

Alina Reiman

KAATOPAIKAN PINTARAKENTEEN TOIMINTA

Ämmässuon koerakenteet

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Marraskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Alina Reiman: Kaatopaikan pintarakenteen toiminta – Ämmässuon koerakenteet
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2019

Tämä diplomityö on osa Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymän (HSY) kehitysprojektia *Kaatopaikan väliaikaisten pintarakenteiden vertailu- ja suunnitteluprojekti*. Projektin tarkoituksena on selvittää jättemateriaalien ja rakentamisesta muodostuvien kaivumaiden hyötykäyttöä kaatopaikan väliaikaisessa pintarakenteessa. Tutkittavia materiaaleja ovat jätteenpolton kuona, erilaiset jätteenpolton kuonan seokset, jätevedenpuhdistamon lietteestä valmistettu liete-kompostiseos ja Helsinki-moreeni. Kyseisiä jättemateriaaleja syntyy pääkaupunkiseudulla suuret määrät. Toisaalta kaatopaikkojen pintarakenteisiin kuluu paljon maa-aineksia ja muita materiaaleja. Kiertotalousajattelun mukaista on, että kaatopaikkojen sulkemisrakenteissa hyödynnetään mahdollisimman paljon teknisesti soveltuvia ja ympäristökelpoisuuden täyttäviä mineraalisia jättemateriaaleja. Projektin tuloksia on tarkoitus hyödyntää kaatopaikan väliaikaisten pintarakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen kaatopaikalla. Nykyinen jätteenkäsittelykeskuksen ympäristölupa edellyttää, että vuoden kuluttua täytön päättymisestä täyttöalueelle tulee rakentaa väliaikainen pintarakenne. Lopulliset pintarakenteet rakennetaan vasta, kun täyttö on painunut riittävästi, jotta epätasaiset painumat eivät vaurioita pintarakennetta.

Tutkimushankkeessa rakennettiin viisi koerakennetta, jotka instrumentointiin. Diplomityön osuus tutkimushankkeesta oli koerakenteiden rakentamisen dokumentointi, rakentamisen aikainen laadunvalvonta (tiivistystarkkailu ja laboratoriokokeet) sekä ensimmäisen seurantajakson (syksy/talvi 2018 – 30.6.2019) instrumentointitulosten sekä keskeisten vedenlaatutulosten raportointi. Tutkimushankkeessa ei tutkittu rakenteiden kaasunjohtavuutta tai kaatopaikkakaasun vaikutusta materiaaleihin, koska koerakenteita ei rakennettu jätetäytön päälle.

Projektin perusteella koerakenteiden toteuttaminen on haastavaa ja poikkeavaa tavanomaisesta kaatopaikkojen pintarakenteiden toteuttamisesta. Koerakentaminen vaatii kaikkien osapuolten sitoutumista jo suunnitteluvaiheessa, jotta vältetään virheitä ja suunnitelmien muuttamiselta työmaalla.

Koerakenteista mitatut vesimäärät ja vedenlaatuhavainnot poikkesivat joiltain osin ennakkooloituksista. Koerakenteiden osakerroksista ensimmäisen seurantajakson aikana purkautuneiden kumulatiivisten vesimäärien perusteella vesimäärien tarkkailuun käytetty menetelmä ei ole kaikilta osin luotettava. Mittakaivoissa käytetyn paineanturin mittaustarkkuus ei ollut riittävä. Koerakenteiden vertailu ei ollut ensimmäisen seurantajakson aikana mahdollista. Mittakaivoihin purkautuneesta vedestä tehtyjen kenttä- ja laboratoriomittausten perusteella umpikaivojen padottaminen on vaikuttanut yläpuolisista rakennekerroksista purkautuvan veden laatuun tai kaikista rakennekerroksista suotautuvia vesiä ei ole johdettu oikeisiin kaivoihin.

Tutkimuksen tulosten perusteella rakeisuus-, vesipitoisuus- ja hehkutushäviömääritykset ovat hyviä ja edullisia tapoja seurata käytettävien jättemateriaalien tasalaatuisuutta. Tulosten perusteella rakenteiden kuivairtotehiyden määrittäminen työmaalla on haastavaa ja tulos riippuu käytettävästä menetelmästä. Materiaalista riippuen troxler-mittalaitteella sekä vesi- ja hiekkavolymetrillä saadaan toisistaan huomattavasti poikkeavia kuivairtotehiyden arvoja. Yhdellä mittaustelmällä saadut tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia ja niiden perusteella voidaan arvioida tiivistystyön tasaisuutta. Mineraalisen tiivistyskerroksen irtotehiydellä on huomattava vaikutus rakennekerroksen vedenläpäisevyyteen, joten rakenteen kuivairtotehiys pitäisi pystyä luotettavasti määrittämään. Koerakenteessa käytetyn kuonabentoniittiseoksen vedenläpäisevyys kasvoi 100-kertaiseksi eli 10^{-9} :stä 10^{-7} :ään m/s, kun koekappaleen kuivairtotehiys oli 100 kg/m^3 pienempi.

Avainsanat: kaatopaikan pintarakenne, bentoniitti, kapillaarisulkurakenne, jätteenpolton kuona, Helsinki-moreeni, kiertotalous

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Alina Reiman: The Performance of a Landfill Capping – Case Ämmässuo
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
November 2019

This master's thesis is a part of a research project of Helsinki Region Environmental Services Authority (HSY). The aim of the project is to find usage to waste materials and surplus soils in the temporary landfill capping. The used materials in this study were treated municipal solid waste incineration bottom ash (MSWI BA), mixture of municipal solid waste incineration bottom ash with both bentonite and bitumen, composted municipal wastewater sludge and surplus soil called Helsinki-moraine which contains small amounts of construction waste like concrete and wood. In Helsinki region a lot of these kind of materials are generated and for the sake of circular economy it is advised to find use to these waste materials. Landfill cappings require significant amounts of natural aggregates and other materials which could be replaced with technically and environmentally suitable waste materials or geosynthetic products. The results of this study are intended to be used in designing of new temporary landfill cappings in landfill Ämmässuo in Espoo. The current environment permit of Ämmässuo requires that the temporary landfill capping systems must be build one year after the filling has ended in a landfilling area. The final landfill capping systems are built when most of the deformations have occurred. Uneven deformations can damage the landfill cappings and thus weaken the performance of the landfill capping system.

For this research five test capping systems were built to Ämmässuo landfill. The test cappings were instrumented. This master's thesis includes the documentation of construction of these capping structures, in-site density measurements and laboratory testing of the materials, reporting of the instrumentation results of the first follow-up period (autumn/winter 2018– 30.6.2019) and selected results of the water quality measurements. The gas permeability or the effects of landfill gases were not included to this study since the test capping structures were not built on actual waste fill.

Based on the experience, it is challenging to build test structures compared to “normal” structures. All parties must be involved to the project early on and everyone involved should study the designs carefully. In this way mistakes and last-minute changes to the plans could be avoided.

According to the laboratory tests grain size distribution, water content and loss on ignition are good and cheap ways to monitor homogeneity of the used waste materials. Based on the permeability tests, the permeability is highly depending on the dry density. On the other hand, the in-situ density results are strongly depending on the measurement method. In addition, the heterogeneity and the chemical composition of the certain waste materials are affecting on the results.

The most important result of this follow-up period is the proposal of methods to improve the monitoring system. Based on the results of the first follow-up period, the discharging cumulative water amounts are partly incorrect, since the method used for the water amount measurements isn't completely reliable. The reading accuracy of the sensors in the wells is inadequate for measured water flow. Therefore, it isn't possible to compare these test structures during the first follow-up period. According to the measurements performed in the structure layers and in the wells, it is possible that some wells are not connected to the proper layer.

Keywords: landfill capping, bentonite, capillary barrier system, municipal solid waste incineration bottom ash (MSWI BA), Helsinki moraine, circular economy

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on laadittu yhteistyössä Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän (HSY) ja Tampereen yliopiston kanssa. Diplomityön vastuuohjaajana toimi yliopisto-opetta Minna Leppänen. Kiitos hänelle ja HSY:n Heikki Hämäläiselle tästä mielenkiintoisesta ja haastavasta tutkimusprojektista, jonka ansiosta pääsin perehtymään kaatopaikkarakenteisiin. Kiitos myös diplomityön toiselle tarkastajalle professori Pauli Kolisojalle.

Ohjaajien lisäksi työn tekemisessä apuna oli muitakin tahoja, joita tahdon kiittää. Kiitos Vahanan Environment Oy:n Joel Kuposelle ja Marko Sjölundille korvaamattomasta avusta työmaalla. Kiitosta ansaitsee myös koko Maa-, pohja- ja ratarakenteiden porukka ja etenkin Geolaboratorion henkilökunta. Kiitos avusta tutkimukseen liittyneiden laboratoriokokeiden tekemisessä. Paljon on muuttunut siitä, kun tulin laboratorioon ensimmäisen kerran kesätöihin seulomaan. Teidän kanssanne oli suuri ilo tehdä töitä usean vuoden ajan.

Suuri kiitos kuuluu myös opiskelukavereille, joiden kanssa vietin monet pitkät illat TTY:n tietokoneluokissa harkkatöiden parissa ja välillä myös opiskeluriennoissa. Ilman teitä tämä taival olisi ollut hyvin erilainen. Kiitos myös diplomityöhön tekemiseen saadusta vertaistuesta! Kiitos myös Salo-ystävilleni, jotka muistutitte, että koko elämä ei pyöri pelkästään opintojen ympärillä. Kiitos vanhemmilleni diplomityön ja koko opintojeni ajan saamastani tuesta. Kiitos, kun piditte jaksamisestani huolta koerakenteiden toteuttamisen ajan. Kiitos mummo, kun sain tulla luoksesi aina halutessani puutarhahommiin ja annoit muuta ajateltavaa. Suuri kiitos kuuluu myös poikaystävälleni. Astuit elämäni, kun osasin sitä vähiten odottaa. Diplomityön myötä yksi vaihe elämässäni päättyy ja uusi vaihe kanssasi alkaa. Danke Philipp, dass du immer für mich da bist.

Tampereella, 25.11.2019

Alina Reiman

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	KAATOPAIKAN PINTARAKENNE.....	3
2.1	Lainsäädäntö.....	3
2.2	Pintarakenteeseen kohdistuvat kuormitustekijät	6
2.2.1	Hydraulinen kuormitus	6
2.2.2	Fysikaalinen kuormitus	7
2.2.3	Kemiallinen kuormitus.....	10
2.2.4	Biologinen kuormitus.....	10
2.2.5	Ilmastollinen kuormitus	11
2.3	Rakennekerrosten vaatimukset.....	12
2.3.1	Esipeittokerros	12
2.3.2	Kaasunkeräyskerros	13
2.3.3	Pintarakenteen tiivistyskerros	14
2.3.4	Pintarakenteen keinotekoinen eriste.....	15
2.3.5	Pintarakenteen kuivatuskerros	16
2.3.6	Pintakerros	18
2.3.7	Kasvukerros	19
3.	PINTARAKENTEEN RAKENNEKERROKSISSA KÄYTETTÄVIÄ MATERIAALEJA	20
3.1	Bentoniitti.....	20
3.1.1	Ominaisuudet	20
3.1.2	Bentoniitin paisuminen	22
3.2	Bentoniittimatto.....	23
3.3	Polymeerimodifioitu bentoniitti	24
3.4	Jätteenpolton pohjakuona	25
3.5	Kuonabentoniittiseos	27
3.6	Bitumistabiloitu kuona	29
3.7	Helsinki-moreeni	29
3.8	Jätevedenpuhdistamon liete	30
4.	KAPILLAARISULKURAKENNE	31
4.1	Rakenne.....	31
4.2	Toimintaperiaate.....	32
4.3	Materiaalit ja kerrospaksuudet	34
4.4	Vedenjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä.....	35
4.5	Käyttökokemuksia.....	36
5.	TUTKIMUSKOHDE	39
5.1	Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus.....	39
5.2	Ympäristöluvan vaatimuksen pintarakenteelle	41
5.3	Tutkimushanke	43

6.	KOERAKENTEET	45
6.1	Tutkittavat koerakenteet.....	46
6.1.1	Bentoniittimatto ja salaojamatto	46
6.1.2	Kuonabentoniittiseos ja salaojamatto.....	47
6.1.3	Kapillaarisulkurakenne ohennetulla pintakerroksella.....	47
6.1.4	Väliaikainen peittorakenne moreenista.....	48
6.1.5	Pintarakenne bitumistabiloidusta kuonasta.....	48
6.2	Instrumentointi ja vesimäärien seuranta.....	49
6.3	Rakentamisen aikainen laadunvalvonta	56
6.3.1	Tarkemittaukset.....	56
6.3.2	Tiivistystarkkailu	57
6.3.3	Näytteenotto	61
6.3.4	Vesipitoisuus.....	61
6.3.5	Rakeisuus	62
6.3.6	Kiintotiheys	62
6.3.7	Hehkutushäviö	63
6.3.8	pH ja johtokyky.....	63
6.3.9	Paisuntakerroin.....	64
6.3.10	Vedenläpäisevyys.....	64
6.4	Vesinäytteenotto.....	65
7.	RAKENTAMINEN	66
7.1	Koerakenne A.1 bentoniittimatto ja salaojamatto	67
7.2	Koerakenne A.2 kuonabentoniittiseos ja salaojamatto	68
7.3	Koerakenne B.2 kapillaarisulkurakenne ohennetulla pintakerroksella	69
7.4	Koerakenne C.0 väliaikainen peittorakenne moreenista.....	70
7.5	Koerakenne U.1 pintarakenne bitumistabiloidusta kuonasta	70
8.	RAKENTAMISEN AIKAISEN LAADUNVALVONNAN TULOKSET	71
8.1	Tarkemittausten tulokset	71
8.2	Tiivistystarkkailun tulokset.....	72
8.3	Laboratoriotulokset	81
8.3.1	Vesipitoisuus.....	81
8.3.2	Rakeisuus	86
8.3.3	Kiintotiheys	88
8.3.4	Hehkutushäviö	90
8.3.5	pH ja johtokyky.....	94
8.3.6	Paisuntakerroin.....	96
8.3.7	Vedenläpäisevyys.....	97
9.	SEURANTATULOKSET	108
9.1	Instrumentoinnin ja mittakaivojen tulokset.....	108
9.1.1	Rakenteista purkautuva vesimäärä.....	108
9.1.2	Kumulatiivinen vesimäärä	113
9.1.3	Lämpötilamittaukset.....	122

9.1.4	Maankosteusmittaukset.....	130
9.1.5	Johtokyky mittaukset	137
9.2	Vedenlaatutulokset.....	144
9.2.1	Kaivojen instrumentointi.....	145
9.2.2	Vesinäytteenoton tulokset.....	153
9.2.3	Vedenlaatutulosten vertailu.....	165
10.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	170
	LÄHTEET.....	173

LIITE 1: Koerakenteen A.1 rakentaminen

LIITE 2: Koerakenteen A.2 rakentaminen

LIITE 3: Koerakenteen B.2 rakentaminen

LIITE 4: Koerakenteen C.0 rakentaminen

LIITE 5: Koerakenteen U.1 rakentaminen

LIITE 6: Vesinäytteenotto

LIITE 7: Materiaalien laboratoriokokeet

LYHENTEET, MERKINNÄT JA KÄSITTEET

fDOM	eng. fluorescent Dissolved Organic Matter, fluoresoivan liuennon orgaanisen aineen määrä
HSY	Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä
LLDPE	eng. Linear low-density polyethylene, lineaarinen matalatiheyksinen polyeteeni
L/S-suhde	uuttoliuoksen nesteen ja kiintoaineksen suhde (liquid/solid)
SYKE	Suomen ympäristökeskus
VNa	valtioneuvoston asetus
VNp	valtioneuvoston päätös
<i>e</i>	huokosluku
<i>k</i>	vedenläpäisevyyskerroin
<i>L</i>	kapillaarisulkurakenteen toimintapituus
<i>n</i>	huokoisuus
<i>q</i>	suotautuva vesimäärä
Q_{max}	kapillaarisulkurakenteen vedenpoistokapasiteetti
S_r	kyllästysaste
<i>w</i>	vesipitoisuus
ϕ	luiskan kaltevuus
laboratorionäyte	näyte, osanäyte tai osanäytteet, jotka lähetetään tai vastaanotetaan laboratorioon
testinäyte	laboratorionäytteestä valmistettu näyte, joka käytetään kokonaan yhteen testiin

1. JOHDANTO

Kaatopaikkojen pintarakenteisiin kuuluu huomattavat määrät maa-aineksia ja muita materiaaleja. Kiertotalousajattelun mukaista on hyödyntää kaatopaikoilla mahdollisimman paljon teknisesti soveltuvia ja ympäristökelpoisuuden täyttäviä jätemateriaaleja sulkemiskäytöksissä, jolloin jätettä päätyy vähemmän jätetäyttöön. Kaatopaikkoja ja niiden ympäristöä on seurattava ja tarkkailtava kaatopaikan käytön ja jälkihoitovaiheen aikana, mikä tekee kaatopaikoista hyviä jätemateriaalien käyttökohteita. Jättemateriaalien käyttö on myös teknistaloudellista, koska se vähentää neitseellisten maa-ainesvarojen kulutusta ja pienentää kaatopaikan sulkemiskustannuksia. Käyttökokemuksien saaminen luonnon maa-aineksista poikkeavista jätemateriaaleista edistää jätemateriaalien hyötykäyttöä.

Tutkimuksen tavoitteena on arvioida Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen alueelle toteutettavien jätemateriaaleja sisältävien väliaikaisten kaatopaikan pintarakenteiden toimintaa ja tehokkuutta instrumentoinnin ja eri kerroksista purkautuvien vesien määrien ja laadun seurannan perusteella. Tutkittavia jätemateriaaleja ovat Helsinki-moreeni, liete-kompostiseos sekä jätteenpolton kuona ja kuonasta valmistetut bentoniitti- ja bitumiseokset. Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa tietoa kaatopaikan pintarakenteen tehokkuuden ja käyttäytymisen arviointiin, löytää Ämmässuon kaatopaikalle resurssitehokas väliaikainen pintarakenne ja edistää jätteenpolton kuonan hyötykäyttöä kaatopaikalla. Tutkimuksessa arvioidaan koepintarakenteiden vedenläpäisevyyttä, vedenpidätyskykyä, rakennekerrosten läpi suotautuvan veden määrää ja laatua sekä rakenteen toimintaa ja kestävyyttä suomalaisissa olosuhteissa. Tutkimuksessa ei tarkastella pintarakenteen kaasunläpäisevyyttä, koska rakenteita ei rakennettu jätetäytön päälle.

Diplomityö koostuu kirjallisuusselvityksestä, koepintarakenteista, rakentamisen aikaisesta laadunvalvonnasta ja koepintarakenteiden seurantatuloksista. Kirjallisuusselvityksessä käsitellään kaatopaikan pintarakennetta koskeva lainsäädäntö, pintarakenteeseen kohdistuvat kuormitustekijät, rakennekerrosten vaatimukset, vaihtoehtoisia kaatopaikan pintarakenteen rakennekerroksissa käytettäviä materiaaleja sekä kapillaarisulkurakenteen toimintaperiaate. Lisäksi esitellään tutkimuskohteena oleva Ämmässuon kaatopaikka ja ympäristöluvan asettamat vaatimukset pintarakenteelle. Diplomityössä keskitytään viiden Ämmässuolle rakennetun koepintarakenteen rakentamisen dokumentointiin, rakentamisaikaiseen tiivistystarkasteluun ja materiaalinäytteiden laboratoriotuloksiin sekä rakenteiden toiminnan seurantaan seurantajakson aikana, joka alkoi rakenteiden valmistumisesta ja päättyi kesäkuun 2019 lopussa. Vesinäytteenoton osalta diplomityöhön on poimittu vain osa tuloksista.

Diplomityö liittyy Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymän (HSY) kehitystyöhön, jossa etsitään tehokkaita ja edullisia materiaaleja ja rakenneratkaisuja kaatopaikoille. Tarkoituksena on myös löytää soveltuvia käyttökohteita jätteenpolton kuonalle.

2. KAATOPAIKAN PINTARAKENNE

Kaatopaikan pintarakenteella tarkoitetaan ympäristönsuojusrakennetta, joka rakennetaan kaatopaikan jätetäytön päälle jätetäytön saavutettua lopullisen korkeutensa. Pintarakenteen tehtävä on estää sade- ja sulamisvesien suotautuminen alla olevaan jätetäyttöön, mikä vähentää likaantuneen suotoveden muodostumista ja haitta-aineiden leviämistä ympäristöön. Pintarakenne vähentää myös kaatopaikkakaasujen purkautumista ilmakehään ja tehostaa näin kaatopaikkakaasun talteenottoa ja hyödyntämistä. Lisäksi pintarakenne vähentää kaatopaikkojen haju-, pöly-, tuholaiseläin- ja maisemahaittoja. Pintarakenne myös mahdollistaa kaatopaikka-alueen jälkikäytön. (Suomen ympäristökeskus 1998; Ympäristöministeriö 2008)

2.1 Lainsäädäntö

Suomessa kaatopaikkoja koskevien säädösten valmistelu alkoi 1990-luvun alkupuolella. Taustalla oli Euroopan unionin valmisteleva kaatopaikkadirektiivi, joka astui voimaan vuonna 1999, ja kaatopaikkoihin liittyvän tietoisuuden kasvu. Ennen 1990-lukua kaatopaikkoja koskeva lainsäädäntö oli sirpaloitunutta ja puutteellista. Uuden jätelain (1072/1993) tultua voimaan 1994 tammikuussa kaatopaikoilta vaadittiin ympäristölupa. *Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (VNp 861/1997)* astui voimaan lokakuussa 1997. Kaatopaikan toiminta koko elinkaarensa ajan kuuluu päätöksen soveltamisalaan. (Ympäristöministeriö 2008, s. 15) *Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (VNa 331/2013)* vuodelta 2013 kumosi säädöksen 861/1997. Tätä asetusta on tämän jälkeen muutettu kahdesti (VNa 103/2015; VNa 960/2016), mutta kaatopaikan pinta- ja pohjarakenteita koskevien määräysten sisältö ei ole juurikaan muuttunut.

Merkittävin muutos on vuonna 2016 siirtymäajan päätyttyä voimaan astunut orgaanisen jätteen kaatopaikkakielto (28 §). Tämän jälkeen tavanomaiselle kaatopaikalle ei ole hyväksytty tavanomaista jätettä, jonka biohajoavan tai orgaanisen aineksen määrä on yli 10 %:a orgaanisen hiilen kokonaismäärän tai hehikutushäviön perusteella, minkä vuoksi sekajäte nykyään poltetaan ja hyödynnetään energiana. Muutos koskee myös biohajoavan ja muun orgaanisen jätteen hyödyntämistä pinnan tiivistyskerroksen alapuolisissa kaatopaikkarakenteissa. Kaatopaikkakielto ei kuitenkaan koske tietyin ehdoin energiantuotannosta tai jätteenpolttamisesta syntyviä lento- tai pohjatuhkia sekä pilaantunutta maa-ainesjätettä. Rakennus- ja purkujätteiden osalta biohajoavan tai orgaanisen aineksen enimmäismäärä on 15 %:a vuoden 2019 loppuun saakka, jonka jälkeen vaatimus kiristyy 10 %:iin. (VNa 331/2013)

Kaatopaikat luokitellaan *valtioneuvoksen asetuksen 331/2013* perusteella kolmeen luokkaan niihin sijoitettavan jätteen laadun perusteella. Luokat ovat pysyvän, tavanomaisen

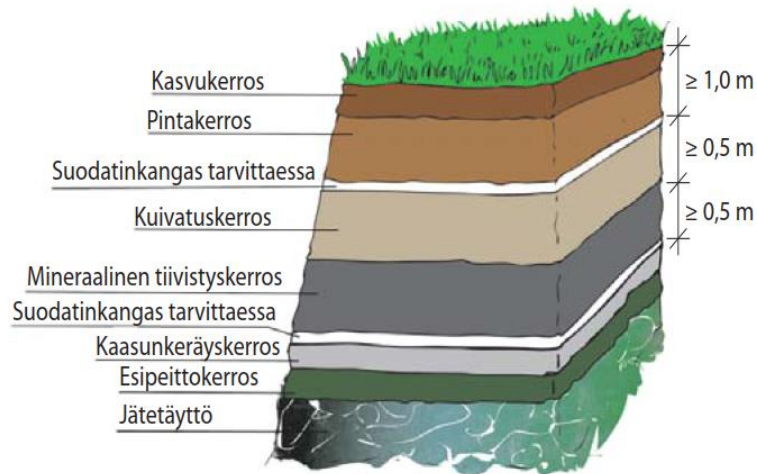
ja vaarallisen jätteen kaatopaikka. Lainsäädännön mukaan pysyvä jäte on jätettä, ”joka ei liukene, pala tai reagoi muutoin fysikaalisesti tai kemiallisesti eikä hajoa biologisesti tai reagoi muiden aineiden kanssa aiheuttaen vaaraa terveydelle tai ympäristölle”. Pysyvä jäte on nimensä mukaan pysyvää eli pitkän ajan kuluessa siinä ei tapahdu olennaisia muutoksia kemiallisesti, fysikaalisesti tai biologisesti. Pysyvän jätteen sisältämien haitallisten aineiden kokonaispitoisuudet ja –liukoisuudet ovat merkityksettömiä. Tavanomainen jäte on jätettä, joka ei ole vaarallista eikä pysyvää jätettä. (VNa 331/2013 2013) Vaarallisella jätteellä on jokin vaaraominaisuus eli se on palo-, räjähdys- tai tartuntavaarallista, muuten terveydelle tai ympäristölle vaarallista tai sillä on joku vastaava ominaisuus (Jätelaki 2011).

Kaatopaikkakelpoisuuden arvioinnissa käytetään kokonaispitoisuuksia ja liukoisuusominaisuuksia. Liukoisuusominaisuuksien todentamiseen käytetään joka läpivirtaustestiä tai kaksivaiheista ravistelutestiä. (VNa 331/2013 2013) Kaatopaikkaluokituksen mukaiset raja-arvot liukoisuudelle on esitetty taulukossa 1. L/S-suhde kuvaa uuttoliuoksen nesteen ja kiintoaineksen suhdetta (liquid/solid).

Taulukko 1. Kaatopaikkaluokituksen mukaiset raja-arvot niihin sijoitettavan jätteen haitta-aineiden liukoisuuden mukaan. Raja-arvot annettu yksikössä mg/kg kuiva-ainetta L/S suhteessa 10 l/kg. (VNa 331/2013 2013)

Haitta-aine	Liukoisuuden raja-arvo (mg/kg kuiva-ainetta L/S 10l/kg)		
	Pysyvän jätteen kaatopaikka	Tavanomaisen jätteen kaatopaikka	Vaarallisen jätteen kaatopaikka
Antimoni (Sb)	0,06	0,7	5
Arseeni (As)	0,5	2	25
Barium (Ba)	20	100	300
Elohopea (Hg)	0,01	0,2	2
Kadmium (Cd)	0,04	1	5
Kromi (yht.) (Cr _{kok})	0,5	10	70
Kupari (Cu)	2	50	100
Lyijy (Pb)	0,5	10	50
Molybdeeni (Mo)	0,5	10	30
Nikkeli (Ni)	0,4	10	40
Seleeni (Se)	0,1	0,5	7
Sinkki (Zn)	4	50	200
Fluoridi (F ⁻)	10	150	500
Kloridi (Cl ⁻)	800	15 000	25 000
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	1 000 ¹⁾	20 000	50 000
Liuennot orgaaninen hiili (DOC)	500 ²⁾	800 ²⁾	1 000
Liuenneiden aineiden kokonaismäärä (TDS)	4 000 ³⁾	60 000 ³⁾	100 000

¹⁾ Jätteen katsotaan täyttävän sulfaattipitoisuuden kelpoisuusvaatimuksen myös, jos pitoisuus ei ylitä seuraavia arvoja: 1 500 mg/l (läpivirtaustestin ensimmäinen uutosto, uuttosuhte L/S = 0,1 l/kg) ja 6 000 mg/kg



Kuva 1. Kaatopaikan pintarakenteen periaatekuva (Infra 15-710194 2018).

2.2 Pintarakenteeseen kohdistuvat kuormitustekijät

Kaatopaikkarakenteilta vaaditaan lähes ikuista tai vähintään useiden satojen vuosien toimivuutta kaatopaikan luokasta riippuen. Tänä aikana kaatopaikan pintarakenteeseen kohdistuu erilaisia kuormitustekijöitä, jotka pitää ottaa suunnittelussa huomioon. Rakenteen pitkäaikaiskestävyyteen eivät vaikuta pelkästään käytetyt materiaalit, vaan myös valitut suunnitteluratkaisut sekä alueen jälkikäyttö. (Ympäristöministeriö 2008)

2.2.1 Hydraulinen kuormitus

Kaatopaikan pintarakenteeseen tulevien, lähtevien ja varastoituvien vesimäärien suhdetta kuvataan vesitaseella. Yksinkertaisimmillaan kaatopaikan pintarakenteen vesitase voidaan ilmaista kaavan 1 tavoin seuraavasti (Blight et al. 1992, s. 36):

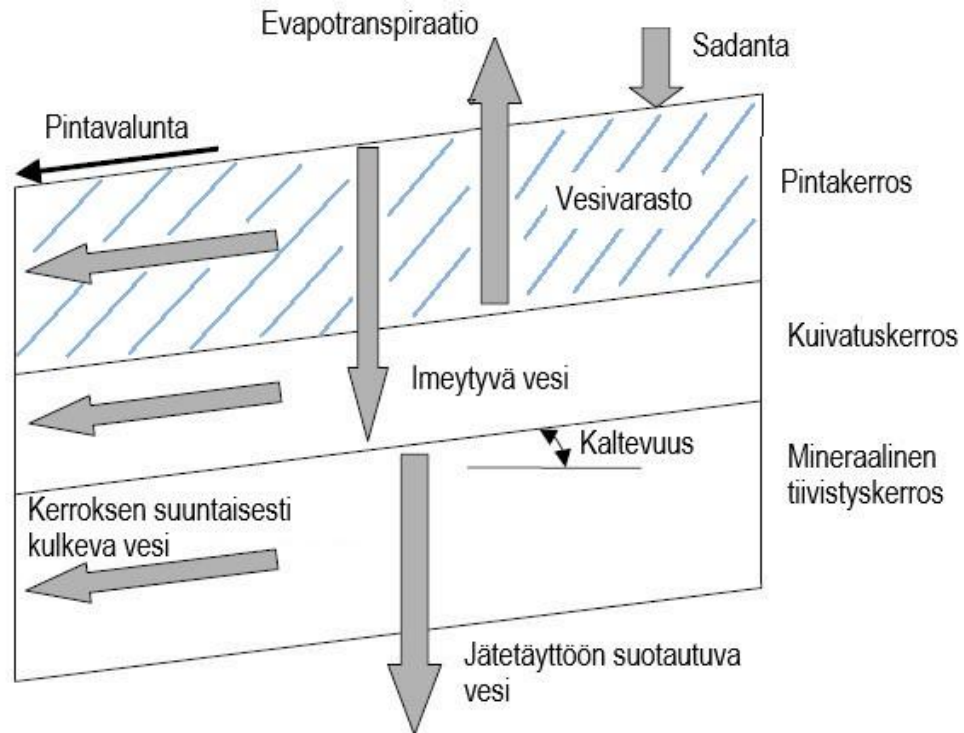
$$\text{sisään menevä vesi} = \text{ulostuleva vesi} + \text{vesivaraston muutos} \quad (1)$$

Pintarakenteen sisään menevä vesi sisältää sadannan (P). Sadanta sisältää sadannan ja sulamisvedet. Ulostuleva vesi sisältää evapotranspiraation (ET), kaatopaikkakaasujen vesihöyryn (G), jätetäyttöön suotautuvan vesimäärän (L) ja pintavalunnan (R). Vesivaraston muutos (ΔU_s) sisältää pintarakenteeseen varastoituneen vesimäärän. Kaatopaikan pintarakenteen vesitase voidaan esittää kaavan 2 tavoin (Blight et al. 1992):

$$P = ET + G + L + R + \Delta U_s. \quad (2)$$

Kaatopaikkakaasujen vesihöyryn määrää voidaan pitää häviävän pienenä muihin vesitaseeseen tekijöihin verrattuna. Suunnittelulla voidaan vaikuttaa lähinnä pintavaluntaan ja suotautumiseen. Evapotranspiraation määrään voidaan vaikuttaa kasvillisuuden avulla. (Blight et al. 1992) Veden kulkeutumista kaatopaikan pintarakenteessa on havainnollis-

tettu kuvassa 2. Pintarakenteessa kaikki rakenteen sisään pääsevä vesi ei kulkeudu suoraan alaspäin. Vesi voi rakenteen kerroksien ominaisuuksista riippuen kulkea myös kerroksien suuntaisesti. Vesi, joka ei purkaudu pintarakenteen rakennekerroksista, ei jää varastoon tai poistu evapotranspiraation myötä, pääty lopulta jätetäyttöön.



Kuva 2. Veden kulkeutuminen kaatopaikan pintarakenteessa (muokattu lähteestä Keelson 2015).

Rakenteessa oleva vesi kuormittaa rakennetta etenkin jäätyessään tai virtauksen aiheuttamassa eroosiossa. Veden aiheuttamaa kuormitusta on selitetty enemmän kohdassa 2.2.5 Ilmastollinen kuormitus.

2.2.2 Fysikaalinen kuormitus

Kaatopaikan pintarakenteisiin kohdistuu pitkä- ja lyhytaikaista fysikaalista rasitusta, jotka aiheuttavat pintaa vastaan kohtisuoria jännityksiä ja vetojännityksiä. Jännitykset aiheuttavat painumia ja stabiliteettiongelmia. Pintaa vastaan kohtisuoria jännityksiä aiheuttaa pintarakenteisiin kohdistuva staattinen kuorma kuten rakenteista aiheutuva paino, laitteiden paino sekä liikennekuormat. Kaatopaikkakaasun paine sekä jätepenkereen epätaaiset painumat sekä paikalliset sortumat aiheuttavat moniulotteisia vetojännityksiä. (Suomen ympäristökeskus 1998, s. 91)

Jätetäyttö painuu vaihtelevasti. Painumisen nopeuteen, tasaisuuteen, keston ja määrään vaikuttavat muun muassa jätteen laatu ja jätetäytön tiivistys. Orgaanisen jätteen hajoamisen seurauksena jätetäyttö kokoonpuristuu, mikä aiheuttaa siirtymiä ja jännityksiä jäte-

täytön yläpuolisiin rakenteisiin. Etenkin epätasaiset painumat ovat haitallisia pintarakenteen toiminnan kannalta, koska tiivistyskerros voi epätasaisten painumien vuoksi vaurioitua. Rakenteiden ja käytettyjen materiaalien muodonmuutoskykyyn tulee kiinnittää erityistä huomiota. (Ympäristöministeriö 2008)

Jätteen epähomogeenisuus vaikuttaa merkittävästi painumien epätasaisuuteen, koska erilaiset jätejakeet hajoavat ja täten painuvat eri tavalla. Jos sekajätetäytön sisältämä jäte saadaan hajoamaan bioreaktorin tavoin tehokkaasti, suurin osa kaatopaikan painumista tapahtuu noin 10 vuodessa. Lopulliset pintarakenteet kannattaa rakentaa vasta mahdollisimman myöhäisessä vaiheessa, jotta ne eivät vahingoitu painumien seurauksena. (Ympäristöministeriö 2008)

Pintarakenteeseen kohdistuva fyysikaalinen kuormitus vaikuttaa stabiliteettiin (Ympäristöministeriö 2008). Kaatopaikan vakavuus on riippuvainen etenkin kaatopaikan pohjamaan ja jätepenkereen lujuusominaisuuksista sekä pohjamaan ja jätteiden muodonmuutoksista (Suomen ympäristökeskus 2001a). Stabiliteetti voidaan jakaa kolmeen osaan: kokonaistabiliteettiin, sisäiseen stabiliteettiin ja luiskastabiliteettiin. (Ympäristöministeriö 2008)

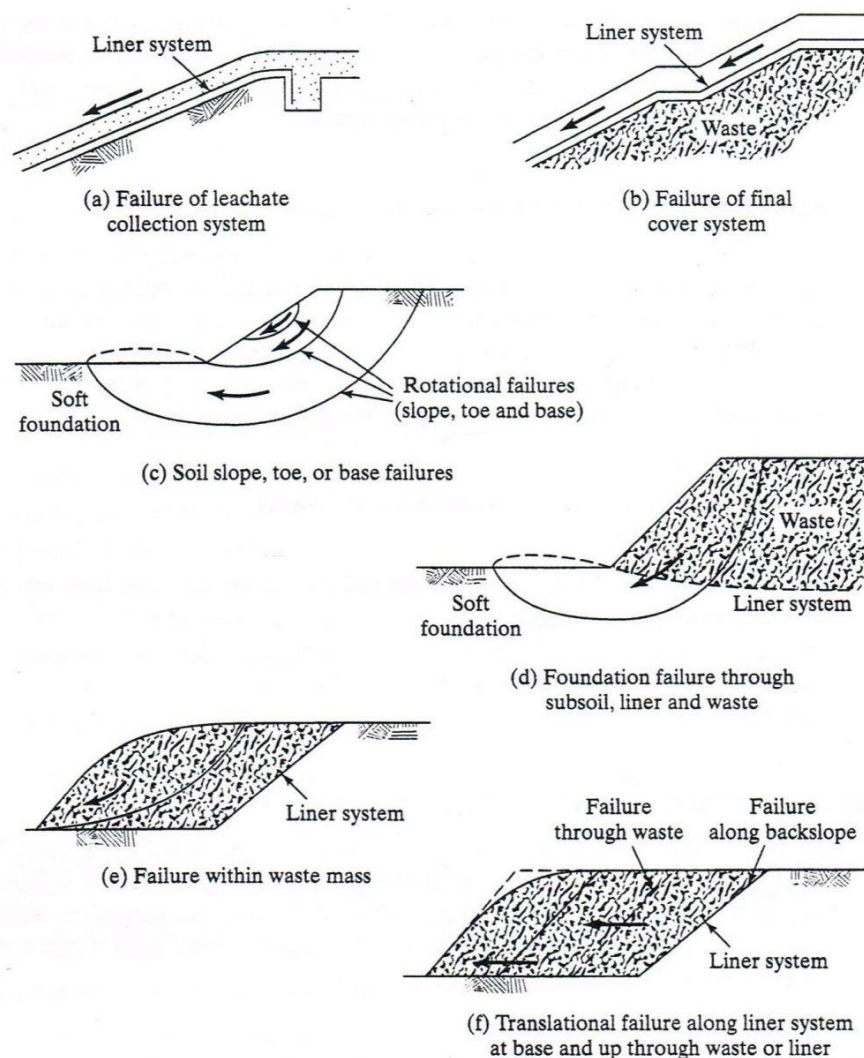
Kaatopaikan pintarakenteen kannalta oleellisin on luiskastabiliteetti, joka tulee tarkistaa erikseen (Ympäristöministeriö 2008). Kaatopaikan pintarakenteen kannalta vaarallisin liukupinta sijaitsee usein geosynteettisten tuotteiden tai geosynteettisen tuotteen ja mineraalisen rakennekerroksen välissä (Ympäristöministeriö 2008, InfraRYL 2018). Jotta luiskastabiliteetti on riittävä, on käytettävien materiaalien välillä oltava tarvittava kitkakerroin. Kitkavoiman on oltava riittävällä varmuudella suurempi kuin leikkausvoiman, joka vaikuttaa pinnan suuntaisesti. Käytettäessä geomembraaneja on kalvon yläpuolisen kitkavoiman oltava alhaisempi kuin alapuolisen, jottei geomembraaniin synny vetojännityksiä. (Suomen ympäristökeskus 1998, s. 94)

Kokonaistabiliteetti käsittää kaatopaikan kokonaisvakavuuden eli kaatopaikan perustan ja pohjarakenteiden vakavuuden, jätetäytön vakavuuden ja pintarakenteiden vakavuuden. Kokonaisvakavuustarkastelulla varmistetaan, että rakenteen kuormat eivät aiheuta alueellista stabiliteetin menetystä ja ympäristössä olevien rakenteiden vaurioitumista. Sisäinen vakavuus käsittää koko rakenteen koossapysymisen. (Suomen ympäristökeskus 1998, s. 62)

Stabiliteettitarkastelut tehdään yleensä liukupinta-analyysillä. Maan murtumisen tapahtuu liukupintaa pitkin, jonka muoto riippuu rakenteesta ja materiaaleista. Liukupinnan yläpuolinen maamassa liikkuu murrossa. Usein liukupinta oletetaan ympyränmuotoiseksi, mutta myös muunlaiset liukupinnat on tarkasteltava. Liukupinnan muotoon vaikuttavat kerrosrajat, maan lujuusominaisuudet, heikkousvyöhykkeet sekä maassa ole-
massa olevat rakenteet. Sekä lyhytaikainen että pitkäaikainen stabiliteetti on tarkastel-

tava, koska stabiliteetti muuttuu ajan myötä. Työnaikainen vakavuus voidaan koheesio-
maalajeilla arvioida suljetun tilan menetelmällä (maakerrosten suljettu leikkauslujuus) ja
pitkän ajan vakavuus tehokkaiden jännitysten avulla. (Ympäristöministeriö 2008)

Erilaisia kaatopaikan sortumia on esitetty kuvassa 3. Tapauksissa a ja b on kyse niin sa-
notusta "vener" stabiliteetista, jossa geosynteetin ja mineraalisen rakennekerroksen vä-
liin syntyy liukupinta, jonka vuoksi mineraalinen rakennekerros liukuu geosynteettiä pit-
kin kohti luiskan alaosaan. Tapauksissa c, d ja e on ympyräliukupinta, joka sijaitsee ta-
pauksesta riippuen joko vain osassa luiskaa tai koko luiskan matkalla tai vain jätetäytössä.
Liukupinta ei aina rajoitu jätetäyttöön, jolloin liukupinta kulkee myös pohjamaan kautta.
Liukupinta voi kulkea myös pohjarakenteessa olevan geosynteetin läpi (tapaus d). (Qian
et al. 2002)



Kuva 3. Erilaisia kaatopaikan sortumia (Qian et al. 2002).

Kaatopaikan mahdollinen jälkikäyttö kuormittaa kaatopaikkarakenteita, minkä vuoksi kaatopaikan jälkikäyttö kannattaa ottaa huomioon pintarakenteita suunniteltaessa. Rakennuksia tai laitoksia ei käytöstä poistetuille kaatopaikoille tule rakentaa, koska kunnostettuihin kaatopaikkoihin liittyy tunnistamattomia haittatekijöitä. (Ympäristöministeriö 2008)

Käytöstä poistettua kaatopaikkaa voi hyödyntää muun muassa ulkoliikuntaan ja virkistyskäyttöön (Ympäristöministeriö 2008). Kuormitusta aiheutuu täten muun muassa liikenteestä, rakennelmista, hoidosta ja huollosta, kuten kastelusta ja lannoittamisesta. Kaatopaikan jälkikäyttö ei saa vaarantaa rakenteiden toimintaa (Ympäristöministeriö 2008).

2.2.3 Kemiallinen kuormitus

Pintarakenteeseen aiheutuva kemiallinen kuormitus on tyypillisesti vähäisempi kuin pohjarakenteeseen kohdistuva kemiallinen kuormitus, mutta pintarakenteeseen voi aiheutua kemiallista kuormitusta rakennusmateriaaleista ja kaatopaikkakaasuista. Etenkin, jos rakenteessa käytetään teollisuuden sivutuotteita tai pilaantuneita maita, tulee materiaalien kemiallinen yhteensopivuus varmistaa, koska kaatopaikan pintarakenteen vedet sisältävät materiaaleista veden liuottamia haitta-aineita. Esimerkiksi veteen liukenevat kationit voivat estää bentoniitin paisumisen tai aiheuttaa saostumia. (Ympäristöministeriö 2008)

Kun jäte hajoaa biologisesti hapottomissa olosuhteissa, syntyy kaatopaikkakaasua (Ympäristöministeriö 2008). Kaatopaikkakaasun muodostumiseen vaikuttavat jätteen koostumus, jätteen ja jätepenkereen rakenne, kosteus ja lämpötila (Suomen ympäristökeskus 2001a, s. 88). Kaatopaikkakaasun pääkomponentit ovat metaani, jota on noin 55–65 %:a, ja hiilidioksidi, jota on noin 35–45 %:a. Molemmat aineet ovat värittömiä ja hajuttomia. Lisäksi kaatopaikkakaasu sisältää vesihöyryä ja pieniä pitoisuuksia kloori- ja fluorihilivetyjä sekä rikkiyhdisteitä. Rikkiyhdisteet aiheuttavat kaatopaikkakaasulle tyypillisen hajuun. (Ympäristöministeriö 2008)

Kaatopaikkakaasut sisältävät aggressiivisia kaasukomponentteja, jotka voivat aiheuttaa materiaalin karstaantumista (Ympäristöministeriö 2008). Purkautuva metaani aiheuttaa myös kasvillisuusvaurioita (Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä 2018b). Kaasun korkea lämpötila voi myös kuivattaa rakennekerroksia aiheuttaen esimerkiksi halkeilua (Infra 15-710194 2018). Kaasut aiheuttavat myös palo- ja räjähdysvaaraa.

2.2.4 Biologinen kuormitus

Kasvien juuret voivat vahingoittaa lähellä maanpintaa olevia kaatopaikkarakenteita. Kasvien juuret aiheuttavat tunkeutuessaan halkeilua pintarakenteeseen ja maatuessaan juuresta jää jäljelle juuren kokoinen tyhjä tila, jossa vesi pääsee helposti liikkumaan. Tämän vuoksi tiivistysrakenteet tulee suojata suojakankailla tai riittävän paksuilla tai niukkara-

vinteisillä rakennekerroksilla. Kaatopaikalla voidaan myös suosia lyhytjuurisia kasvilajeja ja kitkeä pois lajeja, joiden juuret ylettyvät liian syvälle, minkä vuoksi jätetäyttöalueilla ei kasva puita. (Suomen ympäristökeskus 1998)

Biologista rasiutusta kaatopaikan pintarakenteelle voivat aiheuttaa myös erilaiset mikrobit ja eläimet. Etenkin linnut ja jyrsijät aiheuttavat vaurioita tunkeutuessaan rakenteisiin. Vaurioita voidaan estää suojaavilla maakerroksilla. (Suomen ympäristökeskus 1998) Mikrobeista muodostuvat biofilmit voivat tukkia suodatinkankaita ja rakennekerroksia, mikä vaikuttaa hydrauliseen johtavuuteen.

2.2.5 Ilmastollinen kuormitus

Maan huokosissa oleva vesi jääty, kun maan lämpötila laskee alle 0 °C:seen eli maa rouhtaantuu. Kun huokosvesi jäätyy, routivan maan tilavuus kasvaa eli maa routii, jonka seurauksena maanpinta ja jäätyneen maan varaan perustetut rakenteet nousevat eli tapahtuu routanousua. Routimista tapahtuu, jos materiaali on routivaa, jäätymisrintamassa on tai siihen pääsee kulkeutumaan vettä ja rakenteen lämpötila laskee alle 0 °C:een. Jos routanousu on epätasaista, kaatopaikkarakenteisiin voi aiheutua routanousun seurauksena vaurioita. (RIL 261-2013 2013)

Pakkaskauden päättyessä keväällä maanpinnan lämpötila nousee jäätympisteeseen yläpuolelle ilman lämpötilan ja auringonsäteilyn vaikutuksesta. Tällöin rakenne alkaa sulaa ja routimisen nostama rakenne alkaa painua takaisin alkuperäiselle tasolleen. Samalla rakennemateriaaliin kertynyt vesi vapautuu ja vesi jää sulaneen rakenteen huokostilaan, jolloin vesipitoisuus kasvaa. Tässä yhteydessä mahdollisesti syntyvä huokosveden ylipaine alentaa maankaltaisen materiaalien tehokasta jännitystä, jolloin rakenteen lujuus alenee ja se voi menettää kantavuutensa kuorman alla. Huokosveden purkauessa lujuus palautuu normaaliksi vähitellen ja maanpinta laskee jäätymistä edeltäneelle tasolla. (RIL 261-2013 2013)

Rakenteissa, joissa käytetään luonnonmaata tai luonnonmaa-ainesten kaltaisia materiaaleja, jäätyminen aiheuttaa tehokkaan huokostilan kasvua, joka lisää vedenjohtavuutta. Samalla jäätyminen aiheuttaa paikallista kuivumista ja halkeilua, mikä lisää myös vedenjohtavuutta (Ympäristöministeriö 2008). Tiivistyskerroksen toimivuuden kannalta routimisen aiheuttamat vauriot voivat olla merkittäviä, koska jäätymis-sulamissyklit voivat kasvattaa rakenteen vedenläpäisevyyttä moninkertaisesti (Suomen ympäristökeskus 1998).

Lämpötilan noustessa tiivistyskerroksessa käytetty mineraalinen materiaali voi kuivua, joka voi aiheuttaa materiaalin halkeilua. Tiivistyskerroksen halkeilu voi kasvattaa vedenläpäisevyyden helposti 100–1000-kertaiseksi (Ympäristöministeriö 2008). Rakenteen

kastuessa tiivistyskerros ei välttämättä korjaudu itsestään. Rakenteen liiallinen kastuminen myös vähentää rakenteen lujuutta, joten kuivumis-kastumissyklit heikentävät rakenteen toimivuutta.

Tuuli ja sade voivat aiheuttaa eroosiota. Vesieroosiota voidaan estää käyttämällä loivempia luiskia, rakenteellisia suojakerroksia ja kasvillisuutta, joka sitoo maa-ainesta ja vähentää pintavaluntaa. (Suomen ympäristökeskus 1998) Veden virtaus rakenteen halkeamissa ja makrohuokosissa voi aiheuttaa sisäistä eroosiota, jossa virtaava vesi huuhtoo materiaalista hienoainesta. Tällöin jäljelle jää karkea hyvin vettä johtava aines. (Ympäristöministeriö 2008)

Jos pintarakenteissa käytetään kalvoa, voi auringon ultraviolettisäteily aiheuttaa ennenaikaista kalvon vanhenemista. Haittojen minimoimiseksi kalvot kannattaa mahdollisimman pian peittää tai valita kalvo, johon on lisätty hiilimustaa tai muuta ultraviolettisäteilynkestävyyttä parantavaa ainetta. Säteilyltä suojaaminen vähentää myös kalvojen lämpölaajenemista ja jännityssäröilyä. Liiallinen auringonpaiste voi rakentamisen aikana aiheuttaa myös mineraalisen tiivistyskerroksen kuivumista, joka voi aiheuttaa rakenteen halkeilua ja murentumista, mikä vaikuttaa rakenteen vedenläpäisevyyteen sekä vaikeuttaa rakenteen päälle rakentamista. (Suomen ympäristökeskus 1998)

2.3 Rakennekerrosten vaatimukset

Pintarakenteen kerroksilla on pintarakenteen toiminnan kannalta erilaisia tehtäviä, joten kerroksille on erilaisia vaatimuksia. Vaatimukset riippuvat siitä, mitä pintarakenteella tavoitellaan. Jälkikäyttö asettaa myös omat vaatimuksensa.

2.3.1 Esipeittokerros

Jätetäytön päälle rakennetaan usein esipeittokerros, joka toimii väliaikaisena peittona ja jonka tehtävä on estää tuhoeläinten ja lintujen pääseminen jätetäyttöön, peittää jäte näkyvistä, estää jätteen sekoittuminen muihin rakennekerroksiin, vähentää tuulen vaikutusta sekä edistää jätetäytön kokoonpuristuvuutta ja parantaa kantavuutta. Esipeittokerroksella muotoillaan kaatopaikan lopullinen pinta, jotta pinnan kaltevuus on riittävä. (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018) Pinnan ohjeellinen kaltevuus on vähintään 1:20 (noin 3°) pintavesien johtamisen ja mahdollisten painumien vuoksi ja maksimissaan 1:3 (noin 18°), jotta rakenteet on mahdollista rakentaa ja luiskan stabiliteetti ja eroosiokestävyys on riittävä (Infra 15-710194 2018).

Esipeittomateriaalin tulee olla helposti työstettävää (InfraRYL 2018). Materiaaliksi kelpaavat kaatopaikkakelpoisuuden täyttävät materiaalit, kuten pilaantuneet maat tai soveltuvat jättejakeet. Tärkeää on ottaa huomioon päälle tulevien kerrosten asettamat vaatimukset ja rajoitteet. Valitun materiaalin aiheuttamat vaikutukset kaatopaikkaprosesseihin ja suotoveden laatuun tulee myös ottaa huomioon. Huonosti vettä- ja kaasuja johtavia tai

liettyviä materiaaleja ei kannata käyttää. (Infra 15-710194 2018) Suositeltu vähimmäis-kerrospaksuus on 0,3 m:ä (Ympäristöministeriö 2008; InfraRYL 2018). Kerros tiivistetään maksimissaan 0,5 m:n paksuisissa kerroksissa (InfraRYL 2018).

2.3.2 Kaasunkeräyskerros

Kaasunkeräyskerros kokoo kaatopaikkakaasut ja toimii kantavana rakennusalustana päälle rakennettavalle tiivistyskerrokselle. Materiaalin tulee olla hyvin kaasuja johtavaa. (Infra 15-710194 2018) Kaasunjohtavuus arvioidaan vedenläpäisevyyden ja huokoisuuden perusteella tai mitataan (InfraRYL 2018). Kaasunjohtavuuden kannalta oleellista on materiaalin huokoisuus, joten parhaiten soveltuvia materiaaleja ovat karkeat materiaalit, jotka toimivat samalla kantavana kerroksena (Infra 15-710194 2018). Hienoainesta ($< 0,063$ mm:n osuus) tulee olla alle 10 %:a ja rakennekerroksen huokoisuuden $n < 20$ %:a (InfraRYL 2018).

Materiaalina voidaan käyttää kiviainesta tai teknisesti soveltuvaa ja kaatopaikan luokituksen mukaisen kaatopaikkakelpoisuuden täyttävää jättemateriaalia. Jättemateriaalin kemiallinen yhteensopivuus muiden rakennekerrosmateriaalien kanssa ja kaasunjohtavuusominaisuuksien säilyminen tulee arvioida jättemateriaalien käytön yhteydessä. Lisäksi vapautuvien haitta-aineiden vaikutus kaatopaikkaprosesseihin ja suotoveden laatuun tulee ottaa huomioon. (InfraRYL 2018) Rakentamisen kannalta suositeltu vähimmäisrakennepaksuus on 300 mm:ä (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018), jolloin maksimiraekoko on puolet kerroksen paksuudesta eli 150 mm:ä (Infra 15-710194 2018). Mineraalinen kaasunkeräyskerrosmateriaali levitetään yhtenä kerroksena ja mahdollisimman suuren huokoisuuden säilymiseksi sitä ei tiivistetä paitsi, jos se on kantavuuden tai yläpuolisten kerrosten tiivistämisen kannalta tarpeen (InfraRYL 2018).

Kaasunkeräyskerroksena voidaan käyttää soveltuvissa kohteissa myös salaojamattoa (Infra 15-710194 2018; InfraRYL 2018). Salaojamatosta tulee varmistaa riittävä pitkäaikaiskestävyys, kaasunjohtavuuden säilyminen kuormitettuna, kemiallinen ja biologinen kestävyys sekä yhdensopivuus muiden materiaalien ja kaatopaikkakaasujen kanssa. Salaojamaton käyttö ei saa aiheuttaa liukupintaa, joista vaarallisin sijaitsee usein geosyntetistien tuotteiden välissä, kuten bentoniittimaton ja salaojamaton välissä. Jyrkissä luisissa on tehtävä erikseen stabiliteettitarkastelut. (InfraRYL 2018)

Erillistä kaasunkeräyskerrosta ei tarvita, jos esipeittokerros on rakennettu kaasunkeräyskerrokseen soveltuvasta materiaalista. Jos kaatopaikkakaasua ei muodostu, ei kaasunkeräyskerrosta luonnollisesti tarvita. Kaasut voidaan kerätä erillisen kerroksen sijaan kaasuoastolla tai kaasukaivoilla, jos kaasun muodostuminen jätetäytöstä on vähäistä. (Infra 15-710194 2018) Jos kaasunmuodostumista halutaan tehostaa, voidaan jätetäyttöä kas- tella kaasunkeräilykerroksen yhteyteen tai sen alapuolelle rakennetulla kosteuden jakokerroksella. Kerroksen tai erillisen syöttöputken kautta jätetäyttöön voidaan imeyttää esimerkiksi kaatopaikan suotovesiä. (Ympäristöministeriö 2008)

2.3.3 Pintarakenteen tiivistyskerros

Tavanomaisen ja vaarallisen jätteen kaatopaikoilla tulee olla VNa 331/2013 mukaisesti vähintään 0,5 m:n paksuinen pintarakenteen tiivistyskerros. Pintarakenteen tiivistyskerros estää kaasujen purkautumista ja vähentää sade- ja sulamisvesien suotautumista jätetäyttöön (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018; InfraRYL 2018). Kaatopaikan pintarakenteen toiminnan kannalta tiivistyskerros on hyvin oleellinen, joten sen suunnitteluun ja rakentamiseen pitää kiinnittää erityistä huomiota (Ympäristöministeriö 2008). Ohjeellinen vedenläpäisevyyden vaatimus tiivistyskerrokselle on $k \leq 10^{-9}$ m/s. Vesitaseen perusteella lasketaan läpäisevä vesimäärä ottaen huomioon pintavalunta, haihdunta, pintakerroksen varastointikyky ja kuivatuskerroksen tehokkuus. (Infra 15-710194 2018)

Tiivistyskerros voidaan rakentaa esimerkiksi savesta, maabentoniitista, bentoniittimattosta tai soveltuvasta teollisuuden sivutuotteesta. (Ympäristöministeriö 2008) Mineraalinen tiivistyskerros tiivistetään vähintään kahdessa kerroksessa kokonaispaksuuden ollessa yli 0,5 m:ä. Mineraalisesta tiivistyskerroksesta tehdään koerakenne, jolla varmistetaan materiaalin tiivistyminen työmaaolosuhteissa käytettävällä kalustolla. (InfraRYL 2018)

Tiivistyskerrosmateriaalin ominaisuudet eivät saa merkittävästi heikentyä kuivumis-kastumis- tai jäätymis-sulamissykliä, jätetäytön epätasaisien painumien tai kemiallisen kuormituksen takia (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018). Jätetäytön epätasaiset painumat voivat aiheuttaa tiivistyskerrokseen paikallisia muodonmuutoksia ja halkeamia. Tiivistyskerroksen päällä olevat pinta- ja kuivatuskerros suojaavat rakennetta kuivumiselta ja jäätymiseltä sekä kasvuston juurilta. Myös jätetäytön ja kaasun korkea lämpötila voivat kuivattaa tiivistyskerrosta. (Infra 15-710194 2018) Tiivistyskerroksen halkeilu voi kasvattaa vedenläpäisevyyden helposti 100–1000-kertaiseksi ja samalla aiheuttaa hallitsematonta kaasunpurkautumista (Ympäristöministeriö 2008).

Yleensä pintarakenteen tiivistyskerrokseen kohdistuva kemiallinen rasitus on vähäinen, joten bentoniittimatto voi yksinään toimia tehokkaana tiivistyskerroksena, vaikkei se täytä VNa:n paksuusvaatimusta. Bentoniittimatto on suojattava tarpeeksi paksuilla yläpuolisilla kerroksilla, jotta se on suojassa juurilta sekä kuivumis-kastumis- ja jäätymis-sulamissykliä vaikutuksilta. Bentoniitin kemiallista rapautumista kiihdyttävät esimerkiksi kloridi, kalsium ja magnesium, korkea suolapitoisuus sekä alhainen tai korkea pH. Bentoniittia käytettäessä pitää ylä- ja alapuolisille rakenteille tästä syystä asettaa kemiallisia laatuvaatimuksia. (Infra 15-710194 2018) Bentoniittimattosta on kerrottu lisää kohdassa 3.2 *Bentoniittimatto*.

Alustassa ei saa tapahtua liian suuria paikallisia muodonmuutoksia. Bentoniittimatto kestää noin 10 %:n venymiä ilman maton ominaisuuksien merkittävää huononemista. (Infra

15-710194 2018) Pintarakenteen kuormitusoloissa, joka vastaa noin 15-20 kPa:ia, luonnonmaatiivisteille sallitaan yleensä noin 1 %:n venymä, joka todellisuudessa ylittyy todennäköisesti (Ympäristöministeriö 2008).

2.3.4 Pintarakenteen keinotekoinen eriste

Pintarakenteen keinotekoisella eristeellä estetään sade- ja sulamisvesien imeytyminen ja tehostetaan kaasun keräämistä (Ympäristöministeriö 2008; InfraRYL 2018). Keinotekoinen eriste vaaditaan vain vaarallisen jätteen kaatopaikoilla, mutta kalvoja voidaan käyttää muillakin kaatopaikoilla (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018; InfraRYL 2018) Lainsäädännössä keinotekoisille eristeille ei ole asetettu teknisiä vaatimuksia eikä määritellä eristeen materiaalia, mutta yleisimmin käytetään polymeeristä valmistettuja tiivistyskalvoja eli geomembraaneja (Infra 15-710194 2018).

Keinotekoinen eriste asennetaan tavallisesti mineraalisen tiivistyskerroksen päälle, kuten kaatopaikan pohjarakenteessa (Infra 15-710194 2018). Jos tarkoituksena on tehostaa kaasunkeräilyä, voidaan keinotekoinen eriste asentaa kaasunkeräilykerroksen ja tiivistyskerroksen väliin tarvittavien suojakerrosten kanssa, mikä aiheuttaa haasteita rakentamiselle ja luiskastabiliteetille. Vesien johtamisen kannalta paras paikka eristeelle on tiivistyskerroksen päällä. (Ympäristöministeriö 2008) Tiivistyskalvon ja mineraalisen tiivistyskerroksen välisen kontaktin tulee olla hyvä. Irtonainen, kuiva maa-aines voi rajapinnassa muodostaa vettä johtavan kerroksen. (InfraRYL 2018)

Jos kaatopaikalla on käytetty väliaikaisena peittona tiivistyskalvoa, jää keinotekoinen eriste silloin tiivistyskerroksen alle. Tällöin pitää aina varmistua tiivistyskerroksen ja kalvon välisestä kitkasta myös vedellä kyllästyneessä tilanteessa sekä kalvon ehjyydestä rakennettaessa kalvon päälle. (Infra 15-710194 2018)

Kitkaominaisuuksia voidaan parantaa valitsemalla kitkapinnoitettu kalvo (Infra 15-710194 2018). Tiivistyskerroksen tiivistäminen keinotekoisien eristeen päälle vahingoittamatta eristettä on käytännössä mahdotonta ilman paksua suojakerrosta, mutta bentoniittimaton asentaminen saattaa onnistua (Ympäristöministeriö 2008). Suojakerroksien tarve pitää huomioida työmaaliikenteessä.

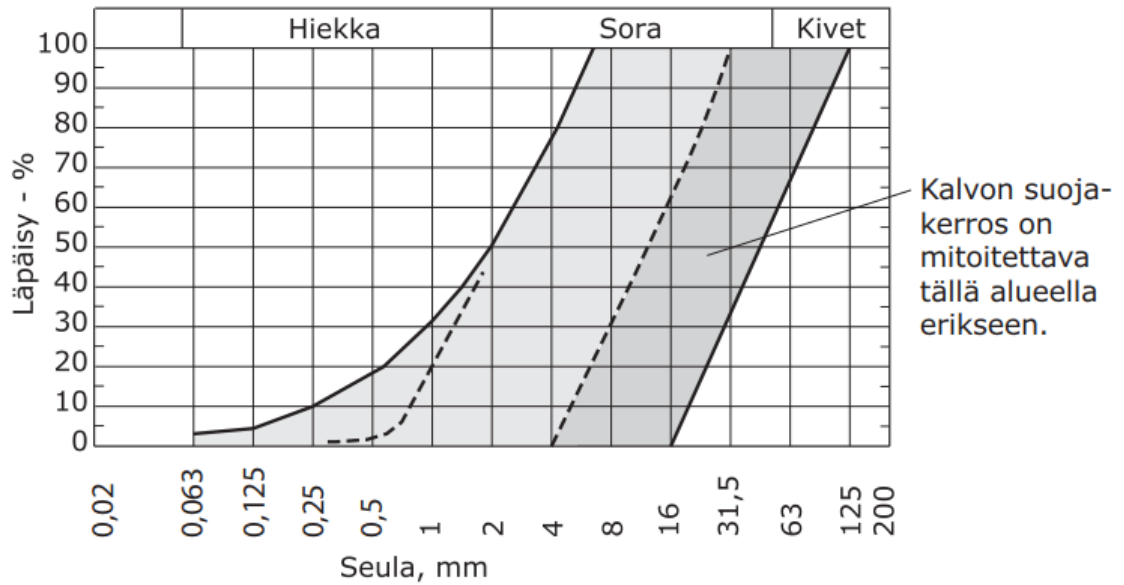
Keinotekoisien eristeen tulee kestää kaatopaikan epätasaiset painumat ja kaasunpaine sekä kemialliset, biologiset ja termiset rasituksen suunnitellun käyttöikänsä ajan ilman ominaisuuksien merkittävää heikkenemistä (InfraRYL 2018). Lisäksi kitkan on oltava riittävä luiskien rajapinnoissa stabiliteetin vuoksi (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018; InfraRYL 2018). Usein pinnan keinotekoisena eristeenä käytetäänkin 1,5 mm:n paksuista LLDPE-kitkakalvoa (Linear Low Density Polyethylene eli lineaarinen matalatiheysinen polyeteeni). Keinotekoisia eristeitä voidaan valmistaa useista raaka-aineista polyeteenin (PE) lisäksi, kuten polypropeenista (PP), polyvinyylikloridista (PVC), bitumista ja eteenipropeenikumista (EPDM). Keinotekoisena eristeenä voidaan käyttää myös

tiivistä asfalttia, mutta se ei kestä epätasaisia painumia. Painumien lisäksi pakkaneen ja alustan routiminen voivat aiheuttaa asfalttiin vetojännityksiä, jos asfalttia ei suojata tarpeeksi paksuilla yläpuolisilla rakennekerroksilla. (Infra 15-710194 2018)

2.3.5 Pintarakenteen kuivatuskerros

Pintarakenteen kuivatuskerros johtaa pintakerroksen läpi suotautuneet sade- ja sulamisvedet pois rakenteesta ja alentaa tiivistyskerrokseen kohdistuvaa hydraulista gradienttia (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018; InfraRYL 2018). Kuivatuskerros myös suojaa alla olevaa tiivistyskerrosta routimiselta sekä kasvien juurilta. Kuivatuskerroksen varastokapasiteetin tulee olla riittävä sulamisvesiä ja rankkasateita varten. Kerroksen vedenjohtavuuden on oltava tarpeeksi hyvä, jotta yläpuolinen pintakerros ei kyllästy vedellä eikä tiivistyskerrokseen pääse kohdistumaan suurta hydraulista gradienttia. (Infra 15-710194 2018)

Pinnan kuivatuskerros voidaan tehdä kiviaineksesta, salaojamatosta tai soveltuvasta jättemateriaalista (Infra 15-710194 2018). VNa 331/2013 mukaan kuivatuskerroksen tulee olla vähintään 0,5 m:n paksuinen tavanomaisen ja vaarallisen jätteen kaatopaikoilla. Kuivatuskerros tehdään yhtenä kerroksena, jos siinä käytetään yhtä materiaalia ja vastaavasti kahdessa kerroksessa, jos käytetään kahta materiaalia (InfraRYL 2018). Ohjeen mukainen vedenläpäisevyysuudistus on $k \geq 10^{-3}$ m/s, joka vastaa mursketta tai karkeaa soraa (Infra 15-710194 2018). Materiaalin hienoainepitoisuus ($< 0,063$ mm:n osuus) saa olla korkeintaan 3 %:a. Mineraaliselle materiaalille on InfraRYL:ssä esitetty kuvan 4 mukainen rakeisuusaluevaatimus. Materiaalin tulee säilyttää vedenjohtavuutensa ja kantavuutensa mekaanisesta, biologisesta, kemiallisesta ja termisestä kuormituksesta huolimatta. (InfraRYL 2018)



Kuva 4. Kaatopaikan pinnan kuivatuskerroksen kiviaineksen rakeisuuden ohjealue. Kuivatuksen kannalta suositeltu alue on katkoviivojen välissä. Tiivistyskalvon suojakerros on erikseen mitoitettava ja testattava, jos rakeisuuskäyrä kulkee tummennetulla alueella. (InfraRYL 2018)

Pinnan kuivatuskerros voidaan tehdä mineraalisen aineksen sijasta salaojamatosta, jonka vedenjohtavan ytimen toisella tai molemmilla puolilla on suodatinkangas. Salaojamaton vedenjohtavuuden pitää olla riittävä, kun otetaan huomioon pintakerroksen vedenpidätyskapasiteetti, luiskan kaltevuus ja pituus sekä kitka luiskien rajapinnoissa. Salaojamaton vedenjohtavuuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten maton ytimen kokoonpuristuminen, maton kemiallinen ja biologinen tukkeutuminen ja kankaiden tunkeutuminen salaojamaton ytimeen. Kuivatuskapasiteettiin vaikuttavat myös luiskakaltevuus ja pinta-kuorma. Mitoituksessa nämä asiat otetaan huomioon erilaisilla vähennyskertoimilla. Salaojamaton pitkäaikaiskestävyys pitää pystyä osoittamaan. (Infra 15-710194 2018) Esimerkkejä erilaisista salaojamatosta on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Salaojamaton erilaisia ytimiä (GrowTek 2018; GEOMAT 2019).

Salaojamaton tukkeutuminen on merkittävämpää kaatopaikan pohjarakenteissa kuin pintarakenteissa, mutta tukkeutuminen riippuu käytetyistä materiaaleista. Kemiallista tukkeutumista aiheuttaa kalkin ja magnesiumin saostumisesta. Biologinen tukkeutuminen johtuu mikrobi- ja sienikasvustoista tai juurista. Juuret ja biologinen kuormitus ovat merkittävä riski pintarakenteissa. Kuormituksen suuruus johtuu paljon alueen jälkikäytöstä. (Infra 15-710194 2018)

Pinnan kuivatuskerroksessa voidaan käyttää myös soveltuvia jättemateriaaleja, mutta kerroksesta purkautuvien vesien laatu ja käsittelytarve on arvioitava erikseen liukoisuuskokeilla. Myös jättemateriaalien enimmäisraekoko ja materiaalin aiheuttama kemiallinen kuormitus voivat rajoittaa materiaalin käyttöä, etenkin jos tiivistyskerroksessa on käytetty bentoniittimattoa. (Infra 15-710194 2018) Materiaali ei saa olla helposti murskautuvaa ja materiaalin tulee säilyttää kantavuutensa ja vedenjohtavuutensa kuormituksen alaisena (InfraRYL 2018).

Kuivatuskerroksen tehokkuus riippuu pinnan kaltevuudesta ja päällä olevan kerroksen vedenläpäisevyydestä. Kuivatustarve on suurimmillaan yleensä heti rakentamisen jälkeen ja keväisin lumien sulamisaikaan. Kasvillisuus haihduttaa jo muutaman vuoden kuluttua rakentamisesta suurimman osan pintakerrokseen imeytyneestä kosteudesta ja pintakerros toimii vesivarastona. Pienemmillä kaatopaikoilla voidaan vedenläpäisevyysvaatimuksesta yleensä joustaa, koska pintakerrokseen ei kohdistu pysyvää vedenpainetta. Jos kaatopaikan läheisyydessä on saatavilla karkeaa hiekkaa tai soraa, jonka vedenläpäisevyys $k > 10^{-5} - 10^{-4}$ m/s, voidaan tätä mahdollisesti käyttää. Karkeat materiaalit pysäyttävät paremmin juurien tunkeutumisen kerrokseen, joten suunnittelussa kokonaisuus kannattaa ottaa huomioon. (Infra 15-710194 2018)

2.3.6 Pintakerros

Pintakerros suojaa sen alapuolisia rakennekerroksia kuivumiselta ja jäätymiseltä sekä toimii vesivarastona ja kasvualustana. Pintarakenne myös mahdollistaa kaatopaikka-alueen

jälkikäytön. (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018; InfraRYL 2018) Tavanomaisen ja vaarallisen jätteen kaatopaikoilla tulee olla vähintään 1 m:n paksuinen pintakerros VNa 331/2013 mukaan. Pintakerrokseen tarvitaan paljon materiaalia, joten tyypillisesti käytetään lähistöltä saatavia ylijäämämaita (Infra 15-710194 2018). Materiaalin enimmäisraekoko on 150 mm:ä ja soveltuvia maalajeja ovat hiekkainen silttimoreeni, hiekkamoreeni ja hiekka. Hienoainespitoisuuden ($< 0,063$ mm:n osuus) suositeltu enimmäismäärä on alle 30 %:a. (InfraRYL 2018) Pintakerroksessa voidaan käyttää kiviaineksen sijaan teknisesti rakenteeseen soveltuvia pysyvän jätteen vaatimukset täyttäviä jätemateriaaleja (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018; InfraRYL 2018). Jätemateriaalien pitää täyttää vaaditut kaatopaikkakelpoisuuskriteerit ja olla yhteensopivia muiden käytettyjen materiaalien kanssa. Pintakerros rakennetaan yhtenä tai kahtena kerroksena. (InfraRYL 2018)

Kerroksen pitäisi pystyä varastoimaan rankkasateen aikainen vesimäärä, joten materiaalin huokostilan ja vedenpidätyskyvyn tulee olla riittävä. Muuten pinta voi liettyä ja lamikoitua ja luiskiin voi aiheutua eroosio- ja stabiliteettiongelmia. Pintakerrosmateriaalin vedenläpäisevyyden tulisi olla nämä asiat huomioon ottaen luokkaa $k \geq 10^{-6}$ m/s. Luiskassa voi olla tarpeen käyttää karkeampaa materiaalia riittävän luiskastabiliteetin saavuttamiseksi ja eroosion välttämiseksi. Rakeisuuskäyrän perusteella voidaan arvioida materiaalin eroosiokestävyyttä. Materiaalissa oleva orgaaninen aines voi aiheuttaa kerroksen tukkeutumista, liettymistä ja kokoonpuristumista. Toisaalta orgaaninen aines sitoo vettä sekä edesauttaa kasvillisuuden muodostumista ja täten vähentää eroosiota. (Infra 15-710194 2018)

2.3.7 Kasvukerros

Pintarakenteen yläosaan rakennetaan tyypillisesti vähintään 200–300 mm:n paksuinen kasvukerros humuspitoisesta maasta tai muusta kasvualustaksi soveltuvasta materiaalista. Soveltuvuus kasvualustaksi voidaan todentaa viljavuusanalyysillä. Jos kasvukerrosmateriaali sisältää runsaasti helposti liukenevia ravinteita, tulee varautua ravinnepäästöihin parina ensimmäisenä vuotena rakentamisen jälkeen. Kasvukerrosmateriaalin tulee kestää eroosiota. Kasvillisuudella voidaan vähentää pintaeroosiota, joten kasvillisuuden muodostumisen edistäminen on suotavaa. (Infra 15-710194 2018)

Kasvillisuus haihduttaa pintakerrokseen imeytynyttä kosteutta ja maisemoi kaatopaikan. Kasvillisuus riippuu kaatopaikan jälkikäytöstä. Kasvusto ei saa vaurioittaa rakennekerroksia. Tämän vuoksi kaatopaikoilla suositaan lyhytjuurisia lajeja ja syväjuuriset alueelle levinneet lajit poistetaan. (Ympäristöministeriö 2008; Infra 15-710194 2018) Kasvillisuus voi levitä luonnollisesti kaatopaikan ympäristöstä, mutta jyrkkä- ja pitkäluiskaisilla kaatopaikoilla kasvillisuuden muodostumista on syytä edistää siementämällä sekä tarvittaessa lannoittamalla ja kastelemalla (Infra 15-710194 2018).

3. PINTARAKENTEEN RAKENNEKERROKSISSA KÄYTETTÄVIÄ MATERIAALEJA

Kaatopaikan pintarakenteen tiivistyskerros voidaan tehdä mineraalisesta maa-aineksesta kuten savesta *VNa 331/2013* mukaisen paksuusvaatimuksen saavuttamiseksi. Mahdollista on myös käyttää vaihtoehtoisia materiaaleja, esimerkiksi maabentoniittia, bentoniittimattoa, tiivistyskalvoa tai rakenteeseen soveltuvaa ja ympäristölliset vaatimukset täyttävää uusiomateriaalia, kuten kuitusavea. (Suomen ympäristökeskus 2001a) Poikkeaminen valtioneuvoston asetuksesta tarvitsee aina perustelut sekä arvion rakenteen ympäristövaikutuksista (*VNa 331/2013 2013*). Yleensä poikkeaminen asetuksen vaatimuksista on tiedossa jo etukäteen, jolloin poikkeaville materiaaleille ja rakenteille haetaan lupaa kaatopaikan ympäristöluvassa.

Vuonna 2016 siirtymäajan päätyttyä voimaan astunut orgaanisen jätteen kaatopaikkakielto estää biohajoavan ja muun orgaanisen jätteen, jossa biohajoavan tai orgaanisen aineksen määrä on yli 10 %:a orgaanisen hiilen kokonaismäärän tai hehikutushäviön perusteella, hyödyntämisen pintarakenteen tiivistyskerroksen alapuolisissa kaatopaikkarakenteissa tavanomaisen jätteen kaatopaikalla. Tämä vaatimus ei kuitenkaan koske energiantuotannosta tai jätteen polttamisesta syntyvää lento- ja pohjatuhkaa, jossa liuenneen orgaanisen hiilen määrä on < 800 mg/kg liukoisuuskokeen nesteen ja kiinteän aineen suhteen ollessa 10 litraa nestettä kilogrammaa kuiva-ainetta kohden. Vaatimus ei koske myöskään pilaantunutta maa-ainesjätettä ja pilaantunutta ruoppausjätettä eikä metsäteollisuuden soodasakkaa ja siistauslietettä. (*VNa 331/2013 2013*)

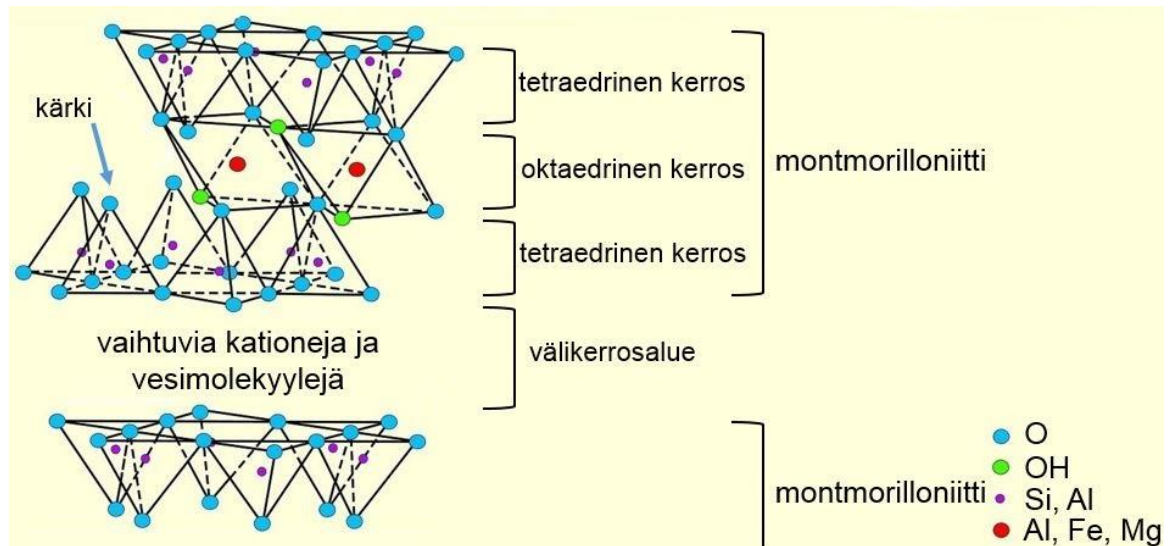
3.1 Bentoniitti

Kaatopaikan pintarakenteissa käytetään usein bentoniittia sisältäviä materiaaleja bentoniitin pienen vedenläpäisevyyden vuoksi. Bentoniitti on vulkaanista savea, joka on muodostunut tulivuoren tuhkasta tai tuffista (Carlson 2004; Wypych 2016 s. 51). Bentoniitti koostuu pääasiassa smektiittimineraaleihin kuuluvasta montmorilloniitistä (Karnland et al. 2006 s. 13; Wypych 2016 s. 51).

3.1.1 Ominaisuudet

Smektiittiryhmän mineraaleilla on 2:1 kerrosrakenne, jossa kahden tetraedrisen piioksidilevyn välissä on oktaedrinen alumiinioksidilevy (Suomen ympäristökeskus 1998; Karnland et al. 2006). Smektiittimineraalin rakenne on esitetty kuvassa 6. Montmorilloniittipartikkelien väliset sidokset ovat heikkoja van der Waals -voimien aiheuttamia sidoksia tai varausta tasapainottavien kationien välisiä sidoksia. Nämä sidokset hajoavat helposti

veden tai muiden polaaristen nesteiden tunkeutuessa levyjen väliin, jolloin montmorilloniitti paisuu huomattavasti (Mitchell & Soga 2005 s. 59). Montmorilloniitillä on saviryhmän suurin paisumispotentiaali (Suomen ympäristökeskus 1998 s. 30). Yksittäinen montmorilloniittipartikkeli on hyvin ohut ja leveys- ja syvyysuunnassa satoja kertoja leveämpi kuin paksuussuunnassa, joten rakenne on levymäinen (Suomen ympäristökeskus 1998; Karnland et al. 2006).



Kuva 6. Montmorilloniitin rakenne (muokattu lähteestä Grim 1962, Mogk mukaan). Oktaedri- ja tetraedrikerrosten yhteiset anionit ovat happea ja tetraedrien kärjet ovat kohti oktaedrikerrosta. (Mitchell & Soga 2005)

Smektiittiryhmän mineraaleilla on merkittävä varausten vajaus, koska pii- ja alumiini-ionit korvautuvat herkästi. Montmorilloniitti tasaa negatiivisen varauksen vajauksen adsorboimalla ulkopuolelta kationeita välikerrosalueelle (kuva 5). (Karnland et al. 2006 s. 13) Montmorilloniitissä osa oktaedrisen kerroksen kolmenarvoisista alumiini-ioneista korvautuu kahdenarvoisilla magnesiumioneilla (Suomen ympäristökeskus 1998 s. 30; Karnland et al. 2006) ja osa tetraedrisen kerroksen pii-ioneista saattaa korvautua pääasiassa alumiinilla. Oktaedrisessä kerroksessa varaus on suurempi kuin tetraedrisessä. (Karnland et al. 2006 s. 13)

Varauksen tasoittavat kationit ovat harvoin vain yhtä laatua. Usein bentoniitti nimetään hallitsevan kationin mukaan. Esimerkiksi natriumbentoniitissa hallitsevana kationina on natriumioni Na^+ . Paisumisominaisuudet ovat suurelta osin riippuvaisia varausta tasoittavien kationeiden laadusta ja määrästä sekä väliin tunkeutuvan liuoksen konsentraatiosta. (Karnland et al. 2006 s. 13)

Natriumbentoniitti on merivedessä muodostunutta bentoniittia, jolla on suuri paisuntakerroin vedessä. Kalsiumbentoniitti on muodostunut makeassa vedessä ja sen paisumiskyky on vähäinen. (Suomen ympäristökeskus 1998; Wypych 2016 s.51)

3.1.2 Bentoniitin paisuminen

Bentoniitti, kuten muutkin savet, paisuvat kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa jopa neljän molekyylin paksuinen kerros vettä tunkeutuu välitilaan montmorilloniittipartikkeleiden väliin tai vieretysten olevien partikkelien väliin. (van Olphen 1977, s. 66 & 243) Koska partikkeleiden välinen etäisyys kasvaa maksimissaan neljän vesimolekyylin verran, kuiva bentoniitti paisuu tilavuudeltaan maksimissaan kaksinkertaiseksi (van Olphen 1977, s. 66). Toisessa paisumisvaiheessa lisävesi saa partikkeleiden väliset etäisyydet kasvamaan merkittävästi neljän vesimolekyylin paksuisesta etäisyydestä (van Olphen 1977, s. 66 & 243; McBride 1994, Kolstad et al. 2004 mukaan), jolloin savi sitoo huokosiinsa paljon vettä ja paisuu huomattavasti. Samalla saven vedenläpäisevyys pienee, jos bentoniitti ei pääse paisumaan vapaasti eli bentoniitin tilavuus ei muutu. (Kolstad et al. 2004)

Jos välitilassa olevat kationit ovat yhdenarvoisia, kuten natrium Na^+ , molemmat paisumisvaiheet tapahtuvat saven päästessä kosketuksiin veden kanssa. Jos välitilassa olevat kationit ovat kahden- tai kolmenarvoisia, kuten kalsium Ca^{2+} , tapahtuu vain paisumisen ensimmäinen vaihe, jolloin paisuminen rajoittuu maksimissaan neljän vesimolekyylin paksuiseen partikkelien väliseen etäisyyteen. (Kolstad et al. 2004) Kationien ollessa moniarvoisia vahva elektrostaattinen vetovoima montmorilloniittipartikkeleiden ja välitilan kationien välillä estää toisen paisumisvaiheen (Kolstad et al. 2004; Katsumi et al. 2008).

Kolstad et al. (2014) mukaan ionivahvuus ja yhden- ja kahdenarvoiset kationit liuoksessa vaikuttavat bentoniitin paisumiskykyyn ja täten bentoniitin vedenläpäisevyyteen. Paisumiskyky on suoraan verrannollinen yhden- ja kahdenarvoisten kationien määrään ja kääntäen verrannollinen ionivahvuuteen verrattuna. Vedenläpäisevyys on taas suoraan verrannollinen ionivahvuuteen ja kääntäen verrannollinen yhden- ja kahdenarvoisten kationien määrään verrattuna. Yhden- ja kahdenarvoisilla kationeilla on suurempi vaikutus liuoksissa, joissa on alhainen ionivahvuus. Konsentraatiolla on suurempi vaikutus korkean ionivahvuuden omaavissa liuoksissa. Suurempia vedenläpäisevyyksiä on havaittu väkevissä liuoksissa ja liuoksissa, joissa on runsaasti kahdenarvoisia kationeita. (Kolstad et al. 2004)

Nesteen tunkeutuessa montmorilloniittiin mineraalissa olevat kationit pääsevät korvautumaan, mikä saa natriumbentoniitin reagoimaan nesteen kanssa. Kationien korvautumiseen vaikuttavat kationin valenssi, määrä ja koko. (Suomen ympäristökeskus 1998; Kolstad et al. 2004) Yleensä kationit, joilla on suurempi valenssi ja pienempi koko, korvautuvat kationeilla, joilla on pienempi valenssi ja suurempi koko. (Kolstad et al. 2004) Spósito (1981; 1989) ja McBride (1994) mukaan korvautumisjärjestys on $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+}$ (katso Kolstad et al. 2004). Koska natriumkationi on järjestyksen alkupäässä, natriumbentoniitti on altis kationin korvautumiselle, jos liuoksessa on kahden- tai kolmenarvoisia ioneita (Spósito 1981, Kolstad et al. 2004 mukaan).

Kalsiumbentoniitin ominaisuuksia voidaan parantaa aktivoinnilla (Infra 15-710194 2018). Kalsiumbentoniitin aktivoiminen voidaan tehdä epäorgaanisella hapolla (useimmiten HCl tai H₂SO₄) (Bergaya & Lagaly 2013, s. 385-386) tai sooda-aktivointina (alkaliaktivointi) (Guyonnet et al. 2005; Steudel et al. 2013; Di Emedio et al. 2014). Haptoaktivointi saa kahdenarvoiset Ca²⁺-ionit korvautumaan yhdenarvoisilla H⁺-ioneilla ja liuottamaan Fe³⁺-, Fe²⁺-, alumiini- ja magnesiumioneita smektiittimineraaleista. Tämä muokkaa smektiittimineraalien rakennetta lisäten huokoisuutta ja ominaispinta-alaa, mikä parantaa bentoniitin vedenimukykyä. Huokoisuuden ja ominaispinta-alan kasvu riippuu hapon vahvuudesta, käsittelyajasta ja lämpötilasta. (Bergaya & Lagaly 2013, s. 385-386; 395)

Sooda-aktivointi lisää bentoniitin natriumpitoisuutta (Lagaly et al. 1981, Steudel et al. 2013 mukaan; Guyonnet et al. 2005). Bentoniittiin lisätään 1–5 painoprosenttia (Lagaly et al. 1981, Steudel et al. 2013 mukaan) soodaa (natriumkarbonaatti, Na₂CO₃), joka muuttaa Ca²⁺- tai Ca²⁺-Mg²⁺-pitoisen bentoniitin Na⁺-pitoiseksi bentoniitiksi (Lagaly et al. 1981, Steudel et al. 2013 mukaan; Guyonnet et al. 2005). Vapautuneet Ca²⁺-ionit reagoivat jäljelle jääneen karbonaatin kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia (CaCO₃). Kalsiumkarbonaatin saostuminen tukee kationin korvautumista kalsiumista natriumiin (Lagaly et al. 1981, Steudel et al. 2013 mukaan). Guyonnet et al. (2005) mukaan kalsiumkarbonaatti voi liueta uudestaan päästessään kosketuksiin suotovesien kanssa vapauttaen kalsiumioneita, jotka voivat puolestaan korvata natriuminoneja muuntaen natriumbentoniitin kalsiumbentoniitiksi eli aktivoitu bentoniitti rapautuu. Yleisesti natriumvaihdetujen bentoniittien ominaisuudet ovat usein huonompia luonnolliseen natriumbentoniittiin verrattuna (Bergaya & Lagaly 2013; Guyonnet et al. 2005).

