tavoitteena oli perehtyä kuivapeittojen toimivuuden mittaamiseen soveltuviin ratkaisuihin pilotoimalla moreenin ja biokaasun tuotannossa syntyvän mädätysjäätännöksen soveltuvuutta kaivannaisjätteen peittomateriaaliksi. Soveltuviin mittalaitteisiin perehtymisen lisäksi työn vaiheita olivat mm. laitehankinta kilpailutuksineen, antureiden testimittaukset valvotuissa oloissa, sää- ja mittausaseman rakentaminen, datan seuranta ja keruu, sekä mittaustulosten käsittely. Pilotointi toteutettiin Leppävirran kunnassa sijaitsevan Särkiniemen suljetun nikkelikaivoksen sivukiven läjitysalueella instrumentoiduilla lysimetrikokeilla.</p>	
<p>Avainsanat</p> <p>Kaivannaisjätteen kuivapeitto, ympäristömonitorointi, lysimetrikokeet</p>	

Field of Study			
Technology, Communication and Transport			
Degree Programme			
Master's Degree Programme in Environmental Engineering			
Author(s)			
Pekka Forsman			
Title of Thesis			
Measurement systems for determining the performance of mine waste dry covers			
Date	18.11.2019	Pages/Appendices	41/1
Supervisor(s)			
Mr Pasi Pajula, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners			
Geological Survey of Finland			
Abstract			
<p>Mining produces large amounts of waste, such as tailings and waste rock. The mine wastes containing sulphide minerals might be oxidized when interacting with atmospheric oxygen and rainwater. Acidic and harmful element containing drainage water can be environmentally hazardous for decades. Mine waste needs to be covered with the right method to prevent or effectively minimize the diffusion of rain water and oxygen into the waste and the formation of acid mine drainage.</p> <p>The first work package of the currently on-going budget-funded TUMMELI-project at Geological Survey of Finland develops expertise in mine waste dry cover research and modeling. The aim of my thesis was to explore the suitable methods for measuring the performance of dry covers by piloting suitability of till and digestate from biogas production as a component of mine waste dry covers. The thesis consists of several stages from the purchase of measuring equipment to the processing of the results. The piloting was performed with instrumented lysimeter tests installed in a waste rock pile at the closed Särkiniemi nickel mine in the municipality of Leppävirta.</p>			
Keywords			
Mine waste dry cover, environmental monitoring, lysimeter tests			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	5
2	KAIVANNAISJÄTEPEITTOJEN TOIMIVUUTEEN LIITTYVIÄ TUTKIMUKSIA.....	7
2.1	Sivukivipeittojen heterogeenisyyden arviointi lysimetrien avulla, Mt. Isa Mines, Australia	7
2.2	Moreenipeiton toimivuuden tutkimus, Equity Silver mine, Kanada	10
3	SÄRKINIEMEN KUIVAPEITTOTUTKIMUKSET	13
3.1	TUMMELI-projekti	13
3.2	Särkiniemen kaivoksen toiminta	13
3.3	Kenttäkokeet ja instrumentointi	14
4	MITTALAITTEISTO	16
4.1	Lysimetrit	16
4.2	CR1000X-dataloggeri.....	17
4.3	SO-110-happianturi.....	17
4.4	CS650-reflektometri	18
4.5	Tipping Bucket Flow Gauge 6506G.....	19
4.6	Sääasema.....	20
5	OHJELMISTO JA TIEDONSIIRTO	21
5.1	LoggerNet ja mittausohjelma	21
5.2	Reitittimet	21
5.3	Yhteysasetusten määitykset	22
6	ANTUREIDEN TESTIMITTAUKSET	23
6.1	Testimittauksen vaiheet	23
6.2	Testimittauksen tulokset	24
7	SÄRKINIEMEN KENTTÄTYÖT	26
7.1	Alkuvalmistelut	26
7.2	Mittausaseman rakentaminen	26
7.3	Sääaseman rakentaminen.....	28
7.4	Lysimetrien kastelut ja peittojen asennukset.....	31
8	HAPPI- JA VESIPITOISUUSTULOKSIA.....	36
9	YHTEENVETO.....	39
	LÄHTEET	40
	LIITE 1: NÄKYMÄ CRBASIC EDITORISTA.....	42

1 JOHDANTO

Kaivostoiminnan seurauksena syntyneet happamat valumavedet voivat aiheuttaa pahimmillaan suuren riskin ympäristön pilaantumiseen ja vakavaa vaaraa ihmisen terveydelle. Näitä happamia vesiä muodostuu pääasiassa kaivoksilla, joilla työstetään sulfidimineraaleja tai joiden toiminnasta on syntynyt sulfidimineraaleja sisältävää jätettä. Sulfidimineraalien hapettua muodostuu vajovettä happamoittavaa rikkihappoa. Raudan hapettua ja saostuessa muodostuneet protonit aiheuttavat jätteen kemiallista rapautumista ja haitallisten metallien liukenemista.

(Kumpulainen, Carlson & Räisänen 2007)

Kun ilmakehän happi ja kosteus pääsevät kosketuksiin jäteaineksen sisältämien sulfidimineraalien kanssa, se alkaa hapettumaan. Kaivostoiminnassa syntyneet sulfidipitoiset jätteet täytyy peittää oikealla tavalla hapettumisen estämiseksi mahdollisimman tehokkaasti. Peittotapoja on käytännössä kahta tyyppiä. Tehokas tapa hidastaa rautasulfidien hapettumista ja aineiden liukenemista on käyttää märkäpeittoa, jossa jäteaines sijoitetaan kokonaan veden alle. Happi liikkuu vedessä huomattavasti hitaammin kuin ilmassa. (Tremblay & Hogan 2001). Toinen peittotapa on yhdestä tai useammasta maa-aineskerroksesta koostuva kuivapeitto.

Kuivapeittoja voidaan käyttää läjitetyn sivukiven sekä rikastushiekan peittämiseen. Useampikerroksisessa kuivapeitossa voi olla jäteaineksen päällä tiivistetty ja vettä pidättävä kerros estämässä hapen kulkeutumista. Huokoisempi pintakerros haihduttaa vettä suoraan takaisin ilmakehään ja se voi toimia myös kasvualustana luovuttaen vettä peiton päälle istutetun kasvillisuuden käyttöön. Kasvien kautta vesi haihtuu takaisin ilmakehään. Pintakerros suojaa tiivistettyä kerrosta eroosiolta. Kuivapeitossa voi olla myös orgaanisesta aineksesta koostuva happea kuluttava kerros.

(Kauppila, Räisänen & Myllyoja 2011)

Muita kuivapeiton tehtäviä voi olla mm. jätteen eristäminen muusta ympäristöstä ja jättemateriaalin fyysikaalisen ja kemiallisen rapautumisen sekä pölyämisen estäminen. On olemassa useita rakenteeltaan erilaisia kuivapeitoksi soveltuvia ratkaisuja, joista sopivin valitaan kohteen päästötavoitteiden, jätteen pitkäaikaiskäyttämisen ja ilmastollisten olosuhteiden mukaan. (O’Kane Consultants 2012)

Kaivostoiminnasta voi syntyä valtavia määriä, jopa satoja miljoonia tonneja, kaivannaisjätettä eli rikastushiekkaa ja sivukiveä. Jäte voidaan karkeasti luokitella kahteen ryhmään: happoa muodostamattomaksi (NAF; ”non-acid forming”), tai potentiaalisesti happoa muodostavaksi jätteeksi (PAF; ”potentially acid forming”). Kaivannaisjätteelle sopivimman jälkihoitomenetelmän valinta on ensisijaisen tärkeää ympäristövaikutusten minimoimisen kannalta. Peittojen sopivuutta tietyille jäteainekselle täytyy testata ennen lopullista valintaa. Testauksessa käytettyjä menetelmiä ovat esimerkiksi kaivosalueelle rakennettavat suuret testikaset, lysimetrikokeet tai laboratoriossa tehtävät kolonnitestit.

Lysimetrikokeet ovat käytännössä suuren mittakaavan huuhtoutumiskokeita. Ylhäältä avonaisten, yleensä pylväsmallisten tai suorakulmaisten säiliöiden sisään täytetään jäteainesta sekä vaihtoehtoisia kuivapeittorakenteita (Hansen, Holm, Hansen & Hjelmars 2000). Lysimetrin sisäkerrosten läpi suotautunut vesi johdetaan pohjan tai seinämän alaosaan tehdystä reiästä ulos. Suotautuneen veden määrää voidaan mitata virtausmittareilla. Se voidaan myös kerätä talteen vedenlaadun seurantaan varten. Lysimetrit voidaan asentaa maan pinnalle tai upottaa esimerkiksi kaivannaisjätealueelle maanpinnan tasoon tai syvemmälle. Lysimetrikokeita suunniteltaessa on useita asioita jotka täytyy päättää tapauskohtaisesti. Näitä ovat esimerkiksi lysimetrin muoto, koko, valmistusmateriaali, määrä, sijainti ja asennustapa. Kaivannaisjätealueelle asennettuna lysimetrikokeet simuloivat todellisia kenttäolosuhteita huomattavasti paremmin kuin kontrolloidut laboratoriokokeet. (Hansen ym. 2000).

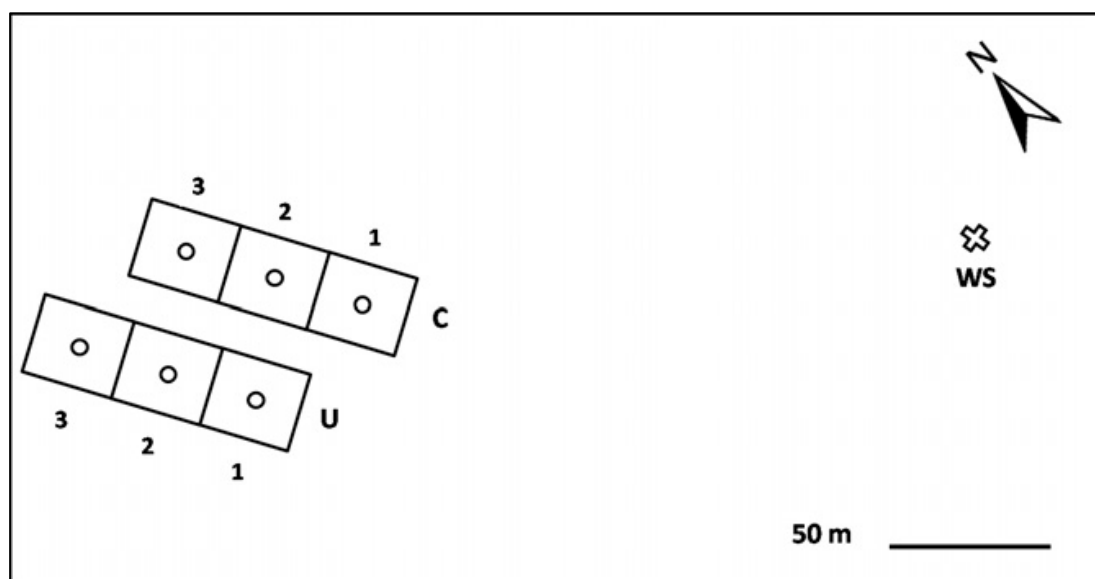
Kaivannaisjätteiden kuivapeittojen toimivuudesta on tehty useita selvityksiä ja tutkimuksia. Keskeisimmät mitattavat suureet näissä tutkimuksissa ovat peittomateriaalien happi- ja vesipitoisuudet. Muita mitattavia parametrejä voivat olla mm. peittomateriaalin lämpötila ja imukyky, veden pintavalunta, sekä pysty- ja sivusuuntainen suotautuminen kuivapeittokerrosten ja jäteaineksen lävitse. Usein kaivosalueelle rakennetaan myös sääasema seuraamaan paikallisia ilmasto-olosuhteita, kuten lämpötilaa, sadantaa, ilmankosteutta, haihduntaa ja auringon säteilyä. Kuivapeittojen toimivuuteen liittyviä instrumentoituja lysimetrikokeita on tehty eri puolilla maapalloa jo vuosikymmenien ajan. Lysimetrejä voidaan käyttää myös mikrobiologisen bakteeritoiminnan aiheuttaman sulfidimineraalien hapettumisen seurantaan liittyvissä kokeissa (Sand ym. 2007).

2 KAIVANNAISJÄTEPEITTOJEN TOIMIVUUTEEN LIITTYVIÄ TUTKIMUKSIA

2.1 Sivukivipeittojen heterogeenisyyden arviointi lysimetrien avulla, Mt. Isa Mines, Australia

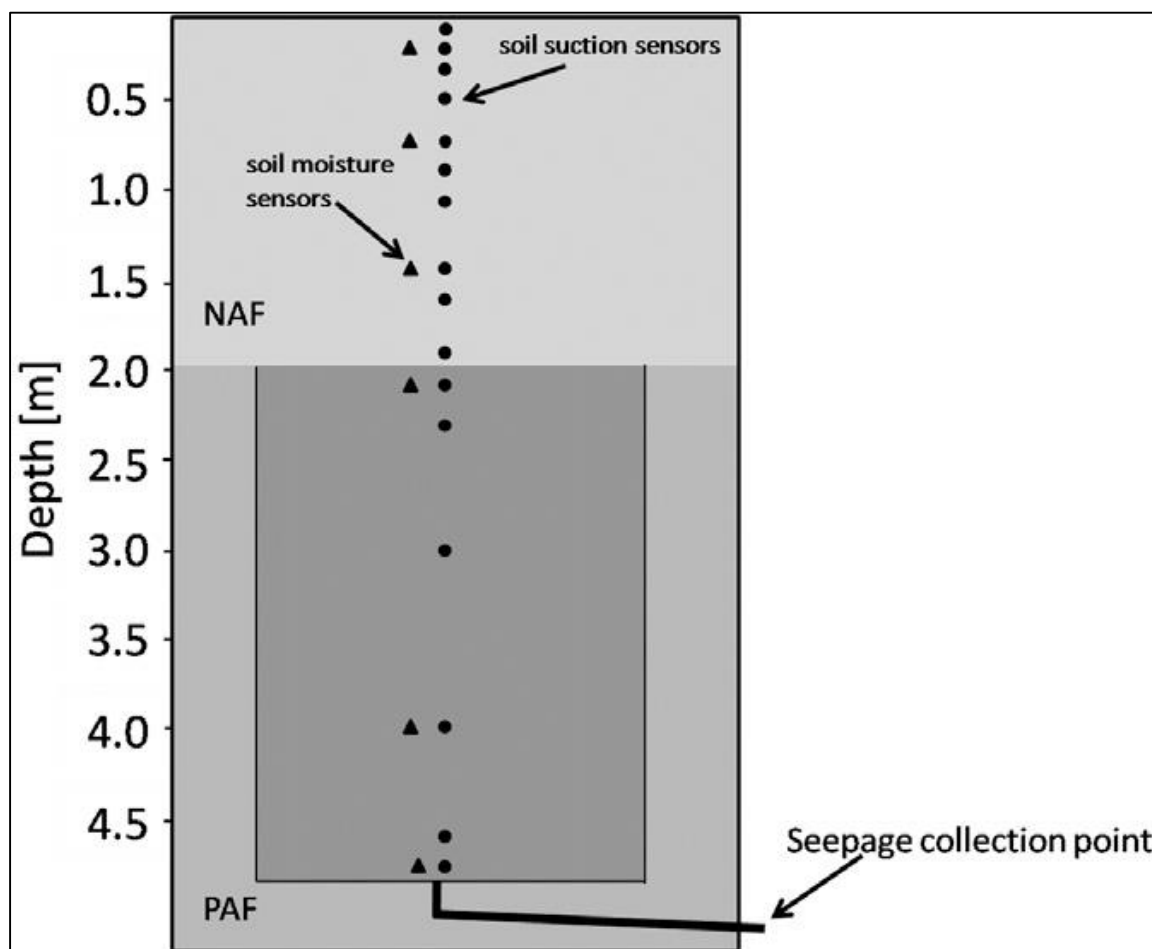
Kaivannaisjätteille käytettyjen peittomateriaalien koostumuksen heterogeenisyys aiheuttaa epävarmuutta peiton toimintakyvyssä. Peitoissa käytetty materiaali on usein malmin louhinnassa syntynyttä NAF-sivukiveä, jonka raekokoon vaikuttaa louhinnassa käytetty räjäytysvoima ja kallioperän rapautumisaste. Koska materiaali on laadultaan vaihtelevaa, fysikaaliset ominaisuudet voivat vaihdella suuresti kuivapeiton eri osissa. Materiaalin sisältämät suurikokoiset partikkelit voivat muodostaa vedelle makrohuokosvirtausreittejä, joita pitkin vesi pääsee valumaan jäteainekseen pidättymättä peittorakenteen sisälle. Australian Queenslandin osavaltion luoteisosassa sijaitsevalla Mount Isan kaivosalueella vertailtiin kahden vaihtoehdoisen kuivapeiton suorituskykyä sekä peittojen materiaalien heterogeenisyyttä. Mount Isan kaivosalue sijaitsee puolikuivan monsuuni-ilmaston alueella. Alueen keskimääräinen vuotuinen sadanta oli 420 mm aikavälillä 1932 -2009. Peittojen toimivuutta arvioitiin instrumentoiduilla lysimetrikokeilla, maaperän imu- ja kosteusmääritysten sekä sääolojen seurannan avulla. (Schneider, Doley & Mulligan 2010)

Koealue tehtiin kymmenen metriä korkean sivukiven läjitysalueen päälle, jossa kahta kuivapeittorakennetta testattiin kolmella rinnakkaisella 20x20 metrin kokoisella palstalla (kuva 1). Sekä kasan PAF- että peitoissa käytetty hyvälaatuinen NAF-sivukivi oli louhittu 300 metrin syvyydestä. Materiaalien raekokojakaumat määritettiin laboratoriossa. PAF-jätekivi oli peittomateriaalia hienompaa, sisältäen lähes 60 % karkeaa kiviainesta (>2 mm). Peittomateriaalissa karkean aineksen osuus oli noin 75 %. Toinen peitoista koostui puolen metrin kerroksesta tiivistettyä sivukiveä, jota suojasi vielä puolentoista metrin tiivistämätön kerros. Toisessa oli yhtenäinen kahden metrin kerros tiivistämätöntä sivukiveä. Koejärjestely rakennettiin traktorin ja kaivinkoneen voimin suurten mittakaavan kokeiden mukaisesti. (Schneider ym. 2010)



