

Juho Ali-Tolppa

# KAATOPAIKAN PINTARAKENTEIDEN LIUKOISUUSPROSESSIT JA VESITASE

Diplomityö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastajat: Professori Jukka Rintala  
Yliopisto-opettaja Minna Leppänen  
Joulukuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Juho Ali-Tolppa: Kaatopaikan pintarakenteiden liukoisuusprosessit ja vesitase  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Joulukuu 2021

---

Kiertotalousajattelu on keskeinen osa kaatopaikkarakentamista. Kaatopaikan pintarakenteissa on mahdollista hyötykäyttää ympäristökelpoisuuden täyttäviä ja teknisesti soveltuvia jätemateriaaleja. Kaatopaikan pintarakenteella pyritään estämään likaisen suotoveden muodostumista ja haitta-aineiden ja kaatopaikkakaasujen kulkeutumista ympäristöön. Käsitellyn jätteenpolton pohjakuonan soveltuvuutta pintarakenteisiin on tutkittu, koska pohjakuonan saatavuus on kasvanut jätteenpolton lisääntyessä ja pintarakenteissa käytetyt massamäärät ovat suuria. Kaatopaikan pintarakenteen toiminnan tehokkuutta voidaan tutkia vesitaseella, joka koostuu tulevista sekä poistuvista vesimääristä ja vesivaraston muutoksesta.

Tässä diplomityössä tutkittiin Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen alueella sijaitsevien koepintarakenteiden vesitaseita ja pintarakenteiden rakennekerroksissa käytettyjen jätteenpolton pohjakuonan ja Helsinki-moreenin liukoisuusprosesseja. Kaatopaikan pintarakenteen toiminnan tehokkuutta voidaan tutkia vesitaseella, joka koostuu tulevista sekä poistuvista vesimääristä ja vesivaraston muutoksesta. Koerakenteiden vesitaseita seurattiin 29.1.-30.6.2021. Koerakenteista purkautuvien vesien laatua tutkittiin mittakaivoista kenttämittauksilla ja vesinäytteiden laboratorioanalyyseillä sekä jatkuvatoimisilla antureilla. Koerakenteiden rakennekerroksista purkautuvia vesimääriä seurattiin Luode Consultingin tuottaman virtaamadatan avulla. Lisäksi koerakenteiden rakennekerroksien lämpötila-, johtokyky- ja maankosteusarvoja seurattiin rakennekerroksiin asennettujen antureiden avulla. Veden laadullisessa analysoinnissa keskityttiin erityisesti pH:n ja johtokyvyn tarkasteluun ja liukenevien kloridien, sulfaattien ja tiettyjen raskasmetallien analysoimiseen. Tulosten perusteella arvioitiin koerakenteiden toimintaa ja koerakenteiden rakennekerroksien materiaalien liukoisuuskäyttäytymistä.

Vesitasetuloksien perusteella VNa 331/2013:n periaatteiden mukaisesti rakennetut ohennetut koerakenteet A.2 ja A.1 estivät tehokkaimmin veden suotautumista koerakenteen läpi tarkkailujakson aikana. Koerakenteessa A.2 on 0,5 metrin paksuinen tiivistyskerros kuonabentoniitista ja koerakenteessa A.1 bentoniittimatto. Koerakenteiden A.2 ja A.1 läpi suotautui tarkkailujaksolla noin 15 ja 20 % sadannasta. Kapillaarieristeestä eli koerakenteesta B.2 suotautui noin 73 % sadannasta.

Veden laadullisten tuloksien perusteella jätteenpolton pohjakuonasta liukenee ja kulkeutuu kloridia, sulfaattia ja joitakin raskasmetalleja. Sähkönjohtavuus on pääsääntöisesti selvästi laskeutunut kuonakerroksista purkautuvassa vedessä. Tulosten perusteella karkearakeisesta jätteenpolton kuonasta liukenevat pitoisuudet ovat pääsääntöisesti pienempiä kuin hienorakeisesta kuonasta liukenevat pitoisuudet, mikä korreloi liukoisuuskokeiden tulosten kanssa. Lämpötilatuloksien perusteella koerakenteiden tiivistyskerrokset eivät ole jäätyneet koko seurantajakson aikana edes ohennetun pintakerroksen alla, vaikka kuivatuskerroksena on käytetty ohutta salaojamattoa.

Tutkimustuloksien perusteella laadittiin suunnitelma mittakaivojen veden laadullisten instrumentointien uudelleenjärjestelyistä, vesinäytteenoton jatkosta ja koerakenteen U.1 vesien johtamisrakenteiden tarkastamisesta ja korjaamisesta. Johtokyky osoittautui tulosten perusteella luotettavaksi ympäristövaikutuksia kuvaavaksi parametriksi, koska jatkuvan instrumentoinnin ja kenttä- ja laboratoriomittauksien tulokset olivat pääsääntöisesti yhteneviä. Pintarakenteista purkautuvien vesien laadullista seurantaa jatketaan.

Avainsanat: Kaatopaikan pintarakenne, vesitase, liukoisuus, jätteenpolton pohjakuona, kulkeutuminen, pidentyminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Juho Ali-Tolppa: Solubility Processes and Water Balance of the Landfill Capping  
Master of Science Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Programme in Environmental and Energy Engineering  
December 2021

---

Circular economy is a focal point of landfill construction. In landfill cappings it is possible to utilize environmentally compatible and technically suitable waste materials. The purpose of a landfill capping is trying to prevent the formation of landfill leachate and the migration of the contaminants and landfill gas to environment. The volume of materials needed for landfill capping is high. The efficiency of landfill capping's performance can be studied based on the water balance which consists of input and output water and the change of the water storage.

The availability of treated municipal solid waste incineration bottom ash (MSWI BA) has been increasing in Finland because the landfilling of waste has been replaced by waste incineration. Suitability of treated MSWI BA as a landfill capping material has been studied.

In this study, water balances of landfill capping systems built in Ämmässuo eco-industrial centre were studied, as well as the solubility processes of MSWI BA and so called "Helsinki-moraine" (i.e. surplus soil containing minor pieces of mineral construction waste) used in cover structures, were studied. The water balances of the landfill capping systems were monitored during 29.1.2021–30.6.2021. Quality of discharging water from landfill capping systems were examined from wells by 3 water sampling rounds and 6 in situ -measuring visits and through continuous measuring sensors installed into the structures and 3 wells. In addition, the temperature, conductivity and soil moisture values of the structural layers of the landfill capping systems were monitored by sensors installed in the structural layers. The qualitative analysis of water focused especially on pH and conductivity and the analysis of soluble chlorides, sulphates and certain heavy metals. Based on the results, the functionality of the landfill capping systems and the solubility behavior of materials used in structural layers were evaluated

According to the water balance results, the capping systems constructed in accordance with the principles of Government Decree on Landfills (331/2013) (A.2 and A.1) prevented filtration through the landfill capping the most efficiently during the monitoring period. The sealing layer in A.2 was constructed of fine-grained MSWI BA enriched by a polymer enhanced bentonite and in A.1 a geosynthetic clay liner was used. About 15 and 20 per cent of the cumulative precipitation seeped through the capping systems A.2 and A.1, respectively, during the monitoring period. The majority of the discharged water, ca. 73 per cent, seeped through the capping system B.2, which was a capillary barrier system built from various MSWI BA fractions.

Based on the quality of the water, salts, such as chloride and sulphate, and some heavy metals are dissolving and migrating from MSWI BA. However, conductivity has been decreasing since the construction phase in the water discharged from layers containing MSWI BA. Based on the results, the dissolving concentrations from coarse MSWI BA are mainly lower than the dissolving concentrations of fine-grained MSWI BA. Based on the temperature results in the structural layers, the sealing layers did not freeze, even though the drainage layer was thin drainage geocomposite.

Based on the findings, a proposal was made to reorganize the qualitative instrumentations of the wells connected to the capping systems, continue the water sampling and field water quality measurements, check and repair the water management and collection of the capping system U.1. Based on the results, conductivity proved to be a reliable measurable parameter representing the environmental loading, because the continuous instrumentation results, in situ – water quality results and laboratory analyses were generally consistent.

Keywords: Landfill Capping, Water Balance, Solubility, MSWI Bottom Ash, Migration, Retardation,

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

# ALKUSANAT

Kiitokset HSY:lle diplomityön tekemisen mahdollistamisesta ja mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta. Kiitokset myös työnantajalleni Vahanen Environment Oy:lle. Erityiskiitokset työni ohjaajalle Marko Sjölundille avusta diplomityöaiheen etsinnässä ja työn realisoitumisessa sekä hyvistä neuvoista läpi diplomityön. Haluan myös kiittää Tampereen yliopiston ohjaajiani Jukka Rintalaa ja Minna Leppästä asiantuntevista kommentteista ja avusta diplomityön tekemisessä.

Kiitos myös opiskelukavereilleni kaikista mukavista hetkistä opiskeluvuosien aikana. Vielä lopuksi haluan osoittaa suurimmat kiitokset perheelleni, joka on aina tukenut minua niin opinnoissa kuin elämässä.

Tampereella, 14.12.2021

Juho Ali-Tolppa

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KAATOPAIKAN PINTARAKENTEEN VESITASE .....	4
2.1 Pintarakenteita koskeva lainsäädäntö .....	4
2.2 Pintarakenteen rakennekerrokset.....	5
2.3 Pintarakenteen vesitase .....	6
2.4 Kulkeutumisprosessit maaperässä.....	8
2.4.1 Advektio .....	8
2.4.2 Diffuusio, dispersio ja haihtuminen.....	9
2.4.3 Kulkeutuminen kompleksina ja hiukkasena .....	10
2.5 Pidättymisprosessit maaperässä.....	11
2.5.1 Sorptio .....	12
2.5.2 Ioninvaihto .....	13
2.5.3 Saostuminen.....	13
3. UUSIOMATERIAALIEN YMPÄRISTÖKELPOISUUS .....	15
3.1 Jättemateriaalien ympäristökelpoisuus.....	15
3.1.1 Liukoisuustestit .....	16
3.1.2 Liukoisuuteen ja kulkeutumiseen vaikuttavia tekijöitä .....	18
3.1.3 Yleisimpiä hyötykäyttöä rajoittavia haitta-aineita .....	20
3.2 Jätteenpolton pohjakuona .....	21
3.2.1 Koostumus.....	21
3.2.2 Alkuaineiden kokonaispitoisuudet pohjakuonassa.....	22
3.2.3 Pohjakuonasta liukenevia haitta-aineita .....	24
3.3 Helsinki-moreeni .....	26
4. MATERIAALIT JA MENETELMÄT .....	28
4.1 Tutkimuskohde.....	28
4.2 Tutkimuskohteen koerakenteiden esittely.....	28
4.3 Koerakenteiden seuranta .....	31
4.3.1 Kaivojen vesimääräseuranta ja rakenteiden instrumentoinnit.....	31
4.3.2 Vedenlaadun kenttämittaukset .....	34
4.3.3 Vesinäytteenotto .....	34
4.3.4 Mittakaivojen laadulliset mittausanturit .....	35
4.4 Vesitasetarkastelu.....	35
4.5 Kuormituslaskelmat.....	37
5. TULOKSET .....	38
5.1 Vesitaselaskelmat .....	38
5.1.1 Koerakenteista purkautuvat vesimäärät .....	38
5.1.2 Kumulatiiviset virtaamat .....	41
5.2 Koerakenteiden instrumentointitulokset.....	48
5.2.1 Lämpötila .....	49
5.2.2 Maankosteus .....	53
5.2.3 Johtokyky.....	57
5.3 Koerakenteista purkautuvan veden laatu .....	61

5.3.1	Jatkuvatoimiset anturit .....	61
5.3.2	Veden pH-tulokset .....	69
5.3.3	Veden sähkönjohtavuus.....	74
5.3.4	Veden kloridipitoisuus .....	80
5.3.5	Veden sulfaattipitoisuus .....	81
5.3.6	Veden metallipitoisuudet.....	83
5.4	Rakennekerrosten kuormituslaskelmat.....	89
5.4.1	Tarkkailujakson laskennalliset kuormitukset.....	89
5.4.2	Rakennekerroksista liukenevien metallien ja suolojen liukenemisajat.....	94
6.	TULOSTEN TARKASTELU.....	98
6.1	Vesitasetarkastelu.....	98
6.2	Lämpötilaprofiilit .....	101
6.3	Veden laadun seuranta .....	102
6.4	Materiaalin hyötykäyttökelpoisuus.....	102
6.4.1	Käsitellyn jätteenpolton kuonan ympäristövaikutukset.....	105
6.4.2	Helsinki-moreenin ympäristövaikutukset .....	106
6.4.3	Kuivatuskerroksesta purkautuvien vesien laatu.....	107
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	108
7.1	Pintarakenteiden toiminta.....	108
7.2	Jättemateriaalien vaikutukset läpivirtaavaan veteen.....	109
7.3	Jatkotoimenpiteet.....	110
	LÄHTEET .....	112
	LIITE 1. VALOKUVALIITE .....	118
	LIITE 2. VEDEN REDOX-KENTTÄMITTAUSTEN TULOKSET .....	120
	LIITE 3. VEDEN HAPPIPITOISUUDEN KENTTÄMITTAUSTULOKSET.....	121
	LIITE 4. LABORATORIOANALYYSIMENETELMÄT .....	122
	LIITE 5. KOERAKENNEKERROSTEN LÄMPÖTILAHAVAINNOT.....	123
	LIITE 6. LÄMPÖTILA-, MAANKOSTEUS- JA JOHTOKYKYINSTRUMENTOINNIN TULOKSET.....	127
	LIITE 7. LUMISYVYYS NUUKSION HAVAINTOASEMALLA (ILMATIETEENLAITOS 2021).....	134
	LIITE 8. PINTARAKENTEIDEN RAKENNEKERROSTEN MITTOJA JA HAITALLISTEN AINEIDEN LASKENNALLISIA LIUKOISUUSAIKOJA.....	135
	LIITE 9. KOERAKENTEISTA PURKAUTUVIEN VESIEN LAADULLISIA TULOKSIA JA HYÖDYNNETTÄVÄN JÄTTEEN SALLITUT LIUKOISUUDET PEITETYSSÄ KENTTÄRAKENTEESSA (L/S 10) (VNA 843/2017) .....	136

# LYHENTEET JA KÄSITTEET

DOC	eng. Dissolved Organic Carbon, liennut orgaaninen hiili
EPDM	eng. Ethylene Propylene Diene Monomer, etyleenipropyleenidieeni-monomeeri
fDOM	eng. fluorescent Dissolved Organic Matter, fluoresoiva liennut orgaaninen aines
FNU	eng. Formazin Nephelometric Unit, sameuden yksikkö
HDPE	eng. High Density Polyethylene, suuritiheyspolyeteeni
LLDPE	eng. Linear Low-Density Polyethylene, lineaarinen pientiheyspolyeteeni
mS/m	Millisiemensia metriä kohden, sähkönjohtavuuden yksikköä
Evapotranspiraatio	Maanpinnalta ja kasveista tapahtuva kokonaishaihdunta
Helsinki-moreeni	Ylijäämämaa-aines, joka sisältää pieniä määriä mineraalista rakennusjätettä ja alle VNa 214/2007:n mukaisten alempien ohjearvojen pitoisuuksia haitta-aineita
Kolloidi	Hienojakoinen suspensiossa oleva aine, jolla on suuri ominaispinta-ala ja halkaisija 10–10 000 Å
L/S-suhde	Veden ja kiinteän materiaalin suhde (liquid/solid)
MARA-asetus	<i>Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (VNa 843/2017)</i>
PIMA-asetus	<i>Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (VNa 214/2007)</i>
Pysyvä jäte	Jäte, joka ei liukene, pala tai reagoi muutoin fysikaalisesti tai kemiallisesti eikä hajoa biologisesti tai reagoi muiden aineiden kanssa aiheuttaen vaaraa terveydelle tai ympäristölle
Tarkkailukerros	Koepintarakenteen alin rakennekerros, johon oletettuun jätetäyttöön purkautuva vesi kerääntyy
Tavanomainen jäte	Jäte, joka ei ole vaarallista jätettä
Vaarallinen jäte	Jäte, jolla on palo- tai räjähdysvaarallinen, tartuntavaarallinen, muu terveydelle vaarallinen, ympäristölle vaarallinen tai muu vastaava ominaisuus (vaaraominaisuus)
V-kaivo	Läpivirtauskaivo, jossa on v-pato

# 1. JOHDANTO

Kiertotaloudesta on tullut tärkeä ja ajankohtainen aihe, mikä näkyy maarakentamisessa kaatopaikoilla. Kaatopaikan pintarakenteissa voidaan usein hyötykäyttää ympäristökelpoisuuden täyttäviä ja teknisesti soveltuvia jätemateriaaleja. Kaatopaikan pintarakenteella tarkoitetaan monikerroksista rakennetta, jonka tehtävänä on estää kaatopaikka-kaasujen vapautumista ilmakehään ja veden päätymistä jätetäyttöön (Travar et al. 2009). Veden päästessä jätetäyttöön muodostuu likaista suotovettä, joka voi aiheuttaa haitta-aineiden kulkeutumista ympäristöön (Suomen ympäristökeskus 2008, s. 45). Jättemateriaalien hyötykäyttämismahdollisuuksien ja muodostuvan suotoveden takia on tärkeää ymmärtää rakenteissa käytettyjen materiaalien liukoisuuskäyttäytymistä.

Luonnonmaan ja kiviainestuotteiden sijaan pintarakenteisiin soveltuvan jätteen hyötykäyttäminen on teknisten ominaisuuksien täytyessä tavoiteltavaa, koska rakenteisiin tarvittavien materiaalien massamäärät ovat suuria. Esimerkiksi jätteenpolton tuhkien määrät ovat kasvaneet, johon on vaikuttanut jätteen kaatopaikkasijoittamisen korvaantuminen jätteenpoltolla. (Travar et al. 2009)

Pintarakenteiden tehokkuutta vedenhallinnan kannalta voidaan tarkastella vesitaseen avulla. Vesitaseen periaatteena on laskea systeemiin tulevat ja lähtevät vesimäärät (São Mateus et al. 2012). Tulevat ja lähtevät vesimäärät muodostuvat useista eri tekijästä, kuten sadannasta, evapotranspiraatiosta, pintavalunnasta sekä eri rakennekerroksien kautta purkautuvista vesimääristä. Kaatopaikan pintarakenteen vesitaseen laskemiseen on kehitetty mallinnusohjelmia, joilla pyritään kuvaamaan pintarakenteiden toimintaa.

Jätetäyttö painuu vielä kaatopaikan sulkemisen jälkeenkin. Pintarakenteiden kestävyyskannalta on järkevää antaa jätetäytön painua mahdollisimman pitkään ennen lopullisten pintarakenteiden toteuttamista. Jos jätetäytön painumista annetaan tapahtua yli 2 vuotta ja jätetäytössä muodostuu huomattavasti kaatopaikkakaasuja, on syytä rakentaa vesien ja kaasujen hallitsemiseksi väliaikainen pintarakenne. (Suomen ympäristökeskus 2008, s. 90)

Tämän diplomityön tavoitteena on tarkastella Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen pintakoerakenteiden rakennekerroksissa käytettyjen käsitellyn jätteenpolton kuonan lajitteiden ja pieniä määriä rakennusjätettä sisältävän ylijäämämaan, Helsinki-moreenin,



vaikutuksia läpisuotautuvan veden laatuun ja siten arvioida niiden vaikutuksia hyötykäyttökohteen ympäristöön ja muihin rakenteisiin. Lisäksi työn tavoitteena on arvioida pintakoerakenteiden toimintaa seurantajakson aikaisten seurantatulosten ja niiden perusteella tehtävien vesitaselaskelmien avulla. Diplomityön tulosten perusteella arvioidaan materiaalien soveltuvuutta kaatopaikan pintarakenteiden kerroksiin. Tässä diplomityössä on tavoitteena vastata seuraaviin kysymyksiin:

- 1) Millaisia ovat jätteenpolton pohjakuonan ja Helsinki-moreenin liukoisuusprosessit ja mitkä tekijät niihin vaikuttavat?
  - a. Millaisia ovat edellä mainittujen materiaalien liukoisuusominaisuudet ja mitä niistä liukenee?
  - b. Miten edellä mainituista materiaaleista liukenevat aineet vaikuttavat muihin pintarakenteissa käytettäviin materiaaleihin?
- 2) Millainen on pintakoerakenteiden vesitase seurantajakson (1.12.2020–30.6.2021) aikana?
  - a. Mikä on pintakoerakenteiden tehokkuus suhteessa toisiinsa vesitaseiden perusteella?
  - b. Mikä on tarkasteltavan pintarakenteen toiminnan kannalta oleellisin rakenneosaa?
  - c. Millainen kuormitus rakenteessa käytetyistä jätemateriaaleista aiheutuu vesitaseen perusteella?

Työ on rajattu tutkimaan käsitellyn jätteenpolton pohjakuonan ja Helsinki-moreenin liukoisuusominaisuuksia ja -prosesseja. Lisäksi materiaalien soveltuvuuden arviointi kaatopaikan pintarakenteeseen on rajattu tiettyyn rakennekerrokseen, ei yleisesti. Tarkastettava pintakoerakenteiden tarkkailujakso on rajattu aikavälille 1.12.2020–30.6.2021. Työssä ei tarkastella kaatopaikkakaasujen vaikutuksia tai rakenteen tehokkuutta kaasujen hallinnassa ja käsittelyssä eikä vaikutuksia jätetäytön prosesseihin, sillä tutkittavien koerakenteiden alla ei ole jätetäyttöä.

Diplomityö koostuu teoriaosuudesta, vesitasetarkastelusta ja koerakenteiden seurantatuloksista. Teoriaosuudessa tarkastellaan materiaalien liukoisuus- ja pidätymprosesseja sekä niihin vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi teoriaosuudessa tarkastellaan kaatopaikan pintarakenteen vesitasetta ja materiaalien kemiallista koostumusta. Teoriaosuuden jälkeen kuvataan tutkimuskohde, seurantatuloksien kerääminen ja vesitasetarkastelun sekä kuormituslaskelmien toteuttaminen. Tämän jälkeen esitetään työn tulokset ja niiden

tarkastelu. Lopuksi kerrotaan työn tuloksien perusteella muodostuneet johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet.

Diplomityön tekemisen on rahoittanut Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (HSY). HSY:ltä työn ohjaukseen osallistuvat Heikki Hämäläinen, Kirsi Karhu ja Juha Lipsanen. Diplomityön ohjausryhmään kuuluvat lisäksi Mikko Kiirikki (Luode Consulting Oy), Minna Leppänen (Tampereen yliopisto), Jukka Rinkinen (Ramboll Finland Oy), Jukka Rintala (Tampereen yliopisto) ja Marko Sjölund (Vahanen Environment Oy).

## 2. KAATOPAIKAN PINTARAKENTEEN VESITASE

Kaatopaikalle rakennetaan pintarakenne jätetäytön ollessa sen lopullisessa korkeudessa. Pintarakenteen rakennekerroksille on esitetty vaatimuksia *Valtioneuvoston asetuksessa kaatopaikoista (VNa 331/2013)*. Vaatimukset koskevat rakennekerroksien vähimmäispaksuuksia ja toteuttamistarvetta.

Vesitase on kaatopaikkasuunnittelussa keskeinen laskettava tase, joka käytännössä kuvaa kaatopaikkasysteemin tulevia ja lähteviä vesimääriä. Vesimäärien arvioinnissa huomioidaan useita eri muuttujia, joiden arvioiminen kenttäolosuhteissa voi olla haastavaa. Vesitaselaskennassa huomioidaan esimerkiksi ilmastolliset muuttujat, kuten sadanta ja haihdunta, ja pintarakenteiden hydrauliset ominaisuudet. (São Mateus et al. 2012)

### 2.1 Pintarakenteita koskeva lainsäädäntö

Kaatopaikat luokitellaan *Valtioneuvoston asetuksessa kaatopaikoista (VNa 331/2013)* pysyvän, tavanomaisen tai vaarallisen jätteen kaatopaikaksi. Pysyvällä jätteellä tarkoitetaan jätettä: ”joka ei liukene, pala tai reagoi muutoin fysikaalisesti tai kemiallisesti eikä hajoa biologisesti tai reagoi muiden aineiden kanssa aiheuttaen vaaraa terveydelle tai ympäristölle.” Pysyvässä jätteessä ei tapahdu pitkällä aikavälillä olennaisia biologisia, kemiallisia tai fysikaalisia muutoksia eikä se aiheuta vaaraa pinta- tai pohjaveden laadulle. Pysyvän jätteen haitallisten aineiden kokonaishuuhtoutuminen ja -pitoisuus sekä jätteestä muodostuvan kaatopaikkaveden myrkyllisyys on ympäristölle merkityksetön. (VNa 331/2013)

Jätelain 646/2011 mukaan vaarallisella jätteellä tarkoitetaan jätettä: ”jolla on palo- tai räjähdysvaarallinen, tartuntavaarallinen, muu terveydelle vaarallinen, ympäristölle vaarallinen tai muu vastaava ominaisuus (vaaraominaisuus).” (Jätelaki 646/2011) Tavanomaisella jätteellä tarkoitetaan jätettä, joka ei ole vaarallista jätettä (VNa 331/2013).

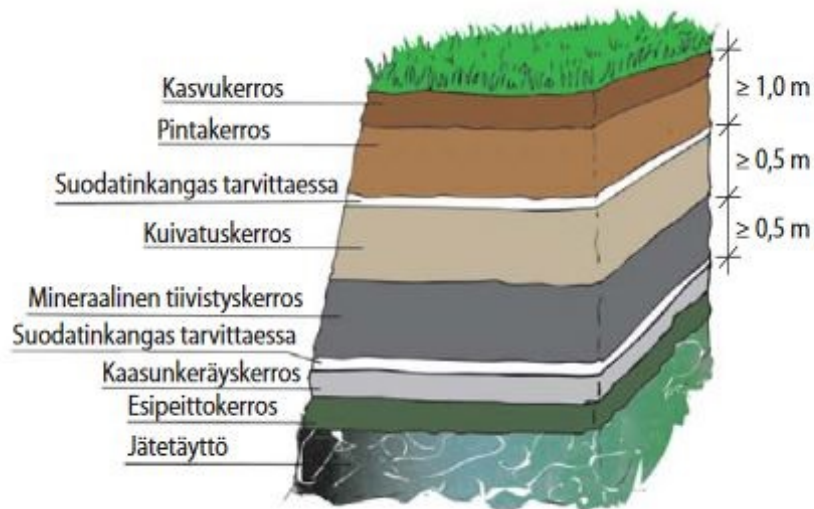
Tavanomaisen jätteen ja vaarallisen jätteen kaatopaikalle on rakennettava pintarakenne, kun jätetäyttö on saavuttanut lopullisen korkeuden. Pintarakenne koostuu pintakerroksesta, kuivatuskerroksesta, tiivistyskerroksesta ja kaasua muodostavan jätteen päälle rakennettavasta kaasunkeräyskerroksesta. Tavanomaisen jätteen kaatopaikalla ei vaadita keinotekoista eristettä, mutta vaarallisen jätteen kaatopaikalla se on pakollinen. Kaasunkeräyskerros vaaditaan tavanomaisen jätteen kaatopaikalle, mutta vaarallisen jätteen kaatopaikalle sitä vaaditaan vain, mikäli kaasua muodostuu. (VNa 331/2013) Pintarakenteiden kerroksia koskevat vaatimukset on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Tavanomaisen ja vaarallisen jätteen kaatopaikoilla käytettävien pintarakenteiden kerrosvaatimukset (VNa 331/2013).

Rakennekerros	Tavanomaisen jätteen kaatopaikka	Vaarallisen jätteen kaatopaikka
Pintakerros $\geq 1$ m	Vaaditaan	Vaaditaan
Kuivatuskerros $\geq 0,5$ m	Vaaditaan	Vaaditaan
Tiivistyskerros $\geq 0,5$ m	Vaaditaan	Vaaditaan
Keinotekoinen eriste	Ei vaadita	Vaaditaan
Kaasunkeräyskerros	Vaaditaan	Tarpeen mukaan

## 2.2 Pintarakenteen rakennekerrokset

Kaatopaikan pintarakenne muodostuu useasta eri rakennekerroksesta, joilla on omat tehtävänsä ja vaatimuksensa (kuva 1) (Suomen ympäristökeskus 2008, s. 45). Pintarakenteen rakennekerroksien lisäksi sen toimintaan vaikuttavat myös pinnan kaltevuus ja kasvillisuus (Suomen ympäristökeskus 2002, s. 59).



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

Muotoillun jätetäytön päällä on alhaalta lähtien esipeittokerros, kaasunkeräyskerros, mineraalinen tiivistyskerros, kuivatuskerros, pintakerros ja sen yläosan muodostava kasvikerros (kuva 1). Suodatinkangasta käytetään tarvittaessa pintakerroksen ja kuivatuskerroksen tai mineraalisen tiivistyskerroksen ja kaasunkeräyskerroksen välissä estämään hienoaineksen kulkeutuminen kerroksesta toiseen. (Infra 15-710194 2018) Rakennekerroksien keskeisimmät tehtävät ja niissä käytettävät materiaalit ovat esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Kaatopaikan pintarakenteiden rakennekerrosten tavoitteet ja niissä käytetyt materiaalit (koottu lähteistä: *Infra 15-710194 2018, InfraRYL 2018, Wahlström et al. 2004, Suomen ympäristökeskus 2008*).

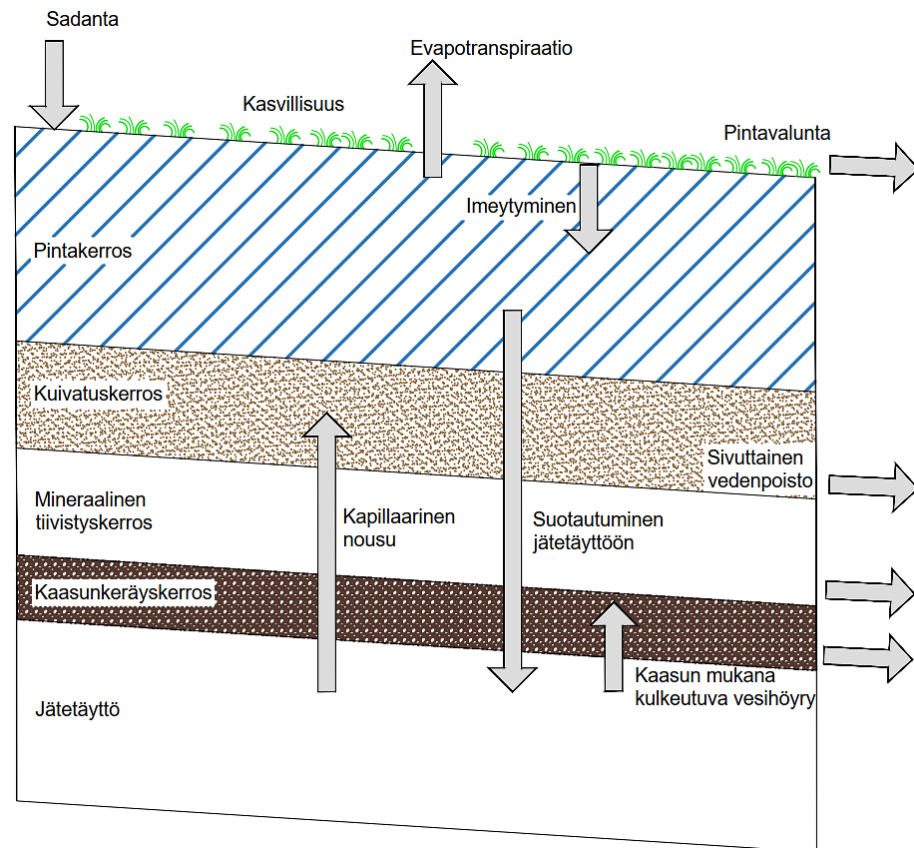
Rakennekerros	Tavoitteet	Rakennekerroksissa käytettäviä materiaaleja
Kasvukerros	Estää pintaeroosiota, vähentää imeytymään pyrkivää vesimäärää lisäämällä haihduntaa, maisemoi	Humuspitoinen maa tai kasvualustamateriaali
Pintakerros	Estää alempien kerroksien kuivumista ja jäätymistä, varastoi vettä ja mahdollistaa jälkikäytön	Ylijäämämaa, pysyvän jätteen vaatimukset täyttävä teknisesti soveltuva aines
Kuivatuskerros	Johtaa kasvu- ja pintakerroksesta suotautuva vesi pois tiivistyskerroksen päältä, alentaa tiivistyskerrokseen kohdistuvaa hydraulista gradienttia	Karkea sora, murske, sala- ojamatto, soveltuva jätemateriaali esim. rengasleike, sala- ojamatto
Keinotekoinen eriste	Tehostaa kaasujen keräämistä, estää sade- ja sulamisveden imeytymisen	LLDPE, HDPE- tai EPDM-tiivistyskalvot
Tiivistyskerros	Vähentää veden pääsyä jätetäyttöön ja kaasujen purkautumista	Savi, maabentoniittiseos, kuitusavi, bentoniittimatto
Kaasunkeräyskerros	Kaasun kerääminen ja johtaminen hyödynnettäväksi tai käsiteltäväksi	Karkea sora ja murske, teknisesti soveltuvat kaatopaikkakelpoisuuden täyttävät jättemateriaalit esim. valimohiekat, energiatuotannon kuonat ja pohjatuhkut, tiili- ja betonimurske
Esipeittokerros	Peittää ja muotoilla jätetäyttö, muodostaa tasainen kantava pinta, estää eläinten pääsy jätetäyttöön	Kaatopaikkakelpoisuuden täyttävät ja teknisesti soveltuvat maa-ainekset ja jätemateriaalit esim. pilaantuneet maat, valimohiekat, tiili- ja betonimurske sekä energiatuotannon pohjatuhkut

### 2.3 Pintarakenteen vesitase

Kaatopaikan pintarakenteen vesitase muodostuu tulevista ja poistuvista vesistä sekä vesivaraston muutoksesta. Kaatopaikan pintarakenteisiin tuleva vesilähde on sadanta (P). Poistuvia vesilähteitä ovat evapotranspiraatio (ET), pintavalunta (R), pintarakenteista jätetäyttöön suotautuva vesi (L) ja kaatopaikkakaasujen mukana siirtyvä vesihöyry (G). Vesivaraston muutos ( $\Delta U_s$ ) kuuluu myös vesitaseeseen, sillä pintarakenteisiin tuleva vesi voi varastoitua materiaaliin. (Blight et al. 1992) Kaatopaikan pintarakenteen vesitase voidaan esittää kaavan 1 mukaan (Blight et al. 1992). Lumen sulamisvedet huomioidaan sadannan yhteydessä.

$$P = ET + G + L + R + \Delta U_s \quad (1)$$

Veden kulkeutumista voi tapahtua pintarakenteessa useisiin suuntiin (kuva 2). Sadanasta imeytyvä vesi voi suotautua suoraan alaspäin alapuolisiin kerroksiin tai haihtua suoraan. Evapotranspiraatio tapahtuu alhaalta ylöspäin. Vesi voi liikkua pintarakenteen kaltevuuden suuntaisesti esimerkiksi hyvin vettä johtavassa kuivatuskerroksessa ja kerrosten rajapinnoissa, jolloin virtaukseen vaikuttaa pintarakenteiden kaltevuus.