3.2 Bentoniittimatto

Tiivistyskerroksessa voidaan käyttää bentoniittimattoa, joka on geosynteetti, jossa kahden geotekstiilin välissä on bentoniittisavikerros (Kuva 7). Bentoniitti on jauhemaista tai rakeista ja sen väri riippuu esiintymästä. Tuotteen ominaisuudet riippuvat käytetyn bentoniitin määrästä ja laadusta sekä kankaiden laadusta ja sidontatekniikasta. Yleensä toinen kankaista on kudottu ja toinen neulasidottu. Bentoniittimatossa voi olla myös ylimääräinen tukikangas, joka lisää maton vetolujuutta ja muodonmuutoskestävyyttä. Tällöin matossa on kaksi neulasidottua ja yksi kudottu kangas. Neulasidottu kankaista tulee olla helpposti asennuksen aikana, joten vähintään yhden bentoniittimaton kankaista tulee olla kudottu muodonmuutosten ja kutistuman vähentämiseksi. (Infra 15-710194 2018)



Kuva 7. Vasemmalla bentoniittijauhe ja oikealla bentoniittimatto (Kinnunen 2017; Naue 2019).

Kaatopaikkarakenteissa käytetään bentoniittimattoja, jotka sisältävät luonnon natriumbentoniittia. Bentonitti ei saa sisältää orgaanisia lisäaineita, jotka lisäävät paisumista tai pienentävät vedenläpäisevyyttä. Bentonitiin määrän tulee olla minimissään 4 000 g/m². Matossa käytetyn bentoniitin montmorilloniittipitoisuus on vähintään 80 %:a XRD:llä määritettynä ja kalsiumpitoisuuden tulee olla alle viisi prosenttia. Paisumisindeksin tulee olla ≥ 24 ml/ 2g. (Infra 15-710194 2018) Paisumiskyvyn määrittämisestä on kerrottu kohdassa 6.3.9 *Paisuntakerroin*.

Kuten muidenkin geosynteettien tapauksessa, tulee materiaalien rajapinnoissa ottaa huomioon riittävän kitkan saavuttaminen. Jyrkissä ja pitkissä luiskissa on lisäksi tarkistettava, että bentoniitin sisäinen lujuus on riittävä. Bentonittimaton vedenläpäisevyys ja paksuus riippuvat bentoniittimaton yläpuolisesta kuormituksesta. Alhaisen vedenläpäisevyyden saavuttamiseksi bentoniittimaton päällä on oltava riittävän suuri kuorma. (Infra 15-710194 2018)

3.3 Polymeerimodifioitu bentoniitti

Nykyään markkinoilla on myös polymeerimodifioitua bentoniittia. Bentonittiin on lisätty polymeeriä, joka parantaa bentoniitin ominaisuuksia, kuten paisumis- ja itsekorjautuvuuskykyä (Di Emedio et al. 2014; De Camillis et al. 2016). Polymeerimodifioitujen bentoniittien on todettu säilyttävän ominaisuutensa paremmin aggressiivisissa uuttoliuksissa luonnolliseen bentoniittiin verrattuna (Katsumi et al. 2008; De Camillis et al. 2016; Ross & Rowland 2017; Leppänen et al. 2018). Suomessa maabentoniittiseoksissa suositellaan käytettäväksi kemiallisen rapautumisen takia luonnon natriumbentoniittia, vaikka yleisemmin seoksissa on käytetty aktivoitua kalsiumbentoniittia. (Infra 15-710194 2018)

Paisumuskyky ei takaa materiaalin toimintaa vedenläpäisevyyskokeessa, koska paisumuskyky ei ota huomioon läpivirtauksen vaikutusta. Vaikka luonnollisen natriumbentoniitin paisumuskyky olisi todettu riittäväksi (≥ 24 ml/2g ASTM D5890 mukaisesti) ionivaihdetulla vedellä ja uuttoliuksella, ei luonnon natriumbentoniittia sisältävän tiivistetyn koekappaleen vedenläpäisevyyskerroin k ole välttämättä tarpeeksi alhainen ($< 1 \cdot 10^{-9}$ m/s) toisin kuin polymeerimodifioitua bentoniittia sisältävän koekappaleen (Leppänen et al. 2018).

Polymeerimodifioitujen bentoniittien pitkäaikaiskäyttämistä ei ole tutkittu kattavasti. (Leppänen et al. 2018) Ross & Rowland (2017) mukaan osa polymeerimodifioiduista bentoniiteista säilyttää ominaisuutensa altistuessaan aggressiivisille uuttoliuksille kuuden kuukauden jälkeen, mutta ominaisuuksien säilyminen on tuotekohtaista. Tutkimuksessa testatuista polymeerimodifioitua bentoniittia sisältävistä bentoniittimatoista kahdella kolmesta vedenläpäisevyys kasvoi tavoitearvoa suuremmaksi. (Ross & Rowland 2017) Katsumi et al. (2008) tutkimusten mukaan erään polymeerimodifioidun bentoniitin vedenläpäisevyys oli pari vuotta kokeen alkamisen jälkeen vielä luokkaa 10^{-10} - 10^{-11} m/s käytetyn uuttoliuksen laadusta riippuen. Tulosten vertaileminen on hankalaa, koska käytetyt polymeerit, bentoniitit ja uuttoliukset poikkeavat toisistaan eri tutkimuksissa.

3.4 Jätteenpolton pohjakuona

Jätteenpolton pohjakuona on yhdyskuntajätteenpolton yhteydessä syntyvää kuonaa, joka jää jätteenpolttolaitoksen arinalle (Suomen Erityisjäte 2017). Jätteenpolton yhteydessä syntyy erilaisia jätejakeita, kuten arinapölyä, kattila- ja lentotuhkaa, savukaasujen puhdistusjätettä sekä pohjakuonaa, jota syntyy määrällisesti eniten muihin jätteenpolton jätteisiin verrattuna eli noin 20-30 %:a poltettavan jätteen määrästä (Chandler et al. 1997; Wiles 1996, Suomen Erityisjäte 2017 mukaan).

Vuonna 2019 Suomessa oli yhdeksän käynnissä olevaa ja yksi Saloon rakenteilla oleva yhdyskuntajätteen polttolaitosta, joista suurin osa on arinapolttolaitoksia (Suomen Erityisjäte 2017; Jätelaitosyhdistys 2019). Polttolaitosten sijainti on esitetty kuvassa 8. Kahdella laitoksella polttamiseen käytetään kaasutus- tai leijupetiteknikkaa (Lahti ja Leppävirta), jotka vaativat parempaa jätteen esikäsittelyä arinatekniikkaan verrattuna, minkä vuoksi poltossa syntyvien jätteiden määrä ja koostumus poikkeavat arinapoltosta syntyvästä pohjakuonasta (Suomen Erityisjäte 2017). Salon jätevoimalaitos valmistuu suunnitelmien mukaan vuonna 2021 ja se hyödyntää arinatekniikkaa (Lounavoima 2019). Suomessa syntyy vuosittain 233 500 – 265 000 tonnia jätteenpolton pohjakuonaa. Suurin yksittäinen jätteenpolton kuonan syntypaikka on Vantaan Energian jätteenpolttolaitos (65 000 – 70 000 tonnia kuonaa vuodessa). (Suomen Erityisjäte 2017)



Kuva 8. Vuonna 2019 Suomessa käynnissä ja rakenteilla olevat jätteenpolttolaitokset (päivitetty lähteestä Suomen Erityisjäte 2017). Riihimäellä sijaitsee kaksi Ekokemin jätevoimalaa.

Yhdyskuntajätteen poltosta syntyvä raakakuona on usein heterogeenistä ja se sisältää magneettisia ja ei-magneettisia metalleja, kuonaa ja palamatonta epäorgaanista ainesta (lasia, keramiikkaa ja kiviainesta) ja palamatonta orgaanista ainesta. Teknisiltä ominaisuuksiltaan jätteenpolton pohjakuona vastaa maarakentamisessa käytettäviä luonnonmateriaaleja ja pohjakuonaa voidaankin ominaisuuksiensa puolesta käyttää korvaamaan hiekkaa, soraa ja mursketta erilaisissa maarakenteissa, kuten suodatinkerroksessa ja jakavassa kerroksessa varastokentillä, liikuntapaikoilla, pysäköintialueilla ja kevyen liikenteen väylillä. Syntyvän jätteenpolton pohjakuonan ominaisuuksiin ja laatuun vaikuttavat polttoaineen koostumus ja laatu, polttotekniikka ja polttoparametrit, kattiloiden kunto ja tuhkan talteenottojärjestelmä sekä ikäännyttäminen. (Kaartinen et al. 2010)

Jätteenpolton pohjakuona on huokoista ja kevyttä sekä omaa suuren ominaispinta-alan (Kaartinen et al. 2010). Jätteenpolton pohjakuona on väriltään harmaata ja vastaa rakeisuudeltaan luonnonhiekkaa ja -sora (Chandler et al. 1997, Suomen Erityisjäte 2017 mu-

kaan). Jätteenpolton kuonan mineraaliainepartikkelit ovat tavanomaista kiviainesta hauraampia, minkä vuoksi materiaali hienonee jonkin verran kuormituksen alla. Materiaalin huokoisuuden vuoksi jätteenpolton kuona imee itseensä vettä kapillaarisesti ja rakeet myös läpäisevät vettä. (Suomen Erityisjäte 2017) Vuonna 2017 TTY:llä Sahi-kapillaarimetrillä tehtyjen kokeiden perusteella jätteenpolton kuonan 0/5 mm:n fraktiolla kapillaarisuus oli kuivairtoteiheydestä riippuen 0,15-0,30 m:ä. Suoramittausmenetelmällä putkessa määritettynä vedennousukorkeus oli lähes samassa tiiviydessä 0,47-0,49 m:ä. Sahi-kapillaarimetrillä jätteenpolton kuonafraktion 0/45 mm:ä alle 16 mm:n jakeella kapillaarisuus oli 0,14-0,18 m:ä. Suoramittausmenetelmällä putkessa määritettäessä kuivairtoteiheys oli noin 100-200 kg/m³ suurempi, jolloin vedenimeytymiskorkeus oli 0,39-0,44 m:ä. Jätteenpolton kuonalle näyttää olevan tyypillistä, että vesi nousee materiaalissa useiden viikkojen tai ehkä peräti kuukausien ajan (Suomen Erityisjäte 2017). Kuivairtoteiheyden ollessa suurempi kapillaarisuus kasvaa.

Jätteenpolton kuonan lujuusomaisuudet heikkenevät liiallisen veden vaikutuksesta. Jätteenpolton kuonan ikääntyminen muuttaa kuonan kemiallista koostumusta ja ominaisuuksia, mikä parantaa kuonan jäykkyys- ja lujuusomaisuuksia ajan myötä. Jätteenpolton kuonan pH on emäksinen, mikä voi aiheuttaa joidenkin materiaalien korroosiota. Jätteenpolton kuonan kemiallinen yhteensopivuus muiden materiaalien kanssa tulee tarkistaa. Pohjakuona sisältää liukoisia haitta-aineita, joten materiaalin ympäristökelpoisuus tulee myös varmistaa. (Suomen Erityisjäte 2017) Luonnon materiaaleihin verrattuna pohjakuonassa etenkin kuparin, sinkin, antimonin, lyijyn, molybdeenin, kloridin, sulfaatin ja orgaanisen hiilien liukoisuus saattaa olla korkeampi (Kaartinen et al. 2010)

Raakakuona käsitellään magneettisten ja ei-magneettisten metallien talteen ottamiseksi (Kaartinen et al. 2010; Suomen Erityisjäte 2017). Ilman jatkojalostusta pohjakuona ei sovellu hyötykäyttöön, vaan käyttö edellyttää vähintään fysikaalista esikäsittelyä eli metallien erottamista ja seulontaa eri kuonafraktioiksi. Lisäksi ympäristökelpoisuuden parantamiseksi materiaalia myös välivarastoidaan eli ikäännytetään. Ikäännyttämisen aikana pohjakuona reagoi veden ja ilman kanssa, mikä vähentää kuonan reaktiivisuutta ja liukoisuutta. (Kaartinen et al. 2010) Jätteenpolton pohjakuona käsitellään myös rakeisuuksiltaan erilaisten tuotteiden saamiseksi (Suomen Erityisjäte 2017). Pohjakuonan rakeisuus riippuu käsittelyssä käytetyistä seulako'oista. Vuonna 2018 Ämmäsuolla käsiteltiin Vantaan polttolaitoksen jätteenpolton kuonia, jonka kuonafraktiot olivat 0/5 mm:ä (hieno kuona), 5/12 mm:ä (keskikarkea kuona) ja 12/35 mm:ä (karkea kuona). Kyseisiä jätteenpolton kuonafraktioita käytettiin tässä tutkimuksessa kapillaarisulkurakenteessa ja kahden tiivistyskerroksen runkoaineena.

3.5 Kuonabentoniittiseos

Kuonabentoniittiseoksessa on runkoaineena jätteenpolton pohjakuonaa ja lisäaineena bentoniittia. Materiaali on maabentoniitin kaltainen, mutta runkoaineena oleva maa-aines

on korvattu jätteenpolton kuonalla, mikä asettaa omat vaatimuksensa bentoniitille. Teollisuuden sivutuotteiden kelpoisuus, pitkäaikaiskestävyys, yhteensopivuus bentoniitin kanssa sekä laadun tasaisuus tulee osoittaa, jos tiivistyskerroksessa halutaan käyttää jätemateriaaleja. Jättemateriaalien haitallisten aineiden kokonaispitoisuudet, liukoisuudet ja maatuvuus poikkeavat maa-aineksista. (Infra 15-710194 2018)

Jätteenpolton pohjakuonan hienoaines (0...5 mm:ä) on kaatopaikan pintakerrokseen ominaisuuksiltaan soveltuva materiaali, mutta yksinään se ei täytä tiivistyskerroksen vedenläpäisevyyden vaatimuksia, joten siihen pitää lisätä vedenläpäisevyyttä pienentävää bentoniittia (Puma et al. 2013; Leppänen et al. 2018). Hyvin tiivistetyn jätteenpolton kuonan hienoaineksen vedenläpäisevyys on luokkaa $k = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s (Leppänen et al. 2018). Kun bentoniitti täyttää täysin jätteenpolton pohjakuonan huokostilan, bentoniitilla täytetyt huokokset säätelevät materiaalin vedenläpäisevyyttä. Oikean sekoitussuhteen määrittäminen on tärkeää, jotta koko huokostila täyttyy bentoniitilla. Jos optimisekoitussuhde ylittyy, kuonarakeet eivät ole enää yhteydessä keskenään vaan hajaantuvat omaksi faasikseen bentoniittiin. (Puma et al. 2013) Bentoniitti on kallista, joten sen määrä halutaan kustannussyistä minimoida.

Jos runkoaineena käytetään karkeampaa jätteenpolton pohjakuonaa, jossa on isompia rakeita, tarvitaan bentoniittia enemmän hienojakoiseen pohjakuonaan verrattuna. Jotkut isommat rakeet saattavat olla huokoisia, jolloin bentoniittia tarvitaan vielä enemmän. (Leppänen et al. 2018) Bentoniitin paisumiskyky vähenee, kun bentoniitti on kosketuksessa runsaasti kationeja sisältävien aggressiivisten liuksien kanssa (Puma et al. 2013; Leppänen et al. 2018). Jätteenpolton pohjakuonassa on runsaasti liukoista kloridia, sulfaattia ja kalsiumia, jotka laskevat bentoniitin paisumiskykyä. Todellisten vaikutusten arvioimiseksi bentoniitin paisumis- ja vedenläpäisevyyskoe tulee tehdä veden lisäksi myös uuttoliuosta käyttäen (Leppänen et al. 2018).

Vuonna 2015 Ämmässuon vanhalle kaatopaikalle rakennettiin koerakenne, jossa käytettiin mineraalisenä tiivistyskerroksena jätteenpolton kuonaa, jonka rakeisuus oli 0–2 mm:ä, ja lisäaineena polymeerimodifioitua bentoniittia. Rakenteen tavoitteellinen vedenläpäisevyys k oli $\leq 10^{-9}$ m/s. Ennakkokokeiden perusteella jätteenpolton kuonafraktion 0–2 mm:ä kuivatilavuuspainon tulee olla yli 1300 kg/m^3 , jotta saavutetaan riittävän alhainen vedenläpäisevyys. Mineraalisen tiivistyskerroksen päälle asennettiin kitkapintainen LLDPE-kalvo ja suojageotekstiili. Suojageotekstiili peitettiin murskeella, joka toimi kuivatuskerroksena. Rakenne kaivettiin auki huhtikuussa 2017. Polymeerimodifioitun bentoniitin paisumiskyky oli vähentynyt hienoaineksesta tehdyn paisumiskokeen perusteella eli jätteenpolton kuona oli rapauttanut bentoniittia. Kuonabentoniitin hienoaineksen paisumiskyky oli 3 ml/2g , kun käytetyn bentoniitin paisumiskyky oli ollut ennakkokokeiden perusteella 26 ml/2g . Koerakenteessa kuonabentoniitti on kalvon alla suojassa. Koerakenteen perusteella yhdistelmä rakenne on tehokas pintarakenne. (Leppänen 2018) Yhdessä tässä tutkimuksessa toteutetussa koerakenteessa kuonabentoniittia käytettiin tiivistyskerroksen materiaalina.

3.6 Bitumistabiloitu kuona

Stabilointia käytetään pilaantuneiden maiden kunnostukseen. Toisin kuin monissa kunnostusmenetelmissä stabiloinnissa ei pyritä pienentämään käsiteltävän materiaalin haitta-ainepitoisuutta. Stabiloinnissa pyritään vähentämään haitta-aineiden kulkeutumista ja leviämistä ympäristöön, jolloin haitta-aineiden haitallisuutta vähennetään sitomalla haitta-aineet käsiteltyyn materiaaliin. Stabilointimenetelmät voivat perustua sekä kemiallisiin että fysikaalisiin ilmiöihin. Stabiloinnilla viitataan prosesseihin, joissa haitta-aineista aiheutuvaa riskiä pienennetään muuntamalla haitta-aineet vähemmän toksiseen tai liukoiseen muotoon. Stabiloinnille läheinen prosessi on kiinteytys, jossa sideaineella kapseloidaan haitta-aineet, mikä estää haitta-aineiden kulkeutumisen. Usein kiinteytystä ja stabilointia käytetään synonyymeinä. (Suomen ympäristökeskus 2001b, s.36)

Stabiloinnissa materiaalin lisätään sideainetta kuten bitumia, sementtiä tai kalkkia. Koska käsiteltävän materiaalin ominaisuudet vaihtelevat kohteittain, tulee ennen stabilointia selvittää kullekin materiaalille sopiva sideainesuhde. Reseptöinnin jälkeen koestabiloidulle materiaalille tehdään liukoisuustesti, jolla osoitetaan stabiloidun materiaalin ympäristökelpoisuus. (Suomen ympäristökeskus 2001b, s.36)

Bitumistabilointi soveltuu parhaiten karkearakeiselle ja kuivalle maamateriaalille kuten siltille, hiekalle ja moreenille (Suomen ympäristökeskus 2001b, s.38). Tutkimuksessa bitumistabiloitua jätteenpolton kuonaa, jonka rakeisuus on 0-5 mm:ä, käytettiin yhden koepintarakenteen tiivistyskerroksen materiaalina. Käytetty jätteenpolton kuona vastaa rakeisuuskäyrältään soraista hiekkaa (katso kuva 47). Bitumistabilointi soveltuu etenkin raskasmetalleille (Suomen ympäristökeskus 2001b, s.38). Bitumistabilointi pienentää materiaalin vedenläpäisevyyttä (Kukkamäki 2019). Vedenläpäisevyyden pienentyminen perustuu materiaalin huokostilan pienenemiseen ja bitumikalvojen syntymiseen. Materiaalin vedenläpäisevyys todetaan laboratoriotestien avulla.

Stabilointi parantaa jätteenpolton kuonan fysikaalisia ja teknisiä ominaisuuksia, jolloin kuonan ja bitumin seosta on helpompi tiivistää (Kukkamäki 2019). Stabilointi kasvattaa jätteenpolton kuonan kantavuutta ja muodonmuutoskestävyyttä. Bitumistabiloidun kuonan roudankestävyys paranee, koska bitumi rajoittaa rakenteeseen pääsevän veden määrää. Bitumi sitoo rakeita toisiinsa ja tarpeeksi isona määränä bitumi vähentää sisäistä eroosiota, koska rakenteesta tulee sidottu sitomattoman sijaan.

3.7 Helsinki-moreeni

Ylijäämämaita syntyy Suomessa vuosittain noin 20-30 miljoonaa tonnia, joista pääkaupunkiseudulla syntyy noin neljä miljoonaa tonnia. Suurta osaa ylijäämämaista on teknisten ominaisuuksiensa vuoksi vaikea hyötykäyttää. (Vaara 2011) Vuonna 2018 Helsinki kierrätti maamassoja 750 000 tonnia (Vento 2019). Helsingin alueella muodostuu paljon

ylijäämämaita, joiden joukossa on muun muassa mineraalista purkumateriaalia (tiiltä, betonia) sekä puuta ja stabiloitua savea. Kyseistä ylijäämämaata kutsutaan Helsinki-moreeniksi. Helsinki-moreenia muodostuu uuteen käyttöön otettavien alueiden rakennustyömailta (Huhtinen et al. 2018). Materiaalin hyötykäyttö on haastavaa. Maa-aineserä luokitellaan sekalaiseksi rakennus- ja purkujätteeksi, jos kaivetun maa-aineksen joukossa on huomattava määrä jätettä, jota ei voida erotella erikseen maa-aineksesta. Huomattavan jätemäärän rajaa ei ole yleispätevästi määritelty ja se riippuu jätteen määrästä ja ominaisuuksista. (Huhtinen et al. 2018)

Sekalaisen rakennus- ja purkujätteen ammattimaiseen ja laitospäiväiseen käsittelyyn tarvitaan ympäristölupa, jonka saaminen voi kestää pidempään kuin rakennushankkeessa on mahdollista käyttää. Tämän takia Helsinki-moreeni päättyy usein hyötykäytön sijasta kaatopaikalle. Valtioneuvoston asetuksen (*asetus eräiden maa-ainesjätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa* eli MASA-asetus) taustaselvityksen perusteella rakennusjätettä sisältävä maa-aines olisi pääsemässä osaksi MASA-asetusta, jolloin tiettyjen ehtojen täytyessä Helsinki-moreenia voidaan hyötykäyttää ilmoitusmenettelyllä ympäristöluvan sijaan. (Huhtinen et al. 2018) Tässä tutkimuksessa toteutetuissa koerakenteissa hyödynnettiin Helsinki-moreenia pintakerroksen materiaalina.

3.8 Jätevedenpuhdistamon liete

Pääkaupunkiseudulla syntyy jätevettä noin 130 miljoona kuutiota vuodessa (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2019a), josta kuivattua yhdyskuntajätevesiliettä muodostui vuonna 2018 lähes 88 500 tonnia. Kaikki kuivattu yhdyskuntajätevesiliete toimitettiin jatkojalostukseen (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2019b). Pääkaupunkiseudulla muodostuva lietemäärä on merkittävä, joten sille halutaan löytää hyötykäyttökohteita. Vesilaitosyhdistyksen tekemän selvityksen mukaan vuonna 2016 noin 40 %:a käsitellystä lietteestä hyödynnettiin maataloudessa ja noin 50 %:a viherrakentamisessa. (Suomen Vesilaitosyhdistys 2017)

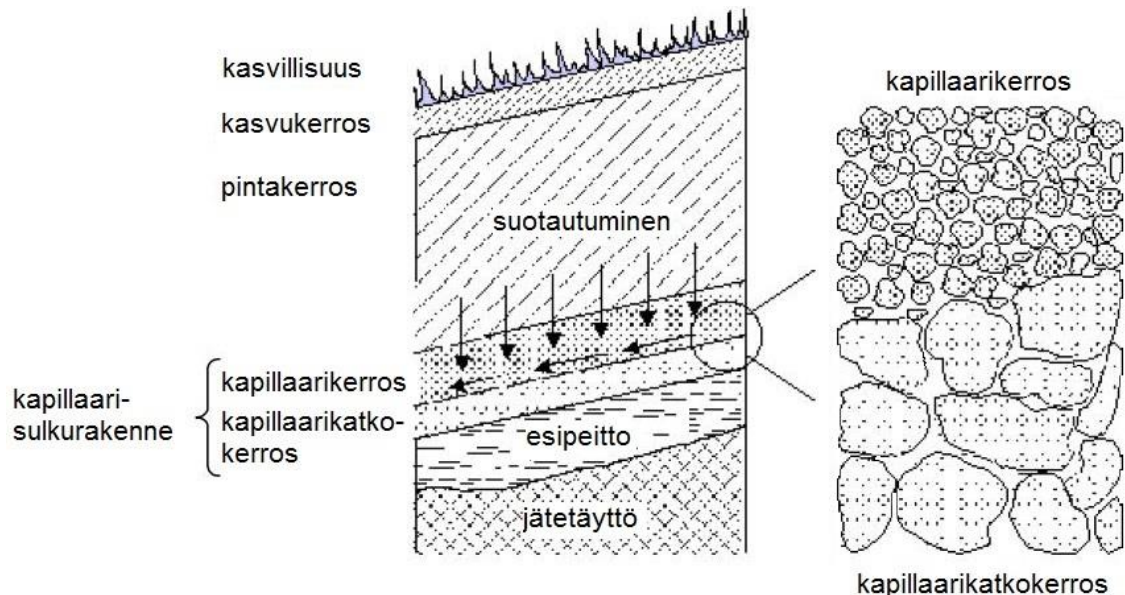
Pääkaupunkiseudulla muodostuvasta yhdyskuntajätevesilietteestä suurin osa jatkojalostetaan maatalous- ja viherrakennuskäyttöön soveltuviksi tuotteiksi kompostoimalla ja lisäämällä kompostoitua lietteeseen lisäaineita, kuten savensekaista hiekkaa, turvetta tai biotiittia (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2019b). Jatkojalostetut mulatuotteet sisältävät eloperäistä ainesta, fosforia ja typpeä, jotka pääsevät hyötykäytön kautta uudelleen kiertoön (Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2019a). Tässä tutkimuksessa toteutetuissa koerakenteissa hyödynnettiin jätevedenpuhdistamon kompostoitua liettä lietekompostiseoksessa, jota käytettiin kahden koerakenteen kasvukerroksessa.

4. KAPILLAARISULKURAKENNE

Kapillaarisulkurakenne on vaihtoehtoinen rakenne, jolla voidaan jossain tapauksissa korvata kaatopaikan pintarakenteen perinteinen tiivistyskerros (Simon & Müller 2004; Gartung et al. 2010) tai toteuttaa väliaikainen pintarakenne. Kapillaarisulkurakenteessa hyödynnetään hienorakeisen maa-aineksen vedenpidätyskykyä, eri partikkelikokoa olevien rakennekerroksien rajapinnassa olevia kapillaarivoimia sekä osittain vedellä kyllästyneen kerroksen vedenläpäisevyyttä (Parent & Cabral 2006).

4.1 Rakenne

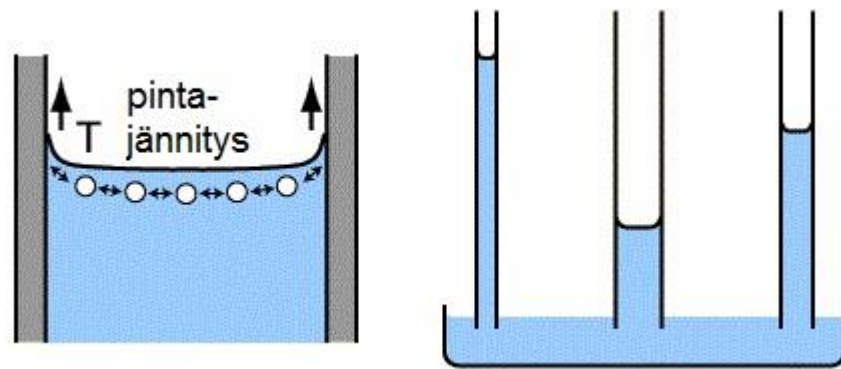
Kapillaarisulkurakenne koostuu kahdesta rakeisesta kaltevasta kerroksesta (Kämpf & Montenegro 1997; Simon & Müller 2004; Parent & Cabral 2006; Gartung et al. 2010; Zhan et al. 2010), joista yläpuolinen on hienojakoisempi kapillaarikerros ja alapuolinen karkearakeisempi kapillaarikatkokerros (Kuva 9). Kerrosten raekokojen (huokoskoon) välillä pitää olla riittävä ero. (Kämpf & Montenegro 1997; Simon & Müller 2004; Parent & Cabral 2006) Kapillaarisulkurakenteen päällä on paksu pintakerros, joka pidättää suotautunutta sadevettä ja tasaa suotautumista kapillaarisulkurakenteeseen (Kämpf & Montenegro 1997).



Kuva 9. Kaatopaikan pintarakenne kapillaarisulkurakenteella (muokattu lähteestä Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010). Ero kapillaari- ja kapillaarikatko-kerrosten rakeisuuksien välillä on merkittävä.

4.2 Toimintaperiaate

Vedellä on kyky nousta kapillaarisesti ohuissa huokosissa ja putkissa (Kuva 10), mikä johtuu veden ja ympäröivän seinämän välisestä vetovoimasta ja veden pintajännityksestä. Veden ja seinämän välinen adheesio nostaa vedenpinnan kaarelle ja pintajännitys pyrkii samalla oikaisemaan vedenpinnan, mikä saa veden nousemaan ylöspäin maan huokosten muodostamassa monimutkaisessa kapillaariputkistossa. Lopulta vedenpintaa ylöspäin vetävä voima on tasapainossa muodostuneen vesipatsaan painon kanssa, jolloin kapillaarinen nousukorkeus on saavutettu. Kapillaarinen nousukorkeus on kääntäen verrannollinen huokosen halkaisijaan ja halkaisija on verrannollisen maa-aineksen raekokoon eli mitä pienempi raekoko sitä korkeammalle vesi nousee kapillaarisesti. (Jääskeläinen 2009, s. 38)

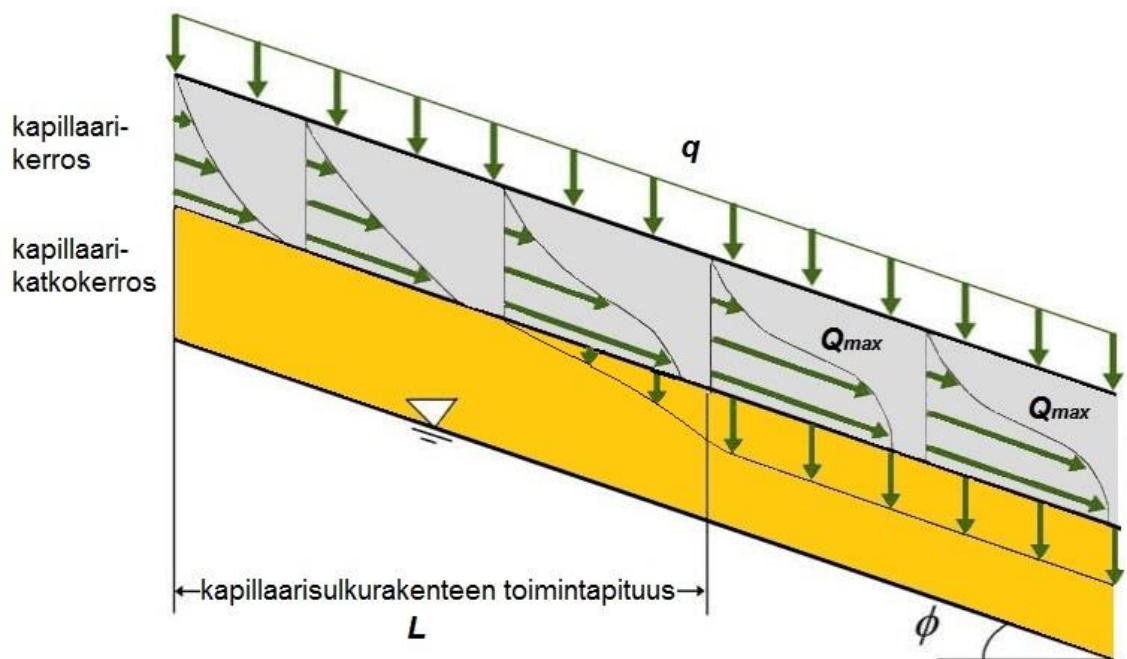


Kuva 10. Kapillaari-ilmiö johtuu nesteen pintajännityksestä sekä nesteen ja ympäröivien seinämien välisestä vetovoimasta. Kapillaarinen nousukorkeus on kääntäen verrannollinen putken halkaisijaan, minkä vuoksi kapeimmassa putkessa vesi nousee korkeimmalle. (muokattu lähteestä Nave 2018)

Vedellä osittain kyllästyneissä olosuhteissa kerrosten rajapinnan suuri huokoskokojen ero saa veden pidättymään kapillaarisesti kapillaarikerrokseen ja osa suotautuneesta vedestä virtaa painovoimaisesti kaltevassa kerrosten rajapinnassa kohti luiskan alaosaa. Veden virratessa luiskan kaltevuuden suunnassa virtaavan veden tilavuus kasvaa kapillaarikerroksessa kapillaarikatkokerroksen ollessa lähes kuiva. (B. Ross 1990; Kämpf & Montenegro 1997; Parent & Cabral 2006). Osittain kyllästyneessä rakenteessa kerrosten rajapinnassa vallitsee negatiivinen huokosvedenpaine (Stormont & Morris 1997; Rahardjo et al. 2012) eli matriisi-imupaine, kun huokosissa on runsaasti ilmaa. Tiettyyn matriisi-imupaineeseen saakka kapillaarikatkokerros on käytännössä kuiva. (Rahardjo et al. 2012)

Kapillaarikerroksen vedenläpäisevyys kasvaa kyllästysasteen funktiona. Se voi olla useita kertaluokkia suurempi kuin kapillaarikatkokerroksen vedenläpäisevyys (Kämpf & Montenegro 1997). Lopulta kapillaarikerroksen huokokset kyllästyvät vedellä, jolloin matriisi-imupaine pienenee ja kapillaarivoimat eivät enää pysty pidättelemään vettä, jolloin vesi pääsee suotautumaan kapillaarikatkokerrokseen (Kuva 11tso kuva 11) (Rahardjo et

al. 2012). Tässä kohdassa rakenteen vedenpoistokapasiteetti Q_{max} eli maksimaalinen vaakasuuntainen virtaus on saavutettu (B. Ross 1990; Kämpf & Montenegro 1997; Parent & Cabral 2006). Kapillaarisulkurakenne ei enää pysty ohjaamaan suotautuvaa vettä kohti luiskan alaosaa, vaan kapillaarikerrokseen suotautuva vesimäärä q suotautuu kokonaan kapillaarikatkokerrokseen, joten rakenteen läpimurtopiste on saavutettu (B. Ross 1990; Parent & Cabral 2006). Kapillaarisulkurakenne ei toimi enää kapillaarikatkona, vaan kuivatuskerroksena (Rahardjo et al. 2012). Kohtisuora etäisyys luiskan yläosasta läpimurtopisteeseen on kapillaarisulkurakenteen toimintapituus L ja ϕ on luiskan kaltevuus (Parent & Cabral 2006).



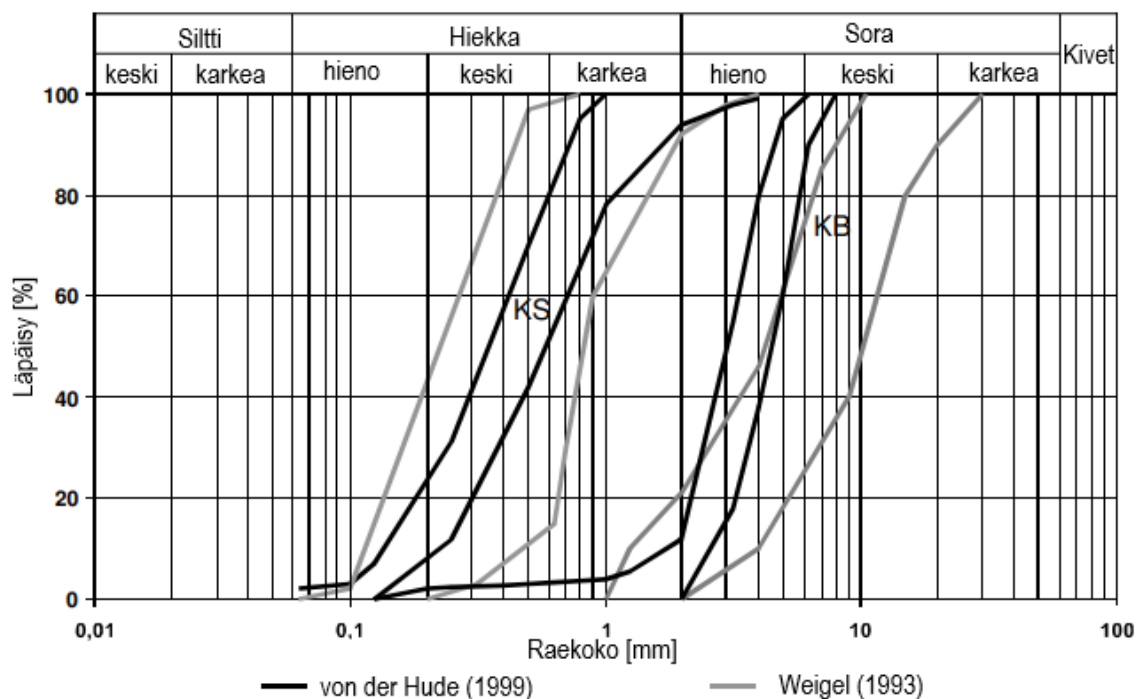
Kuva 11. Kapillaarisulkurakenteen toimintaperiaate (muokattu lähteestä Parent & Cabral 2006). Kuvassa ei ole esitetty muita pintarakenteen osia.

Kapillaarisulkurakenne toimii tehokkaasti, jos kerrosten rakeisuusjakaumat on valittu huolella, kaltevuus ja luiskan pituus ovat riittävät ja kapillaarikerroksen vedenläpäisevyys on tarpeeksi suuri kerrokseen suotautuvaan vesimäärään nähden (Simon & Müller 2004). Rakenteen mitoittaminen perustuu pitkälti vedenpoistokapasiteetin mitoittamiseen, jonka perusteella muut ominaisuudet määritetään (Kämpf & Montenegro 1997). Tavanomaiseen pintarakenteeseen verrattuna kapillaarisulkukerroksen vaatima vähimmäiskaltevuus on suurempi eli noin 8° ($\approx 1:7$), jotta vesi pystyy virtaamaan kerrosten rajapinnassa (Gartung et al. 2010, s. 200; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010). Rakenteen maksimikaltevuuden määrittää luiskan stabiileetti (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010). Rakenteen vedenpoistokapasiteetin on todettu olevan lineaarisesti riippuvainen luiskan kaltevuudesta ϕ (Kämpf et al. 2003).

4.3 Materiaalit ja kerrospaksuudet

Kapillaarikerros tehdään yleensä lajittuneesta hienorakeisesta hiekasta. *Saksan geoteknisen yhdistyksen (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik eli DGGT)* ohjeen mukaan tarpeeksi hyvä vaakasuuntainen vedenjohtavuus on usein tasarakeisella hiekalla, joka sisältää hyvin vähän hienoa silttiä tai savea. Erityistapauksissa myös jättemateriaalit voivat soveltua kapillaarikerrosmateriaaliksi. Materiaali ei saa sisältää orgaanista ainesta eikä suuria pitoisuuksia kalkkia ja liukoisia aineita. Kerroksen toiminnalliset ominaisuudet huomioiden kapillaarikerroksen vähimmäispaksuutena voidaan pitää 0,30 m:ä. (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010)

Kapillaarikatkokerrokseen soveltuu tasarakeinen sora, joka ei sisällä hienoainesta. Tiettyissä tapauksissa myös jättemateriaalit voivat soveltua kapillaarikatkokerrokseen. Materiaalin tulee olla rapautumista ja mekaanista rasitusta kestävää sekä mahdollisimman vähähuokoista. Rakennekerrospaksuuden tulee olla vähintään 0,15 m:ä. (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010) Kapillaarikerroksen ja kapillaarikatkokerroksen ohjeelliset rakeisuusalueet on esitetty kuvassa 12. Kuvassa on esitetty ohjeelliset rakeisuudet kahdesta eri tutkimuksesta.

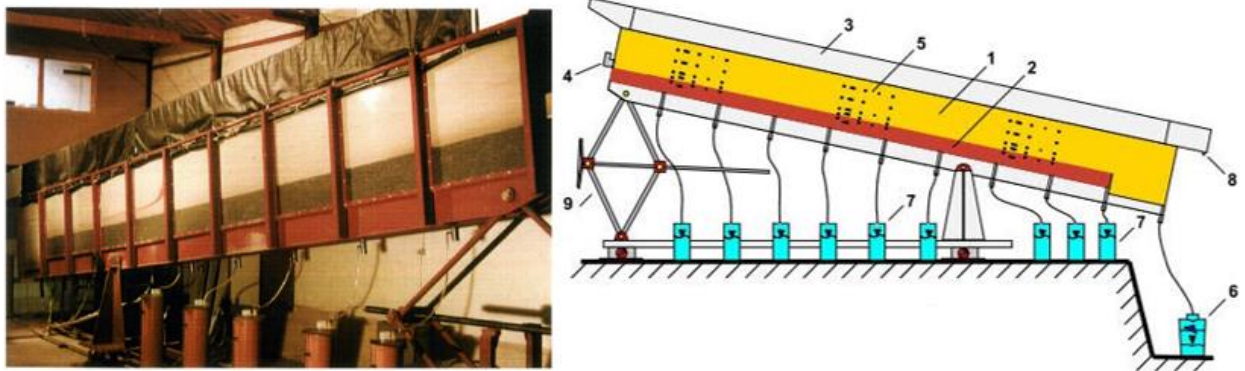


Kuva 12. Kapillaarikerroksen (KS = Kapillarschicht) ja kapillaarikatkokerroksen (KB = Kapillarblock) ohjeelliset rakeisuudet kahden eri tutkimuksen perusteella. Mustilla viivoilla rajatut alueet kuvaavat von der Hude (1999) mukaisia rakeisuuksia ja harmailla viivoilla rajatut alueet kuvaavat Weigel (1993) mukaisia rakeisuuksia. (muokattu lähteestä Pfeiffer 2006, s. 76)

Rakennekerrospaksuudet tulee osoittaa riittäviksi ennakkokokeilla. Kapillaarisulkurakenteisiin liittyvät kokeet tehdään kolmessa vaiheessa. Ensin materiaalien ominaisuudet

tutkitaan laboratoriossa. Toisessa vaiheessa valittujen materiaalien yhteensopivuus ja rakenteen toiminta tutkitaan kaltevassa koejärjestelyssä (kaatokaukalo), joka on esitetty kuvassa 13. (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010) Oikeanpuoleisessa kuvassa numeroidut osat ovat:

1. kapillaarikerros,
2. kapillaarikatkokerros,
3. yläpuolinen kastelujärjestelmä,
4. päädyn kastelujärjestelmä,
5. antureita,
6. kapillaarikerroksen vesienkeräysastia,
7. kapillaarikatkokerroksen lohkoittaiset vesienkeräysastiat,
8. yläpuolisen kastelujärjestelmän ylivuoto &
9. tunkki kaltevuuden säätöä varten (Berger 2018).



Kuva 13. Kalteva koejärjestely, jossa todetaan kapillaarisulkurakenteeseen valittujen materiaalien yhteensopivuus. Vasemmalla tummemmasta materiaalista tehty kerros on kapillaarikatkokerros ja vaaleampi on kapillaarikerros. (Berger 2018)

Kolmannessa vaiheessa rakennetaan kenttäkoerakenne. Kenttäkoerakenteen vähimmäiskoko on 4 m x 20 m:ä. (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik 2010)

4.4 Vedenjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä

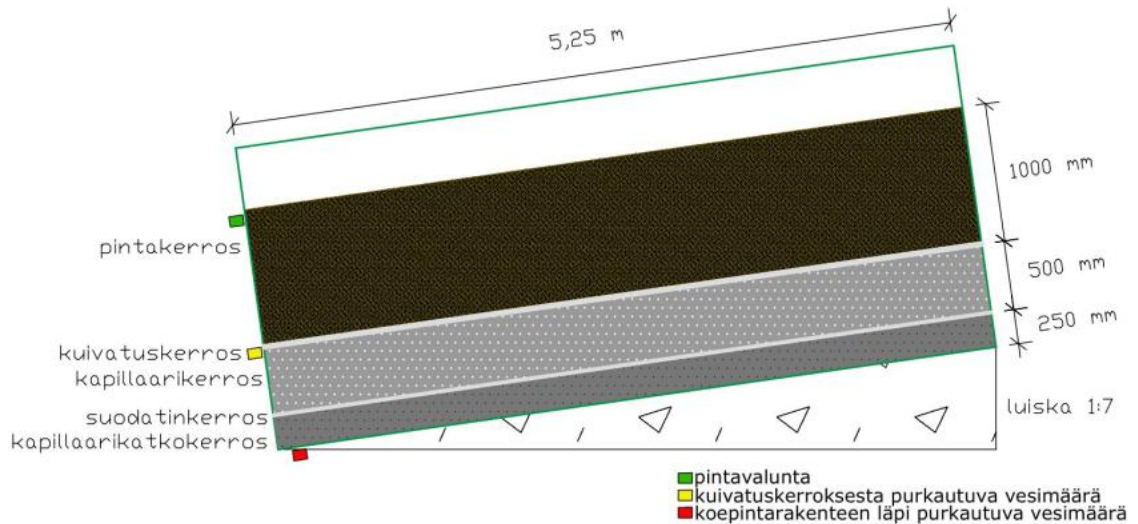
Lämpötilalla on merkittävä vaikutus maan hydraulisiin ominaisuuksiin (Nielsen et al. 1986, Kämpf & Montenegro 1997 mukaan). Lämpötilalla on todettu olevan huomattava vaikutus kapillaarisulkurakenteen virtausprosesseihin (Kämpf & von der Hude 1995, Kämpf & Montenegro 1997 mukaan). Lämpötilan muutokset vaikuttavat veden ominaisuuksiin. Lämpötilan noustessa veden viskositeetti eli kyky vastustaa virtaamista heikkenee ja tiheys pienenee. (Brunner 2014) Ilmaston lisäksi kaatopaikan pintarakenteen lämpötilaan vaikuttaa kaatopaikkakaasujen muodostuminen ja purkautuminen (Infra 15-710194 2018).

Tavanomaiseen saviseen pinnan tiivistyskerrokseen verrattuna kapillaarisulkurakenteella ei ole kuivumisen tai halkeilun vaaraa. Rakenteen toimintateho riippuu ilmasto-olosuhteista, kuten sadannan intensiteetistä ja rakenteen kuivumisen ja kastumisen välisestä ajasta. Kapillaarikerros voi hienojakoisuutensa vuoksi tukkeutua, juuret voivat tunkeutua rakenteeseen, (Simon & Müller 2004) rakenteeseen voi saostua kivennäisaineita ja huokostilaan voi kasvaa mikrobeja, mitkä muuttavat materiaalien huokoisuutta ajan myötä ja pienentävät vedenjohtavuutta (Gartung et al. 2010). Kerrosten välinen huokoisuuksien ero ei saa muuttua epätoivotusti, jotta rakenne toimisi halutulla tavalla, joten rakeiden pitää olla tarpeeksi pysyviä (Gartung et al. 2010).

4.5 Käyttökokemuksia

Useita kapillaarisulkurakenteita ja koekenttiä on toteutettu rakenteen pitkäaikaistoiminnan selvittämiseksi. Kapillaarisulkurakenteen keskimääräinen hinta on ollut noin 20 €/m² (Melchior & Steinert 2001, Simon & Müller 2004 mukaan). ”Tavanomaisen” pintarakenteen hinta on noin 50-150 €/m² (Hoins 1999; Weand et al. 1999, Simon & Müller 2004 mukaan). Kapillaarisulkurakenteen on todettu toimivan erinomaisena pinnan tiivistyskerroksena keskieuropalaisissa sääolosuhteissa (Kämpf & Montenegro 1997). Yleisesti on ajateltu, että kapillaarisulkurakenne toimii tehokkaasti vain kuivassa tai melko kuivassa ilmastossa (Zhan et al. 2010). Alustavien laboratoriokokeiden ja numeerisien tutkimusten mukaan kapillaarisulkurakenne soveltuu myös verrattain kosteaan ilmastoon (Rahardjo et al. 2007, Zhan et al. 2010 mukaan).

HSY teetti vuonna 2017 hallissa lavalysimetrikokeita, joissa tutkittiin jätteenpolton kuonafraktioiden 0-4 mm:ä ja 4-12 mm:ä käyttäytymistä kapillaarisulkurakenteessa. Kokeita tehtiin yhteensä neljä ja niissä testattiin erilaisia materiaaliyhdistelmiä. Leikkauskuva kahdesta ensimmäisestä koepintarakenteesta on esitetty kuvassa 14. Kaikissa kokeissa kapillaarikatkerros rakennettiin jätteenpolton kuonafraktiosta 4-12 mm:ä ja kapillaarikerros kuonafraktiosta 0-4 mm:ä. Kerrokset erotettiin toisistaan suodatinkankaalla. Kahdessa kokeessa oli pintakerroksen lisäksi kuivatuskerros salaojamatosta. Pintakerroksessa käytettiin kolmea erilaista materiaalia: Helsinki-moreenia, hiekoitushiekka-kivituhkaseosta ja inframultaa. Lavalysimetrin kaltevuus oli 1:7 ja pinta-ala 12,3 m². Rakenteita kasteltiin kastelupistoolilla tai sadettajilla. (Kurikkala 2018)



Kuva 14. Kahden ensimmäisen koepintarakenteen leikkauskuva lavalysimetrin sivulta (Kurikkala 2018).

Tutkimustulosten perusteella kapillaarisulkurakenteella ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta pintarakenteen läpi suotautuvaan vesimäärään. Kapillaarikerroksessa käytetyn jätteenpolton kuonafraktion 0-4 mm:ä läpi ei juurikaan suotautunut vettä. Huonosti vettäläpäisevästä Helsinki-moreenista tehty pintakerros vähensi vesien suotautumista alapuolisiin kerroksiin tehokkaasti. Pintakerroksessa käytetty hyvin vettäläpäisevä hiekoi-tushiekka-kivituhkaseos osoitti salaojamaton toimivan hyvin kuivatuskerroksena. Kuiva-tuskerroksen jättäminen pois johti veden purkautumiseen kapillaarikerroksen yläpintaa pitkin. Tutkimusten perusteella jätteenpolton kuonafraktio 0-4 mm:ä saattaa soveltua 1:7 kaltevuudessa tiivistyskerrokseksi tai sen osana käytettäväksi materiaaliksi lähellä opti-mivesipitoisuutta tiivistettynä etenkin, jos sen päällä on huonosti vettäläpäisevä pintakerros. (Kurikkala 2018) Lavalysimetrin (kuva 15) pitkittäissuuntainen pituus oli vain 5,25 m:ä (Kurikkala 2018), joka on todella pieni todelliseen kaatopaikan pintarakenteeseen verrattuna.



Kuva 15. HSY:n kokeissa käytetty lavalysimetri, joka on rakennettu vanhasta jätelavasta. Lavan kyljessä on ikkunat, joista voi voidaan havainnoida kapillaari-ilmiötä. (Kurikkala 2018)

5. TUTKIMUSKOHDE

5.1 Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus

Ämmässuo on Pohjoismaiden suurin kaatopaikka (Moisio 2009). Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus sijaitsee osoitteessa Ämmässuontie, 02820 Espoo (Aluehallintovirasto 2012). Jätteenkäsittelykeskus sijaitsee osittain myös Kirkkonummen kunnan alueella. Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus otettiin käyttöön vuonna 1987 seudullisena yhdyskuntajätteen kaatopaikkana. Ämmässuosta tuli pääkaupunkiseudun ainoa yhdyskuntajätteen kaatopaikka 1990-luvun alussa. (Uuksulainen et al. 2018)

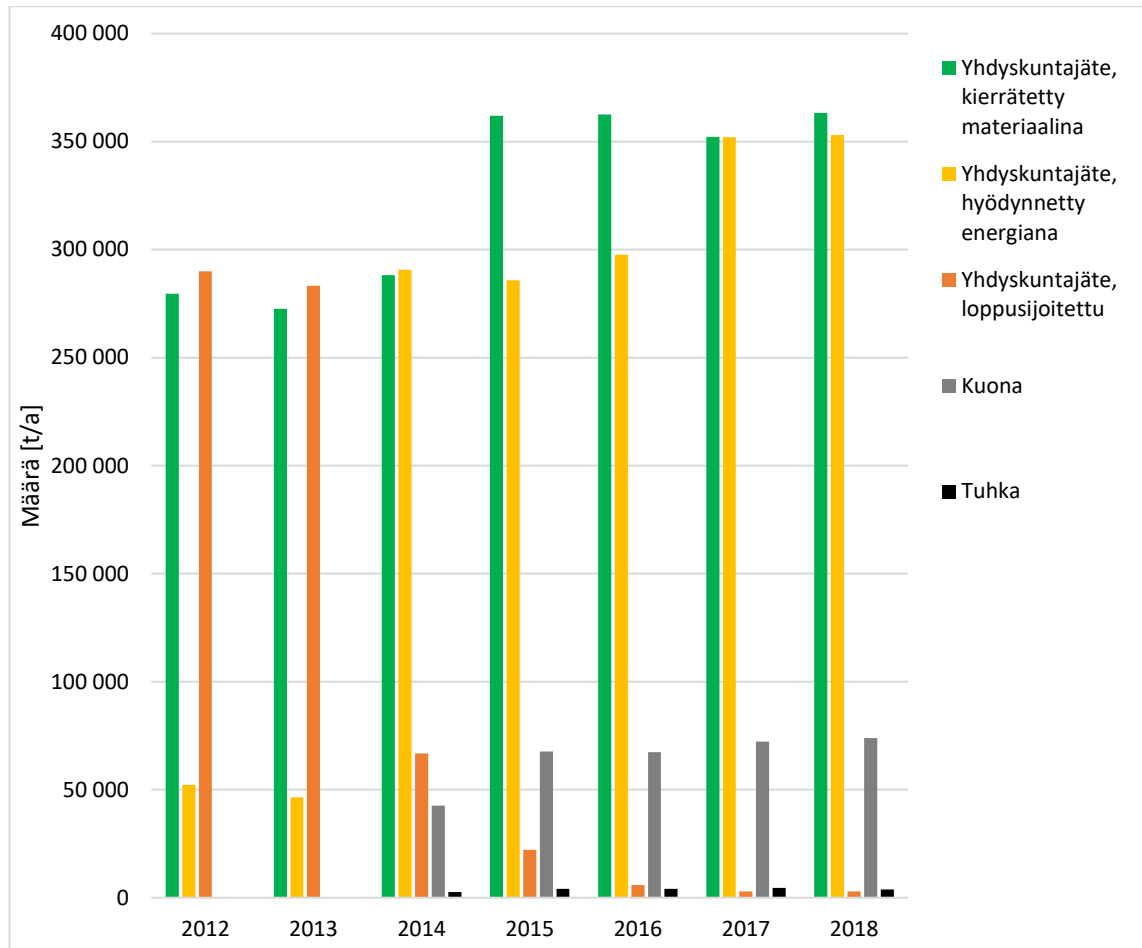
Kaatopaikka koostuu vanhasta ja uudesta kaatopaikasta. Ämmässuon vanhan kaatopaikan käyttö loppui vuonna 2007, koska kaatopaikan pohjarakenteet eivät täyttäneet uuden lainsäädännön vaatimuksia (Uuksulainen et al. 2018). Lokakuussa 2007 loppui siirtymäaika kyseisen päätöksen täytäntöönpanoon. Vanhan kaatopaikan pinta-ala on noin 53 hehtaaria ja sinne sijoitettu jätemäärä on noin 11 miljoonaa tonnia. Vanhan kaatopaikka-alueen väliaikaiset pintarakenteet valmistuivat lokakuussa 2010. Vanhan kaatopaikan sulkemisen aikoihin otettiin käyttöön Ämmässuon uusi kaatopaikka, jonka täyttöalueen pinta-ala on noin 55 hehtaaria. (Uuksulainen et al. 2018) Tähän diplomityöhön liittyvät koerakenteet sijaitsevat uuden kaatopaikan kaakkoisosassa (Kuva 16).



Kuva 16. Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus (Helsingin seudun ympäristöpalvelut – kuntayhtymä 2018a). Koerakenteiden sijainti on merkitty punaisella.

Keväästä 2014 alkaen HSY:n keräämä sekajäte on kaatopaikkasijoituksen sijasta viety Vantaan Energian jätevoimalaan, jossa jäte poltetaan ja hyödynnetään energiana ja lämpönä. Jätevoimalaan tuodaan jätettä pääkaupunkiseudun lisäksi Uudeltamaalta. Jätevoimala polttaa vuodessa noin 320 000 tonnia jätettä. (Kontturi 2016) Vuonna 2018 Vantaan Energia Oy:n jätevoimalasta peräisin olevaa raakakuonaa otettiin Ämmässuolla vastaan

noin 74 000 tonnia ja jätteenpolton kuonaa käsiteltiin noin 83 000 tonnia. Käsittelyn jälkeen kuonaa jäi varastoon noin 30 000 tonnia. Pääkaupunkiseudulla syntyvän yhdyskuntajätteen määrää on verrattu jätteenpoltosta syntyvän kuonan ja tuhkan määrään kuvassa 17. Jätteenpolton kuonasta otetaan talteen magneettiset ja ei-magneettiset metallit hyötykäyttöä varten. Lentotuhka stabiloidaan ja loppusijoitetaan Ämmäsuolla sitä varten rakennettuun vaarallisen jätteen soluun. (Korhonen et al. 2019)



Kuva 17. Pääkaupunkiseudulla syntyvä yhdyskuntajäte hyödyntämistavoittain ja Vantaan Energian jätevoimalasta HSY:n vastaanottamat jätteenpolton kuona- ja tuhkamäärät (luvut lähteistä Uuksulainen et al. 2018; Korhonen et al. 2019; Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä 2019c). Jätevoimala on aloittanut toimintansa vuonna 2014.

Vuonna 2018 Ämmäsuolla loppusijoitettiin jätettä 3 444 tonnia, joka on noin 0,8 %:a Ämmäsuon jätteenkäsittelykeskuksen vastaanottamasta jäte- ja maamäärästä, joka oli vuonna 2018 hieman yli 430 000 tonnia (Korhonen et al. 2019). Ämmäsuon painopiste on siirtynyt jätteen loppusijoituksesta jätteiden jalostukseen ja kiertotalouden edistämiseen (Uuksulainen et al. 2018). Ämmäsuolla tehdään biojätteestä multaa ja biokaasua, käsitellään jätevoimalan kuonaa ja tuhkaa, kerätään ja hyödynnetään kaatopaikkakaasua, käsitellään pilaantuneita maita ja lajitellaan jätekuormia sekä toimitetaan materiaaleja uusiokäyttöön. Ämmäsuon ekoteollisuuskeskuksen alueella toimii lisäksi useita yrityksiä,

joiden toiminta perustuu teollisiin symbiooseihin. Alueella hyödynnetään ja jalostetaan monipuolisesti materiaaleja. Yritysten ja muiden toimijoiden toimesta alueella hyödynnetään muun muassa kierrätysasfalttia asfaltissa, käsitellään purkubetonia ja välivarastoidaan hyötykäytettäviä maa-aineksia kiviainestermiinalissa. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä 2018a)

5.2 Ympäristöluvan vaatimuksen pintarakenteelle

Ympäristönsuojelulain liitteen 1 taulukon 1 kohdan 13 mukaan kaatopaikalle, jätteen ammattimaiselle tai laitospäiväiselle hyödyntämiselle tai käsittelylle on oltava ympäristölupa (YSL 527/2014). *Valtioneuvoston asetuksen ympäristönsuojelusta* § 34 mukaan ympäristöluvan myöntää joko valtion ympäristölupaviranomainen tai kunnan ympäristönsuojeluviranomainen toiminnan laajuudesta ja luonteesta riippuen. Kaatopaikalle luvan myöntää aluehallintovirasto (VNa 713/2014 2014). Ämmässuon ympäristöluvassa (Aluehallintovirasto 2012) on annettu muun muassa kaatopaikan käytön lopettamista ja sulkemista koskevia määräyksiä. Vanhaa kaatopaikkaa koskevat määräykset ovat B.1.-B.15. (Aluehallintovirasto 2012).

Ympäristöluvan (B.7.) mukaan kaatopaikan tai sen osan pinta on muotoiltava, tasoitettava ja maisemoitava väliaikaisin pintarakentein, kun lopullinen täyttökorkuus on saavutettu. Väliaikaisten pintarakenteiden tulee estää mahdollisimman hyvin kaatopaikkakaasujen purkaantuminen ilmaan ja suotovesien muodostuminen. Kohdan B.8. mukaan väliaikaisten pintarakenteiden päälle on rakennettava lopullinen pintarakenne siten, että muodostuu seuraavat rakennekerrokset alhaalta ylöspäin lueteltuina: kaasunkeräyskerros ($\geq 0,3\text{m}$), tiivistyskerros, kuivatuskerros ($\geq 0,5\text{m}$) ja pintakerros. Väliaikainen pintakerros voi olla osa lopullista pintarakennetta. (Aluehallintovirasto 2012)

Orgaanisen aineksen hajoamisesta ja jätetäytön tiivistymisestä aiheutuvat painumat aiheuttavat jännityksiä ja muodonmuutoksia jätetäytön päällä oleviin rakenteisiin. Rakenteiden kestävyys kannalta on parempi, että lopulliset rakenteet rakennetaan vasta jätetäytön riittävän painumisen jälkeen, jotta rakenteet pysyvät ehjinä (Ympäristöministeriö 2008). Kun jätetäytön riittävästä painumisesta on varmistuttu, on rakennettava kaatopaikan pintarakenteen lopulliset rakennekerrokset (Aluehallintovirasto 2012).

Ympäristölupapäätöksen (B.9.) mukaan pintarakenteen mineraalisen tiivistyskerroksen tulee olla vähintään 0,5 m:n paksuinen ja sen vedenläpäisevyyskerroin (k) tulee olla $\leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Tiivistysrakenteen vaurioituminen rakentamisen aikana ja rakentamisen jälkeen pitää estää asianmukaisesti. (Aluehallintovirasto 2012)

Kuivatuskerroksen materiaalin vedenläpäisevyyskerroin tulee olla $\geq 1 \cdot 10^{-3}$ m/s (B.10.). Kuivatuskerroksen rakeisuus huomioiden rakenteen pinta tulee suojata kuivatuskerroksen tukkeutumisen välttämiseksi. Kuivatuskerroksen päälle tulee tehdä vähintään 1 m:n paksuinen pintakerros. Viimeistellylle alueelle istutetaan tai kylvetään kohteeseen

sopiva kasvillisuus. Kasvillisuuden juuristo ei saa vaarantaa pintarakenteen toimivuutta. (Aluehallintovirasto 2012)

Ympäristöluvan (B.2.) mukaan kaatopaikan pintarakenteissa voidaan käyttää asfaltti-, betoni- ja tiilijätettä, rakennusjätteen käsittelyrejektia, joka ei sisällä roskaantumista aiheuttavia jätemateriaaleja, kompostia kasvukerroksessa, puhtaita maa- ja kiviaineksia, tavanomaisiksi jätteiksi luokiteltavia maa- ja kivennäisjätteitä, jätteenkäsittelylaitoksessa käsiteltyä tavanomaiseksi jätteeksi luokiteltuja pilaantuneita maita sekä tavanomaiseksi jätteeksi luokiteltavaa voimalaitosten ja jätteenpolton kuonaa. Vain kompostin osalta on määritelty, missä kerroksessa sitä voidaan hyödyntää. Maa- ja kiviainesjätteiden sekä pilaantuneiden maiden sisältämien haitallisten aineiden pitoisuudet pitää olla alle maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistamistarpeen arvioinnissa annetussa valtioneuvoston asetuksessa (214/2007) ilmoitettujen ylempien ohjearvojen. (Aluehallintovirasto 2012) Ylemmät ohjearvot on esitetty alempien ohjearvojen kanssa taulukossa 3 metallien ja puolimetallien osalta.

Jätettä saa käyttää kaatopaikkarakenteissa vain, jos jäte on käyttötarkoitukseen teknisesti soveltuvaa eikä sen käytöstä aiheudu ympäristölle haittaa tai vaaraa. Pilaantuneiden maiden kaatopaikkakelpoisuus on erikseen osoitettava, jos niiden maa-aineksen sisältämät haitta-aineiden pitoisuudet ylittävät maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista annetun valtioneuvoston asetuksen (214/2007) alemmat ohjearvot. (Aluehallintovirasto 2012) Ohjearvot ovat esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. *Maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnissa käytettävät metallien ja epämetallien pitoisuudet (VNa 214/2007 2007).*

Haitta-aine	Kynnysarvo (mg/kg)	Alempi ohjearvo (mg/kg)	Ylempi ohjearvo (mg/kg)
Antimoni (Sb)	2	10	50
Arseeni (As)	5	50	100
Elohopea (Hg)	0,5	2	5
Kadmium (Cd)	1	10	20
Koboltti (Co)	20	100	250
Kromi (Cr)	100	200	300
Kupari (Cu)	100	150	200
Lyijy (Pb)	60	200	750
Nikkeli (Ni)	50	100	150
Sinkki (Zn)	200	250	400
Vanadiini (V)	100	150	250

Pintarakenteen tiivistyskerroksen päällä olevien kerroksien rakentamiseen on käytettävä maa-aineksia, jotka sisältävät haitta-aineita vähemmän kuin maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista annetussa valtioneuvoston asetuksessa (214/2007) on määritetty alempien ohjearvojen mukaiseksi pitoisuudeksi. Pintarakenteissa hyödynnet-

tävien pilaantuneiden maiden pölyäminen ja huuhtoutuminen sadevesien mukana on es-tettävä rakennusvaiheessa suojaamalla pilaantuneet maa-ainekset tuulelta ja sateelta. (Aluehallintovirasto 2012)

5.3 Tutkimushanke

Tämä diplomityö on osa HSY:n kehitysprojektia *Kaatopaikan väliaikaisten pintarakenteiden vertailu- ja suunnitteluprojekti*. Projektin tarkoituksena on selvittää uusiomateriaalien ja rakentamisesta muodostuvien kaivumaiden hyötykäyttöä kaatopaikan väliaikaisessa pintarakenteessa. Tutkittavia materiaaleja ovat jätteenpolton kuona, erilaiset jätteenpolton kuonan seokset, jätevedenpuhdistamon lietteestä valmistettu lietekomposti-seos ja Helsinki-moreeni. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä 2017)

Tutkimushankkeen avulla kehitetään uusiomateriaalien hyödyntämismahdollisuuksia. Projektin tuloksia on tarkoitus hyödyntää kaatopaikan väliaikaisten pintarakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen kaatopaikalla. Nykyinen jätteenkäsittelykeskuksen ympäristöluva edellyttää, että vuoden kuluttua täytön päättymisestä kullakin täyttöalueella pitää rakentaa väliaikainen pintarakenne. Lopulliset pintarakenteet rakennetaan vasta, kun täyttö on painunut tarpeeksi. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä 2017)

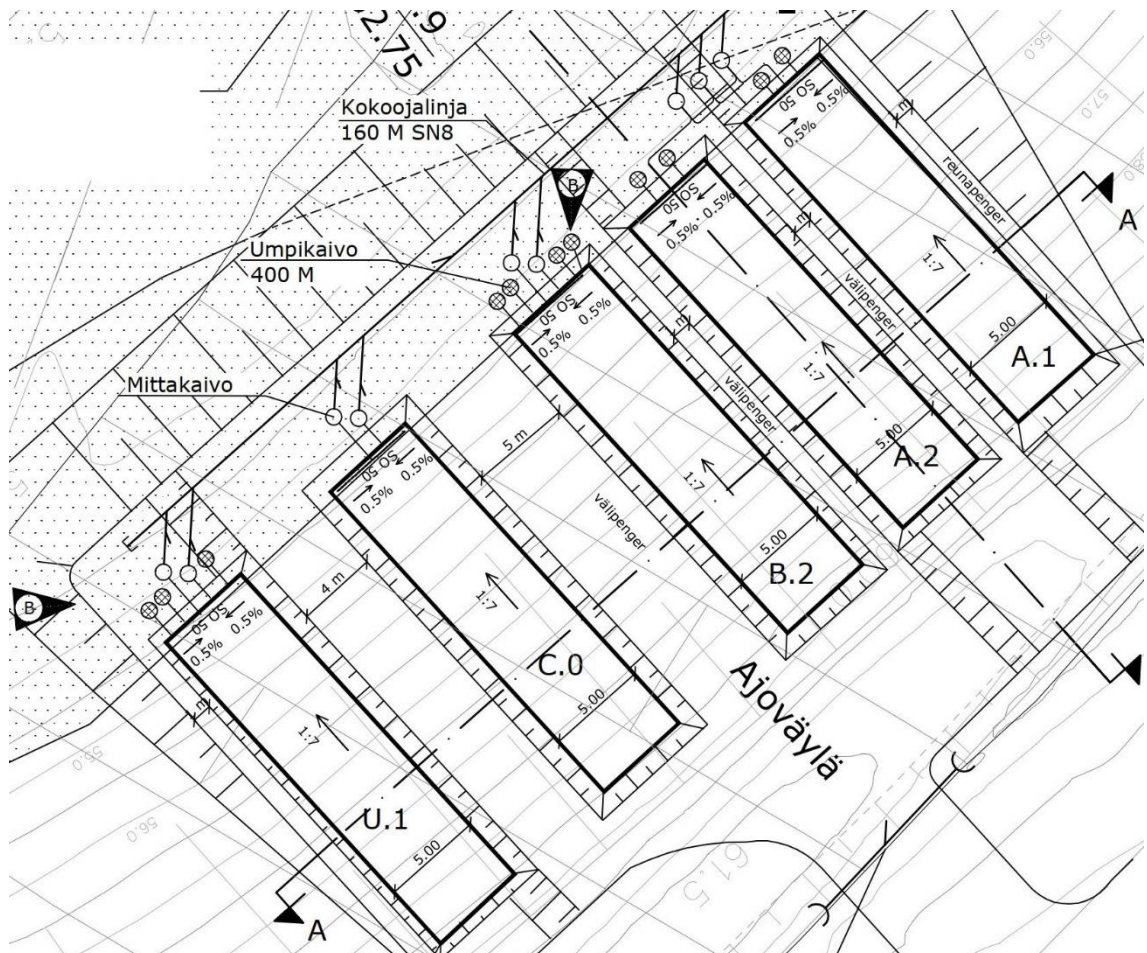
Koska jätteenpolton kuonaa, jätevedenpuhdistamon lietettä ja ylimääräisiä kaivuumaita syntyy pääkaupunkiseudulla suuret määrät, on niiden hyödyntäminen väliaikaisissa pintarakenteissa teknistaloudellisesti järkevää. Vaikka väliaikainen pintarakenne voi olla osa lopullista pintarakennetta, on järkevää käyttää jätteenkäsittelyalueen omia materiaaleja neitseellisten kiviainesten sijaan. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon, että lopullinen pintarakenne on myöhemmin mahdollista toteuttaa väliaikaisen pintarakenteen päälle (Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä 2017). Väliaikaiset pintarakenteet tulee suunnitella niin, että niistä ei aiheudu vaarallisia liukupintoja. Koska väliaikainen pintarakenne painuu, tulee rakenteen suunnittelussa ottaa huomioon, että väliaikaisen pintarakenteen päälle pystytään toteuttamaan muotoilutäyttö soveltuvalla materiaalilla ennen lopullisen pintarakenteen rakentamista. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä 2017)

Diplomityön osuus tutkimushankkeesta on vuonna 2018 rakennettujen viiden koerakenteen rakentamisen dokumentointi, rakentamisenaikaisen laadunvalvonnan (tiivistystarkkailu- ja laboratoriokokeet) toteuttaminen ja raportointi, ensimmäisen seurantajakson instrumentoimisen avulla kerättyjen mittaustulosten raportointi ja vedenlaatutulosten oleellisimpien asioiden esittely. Vedenlaadun raportointi kuuluu muulta osin Vahanen Environment Oy:lle. Tutkimushankkeessa ei tutkittu rakenteiden kaasunjohtavuutta tai kaatopaikkakaasun vaikutusta materiaaleihin, koska koerakenteita ei rakennettu jäte-täytön päälle.

Koerakenteet yhtä lukuun ottamatta suunnitteli Ramboll Finland Oy ja Vahanen Environment Oy toimi rakentamisen riippumattomana laadunvalvojana. Instrumentoinnin ja materiaalitestauksen periaatteellisesta suunnittelusta vastasi Minna Leppänen Tampereen teknillisestä yliopistosta. (Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä 2017) Rakentamisen osalta kilpailutuksen voitti YIT ja antureiden toimittamisen ja asentamisen osalta Luode Consulting Oy.

6. KOERAKENTEET

Tutkimus toteutettiin rakentamalla viisi erilaista koepintarakennetta (A.1, A.2, B.2, C.0 ja U.1) Ämmässuon kaatopaikalle. Koepintarakenteilla tarkoitetaan rakennettuja koerakenteita, joilla testattiin erilaisten kaatopaikan pintarakenneratkaisujen toimintaa. Rakentamisen aikana rakentaminen dokumentointiin valokuvaamalla ja työn aikaista laadunvalvontaa tehtiin seuraamalla rakennekerrosten irtotiheyttä troxler-laitteella sekä vesi- ja hiekkavolyometrillä sekä ottamalla mineraalisista materiaaleista näytteitä laboratorionäytteiksi varten. Rakenteet ja osa kaivoista instrumentointiin ja mittakaivoista otettiin vesi- ja hiekkavolyometriä kenttä- ja laboratorionäytteiksi varten. Rakennekerroksista ja kenttämittauksista sekä laboratorionäytteiden ottokohdista tehtiin tarkemittaukset. Koerakenteet rakennettiin elo-syyskuussa 2018 Ämmässuon kaatopaikan laajennusalueen itäreunalle alueelle R1. Koerakenteiden asemointi toistensa suhteen on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Koerakenteiden asemointi toisiinsa nähden (muokattu lähteestä Ramboll 2018a).

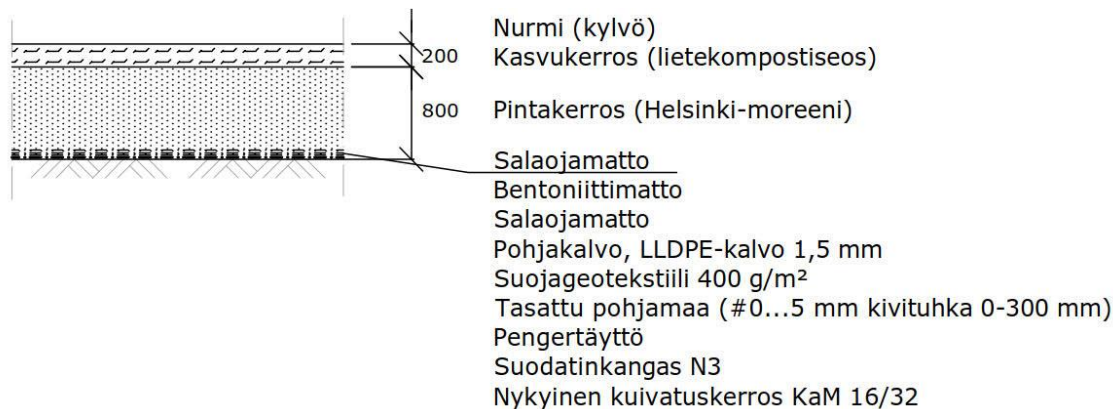
6.1 Tutkittavat koerakenteet

Koerakenteita rakennettiin viisi alkuperäisen neljän sijaan. Koerakenteet A.1, A.2, B.2 ja C.0 ovat Rambollin suunnittelema rakenteita. Koepintarakenteista bitumistabiloitua jätepolton kuonaa sisältävä koerakenne eli U.1 on urakoitsijan eli YIT:n ehdottama rakenne, joka ei kuulunut alkuperäisiin suunnitelmiin. Koerakenteita ei rakennettu jäte-
tätön päälle, joten rakenteissa ei otettu huomioon kaasunjohtavuutta.

Jokaisessa koerakenteessa tasatun työalueen päälle levitettiin suojageotekstiili (neliö-
paino 400g/m²) tai suojageotekstiilin loputtua urakoitsijalta kaksi päällekkäistä suodatinkangasta, joiden neliöpaino oli 200 g/m² (Vahanen 2018b). Suojageotekstiilin (*Bontec SNW50*) tai suodatinkankaiden (*Bontec TS 3*) päälle levitettiin lysimetrimä toimiva LLDPE-kalvo (*GSE Ultra FrictionFlex Geomembrane 1,5 mm*). Kalvon päälle asennettiin tarkkailukerroksena toimiva salaojamatto (*INTERDRAIN GXG 412*), johon kertyvät koko koerakenteen läpäisseet vedet. (Ramboll 2018a)

6.1.1 Bentoniittimatto ja salaojamatto

Bentoniitti- ja salaojamatosta koostuvan koerakenne on esitetty kuvassa 19. Myöhemmin rakenteesta käytetään nimitystä koerakenne A.1. Koerakenne A.1 ei ole *VNa 331/2013* mukainen, mutta tehokkaaksi todettu pintarakenne, johon muita koerakenteita verrataan.

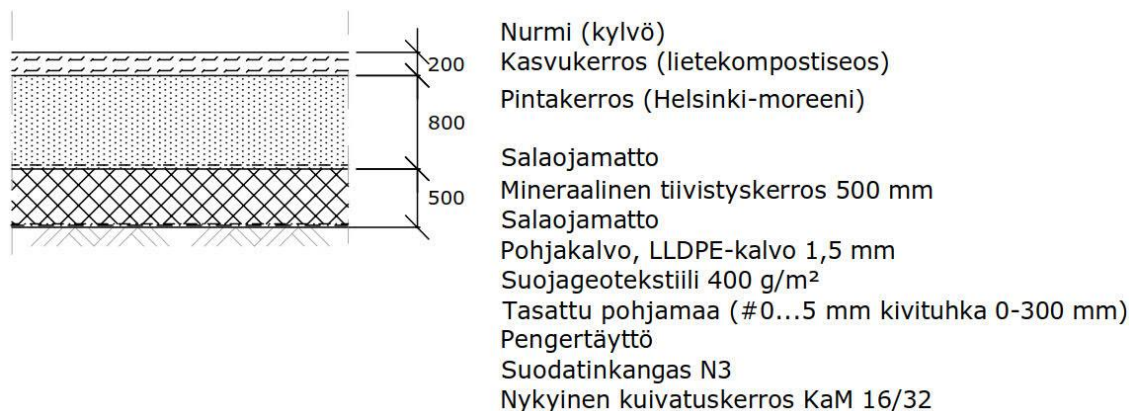


Kuva 19. Koerakenne A.1 eli rakenne bentoniittimatolla ja salaojamatolla (Ramboll 2018a).

Koerakenteessa A.1 tarkkailukerroksen salaojamaton päällä on bentoniittimatto (*Bentofix NSP 5300*), joka toimii tiivistyskerroksena. Bentoniittimaton yläpuolinen salaojamatto toimii kuivatuskerroksena. Pintakerros on Helsinki-moreenia ja kasvukerros lietekompostiseosta. Koerakenne nurmetetaan. (Ramboll 2018a)

6.1.2 Kuonabentoniittiseos ja salaojamatto

Kuonabentoniittiseoksesta ja salaojamatosta koostuvan koerakenteen rakenne on esitetty kuvassa 20. Myöhemmin rakenteesta käytetään nimitystä koerakenne A.2.

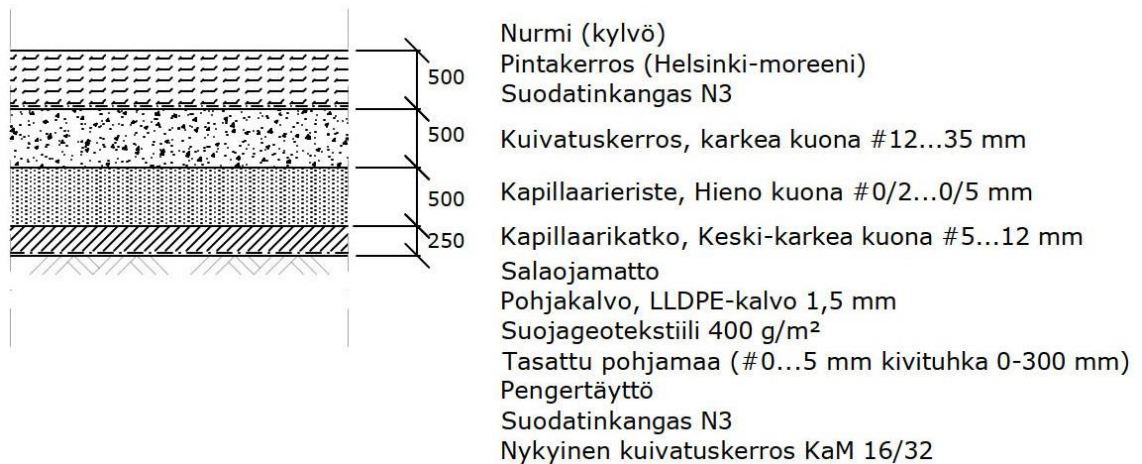


Kuva 20. Koerakenne A.2 eli rakenne mineraalisella tiivistyskerroksella ja salaojamatolla (Ramboll 2018a).

Koerakenteessa A.2 tarkkailukerroksen salaojamaton päällä on 500 mm:n paksuinen mineraalinen tiivistyskerros, jonka materiaalina on käytetty jätteenpolton kuonafraction 0/5 mm:ä ja bentoniitin seosta (kuonabentoniitti). Bentoniitti on polymeerimodifioitua luonnon natriumbentoniittia (*BENTONITE CP-200RES*). (Ramboll 2018b) Kuonabentoniitista ylöspäin koerakenne A.2 on samanlainen kuin koerakenne A.1. Kuonabentoniitin yläpuolinen salaojamatto toimii kuivatuskerroksena. Pintakerros on Helsinki-moreenia ja kasvukerros lietekompostiseosta. Koerakenne nurmetetaan. (Ramboll 2018a)

6.1.3 Kapillaarisulkurakenne ohennetulla pintakerroksella

Kapillaarisulkurakenne ohennetulla pintakerroksella on esitetty kuvassa 21. Myöhemmin rakenteesta käytetään nimitystä koerakenne B.2.

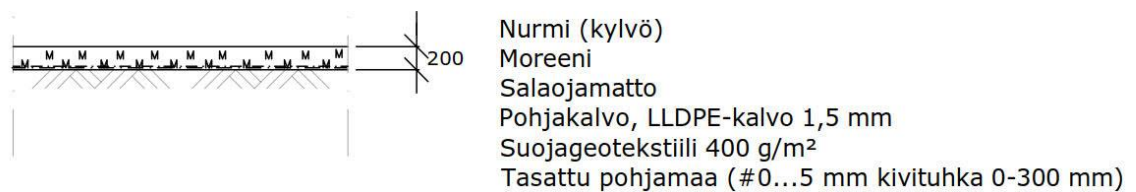


Kuva 21. Koerakenteessa B.2 eli kapillaarisulkurakenteessa ohennetulla pintakerroksella (Ramboll 2018a).

Koerakenteessa B.2 tarkkailukerroksen salaojamaton päällä on 250 mm:n paksuinen kapillaarikatkokerroks jätteenpolton kuonasta 5/12 mm:ä. Kapillaarikatkon päällä on 500 mm:n paksuinen kapillaarieriste jätteenpolton kuonasta 0/5 mm:ä. Kuivatuskerros on jätteenpolton kuonasta 12/35 mm:ä. Kuivatuskerros erotetaan pintakerroksesta suodatinkankaalla. Pintakerros on rakennettu Helsinki-moreenista ja sen paksuus on ohuempi kuin koerakenteissa A.1 ja A.2. Koerakenteessa ei ole erillistä kasvukerrosta, mutta rakenne nurmetetaan. (Ramboll 2018a)

6.1.4 Väliaikainen peittorakenne moreenista

Väliaikainen peittorakenne on esitetty kuvassa 22. Myöhemmin rakenteesta käytetään nimitystä koerakenteessa C.0.

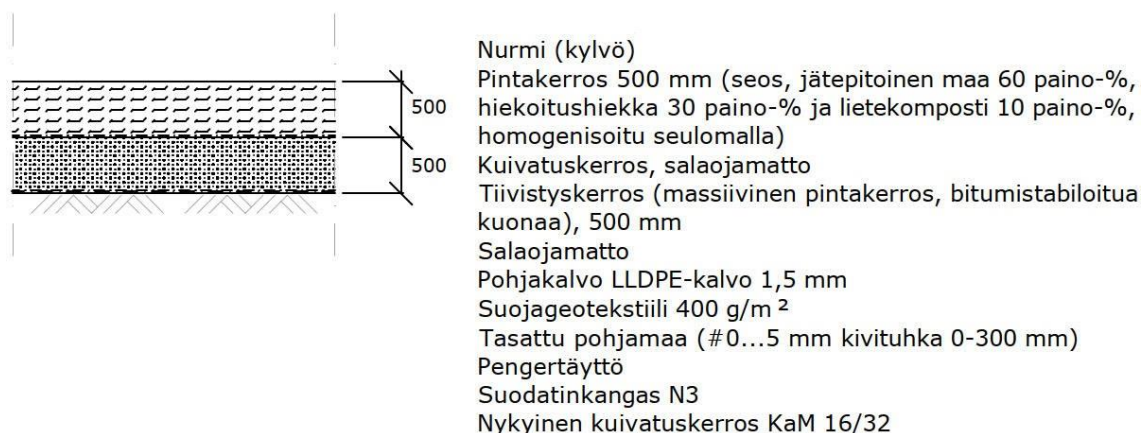


Kuva 22. Koerakenteessa C.0 eli väliaikainen peittorakenne moreenista (Ramboll 2018a).

Koerakenteessa C.0 tarkkailukerroksen salaojamaton päällä on 200 mm:n paksuinen Helsinki-moreenikerros. Koerakenteessa nurmetetaan. (Ramboll 2018a)

6.1.5 Pintarakenne bitumistabiloidusta kuonasta

Urakoitsijan ehdottama koerakenteessa, jossa käytettiin bitumistabiloitua jätteenpolton kuonaa, on esitetty kuvassa 23. Myöhemmin rakenteesta käytetään nimitystä koerakenteessa U.1.



Kuva 23. Koerakenne U.1 eli väliaikainen pintarakenne bitumikuonasta (Ramboll 2018a).

Koerakenteessa U.1 tarkkailukerros salaojamaton päällä oleva 500 mm:n paksuinen tiivistyskerros tehdään bitumistabiloidusta jätteenpolton kuonasta (lyhyemmin bitumikuona). Tiivistyskerroksen päälle tulee kuivatuskerrosena toimiva salaojamatto. Pintakerros, jonka paksuus on 500 mm:ä, tehdään seoksesta, joka sisältää 60 painoprosenttia jätepitoinen maata (Helsinki-moreenia), 30 painoprosenttia hiekoitushiekkaa ja 10 painoprosenttia lietekompostia. Seos on homogenisoitu seulomalla. (Ramboll 2018a) Koerakenne nurmetetaan.

6.2 Instrumentointi ja vesimäärien seuranta

Koerakenteiden vesimääriä seurattiin rakennekerroksiin yhdistettyjen kaivojen kautta. Osa kaivoista on v-kaivoja, joissa on pinnankorkeuden mittaus ja joista saadaan suoraan virtaamadataa datapalvelusta. Loput kaivoista ovat umpikaivoja, joihin kertynyttä vesimäärää seurattiin pumppaamalla kaivot tyhjiksi. Joissakin umpikaivoissa on lisäksi vedenkorkeusanturi. Tällöin umpikaivoissa on hälytysraja, joka ilmoittaa umpikaivon olevan pian täynnä.