Kuva 1. Mount Isan kaivoksen sivukiven läjitysalueen koejärjestely. 1, 2 ja 3 = kuivapeittojen rinnakkaiset palstat, C = kuivapeitto, jonka ylin 0,5 m kerros tiivistetty, U = tiivistämätön 2 m:n peitto, WS = sääasema ja o = lysimetrien sijainnit. (Schneider ym. 2010)

Jokainen palsta instrumentoitiin samalla tavoin. Suuret, halkaisijaltaan ja korkeudeltaan kolmemetriset, lysimetrit kaivettiin palstoille jätekasan sisään niin, että niiden yläreuna sijoittui PAF-jätteen pinnan korkeudelle. Lysimetrien pohjalle laitettiin suodatinkankaat ja ne täytettiin sivukivellä tiivistäen tärylevyllä noin puolen metrin välein. Täytön yhteydessä lysimetrit ja niiden päälle kasatut peittokerrokset instrumentoitiin kuudella kosteutta mittaavalla reflektometrillä (Campbell CS616) ja 16:lla maan imukykyä mittaavalla Campbellin 229L-anturilla (kuva 2). Lysimetrien vedenpoistoletkuihin asennettiin Tipping Bucket-mittarit (Unidata 6506G) suotautuvien vesimäärien seuraamiseksi ja sääasema rakennettiin noin 500 metrin etäisyydelle koealueesta. Asennustyöt tehtiin lokakuussa 2008. Kaikille kuudelle palstalle asennettiin oma dataloggeri tallentamaan mittauksia neljän tunnin välein. (Schneider ym. 2010)



Kuva 2. Lysimetrien rakenne ja mittaustantureiden sijoittelu Mount Isan kaivoksen sivukiven läjitysalueen koepalstoilla. (Schneider ym. 2010)

Dataa kerättiin noin neljän kuukauden ajan, aikavälillä 5.12.2008 -25.3.2009. Kahden loggerin (Kuva 1, C1- ja U2-palstat) akkujen latauksessa esiintyi ongelmia ja ne toimivat vain aurinkoisina jaksoina aurinkopaneelin antaessa niille virran. Datan vähyyden takia näiden palstojen tulokset jätettiin pois tarkastelusta. Tammikuun 2009 aikana oli kymmenen päivän jakso, jolloin kaikkien lysimetrien suotovesien määrät näyttivät nollaa vaikka vettä satoi 253 mm. Kosteus- ja imuanturien mittausdatan perusteella pääteltiin, etteivät Tipping bucket-mittarit toimineet ko. aikavälillä. Syytä tähän ei löydetty. (Schneider ym. 2010)

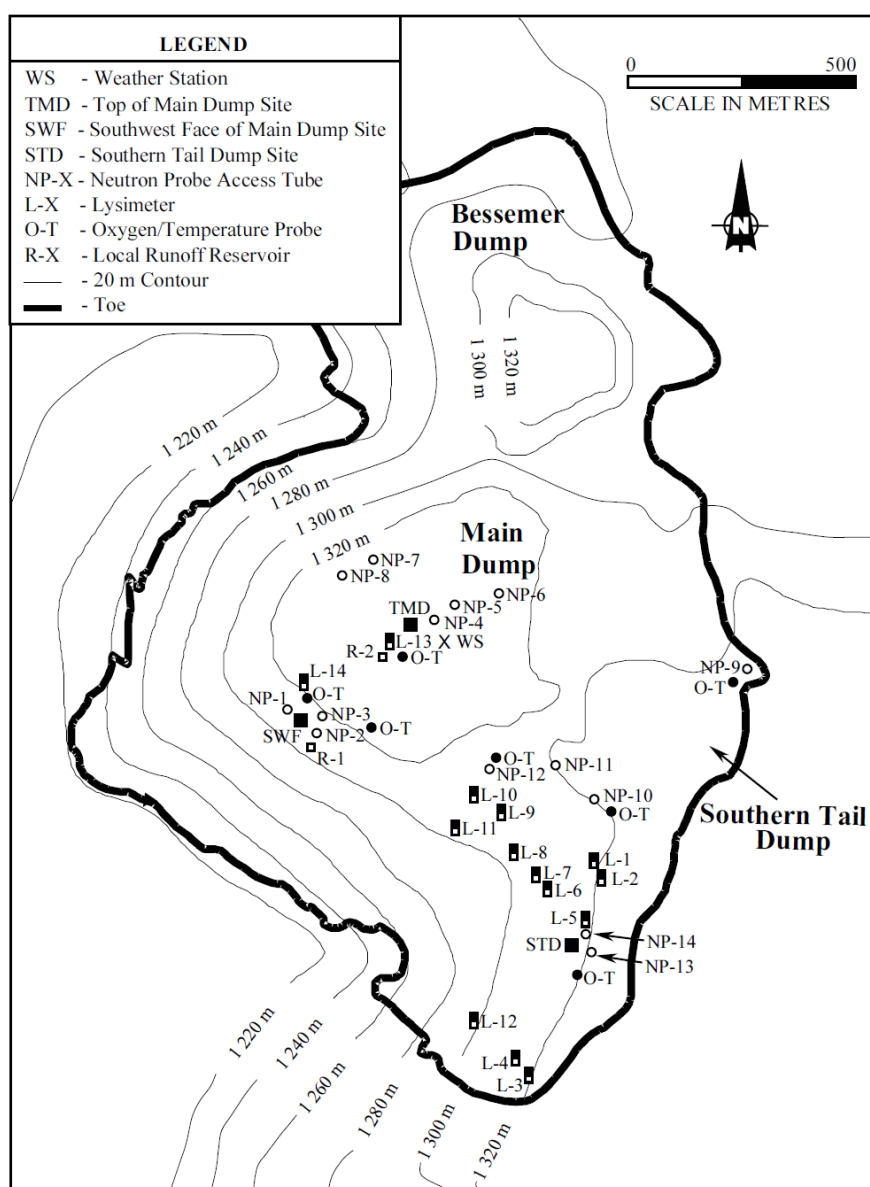
Joulukuun 7. päivän ensimmäisen sadejakson aikana vesi suotautui nopeasti noin metrin syvyydelle tiivistämättömissä U-palstojen peitoissa. Suuremmat erot näkyivät tiivistetyn pintakerroksen palstoissa, joista C3:ssa vesi suotautui peittoon 1,1 metrin ja C2:ssa kahden metrin syvyydelle. Toisen sadejakson tuloksena U1 kostui uudelleen noin metrin ja muut palstat noin puolen metrin syvyydeltä. Tammikuun 2009 alussa noin viikon kestäneiden rankkasateiden suotautumisissa oli nähtävissä suuria eroja, jolloin vesi suotautui C3:ssa peiton läpi jo 99mm:n sadannan jälkeen. Muiden palstojen osalta vesi läpäisi peittokerrokset C2-palstassa 151 mm, U3:ssa 108 mm ja U1:ssa 140 mm sadannan jälkeen. C3:ssa veden nopea kulkeutuminen viittaa makrohuokosvirtauksien muodostumiseen. (Schneider ym. 2010). Tämä on yleinen ongelma suurikokoisia partikkeleita sisältävissä sivukivien kuivapeitoissa. (O’Kane Consultants, 2003). Peiton hienojakoisemman aineksen ja kivien erilainen käyttäytyminen kostumis- ja kuivumisprosesseissa johtaa aineiden irtoamiseen toisistaan ja mahdollistaa makrohuokosvirtauksien syntymisen. (Poesen & Lavee 1994).

Peitoista ja lysimetrien sisältä mitatut kosteuspitoisuudet vastasivat hyvin alueen sadantaa. Erot lysimetrien kosteuspitoisuuksissa johtuivat todennäköisesti palstojen materiaalien erilaisista irtotiheyksistä ja hienomman kiviaineksen osuuksien eroista. Myös suotautuneiden vesien määrissä oli suuria eroja kumulatiivisen kertymän vaihdellessa eri palstoilla 21 -736 mm mittausjakson aikana. Suotovesiä tuli enemmän lysimetreistä, joissa oli tiivistetty pintakerros. (Schneider ym. 2010)

Kokeessa tehdyt mittaukset osoittivat, että vaikka palstoilla käytettiin samoja peittomateriaaleja, niiden sisäisessä koostumuksessa oli runsaasti vaihtelevuutta. Koostumuserot lisäävät peiton toiminnan epävarmuutta ja voivat aiheuttaa makrohuokosvirtauksia peiton sisällä. Näiden ongelmien välttämiseksi kaivosten tulisi panostaa laadunvarmistukseen peittomateriaalien valinnassa ja valmistusprosessissa. Peittorakenteissa tulisi käyttää hienojakoista, homogeenista materiaalia. (Schneider ym. 2010)

2.2 Moreenipeiton toimivuuden tutkimus, Equity Silver mine, Kanada

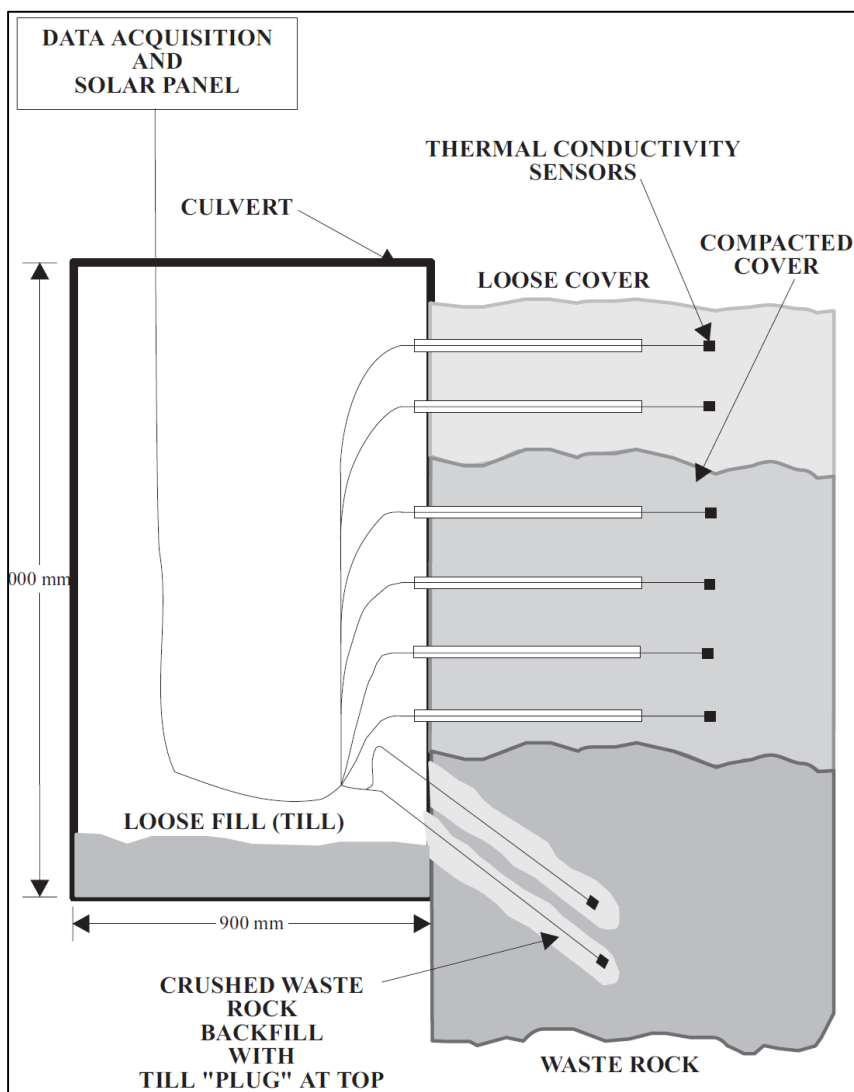
Kanadan British Columbiassa Equity Silver minen kaivosalueella selvitettiin vuosina 1993- 1995 kak-sikerroksisen moreenipeiton toimivuutta hapen ja veden pääsyn estämisessä jätteainekseen lysimetri-kokeiden ja kenttämittausten avulla. Equityn kaivoksella on kolme sivukiven läjitysalueetta. Avo-louhoksen avaamisen myötä syntyneellä pääläjitysalueella on 52 Mt sivukiveä 41 hehtaarin alueella, eteläisellä läjitysalueella 12 Mt ja pienimmällä Bessemerin läjitysalueella 10 Mt sivukivijätettä. Jäte on suhteellisen karkeaa koostuen pääasiassa vulkaanisesta- ja vähäisissä määrin sedimenttikivistä. Ete-läisen jälitysalueen kuivapeitto valmistui vuonna 1991, Besserin- ja pääläjitysalueen peitot vuonna 1994. Kaikkien kolmen alueen peitoissa on samanlainen rakenne, joka koostuu puolen metrin tiivis-tetystä-, ja päällä olevasta 0,3 metrin tiivistämättömästä moreenikerroksesta. Tiivistetyn kerroksen tehtävänä on säilyttää veden korkea kyllästymisaste ja alhainen vedenjohtavuus. Tämä vähentää hapen diffuusiota ja veden suotautumista jätteainekseen. Huokoisen päällyskerroksen on tarkoitus suojata alemmaa kerrosta eroosiolta, routimiselta ja kuivumiselta sekä toimia kasvualustana päälle istutetulle kasvillisuudelle. (O’Kane, Wilson & Barbour 1998)



Kuva 3. Equity Silver minen sivukiven jälitysalueiden instrumentointi (O’ Kane ym. 1998)

Peittomateriaali karakterisoitiin laboratoriossa, jossa määritettiin mm. raekokojakauma, ominaispaine, vedenpidätyskäyrä, kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus ja kokoonpuristuvuus. Pää- ja eteläisen läjitysalueiden kuivapeittojen instrumentointi toteutettiin aikavälillä 1992 -1994. Besseberin läjitysalue oli vielä asennusten aikaan käytössä, joten se jäi instrumentoinnin ulkopuolelle. Kolme päämittausasemaa (kuva 3, TMD, SWF ja STD) instrumentointiin lämmönjohtavuus- ja kosteusantureilla. Lisäksi peiton happi- ja hiilidioksidipitoisuuksia monitoroitiin kaivosyhtiön aikaisemmin asentamalla antureilla. (O' Kane ym. 1998)

Asennukset jätekasan ja peiton sisään tehtiin kaivurilla maahan kaivetuista teräksisistä rumpuputkista käsin (kuva 4). Anturit työnnettiin omalla asennustyökalullaan rumpuputken kylkiin leikattujen reikien kautta porattuihin aukkoihin. Sivukivijätteeseen asennettaville antureille porattiin viistot käytävät, jotka täytettiin asennuksen jälkeen sivukivimurskalla. Asennusetaisyysissä huomioitiin rumpuputken itsensä aiheuttama vaikutus tuloksiin. Anturit kytkettiin aurinkopaneelilla toimiviin loggereihin ja rumpuputket suljettiin asennusten jälkeen kansilla ilman pääsyn estämiseksi. Yhteensä 14 lysimetriä asennettiin mittausasemien läheisyyteen ja pääläjitysalueelle sijoitettiin lisäksi kaksi valuma-allasta pintavalunnan seuraamiseksi. Paikallisia sääoloja seurattiin TMD-mittausaseman viereen rakennetulla sääasemalla. (O' Kane ym. 1998)



Kuva 4. Equity Silver minen mittausasemien rakenne. (O' Kane ym. 1998)

Dataa luettiin asemilta noin 45 päivän välein. Kyllästymisasteet määritettiin peittokerrosten vesipitoisuusmittausten keskiarvoista jokaisen datankeruun yhteydessä. Mittaustulokset osoittivat tiivistetyn kerroksen säilyttävän korkean kyllästymisasteen, yli 90 %, koko kolmevuotisen mittausjakson ajan kaikilla mittausasemilla. Tällä oli suuri merkitys hapen kulkeutumisen estämisessä jätteainekseen. Alhainen hydraulinen johtavuus toimi myös veden massavirtaa pienentävänä tekijänä. Tiivistetty kerros oli mittausjakson kesäkausien alussa kyllästyneessä tilassa ja laski hieman loppukesää kohden pidemmän kuivan kauden seurauksena. Syksyn sateet ja lumien sulaminen keväällä kyllästivät peiton tiiviin kerroksen uudestaan. Ylemmän tiivistämättömän moreenikerroksen kyllästymisaste vaihteli ilmastollisista olosuhteista riippuen 62 -85 %. Se toimi kuten pitikin alemman kerroksen suojana ja kasvillisuuden kasvualustana. (O' Kane ym. 1998)

Lämmönjohtavuusantureilla mitattiin myös matriisista imua eli peittomateriaaliin kohdistuvaa painetta vesipitoisuuserojen tasaamiseksi sen sisällä. SWF-mittausasemalla tiivistetyn moreenikerroksen matriisi-imu pysyi alle 90 kPa:n koko mittausjakson ajan. Alhaiset paine-arvot korreloivat korkean kyllästymisasteen kanssa. STD-asemalla vastaavat paine-arvot nousivat hetkellisesti yli 400 kPa:n kesäkauden lopulla, kun kyllästymisaste oli noin 80 %. TDM-asemalta ei saatu määritettyä matriisista imua peiton tiivistetystä osasta viallisten antureiden takia. Ylemmästä huokoisesta kerroksesta saatu data vastasi kuitenkin STD-aseman vastaavan huokoisen kerroksen paine-arvoja. Tämä viittaisi siihen, että molemmilla asemilla vallitsi samankaltaiset paineolosuhteet myös tiivistetyssä kerroksessa. Peittorakenteiden matriisinen imu pieneni merkittävästi kuivien jaksojen jälkeen seuranneiden sateiden vaikutuksesta. Tulokset osoittivat lämmönjohtavuussensorien soveltuvan hyvin kuivapeittojen monitorointiin ja lisäävän tutkimuksen luotettavuutta. Mittausasemilla kuivapeitoille määritettiin hydrauliset kaltevuudet, joiden perusteella veden virtaussuunta oli pääsääntöisesti ylöspäin: jätteaineksesta kuivapeiton tiivistettyyn osaan. (O' Kane ym. 1998)

TMD- ja SWF-mittausasemilla kuivapeittojen alapuolelta mitatut happipitoisuudet laskivat tasaisesti koko kolmivuotisen mittausjakson ajan. Moreenipeitto toimi hyvin hapen pääsyn estäjänä jätteainekseen. STD-aseman mittaustulokset hapen osalta olivat kuitenkin ristiriitaisia happipitoisuuden noustessa keväisin, jolloin kuivapeiton tiivistetyn moreenikerroksen kyllästymisaste oli korkeimmillaan. Tähän ei löydetty syytä. Lysimetreillä mitattu veden suotautuminen oli keskimäärin 5 % alueen kokonaissadannasta vuodessa. Laskuihin ei otettu kolmen lysimetrin suotautumisen nollatuloksia mukaan, koska ne johtuivat todennäköisesti hajonneista tai tukkeutuneista letkuista. Lysimetrien suotautumismittaukset voivat erota todellisesta veden kulkeutumisesta jätteainekseen lysimetrien asentamisen aiheuttaman peittomateriaalin häiriintymisen takia. Alhaiset hydrauliset kaltevuudet kuitenkin tukivat lysimetreillä mitattuja tuloksia vähäisestä suotautumisesta peittojen lävitse. Lämpötilamittauksista kävi ilmi, että talvisin lumipeite ja kuivapeiton ylempi tiivistämätön kerros suojasivat tiivistettyä peittokerrosta jäätymiseltä. (O' Kane ym. 1998)

3 SÄRKINIEMEN KUIVAPEITTOTUTKIMUKSET

3.1 TUMMELI-projekti

GTK:lla on käynnissä budjettirahoitteinen tuotantoalueiden tutkimusmenetelmien ja mallinnuksen kehittäminen-projekti (TUMMELI), jonka ensimmäisessä työpaketissa kehitetään osaamista kaivannaisjätealueiden peittorakennetutkimuksissa ja mallinnuksessa. Neljä vuotta kestävä projekti päättyy vuoden 2020 loppuun mennessä. Opinnäytetyöni tavoitteena on perehtyä kuivapeittojen toimivuuden mittaamiseen soveltuviin ratkaisuihin. TUMMELI-projektin rahoituksella hankittu, pääosin maaperän- ja säähavaintojen mittauksissa tarvittava laitteisto, on otettu käyttöön Leppävirran Särkiniemen vanhan nikkeli-kaivoksen sivukiven läjitysalueelle (kuva 5) tehdyissä kuivapeittokokeissa.