**Kuva 2.** Veden kulkeutuminen kaatopaikan pintarakenteessa (täydentäen muokattu lähteestä Beck-Broichsitter et al. 2018).

On havaittu, että vuosittaisella sadantamäärällä on suuri vaikutus pintarakenteesta suotautuvaan vesimäärään. Vähäsateisilla alueilla, joissa sadanta on alle 250 millimetriä vuodessa, on helpompaa suunnitella pintarakenne saavuttamaan pieniä, alle 5 mm/a, suotautumismääriä. Pienien suotautumismäärien saavuttaminen on vaikeaa, kun sadanta ylittää 500 mm/a ja jopa mahdotonta kosteilla alueilla, joissa sadanta on yli 750 mm/a. (Apiwantragoon et al. 2015) Pintarakenteeseen suotautuva vesimäärä on pienempi kuin sadanta, sillä pintavalunta ja evapotranspiraatio vähentävät imeytyvää vesimäärää (Kjeldsen & Beaven 2010, s. 711).

Pintavaluntaan vaikuttavia tekijöitä ovat sateen voimakkuus, lumen sulaminen, maaperän jäätyminen sekä pintakerroksen maa-aineksien kyllästynyt vedenläpäisevyys. Lumen sulaminen voi olla merkittävä osa vuosittaista pintavaluntaa lumisilla ja jäätyneillä

alueilla. (Apiwantragoon et al. 2015) Pintavaluntaa tapahtuu yleensä rankkasateen jälkeen. Pintavalunta voi aiheuttaa merkittävää eroosiota erityisesti, mikäli pinta ei ole täysin peittynyt kasvillisuudella. (Kjeldsen & Beaven 2010, s. 712)

Evapotranspiraation suuruuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi suhteellinen kosteus, kasvillisuus ja lämpötila. Evapotranspiraatiolla tarkoitetaan maanpinnalta ja kasveista tapahtuvaa kokonaishaihduntaa. Pintakerroksen korkea lämpötila ja kasvillisuus tehostavat veden haihduntaa. (Kjeldsen & Beaven 2010, s. 713; Scheutz & Kjeldsen 2010, s. 831) Kapillaarinen nousu (Beck-Broichsitter et al. 2018) ja kaatopaikkakaasut voivat kuljettaa vettä jätetäytöstä myös ylöspäin pintarakenteissa. Kaatopaikkakaasu sisältää tyypillisesti vettä  $23 \text{ g/m}^3$   $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :een lämpötilassa. (Kjeldsen & Beaven 2010, s. 710, 714).

## 2.4 Kulkeutumisosprosessit maaperässä

Maaperässä haitta-aineiden kulkeutumista ohjaavat kemialliset ja fysikaaliset prosessit. Prosessien tehokkuuteen vaikuttavat maaperän ominaisuudet, ilmastolliset tekijät ja haitta-aineiden kemiallinen esiintymismuoto. Haitta-aineiden kulkeutumista ohjaavia kemiallisia ja fysikaalisia prosesseja ovat advektio, dispersio, diffuusio, haihtuminen ja kulkeutuminen metallikompleksissa tai kolloidiin kiinnittyneenä. (Heikkinen 2000, s. 11)

Aineiden kulkeutuminen maan huokostilassa tapahtuu nestemäisenä, nesteeseen liuenneena ja kaasuna. Suuri osa maaperän haitta-aineista ovat veteen liuenneina ioneina sekä molekyyleinä. (Suomen ympäristökeskus 2002, s. 20) Lisäksi haitta-aineet voivat muodostaa maaperässä orgaanisen tai epäorgaanisen metallikompleksin. (Yong et al. 1992, s. 153)

### 2.4.1 Advektio

Advektio on keskeisin kulkeutumisosprosessi veteen liuenneille aineille. Siinä veteen liuenneet aineet leviävät vesivirtauksen mukana. Leviämiseen vaikuttaa keskimääräinen virtausnopeus. Advektiota voi tapahtua myös ilmassa, jolloin ilmaan haihtuva aine kulkeutuu ilmapirran mukana. (Ympäristöministeriö 2014, s. 100)

Maaperän kapillaari- ja vajovesivyohtyhykkeessä advektiota säätelee ensisijaisesti sademäärä. Pohjavesivyohtyhykkeessä veden virtausnopeuteen- ja suuntaan vaikuttavat hydraulinen gradientti sekä maaperän rakenne, jonka vaikuttavimpana ominaisuutena on vedenjohtavuus. Yleisesti ottaen mitä suurempi on maaperän sisältämä veden määrä ja

veden virtausnopeus, sitä nopeammin haitta-aineet kulkeutuvat advektiolla. Veden virtaus on maaperässä tyypillisesti sitä nopeampaa, mitä suurempi on vedenläpäisevyys ja mitä jyrkempi on hydraulinen gradientti. (Heikkinen 2000, s. 12) Pohjaveden virtausnopeus voidaan esittää Darcyn lain mukaisesti:

$$v = k * i \quad (2.1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta x}, \quad (2.2)$$

,joissa  $v$  on veden virtaamanopeus,  $k$  vedenjohtavuus,  $i$  hydraulinen gradientti,  $\Delta h$  hydraulisten korkeuksien ero ja  $\Delta x$  etäisyys (Yong et al. 1992, s. 132).

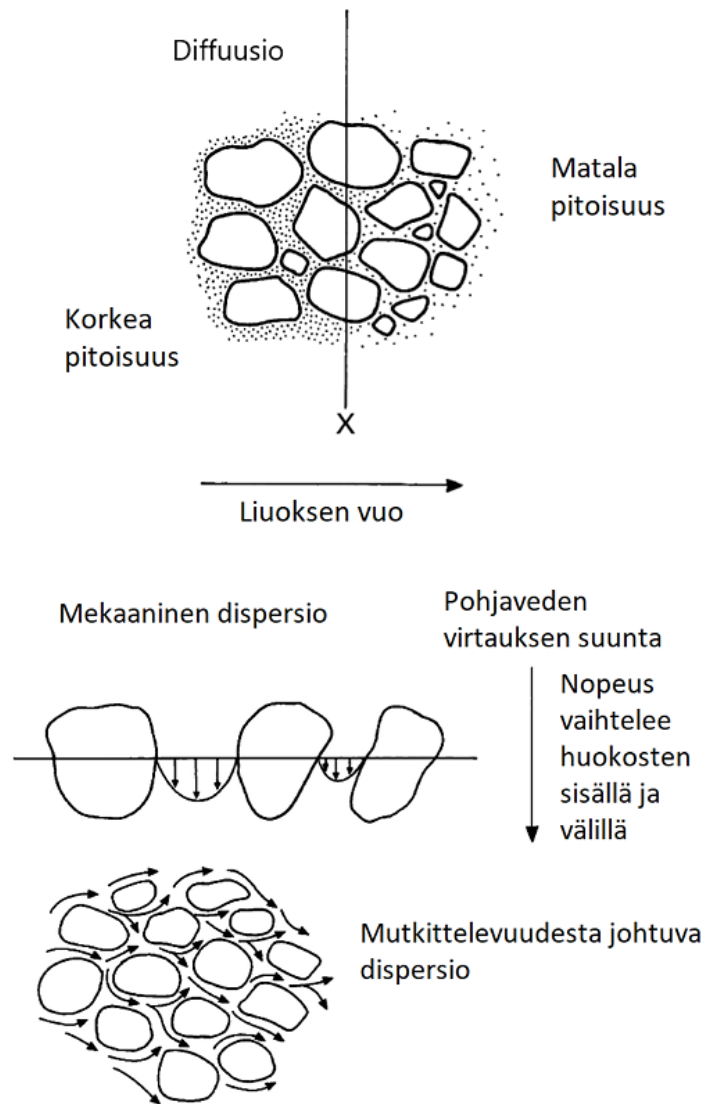
## 2.4.2 Diffuusio, dispersio ja haihtuminen

Diffuusio on kulkeutumisprosessi, joka pohjautuu molekyylien liikkeeseen ja pyrkimykseen tasoittaa aineiden epätasaista kemiallista jakaumaa väliaineessa (kuva 3). Diffuusio on tehokkaampaa pohjavesivyöhykkeessä kuin vajovesivyöhykkeessä, koska sen merkitys on suurempi huokosten ollessa vedellä kyllästyneitä. Diffuusio on tehokkain kulkeutumismuoto hienorakeisissa, pienihuokoisissa tai heikosti lajittuneissa maala-jeissa. Diffuusiokerroin on ominaista eri aineille ja väliaineille. (Heikkinen 2000, s. 12) Diffuusiota tapahtuu myös ilman advektiovirtausta ja osittain kyllästyneessä vyöhykkeessä.

Dispersiolla kuvataan päävirtaussuunnissa tapahtuvaa hajontaa. Osa aineesta kulkeutuu keskimääräistä virtausnopeutta nopeammin, mikä levittää liuennutta ainetta sisältävän alueen advektion aiheuttamaa aluetta laajemmalle. Dispersiota aiheuttaa kaksi tekijää, jotka ovat diffuusio ja mekaaninen dispersio. (Kuusela-Lahtinen & Vahanne 2005, s. 26)

Mekaanista dispersiota tapahtuu, kun paikalliset virtausnopeudet eroavat keskimääräisestä virtausnopeudesta (kuva 3). Virtausnopeuksien erot aiheutuvat materiaalien heterogeenisyydestä, jota voi ilmetä mikroskooppisella, makroskooppisella ja megaskooppi-sella tasolla. Maan huokoskanavien koot vaihtelevat ja reitit mutkittelevat. Heterogeenisyys aiheuttaa virtausnopeuden lisäksi muutoksia virtaussuunnissa (Domenico & Schwartz 1998, s. 219–220)





**Kuva 3.** Havainnekuvat diffuusiosta ja mekaanisesta dispersiosta (muokattu lähteestä Hiscock & Bense 2014, s. 311).

Haihtuminen on keskeinen kulkeutumismekanismi kapillaarivyöhykkeessä. Maaperän kosteus, vedenläpäisevyys sekä lämpötila vaikuttavat haihtumisen tehokkuuteen. Maaperän kosteus sekä korkea lämpötila lisäävät haihtumista, mutta maaperän mahdollinen jäätyminen estää osittain haihtumista. (Heikkinen 2000, s. 12) Haihtumista tapahtuu myös maan pinnassa.

### 2.4.3 Kulkeutuminen kompleksina ja hiukkasena

Haitta-aineet voivat kiinnittyä vesiliukoisten orgaanisten tai epäorgaanisten aineiden pinnalla oleviin funktionaalsiin ryhmiin muodostaen kompleksin (Yong et al. 1992, s. 153).

Kulkeutuminen kompleksissa on erityisesti metalli-ioneille keskeinen kulkeutumismuoto (Heikkinen 2000, s. 12). Komplekseja muodostavista epäorgaanisista ioneista esimerkkejä ovat kloridi, sulfaatti ja fosfaatti. Orgaanisessa aineessa funktionaaliset ryhmät, kuten fenoli- ja amiiniryhmät, muodostavat komplekseja metalli-ionien kanssa. Metallio-ionien ja epäorgaanisten ligandien muodostamat kompleksit ovat selvästi heikompia kuin orgaanisten ligandien kanssa muodostuvat kompleksit. (Yong et al. 1992, s.153)

Koordinaatiokemia vaikuttaa oleellisesti orgaanisten ja epäorgaanisten kompleksien muodostumiseen. Muodostuvat kompleksit ovat pysyvämpiä suuren varauksen, kuten +2 tai +3, ja pienen ionikoon kationeilla. Myös haitta-aineita sitovien yhdisteiden varauksella ja ionikoolla on merkitystä kompleksin pysyvyydelle. Pienimolekyyliset ionit, kuten fluoridit, pidättävät haitta-aineita pysyvämmiin, koska ne ovat tiiviytensä ansiosta kestävämpiä kuin molekyylikooltaan suuret ionit. (Heikkinen 2000, s. 14)

Haitta-aineet voivat kulkeutua myös kolloideihin kiinnittyneinä. Kolloidilla tarkoitetaan hienojakoista suspensiossa olevaa ainetta, jolla on suuri ominaispinta-ala ja halkaisija on 10–10 000 ångströmiä. (Heikkinen 2000, s. 15) Kolloidit edistävät erityisesti huonosti liukenevien haitta-aineiden liikkumista. Tämä selittyy suurella ominaispinta-alalla, jonka seurauksena kolloideilla on korkea sorptiokapasiteetti. (Gavrilescu 2014, s. 421) Kolloidihiuksia ovat esimerkiksi alumiinin, mangaanin ja raudan oksidit (Kanti Sen & Khilar 2006).

Haitta-aineiden kulkeutumiseen kolloideissa vaikuttavat maaperän vedenläpäisevyys ja veden määrä, maaperän redox-olosuhteet ja pH sekä kolloidien määrä maaperässä. Maaperän happamoituminen vähentää raskasmetallien kulkeutumista kolloideissa, koska happamissa olosuhteissa monet kolloidiset yhdisteet ovat kykenemättömiä sitomaan kationeja. (Heikkinen 2000, s. 15)

## 2.5 Pidättymisprosessit maaperässä

Maaperän aineet voivat kulkeutumisen lisäksi pidäytyä maaperään. Pidättyminen on yhteisnimi prosesseille, joiden seurauksena liikkuvasta faasista kiinnittyy haitta-aineita kiinteään materiaaliin liikkuvan faasin leviämisreiteillä (Elert et al. 2006, s.19). Jos haitta-aineet pidättyvät maaperään, niiden kulkeutuminen voi heiketä tai jopa täysin estyä (Heikkinen 2000, s. 21).

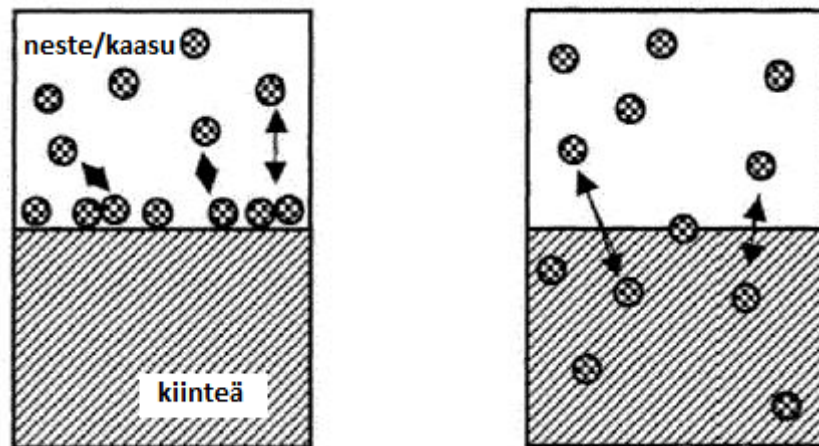
Pidättymiseen vaikuttavat haitta-aineiden kemialliset ominaisuudet ja esiintymismuodot sekä maaperän kemialliset ominaisuudet. Esimerkiksi anionisena olevien haitta-aineiden

pidättyminen on tehokkainta happamissa ja hapettavissa olosuhteissa. Useille kationisille haitta-aineille parhaimmat pidättymisolosuhteet ovat emäksiset ja hapettavat. (Heikkinen 2000, s. 21)

### 2.5.1 Sorptio

Sorptiolla tarkoitetaan yleisesti prosesseja, joissa liuenneet aineet pidättyvät nesteestä kiinteisiin aineisiin. Prosessin kuvailemisen yksinkertaistamiseksi, sorptiota käytetään yhteisterminä kuvaamaan fysikaalista sekä kemiallista adsorptiota ja saostumista. (Yong et al. 1992, s. 144,148–149) Sorptioreaktiot ovat nopeita ja palautuvasti tapahtuvia (Wahlström & Laine-Ylijoki 1997, s. 23). Tässä työssä saostuminen on kuvattu omassa alaluvussa.

Fysikaalisessa adsorptiossa nestefaasissa olevat haitta-aineet kiinnittyvät kiinteän aineen pintaan vetovoimien ansiosta (Yong et al. 1992, s. 149). Kemiallisessa adsorptiossa pidättyminen pinnalle tapahtuu kemiallisella sidoksella. Muodostunut sidos voi olla ioni-, kovalenttinen- tai koordinaatiosidos. (Yong et al. 1992, s. 152–153) Adsorption vastareaktio on desorptio, jossa aine irtoaa pinnalta nestefaasiin (Paasonen-Kivekäs et al. 2016, s. 159). Absorptiossa haitta-aineet kiinnittyvät pinnan sijasta suoraan toisen aineen rakenteeseen (kuva 4) (Heikkinen 2000, s.16). Absorption osuus pohjavesisysteemeissä on suhteellisen pieni. (Suomen ympäristökeskus 2002, s. 27)



**Kuva 4.** Havainnekuvat adsorptiosta ja absorptiosta (muokattu lähteestä Ong & Kolz 2007, s. 101). Adsorptiossa liuenneet aineet kerääntyvät kahden faasin rajapintaan ja absorptiossa liuenneet aineet siirtyvät faasista toiseen.

Maaperän adsorptiokykyä voidaan havainnollistaa määrittämällä kokeellinen adsorptioisotermi, jolla kuvataan aineiden adsorptiota maapartikkeleihin suhteessa liuenneeseen aineeseen. Kaavan 3 mukaisen adsorptioisotermin käyttämisen edellytyksenä on, että

reaktio tapahtuu reversiibelisti ja tarpeeksi nopeasti saavuttaakseen tasapainotilan liikkuvan pohjaveden kanssa. Kiinnittyvän aineen ei myöskään pidä kilpailla kiinnittymispai- kasta muiden aineiden kanssa. Tällöin adsorptioisotermin voidaan esittää kaavalla:

$$C = f(c) \quad (3)$$

,jossa C on kiinteässä väliaineessa oleva laskettava yhdisteen pitoisuus ja c on aineen pitoisuus pohjavedessä. Lineaaraisella, vakioarvoisella tai ensimmäisen asteen isoter- millä voidaan arvioida laskennallisesti monien aineiden adsorptiota. (Suomen ympäris- tökeskus 2002, s. 27)

## 2.5.2 Ioninvaihto

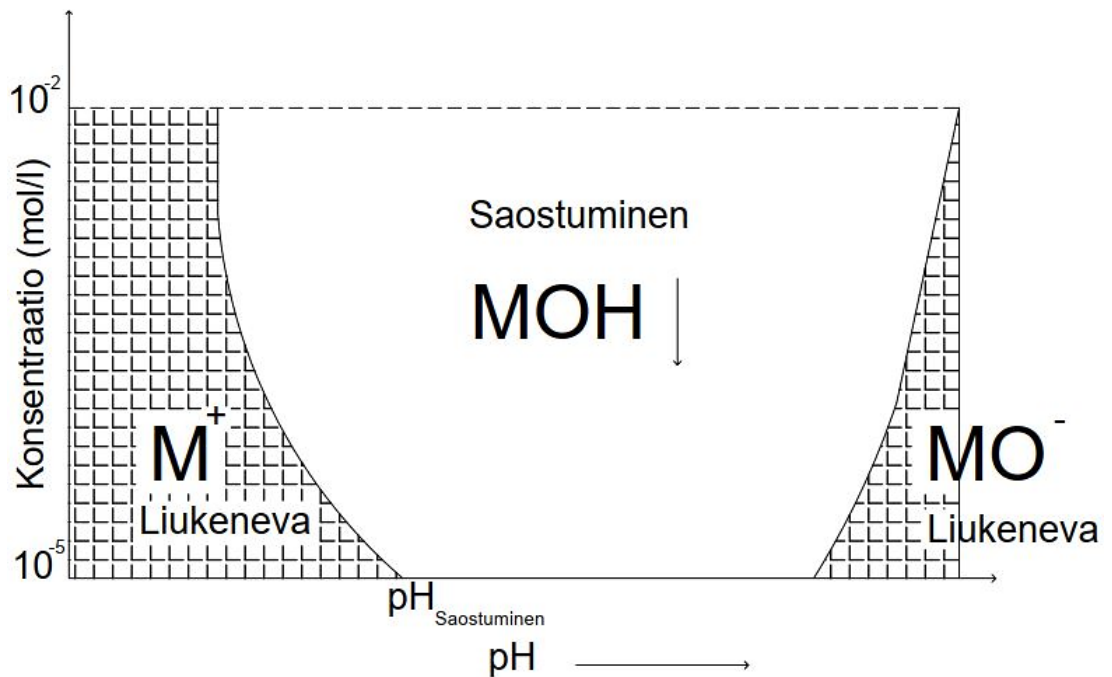
Ioninvaihto on fysikaalis-kemiallinen reaktio. Mineraalien kemiallisen rakenteen muuttu- essa, esimerkiksi rapautumisessa, muodostuu mineraalien pinnoilla ilmeneviä sähköisiä varauksia. Sähköiset varaukset vetävät puoleensa maavedessä olevia ioneja. Suurin osa muodostuneista varauksista on negatiivisia, jotka vetävät puoleensa kationeja. (Westman 1991 s. 20–21) Reaktiossa maavedessä olevat kationit syrjäyttävät negatiivi- sesti varautuneen maahiukkasen pinnalle kiinnittyneet kationit. Kyseistä reaktiota kutsu- taan kationinvaihdoksi. Kationinvaihtoa voi tapahtua myös maan huokoskaasusta. Nes- teen tai kaasun ionikoostumus muuttuu reaktiossa, mutta ionien kokonaismäärä pysyy muuttumattomana. Negatiivisesti varautuneiden anionien välillä on myös mahdollista ta- pahtua ioninvaihto, jota kutsutaan anioninvaihdoksi. (Heikkinen 2000, s. 19)

Savi on tehokas kationien vaihtaja melkein pH:sta riippumatta. Savimineraaleille on tyy- pillistä negatiivinen pintavaraus, joka selittyy kiderakenteessa korkeampivalenssisten io- nien korvautumisella alemmpivalenssisilla ioneilla. Kiderakennetta muuttamatonta ionien vaihtumista kutsutaan isomorfiseksi korvautumiseksi. Negatiivisen varauksen takia savi- mineraalit pyrkivät saavuttamaan varaustasapainon adsorboimalla pinnalleen huokos- vedessä olevia liuenneita kationeja. (Suomen ympäristökeskus 2002, s. 28–29)

## 2.5.3 Saostuminen

Saostuminen on käänteinen reaktio liukenemiselle. Saostumisessa liuenneet aineet muodostavat rajapinnalle uuden liukenevan kiinteän faasin. Saostumiseen vaikuttavat liuenneiden aineiden konsentraatiot sekä maaperän ja maaperän huokosveden pH. Sa- ostuminen on keskeinen prosessi metallien pidättymisessä. (Yong et al. 1992, s. 155–

156) Tämä selittyy sillä, että lievästi emäksisissä pH-olosuhteissa useimmat metallit saostuvat hydroksideina (Suomen ympäristökeskus 2002, s. 32). Kuvassa 5 on havainnollistettu metallihydroksidin liukoisuutta ja saostumista eri pH-arvoilla.



**Kuva 5.** Metallihydroksidien liukoisuus suhteessa pH:n arvoihin (mukaanlähdeestä Yong et al. 1992, s. 156). Metallihydroksidien saostuminen tapahtuu, kun liuenneen aineen pitoisuus on tarpeeksi korkea ja ja pH optimaalisella alueella.  $M^{+}$  kuvastaa metalli-iona, MOH saostunutta metallihydroksidia ja  $MO^{-}$  liukenevaa metalli-iona.

### **3. UUSIOMATERIAALIEN YMPÄRISTÖKELPOISUUS**

Teollisuuden sivutuotteet sekä energiantuotannon tuhkat ja kuonat ovat tyypillisiä maa- rakentamiseen soveltuvia, ns. uusiomateriaaleja. Sivutuotteiden hyötykäyttö edellyttää materiaalien ympäristökelpoisuutta, joka muodostuu muun muassa tuotteiden käyttöta- voista, ominaisuuksista sekä käyttöympäristön olosuhteista. Materiaalien haittatekijät määräytyvät usein kemiallisen koostumuksen, suurimmaksi osaksi haitallisten aineiden pitoisuuksien, ja haitallisten aineiden liukoisuuksien perusteella. (Wahlström et al. 1999, s. 10–11)

Haitta-aineiden kokonaispitoisuustietoja voidaan hyödyntää ympäristöön päätyvien pitoi- suuksien arvioinnissa. Esimerkiksi arseenin kokonaispitoisuustiedot ovat tarpeellisia, kun arvioidaan ympäristöön kulkeutuvaa kokonaismäärää erilaisilla leviämisreiteillä (AS- ROCKS-hanke 2014). Liukenevien haitta-aineiden ja liukoisuuksien määrittelemine on tärkeää, jotta materiaalien ympäristövaikutuksia voidaan tunnistaa ja arvioida.

#### **3.1 Jättemateriaalien ympäristökelpoisuus**

Jättemateriaalien ympäristökelpoisuutta arvioidaan haitta-aineiden kokonaispitoisuuden ja liukoisuuden perusteella. Liukoisuuskokeen menetelmiä on kehitetty epäorgaanisille haitta-aineille, mutta orgaanisille haitta-aineille ei ole vielä standardoitua testimenetel- mää.

Haitta-aineiden liukoisuuskäyttämiseen vaikuttavien tekijöiden arvioiminen on liukoi- suustutkimuksien tärkein vaihe. Liukoisuuteen vaikuttavat tekijät voidaan esimerkiksi ja- otella neljään eri kategoriaan: kemiallisiin, mekaanisiin, fysikaalisiin ja biologisiin tekijöi- hin. Kaikkien tekijöiden vaikutuksia ei voida luotettavasti arvioida olemassa olevilla tes- timenetelmillä, vaan niistä tehdään vain karkeita oletuksia. (Wahlström & Laine-Yli- joki 1997 s. 11–12)

Liukoisuuskokeiden tuloksien hyödyntämisessä tulee huomioida, että laboratorio-olo- suhteet eroavat sijoituspaikan olosuhteisiin verrattuna useista eri tekijöistä. Materiaalien ympäristökelpoisuutta tutkittaessa on liuenneiden ainemäärien lisäksi tärkeää huomioida sijoituspaikalle ominaisia piirteitä ja materiaalien ominaisuuksia. (Wahlström & Laine-Yli- joki 1997 s. 18–19)

Suomessa tietyissä rakenteissa hyödynnettävien asetuksessa käsiteltyjen jättemateriaa- lien haitallisten aineiden liukoisuuspitoisuuksille on esitetty raja-arvoja valtioneuvoston

asetuksessa eräiden jätteiden hyödyntämisessä maarakentamisessa 843/2017 (ns. MARA-asetus). Raja-arvot haitta-aineiden liukoisuudelle vaihtelevat jätemateriaalin ja käyttökohteen mukaan. Raja-arvoihin vaikuttaa myös peitetäänkö vai päällystetäänkö rakennekerros. (VNa 843/2017)

### 3.1.1 Liukoisuustestit

Haitta-aineiden liukoisuuksien määrittämisessä käytetään joko SFS-EN 14405 mukaista läpivirtaustestiä tai standardin SFS-EN 12457-3 mukaista kaksivaiheista ravistelutestiä tai vastaavaa menetelmää (VNa 843/2017). L/S-suhde kuvastaa uuttoliuoksen nesteen ja kiinteän materiaalin suhdetta. Tulokset ilmoitetaan yleensä L/S-suhteella 10, joka kuvastaa pitkäaikaista tilannetta.

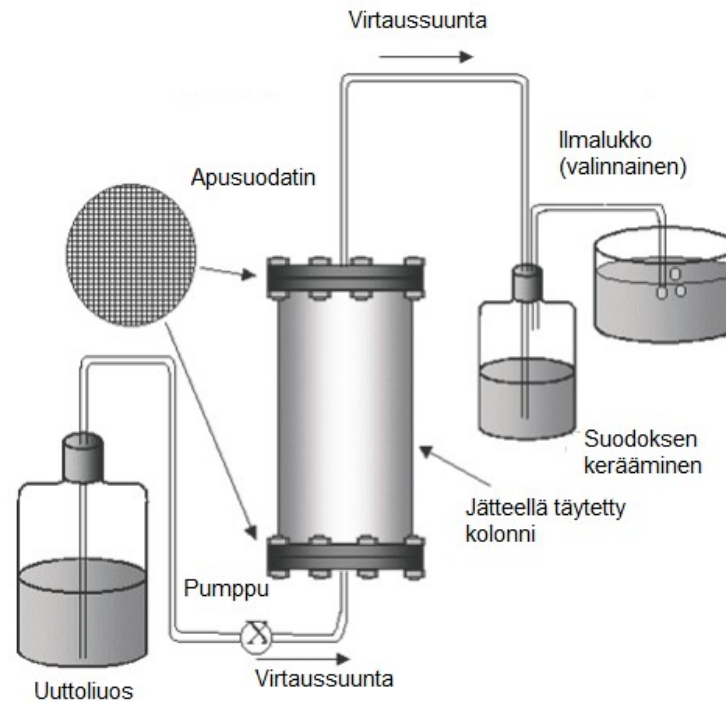
Läpivirtaustestit pohjautuvat tyypillisesti oletukseen tasapainotilanteen tai vähintään paikallisen tasapainotilan muodostumisesta veden ja kiinteän faasin välille. Kaatopaikkakelpoisuuden arvioinnissa niitä käytetään perusmäärittelyvaiheessa. (Kuusela-Lahtinen et al. 2012, s. 10) Läpivirtaustestiä käytetään määrittelemään epäorgaanisten ja haihtumattomien orgaanisten yhdisteiden liukoisuuskäyttäytymistä rakeisesta jätteestä. Läpivirtaustesti tehdään kolonnissa, jonka halkaisija on 5 cm tai 10 cm. (SFS-EN 14405 2017) Alla on periaatteellinen kuvaus liukoisuustestistä 10 cm:n halkaisijaisessa kolonnissa. Standardin mukainen koejärjestely on havainnollistettu kuvassa 6.

Analysoitava laboratorionäyte otetaan vähintään 10 kg:n näytteestä. Analysoitava laboratorionäyte säilytetään suljetussa pakkauksessa, jotta siinä ei tapahdu muutoksia. Varastointia alhaisessa lämpötilassa (4 °C) voidaan tarvita estämään ei-toivotut muutokset jätemateriaalissa. Laboratorionäyte seulotaan. Jos raekoko on  $\geq 10$  mm, näyte murskataan pienemmäksi, mikäli kyseistä jaetta on yli 5 % (m/m). Jos näytteessä on murskaamatonta materiaalia, esimerkiksi metallisia osia, se poistetaan ja sen massa ja materiaalityyppi kirjataan. (SFS-EN 14405 2017)

Kolonnin pohjalle asennetaan suodatinlevy ja esisuodatin. Testikolonne täytetään materiaalilla vähintään viitenä peräkkäisenä kerroksena ja yksi kerros lisätään kolmena alikerroksena. Materiaali tiivistetään pudottamalla 500 g punnus 20 cm:n korkeudelta kolme kertaa kerroksen aikana. Tiivistetyn testimateriaalin tilavuuden varmistetaan olevan 2,4 litraa ja korkeuden  $30 \pm 5$  cm:n. Kolonnin yläosaan asennetaan suodatinlevy ja esisuodatin, jotka estävät hiukkasten kulkeutumisen suodoksen mukana. (SFS-EN 14405 2017)

Testi tehdään 19–25 °C:een lämpötilassa. Testin alussa kolonne kyllästetään vedellä, jonka jälkeen se jätetään tasapainottumaan 16–72:n tunnin ajaksi. Tämän jälkeen kolonnein pumpataan alaosasta ylöspäin tislattua vettä, jonka sähköjohtavuus on korkeintaan

0,1 mS/m, pumppausnopeuden ollessa noin 42–56 ml/h. Kolonnista ulostulevasta liuoksesta otetaan korkeintaan 15 ml:n vesinäyte alkutilanteen pH-mittausta varten. Kolonniin pumpataan lisää vettä ja suodosta kerätään halutuilla L/S-suhteilla omiin keräyspulloihin. Standardissa esitettyjä valinnaisia L/S-suhteita ovat 0–0,1; 0,1–0,2; 0,2–0,5; 0,5–1; 1–2; 2–5; 5–10. Kerätyt suodokset suodatetaan 0,45 µm:n kalvosuodattimella, jonka jälkeen niistä mitataan heti pH ja sähkönjohtavuus. Tämän jälkeen näytteistä analysoidaan halutut pitoisuudet. (SFS-EN 14405 2017)



**Kuva 6.** Läpivirtaustestin laitteiston havainnekuva (muokattu lähteestä SFS-EN 14405 2017).

Kaksivaiheinen ravistelutesti SFS-EN 12457-3 on kehitetty rakeisten jätteiden sekä lietteiden liukoisuuden tutkimiseen. Standardi on kehitetty epäorgaanisten aineiden liukemisen tutkimista varten. Testi soveltuu jätteille, joiden raekoko on heti tai murskaamisen jälkeen alle 4 mm. (SFS-12457-3 2002)

Testi tehdään  $20 \pm 5$  °C:een lämpötilassa ja kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa testattavaa materiaalia otetaan kuivamassaltaan  $175 \pm 5$  g:n näyte 500 ml:n pulloon. Pulloon lisätään tislattua tai ionivaihdetta vettä siten, että L/S-suhteeksi saadaan  $2$  l/kg  $\pm 2$  %. Tämä jälkeen kannellista pulloa ravistellaan ravistelijassa  $6$  h  $\pm 0,5$  h. Ravistelun jälkeen annetaan suspendoituneen kiinteän aineen laskeutua  $15$  min  $\pm 5$  min. Tämän jälkeen suodos suodatetaan lähes kokonaan  $0,45$  µm:n suodatinkalvon läpi hyödyntäen esimerkiksi imusuodatuslaitteistoa. Ensimmäisestä suodoksesta mitataan pH, sähkönjohtavuus ja lämpötila heti suodatuksen jälkeen. (SFS-12457-3 2002)



Toisessa uuttovaiheessa 2 l:n pulloon lisätään vettä, jotta kumulatiiviseksi L/S-suhteeksi saadaan  $10 \text{ l/kg} \pm 2 \%$ . Ensimmäisessä vaiheessa käytetty pullo huuhdellaan 2 l:n pulloon. Myös ensimmäisessä vaiheessa käytetyt suodattimet lisätään 2 l:n pulloon. Tämän jälkeen pulloa ravistellaan 18 tuntia  $\pm 0,5 \text{ h}$ , jonka jälkeen suspendoituneen kiinteän aineen annetaan laskeutua  $15 \text{ min} \pm 5 \text{ min}$ . Suodos suodatetaan  $0,45 \mu\text{m}$ :n suodatinkalvon läpi suodatinlaitteiston avulla. Suodoksesta mitataan pH, lämpötila ja sähkönjohtavuus heti suodattamisen jälkeen. (SFS-12457-3 2002)

Näytteistä analysoidaan halutut pitoisuudet. Ensimmäisestä suodoksesta saadaan lasketua pitoisuuksien avulla liukoisuudet L/S-suhteessa 2 ja toisesta suodoksesta L/S-suhteessa 8. (SFS-12457-3 2002)

L/S-suhteen suuruus kuvastaa huuhtoutumisen aikaväliä. L/S-suhde 2 kuvastaa lyhyen aikavälin huuhtoutumista ja L/S-suhde 10 pitkän aikavälin huuhtoutumista.