Umpikaivoja on käyty tyhjäämässä useammin 17.4.2019 alkaen, jotta kaivot eivät pääse tulvimaan. Välillä umpikaivot ovat silti padottaneet, jolloin umpikaivon tyhjennyksen jälkeen seurattiin, jos kaivossa olevasta putkesta valuu lisää vettä kaivoon. Jos näin kävi, mitattiin vesimäärä uudestaan. Mittauksen jälkeen tyhjennys- ja mittausprosessi toistettiin niin useasti, että veden valuminen kaivoon loppui. Kesällä 2019 kaivoja on tyhjenetty Vahanen Environment Oy:n lisäksi myös HSY:n toimesta. (Alenius 2019)

Koerakenteiden rakennekerroksiin asennettiin yhdistelmämittausantureita (maankosteus, lämpötila ja sähkönjohtokyky). Luode Consulting asensi rakenteisiin yhteensä 24 yhdistelmäanturia, joista yksi (anturi 11) rikkoontui rakentamisen aikana. Anturia ei korvattu. Lisäksi Tampereen teknillinen yliopisto toimitti koerakenteen U.1 mineraaliseen tiivis-

tyskerrokseen kuusi lämpötila-anturia ja kaksi yhdistelmäanturia (maankosteus, lämpötila ja sähkönjohtokyky), jotka asennettiin urakoitsijan toimesta. Rakenteisiin liittyvien kaivojen ja antureiden asemointi ja tunnuksat on esitetty seuraavissa kuvissa 24-27.

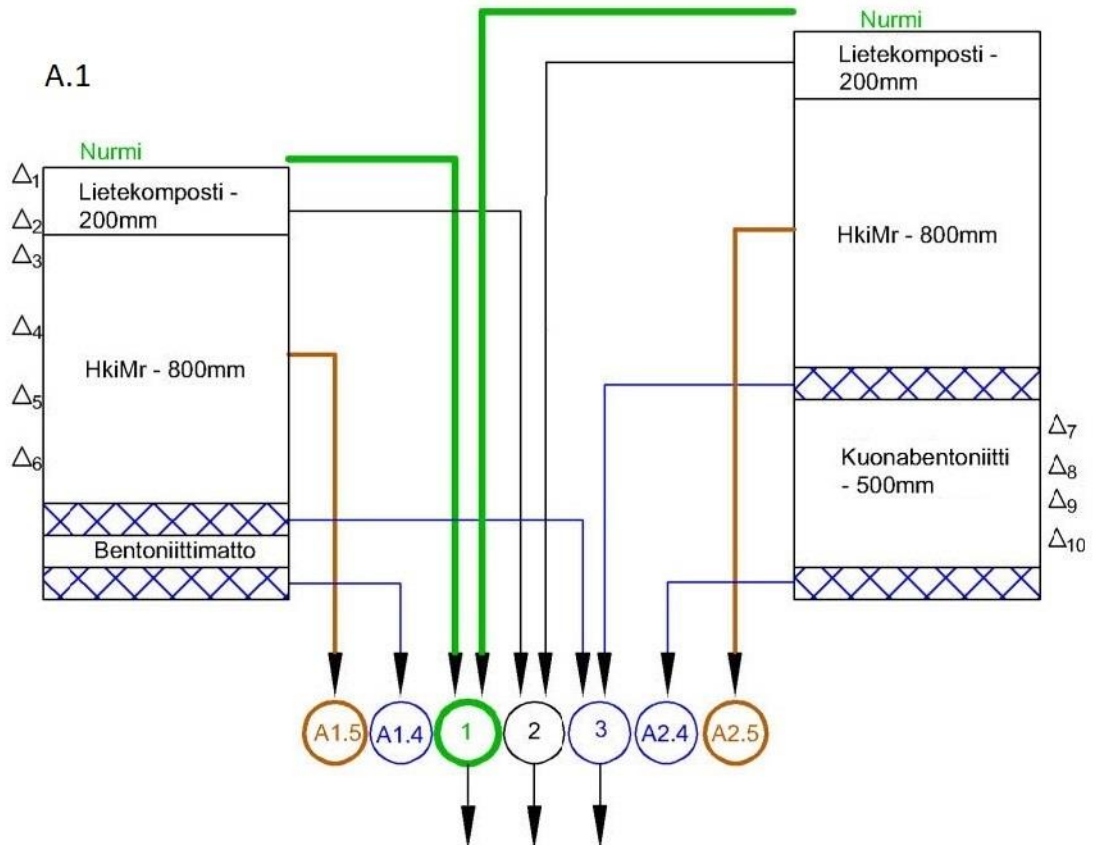
Koerakenteiden A.1 ja A.2 mittakaivot ja instrumentointi on esitetty kuvassa 24. Koska koerakenteilla on materiaaliltaan ja kerrospaksuuksiltaan samanlaiset pinta- ja kasvukerrokset, näistä rakennekerroksista purkautuvat vedet kerättiin molemmista koerakenteista yhteisiin v-kaivoihin. Rakenteilla A.1 ja A.2 on yhteinen kasvukerroksen päältä (nurmi) pintavalunnan keräävä v-kaivo (kaivo 1). Rakenteilla on myös yhteinen v-kaivo (kaivo 2), johon ohjautuu vedet molempien rakenteiden kasvukerroksista. V-kaivoon 3 kerääntyy molempien rakenteiden kuivatuskerrosten vedet. Kaivossa 3 on myös pH-, lämpötila-, johtokyky-, sameus- ja DOC-anturit. Kaivoista 1-3 vedet johdetaan kokoomalinjaan. Muut rakenteiden A.1 ja A.2 kaivot ovat koerakennekohtaisia umpikaivoja, joihin ohjataan pintakerrokseen (kaivot A1.5 ja A2.5) tai rakenteen pohjalla olevaan salaojamattoon eli tarkkailukerrokseen (kaivot A1.4 ja A2.4) kertyneet vedet. Kaivossa A2.4 on vedenpinnan korkeuden mittausta.

Koska kasvu- ja pintakerros olivat molemmilla koerakenteilla samanlaisia, asennettiin antureita vain koerakenteen A.1 kasvu- ja pintakerrokseen. Kasvukerroksessa on kaksi yhdistelmäanturia ja pintakerroksessa neljä. Koerakenteen A.2 tiivistyskerroksessa, joka on tehty kuonabentonitista, on neljä yhdistelmäanturia. Antureiden suunniteltu asemointi on esitetty kuvan 24 yhteydessä olevissa taulukoissa.

	Pinnasta	Vasemmalta	Alhaalta
Δ_1	50mm	4000mm	5000mm
Δ_2	150mm	2000mm	5000mm
Δ_3	250mm	5000mm	5000mm
Δ_4	450mm	4000mm	5000mm
Δ_5	650mm	3000mm	5000mm
Δ_6	850mm	2000mm	5000mm

	Pinnasta	Vasemmalta	Alhaalta
Δ_7	1050mm	2200mm	5000mm
Δ_8	1150mm	2600mm	5000mm
Δ_9	1250mm	3000mm	5000mm
Δ_{10}	1350mm	3400mm	5000mm

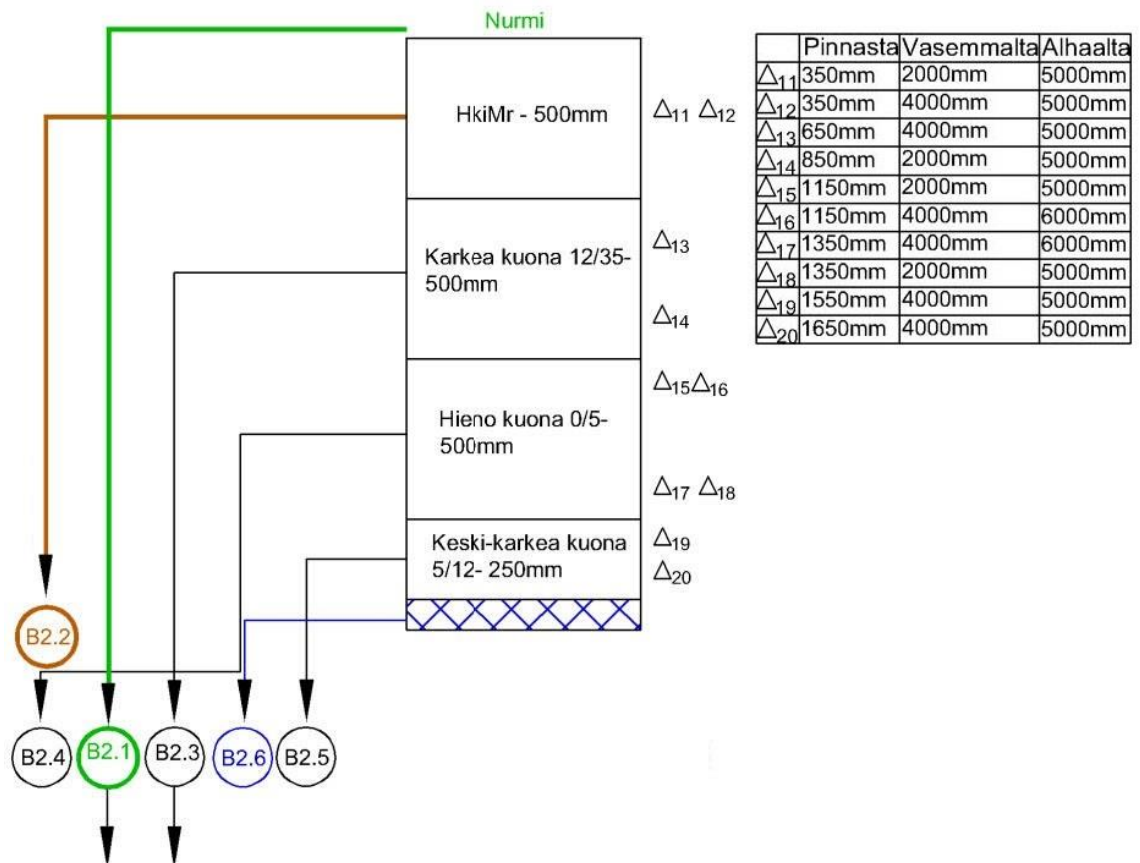
A.2



Kuva 24. Koerakenteiden A.1 ja A.2 instrumentointi ja mittakaivot (Vahanen 2019a). Instrumenttien sijainti on esitetty kuvan yhteydessä olevissa taulukoissa. Sininen rasteri kuvaa salaojamattoa.

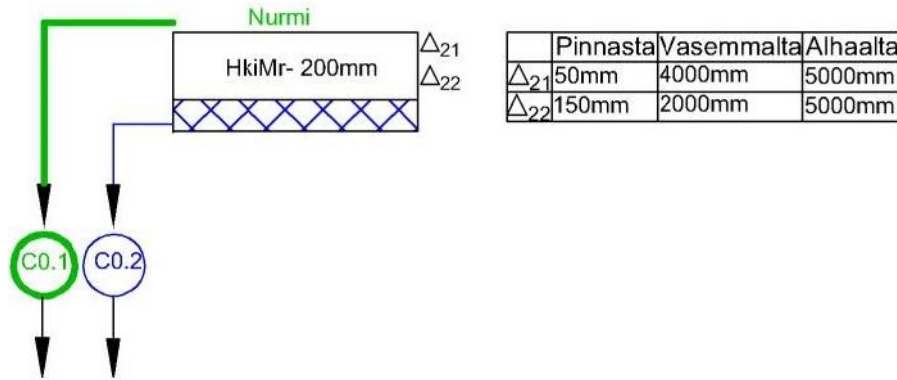
Koerakenteen B.2 mittakaivot ja instrumentointi on esitetty kuvassa 25. Kasvukerroksen päältä (nurmi) pintavalunta johdetaan v-kaivoon B2.1. Koerakenteen kuivatuskerrokseen (jätteenpolton kuonafraktio 12/35 mm) kertyvät vedet johdetaan v-kaivoon B2.3. Kaivossa B2.3 on lämpötilan, pH:n, johtokyvyn ja sameuden mittaus. Loput koerakenteen kaivot ovat umpikaivoja. Umpikaivoon B2.2 ohjataan pintakerrokseen (Helsinki-mooreeni) kertyvät vedet. Kaivossa on vedenpinnan korkeuden mittaus. Kapillaarieristeestä (jätteenpolton kuonafraktio 0/5 mm) purkautuvat vedet johdetaan umpikaivoon B2.4 ja kapillaarikerroksesta (jätteenpolton kuonafraktio 5/12 mm) purkautuvat umpikaivoon B2.5. Umpikaivoon B2.6, jossa on vedenpinnan korkeuden mittaus, johdetaan tarkkailukerrokseen kertyvät vedet.

Anturi 11 rikkoontui rakentamisen yhteydessä eikä sitä korvattu, joten pintakerroksessa on vain yksi yhdistelmäanturi 350 mm:n syvyydellä. Kuivatuskerroksessa on kaksi yhdistelmäanturia eri syvyyksillä. Kapillaarikerroksen jätteenpolton kuonafraktiossa 0/5 mm:ä on neljä yhdistelmäanturia, jotka ovat pareittain kahdella eri syvyydellä. Kapillaarikerroksessa on kaksi yhdistelmäanturia.



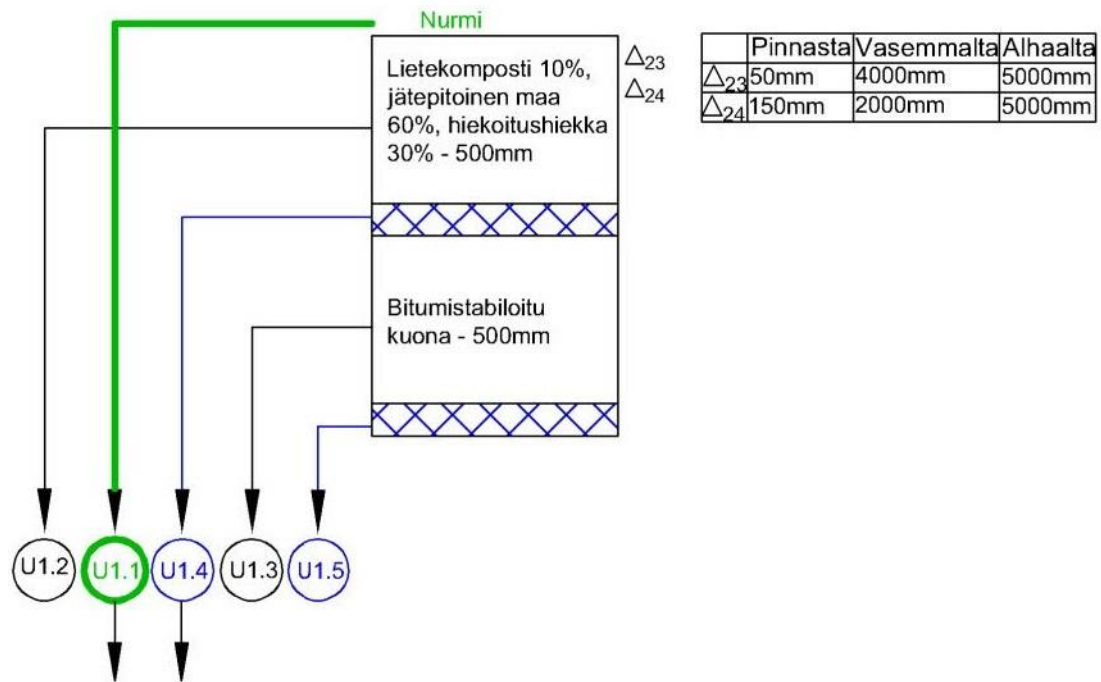
Kuva 25. Koerakenteen B.2 instrumentointi ja mittakaivot (Vahanen 2019a). Instrumenttien sijainti on esitetty kuvan yhteydessä olevassa taulukossa. Sininen rasteri kuvaa salaojamattoa.

Koerakenteen C.0 mittakaivot ja instrumentointi on esitetty kuvassa 26. Kasvukerroksen päältä (nurmi) pintavalunta johdetaan v-kaivoon C0.1. V-kaivoon C0.2 johdetaan tarkkailukerrokseen kertyvät vedet. Moreenikerroksessa on kaksi yhdistelmäanturia eri syvyyksillä.



Kuva 26. Koerakenteen C.0 instrumentointi ja mittakaivot (Vahanen 2019a). Instrumenttien sijainti on esitetty kuvan yhteydessä olevassa taulukossa. Sininen rasteri kuvaa salaojamattoa.

Koerakenteen U.1 mittakaivot ja instrumentointi on esitetty kuvassa 27. Kasvukerroksen päältä (nurmi) pintavalunta johdetaan v-kaivoon U1.1, jota ei ole instrumentoitu, joten v-kaivoon tulevasta vesimäärästä ei ole tarkkaa tietoa. V-kaivoon U1.4 johdetaan koerakenteen kuivatuskerrokseen kertyvät vedet. Kaivossa on myös lämpötilan, pH:n, sameuden ja johtokyvyn mittausta. Loput koerakenteen U.1 kaivot ovat umpikaivoja. Kasvukerroksen alaosaan kertyvät vedet johdetaan kaivoon U1.2. Kaivoon U1.3 johdetaan tiivistyskerrokseen (bitumistabiloitu kuona) kertyvät vedet. Umpikaivoon U1.5 kertyvät tarkkailukerrokseen kertyvät vedet. Kaivossa U1.5 on vedenpinnan korkeuden mittausta.



Kuva 27. Koerakenteen U.1 instrumentointi ja mittakaivot (Vahanen 2019a). Instrumenttien sijainti on esitetty kuvan yhteydessä olevassa taulukossa. Sininen rasteri kuvaa salaajamattoa.

Luode Consultingin asentamat maaperäanturit ovat tyypiltään *HydraProbe SDI-12* ja kaivoissa olevat sondit ovat mallia *EXO3* (Kiirikki 2019a). TTY:n toimittamat anturit ovat METER Groupin valmistamat ja mallia *TEROS 12* (Latvala 2019).

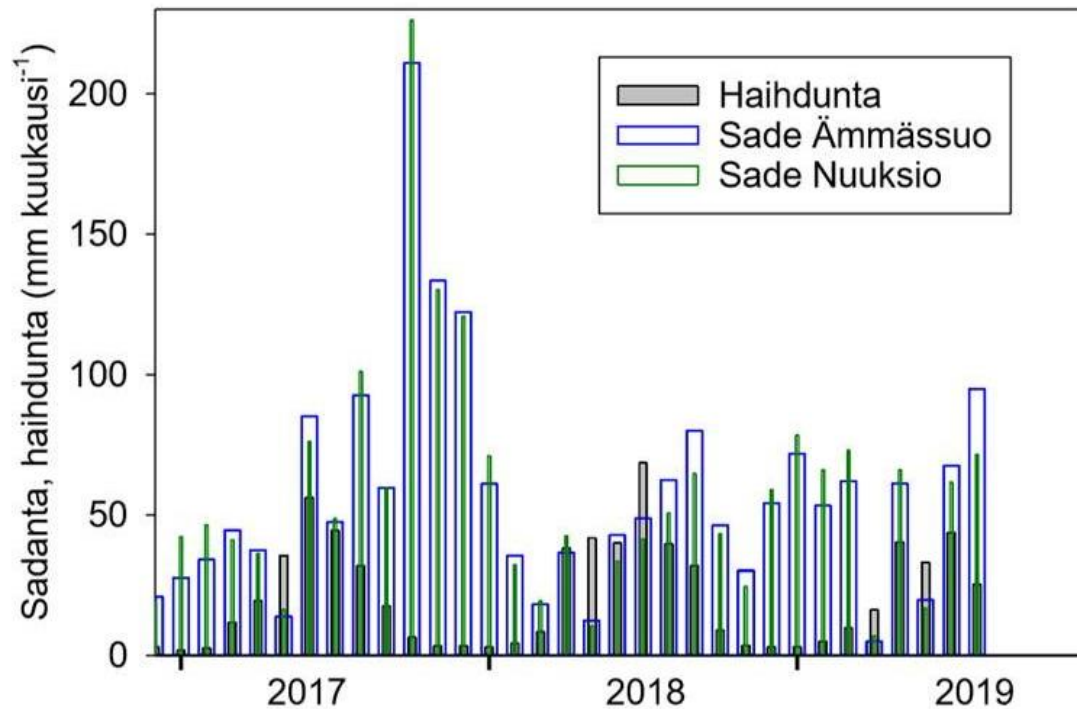
Luode Consultingin asentamien antureiden mittausdata kerättiin seurantajakson jälkeen Luode-Datapalvelusta. TTY:n antureiden data saatiin TTY:n edustajalta. Umpikaivoista, joissa ei ollut pinnan korkeuden tai virtaaman mittausta, vesimäärää seurattiin kaivojen tyhjentämisen mukaisten vesimäärien perusteella.

Ämmäsuon ekoteollisuuskeskuksen oman sääaseman dataa hyödynnettiin vesitasetarkastelun yhteydessä instrumentoinnin tuottamat mittausdatan kanssa. Sääaseman sijainti on esitetty kuvassa 28 oranssilla nuolella kuvan oikeassa yläkulmassa. Etäisyyttä koerakenteilla ja sääasemalla on linnuntietä noin 1,1 km:ä. Sääasema mittaa tuulen suunnan ja nopeuden, lämpötilan, ilman kosteuden, ilmanpaineen, sadannan ja auringon säteilytehon.



Kuva 28. Ämmässuon ekoteollisuuskeskuksen sääaseman sijainti. Sääasema on merkitty kuvaan oranssilla nuolella. Koerakenteiden sijainti on rajattu oranssilla viivalla.

Ilmatieteen laitos on verrannut Ämmässuon sääaseman mittausdataa Nuuksion sääaseman dataan, joka on Ämmässuota lähin Ilmatieteen laitoksen sääasema. Ämmässuon sääaseman mittauksia pidetään luotettavina ja poikkeama Nuuksion sääaseman mittauksiin oli kokonaisuudessaan alle yhden prosentin, mutta päivittäinen vaihtelu on vähän suurempaa. Talven mittauksien luotettavuus on aina hieman kesän tuloksia huonompi. Kesän tuloksissa ei ollut mitään epäilyttävää tai Nuuksion tuloksista merkittävästi poikkeavaa. (Karhu 2019) Vertailu sääasemien välillä on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Sadanta ja haihdunta vuodesta 2017 elokuukuuhun 2019 asti (muokattu lähteestä Karhu 2019).

Sääseman datan perusteella terminen talvi (vuorokauden keskilämpötila laskee pysyvästi nollan asteen alapuolelle) on alkanut 19.11.2018 ja vuorokauden keskilämpötila nousi pysyvästi nollan asteen yläpuolelle 13.3.2019, joten talvi kesti 115 päivää.

6.3 Rakentamisen aikainen laadunvalvonta

Rakentamisen aikaista laadunvalvontaa tehtiin valokuvaamalla, tarkemittaamalla, mittaamalla rakenteen irtotiheyttä työmaalla ja ottamalla näytteitä laboratoriokokeita varten. Tiivistystarkkailulla seurattiin tiivistystyön tasalaatuisuutta ja saavutettua tilavuuspainoa. Laboratorioon otetuista näytteistä tutkittiin materiaalien tasalaatuisuutta ja ominaisuuksia.

6.3.1 Tarkemittaukset

Urakoitsija teki tarkemittaukset ja laski koerakenteiden mineraalisten rakennekerrosten yläpintojen pinta-alat ja tilavuudet. Pintarakenteiden A.1, A.2, B.2 ja C.0 kaikki instrumenttien, kenttämittausten ja näytepisteiden sijainnit mitattiin.

Mittauskalustona käytettiin mittaussuunnitelman mukaan *Leica TS 15* takymetriä ja *Leica GS 15 GPS* -mittalaitetta. Mittausten koordinaattijärjestelmänä oli GK25 ja korkeusjärjestelmänä N2000. Koneohjauksen tarkistusta varten työmaa-alueelle tehtiin kiintopis-

teitä. Kiintopisteet tehtiin GPS-mittalaitteen *Smart Net 100*:n pisteen keskiarvomittauksella. Korkeus tarkistettiin työmaalla lähimpään korkeuskiintopisteeseen. Mittatoleranssi oli ± 3 cm:ä kaikissa suunnissa. (Vitomittaus 2018)

6.3.2 Tiivistystarkkailu

Työmaalla tehtiin vesivolymetri- ja troxler-mittauksia rakennekerrosten (kuiva)irtotiheyden määrittämiseksi. Mittalaitteet on esitetty kuvassa 30. Lisäksi urakoitsija teki hiekkavolumetrimittauksia bitumikuonasta.



Kuva 30. Vasemmalla vesivolymetri ja oikealla troxler-mittalaite (malli 3430) sekä mittaukseen tarvittavat apuvälineet (Reiman 2018).

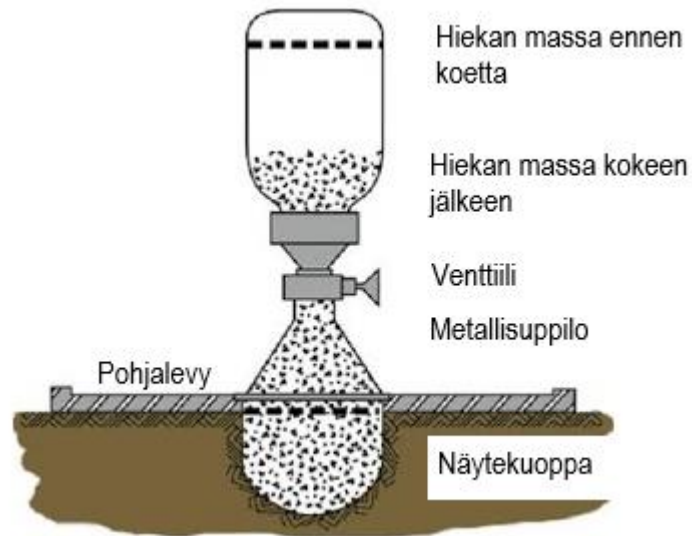
Vesivolymetrimittauksella määritetään kentällä märkä- ja kuivairtitiheys. Märkäirtitiheys määritetään näytekuopasta poistetun näytteen massan ja kuopan tilavuuden suhteena. Kuivairtitiheys on näytteen kuivamassan ja näytekuopan tilavuuden suhde. Mittaus aloitetaan asettamalla vesivolymetrin pohjalevy tasoitetulle alustalle. Pohjalevy voidaan kiinnittää paikoilleen nauloilla levyn nurkista. Vesivolymetri kiinnitetään pohjalevyyn ja mitataan alkutilavuus painamalla kahvaa kevyesti alaspäin, mikä saa painesylin-
terin sisällä olevan vedellä täytetyn kumin työntymään ulospäin (Hartikainen 1978). Alkutilavuus luetaan vesivolymetrin varren mitta-asteikolta (Kuva 31) tietyn paineen (0,2 bar) saavuttamisen jälkeen. Laite irrotetaan pohjalevystä ja maahan kaivetaan pohjalevyn aukon kokoinen kuoppa, jonka tulee olla tarpeeksi syvä suhteessa materiaalin raekokoon. Kuopan suositeltu tilavuus on noin litra (Hartikainen 1978). Kuopan tulee olla mahdollisimman säännöllinen eikä seinämiä saa tiivistää eikä löyhdyttää. Koekuopasta irrotettu materiaali otetaan tarkoin talteen ja punnitaan luonnontilaisena ja uunikuivattuna. (Hartikainen 1978) Vesivolymetri asetetaan takaisin pohjalevyyn kiinni ja mitataan koekuopan tilavuus 0,2 bar:ssa. Näytteen tilavuus on mitattujen loppu- ja alkulukeman erotus.

Vesivolymetrimittauksessa on useita mahdollisia virhelähteitä. Laite saattaa liikahtaa, varren mitta-asteikon lukema voidaan lukea väärin, näytettä voidaan hukata, näytekuopan seinämät voivat tiivistyä tai löyhtyä. Näytekuopan seinämässä voi olla iso kivi, joka pitää poistaa ja seinämään tullut aukko paikata, jotta kuopasta saadaan mahdollisimman säännöllisen muotoinen. Paikattu kohta ei välttämättä vastaa alkuperäistä tiiviyyttä, mikä vääristää mittaustulosta. Näytettä voi hukkaa inhimillisen virheen tai tuulen vuoksi. Pohjalevy voi nousta maasta mittauksen aikana pohjalevyn kiinni naulaamisesta huolimatta, jos sen päällä ei seistä tasaisesti mittauksen aikana. (Hartikainen 1978) Painon jakaminen tasaisesti pohjalevyn päälle on haastavaa kaltevalla tasolla.



Kuva 31. Vasemmalla vesivolymetrin mitta-asteikko ja oikealla kuoppa mittauksen jälkeen (Reiman 2018).

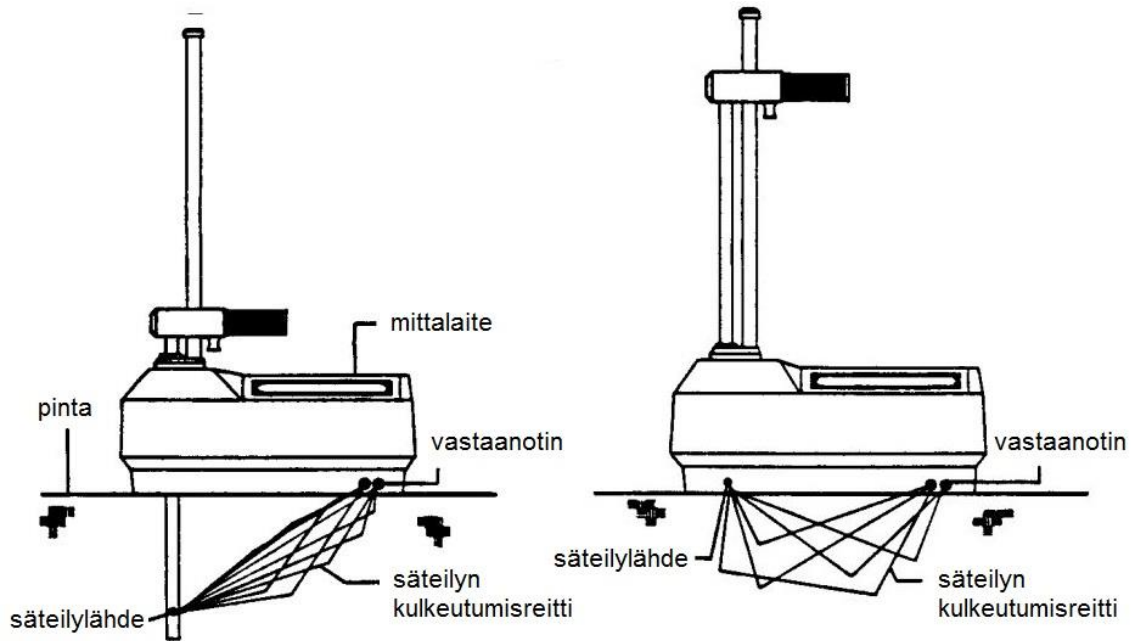
Vesivolymetrin sijasta märkä- ja kuivairtoteiheyden määrittämiseen voidaan käyttää myös hiekkavolymetriä. Hiekkavolymetrimittaus suoritetaan samalla tavalla kuin vesivolymetrimittaus, mutta kaivetun kuopan tilavuus mitataan hiekkavolymetrillä, jonka toimintaperiaate on esitetty kuvassa 32. Hiekkavolymetrimittaus perustuu siihen, että mittaukseen käytettävä kuiva tasarakeinen hiekka, jonka rakeisuus on 0,5-1 tai 0,5-2 mm:ä, asettuu tiivistämättömänä aina samaan tilavuuteen. Hiekkaa valutetaan varovasti kaivettuun kuoppaan sullomatta sitä. Kuopan tilavuus määritetään hiekan menekkinä, joko suoraan tilavuusmittoina tai epäsuorasti punnitsemalla. Määrittämisessä voidaan käyttää kuvan 32 mukaista laitteistoa tai tavallista mittalasia. (Hartikainen 1978) Määrittämisvirhelähteet voivat johtua muun muassa mittaukseen käytettävän hiekan tiivistymisestä ja hiekan tai kaivetun kuopan materiaalin hukkaamisesta. Hiekka tiivistyy herkästi iskujen ja tärinän vaikutuksesta.



Kuva 32. Hiekkavolymetri (muokattu lähteestä ZTM 2019).

Troxler-laite on säteilyyn perustuva mittauslaite, jolla voidaan mitata mittauspisteen irrotiheys ja vesipitoisuus. Mittauslaite on kehitetty luonnolliselle maalle, maankaltaisille materiaaleille, kiviainekselle, betonille ja asfaltille. Laite mittaa säteilylähteen lähettämän radioaktiivisen säteilyn kulkeutumista rakennekerroksessa laitteessa olevalle vastaanottimelle, joka muuntaa säteilyn tiheydeksi. (Troxler Electronic Laboratories, Inc. 2006)

Troxler-mittauslaitteella mittaukset ovat mahdollisia 300 mm:n syvyyteen asti 50 mm:n välein. Irrotiheys voidaan mitata myös pinnalta, jolloin rakenteeseen ei tarvitse tehdä reikää. Pinnalla mittaus tapahtuu heijastusmittauksena ja syvemmillä suoramittauksena (kuva 33). Suoramittauksessa mittalaite asetetaan tasatulle alustalle ja laitteen varsi, jossa säteilylähte sijaitsee, työnnetään rakenteen sisään halutulle syvyydelle varrelle tehtyyn pieneen reikään. (Troxler Electronic Laboratories, Inc. 2006)



Kuva 33. Troxler-mittauslaitteen toimintaperiaate (muokattu lähteestä Troxler Electronic Laboratories, Inc. 2006).

Laitteen määrittämän vesipitoisuuden perusteella laite muuntaa mitaamansa märkäirtotiheyden suoraan kuivairtotiheydeksi. Troxler-mittauslaite määrittää rakennekerroksen vesipitoisuuden materiaalin vetypitoisuuden perusteella. Laitteessa on ilmaisim, joka määrittää säteilylähteen lähettämien ja materiaalin termalisoimien neutronien määrän. Materiaali hidastaa neutroneita. Termalisaatiassa neutronien hitaus saavuttaa pisteen, jonka jälkeen törmäykset vedyn tai muiden materiaalien kanssa eivät enää hidasta neutronia. (Troxler Electronic Laboratories, Inc. 2006)

Laite ei mittaa jätteenpolton kuonan vesipitoisuutta oikein, koska jätteenpolton kuonalla on kiviaineksesta poikkeava kemiallinen koostumus, joka häiritsee mittauksia. Lisäksi materiaalin sisältämät metallit aiheuttavat häiriötä mittaukseen. Tämän vuoksi mittapisteen vesipitoisuus pitää tarkistaa erikseen materiaalinäytteestä laboratoriossa. Määritetyllä vesipitoisuudelle lasketaan kuivairtotiheys käyttäen troxler-laitteen mitaamaa märkäirtotiheyttä olettaen, että laite mittaa jätteenpolton kuonan märkäirtotiheyden oikein. (Suomen Erityisjäte 2017)

Koska troxler-mittaus perustuu radioaktiiviseen säteilyyn, tulee laite tehdaskalibroida säännöllisin väliajoin, koska säteilylähteen aktiivisuus pienenee ajan myötä. Säteilyn intensiteetin väheneminen vaikuttaa laitteella määritettyihin tuloksiin. Varsinaisen kalibroinnin lisäksi säteilylähteen muuttumattomuutta seurataan standardilukemaa seuraamalla. Tiheyden standardilukeman muutos saa olla $\pm 1\%$:a per päivä ja kosteuspitoisuuden standardilukeman $\pm 2\%$:a per päivä. Standardilukema otetaan päivittäin ja saatua lukemaa verrataan aikaisemmin määritettyihin standardilukemiin. Standardilukema määritetään asettamalla mittalaite laitteen mukana tulevan pölkyn päälle. Pölkyn alustan tulee olla tasainen ja kuiva. Standardilukeman mittaus tulee tehdä vähintään kolmen metrin

päässä pystysuorista pinnoista ja vähintään kymmenen metrin päässä muista radioaktiivisista lähteistä. (Troxler Electronic Laboratories, Inc. 2006)

Koska laitteessa on radioaktiivista materiaalia, tulee työskentelyssä kiinnittää huomiota säteilyturvallisuuteen. Tärkeintä on rajoittaa altistusta, mikä voi tapahtua rajoittamalla laitteen läheisyydessä käytettyä aikaa, kasvattamalla etäisyyttä säteilylähteeseen tai suo-
jatamalla säteilyltä. Jos laitteen säteilylähteen läheisyydessä käytetyn ajan puolittaa, puolittuu myös säteilyaltistus. Etäisyyden kasvattaminen kaksinkertaiseksi vähentää säteilyaltistuksen yhteen neljäsosaan alkuperäisestä. Altistusta vähentävä suoja-
pukeutuminen on haastavaa kenttäolosuhteissa. Henkilökohtaista altistumista voidaan seurata henkilökohtaisilla mittareilla. Normaaleissa olosuhteissa täysiaikaisesti troxler-mittalaitteen kanssa työskentelevän henkilön vuosialtistus on selvästi vuosittaisen säteilyaltistusrajan alapuolella. Laitteen vartta, jossa säteilylähde sijaitsee, ei kannata pitää turhaan ulkona. Mittalaite tulee säilyttää sille suunnitellussa säilytyslaatikossa. (Troxler Electronic Laboratories, Inc. 2006)

6.3.3 Näytteenotto

Koerakenteissa käytettävistä materiaaleista otettiin näytteitä ennakkokokeita (rakeisuus, vesipitoisuus ja pF-koe) varten elokuussa 2018. Laadunvalvontakokeita varten näytteet otettiin rakentamisen yhteydessä elo-syyskuussa 2018. Näytteet toimitettiin Tampereen teknillisen yliopiston *Maa- ja pohjarakenteiden* tutkimuslaboratorioon. Koerakenteen U.1 pintakerroksesta ei toimitettu näytettä.

6.3.4 Vesipitoisuus

Vesivolymetri- ja troxler-mittausten yhteydessä otetuista näytteistä tutkittiin vesipitoisuus standardin *SFS-EN 1097-5* mukaan. Lämpökaappikuivausmenetelmällä määritetään materiaalin vapaan veden kokonaismäärä. Koetta varten testinäyte punnitaan ja asetetaan astiassa tuuletettuun lämpökaappiin, jonka lämpötila on 110 ± 5 °C. Näyte kuivataan vakiomassaan eli peräkkäisten punnitusten massojen ero on maksimissaan 0,1 %:a, kun punnitusten välillä on vähintään yksi tunti. Vesipitoisuus määritetään näytteessä olevan veden massan ja näytteen kuivamassan suhteena. (SFS-EN 1097-5 2008)

Kuivattavan testinäytteen minimimassa määritetään ylemmän seulakoon D perusteella. Jos D on $\geq 1,0$ mm, tarvittava minimimassa on $0,2 \cdot D$ (kg). Jos D on $< 1,0$ mm, minimimassa on 0,2 kg. (SFS-EN 1097-5 2008) Koska laboratorioon toimitettujen näytteiden piti riittää useaan laboratoriomäärittelyyn, oli osa testinäytteistä kevyempiä kuin mitä standardi SFS-EN 1097-5 vaatii.

6.3.5 Rakeisuus

Näytteiden rakeisuutta tutkittiin kuiva- ja pesuseulomalla materiaalista riippuen standardin *SFS-EN 933-1* mukaan. Testinäyte valmistetaan laboratorionäytteestä jakamalla. Standardissa on määritetty testinäytteiden vähimmäiskoot. Jos testinäytteen koko on pienempi kuin standardissa on mainittu, voi testimenetelmän tarkkuus heikentyä. Osa testinäytteistä oli minimimassavaatimusta pienempiä, koska näytemäärä oli pieni tehtävien testien määrään verrattuna. Seulottava testinäyte kuivatetaan vakiomassaan 110 ± 5 °C lämpötilassa ja näyte punnitaan jäähtymisen jälkeen. (SFS-EN 933-1 2012)

Pesuseulonnassa näytteessä oleva hienoaines erotetaan pesemällä. Näyte asetetaan astiaan ja peitetään vedellä. Näytettä sekoitetaan astiassa hienoaineksen irrottamiseksi ja liettämiseksi. Näytteessä olevaa vettä kaadetaan 0,063 mm:n pesuseulalle, jolloin hienoaines pääsee veden mukana seulan lävitse. Pesemistä jatketaan kunnes 0,063 mm:n seulan läpäissyt vesi on kirkasta. Pesuseulalle jäänyt yli 0,063 mm:ä suurempi osa näytteestä kuivataan uunissa 110 ± 5 °C lämpötilassa vakiomassaan. Näytteen jäähtyttyä se punnitaan. (SFS-EN 933-1 2012)

Kuivaseulonnalla ja pesuseulonnalla saadaan erilainen raekokojakauma jätteenpolton kuonille. Eroa on etenkin hienoaineksen määrässä, koska jätteenpolton kuonan hienoaines liukenee veteen. (Ramboll 2018c) Tämä tekee vaikeaksi arvioida, milloin vesi on tarpeeksi kirkasta, jotta näytteen peseminen voidaan lopettaa. Määritettyjä rakeisuuskäyriä tulee siis verrata samalla tavalla määritettyihin rakeisuuskäyriin (Ramboll 2018c).

Pesty näyte tai, jos kyseessä on kuivaseulonta, pesemätön uunikuivattu näyte kaadetaan seulasarjaan seulontaa varten. Seulasarjaa ravistellaan koneellisesti tai käsin niin kauan, että kaikki seulan reikäkokoaa pienempi aines on mennyt seulan lävitse, minkä jälkeen seuloille jääneet massat punnitaan yksitellen aloittamalla suurimmasta. Myös pohja-astiaan kerääntynyt aines punnitaan. Punnittujen massojen perusteella lasketaan kullekin seulalle jäänyt massa prosentteina suhteessa alkuperäiseen kuivamassaan, minkä jälkeen lasketaan kumulatiivinen läpäisy. Hienoaineksen kohdalla otetaan huomioon pesun aikana poistunut < 0,063 mm:ä oleva hienoaines ja seulonnassa pohjalle jäänyt massa. Laskettujen kumulatiivisten seulojen läpäisyprosenttien avulla piirretään rakeisuuskäyrä, jossa y-akselilla on läpäisyprosentti ja logaritmisella x-akselilla raekoko eli seulan aukkokoko. (SFS-EN 933-1 2012)

6.3.6 Kiintotiheys

Näytteiden kiintotiheys tutkittiin standardin *SFS-EN 1097-6* mukaan pyknometri- tai verkkokorimenetelmällä. Standardi soveltuu normaalipainoisten kiviainesten ja kevytkiviaineksen kiintotiheyden testaamiseen. Standardin mukaan näytteet upotetaan veteen.

Menetelmä ei sovellu jätteenpolton kuonille hienoaineksen vesiliukoisuuden vuoksi, joten jätteenpolton kuonafraktioiden ja kuonaseosten kiintotiheys tutkittiin upottamalla näytteet metanoliin. Muut näytteet upotettiin ionivaihdettuun veteen.

Kiintotiheys määritetään massan suhteena tilavuuteen. Testinäytteen massa määritetään punnitsemalla näyte kyllästetyssä pintakuivassa tilassa ja uudestaan uunikuivana. Veden massasta, jonka testinäyte syrjäyttää pyknometri- tai verkkokorimenetelmässä, määritetään veden tunnetun tiheyden perusteella tilavuus. Koska huokoisilla kiviaineksilla tiheys riippuu lajitteen raakoista, on näyte tarpeen jakaa lajitteisiin. Laboratoriossa standardin mukaan tutkittiin osanäytteet alle 4 mm:ä, 4/16 mm:ä ja yli 16 mm:ä. (SFS-EN 1097-6 2014)

6.3.7 Hehkutushäviö

Hehkutushäviö määritettiin materiaaleista seulotusta alle 4 mm raekokoon jakeesta. Hehkutushäviö määritetään standardin mukaan kahdesta rinnakkaisesta testinäytteestä. Jätteenpolton kuonafraktioiden, kuonaseosten sekä lietekompostiseoksen hehkutushäviö määritettiin standardin *SFS-EN 1744-7* mukaan. Standardista poiketen hehkutushäviö määritettiin portaittain. Portaina käytettiin 480 °C (4 tuntia), 800 °C (1 tunti) ja 925 °C (1 tunti).

Helsinki-moreenien hehkutushäviöt testattiin portaissa 550 °C (2 tuntia) ja 800 °C (1 tunti). Edellä mainitut portaat valittiin, koska niitä oli käytetty vastaavanlaisilla materiaaleilla aikaisemmin.

6.3.8 pH ja johtokyky

Näytteiden pH mitattiin standardin *SFS-ISO 10390* mukaan. Alle 2 mm:n raekoon näytettä, joka on kuivatettu < 40 °C lämpötilassa, mitataan vähintään 5 ml:a näytepulloon. Pulloon lisätään näytteen tilavuuteen verrattuna viisinkertainen tilavuus vettä. Käytettävän veden sähkönjohtavuuden on oltava alle 0,2 mS/m (25 °C) ja pH:n yli 5,6. Näytettä sekoitetaan sekoittimella tai ravistimella 60 ± 10 minuuttia, jonka jälkeen näytteen annetaan seistä vähintään yhden tunnin ja maksimissaan 3 tuntia. Näytepullon suu suljetaan, jottei näyte reagoisi ilman kanssa. Seisottamisen jälkeen pH mitataan pH-elektrodilla. (SFS-ISO 10390 2007)

Näytteiden johtokyky testattiin standardin *ISO 11265* mukaan. pH:n määrittämisestä poiketen testinäytteeseen (20 g alle kahden millimetrin raekoon näytettä) lisätään viisinkertainen tilavuus vettä (100 ml) näytteen massaansa verrattuna, jonka jälkeen testinäytettä ravistetaan 30 minuuttia ravistimessa. Tämän jälkeen näyte suodatetaan suodatinpaperia käyttäen, jonka jälkeen näyte on valmis elektrodilla mitattavaksi.

6.3.9 Paisuntakerroin

Polymeerimodifioidun bentoniitin ja kuonabentoniitin alle 0,063 mm:n lajitteen paisuntakerroin määritettiin standardin *ASTM D 5890-11* mukaisesti käyttäen nesteenä ionivaihdettua vettä. Standardin mukaan 100 %:a näytteestä tulee läpäistä 0,149 mm (100 mesh) seulan ja 65 %:a 0,075 mm (200 mesh) seulan. TTY:llä käytetään vastaavina seuloina 0,0125 mm ja 0,063 mm.

Kokeessa kuivattua ja jauhettua materiaalia punnitaan 2,00 g:aa. Materiaalia lisätään 0,1 g:n erissä 100 ml:n mittalasiin, jossa on 90 ml:aa ionivaihdettua vettä. Materiaali pölytetään varovasti veden pinnalle 30 sekunnin aikana. Materiaalin annetaan laskeutua 10 minuuttia ennen uutta materiaalilisäystä. Kun koko punnittu määrä on ripoteltu lasiin, täytetään mittalasi 100 ml:n merkkiin asti ja samalla huuhdellaan mahdolliset materiaali jäämät lasin reunoilta veteen. Mittalasin suu suljetaan. Kahden tunnin kuluttua tarkistetaan, onko näytteessä ilmakuplia, jotka voidaan poistaa kallistelemalla mittalasia varovasti 45 asteen kulmassa. Näytteen annetaan seistä vähintään 16 tuntia viimeisen näyte-erän lisäämisestä tai ilmakuplien poistamisesta. Laskeutuneen materiaalin tilavuus luetaan 0,5 ml:n tarkkuudella. Mittauksessa ei huomioida kevyttä flokkuloitunutta materiaalia laskeutuneen sedimentin päällä. (ASTM D 5890-11) Jos 16 tunnin jälkeen näytteessä ilmenee huomattavaa turpoamista (yli 10 %:a neljän tunnin aikana), tilavuuden mittausta voidaan jatkaa maksimissaan 48 tuntiin asti.

6.3.10 Vedenläpäisevyys

Lietekompostiseoksien, Helsinki-moreenien ja jätteenpolton kuonafraktioiden vedenläpäisevyys tutkittiin standardin *SFS-EN ISO 17892-11* mukaisesti vakiopainekokeena jäykkäseinämaisessä sellissä, jonka halkaisija oli 102 mm:ä. Halkaisijan vuoksi materiaalin maksimirakoko oli 20 mm:ä. Materiaaleista valmistettiin vedenläpäisevyyskappaleet sullomalla rakenteesta otettua näytettä haluttua kuivatilavuuspainoa vastaava määrä koeselliin. Kuivatilavuuspainot määritettiin työmaalla tehtyjen vesivolymetri- ja troxler-tulosten perusteella. Näyte tiivistettiin viidessä kerroksessa. Kokeessa mitataan ulosvirtaavan veden massaa tietyssä ajassa (virtaama), minkä perusteella määritetään vedenläpäisevyys k , kun tunnetaan paine-eron ja näytteen korkeuden suhde (gradientti), näytteen poikkipinta-ala ja veden lämpötila. Vedestä mitataan lämpötila, jotta voidaan suorittaa lämpötilan korjaus 20 asteeseen.

Kuonabentoniitin ja bitumikuonan vedenläpäisevyys mitattiin joustavaseinämaisellä menetelmällä standardin *SFS-EN ISO 17892-11* mukaisesti kahdessa eri kuivatilavuuspainossa. Vedenläpäisevyyskappaleet valmistettiin ICT-kiertotiivistinlaitteella. Molemmista materiaaleista valmistettiin kaksi rinnakkaista näytettä kussakin kuivatilavuuspainossa. Tavoitekuivatilavuuspainot määritettiin työmaalla tehtyjen vesi- ja hiekkavolymetrimittausten perusteella. Tehokas jännitys oli maksimissaan 20 kPa, joka vastaa pintarakenteesta aiheutuvaa tehokasta jännitystä paremmin kuin usein käytetty 50 kPa.

Ennen kokeen aloitusta näyte kyllästetään ja poistetaan mahdolliset ilmakuplat. Kokeessa sellipaine nostetaan hitaasti halutulle tasolle sellipainetta ja etu- ja takapainetta nostamalla. Etu- ja takapainetta muuttamalla nostetaan hydraulista gradienttia tehokkaan jännityksen pysyessä vakiona. Mittauksessa käytetty hydraulinen gradientti riippuu materiaalin vedenläpäisevyydestä. Sisään- ja ulosvirtauksen perusteella lasketaan vedenläpäisevyysarvot k näytteeseen virtaavalle ja sen läpi tulleelle virtaukselle, joiden keskiarvosta lasketaan varsinainen k -arvo, kun keskiarvo kerrotaan lämpötilakorjauskertoimella. Tulos ilmoitetaan 20 °C asteen lämpötilassa

6.4 Vesinäytteenotto

Kaivoihin kertyneestä vedestä tehtiin kenttämittauksia in situ -mittareilla ja otettiin näytteitä laboratoriomäärittelyä varten. Vahanen Environment Oy:n tekemissä kenttämittauksissa on mitattu happipitoisuus, lämpötila, pH, redox-potentiaali ja sähkönjohtavuus ja HSY:n tekemissä kenttämittauksissa lämpötila, pH ja sähkönjohtavuus (Vahanen 2019b).

Happipitoisuus määritettiin kenttämittarilla. Happipitoisuusnäyte otettiin homogenisoidusta kaivovedestä. Tämän jälkeen kaivoissa oleva vesi homogenisoitiin ja vedestä otettiin tarvittava määrä näytteitä muita kenttäkokeita ja laboratoriomäärittelyä varten. Laboratorionäytteet toimitettiin tutkittavaksi SGS Finland Oy:n laboratorioon. Seuranta-ajalle osui kuusi kenttämittausta ja kolme laboratorionäytteenottoa.

7. RAKENTAMINEN

Paikan, johon koerakenteet sijoitettiin, alkuperäinen kaltevuus oli 1:4, joten pohja muotoiltiin kaltevuuteen 1:7. Kaikkien koerakenteiden pohjalle levitettiin suojageotekstiili tai suodatinkangas ennen pohjakalvon asentamista. Suojageotekstiilin limitys oli ≥ 300 mm:ä ja neliöpaino vähintään 400 g/m^2 . Suojageotekstiilin tuli olla neulasidottua ja neulavapaata. Koealtaan päätyluiskassa pohjakalvon alapuolisena suojauksena käytettiin bentoniittimattoa, joka samalla toimi läpivientejä varmistava rakenteena. (Ramboll 2018b) Suojageotekstiilin pinta puhdistettiin mahdollisesta maa-aineksesta ennen pohjakalvon levittämistä.

Kaikkien koerakenteiden pohjalle ja luiskiin asennettiin kitkapinnotteinen LLDPE-kalvo. Kalvo levitettiin puomin avulla rakenteen sivulta. Kalvon nimellispaksuus oli 1,5 mm:ä. Kalvolla rakenteesta tehtiin lysimetri, joka kerää kaiken rakenteeseen tulevan veden. Vesiiviyyden varmistamiseksi kaikki putkien läpiviennit tehtiin läpivientielementeillä. Pohjakalvo liitettiin kaulukseen ekstruusio- eli pursoitesaumalla (kuva 34). Saumojen pinnat puhdistettiin ja tarvittaessa hiottiin. Läpivientien ja paikkojen ekstruusiosaumamat testattiin kipinäkokeella standardin ASTM D6365 mukaisesti. Kalvon leveydestä johtuen jokaiseen altaaseen tuli yksi pitkittäissauma. Kalvokaistojen väliset saumat tehtiin kaksoissaumalla, joka painekoestettiin standardin ASTM D5820 mukaisesti. Sauman päästä otettiin näytepalat, joista toisesta tehtiin kuorinta- ja vetokokeet työmaalla (kuva 34). Toinen näytepaloista luovutettiin valvojalle. (Ramboll 2018b)



Kuva 34. Vasemmalla läpiviennin ekstruusiosausaus ja oikealla kuorintakoe kaksoissaumasta (Reiman 2018).

Kalvon yläpuolisena suojakerroksena toimii kaikissa koerakenteissa tarkkailukerroksen salaojamatto, joka levitettiin koerakenteen pohjalla olevan kalvon päälle. Rullan leveydestä johtuen tarkkailukerrokseen tuli yksi pitkittäissauma. Salaojamaton ytimen ympärillä olevat suodatinkankaat limitettiin vähintään 100 mm:ä ja vettäjohtavat ytimet liitettiin yhteen nippusiteillä 300 mm:n välein. Koko koerakenteen pituus rakennettiin aina yhdestä rullapituudesta. (Ramboll 2018b) Tarkkailukerrokseen kertyneet vedet kerättiin

altaan pohjalla olevan läpiviennin kautta. Alkuperäisistä suunnitelmista poiketen altaiden alimpaan kohtaan suunniteltu pohjakouru sekä tarkkailukerroksen vesienkeräämiseen suunniteltu salaojaputki poistettiin kalvon asentamisen helpottamiseksi sekä ekstruusiosaumojen ja muiden kalvon heikkouskohtien vähentämiseksi (Vahanen 2018a).

Koerakenteiden toteutus dokumentointiin valokuvaamalla. Valokuvista tehtiin rakennekohtaiset valokuva-liitteet, jotka ovat diplomityössä liitteinä (liitteet 1-5).

7.1 Koerakenne A.1 bentoniittimatto ja salaojamatto

Koerakenteessa A.1 tarkkailukerroksen salaojamaton päälle asennettiin bentoniittimatto, joka toimii mineraalisena tiivistyskerroksena. Bentoniittimatto levitettiin rakenteen sivulta rullan läpi ulottuvaa puomia käyttäen (kuva 35). Koko koerakenteen pituus rakennettiin yhdestä rullapituudesta. Päätyluiskaan lisättiin noin puolen metrin bentoniittimatokaistale vedenohjauksrakenteeksi (Vahanen 2018a). Bentoniittimaton saumoihin lisättiin bentoniittijauhetta. (Ramboll 2018b)

Bentoniittimaton päälle levitettiin salaojamatto, joka toimii kuivatuskerroksena. Koko koerakenteen pituus rakennettiin aina yhdestä rullapituudesta. (Ramboll 2018b) Alkuperäisissä suunnitelmissa olleesta salaojaputkesta, johon piti kerätä salaojamattoon kertyvät vedet, luovuttiin.

Pintakerroksen vedet kerätään salaojaputken kautta. Kuivatuskerroksen salaojamaton päälle asennettiin noin metrin levyinen LLDPE-kalvokaistale, joka kiinnitettiin ekstruusiosaumalla päätyluiskaan ja läpiviennin kaulukseen (kuva 35). Pintakerros tehtiin Helsinki-moreenista. Kerroksen kokonaispaksuus on 800 mm:ä. (Ramboll 2018b) Pintakerros tiivistettiin kaivinkoneen kauhalla kevyesti painellen kahdessa 400 mm:n paksuisessa kerroksessa. Ensimmäisestä osakerroksesta tehtiin viidestä pisteestä troxler-mittauksia ja toisesta osakerroksesta yhdeksän troxler- ja neljä vesivolymetrimittausta.



Kuva 35. Vasemmalla bentoniittimatton levittäminen ja oikealla pintakerroksen vedet keräävä salaojaputki (Reiman 2018).

Koerakenteen kasvukerros tehtiin lietekompostiseoksesta. Kerrospaksuus oli 200 mm:ä. (Ramboll 2018b) Kasvukerros rakennettiin pari viikkoa muiden rakennekerrosten valmistumisen jälkeen. Koerakenteen alaosaan pintakerroksen päälle asennettiin LLDPE-kalvokaistale, jonka päällä olevaan salaojaputkeen johdetaan kasvukerrokseen kertyvät vedet. Kalvokaistale on koko rakenteen levyinen toisin kuin pintakerroksen vedet keräävän salaojaputken alla. Pintakerros pääsi tiivistymään kalvokaistaleen alla lähellä sivuluiskaa, joka muutti rakenteen kaltevuutta, joten rakennetta jouduttiin korjaamaan jälkikäteen (Vahanen 2018a).

Kasvukerroksesta tehtiin viisi troxler- ja kolme vesivolymetrimittausta. Kasvukerros nurmetettiin. Pintavalunta kerätään ylimmän kerroksen alareunaan rakennettavalla linjakuivatuskourulla (Ramboll 2018b).

7.2 Koerakenne A.2 kuonabentoniittiseos ja salaojamatto

Pohjakalvo suojattiin luiskissa suodatinkankaalla, koska rakenteessa käytettiin jätteenpolton kuonaa. Koerakenteen A.2 tiivistyskerros tehtiin kuonabentoniitista. Ennakkokokeiden mukaan kuonabentoniitissa tulee olla vähintään näljä painoprosenttia polymeeri-parannettua bentoniittia runkoaineen märkäpainosta. Tiivistyskerroksen tavoitevedenläpäisevyyskerroin on $< 10^{-8}$ m/s ja tavoitekuivairtitiheys, jolla ennakkokokeiden perusteella tavoiteltu vedenläpäisevyys saavutetaan, on noin 1400-1500 kg/m³. (Ramboll 2018b)

Työtapaselosteesta poiketen kuonabentoniitin koetiivistys tehtiin osana lopullista rakennetta. Kuonabentoniittikerros rakennettiin kahdessa 250 mm:n kerroksessa, joissa alemmassa tehtiin koetiivistys. Alempi kerros tiivistettiin 13,5 tonnin jyrällä kolmella yliajokerralla ja jokaisen yliajon jälkeen tiivistetystä osakerroksesta tehtiin kaksi rinnakkaista troxler-mittausta. Tulosten perusteella kolmella yliajokerralla saavutettiin haluttu kuivairtitiheys. Tilaajan toiveesta ylempi kerros tiivistettiin neljällä yliajokerralla. (Vahanen 2018b) Alemman osakerroksen pinta karhennettiin ennen ylemmän osakerroksen rakentamista (Ramboll 2018b). Reunat tiivistettiin erikseen täryttimellä. Alemman ja

ylemmän osakerroksen pinnasta tehtiin kustakin viisi troxler-mittausta. Alemmasta osakerroksesta tehtiin kolme vesivolymetrimittausta.

Kuonabentoniitin päälle tuli samanlaiset rakenteet kuin koerakenteessa A.1 eli kuivatuskerroksen salaojamatto, pintakerros Helsinki-moreenista ja kasvukerros lietekomposti-seoksesta. Kuivatuskerrokseen kertyvät vedet kerätään kuonabentoniittiin muotoiltuun painanteeseen, johon laitettiin salaojaputki. Pintakerroksen vedet kerättiin samanlaisella ratkaisulla kuin koerakenteessa A.1. Kasvukerrokseen kertyvät vedet keräävää läpivientä ei ole dokumentoitu. Pintavalunta kerätään ylimmän kerroksen alareunaan rakennettavalla linjakuivatuskourulla (Ramboll 2018b). Helsinki-moreenista tehtiin kymmenen troxler- ja kolme vesivolymetrimittausta. Kasvukerroksesta tehtiin viisi troxler- ja kolme vesivolymetrimittausta. Pintakerros nurmetettiin.

7.3 Koerakenne B.2 kapillaarisulkurakenne ohennetulla pintakerroksella

Koerakenteessa B.2 käytettiin LLDPE-kalvon alapuolisena suojakerroksena kahta päällekkäistä suodatinkangasta, joiden neliöpaino oli 200 g/m^2 , suojageotekstiilin (neliöpaino 400 g/m^2) sijaan riippumattoman laadunvalvojan hyväksynnällä (Vahanen 2018b). Tarkkailukerroksen salaojamaton päälle rakennettiin 250 mm:n paksuinen kerros jätteenpolton kuonafraktiosta 5/12 mm, joka toimii kapillaarikatkona. Kerros tasoitettiin kevyesti työkoneella yliajamalla. (Ramboll 2018b) Kapillaarikatkosta tehtiin viisi troxler- ja kolme vesivolymetrimittausta.

Kapillaarikatkon päälle tuli 500 mm:n paksuinen kerros jätteenpolton kuonafraktiosta 0/5 mm, joka toimii kapillaarieristeenä. Kerros tiivistettiin kahdessa kerroksessa lähellä ennakkokokeissa määritettyä optimivesipitoisuutta (21 %:a). Molemmista kerroksista tehtiin viisi troxler-mittausta. Kapillaarieristeestä tehtiin kolme vesivolymetrimittausta. Valokuvien perusteella pohjakalvon luiskat suojattiin suodatinkankaalla vasta kapillaarieristeen rakentamisen jälkeen.

Kapillaarieristeen päälle tehtiin 500 mm:n paksuinen kuivatuskerros jätteenpolton kuonafraktiosta 12/35 mm. Kerros tasoitettiin kevyesti työkoneella yliajamalla. (Ramboll 2018b) Kuivatuskerroksesta tehtiin viisi troxler- ja kolme vesivolymetrimittausta.

Koerakenteen kuivatuskerros ja pintakerros erotettiin toisistaan ensin suunnitelmista poiketen salaojamatolla (Vahanen 2018c), joka vaihdettiin seuraavalla viikolla suodatinkankaaseen (Vahanen 2018d). Pintakerroksen pinnan avaamisen yhteydessä yksi yhdistelmäantureista (anturi 11) rikkoontui, mutta sitä ei korvattu uudella.

Pintakerros tehtiin koerakenteisiin A.1 ja A.2 verrattuna ohuempana. Pintakerroksen paksuus on 500 mm:ä ja se on tehty Helsinki-moreenista. Helsinki-moreeni tiivistettiin kevyesti kaivinkoneen kauhalla painelemalla. Pintakerros tiivistettiin kahdessa kerroksessa,

joista molemmista tehtiin viisi troxler-mittausta. Pintakerroksesta tehtiin kolme vesivolymetrimittausta. Pintakerros nurmetettiin. Pintavalunta kerätään ylimmän kerroksen alareunaan rakennettavalla linjakuivatuskourulla. (Ramboll 2018b) Vedet keräävät läpiviennit on dokumentoitu vain ennen rakennekerrosten rakentamista.

7.4 Koerakenne C.0 väliaikainen peittorakenne moreenista

Koerakenteessa C.0 käytettiin LLDPE-kalvon alla suojakerroksena suojageotekstiilin sijaan (neliöpaino 400g/m^2) kahta päällekkäistä suodatinkangasta, joiden neliöpaino on 200g/m^2 (Vahanen 2018c). Tarkkailukerroksen salaojamaton päälle tuli 200 mm:n paksuinen Helsinki-moreeni -kerros. Helsinki-moreenista tehtiin kolme vesivolymetri- ja viisi troxler-mittausta. Helsinki-moreeni -kerros nurmetettiin.

Kuvien perusteella rakenteen läpi on kolme läpivientä, joista kaksi on koerakenteen pohjalla. Kuvien perusteella pohjalla oleviin läpivienteihin liitetyt putket liittyvät yhteisellä t-haaralla tarkkailukerroksen kaivoon C0.2. Valokuvien perusteella pohjakalvon luiskat suojattiin yläpuolelta suodatinkankaalla Helsinki-moreeni -kerroksen rakentamisen jälkeen. Helsinki-moreeni -kerros nurmetettiin. Pintavalunta kerätään ylimmän kerroksen alareunaan rakennettavalla linjakuivatuskourulla.

7.5 Koerakenne U.1 pintarakenne bitumistabiloidusta kuonasta

Koerakenteessa U.1 LLDPE-kalvon alla käytettiin suojakerroksena suojageotekstiilin sijaan (neliöpaino 400g/m^2) kahta päällekkäistä suodatinkangasta, joiden neliöpaino on 200g/m^2 (Vahanen 2018d). Pohjakalvon luiskat suojattiin yläpuolelta suodatinkankaalla. Tarkkailukerroksen salaojamaton päälle rakennettiin 500 mm:n paksuinen kerros bitumikuonasta, joka tiivistettiin jyrällä (Vahanen 2018e). Urakoitsija teki bitumikuonasta kolme troxler-mittausta (Vahanen 2018e) sekä kolme hiekkavolymetrimittausta. Kaksi vesivolymetrimittausta tehtiin troxler- ja hiekkavolymetrimittausten vierestä.

Bitumikuonan päälle tuli kuivatuskerrokseksi salaojamatto. Matot limitettiin ja ytimet kiinnitettiin toisiinsa nippusiteillä (Vahanen 2018e). Pintakerros rakennettiin jätepitöisen maan, hiekoitushiekan ja lietekompostin seoksesta. Pintakerros nurmetettiin. Pintavalunta kerätään ylimmän kerroksen alareunaan rakennettavalla linjakuivatuskourulla (Ramboll 2018b). Vedet keräävät läpiviennit on dokumentoitu vain ennen rakennekerroksien rakentamista.

8. RAKENTAMISEN AIKAISEN LAADUNVALVONNAN TULOKSET

8.1 Tarkemittausten tulokset

Urakoitsijan tekemien mittausten perusteella lasketut mineraalisten rakennekerrosten pinta-alat on esitetty taulukossa 4. Pinta-alat ovat rakennekerroksen yläpinnan pinta-aloja.

Taulukko 4. Koerakenteiden mineraalisten rakennekerrosten yläpintojen pinta-alat.

	Yläpinnan pinta-ala (m ²)				
	A.1	A.2	B.2	C.0	U.1
Kasvukerros	120	127	-	-	-
Pintakerros	122	127	134	94	118
Tiivistyskerros	-	107	-	-	118
Kapillaarisulkurakenne + kuivatuskerros	-	-	130	-	-

Urakoitsijan toimittamat mineraalisten rakennekerrosten tilavuudet on esitetty taulukossa 5. Kapillaarisulkurakenteen osalta eri jätteenpolton kuonafraktioiden tilavuuksia ei ole eritelty.

Taulukko 5. Koerakenteiden mineraalisten rakennekerrosten tilavuudet.

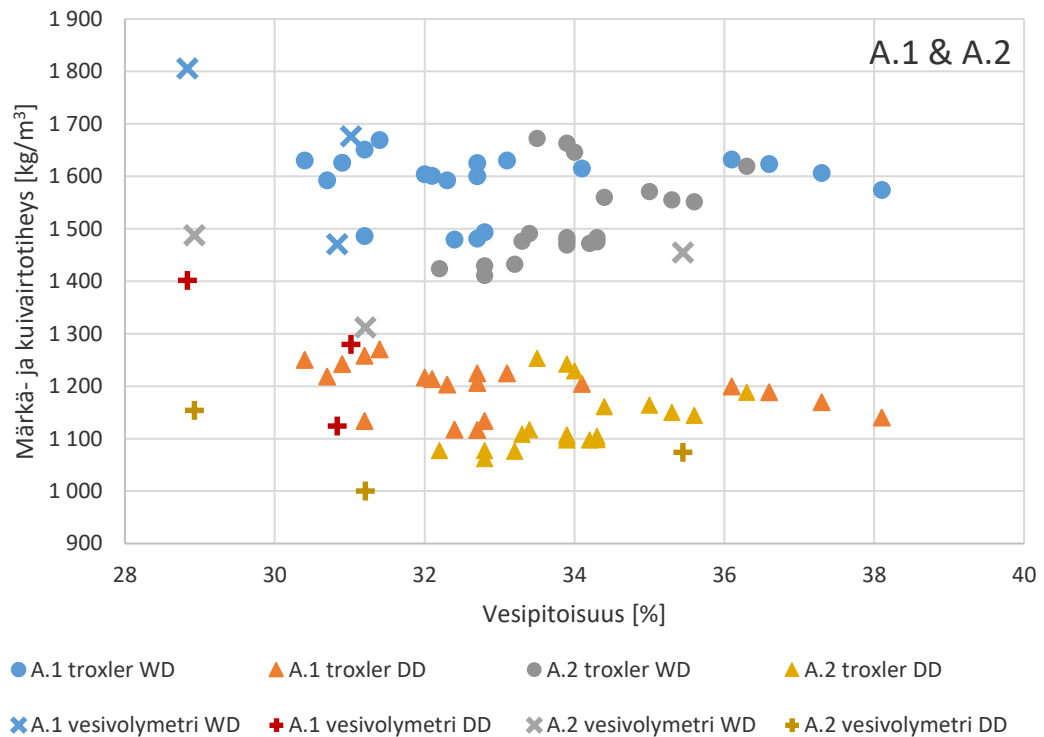
	Rakennekerroksen tilavuus (m ³)				
	A.1	A.2	B.2	C.0	U.1
Kasvukerros	23	25	-	-	-
Pintakerros	64	93	58	21	23
Tiivistyskerros	-	46	-	-	58
Kapillaarisulkurakenne + kuivatuskerros	-	-	134	-	-

Urakoitsija ei toimittanut kaikkien asennettujen instrumenttien, kenttämittausten ja näytenpisteiden sijaintitietoja lokakuun 2019 loppuun mennessä. Bentoniitti- ja salaojamattojen pinta-aloja ei ole ilmoitettu. Kapillaarisulkurakenteen B.2 eri jätteenpolton kuonafraktioiden pinta-aloja tai tilavuuksia ei ole eritelty.

8.2 Tiivistystarkkailun tulokset

Tiivistystarkkailun tulokset on esitetty kuvissa 36-40. WD tarkoittaa märkäirtotiheyttä (*wet density*) ja DD kuivairtotiheyttä (*dry density*). Troxler-mittauksen WD-lukemat on merkitty kuvaan palloilla ja DD-lukemat kolmioilla. Vesivolymetrimittausten WD-tulokset on merkitty rasteilla ja DD-tulokset risteillä. Koerakenteesta U.1 tehtyjen hiekkavolumetrimittausten mittaustulokset on merkitty neliöillä.

Lietekompostiseoksesta tehtyjen tiivistystarkkailun tulokset on esitetty kuvassa 36. Rakenteessa A.2 on tulosten perusteella saavutettu keskimäärin pienempi irtotiheys A.1:een verrattuna molemmilla tavoilla mitattuna. Troxler-laitteella mitattuna vesipitoisuuden keskiarvo on korkeampi kuin vesivolymetrimittauksen yhteydessä laboratorioissa määritetty vesipitoisuus.



Kuva 36. Koepintarakenteissa A.1 ja A.2 kasvukerroksena käytetyn lietekompostiseoksen tiivistystarkkailun tulokset.

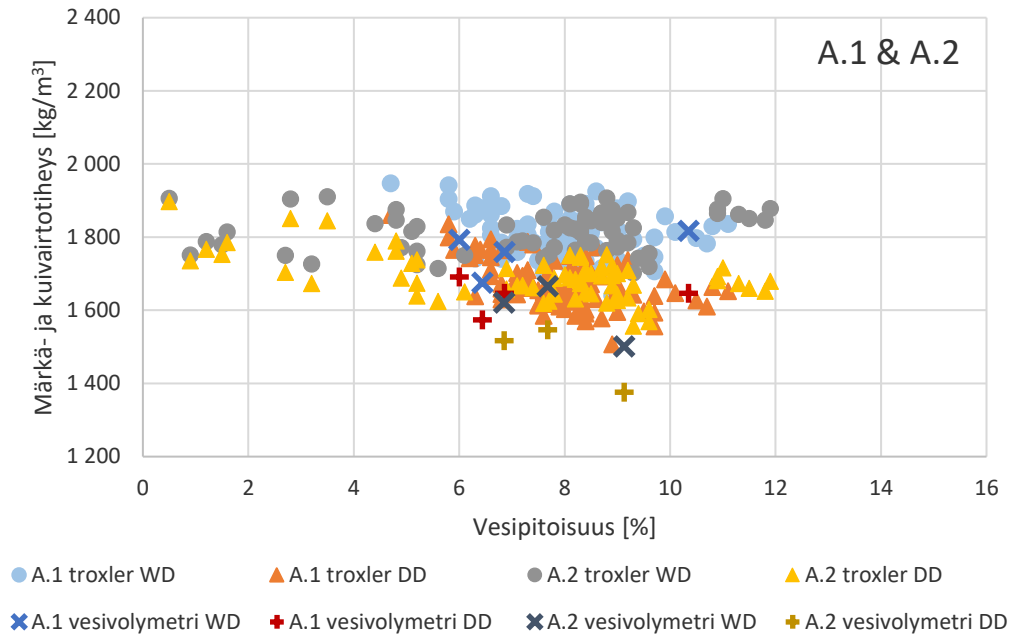
Lietekompostiseoksesta tehtyjen tiivistystarkkailumittausten vaihtelualueet, keskiarvot ja hajonnat on esitetty taulukossa 6. Työselityksessä lietekompostiseokselle ei ole esitetty tavoitearvoa kuivairtotiheydelle. Koerakenteessa A.1 saavutettiin keskimääräisesti korkeampi kuivairtotiheyden arvo (1196 kg/m^3) kuin koerakenteessa A.2 (1133 kg/m^3). Troxler-mittalaitteella mitattuna kuivairtotiheyksien keskiarvoilla on eroa hieman yli 60 kg/m^3 , ja vesivolymetrillä mitatuilla on eroa lähes 200 kg/m^3 . Vesivolymetrimittaustulosten hajonta on suurempi, mikä johtuu pienemmästä mittaussäärästä (3 kpl). Troxler-mittaus on tehty viidessä eri pisteessä neljällä eri syvyydellä (0, 50, 100 ja 150 mm:ä). Vaikka

vesivolymetrimittauksen yhteydessä otettu näyte on punnittu laboratoriossa kokonaan parin päivän päästä mittauksesta, on vesipitoisuus ollut useimmiten joko pienempi kuin troxler-laitteella mitattu tai troxler-laitteella mitattujen vesipitoisuuksien minimien luokkaa.

Taulukko 6. *Lietekompostiseoksesta tehtyjen tiivistystarkkailumittausten vaihtelualueet, keskiarvot ja hajonnat.*

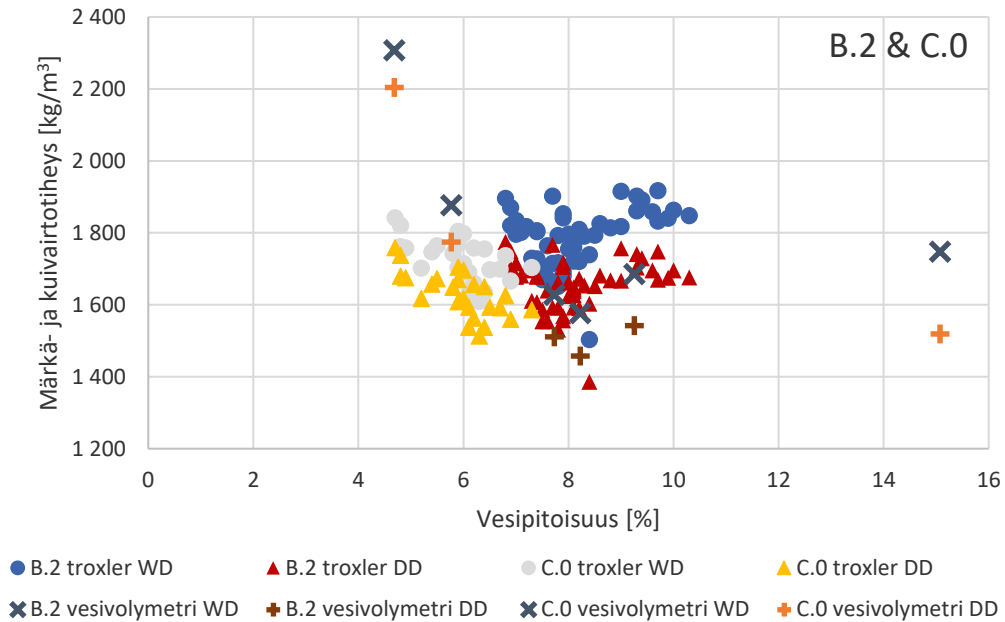
		A.1 lietekompostiseos			A.2 lietekompostiseos		
		Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]	Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]
Troxler n=5	Maksimi	1 669	1 270	38,1	1 672	1 253	36,3
	Minimi	1 479	1 116	30,4	1 411	1 062	32,2
	Keski-arvo	1 590	1 196	33,0	1 518	1 133	34,0
	Hajonta	56,8	45,7	2,2	79,7	55,8	1,0
Vesivolymetri n=3	Maksimi	1 805	1 401	31	1 488	1 154	35,4
	Minimi	1 470	1 124	29	1 312	1 000	28,9
	Keski-arvo	1 651	1 268	30	1 418	1 076	31,9
	Hajonta	138,0	113,6	1,0	76,3	62,9	2,7

Helsinki-moreenista tehdyn tiivistystarkkailun tulokset on esitetty kuvissa 37 ja 38. Kuvassa 37 on koerakenteiden A.1 ja A.2 tiivistystarkkailun tulokset. Molemmissa koerakenteissa on saavutettu troxler-mittausten keskiarvojen perusteella lähes sama irtotiheys. Vesivolymetrimittauksen kuivairtitiheyden keskiarvon perusteella koerakenne A.1 (1 640 kg/m³) on huomattavasti tiiviimpi kuin koerakenne A.2 (1 480 kg/m³). Troxler-mittauksella on koerakenteessa A.2 kahdessa mittapisteessä mitattu poikkeavan alhaisia vesipitoisuuksia muihin pisteisiin verrattuna.



Kuva 37. Koerakenteissa A.1 ja A.2 pintakerroksena käytetyn Helsinki-moreenin tiivistystarkkailun tulokset.

Kuvassa 38 on esitetty Helsinki-moreenin tiivistystarkkailun tulokset koerakenteista B.2 ja C.0. Koerakenteen C.0 moreenikerros on keskimäärin hieman kuivempi kuin koerakenteen B.2 pintakerros. Koerakenteissa on saavutettu troxler-mittausten mittaustulosten keskiarvojen perusteella lähes sama kuivairtitiheys. Vesivolymetrimittauksien kuivairtitiheyksien keskiarvojen perusteella koerakenne B.2 ($1\,503\text{ kg/m}^3$) on selvästi löyhempi kuin koerakenne C.0 ($1\,832\text{ kg/m}^3$). Troxler-mittauksella määritetty keskimääräinen kuivairtitiheys ja vesipitoisuus ovat samaa luokkaa kuin rakenteiden A.1 ja A.2 Helsinki-moreeneilla.



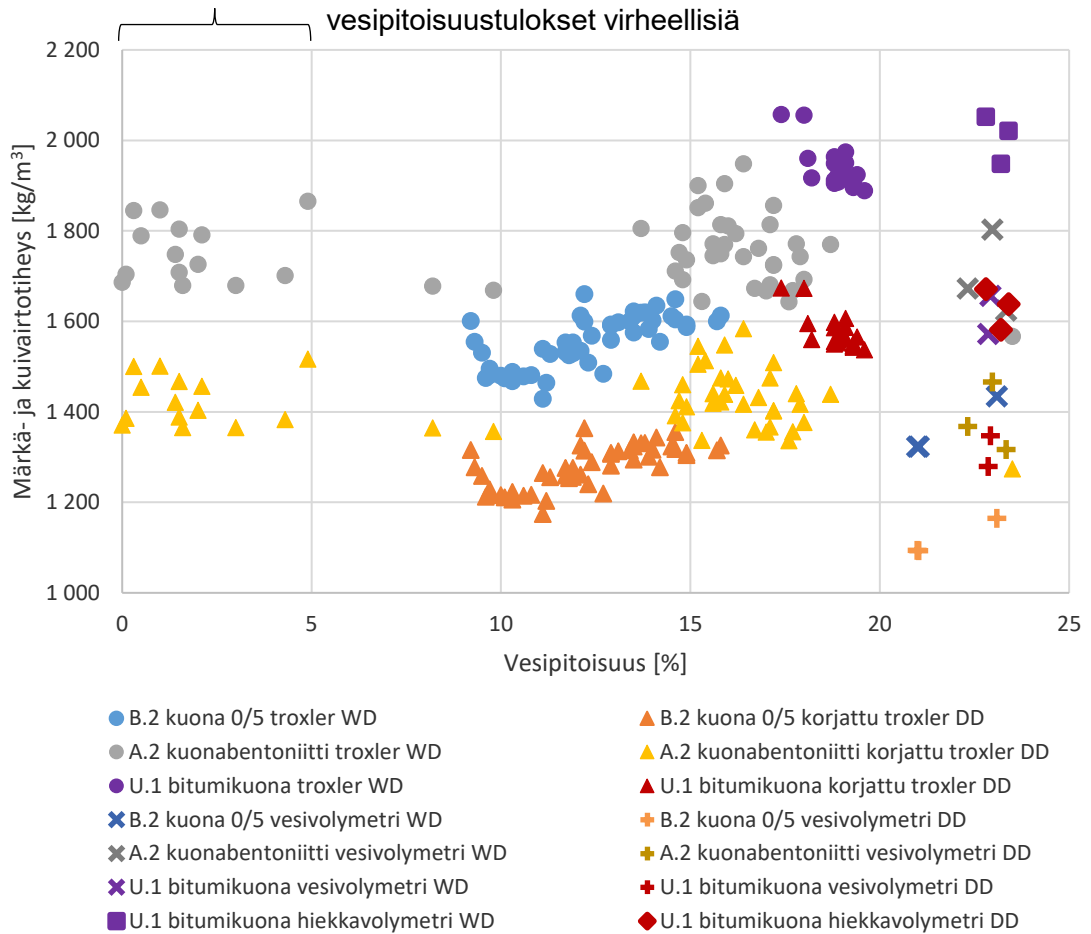
Kuva 38. Koerakenteissa B.2 ja C.0 pintakerroksena käytetyn Helsinki-moreenin tiivistystarkkailun tulokset.

Helsinki-moreenista tehtyjen tiivistystarkkailumittausten vaihtelualueet, keskiarvot ja hajonnat on esitetty taulukossa 7. Työselityksessä pintakerroksen tai koerakenteen C.0 Helsinki-moreenikerrokselle ei ole annettu irtotiheydelle tavoitearvoa. Koerakenteissa A.1, A.2 ja B.2 Helsinki-moreeni tiivistettiin kaivinkoneen kauhalla kevyesti tiivistämällä kahdessa kerroksessa ja koerakenteessa C.0 yhdessä kerroksessa. Troxler-tulosten keskiarvon perusteella koerakenteissa on saavutettu suunnilleen sama kuivairtitiheys (noin 1630–1690 kg/m³) hajonnan ollessa samaa suuruusluokkaa. Vesivolymetrimittausten kuivairtitiheydessä oli suurempaa hajontaa. Koerakenteessa C.0 yhteen vesivolymetrin mittaushetkeen osui iso kivi, joka aiheutti merkittävästi suuremman kuivairtitiheyden, ja toiseen mittapisteseen selvästi hienorakeisempi kohta. Vesivolymetrimittauksessa kuivairtitiheys on yleensä troxler-laitteella mitattua pienempi. Vesivolymetrimittauksia on huomattavasti vähemmän kuin troxler-mittauksia, joita tehtiin vähintään viisi kappaletta tiivistettävää osakerrosta kohti. Vesipitoisuuksissa troxler- ja vesivolymetrimittausten välillä ei ole suurta eroa. Koerakenteessa A.2 on troxler-laitteella kahdessa mittapistessä mitattu poikkeuksellisen pieniä vesipitoisuuksia, mikä voi johtua mittausvirheestä.

Taulukko 7. Helsinki-moreenista tehtyjen tiivistystarkkailumittausten vaihtelualueet, keskiarvot ja hajonnat.

		A.1 pintakerros			A.2 pintakerros		
		Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]	Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]
Troxler n=14 (A.1) & 10 (A.2)	Maksimi	1 947	1 860	11,1	1 910	1 897	11,9
	Minimi	1 641	1 507	4,7	1 702	1 557	0,5
	Keski-arvo	1 805	1 673	7,9	1 816	1 694	7,3
	Hajonta	59,6	62,7	1,2	54,1	64,1	2,8
Vesivolymetri n=4 (A.1) & 3 (A.2)	Maksimi	1 817	1 646	10,4	1 666	1 547	9,1
	Minimi	1 675	1 574	6,0	1 501	1 376	6,8
	Keski-arvo	1 761	1 640	7,4	1 596	1 480	7,9
	Hajonta	53,5	42,0	1,7	69,4	74,7	0,9
		B.2 pintakerros			C.0 pintakerros		
		Märkäirto- tiheys [kg/m ³]	Kuivairto- tiheys [kg/m ³]	Vesipitoi- suus [%]	Märkäirto- tiheys [kg/m ³]	Kuivairto- tiheys [kg/m ³]	Vesipitoi- suus [%]
Troxler n=10	Maksimi	1 917	1 775	10,3	1 841	1 759	7,3
	Minimi	1 503	1 386	6,8	1 609	1 513	4,7
	Keski-arvo	1 789	1 654	8,2	1 726	1 630	5,9
	Hajonta	79,3	70,3	0,9	58,4	61,8	0,7
Vesivolymetri n=3	Maksimi	1 685	1 542	9,3	2 307	2 204	15,1
	Minimi	1 577	1 457	7,7	1 747	1 519	4,7
	Keski-arvo	1 630	1 503	8,4	1 977	1 832	8,5
	Hajonta	44,1	35,1	0,6	239,4	282,9	4,7

Koerakenteen B.2 jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm:ä ja samaa kuonaa runkoaineenaan käyttävien kuonaseosten, kuonabentoniitin (A.2) ja bitumikuonan (U.1), tiivistystarkkailun tulokset on esitetty kuvassa 39. Kuvassa näkyvät troxler-mittauksen kuivairtotiheyden arvot eivät ole laitteen suoraan mittaamia kuivairtotiheyksiä. Lukemat ovat vesivolymetrinäytteiden vesipitoisuuden perusteella troxler-laitteen märkäirtotiheydestä laskettuja, ns. korjattuja kuivairtotiheyksiä. Bitumikuonan troxler-mittaukset on tehty urakoitsijan troxler-laitteella ja muiden materiaalien TTY:n troxler-laitteella. Urakoitsijalla oli käytössään laitteen uudempi malli. Urakoitsija teki bitumikuonasta myös kolme hiekkavolymetrimittausta.



Kuva 39. Jätteenpolton kuonafraction 0/5 mm:ä, kuonabentoniitin ja bitumikuonan tiivistystarkkailun tulokset.

Jätteenpolton kuonafraktiosta 0/5 mm:ä ja kuonaseoksista tehtyjen tiivistystarkkailumittausten vaihtelualueet, keskiarvot ja hajonnat on esitetty taulukossa 8. Hiekka- ja vesivolymetrinäytteistä on laboratoriossa määritetty suurempi vesipitoisuus kuin troxler-laitteella mitattuna. Aikaisemmissa tutkimuksissa on todettu, että troxler-laite mittaa jätteenpolton kuonan vesipitoisuuden virheellisesti (Suomen Erityisjäte 2017). Koerakenteen A.2 kuonabentoniitissa mitattiin troxler-laitteella epärealistisen pieniä ja jopa pari negatiivista vesipitoisuutta, jotka jätettiin tulosten ulkopuolelle. Kentällä on tapahtunut mitauksessa inhimillinen virhe, joka johtuu todennäköisesti siitä, että mittalaitteeseen on syötetty väärä syvyyden arvo. Tästä huolimatta troxler-laitteen ilmoittama irtotiheyden taso on lähes sama kuin pisteissä, joissa vesipitoisuustulos on järkevää suuruusluokkaa ja syvyys on syötetty laitteelle oikein. Syynä voi olla myös metallinpalanen, joka aiheuttaa häiriötä mittaukseen.