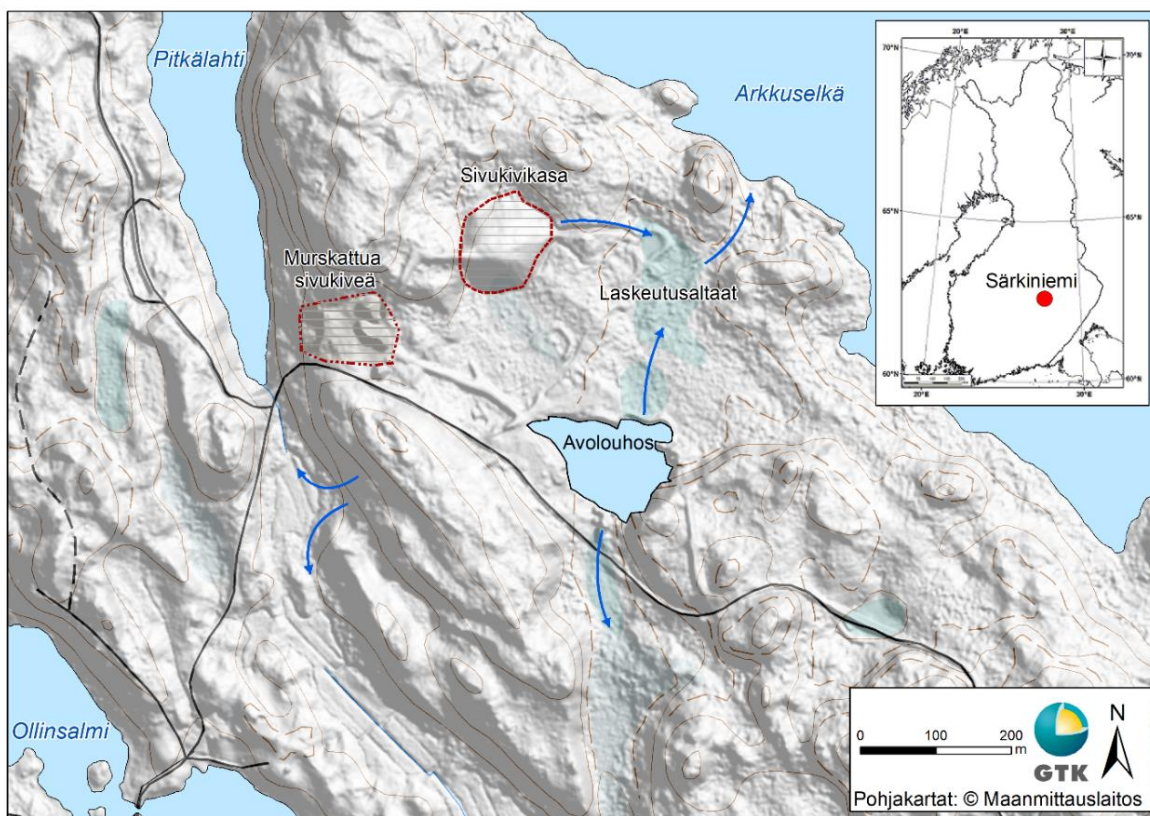


Kuva 5. Leppävirran Särkiniemen kaivoksen sivukiven läjitysalueetta marraskuussa 2018. (Forsman, 2018)

3.2 Särkiniemen kaivoksen toiminta

Leppävirran kunnassa sijaitseva Särkiniemen nikkeli-kaivos (kuva 6) avattiin vuonna 2007 Belvedere Resourcesin suomalaisen Finn Nickel-tytäryhtiön toimesta, mutta sen toiminta keskeytettiin kannattamattomana jo vuoden 2008 joulukuussa nikkelin hinnan romahdettua. Toimintansa aikana alueelta louhittiin yhteensä 123 000 t malmia, joka kuljetettiin Hituran kaivokselle prosessoitavaksi (Vulcan Resources 2009).

Louhinnan yhteydessä syntyneestä sivukivestä rikkipitoisin osa sijoitettiin avolouhoksen täyttöön. Kun avolouhos täyttyi vedellä, jäi rikkipitoisin kiviaines veden pinnan alapuolelle. (Suomalainen, Montonen & Makkonen 2009). Osa jäljelle jääneestä sivukivestä läjitettiin sivukivialueelle ja osa murskattiin maanrakennuskäyttöön. Mursketta on käytetty maanrakennustoissa muualla, mutta suuri osa on edelleen läjitettynä kaivosalueelle.

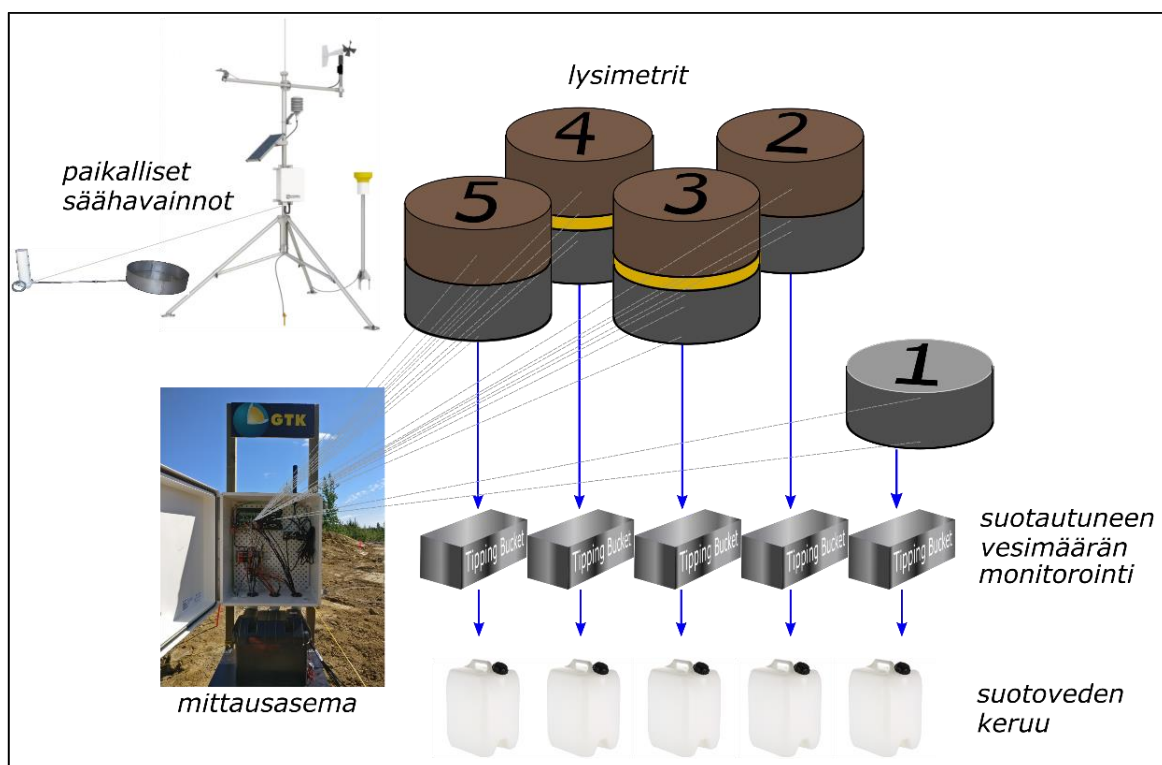


Kuva 6. Särkiniemen suljetun kaivoksen sijainti, alueella olevat sivukivikaset ja avolouhos. Pintavesien virtaussuunnat on merkitty sinisillä nuolilla. (Forsman, 2019)

3.3 Kenttäkokeet ja instrumentointi

Särkiniemen lysimetrikokeissa pilotoidaan biokaasun tuotannossa syntyvän mädätysjäännöksen soveltuvuutta kavannaisjätteen peittomateriaalina. Testin perusteella on tarkoitus selvittää toimiiko mädätysjäte happea kuluttavana ja/tai vettä pidättävänä kerroksena sivukivijätteen peittorakenteessa. Tämän lisäksi pyritään selvittämään vaikuttavatko orgaanisesta aineksesta liukenevat hiiliyhdisteet sivukiven rapautumisprosesseihin.

Pilotoinnissa käytetään viittä lysimetriä, jotka kaivetaan läjitysalueelle ja täytetään sivukivimurskalla. Kahteen lysimetriin laitetaan 0,3 metrin moreenipeiton lisäksi viiden senttimetrin kerros mädätysjäännöstä ja toiseen pariin peitoksi tulee pelkästään moreenikerros. Yksi lysimetri jätetään ilman peittoa. Tällä voidaan monitoroida pelkän sivukiven vaikutusta suotovesien laatuun, ja käyttää tuloksia verrokkina peittojen toimivuuden arvioinnissa. Lysimetrit ja peittokerrokset instrumentoidaan happiantureilla ja mm. vesipitoisuutta mittaavilla reflektometreilla. Suotautuvien vesien määrää ja laatua seurataan soveltuvalla mittalaitteistolla ja laboratoriossa tehtävillä analyyseillä. Koealueelle asennetaan automaattinen sääasema paikallisten säähavaintojen seuraamiseksi. Lysimetrikokeiden toimintaperiaate on esitetty kuvassa 7.



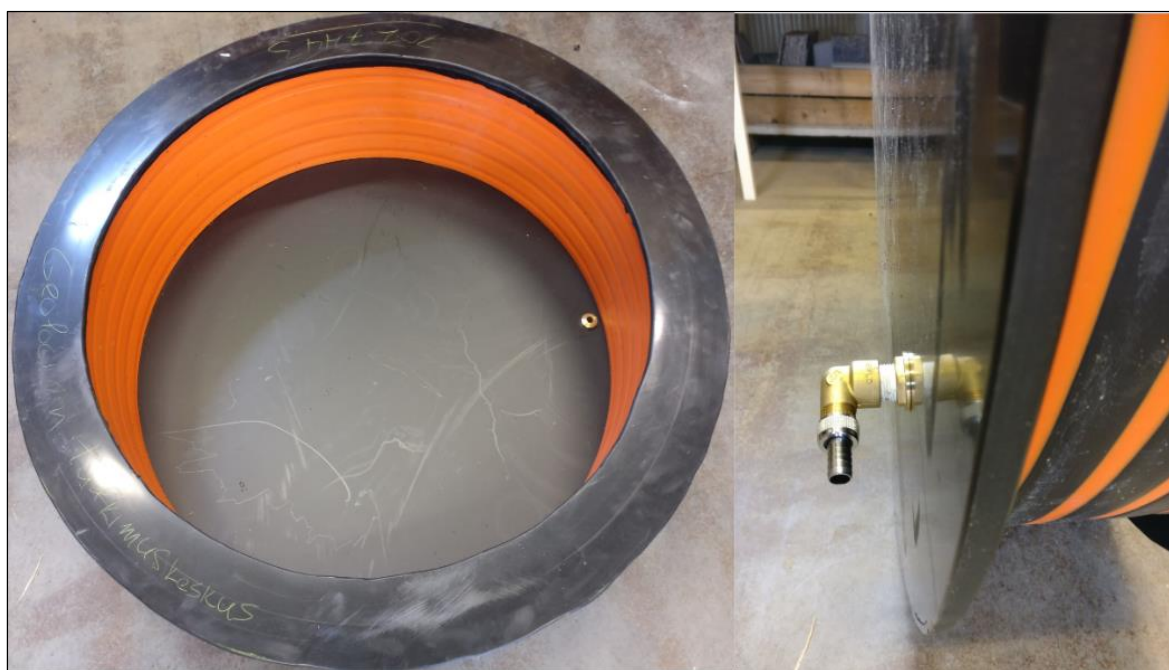
Kuva 7. Särkiniemen lysimetrikokeiden havainnekuva. (Forsman, 2019)

4 MITTALAITTEISTO

Markkinoilla on tarjolla runsaasti erilaisia maaperän mittaamiseen soveltuvia antureita ja mittalaitteita. Hapen kulkeutumisen estäminen jäteainekseen on kaivannaisjätepeiton ensisijaisia tehtäviä vedenpidätyksen ohella. Mitattavien parametrien päättämisen jälkeen tehtiin kilpailutus ko. mittalaitteita myyvien firmojen välillä. Valinnat tehtiin tarpeiden, soveltuvuuden, resurssien sekä aiempien käyttökokemusten perusteella. Lysimetrisäiliöiden lisäksi kokeita varten päädyttiin hankkimaan mm. happi- ja kosteusantureita, dataloggerit koteloineen, Tipping Bucket-mittarit lysimetrien läpi kulkevien vesimäärien seurantaan, automaattinen sääasema sekä 4g-reitittimet mittaus- ja sääaseman etäseurantaa ja datojen luentaa varten.

4.1 Lysimetrit

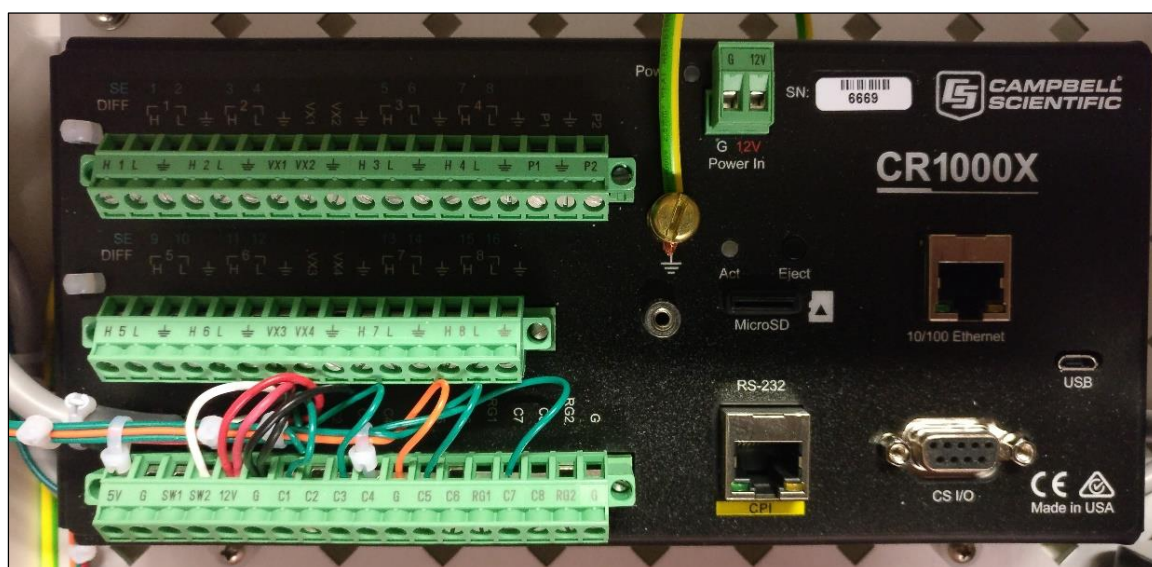
Lysimetrisäiliöt hankittiin mittatilaustyönä muovituotteisiin erikoistuneelta Meltex Oy:lta. Halkaisijaltaan 100 cm ja 30 cm korkeiden polyeteenisten lysimetrien yläosaan hitsattiin reunojen yli ulottuvat kaulukset. Tällä pyrittiin minimoimaan sadeveden suora valunta lysimetrin reunoja pitkin. Lysimetrien pohjiin porattiin reiät letkuliittimille veden läpikulkua varten (kuva 8).



Kuva 8. Meltex Oy:lta hankittujen lysimetrien pohjalle asennettiin letkuliittimet veden ulos johtamista varten. (Forsman, 2019)

4.2 CR1000X-dataloggeri

Mittausaseman ydinkomponenttina toimivaa Campbell Scientificin CR1000X-dataloggeria (kuva 9) voidaan käyttää monenlaisissa sovelluksissa, kuten sääasemissa, mesonet-järjestelmissä, ilman- ja vedenlaadun tutkimuksissa sekä maaperän kosteuden mittauksissa. Se on suunniteltu kestämaan ääriolosuhteita ja soveltuu monimutkaisiin mittausjärjestelmiin. Dataloggeri toimii järjestelmän keskuksena keräten ja varastoiden mittausdataa ja ohjaten antureiden toimintoja. Sen sisäistä 4 MB:n muistia voidaan tarvittaessa laajentaa. Loggerista löytyy runsaasti erilaisia sisääntuloja, joiden ansiosta siihen voidaan kytkeä mm. analogisia- ja sarjakytkentäisiä, SDI-12-, pulssi- ja taajuusantureita. CR1000X-loggeriin on saatavilla myös laajennusmoduuleita, jos halutaan esimerkiksi lisätä kanavien määrää. Loggeria voidaan ohjata Loggenet-, PC400- ja Short Cut-ohjelmistojen avulla. (Campbell Scientific, CR1000X Measurement and Control Datalogger Product Manual 2019). GTK:lla on käytetty Campbell Scientificin dataloggereita myös aiempien projektien yhteydessä, joten käyttöönotto sujui suhteellisen helposti.