### 3.1.2 Liukoisuuteen ja kulkeutumiseen vaikuttavia tekijöitä

Tärkein tutkittava liukoisuuteen vaikuttava tekijä on pH, koska monien metallien liukoisuudet ovat riippuvaisia vallitsevasta pH:sta (Wahlström & Laine-Ylijoki 1997, s. 19). Suurin osa metalleista noudattaa kationista liukenemismallia, jossa liukenevat metallipitoisuudet laskevat liuksen pH:n noustessa (Luo et al. 2019). Usein lievästi emäksisissä pH-olosuhteissa monet metallit pidättyvät saostumalla hydroksideina (Suomen ympäristökeskus 2002, s. 32). Toisaalta esimerkiksi arseenin ja alumiinin on havaittu liukenevan eniten todella emäksisissä, pH:n ollessa noin 2, ja happamissa, pH:n ollessa noin 12, olosuhteissa. (Luo et al. 2019) Kompleksien pysyvyys todennäköisesti kasvaa pH:n noustessa, koska funktionaaliset ryhmät ionisoituvat enemmän (Yong et al. 1992, s. 154).

Redox-olosuhteiden on tunnistettu vaikuttavan pH:n ohella eri aineiden esiintymismuotoon ja liukoisuuteen. Erityisesti kromin ja arseenin liukoisuuteen redox-olosuhteilla on havaittu olevan vaikutuksia. Hapettavissa olosuhteissa metallit esiintyvä yleensä oksideina ja pelkistävässä olosuhteissa metallien liukoisuutta ohjaavat tyypillisesti niukka-liukoiset metallisulfidit. Metallin liukoisuus voi kasvaa huomattavasti, jos pelkistyneessä ja niukkaliukoisessa muodossa olevia haitta-aineita sisältävä materiaali sijoitetaan hapettaviin olosuhteisiin. Erityisesti kuonamateriaaleissa pH-redox-olosuhteiden on havaittu vaikuttavan haitta-aineiden liukoisuuteen. (Wahlström & Laine-Ylijoki 1997, s. 23–24)

Metallien kulkeutumiseen vaikuttaa maaperässä oleva orgaaninen aines. Raskasmetallien liukoisuus kasvaa, kun orgaaninen aines hajoaa. Tällöin liunneen orgaanisen hiilen

ja humushappojen määrä vedessä kasvaa, jolloin veden liottavuus tehostuu redox-potentiaalin pienentyessä. (Kuusela-Lahtinen et al. 2012, s. 7) Orgaaninen aines pidättää maaperän haitta-aineita hyvin, koska sillä on suuri ominaispinta-ala (Heikkinen 2000, s. 21).

Lämpötila vaikuttaa aineiden liuetessa tapahtuviin energianmuutoksiin. Jos kylläisen liuoksen muodostuminen on endoterminen eli ympäristöstä lämpöä sitova, kasvaa liukoisuus lämpötilan noustessa. Jos reaktio on eksoterminen, lämpötilan laskeminen lisää liukoisuutta. (Hänninen et al. 2018, s. 77) Lämpötilan lasku vähentää useiden aineiden liukoisuutta. Lämpötilan laskeminen kuitenkin kasvattaa hiilidioksidin liukenemista veteen, jonka seurauksena joidenkin aineiden liukoisuus saattaa jopa kasvaa. (Wahlström & Laine-Ylijoki 1997, s. 30)

Raekoko on myös materiaalin liukoisuuteen vaikuttava ominaisuus. Liukoisuus tyypillisesti kasvaa raekoon pienentyessä, koska raekoon pienentäminen kasvattaa ominaispinta-alaa. (Todorovic & Ecke 2006) Mikäli aine sisältää paljon emäksisiä komponentteja, esimerkiksi kalkkia, saattaa liukoisuus olla kuitenkin pienempää hienommasta kuin karkeasta materiaalista. Tämä selittyy pääasiassa karkeamman aineksen pintakerroksessa tapahtuvalla karbonoitumisella ja hienonnetun aineen kalkkipitoisten pintojen aiheuttamasta emäksisyydestä. (Wahlström & Laine-Ylijoki 1997, s. 26)

Materiaalin läpi suotautuva vesimäärä on keskeinen liukenevien aineiden määrien kannalta. Veden kulkeutumiseen materiaalin läpi vaikuttavat mahdolliset huonosti vettä johtavat vyöhykkeet materiaalissa, materiaalin vedenläpäisevyys ja sijoituspaikan kaltevuus. (Wahlström & Laine-Ylijoki 1997, s. 27) Yleisesti ottaen maaperän vesimäärän ja veden virtausnopeuden kasvaessa advektion aiheuttama haitta-aineiden kulkeutuminen nopeutuu maaperässä. Lisäksi suuri maaperän vesipitoisuus ja korkea lämpötila lisäävät haihtumista maaperässä. (Heikkinen 2000, s. 12) Veden kulkeutuminen tiettyjä virtausreittejä pitkin on yleistä kenttäolosuhteissa. Kanavoitumisen takia liukoisuudet voivat olla rakenteessa mahdollisesti pienempiä kuin kolonnitestistä saadut tulokset. (Wahlström & Laine-Ylijoki 1997, s. 27) Veden kulkeutumisreittien muutoksiin ja kanavoitumiseen maaperässä voi myös vaikuttaa jäätymis-sulamissykleistä ja kuivumis-kastumissykleistä aiheutuva rasitus ja muodostuvat halkeamat.

Höyrynpaine on aineen haihtumisena tapahtuvaan kulkeutumiseen vaikuttava ominaisuus. Haihtuminen on suuren höyrynpaineen alkuaineille ja yhdisteille tärkeä kulkeutumismuoto. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi elohopea, seleeni ja orgaaniset yhdisteet. (Tolppanen 1989, Yong 1992, Heikkinen 2000, s. 12 mukaan) Henryn lain mukaan tietyn

kaasun massa, joka kyllästää tietyn liuottimen, on suoraan verrannollinen kaasun paineeseen tasapainotilanteessa. Edellytyksenä on myös, että lämpötila on vakio ja kaasu ei reagoi kemiallisesti liuottimen kanssa. Henryn laki voidaan esittää kaavan 3 mukaisesti:

$$p_A = Hx_A, \quad (3)$$

jossa  $p_A$  on osapaine,  $H$  on Henryn vakio ja  $x_A$  on komponentin mooliosuus liuoksessa. (Schaschke 2014, s. 181)

### 3.1.3 Yleisimpiä hyötykäyttöä rajoittavia haitta-aineita

Jättemateriaalit voivat sisältää haitta-aineita, jotka ympäristöön vapautuessaan voivat aiheuttaa terveys- tai ympäristöriskiä, kuten pohjaveden pilaantumista. Jättemateriaalin hyötykäytölle on MARA-asetuksessa (VNa 843/2017) (liitteen 2 taulukossa 1) määritelty hyödynnettävän jätteen suurimmat sallitut haitallisten aineiden liukoisuudet eri maarakentamiskohteissa. Suurimpia sallittuja liukoisuuksia on määritelty raskasmetalleille, kloridille, sulfaatille, fluoridille sekä liuenneelle orgaaniselle hiilelle. (VNa 843/2017) Kaatopaikkarakentaminen ei kuulu MARA-asetuksen soveltamisalaan.

MARA-asetuksessa esitetyt haitallisten aineiden raja-arvot perustuvat teoreettiseen laskennalliseen tarkasteluun, jossa on laskettu riskiperusteiset viitearvot eli jätteen hyödyntämisestä eri maarakentamiskohteissa aiheutuva riski pohja- ja pintaveden laadulle. Laskelmat perustuvat yksinkertaisiin oletuksiin ja laskentamenetelmiin ja ne on tehty yleisellä tasolla. Laskelmien lisäksi raja-arvojen määrittelyssä on lisäksi käytetty päätösanalyysiä, minkä takia raja-arvot eivät ole suoraan laskelmien tuloksia. (MARA-asetuksen soveltamisohje 2019)

Kaatopaikkarakentamisessa jättemateriaalien hyötykäyttöä voivat rajoittaa niiden ominaisuuksien muuttuminen tai haitalliset vaikutukset kaatopaikkaprosesseihin, muodostuvan kaatopaikkaveden laatuun tai muiden rakenteissa käytettävien materiaalien toimintaan tai pitkäaikaiskestävyyteen. Pintarakenteen tiivistyskerroksen yläpuolisissa rakennekerroksissa jättemateriaalien hyötykäyttöä voi rajoittaa niiden mahdollisesti aiheuttama valuma- ja kuivatusvesien käsittelytarve. Kaatopaikkarakenteissa käytettävistä materiaaleista esitetään vaatimuksia kohteen ympäristöluvassa. (Infra 15-710194 2018)

Liukoista orgaanista ainesta muodostuu maaperään orgaanisen aineksen hajotessa (Kuusela-Lahtinen et al. 2012, s. 48). Wahlström & Laine-Ylijoki 1997 mukaan, orgaanisten yhdisteiden määrän suuruus suotovedessä tai sivutuotteessa vaikuttaa merkittä-

västi joidenkin metallien liukenemisen tutkimiseen. DOC-yhdisteet muodostavat komplekseja erityisesti kuparin, lyijyn, molybdeenin, nikkelin, kadmiumin ja sinkin kanssa. Kompleksinmuodostus lisää aineiden liukoisuutta, koska kompleksinmuodostukseen osallistunut aine ei ole enää ionien tasapainotilassa mukana, vaan systeemi pyrkii uuteen tasapainotilaan. (Wahlström & Laine-Ylijoki 1997, s. 21)

Fluoridi-, (Heikkinen 2000, s. 14) kloridi- ja sulfaatti-ionit muodostavat epäorgaanisia komplekseja metalli-ionien kanssa (Yong et al. 1992, s. 153). Kloridi on ei-reaktiivinen vesiliukoinen ioni, jonka avulla pystytään arvioimaan pohjaveden laadussa tapahtuvia luontaisia vaihteluita sekä mahdollisesti haitta-aineiden kulkeutumista (Ympäristöministeriö 2014, s. 222). Kloridi edistää veden korroosiovaikutusta, mikäli pitoisuus on kymmeniä milligrammoja litrassa. Kloridin laatutavoite talousvedessä on korkeintaan 250 mg/l. Talousvedessä sulfaatin laatutavoite on 250 mg/l. Suuret sulfaattipitoisuudet lisäävät korroosioriskiä, minkä takia sulfaatin tavoitepitoisuudeksi suositellaan esimerkiksi alle 150 mg/l. Fluoridi vähentää pieninä pitoisuuksina hammaskariesta, mutta liiallisina pitoisuuksina siitä aiheutuu terveyshaittoja. (Valvira 2020)

## 3.2 Jätteenpolton pohjakuona

Jätteenpolton pohjakuonaa syntyy jätteenpolton yhteydessä. Käsittelemätön pohjakuona on huokoista ja raekooltaan moninaista. (Kaartinen et al. 2010, s. 21) Suomessa syntyy vuosittainen jätteenpolton pohjakuonaa noin 300 000 tonnia (Suomen Erityisjäte 2017, s. 7). Jätteenpolttolaitoksia on Suomessa tällä hetkellä yhdeksän ja kymmenettä rakennetaan (Bröckl et al. 2021, s. 9).

### 3.2.1 Koostumus

Jätteenpolton pohjakuona on heterogeeninen materiaali, joka sisältää pääsääntöisesti mineraaleja (keramiikkaa, lasia, tuhkaa ja sulamistuotteita), metalleja ja palamatonta orgaanista materiaalia (Sormunen 2017, s. 19) (kuva 7). Mineraalien osuus on noin 80–85 %, metallien osuus noin 10–12 % ja ei-rautametallien osuus noin 2–5 % jätteenpolton pohjakuonasta (CEWEP 2017). Palamattoman materiaalin osuus on tyypillisesti noin 1 % (Holm & Simon 2017). Jätteenpolton pohjakuonassa esiintyy suurimpina pitoisuuksina yhdisteistä alumiinin ja piin oksideja. Muita esiintyviä aineita ovat esimerkiksi alkali- ja maa-alkaliyhdisteet, sulfaattit ja kloridit. (Kaartinen et al. 2010, s. 22)



**Kuva 7.** *Käsittelemätön jätteenpolton pohjakuona (Kaartinen et al. 2010, s. 44).*

Jätteenpolton pohjakuona tyypillisesti käsitellään ennen hyötykäyttämistä. Käsittelyn tarkoituksena on muun muassa parantaa kuonan ympäristöllisiä ja teknisiä ominaisuuksia, ottaa talteen metalleja ja erotella jakeita toisistaan. Ikäännyttämällä, eli antamalla kuonan reagoida veden ja ilman kanssa, pyritään vähentämään kuonan reagoivuutta ja metallien liukoisuutta ympäristöön. Magneettierottelulla kuonasta erotellaan magneettiset metallit ja pyörrevirtaerottimella erotellaan ei-magneettiset metallit. Seulonnan avulla rakeet erotellaan useampaan eri kokoluokkaan, jotta prosessoitavuus optimoituu ja tietyt jakeet, kuten lasi ja metallit, saadaan erilleen. (Kaartinen et al. 2010, s. 26,28)

### **3.2.2 Alkuaineiden kokonaispitoisuudet pohjakuonassa**

Pohjakuonassa esiintyvien eri alkuaineiden pitoisuudet vaihtelevat. Pohjakuonan kemialliseen koostumukseen vaikuttavia tekijöitä ovat poltettavan jätteen koostumus ja jätteenpoltteknikka (Izquierdo et al. 2002). Suurempina pitoisuuksina esiintyviä alkuaineita ovat pii, rauta, kalsium, alumiini, natrium, kalium, hiili ja happi. Muita vähemmän esiintyviä alkuaineita ovat muun muassa sinkki, kupari, lyijy, kromi, antimoni, vanadiini, arseeni ja seleeni. (Chandler et al. 1997, s. 378–379,385) Suomalaisen käsitellyn jätteenpolton pohjakuonassa merkittävimpiä haitta-aineita kokonaispitoisuuksien perusteella ovat sinkki, kupari ja barium (taulukko 3).

**Taulukko 3.** Vantaan jätteenpolttolaitoksen yhdyskuntajätteen polton käsiteltyjen pohjakuonien alkuaineiden kokonaispitoisuuksia (koottu lähteestä Ramboll 2021). Tulokset on ilmoitettu mg/kg kuiva-ainetta.

Aine Tutkittu fraktio (mm)	Perusmäärittelytestaus 2019					Laadunvalvonta 2020				
	0-2	2-6	6-16	16-32	32-50	0-2	2-5	5-16	16-50	2-50
TOC (%)	2	2	1	0	0	2	2	0	0	2
PAH tot (mg/kg)	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1	1	<0,1
PCB tot (mg/kg)	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	0,004	0,004	0,010
As (mg/kg)	9	7	9	9	8	12	16	17	17	18
Ba (mg/kg)	1 200	1 100	1 600	1 400	1 300	2 700	370	1 100	1 100	1 300
Cd (mg/kg)	2	2	2	1	2	2	1	1	6	5
Cr (mg/kg)	340	130	140	130	150	390	180	140	220	340
Cu (mg/kg)	7 500	2 300	7 600	1 500	2 100	4 500	1 700	2 500	1 100	3 000
Mo (mg/kg)	9	9	7	8	8	11	10	7	8	35
Ni (mg/kg)	320	130	87	71	84	250	96	61	140	320
Pb (mg/kg)	610	290	1 300	200	140	640	220	230	280	500
Se (mg/kg)	4	2	2	3	<1	16	18	<1	3	<1
Sb (mg/kg)	70	42	40	35	28	58	40	66	34	53
V (mg/kg)	29	29	24	27	26	39	38	28	44	27
Zn (mg/kg)	10 000	5 000	2 000	1 500	2 900	7 000	770	1 400	3 700	2 400
Hg (mg/kg)	0,37	0,12	0,12	0,06	0,06	0,40	0,36	0,09	0,11	0,22

Pohjakuonan laadun edistämiseen yksinkertaisin tapa on optimoida polttoprosessin olosuhteita. Olosuhteita voidaan optimoida sekoittamalla jätettä palamisen aikana, lisäämällä palamisen viipymäaikoja tai nostamalla lämpötilaa tulipesässä. Tämän avulla pyritään saavuttamaan orgaanisen aineksen mahdollisimman täydellistä palamista. Pohjakuonan lisäprosessointi on usein myös tarpeellista, jotta sitä voidaan esimerkiksi käyttää maarakentamisessa. (Kaartinen et al. 2010, s. 27) Pohjakuonan laatua voidaan myös parantaa lisäämällä metallien erilliskeräystä, jotta poltettava jäte sisältäisi vähemmän metallia. Jätteenpolton pohjakuonan esikäsittelyn yhtenä tarkoituksena on erottaa pohjakuonassa olevia metallijakeita (Kaartinen et al. 2010, s. 26). Erottelusta huolimatta pohjakuonaan jää metalleja (taulukko 3).

Useammassa tutkimuksessa on osoitettu, että metallien, kuten lyijyn ja sinkin, kokonaispitoisuudet ja liukoisuudet eivät korreloi keskenään jätteenpolton pohjakuonassa (Hyks & Astrup 2009, Saveyn et al. 2014; Sormunen 2017, s. 21 mukaan). Kokonaispitoisuuden ja liukoisuuden korreloimattomuuteen aggregaateissa vaikuttaa alkuaineiden mahdollinen sisältyminen aggregaattiseen matriisiin, jolloin ne eivät välttämättä ole saatavilla veden kanssa kontaktiin. Myös mineraalien liukoisuusrajoitteet sekä sorptioprosessit voivat estää alkuaineiden liukenemistä niiden pitoisuuksien mahdollistamalla tasolla. (Saveyn et al. 2014, s. 46) Pohjakuonasta maaperään sekä pinta- ja pohjavesiin mahdollisesti haitallisten aineiden aiheuttamat riskit tulisi määrittellä jätemateriaalin aineiden liukoisuuksien perusteella kokonaispitoisuuksien sijaan (Dijkstra et al. 2006; Sormunen 2017, s. 21 mukaan). Pohjakuonan liukenemiskäyttämisen tiedot ovat tämän takia tärkeitä arvioitaessa materiaalista aiheutuvia ympäristövaikutuksia niiden eri käyttötarkoituksissa (Astrup et al. 2016, s. 618).

### **3.2.3 Pohjakuonasta liukenevia haitta-aineita**

Jätteenpolton jäännöksistä, kuten pohjakuonasta, liukenevat alkuaineet voidaan jaotella kolmeen eri ryhmään hallitsevan liukenemiskäyttämisen mukaan: saatavuuskontrolloitaviin, liukoisuuskontrolloitaviin ja kompleksoitumis-sorptiokontrolloitaviin. Saatavuuskontrolloitavina alkuaineina voidaan periaatteessa pitää helposti liukenevia yhdisteitä. Niiden vapautumista eivät rajoita liukoisuusrajoitteet, sillä pitoisuudet liuoksessa ovat mineraalin liukoisuutta alemmat. (Hyks et al. 2009)

Yleisesti liukoisuuskontrolloiminen liittyy kiinteässä aineessa olevien metallioksidien, kuten alumiini-, sinkki- ja rautaoksidien, liukenemiseen (Luo et al. 2019). Liukoisuuskontrolloimista tapahtuu, kun jätemateriaalin kanssa kontaktissa ollut liuos on kylläinen tarkasteltavien aineiden suhteen (Kosson et al. 1996). Liukoisuuskontrolloitavien alkuaineiden irtoamisen rajoittava tekijä on mineraalin liukoisuus. Kalsiumin liukeneminen kalsiumsulfaatista on esimerkki liukoisuuskontrolloitavan alkuaineen liukenemisestä. (Hyks et al. 2009)

Kompleksoitumis-sorptiokontrolloitavat alkuaineet ovat pääasiassa metalleja (Hyks et al. 2009). Metalleilla on kemiallinen taipumus muodostaa komplekseja liunneen orgaanisen hiilen kanssa ja niiden liukenemisen on esitetty vaihtelevan suhteessa liunneen orgaanisen hiilen määrään. (Johnson et al. 1996; Hyks et al. 2009 mukaan) Hivenmetallien liukenemistä jätteenpolton kuonasta kontrolloidaan usein sorptioprosesseilla pinnoille, kuten orgaaniseen ainekseen, saveen tai oksideihin (Zhao et al. 2017, Luo et al.

2019 mukaan). Kompleksoituminen ja sorptio eivät ole kuitenkaan ainoita metallien liukenemistä kontrolloitavia prosesseja, koska metallien on myös tutkittu olevan liukoisuus-kontrolloitavia (Hyks et al. 2009).

Jätteenpolton pohjakuonasta liukenevista mahdollisesti haitallisista aineista erityisen kriittisinä kuonan ympäristövaikutuksien kannalta on pidetty metalleista antimonia, kuparia sekä molybdeenia ja liukoista suoloista sulfaattia ja kloridia (Saveyn et al. 2014, Sormunen 2017, s. 21 mukaan). Aineiden liukoisuuksiin vaikuttavat erilaiset tekijät. Esimerkiksi kuparin liukeneminen voi olla yhteydessä liuennun orgaanisen hiilen jäännöksiin. Helposti liukenevalla kloridilla liukoisuuteen vaikuttaa sen saatavuus. (Hyks et al. 2009)

Taulukossa 4 on esitetty suomalaisesta käsitelystä jätteenpolton pohjakuonasta liukenevien haitta-aineiden pitoisuuksia, jotka on mitattu liukoisuustesteillä. Tutkituista liukenevista suoloista sulfaattia ja kloridia liukenee eniten. Liukoisuus vaihtelee raekoon ja liukoisuustestityypin mukaan noin 1 000–5 000 mg/kg välillä L/S-suhteella 10 mitattuna. Tuloksien perusteella metalleista liukenee eniten molybdeeniä, kuparia ja kromia (Ramboll 2021).

**Taulukko 4.** Käsiteltyjen jätteenpolton pohjakuonien haitta-aineiden liukoisuustestituloksia (koottu lähteestä Ramboll 2021). Laadunvalvonnan 2020 ja perusmäärittelytestauksen 2019 liukoisuustestit ovat ravistelutestejä ja perusmäärittelytestauksen läpivirtaustesti. Liukoisuustestien tulokset on esitetty L/S-suhteella 10.

Tutkittu aine	Perusmäärittelytestaus 2019					Perusmäärittelytestaus 2019					Laadunvalvonta 2020				
	Kumulatiivinen liuennut määrä L/S 10 (CEN/TS 14405), mg/kg läpivirtaus					Kumulatiivinen liuennut määrä L/S 10 (SFS-EN 12457-3), mg/kg ravistelu					Kumulatiivinen liuennut määrä L/S 10 (SFS-EN 12457-3), mg/kg ravistelu				
Fraktio, mm	0-2	2-6	6-16	16-32	32-50	0-2	2-6	6-16	16-32	32-50	0-2	2-5	5-16	16-50	2-50
As	<0,05	<0,05	0,24	<0,05	<0,05	0,014	0,01	0,035	0,009	0,01	0,01	0,01	0,01	<0,006	0,01
Ba	0,42	0,39	0,29	0,35	0,57	0,342	0,36	0,342	0,25	0,29	0,4	0,37	0,32	0,31	0,24
Cd	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,002	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0012	<0,001
Cr	1,7	0,24	0,09	0,14	<0,05	3,12	0,8	0,14	0,074	0,04	2,63	1,79	0,24	0,059	0,04
Cu	1,7	0,89	0,5	0,49	0,26	1,79	1,01	0,62	0,34	0,4	1,04	0,89	0,26	0,18	0,22
Mo	1,3	0,64	0,49	0,39	0,45	1,29	0,74	0,37	0,2	0,32	1,26	1	0,36	0,34	0,79
Pb	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,006	0,006	0,009	<0,006	<0,006	0,03	0,02	<0,01	<0,006	<0,01
Ni	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,006	0,006	0,009	<0,006	<0,006	<0,01	<0,01	<0,01	<0,007	<0,01
Sb	0,24	0,44	0,3	0,17	0,12	0,23	0,63	0,23	0,27	0,19	0,19	0,27	0,33	0,3	0,22
Se	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,04	<0,03	<0,033	<0,029	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Zn	0,07	0,07	<0,05	<0,05	0,07	0,2	0,19	0,12	<0,12	<0,118	0,41	0,24	<0,12	<0,12	<0,12
Hg	<0,005	<0,005	0,019	<0,005	0,009	0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0,003	0,003	<0,002	<0,002	0,003
DOC	170	81	77	59	67	264	136,1	143,9	100	<0,002	275	140	56,9	41,7	81,7
Cl <sup>-</sup>	3 100	1 800	1 200	1 000	1 200	4 841	3 042	1 291	947	1 094	3 961	2 881	1 203	1 391	2 363
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4 200	1 900	2 500	2 500	2 000	3 531	2 304	1 883	1 950	1 914	2 639	3 061	2 368	2 838	5 007
F <sup>-</sup>	5,1	3	2,9	2,4	3,4	<1	<1	<1	<1	<1	1,7	3,9	<10,0	<10	<9,9

Jätteenpolton pohjakuonan mahdollisesti liukeneva hiilifraktio voidaan jakaa humushappoihin, fulvohappoihin sekä hydrofiiliseen orgaaniseen hiileen (van Zomeren & Comans 2009). Jätteenpolton pohjakuonasta liukenevan orgaanisen aineksen määrä liittyy siinä olevan palamattoman orgaanisen materiaalin jäännöksiin ja siinä voi olla huomattavaa



vaihtelua (Hjelmar 1996). Pohjakuonan laatua tulisi tarkkailla jatkuvasti visuaalisesti, jotta pohjakuonan hyötykäytöstä ei aiheudu ongelmia ylittyvien liukenevien DOC-pitoisuuksien takia. Huonosti palanut materiaali tulee uudelleen polttaa. (Sormunen & Rantsi 2015)

### 3.3 Helsinki-moreeni

Ylijäämämaata kertyy Suomessa vuosittain arvion mukaan noin 20–30 miljoonaa tonnia. Tästä noin 4 miljoonaa tonnia on Helsingin seudulta muodostunutta. (Vaara 2011, s. 4) Helsinki-moreeniksi kutsutaan Helsingin seudulla muodostuvaa ylijäämämaata, joka sisältää pieniä määriä (alle 10 %) mineraalista rakennusjätettä. Helsinki-moreenin sisältämän maa-aineksen haitta-ainepitoisuudet alittavat *valtioneuvoston asetuksen maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (214/2007, ns. PIMA-asetus)* mukaiset alemmat ohjearvot. (Helsingin kaupungin ympäristölautakunta 2016) Helsinki-moreenia kaivetaan uuteen käyttöön otettavien alueiden rakennustyömaiden maaperästä. Se sisältää muun muassa betonia, tiiltä ja stabiloitua savea. (Huhtinen et al. 2018, s. 57)

Helsinki-moreenissa voi olla pieniä pitoisuuksia erilaisia raskasmetalleja, jotka ovat peräisin joko maan seassa olevasta mineraalisesta rakennusjätteestä tai lievästi pilaantuneesta maa-aineksestä (taulukko 5). Esimerkki Helsinki-moreenin liukoisuudet alittavat *VNa 331/2013:n* mukaisten pysyvän jätteen raja-arvot. Maan seassa voi olla humusta tai muuta kasvillisuudesta peräisin olevaa orgaanista ainesta.

Helsinki-moreenin maa-aines voi sisältää metallipitoisuuksia, jotka alittavat *PIMA-asetuksen (VNa 214/2007)* mukaisten alempien ohjearvojen pitoisuudet. Betonimurskeen sisältämiä haitallisia aineita ovat pääsääntöisesti kromi, molybdeeni ja sulfaatti (Wahlström et al. 2001, s. 45). Diotti et al. 2020 ovat havainneet liukoisuustestien perusteella, että rakennus- ja purkujätteestä liukenevista metalleista kromi, nikkeli, lyijy ja kupari ovat liukoisuudeltaan kriittisimpiä. Diotti et al. 2020 ovat lisäksi havainneet liukoisuustesteissä, että kloridi, fluoridi ja sulfaatti ovat liukoisuuden kannalta kriittisiä parametrejä rakennus- ja purkujätteen liukoisuudessa (Diotti et al. 2020).

**Taulukko 5.** Helsinki-moreenin kokonaispitoisuuksia ja haitta-aineiden liukoisuuksia (koottu lähteistä Metropolilab 2019a ja Metropolilab 2019b) ja pysyvän jätteen kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvot (VNa 331/2013) sekä hyödynnettävän jätteen sallitut liukoisuudet peitettyssä kenttärakenteessa (VNa 843/2017).

Tutkittu aine	Kokonaispitoisuudet (mg/kg)		Kumulatiivinen liennut määrä L/S 10 SFS EN-12457-3:2002 2-vaiheinen ravistelutesti		Pysyvän jätteen raja-arvo (mg/kg kuiva-ainetta) VNa 331/2013 L/S 10	Haitallisten aineiden raja-arvo (mg/kg kuiva-ainetta) VNa 843/2017 L/S 10
	MK107	MK108	MK107	MK108		
Näyte	MK107	MK108	MK107	MK108	-	-
As	< 5	< 5	0,04	0,01	0,5	0,5
Hg	0,1	< 0,05	< 0,002	< 0,002	0,01	0,01
Cd	< 1	< 1	< 0,001	< 0,001	0,04	0,04
Co	7	8	em.	em.	em.	em.
Cr	19	23	0,03	0,06	0,5	0,5
Cu	23	17	0,08	0,18	2	2
Pb	22	8	0,04	0,06	0,5	0,5
Ni	10	13	0,09	0,05	0,4	0,4
Zn	91	48	< 0,15	0,29	4	4
V	28	30	0,06	0,09	-	2
Sb	< 2	< 2	< 0,06	< 0,06	0,06	0,3
Ba	em.	em.	0,22	0,45	20	20
Se	em.	em.	< 0,03	0,04	0,1	0,4
Mo	em.	em.	0,02	0,01	0,5	0,5
Cl <sup>-</sup>	em.	em.	< 16	< 18,9	800	800
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	em.	em.	< 32,7	58	1000	1200
F <sup>-</sup>	em.	em.	5,9	5,3	10	10
DOC	em.	em.	58	82,2	500	500
TDS	em.	em.	1 078	1 775	4 000	em.

## 4. MATERIAALIT JA MENETELMÄT

### 4.1 Tutkimuskohde

Tutkimuksessa tarkasteltavat koepintarakenteet sijaitsevat Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän (HSY) Ämmässuon ekoteollisuuskeskuksessa, joka on noin 200 hehtaarin laajuinen jätteenkäsittelykeskus Espoon kaupungin länsiosassa, osittain Kirkkonummen kunnan alueella (kuva 8). Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus otettiin käyttöön vuonna 1987, jolloin se toimi seudullisena yhdyskuntajätteen kaatopaikkana. Vuonna 2014 aloitti toimintansa Vantaan Energia Oy:n jätevoimala, jolloin kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrä väheni huomattavasti. Ämmässuon toimintojen pääpaino on vaihtunut loppusijoittamisesta jätteen jalostamiseen käsiteltävän jätteen määrän ja laadun muuttumisen seurauksena. (Uksulainen et al. 2021)



*Kuva 8. Ortoilmakuva Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksesta vuonna 2019 (kartta.hsy.fi). Koerakenteiden sijainti on rajattu punaisella viivalla.*

### 4.2 Tutkimuskohteen koerakenteiden esittely

Viisi erilaista koerakennetta on rakennettu elo-syyskuussa 2018 Ämmässuon kaatopaikan laajennusalueen itäreunalle. Koepintarakenteiden tarkoituksena on tutkia erilaisten pintarakenneratkaisujen toimintaa. Koerakenteissa ei ole huomioitu kaasunjohtavuutta,

sillä rakenteiden alla ei ole jätetäyttöä. Koepintarakenteiden rakentaminen ja niissä käytetyt materiaalit on kuvattu tarkemmin Reimanin diplomityössä (Reiman 2019).

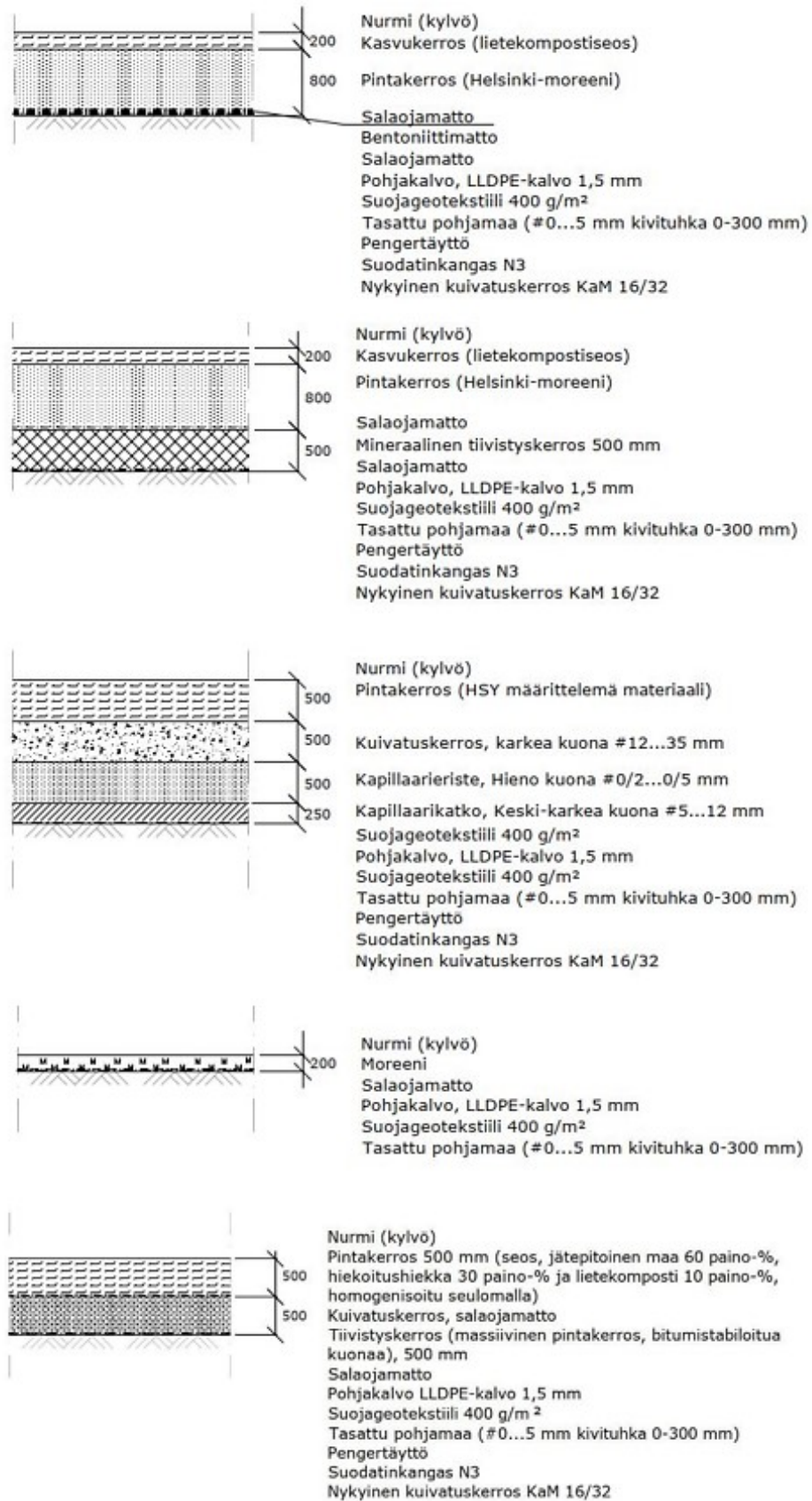
Koerakenteiden rakennepoikkileikkaukset on esitetty kuvassa 9. Kaikissa koerakenteissa on tasatun pohjamaan päällä suojageotekstiili tai kaksi suodatinkangasta, joiden neliöpaino on  $400 \text{ g/m}^2$  (Vahanen 2018). Suojageotekstiilin tai suodatinkankaiden päällä on 1,5 mm:n paksuinen LLDPE-pohjakalvo, joka on saumattu vesitiiviisti. Pohjakalvon päälle on asennettu salaojamatto. (Ramboll 2018) Salaojamatto toimii koerakenteen tarkkailukerroksena, johon kerääntyy pintarakenteen läpäisevä vesimäärä.