Jätteenpolton kuonaseoksista vain kuonabentoniitin kuivairtitiheydelle oli asetettu tavoitetaso, joka oli 1400–1500 kg/m³. Koska troxler-laite mittaa vesipitoisuuden virheellisesti ja oletettavasti kuonan märkäirtitiheyden oikein, korjattiin troxler-mittauksen märkäirtitiheyden arvo kuivairtitiheydeksi vesivolymetrimittauksen yhteydessä laboratoriossa

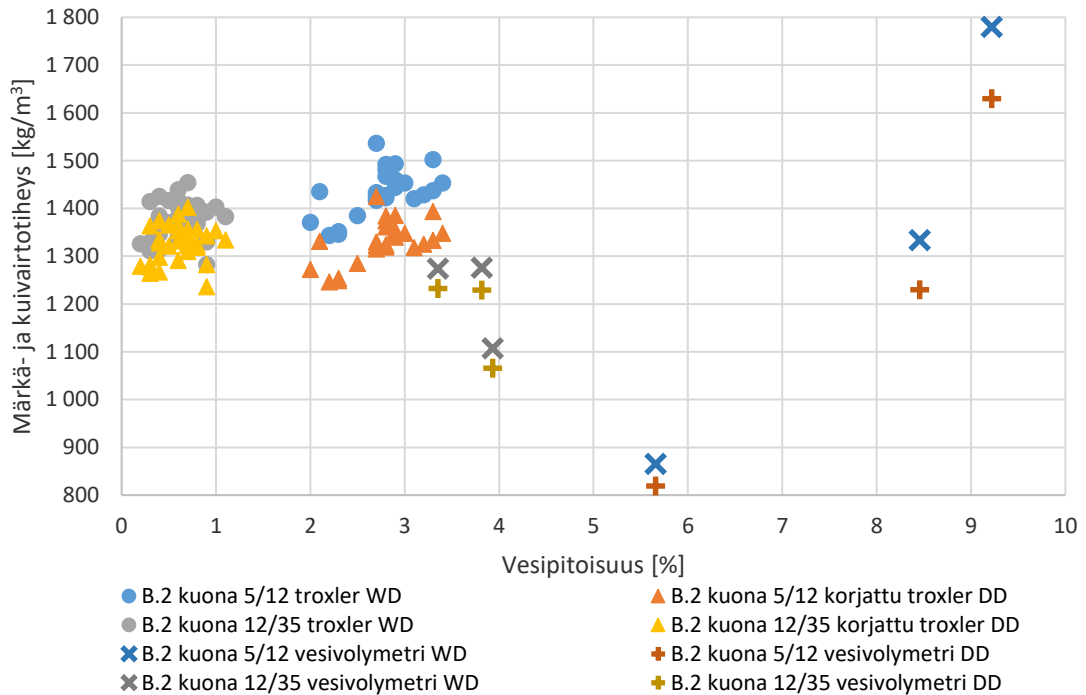
määritetyn keskimääräisen vesipitoisuuden perusteella. Troxler-laitteella ja vesivolymetrillä mitattiin alle 1400 kg/m^3 kuivairtotehiyksiä. Troxler-mittausten kuivairtotehiyden keskiarvo on yli 1400 kg/m^3 , mutta vesivolymetrimittausten kuivairtotehiyden keskiarvo on alle 1400 kg/m^3 . Tosin kuonabentoniitista tehtiin vain kolme vesivolymetrimittausta, kun taas troxler-mittauksia tehtiin kymmenen.

Bitumikuonasta tehtiin vesi- ja hiekkavolymetrimittauksia. Hiekkavolymetrillä mitattiin keskimäärin 300 kg/m^3 suurempia kuivairtotehiyden arvoja kuin vesivolymetrillä. Vesipitoisuudessa ei ollut merkittävää eroa, joten ero tulee kentällä mitatusta kuopan tilavuudesta. Troxler-tuloksiin verrattuna vesivolymetrimittauksella saatiin tulokseksi pienempi kuivairtotehiys ja hiekkavolymetrimittauksilla keskimääräisesti korkeampi kuivairtotehiys.

Taulukko 8. *Jätteenpolton kuonafraktiosta 0/5 mm, kuonabentoniitista ja bitumi-kuonasta tehtyjen tiivistystarkkailumittausten vaihtelualueet, keskiarvot ja hajonnat. Taulukossa VVM tarkoittaa vesivolymetriä ja HVM hiekkavolymetriä.*

		B.2 kuona 0/5 mm			A.2 kuonabentoniitti		
		Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Korjattu kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]	Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Korjattu kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]
Troxler n=10	Maksimi	1 660	1 364	15,8	1 948	1 584	34,7
	Minimi	1 429	1 240	9,2	1 557	1 266	8,2
	Keski-arvo	1 555	1 310	12,3	1 751	1 423	17,1
	Hajonta	57,4	47,1	1,8	77,2	62,7	4,1
		Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]	Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]
Vesivolymetri n=3	Maksimi	1 434	1 165	23,1	1 803	1 466	23,3
	Minimi	1 323	1 093	21,0	1 624	1 316	22,3
	Keski-arvo	1 360	1 117	21,7	1 700	1 383	22,9
	Hajonta	52,3	33,8	1,0	75,6	62,1	0,4
Bitumikuona U.1							
		Märkä-irtotiheys [kg/m ³]	Korjattu kuivairto- tiheys [kg/m ³]	Vesi- pitoisuus [%]			
Troxler n=3	Maksimi	2 057	1 674	19,6			
	Minimi	1 889	1 537	17,4			
	Keski-arvo	1 936	1 575	18,9			
	Hajonta	45,4	36,9	0,5			
		VVM märkä- irtotiheys [kg/m ³]	VVM kuiva- irtotiheys [kg/m ³]	VVM vesi- pitoisuus [%]	HVM märkä- irtotiheys [kg/m ³]	HVM kuiva- irtotiheys [kg/m ³]	HVM vesi- pitoisuus [%]
VVM n=2 HVM n=3	Maksimi	1 656	1 347	22,9	2 052	1 671	23,4
	Minimi	1 572	1 279	22,9	1 948	1 581	22,8
	Keski-arvo	1 614	1 313	22,9	2 007	1 630	23,1
	Hajonta	42,1	34,0	0,0	43,6	37,2	0,2

Koerakenteen B.2 jätteenpolton kuonafraktioiden 5/12 mm:ä ja 12/35 mm:ä tiivistystarkkailun tulokset on esitetty kuvassa 40. Kuvassa esitetyt troxler-mittauksen kuivairtitiheyden arvot eivät ole laitteen suoraan mittaamia kuivairtitiheyksiä. Lukemat ovat vesivolymetrinäytteiden vesipitoisuuden perusteella troxler-laitteen märkäirtitiheydestä laskettuja, ns. korjattuja kuivairtitiheyksiä.



Kuva 40. Jätteenpolton kuonafraktioiden 5/12 mm:ä ja 12/35 mm:ä tiivistystarkkailun tulokset.

Tulosten perusteella troxler-laite mittaa vesipitoisuuden virheellisesti, koska laitteen antama vesipitoisuus on vesivolymetrimittausta selkeästi pienempi. Molemmat materiaalit on tiivistetty rakenteeseen kevyesti yliajamalla (Ramboll 2018b) ja erilaisesta raekoosta huolimatta molempien fraktioiden kuivairtitiheys on samaa luokkaa (noin 1330 kg/m³). Fraktion 5/12 mm:ä vesivolymetrimittauksen tuloksissa on suurta hajontaa, mutta vesivolymetrimittauksen yhteydessä määritetty irtotiheys on keskimäärin pienempi kuin troxler-laitteella mitattu. Vesivolymetritulosten hajonta johtuu todennäköisesti mittauspisteen kohdalla olleista yksittäisistä isoista rakeista. Jätteenpolton kuonafraktioista 5/12 mm:ä ja 12/35 mm:ä tehtyjen tiivistystarkkailumittausten vaihtelualueet, keskiarvot ja hajonnat on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. *Jätteenpolton kuonafraktioista 5/12 mm:ä ja 12/35 mm:ä tehtyjen tiivistystarkkailumittausten vaihtelualueet, keskiarvot ja hajonnat.*

		B.2 kuona 5/12 mm			B.2 kuona 12/35 mm		
		Märkä- irtotiheys [kg/m ³]	Korjattu kuiva- irtotiheys [kg/m ³]	Vesi- pitoisuus [%]	Märkä- irtotiheys [kg/m ³]	Korjattu kuiva- irtotiheys [kg/m ³]	Vesi- pitoisuus [%]
Troxler n=5	Maksimi	1 536	1 425	3,4	1 454	1 402	1,1
	Minimi	1 343	1 246	2,0	1282	1 236	0,2
	Keski- arvo	1 435	1 331	2,8	1 376	1 327	0,6
	Hajonta	47,8	44,4	0,4	38,1	36,8	0,2
		Märkä- irtotiheys [kg/m ³]	Kuiva- irtotiheys [kg/m ³]	Vesi- pitoisuus [%]	Märkä- irtotiheys [kg/m ³]	Kuiva- irtotiheys [kg/m ³]	Vesi- pitoisuus [%]
Vesivolymetri n=3	Maksimi	1 780	1 629	9,2	1 276	1 233	3,9
	Minimi	865	819	5,7	1 107	1 065	3,4
	Keski- arvo	1 326	1 226	7,8	1 219	1 176	3,7
	Hajonta	373,4	331,0	1,5	79,0	77,9	0,3

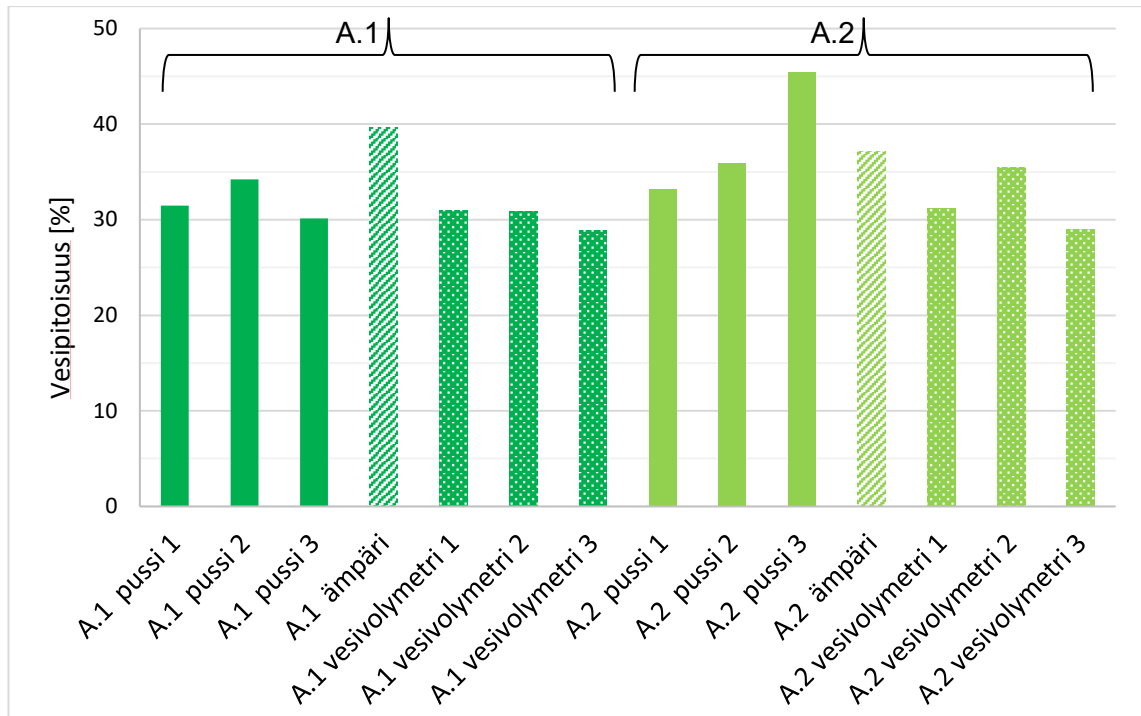
8.3 Laboratoriotulokset

Materiaalien ennakkokokeet tehtiin elokuussa 2018. Työnaikaiseen laadunvalvontaan liittyvät laboratorioskokeet tehtiin TTY:n maa-aineslaboratoriossa elo-syyskuussa 2018 ja niitä jatkettiin kesällä 2019 huhti-heinäkuun välisenä aikana. Kaikki vesivolymetrinäytteet käsiteltiin parin päivän sisällä näytteiden ottamisesta laboratoriossa. Pussi- ja ämpäriinäytteet olivat huoneenlämmössä noin kahdeksan kuukautta näytteenoton jälkeen. Varastokasalta otetut ennakkonäytteet käsiteltiin parin viikon sisään näytteiden ottamisesta. Kuvaliitteessä 7 on esitetty kuvia laboratorioskokeista.

8.3.1 Vesipitoisuus

Näytteitä otettiin erilaisiin näyteastioihin. Pusseihin otetut näytteet on esitetty kuvissa 41-44 tasaisella rasterilla ja ämpäriin otetut raidallisella. Vesivolymetrimittausten yhteydessä tehdyt vesipitoisuusmääritykset on kuvattu kuvissa pilkullisella rasterilla.

Lietekompostiseosnäytteet otettiin koerakenteiden A.1 ja A.2 kasvukerroksista. Lietekompostiseosnäytteiden vesipitoisuustulokset on esitetty kuvassa 41. Koerakenteen A.1 näytteet on esitetty kuvassa tummemmalla vihreällä kuin koerakenteen A.2 näytteet.



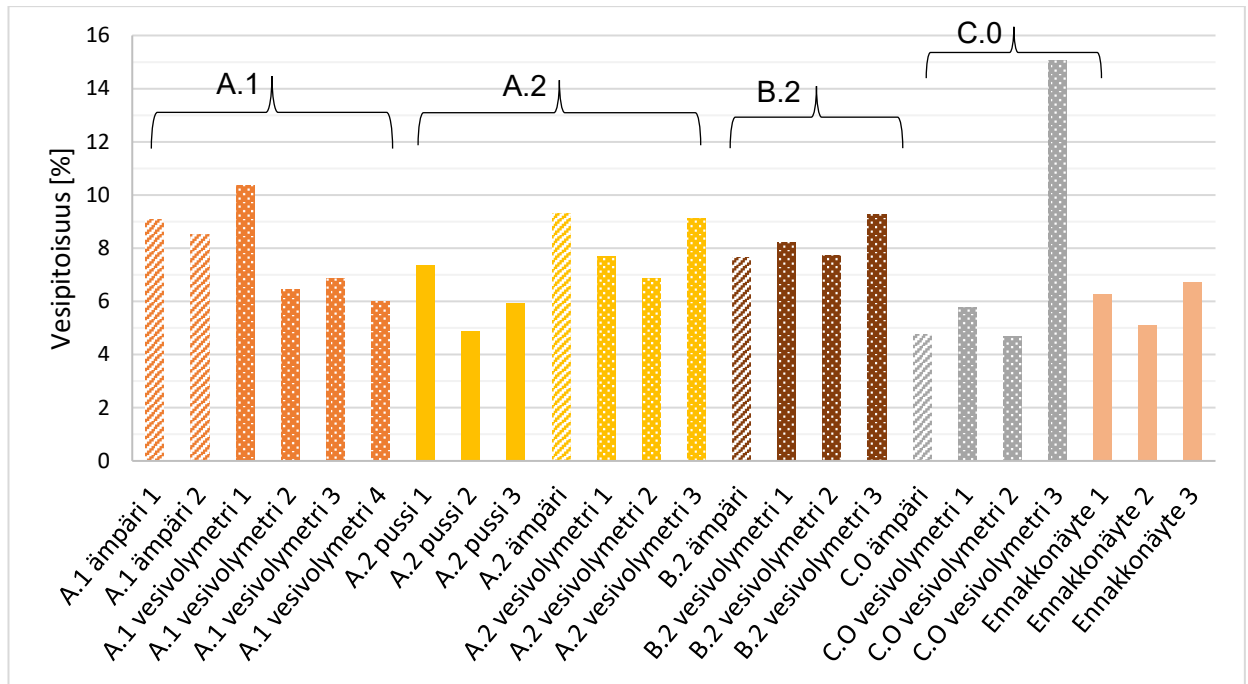
Kuva 41. Kasvukerroksessa käytetyn lietekompostiseoksen vesipitoisuustulokset.

Lietekompostiseosnäytteiden vesipitoisuustulokset on koottu taulukoon 10. Lietekompostiseoksen vesipitoisuuden vaihtelee 29-45 %:n välillä ja keskiarvo on noin 32-35 %:a.

Taulukko 10. Kasvukerroksessa käytetyn lietekompostiseoksen vesipitoisuus koerakenteittain standardin SFS-EN 1097-5 mukaan.

	A.1	A.2
Näyttemäärä	7	7
Vesipitoisuus [%]		
Maksimi	39,7	45,4
Minimi	28,8	28,9
Keskiarvo	32,3	35,3
Hajonta	3,37	4,90

Helsinki-moreeninäytteet otettiin rakenteiden A.1, A.2 ja B.2 pintakerroksista ja rakenteen C.0 moreenikerroksesta. Helsinki-moreeninäytteiden vesipitoisuustulokset on esitetty kuvassa 42. Rakenteen A.1 näytteet on esitetty oranssilla, A.2 keltaisella, B.2 ruskealla ja C.0 harmaalla. Kuvan 42 kolme viimeistä tulosta ovat ennakkonäytteitä.



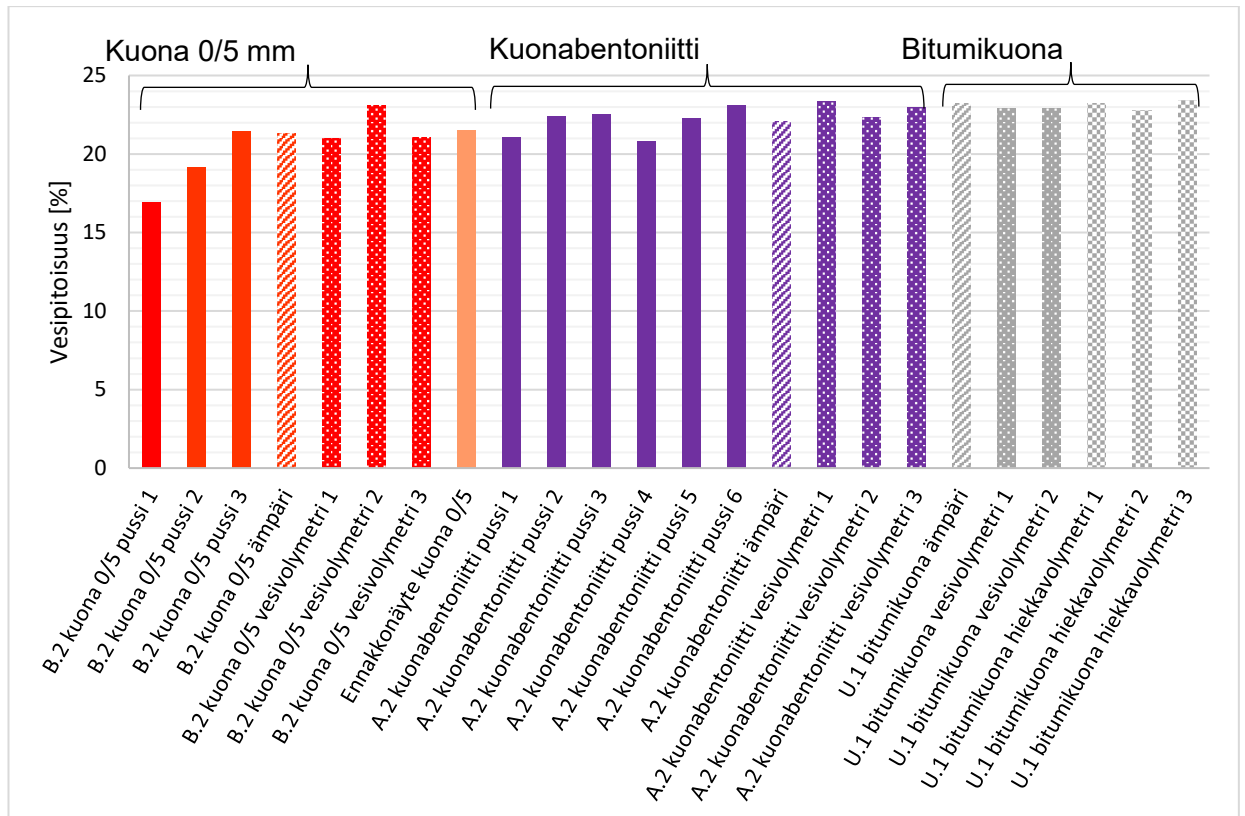
Kuva 42. Koerakenteissa käytetyn Helsinki-moreenin vesipitoisuustulokset. Koerakenteiden A.1, A.2 ja B.2 näytteet ovat pintakerroksesta ja koerakenteen C.0 moreenikerroksesta.

Ennakkonäytteet oli otettu kasalta. Helsinki-moreeninäytteiden vesipitoisuustulokset on koottu taulukkoon 11. Helsinki-moreenin vesipitoisuus vaihtelee välillä 5-15 %:a. Vesipitoisuuden keskiarvo vaihtelee 6-8 %:n välillä.

Taulukko 11. Helsinki-moreenin vesipitoisuustulokset koerakenteittain standardin SFS-EN 1097-5 mukaan. Ennakkokoenäytteiden tulokset ovat omissa sarakkeessaan.

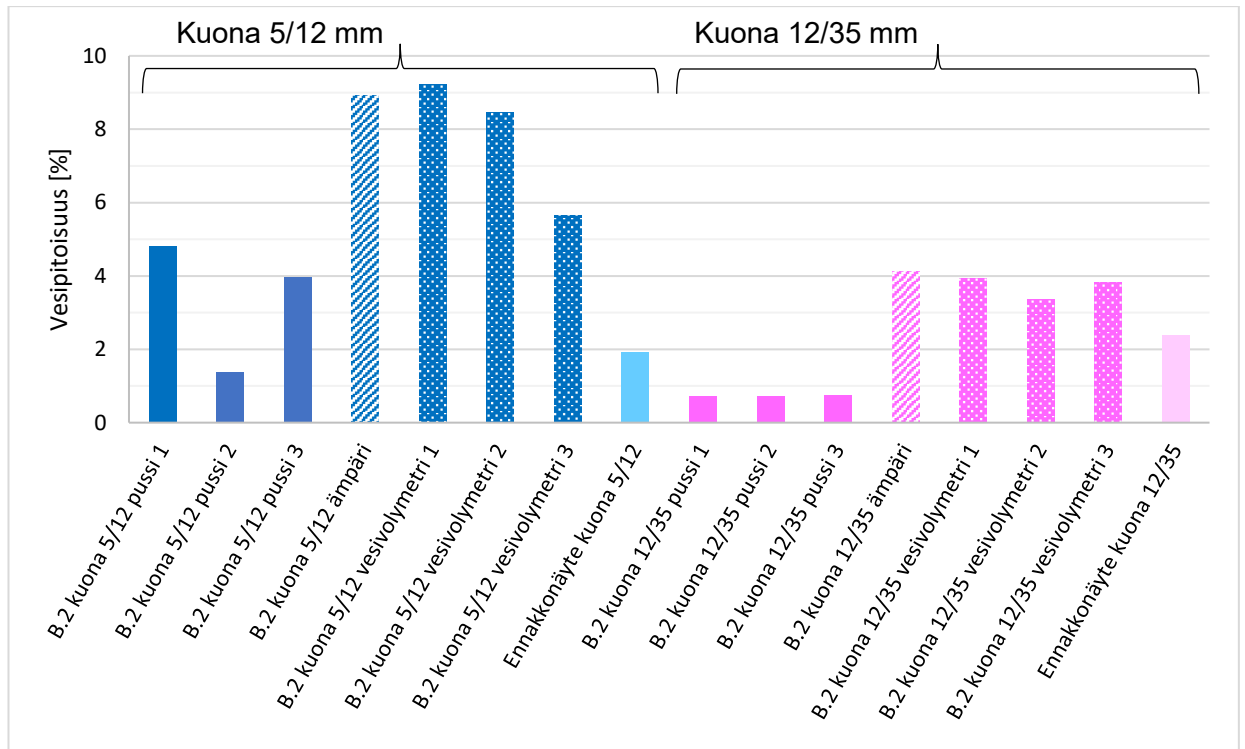
	A.1	A.2	B.2	C.0	Ennako
Näytemäärä	6	7	4	4	3
Vesipitoisuus [%]					
Maksimi	10,4	9,3	9,3	15,1	6,7
Minimi	6,0	4,9	7,7	4,7	5,1
Keskiarvo	7,9	7,3	8,2	7,6	6,0
Hajonta	1,56	1,49	0,64	4,35	0,69

Jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm:ä ja siitä valmistettujen kuonabentoniitti- ja bitumi-kuonaseosten vesipitoisuustulokset on esitetty kuvassa 43. Urakoitsija teki bitumikuonasta kolme hiekkavolymetrimittausta, joiden vesipitoisuustulokset on esitetty kuvassa ruudullisella rasterilla. Kuvassa 43 jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm tulokset ovat punaisella, kuonabentoniitin liilalla ja bitumikuonan harmaalla. Oranssi palkki on ennakkokoetulos. Jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm:ä ja kuonaseosten vesipitoisuuksien keskiarvot ovat samaa suuruusluokkaa (noin 21-23 %:a).



Kuva 43. Jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm ja kuonafraktiota 0/5 mm sisältävien kuonaseosten (kuonabentoniitti ja bitumikuona) vesipitoisuustulokset.

Jätteenpolton kuonafraktioiden 5/12 mm:ä ja 12/35 mm:ä vesipitoisuustulokset on esitetty kuvassa 44. Jätteenpolton kuonafraktion 5/12 mm:ä tulokset on merkitty sinisellä ja fraktion 12/35 mm:ä pinkillä. Pussinäytteistä osa odotti säilytyksessä pitkään ennen analysointia, joten ne ovat voineet päästä kuivumaan. Karkeat rakeet olivat tehneet osaan pusseista pieniä reikiä. Karkeampien kuonafraktioiden osalta vesipitoisuus on todennäköisemmin lähempänä ämpäriässä olleiden näytteiden ja vesivolymetrinäytteiden suuruusluokkaa eli jätteenpolton kuonafraktion 5/12 mm:ä vesipitoisuus on noin 6-9 %:a ja kuonafraktiolla 12/35 mm:ä 3-4 %:a.



Kuva 44. Jätteenpolton kuonafraktioiden 5/12 mm:ä ja 12/35 mm:ä vesipitoisuustulokset.

Kaikkien jätteenpolton kuonafraktioiden ja kuonaseosten vesipitoisuudet on kerätty taulukkoon 12. Ennakkokoenäytteiden tulokset on esitetty suluissa.

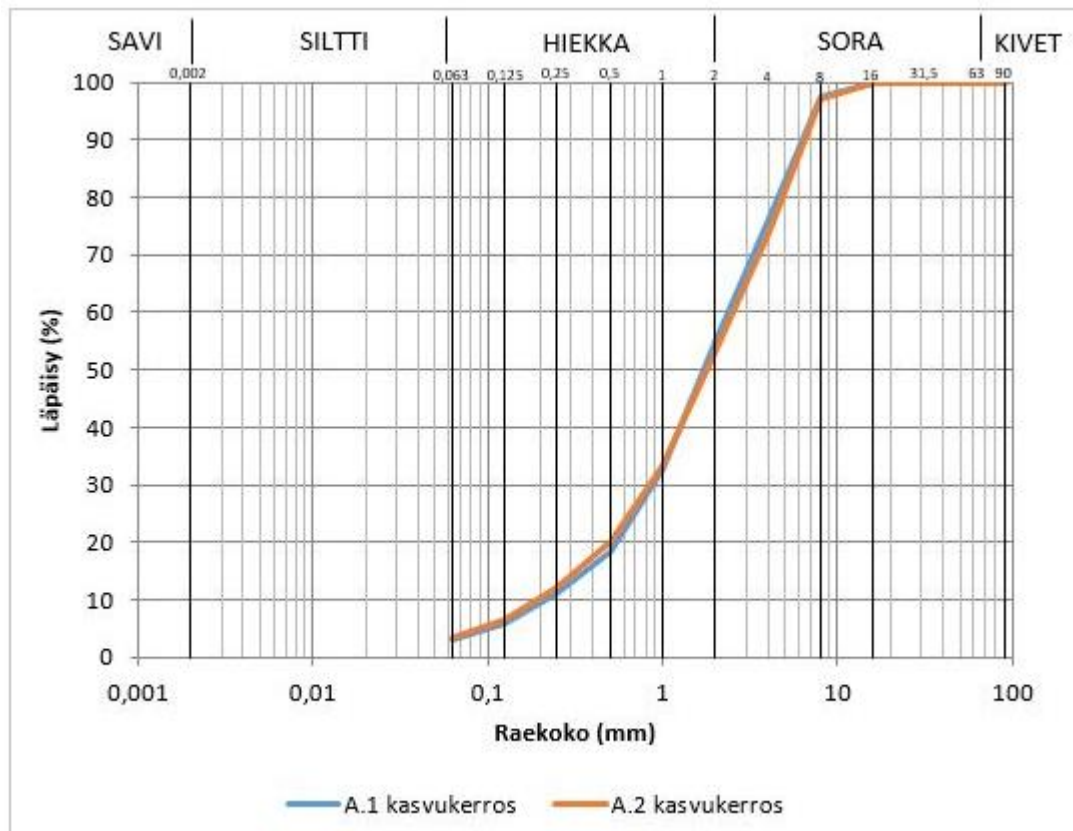
Taulukko 12. Jätteenpolton kuonafraktioiden ja kuonaseosten vesipitoisuustulokset koerakenteittain standardin SFS-EN 1097-5 mukaan.

	B.2 kuona 0/5 mm	B.2 kuona 5/12 mm	B.2 kuona 12/35 mm	A.2 kuona- bentoniitti	U.1 bitumi- kuona
Näytemäärä	7 (1)	7 (1)	7 (1)	10	6
Vesipitoisuus [%]					
Maksimi	23,1	9,2	4,1	23,3	23,4
Minimi	16,9	1,4	0,7	20,8	22,8
Keskiarvo	20,6 (21,5)	6,1 (1,9)	2,5 (2,4)	22,3	23,1
Hajonta	1,82	2,72	1,53	0,78	0,21

Vesipitoisuusmääritysten perusteella vesipitoisuudessa oli paikoin hajontaa. Vesivolymetritulosten tarkastelussa pitää ottaa huomioon, että näytemäärä on suhteellisen pieni verrattuna joidenkin materiaalien maksimiraekokoon. Yksittäiset isot rakeet tai poikkeavan kosteat kohdat vaikuttavat etenkin Helsinki-moreenin vesipitoisuuteen. Volymetri-näytteitä lukuun ottamatta näytteet odottivat käsittelyä useampia kuukausia, joten osa näytteistä on voinut päästä kuivumaan säilytyksen aikana. Tämä selittää osan eroista etenkin karkeiden jätteenpolton kuonafraktioiden tapauksessa, sillä osa pusseissa säilytetyistä näytteistä oli huomattavasti muita näytteitä kuivempia. Tulosten perusteella vesipitoisuusmäärittäminen voi soveltua materiaalin tasalaatuisuuden seurantaan.

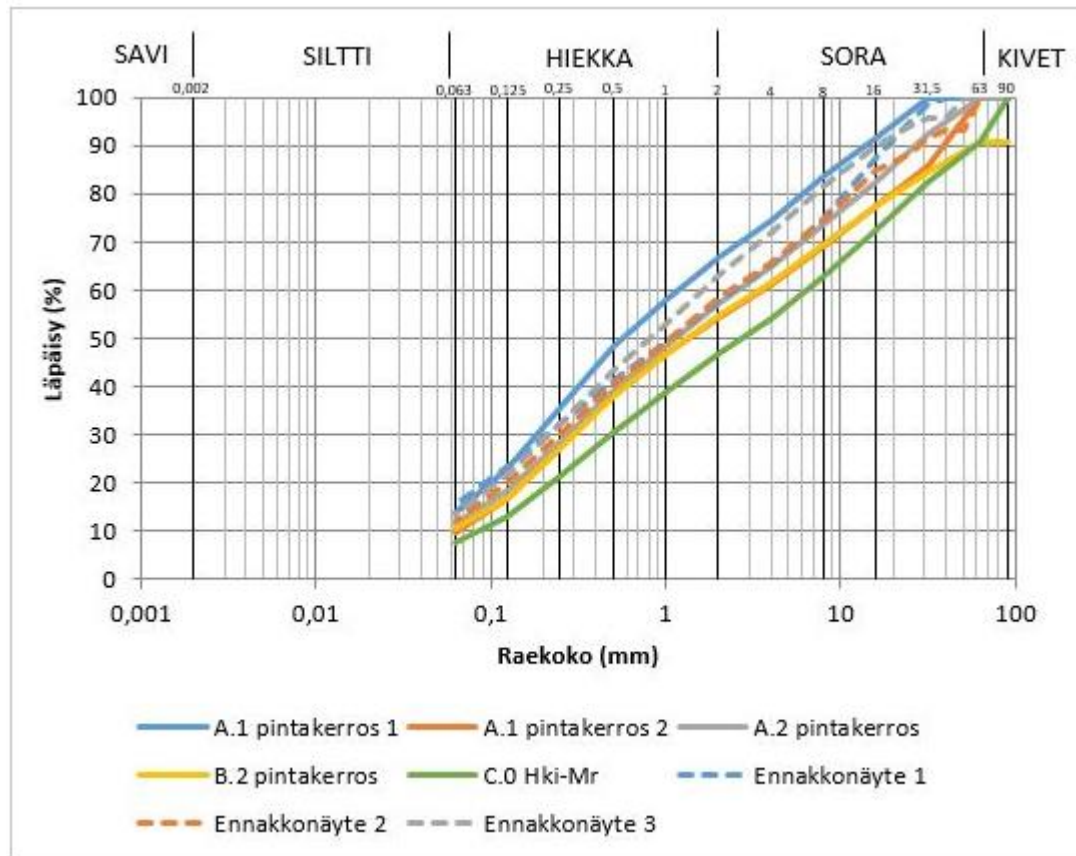
8.3.2 Rakeisuus

Koerakenteiden A.1 ja A.2 kasvukerroksien lietekompostiseosnäytteet kuivaseulottiin pesuseulonnan sijaan niiden sisältämän orgaanisen aineksen vuoksi. Rakeisuuskäyrät on esitelty kuvassa 45. Rakeisuuden perusteella lietekompostiseoksen hienoainespitoisuus (eli alle 0,063 mm:n osuus) on 3,0-3,5 %:a. Rakeisuuskäyrien perusteella näytteet ovat keskenään tasalaatuisia.



Kuva 45. Koerakenteiden kasvukerroksena käytetyn lietekompostiseoksen rakeisuus. Rakeisuusmääritys on tehty kuivaseulontana standardin SFS-EN 933-1 mukaan.

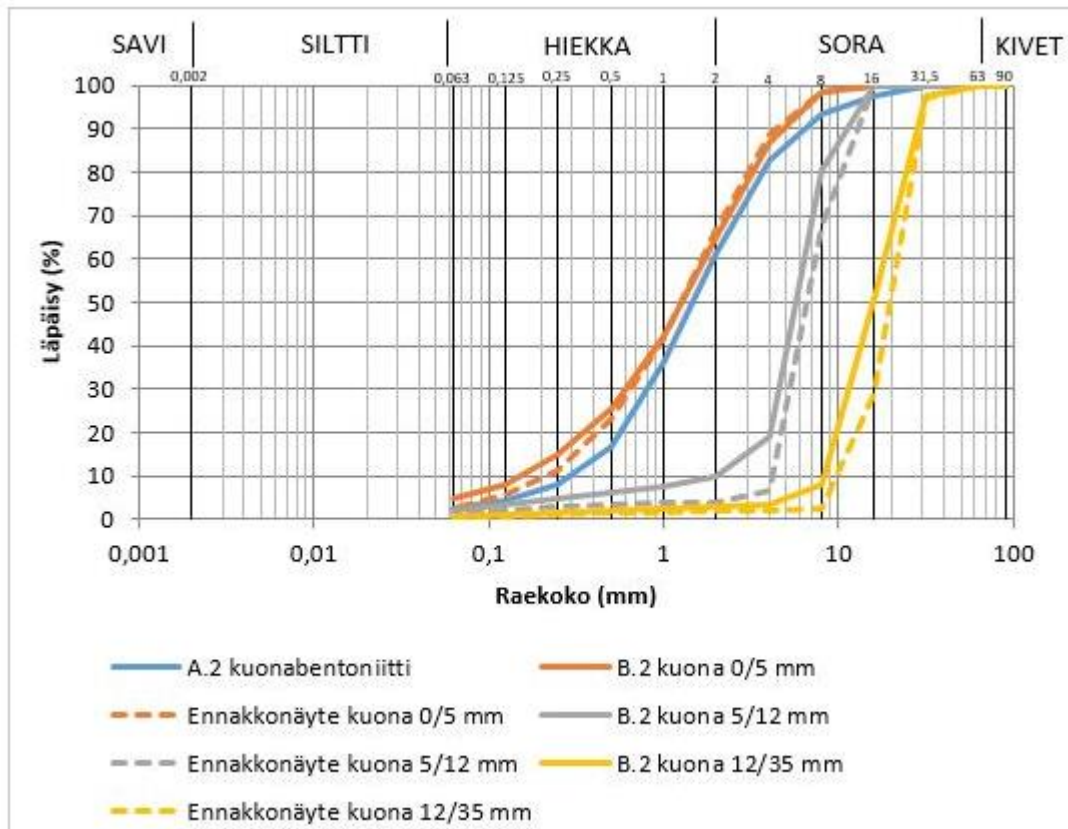
Koerakenteiden Helsinki-moreeninäytteet pesuseulottiin. Koerakenteesta A.1 oli kaksi näytettä ja muista koerakenteista yksi. Näytteet olivat pintakerroksista rakennetta C.0 lukuun ottamatta, jossa ei ollut erillistä pintakerrosta, vaan ohut moreenikerros. Helsinki-moreenista oli kolme ennakkonäytettä. Rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 46. Ennakkonäytteiden rakeisuuskäyrät on piirretty katkoviivoilla.



Kuva 46. Koerakenteissa käytetyn Helsinki-moreenin rakeisuus. Ennakkokoiden tulokset on esitetty katkoviivoilla. Rakeisuusmääritys on tehty standardin SFS-EN 933-1 mukaan pesuseulontana.

Rakeisuuden perusteella Helsinki-moreenin hienoainespitoisuus (alle 0,063 mm:n osuus) vaihtelee välillä 7,7-14,0 %:a. Helsinki-moreeneilla on suora rakeisuuskäyrä luonnon moreeneihin verrattuna, koska materiaalia on jalostettu seulomalla. Luonnon moreenien rakeisuuskäyrät ovat yleensä käyrän päistä hieman loivempia kuin keskellä. Helsinki-moreenien rakeisuuskäyrien lähtöpiste karkeassa päässä vaihtelee näytteissä olleiden yksittäisten isojen kivien vuoksi. Muuten rakeisuuskäyrät ovat lähes samanlaisia. Ennakkonäytteet ja rakentamisen aikana otetut näytteet vastaavat toisiaan. Koerakenteissa käytetystä Helsinki-moreenista on poistettu yli 100 mm:n kivet.

Jätteenpolton kuonafraktioiden ja kuonabentoniitin rakeisuus tutkittiin kuivaseulomalla. Kuonafraktiot ja kuonabentoniitti kuivaseulottiin, koska jätteenpolton kuonan hienoaines liukenee veteen. Pesuseulonnan tulos riippuu siitä, kuinka kauan näytteen pesemistä jatketaan eli kuinka paljon näytettä liukenee veteen. Rakeisuuskäyrät on esitetty kuvassa 47. Jätteenpolton kuonafraktioiden ennakkonäytteiden rakeisuuskäyrät on piirretty katkoviivoilla.



Kuva 47. Jätteenpolton kuonafraktioiden ja kuonabentoniitin rakeisuus. Ennakkokokeiden tulokset on merkitty katkoviivoilla. Rakeisuusmääritys on tehty standardin SFS-EN 933-1 mukaan kuivaseulontana.

Jätteenpolton kuonafraktioiden rakenteesta otettujen näytteiden ja ennakkokoenäytteiden rakeisuuksien välinen ero on pieni kuonafraktiota 5/12 mm:ä lukuun ottamatta, jossa ero on suurimmillaan yli kymmenen prosenttia. Rakentamisen aikana otetut näytteet ovat ennakkokoenäytteisiin verrattuna hienorakeisempia. Rakentamisen aikana otetut näytteet on otettu valmiista rakenteesta eli materiaalia on käsitelty ja tiivistetty enemmän kuin kasalta otettua ennakkonäytettä, jolloin osa rakeista on hienontunut, mikä selittää suuremman hienorakeisuuden. Kuonabentoniitin, jonka runkoaineena on käytetty jätteenpolton kuonafraktiota 0/5 mm:ä, rakeisuuskäyrässä ei näy bentoniitin lisäyksen vaikutusta hienoainespitoisuuteen jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm:ä rakeisuuskäyrään verrattuna.

8.3.3 Kiintotiheys

Lietekompostiseoksen ja Helsinki-moreenin kiintotiheys tutkittiin ionivaihdettua vettä käyttäen. Lietekompostiseoksesta tutkittiin standardin SFS-EN 1097-6 mukaan jae 0/4 mm:ä pyknometrinen menetelmällä. Helsinki-moreenista tutkittiin jakeet 0,063/4 mm:ä ja jae 4/16 mm:ä pyknometrinen menetelmällä. Helsinki-moreenin yli 16 mm:n näyte tutkittiin verkkokorimenetelmällä. Testinäytteet, joiden rakeisuudet ovat 4/16 mm:ä ja yli 16

mm:ä, olivat standardin *SFS-EN 1097-6* vaatimukseen verrattuna liian pieniä. Pyknometri menetelmässä pitäisi olla 4/16 mm:n jaetta yhteensä vähintään kaksi kilogrammaa ja verkkokorimenetelmässä tulee olla yli 16 mm:n jaetta yli seitsemän kilogrammaa. Tulokset on esitetty taulukossa 13. Lietekompostiseosnäytteet jouduttiin laittamaan vakuumiin puoleksi tunniksi ilman poistamiseksi. Muista näytteistä ilma poistettiin kevyesti pyknometriä kääntelemällä.

Taulukko 13. *Koerakenteissa käytetystä lietekompostiseoksesta ja Helsinki-moreenista valmistettujen testijakeiden kiintotiheydet. Kokeet on tehty ioni-vaihdettuun veteen standardin SFS-EN 1097-6 mukaan.*

Näyte	Kiintotiheys [g/cm ³]
Lietekompostiseos 0/4 mm	
A.1 kasvukerros	2,55 ¹⁾
A.2 kasvukerros	2,54 ¹⁾
Helsinki-moreeni, jae 0,063/4 mm	
A.1 pintakerros	2,56
C.0 Helsinki-moreeni	2,57
Helsinki-moreeni, jae 4/16 mm	
A.1 pintakerros	2,62 ²⁾
C.0 Helsinki-moreeni	2,64 ²⁾
Helsinki-moreeni, jae > 16 mm	
A.1 pintakerros	2,64 ²⁾
C.0 Helsinki-moreeni	2,64 ²⁾

1) Testinäytettä pidetty vakuumissa puoli tuntia

2) Testinäytteen massa ei standardin mukainen (4/16 mm näytettä alle 2 kg ja > 16 mm näytettä alle 7 kg verkkokorimenetelmällä)

Kaikkien jätteenpolton kuonafraktioiden kiintotiheys tutkittiin pyknometri menetelmällä. Kokeissa käytettiin veden sijaan metanolia. Jätteenpolton kuonafraktiosta 0/5 mm:ä tutkittiin jae 0/4 mm:ä. Kuonafraktioista 5/12 mm:ä ja 12/35 mm:ä tutkittiin 4/16 mm:n jae. Kuonafraktiosta 12/35 mm:ä tutkittiin myös yli 16 mm:n jae. Tulokset on esitetty taulukossa 14. Ilma poistettiin näytteistä pyknometriä kevyesti kääntelemällä.

Taulukko 14. *Jätteenpolton kuonafraktioista valmistettujen testijakeiden kiintotiheydet. Kokeet on tehty metanoliin.*

Näyte	Kiintotiheys [g/cm ³]
Jae 0/4 mm	
B.2 kuona 0/5 mm	2,61
Jae 4/16 mm	
B.2 kuona 5/12 mm	2,56 ¹⁾
B.2 kuona 12/35 mm	2,56 ¹⁾
Jae > 16 mm	
B.2 kuona 12/35 mm	2,46 ¹⁾

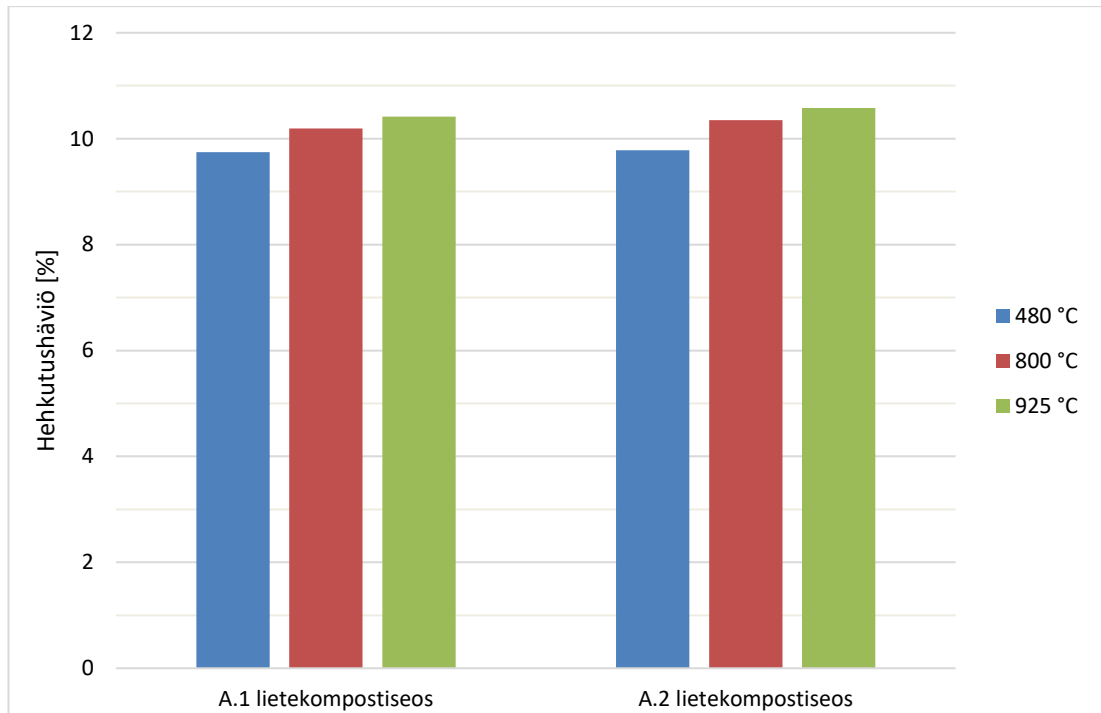
1) Testinäytteen massa ei standardin mukainen (4/16 mm näytettä alle 2 kg ja > 16 mm alle 5 kg pyknometrimenetelmällä)

Myös jätteenpolton kuonien 4/16 mm:ä ja yli 16 mm:ä testinäytteiden massat jäivät standardin *SFS-EN 1097-6* mukaisia massoja pienemmiksi. Jaetta 4/16 mm:ä olisi pitänyt olla vähintään kaksi kilogrammaa ja yli 16 mm:n jaetta vähintään viisi kilogrammaa. Jätteenpolton kuonat eivät kuulu suoraan kyseisen standardin sovellusalaan.

Kiintotiheyden perusteella materiaalit ovat tasalaatuisia. Materiaalin kiintotiheys on lähes sama näytteenotto paikasta riippumatta. Kuonan testinäytteen 4/16 mm:ä tapauksessa kiintotiheys on sama, vaikka testinäytteet valmistettiin eri kuonafraktioista. Kaikkien yli 16 mm:n jakeiden testinäytteet olivat huomattavasti pienempiä kuin standardin vaatima testinäytteen massa, joten kiintotiheyden arvot ovat vain suuntaa-antavia. Suomalaisten kiviainesmaalajien kiintotiheys on 2,65 g/cm³ luokkaa (Helenelund 1974), joten jätteenpolton kuonien kiintotiheys on lähellä kiviainesten kiintotiheyttä. Vuonna 2015 TTY:llä tutkittiin jätteenpolton kuonafraktiota 0/2 mm:ä, jonka kiintotiheydeksi määritettiin 2,22 g/cm³, kun määrittäminen tehtiin veteen (Leppänen 2018).

8.3.4 Hehkutushäviö

Koerakenteissa käytettyjen lietekompostiseoksen, jätteenpolton kuonafraktioiden ja kuonaseosten hehkutushäviöä tutkittiin portaissa 480°C (4 h), 800°C (1 h) ja 925°C (1 h) alle 4 mm:n jakeesta. Lietekompostiseoksen hehkutushäviötulokset on esitetty kuvassa 48.



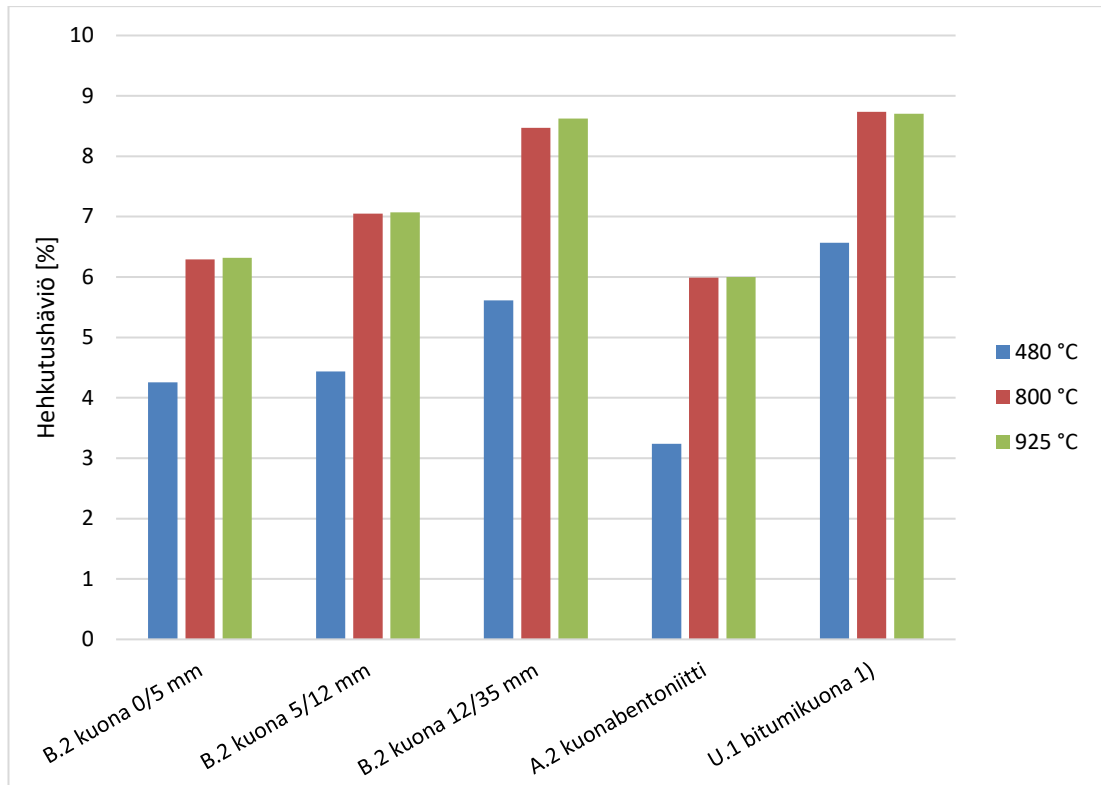
Kuva 48. Lietekompostiseoksen standardin SFS-EN 1744-7 mukaan portaittain määritetty hehkutushäviö.

Lietekompostiseoksen hehkutushäviötulokset on koottu taulukkoon 15. Hehkutushäviötulosten perusteella lietekompostiseos on tasalaatuista eri koerakenteissa. Erot eri portaiden välillä ovat merkityksettömiä.

Taulukko 15. Koerakenteissa käytetyn lietekompostiseoksen standardin SFS-EN 1744-7 mukaan määritetyt hehkutushäviöt.

Näyte	Hehkutushäviö [%]		
	480 °C	800 °C	925 °C
A.1 lietekompostiseos	9,7	10,2	10,4
A.2 lietekompostiseos	9,8	10,3	10,6

Jätteenpolton kuonafraktioiden, kuonabentoniitti- ja bitumikuonaseoksien hehkutushäviötulokset on esitetty kuvassa 49. Kuonabentoniitin ja bitumikuonan runkoaineena on käytetty jätteenpolton kuonafraktiota 0/5 mm:ä. Bitumikuonasta alle 4 mm:n jakeen erottaminen oli hankalaa, joten siitä tehtiin vain yksi määrittäminen. Standardin SFS-EN 1744-7 mukaan hehkutushäviö tulee määrittää kahden rinnakkaiskokeen keskiarvona.



Kuva 49. Jätteenpolton kuonafraktioiden, kuonabentoniitti- ja bitumikuonaseoksien portaittain standardin SFS-EN 1744-7 mukaan määritetty hehikutushäviö.

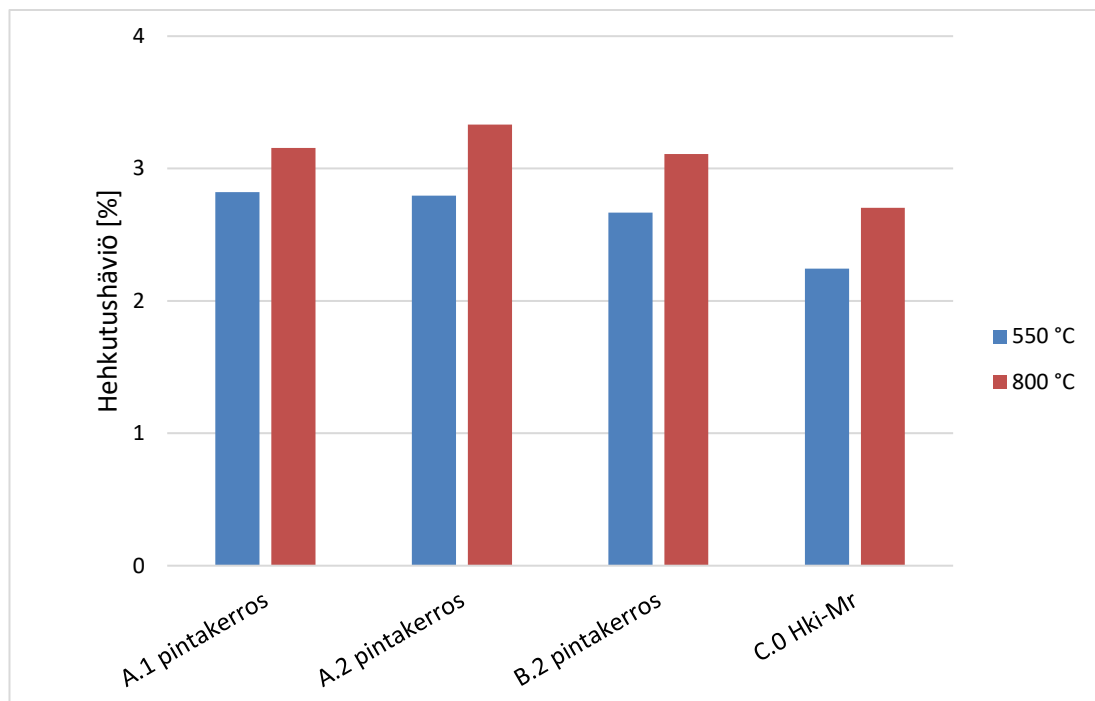
Jätteenpolton kuonafraktioiden ja kuonaseosten hehikutushäviötulokset on koottu taulukoon 16. Jätteenpolton kuona on muodostunut jätteenpolton yhteydessä korkeassa lämpötilassa, joten sen ei pitäisi sisältää juurikaan palamatonta orgaanista ainesta. Hehikutushäviö aiheutuu todennäköisesti kideveden poistumisesta ja kemiallisen rakenteen muutoksista. Kuonafraktioiden hehikutushäviö kasvaa raekoon kasvaessa. Bitumikuonan ja sen runkoaineena käytetyn jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm:ä hehikutushäviön ero 480 asteessa on yli 2 %:a. Tämä selittyy bitumikuonassa sideaineena käytetyn bitumin palamisella. Ero muiden portaiden välillä on jätteenpolton kuonafraktiolla 0/5 mm:ä ja siitä valmistetuilla seoksilla lähes sama. Kaikilla jätteenpolton kuonafraktioilla ja kuonaseoksilla ero 480 ja 800 asteen välillä on noin kaksi prosenttia, mutta ero 800 ja 925 asteen välillä on merkityksetön tai massa jopa hieman kasvaa.

Taulukko 16. *Jätteenpolton kuonafraktioiden ja kuonaseosten standardin SFS-EN 1744-7 mukaan määritetyt hehkutushäviöt.*

Näyte	Hehkutushäviö [%]		
	480 °C	800 °C	925 °C
B.2 kuona 0/5 mm	4,3	6,3	6,3
B.2 kuona 5/12 mm	4,4	7,1	7,1
B.2 kuona 12/35 mm	5,6	8,5	8,6
A.2 kuonabentoniitti	3,2	6,0	6,0
U.1 bitumikuona ¹⁾	6,6	8,7	8,7

1) Standardin vastaisesti materiaalista ei ole rinnakkaismäärittystä

Helsinki-moreeninäytteiden hehkutushäviötulokset on esitetty kuvassa 50. Helsinki-moreenin hehkutushäviö tutkittiin portaissa 550 °C (2 h) ja 800 °C (1 h).



Kuva 50. *Koerakenteissa käytetyn Helsinki-moreenin portaittain määritetty hehkutushäviö.*

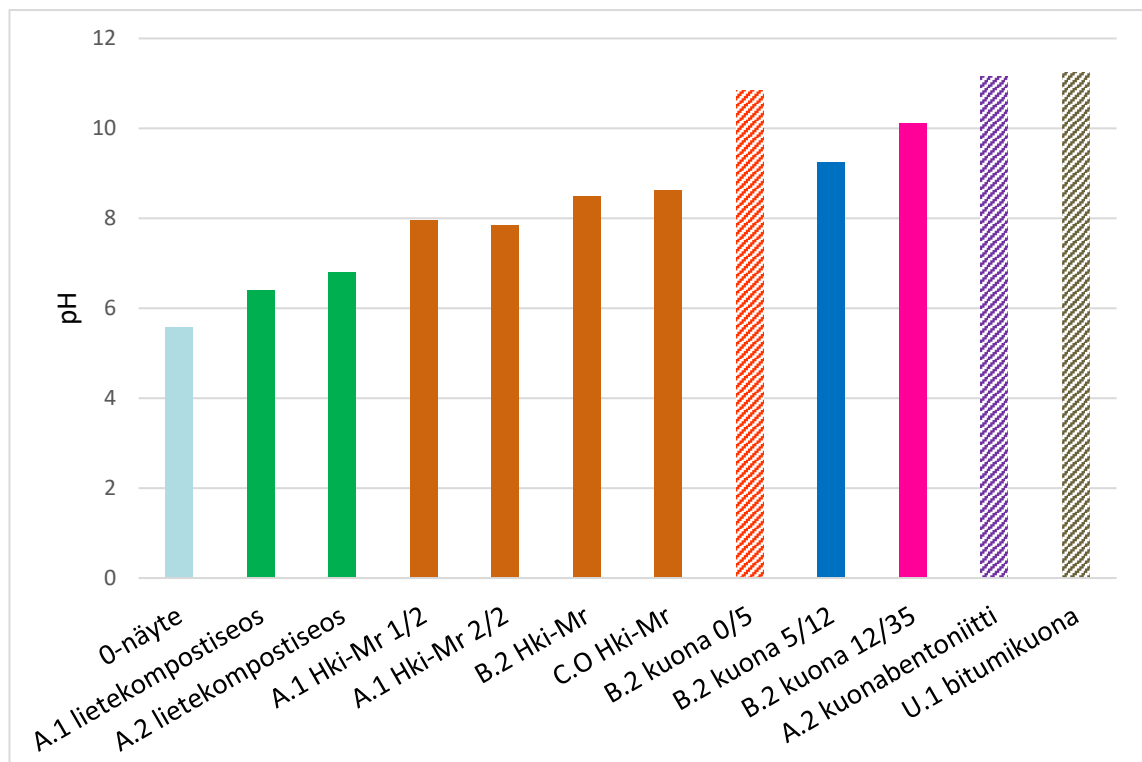
Helsinki-moreeninäytteiden hehkutushäviötulokset on koottu taulukkoon 17. Hehkutushäviötulokset eri Helsinki-moreeninäytteiden ovat samaa suuruusluokkaa, joten materiaali on hehkutushäviön perusteella tasalaatuista. Lukuarvot ovat tavanomaista luonnon moreenia korkeampia.

Taulukko 17. Helsinki-moreenin portaittain määritetyt hehkutushäviöt.

Näyte	Hehkutushäviö [%]	
	550 °C	800 °C
A.1 pintakerros	2,8	3,2
A.2 pintakerros	2,8	3,3
B.2 pintakerros	2,7	3,1
C.0 moreenikerros	2,2	2,7

8.3.5 pH ja johtokyky

Koerakenteissa käytetyistä mineraalisista materiaaleista tehtyjen pH-määritysten tulokset ovat esitetty kuvassa 51. Kuonabentoniitin ja bitumikuonan runkoaineena on käytetty jätteenpolton kuonafraktiota 0/5 mm:ä, joten niiden tulokset on kuvissa 51 ja 52 esitetty kuonafraction 0/5 mm:ä kanssa samalla rasterilla.

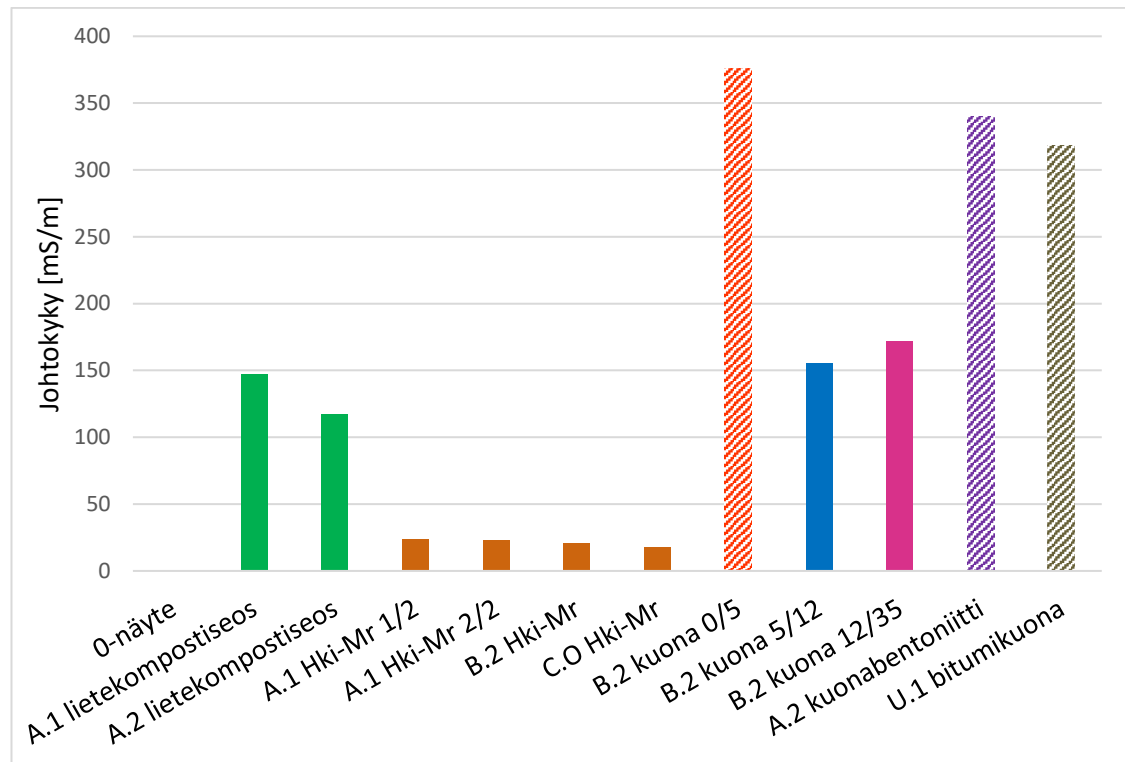


Kuva 51. Koerakenteissa käytettyjen mineraalisten materiaalien pH-arvot standardin SFS-ISO 10390 mukaan määritettynä.

pH-määritysten perusteella jätteenpolton kuona on alkaalista, kuten aiemmissa kokeissa on todettu (Kaartinen et al. 2015, Suomen Erityisjäte 2017). Jätteenpolton kuonista hienorakeisimmalla 0/5 mm:n kuonafraktiolla ja sitä runkoaineena käyttävillä kuonabentoniitti- ja bitumikuonaseoksilla on muita materiaaleja korkeampi pH (noin 11). pH-määrittäminen on tehty standardin SFS-ISO 10390 mukaan alle 2 mm:n jakeesta, jota jätteenpolton kuonafraktiot 5/12 mm:ä ja 12/35 mm:ä sisältävät vain pieniä määriä (noin 2 %:a).

Helsinki-moreenin pH vaihtelee 7,8-8,6 välillä. Suomessa maaperä on yleensä hapanta, joten Helsinki-moreenilla on korkeampi pH luonnon materiaaleihin verrattuna. Korkea pH johtunee materiaalin sisältämästä betonista. Lietekomposti on hieman hapanta.

Materiaaleista tehtyjen johtokyky määritysten tulokset ovat esitetty kuvassa 52.



Kuva 52. Koerakenteissa käytettyjen materiaalien johtokyky standardin ISO 11265 mukaan.

Johtokyky määritysten perusteella jätteenpolton kuonafraction 0/5 mm:ä johtokyky on selvästi suurin (376 mS/m) muihin näytteisiin verrattuna. Sitä runkoaineena käytävillä kuonabentoniitti- ja bitumikuonaseoksilla johtokyky on myös korkea (kuonabentoniitti 340 mS/m ja bitumikuona 310 mS/m), mutta sideaine (bentoniitti tai bitumi) alentaa hieman sähkönjohtavuutta. Lietekompostiseoksella on lähes yhtä suuri johtokyky kuin jätteenpolton kuonafraktiolla 5/12 mm:ä. Lietekompostiseoksen korkea johtokyky johtunee lietteen suolapitoisuudesta. pH- ja johtokykytulokset on koottu taulukkoon 18.

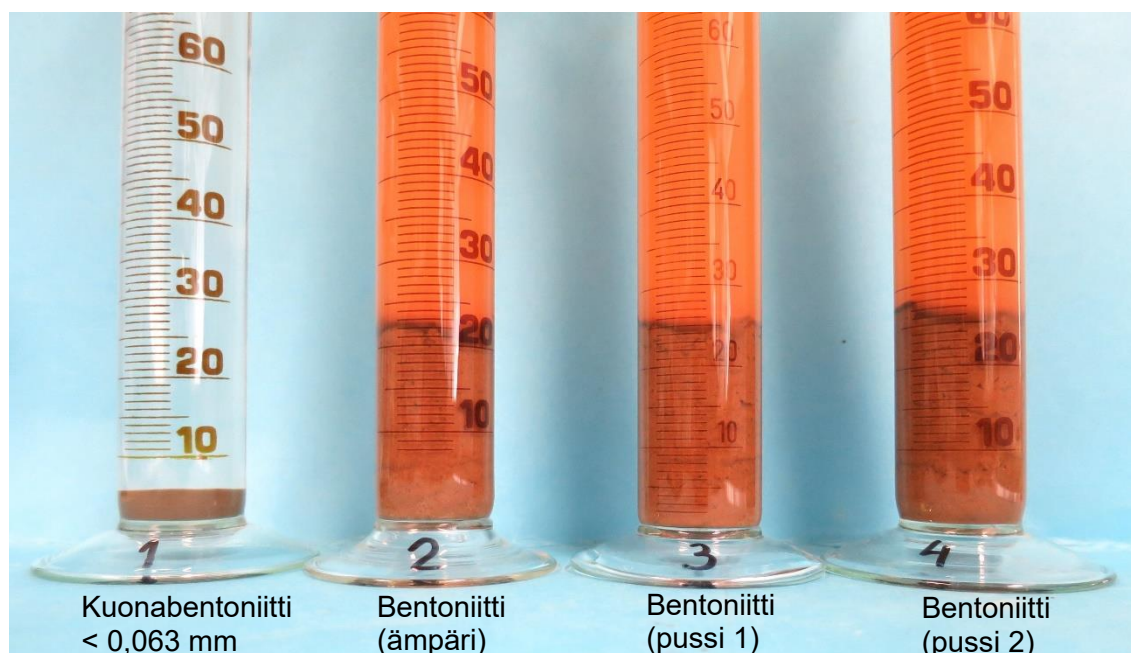
Taulukko 18. Koerakenteissa käytettyjen materiaalien pH standardin SFS-ISO 10390 mukaan ja johtokyky standardin ISO 11265 mukaan.

Näyte	0-näyte	A.1 lietekom- postiseos	A.2 lietekom- postiseos	A.1 pintakerros 1/2	A.1 pintakerros 2/2	B.2 pintakerros Hki-Mr
pH	5,6	6,4	6,8	8,0	7,8	8,5
Johtokyky [mS/m]	0,15	147,0	117,0	23,6	22,5	20,6

Näyte	C.O Hki-Mr	B.2 kuona 0/5	B.2 kuona 5/12	B.2 kuona 12/35	A.2 kuona- bentoniitti	U.1 bitumi- kuona
pH	8,6	10,8	9,2	10,1	11,2	11,2
Johtokyky [mS/m]	17,7	376,0	155,0	171,7	340,0	318,0

8.3.6 Paisuntakerroin

Paisuntakerroin tutkittiin standardin *ASTM D 5890-11* mukaisesti kuonabentoniitin hienoaineksesta eli seulan 0,063 mm:ä läpäisevästä jakeesta, joka sisältää jätteenpolton kuonaa ja polymeeriparannettua bentoniittia. Lisäksi tutkiin kolme näytettä polymeeriparannetusta bentoniitista. Näytteet on esitetty kuvassa 53.



Kuva 53. Kuonabentoniitin hienoaineksesta ja polymeeriparannetusta bentoniitista tehdyt paisuntakerroinnäytteet.

Kuvassa 53 mittalasisissa 1 on kuonabentoniitin hienoaineksesta tehty paisuntakoe. Mittalasisissa 2 oleva näyte on urakoitsijalta 14.8.2018 saatu ennakkonäyte polymeeriparannetusta luonnon natriumbentoniitista (*BENTONITE CP-200RES*). Mittalaseissa 3 ja 4 on

urakoitsijalta saadut rakentamisen aikaiset näytteet polymeeriparannetusta bentoniitista. Määrittystulosten tarkat lukuarvot on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. *Kuonabentoniitin hienoaineksen ja polymeeriparannetun bentoniitin paisuntakerroin standardin ASTM D 5890-11 mukaisesti määritettynä.*

	Kuonabentoniitti <0,063 mm	Bentoniitti ämpäri	Bentoniitti pussi 1	Bentoniitti pussi 2
Paisuntakerroin [ml / 2 g]	< 10	22	25	26

Kuonabentoniitin hienoaineksesta tehdyn paisuntakokeen lukema jäi alle mittalasin mitta-asteikon. Lukema on noin 5 ml / 2 g. Paisuntakokeen perusteella rakenteessa käytetty polymeeriparannettu bentoniitti ei ole niin paisumiskykyistä, kun sen pitäisi olla. Tuotetiedoissa polymeeriparannetun bentoniitin paisuntakertoimeksi on ilmoitettu vähintään 28 ml / 2 g:a (Cetco 2014) ja tehtaan laadunvalvontatuloksien mukaan paisuntakerroin on 34 ml / 2 g:a (Cetco 2018). Molemmat dokumentit on saatu urakoitsijalta. Ennakonäytteen perusteella paisuntakerroin oli 22 ml / 2 g:aa. Rakentamisaikaisista näytteistä paisuntakertoimen arvoksi mitattiin 25 ja 26 ml / 2 g:aa. InfraRYL (2018) mukaan maabentoniitin, jonka runkoaine voidaan korvata jätemateriaalilla tai teollisuuden sivutuotteella, bentoniitin paisumiskyvyn tulee olla vähintään 24 ml / 2 g:a ASTM D5890 mukaan määritettynä. Bentoniitin paisumiskyky pienenee mahdollisesti jätteenpolton kuonan vaikutuksesta.

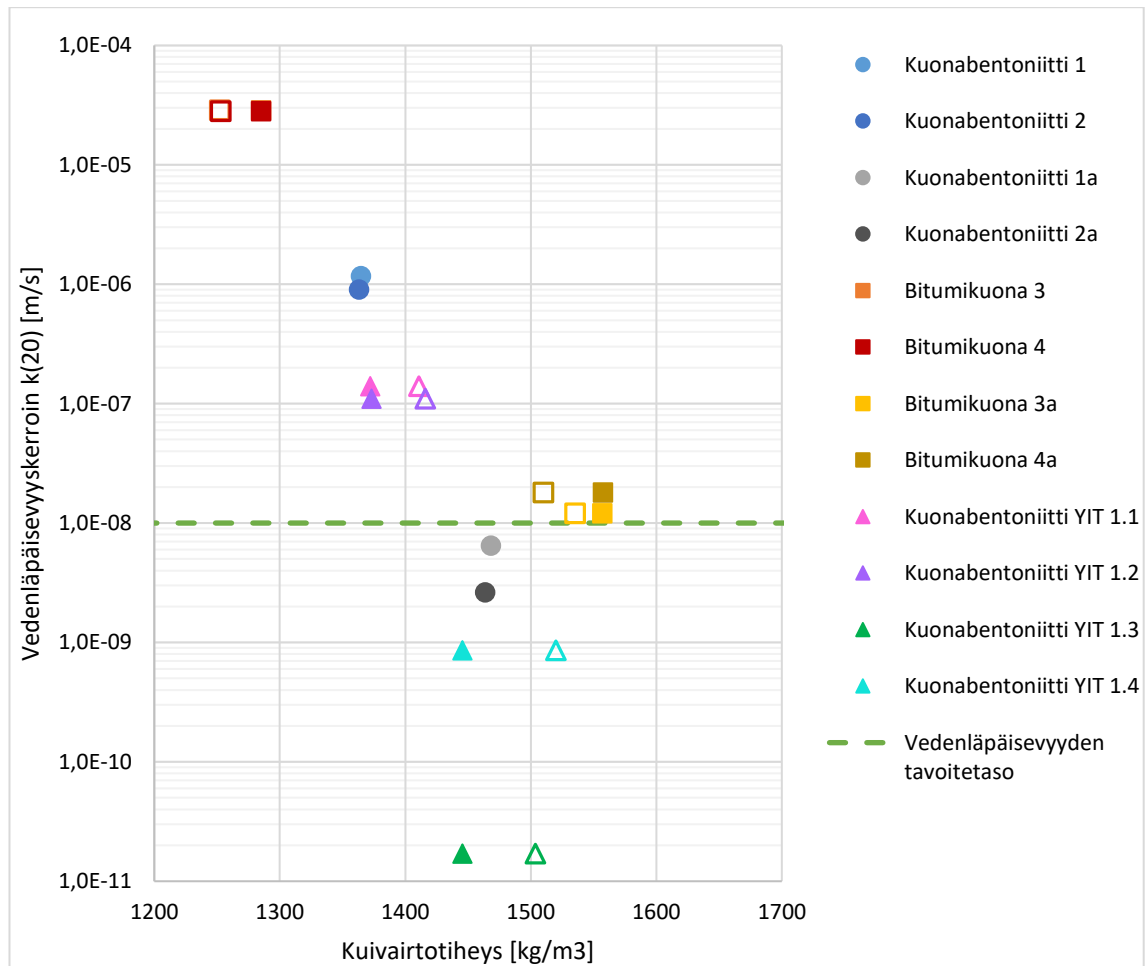
8.3.7 Vedenläpäisevyys

Kuonabentoniitti- ja bitumikuonaseosten vedenläpäisevyys tutkittiin joustavaseinämällä menetelmällä standardin *SFS-EN ISO 17892-11* mukaisesti rakentamisen yhteydessä otetuista näytteistä. Molemmissa seoksissa runkoaineena käytettiin jätteenpolton kuonan fraktiota 0/5 mm:ä. Koekappaleet tiivistettiin kiertotiivistyslaitteella. Koekappaleiden kuivatilavuuspainot määritettiin tehdyn tiivistystarkkailun tulosten perusteella. Kuonabentoniitin kuivairtitiheyden tavoitetaso oli 1400-1500 kg/m³. Bitumikuonan kuivairtitiheydelle ei ollut tavoitearvoa.

Myös urakoitsija teki kuonabentoniitista neljä vedenläpäisevyyskoetta. Niissä käytettiin tehokkaana jännityksenä 50 kPa:a. TTY:llä tehokas jännitys vedenläpäisevyyskoeksessa oli 20 kPa:a, joten tulokset eivät ole suoraan verrannollisia keskenään. Kaikki kuonabentoniitin ja bitumikuonan vedenläpäisevyyskoetulokset on esitetty kuvassa 54. Kuonabentoniitin vedenläpäisevyyskerroimen ($k \leq 10^{-8}$ m/s) tavoitetaso on merkitty kuvaan katkoviivalla. Koska bitumikuonan vedenläpäisevyyskoekappaleet kokoonpuristuivat kokeen aikana, on tulos esitetty kahdella kuivairtitiheyden arvolla: ennen koetta ja kokeen jälkeen. Myös urakoitsijan tekemien kuonabentoniittikoekappaleiden kuivatilavuuspaino muuttui kokeen aikana. Kuvassa 54 ennen koetta määritetyt kuivairtitiheyden arvot on esitetty umpinaisella kuviolla. Jos kuivairtitiheys on vedenläpäisevyyskoeken jälkeen

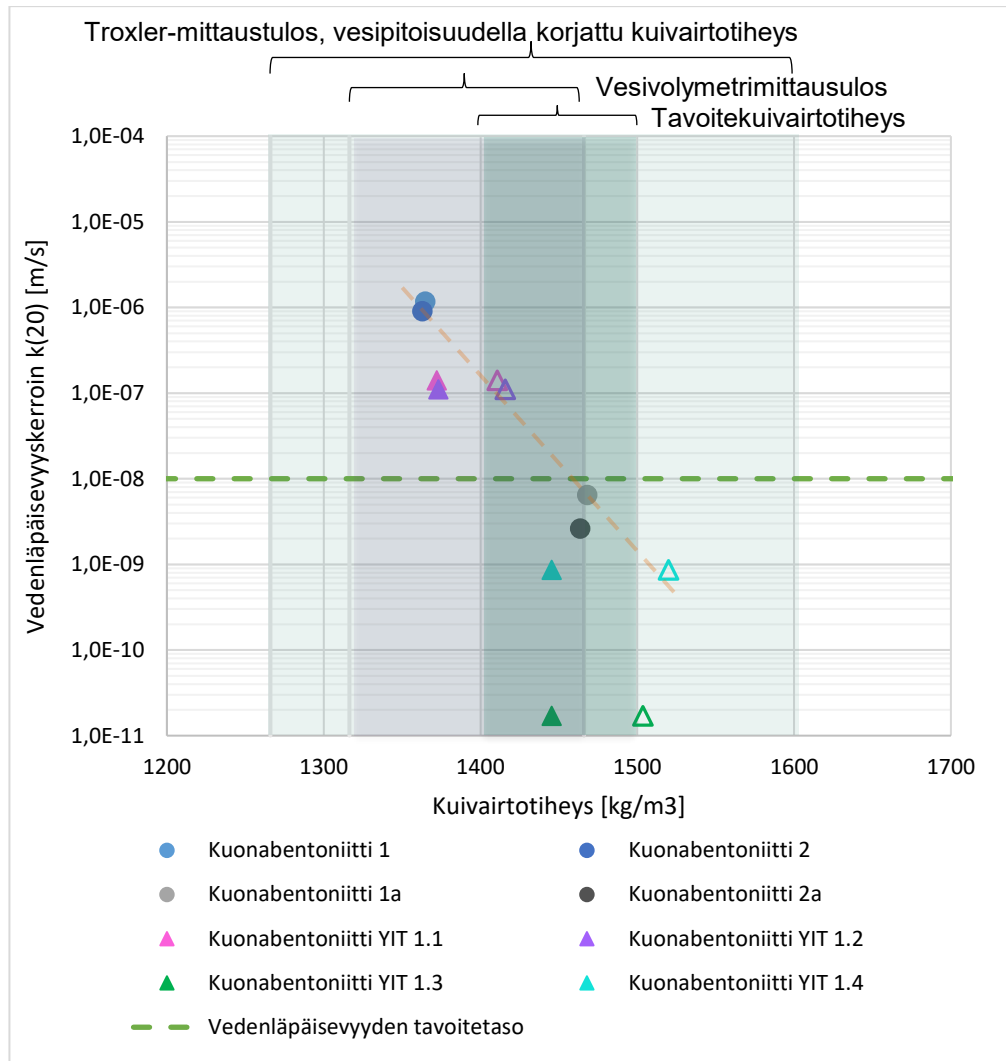
muuttunut, on kokeen jälkeen määritetty kuivairtitiheys esitetty samalla kuviolla, mutta ilman täyttöä eli kuviosta on näkyvissä vain ääriviivat.

TTY:llä vedenläpäisevyyskoesarjoja tehtiin kaksi, koska ensimmäisen sarjan koekappaleiden kuivairtitiheyksillä määritettiin tavoitteeseen verrattuna liian suuria vedenläpäisevyyksiä. Vedenläpäisevyyskoe toistettiin isommalla, rakenteesta mitattujen kuivairtitiheyksien vaihteluvälillä olevalla, kuivairtitiheyden arvolla.



Kuva 54. Koerakenteissa käytetyn kuonabentoniitin ja bitumikuonan vedenläpäisevyyskokeiden tulokset standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä.

Pelkästään kuonabentoniitin vedenläpäisevyyskokeiden tulokset on esitetty kuvassa 55. Troxler-mittaustulosten mukainen kuivairtitiheyden vaihteluväli on esitetty kuvassa. Troxler-mittaustulosten kuivairtitiheys on laskettu materiaalin laboratoriossa määritettyä vesipitoisuutta käyttäen laitteen mittaamasta märkäirtitiheyden arvosta. Vesivolymetri-mittaustulosten mukainen kuivairtitiheyden vaihteluväli ja kuivairtitiheyden tavoitealue on esitetty kuvassa 55.



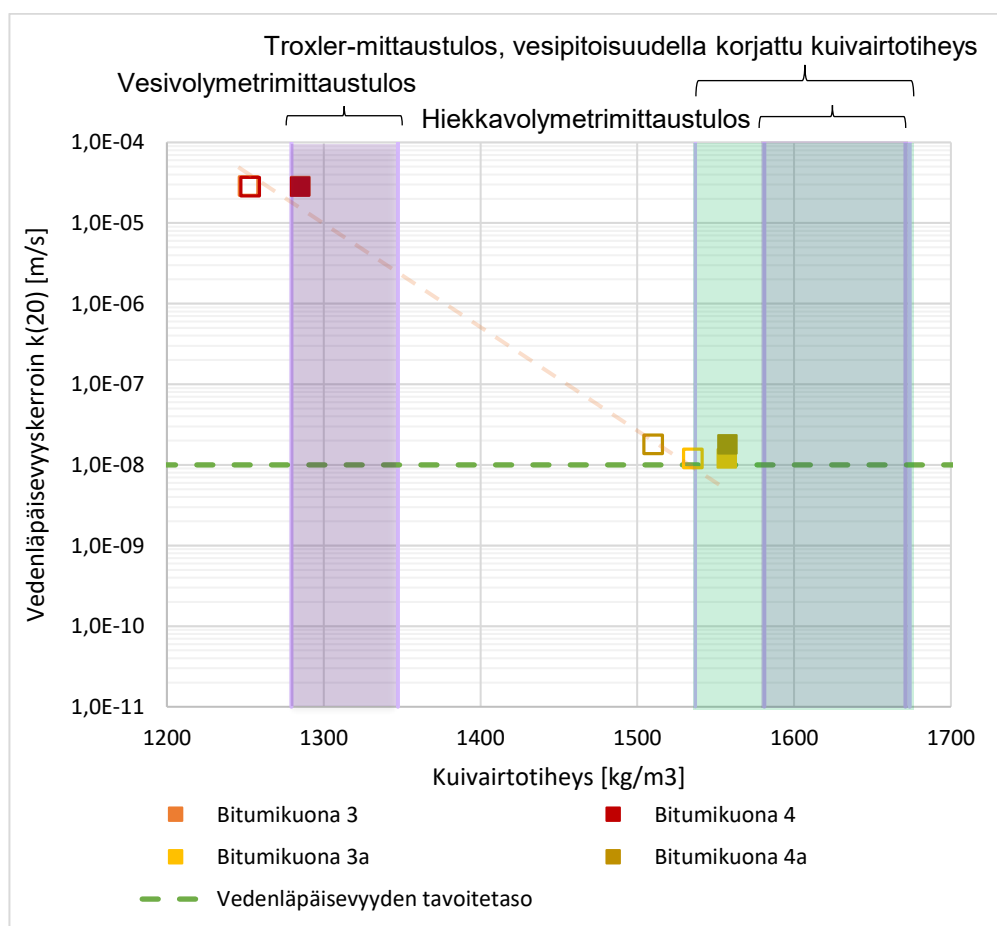
Kuva 55. Kuonabentoniittiseoksen vedenläpäisevyys standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä. Tiivistystarkastelumittausten vaihteluvälit ja tavoitekuivairtoteihs on esitetty kuvassa alueina.

Urakoitsijan tekemän kuonabentoniittikoekappaleen 1.3 vedenläpäisevyyskerroimen arvo ($1,7 \cdot 10^{-11}$ m/s) poikkeaa paljon sen rinnakkaisen koekappaleen 1.4 tuloksesta $8,6 \cdot 10^{-10}$ m/s, mikä on aikaisempien tutkimustuloksien kanssa samaa suuruusluokkaa. Vedenläpäisevyydetulokset koekappaleelta 1.3 lukuun ottamatta näyttävät asettuvan samalla suoralle, vaikka kokeissa on käytetty erisuuruista tehokasta jännitystä. Urakoitsijan tekemät kuonabentoniitin koekappaleiden kuivairtoteihs on muuttunut merkittävästi kokeen aikana.

Työkohtaisessa työselityksessä (Ramboll 2018b) kuonabentoniitin tavoitekuivairtoteihsiksi on määritelty ennakkokokeiden perusteella 1400–1500 kg/m³ ja vedenläpäisevyyskerroimen k tavoitteeksi $< 1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Tässä tutkimuksessa tehtyjen vedenläpäisevyyskokeiden tulosten perusteella kuivairtoteihsen ollessa noin 1460 kg/m³ (kuonabentoniitti 1a ja 2a) on vedenläpäisevyyskerroin k alle $1 \cdot 10^{-8}$ m/s (1a, $k = 6,4 \cdot 10^{-9}$ m/s ja 2a, $k = 2,6 \cdot 10^{-9}$ m/s). Kun kuivairtoteihs on 100 kg/m³ pienempi (koekappaleet 1 ja 2), on

vedenläpäisevyys 10-100-kertaa liian suuri. Vedenläpäisevyys riippuu siis voimakkaasti kuivairtitiheydestä. Työmaalla saavutettu kuivairtitiheys pitää pystyä luotettavasti määrittämään, jotta voidaan varmistua tavoitetason saavuttamisesta. Eri kenttämittareilla ja jopa saman menetelmän sisällä vaihtelu tuloksissa voi olla yli 100 kg/m^3 . Ensimmäisen koesarjan koekappaleiden 1 ja 2 kuivairtitiheys osuu hieman troxler- ja vesivolymetrimittaustulosten kuivairtitiheyden vaihteluvälin löyhemmälle puolelle ja toisen koesarjan koekappaleiden 1a ja 2a kuivairtitiheys troxler-mittaustulosten tiiviimmälle puolelle ja vesivolymetrimittaustulosten vaihtelualueen ylärajalle.

Bitumikuonaseoksen vedenläpäisevyyskokeiden tulokset on esitetty kuvassa 56. Troxler-mittaustulosten mukainen kuivairtitiheyden vaihteluväli, jossa on huomioitu laboratoriossa määritetty vesipitoisuus, on esitetty kuvassa. Vesi- ja hiekkavolymetrimittaustulosten mukainen kuivairtitiheyden vaihteluväli on esitetty kuvassa 56. Troxler-mittaustulosten kuivairtitiheyden vaihteluväli osuu osittain hiekkavolymetrimittaustulosten vaihteluvälille. Vesivolymetrimittauksella määritettyjen kuivairtitiheyksien vaihteluväli erottuu kuvassa selvästi.



Kuva 56. Bitumikuonaseoksen vedenläpäisevyys standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä. Tiivistystarkastelumittausten vaihteluvälit on esitetty kuvassa alueina.

Bitumikuonan koekappaleilla 3 ja 4 oli sama kuivairtoteiheyys, joten koekappaleen 3 merkki jää kuvassa 56 koekappaleen 4 merkin alle. Rakenne U.1 on urakoitsijan ehdotama rakenne eikä se sisältynyt alkuperäiseen urakkaan. Urakoitsija ei ilmoittanut bitumikuonan vedenläpäisevyydelle tai kuivairtoteiheydelle tavoitearvoja.