Kuva 9. Campbell Scientificin CR1000X-dataloggeri. (Forsman, 2019)

4.3 SO-110-happianturi

Apogee Instrumentsin valmistama SO-110 (kuva 10) mittaa kaasumaista happea galvaanisen kennon avulla. Laboratoriokokeiden- ja sisätilojen happimittausten lisäksi anturia voidaan käyttää jatkuva- ja kerta- mittauksissa maaperästä ja huokoisista materiaaleista esimerkiksi kaatopaikoilla ja kaivannaisjätealueilla. Mittausprosessissa hapen ja elektrolyytin välinen kemiallinen reaktio tuottaa sähkövirtaa ja kuluttaa pienen määrän happea. Prosessi synnyttää itse tarvitsemansa virran. SO-110-anturi mittaa analogisen jännitteen, joka on lineaarisesti verrannollinen kaasumaisen hapen osapaineeseen. Anturi koostuu galvaanisesta kennosta, mittauskalvosta, lämpötilaa mittaavasta termistorista, mittauskalvon takana sijaitsevasta lämmittimestä ja signaalin prosessointipiiristä. Maaperästä tehtäviä mittauksia varten antureille on saatavilla lisävarusteena diffuusiopäät, jotka muodostavat mittaukselle tarvittavan ilmataskun anturin päähän ja suojaavat mittauskalvoa vaurioilta. (Apogee Instruments, Oxygen Sensor Owner's Manual 2016)

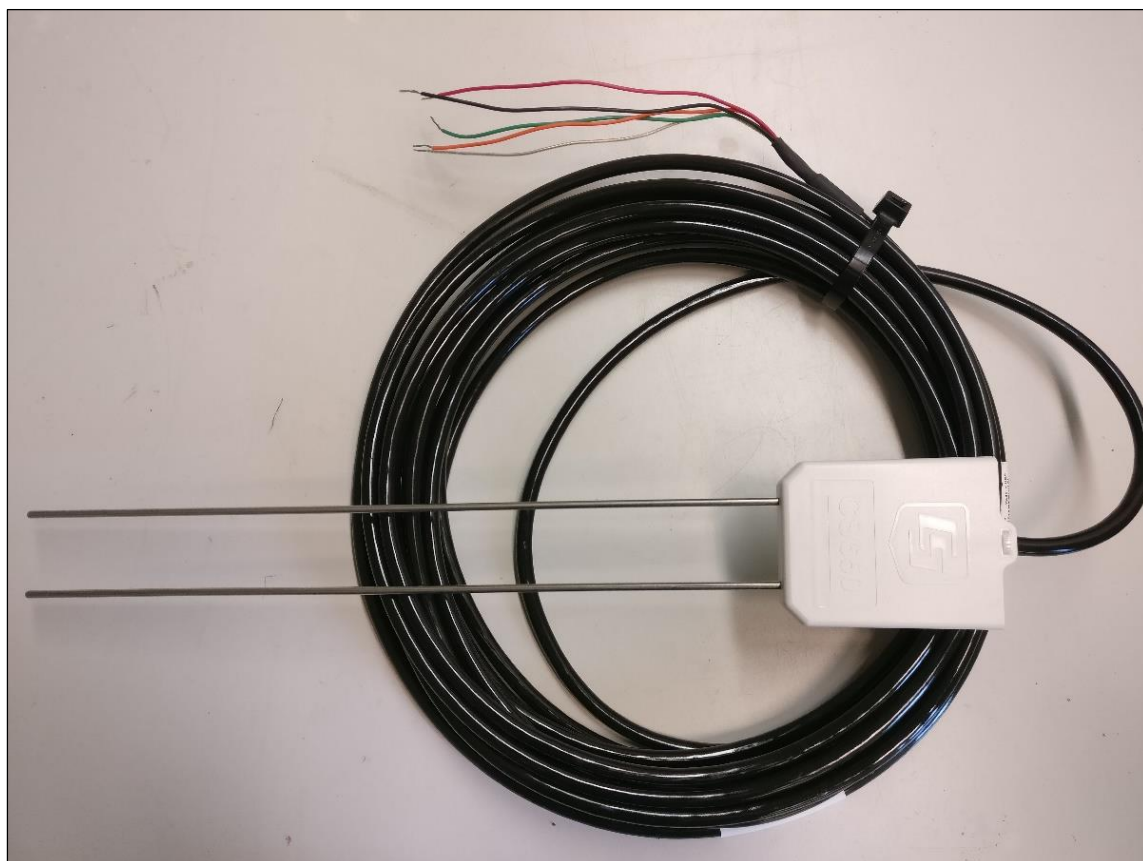
SO-110-anturin vasteaika on 60 sekuntia. Teflonisen mittauskalvon takana olevan lämmittimen tehtävänä on estää vettä tiivistymästä kalvon pinnalle. Tiivistyessään vesi voi rajoittaa hapen kulkeutumista ja aiheuttaa virheellisiä mittauksia. Lämmitin pitää mittauskalvon pinnan noin kaksi astetta ympäröivän materiaalin lämpötilaa ylempänä. SO-110-anturit kytketään dataloggerin differentiaaliportteihin ja ne vaativat toimiakseen 12V virtalähteen. (Apogee Instruments, Oxygen Sensor Owner's Manual 2016)



Kuva 10. Apogee Instrumentsin SO-110-happianturi (Forsman, 2019)

4.4 CS650-reflektometri

Campbell Scientificin valmistama CS650-reflektometri (kuva 11) koostuu kahdesta rinnakkaisesta, ruostumattomasta teräksestä valmistetusta mittaussauvasta ja muovikoteloidusta piirilevystä. Laite mittaa sähkömagneettisten aaltojen etenemisaikaa ja signaalin vaimennusta mittaussauvojen välillä sekä lämpötilaa. Näiden perusteella pystytään määrittämään maaperän suhteellinen permittiivisyys (sähkömagneettisen kentän heikentämiskykyä kuvaava suure), vesipitoisuus ja sähkönjohtavuus. Sauvoihin on kytketty oskillaattori, joka mittaa lähettämänsä sähkömagneettisten aaltojen käyttämää aikaa niiden siirtyessä sauvasta toiseen, ja palatessa takaisin. Aaltojen siirtymisaika on riippuvainen maa-aineksen suhteellisesta permittiivisyydestä. Veden määrä vaikuttaa mittaukseen siten, että vesipitoisuuden kasvaessa aalloilla menee pidempi aika kulkea sauvojen välillä, kun taas kuivemmassa maa-aineksessa aallot liikkuvat nopeammin. (Campbell Scientific, CS650 and CS655 Water Content Reflectometers Product Manual 2012)



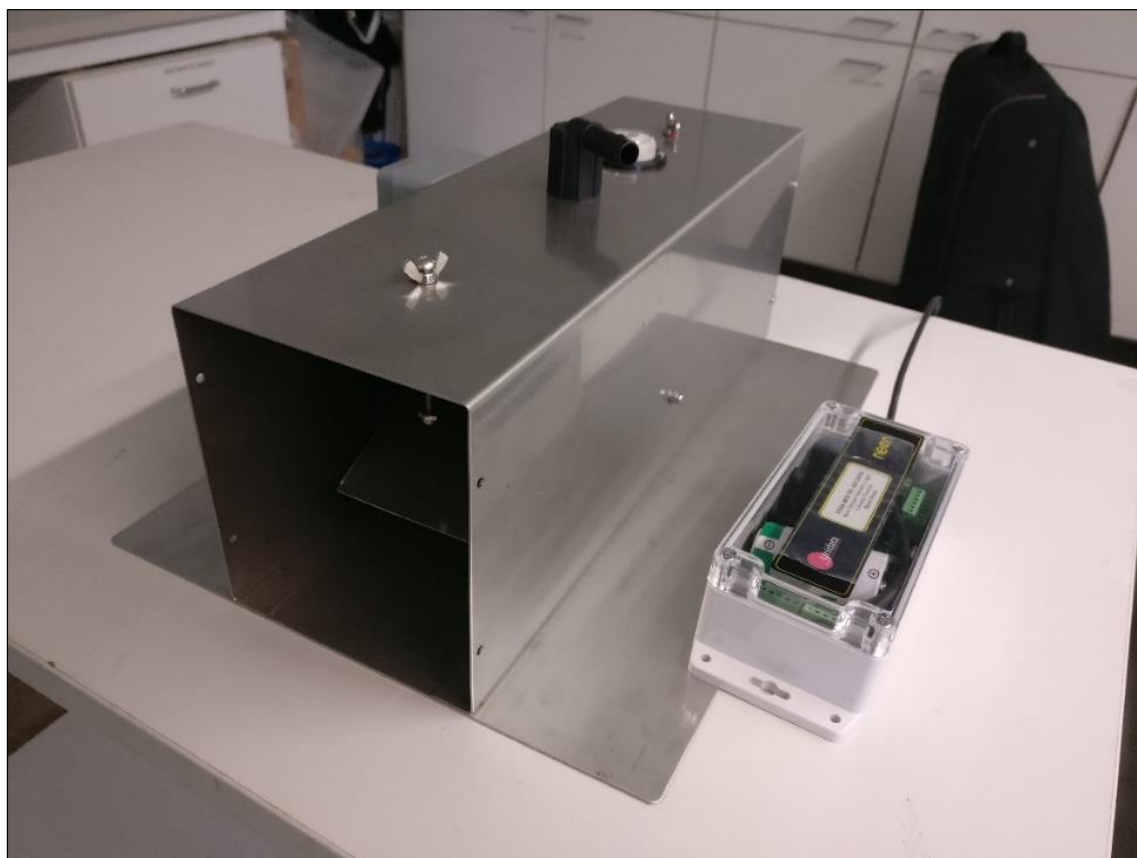
Kuva 11. Campbell Scientificin CS650-reflektometri (Forsman, 2019)

Maaperän sähkönjohtavuus määritetään sauvojen lähettämien aaltojen signaalin vaimennuksen perusteella, mikä on riippuvainen materiaalin ominaisuuksista. Data saadaan SDI-12-signaalina. Anturin mittausaika on 3 ms ja SDI-12 komennon muodostamiseen kuluu aikaa 0,6 sekuntia. Parametrien mittausalueet ovat vesipitoisuudelle 0-100 %, sähkönjohtavuudelle 0-3 dS/m ja lämpötilalle -50 - +70 °C. (Campbell Scientific, CS650 and CS655 Water Content Reflectometers Product Manual 2012)

4.5 Tipping Bucket Flow Gauge 6506G

Lysimetrien läpi suotautuvien vesien määriin vaikuttaa luonnollisesti paikallisen sadannan määrä. Kuivina ajanjaksoina määrät ovat hyvin pieniä, joten tavalliset kotitalouksissa käytetyt vesimittarit eivät sovellu niiden mittaamiseen. Mittauksia varten hankittiin Unidatan valmistamia Tipping Bucket Flow Gauge 6506G-mittareita (kuva 12), joilla pystytään mittaamaan pienempiä virtaamia. Mittarin sisällä on kaatomekanismilla toimiva ja keskeltä saranoitu kaksiosainen kauha. Kun vettä johdetaan mittariin, toinen puoli kauhasta alkaa täyttymään kunnes se kallistuu vesimäärän ollessa 75 ml, jolloin toinen puoli kauhasta alkaa vuorostaan täyttymään. Kippausten määrä tallentuu digitaalisina pulsseina loggerille. (Unidata, Tipping Bucket Flow Gauge Model 6506G and 6506H Manual 2013)

Mittari on suunniteltu pelkästään vesimäärien mittaukseen. Siinä ei ole letkuliitintä vesien talteenottoa varten, vaan vesi kulkeutuu säiliön päätyreunojen pienistä aukoista ulos. Savonialta tilattiin ulkoisena palveluna muokkaustyö, jossa mittareihin asennettiin sisäsäiliöt ja letkuliittimet vesien ohjaamiseksi omiin kanistereihin vedenlaatumäärytyksiä varten. Aluksi Tipping Bucketit suunniteltiin kytkettäväksi Neon Remote Telemetry-loggereihin. Järjestelmän yksinkertaistamiseksi ne kytkettiin kuitenkin CR1000X-loggerin pulssinluku- ja kontrolliportteihin yhdessä happi- ja kosteusanturien kanssa. Mittausohjelmaan kirjoitettiin oma osio Tipping Bucketien pulssien luennalle. Näin saatiin karsittua järjestelmän komponentteja, pienennettyä kustannuksia ja tehtyä datan luenta helpommaksi.



Kuva 12. Unidatan Tipping Bucket Flow Gauge 6506G ja Neon Remote Telemetry 3004-M0B dataloggeri. (Forsman, 2019)

4.6 Sääasema

Campbell Scientificilta hankittiin muiden mittalaitteiden ohella automaattinen sääasema paikallisten sääolosuhteiden tarkkailemiseksi. Aseman keskeisimmät komponentit ovat CR300-dataloggeri, Novalynx-haihduntamittari ja -astia, ARG100-sademittari, CS215 lämpötila- ja kosteusanturi, Young-tuulimonitori sekä auringon säteilyä mittaava pyranometri. Asema saa virtansa aurinkopaneelist ja pienestä lyijyakusta. CS300-loggeri on Campbell-sarjaa ja siten ohjelmoitavissa Loggernet-ohjelmistolla. Se on käytännössä kevytversio mittausasemassa käytetystä CR1000X:sta.

5 OHJELMISTO JA TIEDONSIIRTO

5.1 LoggerNet ja mittausohjelma

LoggerNet on Windows-käyttöjärjestelmällä PC:lla toimiva Campbell Scientificin ohjelmisto data-loggereiden ohjausta varten, jolla voidaan mm. ohjelmoida sekä kommunikoida ja lukea dataa loggereiden ja tietokoneen välillä. Sen avulla voidaan pitää yhteyttä yksittäiseen loggeriin tai tietoliikennettä hyödyntäviin suuriin järjestelmiin, joihin on kytkettynä useita loggereita. Ohjelman avulla voidaan luoda kustomoituja mittausohjelmia sekä esittää graafisesti reaaliaikaisia tai aiemmin mitattuja dataa. Sillä voidaan myös lukea ja tallentaa dataa eri formaateissa (ASCII, binary ja XML), ja tuoda ne kolmannen osapuolen analyysiohjelmistoihin. LoggerNet koostuu useasta 32-bittisestä ohjelmasta, joiden avulla seurataan ja hallitaan mittausjärjestelmää. Ohjelmointikielenä käytetään Campbell Scientificin luomaa Visual Basicin kaltaista CRBasicia. (Campbell Scientific, laitevalmistajan verkkosivut)

LoggerNet oli jo hankittu GTK:lle aiempien projektien yhteydessä. Mittausohjelma tehtiin LoggerNetiin kuuluvalla CRBasic Editorilla. Pohjana käytettiin dataloggerin mukana tullutta ohjelmarunkoa, jota muokattiin omiin tarpeisiin sopivaksi. Koodausapua mittausohjelman teossa saatiin GTK:lta eläköityneeltä Pekka Hänniseltä, joka tarjoaa nykyään ympäristömittauspalveluita omalla toiminimellään. Pekka oli myös valvomassa antureiden kytkentöjä Särkiniemessä. CRBasic-ohjelmointikieli muistuttaa syntaksiltaan, logiikaltaan ja rakenteeltaan BASIC-ohjelmointikieltä. Liitteessä 1 on esitetty CRBasic Editorin päänäkymä, joka on jaettu kolmeen osa-alueeseen. Nämä ovat käskyjen syöttöön tarkoitettu ohjelmointialue, ohjepaneeli ja alapuolinen viestikenttä, jossa näkyvät mm. mahdolliset virheilmoitukset. Liitteen 1 ohjelmointialueessa on nähtävillä myös osa Särkiniemessä käytetystä mittausohjelmasta. Mittausohjelma koostuu määrittely-, ja ohjelmointivaiheesta. Määrittelyvaiheessa määritellään ohjelmassa käytettävät vakiot, muuttujat, yksiköt, datataulukot ja aliohjelmat. Tätä seuraa ohjelmointivaihe, jossa syötetään varsinaiset ohjelman toiminnot. Näitä ovat mm. tehtävät mittaukset, mittausarjan aikavälin määrittely ja mittauksen mahdolliset lisäprosessoinnit kuten kalibrointikertoimien käyttö ja pulssisummien määrittely. Lopuksi suoritetaan datataulukoiden kirjoitus. (Campbell Scientific, LoggerNet Instruction manual 2015)

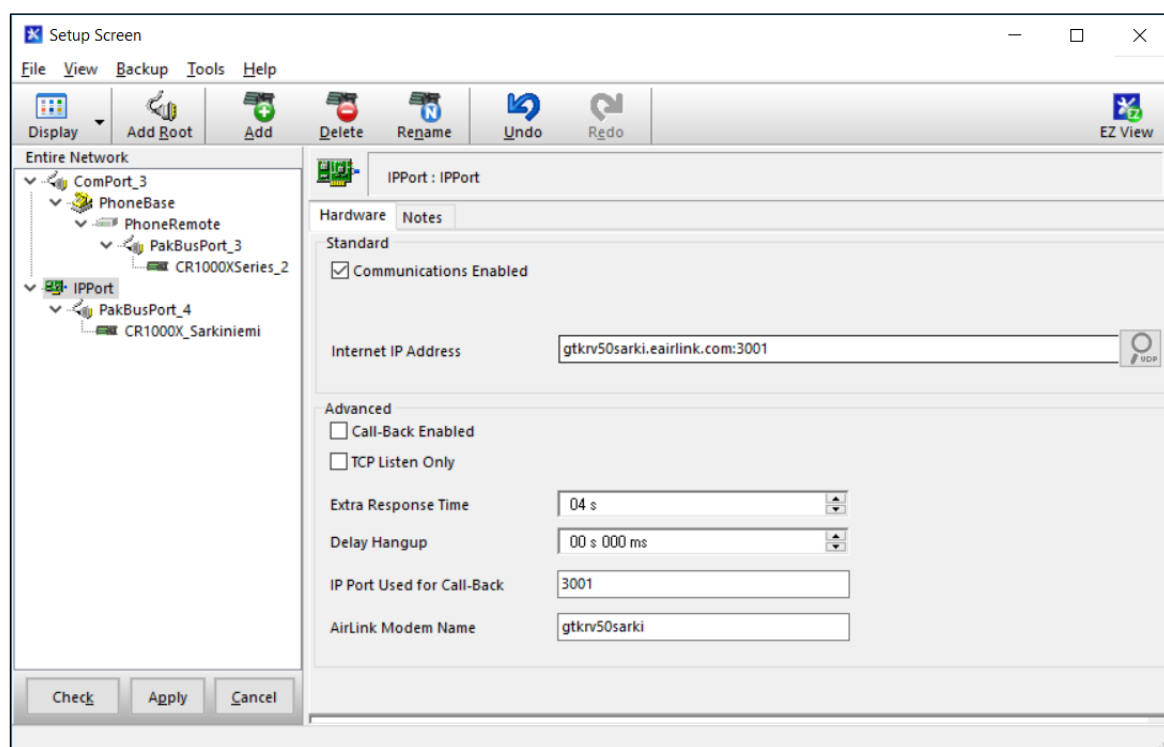
5.2 Reitittimet

GTK:n aiemmilla mittausasemilla tiedonsiirto toimiston ja aseman välillä on tehty GSM-datayhteyden avulla. Kyseinen piirikytkentäinen tiedonsiirtopalvelu on jo korvautunut suureksi osaksi uudemmilla tekniikoilla, vaikka useat operaattorit tarjoavatkin siihen edelleen mahdollisuuden. Särkiniemen mittausasemalla tiedonsiirtotapaa päätettiin uudistaa aiempien yhteysongelmien takia ja Campbell Scientificilta hankittiin mittalaitteiden ohella kaksi Sierra Wirelesin valmistamaa Airlink Rv50 4G-reititintä mittaus- ja sääaseman etäyhteyksille. Näitä varten avattiin kaksi M2M-liittymää (50Mt datapaketilla, nopeus 2/1Mbs), joissa toimii julkiset dynaamiset IP-osoitteet eli osoite vaihtuu ajoittain. Kiinteillä osoitteilla liittymät olisivat kustantaneet noin viisi kertaa enemmän, joten päädyttiin dynaamisiin IP-osoitteisiin, vaikka se teettiinkin hieman ylimääräistä asennustyötä.