Koerakenteessa A.1 on tiivistyskerroksena bentoniittimatto ja koerakenteessa A.2 polymeriparannetulla bentoniitilla seostetusta hienorakeisesta jätteenpolton kuonasta #0/5 mm rakennettu 500 mm:n paksuinen tiivistyskerros (Ramboll 2018). Molemmissa on kuivatuskerroksena salaojamatto, 800 mm:n pintakerros Helsinki-moreenia ja 200 mm:n nurmetettu kasvukerros lietekompostiseosta (kuva 9). (Ramboll 2018)

Koerakenne B.2 on kapillaarisulkurakenne, jossa on ohennettu pintakerros. Kapillaarisulkurakenne koostuu karkeasta 250 mm:n paksuisesta kapillaarikatkosta, jossa on käytetty keskikarkeaa kuonalajitetta #5/12 mm, ja hienorakeista 500 mm:n paksuisesta kapillaarieristeestä, jossa on käytetty hienoa kuonalajitetta #0/5 mm. Kuivatuskerros on karkeaa jätteenpolton kuonafraktiota #12/35 mm. Helsinki-moreenista rakennetun pintakerroksen paksuus on 500 mm eikä erillistä kasvukerrosta ole. (Ramboll 2018)

Koerakenne C.0 on Helsinki-moreenista tehty väliaikainen, 200 mm:n paksuinen pintarakenne (kuva 9) (Ramboll 2018). Koerakenteessa C.0 ei ole enää veden määrän seurantaa, joten koerakenteen vesitasetta ei tarkastella. Koerakenteessa olevien yhdistelmäantureiden tulokset on kuitenkin raportoitu tässä diplomityössä.

Koerakenteessa U.1 on käytetty tiivistyskerroksessa bitumistabiloitua jätteenpolton kuonaa (kuva 9). Kuivatuskerros on tehty salaojamatosta ja 500 mm:n paksuinen pintakerros on rakennettu seoksesta, joka sisältää 60 painoprosenttia Helsinki-moreenia, 30 painoprosenttia hiekoitushiekkaa ja 10 painoprosenttia lietekompostia. (Ramboll 2018, Reiman 2019 mukaan)



**Kuva 9.** Koepintarakenteet A.1, A.2, B.2, C.0 ja U.1 (Ramboll 2018; Reiman 2019).

### 4.3 Koerakenteiden seuranta

Koerakenteiden toimintaa seurataan rakennekerroksiin ja mittakaivoihin asennetuilla jatkuvatoimisilla antureilla sekä mittakaivoista tehtävillä kenttämittauksilla ja vesinäytteenotolla. Koerakenteista purkautuvan veden määrää ja laatua sekä rakennekerroksien ominaisuuksia seurattiin tarkkailujakson aikana 1.12.2020–30.6.2021. Seurantajaksolla tarkoitetaan tässä diplomityössä syksystä 2018 kesäkuun 2021 loppuun kestänyttä ajanjaksoa. Seurantajakson aikaiset lämpötila-, johtokyky- ja maankosteustulokset on esitetty liitteessä 6.

#### 4.3.1 Kaivojen vesimääräseuranta ja rakenteiden instrumentoinnit

Pintarakenteiden rakennekerroksista purkautuvan veden määrää seurattiin pintarakenteiden rakennekerroksiin yhdistettyjen mittakaivojen avulla (kuva 10). Kaivot ovat joko umpikaivoja tai läpivirtauskaivoja, joissa on v-pato. Kaikkiin mittakaivoihin on asennettu pumppausjärjestelmä, paitsi B2.2-kaivoon, johon ei kertynyt seurantajakson aikana vettä, ja koerakenteen C.0 mittakaivoihin, koska koerakenteen C.0 osalta vesimäärien seuranta on lopetettu.

Pumput on ajastettu tyhjentämään kaivoja 30 minuutin, 2 tunnin tai 24 tunnin välein, jolloin pumput pumppaavat 3 minuuttia kerrallaan. Pumppauksen jälkeen on 2 minuuttia aikaa ennen pinnan tason mittausta, jotta pumppauksen jälkeen letkuissa oleva vesi ehtii palautua kaivoihin. Kaivoissa on jatkuvatoimiset paineanturit, joiden avulla veden pinnan tasot saadaan mitattua 10 minuutin välein. (Hämäläinen 2020)

Koerakenteiden rakennekerroksiin on asennettu antureita mittaamaan maankosteutta, sähkönjohtokykyä ja lämpötilaa. Antureiden sijainti on esitetty kuvassa 10. Kuvasta näkyy myös mittakaivot sekä mittakaivoissa olevat anturit.

Reimanin diplomityössä todettiin seurantatulosten perusteella, että vesien johtamisjärjestelmissä on virheitä. Joulukuussa 2020 pintarakenteita korjattiin ja samassa yhteydessä rakennettiin kolme uutta umpikaivoa. Kenttien reunat rajattiin siten, ettei koerakenteeseen kerry vesiä sen ulkopuolelta. Koerakenteiden A.1 ja A.2 pintavalunnat sekä kasvu- ja kuivatuskerroksista purkautuvat vedet yhdistettiin rakennekerroskohtaisesti ja kerättiin kolmeen v-kaivoon. Korjauksien yhteydessä A.1 ja A.2 kenttien vedet eroteltiin ja tehtiin uudet umpikaivot, joihin johdetaan koerakenteesta A.1 pintavalunta (kaivo A1.1) sekä kasvukerroksen ja kuivatuskerroksen vedet (kaivot A1.2 ja A1.3.). Alkuperäisiin kol-

meen v-kaivoon johdetaan korjausten jälkeen pintarakenteen A.2 pintavalunta sekä kasvukerroksen ja kuivatuskerroksen vedet. Uusien kaivojen rakentamisen yhteydessä vanhat v-kaivot 1, 2 ja 3 nimettiin uudelleen kaivoiksi A2.1, A2.2 ja A2.3.

Koerakenteen A.1 rakennekerrokseen kertyvät vedet johdetaan viiteen mittakaivoon (kuva 10). Koerakenteeseen A.1 on asennettu eri syvyyksille kaksi yhdistelmäanturia kasvukerrokseen ja neljä yhdistelmäanturia pintakerrokseen.

Koerakenteen A.2 rakennekerroksista johdetaan vedet viiteen eri mittakaivoon (kuva 10). Koerakenteen A.2 tiivistyskerroksessa on neljä yhdistelmäanturia eri korkeuksilla. Koerakenteeseen A.2 ei ole asennettu kasvu- tai pintakerrokseen yhdistelmäantureita, koska kyseiset rakennekerrokset ovat vastaavat kuin koerakenteessa A.1.

Koerakenteen B.2 rakennekerroksista purkautuvat vedet johdetaan kuuteen mittakaivoon (kuva 10). Koerakenteen B.2 pintakerroksessa on yksi yhdistelmäanturi (anturi 12). Anturi 11 ei ole toiminnassa, koska se on vaurioitunut asennuksessa. Kuivatuskerroksessa on kaksi yhdistelmäanturia eri syvyyksillä. Kapillaarieristeessä on neljä yhdistelmäanturia, jotka on sijoitettu pareittain eri syvyyksille. Kapillaarikatkokerroksessa on kaksi yhdistelmäanturia eri syvyyksillä.

Koerakenteen C.0 rakennekerroksista purkautuvat vedet johdetaan kahteen v-kaivoon (kuva 10). Pintavalunta kerätään kaivoon C0.1 ja kaivoon C0.2 johdetaan tarkkailukerrokseen kertyneet vedet. Helsinki-moreenikerrokseen on sijoitettu kaksi yhdistelmäanturia eri syvyyksille. Koerakenteen U.1 rakennekerroksista johdetaan vedet viiteen kaivoon (kuva 10). Rakenteessa U.1 on kaksi yhdistelmäanturia ja kuusi lämpötila-anturia eri syvyyksillä.

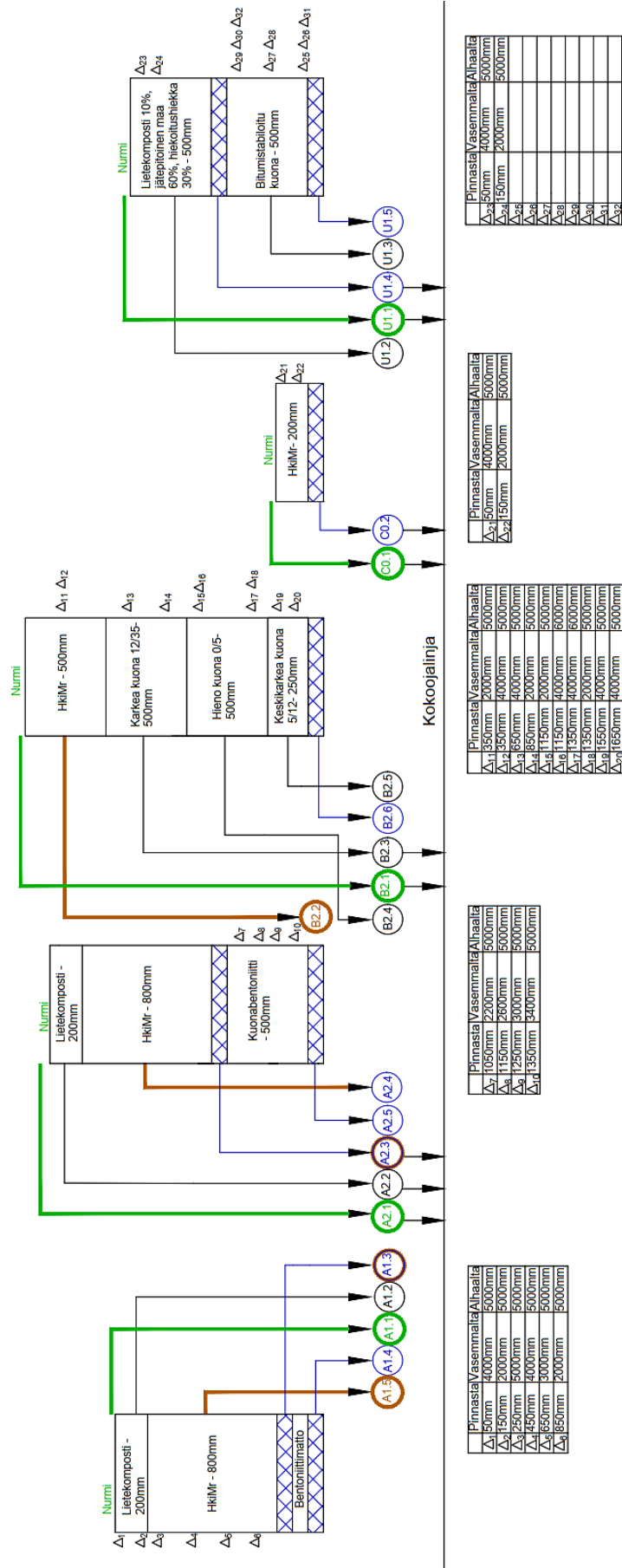
Koerakenne U.1

Koerakenne C.0

Koerakenne B.2

Koerakenne A.2

Koerakenne A.1



Kuva 10. Koerakenteiden mittakaivot ja instrumentoinnit (Vahänen 2021).



### 4.3.2 Vedenlaadun kenttämittaukset

Koerakenteista purkautuvien vesien mittakaivosta tehtiin kenttämittauksia kenttämittareilla tarkkailujakson aikana 1.12.2020–30.6.2021. Kenttämittauksia tehtiin vesinäytteenottojen yhteydessä ja omina kenttämittauskertoina kerran kuukaudessa tammikuuta lukuun ottamatta. Kenttämittauksien yhteydessä mitattiin myös kaivojen vedenpinnan korkeudet.

Kenttämittauksissa mitattiin veden lämpötila, pH, sähkönjohtavuus, redox-potentiaali ja happipitoisuus. Kenttämittauksissa mittarin annettiin mitata noin minuutin verran, jonka jälkeen mittaustulokset kirjattiin. Ensimmäiset kenttämittaukset mitattiin YSI Professional Plus-mittarilla ja loput kenttämittaukset YSI Pro DSS-mittarilla. Joulukuun kenttämittauksissa veden happipitoisuus mitattiin erillisellä happimittarilla. Joulukuun kenttämittauksissa ei mitattu pH:ta, sillä mittarin pH-anturi oli mittauksien aikana epäkunnossa. Kenttämittari kalibroitiin ennen kenttämittauksien aloittamista. Redox- ja happipitoisuuskenttämittaustulokset on esitetty liitteissä 2 ja 3.

### 4.3.3 Vesinäytteenotto

Koerakenteista purkautuvien vesien mittakaivoista otettiin vesinäytteitä kolmella näytteenottokierroksella. Ensimmäinen vesinäytteenotto tehtiin 1.12.2020 ennen koerakenteiden pieniä korjauksia ja kolmen uuden umpikaivon rakentamista. Toinen vesinäytteenotto tehtiin 8.4.2021 arvioidun lumien sulamisen aikaan ja kolmas 22.6.2021. Vesinäytteenottojen yhteydessä tehtiin kenttämittauksia ja vedenpinnankorkeuden mittauksia. Vesinäytteet otettiin homogenisoidusta kaivovedestä näytteenottimella. Homogenisointi tehtiin sekoittamalla kaivossa olevaa vesipatsasta, jotta mittakaivon vesi ei olisi kerrostunutta. Liitteessä 1 on esitetty valokuvia vesinäytteenotoista ja kenttämittauksista.

Vesinäytteet lähetettiin SGS Finland Oy:n laboratorioon analysoitavaksi heti vesinäytteenottojen jälkeen. Näytteenottokaivoissa, lähetettyjen vesinäytteiden määrissä ja laboratorioanalyseissä oli vaihtelua näytteenottokierroksien välillä (taulukko 6). Kevään vesinäytteenotossa otettiin suunnitellusti enemmän vesinäytteitä ja analyysyjä, sillä näytteenotto pyrittiin ajoittamaan lumien sulamisen aikaan, jolloin aineet lähtisivät liikkeelle pintarakenteissa. Liitteessä 4 on esitetty määrityksissä käytetyt laboratoriomenetelmät.

**Taulukko 6.** Toteutuneet vesinäytteiden laboratorioanalyysit tarkkailujaksolla. Numerot 1, 2 ja 3 viittaavat vesinäytteenottokierrokseen 1.12.2020, 8.4.2021 ja 22.6.2021.

Mittakaivo	Koerakenne A.1				Koerakenne A.2				Koerakenne B.2						Koerakenne U.1			
	A1.2	A1.3	A1.4	A1.5	A2.2	A2.3	A2.4	A2.5	B2.1	B2.2	B2.3	B2.4	B2.5	B2.6	U1.2	U1.3	U1.4	U1.5
pH	2,3	2	1,2	1,2	2	1,2	1,2	2,3	3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	2,3	2,3	1,2	1,2,3
Sähkönjohtavuus	2,3	2	1,2	1,2	2	1,2	1,2	2,3	3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	2,3	2,3	1,2	1,2,3
Liukoiset metallit*	2	2	1,2	1,2	2	1,2	1,2	2,3		2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	2	2,3	1,2	1,2,3
Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,3	2	1,2	1,2	2	1,2	1,2	2,3		2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	2,3	2,3	1,2	1,2,3
F <sup>-</sup>	2	2	1,2	1,2	2	1,2	1,2	2,3		2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	1,2,3	2	2,3	1,2	1,2,3
CODMn, TDS					2										2			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N, Kokonais-N								2										2,3
Kokonais-P								2										2,3
Sameus								2										2
DOC								2										2,3

\* As, Ba, Hg, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Sb, Se, Mo, V, Al, Ca, Mg, Mn, Fe

#### 4.3.4 Mittakaivojen laadulliset mittausanturit

Kenttämittauksien ja vesinäytteenottojen lisäksi vesien laatua seurattiin kolmessa kuivaustuskerroksen mittakaivossa jatkuvan instrumentoinnin avulla. Mittakaivoihin A2.3, B2.3 ja U1.4 on asennettu anturit mittaamaan koerakenteista purkautuvien vesien pH:ta, sähkönjohtavuutta, lämpötilaa ja sameutta. Lisäksi mittakaivossa A2.3 seurataan liuenneen orgaanisen aineksen määrää, joka mitataan fluoresoivana liuenneena orgaanisena aineksena (fDOM).

#### 4.4 Vesitasetarkastelu

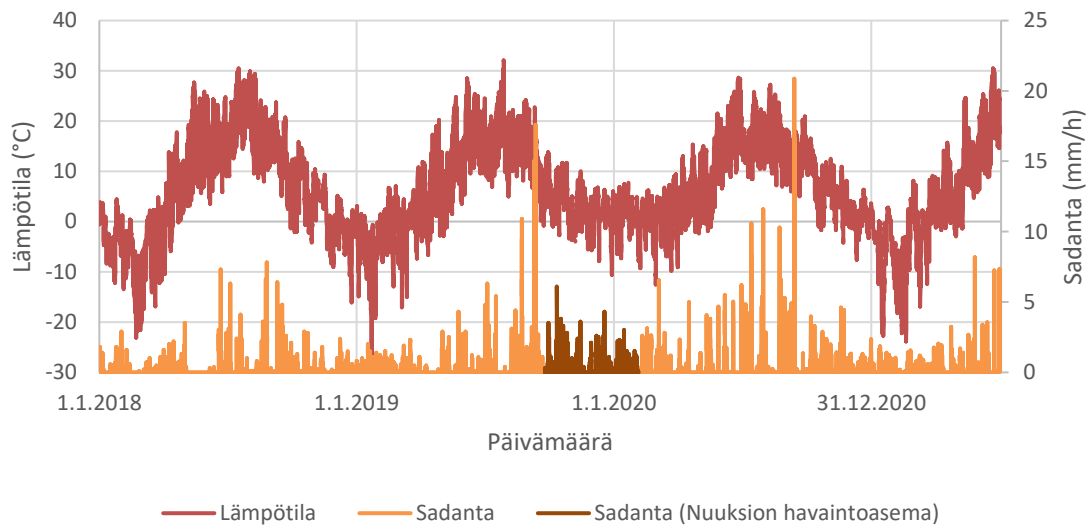
Tarkkailujakson aikaista vesitasetta tarkastellaan vertailemalla rakennekerroksista purkautuvien vesien kokonaisvirtaamia tarkkailujakson aikaiseen sadantaan. Vertailun tavoitteena on selvittää eri rakennekerroksista purkautuvien vesimäärien osuudet ja kokonaisvirtaamien suuruudet verrattuna laskennalliseen sadantaan ja sen perusteella arvioida eri rakennekerrosten osuutta vesitaloudessa. Pintarakenteen tehokkuutta arvioidaan tarkkailukerrokseen suotautuvan vesimäärän perusteella. Virtaamatietoja käytetään myös kuormituksen laskennassa. Lisäksi vesitasetta tarkastellaan tarkkailujakson rakennekerroksista purkautuvien hetkellisten vesimäärien avulla tarkkailujakson eri hetkinä. Hetkellisillä virtaamilla tarkastellaan pintarakenteiden toimintaa eri tarkkailujakson hetkillä. Vesitasetarkastelu on tehty neliometriä kohden, jotta koerakenteiden tulokset ovat keskenään vertailtavissa. Koerakenteiden pinta-aloina on käytetty korjauksien yhteydessä määritettyjä pinta-aloja neliömetrin tarkkuudella (taulukko 7).

**Taulukko 7.** Koepintarakenteiden virtaamien ja sadantojen laskelmissa käytetyt tarkemmitatut pinta-alat neliömetrin tarkkuudella (YIT 2020).

Koerakenne	A.1	A.2	B.2	U.1
Pinta-ala (m <sup>2</sup> )	160	157	161	155

Ämmässuon sääasemalla mitattuja sadanta- ja lämpötilatuloksia on hyödynnetty vesitaseen laskemisessa ja muiden tuloksien tarkastelussa. Vesitasetarkastelussa sadannan on oletettu jakautuvan tasaisesti pintarakenteiden pinta-aloille. Tuntikohtaiset lämpötila-arvot laskettiin mitattujen minuuttikohtaisten lämpötilojen keskiarvoina ja sadanta on ilmoitettu tuntisummana (Mäkelä 2021a). Etäisyys koerakenteilta sääasemalle on noin 1,1 kilometriä linnuntietä (Reiman 2019).

Kuvassa 11 on sääaseman mittaamat sadanta- ja lämpötila-arvot 1.1.2018–30.6.2021. Sadantatiedot 25.9.2019–4.2.2020 puuttuvat, joten sääaseman tietojen sijaan on esitetty Nuuksion havaintoaseman tiedot. Vuoden 2020 talvi on ollut tähän mennessä leudoin, sillä lämpötila ei ole ollut alle -15 °C:een (kuva 11). Vuosien 2018, 2019 ja 2021 talvina lämpötilat kävivät alle -20 °C:ssa.



**Kuva 11.** Ämmässuon sääasemalla mitatut lämpötila- ja sadantatulokset ajalta 1.1.2018 – 30.6.2021 (Mäkelä 2021b). Sadantatiedot ajalta 25.9.2019–4.2.2020 ovat Nuuksion havaintoasemalla mitattuja (Ilmatieteenlaitos 2021), sillä kyseisen ajan sadantatietoja ei ole saatavilta Ämmässuon sääasemalta.

## 4.5 Kuormituslaskelmat

Tässä työssä lasketaan rakennekerroksissa käytetyistä materiaaleista aiheutuvaa kuormitusta vesinäytteistä laboratorioissa määritettyjen pitoisuuksien ja mittakaivoista mitattujen näytteenottohetkeä vastaavien hetkellisten virtaamien (luku 5.4.1.). Laskelmien avulla pyritään ottamaan huomioon pistemäisten laboratorioissa mitattujen pitoisuuksien lisäksi rakennekerroksista purkautuvien vesimäärien vaikutusta rakennekerroksissa käytettävistä materiaaleista aiheutuvaan kuormitukseen. Tarkastelu rajataan kloridi-, sulfaatti-, kupari-, molybdeeni-, magnesium- ja kalsiumkuormitusten laskemiseen. Kuormituslaskelmissa käytetään virtaamana vesinäytteenotto päivän tuntikohtaisten virtaamien keskiarvoa ja pitoisuutena näytteen laboratoriotulosta. Kuormitus ilmoitetaan yksikössä grammaa tai milligrammaa päivässä.

Kuormituslaskelmissa tutkitaan lisäksi Helsinki-moreenia ja jätteenpolton kuonaa sisältävistä rakennekerroksista liukenevien kloridi-, sulfaatti-, kupari, kromi- ja molybdeenimäärien liukenemisaikoja (luku 5.4.2.). Liukenemisaikalaskelmien avulla pyritään arvioimaan, kuinka kauan haitta-aineiden kulkeutuminen rakennekerroksissa käytetyistä materiaaleista kestää. Rakennekerrosten rakenneteoreettiset tilavuudet lasketaan rakennekerrosten ylä- ja alapintojen tarkemitattujen pinta-alojen ja suunniteltujen kerros-paksuuksien perusteella (liite 8). Rakennekerrosten kuivairtitiheydet lasketaan rakentamisen aikana rakenteista mitattujen märkäirtitiheyksien ja näytteistä määritettyjen vesipitoisuuskeskiarvojen avulla (Reiman 2019). Koerakenteen U.1 pintakerroksesta ei ole tehty mittauksia rakentamisen aikana. Rakennekerrosten rakenneteoreettisten tilavuuksien ja kuivairtitiheyksien avulla on laskettu rakennekerrosten kokonaiskuivapainot

Rakennekerroksista liukenevat kloridi-, sulfaatti-, kupari-, kromi- ja molybdeenimäärät lasketaan L/S-suhteella 10 saatujen liukoisuustestituloksien maksimiarvojen perusteella (taulukot 4 ja 5). Laskelmat siten todennäköisesti yliarvioivat liukenevia määriä.

Laskelmissa käytetään hienorakeiselle kuonalle raekoon 0–2 mm liukoisuustuloksia, keskikarkealle kuonalle raekoon 6–16 mm tuloksia ja karkealle kuonalle raekoon 16–32 mm tuloksia. Bitumikuonan ja kuonabentoniitin laskelmissa käytetään hienorakeisen kuonan liukoisuustuloksia. Koerakenteen U.1 pintakerroksen materiaalista ei ole käytettävissä liukoisuustestituloksia. Liukenemisajat lasketaan jakamalla liukenevat määrät lasketuilla minimi- ja maksimikuormituksilla. Tulokset kuvaavat tarkkailujakson hetkellisiä pitoisuuksia ja virtaamia eivätkä koko käyttöiän tilannetta.

## 5. TULOKSET

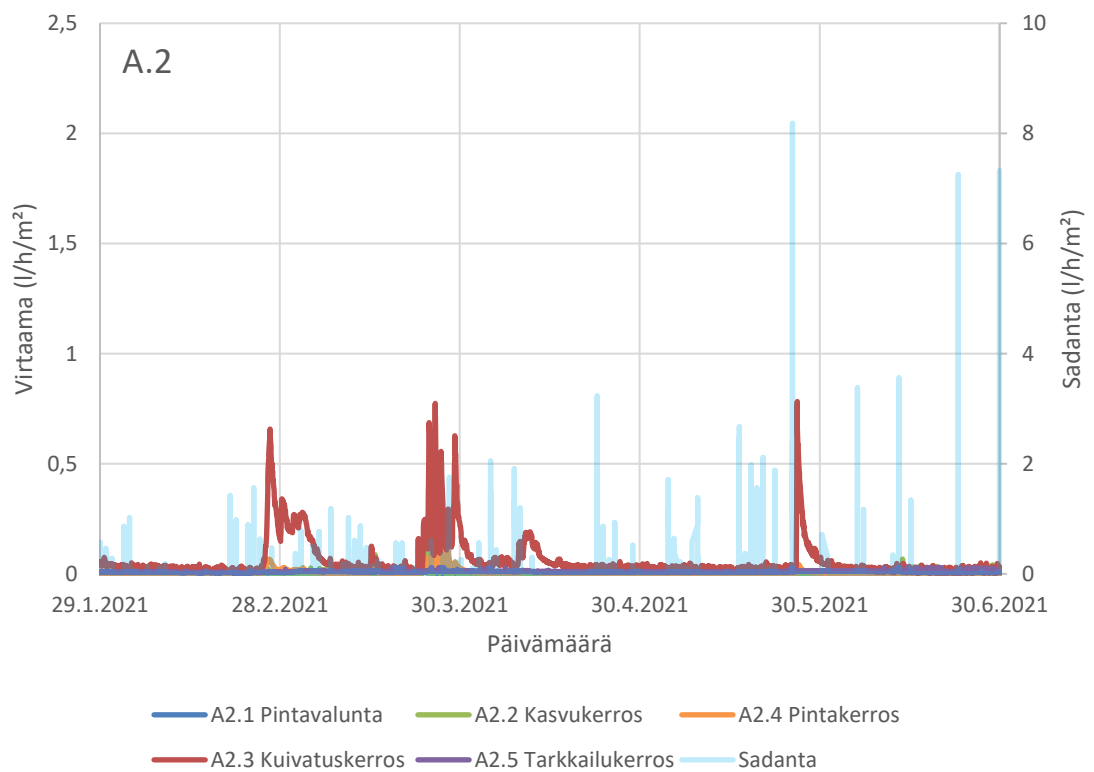
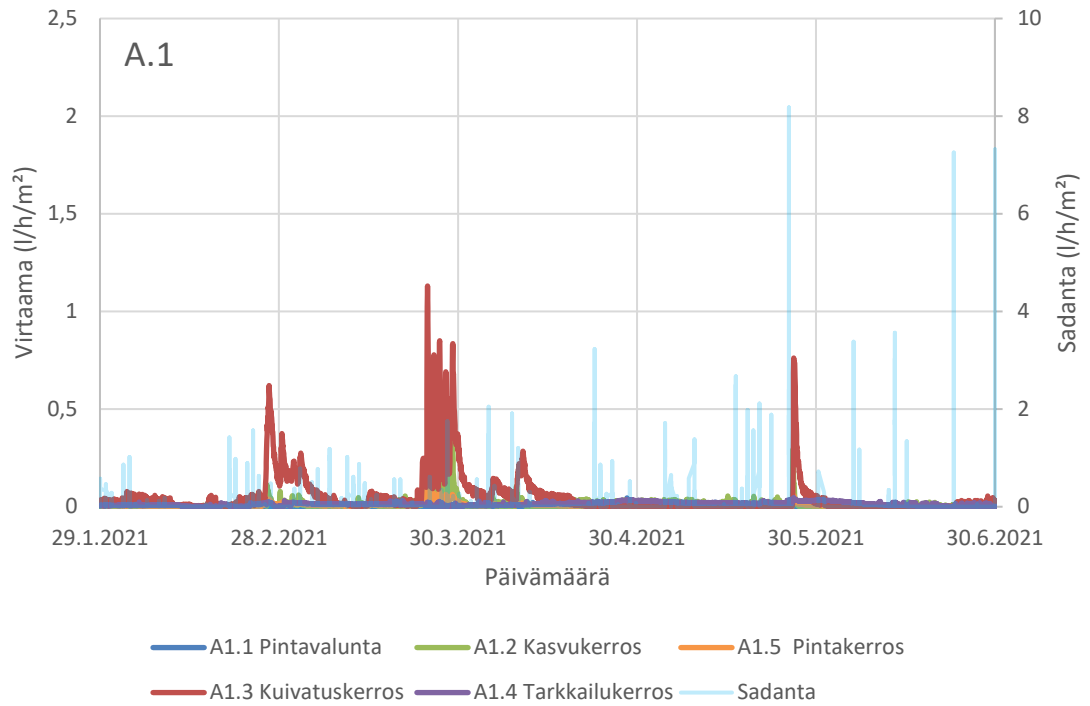
### 5.1 Vesitaselaskelmat

Vesitasetarkastelu tarkkailujaksolla on aloitettu 29.1.2021, jolloin koerakenteen A.1 uusien umpikaivojen veden määrän mittaukset käynnistyivät. Koerakenteen C.0 mittakairoissa ei mitattu virtaamaa tarkkailujaksolla, joten sen vesitasetta ei olla tarkasteltu. Koerakenteen B.2 pintakerroksesta purkautuvasta vedestä (mittakaivo B2.2) ei mitata virtaamaa, joten tarkasteluissa on käytetty täysinäisen kaivon vesimäärää, joka on 50 litraa. Diplomityön tarkkailujakso loppui 30.6.2021.

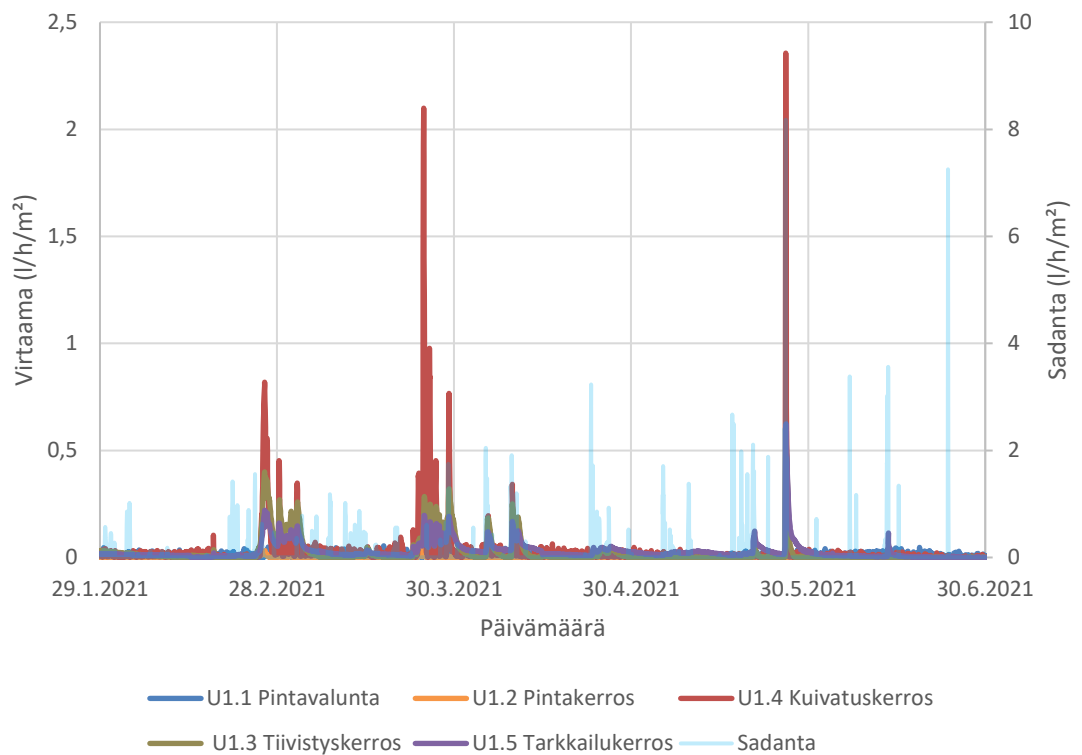
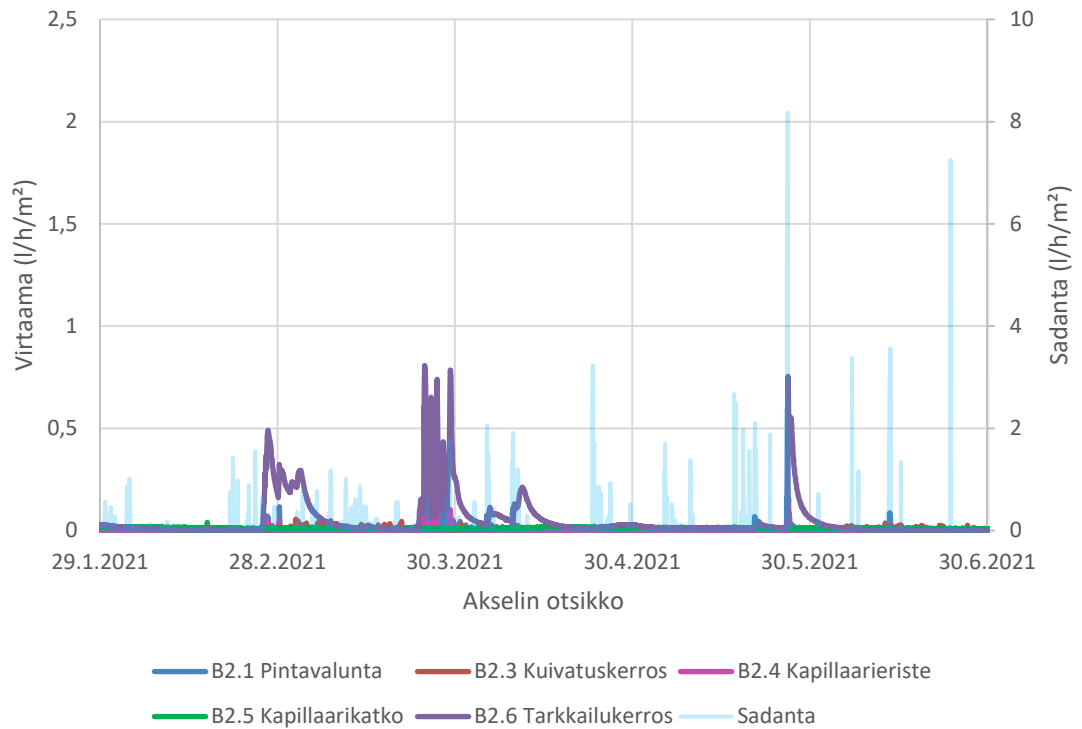
#### 5.1.1 Koerakenteista purkautuvat vesimäärät

Kuvissa 12 ja 13 on esitetty koerakenteista purkautuvien vesien mittakairoissa mitatut virtaamat. Virtaamat ja sadanta on laskettu neliömetrikohtaisesti käyttämällä urakoitsijan tarkemittaamia pinta-aloja neliömetrin tarkkuudella (taulukko 7). Virtaamien lisäksi kuvissa on esitetty laskennallinen sadanta kuvastamaan sen mahdollisia vaikutuksia virtaamaan.