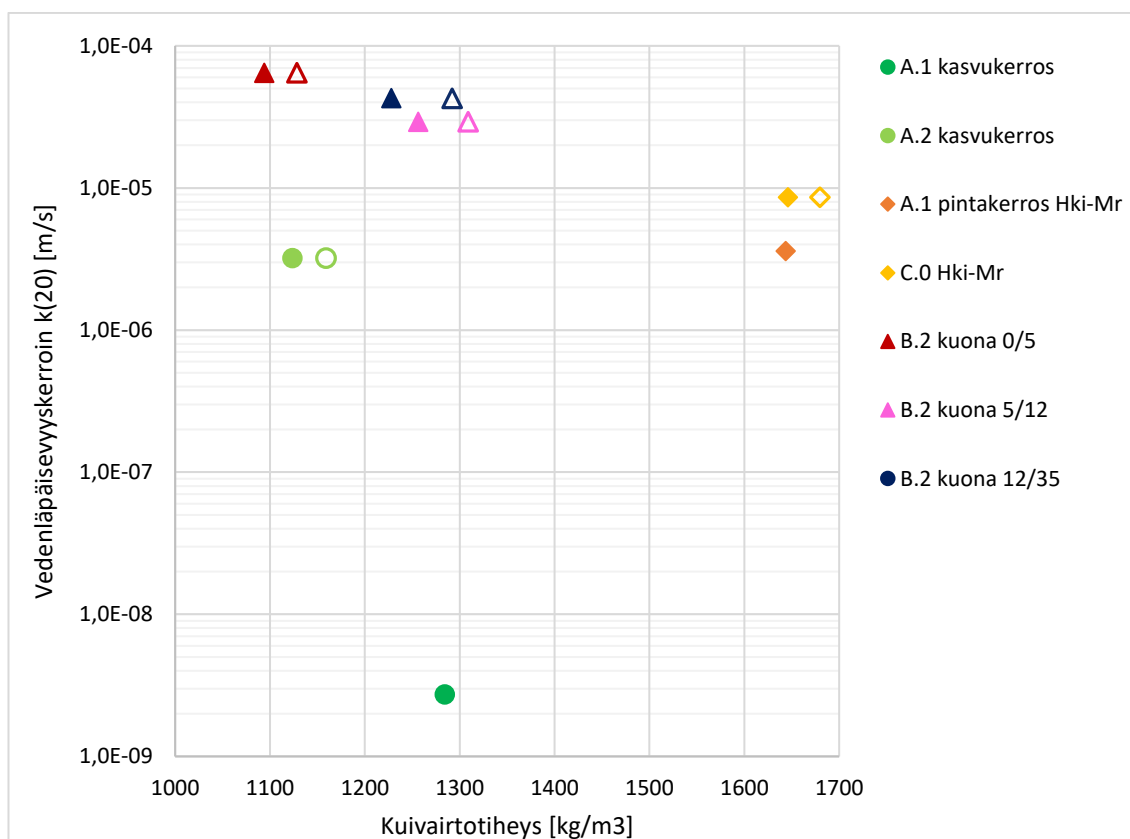
Kun bitumikuonaseosta tiivistettiin kiertotiivistyslaitteella yli 1550 kg/m^3 kuivairtoteiheyteen, seoksesta erottui vettä. Tämä viittaa siihen, että kyseisen seoksen maksimikuivairtoteiheyys ko. työmäärällä ylitettiin. Urakoitsija määrittä rakenteesta hiekkavolymetri- ja troxler-mittauksilla kuitenkin tätä suurempia kuivairtoteiheyksiä. Tulosten perusteella troxler- ja hiekkavolymetrimittaus yliarvioivat rakenteen kuivairtoteiheyden. Vesivolymetrimittauksien tulokset olivat keskimäärin noin 300 kg/m^3 pienempiä kuin hiekkavolymetrimittauksilla määritetty kuivairtoteiheyys. Vesivolymetrimittauksista vastaavassa kuivairtoteiheydessä oli materiaali vielä löyhää ja koekappaleita oli vaikea liikuttaa sitä rikkomatta. Kuivairtoteiheyden ollessa 1557 kg/m^3 mitattiin bitumikuonaseoksen vedenläpäisevyydeksi noin $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$.

Kuonabentoniitin ja bitumikuonan vedenläpäisevyyskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 20. Taulukossa on myös urakoitsijan tekemien vedenläpäisevyyskokeiden tulokset. Negatiivinen kokoonpuristuman arvo kuvaa, että koekappaleen korkeus on kokeen aikana kasvanut.

Taulukko 20. *Kuonabentoniitti- ja bitumikuonaseosten vedenläpäisevyyskokeiden tulokset standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä.*

Koe-kappale	Ennen koetta		Kokeen jälkeen			Vedenläpäisevyyskerroin k [m/s]
	Kuiva-irtoteiheyys [kg/m ³]	Vesipitoisuus [%]	Kuiva-irtoteiheyys [kg/m ³]	Vesipitoisuus [%]	Kokoonpuristuma [mm]	
A.2 kuonabentoniitti						
1	1 365	23,5	1 365	36,2	0,0	$1,2 \cdot 10^{-6}$
2	1 363	23,6	1 363	35,7	0,0	$9,0 \cdot 10^{-7}$
1a	1 468	23,0	1 468	30,2	0,0	$6,4 \cdot 10^{-9}$
2a	1 464	23,4	1 464	29,7	0,0	$2,6 \cdot 10^{-9}$
YIT 1.1	1 372	29,0	1 411	32,1	-0,2	$1,4 \cdot 10^{-7}$
YIT 1.2	1 373	29,0	1 416	31,0	-0,5	$1,1 \cdot 10^{-7}$
YIT 1.3	1 445	29,0	1 504	29,8	-0,3	$1,7 \cdot 10^{-11}$
YIT 1.4	1 445	29,0	1 520	24,8	-0,7	$8,6 \cdot 10^{-10}$
U.1 bitumikuona						
3	1 285	24,7	1 252	36,2	0,6	$2,9 \cdot 10^{-5}$
4	1 285	25,2	1 253	36,5	0,7	$2,8 \cdot 10^{-5}$
3a	1 557	22,6	1 535	22,9	0,4	$1,2 \cdot 10^{-8}$
4a	1 557	22,7	1 510	23,2	0,7	$1,8 \cdot 10^{-8}$

Lietekompostiseoksen, Helsinki-moreenin ja jätteenpolton kuonafraktioiden vedenläpäisevyys testattiin käyttäen jäykkäseinämäistä menetelmää. Tavoitekuivairtoteiheyksiä asetettiin tehtyjen tiivistystarkkailumittausten (troxler- ja vesivolymetrimittaus) perusteella. Lietekompostiseoksen, Helsinki-moreenin ja jätteenpolton kuonafraktioiden vedenläpäisevyyskokeiden tulokset on esitetty kuvassa 57. Osa koekappaleista tiivistyi kokeen aikana, joten näille koekappaleille on esitetty vedenläpäisevyyden tulos myös ennen kokeen aloitusta määritetyn kuivairtoteiheyden funktiona. Kuvassa 57 ennen koetta määritetyt kuivairtoteiheyden arvot on esitetty umpinaisella kuviolla. Jos kuivairtoteiheyksiä on vedenläpäisevyyskokeen jälkeen muuttunut, on kokeen jälkeen määritetty kuivairtoteiheyksiä esitetty samalla kuviolla, mutta ilman täyttöä eli kuviossa on näkyvissä vain ääriviivat.



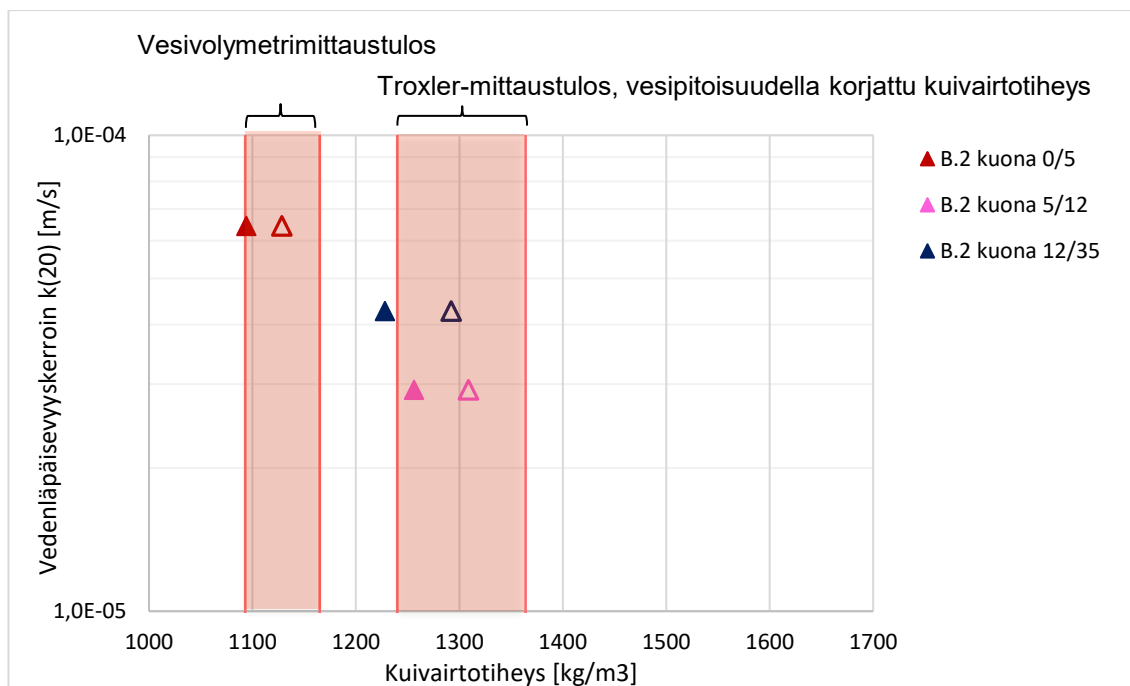
Kuva 57. Jäykkäseinämäisten vedenläpäisevyyskokeiden tulokset standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä.

Koerakenteen A.1 lietekompostiseoksen vedenläpäisevyyskoekappaleen kuivairtoteiheyksiä osui troxler-mittaustulosten kuivairtoteiheyden vaihteluvälin yläpäähän ja vesivolymetrimittauksella mitattujen kuivairtoteiheyksien vaihteluvälin keskipaikoille. Koerakenteen A.2 lietekompostiseoksen vedenläpäisevyyskoekappaleen kuivairtoteiheyksiä osui troxler-mittauksella määritettyjen kuivairtoteiheyksien vaihteluvälin keskelle ja vesivolymetrillä mitattujen kuivairtoteiheyksien vaihteluvälin yläpäähän. Koerakenteen A.2 koekappale kokoonpuristui kokeen aikana. Koerakenteesta A.1 kasvukerroksesta mitattu kuivairtoteiheyksiä on koerakenteesta A.2 mitattua kuivairtoteiheyttä suurempi, joten myös koekappale

leesta tehtiin tiiviimpi. Rakenteesta mitattujen kuivairtotehiyksiin vaihteluvälien lukuarvot on esitetty kohdassa 8.2 *Tiivistystarkkailun tulokset*. Koerakenteen A.1 lietekompostin vedenläpäisevyyskertoimen arvo $2,7 \cdot 10^{-9}$ m/s on jäykkäseinämäisen sellin luotettavan mittausalueen rajamailla. Koesellin purkamisen yhteydessä havaittiin, että suodatinpaperiin oli kertynyt orgaanista ainesta ja/tai hienoainesta, joka oli todennäköisesti vaikuttanut tulokseen. Suodatinkankaiden tukkeutuminen ja biofilmien muodostuminen ovat myös ongelmana kaatopaikoilla.

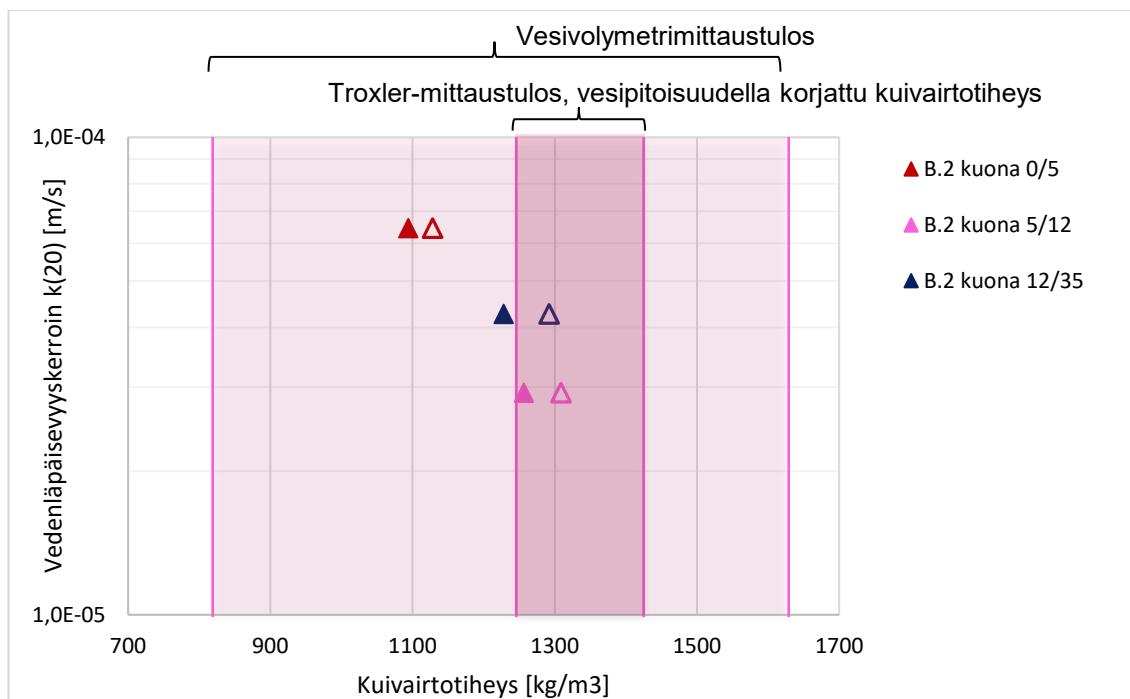
Koerakenteen A.1 Helsinki-moreenin vedenläpäisevyyskoekappaleen kuivairtotehiys osui troxler-mittaustulosten kuivairtotehiyden vaihteluvälin keskipaikkeille ja vesivolymetrimittauksilla määritettyjen kuivairtotehiyksiin vaihteluvälin keskelle. Troxler-mittaustulosten vaihteluväli on vesivolymetrimittaustulosten vaihteluväliä laajempi. Troxler- ja vesivolymetrimittaustulosten kuivairtotehiyksiin vaihteluvälialueet ovat noin 500 kg/m^3 limittäin. Koerakenteen C.0 vedenläpäisevyyskoekappaleen kuivairtotehiys osui troxler-mittaustulosten kuivairtotehiyden vaihteluvälin keskelle ja vesivolymetrimittaustulosten kuivairtotehiyden vaihteluvälin löyhemmälle puolelle. Vesivolymetrimittaustulosten vaihtelualue on huomattavasti laajempi ja troxler-mittaustulosten kuivairtotehiyden arvot osuvat vesivolymetrimittaustulosten kuivairtotehiyden vaihtelualueen sisäpuolelle. Molemmilla Helsinki-moreenista valmistetuilla koekappaleilla oli lähes sama kuivairtotehiys ennen koetta, mutta C.0:n koekappale puristui kokoon kokeen aikana. Helsinki-moreenikoekappaleilla vedenläpäisevyys on samaa luokkaa kuin lietekompostiseoksen A.2 koekappaleella, vaikka kuivairtotehiys oli suurempi. Orgaanisella aineksella ja rakeisuudella on vaikutusta vedenläpäisevyyteen.

Koerakenteen B.2 jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm troxler- ja vesivolymetrimittaustulosten mukaiset kuivairtotehiyden vaihtelualueet on kuonafraktioiden vedenläpäisevyyskokeiden tulosten kanssa esitetty kuvassa 58. Vaihtelualueet on esitetty kuvassa. Jätteenpolton kuonafraktion 0/5 mm:ä koekappaleen kuivairtotehiys valittiin vesivolymetrimittausten perusteella. Troxler-mittaustulosten kuivairtotehiyden arvot ovat suurempia kuin vesivolymetrimittauksella määritetyt. Kuvassa on käytetty korjattuja kuivairtotehiyden arvoja.



Kuva 58. Tutkitun jätteenpolton kuonafraction 0/5 mm:ä koekappaleen vedenläpäisevyytulokset standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä. Tiivistystarkastelumittausten kuivairtitiheyden vaihteluvälit on esitetty kuvassa.

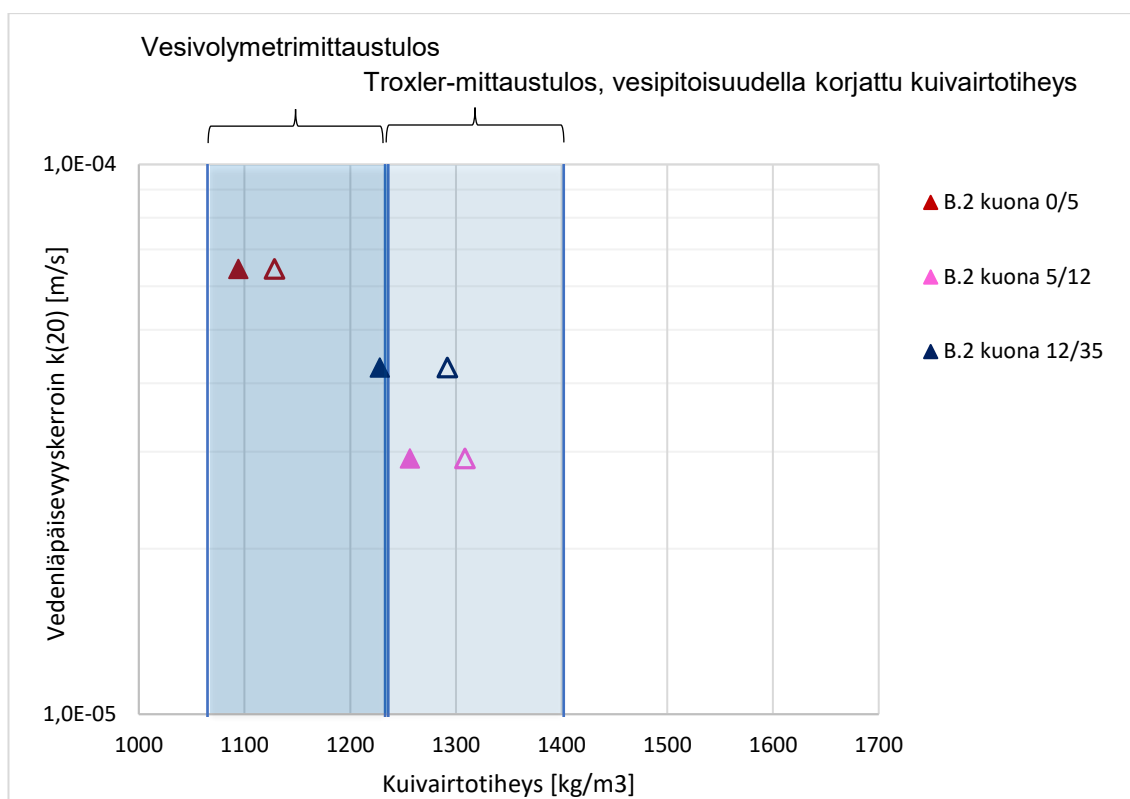
Koerakenteen B.2 jätteenpolton kuonafraction 5/12 mm:ä troxler- ja vesivolymetrimittaustulosten mukaiset kuivairtitiheyden vaihtelualueet on kuonafractionien vedenläpäisevyysskoekokeiden tulosten kanssa esitetty kuvassa 59. Vaihtelualueet on merkitty alueina. Troxler-mittauksen kuivairtitiheyslukemat eivät ole suoraan laitteen mittaamia. Kuivairtitiheyden arvo on laskettu laitteen mittaamasta märkäirtitiheydestä laboratoriossa määritettyä vesipitoisuutta käyttäen.



Kuva 59. Tutkitun jätteenpolton kuonafraktion 5/12 mm:ä koekappaleen vedenläpäisevyytulokset standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä. Tiivistystarkastelumittausten kuivairtitiheyden vaihteluvälit on esitetty kuvassa.

Koerakenteen B.2 jätteenpolton kuonafraktion 12/35 mm troxler- ja vesivolymetrimittaustulosten mukaiset kuivairtitiheyden vaihtelalueet on kuonafraktioiden vedenläpäisevyysskoekokeiden tulosten kanssa esitetty kuvassa 60. Koska materiaali sisälsi yli 20 mm:n rakeita, materiaali katkaistiin 20 mm:n seulalla ennen sullontaa,

joten tulos edustaa jätteenpolton kuonaa 12/20 mm:ä. Vaihtelalueet on esitetty alueina. Troxler-mittauksen kuivairtitiheyslukemat eivät ole suoraan laitteen mittaamia. Kuivairtitiheyden arvo on laskettu laitteen mittaamasta märkäirtitiheydestä laboratoriossa määritettyä vesipitoisuutta käyttäen. Kuivairtitiheyksien vaihteluvälit menevät hieman päällekkäin.



Kuva 60. Tutkitun jätteenpolton kuonafraction 12/35 mm;ä koekappaleen vedenläpäisevyytulokset standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä. Tiivistystarkastelumittausten kuivairtitiheyden vaihteluvälit on esitetty kuvassa.

Kaikilla jätteenpolton kuonafraktioilla vedenläpäisevyyskerroin oli luokkaa 10^{-5} m/s. Troxler- ja vesivolymetrimittausten perusteella määritettyjen kuivairtitiheyden arvoilla oli keskenään suuriakin eroja, joten on vaikea sanoa, vastaako vedenläpäisevyyskokeisiin valitut kuivairtitiheyden arvot tilannetta koerakenteessa. Jäykkäseinämäisten vedenläpäisevyyskokeiden tulokset on koottu taulukkoon 21. Kaikkien kuonafraktioiden vedenläpäisevyys oli samaa suuruusluokkaa (10^{-5} m/s). Kaikki koekappaleet eivät tiivistyneet kokeen aikana.

Taulukko 21. Lietekompostiseoksen, Helsinki-moreenin ja jätteenpolton kuonafraktioiden vedenläpäisevyytulokset standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti määritettynä.

Koekappale	Ennen koetta		Kokeen jälkeen			Vedenläpäisevyyskerroin $k(20)$ [m/s]
	Kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Arvioitu vesi-pitoisuus [%]	Kuiva-irtotiheys [kg/m ³]	Vesi-pitoisuus [%]	Kokoonpuristuma [mm]	
Lietekompostiseos						
A.1 kasvukerros	1 284	37,0	1 284	36,4	0,0	$2,7 \cdot 10^{-9}$
A.2 kasvukerros	1 124	36,9	1 159	46,1	3,0	$3,2 \cdot 10^{-6}$
Helsinki-moreeni						
A.1 pintakerros	1 644	9,1	1 644	21,2	0,0	$3,6 \cdot 10^{-6}$
C.0 Hki-Mr	1 646	5,0	1 680	19,8	2,0	$8,6 \cdot 10^{-6}$
Kuona						
B.2 kuona 0/5	1 094	25,4	1 128	41,8	3,0	$6,5 \cdot 10^{-5}$
B.2 kuona 5/12	1 256	11,0	1 309	17,8	4,0	$2,9 \cdot 10^{-5}$
B.2 kuona 12/35	1 228	4,3	1 292	8,3	5,0	$4,3 \cdot 10^{-5}$

Taulukossa 22 on esitetty huokoisuus n , huokosluku e ja kyllästysaste S_r koekappaleille vedenläpäisevyysskoeken jälkeen. Niiden laskemisessa on käytetty tutkimuksen yhteydessä määritettyjä kiintotiheyksiä. Koska jätteenpolton kuonafraktio 12/35 mm:ä katkaistiin 20 mm:n seullalla, vastaavat tulokset todellisuudessa jätteenpolton kuonafraktiota 12/20 mm:ä.

Taulukko 22. Lietekompostiseoksen, Helsinki-moreenin ja jätteenpolton kuonafraktioiden huokoisuus, huokosluku ja kyllästysaste standardin SFS-EN ISO 17892-11 mukaisesti vedenläpäisevyysskoeken jälkeen.

Koekappale	Kokeen jälkeen		
	Huokoisuus n [%]	Huokosluku e	Kyllästysaste S_r [%]
Lietekompostiseos			
A.1 kasvukerros	49,6	0,99	94
A.2 kasvukerros	54,4	1,19	98
Helsinki-moreeni			
A.1 pintakerros	35,5	0,55	98
C.0 Hki-Mr	35,1	0,54	95
Kuona			
B.2 kuona 0/5	56,8	1,31	83
B.2 kuona 5/12	48,9	0,96	48
B.2 kuona 12/35	48,3	0,93	22

9. SEURANTATULOKSET

9.1 Instrumentoinnin ja mittakaivojen tulokset

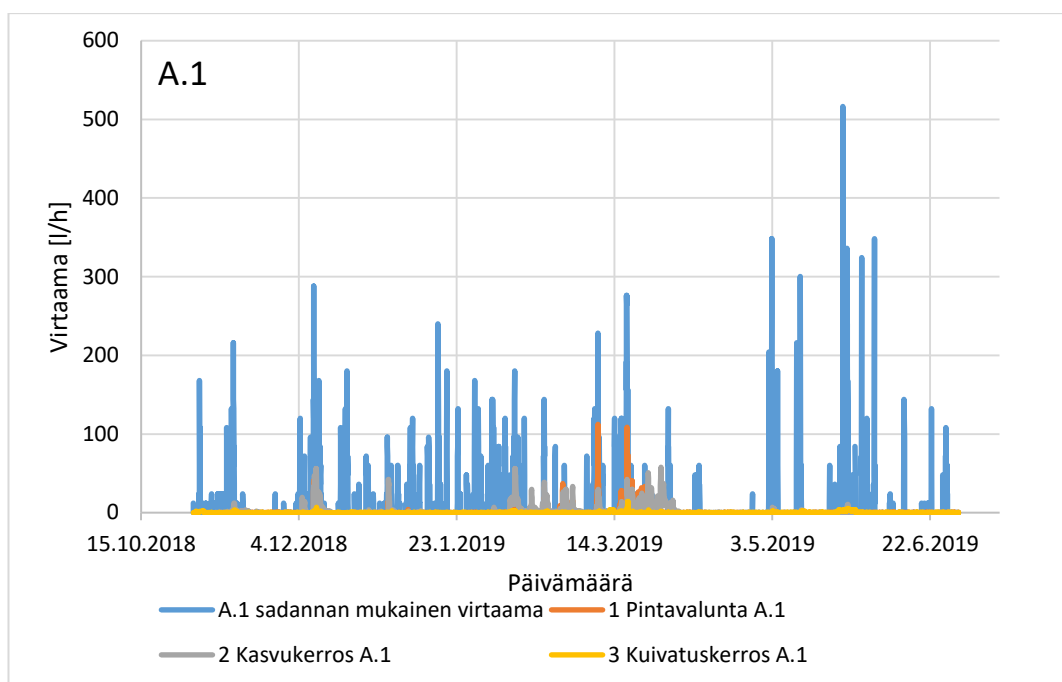
Koerakenteisiin ja mittakaivoihin asennettujen mittausantureiden seurantajakso aloitettiin heti, kun antureista oli saatavilla mittausdataa. Aloitusajankohta vaihteli koerakenteiden valmistumisen mukaan. Tässä työssä tarkasteltava seurantajakso päättyi kesäkuun 2019 loppuun.

9.1.1 Rakenteista purkautuva vesimäärä

Kaikissa v-mittakaivoissa paitsi v-kaivossa U1.1 on virtaaman ja pinnankorkeuden mitaus. Virtaamalaskelmissa on käytetty v-kaivosta suoraan mitattua virtaaman arvoa, kun virtaamaa on mitattu. Jos kaivossa vesipatsaan pinta on v-aukon alapuolella, on virtaama laskettu pinnan korkeuden muutoksen perusteella. Koska v-aukko on pyöreän kaivon keskellä, on pinnankorkeuden perusteella lasketussa virtaamassa pinta-alana käytetty puolilympyrää. Virtaamakuvaajissa on esitetty vain v-kaivot ja umpikaivot, joista saadaan jatkuvaa mittaustietoa. Umpikaivon pinnankorkeuden positiivinen muutos on laskettu virtaamaksi.

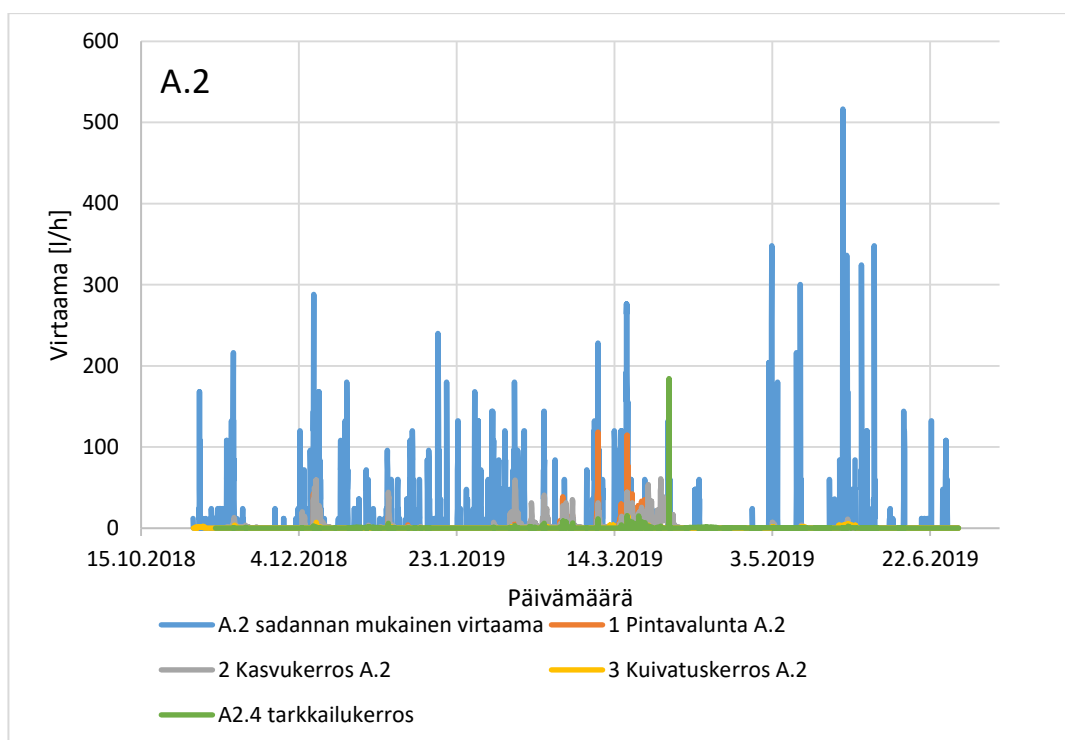
Umpikaivoihin kertyvä vesimäärä oli etukäteen arvioitua suurempi. Osa umpikaivoista tulvi seurantajakson aikana, joten umpikaivojen kertynyt vesimäärä voi olla mittausdatan perusteella laskettua suurempi. Umpikaivoa alettiin tyhjentää säännöllisesti 17.4.2019 lähtien. Umpikaivojen, joissa ei ole pinnankorkeusanturia, vesimäärät on huomioitu vain kumulatiivisen vesimäärän tarkastelussa. Virtaamatuloksia verrataan sadannan perusteella määritettyyn teoreettiseen virtaamaan, joka kertyy ylimmän rakennekerroksen pinta-alalle. Sadantatiedot saatiin Ämmässuon sääasemalta.

V-kaivoihin 1 (pintavalunta), 2 (kasvukerros) ja 3 (kuivatuskerros) kerätään vedet koerakenteista A.1 ja A.2, koska koerakenteilla on periaatteessa samanlaiset pinta- ja kasvukerrokset. Kaivojen virtaamat on jaettu suhteessa koerakenteiden pinta-aloihin, mutta todellisuudessa todellinen jakautuminen voi olla jotain muuta ottaen huomioon, että eri koerakenteissa on saavutettu eri kuivairtoiheys. Kuvassa 61 on esitetty koerakenteesta A.1 eri kerroksista purkautuva vesimäärä v-kaivojen osalta.



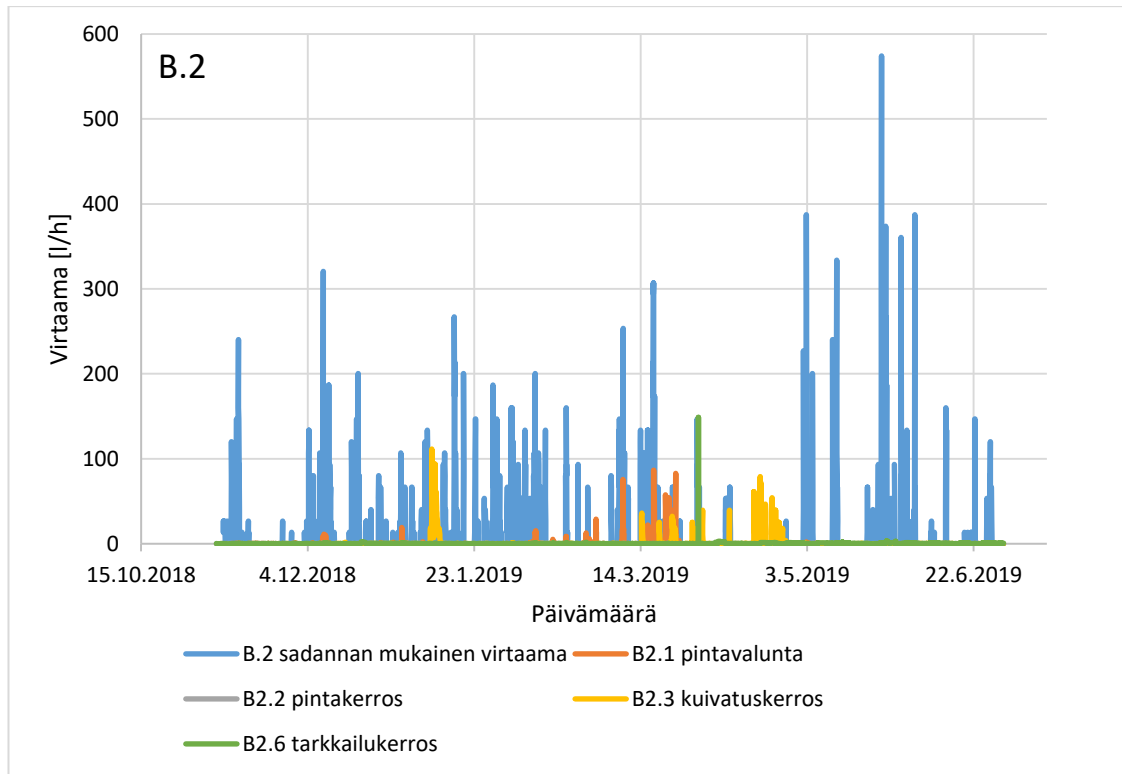
Kuva 61. Koerakenteen A.1 eri rakennekerroksista purkautuva laskennallinen vesimäärä ajalta 7.11.2018-30.6.2019.

Kuvassa 62 on esitetty koerakenteen A.2 eri kerroksista purkautuva vesimäärä. Kuvassa kaivojen 1, 2 ja 3 virtaamat on laskettu A.1 ja A.2 koerakenteiden yhteismäärästä suhteessa koerakenteiden pinta-alaan. Umpikaivossa A2.4 mitataan pinnankorkeutta, jonka perusteella lasketaan virtaama. Umpikaivo A2.4 ei ole tulvinut 17.4.2019 tehdyn tyhjenyksen jälkeen (Alenius 2019). Kuvat ovat lähes identtiset, koska koerakenteiden pinta-aloissa on vain pieni ero.



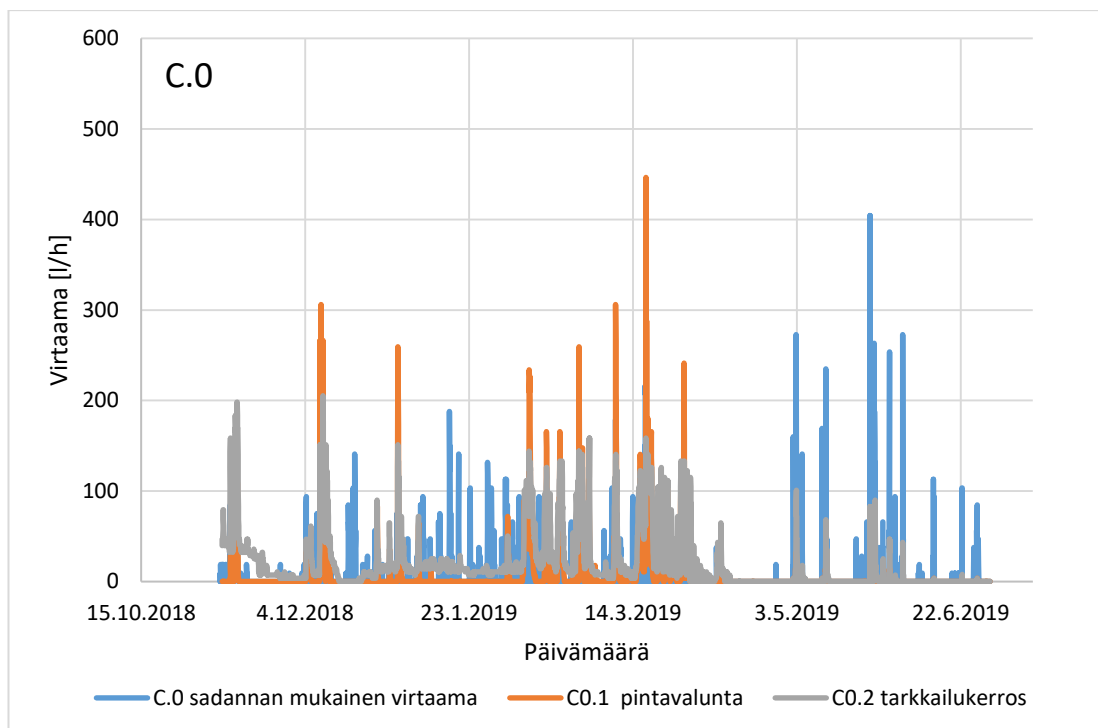
Kuva 62. Koerakenteen A.2 eri rakennekerroksista purkautuva laskennallinen vesimäärä ajalta 7.11.2018-30.6.2019.

Kuvassa 63 on esitetty koerakenteen B.2 eri kerroksista purkautuva laskennallinen vesimäärä. Mittakaivoissa B2.1 ja B2.3 on v-padot. Umpikaivoissa B2.2 ja B2.6 mitataan pinnankorkeutta, jonka perusteella lasketaan virtaama. Umpikaivo B2.2 on ollut lähes aina tyhjä ja B2.6 ei ole päässyt tulvimaan 17.4.2019 tehdyn tyhjennyksen jälkeen (Alenius 2019). Umpikaivoon B2.6 on tihkunut maavettä ja vuotavan yhteen korjaus tehtiin 29.7.–1.8.2019 (Hämäläinen 2019).



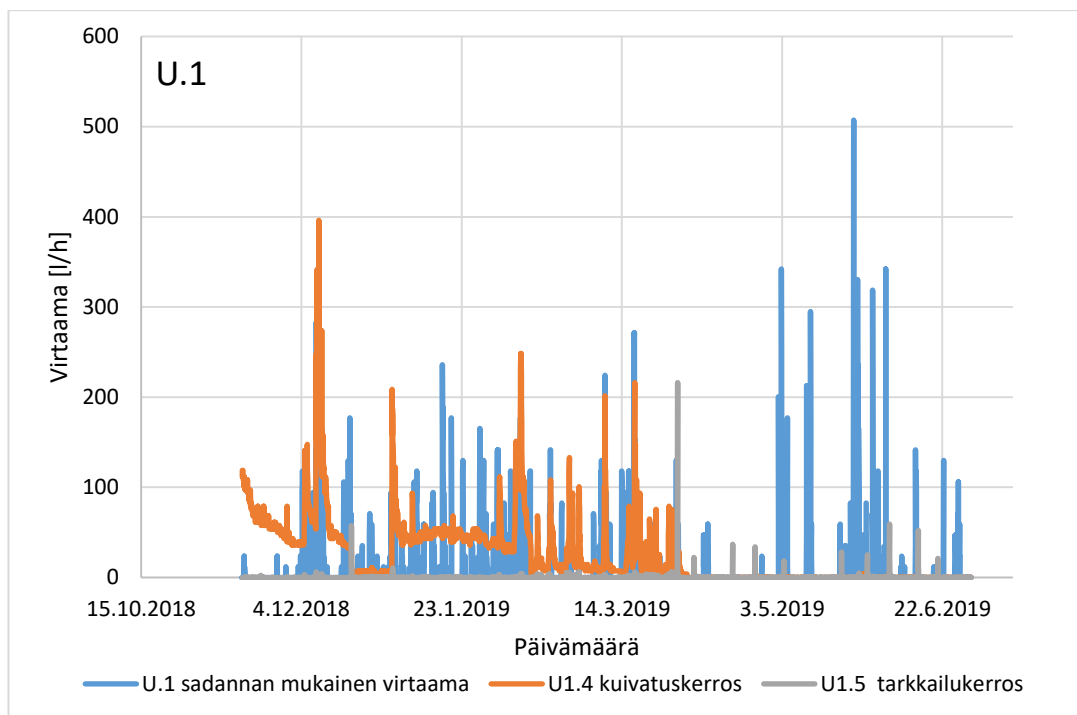
Kuva 63. Koerakenteen B.2 eri rakennekerroksista purkautuva laskennallinen vesimäärä ajalta 7.11.2018-30.6.2019.

Kuvassa on 64 esitetty koerakenteen C.0 eri kerroksista purkautuva laskennallinen vesimäärä. Mittakaivot C0.1 ja C0.2 ovat molemmat v-kaivoja.



Kuva 64. Koerakenteen C.0 eri rakennekerroksista purkautuva laskennallinen vesimäärä ajalta 8.11.2018-30.6.2019.

Kuvassa 65 on esitetty koerakenteen U.1 eri kerroksista purkautuva laskennallinen vesimäärä. Mittakaivossa U1.4 on v-pato. Umpikaivossa U1.5 mitataan pinnankorkeutta. Umpikaivo U1.5 ei ole tulvinut 17.4.2019 tapahtuneen tyhjennyksen jälkeen (Alenius 2019).

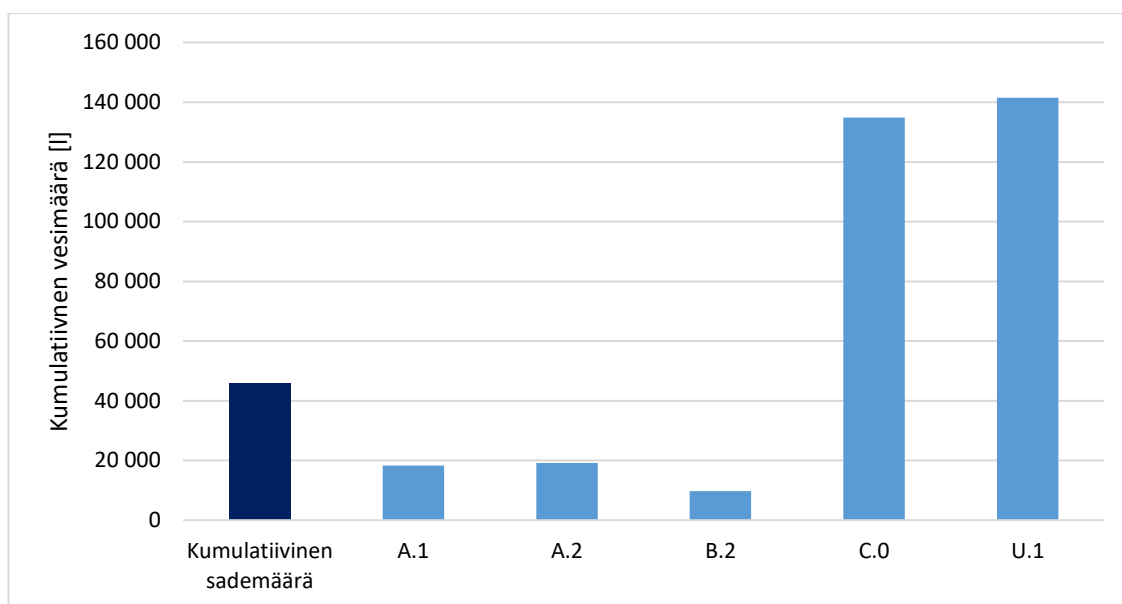


Kuva 65. Koerakenteen U.1 eri rakennekerroksista purkautuva laskennallinen vesimäärä ajalta 15.11.2018-30.6.2019.

9.1.2 Kumulatiivinen vesimäärä

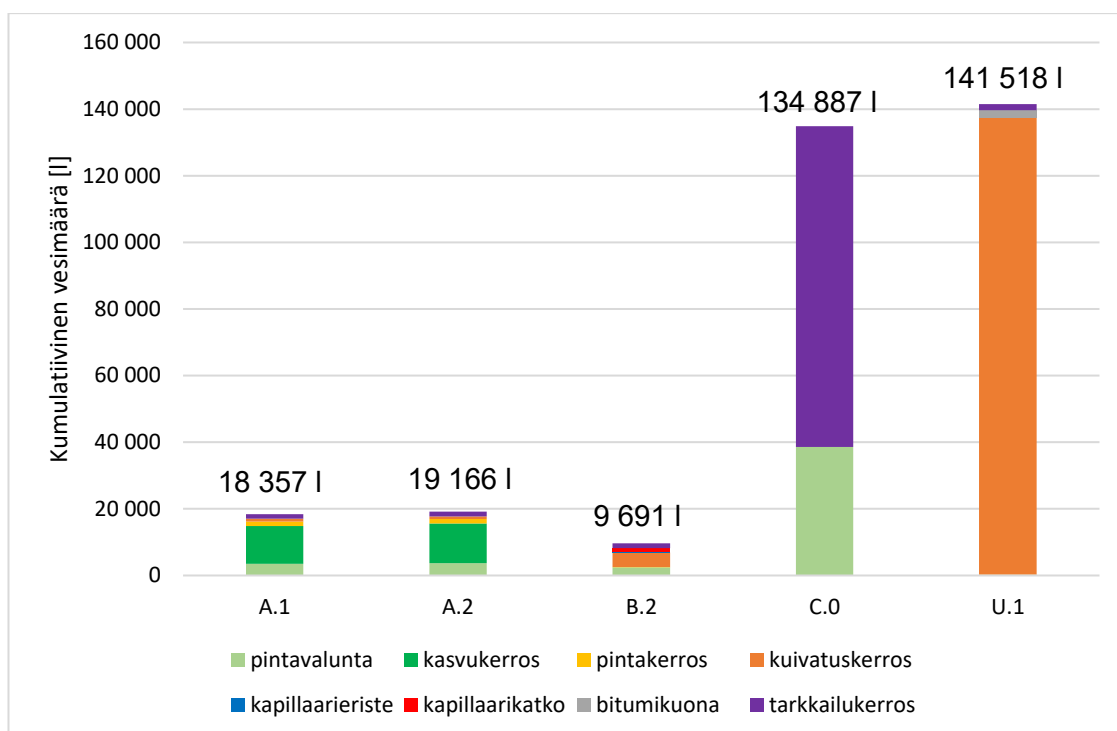
Pintakoerakenteiden vesitasetta on tarkasteltu koerakenteiden osakerroksista purkautuvan laskennallisen kumulatiivisen vesimäärän avulla. Kumulatiivisella vesimäärällä tarkoitetaan tietystä ajanhetkestä alkaen tarkkailun loppuun saakka kertyvää kokonaisvesimäärää eli purkautuvien laskennallisten vesimäärien summaa. Koska mittausdataa alkoi kertyä eri aikaan eri koerakenteissa, on kumulatiivisen vesimäärän laskeminen aloitettu vasta, kun viimeisen koerakenteen kaivot on saatu instrumentoitua eli 15.11.2018. Koerakenteiden laskennallista kumulatiivista vesimäärää verrataan sadannan perusteella määritettyyn kumulatiiviseen sademäärään, joka on määritetty suhteuttamalla sadanta koerakenteen pinta-alaan. Kumulatiivisen sateen osalta oletetaan, että sademäärä muodostuu tasaisesti koko koerakenteen pinta-alalta. Kumulatiivisen sademäärän laskeminen on aloitettu kuukautta aikaisemmin eli 15.10.2018, koska on haluttu huomioida, että vesi ehtii varastoitua rakenteeseen ennen sen ulosvirtausta. Koska mittakaivoihin 1, 2 ja 3 kerätään vedet molemmista koerakenteista A.1 ja A.2., kaivojen virtaamat on suhteutettu koerakenteiden pinta-aloihin. Koerakenteen A.2 pinta-ala on hieman suurempi kuin koerakenteen A.1, joten A.2 saa teoriassa isomman osan sadannasta ja myös virtaamasta.

Kumulatiivinen sademäärä ajalta 15.10.2018-30.6.2019 ja kumulatiiviset vesimäärät koerakenteista ajalta 15.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 66. Koerakenteiden kumulatiivinen vesimäärä on eri rakennekerroksista purkautuvien vesimäärien summa. Tulosten perusteella koerakenteista C.0 ja U.1 purkautuu laskennallisesti noin kolminkertainen määrä vettä kumulatiiviseen sademäärään verrattuna.



Kuva 66. Kumulatiivinen sademäärä ja koerakenteiden laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä seurantajakson aikana 15.11.2018-30.6.2019.

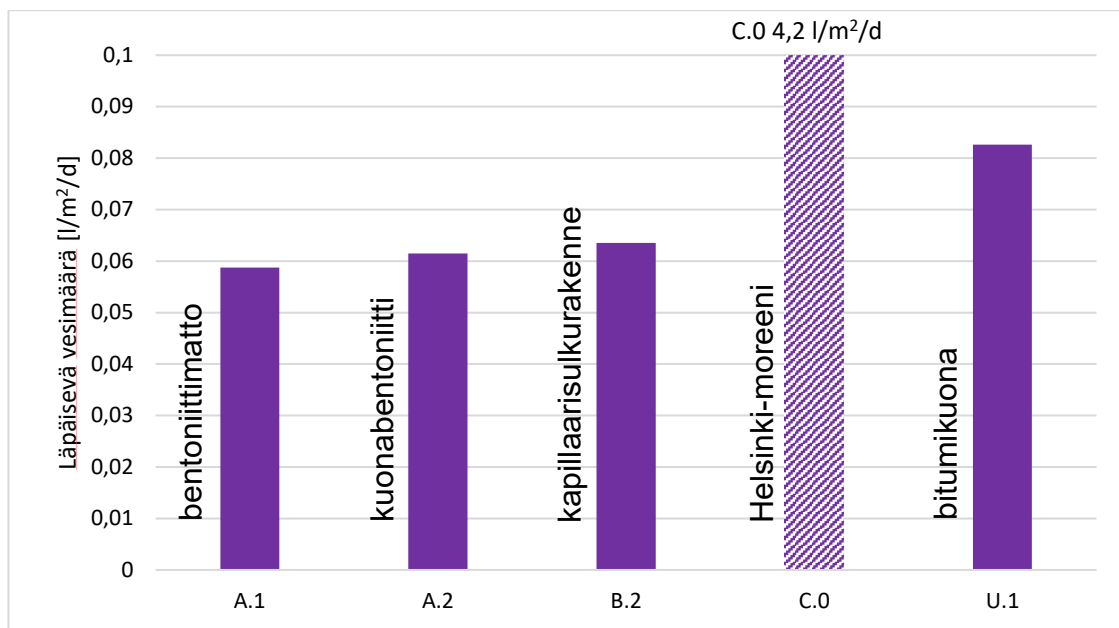
Kuvassa 67 on esitetty koerakenteiden eri rakennekerroksista purkautuva, laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä. Tulosten perusteella koerakenteissa A.1 ja A.2 kasvukerroksen kautta purkautuu eniten vesiä; koerakenteessa C.0 puolestaan tarkkailukerroksesta ja koerakenteessa U.1 kuivatuskerroksesta.



Kuva 67. Koerakenteiden laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä rakennekerroksittain seurantajakson aikana 15.11.2018-30.6.2019. Koerakenteesta U.1 puuttuu pintavalunta, koska tietoja ei ollut käytettävissä.

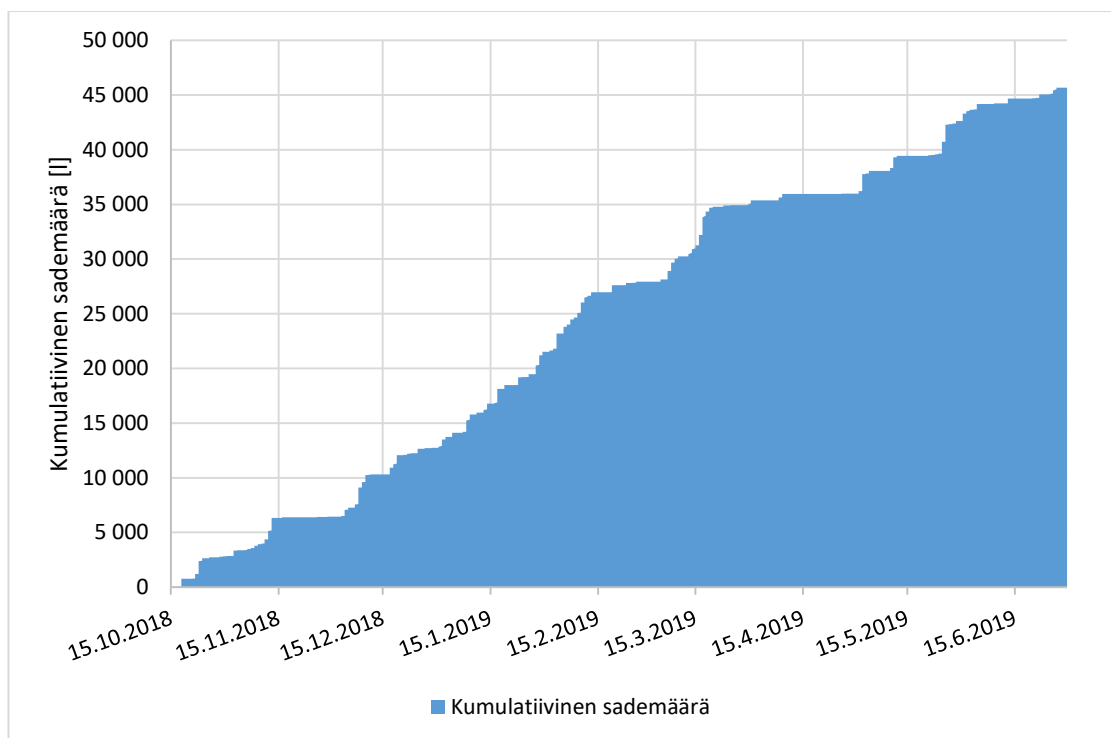
Koska vain tiivistyskerroksen läpäisevä vesimäärä pääsee jätetäyttöön, on kuvassa 68 esitetty tiivistyskalvon päällä olevasta tarkkailukerroksesta purkautuva vesimäärä litroina per päivä per neliö. Koska koerakenteen C.0 tarkkailukerroksesta purkautuu moninkertainen määrä vettä muihin koerakenteisiin verrattuna, on palkki katkaistu ja laskennallinen tulos kirjoitettu palkin yläpuolelle. Kumulatiivisen vesimäärän seurantajakson 15.11.2018-30.6.2019 pituus on 228 päivää. B.2 tarkkailukerroksen kaivon B2.6 oli vuotanut ympäristöstä vettä (Hämäläinen 2019), jonka määrää ei pystytä arvioimaan. Kaikille koerakenteille käytettiin samaa teoreettista pohjan pinta-alaa (100 m^2), koska urakoitsijalta ei saatu koerakenteiden pohjien tarkkeita. Tulosten perusteella koerakenteen A.1 läpäisevä laskennallinen vesimäärä on pienin, mutta ero koerakenteisiin A.2 ja B.2 on vähäinen.

Vertailukohtana voidaan käyttää valtioneuvoston asetuksen 331/2013 mukaisen kaatopaikan pohjarakenteen mineraalisen kerroksen läpäisevää vesimäärää (paksuus yksi metri ja vedenläpäisevyyskerroin $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$). Kun vedenpaine korkeutena käytetään yhtä metriä ympäristöoppaan 36 mukaisesti (Suomen ympäristökeskus 1998), saadaan teoreettiseksi läpäiseväksi vesimääräksi $0,178 \text{ l/m}^2/\text{d}$. Koerakenteet C.0 lukuun ottamatta läpäisevät selvästi vähemmän.



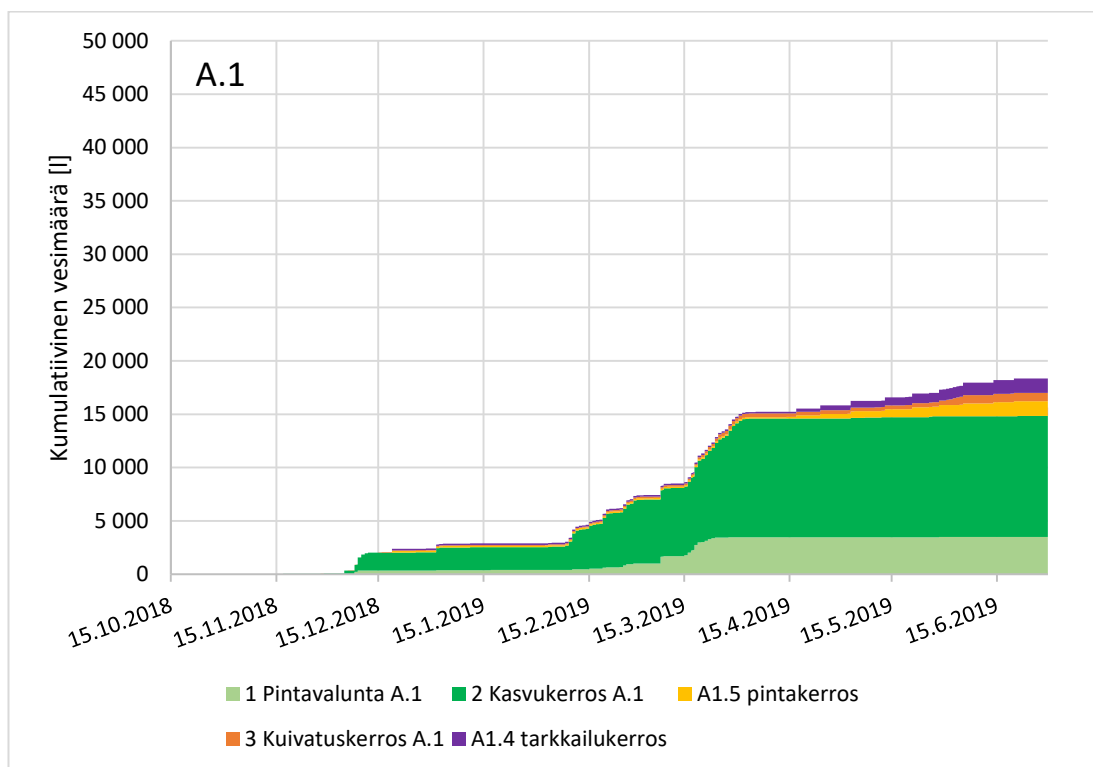
Kuva 68. Koerakenteen läpisyötävä laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä seurantajakson aikana 15.11.2018-30.6.2019 eli tarkkailukerroksesta purkautuva laskennallinen vesimäärä. Koerakenteen C.0 läpäisyä kuvaava pylväs ei mahdu kokonaan kuvaan, joten sen tulos on pylvään yläpuolella.

Kuvassa 69 on esitetty kumulatiivinen sademäärä 15.10.2018-30.6.2019. Vertailua varten on koerakenteiden A.1, A.2 ja B.2 tulokset esitetty samassa mittakaavassa (kuvat 70-72).



Kuva 69. Kumulatiivinen sademäärä seurantajakson aikana 15.10.2018-30.6.2019.

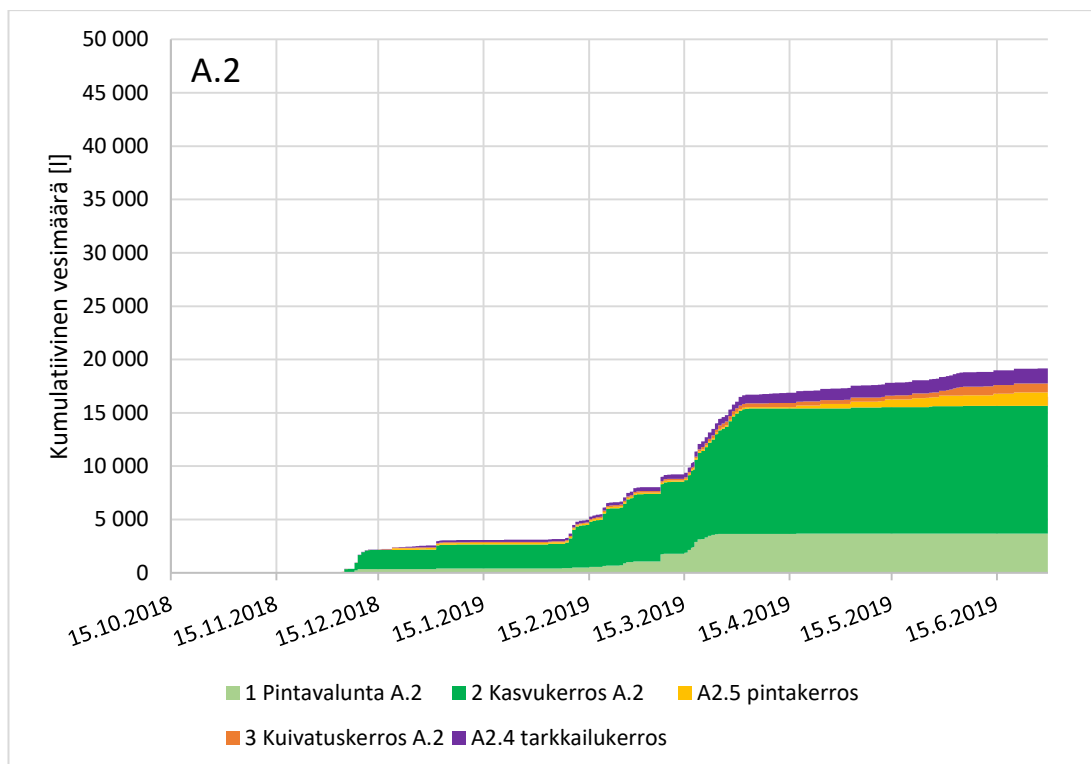
Koerakenteen A.1 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä ajan funktiona on esitetty kuvassa 70. Umpikaivot A1.4 ja A1.5 eivät ole tulvineet 17.4.2019 tapahtuneen tyhjennyksen jälkeen (Alenius 2019). Tulosten perusteella kasvukerros toimii vettä johtavana kerroksena. Suurin osa vesimäärästä purkautuu kasvukerroksesta (62 %:a) ja pintavaluntana (19 %:a). Kasvukerroksen ja pintakerroksen osuus purkautuvasta vesimäärästä on merkittävä ajanjaksolla ennen huhtikuuta 2019. Sen jälkeen purkautuva vesimäärä kyseisissä kerroksissa on ollut pieni. Kuivatuskerros ei toimi tulosten perusteella oletetulla tavalla, koska sen osuus kokonaisvesimäärästä on vain 4,3 %:a.



Kuva 70. Koerakenteen A.1 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä seurantaajan aikana 15.11.2018-30.6.2019.

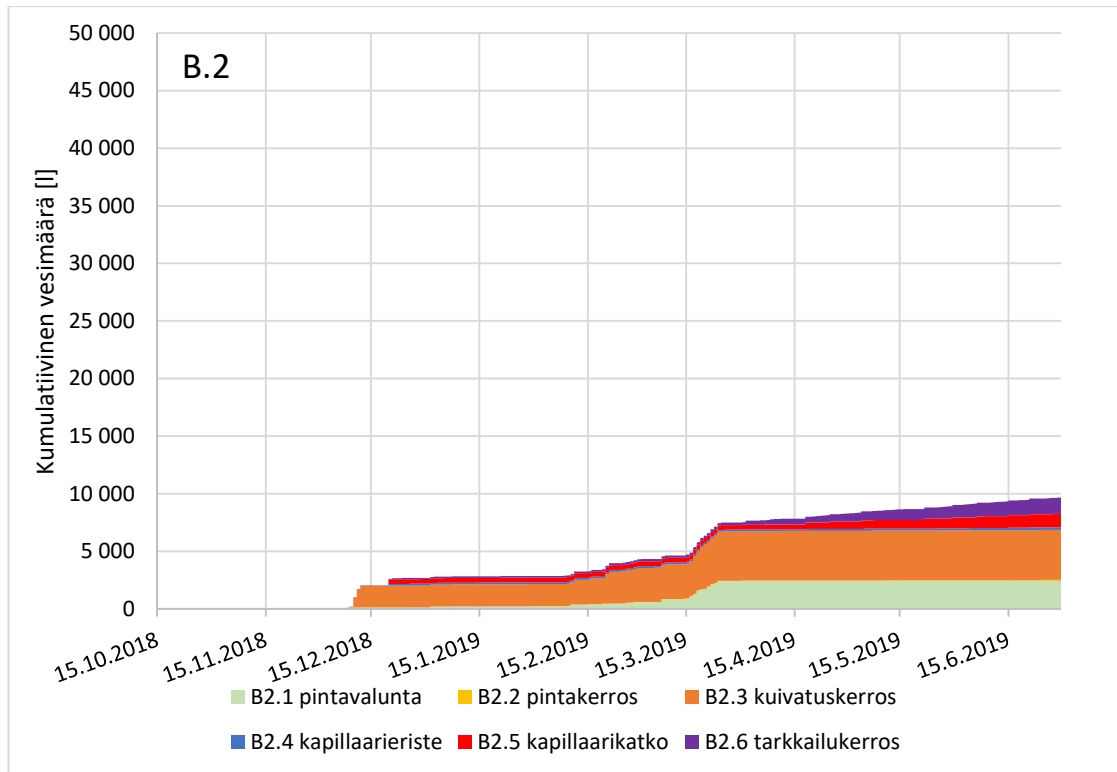
Koerakenteen A.2 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä ajan funktiona on esitetty kuvassa 71. Kuva on lähes samanlainen kuvan 70 kanssa, koska mittakaivoihin 1, 2 ja 3 kerätään vedet molemmista koerakenteista A.1 ja A.2. Kaivojen virtaamat on suhteutettu koerakenteiden pinta-aloihin. Koska pinta-aloilla on hyvin pieni ero, ovat kuvat lähes samanlaiset.

Umpikaivot A2.4 ja A2.5 eivät ole tulvineet 17.4.2019 tapahtuneen tyhjennyksen jälkeen (Alenius 2019). Tulosten perusteella kasvukerros toimii vettä johtavana kerroksena. Suurin osa vesimäärästä purkautuu kasvukerroksesta (63 %:a) ja pintavaluntana (19 %:a). Kasvukerroksen ja pintakerroksen osuus purkautuvasta vesimäärästä korostuu ajanjaksolla ennen huhtikuuta 2019. Sen jälkeen purkautuva vesimäärä kyseisissä kerroksissa on ollut pieni. Kuivatuskerros ei toimi tulosten perusteella oletetulla tavalla, koska sen osuus kokonaisvesimäärästä on vain 4,4 %:a.



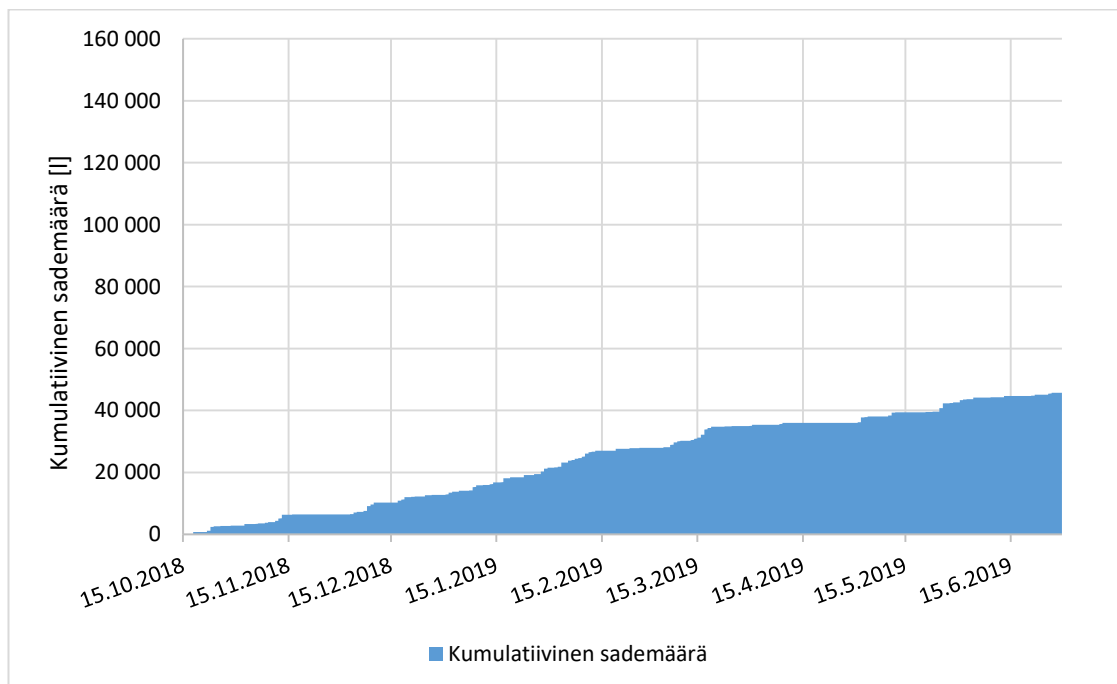
Kuva 71. Koerakenteen A.2 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä seurantajakson aikana 15.11.2018-30.6.2019.

Koerakenteen B.2 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä ajan funktiona on esitetty kuvassa 72. Umpikaivot B2.2 ja B2.4 ovat olleet lähes aina näytteenottokäynneillä tyhjiä. Umpikaivot B2.5 ja B2.6 eivät ole tulvineet 17.4.2019 tapahtuneen tyhjennyksen jälkeen. (Alenius 2019) Umpikaivoon B2.6 on tihkunut vettä ympäristöstä (Hämäläinen 2019). Tulosten perusteella kuivatuskerros toimii oletetulla tavalla. Sen osuus purkautuvasta kokonaisvesimäärästä on 45 %:a. Pintavalunnan osuus on 25 %:a. Kapillaarieristeen osuus purkautuvasta laskennallisesta vesimäärästä on 2,3 %:a ja kapillaarikatkon osuus on tätä suurempi (12 %:a).



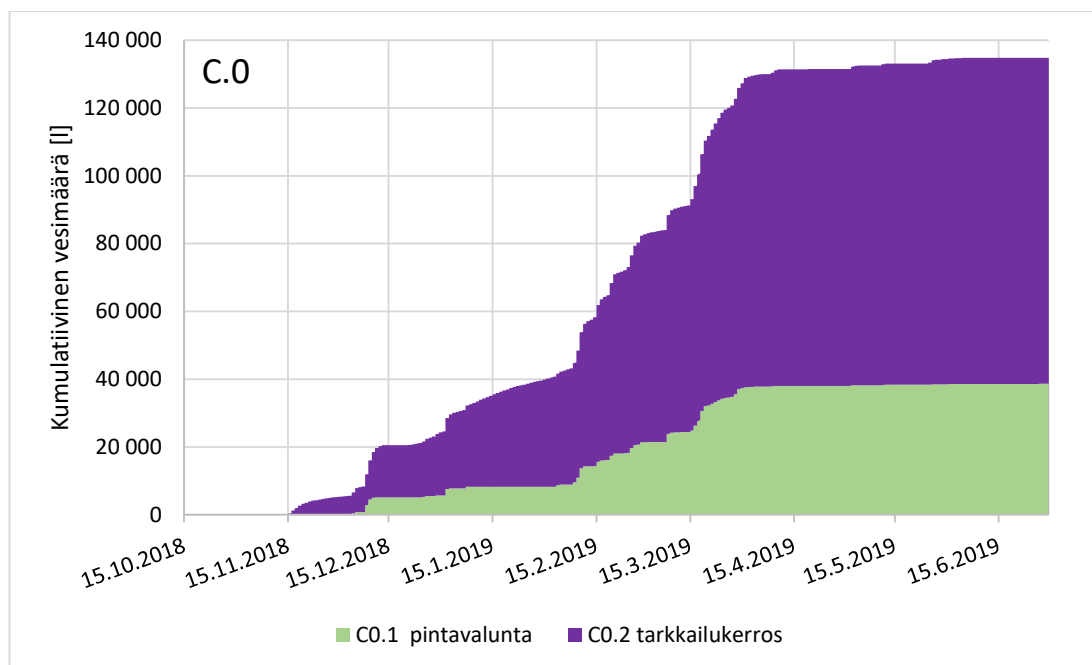
Kuva 72. Koerakenteen B.2 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä seurantajakson aikana 15.11.2018-30.6.2019.

Kuvassa 73 on esitetty kumulatiivinen sademäärä 15.10.2018-30.6.2019 samassa mitta-kaavassa kuin koerakenteiden C.0 ja U.1 tulokset (kuvat 74 ja 75)



Kuva 73. Kumulatiivinen sademäärä seurantajakson aikana 15.10.2018-30.6.2019.

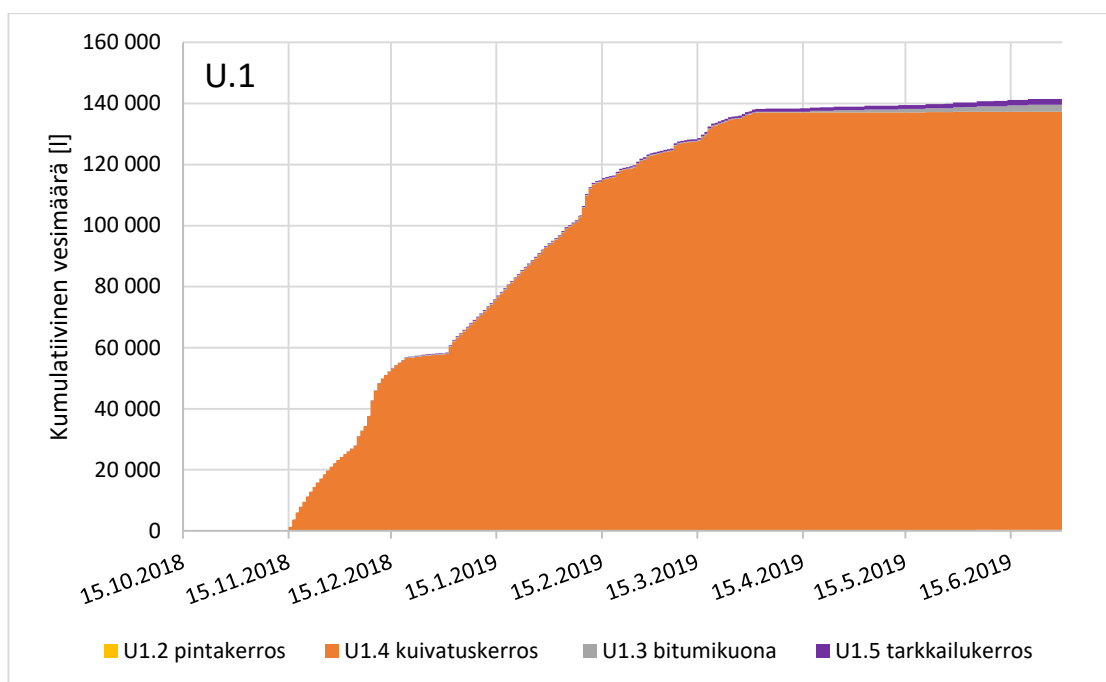
Koerakenteesta C.0 purkautuva laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä ajan funktiona on esitetty kuvassa 74. Pintavalunnan osuus purkautuvasta vesimäärästä on 29 %:a ja tarkkailukerroksen 72 %:a. Tulosten perusteella ohut Helsinki-moreenikerros läpäisee hyvin vettä. Laskennallinen purkautuva vesimäärä on noin kolminkertainen kumulatiiviseen sadantaan verrattuna, mikä ei voi pitää paikkaansa.



Kuva 74. Koerakenteen C.0 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä seurantajakson aikana 15.11.2018-30.6.2019.

Koerakenteen U.1 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä seurantajakson aikana ajan funktiona on esitetty kuvassa 75. Umpikaivo U1.2 on ollut aina lähes tyhjä näytteenotokäynneillä. Umpikaivot U1.3 ja U1.5 eivät ole tulvineet 17.4.2019 tapahtuneen tyhjennyksen jälkeen. Myös v-kaivo U1.1 on ollut lähes aina tyhjä, mutta siitä ei ole vesimäärätietoja, joten kuvasta puuttuu pintavalunta. (Alenius 2019)

Tulosten perusteella kuivatuskerros toimii oletetulla tavalla, koska sen osuus kokonaisvesimäärästä on 97 %:a. Pintakerroksen osuus purkautuvasta laskennallisesta vesimäärästä on vain 0,2 %:a. Laskennallinen purkautuva vesimäärä on noin kolminkertainen kumulatiiviseen sadantaan verrattuna.



Kuva 75. Koerakenteen U.1 laskennallinen kumulatiivinen vesimäärä seurantaajan aikana 15.11.2018-30.6.2019.

Tulosten perusteella laskennallisten kumulatiivisten vesimäärien tapauksessa on havaittavissa ongelmia, koska koerakenteista C.0 ja U.1 tulee kolminkertainen määrä vettä kumulatiiviseen sademäärään verrattuna. Koerakenteista A.1, A.2 ja B.2 purkautuu vastavasti pienempi laskennallinen vesimäärä kumulatiiviseen sademäärään verrattuna. Koerakenteissa C.0 ja U.1 suuri vesimäärä purkautuu v-kaivoista, mutta koerakenteissa A.1, A.2 ja B.2 on myös v-kaivoja, jotka toimivat ”normaalisti”.

V-kaivo ei sovellu koerakenteiden virtaaman mittaamiseen, koska käytännössä v-kaivon mittaustarkkuus on ± 5 mm:ä. Vaihteluvälin vuoksi koerakenteista purkautuva vesimäärä voi olla moninkertainen todellisuuteen verrattuna. Luode Consulting teki koerakenteelle C.0 v-kaivojen tarkastuslaskennan. Kaivon C0.1 automaattimittaus on antanut keskimäärin 3,3 mm:ä korkeampia lukemia kuin manuaali ja kaivo C0.2 2,3 mm:ä korkeampia. Korjattu mittausdata ei silti välttämättä ole sen oikeampaa kuin korjaamaton. Näin pienten erojen mittaaminen pimeässä kaivossa on käytännössä mahdotonta, koska normaalisti lukutarkkuus on 10 mm:ä ja käytännössä maksimitarkkuus on viisi millimetriä. Kaivoissa on anturit, joille valmistajan antama tarkkuus on ± 2 mm:ä. (Kiirikki 2019c) Lukematarkkuudeksi koerakenteille on asetettu yksi millimetri, jonka perusteella on laskettu rakenteista purkautuvaa vesimäärää.

Myös v-aukon morfologia aiheuttaa virhelähdettä, koska v-aukon kärki ei ole täysin terävä. Aukon viimeiset 2-3 mm:ä ovat pyöristyneet, koska pehmeään muoviin ei saa helposti tehtyä täysin terävää kulmaa. Käytetyistä materiaaleista johtuen v-aukon kärkeen muodostuu sakkaa, joka vääristää pinnankorkeuden lukemaa. Sakan muodostumista ei heti huomattu, joten v-aukkoja ei puhdistettu. Arvion mukaan sakan muodostuminen on

voinut talven aikana aiheuttaa 3 mm:n suuruisia tukoksia ja virtaamasta riippumattomia pinnankorkeuden nousuja. (Kiirikki 2019c)

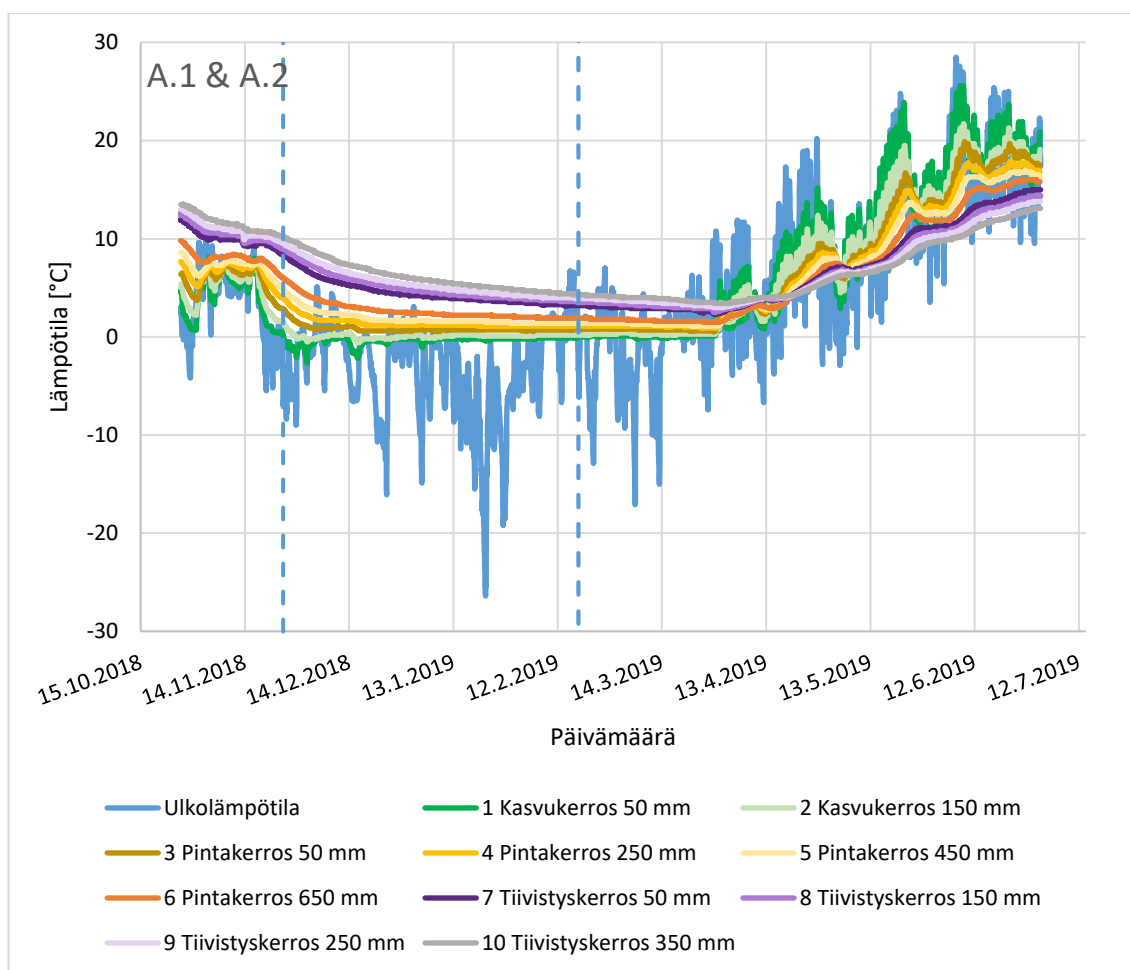
Mittausdatan perusteella talven aikana koerakenteissa C.0 ja U.1 on mitattu paljon hyvin pieniä virtaamia ($< 0,01$ l/s). Muissa koerakenteissa on useammin mitattu tasan 0 l/s. Mittaustarkkuudesta johtuen virhe on todennäköisesti kertaantunut koerakenteissa C.0 ja U.1. Mittaustarkkuudesta ja sakan muodostumisesta johtuen kumulatiivisen vesimäärää ja virtaamatarkastelua ei voida seurantajakson ajalta pitää luotettavina.

Vaikka koerakenteilla A.1 ja A.2 on näennäisesti samanlaiset kasvu- ja pintakerrokset, ei vesimäärien jakaminen koerakenteen pinta-alan perusteella ole realistista. Tiivistystarkkailun perusteella koerakenteiden tiiviydessä on eroja, mikä vaikuttaa purkautuvaan vesimäärään. Rakennekerroksista ei ole myöskään tiedossa lopullisia paksuuksia, joten kerrokset voivat olla keskenään myös eri paksuisia.

9.1.3 Lämpötilamittaukset

Lämpötilan kehittyminen koerakenteissa A.1 ja A.2 lämpötila-antureiden mittaustulosten perusteella 26.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 76. Koska koerakenteissa A.1 ja A.2 on materiaaleiltaan ja rakennepaksuuksiltaan samanlaiset kasvu- ja pintakerrokset, voidaan olettaa, että A.1 antureiden mittausdataa voidaan yleistää kuvaamaan myös koerakennetta A.2. Anturit 1 ja 2 ovat rakenteen A.1 kasvukerroksessa ja anturit 3-6 pintakerroksessa. Anturit 7-10 ovat rakenteen A.2 tiivistyskerroksessa eli kuonabentoniitissa.

Talven aikana vain ylimmän anturin eli kasvukerroksen lämpötila alitti nolla astetta. Lämpötila oli 50 mm syvyydellä alle nollan 25.11.2018-18.2.2019, joka on esitetty kuvassa 76 katkoviivoilla. Lämpötila laski 50 mm:n syvyydellä lyhytaikaisesti alle nollan 6.-9.3. ja 13.-15.3.2019. Lämpötila oli 50 mm:n syvyydellä nolla asteen alapuolella yhteensä 93 päivänä. Kasvukerroksen 150 mm:n syvyydellä olevan mittausanturin mukaan lämpötila oli alle nollan asteen 28.11.-5.12. ja 15.-27.12.2018 sekä 4.-7.1.2019 eli yhteensä 25 päivänä.



Kuva 76. Koerakenteiden A.1 ja A.2 lämpötila-antureiden tulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019 yhdistettynä samaan kuvaan. Anturit 1-6 ovat koerakenteessa A.1 ja anturit 7-10 koerakenteessa A.2.

Koerakenteiden A.1 ja A.2 lämpötilamittaustulosten maksimi-, minimi- ja keskiarvot sekä hajonta seuranta-ajalta on esitetty taulukossa 23. Odotetusti koerakenteiden A.1 ja A.2 kasvukerros ylimpänä rakennekerroksena seuraa ulkolämpötilaa nopeimmin, mikä näkyy paikoin terävinä piikkeinä anturidatassa. Lämpötila nousee kesällä sitä korkeammaksi ja laskee talvella sitä kylmemmäksi, mitä lähempänä pintaa rakennekerros sijaitsee. Vain kasvukerroksessa lämpötila on laskenut alle nollan ja kylmimmillään 50 mm:n syvyydellä on mitattu -2,7 astetta.

Koska lietekompostiseos sisältää orgaanista ainesta, voi kasvukerroksessa tapahtua lämpötuottavia prosesseja. Termisen talven alettua 19.11.2018 kesti kuusi päivää, ennen kuin lämpötila laski kasvukerroksessa 50 mm:n syvyydellä alle nollan asteen ja yhdeksän päivää, ennen kuin lämpötila laski alle nollan 150 mm:n syvyydellä.

Seurantajakso päättyi kesäkuun lopulla 2019 ja silloin koerakenteen A.2 mineraalisen tiivistyskerroksen lämpötila on ollut korkeimmillaan. Tiivistyskerroksen enimmäislämpötila oli seurantajakson aikana 15 astetta ja alin lämpötila 2,3 astetta. Tulosten perusteella tiivistyskerroksen kuonabentoniitti ei jäädy eikä sen lämpötila ole niin korkea, että se

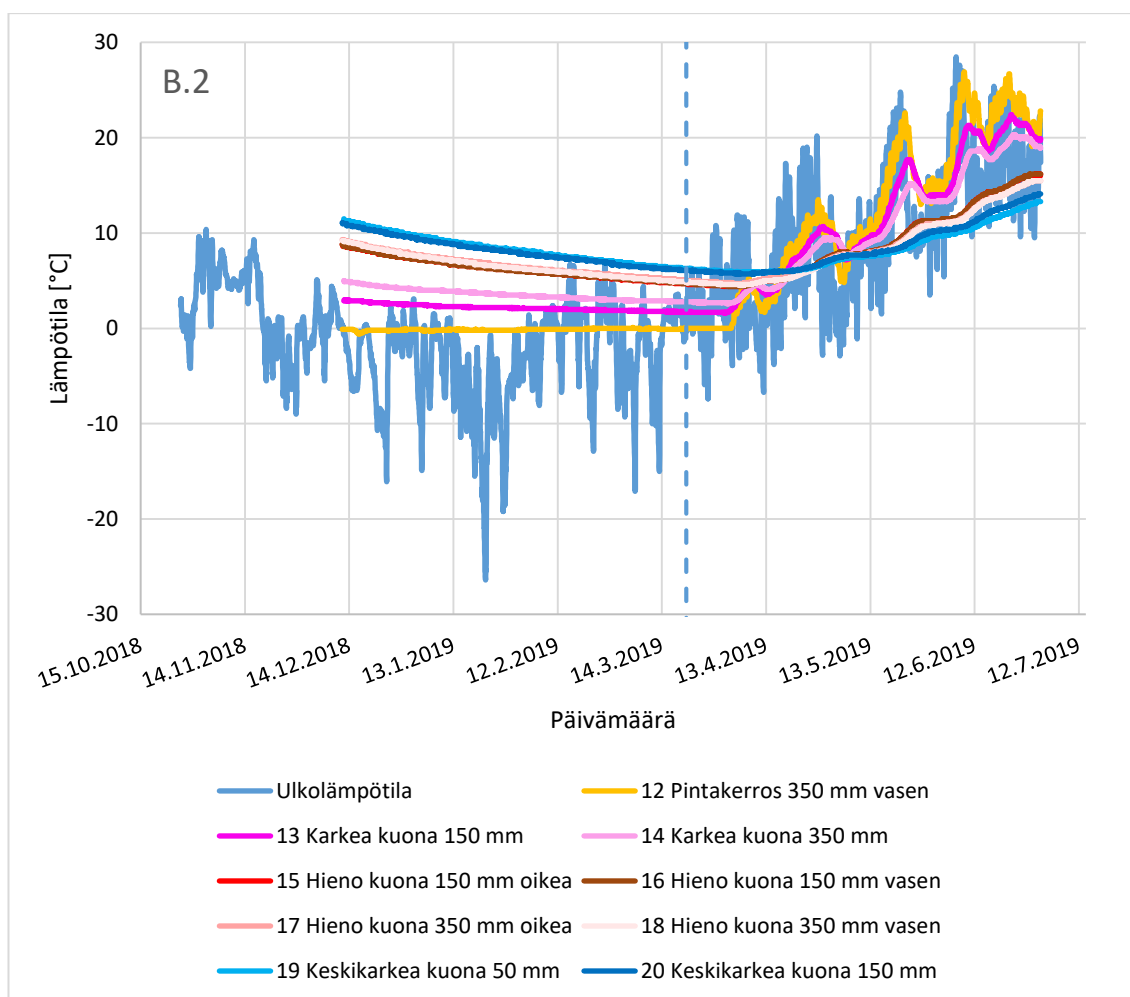
aiheuttaisi kuivumista. Kuonabentoniitin päällä on siis tarpeeksi paksut suojaavat rakennekerrokset talven 2018-2019 pakkasmäärälle. Maankosteusmittaustulokset vahvistavat kosteuden säilymisen rakenteessa seuranta-aikana (kuva 82).