5.3 Yhteysasetusten määrittäminen

Langattoman yhteyden muodostamisessa dataloggeriin kytketyn RV50:n ja tietokoneen välille oli omat haasteensa. Suurimmista kompastuskivistä päästiin päivittämällä reitittimen laiteohjelmisto uusimpaan versioon. Tämä ja kaikki muut RV50-reitittimen omien asetusten muokkaukset tehtiin web-pohjaisella ACEmanager-työkalulla. Reitittimeen asennettiin Campbellin kotisivuilta ladattavissa ollut template-tiedosto, jolla se konfiguroitiin kommunikoimaan 115200 baudin siirtonopeudella CR1000X-dataloggerin kanssa.

Dynaaminen IP-osoite voi muuttua aina reitittimen muodostaessa uuden yhteyden verkkoon. Yhteyden muodostamisen apuna käytettiin dynaamista nimipalvelua, joka muuttaa itse määrätyn verkkotunnuksen dynaamiseksi IP-osoitteeksi. Verkkotunnus toimii kuin staattinen ip-osoite yhteydenmuodostuksessa. Reitittimen konfiguroinnin jälkeen yhteysasetukset määritettiin LoggerNet-ohjelmistolla. Kuvan 13 vasemmassa laidassa näkyy määritetyt yhteydet, joista ylempi (ComPort_3) on aiemmin käytössä ollut puhelinverkkoyhteys. Uutta IP-yhteyttä varten juureen lisättiin IP-portti, jonka osoitetietoihin syötettiin aiemmin ACEManagerilla määritetyt laitenimi, verkkotunnus ja portti. Asetukset määritettiin sekä mittausaseman, että sääaseman reitittimille.



Kuva 13. LoggerNet-ohjelman yhteysasetukset.

6 ANTUREIDEN TESTIMITTAUKSET

Samanlaisten mittalaitteiden ja -antureiden mittaamissa arvoissa voi olla keskinäisiä eroja, vaikka ne laitettaisiin mittaamaan vierekkäin samoja materiaaleja samanlaisissa olosuhteissa. Jos erot antureiden välillä ovat merkittävän suuria, voivat tulokset johtaa virheellisiin päätelmiin. Näiden erojen selvittämiseksi SO-110-happiantureita ja CS650-reflektometrejä testattiin valvotuissa olosuhteissa.

6.1 Testimittausten vaiheet

Anturitestauksen ensimmäisessä vaiheessa huoneilman happipitoisuutta ja lämpötilaa mitattiin kahdella SO-110-anturilla kahden vuorokauden ajan. Anturit sijoitettiin vierekkäin, noin 5 cm:n etäisyydelle toisistaan, metrin korkeudelle lattiatasosta. Mittausväliksi ohjelmaan määritettiin 60 min. Testauksen toisessa vaiheessa muoviastiaan laitettiin 15 kg kvartsihiekkää, jota kasteltiin kahdella litralla vettä (kuva 14). Vesi sekoitettiin tasaisesti kvartsihiekkään, ja happianturit asetettiin hiekkään pystyasennnossa niin, että diffuusiokärjillä varustetut mittauspääät olivat 5-7 cm:n syvyydellä hiekan pinnasta. Mittausväliä tiennettiin 15 minuuttiin ja antureiden annettiin mitata viikon ajan. Happiantureiden mittaama analogien jännite (mV) on lineaarisesti verrannollinen happipitoisuuteen siten, että yhden prosentin happipitoisuutta vastaava jännitearvo on 2.6 mV (Apogee Instruments, Oxygen Sensor Owner's Manual 2019).

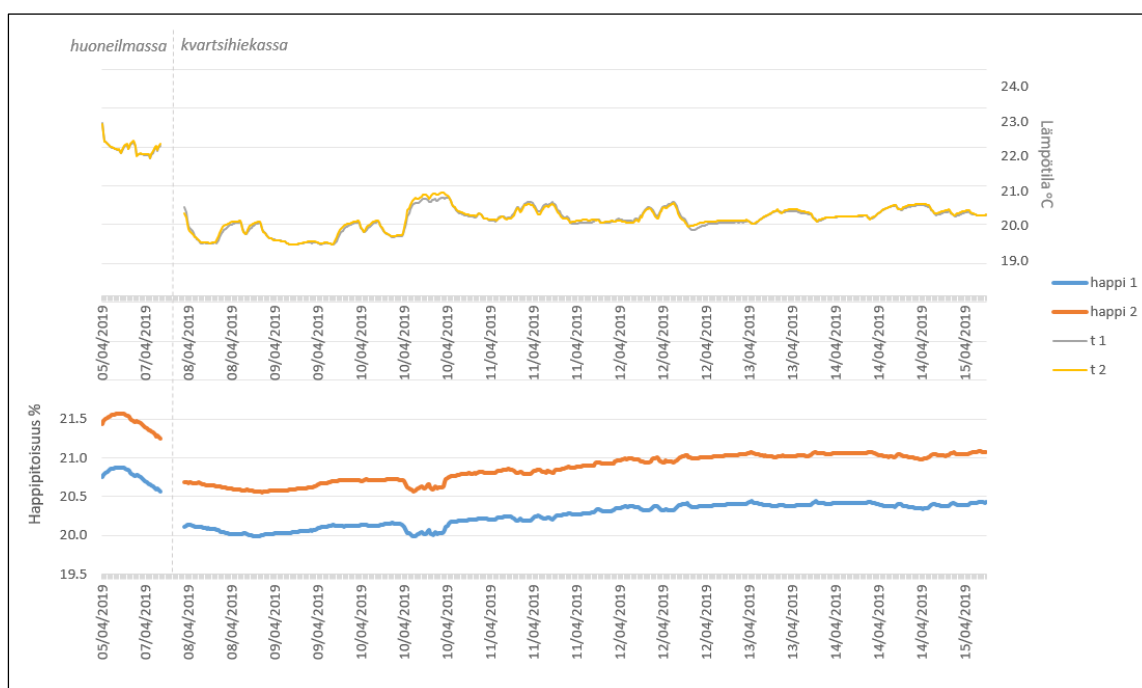


Kuva 14. Anturitestin toisen vaiheen alkuasetelma. Kvartsihiekan kostutuksen jälkeen anturit kaivettiin hiekan sisään ja mittaus käynnistettiin. (Forsman, 2019)

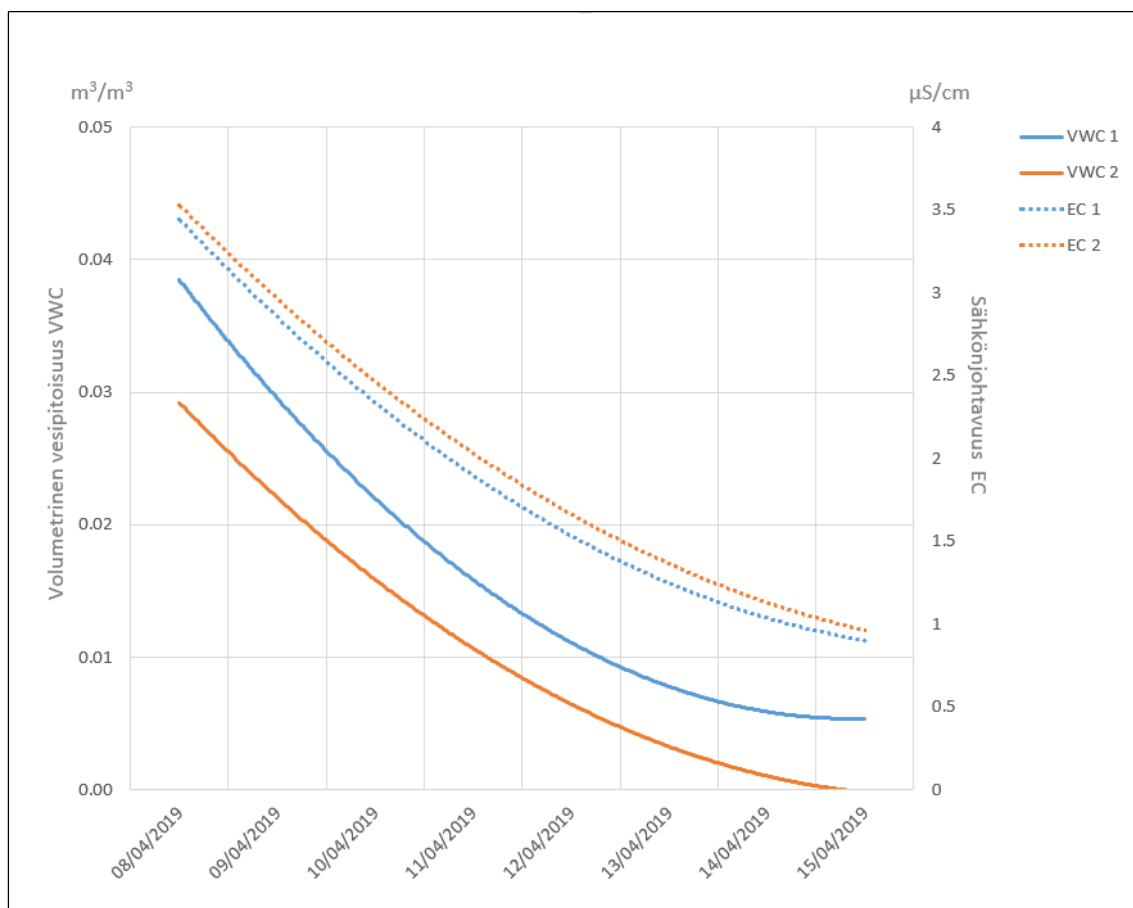
Happiantureiden lisäksi testattiin myös kahta CS650-reflektometriä, jotka laitettiin samaan kvartsihiekk-astiaan noin neljän senttimetrin syvyydelle hiekan pinnasta. Tarkoituksena oli antureiden keskinäisen vertailun lisäksi seurata happi-, lämpötila- ja kosteuspitoisuuksien muutoksia, kun kostutusta hiekasta haihtui vettä pikkuhiljaa huoneilmaan.

6.2 Testimittausten tulokset

Kuvassa 15 on esitetty SO-110-antureiden mittaustulokset. Anturi 1:n mittaama keskimääräinen happipitoisuus ensimmäisen mittaussjakson eli sisäilmamittauksen aikana oli 20,8 % ja anturi 2:n 21,5 %. Antureiden välinen pitoisuusero vaihteli 0,69 -0,70 prosenttiyksikköä. Testauksen toisessa vaiheessa anturit mittasivat kostutettua kvartsihiekkä viikon ajan. Tällöin erot antureiden mittausten välillä olivat hieman pienemmät, 0,54 -0,66 prosenttiyksikköä. Happipitoisuudet olivat matalimmillaan, kun kvartsihiekan vesipitoisuus oli suurin (kuva 16). Lukemat lähtivät loivaan nousuun veden haihtuessa pikkuhiljaa kvartsihiekkasta. Happianturien mittaamat lämpötilat olivat hyvin lähellä toisiaan sekä huoneilmasta että kvartsihiekkasta tehdyissä mittauksissa eron ollessa suurimmillaan vain 0,2 astetta. Tämä näkyy kuvan 15 päällekkäin kulkevista lämpötiläkäyristä.



Kuva 15. SO-110-happiantureiden mittaamat lämpötilat (°C) ja happipitoisuudet (%) huoneilmasta- ja kostutetusta kvartsihiekkasta tehdyissä mittauksissa. (Forsman, 2019)



Kuva 16. CS650-reflektometrien mitaamat vesipitoisuudet (m^3/m^3) ja sähkönjohtavuudet ($\mu\text{S}/\text{cm}$) kostutetussa kvartsihiekkassa. (Forsman, 2019)

Kosteusanturien kvartsihiekkasta mitaamissa vesipitoisuuksissa oli suurimmillaan eroa $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (kuva 16). Kokeen lopussa vesi oli käytännössä kokonaan haihtunut hiekasta anturien mittaussyvytydeltä. Testimittaukset osoittavat happi- ja kosteusanturien mittausten väliset erot pieniksi ja tulokset noudattelevat samoja trendejä. Mitatut sähkönjohtavuudet olivat pieniä, mutta yhdenmukaisia molempien antureiden osalta koko mittausjakson ajan. Antureiden yksilöllisten erojen lisäksi myös sijainti mittaustasossa voi vaikuttaa tulosten pieniin eroavaisuuksiin. Näillä pienillä eroilla ei pitäisi olla merkitystä kuivapeittojen toimivuuteen liittyvien mittauksien kannalta.

7 SÄRKINIEMEN KENTTÄTYÖT

7.1 Alkuvalmistelut

Ennen Särkiniemen kenttätöiden aloittamista tehtiin toimistolla maastotöitä nopeuttavia ja helpottavia esivalmisteluja. Lysimetreihin asennettiin letkuliittimet, mittausasemalle rakennettiin kehikko ja Tipping Bucket-mittareille koottiin kuormalavoista telineet. Sääasema koottiin ja tarkistettiin, että kaikki osat ja komponentit olivat tallessa. Sääaseman mittausohjelmaa ja datan siirron toimivuutta testattiin kahden viikon pituisen mittausjakson ajan.

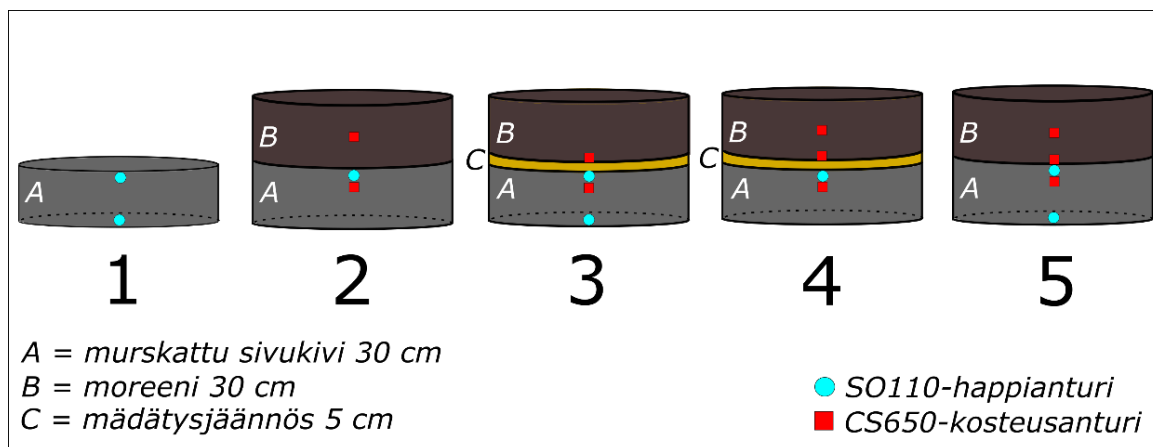
7.2 Mittausaseman rakentaminen

Kesäkuun alussa läjitysalueelta valittiin puiden taimista paljas paikka aseman pystyttämiseen. Kasan sivukivistä ja läjitysalueelta suotautuvasta vedestä otettiin tuolloin näytteet. Kaivoksen sivukivi- ja peittomateriaalit karakterisoitiin laboratoriotesteillä, joissa niille tehtiin mm. kuningasvesiuutto ja ravistelutestit liukoisuusominaisuuksien selvittämiseksi. Materiaalien kokonaisalkuainepitoisuudet määritettiin monihappoliotuksella. Mittausaseman rakentaminen toteutettiin 13.6.2019. Dataloggeri kotelointeen kiinnitettiin sille toimistolla rakennettuun telineeseen ja siihen kytkettiin happi- ja kosteusanturit sekä Tipping Bucket-mittarit. Aseman virtalähteeksi laitettiin 60 Ah:n vapaa-ajan akku. Asennusten yhteydessä todettiin mittausohjelman antavan virheen, jos loggerin vierekkäiset kontrolliportit määriteltiin pulssinlukuportiksi Tipping Bucketien- ja SDI-12-portiksi CS650-reflektometrien kytkemiseen. Ongelma kierrettiin nimeämällä samoilla SDI-12-osoitteilla varustettuja reflektometreja uudelleen, jolloin niitä voitiin kytkeä useampi samaan porttiin. Muunnokset tehtiin LoggerNet-ohjelmistoon kuuluvalla Terminal emulator-työkalulla. Tämä vapautti kontrolliporteja myös Tipping Bucketien käyttöön. Happianturit määritettiin loggaamaan noin tunnin ajaksi ilmaa ennen kuin osa niistä sijoitettiin lysimetrien pohjalle. Näitä lähtöjännitearvoja käytettiin antureiden kalibrointilaskuissa. Kaivuutyöt sujuivat ripeästi paikallisen kaivinkoneurakoitsijan toimesta. Lysimetrit sijoitettiin tasaiseksi kaivetulle alueelle rinteen yläosaan lankkujen päälle (kuva 17). Niihin kiinnitettiin paksulla paineilmaletkulla suojatut PVC-vesiletkut, joiden toinen pää johdettiin tason alapuolella sijaitseviin Tipping Bucket-mittareihin ja niistä edelleen vesikanistereihin. Lankkujen tehtävänä oli tuennan lisäksi jättää vesiletkuille riittävä tila lysimetrien alapuolelle.