Kaikkien koerakenteiden virtaamatuloksissa on kolme selkeää ajankohtaa, jolloin virtaamat ovat kohonneet (kuvat 12 ja 13). Virtaamat ovat hetkellisesti nousseet kahtena lumien sulamishetkenä helmi- ja maaliskuun vaihteessa ja maaliskuun lopussa sekä rankkasateella 26.5.2021. Koerakenteissa A.1, A.2 ja U.1 suurimmat virtaamat tulevat näinä hetkinä kuivatuskerroksista. Muista koerakenteista poiketen, koerakenteessa B.2 suurimmat virtaamat on mitattu tarkkailukerroksesta purkautuvista vesistä. Suurin yksittäinen virtaamatulos oli koerakenteen U.1 tarkkailukerroksesta 26.5.2021, jolloin virtaama oli noin 2,4 l/h/m<sup>2</sup>. Huhtikuun alkupuolen (5.4–10.4.2021) sateet näkyvät virtaamien nousuina. Kesäkuun runsaammat sateet eivät ilmene tuloksien perusteella merkittävinä muutoksina virtaamatuloksissa.



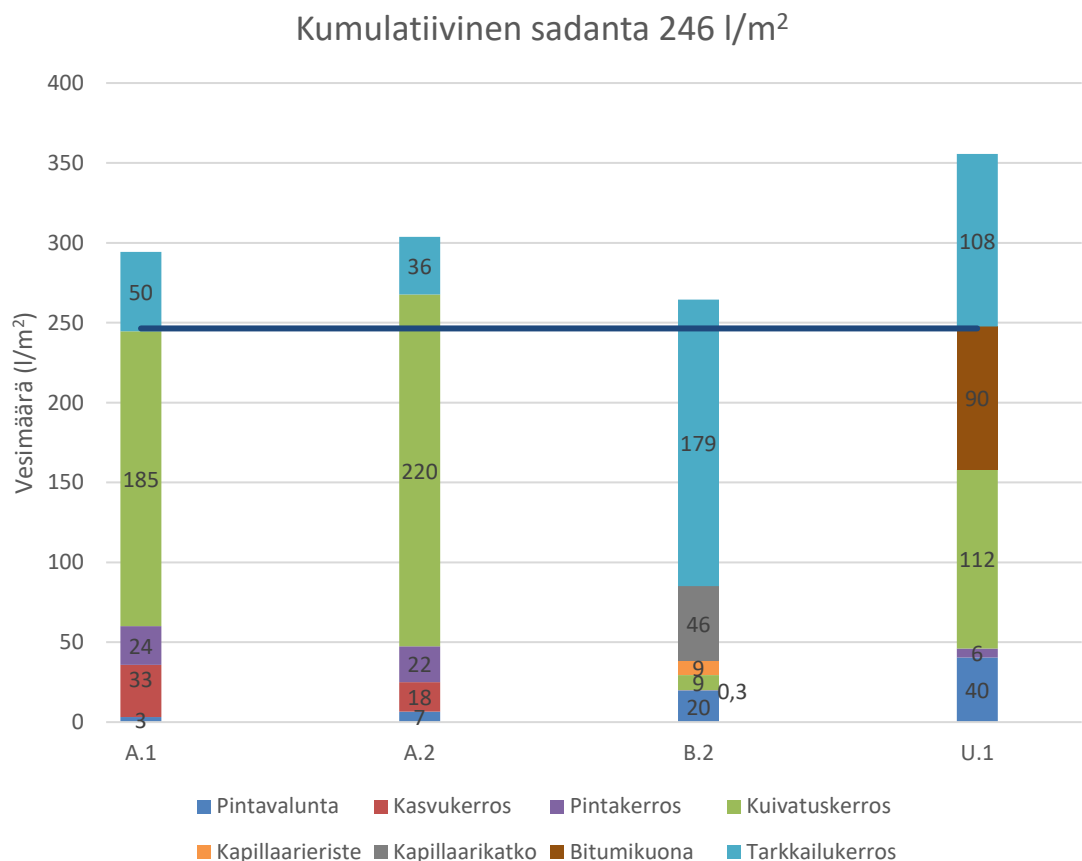
**Kuva 12.** Koerakenteiden A.1 ja A.2 rakennekerroksista purkautuvien vesien virtaamat ja sadanta neliometriä kohden tarkkailujaksolla



**Kuva 13.** Koerakenteiden B.2 ja U.1 rakennekerroksista purkautuvien vesien mittakaivoissa mitatut virtaamat ja sadanta neliometriä kohden tarkkailujaksolla

## 5.1.2 Kumulatiiviset virtaamat

Kumulatiivisten vesimäärien tarkastelu on aloitettu 29.1.2021, jolloin joulukuussa 2020 rakennettuihin umpikaivoihin purkautuvien vesien virtaamia on mitattu ensimmäisen ker-  
 ran kokonaiselta päivältä. Kuvassa 14 on esitetty kumulatiivinen sadanta ja pintaraken-  
 teista purkautuvat kumulatiiviset vesimäärät ajalta 29.1.2021–30.6.2021. Kaikista pinta-  
 rakenteista purkautuneiden vesien yhteenlaskettu määrä on suurempi kuin kumulatiivi-  
 nen sadanta. Pienin ero purkautuneiden vesien virtaamissa verrattuna sadantaan on  
 koerakenteessa B.2, jossa kokonaisvirtaama on noin 7 % sadantaa suurempi (kuva 14).  
 Koerakenteissa A.1 ja A.2 kokonaisvirtaamat ovat noin 19 ja 23 % suurempia kuin sa-  
 danta. Koerakenteessa U.1 vesimäärien ero sadantaan on suurin, noin 44 %. Ero voi  
 johtua ennen tarkkailujaksoa rakennekerrokseen varastoituneesta kosteudesta. Toisaalta  
 osa sadannasta haihtuu, joten koerakenteesta purkautuvan veden virtaaman pitäisi olla  
 sadantaa pienempi.



**Kuva 14.** Koerakenteista purkautuneiden vesien kumulatiiviset määrät ja kumulatiivinen sadanta neliometriä kohden ajalta 29.1.–30.6.2021. Pintarakenteen B.2 pintakerroksen vesimääränä on käytetty täysinäisen kaivon tilavuutta (50 l), koska vesimäärää ei seurata.

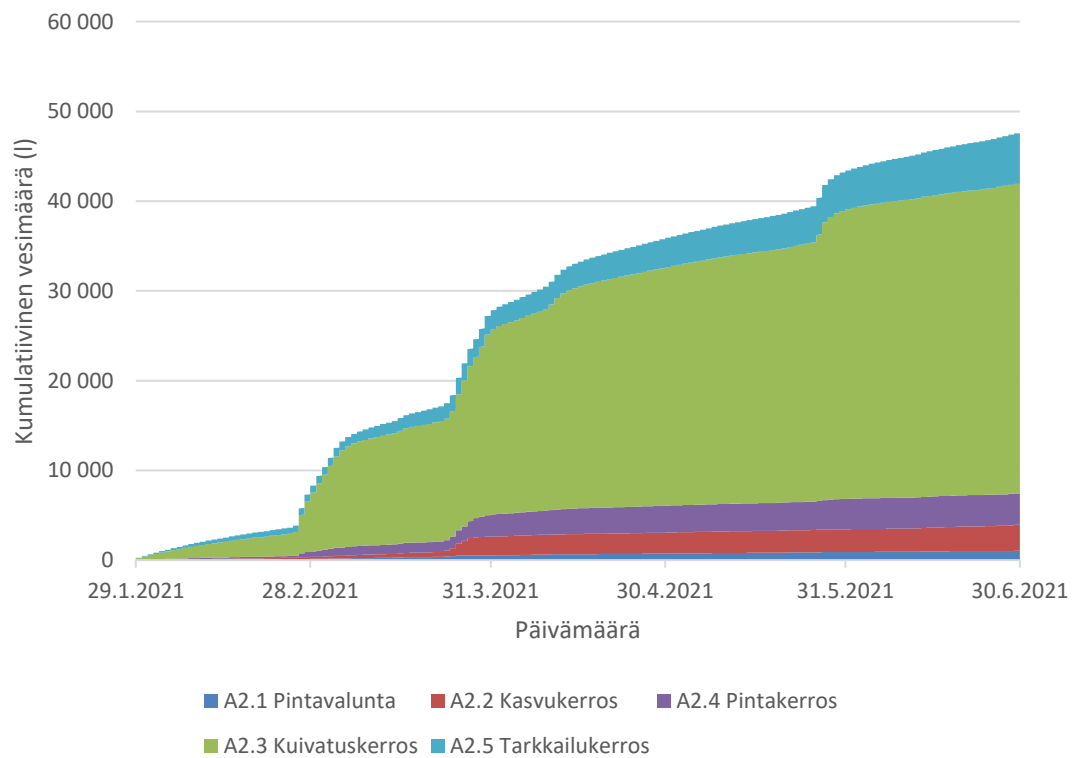
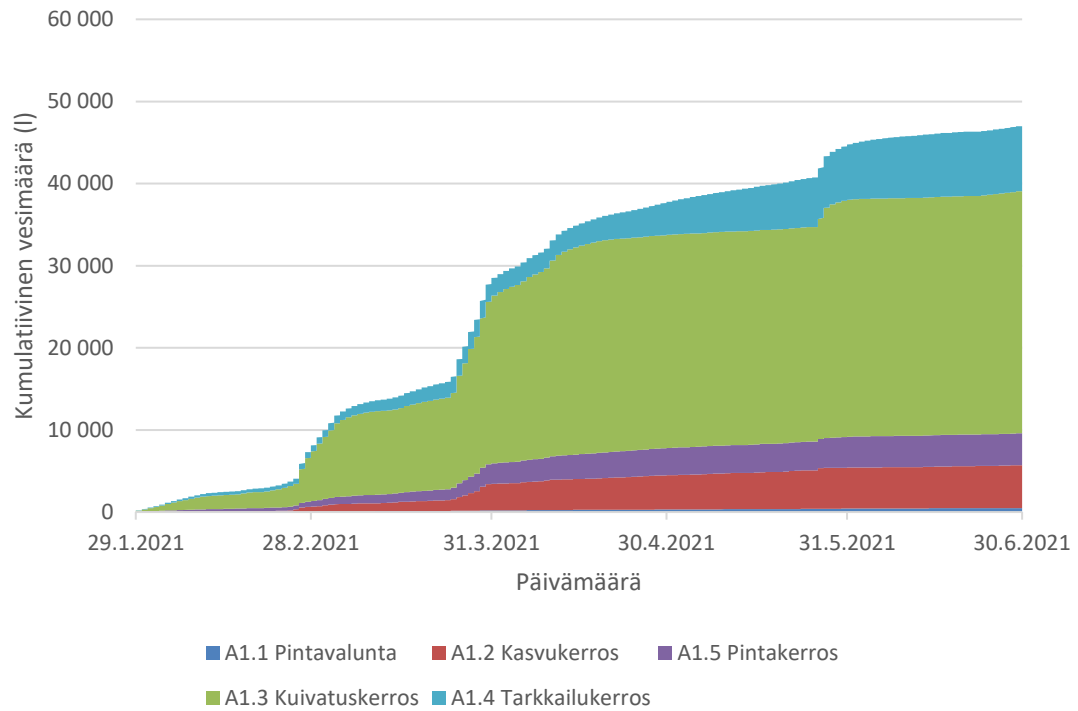


Koerakenteen A.1 ja A.2 mittakaivoista mitatut kumulatiiviset virtaamamäärät ajalta 29.1.2021–30.6.2021 on esitetty kuvassa 15. Suurin osa vedestä on purkautunut kuivatuskerroksesta, noin 63 % koerakenteessa A.1 ja 72 % koerakenteessa A.2. Molempien pintarakenteiden kuivatuskerrokset ovat toimineet tarkoitetuilla tavoilla vettä poisjohtavina kerroksina. Toiseksi eniten vettä on purkautunut tarkkailukerroksista, joiden osuus kumulatiivisista vesimääristä on noin 17 % A.1-rakenteessa ja 12 % A.2-rakenteessa (kuva 15).

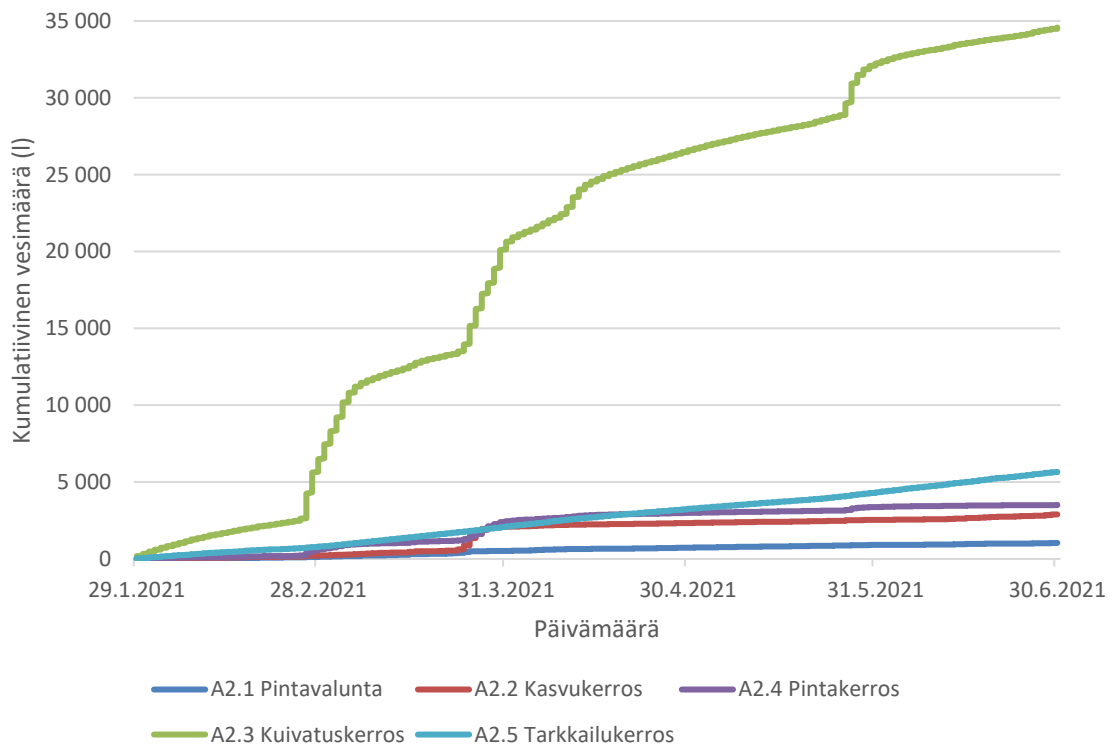
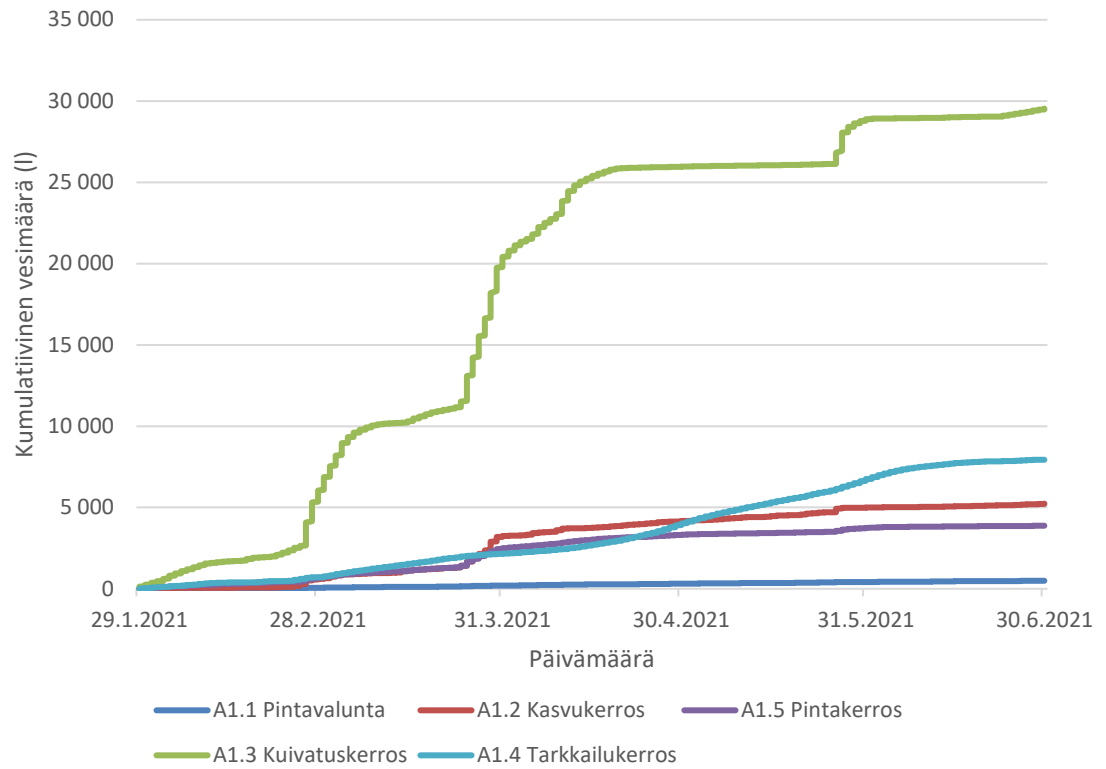
Koerakenteiden A.1 ja A.2 vesien purkautumisissa on eroja, erityisesti kasvu- ja pintakerroksessa (kuva 16). Helmikuun lumen sulamisvedet purkautuvat koerakenteessa A.1 kasvu- ja pintakerroksesta, mutta koerakenteessa A.2 vedet purkautuvat pääosin pintakerroksesta. Tämä on voinut johtua kasvukerroksen jäätymisestä, jolloin sen virtaama ei ole kasvanut lumen sulamisaikana helmikuussa. Vasta maaliskuun lopun lumien sulamisvesien virtaamat näkyvät koerakenteen A.2 kasvukerroksen vesimäärän porrasmaisena kasvuna (kuva 16). Toukokuun rankkasateen virtaama näkyy selkeänä kasvukerroksen virtaaman nousuna koerakenteessa A.1, mutta ei koerakenteessa A.2. Molempien pintarakenteiden pintavalunnat pysyvät koko tarkkailujakson pieninä (noin 1 % ja 2 %) ja tasaisina ilman merkittäviä muutoksia lumen sulamista tai rankkasateista huolimatta. Pintavalunta on noin kaksinkertainen koerakenteessa A.2 verrattuna koerakenteeseen A.1.

Koerakenteen B.2 mittakaivoissa mitatut kumulatiiviset virtaamamäärät on esitetty kuvassa 17. Kapillaarinen eriste ei ole toiminut odotetulla tavalla, sillä suurin osa, noin 68 %, purkautuneesta vedestä on suotautunut koerakenteen läpi tarkkailukerrokseen. Kuivatuskerroksesta on purkautunut noin 3 % kokonaisvesimäärästä, mikä on huomattavasti oletettua vähemmän. Kapillaarieriste on ollut liian hyvin vettä läpäisevä ainakin tällä luiskakaltevuudella. Erityisesti keväällä lumen sulamisen aikaan tarkkailukerroksen virtaamat ovat kasvaneet. Toiseksi eniten vettä on purkautunut kapillaarikatkosta, jonka osuus kokonaisvesimäärästä on noin 18 % (kuva 17).

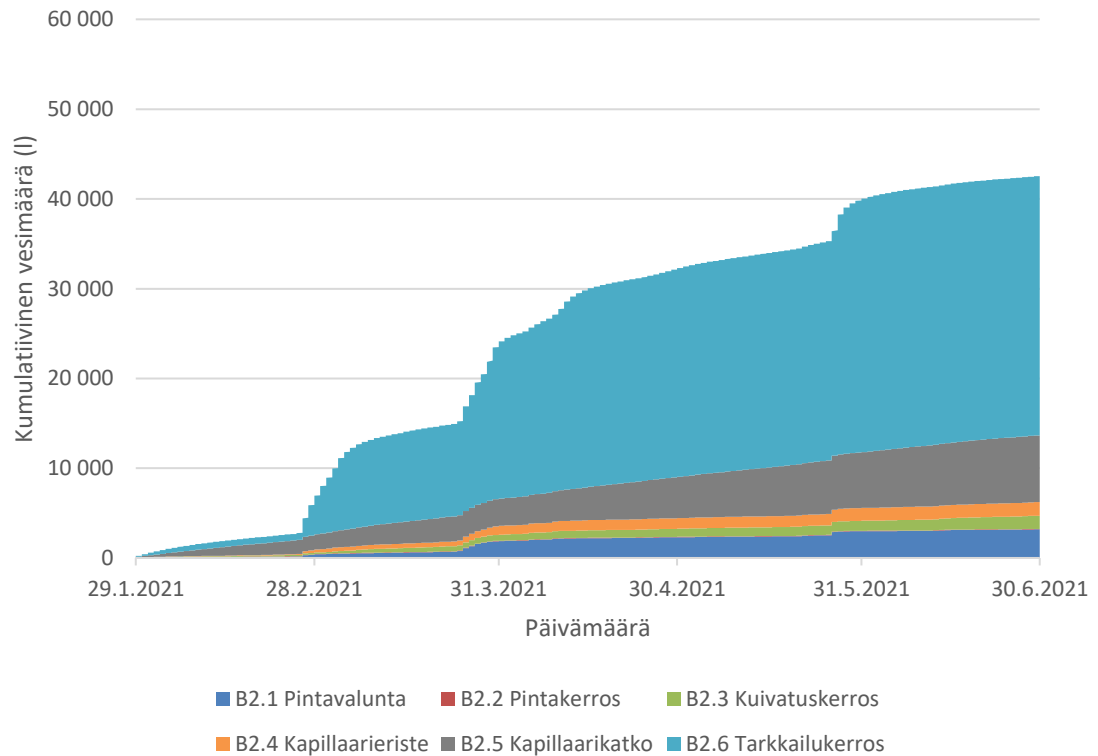
Koerakenteista A.1 ja A.2 poiketen, B.2-koerakenteessa lumien sulaminen helmi- ja maaliskuun lopussa sekä toukokuun rankkasateesta aiheutunut virtaama näkyvät pintavalunnan kumulatiivisten virtaamien porrasmaisena kasvuna (kuva 18). Pintavalunta on noin kolminkertainen verrattuna koerakenteeseen A.2. Kuivatuskerroksesta purkautuvista vesimäärissä ei ole havaittavissa selvää porrasmaista kasvua kyseisissä tarkkailujakson ajankohtina. Hyvin vettä johtavassa kuivatuskerroksessa vesi virtaa alaspäin ja imeytyy alla olevaan kapillaarieristekerrokseen. Suurin osa virtauksesta purkautuu tarkkailukerroksesta, joten vesi suotautuu koko koerakenteen läpi eikä kapillaarinen rakenne toimi riittävän tehokkaasti.



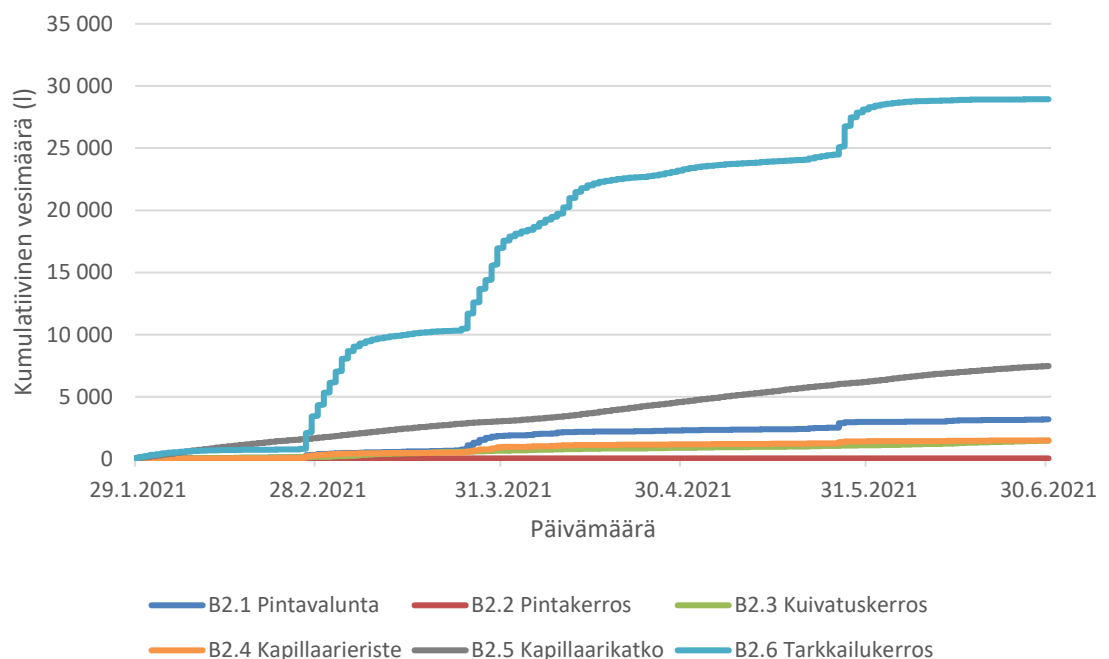
**Kuva 15.** Koerakenteiden A.1 ja A.2 rakennekerroksista purkautuvat kumulatiiviset vesimäärät tarkkailujaksolla.



**Kuva 16.** Koerakenteiden A.1 ja A.2 rakennekerroksista purkautuvat kumulatiiviset vesimäärät tarkkailujaksolla.



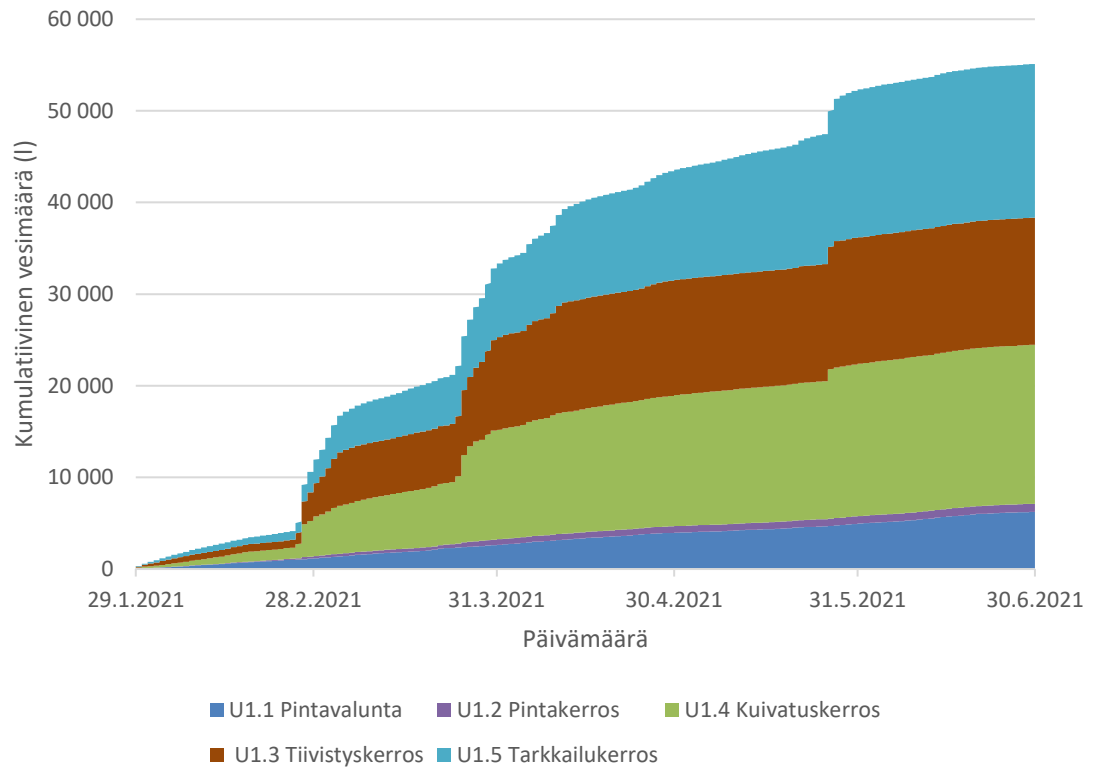
**Kuva 17.** Koerakenteen B.2 rakennekerroksista purkautuvat kumulatiiviset vesimäärät tarkkailujaksolta



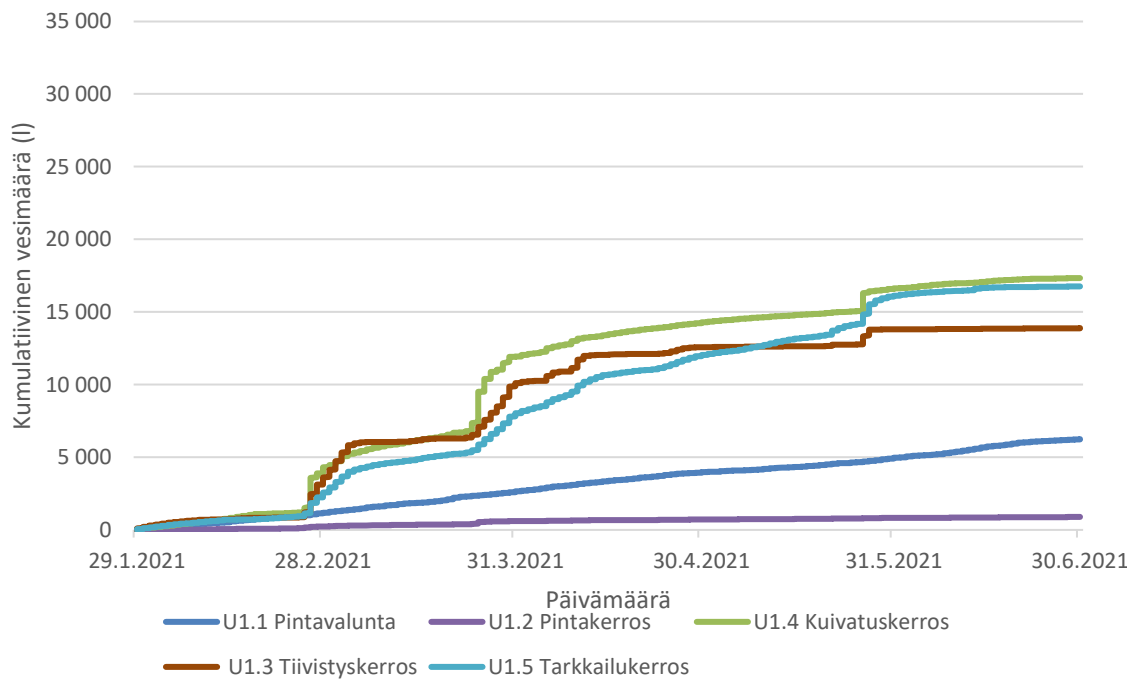
**Kuva 18.** Koerakenteen B.2 rakennekerroksista purkautuvat kumulatiiviset vesimäärät tarkkailujaksolla. Pintakerroksen virtaamatietoja ei ole tarkkailujakson ajalta saatavilla, jonka takia sitä on merkitty täysinäisenä kaivona (50 l).

Suurin osa koerakenteesta U.1 purkautuvista vesistä on muista koerakenteista poiketen purkautunut melko tasaisesti kuivatus-, tarkkailu- ja tiivistyskerroksista. Kuivatuskerroksesta on purkautunut noin 31 % kokonaisvesimäärästä, tarkkailukerroksesta noin 30 % ja tiivistyskerroksesta noin 25 % (kuva 19). Tiivistyskerroksen pitäisi olla huonosti vettä läpäisevää, joten tuloksien perusteella on syytä epäillä vesien keruujärjestelmässä olevan vastaavanlaisia virheitä kuin A.1 -ja A.2-rakenteissa todettiin ja korjattiin ennen tarkkailujakson alkua. Pintavalunnan osuus on muihin koerakenteisiin verrattuna ollut suuri, noin 11 %.

Tiivistys-, kuivatus- ja tarkkailukerroksen kumulatiivisissa kuvaajissa näkyy koerakenteessa B.2 virtaaman kasvu sulamisjaksojen ja toukokuun rankkasateen aikana (kuva 20). Kuivatuskerroksesta purkautuva kumulatiivinen vesimäärä on suurin lukuun ottamatta maaliskuun alkua, jolloin tiivistyskerroksesta purkautui hetkellisesti kumulatiivisesti eniten vettä. Pintakerroksesta purkautunut vesimäärä on noussut samoina ajankohtina kuin kuivatuskerroksesta purkautunut vesimäärä tarkkailujakson aikana, mutta nousut ovat olleet huomattavasti pienempiä.