Taulukko 23. Koerakenteiden A.1 ja A.2 lämpötila-antureiden mittaustulokset antureittain ajalta 26.10.2018-30.6.2019.

Lämpötila [°C]					
	1 Kasvu-kerros 50 mm	2 Kasvu-kerros 150 mm	3 Pinta-kerros 50 mm	4 Pinta-kerros 250 mm	5 Pinta-kerros 450 mm
Maksimi	25,6	21,7	19,9	17,9	17
Minimi	-2,7	-0,6	0,5	0,9	1,1
Keskiarvo	5,0	5,0	5,2	5,3	5,4
Hajonta	7,1	6,4	5,9	5,3	4,9
	6 Pinta-kerros 650 mm	7 Tiivis- tyskerros 50 mm	8 Tiivis- tyskerros 150 mm	9 Tiivis- tyskerros 250 mm	10 Tiivis- tyskerros 350 mm
Maksimi	16	15	14,4	13,8	13,5
Minimi	1,5	2,3	2,5	3	3,4
Keskiarvo	5,5	6,7	6,9	7,1	7,3
Hajonta	4,4	3,7	3,5	3,4	3,2

Lämpötilan kehittyminen koerakenteessa B.2 lämpötila-antureiden mittaustulosten perusteella 12.12.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 77. Pintakerroksessa on vain yksi toimiva anturi 350 mm:n syvyydellä, koska anturi 11 rikkoontui, kun rakenteen pintakerros jouduttiin avaamaan korjausten takia. Anturia ei vaihdettu. Anturit 13 ja 14 ovat kuivatuskerroksessa, joka on tehty karkeasta jätteenpolton kuonasta 12/35 mm:ä. Anturit 15-18 ovat jätteenpolton kuonafraktiosta 0/5 mm:ä tehdyssä kapillaarisessa eristeessä. Anturit 19 ja 20 ovat keskikarkeasta kuonasta 5/12 mm:ä tehdyssä kapillaarikatkossa.

Vain pintakerroksessa 350 mm:n syvyydellä olevalla anturilla on mitattu alle nollan asteen lämpötiloja. Pintakerroksessa olevan anturin mittaustulosten perusteella lämpötila oli alle nollan asteen siitä lähtien, kun mittausdataa on ollut saatavilla (12.12.2018) jatkuen 21.3.2019 asti. Päivä, jona lämpötila nousi yli nollan asteen, on merkitty kuvaan 77 katkoviivalla. Lämpötila oli alle nollan asteen anturin 12 mittausdatan mukaan yhteensä 88 päivää.



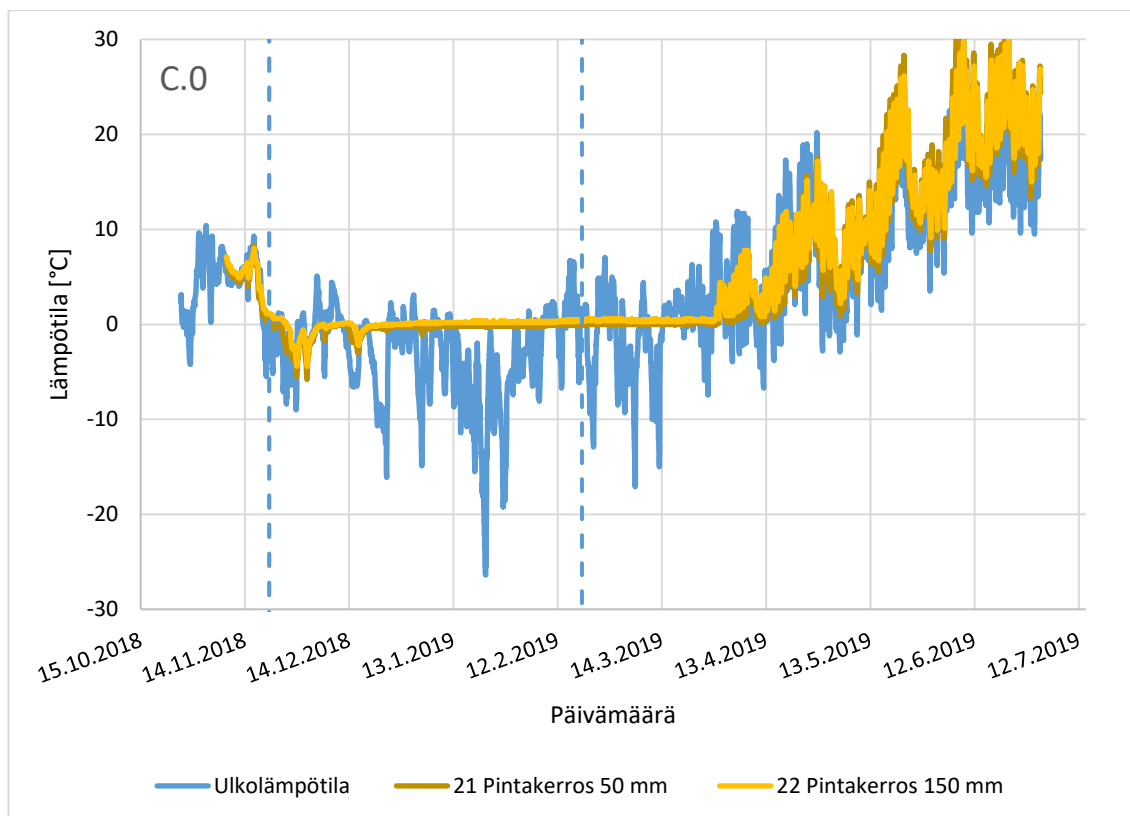
Kuva 77. Koerakenteen B.2 (kapillaarisulkurakenne) lämpötila-antureiden mittaus-tulokset ajalta 12.12.2018-30.6.2019.

Koerakenteen B.2 lämpötilatulosten maksimi-, minimi- ja keskiarvo sekä hajonta seuraanta-ajalta on esitetty taulukossa 24. Kuten koerakenteessa A.1, koerakenteessa B.2 ylimmät rakennekerrokset seuraavat herkimmin ulkolämpötilää. Helsinki-moreenista tehdyn pintakerroksen ja karkeasta jätteenpolton kuonasta rakennetun kuivatuskerroksen lämpötilakuvaajat ovat samanmuotoisia, mutta kuivatuskerroksessa lämpötila on talvella korkeampi ja kesällä viileämpi. Lämpötila on laskenut alle nollan asteen vain pintakerroksessa, jossa alin lämpötila oli -0,6 astetta. Lämpötilamittausten perusteella koerakenteeseen rakennettu 0,5 m:n paksuinen pintakerros Helsinki-moreenista on riittävä suojaamaan alempia rakennekerroksia jäätymiseltä. Mitä suurempi etäisyys lämpötila-anturista on rakenteen pintaan, sitä loivapiirteisemmin lämpötilakuvaajassa ilmenevät ulkolämpötilan muutokset.

Taulukko 24. Koerakenteen B.2 lämpötila-antureiden mittaustulokset ajalta 12.12.2018-30.6.2019.

Lämpötila [°C]					
Anturin tunnus	12 Pinta-kerros 350 mm vasen	13 Karkea kuona 150 mm	14 Karkea kuona 350 mm	15 Hieno kuona 150 mm oikea	16 Hieno kuona 150 mm vasen
Maksimi	26,9	22,4	20,3	16,2	16,2
Minimi	-0,6	1,6	2,6	4,4	4,4
Keskiarvo	6,0	6,7	7,1	7,6	7,6
Hajonta	8,4	6,6	5,4	3,1	3,1
Anturin tunnus	17 Hieno kuona 350 mm oikea	18 Hieno kuona 350 mm vasen	19 Keskikarkea kuona 50 mm	20 Keskikarkea kuona 150 mm	
Maksimi	15,5	15,5	13,3	14,1	
Minimi	4,7	4,5	5,8	5,7	
Keskiarvo	7,7	7,6	8,3	8,3	
Hajonta	2,8	2,8	1,9	2,1	

Lämpötilan kehittyminen koerakenteessa C.0 lämpötila-antureiden mittaustulosten perusteella 8.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 78. Anturit 21 ja 22 on asennettu Helsinki-moreenista tehtyyn rakennekerrokseen kahdelle eri syvyydelle. Molemmilla antureilla on saatu alle nollan asteen lämpötiloja. Lämpötila oli 50 mm:n syvyydellä alle nolla astetta 21.11.2018-19.2.2019. Tämä aikaväli on merkitty kuvaan 78 katkoviivalla. Lämpötila laski alle nollan myös 7.-9.3.2019. Kaikkiaan lämpötila oli alle nollan asteen yhteensä 94 päivänä seurantajakson aikana. Alin mitattu lämpötila oli -5,8 astetta. Alemmalla anturilla 150 mm:n syvyydellä mitattiin alle nollan asteen lämpötiloja 26.11.-10.12. ja 14.-26.12.2018 eli yhteensä 28 päivänä.



Kuva 78. Koerakenteen C.0 (Helsinki-moreeni -kerros) lämpötila-antureiden mitaustulokset ajalta 8.11.2018-30.6.2019.

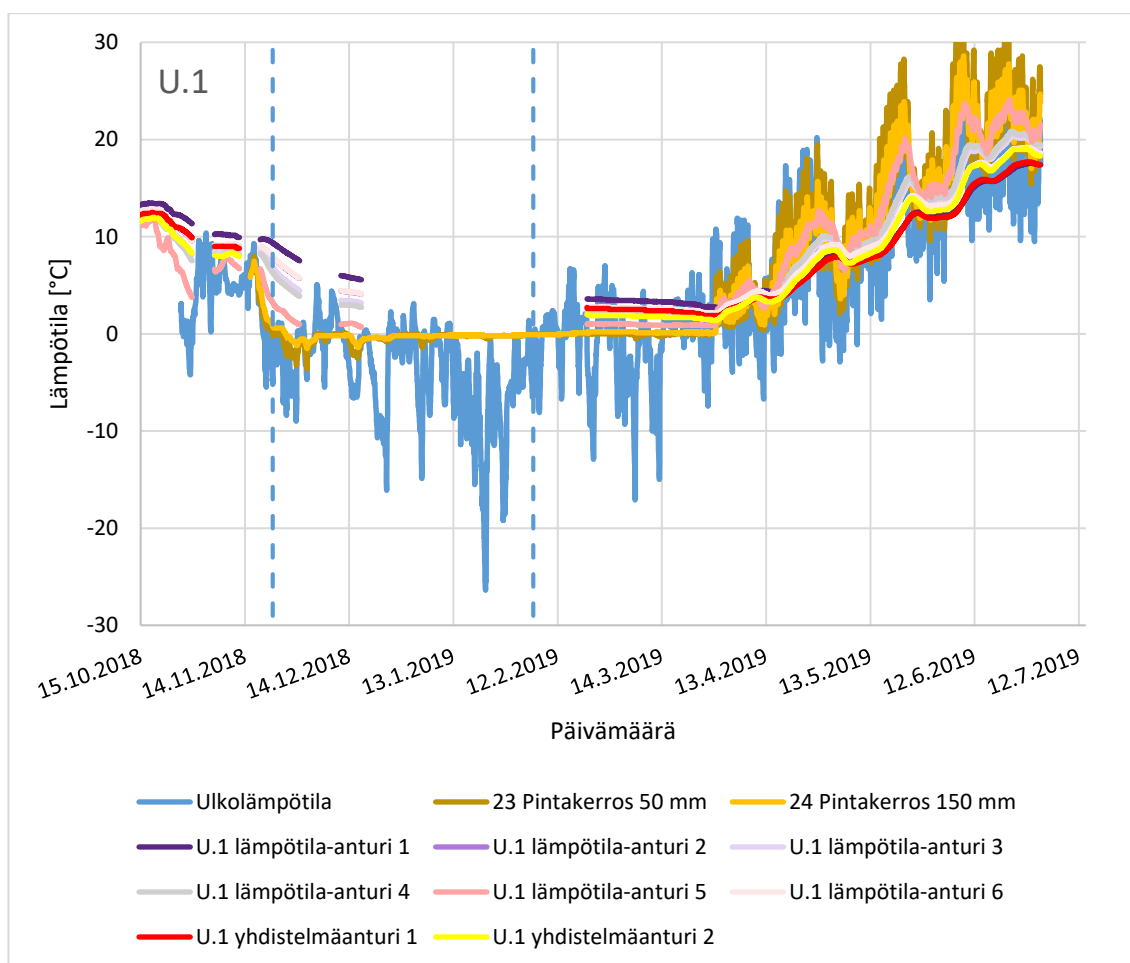
Koerakenteen C.0 lämpötilatulosten maksimi-, minimi- ja keskiarvo sekä hajonta seuranta-ajalta on esitetty taulukossa 25. Odotusten mukaisesti koerakenteessa C.0 lämpötila laski alemmas kuin muista koerakenteissa, koska koerakenteessa ei ollut kasvu- ja pintakerrosta. Helsinki-moreenissa lämpötila on laskenut alemmaksi kuin samalla syvyydellä olevissa antureissa koerakenteen A.1 kasvukerroksessa, jossa vesipitoisuus oli korkeampi ja todennäköisesti tapahtuu lämpöä tuottavia hajoamisprosesseja. Koerakenteessa C.0 50 mm:n syvyydellä lämpötila nousi yli nollan astetta myöhemmin kuin koerakenteen A.1 lietekompostiseoksessa 50 mm:n syvyydellä. Talvikautta lukuun ottamatta Helsinki-moreenissa mitattu lämpötila seurasi hyvin ulkolämpötilaa. Rakennekerroksen lämpötila on noussut lähemmäs nollaa joulukuun puolenvälin jälkeen, mikä todennäköisesti johtuu koerakenteen päälle kinostuneesta paksusta lumipeitteestä.

Taulukko 25. Koerakenteen C.0 lämpötila-antureiden mittaustulokset ajalta 8.11.2018-30.6.2019.

Anturin tunnus	Lämpötila [°C]	
	21 Pinta-kerros 50 mm	22 Pinta-kerros 150 mm
Maksimi	32,1	30,1
Minimi	-5,8	-4,4
Keskiarvo	5,0	5,4
Hajonta	8,1	7,8

Lämpötilan kehittyminen koerakenteessa U.1 lämpötila-antureiden mittaustulosten perusteella 15.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 79. Pintakerroksessa on kaksi anturia 23 ja 24. Muut anturit ovat TTY:n toimittamia ja urakoitsijan asentamia. Niiden tarkasta sijainnista ei ole tietoa. TTY toimitti rakenteeseen kaksi yhdistelmäanturia ja kuusi lämpötila-anturia. TTY:n toimittamilla antureilla oli akun toimintahäiriöstä johtuen pidempi mittauskatkos 17.12.2018-20.2.2019 (yhdistelmäantureilla jo 12.11. alkaen) ja useampi lyhyempi katkos talven aikana.

Mittausdatan perusteella vain pintakerroksessa lämpötila on laskenut alle nollan asteen. Lämpötila oli 50 mm:n syvyydellä alle nollan asteen 22.11.-9.12.2018, 13.12.2018-5.2.2019 ja 4.-9.3., 12.-16.3. sekä 27.3.2019. Päivämäärät 22.11.2018 ja 5.2.2019 on merkitty kuviin katkoviivoilla. Lämpötila oli alle nollan 50 mm:n syvyydellä yhteensä 84 päivänä. Lämpötila oli alle nollan asteen 150 mm:n syvyydellä 25.11.2018-12.2.2019 eli yhteensä 80 päivänä.



Kuva 79. Koerakenteen U.1 (bitumikuonarakenne) lämpötila-antureiden mittaustulokset ajalta 15.11.2018-30.6.2019.

Koerakenteen U.1 pintakerrokseen asennettujen antureiden 23 ja 24 lämpötilatulosten maksimi-, minimi- ja keskiarvo sekä hajonta seuranta-ajalta on esitetty taulukossa 26. Muiden antureiden osalta tuloksia ei ole taulukoitu, koska osassa antureita oli pitkiä mittauskatkoksia, joten arvoja ei voida verrata yhtäjaksoisesti mitattuun mittausaineistoon. Koska osalla koerakenteen U.1 anturilla oli seurantajakson aikana useampia pidempiä mittauskatkoksia, ei lämpötilan kehittymisestä pintakerroksen alapuolella ole täyttä varmuutta. Mittausdatan perusteella ylimmät rakennekerrokset reagoivat ulkolämpötilaan herkemmin kuin alemmat ja ainakin pintakerroksessa lämpötila on laskenut alle nollan asteen. Muihin materiaaleihin verrattuna pintakerroksessa käytetyssä materiaalissa, joka sisältää lietekompostia 10 %:a, jättepitoista maata 60 %:a ja hiekoitushiekkaa 30 %:a, on kesällä mitattu korkeampia lämpötiloja kuin muissa koerakenteissa samalla syvyydellä. Pintakerroksen lämpötila on noussut yli nollan asteen aikaisemmin kuin muissa koerakenteissa.

Taulukko 26. *Koerakenteen U.1 pintakerroksen lämpötila-antureiden mittaustulokset ajalta 15.11.2018-30.6.2019. Taulukossa on esitetty vain antureiden 23 ja 24 tulokset, koska muissa antureissa oli pitkiä mittauskatkoksia, joten arvot eivät ole vertailukelpoisia.*

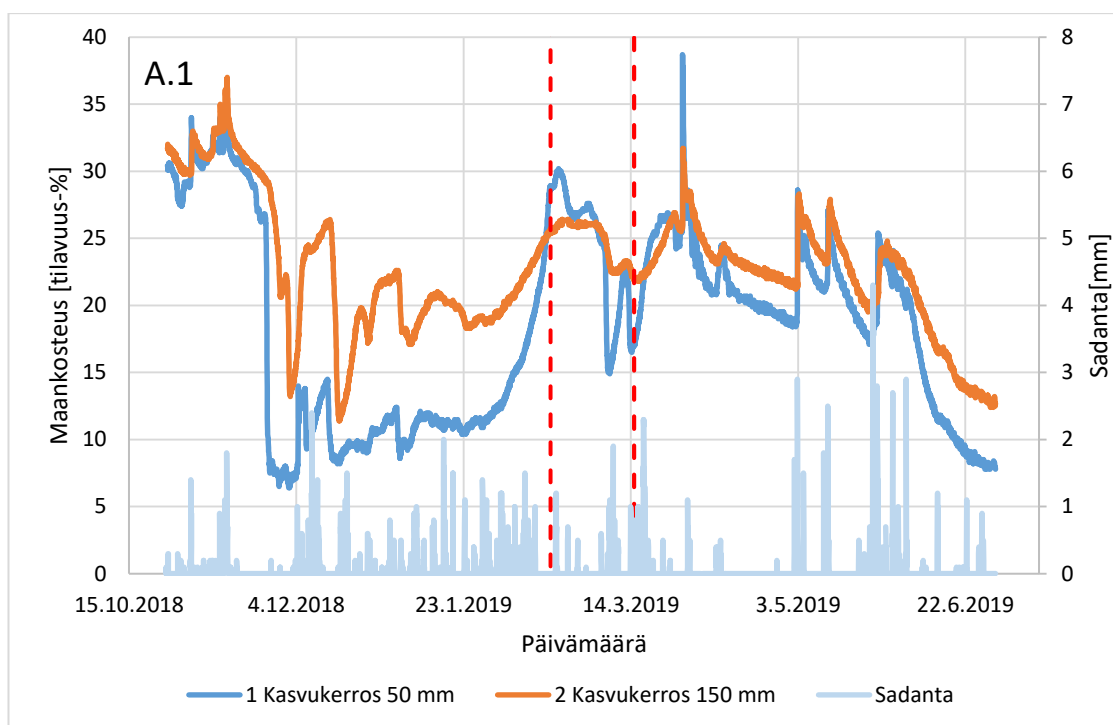
Anturin tunnus	Lämpötila [°C]	
	23 Pinta-kerros 50 mm	24 Pinta-kerros 150 mm
Maksimi	33,1	28,6
Minimi	-3,6	-1,5
Keskiarvo	5,6	5,5
Hajonta	8,6	8,0

9.1.4 Maankosteusmittaukset

Maankosteusmittausten tulokset seuranta-aikana on esitetty kuvissa 80-86. Sadannan vaikutuksen arvioimiseksi kuvissa on esitetty myös sadanta. Maankosteus on ilmoitettu tilavuusprosentteina. Kuvia ei ole esitetty samassa pystymittakaavassa. Rakennekerrokseen asennettuja maankosteusantureita ei ole kalibroitu materiaalikohtaisesti, joten tulosten perusteella voidaan arvioida vain maankosteuden suhteellista muutosta (Kiiरिकki 2019b).

Koerakenteen A.1 kasvukerroksen maankosteuden muutos maankosteusantureiden mittaustiedon perusteella seurantajakson aikana 26.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 80. Maankosteusanturit ovat 50 ja 150 mm:n syvyydellä. Kuvaan on merkitty katkoviivalla ajankohta, jolloin lämpötila nousi yli nollan asteen 50 mm:n syvyydellä. Ensimmäisen kerran lämpötila oli plussan puolella talven aikana 18.2.2019 (ensimmäinen katkoviiva) ja lopullisesti 15.3.2019 (toinen katkoviiva).

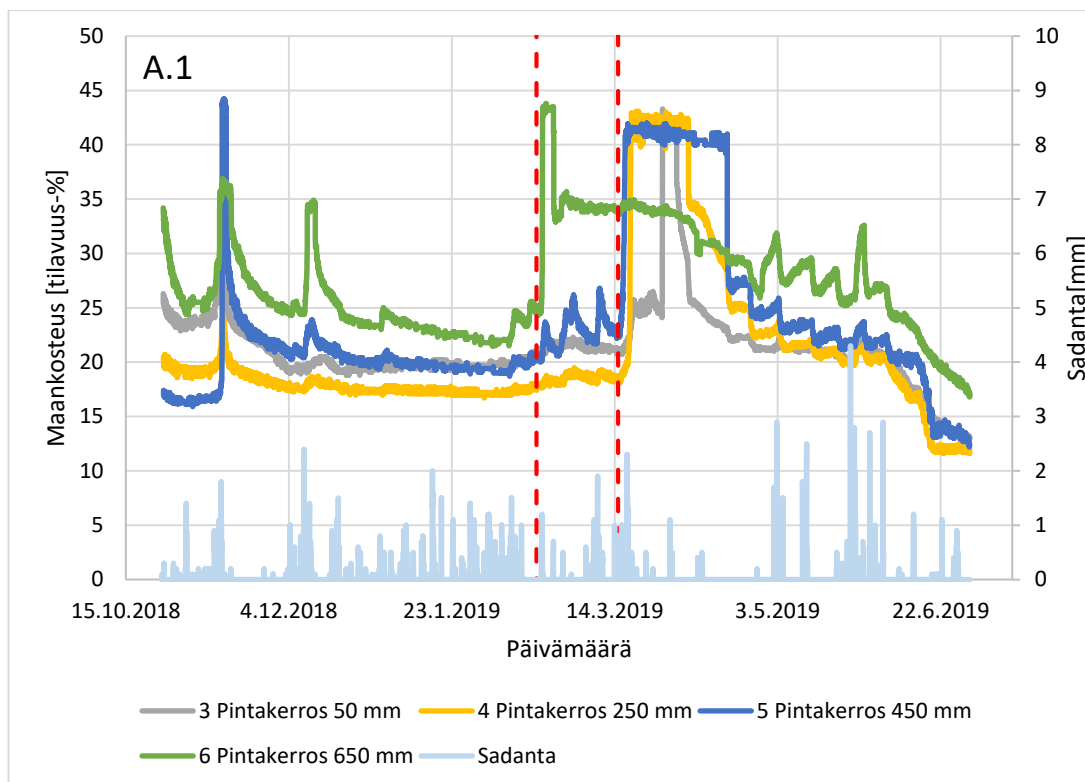
Kosteuspitoisuus on pääsääntöisesti korkeampi syvemmällä koerakenteessa. Talviaikaan etenkin lähellä pintaa, kun lämpötila on rakenteessa alle nollan, veden jäätyminen ilmenee maankosteuden pienemisenä. Maankosteudessa näkyy usein myös piikki sateen jälkeen molemmilla syvyyksillä. Lämpötilan nouseminen nollan asteen yläpuolelle 50 mm:n syvyydellä näkyy myös maankosteudessa.



Kuva 80. Koerakenteen A.1 kasvukerroksen (lietekompostiseos) maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019.

Koerakenteen A.1 pintakerroksen maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 81. Maankosteusanturit ovat 50, 250, 450 ja 650 mm:n syvyydellä. Pintakerroksessa ei ole lämpötilamittausantureiden tulosten perusteella havaittu alle nollan asteen lämpötiloja, mutta kuvaan on merkitty samat päivämäärät kuin kuvassa 80, jolloin kasvukerroksen lämpötila nousi yli nollan asteen. Maankosteuskuvaajat 50, 250 ja 450 mm:n syvyyksiltä ovat suunnilleen samanmuotoisia. Pääsääntöisesti maankosteus kasvaa syvemmillä mentäessä. Korkea tasaisena pysyvä tai vähän ”vähäpätävä” maankosteuden arvo voi kuvata maakerroksen huokostilan kyllästymistä (Kiirikki 2019b).

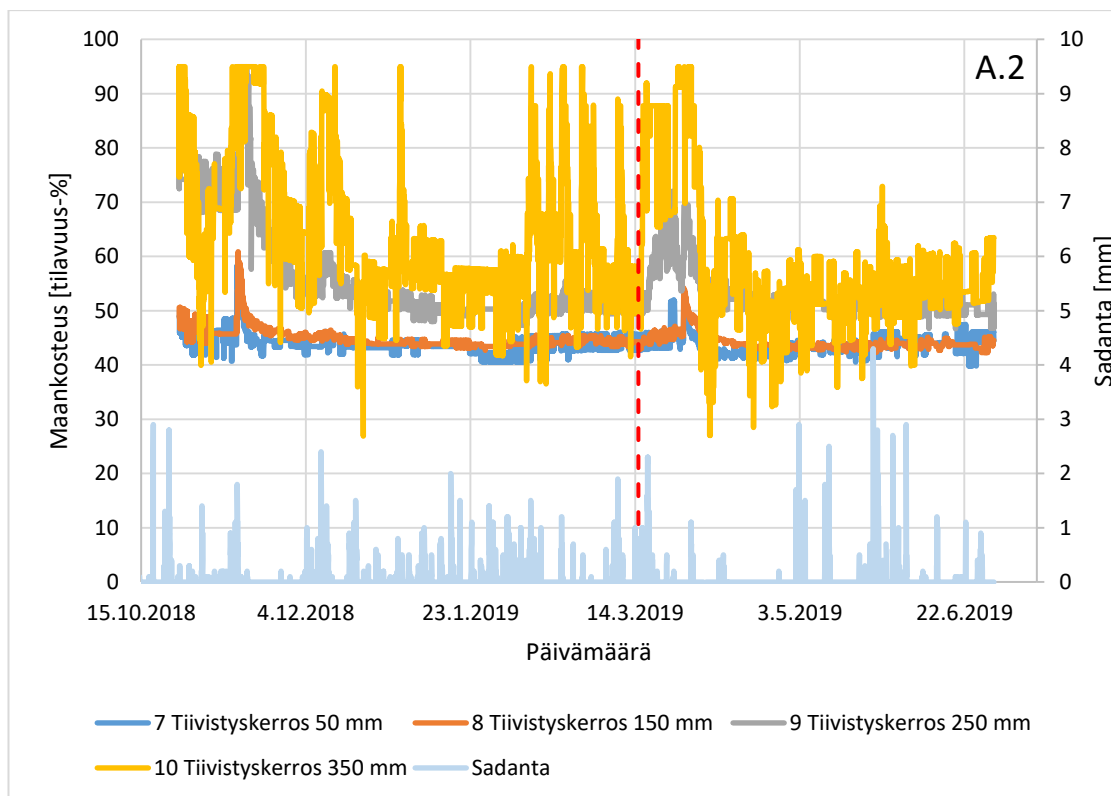
Vaikkei pintakerroksen lämpötila laskenut alle nollan asteen, alhainen lämpötila sai kosteuden sitoutumaan talven aikana, jolloin maankosteustulokset ovat pääsääntöisesti pienempiä. Maankosteuskuvaajissa näkyy usein piikki hieman viiveellä sateesta. Maankosteus on noussut pintakerroksessa samaan aikaan kuin rakenteen kasvukerroksen lämpötila on noussut yli nollan asteen, joten rakenteen kasvukerroksen ”sulaminen” tai mahdollisesti koerakenteen päällä olevan lumen sulaminen näkyy myös pintakerroksen maankosteudessa. Pintakerroksen maankosteustuloksissa on kesällä laskeva trendi.



Kuva 81. Koerakenteen A.1 pintakerroksen (Helsinki-moreeni) maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019.

Koerakenteen A.2 tiivistyskerroksen eli kuonabentoniittikerroksen maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 82. Kuonabentoniitissa on anturit 50, 150, 250 ja 350 mm:n syvyydellä. Tiivistyskerroksessa ei havaittu alle nollan asteen lämpötiloja, mutta kuvaan on merkitty katkoviivalla päivämäärä (15.3.2019), jolloin kasvukerroksen lämpötila nousi lopullisesti yli nollan asteen koerakenteen A.1 mukaan.

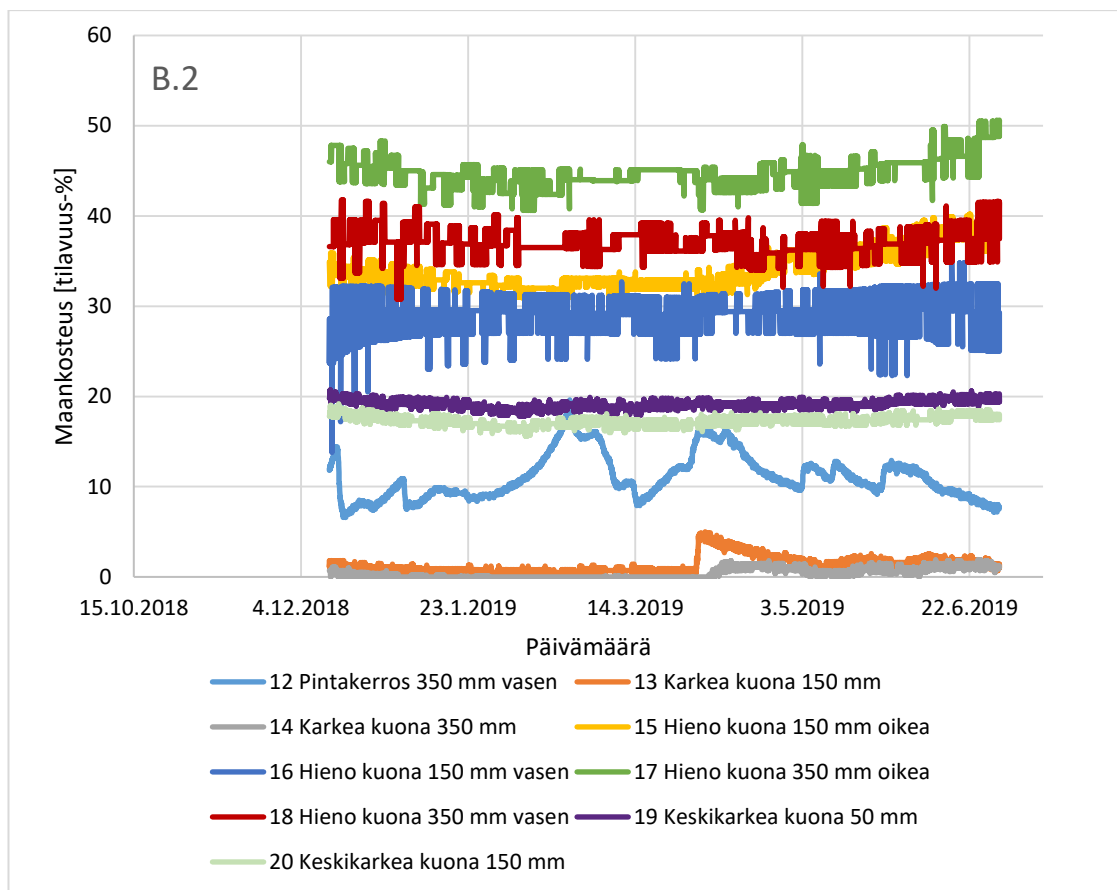
Mittaustulosten perusteella tiivistyskerroksessa 50 ja 150 mm:n syvyydellä maankosteustulokset ovat samaan suuruusluokkaa ja pysyvät melko samalla tasolla koko seurantajakson ajan lukuun ottamatta muutamaa ”piikkiä”. Maankosteus kasvaa syvemällä mentäessä. Kerroksen alimman, 350 mm:n syvyydellä, olevan anturin maankosteustulokset vaihtelevat rajusti. Syynä voi olla hyvin tiivistetyn kerroksen pieni huokostila, joka kylästy pienestä vesimäärän muutoksesta. Tulosten perusteella maakerros on kyllästynyt maankosteuden ollessa noin 95 tilavuusprosenttia (Kiirikki 2019b). Koska tiivistyskerroksen alapuolisen tarkkailukerroksen kaivo A2.4 on usein tulvinut, vesi on voinut padotua ja nousta luiskan alaosaan tiivistyskerroksen alaosaan. Alimman anturin maankosteustulokset vaihtelevat myös talven aikana useita kymmeniä prosentteja. Seurantajakson maankosteusmittausten tulosten perusteella kuonabentoniitin maankosteus on pysynyt lähempänä pintaa lähes vakiona ja syvemällä se on vakiintunut lähes samalle tasolle kevään aikana. Tämän perusteella tiivistyskerros ei kuivu kesän aikana, joten sen päällä on riittävän paksut suojaavat rakennekerrokset.



Kuva 82. Koerakenteen A.2 tiivistyskerroksen (kuonabentoniitti) maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019.

Koerakenteen B.2 (kapillaarisulkurakenne) maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 12.12.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 83. Maankosteusanturit, kuten muutkin anturit, häiriintyvät jätteenpolton kuonan sisältämästä metallista, joka aiheuttaa sirontaa. Tuloksia voidaan kuitenkin vertailla keskenään (Kiirikki 2019b). Pintakerroksessa on yksi anturi 350 mm:n syvyydellä. Kuivatuskerroksessa eli karkeassa jätteenpolton kuonassa anturit ovat 150 ja 350 mm:n syvyydellä. Kapillaarieristeessä eli hienorakeisessa jätteenpolton kuonassa on kaksi rinnakkaista anturia 150 ja 350 mm:n syvyydellä. Kapillaarikatkossa eli keskikarkeassa jätteenpolton kuonassa on anturi 50 ja 150 mm:n syvyydellä.

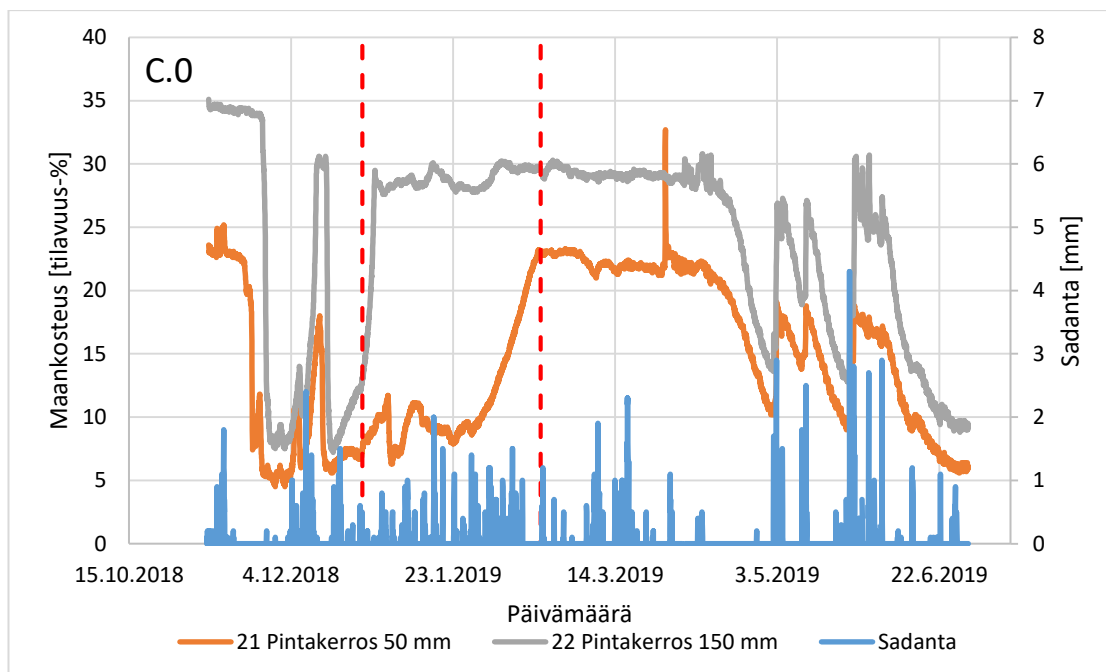
Kuvan 83 perusteella Helsinki-moreenista rakennetussa pintakerroksessa on ollut maankosteuden vaihtelua, joka vastaa muiden koerakenteiden päällimmäisen rakennekerroksen maankosteuden vaihtelua (katso kuva 86). Kuivatuskerroksen eli karkean kuonan ja kapillaarikatkon eli keskikarkean jätteenpolton kuonan maankosteustulokset eivät ole juurikaan vaihdelleet seurantajakson aikana. Kapillaarieristeessä eli hienorakeisessa jätteenpolton kuonassa on myös havaittu maankosteuden vaihtelua mittaustulosten perusteella. Syvemmällä hienorakeisessa jätteenpolton kuonassa on kosteampaa. Samalla syvyydellä, mutta eri puolilla olevissa antureiden mittaustuloksissa, on eroa. Oikealla puolella rakenteessa on kosteampaa kuin vasemmalla. Mittaustulosten perusteella hienorakeisen jätteenpolton kuonan maankosteus on lähtenyt lievään kasvuun.



Kuva 83. Koerakenteen B.2 (kapillaarisulkurakenne) maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 12.12.2018-30.6.2019.

Koerakenteen C.0 (Helsinki-moreeni -kerros) maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 8.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 84. Maankosteusanturit ovat Helsinki-moreenissa 50 ja 150 mm:n syvyydellä. Helsinki-moreeni -kerros saavutti yli nollan asteen lämpötilan 150 mm:n syvyydellä 26.12.2018 (ensimmäinen katkoviiva) ja 50 mm:n syvyydellä 19.2.2019 (toinen katkoviiva).

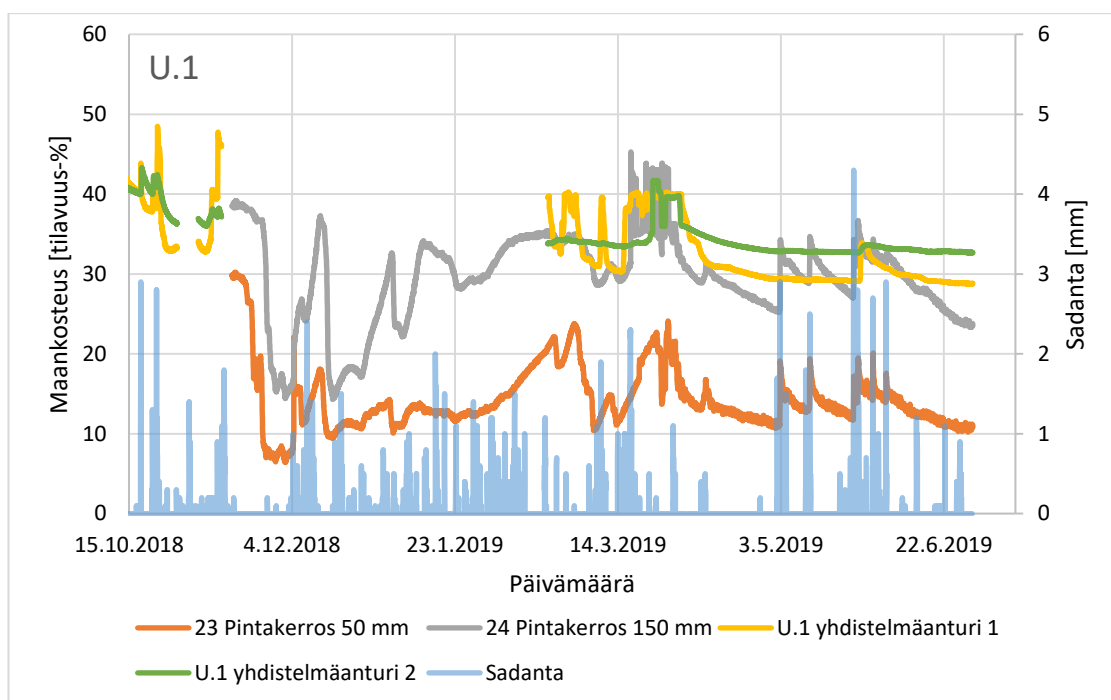
Tulosten perusteella syvemmällä rakenteessa on kosteampaa kuin lähempänä pintaa. Talviaikaan kosteus on sitoutunut, joten kosteus ei näy maankosteusmittauksessa. Syvemmällä maankosteus nousee aikaisemmin talven jälkeen, koska sulassa rakenteessa vesi on vapaata. Molemmilla syvyyksillä maankosteus näyttää nousevan lähes samaan aikaan kuin lämpötila on kyseisellä syvyydellä noussut yli nollan asteen. Maankosteuskäyrässä näkyy usein piikki sateen jälkeen molemmilla syvyyksillä. Sateiden jälkeen maankosteus laskee nopeasti, joten Helsinki-moreeni ei toimi vesivarastona.



Kuva 84. Koerakenteen C.0 (Helsinki-moreeni -kerros) maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 8.11.2018-30.6.2019.

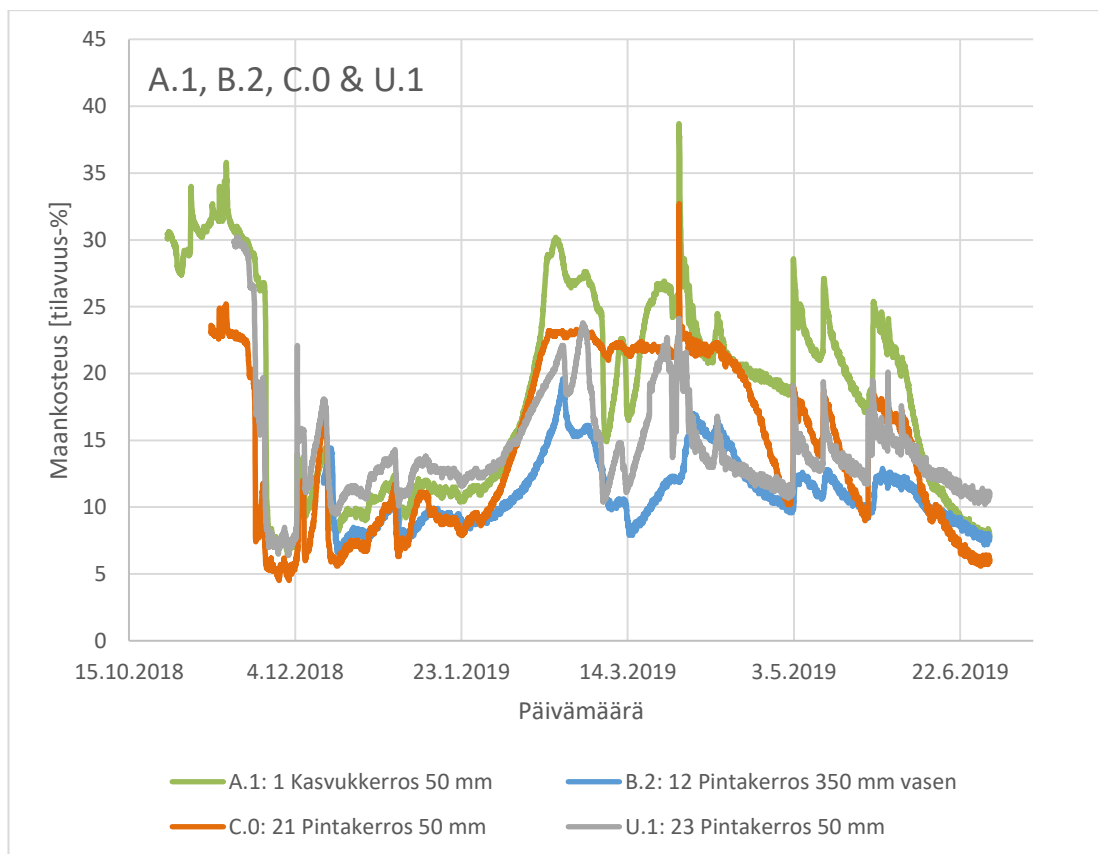
Koerakenteen U.1 maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 15.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 85. Pintakerroksessa on anturit 50 ja 150 mm:n syvyydellä. Kaksi muuta maankosteusanturia oli suunniteltu asennettavaksi bitumikuonaseoksesta rakennettuun tiivistyskerrokseen, mutta urakoitsija ei ole ilmoittanut kyseisten antureiden toteutunutta sijaintia.

Pintakerroksen osalta ylempänä rakenteessa on kuivempaa kuin syvemmillä. Pintakerroksen maankosteuskäyrissä molemmilla syvyyksillä näkyy usein piikki sateen jälkeen. Maankosteuskäyrät ovat samanmuotoiset. Seurantajakson maankosteusmittausten tulosten perusteella bitumikuonan maankosteus on pysynyt lähes vakiona. Tämän perusteella bitumikuonasta tehty tiivistyskerros ei kuivu kesän aikana, joten sen päällä on riittävän paksut suojaavat rakennekerrokset.



Kuva 85. Koerakenteen U.1 (bitumikuonarakenne) maankosteusantureiden mittaustulokset ajalta 15.11.2018-30.6.2019.

Koerakenteiden A.1, B.2, C.0 ja U.1 ylimpänä koerakenteessa sijaitsevien maankosteusantureiden mittaustulokset 30.6.2019 mennessä on esitetty kuvassa 86. Maankosteusantureiden mittaustulosten perusteella maankosteuskäyrät ovat samanmuotoiset lähes koko seurantajakson ajan koerakenteen C.0 kevätkautta lukuun ottomatta. Koerakenteessa C.0 antureiden mittaama maankosteus on pysynyt pidempään samalla tasolla, mikä selittyy koerakenteen päälle kinostuneen lumipeitteen sulamisella. Koska koerakenteen C.0 pinta on korkeustasoltaan alempana muihin koerakenteisiin verrattuna, koekentän päälle on päässyt kerääntymään enemmän lunta kuin muiden koerakenteiden päälle. Pääsääntöisesti maankosteus pienenee ja kasvaa samoihin aikoihin eri koerakenteissa.

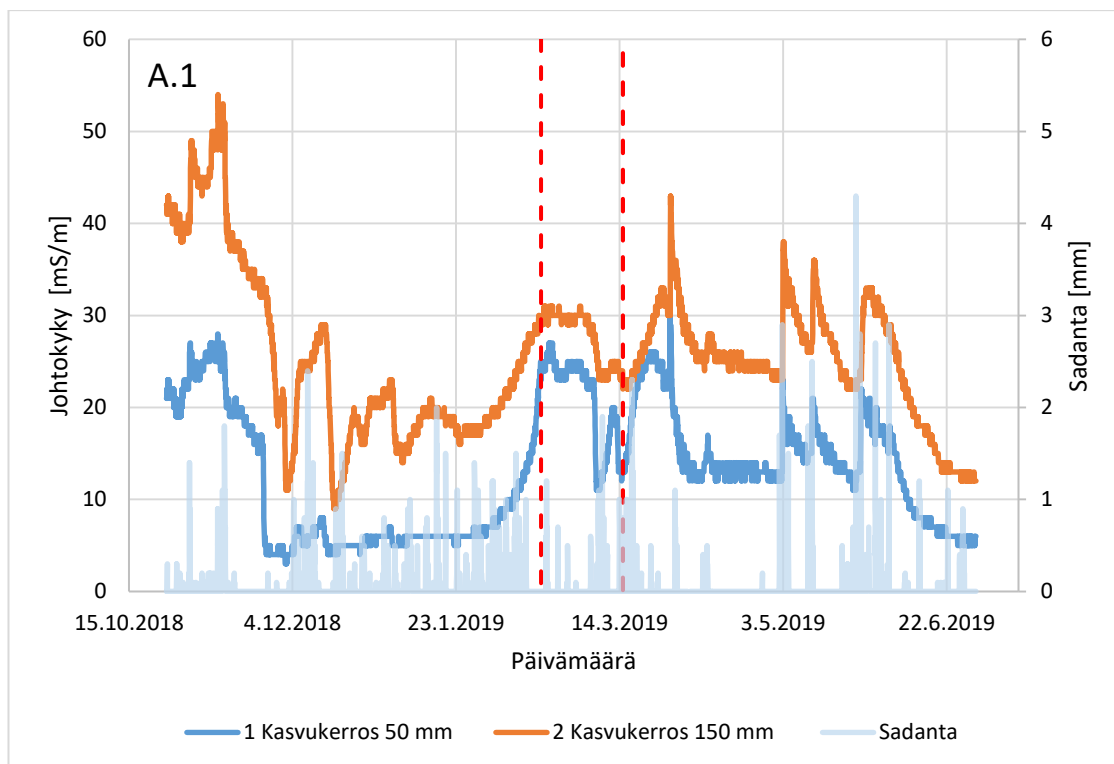


Kuva 86. Koerakenteiden ylimmän rakennekerroksen lähimpänä pintaa olevien maankosteusantureiden mittaustulokset 30.6.2019 mennessä

9.1.5 Johtokykymittaukset

Johtokyvyn kehittyminen koerakenteen A.1 kasvukerroksessa johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella 26.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 87. Johtokykyanturit ovat 50 ja 150 mm:n syvyydellä. Kasvukerroksen lämpötila nousi yli nollan asteen 50 mm:n syvyydellä ensimmäisen kerran talven aikana 18.2.2019 (ensimmäinen katkoviiva) ja lopullisesti 15.3.2019 (toinen katkoviiva).

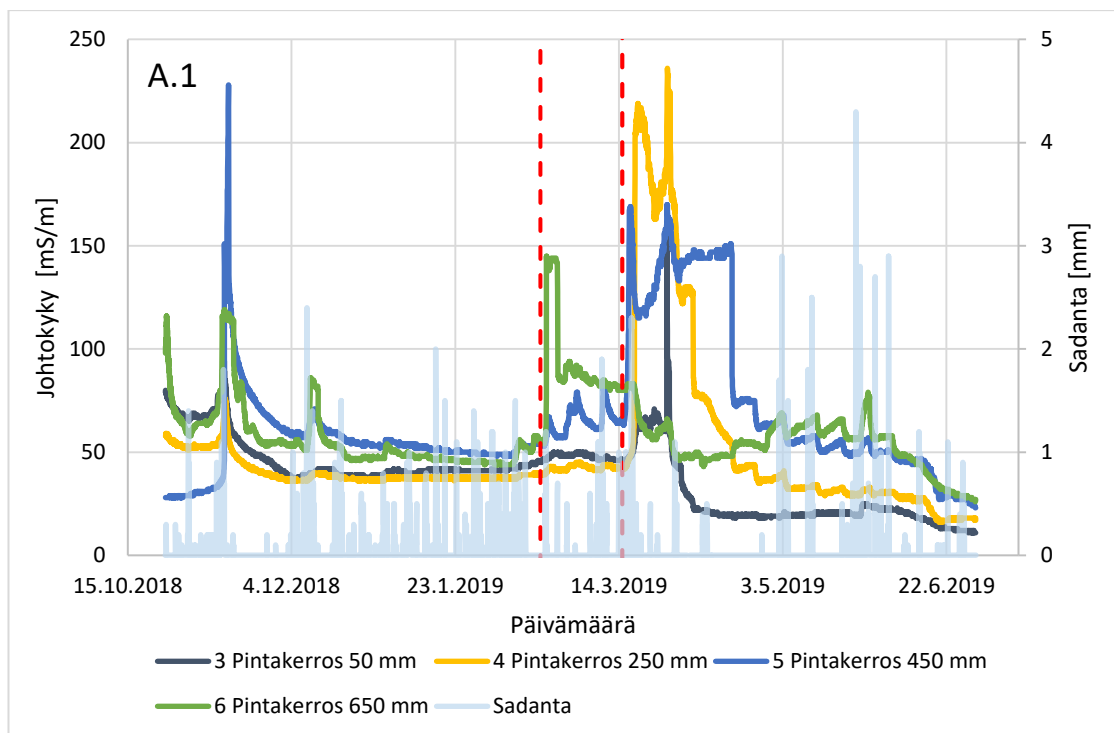
Johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella johtokyky on molemmilla syvyyksillä talviaikaan pienempi ja johtokyky vaikuttaa kasvavan rakenteen ”sulamisen” yhteydessä. Johtokyvyssä näkyy usein piikki sateen aikaan. Kuvan 87 johtokykykäyrät ovat samanmuotoiset kuin samalla syvyydellä maankosteusantureiden mittaustulosten perusteella määritetyt maankosteutta kuvaavat käyrät (katso kuva 80).



Kuva 87. Koerakenteen A.1 kasvukerroksen (lietekompostiseos) johtokykyantureiden mittaustulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019.

Johtokyvyn kehittyminen koerakenteen A.1 pintakerroksessa johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella 26.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 88. Johtokykyanturit ovat 50, 250, 450 ja 650 mm:n syvyydellä. Pintakerroksessa ei mitattu alle nollan asteen lämpötiloja, mutta kuvaan on merkitty samat päivämäärät kuin kuvassa 87, jolloin kasvukerroksen lämpötila nousi yli nollan asteen.

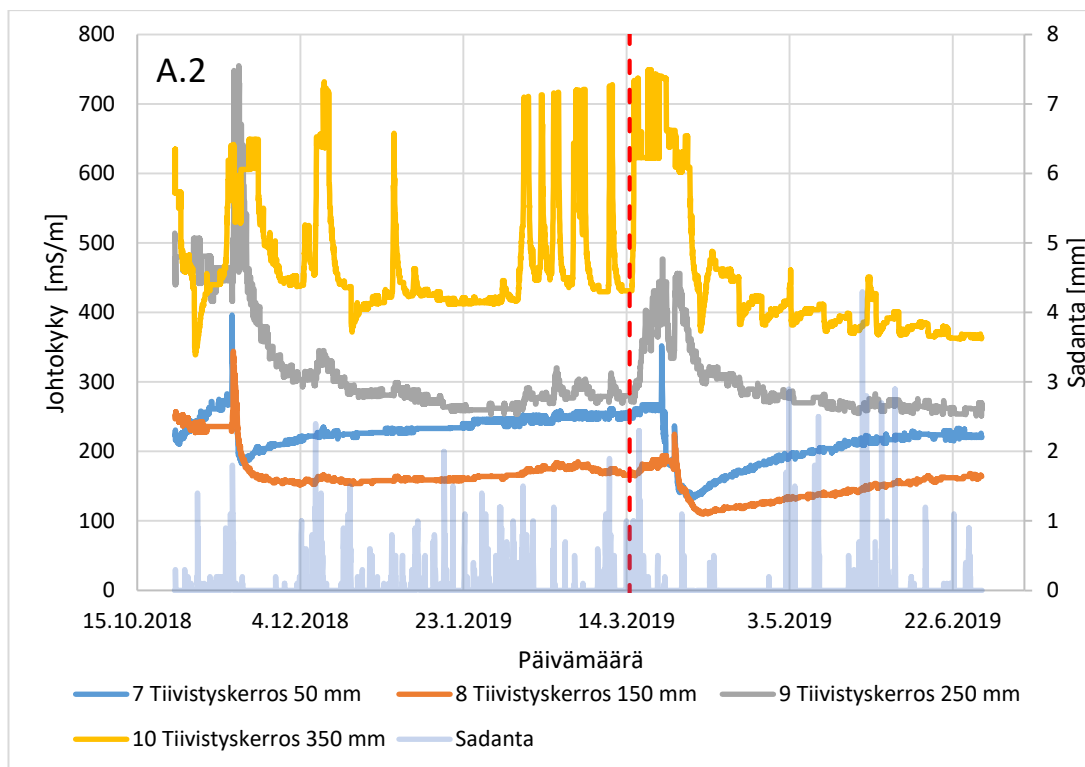
Johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella talvella johtokyky on ollut pienempi ja kasvukerroksen lämpötilan noustessa yli nollan asteen pintakerroksen johtokyvyssä on havaittavissa äkillistä kasvua. Johtokyky on mittaustulosten perusteella myös laskenut melko äkillisesti keväällä. Johtokykyä kuvaavissa käyrissä näkyy usein piikki sateen jälkeen, mutta piikkejä näkyy 50 mm:n syvyydellä vähemmän kuin muilla syvyyksillä. Johtokykymittaustulosten perusteella on havaittavissa laskeva trendi.



Kuva 88. Koerakenteen A.1 pintakerroksen (Helsinki-moreeni) johtokykyantureiden mittaustulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019.

Johtokyvyn kehittyminen koerakenteen A.2 tiivistyskerroksessa eli kuonabentoniitissa johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella 26.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 89. Kuonabentoniitissa on anturit 50, 150, 250 ja 350 mm:n syvyydellä. Tiivistyskerroksessa ei mitattu lämpötila-antureilla alle nollan asteen lämpötiloja, mutta kuvaan on merkitty katkoviivalla päivämäärä (15.3.2019), jolloin kasvukerroksen lämpötila nousi lämpötila-antureiden perusteella lopullisesti yli nollan asteen koerakenteen A.1 mukaan.

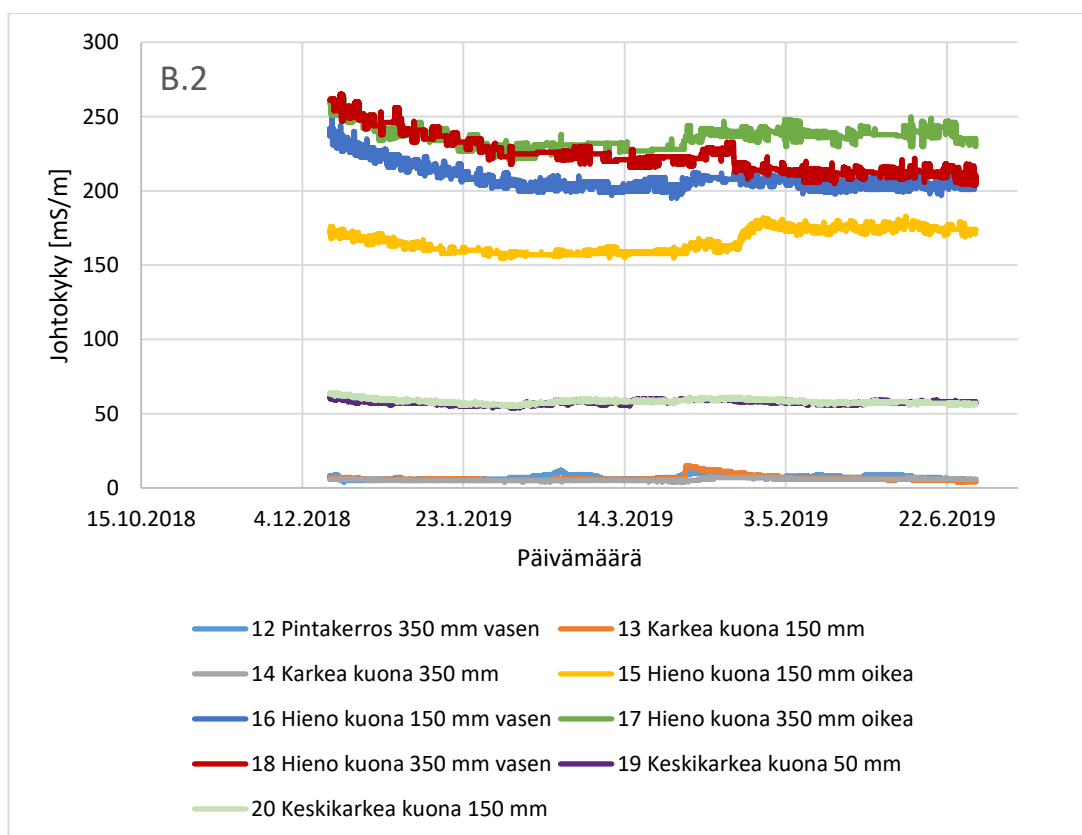
Johtokykykuvaajissa näkyy paikoin piikkejä sateen jälkeen. Kuonabentoniitissa 50 ja 150 mm:n syvyydellä johtokyvyn vaihtelu on mittaustulosten perusteella vähäistä yksittäisiä piikkejä lukuun ottamatta. Etenkin 350 mm:n syvyydellä johtokyvyssä on paikoin rajua heilahtelua. Maaliskuun puolen välin jälkeen jokaisella syvyydellä johtokyvyssä näkyy hetkellinen nousu, joka voi johtua päällä olevien rakennekerrosten ”sulamisesta”. Tiivistyskerroksen johtokykyä kuvaavat käyrät ovat samanmuotoiset kuin samalla syvyydellä maankosteusantureiden mittaustulosten perusteella määritetyt maankosteutta kuvaavat käyrät (katso kuva 82).



Kuva 89. Koerakenteen A.2 tiivistyskerroksen (kuonabentoniitti) johtokykyantureiden mittaustulokset ajalta 26.10.2018-30.6.2019.

Johtokyvyn kehittyminen koerakenteessa B.2 (kapillaarisulkurakenne) johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella 12.12.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 90. Pintakerroksessa on yksi anturi 350 mm:n syvyydellä. Kuivatuskerroksessa eli karkeassa jätteenpolton kuonassa anturit ovat 150 ja 350 mm:n syvyydellä. Kapillaarikerroksessa eli hienorakeisessa jätteenpolton kuonassa on kaksi rinnakkaista anturia 150 ja 350 mm:n syvyydellä. Kapillaarikatkossa eli keskikarkeassa jätteenpolton kuonassa on anturit 50 ja 150 mm:n syvyydellä.

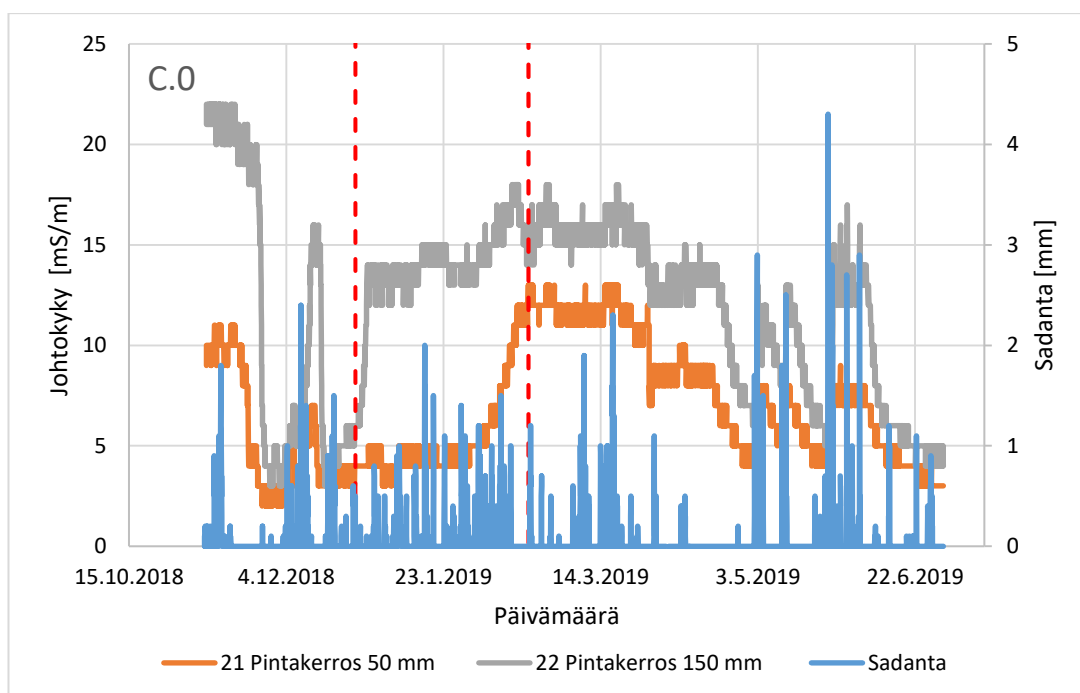
Kuonabentoniittiin verrattuna jätteenpolton kuonassa johtokyky on mittaustulosten perusteella pysynyt koko seurantajakson ajan tasaisena ja vaihtelu on vähäisempää. Hienorakeisen jätteenpolton kuonan johtokyky on aluksi laskenut hiljalleen, mutta rakennekerroksen oikealla puolella antureilla on havaittu johtokyvyn hieman kasvaneen. Vasemmalla puolella johtokyky on laskenut tai pysynyt ennallaan. Karkean jätteenpolton kuonan ja pintakerroksen johtokyvyn mittaustuloksissa kuten maankosteudessa näkyy pieni nousu huhtikuun alun paikkeilla, joka voi johtua pinnalla olevien rakennekerrosten ”sulamisesta”.



Kuva 90. Koerakenteen B.2 (kapillaarisulkurakenne) johtokykyantureiden mittaustulokset ajalta 12.12.2018-30.6.2019.

Johtokyvyn kehittyminen koerakenteessa C.0 (Helsinki-moreeni -kerros) johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella 8.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 91. Anturit ovat Helsinki-moreenissa 50 ja 150 mm:n syvyydellä. Lämpötila-antureiden mittaustulosten perusteella Helsinki-moreeni -kerroksessa lämpötila nousi yli nollan asteen 150 mm:n syvyydellä 26.12.2018 (ensimmäinen katkoviiva) ja 50 mm:n syvyydellä 19.2.2019 (toinen katkoviiva).

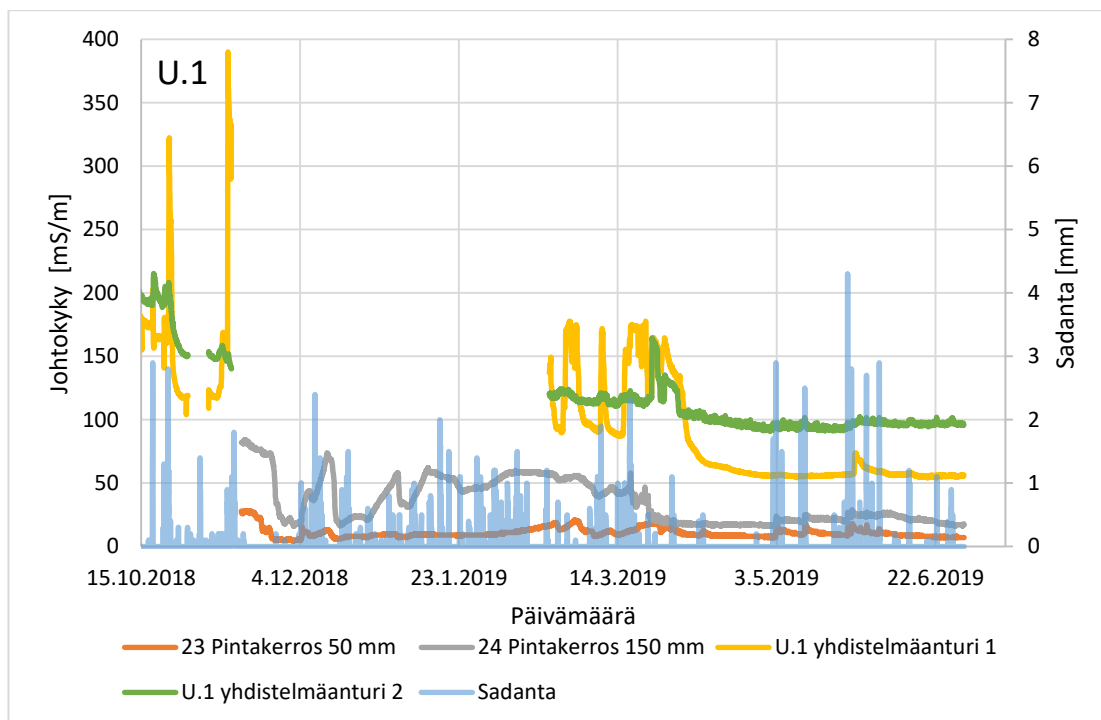
Molemmilla syvyyksillä johtokykykuvaajissa näkyy usein selvät piikit sateen jälkeen. Talven aikana johtokyky on ollut jonkin aikaa matalampi, mutta johtokyky näyttää lähteneen nousuun samoihin aikoihin kuin kyseisellä syvyydellä lämpötila on noussut yli nollan asteen. Johtokykyä kuvaajat käyrät ovat samalaiset maankosteutta kuvaavien käyrien kassa (katso kuva 84).



Kuva 91. Koerakenteen C.0 (Helsinki-moreeni -kerros) johtokykyantureiden mittaustulokset ajalta 8.11.2018-30.6.2019.

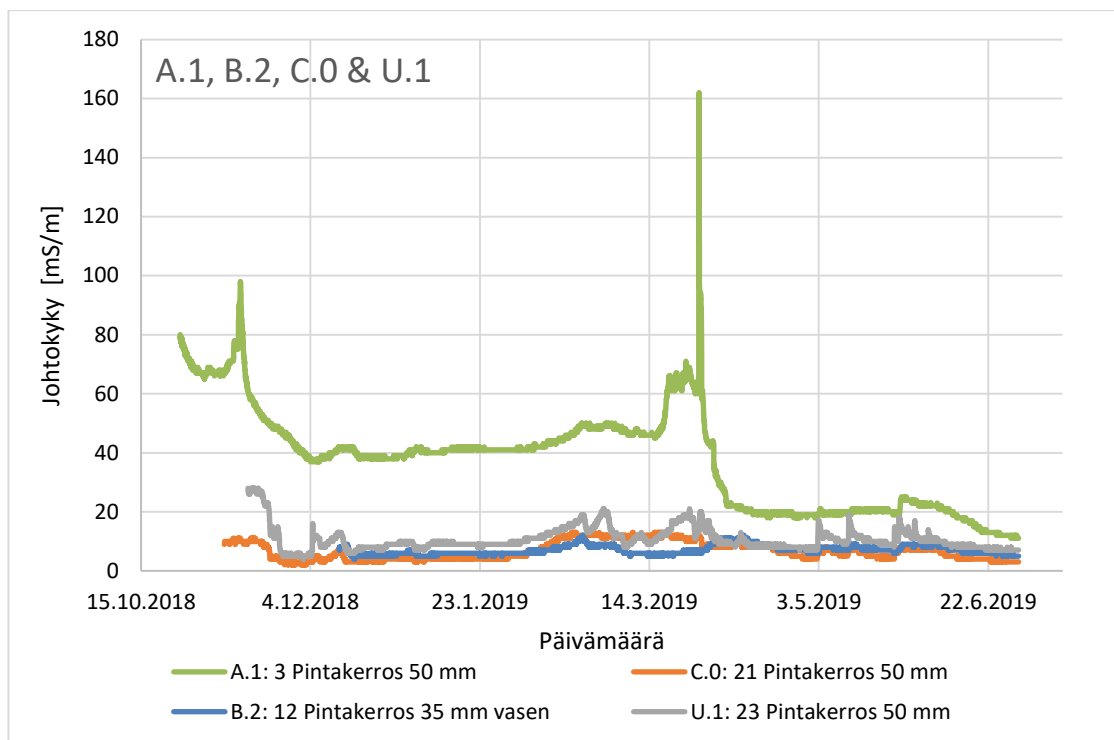
Johtokyvyn kehittyminen koerakenteessa U.1 (bitumikuonarakenne) johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella 15.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 92. Pintakerroksessa on anturit 50 ja 150 mm:n syvyydellä. Kaksi muuta johtokykyanturia on suunniteltu asennettavan bitumikuonaseoksesta rakennettuun tiivistyskerrokseen, mutta urakoitsija ei ole ilmoittanut kyseisten antureiden toteutunutta sijaintia.

Pintakerroksessa johtokykyantureilla on havaittu pientä johtokyvyn nousua usein sateen jälkeen. Johtokykyä kuvaavat käyrät ovat samanmuotoisia maankosteusantureiden tulosten perusteella tehtyjen maankosteuskäyrien kanssa. Huhtikuun alun jälkeen johtokyky on johtokykymittausten perusteella pysynyt lähes samalla tasolla.



Kuva 92. Koerakenteen U.1 (bitumikuonarakenne) johtokykyantureiden mittaustulokset ajalta 15.11.2018-30.6.2019.

Koerakenteiden A.1, B.2, C.0 ja U.1 ylipänä koerakenteessa sijaitsevien johtokykyantureiden mittaustulokset 30.6.2019 mennessä on esitetty kuvassa 93. Johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella johtokykykäyrät ovat samanmuotoiset lähes koko seurantaajan koerakenteissa B.2, C.0 ja U.1. Koerakenteen A.1 pintakerroksessa johtokykyantureilla mitattu johtokyky on korkeampi kuin koerakenteiden B.2 ja C.0 pintakerroksissa, vaikka ne kaikki on valmistettu Helsinki-moreenista. Koerakenteessa A.1 Helsinki-moreenikerroksen päällä on kasvukerros, joka on tehty lietekompostiseoksesta. Kyseisessä kerroksessa mitattu johtokyky on ollut lähes koko ajan alle 50 mS/m. Maaliskuun puolenvälin jälkeen koerakenteen A.1 johtokymittaustuloksissa on huomattava piikki, mutta sen jälkeen koerakenteesta A.1 mitattu johtokyky on lähestynyt muiden koerakenteiden pintakerroksista mitattua johtokykyä. Johtokykyantureiden mittaustulosten perusteella koerakenteen U.1 johtokyky on samaa suuruusluokkaa kuin koerakenteissa B.2 ja C.0, vaikka käytetty materiaali on erilainen. Koerakenteen U.1 johtokykykäyrässä näkyy enemmän ajoittaista pientä vaihtelua koerakenteiden B.2 ja C.0 antureiden mittaustulot verrattuna.



Kuva 93. Koerakenteiden ylimmän rakennekerroksen lähimpänä pintaa olevien johtokykyantureiden mittaustulokset 30.6.2019 mennessä

Kaikissa koerakenteissa antureilla mitattu johtokyky ja maankosteus käyttäytyvät samalla tavalla eli käyrät ovat samanmuotoiset. Johtokyky odotetusti nousee samalla kuin rakenteen vesipitoisuus kasvaa, mikä näkyy maankosteudessa ja johtokyvyssä sateen jälkeisinä piikkeinä. Syvemmillä rakenteessa antureilla havaittu maankosteus oli yleensä korkeampi, mikä näkyi myös korkeampana mitattuna johtokykynä.

Useissa rakenteissa etenkin lähempänä pintaa maankosteus ja johtokyky näyttivät nousevan rakenteen ”sulamisen” yhteydessä eli silloin kuin rakenteessa antureilla havaittu lämpötila nousi yli nollan asteen. Alhaisessa lämpötilassa kosteus sitoutuu, minkä takia talven aikana mitattiin pienempiä johtokyvyn ja maankosteuden arvoja kuin kevään ja kesän aikana. Keväällä rakenteessa on oletetusti myös enemmän vettä, koska koerakenteiden päällä oleva lumi sulaa.

Jätteenpolton kuonafraktiosta 0/5 mm:ä ja siitä valmistetuista kuonaseoksista (kuonabentonitiitti ja bitumikuona) mitattiin korkeimmat johtokyvyn arvot. Lähes kaikissa koerakenteissa antureilla mitattu johtokyky pysyi kevään jälkeen samalla tasolla tai oli laskussa.

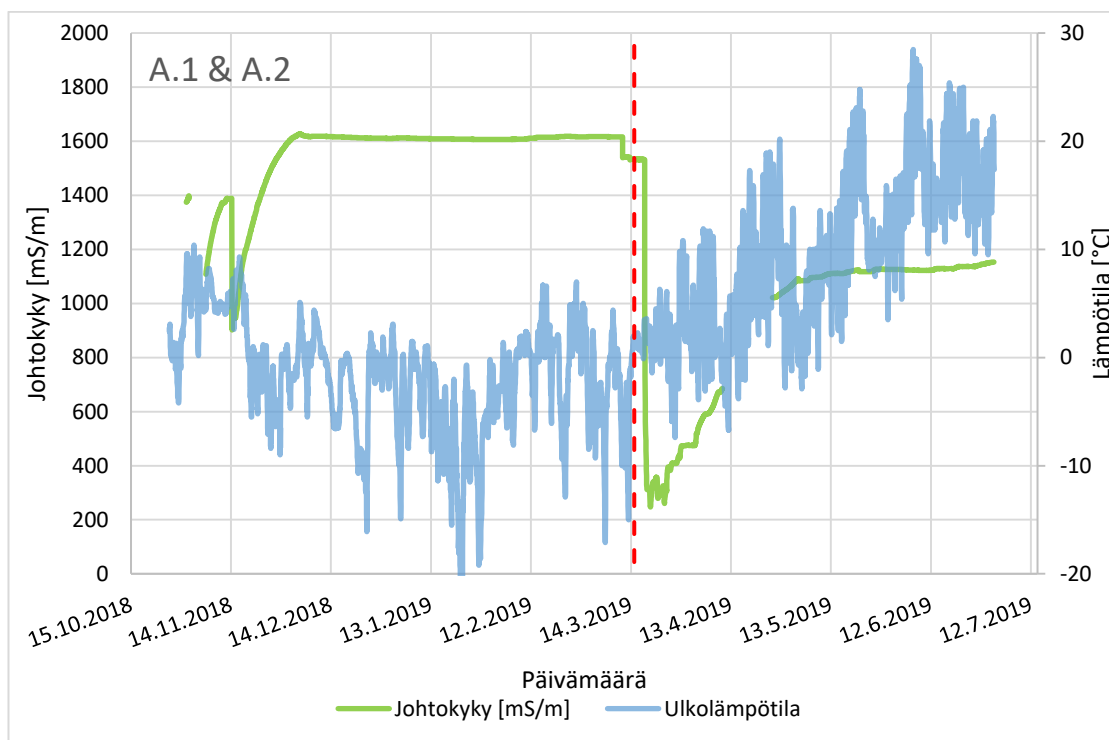
9.2 Vedenlaatutulokset

Vedenlaatua seurattiin muutamassa kaivossa jatkuvalla mittauksella, kenttämittareilla ja ottamalla näytteitä laboratoriomäärityksiä varten. Vesinäytteenoton osalta on nostettu esiin enemmän kentällä tehtyjä in-situ -mittausten tuloksia. Laboratoriokokeiden osalta

on keskitytty vain muutamiin seurattuihin ominaisuuksiin ja aineisiin. Kuvaliitteessä 6 on kuvia näytteenotosta ja kenttämittauksista.

9.2.1 Kaivojen instrumentointi

Koerakenteiden A.1 ja A.2 yhteisestä v-padollisessa mittakaivosta 3, johon purkautuvat kuivatuskerrosten vedet molemmista koerakenteista, mitataan veden lämpötilaa, pH:ta, johtokykyä, veden sameutta ja liuenneen orgaanisen aineen määrää. Anturilla mitattu johtokyvyn kehittyminen seuranta-ajalta 31.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 94. Kuvaan on merkitty katkoviivalla viimeinen päivä, jolloin koerakenteiden kasvukerroksen lämpötila oli alle nolla astetta (15.3.2019). Alussa mitattu johtokyky oli noin 1370 mS/m. Johtokyky on noussut maksimiarvoonsa (noin 1600 mS/m) ulkolämpötilan painuttua pakkasen puolelle ja laskenut nopeasti maaliskuun puolenvälin aikoihin noin 250 mS/m. Mitattu johtokyky nousi noin 1,5 kk:n aikana noin 1150 mS/m paikkeille, jossa se pysyi seurantajakson loppuun asti. Johtokyky näyttää lähteneen kesäkuussa lievään nousuun.



Kuva 94. Koerakenteiden A.1 ja A.2 kuivatuskerrosten yhteisessä mittakaivossa 3 mitattu veden johtokyky sekä ulkolämpötila 31.10.2018-30.6.2019.

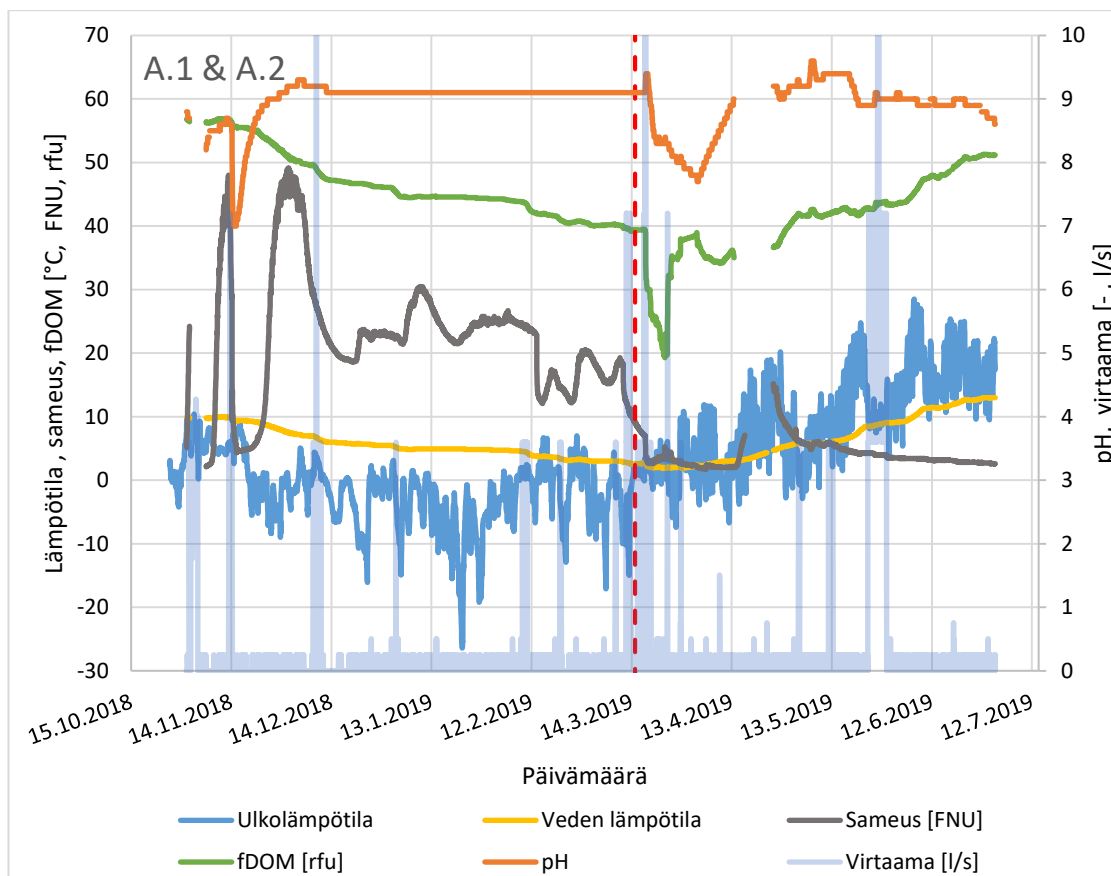
Muiden kaivosta 3 antureilla mitattujen parametrien tulokset seuranta-ajalta 31.10.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 95. Kuvassa on esitetty myös mittakaivosta purkautuva laskennallinen vesimäärä. Laskennallinen vesimäärä sisältää molempien koerakenteiden kasvukerroksista purkautuvat vedet. Kuvan luettavuuden takia laskennallinen virtaama ei mahdu kokonaan kuvaan. Laskennallinen virtaamahuippu oli hieman maaliskuun puolenvälin jälkeen, jolloin laskennallisesti purkautuva vesimäärä oli lähes 30 l/s.

Vedessä olevan orgaanisen aineksen määrää on mitattu fluoresoivan liuenneen orgaanisen aineen määränä (fDOM, Fluorescent Dissolved Organic Matter). Orgaanista ainetta mittaava anturi kalibroitiin uudestaan seurantajakson jälkeen, minkä jälkeen havaittiin, että mitattu arvo on ollut noin 7-16 kertaa liian pieni (Kiirikki 2019b). Todellisuudessa mitattu fDOM:n arvo on ollut seurantajakson aikana 322-360 rfu (keskiarvo noin 350 rfu). Fluoresoivan liuenneen orgaanisen aineen määrä on laskenut hetkellisesti pariksi viikoksi maaliskuun puolenvälin paikkeilla johtokyvyn tavoin. Mitatut arvot ovat todennäköisesti laskeneet nopeasti kasvaneen kaivon purkautuvan vesimäärän takia. Mittaus tulosten perusteella hetkellisen laskun jälkeen fluoresoivan liuenneen orgaanisen aineen määrän trendi on nouseva.

Anturin mittausdatan perusteella kaivossa veden pH oli seurantajakson alussa 8,7 ja parin viikon jälkeen pH laski nopeasti seurantajaksolla mitattuun minimiarvoon 7,0 hetkellisesti. Parissa viikossa pH kasvoi 9:ään. pH oli talvella pitkään 9,1. pH kasvoi 18.3.2019 parissa tunnissa arvoon 9,4:een, minkä jälkeen se pieneni parin viikon aikana 7,7:ään. Nopea pH:n lasku johtuneen kaivon purkautuneen laskennallisen vesimäärän nopeasta kasvamisesta. Veden pH-arvo nousi alle kahdessa viikossa noin 9:ään, minkä jälkeen pH:n arvo on heilahdellut 9:n molemmilla puolilla. Veden pH:n maksimiarvo 9,6 saavutettiin toukokuun alkupuolella.

Mitatussa sameudessa on ollut ennen maaliskuun puoltaväliä muihin kaivoissa mitattuihin parametreihin verrattuna eniten hajontaa. Joulukuun puolenvälin jälkeen vaihtelu ei ole ollut yhtä suurta kuin sitä ennen. Maaliskuun puolenvälin jälkeen mitattu sameuden arvon on laskenut. Sameuden arvo vaikuttaa vakiintuneen huhtikuun lopun jälkeen, jonka jälkeen on havaittavissa loivasti laskeva trendi.

Seurantajakson alussa 31.10.2018 kaivossa olevan veden lämpötila oli lämpötila-anturin perusteella hieman alle 10 astetta. Vesi oli kylmimmillään 1,9 astetta maaliskuun lopulla. Seurantajakson lopussa 30.6.2019 veden lämpötila oli 13 astetta ulkolämpötilan ollessa jo yli 20 astetta.



Kuva 95. Koerakenteiden A.1 ja A.2 yhteisen mittakaivon 3 (kasvukerros) antureiden mittaama veden lämpötila, pH, sameus ja liuennneen orgaanisen aineksen määrä seuranta-aikana 31.10.2018-30.6.2019 sekä kaivoon purkautuva laskennallinen vesimäärä ja ulkolämpötila.

Koerakenteiden A.1 ja A.2 yhteisessä mittakaivossa 3 oli instrumentoinnin perusteella korkea johtokyky ja pH seurantajakson aikana. Koska vedet tulevat molempien koerakenteiden kuivatuskerroksista, pitäisi kaivoon kertyneen veden olla peräisin pelkästään lietekompostiseoksen (kasvukerros) ja Helsinki-moreenin (pintakerros) läpi suotaantuneesta vedestä. Laboratoriossa tehtyjen testien mukaan lietekompostiseoksesta ja Helsinki-moreenista määritetty pH ja johtokyky ovat selvästi alempia kuin kuivatuskerroksen kaivoon kertyneiden vesien pH ja johtokyky. Helsinki-moreenin pH oli laboratoriokokeiden mukaan 7,8-8,6 ja johtokyky noin 18-24 mS/m. Lietekompostiseoksen pH oli 6,4-6,8 ja johtokyky 117-147 mS/m laboratoriokokeiden perusteella (katso taulukko 18).