Kuva 17. Lysimetrit asennettiin sivukiven läjitysalueelle 13.6.2019. Vasemmalla oleva peitottomaksi jätetty vertailulysimetri sijoitettiin hieman erilleen muista. (Forsman, 2019)

Lysimetrien pohjille laitettiin suodatinkankaat veden ulostuloreiän tukkeutumisen ja maa-aineksen kulkeutumisen estämiseksi suotautuvan veden mukana. Materiaalikerrokset ja anturipaikat on esitetty kuvassa 18. Lysimetrit täytettiin sivukivimurskalla asentaen samalla happianturit lysimetrien nro 1, 3 ja 5 pohjalle, ja niitä ympäröivä alue täytettiin moreenilla. Käytössä oli kahdeksan happianturia loggerin differentiaalikanavapaikkojen maksimimäärän mukaisesti. Anturit sijoitettiin sadeveden kulkeutumisen sekä mädätysjännöskerroksen vaikutusten seuraamisen kannalta olennaisiin paikkoihin. Happiantureita suunniteltiin aluksi laitettavan myös moreenikerrokseen, mutta anturin pystysuuntainen asennus olisi voinut aiheuttaa peiton pintaan veden virtausreittejä ja syvemmälle asennettaessa etäisyys kerrosten väliseen happianturiin olisi ollut lyhyt. Lysimetrien pohjalle sijoitetuilla antureilla voidaan seurata hapen diffuusion muutoksia syvemmällä jäteaineksessa. Lysimetreistä saadut mitaustulokset voivat vaihdella keskenään suuresti, jos sivukivimateriaali on koostumukseltaan heterogeenista. Lähtötasojen selvittämiseksi lysimetrit päätettiin jättää ilman peittoja siihen asti kunnes ensimmäiset sadevedet suotautuisivat niiden läpi. Suotautuneista vesistä määritetään alkuainepitoisuudet ja muut laadulliset tekijät ilman peittokerrosten vaikutusta. Peittokerrokseen sijoitettavat reflektometrit jätettiin loggeriin kytkettyinä lysimetrien päälle odottamaan myöhemmin tehtäviä peittoasennuksia.



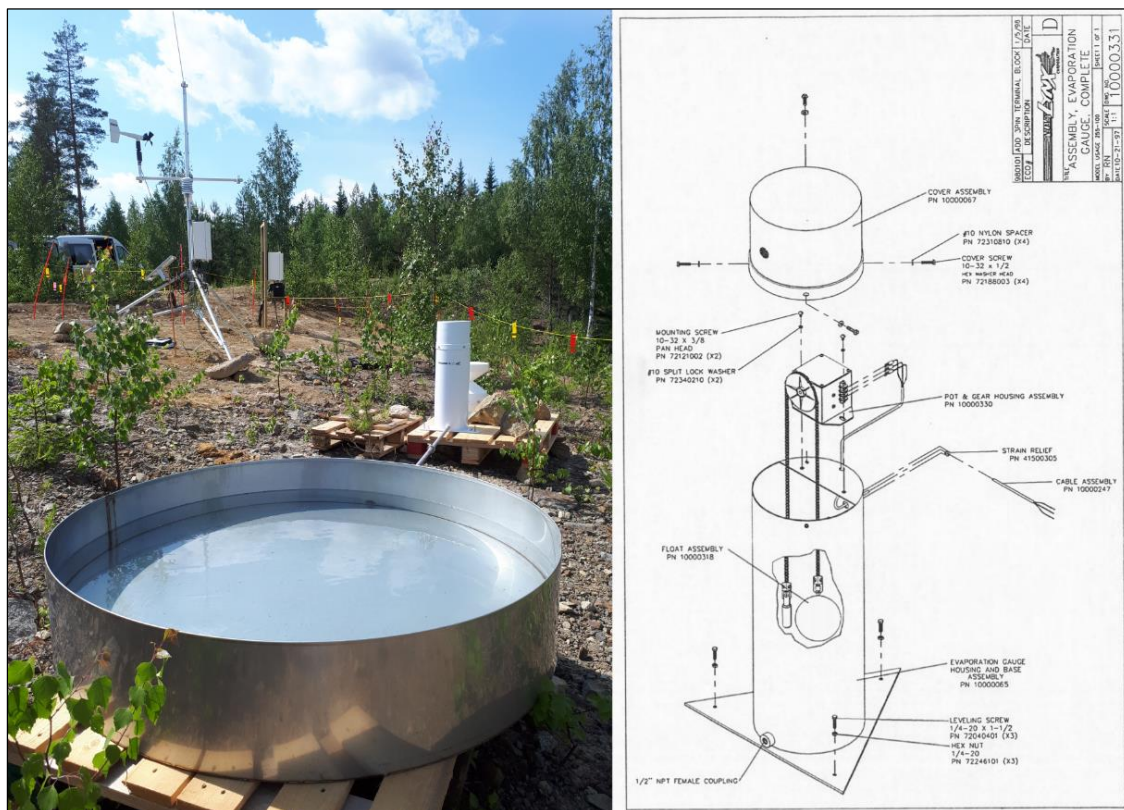
Kuva 18. Särkiniemen lysimetrien materiaalikerrokset ja anturien sijainnit. (Forsman, 2019)

SO-110-antureiden kytkennän jälkeisten, ilmasta mitattujen analogisten jännitearvojen perusteella määritettiin yksilölliset kalibrointikertoimet ja poikkeama-arvot kullekin anturille. Kaavat näiden laskemiseen löytyi anturin manuaalista, mutta Apogee Instrumentsin kotisivuilta oli myös ladattavissa valmis Excel-lomake näiden määrittämiseksi. CS650-reflektometrit ja Tipping Bucketit olivat tehdaskalibroituja. Yksi Tipping Bucket-yksikkö tarkistettiin asennuksen yhteydessä kaatamalla puhdasta vettä kippimekanismin lävitse.

7.3 Sääaseman rakentaminen

Mittausaseman viereen koottiin sääasema paikallisten sääolojen seuraamiseksi. Peittojen toimivuuden ja ennen kaikkea veden pidätyskyvyn kannalta on olennaista tietää mm. paikallisen sadannan ja haihdunnan määrät. CR300-loggeri määritettiin mittaamaan sääparametreja kymmenen minuutin välein. Langattoman seurannan ja tiedonsiirron mahdollisti myös sääaseman osalta Airlink Rv50 4g-reititin, joka mittausaseman reitittimen tavoin määritettiin olemaan päällä joka päivä tunnin ajan, klo 9-10. Aurinkopaneeli ja pieni 7 Ah:n lyijyakku riittivät antamaan tarvittavan virran yhtäjaksoisesti sääasemalle koko kesän 2019 mittausjakson ajan.

Haihdunta määritettiin Novalynxin 255-100-haihduntamittarilla ja ruostumattomasta teräksestä valmistetulla ja tilavuudeltaan lähes 300 litraisella haihdunta-astialla, jotka asennettiin puulavojen päälle sääaseman läheisyyteen aukealle paikalle (kuva 19). Paikkaa valittaessa huomioitiin, ettei sääasema tai ympäröivä kasvillisuus pääse muodostamaan haihtumista hidastavaa varjoa astian ylle. Mittausyksikkö ja haihdunta-astia kiinnitettiin toisiinsa ruostumattomasta teräksestä valmistetulla putkella ja astiaa täytettiin vedellä.



Kuva 19. Haihduntamittari altaineen sijoitettiin Särkiniemen koealueen reunaan tasaiselle alustalle. (Forsman, 2019). Oikealla on esitetty mittausyksikön rakenne. (Novalynx Corporation, Model 255-100 Analog Output Evaporation Gauge Instruction Manual 2015)

Mittausyksikön sisällä on kammio (kuva 19), jossa vedenpinta nousee vaakasuoraan asennettuna samalle tasolle kuin altaassa. Kammion yläosassa oleva hammasratas on kytketty 1000 ohmiseen potentiometriin. Kammiossa on myös koho ja paino, jotka on kiinnitetty ketjulla toisiinsa hammasrat-taan ylitse. Kun altaassa oleva vesi haihtuu, mittausyksikön kammiossa olevan vedenpinnan taso laskee. Tämän seurauksena koho vajoaa alemmaksi saaden rattaan pyörimään ja muuttaen poten-tiometrin resistanssia. Potentiometrin pyyhkijältä luettu jännitearvo voidaan muuttaa haihtuneen veden syvyysarvoksi (mm). (Novalynx Corporation, Model 255-100 Analog Output Evaporation Gauge Instruction Manual 2015)

Astian vedenpinnan taso voi hieman vaihdella tuulen aiheuttamasta veden liikkeestä johtuen, joten määrittämiseen käytettiin viiden mittauksen keskiarvoa kymmenen minuutin aikana. Lähtötasoksi haih-dunta-astiaan kaadettiin 148 litraa vettä, jolloin astian vedenpinta oli 13 cm:n korkeudella. Astian vesimäärää seurattiin toimistolta käsin ja sitä täydennettiin yhden kerran kesän 2019 mittausjakson aikana.

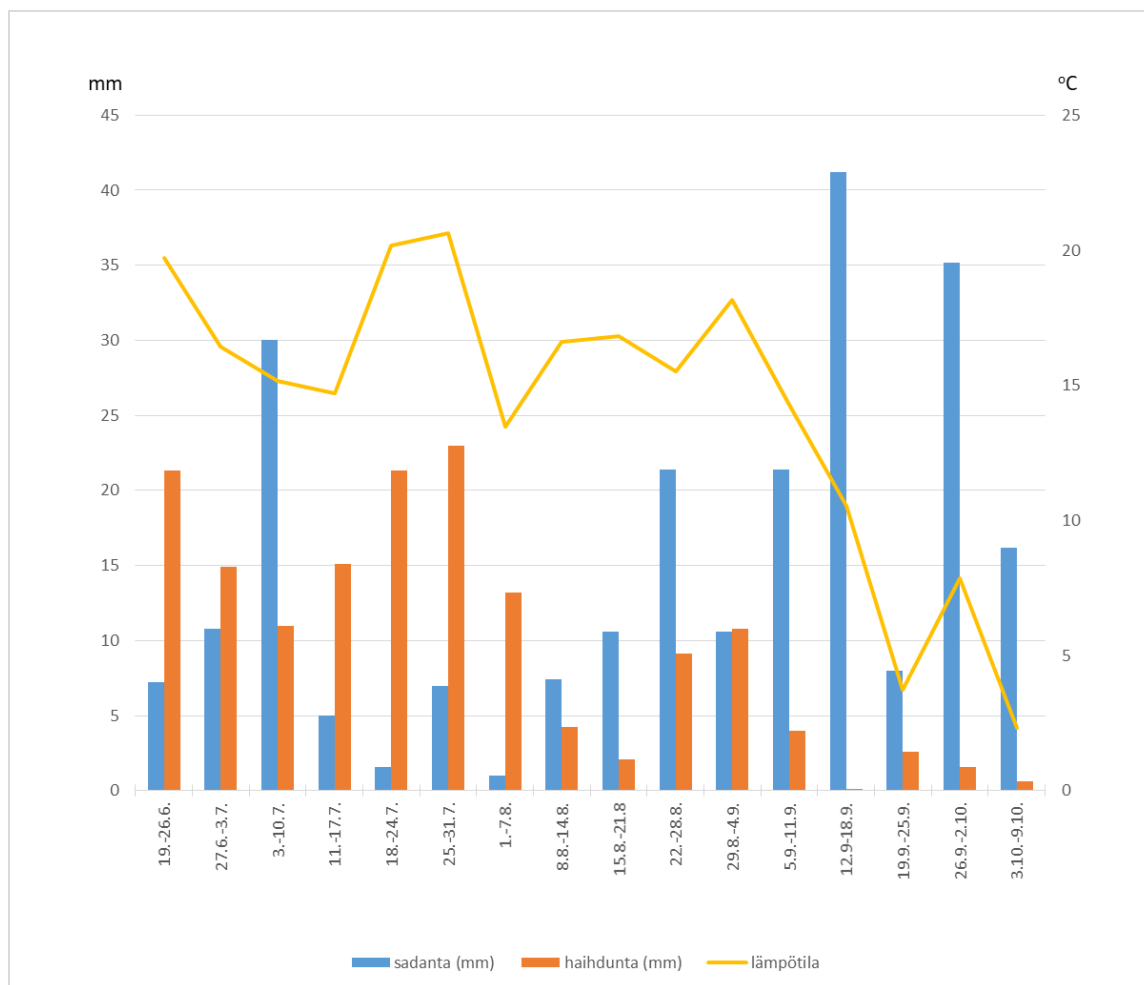
Sadantaa mitattiin ARG100-mittarilla, joka koostuu veden keräinsuppilosta ja sen alapuolisesta poh-jakammista (kuva 20). Mittarin sisällä suppilon alapuolella on Unidatan Tipping Bucketien tapaan kippimekanismilla toimiva kaksiosainen kauha. Kauhan kipatessa 0,2 mm sademäärän jälkeen, sen

varressa oleva magneetti sulkee magneettikytkimen. Sulkemiskerrat tallentuvat dataloggerille ja niiden perusteella voidaan määrittää sademäärä.



Kuva 20. Särkiniemen sääaseman ARG100-sademittari. (Forsman, 2019)

Viikottaiset haihdunnan ja sadannan määrät (mm) sekä keskiarvoiset lämpötilat kesän 2019 mittausjakson aikana on esitetty kuvassa 21, josta näkee hyvin mittausjakson alkuosan lähes kaksi kuukautta kestäneen kuivemman kauden. Ensimmäisen seitsemän viikon aikana haihdunnan määrä oli noin kaksi kertaa suurempi sadantaan verrattuna (sadanta 62,6 mm ja haihdunta 119,8 mm). Tuona aikana ainoastaan kolmannen viikon sademäärä ylitti haihdunnan määrän. Sadepiikki kyseisellä viikolla aiheutui pääosin 3.7.2019 keskiviikon rankkasateesta, jolloin vettä tuli runsaasti, 18,2 mm. Tämän jälkeen oli melko kuivaa aina elokuun puolivälin tienoille saakka, jolloin sateita alkoi tulla yhä enemmän ja ilmojen viiletessä syyskuun alussa myös haihdunta pieneni merkittävästi.



Kuva 21. Viikottaiset sadannat, haihdunnat ja lämpötilat Särkänniemessä kesän 2019 mittausjakson aikana. (Forsman, 2019)

7.4 Lysimetrien kastelut ja peittojen asennukset

Vettä ei ollut vielä elokuun loppupuolella suotautunut lainkaan lysimetrien läpi kuivan kesän takia, vaan vähäiset sateet pidättivät sivukivimurskaan ja haihtuivat siitä vähitellen takaisin ilmakehään. Peitot haluttiin asentaa ennen syksyn kosteampaa ajanjaksoa, joten lysimetrejä kasteltiin lähtötoimien selville saamisen nopeuttamiseksi. Ensimmäinen kastelu tehtiin 22.8., jolloin jokaisen lysimetrin pinnalle kaadettiin GTK:n toimistolta tuotua hanavettä tasaisesti kastelukannulla kahdeksan litraa. Vettä ei suotautunut heti yhdenkään lysimetrin lävitse, mutta se kostutti sivukivimurskaa sen verran, että seuraavan vuorokauden iltana alkaneen rankkasateen seurauksena vettä suotautui läpi lysimetreistä nro 1 ja 3. Suotautuneet vähäiset vedet jäivät pääosin letkuihin ja Tipping Bucket-mittareiden sisällä olevaan keräysastiaan. Kaikkien lysimetrien vesistä tarvittiin näyte, joten 27.8. suoritettiin uusi kastelu. Tällä kertaa vettä varattiin reilusti enemmän, neljä 40 litran astiaa. Kymmenen kastelulitran jälkeen lysimetreistä 1 alkoi tulla vettä läpi, ja 30 litran jälkeen myös lysimetreistä 2 ja 3. Tämän jälkeen kastelua jatkettiin vain lysimetrien 4 ja 5 osalta, joita molempia kasteltiin yhteensä 55 litralla vettä.

Kasteluita suoritettaessa todettiin kaivinkoneella kaivetun tason olevan hieman kalteva. Tämä tuli ilmi vesien suotautumisnopeuksissa. Ylemmällä rinteessä olevista lysimetreistä vesi suotautui nopeammin kuin alemmalla olevista. Kun kaikista lysimetreistä oli saatu vettä lävitse, otettiin näytteet liukosten alkuaineiden ja anionien laboratoriomäärittelyksiin sekä mitattiin mm. pH ja sähkönjohtavuus kenttäkäyttöisellä YSI ProDSS-vedenlaatumittarilla. Lopuksi kanisterit tyhjennettiin ja asetettiin takaisin Tipping Bucketien alle odottamaan uusia suotovesiä.

Lysimetrien päälle asennettiin peitot kaivinkoneen avustuksella 17.9.2019. Kaivuutöiden yhteydessä materiaalikerrokseen sijoitettiin loput jo aiemmin dataloggeriin kytketyistä happi- ja kosteusantureista. Antureiden lopulliset sijainnit on esitetty kuvassa 18. Lysimetrien 3 ja 4 päälle levitettiin Gasumin biokaasulaitokselta haettua orgaanisesta aineksesta koostuvaa mädätysjäännöstä (kuva 22), jota laitettiin kummankin lysimetrin päälle noin 70 litraa. Mädätysjäännös tiivistyi arviolta 5 cm:n paksuiseksi kerrokseksi, kun sen päälle levitettiin moreeni. Moreenista poistettiin isoimmat kivet käsin kaivuutöiden yhteydessä ja se tiivistettiin kaivinkoneen kauhalla tasaisesti lysimetrien päälle (kuva 23). Moreenikerroksen paksuudeksi tuli noin 30 cm. Peittojen asennusten yhteydessä aiemmin suotautuneista vesistä otettiin uudet näytteet ja tehtiin vedenlaatumittaukset.