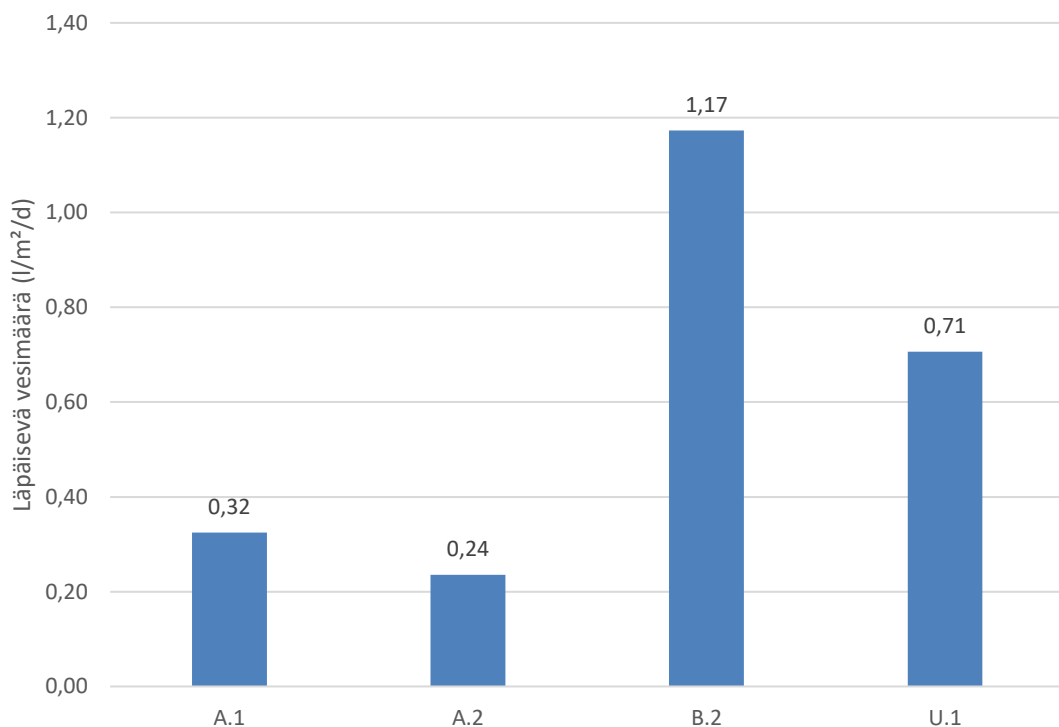


**Kuva 19.** Koerakenteen U.1 rakennekerroksista purkautuvat kumulatiiviset vesimäärät tarkkailujaksolla.



**Kuva 20.** Koerakenteen U.1 rakennekerroksista purkautuvat kumulatiiviset vesimäärät tarkkailujaksolla.

Koerakenteiden tiivistyskerroksen läpäisevä vesimäärä neliometriä kohden vuorokaudessa on laskettu tarkkailukerroksesta purkautuvien virtaamien avulla (kuva 21). Laskelmissa on käytetty tarkkailujakson päivien määrää, joka oli 153 päivää, ja koerakenteiden tarkemitattuja pinta-aloja. Tuloksien perusteella koerakenteet A.2 ja A.1 vähentävät tehokkaimmin veden suotautumista tarkkailukerrokseen tiivistyskerroksen läpi (kuva 21), mikä kuvaa jätetäyttöön suotautuvan veden määrää. Kapillaarisulkurakenteesta B.2 on mennyt vettä tarkkailukerrokseen asti noin viisinkertainen ja bitumikuonarakenteen U.1 läpi noin kolminkertainen määrä vettä verrattuna vettä tehokkaimmin virtausta vähentävään kuonabentoniittirakenteeseen A.2. Kapillaarirakenne B.2 ei vaikuta toimivalta. Koerakenteen A.2 kuonabentoniitista rakennettu, paksu tiivistyskerros on estänyt veden päätymistä tarkkailukerrokseen hieman tehokkaammin kuin koerakenteen A.1 tiivistyskerroksen bentoniittimatto.



**Kuva 21.** Koerakenteiden tiivistyskerrokset läpäisevät vesimäärät neliometriä kohden päivässä tarkkailujaksolla 29.1.2021–30.6.2021.

## 5.2 Koerakenteiden instrumentointitulokset

Koerakenteiden rakennekerroksien lämpötilaa, maankosteutta ja johtokykyä mitattiin rakennekerroksissa olevilla yhdistelmäantureilla. Tässä työssä raportoidaan tarkkailujakson 1.12.2020–30.6.2021 tulokset. Koko seurantajakson aikana kertyneet instrumentointitulokset on esitetty liitteessä 6.

## 5.2.1 Lämpötila

Lämpötila-antureiden tulokset tarkkailujakson ajalta on esitetty kuvissa 22 ja 24. Kuvissa on esitetty myös sääaseman mittaama ulkolämpötila. Seurantajakson aikaisten lämpötila-arvojen maksimi-, minimi- ja keskiarvot sekä keskihajonnat on esitetty liitteessä 5.

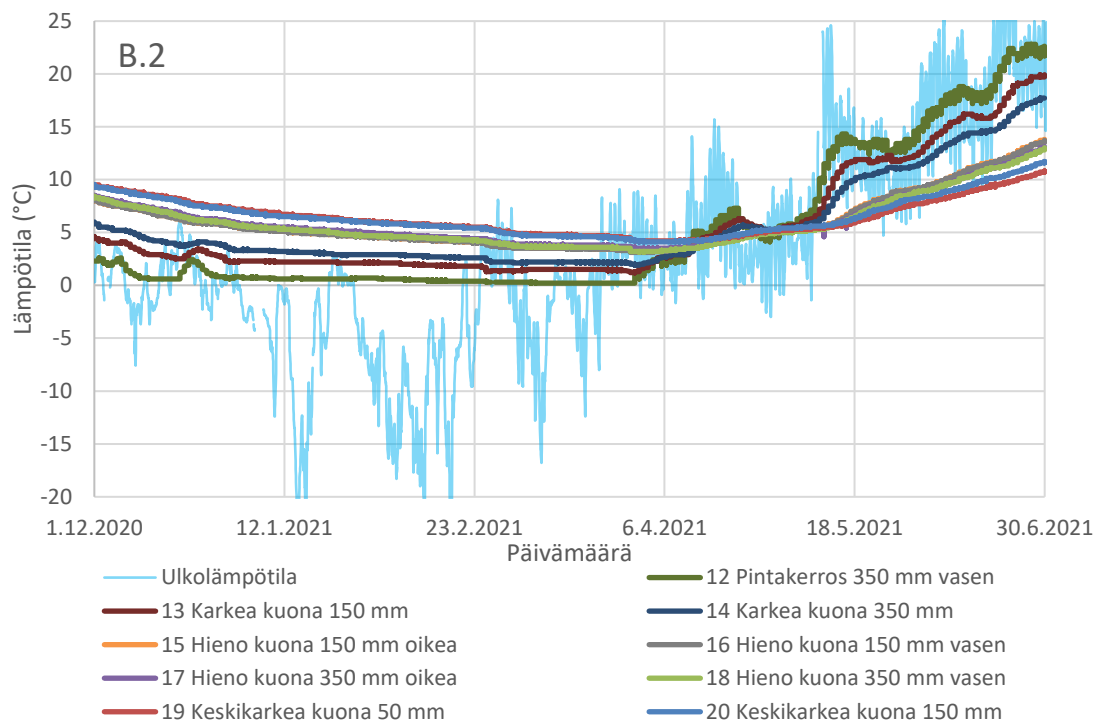
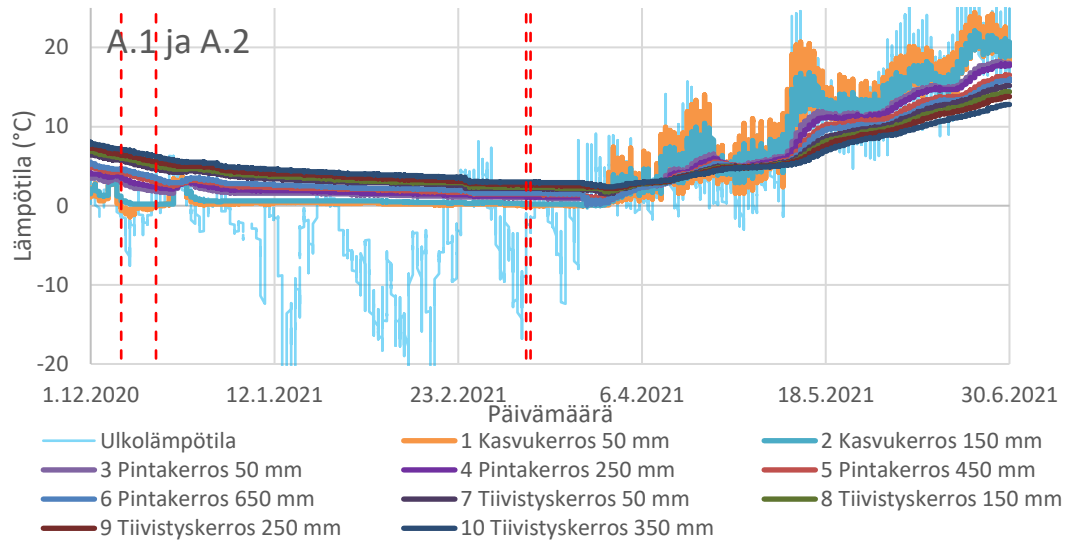
Koerakenteiden A.1 ja A.2 lämpötilatulokset tarkkailujaksolla on esitetty kuvassa 22. Koska koerakenteiden A.1 ja A.2 pinta- ja kasvukerroksien paksuudet ja niissä käytetyt materiaalit ovat samat, käytetään antureiden 1–6 lämpötiloja kuvaamaan myös koerakenteen A.2 vastaavien kerroksien lämpötiloja. Kasvukerroksessa 50 mm:n syvyydessä mitatut lämpötilat olivat alle 0 °C 8.12.2020–16.12.2020 ja 11.3.2021–12.3.2021.

Lämpötilavaihtelu on suurinta kasvukerroksessa. Kasvukerroksen lämpötila korreloi lumipeitteistä jaksoa lukuun ottamatta ulkolämpötilan kanssa. Pinta- ja tiivistyskerroksessa lämpötilat ovat vaihdelleet tarkkailujakson aikana samalla tavalla kuin kasvukerroksessa, mutta muutokset ovat olleet loivempia (kuva 22). Tulosten perusteella lämpötila on ollut rakenteessa nollan alapuolella vain kasvukerroksen yläosassa ja vain muutamana päivänä pakkaskauden alussa joulukuussa ja sen lopussa maaliskuussa. Lumipeitteen ansiosta rakenteen lämpötila on pakkasesta huolimatta noussut nollan yläpuolelle.

Koerakenteen B.2 lämpötilatuloksien vaihtelut muistuttavat koerakenteiden A.1 ja A.2 tuloksia. Pintakerroksen Helsinki-moreenin ja kuivatuskerroksen karkearakeisen jätteenpolton kuonan lämpötilat ovat vaihdelleet laajemmalla alueella muihin kerroksiin verrattuna (kuva 22) Lämpötilat eivät olleet alle 0 °C tarkkailujakson aikana. Rakennekerroksissa lämpötilat seuraavat ulkolämpötilan muutoksia (kuva 22). Lämpötilat nousevat ke-sää kohti, jolloin myös ulkolämpötila nousee.

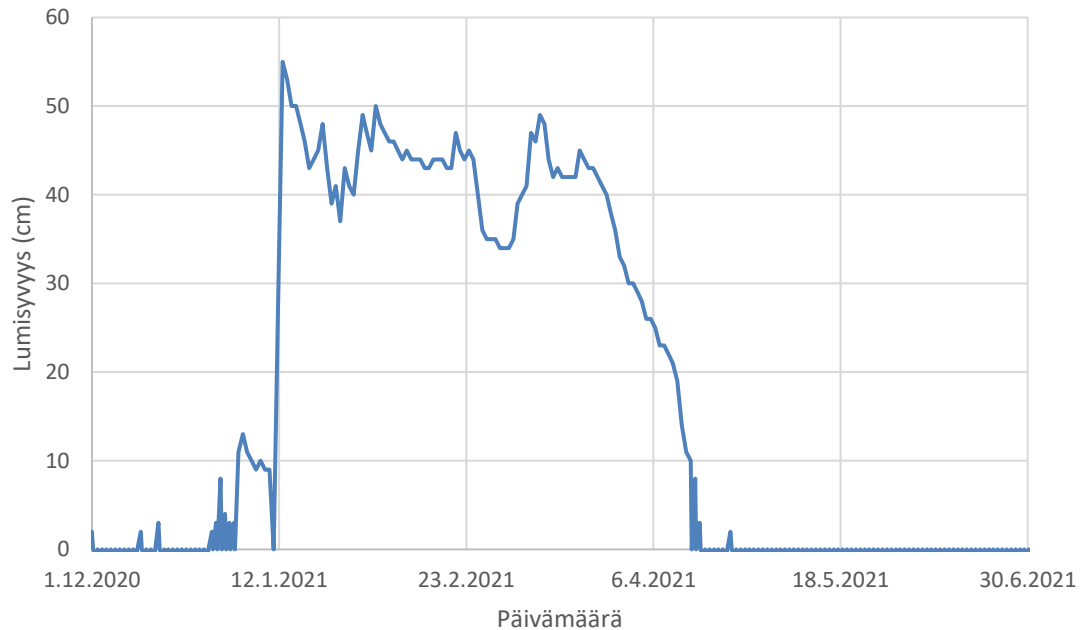
Kapillaarieristeen hienorakeisen jätteenpolton kuonan ja kapillaarikatkon keskikarkean jätteenpolton kuonan lämpötilan vaihtelut ovat olleet samanlaisia, mutta ne eivät ole olleet yhtä jyrkkiä kuin Helsinki-moreenin ja karkearakeisen kuonan vaihtelut (kuva 22).





**Kuva 22.** Koerakenteiden A.1, A.2 ja B.2 rakennekerrosten lämpötilat ja ulkolämpötila tarkkailujaksolla. Punaisella katkoviivalla on merkitty aikaväli, jolloin koerakenteen A.1 kasvukerroksen 50 mm:n syvyydellä lämpötila alitti 0 °C. Selitteen numerot viittaavat kuvaan 10.

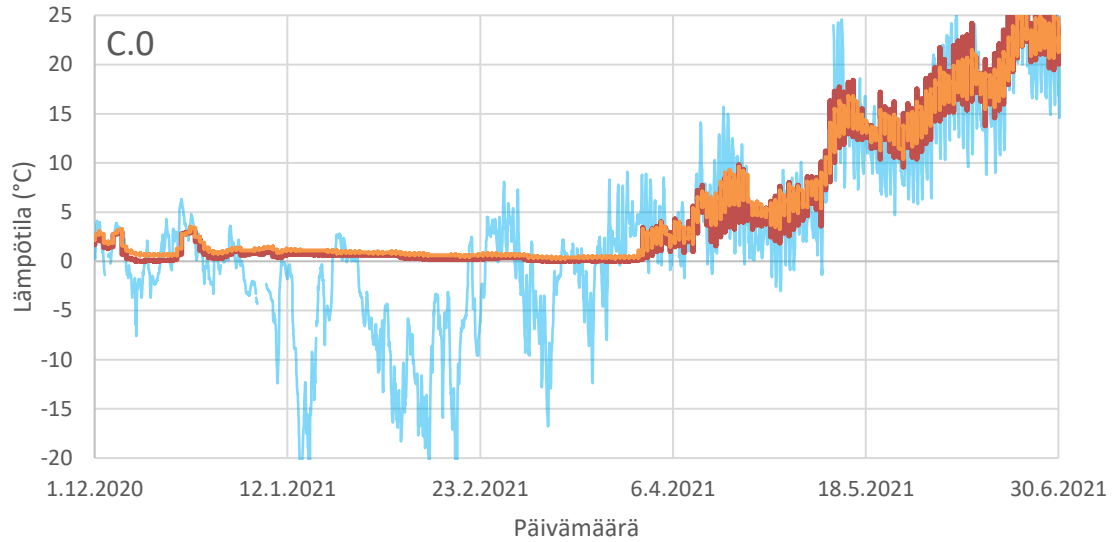
Nuksion havaintoaseman talven 2021 lumisyvyytuloksien perusteella pysyvämpi lumi-peite muodostui tammikuun puolessa välissä. Lumisyvyys vaihteli 34–55 cm:n välillä. Lumi suli lopullisesti huhtikuun puolen välin jälkeen. Koko seurantajakson aikaiset lumisyvyytiedot on esitetty liitteessä 7. (Ilmatieteenlaitos 2021)



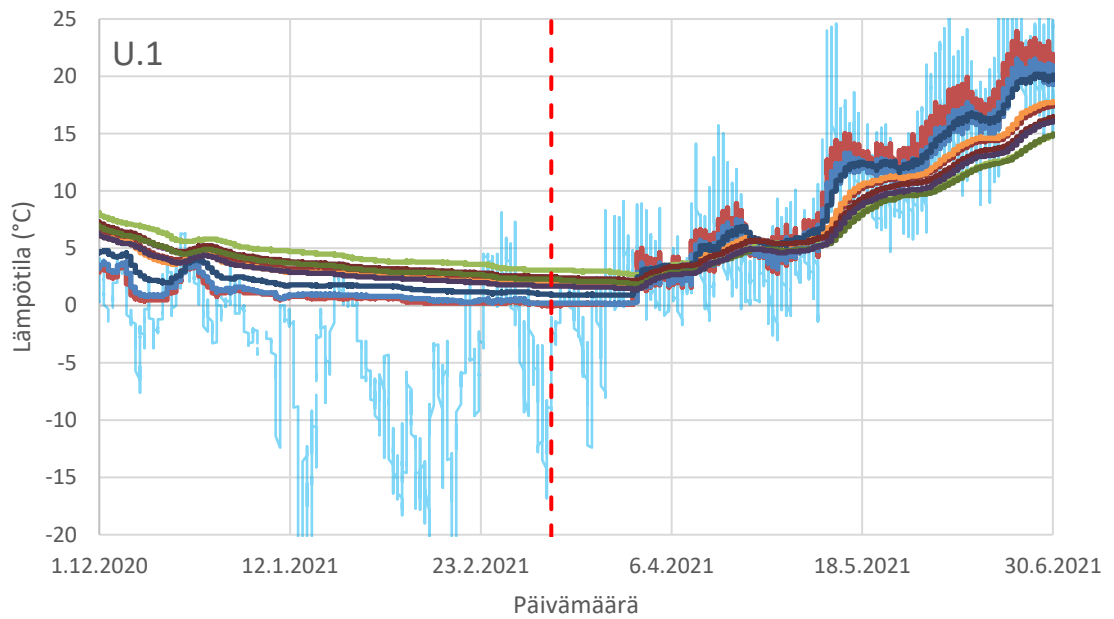
**Kuva 23.** Lumisyvyys Nuuksion havaintoasemalla tarkkailujaksolla 1.12.2020–30.6.2020. (Ilmatieteenlaitos 2021)

Koerakenteen C.0 eli moreenirakenteen lämpötilat ovat tarkkailujakson alusta huhtikuun alkuun asti pysyneet melko tasaisina noin 0–1 °C:ssa, minkä jälkeen lämpötilat ovat läheneet nousemaan ulkolämpötilan nousun yhteydessä tarkkailujakson loppuun (kuva 23). Lähempänä maanpintaa, 50 mm:n syvyydellä, lämpötila on vaihdellut enemmän. Lämpötila ei ole ollut alle 0 °C tarkkailujakson aikana.

Koerakenteen U.1 kasvukerroksen lämpötilavaihtelut muistuttavat koerakenteen A.1 kasvukerroksen lämpötiloja. Kasvukerroksen lämpötila on tarkkailujakson alussa ollut noin 3 °C, jonka jälkeen se on noussut tarkkailujaksolla korkeimmilleen 22.6.2021 lämpötilaan 23,9 °C. Bitumikuona 5 -lämpötila-anturin tulokset ovat lähellä kasvukerroksen lämpötilaa. Bitumikuonassa olevien antureiden korkeusasemasta ei ole tarkkaa tietoa. Lämpötila alitti 0 °C vain yhtenä päivänä 11.3.2021. kasvukerroksessa 50 mm:n syvyydellä (kuva 24).



— Ulkolämpötila — 21 Helsinki-moreeni 50 mm — 22 Helsinki-moreeni 150 mm



— Ulkolämpötila — 23 Pintakerros 50 mm — 24 Pintakerros 150 mm  
 — Bitumikuona 1 — Bitumikuona 2 — Bitumikuona 3  
 — Bitumikuona 4 — Bitumikuona 5 — Bitumikuona 6  
 — Yhdistelmäanturi 1 — Yhdistelmäanturi 2

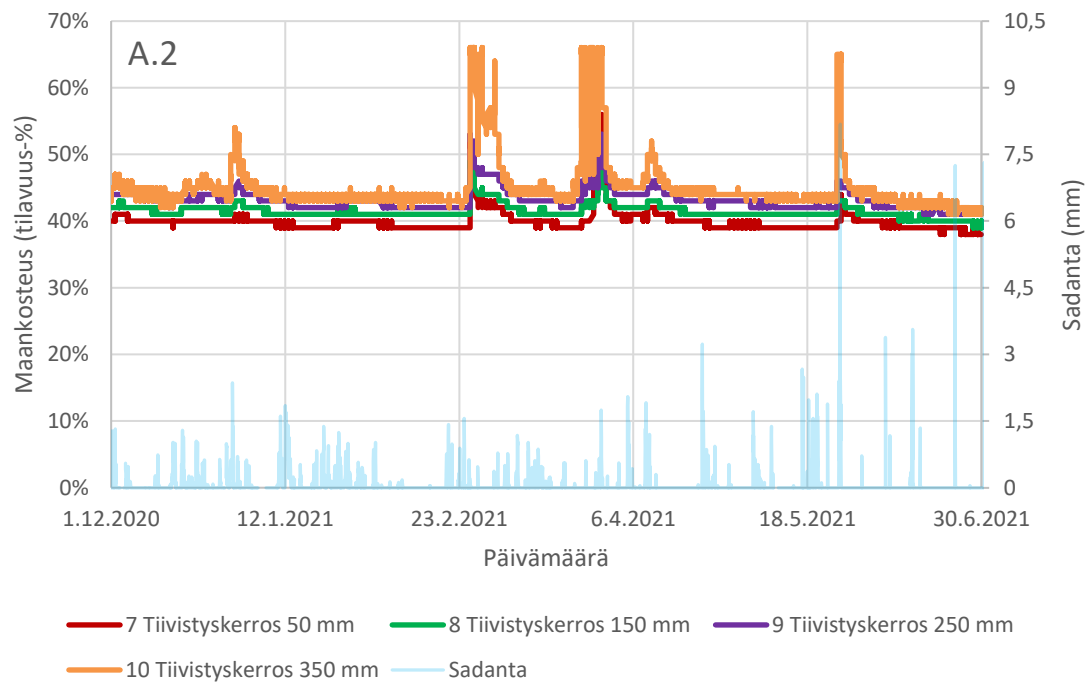
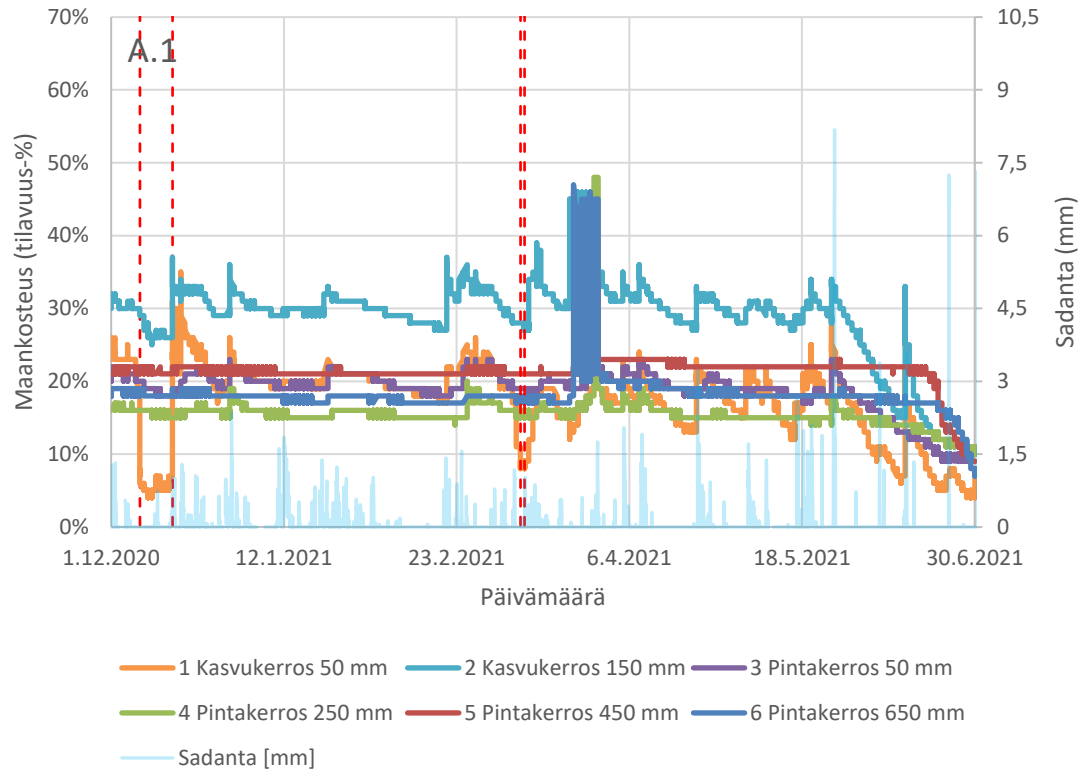
**Kuva 24.** Koerakenteiden C.0 ja U.1 lämpötilat ja ulkolämpötila tarkkailujaksolla. Katkoviivalla on merkitty 11.3.2021, jolloin U.1:n kasvukerroksessa (50 mm) 0 °C alittui. Selitteen numerot viittaavat kuvaan 10.

## 5.2.2 Maankosteus

Koerakenteiden maankosteudet tilavuusprosentteina on esitetty kuvissa 25–27. Maankosteuden lisäksi kuvissa on esitetty sadanta, jotta voidaan arvioida sateen vaikutusta maankosteuteen. Maankosteustuloksien perusteella voidaan arvioida vain maankosteuden suhteellisia muutoksia, koska rakennekerroksien maankosteusantureita ei ole kalibroitu materiaaliakohtaisesti (Kiirikki 2019, Reiman 2019 mukaan). Jäätäneestä materiaalista ei saada mittaustuloksia. Tämä johtuu veden muuttumisesta kiteiseksi, jolloin anturit eivät pysty mittaamaan todellista maankosteutta (Kiirikki 2021c).

Koerakenteessa A.1 maankosteus on ollut pääsääntöisesti suurinta kasvukerroksessa 150 mm:n syvyydellä (kuva 25). Kasvukerroksen antureissa maankosteudessa on tapahtunut paljon muutoksia, johon on luultavasti vaikuttanut lyhyt etäisyys maanpintaan (kuivumis- ja kastumissyklit ja haihdunta). Maaliskuun lopussa pintakerroksen, erityisesti syvyydellä 650 mm:ä, maankosteus on noussut äkillisesti. Nousuun on todennäköisesti vaikuttanut lumen sulaminen. Kuvaan 25 on merkitty punaisilla katkoviivoilla aikavälit, jolloin kasvukerroksen 50 mm:n syvyyden lämpötilat ovat olleet alle 0 °C joulukuussa 2020 ja maaliskuussa 2021. Maankosteuden trendi on laskeva kesää kohti.

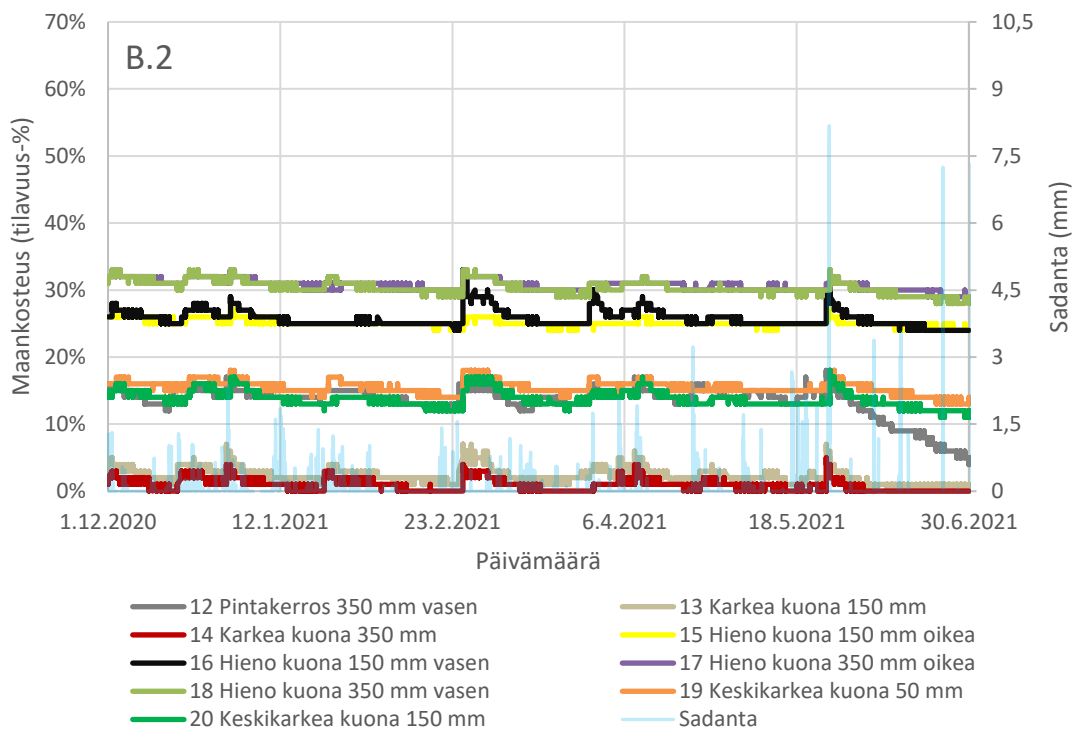
Koerakenteessa A.2 maankosteusanturit ovat vain tiivistyskerroksessa. Tulosten perusteella maankosteus on kasvanut syvemmälle mentäessä (kuva 25). Suurinta maankosteuden vaihtelu ja yksittäiset mitatut arvot ovat olleet alimmassa anturissa 350 mm:n syvyydellä. Helmi- ja maaliskuun lopussa maankosteusarvot ovat nousseet muutamaksi päiväksi, mikä todennäköisesti johtuu lumien sulamisesta. Toukokuun lopun maankosteuspiikki on todennäköisesti johtunut rankkasateesta. Tarkkailujakson loppua kohden rakenteessa on havaittavissa kuivumista, mikä näkyy arvojen loivana laskevana trendinä.



**Kuva 25.** Koerakenteiden A.1 ja A.2 rakennekerrosten maankosteudet ja sadanta tarkkailujaksolla. Selitteen numerot viittaavat kuvaan 10.

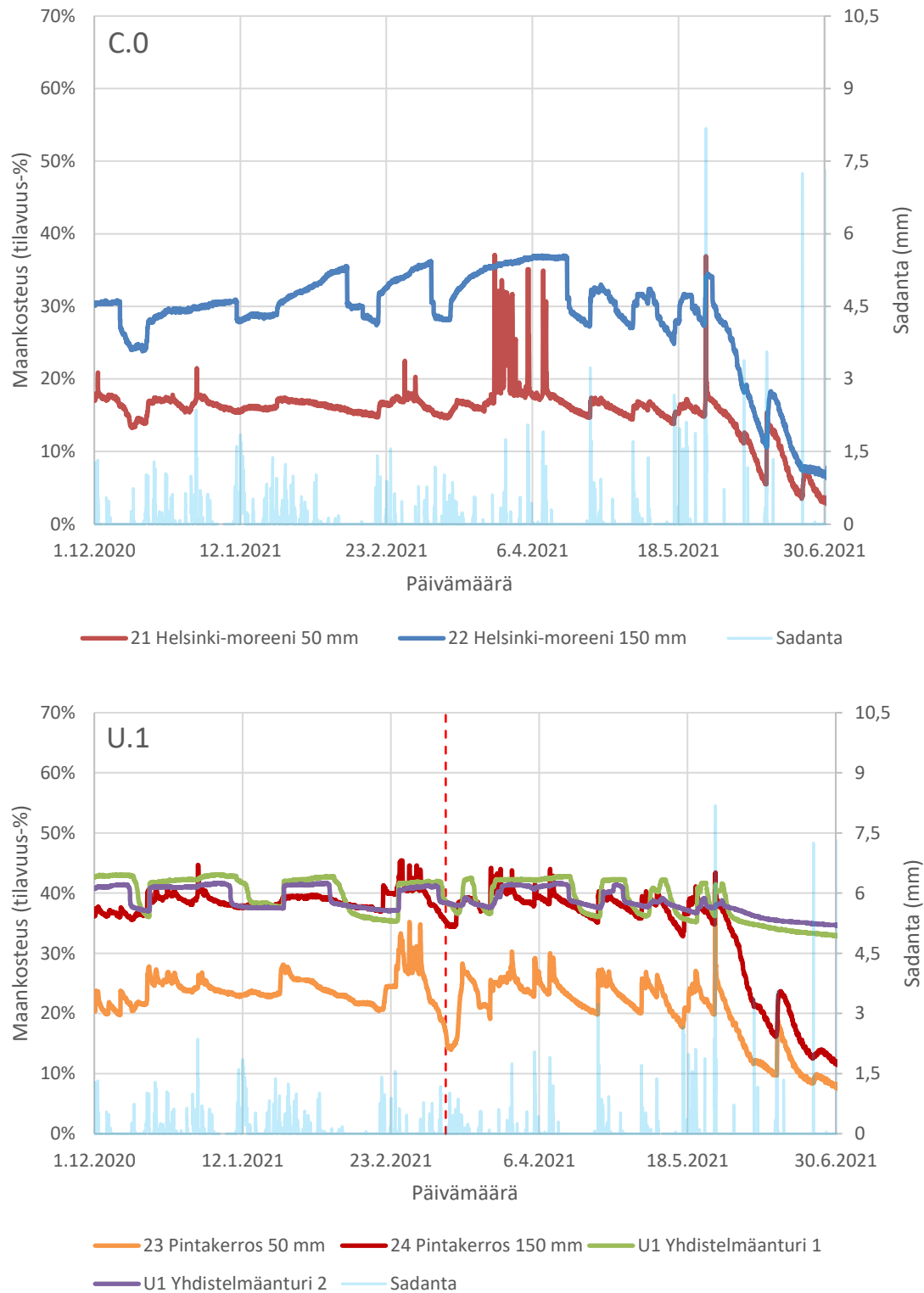
Koerakenteen B.2 maankosteusantureiden instrumentointitulokset on esitetty kuvassa 26. Jätteenpolton kuonan sisältämät metallit aiheuttavat sirontaa, josta anturit häiriintyvät. Tulokset ovat kuitenkin keskenään vertailtavissa. (Kiirikki 2019, Reiman 2019 mukaan)

Karkean jätteenpolton kuonan eli kuivatuskerroksen maankosteus on ollut pienin (0–7 tilavuus-%) (kuva 26). Hienorakeisessa kuonassa eli kapillaarieristeessä syvyyksillä 150 mm ja 350 mm maankosteudet ovat olleet suurimpia (24–33 tilavuus-%) koko tarkkailujakson ajan. Keskikarkeassa kuonassa eli kapillaarikatkossa syvyyksillä 50 mm ja 150 mm maankosteudet ovat vaihdelleet välillä 11–18 tilavuus-%. Pintakerroksen eli Helsinki-moreenin maankosteusarvo on ollut samaa suuruusluokkaa kuin keskikarkean jätteenpoltonkuonan (18 tilavuus-%), mutta tarkkailujakson lopussa se laskee (4 tilavuus-%).