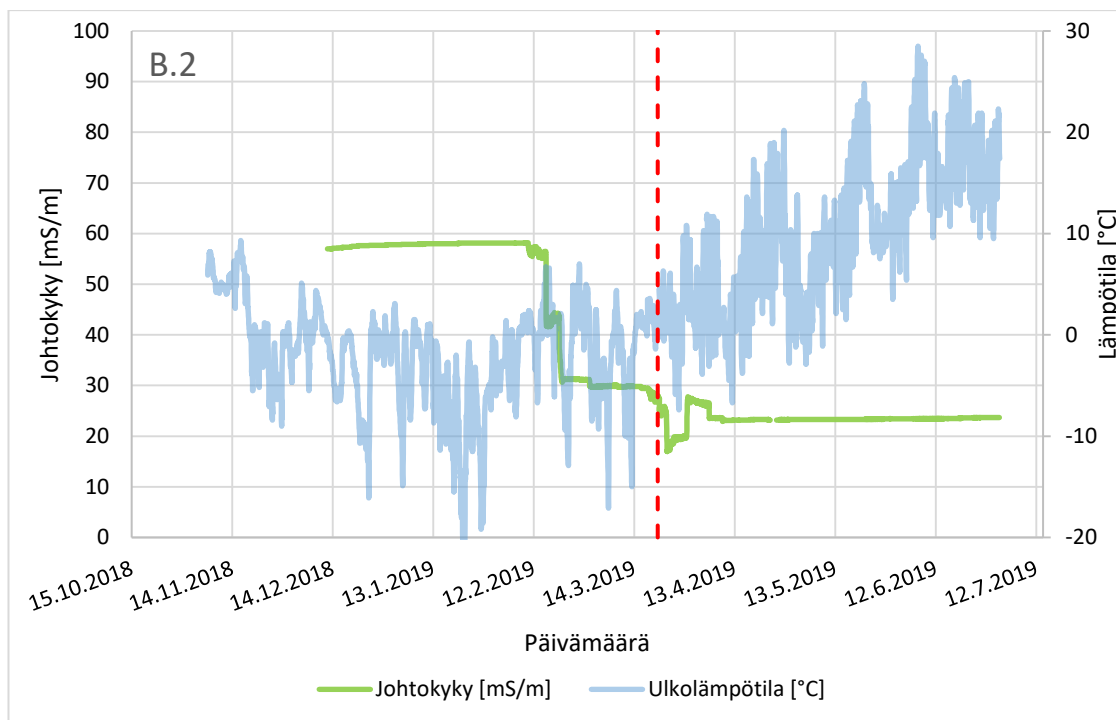
Kaivoista otettujen vesinäytteiden perusteella kaivon A2.5 eli koerakenteen A.2 pintakerroksesta tulevan veden pH (keskiarvo 10,4) on huomattavasti korkeampi kuin kaivossa A1.4 eli koerakenteen A.1 pintakerroksesta tulevan veden pH (keskiarvo 6,9). Kaivossa A2.5 sähkönjohtavuuden keskiarvo (1185 mS/m) on myös moninkertainen kaivoon A1.5 (312 mS/m) verrattuna.

Vesinäytteenoton perusteella koerakenteen A.2 puolelta tulee kaivoon 3 vettä, jossa on korkeampi pH ja johtokyky kuin koerakenteessa A.1. Tulosten perusteella on syytä

epäillä, että putket tulevat eri rakennekerroksesta kuin niihin on merkitty tai kaivojen padottaminen on aiheuttanut virheellisiä tuloksia. Oletettavasti kaivossa A2.4 vesi on padottanut niin paljon, että vettä on noussut pintakerrokseen.

Kaivossa 3 sameus ja fluoresoivan liuennon orgaanisen aineen määrä lähtevät laskuun maaliskuun puolen välin jälkeen, koska vesimäärä on lisääntynyt, mikä laimentaa vettä. Lisääntyneen vesimäärän vuoksi pH ja johtokyky lähtevät samaan aikaan hetkelliseen laskuun. Vesi oli ennen talvea välillä hyvinkin sameaa. Seurantajakson jälkeen todettiin, että orgaanisen aineen mittarin skaala on väärä. Lukema on oikeasti noin 10-kertainen (Kiirikki 2019b). Kuvassa esitetty mittausdata on kalibroimatonta mittausdataa. Tämä todennäköisesti johtuu vedessä olevasta fluoresoivasta aineksesta, joka on muuta kuin orgaanista alkuperää. Koska lietekompostiseos sisältää jätevedenpuhdistamolta peräisin olevaa lietettä, se voi sisältää optisia kirkasteita, jotka vaikuttavat mittaukseen. Huhtikuun puolivälissä kaivossa olevaa anturiin oli kertynyt sakkaa ja se huollettiin. Tältä ajalta ei ole dataa tai sitä ei esitetty sen kyseenalaisen luotettavuuden vuoksi.

Koerakenteen B.2 v-padollisessa mittakaivossa B2.3, johon tulevat kuivatuskerroksen vedet, mitataan veden lämpötilaa, pH:ta, johtokykyä ja sameutta. Veden anturilla mitatut johtokykytulokset seuranta-ajalta 12.12.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 96. Kuvaan on merkitty katkoviivalla viimeinen päivä, jolloin koerakenteen pintakerroksen lämpötila oli alle nolla astetta (21.3.2019). Johtokyky pysyi mittaustulosten perusteella mittaustietojen saamisen alusta asti hieman alle 60 mS/m. Johtokyky laski nopeasti helmikuun puolenvälin aikoihin lukemaan noin 30 mS/m, jossa se pysyi maaliskuun viimeiselle viikolle saakka. Tämän jälkeen johtokyky laski hetkellisesti 20 mS/m:n tietämille, josta se kasvoi noin 23 mS/m, jolla tasolla se pysyi seurantajakson loppuun saakka.



Kuva 96. Koerakenteen B.2 mittakaivon B2.3(kuivatuskerros) antureiden mittaama johtokyky ja ulkolämpötila seuranta-aikana 12.12.2018-30.6.2019.

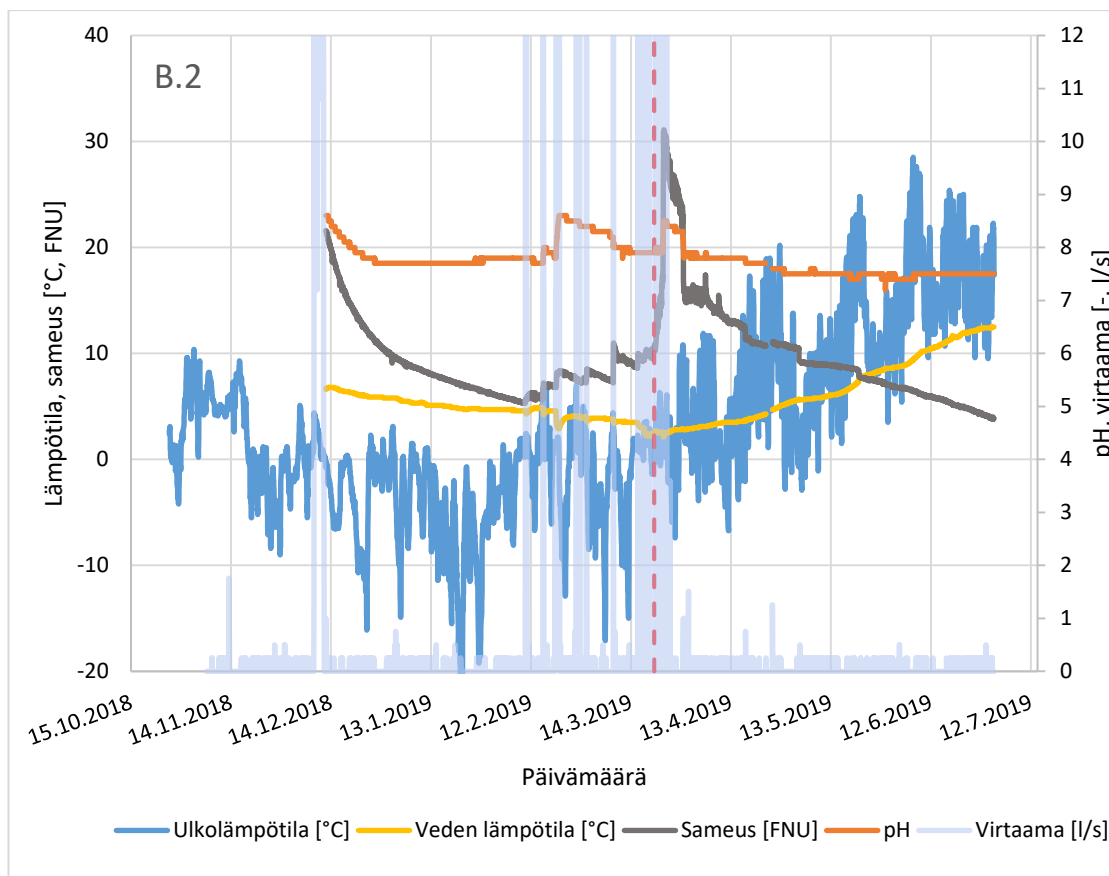
Muiden kaivosta B2.3 (kuivatuskerros) seurantajakson 12.12.2018-30.6.2019 aikana antureilla mitattujen parametrien tulokset on esitetty kuvassa 97. Kuvassa on esitetty myös mittakaivosta B2.3 purkautuva laskennallinen vesimäärä. Kuvan luettavuuden takia laskennallinen virtaama ei mahdu kokonaan kuvaan. Laskennallinen virtaamahuippu oli hieman maaliskuun puolenvälin jälkeen, jolloin purkautuva vesimäärä oli laskennallisesti korkeimmillaan lähes 80 l/s. Toinen huippu osuu joulukuulle.

Kuvaan on merkitty katkoviivalla viimeinen päivä, jolloin koerakenteen pintakerroksen lämpötila oli alle nolla astetta (21.3.2019).

Tarkkailujakson alussa pH oli 8,6. pH pysyi talvella hieman alle 8:ssa, mutta kasvoi tilapäisesti noin 8,5:een helmikuun ja maaliskuun loppupuolella. Maaliskuun lopussa pH laski hieman 8 alapuolelle. pH vakiintui kesän aikana noin 7,5:een.

Mittausdatan perusteella veden sameus laski seurantajakson alusta (yli 20 FNU) talven aikana alimmillaan noin neljään FNU (Formazine Nephelometric Units, formasiini-nefelometrinen sameusyksikkö). Veden sameus nousi huomattavasti hieman maaliskuun puolenvälin jälkeen, mutta arvo laski nopeasti noin viikon jälkeen ja lähti sitten tasaiseen laskuun.

Veden lämpötila oli mittausdatan mukaan seurantajakson alussa hieman alle seitsemän astetta. Kylmintä vesi oli maaliskuun loppupuolella (2,1 astetta) Seurantajakson lopulla havaittu veden lämpötila oli lähes 13 astetta.

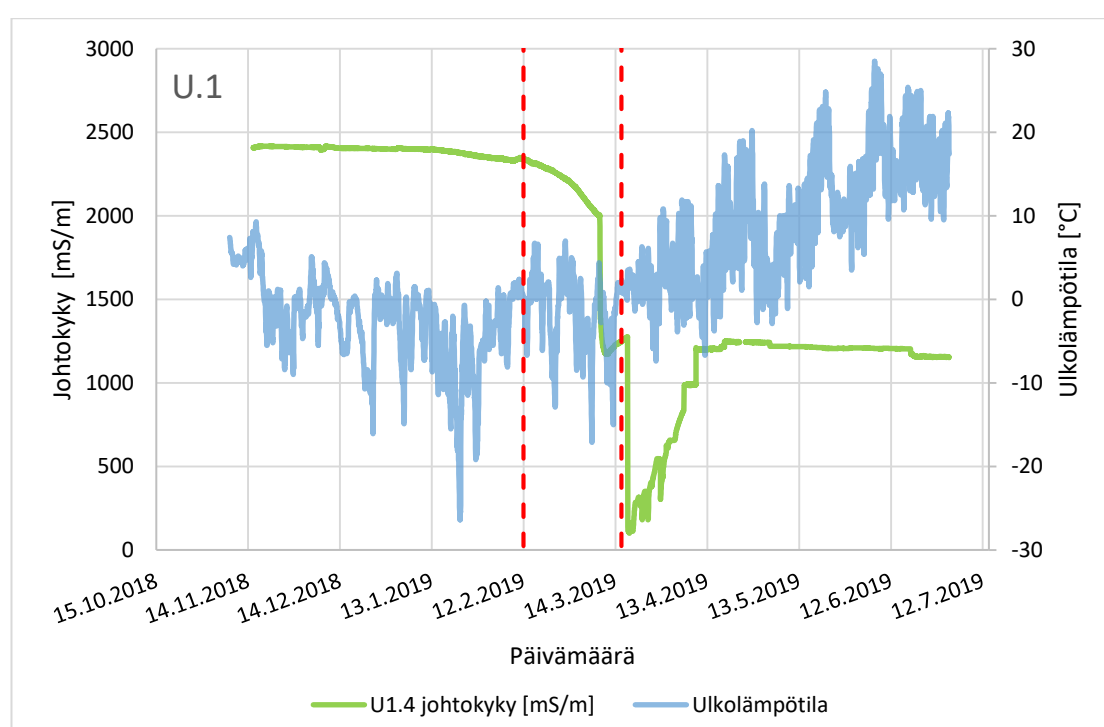


Kuva 97. Koerakenteen B.2 mittakaivosta B2.3 (kuivatuskerros) antureiden mitaama veden lämpötilä, pH ja sameus seuranta-aikana 12.12.2018-30.6.2019 sekä kaivoon purkautuva laskennallinen vesimäärä ja ulkolämpötilä.

Kaivossa B.2.3 veden mitattu sameus ja pH nousevat rakenteen ”sulamisen” jälkeen toisin kuin mittakaivossa 3. Johtokyky laskee myös huomattavasti ennen oletettua ”sulamista”, mikä johtuneee kaivoon tulevan laskennallisen vesimäärän kasvusta, joka alkaa noin helmikuun puolessa välissä ja jatkuu hieman maaliskuun puolenvälin yli. Mitattu johtokyvyn taso laskee väliaikaisesti hieman alemmalle tasolle ”sulamisen” jälkeen, koska kaivoon purkautuva laskennallinen vesimäärä on suurempi kuin helmikuussa. Johtokyvyssä luultavasti näkyy alkuun karkean jätteenpolton kuonan vaikutus. Helsinki-moreenin pH oli laboratoriokokeiden mukaan 7,8-8,6 ja johtokyky noin 18-24 mS/m. Karkean jätteenpolton kuonan johtokyky on noin 170 mS/m ja pH noin 10 laboratoriokokeiden perusteella. Mittakaivoon 3 verrattuna kaivossa B.2.3 mitataan alhaisempi pH ja huomattavasti pienempi johtokyky ottaen huomioon, että koerakenteissa A.1 ja A.2 on B.2 poiketen 200 mm:n paksuinen kasvukerros ja 300 mm:ä paksumpi pintakerros. Pintakerroksen materiaali on sama.

Koerakenteen C.0 v-padollisista mittakaivoista on antureilla mitattu pelkästään virtaamaa.

Koerakenteen U.1 v-padollisessa mittakaivosta U1.4, johon tulevat kuivatuskerroksen vedet, mitataan antureilla veden lämpötilaa, pH:ta, johtokykyä ja sameutta. Veden johtokyky seuranta-aikana 15.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 98. Kuvaan on merkitty katkoviivalla päivä, jolloin koerakenteen pintakerroksen lämpötila 350 mm:n syvyydellä nousi yli nollan asteen (12.2.2019). Toinen katkoviiva on 16.3.2019, jolloin pintakerroksen lämpötila 50 mm:n syvyydellä nousi yli nollan asteen. Anturin mittaustulosten perusteella johtokyky oli seurannan aluksi noin 2400 mS/m ja se laski hitaasti noin kolmen kuukauden aikana noin 100 mS/m. Helmikuun 12. päivänä johtokyky lähti jyrkempään laskuun, kunnes se laski nopeasti 8.3.2019 arvosta 2000 mS/m noin arvoon 1300 mS/m. Johtokyky kasvoi hetkellisesti mutta laski nopeasti uudestaan 18.3., jolloin se pieneni alimmillaan tasolle noin 100 mS/m. Johtokyky nousi vajaan kuukaudessa arvoon 1200 mS/m, jonka jälkeen johtokyky on lähtenyt loivaan laskuun.



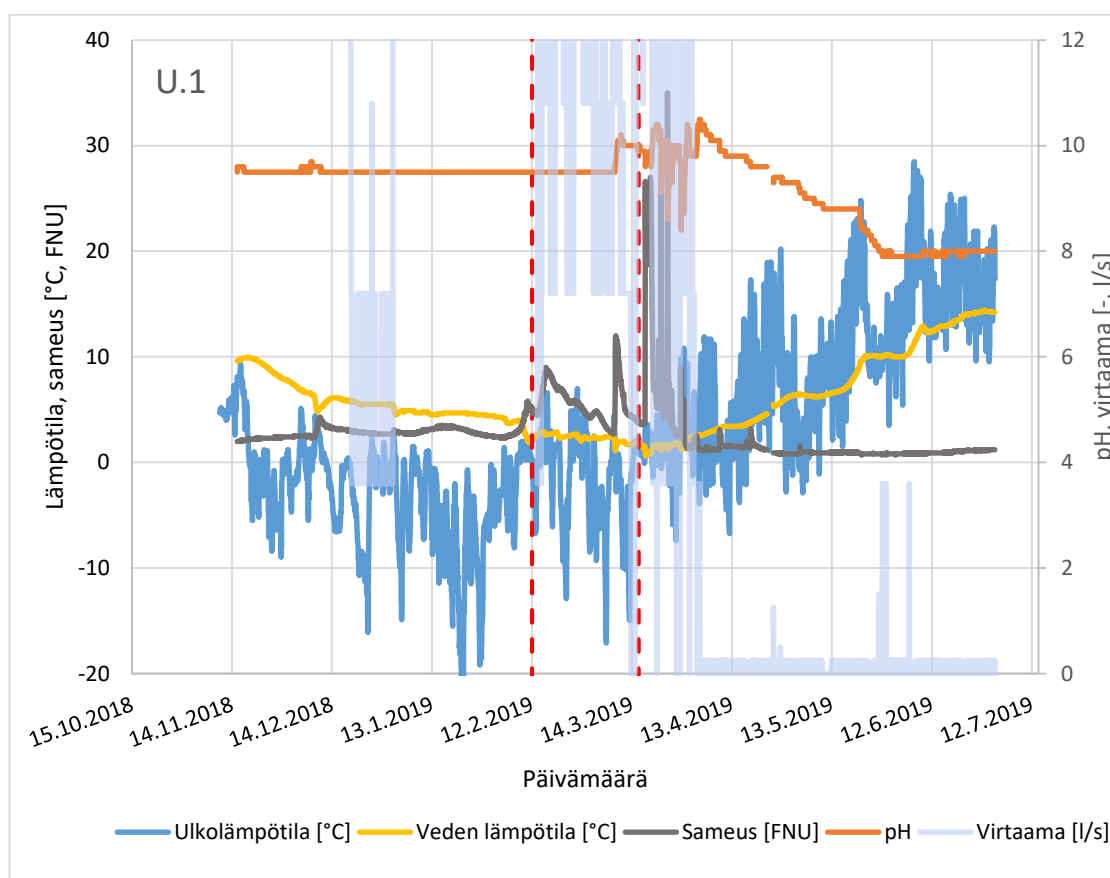
Kuva 98. Koerakenteen U.1 mittakaivon U1.4 (kuivatuskerros) antureiden mittaama johtokyky ja ulkolämpötila seuranta-aikana 15.11.2018-30.6.2019.

Muiden kaivosta U1.4 (kuivatuskerros) antureilla mitattujen parametrien tulokset seuranta-ajalta 15.11.2018-30.6.2019 on esitetty kuvassa 99. Kuvassa on esitetty myös mittakaivosta U1.4 purkautuva laskennallinen vesimäärä. Kuvan luettavuuden takia laskennallinen virtaama ei mahdu kokonaan kuvaan. Laskennallinen kaivoon U.1 purkautuva vesimäärä oli koko talven ajan korkea kaivoihin 3 ja B2.3 verrattuna (usein yli 50 l/s). Laskennallinen purkautuva vesimäärä on ollut suuri samaan aikaan, kun antureilla on havaittu koerakenteen kasvukerroksessa yli nollan asteen lämpötila.

Kuvaan on merkitty katkoviivalla päivä, jolloin koerakenteen pintakerroksen lämpötila 350 mm:n syvyydellä nousi yli nollan asteeseen (12.2.2019). Toinen katkoviiva on 16.3.2019, jolloin pintakerroksen lämpötila 50 mm:n syvyydellä nousi yli nollan asteen.

Mitattu veden pH oli koko talven noin 9,5, mutta se nousi 9.3.2019 yli 10:een. Maaliskuun puolenvälin jälkeen mitattu pH:n arvo heitteli parin viikon ajan 10:n molemmin puolin, minkä jälkeen se lähti tasaiseen laskuun, kunnes se vakiintui noin 8:aan.

Sameus pysyi paria piikkiä lukuun ottamatta noin kolmessa FNU:ssa. 18.3. alkaen sameuden arvo vaihteli noin viikon ajan viiden ja yli 30 FNU:n välillä, kunnes se vakiintui noin yhden FNU:n tasolle.



Kuva 99. Koerakenteen U.1 mittakaivon B1.4 (kuivatuskerros) antureiden mittaama veden lämpötila, pH ja sameus seuranta-aikana 15.11.2018-30.6.2019 sekä kaivon purkautuva laskennallinen vesimäärä ja ulkolämpötila.

B2.3 kaivon tavoin kaivossa U1.4 sameus kasvaa huomattavasti ”sulamisen” aikaan. Myös pH-arvo kasvaa hieman, mutta sen arvo sahaa edestakaisin pian sen jälkeen. Kaivon 3 verrattuna kaivossa U1.4 vesi ei ole ollut ennen sulamista kovinkaan sameaa. Kaivossa U1.4 on korkea pH ja johtokyky, mikä voi johtua tiivistyskerroksessa käytetystä bitumikuonasta. Laboratoriokokeiden perusteella bitumikuonan johtokyky on noin 320 mS/m ja pH 11,2. Kaivon U1.5 padotus on voinut nostaa suolapitoista vettä salaojamat-

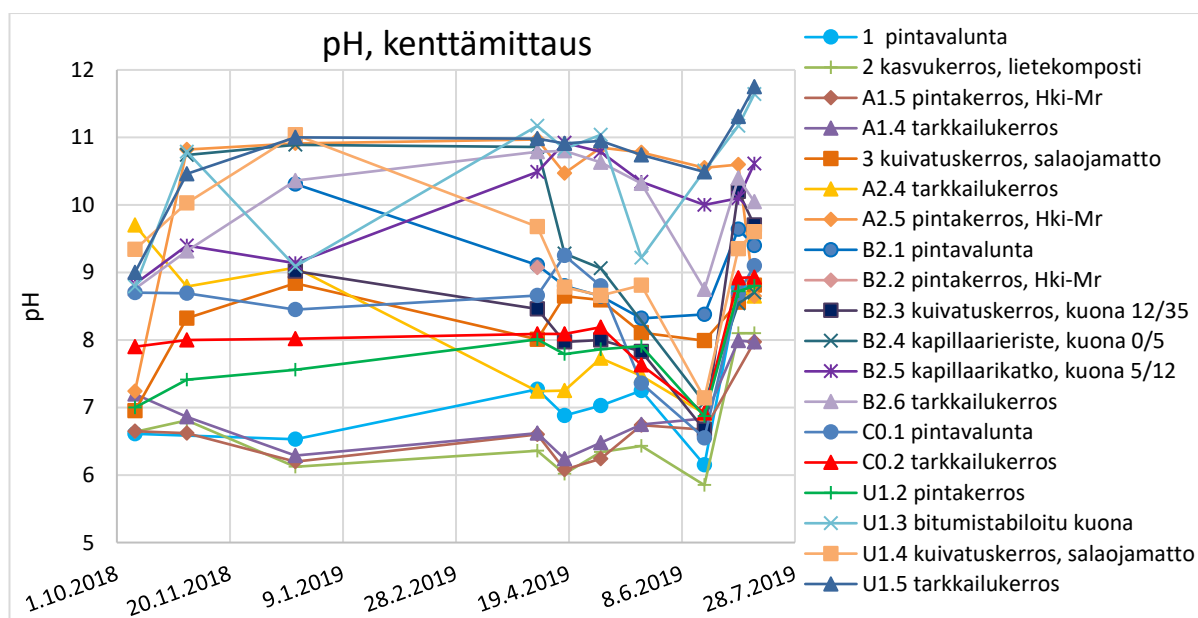
toon. Pintakerroksen materiaalista ei otettu näytettä laboratoriotestejä varten, joten tulosta ei voida verrata laboratoriosta saatuihin arvoihin. Johtokyky näyttää reagoineen rakenteen ”sulamiseen”, koska sen arvo lähti hitaasti pieneneään, kun pintakerroksen alempi osa ylitti nollan asteen lämpötilan ja johtokyky romahti samoihin aikoihin pintakerroksen ylemmän osan saavutettua yli nollan asteen lämpötilan.

Kaikissa kaivoissa oleva vesi on kylmimmillään rakenteen ”sulamisen” aikaan tai hieman sen jälkeen. Vesi on jäähtynyt talven aikana hitaasti veden suhteellisen suuren ominaislämpökapasiteettinsa ansiosta.

9.2.2 Vesinäytteenoton tulokset

Näytteenotto- ja mittaustiheys on vaihdellut. Kaikista kaivoista ei ole otettu laboratoriönäytteitä kaikilla näytteenottokierroksilla eikä kaikista näytteistä ole tehty kaikkia määrittäyksiä. Sulamisajalta ei ole käytettävissä mittatuloksia, minkä vuoksi sen vaikutusta ei voida arvioida. Kenttä- ja laboratoriomittaukset ovat pääsääntöisesti samaa suuruusluokkaa. Tässä työssä tarkastellaan erityisesti pH- ja sähkönjohtavuustuloksia sekä kloridi-, sulfaatti- ja kromipitoisuuksia.

Koerakenteiden mittakaivoihin kertyneestä vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittauksien mittaustulokset on esitetty kuvissa 100-104. Kenttämittauksien mittaustulokset on esitetty kuvioina, joita yhdistää viiva. Laboratoriomittauksien mittaustulokset on esitetty kuvissa ilman mittaustuloksia yhdistävää viivaa. Kuvassa 100 on esitetty kaikki pH:n kenttämittauksien mittaustulokset.



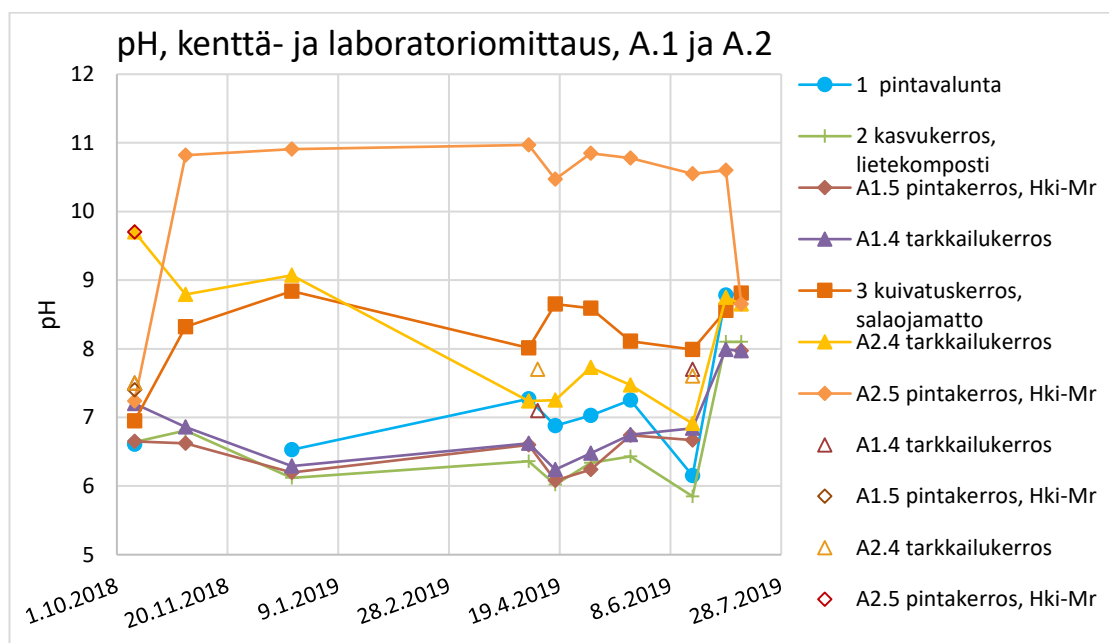
Kuva 100.

Mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen pH:n kenttämittausten mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Koerakenteiden A.1 ja A.2 mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset on esitetty kuvassa 101. Pintavalunnan pH on seurantajakson aikana neutraali (pH 7) tai hieman hapan. Kasvukerroksessa käytetyn lietekompostiseoksen mittakaivon veden pH on muihin verrattuna pienin ja samaa suuruusluokkaa kuin lietekompostiseoksesta laboratoriossa määritetty pH (6,4-6,8).

Molempien koerakenteiden pintakerroksesta purkautuvan veden pH oli seurantajakson alussa mittaustulosten perusteella samaa suuruusluokkaa, noin 7. Koerakenteen A.2 pintakerroksen mittakaivon veden pH nousi nopeasti yli kymmeneen. Koerakenteen A.2 pintakerroksen mittakaivoon purkautuvan veden pH oli lähes koko seuranta-ajan selvästi muita korkeampi. Kesällä 2019 muidenkin koerakenteiden A.1 ja A.2 mittakaivoihin kertyvien vesien pH on päätynyt tasolle 8-9.

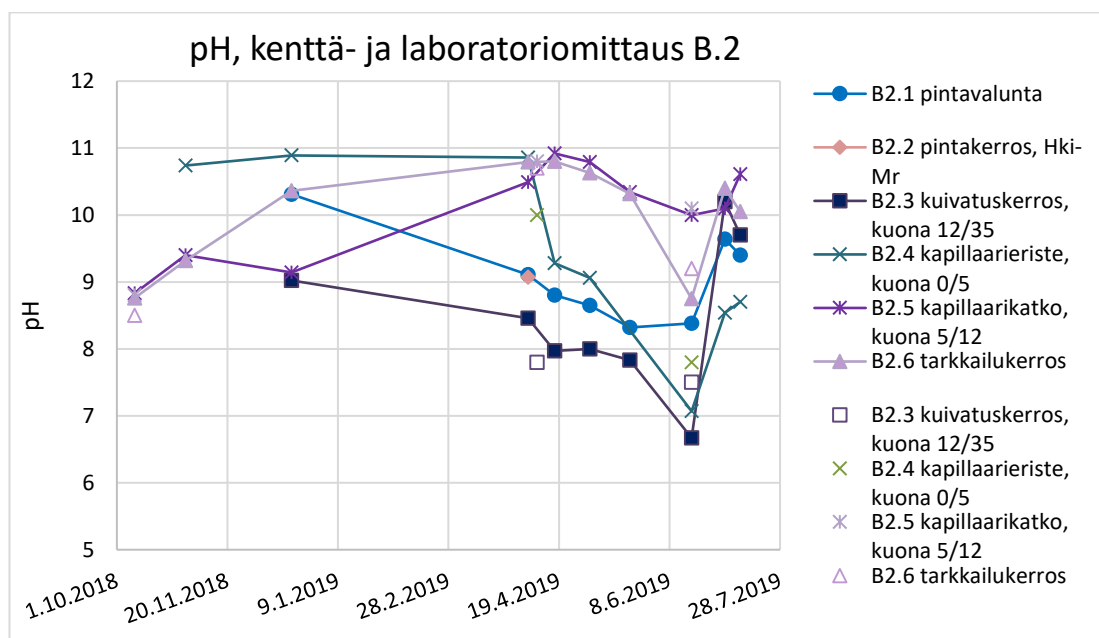
Laboratoriokokeiden perusteella Helsinki-moreenin pH on 7,8-8,6, joten mittakaivon A2.5 vedestä mitattu pH on siihen verrattuna suuri. Alkaalinen pH, yli 10, on todennäköisesti peräisin koerakenteesta A.2 käytetystä kuonabentoniitista. Myös kuivatuskerroksesta purkautuvan veden pH (kaivo 3) on korkeampi (luokkaa 9) kuin koerakenteessa A.1 käytetyistä materiaalista mitatut pH-arvot (taulukko 18) viitaten siihen, että kuivatuskerroksen kautta purkautuu kuonabentoniitin kanssa kontaktissa ollutta vettä. Syynä voi olla kaivojen padottaminen. Kuonabentoniittirakenteen alapuolisia vesiä purkavan tarkkailukerroksen kaivon A2.4 veden pH on seurantajakson aluksi lähes 10 ja se laskee kevään runsaamman virtaaman aikana lähelle neutraalia nousten kesällä yhdeksään.



Kuva 101. Koerakenteiden A.1 ja A.2 mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittauksien mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Koerakenteen B.2 mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset on esitetty kuvassa 102. Pintavalunnan pH on alkaalinen toisin kuin koerakenteissa A.1 ja A.2. Pintavalunnan veden pH on linjassa materiaaleista tehtyjen pH-mittausten kanssa, koska taulukon 18 mukaan Helsinki-moreenin pH on korkeampi kuin lietekompostiseoksen. Pintakerroksesta purkautuvasta vedestä on vain yksi pH:n mittaustulos (noin 9), joka on korkeampi kuin koerakenteen A.1 Helsinki-moreenin läpi virtautuvan veden pH ja alempi kuin koerakenteen A.2 pintakerroksesta purkautuvan veden pH.

Mittaustulosten perusteella jätteenpolton kuonan läpi suotautuva vesi on alkaalista. Pääsääntöisesti mitä hienorakeisempi kuona on kyseessä, sitä korkeampi on sen läpi suotautuneen veden pH. Kapillaarieristeen, tarkkailukerroksen ja kuivatuskerroksen veden pH:ssa näkyy selvä lasku kesäkuun alkupuolella. Koerakenteen B.2 kaivoihin kertyvän veden pH on lähtenyt kesällä nousuun.

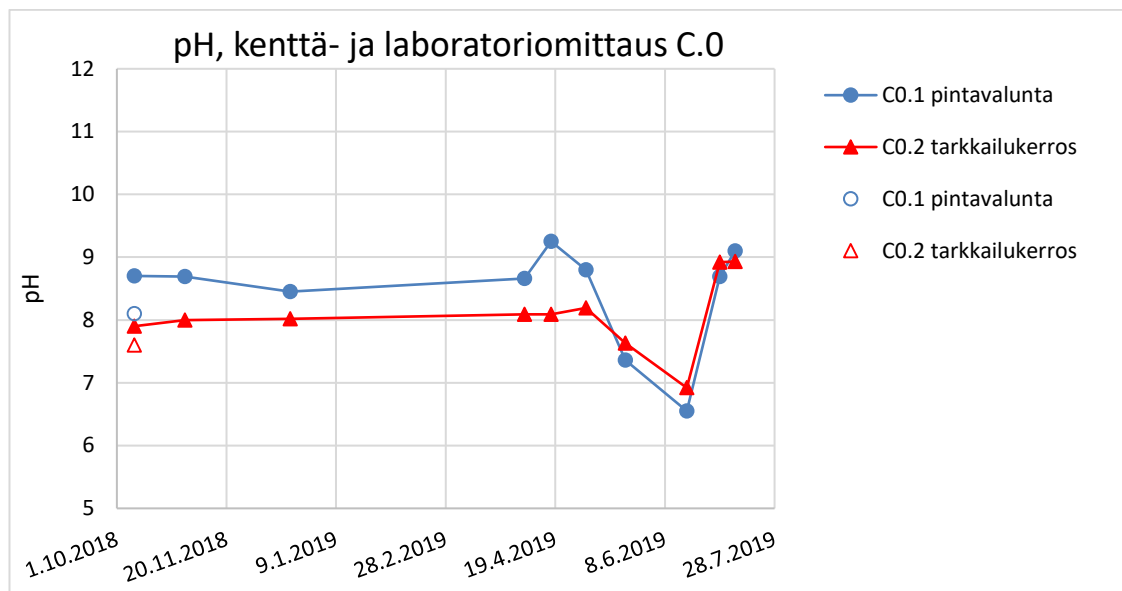


Kuva 102. Koerakenteen B.2 mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittauksien mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Koerakenteen C.0 mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset on esitetty kuvassa 103. Mittaustulosten perusteella pintavalunnan ja tarkkailukerroksen mittakaivojen veden pH-kuvaajat ovat suunnilleen samantyyppisiä seurantajakson aikana. Pintavalunnan pH on pienempi kuin tarkkailukerrokseen kertyvän veden pH, koska tarkkailukerrokseen kertyvä vesi on suotautunut Helsinki-moreeni -kerroksen läpi ja ollut pidempään kontaktissa materiaalin kanssa.

Laboratoriokokeiden perusteella C.0 mittakaivoista mitatun veden pH on korkeampi kuin koerakenteen A.1 pintakerroksesta purkautuvan veden pH ja pääsääntöisesti alempi kuin koerakenteen A.2 pintakerrokseen kertyvän veden pH, vaikka kaikissa materiaalina on

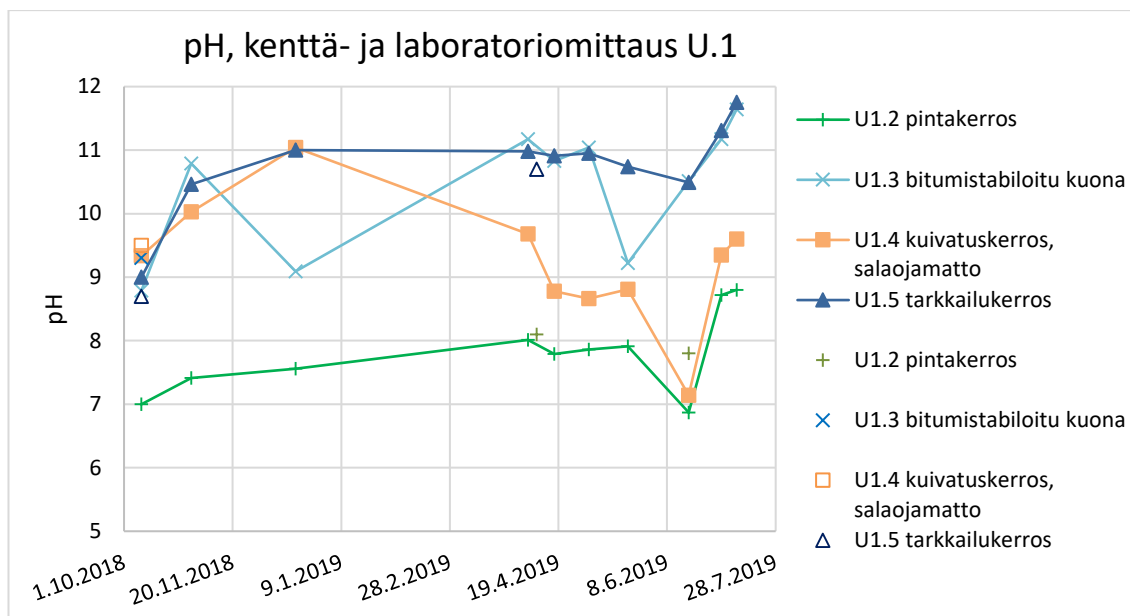
Helsinki-moreeni. Helsinki-moreenin pH on laboratoriokokeiden perusteella 7,8-8,6 (taulukko 18), joten mittakaivon veden pH on linjassa laboratoriotulosten kanssa. Kuten koerakenteessa B.2, myös koerakenteen C.0 mittakaivojen pH:ssa on mittaustulosten perusteella selvä lasku kesäkuun alussa, jonka jälkeen pH nousee noin yhdeksään.



Kuva 103. Koerakenteen C.0 mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittauksien mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

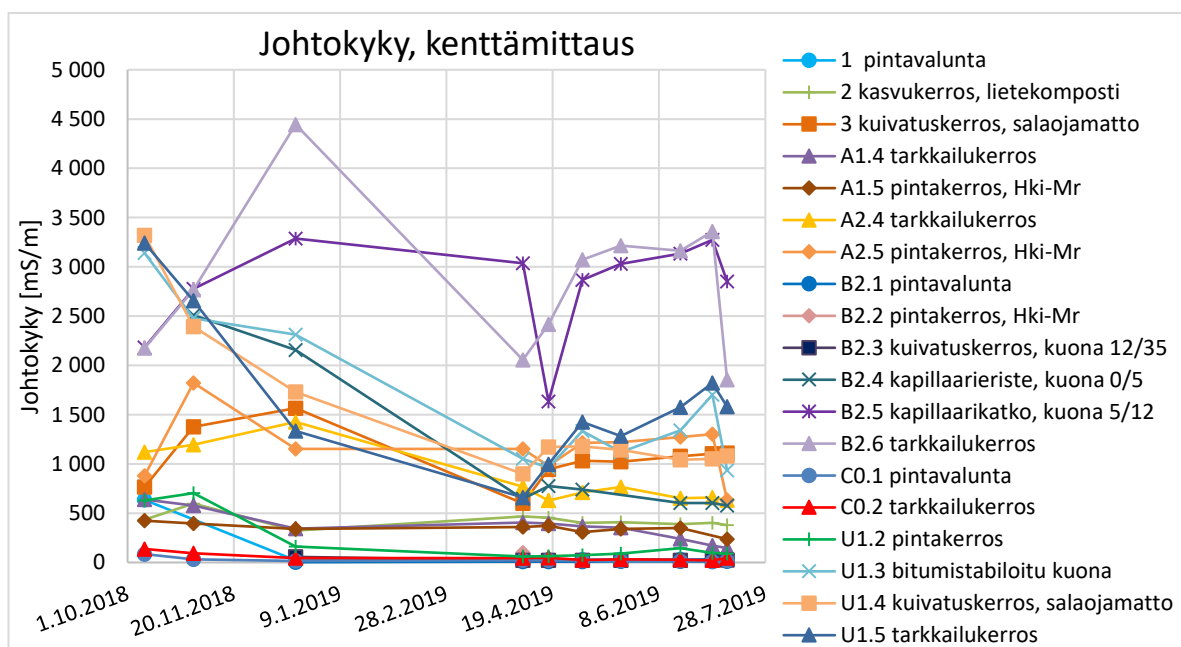
Koerakenteen U.1 mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset on esitetty kuvassa 104. Mittaustulosten perusteella tarkkailukerroksen ja bitumikuonan mittakaivoihin kertyvä vesi on alkaalista. Myös kuivatuskerroksessa pH on pääosin alkaalista. Pintakerroksesta purkautuvan veden pH on samaa suuruusluokkaa kuin Helsinki-moreenilla koerakenteessa C.0.

Kuivatuskerroksen korkea pH on todennäköisesti peräisin bitumikuonasta ja pintakerroksessa käytetystä materiaalista. Bitumikuonan pH oli laboratoriokokeiden perusteella 11,2. Tarkkailukerroksen mittakaivoon kertyvän veden pH on tätä luokkaa. Koerakenteen mittakaivoihin kertyvien vesien pH on lähtenyt nousuun kesän alkupuolella.



Kuva 104. Koerakenteen U.1 mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittauksien mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Koerakenteiden mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittauksien mittaustulokset on esitetty kuvissa 105-110. Kenttämittauksien mittaustulokset on esitetty kuvioina, joita yhdistää viiva. Laboratoriomittauksien tulokset on esitetty ilman tuloksia yhdistävää viivaa. Kuvassa 105 on esitetty kaikki johtokyvyn kenttämittauksien mittaustulokset.



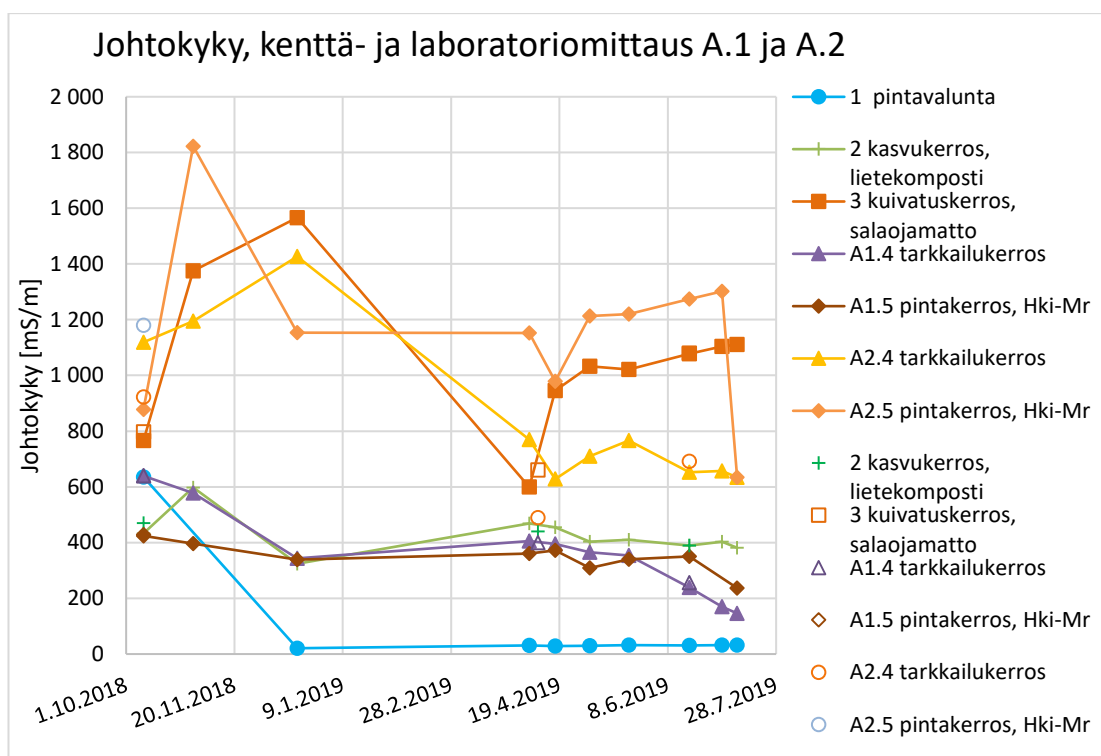
Kuva 105. Mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttämittausten mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Koerakenteiden A.1 ja A.2 mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset on esitetty kuvassa 106. Mittaustulosten perusteella pintavalunnan johtokyky on selkeästi pienin, ensimmäistä mittausta lukuun ottamatta luokkaa 20-30 mS/m. Pintavaluntaan verrattuna kasvukerroksen läpisyötätävän veden johtokyky on jo huomattavasti suurempi, noin 400 mS/m. Lietekompostiseoksen sähkönjohtavuus on laboratoriomittausten perusteella noin 120-150 mS/m (taulukko 18).

Mittaustulosten perusteella koerakenteiden pintakerroksen mittakaivoihin kertyvien vesien johtokyvyissä on huomattava ero. Koerakenteen A.1 vesien johtokyky on ollut huomattavasti pienempi ja tasaisempi. Koerakenteen A.1 tarkkailukerroksesta purkautuvan veden johtokyky on samaa luokkaan koerakenteen pintakerroksesta ja kasvukerroksesta purkautuvien vesien johtokyvyn kanssa.

Koerakenteen A.2 pintakerroksen mittauskaivoon kertyvän veden korkea sähkönjohtavuus on todennäköisesti peräisin kuonabentoniitista liuenneista suoloista. Myös kuivatuskerroksen johtokyvyssä ilmenee kuonan korkea johtokyky: sähkönjohtavuus on samaa suuruusluokkaa kuin kuonabentoniittikerroksen alapuolisesta tarkkailukerroksesta purkautuvassa vedessä, vaikka puolet kaivon vedestä pitäisi olla peräisin koerakenteesta A.1.

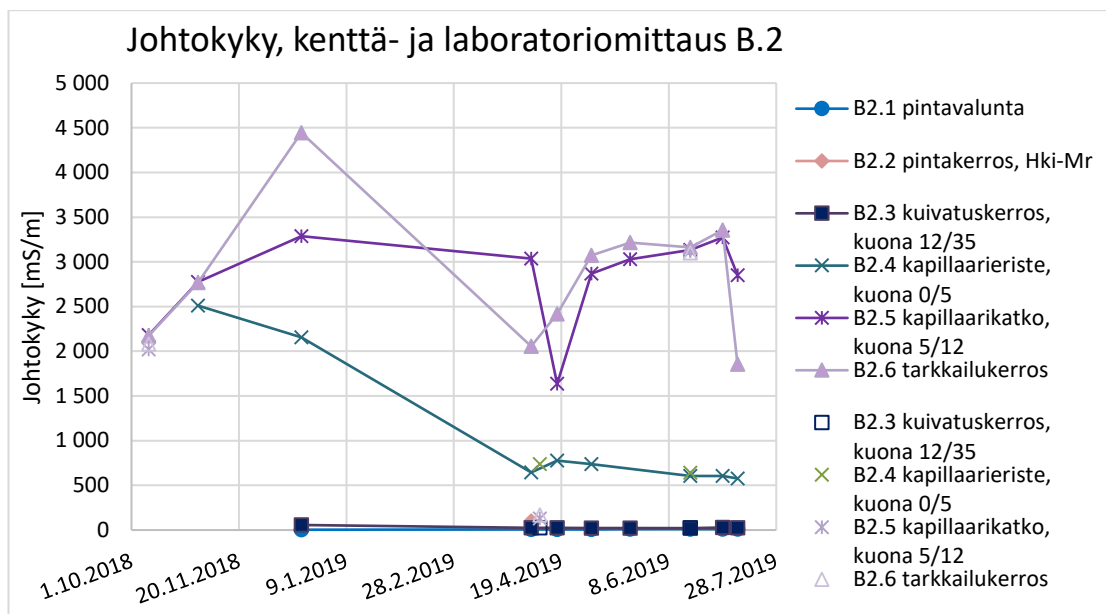
Seurantajakson lopussa koerakenteen A.2 pintakerroksesta purkautuvan veden johtokyky on laskenut merkittävästi hyvin lyhyessä ajassa. Muuten koerakenteiden A.1 ja A.2 mittakaivoihin kertyvän veden johtokyky on tasoittunut tai sen trendi on laskeva tarkkailujakson lopulla.



Kuva 106. Koerakenteiden A.1 ja A.2 mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

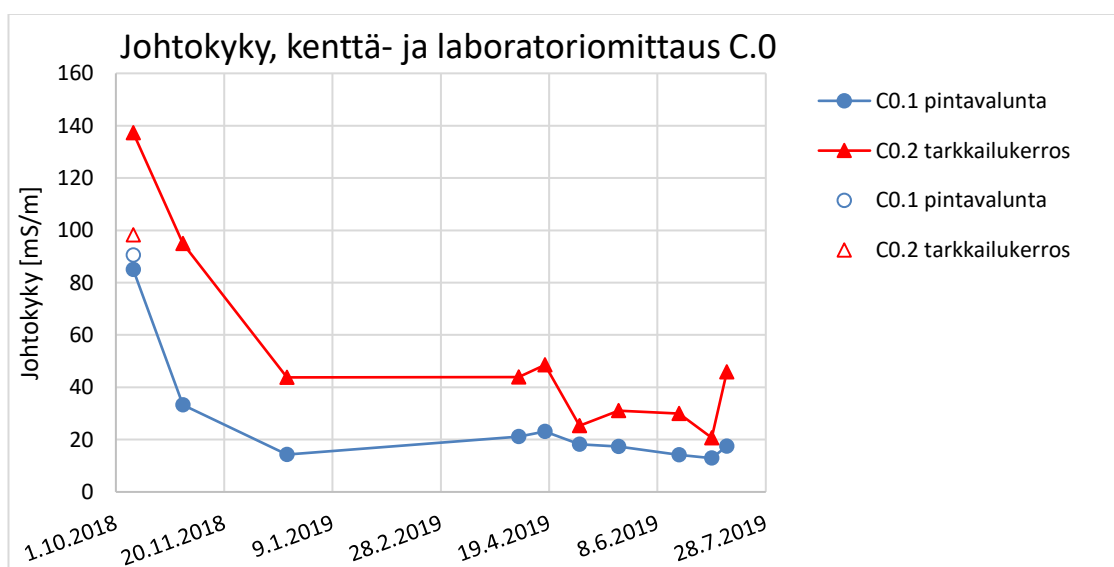
Koerakenteen B.2 mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset on esitetty kuvassa 107. Mittaustulosten perusteella pintavalunnan, pintakerroksesta ja kuivatuskerroksesta (kuonafraktio 12/35 mm:ä) mittakaivoihin purkautuvan veden johtokyky on pieni. Pintavalunnan johtokyky on alle 10 mS/m, pintakerroksesta purkautuvan veden noin 100 mS/m ja kuivatuskerroksesta purkautuvan veden johtokyky on pääsääntöisesti noin 20-30 mS/m.

Kapillaarieristeestä (kuonafraktio 0/5 mm:ä), kapillaarikatkosta (kuonafraktio 5/12 mm:ä) ja tarkkailukerroksesta purkautuvien vesien johtokyky on huomattavasti korkeampi. Kapillaarikatkon ja tarkkailukerroksen vesien sähkönjohtavuus oli selvästi kaikkia muita rakennekerroksia korkeampi ja pysyi korkealla tasolla koko seuranta-ajan. Kapillaarieristeen läpi suotautuvan veden johtokyky on pienempi kuin kapillaarikatkosta, vaikka laboratoriomääritysten perusteella materiaalien sähkönjohtavuudet ovat toisinpäin (taulukko 18). Kapillaarieristeestä purkautuva vesimäärä on pienempi kuin kapillaarikatkosta (kuva 72). Kapillaarikatkon ja tarkkailukerroksen kaivojen vedestä 9.4.2019 tehdyt laboratoriomääritykset eivät ole linjassa muiden mittausten kanssa (B2.5 129 mS/m ja B2.6 167 mS/m).



Kuva 107. Koerakenteen B.2 mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

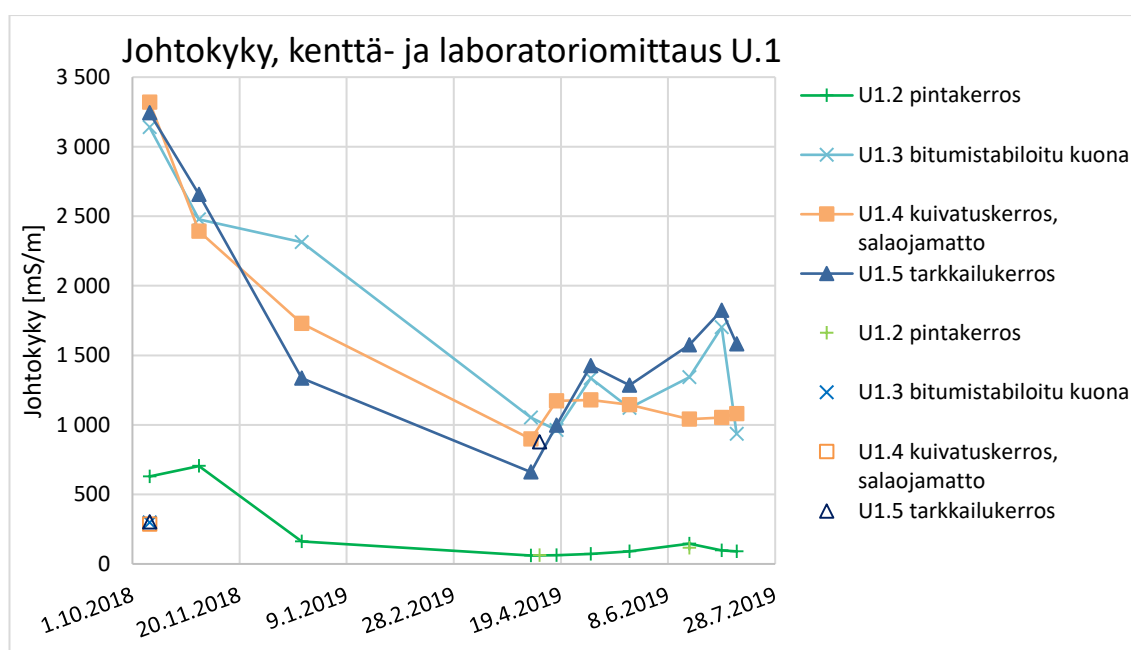
Koerakenteen C.0 mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset on esitetty kuvassa 108. Mittaustulosten perusteella pintakerroksessa käytetyn Helsinki-moreenista purkautuvan veden johtokyky on lähtenyt selvään laskuun. Tarkkailukerroksesta purkautuvan veden johtokyky on suurempi kuin pintavalunnan. Tarkkailukerroksesta purkautuva vesi on suotautunut moreenikerroksen läpi, mikä selittää suuremman mittaustuloksen.



Kuva 108. Koerakenteen C.0 mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Koerakenteen U.1 mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset on esitetty kuvassa 109. Mittaustulosten perusteella kuivatuskerroksesta, bitumikuonasta ja tarkkailukerroksesta purkautuvien vesien johtokyky on korkea heijastaen kuonan vaikutusta. Johtokyky laskee ja vakiintuu seurantajakson aikana.

Pintakerroksesta purkautuvan veden johtokyky on selvästi pienempi, joten kuivatuskerroksen korkea johtokyky johtuu bitumikuonan sisältämästä kuonasta. Kuivatuskerroksesta, bitumikuonasta ja tarkkailukerroksesta purkautuvista vesistä on tehty vain yksi johtokyvyn laboratoriomääritys, joka on eri suuruusluokkaa kuin kenttämittausten tulokset. Laboratoriomittaus on noin kymmenesosa kenttämittauksen tuloksesta. Kyseiset näytteet on otettu samana päivänä 9.10.2018.



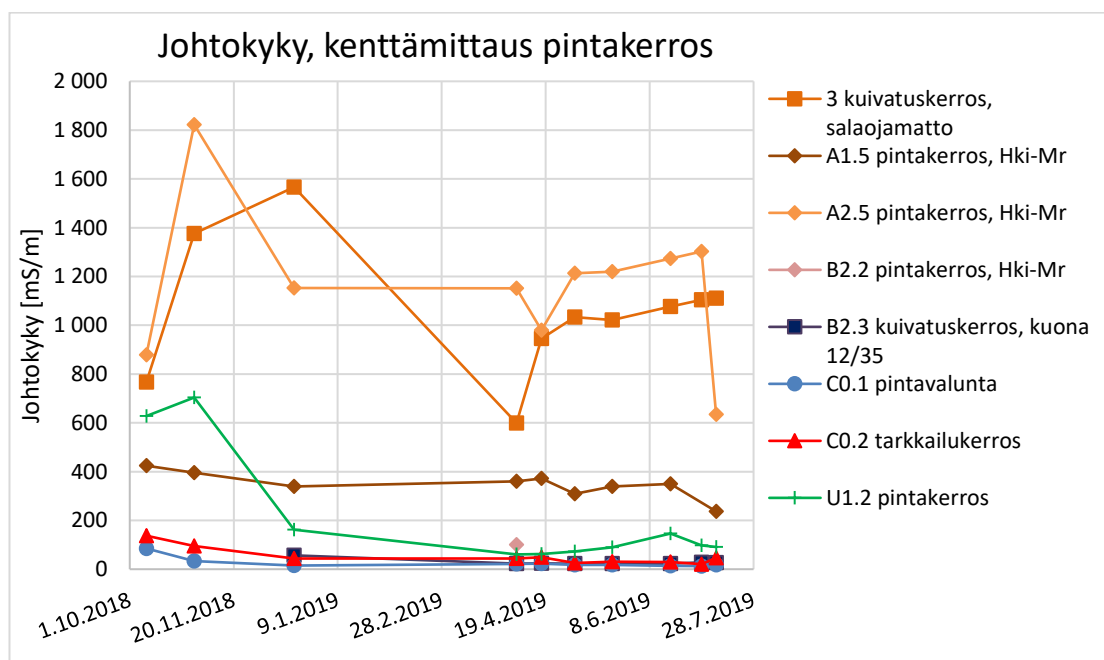
Kuva 109. Koerakenteen U.1 mittakaivoihin purkautuvasta vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittausten mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Kuvassa 110 on esitetty kaikki Helsinki-moreenia sisältävien rakennekerrosten mittakaivoihin kertyvästä vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttämittausten mittaustulokset. Tarkastelussa ovat mukana myös koerakenteiden A.1 ja A.2 yhteinen kuivatuskerros ja B.2 kuivatuskerros, jotka ovat Helsinki-moreenista rakennettujen pintakerrosten alapuolella ja keräävät niistä suotautuvia vesiä.

Koerakenteessa C.0 pintavalunnan ja Helsinki-moreeni -kerroksen läpi suotautuvan veden johtokyky ovat muihin verrattuna pienempiä. Kyseisen koerakenteen läpäisevä laskennallinen virtaama oli moninkertainen muihin koerakenteisiin verrattuna (kuva 74). Koerakenteen B.2 pintakerroksesta purkautuvasta vedestä on vain yksi kenttämittaus, jonka tulos on samaa suuruusluokkaa koerakenteen C.0 vesien johtokykytulosten kanssa.

Koerakenteiden A.1 ja A.2 Helsinki-moreeni -kerroksesta purkautuvien vesien johtokykytulosten välillä on huomattava ero. Koerakenteen A.2 vesien johtokyky on huomattavasti suurempi kuin koerakenteessa A.1. Kyseisillä koerakenteilla on yhteinen mitta-kaivo, johon purkautuu molempien koerakenteiden kuivatuskerroksiin kertyvät vedet. Myös kuivatuskerroksessa sähkönjohtavuus on korkea. Mittaustulosten perusteella koerakenteen A.2 pintakerroksesta purkautuvien vesien korkea johtokyky on luultavasti peräisin pintakerroksen alapuolisesta kuonabentoniitista. Kaivojen padottamisen takia vettä nousee ohuen, salaojamatosta rakennetun, kuivatuskerroksen läpi pintakerrokseen tai kerroksien vedet keräävät läpiviennit eivät toimi suunnitellulla tavalla, vaan vedet pääsevät purkautumaan luiskan alaosaan eri rakennekerroksiin.

Myös koerakenteen U.1 pintakerroksesta purkautuvien vesien korkea sähkönjohtavuus seurantajakson alussa voi selittyä sillä, että kaivojen padottamisen takia alapuolisesta bitumikuonakerroksesta on noussut vettä yläpuolisiin kerroksiin luiskan alaosaan. Johtokyky on tasaantunut suunnilleen samalle tasolle kuin koerakenteen C.0 vesissä.

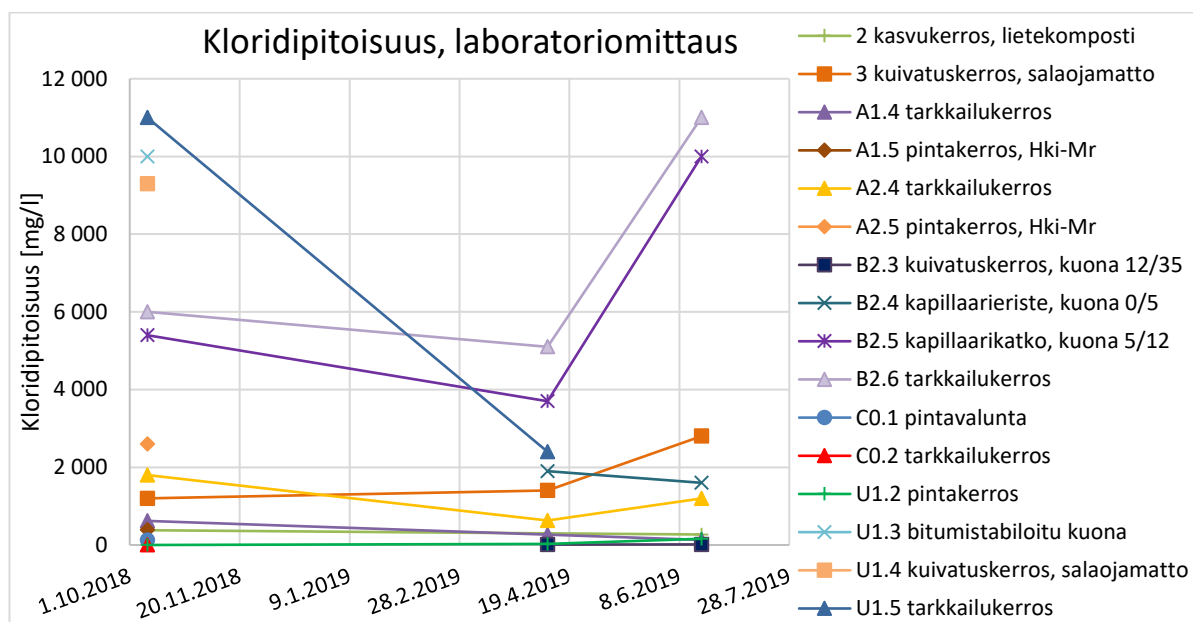


Kuva 110. Helsinki-moreenia sisältävien rakennekerroksien mittakaivoista tehtyjen johtokyvyn kenttämittauksien mittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Kloridipitoisuuden mittaustulokset mittakaivoihin purkautuvasta vedestä on esitetty kuvassa 111. Mittaustulosten perusteella veden kloridipitoisuus on suurin, yli 10 000 mS/m, seurantajakson alussa koerakenteen U.1 kuivatuskerroksesta, bitumikuonasta ja tarkkailukerroksesta purkautuvissa vesissä. Seurantajakson aikana kloridipitoisuus nousee koerakenteen B.2 tarkkailukerroksesta ja kapillaarikatkosta purkautuvasta vedestä samalle tasolle.

Koerakenteen U.1 kerroksissa purkautuvan veden korkea kloridipitoisuus johtunee rakenteesta käytetystä jätteenpolton kuonasta. Kirjallisuuden perusteella jätteenpolton kuonan kloridipitoisuus on 2 977 mg/kg (L/S=10) kuonafraction 0/5 mm:ä kaksivaiheisen ravistelutestin mukaan määritettynä (Ramboll 2018d). Myös kapillaarikatkosta (kuonafraktio 5/12 mm:ä) ja sen alapuolisesta tarkkailukerroksesta purkautuvissa vesissä kloridipitoisuus on korkea. Mittaustulosten perusteella kloridipitoisuus on laskenut keväällä ja lähtenyt uudelleen huomattavaan kasvuun koerakenteen B.2 tarkkailukerroksen ja kapillaarikatkon mittakaivoissa.

Koerakenteiden A.1 ja A.2 yhteisestä kuivatuskerroksesta purkautuvien vesien kloridipitoisuus on selvästi korkeampi kuin muiden A.1 koerakenteen kerroksista purkautuvien vesien kloridipitoisuus. Joistakin rakennekerroksista, kuten esimerkiksi A.2 pintakerroksesta, purkautuvista vesistä on vain yksittäinen mittaustulos, joten kehityssuuntaa ei voida arvioida. Harvempi määrittäsväli hankaloittaa vertailua kenttämittaustuloksiin.

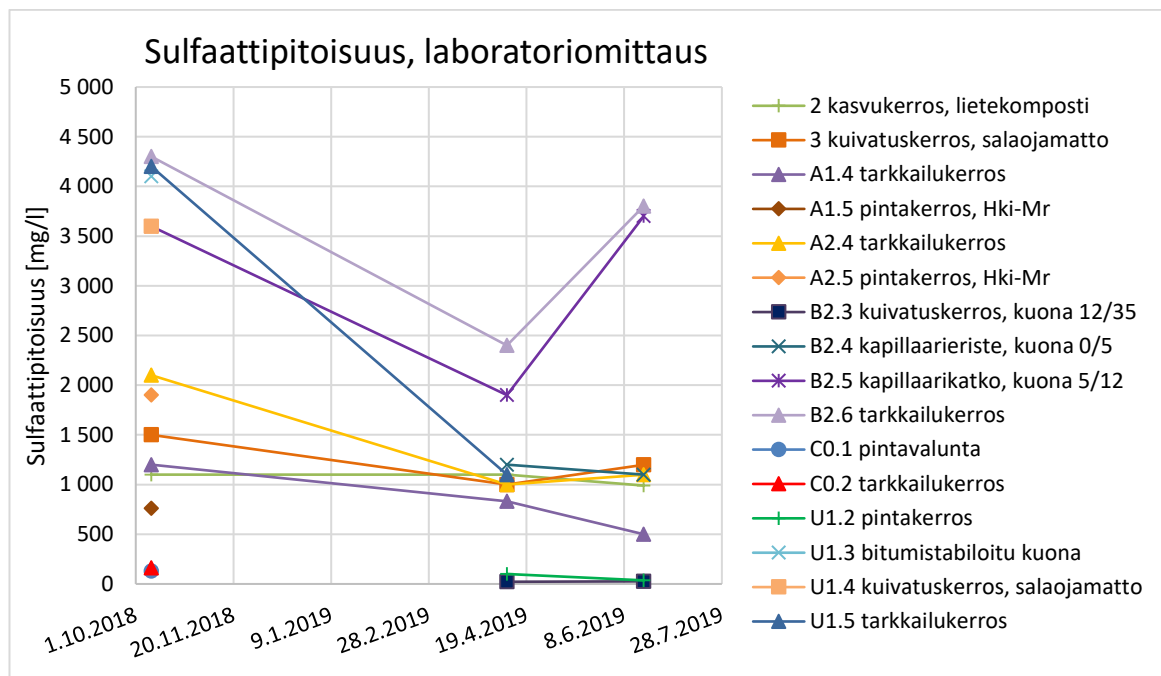


Kuva 111. Kloridipitoisuuden mittaustulokset mittakaivoihin purkautuvasta vedestä 9.10.2018-10.7.2019.

Sulfaattipitoisuuden mittaustulokset mittakaivoihin purkautuvasta vedestä on esitetty kuvassa 112. Mittaustulosten perusteella sulfaattipitoisuus on suurin jätteenpolton kuonaa sisältävistä rakennekerroksista tai niiden alapuolisista tarkkailukerroksista purkautuvissa vesissä (B.2 ja U.1 tarkkailukerrokset, bitumikuona ja kapillaarikatko), joten jätteenpolton kuonasta liukenee sulfaattia veteen. Kirjallisuuden perusteella jätteenpolton kuonasta liukenee sulfaattia veteen. Kirjallisuuden perusteella jätteenpolton kuonan sulfaattipitoisuus on 2 048 mg/kg (L/S=10) kuonafraction 0/5 mm:ä kaksivaiheisen ravistelutestin mukaan määritettynä (Ramboll 2018d).

Sulfaattipitoisuus on mittaustulosten mukaan korkea myös koerakenteen U.1 kuivatuskerroksesta purkautuvassa vedessä, mikä johtunee kuivatuskerroksen alapuolisesta jätteenpolton kuonasta. Myös koerakenteen A.2 pintakerroksesta ja tarkkailukerroksesta

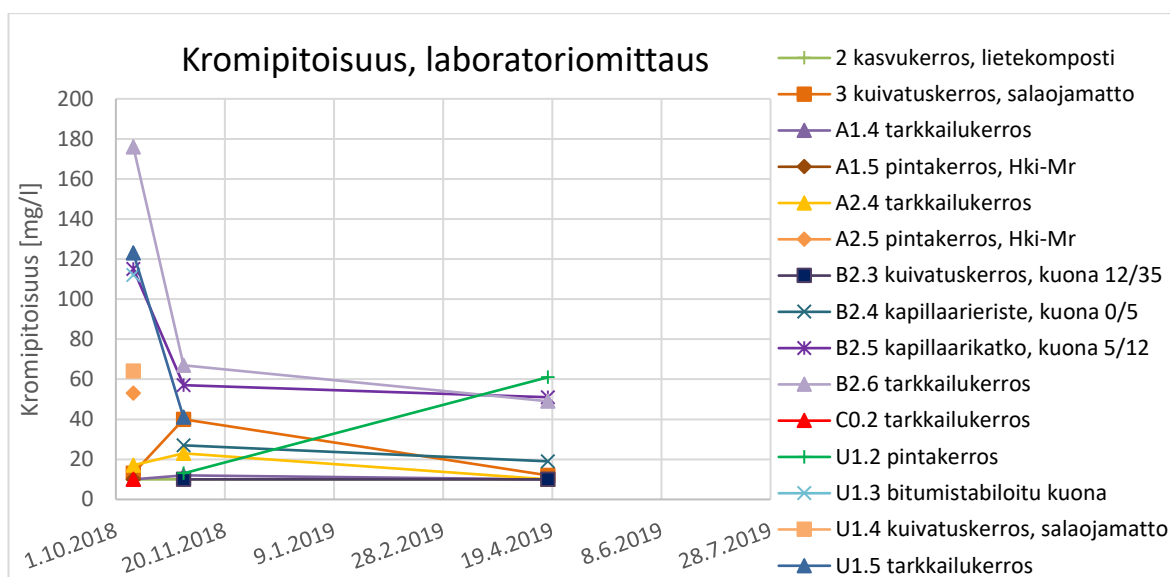
sekä koerakenteen A.1 ja A.2 yhteisestä kuivatuskerroksesta purkautuvissa vesissä on sulfaattipitoisuus yli 1 000 mg/l. Koerakenteen A.1 tarkkailukerroksesta purkautuvan veden sulfaattipitoisuus on yllättävän korkea, laskien seuranta-aikana 1 200 mg/l:sta 500 mg/l:aan.



Kuva 112. Sulfaattipitoisuuden mittaustulokset mittakaivoihin purkautuvasta vedestä 9.10.2018-10.7.2019.

Kromipitoisuuden mittaustulokset mittakaivoihin purkautuvasta vedestä on esitetty kuvassa 113. Kromipitoisuuden määrittäysraja oli 10 mg/l. Jos mittaustulos oli alle määrittäysrajan, on kuvassa 113 pitoisuudeksi merkitty 10 mg/l.

Mittaustulosten perusteella veden kromipitoisuus on suurin jätteenpolton kuonaa sisältävistä rakennekerroksista tai niiden alapuolisista tarkkailukerroksista (B.2 tarkkailukerros, kapillaarikatko, U.1 tarkkailukerros ja bitumikuona) purkautuvissa vesissä heti tarkkailujakson alettua. Kromipitoisuus on laskenut nopeasti. Kromipitoisuus on pääsääntöisesti laskenut tai tasaantunut paitsi koerakenteen U1.2 pintakerroksen mittakaivoon purkautuvassa vedessä, jossa kromipitoisuus kasvoi kahden eri mittauskerran välillä lähes viisinkertaisesti. Kirjallisuuden perusteella jätteenpolton kuonan kromipitoisuus on 0,7 mg/kg (L/S=10) kuonafraction 0/5 mm:ä kaksivaiheisen ravistelutestin mukaan määritettynä (Ramboll 2018d).

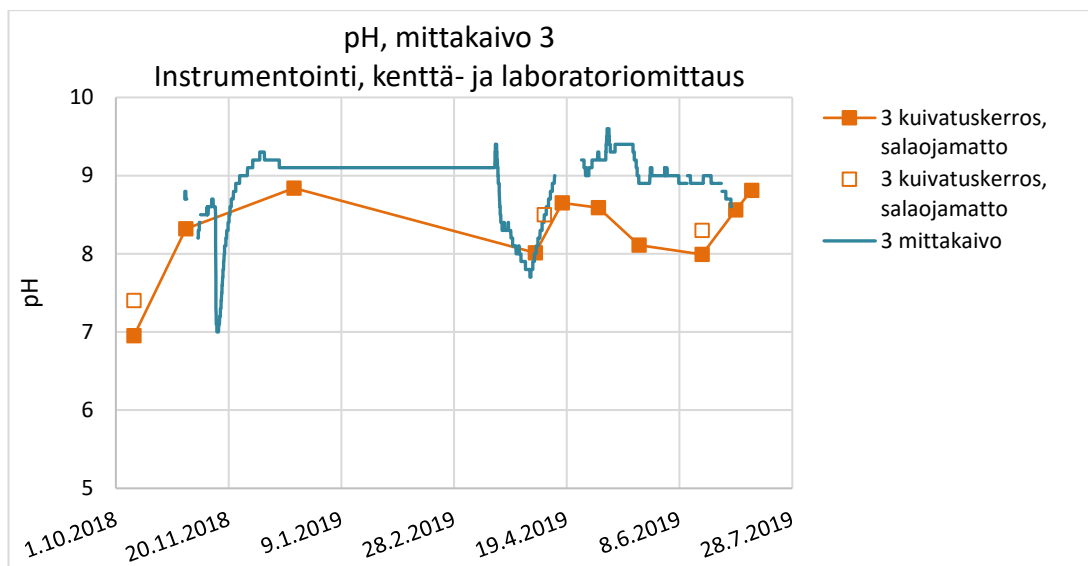


Kuva 113. Kromipitoisuuden mittaustulokset mittakaivoihin purkautuvasta vedestä 9.10.2018-10.7.2019.

Koerakenteesta U.1 kuivatus- ja tarkkailukerroksesta purkautuneista vesistä tutkittiin mahdollisesti bitumista liukenevia öljyhiilivetyjä ja PAH-yhdisteitä. Tutkittujen aineiden pitoisuudet olivat alle laboratorion määrittämissä raja-arvoissa.

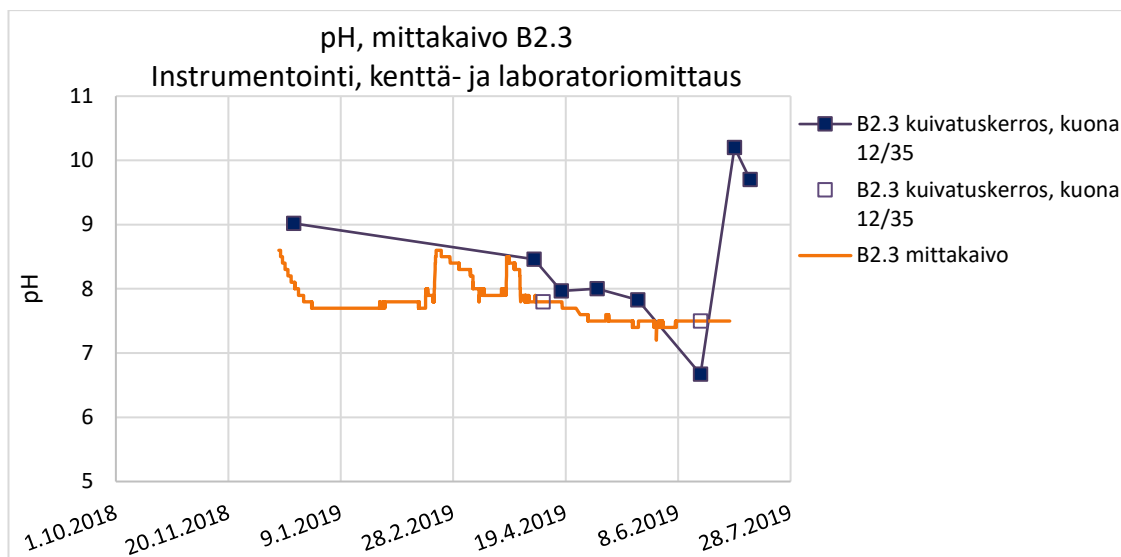
9.2.3 Vedenlaatutulosten vertailu

Mittakaivoissa olevien antureiden mittaustuloksia on verrattu vesinäytteenoton kenttä- ja laboratoriomittaustuloksiin kuvissa 114-119. Mittakaivon 3 pH-anturin mittaustulokset sekä kaivon purkautuneesta vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittaustulokset on esitetty kuvassa 114. pH:n mittaustulokset ovat pääosin yhteneviä. Touko-kesäkuussa kenttä- ja laboratoriomittausten tulokset poikkeavat enemmän jatkuvan mittauksen tuloksista. Pääasiassa kaivon 3 purkautuvasta vedestä on laboratorio- ja kenttämittauksilla saatu pienempi pH:n mittaustulos jatkuvaan mittaukseen verrattuna.



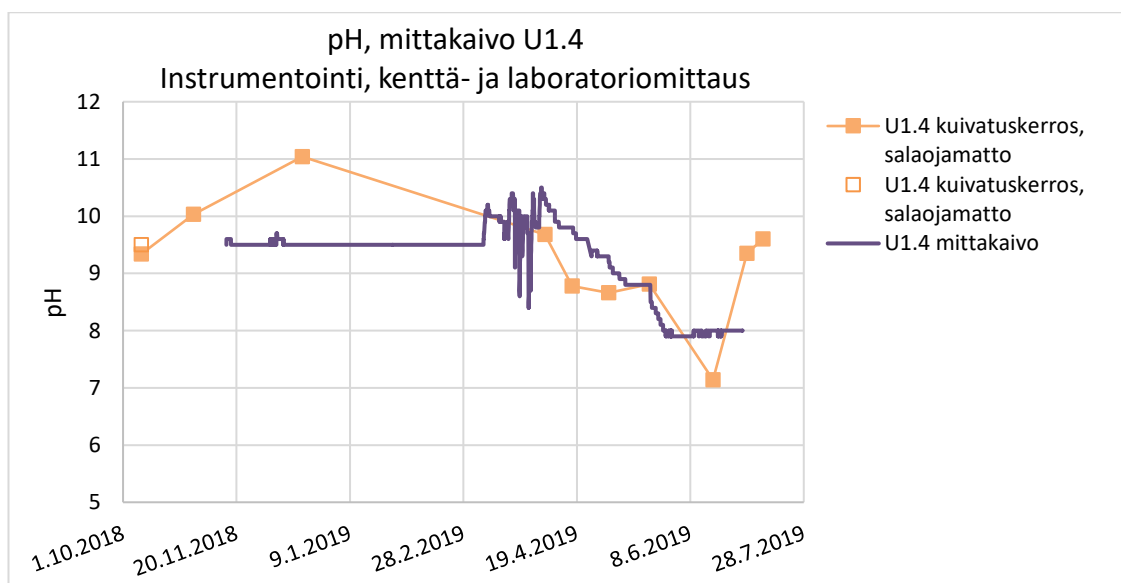
Kuva 114. Mittakaivossa 3 olevan pH-anturin mittaustulokset sekä vesinäytteenoton kenttä- ja laboratoriomittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Mittakaivon B2.3 pH-anturin mittaustulokset sekä kaivon purkautuneesta vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittaustulokset on esitetty kuvassa 115. pH:n mittaustulokset ovat pääosin yhteneviä. Heinäkuun alun kaksi kenttämittauksen tulosta (pH noin 10) poikkeavat merkittävästi jatkuvan mittauksen mittaustuloksesta (pH 7,6). Jatkuvan mittauksen mittaustuloksia ei 30.6.2019 jälkeen ole esitetty kuvissa. Heinäkuun jatkuvan mittauksen mittaustulokset on katsottu Luode Oy:n datapalvelusta. Pääasiassa kaivon B2.3 purkautuvasta vedestä on kenttämittauksella saatu korkeampi pH:n mittaustulos jatkuvaan mittaukseen verrattuna. Laboratoriossa määritetyt pH:n mittaustulokset ovat yhteneviä pH-anturin mittaustulosten kanssa.



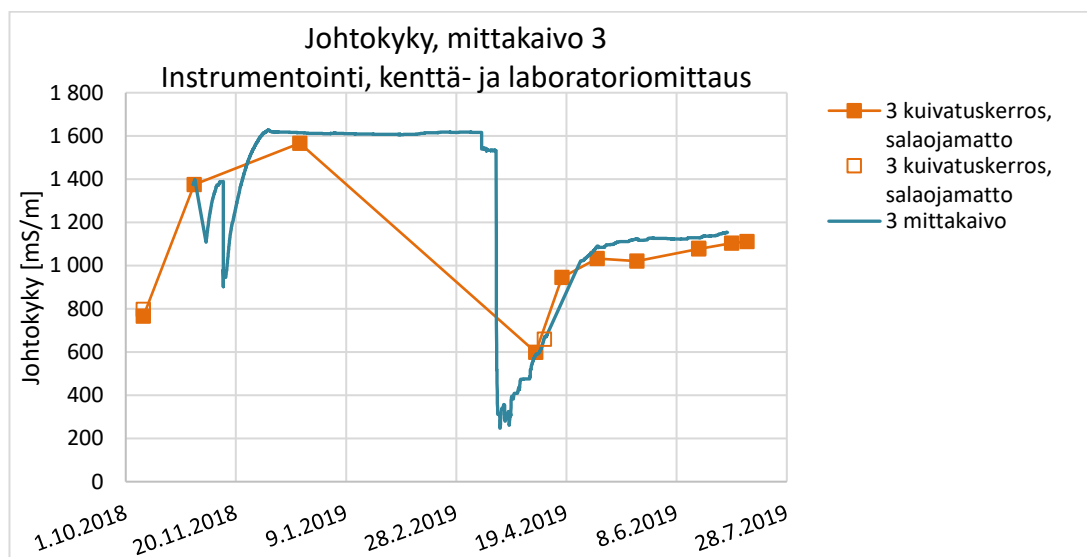
Kuva 115. Mittakaivossa B2.3 olevan pH-anturin mittaustulokset sekä vesinäytteenoton kenttä- ja laboratoriomittaustulokset 12.12.2018-10.7.2019.

Mittakaivon U1.4 pH-anturin mittaustulokset sekä kaivon purkautuneesta vedestä tehtyjen pH:n kenttä- ja laboratoriomittaustulokset on esitetty kuvassa 116. Kaivon U1.4 pH:n mittaustuloksissa on eroja eri menetelmien välillä. Joulukuun kenttämittaustulos poikkeaa lähes 1,5:n verran pH:n jatkuvan mittauksen mittaustuloksista. Heinäkuun alun kaksi kenttämittauksen tulosta (pH yli 9) poikkeavat merkittävästi jatkuvan mittauksen tuloksista (pH noin 8). Heinäkuun jatkuvan mittauksen mittaustulokset on katsottu Luode Oy:n datapalvelusta.



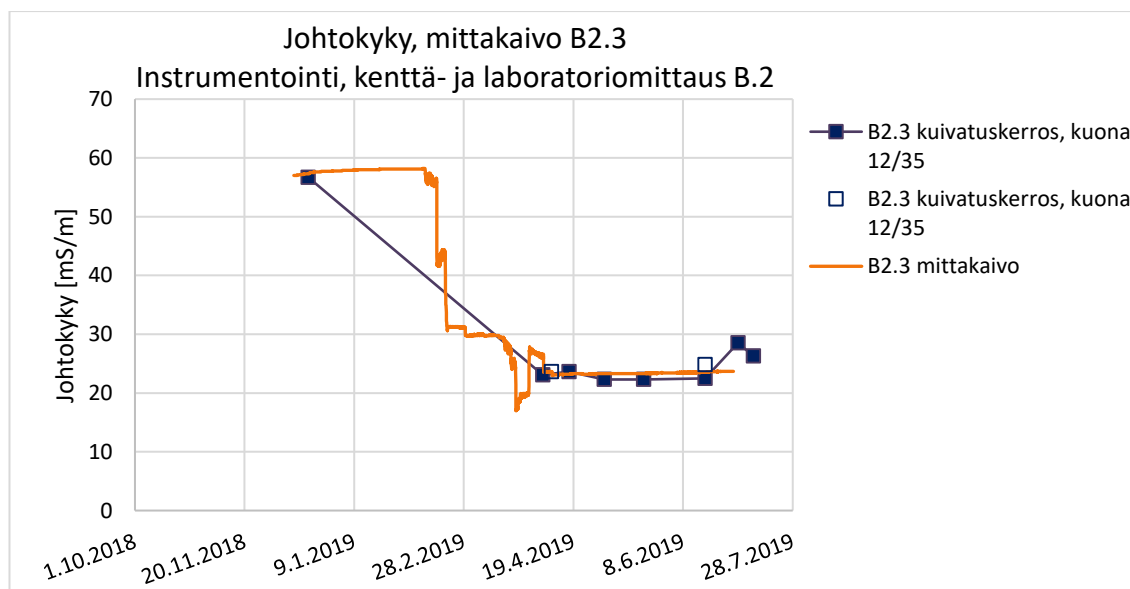
Kuva 116. Mittakaivossa U1.4 olevan pH-anturin mittaustulokset sekä vesinäytteenoton kenttä- ja laboratoriomittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Mittakaivon 3 johtokykyanturin mittaustulokset sekä kaivon purkautuneesta vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittaustulokset on esitetty kuvassa 117. Eri menetelmien johtokyvyn mittaustulokset ovat hyvin yhteneviä.