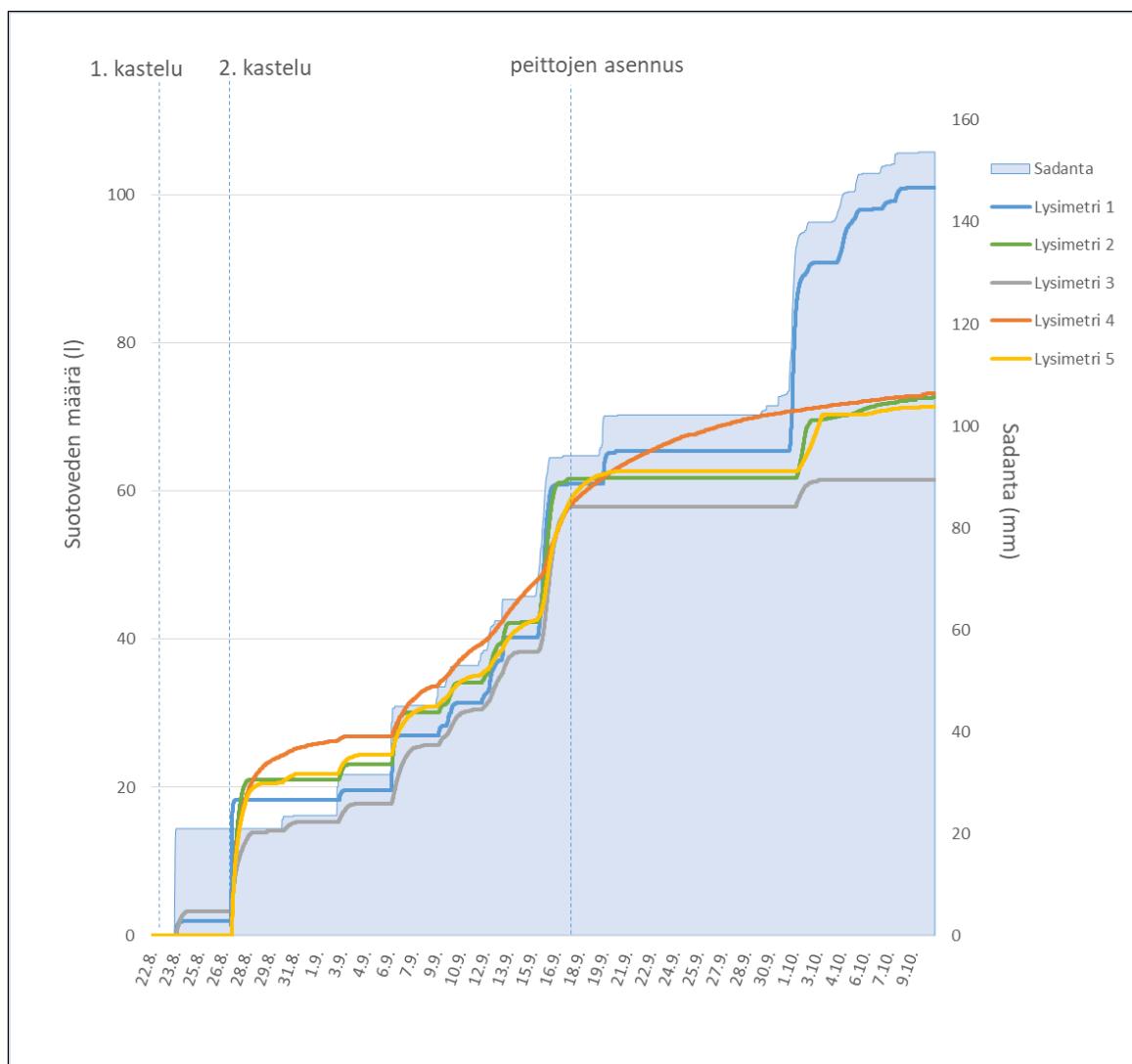


Kuva 22. Gasumilta saatua mädätysjäännöstä levitettiin suodatinkankaan päälle lysimetreihin 3 ja 4. (Forsman, 2019)

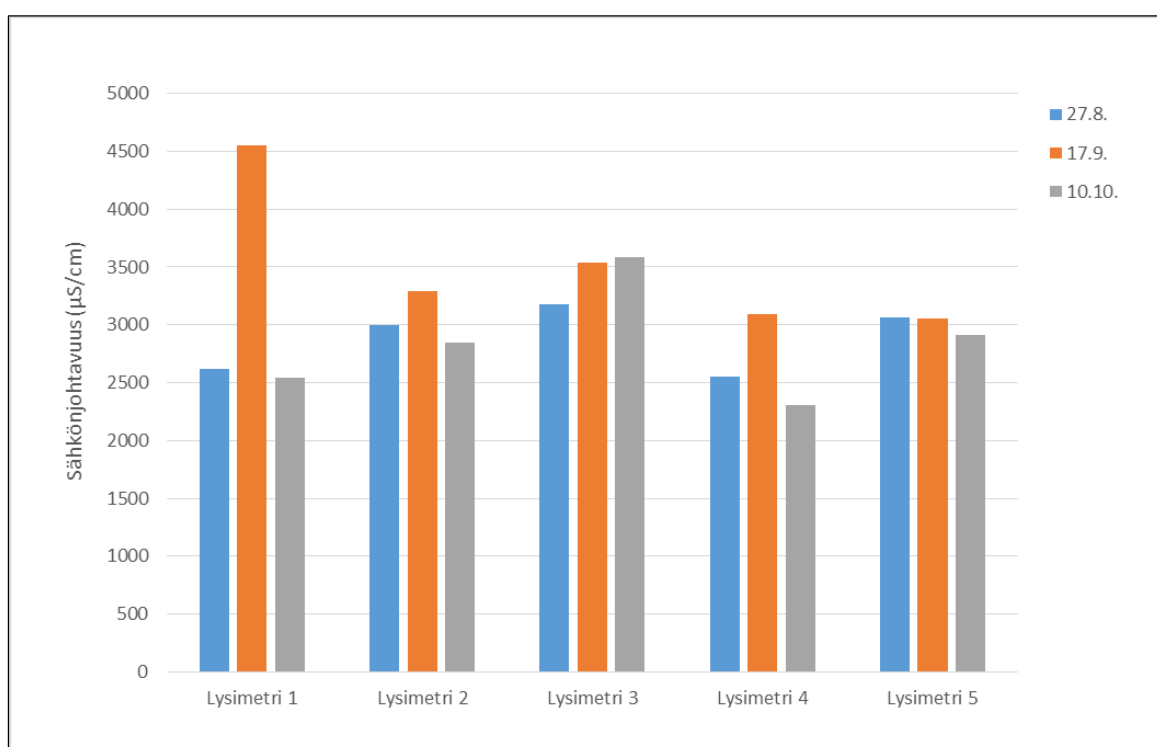


Kuva 23. Lysimetrien päälle kaivinkoneella tasoitettu moreenikerros. Oikealla peitoton vertailulysimetri nro 1. (Forsman, 2019)

Kasteluiden jälkeiset lysimetrien suotovesien ja sadannan kumulatiiviset kertymät on esitetty kuvassa 24. Ensimmäisen kastelukerran jälkeisenä päivänä 23.8. satoi 21 mm, mikä näkyy kuvaajan alussa sadantakäyrän pystysuorana nousuna. Kastelun ja rankkasateen yhteisvaikutuksesta vettä suotautui hieman lysimetrien 1 ja 3 läpi. Muiden lysimetrien osalta vasta toinen kastelukerta sai veden kulkeutumaan kanisteriin saakka. Suotautuneita vesiä kertyi melko tasaisesti sadantaa korreloiden kaikkien lysimetrien osalta peittojen asennukseen saakka, jolloin alkoi muodostumaan suurempia eroja lysimetrien välillä. Peitottoman lysimetrin 1 käyrä korreloi sadantakäyrän mukaisesti. Mädätysjäännöskerroksen saaneella lysimetri 3:lla suotovettä tuli peiton asennuksen jälkeen kaikista vähiten, vain 3,6 litraa mittauskauden loppuun mennessä. Lysimetri 4:ssä, jonka peitossa oli myös mädätysjäännöstä, ei tapahtunut vastaavaa suotoveden määrän hiipumista. Tämä johtuu luultavasti siitä, että lysimetrin 4 sivukivimateriaali oli peittojen asennuksen aikana huomattavasti kosteampaa kuin vähemmän kastellun lysimetrin 3. Kasteluvesiä valui hiljalleen lysimetrin 4 lävitse vielä peittojen asennusten jälkeen.



Kuva 24. Lysimetrien suotovesien ja sadannan kumulatiiviset kertymät aikavälillä 22.8- 10.10.2019. (Forsman, 2019)

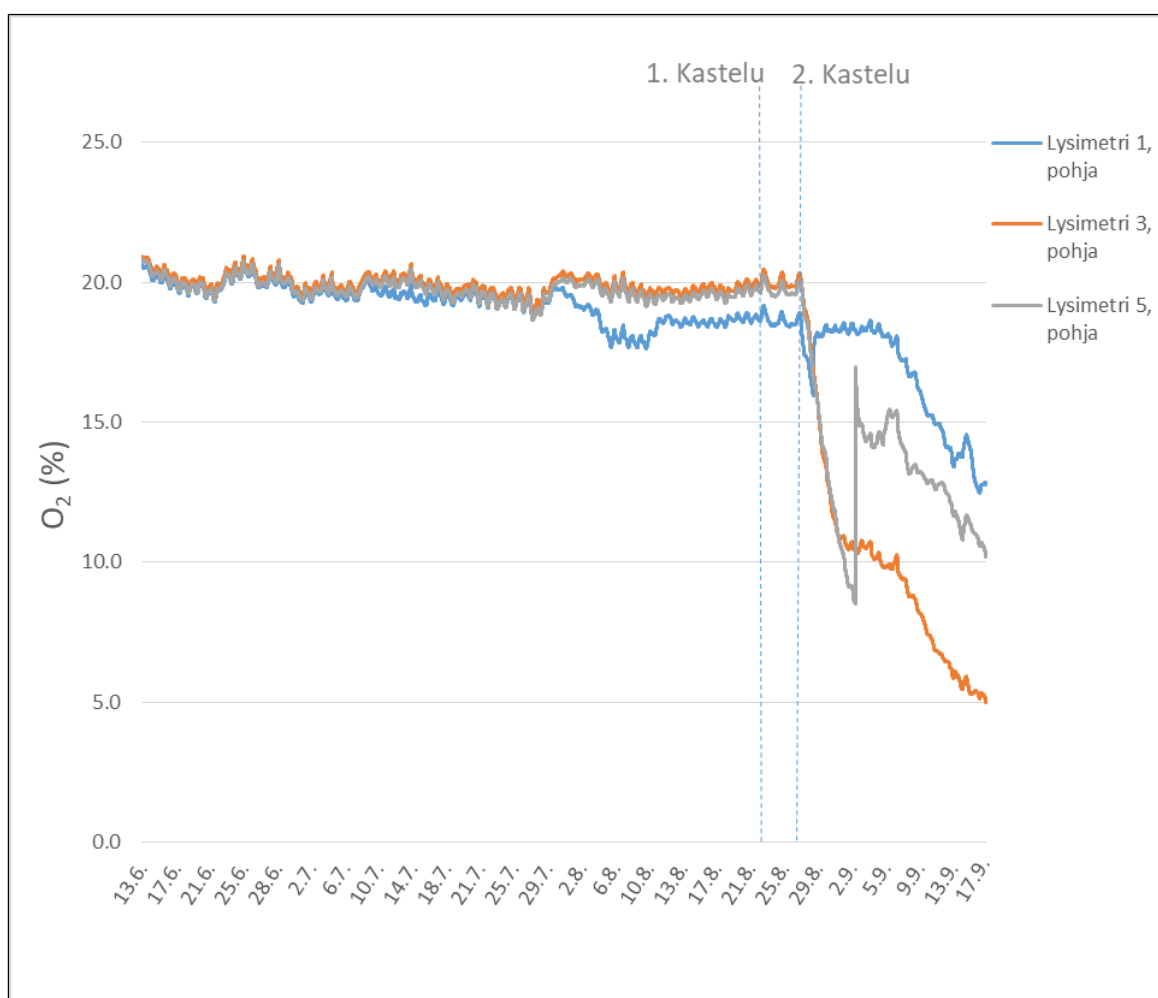


Kuva 25. Lysimetrien suotovesien sähkönjohtavuudet syksyllä 2019. (Forsman, 2019)

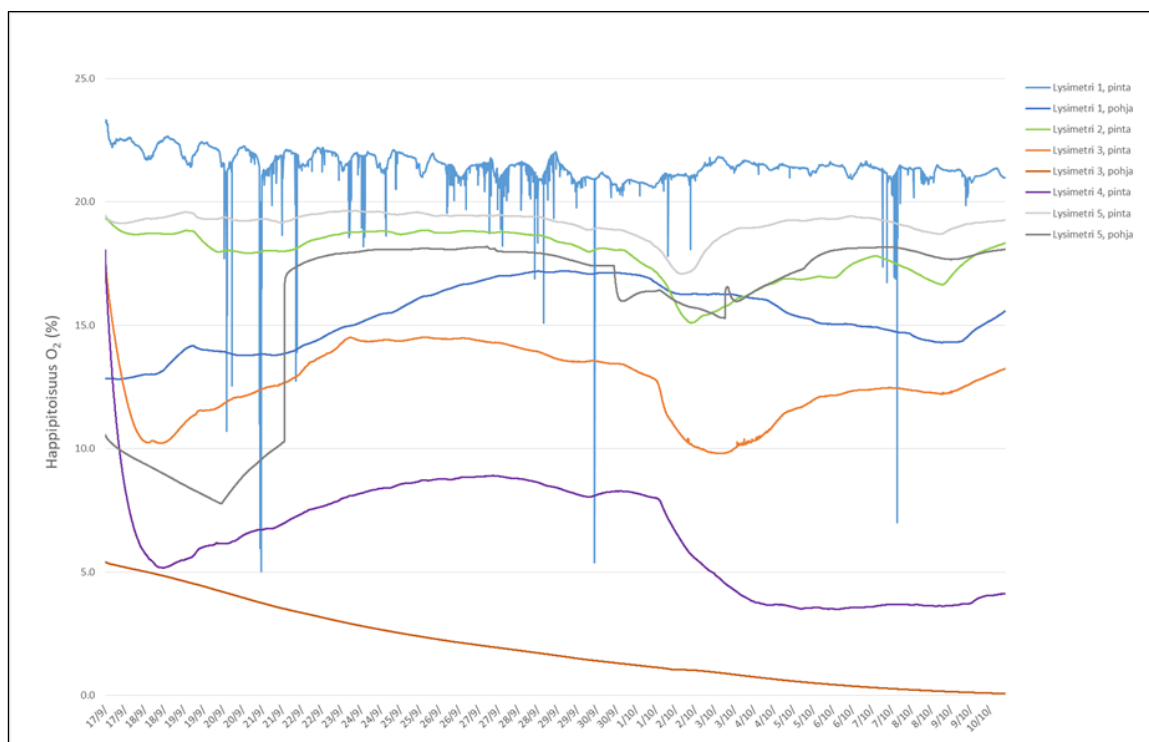
Lysimetrien suotovesistä tehtiin vedenlaatumittaukset kolme kertaa mittausjakson aikana. Kenttämittauksista saadut sähkönjohtavuudet on esitetty kuvassa 25. Lysimetrin 1 läpi suotautuneen veden sähkönjohtavuus oli peittoasennusten yhteydessä 17.9. tehdyissä mittauksissa huomattavasti korkeampi kuin muina ajankohtina. Mittausvirheen poistamiseksi vedestä tehtiin uusintamittaus toistolla, mutta tulos oli sama. Muiden lysimetrien kohdalla vastaavaa kasvua ei havaittu. Kohoama voi johtua esimerkiksi jonkun metallin liukenemisesta sivukiviaineksesta sadeveden mukana, jota lysimetrin 1 kiviaines on sisältänyt muita lysimetrejä enemmän. Asiaa tutkitaan tarkemmin laboratorioanalyysitulosten valmistuttua. Määtysjäännöstä sisältävässä lysimetri 4:ssä suotoveden sähkönjohtavuus pieneni peittojen asennusten jälkeen hieman alle 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$:lla. Lysimetri 3:ssa, joka myös sisälsi määtysjäännöskerroksen, ei tapahtunut vastaavaa vaan sähkönjohtavuus jopa nousi hieman 10.10. tehdyssä mittauksessa. Peitoilla ei siis näyttäisi olevan merkittävää vaikutusta suotovesien sähkönjohtavuuksiin. Mittauksia tullaan jatkamaan vesinäytteenottojen yhteydessä.

8 HAPPI- JA VESIPITOISUUSTULOKSIA

Kaikki kahdeksan SO-110-happianturia sijoitettiin lysimetrien sivukivimurskaan mittaamaan peittojen vaikutusta hapen kukeutumiseen. Niistä kolme kytkettiin jo aseman pystyttämisen yhteydessä mittaamaan happipitoisuutta lysimetrien 1, 3 ja 5 pohjaosiin. Kuvassa 26 on esitetty näiden anturien jännitearvoista määritetyt happipitoisuudet ennen peittojen asentamista. Lysimetrien pohjaosissa vallitsi samanlaiset happiolosuhteet heinä-elokuun vaihteeseen saakka, jolloin lysimetri 1 happipitoisuudessa tapahtui notkahdus pari prosenttiyksikköä alemmaksi muiden lysimetrien arvoihin verrattuna. On mahdollista, että muista hieman erillään sijaitsevaan lysimetriin 1 kertyi pintavaluntana hieman muita enemmän sadevesiä. Ensimmäinen kastelukerta ei saanut aikaan muutoksia happipitoisuuksissa, joten voidaan olettaa että vesi ei riittänyt kastelemaan lysimetrien pohjaosia. Toinen kastelu sen sijaan aiheutti happipitoisuuden jyrkän laskun kaikkien happiantureiden osalta. Lysimetri 5:ssä happipitoisuus nousi 2.9. pystysuoralla harppauksella ylöspäin lähes 8 %-yksikköä.