**Kuva 26.** Koerakenteen B.2 rakennekerrosten maankosteudet ja sadanta tarkkailujaksolla. Selitteen numerot viittaavat kuvaan 10.

Koerakenteessa C.0 eli moreenirakenteessa maankosteus on tuloksien perusteella pääsääntöisesti suurempaa 150 mm:n syvyydellä kuin 50 mm:n syvyydellä (kuva 27). Maaliskuun lopussa 50 mm:n syvyydellä maankosteus on vaihdellut sahaavasti, joka todennäköisesti on liittynyt lumen sulamisesta johtuvaan suurempaan kosteuteen. Samaa vaihtelua ei ole syvemmillä pintamaassa. Maalis- ja toukokuussa on kaksi yksittäistä maankosteuspiikkiä, jolloin lähempänä pintaa mitatut maankosteudet ovat nousseet samalle tasolle kuin alemmassa anturissa. Nämä arvojen nousut johtuvat todennäköisesti lumen sulamisesta ja rankkasadekuurosta. Maankosteudet ovat toukokuun lopulla läheneet laskuun. Koerakenteen U.1 maankosteusantureiden instrumentointitulokset on myös esitetty kuvassa 27.



**Kuva 27.** Koerakenteen C.0 ja U.1 rakennekerrosten maankosteus ja sadanta tarkkailujaksolla. Selitteen numerot viittaavat kuvaan 10.

Kuvaan 27 on merkitty punaisella katkoviivalla 11.3.2021, jolloin pintakerroksessa 50 mm:n syvyydellä lämpötila oli alle 0 °C. Yhdistelmäanturien 1 ja 2 sekä 150 mm:n syvyydessä pintakerroksessa olevan anturin maankosteudet ovat hieman suurempia kuin pin-

takerroksen 50 mm:n syvyyden maankosteudet. Samanaikaisesti pintakerroksen maankosteusarvot ovat laskeneet (kuva 27). Etenkin keväällä maankosteusarvot ovat vaihdelleet sahaavasti, johon on luultavasti vaikuttanut lumen sulaminen.

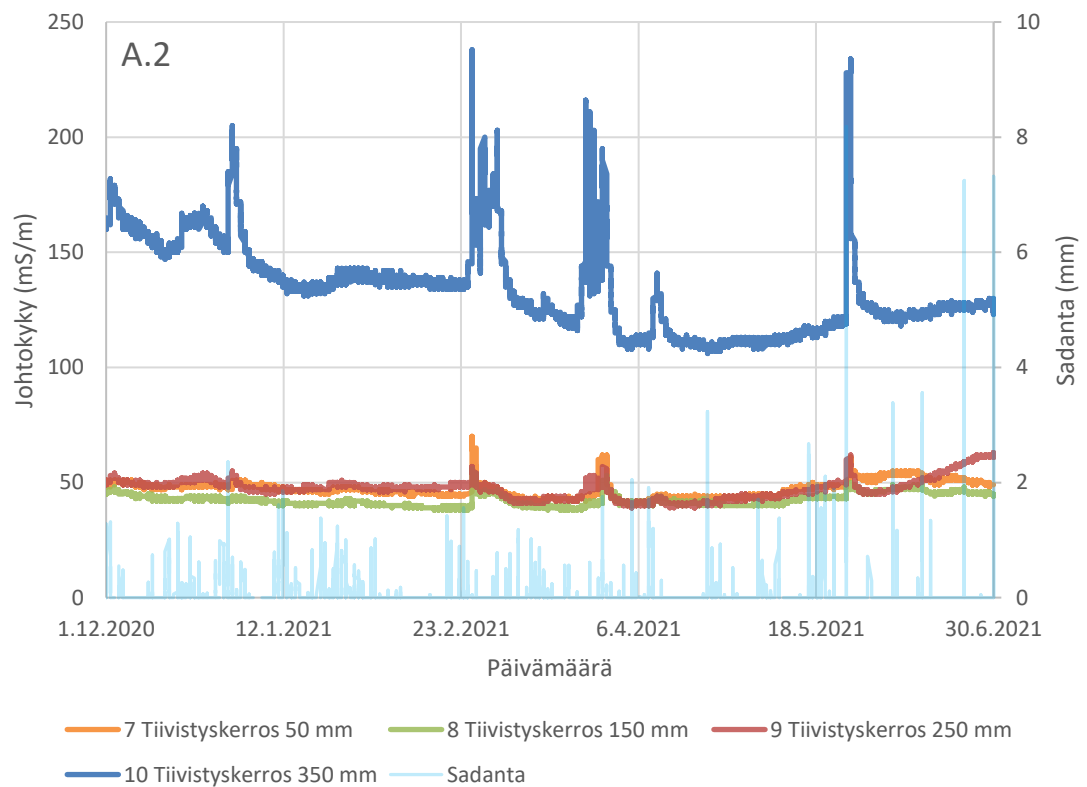
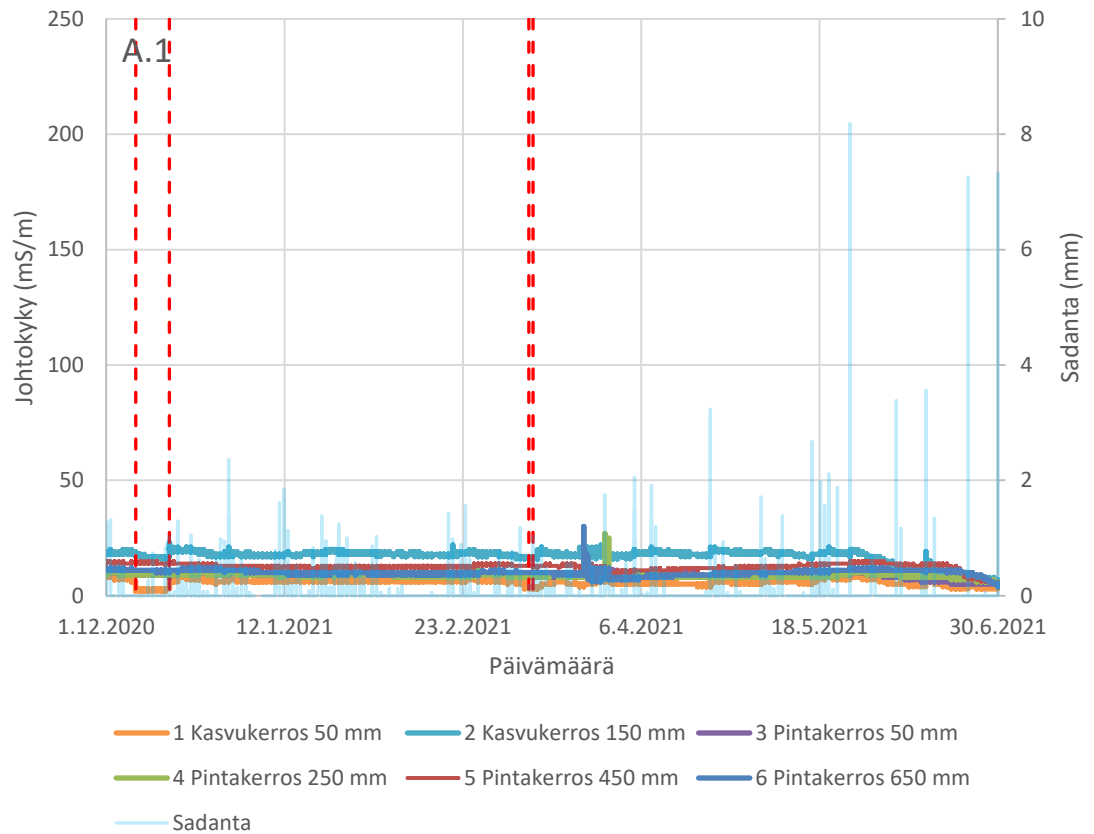
### 5.2.3 Johtokyky

Johtokykytulokset seurantajakson ajalta on esitetty kuvissa 28–30. Johtokyvyn lisäksi on esitetty sadantamäärät, jotta voidaan arvioida sadannasta aiheutuvan kosteuden mahdollista vaikutusta johtokyvyn muutoksiin. Jäätyminen vaikuttaa johtokyvyn mittaamiseen, sillä jäänyt vesi on kiteistä, jolloin anturit eivät pysty mittaamaan todellista arvoa (Kiirikki 2021c).

Koerakenteen A.1 johtokykytuloksien perusteella kasvukerroksen eli lietekompostin 150 mm:n syvyydellä johtokyky on pääsääntöisesti suurin vaihdellen välillä 7–23 millisiemenssiä metriä kohden (mS/m) ja kasvukerroksen 50 mm:n syvyydellä pienin vaihdellen välillä 2–11 mS/m (kuva 28). Pintakerroksen johtokyky on pääsääntöisesti kasvukerroksen arvojen välillä. Johtokyvyn arvot ovat kevään yksittäisiä huippuja lukuun ottamatta olleet alle 25 mS/m tarkkailujakson ajan. Kuvaan on merkitty punaisilla katkoviivoilla aikavälit, jolloin kasvukerroksen 50 mm:n syvyydellä lämpötila alitti 0 °C. Maaliskuun lopussa johtokykyarvoissa on tapahtunut paljon vaihtelua. Johtokyvyn vaihteluihin on todennäköisesti vaikuttanut lumen sulamisvedet, jotka ovat suotautuneet kasvu- ja pintakerroksen läpi.

Koerakenteen A.2 tiivistyskerroksessa alempana, syvyydellä 350 mm, johtokyky on tuloksien perusteella yli kaksinkertainen kuin ylemmissä antureissa (syvyyksillä 50 mm, 150 mm ja 250 mm) (kuva 28). Kuonabentoniittikerroksen alaosassa mitatut sähkönjohtavuuden arvot vaihtelevat noin 110–240 mS/m ja ylempänä mitatut sähkönjohtavuudet noin 40–70 mS/m. Erityisesti tiivistyskerroksen alaosassa mitatuissa johtokykyarvoissa näkyy helmi- ja maaliskuun lopun lumien sulamisesta ja 26.5.2021 olleesta rankkasaateesta aiheutunut vesipitoisuuden kasvu, jolloin johtokykykin on ollut suurempi.

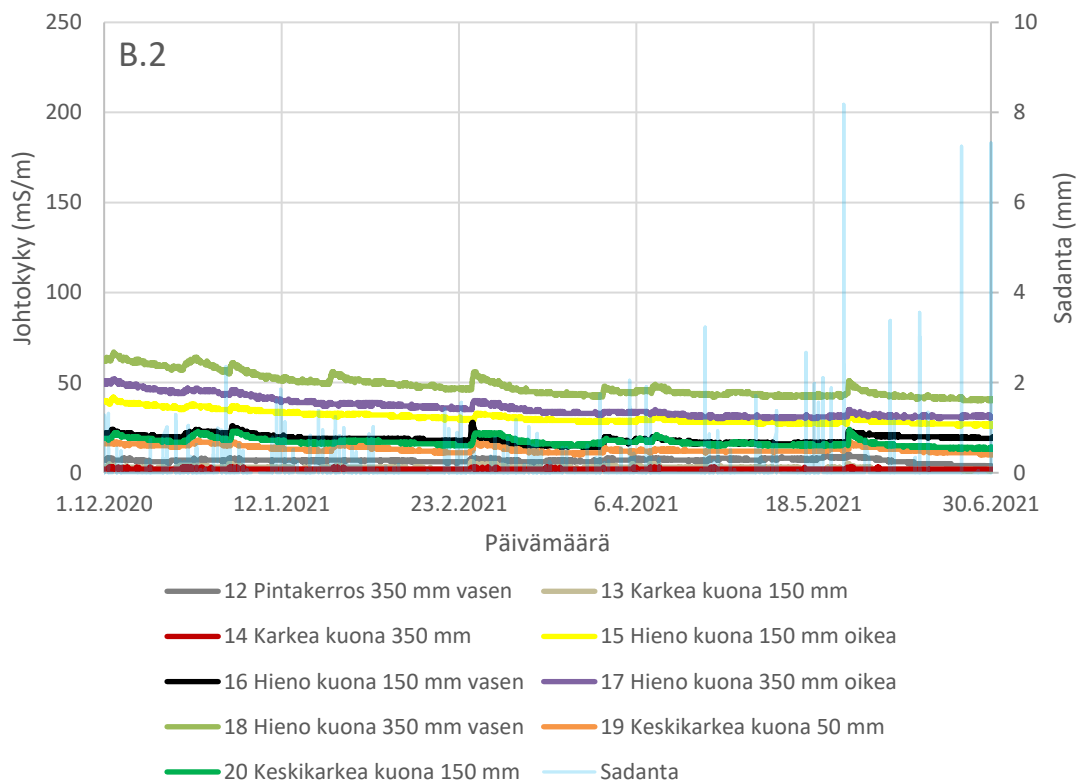




**Kuva 28.** Koerakenteiden A.1 ja A.2 rakennekerrosten johtokyky ja sadanta tarkkailujaksolla. Selitteen numerot viittaavat kuvaan 10.

Koerakenteen B.2 johtokykytuloksien perusteella kapillaarieristeen eli hienorakeisen jätteenpolton kuonan johtokyky on tarkkailujaksolla korkein (kuva 29). Johtokyvyn arvot ovat kapillaarieristeessä olleet suurempia rakennekerroksen alaosassa, 350 mm:n syvyydellä, missä arvot ovat vaihdelleet noin 30–65 mS/m. Toiseksi suurin johtokyky on kapillaarikatkossa käytetyllä keskikarkealla jätteenpolton kuonalla, jonka arvot ovat vaihdelleet noin 10–25 mS/m. Pintakerroksen eli Helsinki-moreenin ja kuivatuskerroksen eli karkearakeisen jätteenpolton kuonan johtokykyarvot ovat melkein koko tarkkailujakson olleet alle 10 mS/m.

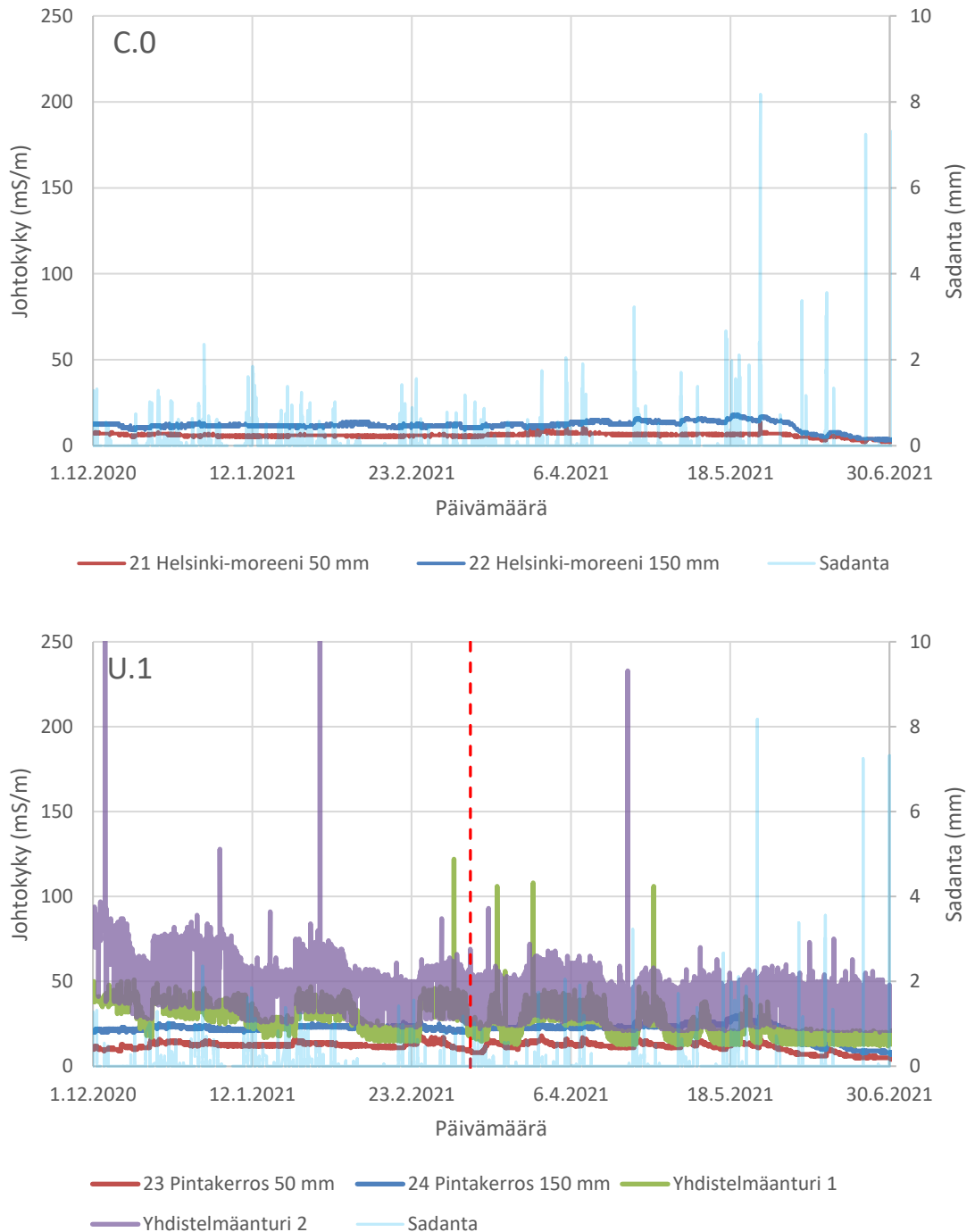
Erityisesti hienorakeisen ja keskikarkean jätteenpolton kuonan johtokykytuloksien muutokset seurantajaksoilla muistuttavat toisiaan. Molempien kuonien johtokykyarvoissa on havaittavissa tarkkailujakson aikana laskeva trendi. Lumen sulaminen helmikuussa ja toukokuun rankkasateet näkyvät johtokykypiikkeinä kuvassa (kuva 29). Pintakerroksen ja hienorakeisen kuonan johtokyky on vaihdellut vastaavasti, mutta vaihtelu on ollut pienempää.



**Kuva 29.** Koerakenteen B.2 rakennekerrosten johtokyky ja sadanta tarkkailujaksolla. Selitteen numerot viittaavat kuvaan 10.

Koerakenteen C.0 pintakerroksen eli Helsinki-moreenin johtokyky on ollut tarkkailujaksolla suurempaa syvemmällä kuin pinnassa (kuva 30). Johtokyky on vaihdellut tarkkailujaksolla välillä 2–18 mS/m. Johtokyvyssä on tapahtunut sahaavaa vaihtelua erityisesti

huhtikuun alussa ja toukokuun lopussa. Maaliskuun lopun lumen sulamisen ja tarkkailujakson suurimman sadekuuron 26.5.2021 vaikutukset johtokykyyn ovat havaittavissa etenkin 50 mm:n syvyydellä, jossa johtokyky on ajoittain noussut piikkimäisesti. Kesäkuun alusta lähtien johtokyky on laskenut sahaavasti tarkkailujakson loppuun asti. Kuvassa 30 on esitetty myös koerakenteen U.1 rakennekerrosten johtokyky.



**Kuva 30.** Koerakenteiden C.0 ja U.1 rakennekerrosten johtokyky ja sadanta tarkkailujaksolla. Punaisella katkoviivalla on merkitty 11.3.2021, jolloin kasvukerroksen (50 mm) lämpötila oli alle 0 °C. Selitteen numerot viittaavat kuvaan 10.

Koerakenteen U.1 kasvukerroksen tuloksien perusteella kasvukerroksen johtokyky on pysynyt pääsääntöisesti melko tasaisena välillä 10–30 mS/m toukokuun loppuun asti, jolloin se alkoi laskea (kuva 30). Maaliskuussa, kun kasvukerroksen lämpötila on laskeutunut alle 0 °C:n, johtokyky on pienentynyt kasvukerroksen 50 mm:n syvyydessä. Kasvukerrossa syvyyksillä 50 mm ja 150 mm johtokyky ovat olleet tarkkailujakson alussa 9 ja 20 mS/m ja tarkkailujakson lopussa 5 ja 8 mS/m. Sadannan vaikutus näkyy 50 mm:n syvyydellä johtokyvyn arvojen pieninä ajoittaisina nousuina. Syvyydellä 150 mm samantyyppistä vaikutusta ei ole havaittavissa yhtä selvästi. Tarkkailujakson lopulla kasvukerroksen johtokyvyn trendi on laskeva.

Bitumistabiloidun kuonan sähkönjohtavuutta mitataan yhdistelmäantureilla. Niiden toteutunutta sijaintia ei ole urakoitsija ilmoittanut (Reiman 2019). Tuloksissa on yksittäisiä häiriöistä johtuvia piikkejä. Tulosten perusteella sähkönjohtavuus on suurempi alemmassa anturissa (2) vaihdellen välillä 20–437 mS/m. Ylemmässä anturissa (1) sähkönjohtavuus on vaihdellut välillä 12–122 mS/m. Molemmissa on loiva laskeva trendi.

### 5.3 Koerakenteista purkautuvan veden laatu

Tarkkailujaksolla koerakenteiden rakennekerroksista purkautuvan veden laatua seurattiin kenttä- ja laboratoriomittauksilla sekä kaivoissa A2.3, B2.3, ja U1.4 jatkuvan instrumentoinnin avulla. Kenttämittaustuloksissa on keskitytty tarkastelemaan sähkönjohtavuuden ja pH:n tuloksia. Kenttämittausten redox- ja happipitoisuustulokset on esitetty liitteissä 2 ja 3. Laboratoriotuloksista on keskitytty tarkastelemaan kloridin, sulfaatin ja tiettyjen raskasmetallien pitoisuustuloksia.

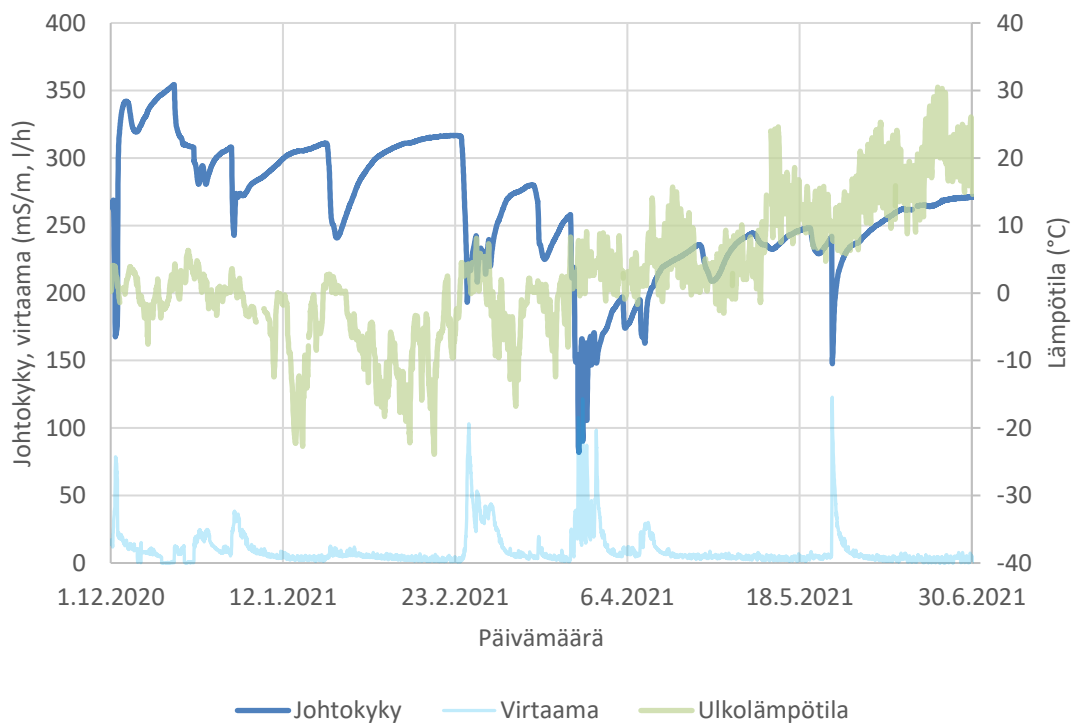
#### 5.3.1 Jatkuvatoimiset anturit

Kuvissa 31–36 on esitetty instrumentoitujen mittakaivojen veden laadun jatkuvan seurannan tulokset tarkkailujakson ajalta. Kaivojen mittaustuloksien lisäksi kuvissa on käytetty ulkolämpötilaa, jotta voidaan arvioida sen mahdollisia vaikutuksia tuloksiin.

Koerakenteen A.2 kuivatuskerroksesta purkautuvan veden johtokykyä, lämpötilaa, sameutta, pH:ta, liuennan orgaanisen aineen määrää ja virtaamaa mitattiin mittakaivossa A2.3. Johtokyky oli seurantajakson alussa noin 260 mS/m, jonka jälkeen se on korkeimmillaan ollut noin 350 mS/m 16.12.2021 ja matalimmillaan noin 80 mS/m 25.3.2021 (kuva 31). Tammi- ja helmikuun pakkasilla, jolloin lämpötila kävi noin –20 °C:ssa, sähkönjohtavuuden arvot ovat olleet noin 300–315 mS/m. Tämän jälkeen lämpötila nousi yli 0 °C:seen, jolloin sähkönjohtavuuden arvot laskivat. Maaliskuun lopusta sähkönjohtavuus

on melko tasaisesti noussut lukuun ottamatta pieniä notkahduksia huhtikuun alkupuolella ja toukokuun lopussa.

Johtokyvyn, virtaaman ja ulkolämpötilan muutoksilla on keskenään havaittavissa oleva yhteys. Virtaaman noustessa veden johtokyky laskee (kuva 31). Helmi- ja maaliskuun lopun korkeammat virtaamamäärät johtuvat todennäköisesti lumen sulamisesta, sillä lämpötila-arvot ovat samanaikaisesti nousseet yli 0 °C:seen. Rankkasade 26.5.2021 näkyy tuloksissa selvästi suurena virtaamana ja johtokyvyn hetkellisenä laskuna. Tarkkailujakson loppua kohden johtokyvyn ja ulkolämpötilan arvot ovat lähteneet nousuun ja virtaama on pysynyt tasaisena. Mittakaivon vesipatsaan homogenisoinnilla ei ole havaittavissa selvää vaikutusta johtokykyyn.



**Kuva 31.** Koerakenteen A.2 kuivatuskerroksen mittakaivossa A2.3 mitattu sähkönjohtavuus ja virtaama sekä sääasemalla havaittu ulkolämpötila tarkkailujaksolla.

Muut mittakaivon A2.3 instrumentoiduista parametreista ja ulkolämpötila tarkkailujakson ajalta on esitetty kuvassa 32. Korkeimmat virtaama-arvot ovat kuvan tulkittavuuden takia rajattu pois. Korkeimmillaan instrumentoitu virtaama oli noin 120 l/h 26.3.2021.

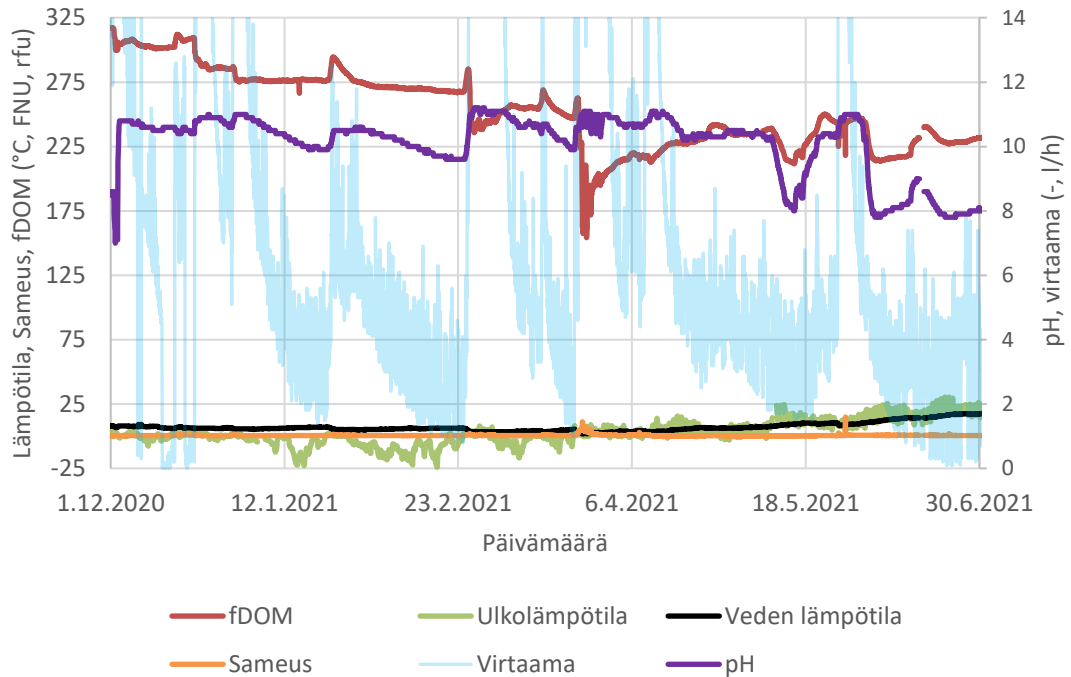
Mittakaivossa instrumentoitu veden pH on ollut seurantajakson alussa 8,5 (kuva 32). Tämän jälkeen pH-arvot ovat kahdesti vaihdelleet noin arvojen 11 ja 9,5 välillä tammi-kuun alusta helmikuun loppuun. Kevään arvoista pH oli matalimmillaan 15.5.2021, jolloin se oli 8. Keväällä pH-arvot ovat todennäköisesti liian korkeita, sillä kesäkuussa tehdyn kalibroinnin yhteydessä pH-arvot alenivat (Kiirikki 2021a). Mitatut pH-arvot vaikuttavat

tuloksien perusteella osittain korreloivan virtaaman kanssa toukokuuhun 2021 asti. Virtaama-arvoissa tapahtuvat nousut näkyvät myös pH-arvojen nousuina. Toukokuun puolesta välistä alkaneen pH:n nousun yhteydessä virtaama-arvot eivät ole nousseet.

Liunneen orgaanisen aineksen määrä on ollut noin 320 rfu:ta tarkkailujakson alussa. Liunneen orgaanisen aineksen määrää on mitattu fluoresoivana liunneena orgaanisena aineksena (fDOM). Kun kaivossa mitattu virtaama on hetkellisesti ollut suuri, fDOM:n arvo on pienentynyt. Tarkkailujaksolla fDOM:n määrä laski pienimmilleen, noin puoleen lähtötasosta, maaliskuun lopulla. Tällä välillä arvoissa oli ajoittaisia pieniä nousuja esimerkiksi tammi- ja helmikuun loppuissa. Orgaanisen aineksen määrä nousi kevään aikana tasolle 240 rfu:ta.

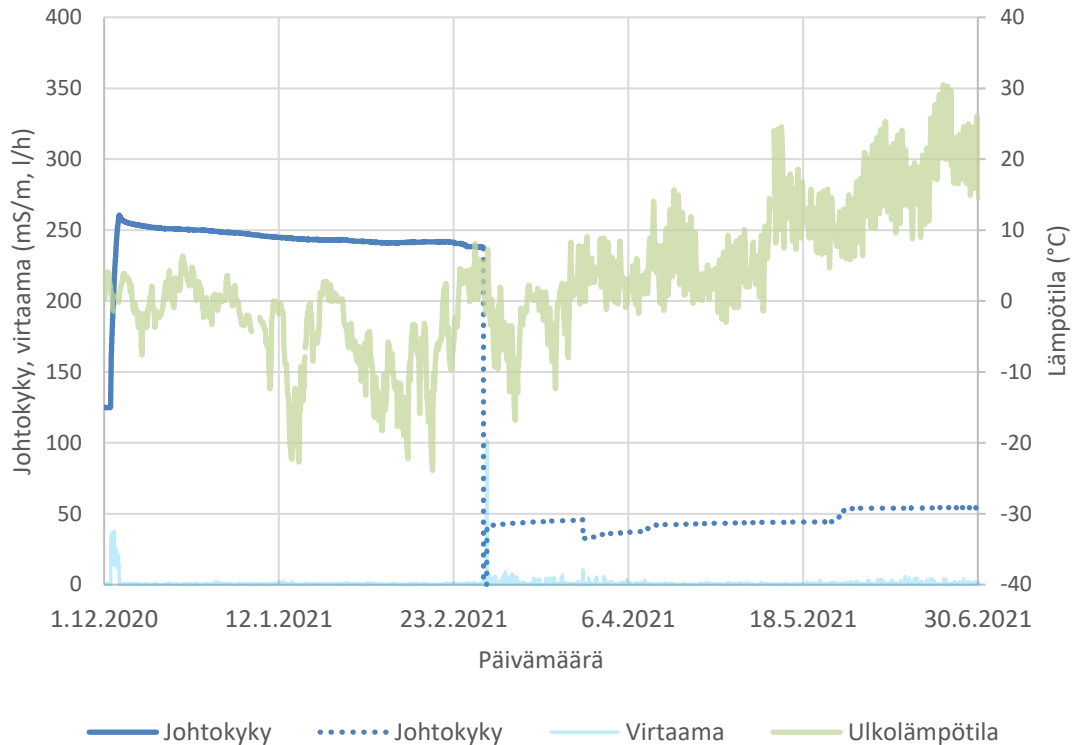
Veden lämpötila seuraa loivapiirteisesti ulkolämpötilaa, mutta pysyy nollan yläpuolella. Veden lämpötila oli tarkkailujakson alussa tammikuussa noin 8 °C tarkkailujakson alussa. Lämpötila laski maaliskuussa ja oli matalimmillaan 25.3.2021 noin 2 °C. Tämän jälkeen veden lämpötila nousi, jolloin tarkkailujakson lopussa sen arvo oli korkeimmillaan 17,9 °C.

Sameus oli tarkkailujakson alussa 0,4 FNU:ta. Se on vaihdellut pääosin 0,4–0,8 FNU:n välillä seurantajakson ajan. Sameuden arvot ovat nousseet korkeiksi yksittäisiksi pikoiksi 25.3.2021, jolloin sameus oli 11,3 FNU:ta ja 28.5.2021, jolloin sameus oli 15 FNU:ta. Kyseiset arvot ovat todennäköisesti johtuneet vesipatsaiden sekoittamisesta kenttämittauksien ja vesinäytteenottojen yhteydessä. Lisäksi seurantajaksolla on muutamia pienempiä sameusarvojen nousuja, joista useimmat ovat ajoittuneet muille kenttämittauspäiville ja päiville, jolloin virtaama-arvot ovat nousseet.



**Kuva 32.** Koerakenteen A.2 kuivatuskerroksen mittakaivossa A2.3 mitattu pH, sameus, veden lämpötila, liuennan orgaanisen aineksen määrä ja virtaama tarkkailujaksolla sekä ulkolämpötila. Korkeimmat virtaama-arvot on kuvan selkeyden takia rajattu kuvasta.