Kuva 117. Mittakaivossa 3 olevan johtokykyanturin mittaustulokset sekä vesinäytteenoton kenttä- ja laboratoriomittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

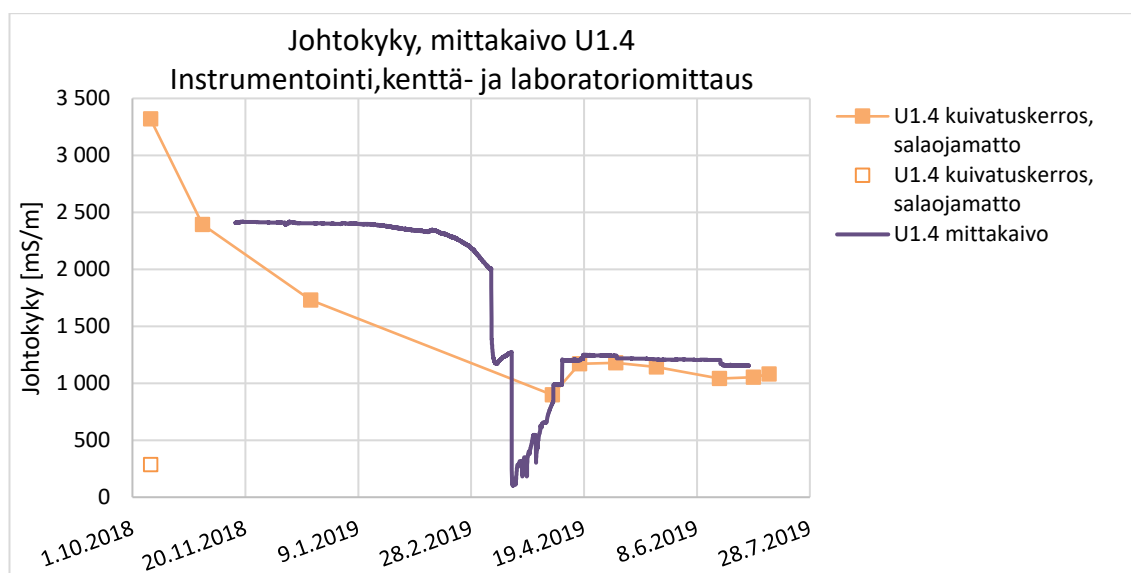
Mittakaivon B2.3 johtokykyanturin mittaustulokset sekä kaivon purkautuneesta vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittaustulokset on esitetty kuvassa 118. Eri menetelmien johtokyvyn mittaustulokset ovat hyvin yhteneviä.



Kuva 118. Mittakaivossa B2.3 olevan johtokykyanturin mittaustulokset sekä vesinäytteenoton kenttä- ja laboratoriomittaustulokset 12.12.2018-10.7.2019.

Mittakaivon U.1.4 johtokykyanturin mittaustulokset sekä kaivon purkautuneesta vedestä tehtyjen johtokyvyn kenttä- ja laboratoriomittaustulokset on esitetty kuvassa 119.

Kuten joulukuun pH:n kenttämittaus, johtokyvyn kenttämittauksen mittaustulos poikkeaa merkittävästi johtokyvyn jatkuvan mittauksen mittaustuloksista. Kaivon purkautuneesta vedestä tehtiin vain yksi johtokyvyn laboratoriomääritys, joka ei ole yhtenevä muiden mittaustulosten kanssa. Ero saattaa johtua siitä, että kaivon vesi sekoitettiin ennen kenttämittausta ja näytteenottoa. Näitä kahta poikkeusta lukuun ottamatta johtokyvyn mittaustulokset ovat yhteneviä.



Kuva 119. Mittakaivossa U1.4 olevan johtokykyanturin mittaustulokset sekä vesinäytteenoton kenttä- ja laboratoriomittaustulokset 9.10.2018-10.7.2019.

Näytteenotolla ja kenttämittauksilla saadaan vain pistemäistä tietoa jatkuvaan mittaukseen verrattuna. Mittaustiheyden tulee olla tarpeeksi tiheä, jotta kenttä- ja laboratoriomittauksilla voidaan havaita äkilliset vedenlaadun muutokset. Keväällä useassa rakenteessa jatkuvalla mittauksella havaittua pH:n ja johtokyvyn äkillistä laskua ei ole havaittu kenttä- tai laboratoriomittauksilla valitulla mittaustiheydellä.

10. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Koerakentamisella selvitettiin jätemateriaalien ja rakentamisesta muodostuvien kaivumaiden hyötykäyttöä kaatopaikan väliaikaisessa pintarakenteessa. Tutkittavia materiaaleja olivat jätteenpolton kuona, erilaiset jätteenpolton kuonan seokset, jätevedenpuhdistamon lietettä sisältävä lietekompostiseos ja Helsinki-moreeni. Projektin tuloksia on tarkoitus hyödyntää kaatopaikan väliaikaisten pintarakenteiden suunnittelussa ja toteutuksessa Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen kaatopaikalla.

Tutkimushankkeessa rakennettiin viisi koerakennetta, jotka instrumentointiin. Yksi tutkituista koerakenteista oli jätteenpolton kuonasta rakennettu kapillaarisulkurakenne, jonka toimintaa on HSY:llä tutkittu aikaisemmin kaltevassa lavalysimetrissä. Diplomityön osuus tutkimushankkeesta oli koerakenteiden rakentamisen dokumentointi, rakentamisen aikainen laadunvalvonta (tiivistystarkkailu ja laboratorionkokeet) sekä ensimmäisen seurantajakson (syksy/talvi 2018 – 30.6.2019) instrumentointitulosten sekä keskeisten vedenlaatutulosten raportointi.

Koerakentaminen

Koerakenteiden toteuttaminen poikkeaa huomattavasti tavallisten pintarakenteiden toteuttamisesta. Kaikkien osapuolien tulee tutustua suunnitelmiin ja erityisesti poikkeaviin detaljeihin ajoissa, jotta voidaan varmistua rakenteiden toteuttavuudesta. Suunnitelmia jouduttiin välillä muuttamaan nopealla aikataululla työmaalla, koska suunnitelmat eivät olleet tarpeeksi yksityiskohtaisia tai detaljien toteutus oli liian haasteellista. Tässä kohtaa kokeneen työnohtajan läsnäolosta työmaalla olisi ollut huomattavasti hyötyä. Suunnitelmien muuttaminen hidasti työn etenemistä. Kaikkien osapuolien huolellinen perehtyminen suunnitelmiin olisi vähentänyt työmaalla ilmenneiden yllätysten määrää. Muutoksien tapahtuessa informaation tulee myös kulkea kaikkien osapuolien välillä, jotta kaikilla on saatavilla viimeisimmät suunnitelmat rakenteista.

Antureiden ja kaapelien asentaminen, alkuperäisestä rakentamisaikataulusta poikkeaminen sekä laadunvalvontamittausten tekeminen hidastivat työtä työmaalla, joka olisi pitänyt ottaa paremmin huomioon aikataulussa ja työn suunnittelussa. Lisäksi joitakin tilaajan materiaaleja ei voinut toimittaa enää klo 17 jälkeen työmaalle, joten työpäivän aikana kertynyttä odotusaikaa ei voitu hyvittää pidentämällä työpäivää.

Tiivistystarkkailu

Mineraalisen tiivistyskerroksen irtotiheydellä on merkittävä vaikutus rakennekerroksen vedenläpäisevyyteen. Laboratoriotulosten perusteella kuonabentoniitin tapauksessa ensimmäisen koesarjan kuivairtitiheyteen verrattuna 100 kg/m^3 korkeampi kuivairtitiheys

pienensi vedenläpäisevyyttä 10^{-7} :stä 10^{-9} :ään m/s. Tämän vuoksi irtotiheyden mittaukseen työmaalla on kiinnitettävä huomiota. Määrittystarkkuus riippuvat menetelmästä ja mittaustulokset ovat haavoittuvaisia inhimillisille virheille.

Troxler-mittauksen tapauksessa tyypillinen virhe johtuu laitteelle virheellisesti syötetystä syvyydestä. Troxler-mittalaitteen määrittämä kuivairtitiheyden arvo tulee korjata laboratoriossa määritetyllä vesipitoisuudella, koska troxler-mittalaitteen vesipitoisuusmittaus häiriintyy metalleista ja muista jätteenpolton kuonan sisältämistä aineista. Vesivolymetrimittauksessa virheet voivat johtua muun muassa mittavarren asteikon virheellisestä lukemisesta, laitteen huonosta kontaktista pintaan, löyhän materiaalin tiivistymisestä mittaauksessa käytettävän paineen vaikutuksesta, materiaalin hukkaamisesta koekuopan kaivamisen yhteydessä tai punnitusvirheestä. Hiekkavolymetrimittauksessa virhettä voi aiheuttaa mittahiekan kalibrointi, materiaalin hukkaaminen näytekuopan kaivamisen yhteydessä tai hiekan tiivistäminen vahingossa kokeen aikana, mikä johtaa liian suureen irtotiheyden lukuarvoon.

Bitumikuonakerroksessa tehdyissä mittauksissa ero vesivolymetri- ja hiekkavolymetrimittauksen tulosten välillä oli peräti 300 kg/m^3 . Kiertotiivistyslaitteella bitumikuonaseoksesta tehdyistä vedenläpäisevyyskoekappaleista erottautui runsaasti vettä koekappaleiden valmistuksen yhteydessä, kun tavoiteirtotiheys oli asetettu hiekkavolymetrimittauksen mukaan. Tämä viittaa siihen, että hiekkavolymetrimittauksella määritetty kuivairtitiheys olisi ollut suurempi kuin mitä materiaalilla voidaan saavuttaa. Kaikilla edellä mainituilla menetelmillä voidaan arvioida tiivistystyön tasaisuutta, mutta todellisen työmaalla saavutetun irtotiheyden määrittämisessä on syytä käyttää harkintaa.

Koerakenteista purkautuvien vesien määrä

Koerakenteista purkautuvien laskennallisten vesimäärien perusteella vedenpaineanturilla varustetut v-kaivot eivät sovellu näin pienien vesimäärien tarkasteluun. Kaikki v-kaivot kannattaakin muuttaa umpikaivoiksi. Muutama hyvin herkästi tulviva umpikaivo kannattaa myös vaihtaa isommaksi, jotta tulvimiselta vältyttäisiin jatkossa. Kaivoon voidaan asentaa pumppu, joka tyhjentää kaivon automaattisesti sen tullessa täyteen.

Koska umpikaivot pääsivät tulvimaan useamman kerran tässä työssä tarkasteltavan seurantajakson aikana, jatkossa koerakenteista purkautuvan vesimäärän tarkastelu kannattaa aloittaa 17.4.2019 alkaen, josta lähtien kaivoja on käyty tyhjentämässä riittävän usein. Lisäksi v-kaivo U1.1 kannattaa instrumentoida tai kaivo tyhjentää umpikaivojen tyhjyyksen yhteydessä, jotta koerakenteesta U.1 saadaan selville pintavalunta. Koska kaivon vesimäärät ovat olleet pieniä, voidaan v-kaivo myös muuttaa umpikaivoksi.

Koerakenteista purkautuvien vesimäärien perusteella on syytä olettaa, että osa kaivoihin tulevista kytkennöistä ovat virheellisiä, jolloin kaivoihin tulee vesi eri rakennekerroksesta kuin on ollut tarkoituksena. Umpikaivo A2.5 täyttyy poikkeuksellisen nopeasti rankem-

pien sateiden jälkeen, mikä viittaa siihen, ettei kyseiseen kaivoon purkaudu vedet tarkkailukerroksesta. Kaivokytöntöjen selvittämiseen voidaan käyttää esimerkiksi kaivoissa olevien putkien kuvaamista tai merkkiainetta. Seurantajakson jälkeen Vahanen Environment Oy on tarkistanut koerakenteen A.2 putkivetoja valokuvien ja korkotietojen perusteella. Virheellisten kaivokytöntöjen vaikutus mittaustuloksiin tulee arvioida erikseen, joten diplomityössä esitettyihin mittaustuloksiin tulee suhtautua kriittisesti.

Koerakenteista purkautuvien vesien laatu

pH- ja sähkönjohtavuustulosten perusteella on syytä epäillä, että kaivoon 3 saattaa tulla vesi eri kerroksesta kuin on ollut tarkoituksena. Koerakenteiden A.1 ja A.2 pintakerroksista purkautuvat vedet pitää johtaa eri kaivoihin, jotta saadaan todellinen kuva eri rakenteiden kerroksista purkautuvista vesistä. Koska vesi saattaa olla peräisin eri rakennekerroksesta, tulee mittaustuloksiin suhtautua kriittisesti.

Mittaustulosten perusteella jätteenpolton kuonasta liukenee klorideja ja sulfaatteja, mikä vaikuttaa myös yläpuolisen kuivatuskerroksen veden laatuun. Tämä näkyy hyvin etenkin koerakenteen U.1 mittakaivojen mittaustuloksista. Pintakerroksen kloridi- ja sulfaattipitoisuus ovat alhaiset, mutta kuivatuskerroksessa pitoisuudet ovat moninkertaiset. Alapuo- lisen jätteenpolton kuonaa sisältävä kerros vaikuttaa yläpuolisen kuivatuskerroksen ja pintakerroksen pH-arvoon ja johtokykyyn. Osatekijänä voi olla kaivojen padottaminen tai se, että putket tulevat eri rakennekerroksesta kuin niihin on merkitty. Tämän takia koerakenteiden A.1 ja A.2 kuivatuskerroksien vedet tulisi johtaa omiin kaivoihinsa, koska todennäköisesti koerakenteen A.2 kuonabentoniitti vääristää nyt koerakenteen A.1 mittaustuloksia erityisesti vedenlaadun osalta.

Ilmastollinen kuormitus

Seurantajakson perusteella rakenteissa A.1, A.2, B.2 ja U.1 oli talven 2018-2019 pakkasmäärälle tarpeeksi paksut tiivistyskerroksia suojaavat rakennekerrokset, koska lämpötilantureilla mitattiin alle nollan asteen lämpötiloja vain kasvu- tai pintakerroksessa. Kesäkuun 2019 lopulla tiivistyskerroksista mitattu lämpötila ei ollut noussut yli 20 asteen, joten todennäköisesti tiivistyskerroksesta käytetyt materiaalit eivät ole kuivuneet lämpötilan vaikutuksesta.

Lumien sulaminen vaikuttaa paljon keväällä tapahtumaan virtaamaan, joten seuraavana talvena kannattaa mitata lumen paksuutta koerakenteiden päällä. Lumen paksuus voi osin selittää etenkin koerakenteen C.0 suurta keväistä virtausmäärää. Koska koerakenteen C.0 yläpinta on painanteessa muita koerakenteita huomattavasti alempana, koerakenteen päälle pääsee kinostumaan enemmän lunta kuin muiden koerakenteiden päälle. Siksi lumen paksuus tulee mitata koerakenteesta C.0 sekä kohdasta, joka kuvaa keskimääräistä tilannetta muilla koerakenteilla. Lumipeitteen paksuus vaikuttaa myös antureilla mitattavaan lämpötilaan.

LÄHTEET

Alenius, M. (2019). Vahanen Environment Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu 31.5. ja 3.9.2019

Aluehallintovirasto (2012). Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen ympäristöpäätös 14.12.2012, 222 s. Saatavissa: http://www.avi.fi/documents/10191/56816/esavi_paa-tos_212_2012_1-2012-12-14.pdf

ASTM D5890-11, Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners, ASTM International

Bergaya, F. & Lagaly, G. (2013). Handbook of Clay Science, Part A: Fundamentals, Elsevier, London, United Kingdom, 2nd Ed., 813 p.

Berger, K. (2018). Operational validation of HYDRUS (2D/3D) for capillary barriers using data of a 10-m tipping trough, Journal of Hydrology and Hydromechanics, Vol. 66(2), pp. 153-160.

Blight, G., Hojem, D. & Ball, J. (1992). Production of Landfill Leachate in Water-Deficient Areas. A Book Chapter in a Book: Christensen, T.H., Cossu, R. & Stegmann, R. (editors). Landfilling of Waste: Leachate, Taylor & Francis, London, United Kingdom, 656 p.

Brunner, G. (2014). Properties of Pure Water, in Hydrothermal and Supercritical Water Processes, Supercritical Fluid Science and Technology, Vol. 5, pp. 9-93.

Carlson, L. (2004). Bentonite Minerology, Working Report 2004-02, Posiva Oy, 105 p. Available: http://www.posiva.fi/files/2257/POSIVA-2004-02_Working-report_web.pdf

Cetco (2014). Bentonite CP-200RES – soil sealant. Technical data sheet

Cetco (2018). Testausraportti DN-31013104 (CP-200RES)

De Camillis, M., Di Emidio, G., Bezuijen, A. & Verástegui-Flores, R. (2016). Hydraulic conductivity and swelling ability of a polymer modified bentonite subjected to wet-dry cycles in seawater, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 44, pp. 739-749.

Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (2010). E 2-33 Kapillarsperren in Oberflächenabdichtungssystemen, 11 p.

Di Emidio, G., De Camillis, M., Bezuijen, A. & Verástegui Flores, R. (2014). Beneficial Impact of Polymer Treatment of Ca-bentonites on Long-term Hydraulic Conductivity, 10th International Conference on Geosynthetics 10ICG, Berlin, Germany, September 21-25, 2014, 5 p.

Gartung, E., Henken-Mellies, W., Kanitz, J. & Ramke, H. (2010). Geotechnical Aspects Of Landfill Closure And Aftercare, Proceedings of the International Symposium on Geoenvironmental Engineering ISGE2009, Hangzhou, China, September 8–10, 2009, pp. 188-203.

GEOMAT (2019). Drainage geocomposites, webpage. Available (referred 12th October 2019): <https://www.geomat.eu/en/drainage-geocomposites>

GrowTek (2019). Dræning: GrowTek X-drain, webpage. Available (referred 12th October 2019): <https://growtek.dk/produktinfo/draenplader/g-drain-10g-2/>

Guyonnet, D., Touze-Foltz, N., Norotte, V., Pothier, C., Didier, G., Gailhanou, H., Blanc, P. & Warmont, F. (2005). Geosynthetic Clay Liner Interaction with Leachate: Correlation between Permeability, Microstructure, and Surface Chemistry, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol 131(6), pp. 740-749.

Hartikainen, O (1978). Tielaboratorion työohjeita 396, 216 s.

Helenelund, K.V. (1974) Maarakennusmekaniikka, Otapaino, Otaniemi, 4. painos, 278 s.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä (2017). Kaatopaikan väliaikaisten pintarakenteiden vertailu- ja suunnitteluprojekti, alustava projektisuunnitelma, liite 1, 14 s.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä (2018a). Ekomo – Ämmässuon ekoteollisuuskeskus, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.6.2018): <https://www.hsy.fi:443/fi/asiantuntijalle/jatehuolto/jatteenkasittelykeskus/Sivut/default.aspx>

Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä (2018b). Metaanimittaukset Ämmässuon vanhalla kaatopaikalla 2018, 24 s.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (2019a). Puhdistamme jätevedet tehokkaasti, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.10.2019): <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/vesihuolto/jatevedenpuhdistus/Sivut/default.aspx>

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (2019b). Jätevedenpuhdistus pääkaupunkiseudulla 2018 -Viikinmäen ja Suomenojan jätevedenpuhdistamot, 23 s.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (2019c). Jättemäärät ja kierrätysaste, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 27.10.2019): https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/ilmas-tonmuutos/kiertotalous/jatemaarat_ja_kierratysaste/Sivut/default.aspx

Huhtinen, T., Palolahti, A., Räisänen, M. & Torppa, A. (2018) Kiviaineshuollon kehittäminen. Ympäristöministeriön raportteja 13/2018, Ympäristöministeriö, Helsinki, 180 s.

Hämäläinen, H. (2019). HSY. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu 2.8.2019

Infra 15-710194 (2018). Kaatopaikkarakenteet, Rakennustietosäätiö, 19 s.

InfraRYL (2018). Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Maa-, pohja- ja kalliorakenteet. Rakennustieto Oy, Helsinki, 424 s.

ISO 11265 (1994). Soil quality - Determination of the specific electrical conductivity, International Organization for Standardization, 9 p.

Jätelaitosyhdistys (2019). Energiahyödyntäminen Suomessa, verkkosivu. Saatavilla (viitattu 24.10.2019): <http://vanha.jly.fi/energia5.php?treeviewid=tree3&nodeid=5>

Jätelaki (2011). 646/2011. Saatavissa (viitattu 21.6.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>

Jääskeläinen, R. (2009). Geotekniikan perusteet, Tammertekniikka, Jyväskylä, 1. painos, 332 s.

Kaartinen T., Laine-Ylijoki, J., Koivuhuhta, A., Korhonen, T., Luukkanen, S., Mörsky, P., Neitola, R., Punkkinen, H. & Wahlström, M. (2015). Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi, VTT tiedotteita 2567, 98 s.

Karhu, K. (2019). HSY. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu 25.9.2019

Karland, O., Olsson, S. & Nilsson, U. (2006). Minerology and sealing properties of various bentonites and smectite-rich claymaterials, Technical Report TR-06-30, Svensk Kärnbränslehantering AB, 112 p. Available: <https://www.skb.se/publication/1419144/TR-06-30.pdf>

Katsumi, T., Ishimori, H., Onikata, M. & Fukagawa, R. (2008). Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 26(1), pp. 14-30. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114407000556>

Keelson, K. B. (2015). Evaluation of Landfill Cover Design Options for Waste Disposal Sites in the Coastal Regions of Ghana, International Journal of Engineering and Technology Innovation, Vol. 5(1), pp. 145-55.

Kiirikki, M. (2019a). Luode Consulting Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu 29.5.2019

Kiirikki, M. (2019b). Luode Consulting Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, diplomityön tulosten esittelytilaisuus 12.9.2019

Kiirikki, M. (2019c). Luode Consulting Oy. Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu 19.9.2019

Kinnunen, V. (2017). Bentoniitti-moreeniseoksen soveltuvuus kaatopaikan pohja- ja pintarakenteena, opinnäytetyö, 37 s.

Kolstad, D.C., Benson, C.H. & Edil, T.B. (2004). Hydraulic Conductivity and Swell of Nonprehydrated Geosynthetic Clay Liners Permeated with Multispecies Inorganic Solutions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 130(12), pp. 1236-1249. Available: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:12\(1236\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1236))

Kontturi, H (2016). Pääkaupunkiseudun seka- ja biojätteen koostumus vuonna 2015, Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymä, 83 s. Saatavissa: https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Raportit/Ammassuon_jatteenkasittelykeskuksen_toiminta_2018.pdf

Korhonen, T., Kuisma-Granvik, S. & Uuksulainen, J. (2019). Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen toiminta vuonna 2018, Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, 77 p. Saatavissa: https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Raportit/ammassuon_jatteenkasittelykeskuksen_toiminta_vuonna_2017.pdf

Kukkamäki, M. (julkaisuhetki tuntematon). Pilaantuneen maaperän puhdistaminen. www.rakennustieto.fi. Saatavissa (viitattu 12.10.2019): https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwjF1O2UupflAhV0wsQBHTzdB2kQFjAAegQIA-RAC&url=https%3A%2F%2Fwww.rakennustieto.fi%2FDownloads%2FRK%2FRK010503.pdf&usg=AOvVaw2_OKNwX3LmhvM5eYawwSXA

Kurikkala, K. (2018). Jätteenpolton kuonan hyödyntäminen kaatopaikan väliaikaisissa pintarakenteissa. Diplomityö, Oulun yliopisto, 102 s.

Kämpf, M., Holfelder, T. & Montenegro, H. (2003). Identification and parameterization of flow processes in artificial capillary barriers, *Water Resources Research*, Vol. 39(10), pp. 1276-1284. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2002WR001860>

Kämpf, M. & Montenegro, H. (1997). On the performance of capillary barriers as landfill cover, *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 1(4), pp. 925-929.

Mitchell, J.K. & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, United States of America, 3rd Ed., 577 p.

Laine-Ylijoki, J., Mroueh, U.-M., Vahanne, P., Wahlström, M., Vestola, E., Salonen, S., & Havukainen, J. (2005). Yhdyskuntajätteiden termisen käsittelyn kuonista ja tuhkista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita – kansainvälinen esiselvitys. VTT Tiedotteita 2291, 90 s.

Latvala, J. (2019). Henkilökohtainen tiedonanto, sähköpostikeskustelu 5.9.2019

Leppänen, M. (2018). Kuonabentonitiikkoerakenteen toiminnan arviointi. Havainnot 4.5.2017 ja alustavia tuloksia, HSY:n kuonaseminaari, Ämmässuo, 11.12.2018

Leppänen, M., Sarkkila, J., Hämäläinen, H. & Rinkinen, J. (2018). Technical Suitability of the Fine Fraction of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash to the Landfill

Capping Liner, Proceedings of the 10th International Conference on the Environmental and Technical Implications of Construction with Alternative Materials WASCON 2018, Tampere, Finland, June 6–8, 2018, pp. 168-175.

Lounavoima (2019). Ekovoimalaitos Salon Korvenmäkeen, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 24.10.2019): <https://www.lounavoima.fi/usein-kysytyt-kysymykset/>

Mogk, D. Mineralogy, Petrology, and Geochemistry Across the Curriculum: Teaching Clay Mineralogy, webpage. Available (referred 28th June 2018): https://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/mineralogy/clay_mineralogy.html

Moisio, T. (2009). Tältä näyttää Pohjoismaiden suurin kaatopaikka, Helsingin Sanomat, verkkouutinen. Saatavissa (viitattu 19.6.2018) <https://www.hs.fi/hstv/uutiset/art-2000002937447.html?share=2296f42851f0db79747917fa12d53599>

Naue (2019). Geosynthetic Clay Liner (GCL) BENTOFIX – the Bentonite liner, webpage. Available (referred 24th October 2019): <https://www.naue.com/naue-geosynthetic/geosynthetic-clay-liner-bentofix/>

Nave, R. Capillary Action, webpage. Available (referred 24th June 2018): <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/surten2.html>

Pfeiffer, B.M. (2006). Vergleichende Untersuchungen von Kapillarsperren aus Natur- und Recyclingbaustoffmaterialien als Beitrag zur Deponieoberflächenabdichtung und Ressourcenschonung, Dissertation, Justus-Liebig-Universität, Gießen, 197 s. Saatavissa: <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2006/3577/pdf/PfeifferBirte-2006-02-17.pdf>

Parent, S. & Cabral, A. (2006). Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect, Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 24(3), pp. 689-710. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-005-3229-9>

Puma, S., Marchese, F., Dominijanni, A. & Manassero, M. (2013). Reuse of MSWI bottom ash mixed with natural sodium bentonite as landfill cover material, Waste Management and Research, Vol. 31(6), pp. 577-584.

Qian, X., Koerner, R.M. & Gray, D.H. (2002). Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction, Prentice Hall, New Jersey, US, 717 p.

Rahardjo, H., Santoso, V.A., Leong, E.C., Ng, Y.S. & Hua, C.J. (2012). Performance of an Instrumented Slope Covered by a Capillary Barrier System, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 138(4), pp. 481-490. Available: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000600](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000600)

Ramboll (2018a). Koekenttien rakentaminen - suunnitelmapaketti 1:200

Ramboll (2018b). Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus, rakennusurakka 16810, kaatopaikan pintarakenteen koekentät. Työkohtainen työselitys 23.2.2018, 24 s.

Ramboll (2018c). Helsingin seudun ympäristöpalvelut - Kuonaohjeen mukaiset vertailutestit, tekninen kelpoisuus- väliraportti, 11 s.

Ramboll (2018d). Jätteenpolton kuonan materiaalitutkimukset – kuonajakeiden liukoisuudet ja pitoisuudet, 20 s.

RIL 261–2013 (2013). Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 257 s.

Ross, B. (1990). The Diversion Capacity of Capillary Barriers, *Water Resources Research*, Vol. 26(10), pp. 2625-2629. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abstract>

Ross, J.D. & Rowland, M.G. (2017). GCL Chemical Compatibility Testing with CCR Landfill Leachate, Proceedings of 2017 World of Coal ASH (WOCA) Conference, Lexington, Kentucky, United States of America, May 9–11, 2017, pp. 1-9.

SFS-ISO 10390 (2007). Soil quality. Determination of pH, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 14 s.

SFS-EN ISO 17892-11 (2019). Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 11: Permeability tests, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 27 p.

SFS-EN 1097-5 (2008). Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 5: Kosteuspitoisuuden määrittäminen kuivaamalla tuuletetussa lämpökaapissa, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 12 s.

SFS-EN 1097-6 (2014). Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimukyvyn määrittäminen, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 47 s.

SFS-EN 1744-7 (2012). Test for Chemical Properties of Aggregates. Part 7: Determination of Loss of Ignition of Municipal Incinerator Bottom Ash Aggregate (MIBA Aggregate)

SFS-EN 933-1 (2012). Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä, Suomen Standardisoimisliitto SFS, Helsinki, 18 s.

Simon, F. & Müller, W.W. (2004). Standard and alternative landfill capping design in Germany, *Environmental Science & Policy*, Vol. 7(4), pp. 277-290. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1462901104000577>

Studel, A., Mehl, D. & Emmerich K. (2013). Simultaneous thermal analysis of different bentonite–sodium carbonate systems: an attempt to distinguish alkali-activate bentonites from raw materials, *Clay Minerals*, Vol 48(1), pp. 117-128.

Stormont, J.C. & Morris, C.E. (1997). Unsaturated Drainage Layers for Diversion of Infiltrating Water, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 123(5), pp. 364-366. Available: <http://ro.uow.edu.au/engpapers/347>

Suomen Erityisjäte (2017). Jätteenpolton pohjakuona – ohje materiaalin hyödyntämiseen maarakentamisessa (1/2018), 2. painos, 42 s.

Suomen Vesilaitosyhdistys (2017). Yhdyskuntalietteen käsittelyn ja hyödyntämisen nykytilannekatsaus, Helsinki 2017, 38 s.

Suomen ympäristökeskus (1998). Kaatopaikan tiivistysrakenteet, Helsinki, 141 s.

Suomen ympäristökeskus (2001a). Kaatopaikkojen lopettamisopas, Helsinki, 109 s.

Suomen ympäristökeskus (2001b). Maaperän ja pohjaveden kunnostus - Yleisimpien menetelmien esittely, Helsinki, 51 s.

Troxler Electronic Laboratories, Inc. (2006). Manual of Operation and Instruction – Model 3430 – Surface Moisture-Density Gauge. Available: <https://www.troxler-labs.com/downloads/pdfs/3430/3430manual.pdf>

Uuksulainen, J., Korhonen, T. & Järvensivu, R. (2018). Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen toiminta vuonna 2017, Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä, 77 p. Saatavissa: https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Raportit/ammassuon_jatteenkasittelykeskuksen_toiminta_vuonna_2017.pdf

Vaara, P. (2011). Ylijäämämassojen vastaanotto palvelutoimintana pääkaupunkiseudulla -hankintaklinikka. Loppuraportti 31.5.2011, Asunto-, toimitila- ja rakennuttajaliitto RAKLI ry, 19 s. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/4888/Ylijaamamassojen_vastaanotto_palvelutoimintana_paakaupunkiseudulla_hankintaklinikka_Loppuraportti_2011.pdf

Vahnen (2019a). Kaivokaavio – Koepintarakenteet, R1 alue. Kaivot ja instrumentit

Vahnen (2019b). Koerakenteiden vesinäytteseuranta ja tulokset. Kokous HSY 12.9.2019

Vahnen (2018a). Valvontaraportti 22.-24.8.2018

Vahnen (2018b). Valvontaraportti 27.-31.8.2018

Vahnen (2018c). Valvontaraportti 3.-7.9.2018

Vahnen (2018d). Valvontaraportti 10.-14.9.2018

Vahnen (2018e). Valvontaraportti 17.-21.9.2018

van Olphen, H. (1977). An Introduction to Clay Colloid Chemistry for Clay Technologists, Geologists and Soil Scientists, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 2nd Ed., 318 p.

Vento, M. (2019). Maamassat laitetaan nyt kiertoon koordinoitusti, Kuntatekniikka, 3/2019. Saatavissa (viitattu 27.10.2019): <https://kuntatekniikka.fi/2019/08/20/maamassat-laitetaan-nyt-kiertoon-koordinoitusti/>

Vitomittaus (2018). Mittaussuunnitelma - Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus, Rakennusurakka 16850

VNa 179/2012, Valtioneuvoston asetus jätteistä (2012). Saatavissa (viitattu 13.8.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2012/20120179>

VNa 331/2013, Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (2013). Saatavissa (viitattu 26.6.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130331>

VNa 103/2015, Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta (2015). Saatavissa (viitattu 26.6.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150103>

VNa 960/2016, Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista annetun valtioneuvoston asetuksen 36 §:n muuttamisesta (2016). Saatavissa (viitattu 26.6.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20160960>

VNa 214/2007, Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (2007). Saatavissa (viitattu 16.6.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20070214>

VNa 713/2014, Valtioneuvoston asetus ympäristönsuojelusta (2014). Saatavissa (viitattu 26.6.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140713>

Wypych, G. (2016). Handbook of Fillers, ChemTec Publishing, Ontario, Canada, 4th Ed., 938 p.

Ympäristöministeriö (2008). Kaatopaikkojen käytöstä poistaminen ja jälkihoito. Ympäristöhallinnon ohjeita 1/2008. Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 155 s.

YSL 527/2014, Ympäristönsuojelulaki (2014). Saatavissa (viitattu 19.6.2018): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527>

Zhan, T., Chen, Y. & Tang, X. (2010). A Preliminary Understanding on Performance of Barriers for MSW Landfills in Southern China, Proceedings of the International Symposium on Geoenvironmental Engineering ISGE2009, Hangzhou, China, September 8–10, 2009, pp. 380-394.

ZTM (2019). Sand Cone Test, website. Available (referred 4th November 2019): <http://zeminteknolojileri.com/en/activity.asp?p=66&q=45>

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DCS04318 Kaivanto putkille (22.8.2019)



DSC04322 Kalvon alle tulevan suojageotekstiilin putsaaminen



DCS04338 Pohjan tiivistäminen



DSC04347 Läpivientielementin valmistus – hionta ennen saumausta

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



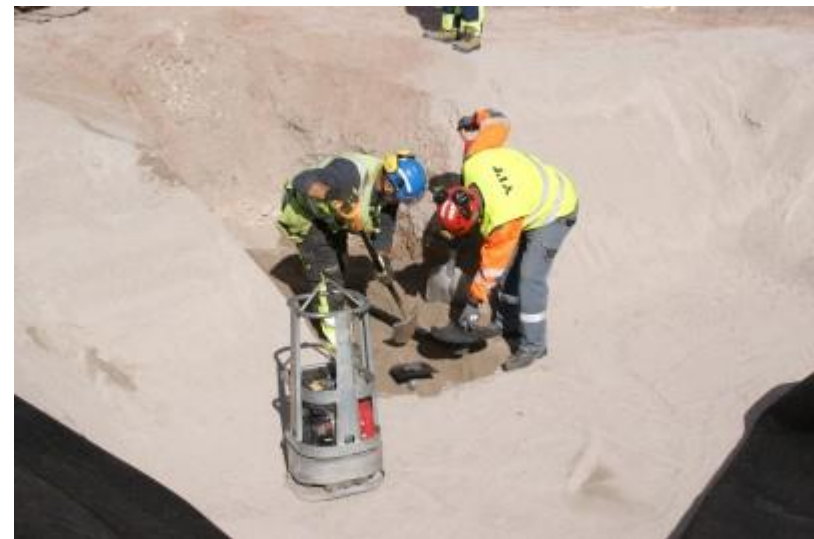
DSC04349 Läpivientielementin valmistus – ekstruusiosausaus



DSC04358 Läpivientielementin valmistus – kipinätesti



DSC04364 Putkikaivannon lätkäys



DSC04368 Putkien asennut



DSC04376 Putkien asennus



DSC4376 Rullien väliaikaisvarastointi työmaalla



DSC04391 Bentoniittimatton asentaminen luiskan pätyyn



DSC04403 Läpivientien tiivistäminen bentoniittijauheella ja -matolla

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04408 Pohjakalvon levittäminen



DSC04422 Pohjakalvon tukeminen rullilla



DCS04429 Koekaksoissaumaus



DSC04437 Kaksoissauman kuorintakoe

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen



DSC04442 päädyn avaaminen uudestaan (1 läpivienti puuttui)



DSC04451 Päädyn tiivistäminen uudelleen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04446 Kolmas läpivienti lisätty pohjalle



DSC04456 Päädyn bentoniittimaton uudelleen levitys



DSC04462 Läpivientien tiivistäminen uudelleen



DSC04467 Tiivistetyt läpiviennit



DSC04473 Pohjakalvo levitetään uudelleen



DSC04476 Pohjimmaisena läpiviennin avaaminen saumauksen ajaksi



DSC04480 Lämpiviennit ennen saumausta



DSC04482 Pohjakalvon kiinnittäminen läpivientiin



DSC04487 Lämpiviennin reunojen hionta



DSC04492 Kuparilangan kiinnittäminen läpivientiin



DSC04498 Läpiviennin ekstruusiosauhaus



DSC04508 Läpiviennin ekstruusiosauaman kipinäkoe



DSC04518 Kipinäkoe päädyn läpiviennissä



DSC04526 Päädyn läpivienti ja sen alla oleva paikka



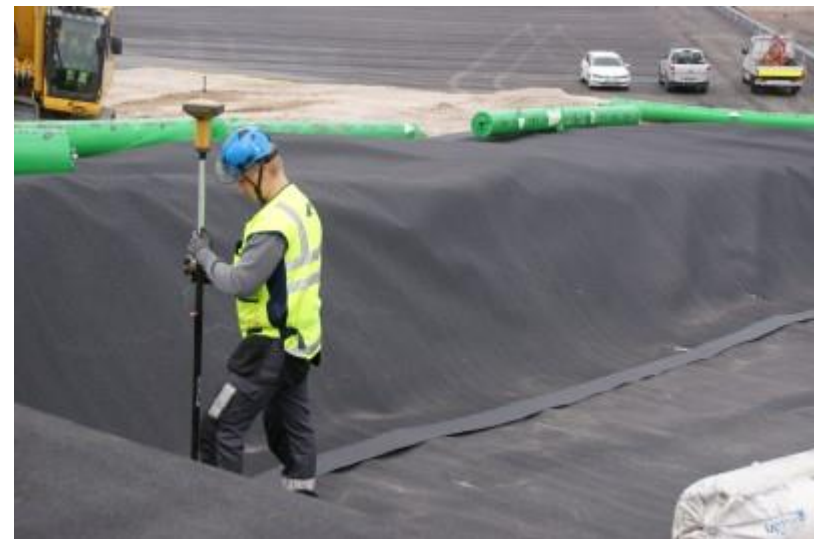
DSC04531 Valmiit läpiviennit seuraavana päivänä (23.8.2018)



DSC04533 Työmaa edellisen päivän jäljiltä



DSC04543 Tiivistyskalvon levitys ja limitys



DSC04548 Saumat tarkemittaus



DSC0455 Hitsauskone



DSC04548 Kaksoissaumaus



DSC04569 Valmis sauma



DSC04572 Paineekoe

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen



DSC04573 Painekeo



DSC04585 Näytesauma kokeen jälkeen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04577 Kuorintakoe tehdyn sauman päästä



DSC04594 Väliaikainen tuenta ja pohjakalvon lakaiseminen

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04599 Salaojamatton levittäminen



DSC04617 Salaojamattojen ytimien kiinnittäminen nippusiteillä



DSC04622 Salaojamatton tarkemittaus



DSC04625 Läpiviennit salaojamatton läpi

Liite 1
Koerakenteen A.1 rakentaminen



DSC04629 Bentoniittimatto matkalla varastokasalta työmaalle



DSC04649 Bentoniittimatto

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04643 Bentoniittimaton levittäminen



DSC04651 Läpiviennit

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04653 Bentoniittimatto



DSC04556 Bentoniittimattokaistaleen asentaminen päättyyn



DSC04558 Bentoniittimattokaistaleen asentaminen päättyyn



DSC04663 Bentoniittimaton reunojen tiivistäminen bentoniitilla

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen



DSC04664 Pintakerroksen vedet kaivoon keräävä salaojaputki



Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita

DSC04666 Kuivatuskerroksen salaojamatto bentoniittimaton päällä



DSC04679 Pintakerroksen Hki-moreenin tiivistäminen kauhalla painelemalla



DSC04680 Anturin asentaminen ja anturin tarkemittaus

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen



DSC04685 Troxler-mittaus



DSC04688 Pintakerroksen päälle asennetun kalvokaistaleen kiinnitys



DSC04692 Kasvukerroksen vedet keräävä salaojaputki



DSC04697 Valmis pintakerros seuraavana päivänä (24.8.2018)



DSC4702 Vesivolymetrin varren lukema



DSC04703 Vesivolymetri



DSC04704 Vesivolymetrin kuoppa



DSC04708 Vesivolymetrin kiinnittäminen alustaan

Liite 1
Koerakenteen A.1 rakentaminen



DSC04716 Vesivolymetrin kuoppa



20180824_114209 Troxler-mittaus vesivolymetrin vierestä (Leppänen 2018)

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



20180824_110320 Kenttäkokeiden tarkemittaus (Leppänen 2018)



20180824_132445 Rullatuotteiden välivarastointi työmaalla

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen



DSC04720 Painunut nurkka



DSC04747 Painunut nurkka viikonlopun jälkeen (27.8.2018)



DSC04751 Valmiin pintakerroksen pinta sateen jälkeen



DSC04753 Valmiin pintakerroksen pinta sateen jälkeen

Liite 1
Koerakenteen A.1 rakentaminen



DSC04761 Penkan avaaminen putkien jatkamiseksi



115343 Valmis kasvukerros 10.9.2018 (Vahnen 2018)

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04778 Putkien jatkaminen



P4091260 Kasvukerros 9.4.2019 (Reiman 2019)

Liite 1

Koerakenteen A.1 rakentaminen



P4091265 Lähikuva kasvukerroksesta 9.4.2019 (Reiman 2019)



P4091341 Koepintarakenteiden A.2 ja A.1 välinen reunavalli

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



P4091331 Koepintarakenteiden A.1 ja A.2 kaivot (Reiman 2019)



13.6.2019 Kentän viherpeittävyys (Hämäläinen 2019)

Liite 2

Koerakenteen A.2 rakentaminen



DSC04733 Kentän pohjan muotoilu 24.8.2018

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04713 A.2 ja B.2 välisen välipenkereen tiivistäminen



DSC04726 A.2 ja B.2 välisen välipenkereen Troxler-mittaus (rakennustavan tarkastus)



DSC04790 Koekentän pohjan tiivistys (27.8.2018)



DSC04804 Luiskan muotoilu



DSC04814 Kaivanto kaivoihin meneville putkille



DSC04815 Valmiin välipenkereen pinta



DSC04824 Putkikaivannon tiivistäminen



DSC04831 Putkien asentaminen tiivistetylle pohjalle



DSC04833 Putken tason tarkastus



DSC04834 Putkien asentaminen



DSC04841 Suojageotekstiilin levittäminen luiskaan



DSC04845 Suojageotekstiilin levittäminen kentän pohjalla



DSC0450 Suojageotekstiilin levittäminen



DSC04855 Luiska ja pohja geotekstiilin levittäminen jälkeen



DSC04858 Suojageotekstiilien kiinnittäminen toisiinsa

Liite 2
Koerakenteen A.2 rakentaminen



DSC04861 Suojageotekstiilin puhdistaminen



DSC04868 Suojageotekstiilin levittäminen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC04864 Suojageotekstiilin asetteleminen



DSC04872 Suojageotekstiilin nurkan muotoileminen



DSC04874 Valmiit suojageotekstiilit



DSC04877 Valmiit putket ja pohjan läpivienti



DSC04881 Bentoniittimaton levittäminen päättyyn



DSC04891 Läpivientien tekeminen bentoniittimattoon



DSC04895 Läpivientien paikkaaminen



DSC04900 Läpivientien kaulukset



DSC04902 Bentoniittimatton reunojen tiivistäminen bentoniittijauheella



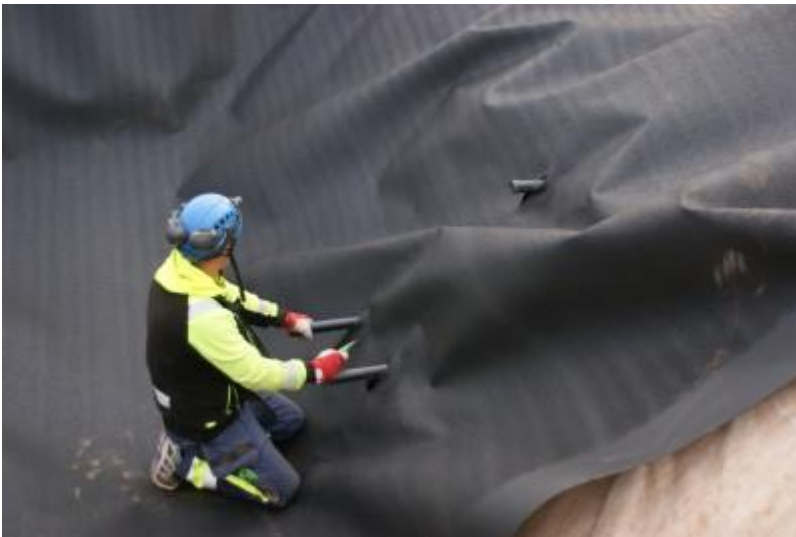
DSC04914 Pohjakalvon levittäminen



DSC04919 Pohjakalvon nurkan asetteleminen



DSC04922 Suojageotekstiilin muotoilu pohjakalvon alla



DSC04933 Putkien läpiviennit pohjakalvosta



DSC04940 Suojageotekstiilien kiinnittäminen toisiinsa



DSC04943 Pohjakalvon levittäminen



DSC04948 Pohjakalvon limittäminen



DSC04960 Pohjakalvon kaksoissaumaus



DSC04965 Kaksoissaumaus yläluiskassa



DSC04982 Pohjan läpiviennin ekstruusiosausaus



DSC04984 Ekstruusiosausaman kipinäko



DSC04993 Pohjakalvon väliaikainen tuenta



DSC04994 Kaksoissauman painekoe (28.8.2018)



DSC04997 Kuonabentoniitin sekoitusasema



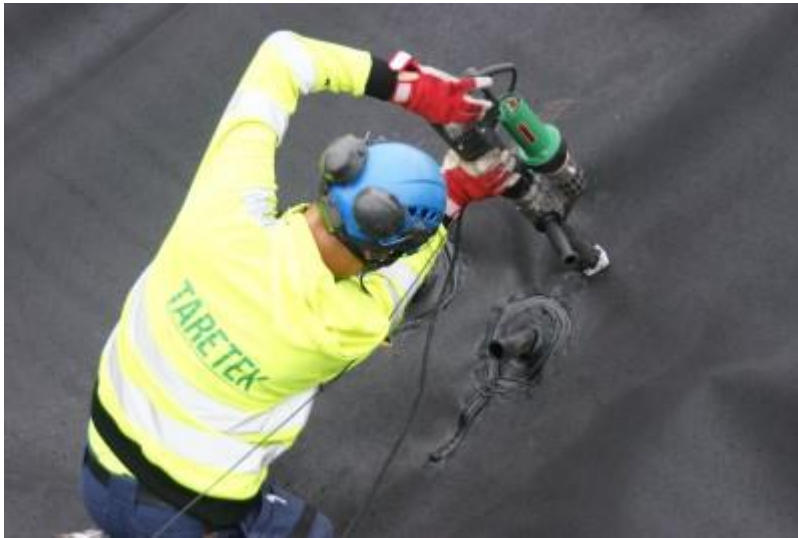
DSC04998 Kuonabentoniitin varastokasa työmaalla



DSC05007 Kaksoissauman paikkaaminen ekstruusiosaumauksella päädyssä



DSC05008 Tarkemittaus



DSC05012 Läpiviennin ekstruusiosauhaus



DSC05015 Tarkastelukerroksen salaojamaton levitys



DSC05019 Salaojamaton ytimien kiinnittäminen nippusiteillä



DSC05035 Kuonabentoniitin levittäminen. Luiskissa suodatinkangas



DSC05040 Kuonabentoniitin levittäminen



DSC05045 Kuonabentoniitin koetiivistys, 1. jyräys



DSC05046 Urakoitsijan 1. jyräyksen troxler-mittaus



DSC05047 Riippumattoman laadunvalvojan 1. jyräyksen troxler



DSC05050 Kuonabentoniitin koetiivistys, 2. jyräys



DSC05056 Läpivienti ja sen viereinen paikkaus, kuparilangan asennus



DSC05053 2. jyräyksen jälkeinen troxler-mittaukset



DSC05058 Kuonabentoniitin koetiivistys, pinta 3. jyräyksen jälkeen



DSC05059 3. jyräyksen jälkeinen troxler-mittaus



DSC05062 Vesivolymetrin kuoppa



DSC05063 Vesivolymetrimittaus



DSC05066 Kuonabentoniitin pinnan karhentaminen



DSC05068 Kuonabentoniitin levittäminen lopulliseen kerrospaksuuteen



DSC05069 Reunojen ja keskiosan tiivistäminen



DSC05072 Yhdistelmäanturin asentaminen kuonabentoniittiin



DSC05073 Yhdistelmäanturin tarkemittaus



DSC05074 Yhdistelmäanturi



DSC05079 Kuonabentoniitin valmis pinta ja troxler-mittaus



DSC05077 Yhdistelmäanturit



DSC05082 Kuivatuskerroksen salaojamaton levittäminen



DSC05084 Liian kapea salaojamatto



DSC05088 Oikean levyinen salaojamatto (29.8.2018)



DSC05089 Salaojamaton ytimien kiinnittäminen toisiinsa



DSC05092 Mattojen väliaikainen tuenta



DSC05092 Putkien päät penkassa



DSC05100 Vedet salaojamaton alta keräävä salaojaputki



DSC05103 Pintakerroksen vedet keräävä salaojaputki



DSC05104 Pintakerroksen tiivistäminen kauhalla painelemalla



DSC05106 Pintakerros, Helsinki-moreeni 400 mm korkeudessa



DSC05109 Pintakerroksen tiivistäminen



DSC05110 Läpivientien putket



DSC05115 Helsinki-moreeni loppui kesken (30.8.2018)

Liite 2
Koerakenteen A.2 rakentaminen



DSC05117 Kasvukerroskseen läpivienti, ei vielä kasvukerrosta



P4091264 Kasvukerros 9.4.2019 (Reiman 2019)

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



115355 Valmis kasvukerros 10.9.2018 (Vahänen 2018)



P4091338 Kasvukerros 9.4.2019 (Reiman 2019)

Liite 2

Koerakenteen A.2 rakentaminen



P4091343 Päätyvalli 9.4.2019 (Reiman 2019)

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



P4091341 Koepintarakenteiden A.2 ja A.1 välinen reunavalli



P4091331 Koepintarakenteiden A.1 ja A.2 kaivot 9.4.2019 (Reiman 2019)



P4091265 Lähikuva kasvukerroksesta 9.4.2019 (Reiman 2019)

Liite 2

Koerakenteen A.2 rakentaminen



13.6.2019 Kentän viherpeittävyys (Hämäläinen 2019)

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



DSC05116 Altaan muotoilu ja B.2 ja C.0 välinen ajotie (30.8.2018)



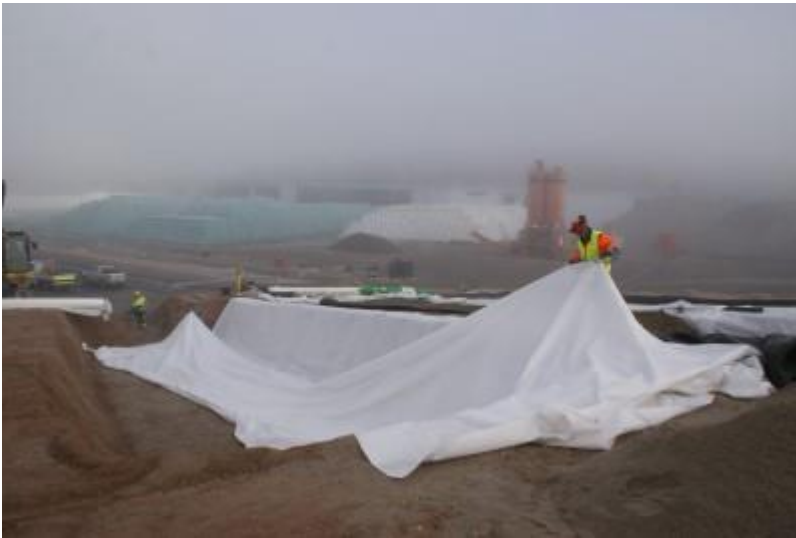
DSC05131 Altaan valmis pohja



DSC05129 Suodatinkankaan levittäminen suojageotekstiilin sijasta



DSC05136 Suodatinkankaan putsaaminen



DSC05137 Toisen suodatinkankaan laittaminen toisen päälle (200g/m² per tekstiili)



DSC05139 Altaan sivuluiska



DSC05142 Suodatinkankaan limitys



DSC05147 Valmis suodatinkangas



DSC05145 Putkikaivanto



DSC05146 Läpivientien putket



DSC05149 Putkien asentaminen



DSC05150 Putkikaivannon tiivistäminen



DSC05157 Putket



DSC05158 Putkien etäisyyden tarkistaminen



DSC05160 Penkan läpiviennit



DSC05161 Päädyn bentoniittimaton asentaminen



DSC05167 Lävivientien tiivistäminen bentoniittimattokaistaleilla ja -jauheella



DSC05172 Lävivientien kauluksien asentaminen



DSC05173 Lävivientien tarkemittaus



DSC05175 Pohjakalvon levittäminen



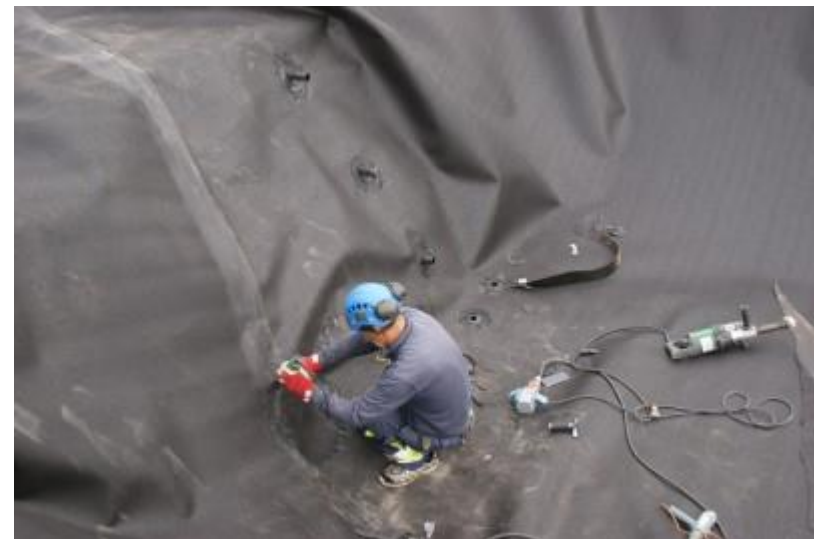
DSC05178 Pohjajalvojen limittäminen



DSC05180 Testisaumaus



DSC05183 Kaksoissaumaus



DSC05186 Kuparilangan asentaminen paikkauksiin ja läpivienteihin



DSC05188 Paikka



DSC05190 Paikan tarkemittaus



DSC05191 Lämpiviennin ekstruusiosausaus



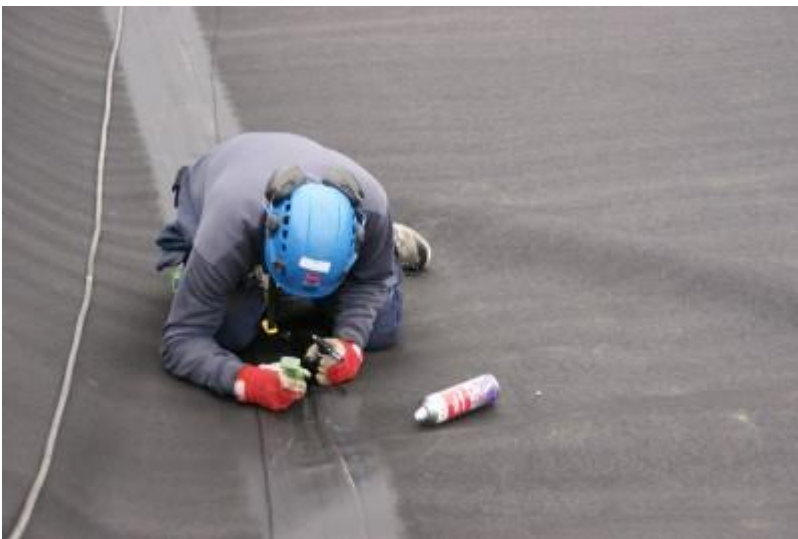
DSC05195 Lämpiviennin kipinätesti



DSC051 Paikan kipinätesti



DSC05204 Paine-koe



DSC05206 Kaksoissauman paikkaus



DSC05207 Uusi paine-koe



DSC05209 Pohjakalvon väliaikainen tuenta



081634 Salaojamattojen yhdistäminen 3.9.2018 (Vahanen 2018)



083236 Tarkkailukerroksen salaojamatton tarkemittaus (Vahanen 2018)



141923 Kapillaarikatkon kuonan levittäminen (Vahanen 2018)



160740 Kapillaarikatkon instrumentointi (Vahnen 2018)



125731 Kapillaarieristeen instrumentit 4.9.2018 (Vahnen 2018)



140304 Kapillaarieristeen instrumentit 4.9.2018 (Vahnen 2018)



161932 Vesivolymetrin kuoppa kapillaarieristeessä (Vahnen 2018)

Liite 3

Koerakenteen B.2 rakentaminen

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



162304 Kuivatuskerroksessa käytettävä kuona 12/35 mm (Vahanan 2018)



171354 Kuonan 12/35 mm levittäminen (Vahanan 2018)



100434 Valmis kuivatuskerros 5.9.2018 (Vahanan 2018)



101622 Kuivatuskerroksen vesivolymetri (Vahanan 2018)



083431 Kuivatuskerroksen päällä salaojamatto, vaihdettu suodatinkankaaseen myöhemmin (Vahnen 2018)



115410 Valmis pintakerros Helsinki-moreenista 10.9.2018 (Vahnen 2018)



083456 Pintakerroksen vedet keräävä salaojaputki (Vahnen 2018)



115418 Pintakerros 10.9.2018 (Vahnen 2018)

Liite 3

Koerakenteen B.2 rakentaminen



152157 Pintakerroksen ja kuivatuskerroksen välisen salaojamaton vaihtaminen suodatinkankaaseen 13.9.2018 (Vahnen 2018)



P4091272 Pintakerros 9.4.2019 (Reiman 2019)

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita



20181002_174517 Pintavalunnan linjakuivatuskouru (Hämäläinen 2018)



P4091337 Pintakerros 9.4.2019 (Reiman 2019)

Liite 3

Koerakenteen B.2 rakentaminen



P4091344 B.2 ja A.2 välinen pengerrus (Reiman 2019)



P4091346 Alapääty (Reiman 2019)



13.6.2019 Kentän viherpeittävyys (Hämäläinen 2019)

Kuvat Reiman 2018, jos ei toisin mainita

Liite 4
Koerakenteen C.0 rakentaminen



DSC05210 Altaan muotoilu 31.8.2018 (Reiman 2018)



113715 Kaksi päällekkäistä suodatinkangasta suojageotekstiilin tilalla 3.9.2018 (Vahanen 2018)



125800 Läpivientien saaminen päädyn bentoniittimaton läpi (Vahanen 2018)



135119 Pohjakalvo (Vahanen 2018)

Liite 4
Koerakenteen C.0 rakentaminen



141704 Kaksoissaumaus (Vahnen 2018)



144514 Lävivientien hiotut reunat (Vahnen 2018)



150846 Lävivientien ekstruusiosaumojen kipinätestaus (Vahnen 2018)



134848 Valmis koepintarakenne 5.9.2018 (Vahnen 2018)

Liite 4
Koerakenteen C.0 rakentaminen



161932 Koekentän kaivot 19.9.2018 (Leppänen 2018)



162013 Putkien liitos 19.9.2018 (Leppänen 2018)



P4091273 Koepintarakenne 9.4.2019 (Reiman 2019)



P4091334 Rakenteen päälle olevaa lunta 9.4.2019 (Reiman 2019)

Liite 4

Koerakenteen C.0 rakentaminen



P4091336 Koepintarakenne 9.4.2019 (Reiman 2019)



13.6.2019 Kentän viherpeittävyys (Hämäläinen 2019)

Liite 5
Koerakenteen U.1 rakentaminen



115438 Keskeneräinen allas 10.9.2019 (Vahanen 2018)



121709 Suodatinkankaan puhdistaminen 13.9.2018 (Vahanen 2018)



123158 Päädyn bentoniittimatto ja läpiviennit (Vahanen 2018)



123244 Suodatinkangas ennen pohjakalvon levittämistä (Vahanen 2018)

Liite 5
Koerakenteen U.1 rakentaminen



132135 Pohjakalvon kaksoissaumaus (Vahanen 2018)



134556 Läpiviennin ekstruusiossaumaus (Vahanen 2018)



135031 Kaksoissauman painekoe (Vahanen 2018)



135810 Läpiviennin kipinäkoe 13.9.2018 (Vahanen 2018)

Liite 5
Koerakenteen U.1 rakentaminen



115433 Bitumikuonan levittäminen 19.9.2018 (Vahanen 2018)



122012 Bitumikuonan tiivistäminen jyrällä. Luiskan alapää täyttämättä antureiden asentamista varten (Vahanen 2018)



150801 Bitumikuonan varastokasa 19.9.2019 (Leppänen 2018)



151140 Läpiviennit (Leppänen 2018)

Liite 5
Koerakenteen U.1 rakentaminen



151802 Urakoitsija tekemässä hiekkavolyometriä (Leppänen 2018)



151817 Hiekkavolyometri (Leppänen 2018)



151847 Hiekkavolyometri tehty troxler-mittauksen vierestä (Leppänen 2018)



151806 Rakenteen avaaminen antureita varten (Leppänen 2018)

Liite 5
Koerakenteen U.1 rakentaminen



153203 Anturin asennus, mittamies valmiina kuopan vieressä (Vahanen 2018)



160412 Anturin peittäminen (Vahanen 2018)



140713 Urakoitsijan troxler-mittaus (Vahanen 2018)



161726 Hiekkavolymerien näytekohdat (Leppänen 2018)

Liite 5
Koerakenteen U.1 rakentaminen



17.27.14 Vesivolymetri troxlerin ja hiekkavolymetrin vierestä (Leppänen 2018)



17.38.09 Toinen vesivolymetri troxlerin ja hiekkavolymetrin vierestä (Leppänen 2018)



140423 Salaojamattojen yhdistäminen 20.9.2018 (Vahnen 2018)



140505 Yhdistämiseen käytetty nippusiteitä (Vahnen 2018)

Liite 5
Koerakenteen U.1 rakentaminen



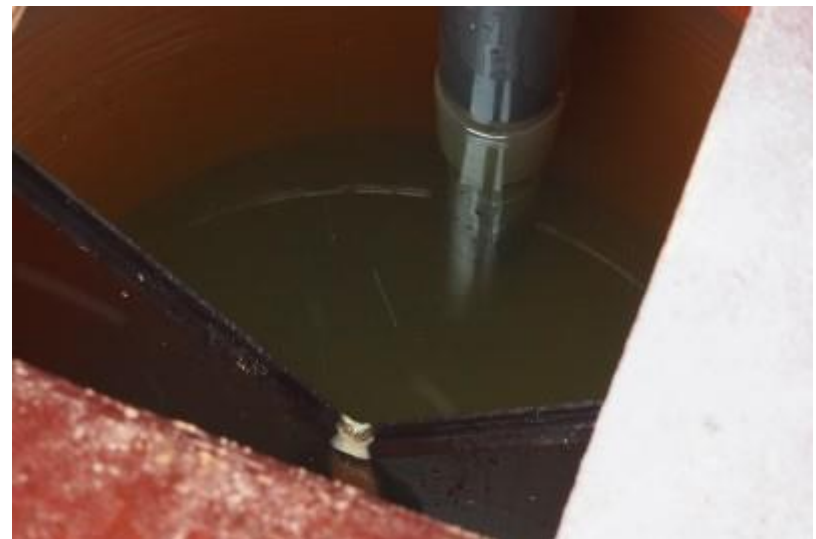
115706 Koekentän pintakerros 21.9.2018 (Vahanen 2018)



P4091274 Pintakerros 9.4.2019 (Reiman 2019)



P4091275 Koekentän kaivot 9.4.2019 (Reiman 2019)



P4091283 Koekentän v-kaivon v-aukko, sakkaa? (Reiman 2019)

Liite 5
Koerakenteen U.1 rakentaminen



P4091335 Koekenttä U.1 (Reiman 2019)



13.6.2019 Kentän viherpeittävyys (Hämäläinen 2019)



P4091249 Happipitoisuuden mittaaminen kenttämittarilla. Näyte otettiin sekoittamattomasta kaivovedestä



P4091266 Kaivon sekoittaminen happinäytteen ottamisen jälkeen



P4091296 Näytteen kaataminen näytteenottimesta



P4091310 Piripintaan täytetty näytepullo



P4091313 DOC-näyte



P4091317 Kaivon sekoittaminen



P4091324 Ammonium-näyte



P4091327 TDS-näyte



P4091331 Koekenttien A.1 ja A.2 kaivot



P4091283 Koekentän U.1 v-kaivo, v-aukossa sakkaa?



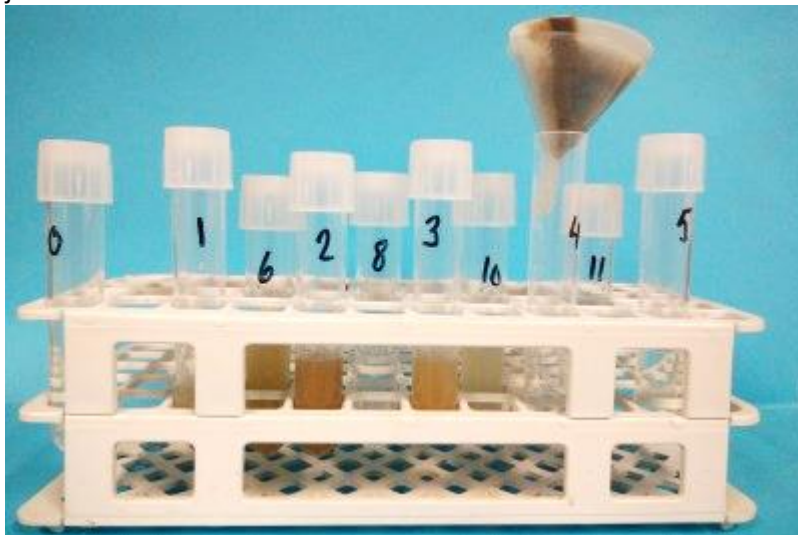
Kiintotiheys: koepintarakenteen A.2 pintakerroksen Hki-moreenin > 16 mm fraktio



Kiintotiheys: koepintarakenteen C.0 Helsinki-moreenin > 16 mm fraktio



Kiintotiheys: kuonien testinäytteet. 16 kuona 12/35 mm 4/16 jae, 18 kuona 12/35 mm > 16 mm jae, A kuona 0/5 mm 0/4 jae & B kuona 5/12 mm 4/16 jae



Johtokykykynäytteiden suodattaminen



Kiintotiheys: kuonafraktio 12/35 mm, jae 4/16 pyknometrissä

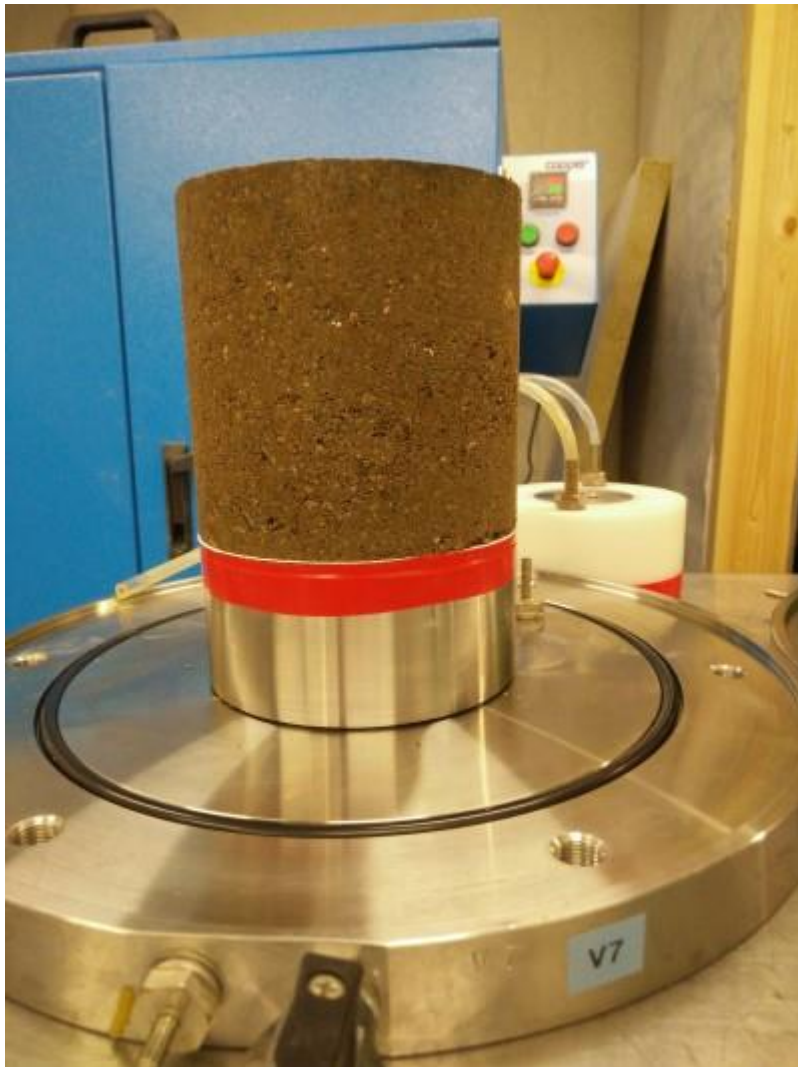
Vedenläpäisevyys, joustavaseinämäinen



Kuonabentoniitti, koekappale V1 kokeen jälkeen



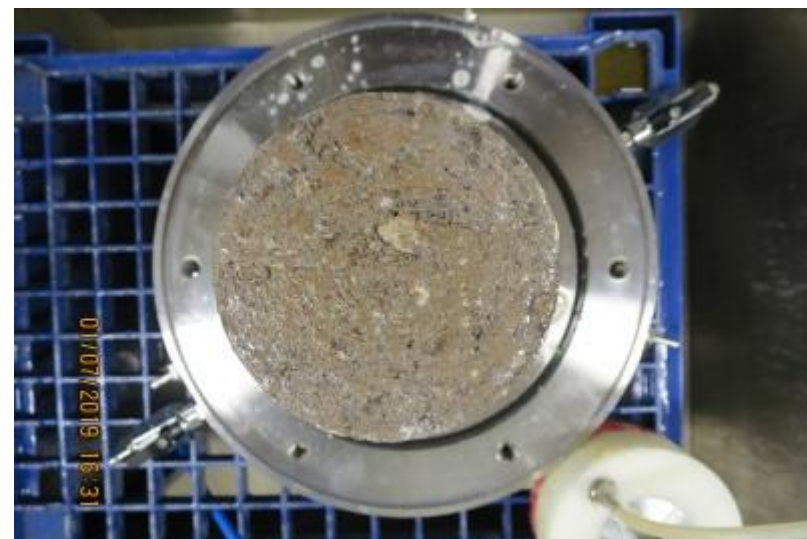
Koekappale V1 kuivana kokeen jälkeen



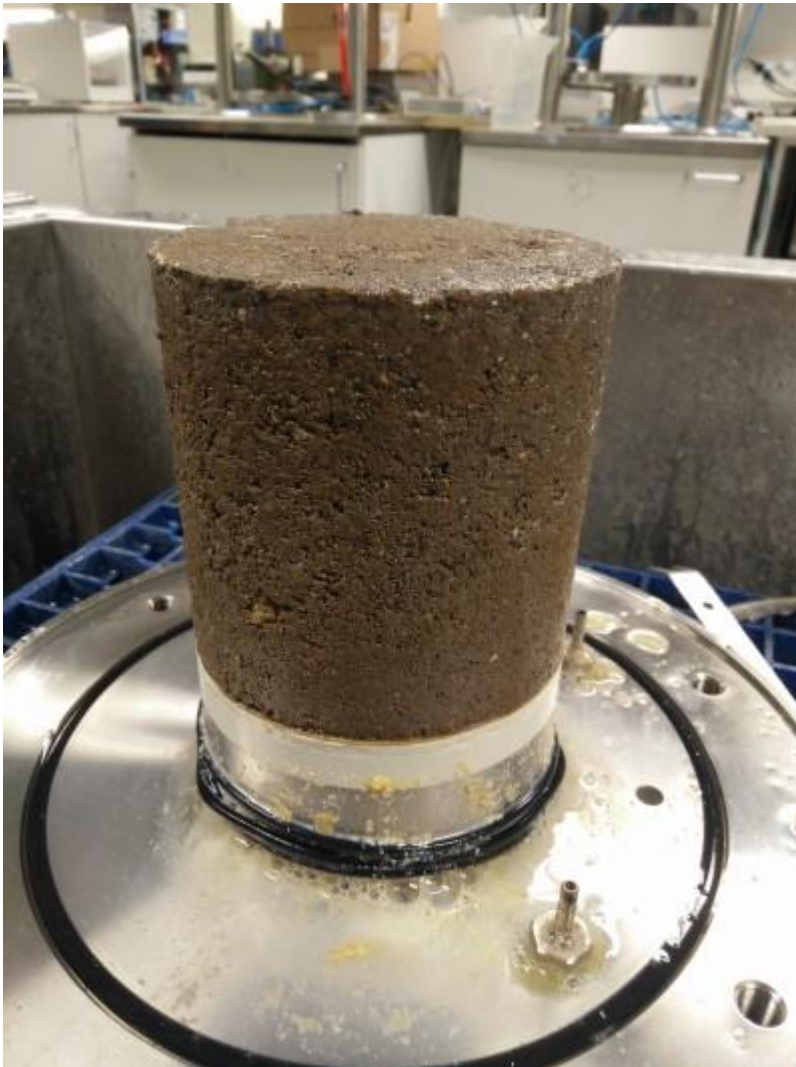
Kuonabentoniitti, koekappale V1a ennen koetta



Koekappale V1a kokeen jälkeen



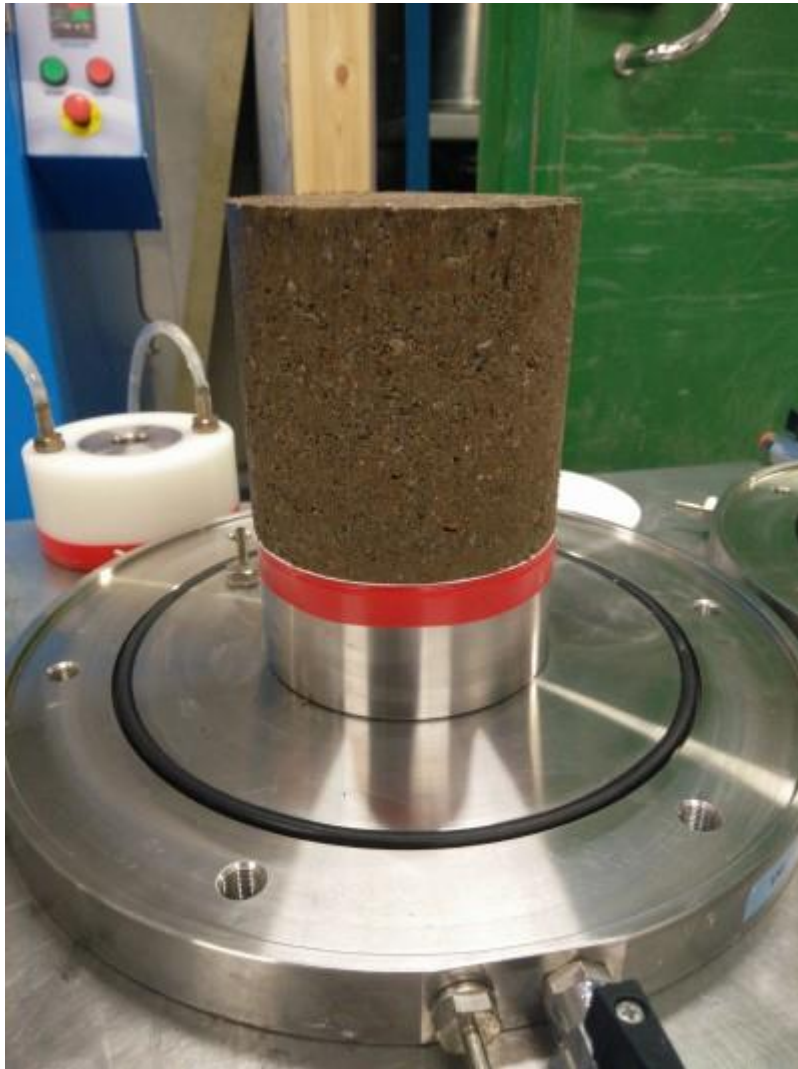
Koekappaleen V1a pääty kokeen jälkeen



Kuonabentoniitti, koekappale V2 kokeen jälkeen



Koekappale V2 kuivana kokeen jälkeen



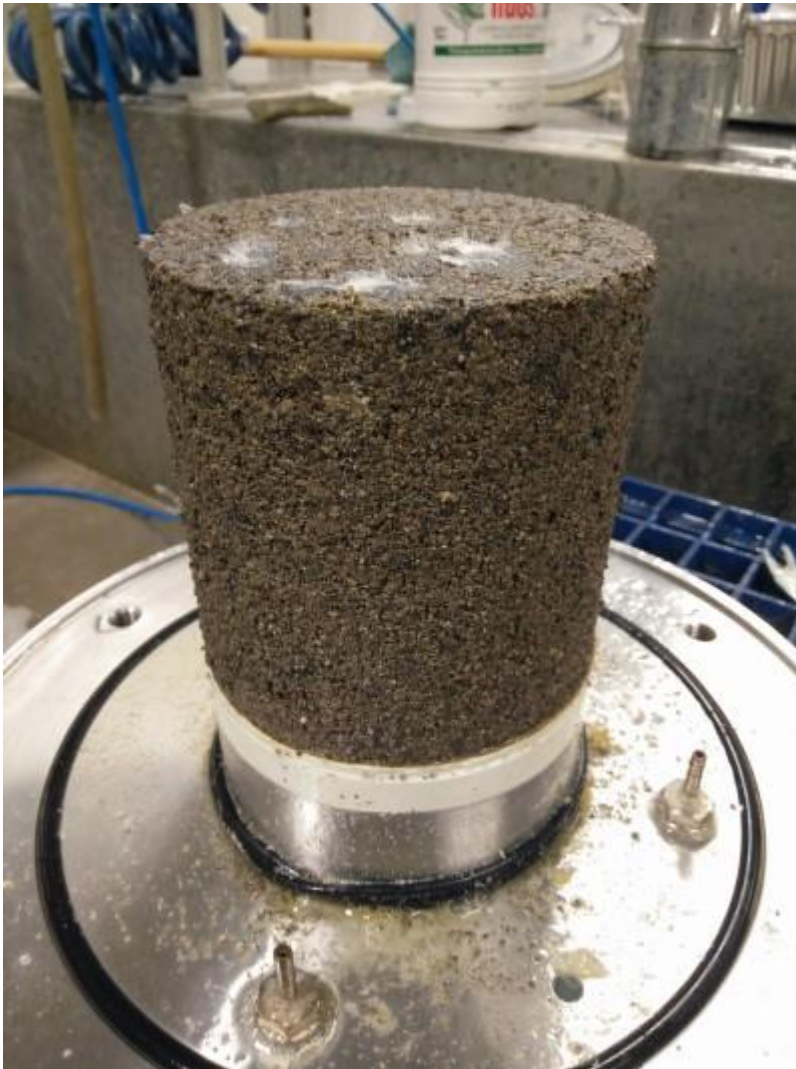
Kuonabentoniitti, koekappale V2a ennen koetta



Koekappale V2a kokeen jälkeen



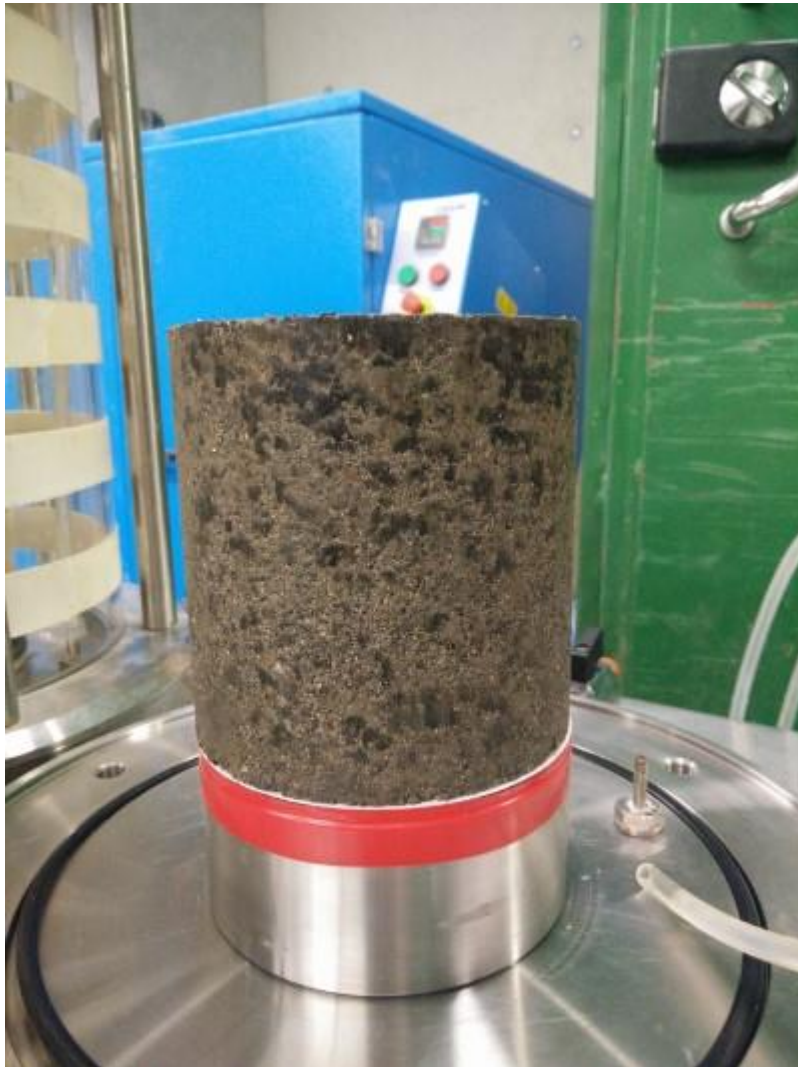
Koekappaleen V2a pääty kokeen jälkeen



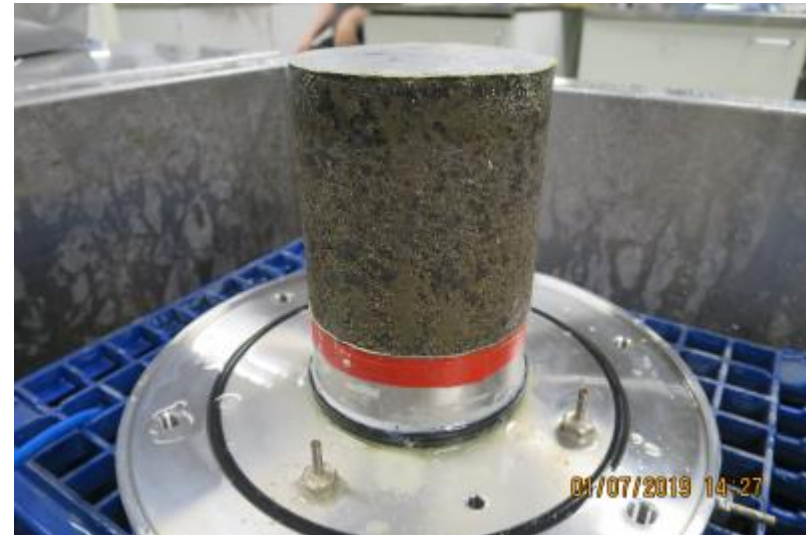
Bitumikuona, koekappale V3 kokeen jälkeen



Koekappale V3 kuivana kokeen jälkeen



Bitumikuona, koekappale V3a ennen koetta



Koekappale V3a kokeen jälkeen



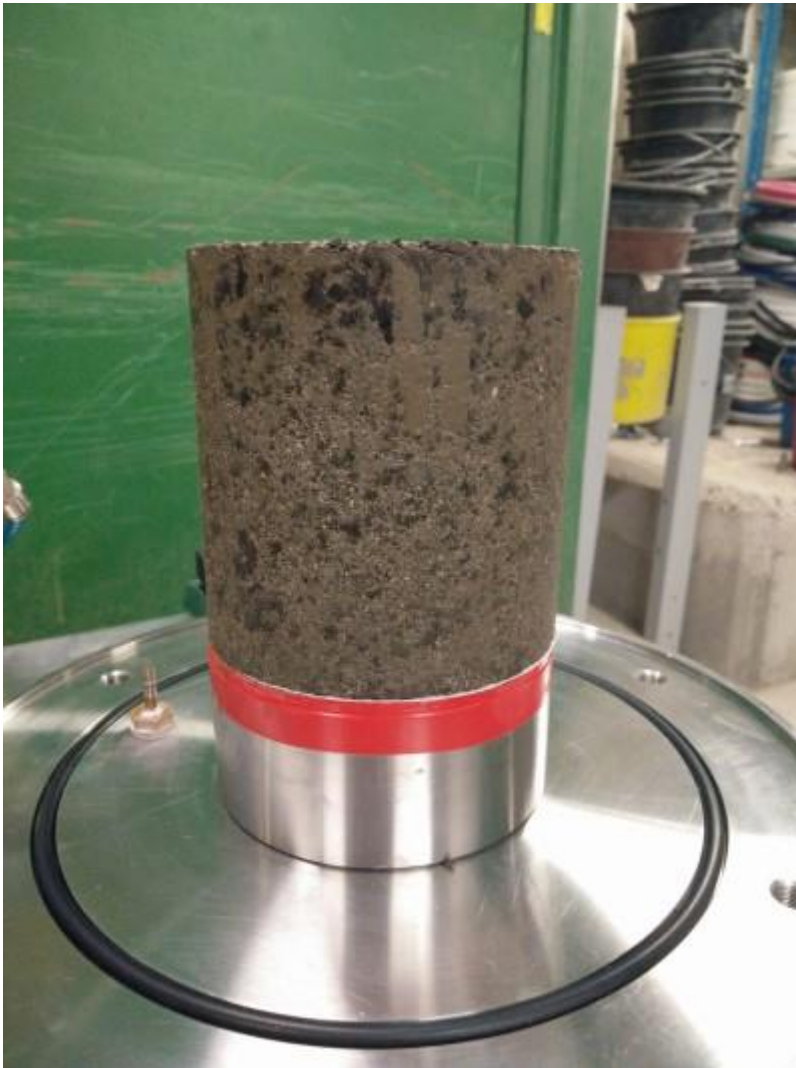
Koekappaleen V3a huokospaperi kokeen jälkeen



Bitumikuona, koekappale V4 kokeen jälkeen



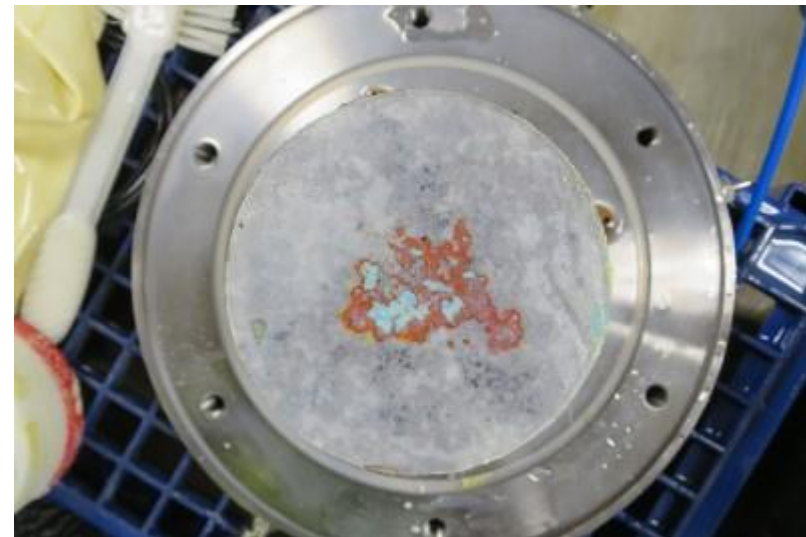
Koekappale V4 kuivana kokeen jälkeen. Koekappale oli niin löyhä, että se hajosi näytteen purkamisen yhteydessä



Bitumikuona, koekappale V4a ennen koetta



Koekappale V4a kokeen jälkeen



Koekappaleen V4a huokospaperi kokeen jälkeen



Joustavaseinämäisten vedenläpäisevyyksien ensimmäinen sarja kuivana kokeen jälkeen. Vasemmalta oikealle kuonabentoniitti V1 ja V2 & bitumikuona V3 ja V4. V4 hajosi näytteen purkamisen yhteydessä



Joustavaseinämäisten vedenläpäisevyyksien toinen sarja kuivana kokeen jälkeen. Vasemmalta oikealle kuonabentoniitti V1a ja V2a & bitumikuona V3a ja V4a

Vedenläpäisevyys, jäykkäseinämäinen



Vasemmalla Koepintarakenteen A.1 lietekompostiseos ja oikealla koepintarakenteen A.2 lietekompostiseos. Näytteet kuivia



A.1 Lietekompostiseos



Koepintarakenteen A.1 pintakerroksen Hki-moreeni. Sivusta



Koepintarakenteen A.1 pintakerroksen Hki-moreeni. Koekappaleen pääty



Kuonafraktio 5/12 mm kokeen jälkeen. Kappale ei pysynyt koossa purkamisen jälkeen



Kuonafraktio 12/35 mm kokeen jälkeen. Kappale ei pysynyt koossa purkamisen jälkeen



Kuonafraktio 0/5 mm, Kappale ei pysynyt koossa purkamisen jälkeen