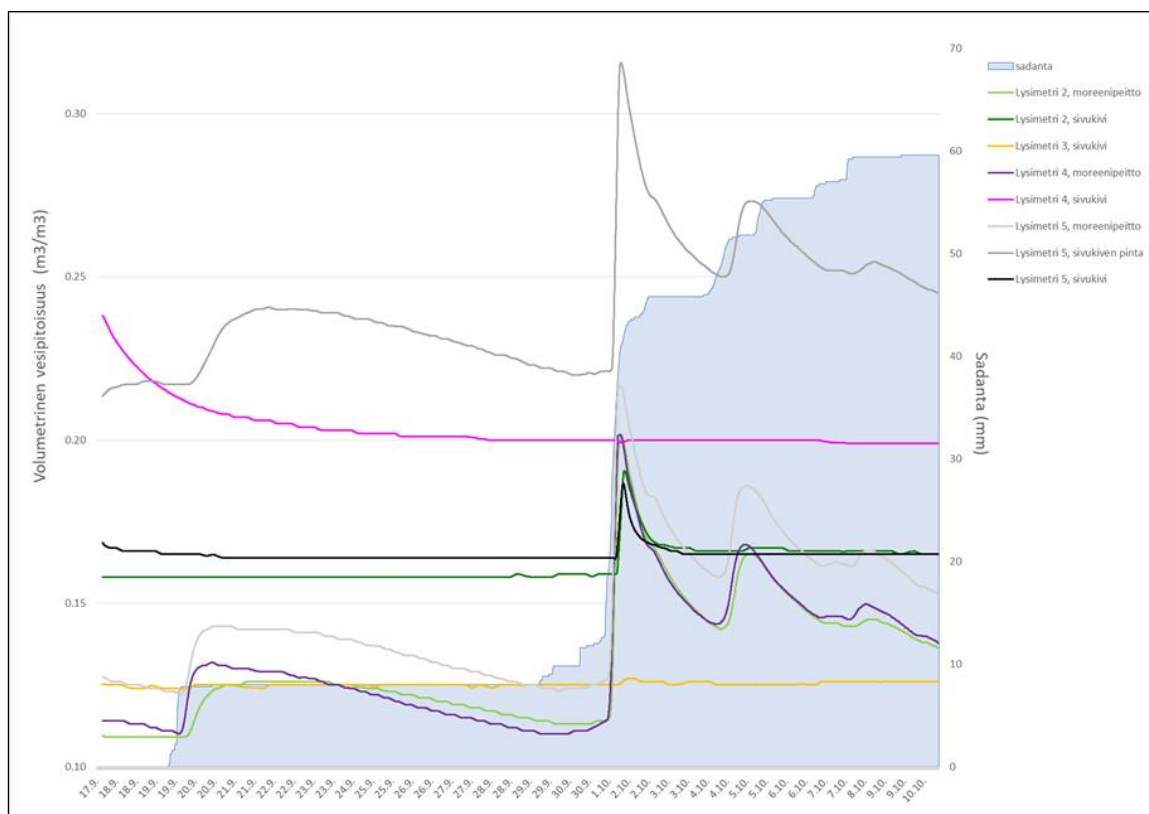


Kuva 26. Lysimetrien 1, 3 ja 5 pohjalle sijoitettujen SO-110-anturien mitaamat happipitoisuudet ennen kuivapeittojen asentamista. (Forsman, 2019)



Kuva 27. SO-110-antureiden mitaamat happipitoisuudet peittojen asennusten jälkeen. (Forsman, 2019)

Loput SO-110-happianturit sijoitettiin sivukivimurskan pintaosiin peittoasennusten yhteydessä. Kuva 27 on esitetty mitatut happipitoisuudet peittojen asennuksesta mittausjakson loppuun. Pienimmät pitoisuudet saatiin mädätysjäännöstä sivukivien ja moreenipeiton välissä sisältävistä lysimetreissä nro 3 ja 4. Lysimetrin 3 pohjalla hapen määrä laski hiljalleen ja saavutti hapettomat olosuhteet mittausjakson lopussa. Lysimetrin 4 pohjalle ei asennettu happianturia, mutta jo pintaosassa pitoisuus tippui jyrkästi heti peittojen asennusten jälkeen ja pysytteli sen jälkeen alle kymmenessä prosentissa. Mittausjakson lopussa happea oli enää 4,1 %. Vertailulysimetrin 1 pintaosassa olevan happianturin data oli epätasaista. Arvot tippuivat välillä alas, mutta pysyivät kuitenkin pääsääntöisesti välillä 19,5 -23,3 %. Arvojen tipahtelu viittaa sähköiseen häiriöön. Happipitoisuudet lysimetrin 2 ja 5 moreenipeittojen alapuolella olivat korkeat koko mittausjakson ajan ja niiden pitoisuuskäyrät korreloivat hyvin keskenään. Pelkkä moreenikerros ei siis näyttänyt estävän hapen pääsyä jätteaineksen pintaan. Lysimetri 5:n pohjalla oleva happianturi teki 22.9. toisen, lähes 7 %:n äkillisen nousun, jonka jälkeen arvot pysyttelivät pintaosiin asennettujen antureiden happipitoisuuksien tasolla. Nämä happipitoisuuden äkilliset muutokset eivät korreloi muiden antureiden mittaustulosten kanssa ja tekevät koko anturista saadun datan epäluotettavaksi.



Kuva 28. CS650-reflektometrien mitaamat kosteuspitoisuudet ja kumulatiivinen sadanta peittojen asennusten jälkeen. (Forsman, 2019)

Peittojen vedenpidätyskykyä selvitettiin CS650-reflektometreilla, joiden mittaustulokset on esitetty kuvassa 28. Ainoastaan mädätysjäännöskerrosten alapuolisten reflektometrien mittaustulokset eivät korreloi sadannan kanssa. Niissä vesipitoisuudet pysyivät lähes muuttumattomina peittoasennusten jälkeisen pienen laskun jälkeen. Enemmän kastellun lysimetrien 4 vesipitoisuus oli näistä kahdesta luonnollisesti korkeampi. Kuvasta on poistettu mädätysjäännöskerroksen päälle asennettujen reflektometrien datat. Ne ottivat häiriötä ilmeisesti suuren vesipitoisuuden tai mädätysjäännöksestä liukenevien aineiden vaikutuksesta ja antoivat tuhatkertaisia lukemia muiden anturien dataan verrattuna. Lysimetri 5:ssä suurimmat vesipitoisuusarvot olivat moreenipeiton ja sivukiven välissä, johon vesi näyttäisi jossain määrin tiivistyvän. Moreenipeittoisten lysimetrien 2 ja 5 sivukivessä sijaitsevien reflektometrien kosteuspitoisuudet eivät nousseet peittojen asennusten jälkeisen sateen vaikutuksesta. Lokakuun alun rankkasade aiheutti kuitenkin veden suotautumisen moreenipeittojen läpi nostaen hieman näiden lysimetrien kosteuspitoisuuksia sivukivessä.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyöni tavoitteena oli perehtyä kuivapeittojen toimivuuden mittaamiseen soveltuviin ratkaisuihin pilotoimalla moreenin ja biokaasun tuotannossa syntyvän mädätysjäännöksen soveltuvuutta kavannaisjätteen peittomateriaalina. Työn vaiheisiin kuului mm. soveltuviin mittalaitteisiin perehtyminen, kilpailutus ja laitehankinta, antureiden testaus, sää- ja mittausaseman rakentaminen, asemien huoltotoimet, datan seuranta ja keruu, sekä tulosten käsittely. Työn tekeminen kaikkine vaiheineen kesti noin vuoden ja mittaukset Särkiniemen asemalla jatkuvat tämän työn jälkeenkin, vähintään vuoden 2020 loppupuolelle saakka. Työn kannalta haastavaksi osoittautui kuiva kesä, joka viivästytti peittojen asennuksia siinä määrin, että lopulta katsottiin parhaaksi kastella peitot keinotekoisesti suotovesien lähtöarvojen selvittämisen nopeuttamiseksi. Työhön sisällytetty mittausjakso peittojen asennusten jälkeen jäi tämän takia melko lyhyeksi. Työssä ei ole mukana maaperä- ja vesinäytteiden laboratorioanalyysituloksia, sillä osa näistä on vielä saamatta. En katsonut niitä välttämättömiksi tämän mittalaitteisiin keskittyvän opinnäytetyön kannalta. Särkiniemen peittorakennetiestien tuloksista on tarkoitus julkaista tieteellinen artikkeli vuoden 2021 aikana.

IP-pohjainen etäyhteys mittaus- ja sääaseman, sekä toimiston välillä toimi ongelmitta koko mittausjakson ajan. Kertaakaan ei tullut sellaista tilannetta, ettei asemiin olisi saanut halutessaan muodostettua yhteyttä. Toimistolta pystyi tarkistamaan esimerkiksi aseman akun varaustason ja suotautuneiden vesien määrät Tipping Bucketien pulssilaskurien perusteella. Reitittimet oli määritetty mitausohjelmassa olemaan päällä joka päivä tunnin ajan akkujen virran säästämiseksi. Päivitetyn mitausohjelman lähettäminen mittausasemalle onnistui myös etäyhteyden avulla.

Tipping Bucket-mittarit toimivat hyvin koko mittausjakson ajan ja lysimetrien suotovesien määrät korreloivat paikallisen sadannan kanssa peittojen asennuksiin saakka. Myös suotovesien keruu onnistui hyvin Savonialta tilatun mittarien muokkaustyön ansiosta. Lysimetrien kasteluissa oli merkillä pantavaa erot suotautumisnopeuksissa. Hieman kaltevan lysimetrien asennustason johdosta ylemmällä rinteessä olevista lysimetreistä suotautuneet veden kulkivat nopeammin keräysastioihin. Alempana olevia lysimetrejä jouduttiin tämän takia kastelemaan suuremmalla vesimäärällä.

Happianturit toimivat hyvin lukuunottamatta lysimetrin 1 sivukivimurskan pinnalla ja lysimetrin 5 pohjalla olevien anturien häiriöitä ja äkillisiä arvojen nousuja. Mädätysjäännöksen päälle sijoitetut CS650-reflektometrit antoivat tuhatkertaisia vesipitoisuusarvoja muiden arvoin verrattuna. Ne ottivat todennäköisesti häiriötä veden kyllästämästä mädätysjäännöksestä liukenevista aineista. Loput reflektometrit toimivat moitteitta. Lyhyen mittausjakson perusteella mädätysjäännöskerros näyttäisi toimivan hyvin veden ja hapen pääsyn estämisessä jäteainekseen. Pelkkä 30 cm moreenikerros ei juuri estänyt veden kulkeutumista ja hapen diffuusiota sivukiveen, vaikka vesi jossain määrin tiivistyikin kerrosten väliin.

Kuivapeittojen toimivuusselvityksissä mittausantureita on kustannussyistä ja loggereiden kytkentäporttien määrästä riippuen rajallisesti käytössä. Niiden optimaalinen sijoittaminen on olennaisen tärkeää tutkimuksen onnistumisen kannalta. Lisäksi on huomioitava antureiden vaurioitumismahdollisuus asennusvaiheessa ja toimivuus mitattavissa materiaaleissa.

LÄHTEET

- Kumpulainen, S., Carlson, L. & Räisänen, M. L. 2007.
Seasonal variations of ochreous precipitates in mine effluents in Finland.
Applied Geochemistry 22, 760-777.
Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292707000157?via%3Dihub>
- Tremblay, G. A. & Hogan, C. M. 2001.
Mend Manual, Volume 4 -Prevention and control. MEND 5.4.2d. 352 s.
Saatavissa: http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/5-4-2dVolume4_PreventionControl.pdf
- Kauppila, P., Räisänen, M. L. & Myllyoja S. 2011.
Metallimalmikaivosten parhaat ympäristökäytännöt. Edita Prima Oy.
Suomen ympäristö 29/2011, 213 s.
Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37056/SY_29_2011.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- O'Kane Consultants Inc. 2012
Cold regions cover system design. Technical guidance document. MEND 1.61.5c. 135 s.
Saatavissa: <http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2013/01/1.61.5c.pdf>
- Hansen, J., Holm, P., Hansen, E. & Hjelm, O. 2000.
Use of lysimeters for characterization of leaching from soil and mainly inorganic waste materials. Nordtest Technical Report 473. 51 s.
Saatavissa: <http://www.nordtest.info/index.php/technical-reports/item/use-of-lysimeters-for-characterisation-of-leaching-from-soil-and-mainly-inorganic-waste-materials-nt-tr-473.html>
- Sand, W., Jozsa, P., Kovacs Z., Săsăran, N., & Schippers, A. 2007
Long-term evaluation of acid rock drainage mitigation measures in large lysimeters.
ScienceDirect. Journal of Geochemical Exploration, 205-211.
Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674206002081>
- Schneider, A., Baumgartl, T., Doley, D. & Mulligan D. 2010
Evaluation of the Heterogeneity of Constructed Landforms For Rehabilitation Using Lysimeters. Vadose Zone Journal 9(4):898-909
Saatavissa: <https://pubs.geoscienceworld.org/vzj/article/9/4/898/317466/evaluation-of-the-heterogeneity-of-constructed>
- O'Kane Consultants. 2003.
Evaluation of the long-term performance of dry cover systems: Phase 1 final report. A study to improve our ability to accurately predict the long-term performance of dry covers.
- Poesen, J., & Lavee, H., 1994.
Rock fragments in top soils: Significance and processes. Catena 23, 28 s.
Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0341816294900507>

- O’Kane, M., Wilson, G.W. & Labour, S.L. 1998.
Instrumentation and monitoring of an engineered soil cover system for mine waste rock.
Vol. 35, No.5: 828-846
- Vulcan Resources. 2009.
Major Acquisition in Finland: Processing plant purchase is an enabling transaction for the Kylylahti project. Lehdistötiö.
Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/karttasovellus/mdae/references/47_S%C3%A4rkinieniemi/Major_Acquisition_in_Finland_Processing_plant_purchase_Kylylahti_Project.pdf
- Suomalainen, O., Montonen, P. & Makkonen, H. 2009.
Finn Nickel. Särkiniemen kaivoksen vuosikertomus 2008, 8 s.
- Campbell Scientific
Laittevalmistajan verkkosivut: <https://www.campbellsci.com/>
- CR1000X Measurement and Control Datalogger Product Manual. 2019.
Saatavissa: <https://s.campbellsci.com/documents/au/manuals/cr1000x-product-manual.pdf>
- LoggerNet, Instruction manual V.4.3. 2015.
Saatavissa: <https://s.campbellsci.com/documents/cn/manuals/loggernet.pdf>
- CS650 and CS655 Water Content Reflectometers Product Manual. 2012.
Saatavissa: <https://s.campbellsci.com/documents/es/manuals/cs650.pdf>
- Apogee Instruments. Oxygen Sensor Owner’s Manual. 2019.
Models SO-110, SO-120, SO-210 and SO-220.
Saatavissa: <https://www.apogeeinstruments.com/content/SO-100-200-manual.pdf>
- Unidata. Tipping Bucket Flow Gauge Model 6506G and 6506H Manual. 2013.
Saatavissa: <https://www.unidata.com.au/wp-content/uploads/2015/07/Unidata-Manual-6506GH-Tipping-Bucket-Flow-Gauge-Issue-5.0.pdf>
- Novalynx Corporation. 2015.
Model 255-100 Analog Output Evaporation Gauge Instruction Manual
Saatavissa: <https://novalynx.com/manuals/255-100-manual.pdf>

LIITE 1: NÄKYMÄ CRBASIC EDITORISTA

CRBasic Editor - [arkkioim2019_Final.CRX for the CR1000X]
File Edit View Search Compile Template Instruction Goto Window Tools Help

Insert
Help
Search...
All

Ohje-paneeli

Ohjelmointialue

```
478 Sample(1,Pulsit_5,F2) 'maaritetään taulukkoon tieto nimeltä Pulsit_5, datatyypiksi Two type floating point (fp2)
479 Sample(1,Pulsisumma_5,F2) 'maaritetään taulukkoon tieto nimeltä pulsisumma
480 EndTable
481
482 'Main Program
483 BeginProg
484 PulseCountReset
485 Scan(SCAN_INTERVAL,Min,1,0) 'Main Scan, pyyrii omaa ohjelmaa, alkaa uudestaan aina next scanin jälkeen, akku, lampotila, modemi, taulun kirjoitus
486 Battery(BattV) 'Default CR1000X Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV'
487 PanelTemp(FTemp,C,50) 'Default CR1000X Datalogger Wiring Panel Temperature measurement 'FTemp_C'
488 'Maaritetään reititin (sw12_5-portissa) päälle joka paiva klo 9-10
489 If TimeIsBetween(540,600,1440,Min) Then
490   SW12(SW12_2,1)
491 Else
492   SW12(SW12_2,0)
493 EndIf
494
495 'C-portit eivät toimi enää vierekkäin pulssi/SDI-portissa, joten Tipping bucketille käytettiin portteja C6, C7 ja C8 ja CS650-reflektometrille C1- ja C3-portteja
496 PulseCount(Pulsit_1,1,P1,1,0,1,0)
497 PulseCount(Pulsit_2,1,P2,1,0,1,0)
498 PulseCount(Pulsit_3,1,C6,1,0,1,0)
499 PulseCount(Pulsit_4,1,C7,1,0,1,0)
500 PulseCount(Pulsit_5,1,C8,1,0,1,0)
501
502 'päivittisen pulssisumman maarittaminen, ohjelman alussa laskuri nollautuu
503 Pulsisumma_1 = Pulsisumma_1 + Pulsit_1
504 Pulsisumma_2 = Pulsisumma_2 + Pulsit_2
505 Pulsisumma_3 = Pulsisumma_3 + Pulsit_3
506 Pulsisumma_4 = Pulsisumma_4 + Pulsit_4
507 Pulsisumma_5 = Pulsisumma_5 + Pulsit_5
508
509 'Call Data Tables and Store Data
510 CallTable SO110
511 CallTable CS650
512
513 RealTime(Aika)
514 If Aika(4) = 0 AND Aika(5) = 0 Then
515   Pulsisumma_1 = 0 'nollautuu vuorokauden vaihte
516   Pulsisumma_2 = 0
517   Pulsisumma_3 = 0
518   Pulsisumma_4 = 0
519   Pulsisumma_5 = 0
520 EndIf
521
522 NextScan
523
524 SlowSequence 'oma kokonaisuus antureiden mittausten, ensin happi
525
526 Scan(SLOW_SCAN_INTERVAL,1,Min,0,0)
527
528 SW12(SW12_1,1) 'switched i portti päälle
```

Viestialue

Version: C:\crb\bin\CRBasic\CR1000X-Corpo\crb1000x.exe VERSION: CR1000X-Beta.00.2017.06.30.02 DATE: 06/30/2017
sarkkioim2019_Final.CRX - Compiled in Sequential Mode
ProgSignature = 20555

Line: 505 Col: 46 D:\mittausohjelmat\sarkkioim2019_Final.CRX loaded. Insert