Koerakenteen B.2 kuivatuskerroksesta purkautuvan veden sähkönjohtavuutta, sameutta, pH:ta, virtaamaa ja lämpötilaa mitattiin mittakaivossa B2.3. Purkautuneen veden sähkönjohtavuus, mittakaivossa mitattu virtaama ja ulkolämpötila tarkkailujaksolla 1.12.2020–30.6.2021 on esitetty kuvassa 33. Sähkönjohtavuus on ollut seurantajakson alussa noin 125 mS/m, jonka jälkeen se on noussut nopeasti noin 260 mS:iin/m joulukuussa 2020. Johtavuus on laskenut loivasti. Maaliskuussa tehtyjen huoltotoimenpiteiden yhteydessä kaivossa oleva pumppu asennettiin liian syväälle ja kaivoon jouduttiin lisäämään puhdasta hanavettä (Kiirikki 2021b). Tämä näkyy sähkönjohtavuuden tuloksissa: sähkönjohtavuus on laskenut äkillisesti 2.3.2021 tasolle 0,1 mS/m. Tämän jälkeen 3.3.2021 sähkönjohtavuus on palautunut tasolle 40 mS/m. Tältä osin johtokyvyn arvot on merkitty kuvaajaan katkoviivalla, koska tulokset eivät luotettavasti kuvaa rakenteesta purkautuvan veden laatua. Sähkönjohtavuudella ja ulkolämpötilalla ei ole havaittavissa selkeää yhteistä trendiä.



**Kuva 33.** Koerakenteen B.2 kuivatuskerroksen mittakaivossa B2.3 mitattu sähkönjohtavuus ja ulkolämpötila tarkkailujaksolla. Katkoviivalla on merkitty johtokyvyn arvot sen jälkeen, kun pumppu asennettiin hetkellisesti liian syvälle ja kaivoa täytettiin hanavedellä.

Mittakaivon B2.3:n muiden parametrien tulokset seurantajaksolla on esitetty kuvassa 34. Mitattu virtaama oli tarkkailujakson aikana korkeimmillaan noin 100 l/h 3.3.2020.

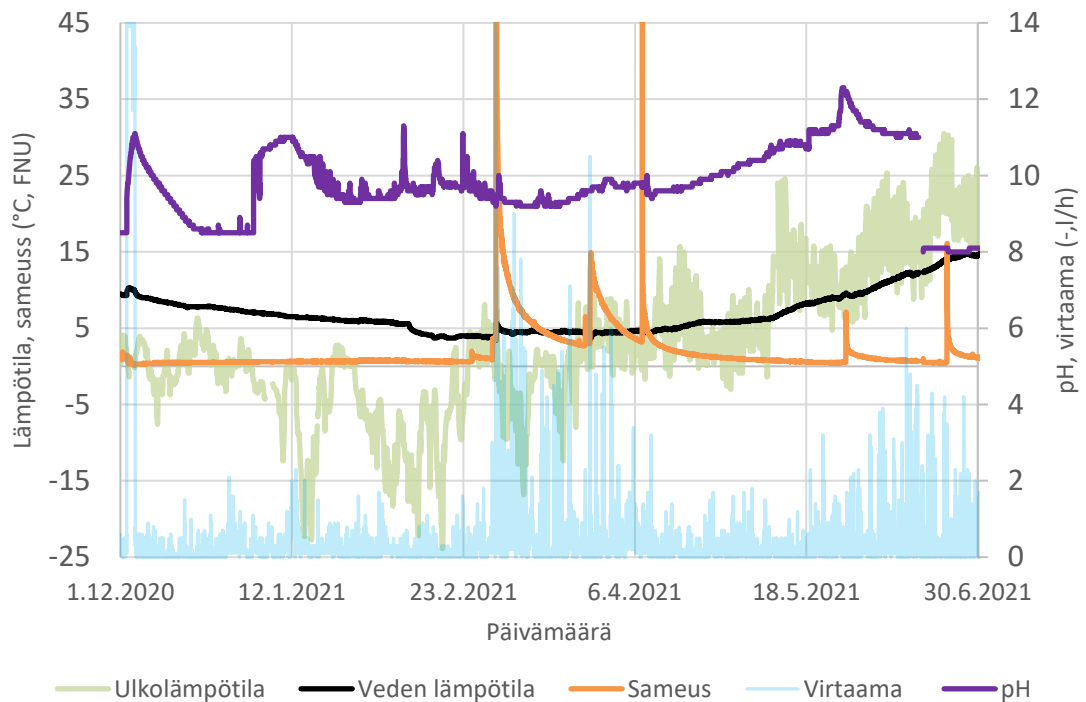
Mitattu pH oli 8,5 tarkkailujakson alussa, jonka jälkeen sen arvo on vaihdellut ja se on käynyt ajoittain noin 11:ssä (kuva 34). Tammikuusta lähtien pH on pysynyt melko tasaisena 9,5:ssä–10:ssä muutamaa yksittäistä pH:n nousua lukuun ottamatta huhtikuun loppuun asti. Tämän jälkeen pH on noussut 12,3:een toukokuun lopussa. Keväällä mittakaivosta B2.3 instrumentoidut pH-arvot ovat myös todennäköisesti liian korkeita, sillä kesäkuussa tehdyn kalibroinnin yhteydessä pH-arvot laskivat selvästi kevään arvoihin verrattuna (Kiirikki 2021a). Kalibroinnin jälkeen pH laski noin 8:aan.

Mitattu sameus oli 0,9 FNU:ta tarkkailujakson alussa. Sameuden arvot ovat pysyneet pääsääntöisesti melko vakaina tarkkailujakson aikana, mutta 3.3.2021 pumpun korkeuden korjaamisen yhteydessä sameus on ollut hetkellisesti noin 1200 FNU:ta. Lisäksi sameus nousi hetkellisesti kevään ja kesän kenttämittauksien ja vesinäytteenottojen yhteydessä (kuva 34).

Mitattu veden lämpötila on ollut seurantajakson alussa 9,5 °C. Lumien sulamisvaihe näkyy tuloksissa lämpötilan nopeana laskuna helmikuussa. Alimmillaan veden lämpötila oli

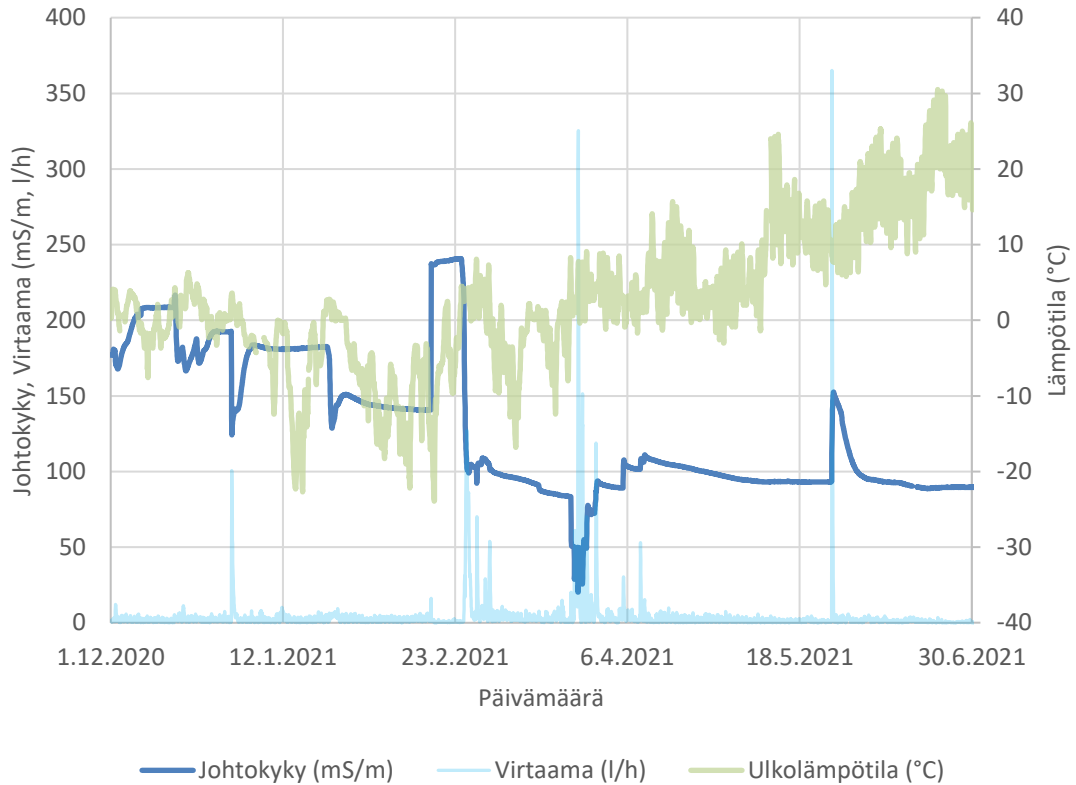


2.3.2021, jolloin se oli 3,3 °C ja ylimmillään 30.6.2021, jolloin se oli 14,9 °C. Veden lämpötila korreloi ulkolämpötilaan, sillä veden lämpötila on noussut kesää kohden ulkolämpötilan noustessa.



**Kuva 34.** Koerakenteen B.2 kuivatuskerroksesta purkautuvan veden mittakaivossa B2.3 mitattu pH, sameus, veden lämpötila ja virtaamat tarkkailujaksolla sekä ulkolämpötila. Korkeimmat virtaama-arvot ovat kuvan selkeyden takia rajattu kuvasta.

Koerakenteen U.1 kuivatuskerroksesta purkautuvan veden johtokykyä, sameutta, pH:ta, virtaamaa ja lämpötilaa mitataan mittakaivossa U1.4. Johtokyky on tarkkailujakson alussa ollut noin 175 mS/m (kuva 35). Johtokyky on laskenut vaihdellen lähinnä virtaaman muutoksista johtuen ja tasaantunut helmikuun puolessa välin noin 140 mS:iin/m. Tämän jälkeen sähkönjohtavuus on noussut ja se on ollut suurimmillaan helmikuun lopussa noin 240 mS/m, jonka jälkeen johtokyky on laskenut. Maaliskuun lopussa on yksittäinen laskupiikki, jonka jälkeen arvo on vakiintunut noin tasolle 20 mS/m. Johtokyvyn laskeminen keväällä johtuu todennäköisesti lumien sulamisesta. Johtokyvyllä ei ole havaittavissa selkeää korrelaatiota ulkolämpötilan kanssa jäätymistä lukuun ottamatta.



**Kuva 35.** Koerakenteen U.1 kuivatuskerroksesta purkautuvan veden mittakaivossa U1.4 instrumentoitu sähkönjohtavuus ja ulkolämpötila tarkkailujaksolla.

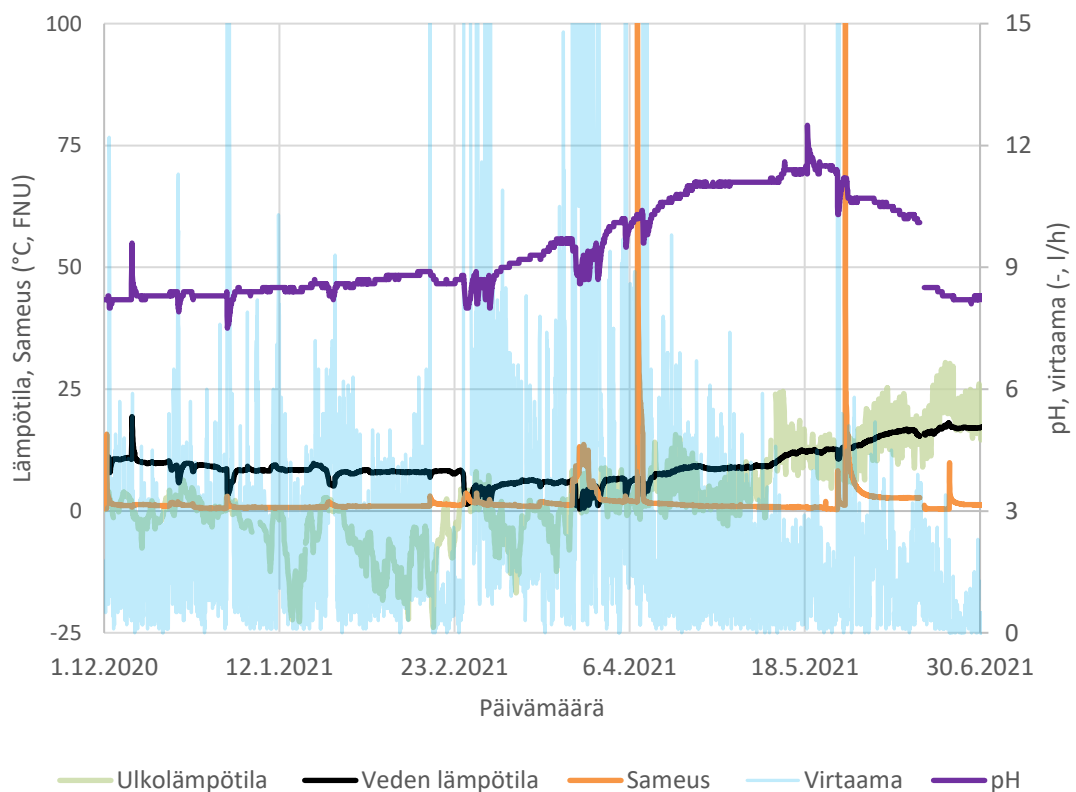
Mittakaivon U1.4 muut mitatut parametrit on esitetty kuvassa 36. Helmi- ja maaliskuun loppuissa mitatut korkeat virtaamat, jotka ovat olleet korkeimmillaan noin 125 l/h ja 215 l/h, ovat seurausta lumen sulamisesta, sillä ulkolämpötila on noussut samanaikaisesti noin 7 °C:een.

Tarkkailujakson alussa pH on ollut 8,2, jonka jälkeen se on noussut sahaavasti toukokuun puoleen väliin saakka, jolloin se on ollut suurimmillaan 12,2 (kuva 36). Kuivatuskerroksesta purkautuneen veden pH-arvot ovat laskeneet, kun kaivoissa mitattu virtaama on noussut piikkiin. Vaihtelua pH-arvoissa on tapahtunut erityisesti lumien sulamisen aikaan, jolloin virtaama-arvot ovat olleet korkeita. Toukokuun puolenvälin jälkeen pH-arvot ovat laskeneet ensin kesäkuun puoliväliin asti 10,1:een, jonka jälkeen puolivuotiskalibroinnin seurauksena pH-arvot ovat pienentyneet seurantajakson lopun ajaksi 8,5:een. Kevään pH-arvot ovat todennäköisesti liian suuria, sillä kalibroinnin seurauksena arvot pienenevät huomattavasti (Kiirikki 2021a).

Sameus on ollut tarkkailujakson alussa 0,5 FNU:ta. Sameuden arvot pysyivät muutamia yksittäisiä piikkejä lukuun ottamatta melko tasaisina koko tarkkailujakson ajan. Suurim-

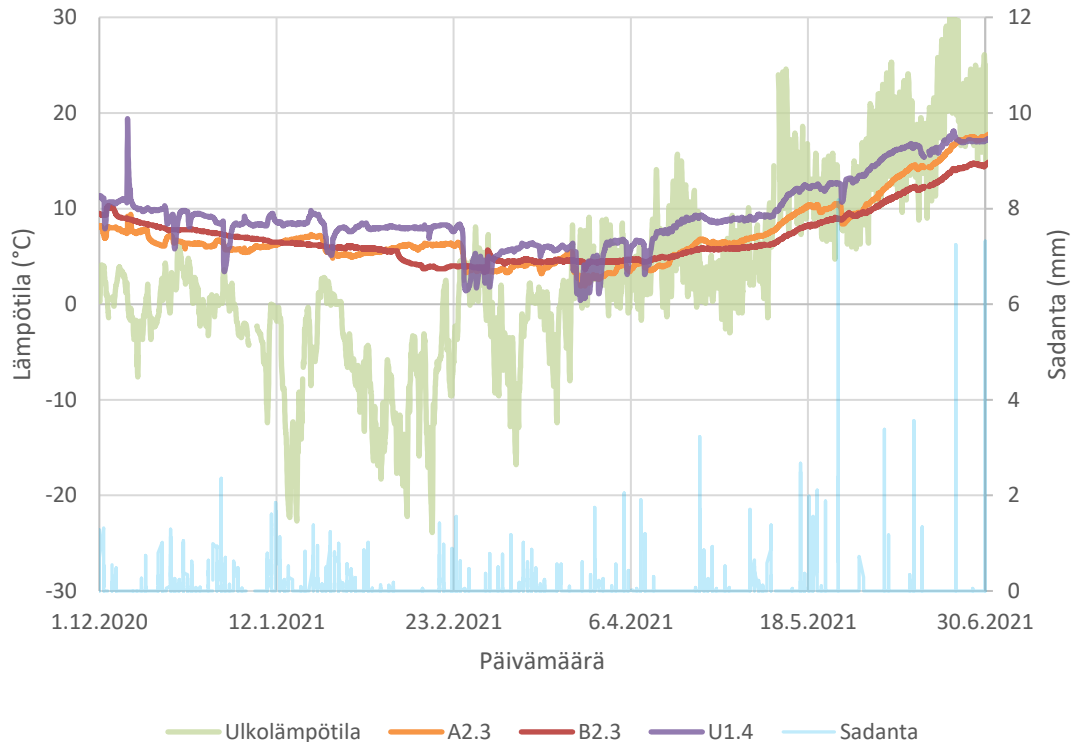
mat yksittäiset sameusarvot ovat mitattu 8.4.2021 ja 28.5.2021, jolloin tehtiin vesinäytteenotto ja kenttämittauksia. Muita sameuden arvoihin liittyviä trendejä ei ole kuvassa 36 havaittavissa. Kesäkuun epäjatkuvuuskohta sameudessa johtuu kalibroinnista.

Mitattu veden lämpötila on ollut tarkkailujakson alussa 11,3 °C. Alimmillaan lämpötila on ollut 0,4 °C 25.3.2021 ja korkeimmillaan 19,4°C 7.12.2021. Lumien sulaminen näkyy tuloksissa lämpötilan nopeana laskuna helmikuun ja maaliskuun lopussa. Vedenlämpötilan trendi on nouseva kesää kohti, mikä oletettavasti johtuu ulkolämpötilan ja rakenteiden lämpötilan nousemisesta.



**Kuva 36.** Koerakenteen U.1 kuivatuskerroksesta purkautuneen veden mittakaivosta instrumentoitu pH, sameus, veden lämpötila, virtaama sekä ulkolämpötila tarkkailujaksolla. Kuvassa ei näy korkeimpia virtaama- ja sameusarvoja kuvan tulokittavuuden takia.

Kuivatuskerrosten mittakaivojen vesistä koerakenteen U.1 eli bitumikuonarakenteen kuivatuskerroksesta purkautuneen veden lämpötila on pääsääntöisesti ollut korkein instrumentoitujen mittakaivojen vesistä (kuva 37). Veden lämpötilat laskevat lumien sulamisen yhteydessä, kun kylmää sulamisvettä suotautuu pintarakenteiden läpi helmi- ja maaliskuussa. Myös toukokuun rankkasade on laskenut veden lämpötilaa, mikä näkyy erityisesti mittakaivoissa A2.3 ja U1.4 (kuva 37).

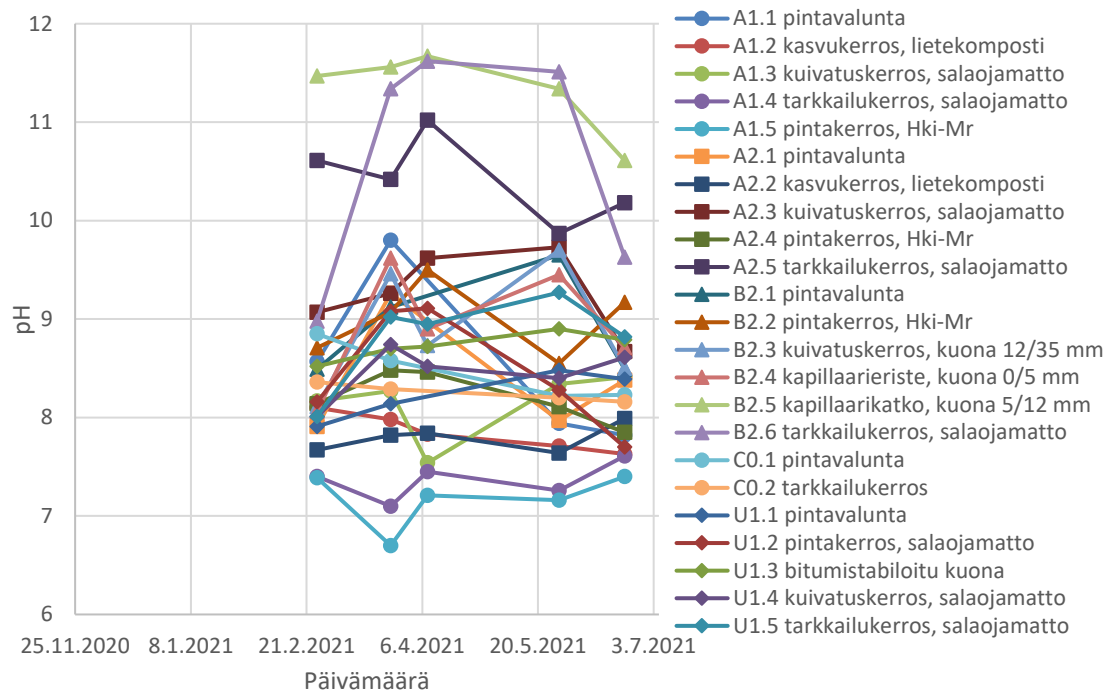


**Kuva 37.** Veden lämpötilat instrumentoiduissa kuivatuskerrosten mittakaivoissa sekä ulkolämpötila ja sadanta tarkkailujakson aikana.

### 5.3.2 Veden pH-tulokset

Tarkkailujakson aikana koerakenteista purkautuvien vesien laatua tutkittiin kenttämitta-reilla kuusi kertaa ja vesinäytteitä analysoitiin laboratoriossa kolme kertaa. Laboratoriotulosten tarkastelu on rajattu keskeisimpiin yhdisteisiin ja tiettyihin raskasmetalleihin. Kuvissa 38–54 on esitetty kenttämittausten ja laboratoriomääritysten tulokset. Kenttämitatut pH- ja sähkönjohtavuustulokset on esitetty yhtenäisinä viivoina ja laboratoriotulokset erillisinä, avoimina symboleina. Laboratoriossa mitatut kloridi-, sulfaatti- ja raskasmetallipitoisuudet on esitetty näytteenottohetkeä kuvaavina pistemäisinä arvoina, jotka on yhdistetty toisiinsa yhtenäisillä kuvaajilla.

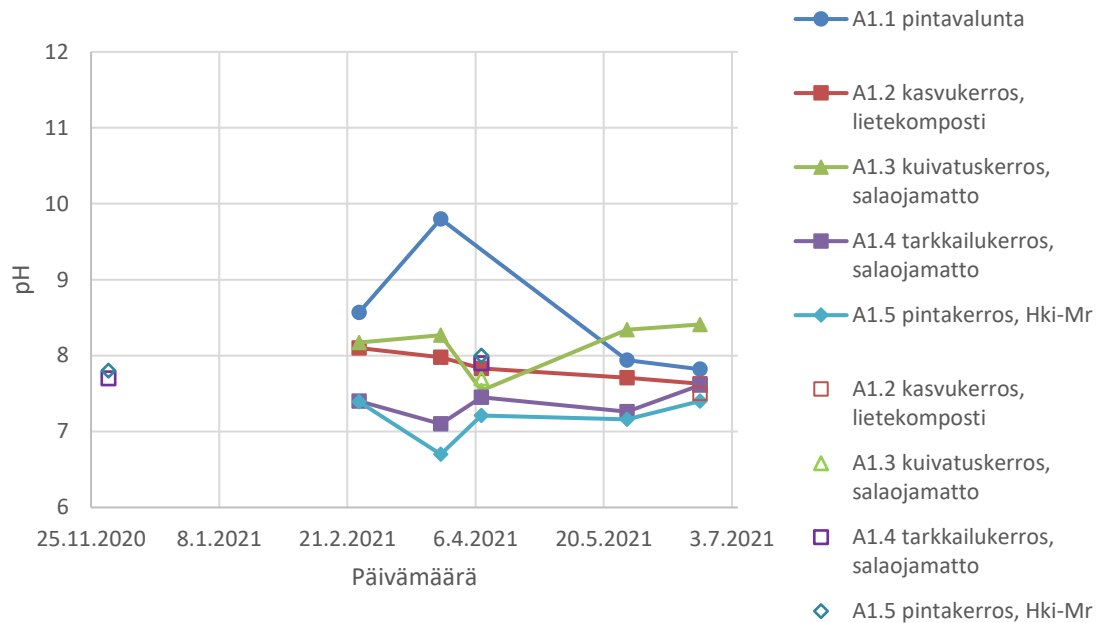
Tarkkailujakson aikaiset pH:n kenttä- ja laboratoriomittauksien tulokset on esitetty kuvissa 38–42. Kaikista mittakaivoista ei otettu vesinäytteitä tarkkailujakson aikana.



**Kuva 38.** Rakennekerroksista purkautuneiden vesien pH-kenttämittaustulokset tarkkailujaksolla.

Metallien kulkeutumisen kannalta pH on keskeinen olosuhdetekijä. Kaikkien mittakaivojen pH:n kenttämittaustuloksien perusteella tuloksissa on suurta ajallista vaihtelua sekä eroja koerakenteiden ja rakennekerrosten välillä (kuva 38). Kuvissa 39–42 on esitetty pH-tulokset koerakenteittain.

**Koerakenteesta A.1** purkautuvien vesien mitatut pH-arvot ovat pääsääntöisesti välillä 7,1–8,5 (kuva 39). Suurin yksittäinen mitattu pH-arvo on pintavalunnan 9,8 ja pienin on pintakerroksesta purkautuneen veden 6,7, jotka molemmat on mitattu maaliskuun kenttämittauksissa. Laboratoriossa analysoitujen näytteiden pH-arvot ovat huhtikuun vesinäytteenotossa hieman kenttämittauksien arvoja suurempia. Kesäkuun mittauksien perusteella koerakenteen A.1 rakennekerroksien vesien pH-arvot ovat välillä 7,5–8,5. Kenttämittausten tulokset ja vesinäytteiden laboratorioanalyysitulokset vastaavat hyvin toisiinsa.



**Kuva 39.** Koerakenteesta A.1 purkautuneiden vesien pH:n kenttä- ja laboratoriomittauksien tulokset tarkkailujaksolla. Taustatiedoksi kuvassa on myös joulukuun 2020 näytteenoton tulokset.

**Koerakenteen A.2** kuivatuskerroksesta purkautuneen veden joulukuussa 2020 laboratoriossa analysoitu pH on tutkittu ennen uuden umpikaivon A1.3 rakentamista, joten analysoitu vesinäyte on koostunut myös osittain koerakenteen A.1 kuivatuskerrokseen kerääntyneestä vedestä. Koerakenteiden kasvu- ja pintakerrokset on tehty samoista materiaaleista ja ne ovat yhtä paksuja, joten kuivatuskerroksesta purkautuvien vesien pitäisi olla laadultaan lähellä toisiaan.

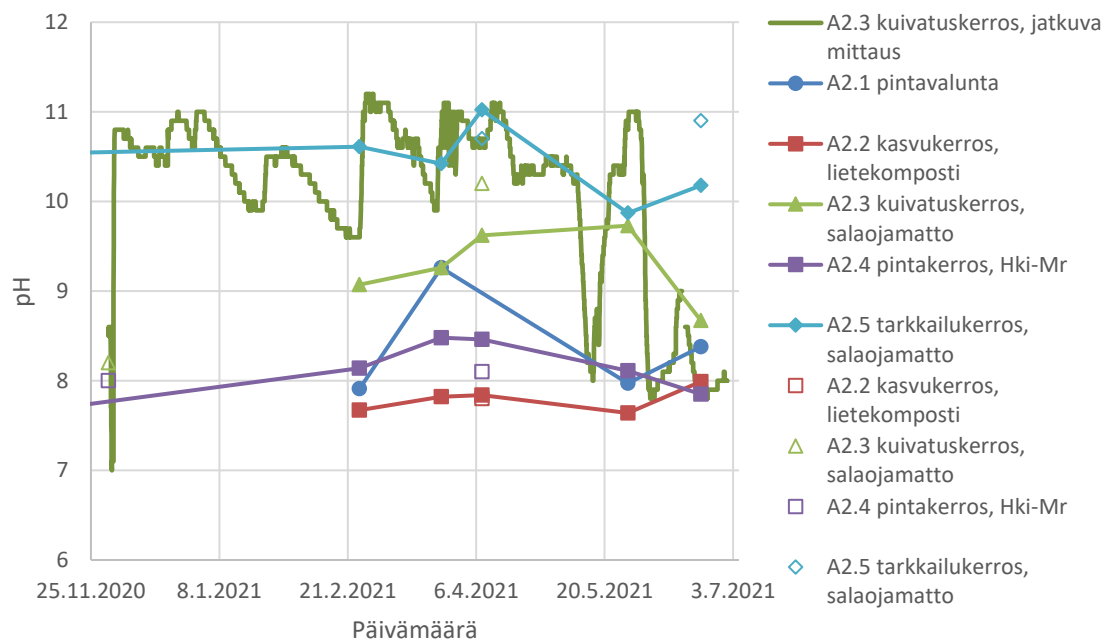
Suurin A.2 rakenteen vesien kenttämittauksissa mitattu pH-arvo on ollut noin 11, joka mitattiin 8.4.2021 tarkkailukerroksesta purkautuvien vesien mittakaivosta (kuva 40). Kasvu- ja pintakerroksen mittakaivoihin purkautuneiden vesien pH-arvot ovat pysyneet kenttämittaustuloksien perusteella melko tasaisina läpi seurantajakson.

Kasvukerroksesta purkautuneen veden pH-arvot ovat oletetusti osittain samankaltaisia kuin vastaavat tulokset koerakenteessa A.1 pintarakenteiden samankaltaisuuden takia. Pintakerroksien vesien pH-kenttämittausten tulokset ovat koerakenteessa A.2 olleet suurempia verrattuna koerakenteeseen A.1, mutta laboratoriomittauksissa arvot ovat olleet molemmissa melkein yhtä suuria. Koerakenteen A.2 kuivatuskerroksesta purkautuneiden vesien pH-arvot ovat selvästi koerakenteen A.1 kuivatuskerroksesta purkautuviin vesiin verrattuna suurempia. Korkeampi pH voi johtua koerakenteen A.2 tiivistyskerroksessa käytetystä kuonabentoniitista, joka on emäksistä. Kuonabentoniitista on voinut

kulkeutua pH:ta nostavia aineksia yläpuoliseen veteen. Yhtenä tekijänä voi olla myös pintakerroksen materiaalin eli Helsinki-moreenin laatuvaihtelu, kuten suurempi määrä betonia tai laastia.

Koerakenteen A.2 tarkkailukerroksesta purkautuvien vesien korkeat pH-arvot johtuvat todennäköisesti tiivistyskerroksen emäksisestä kuonabentoniitista. Pintavalunnan arvot ovat pääsääntöisesti olleet mittauksien perusteella noin 8, mutta maaliskuun mittauksissa pH oli vasten oletuksia noin 9,3. Myös A.1 rakenteessa pintavalunnan pH oli maaliskuussa korkeampi, joten selityksenä voi olla lumeen kertyneiden hiukkasten vaikutus.

Koerakenteen A.2 osalta kenttämittausten tuloksissa ja vesinäytteiden laboratorioanalyysituloksissa on jonkin verran eroa, sekä ylöspäin että alaspäin. Merkittävin ero on tarkkailukerroksen veden pH:ssa kesäkuussa, jolloin laboratorioanalyysin tulos on lähes 1 pH-arvon verran suurempi. Ero on tällöin ollut melkein kymmenenkertainen, koska pH-asteikko on logaritminen. Mitta-anturin ilmoittama pH-arvo on ollut pääsääntöisesti suurempi kuin kenttä- ja laboratoriomittaukset, mutta kalibrointi kesäkuussa ei vaikuttanut tulokseen kuin noin 0,5 yksikköä.

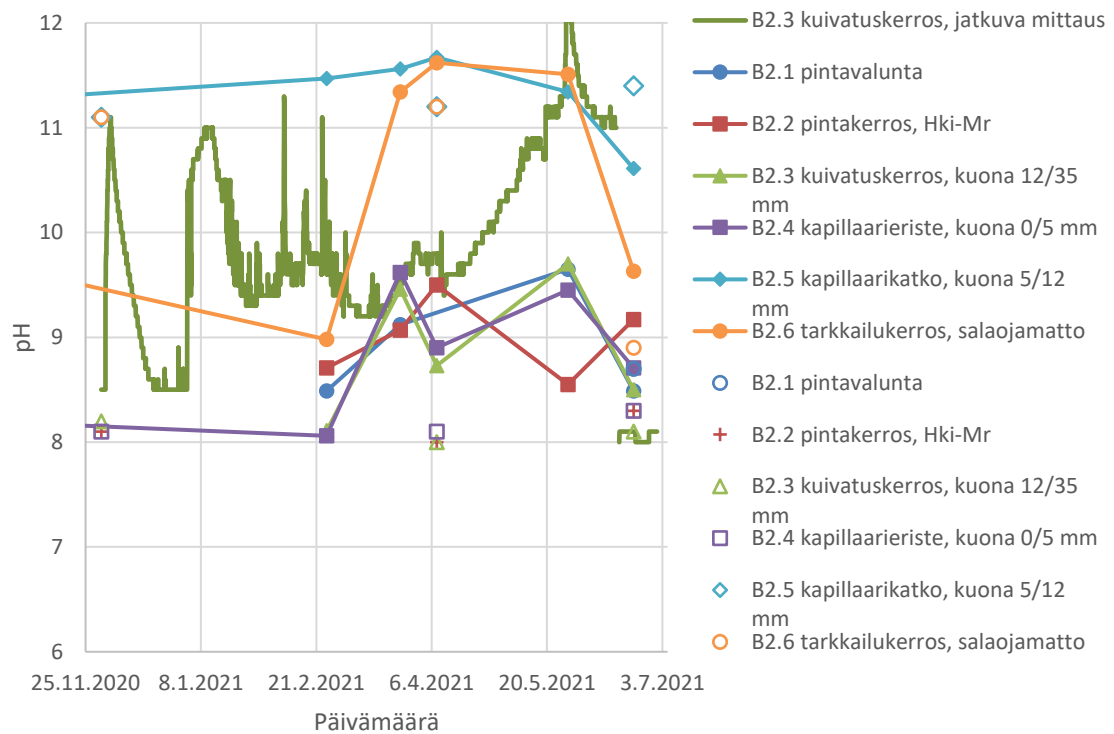


**Kuva 40.** Koerakenteesta A.2 purkautuvien vesien pH:n kenttä- ja laboratoriomittaukset sekä jatkuva mittaus mittakaivossa tarkkailujaksolla. Taustatiedoksi kuvassa on myös joulukuun 2020 näytteenoton tulokset.

**Koerakenteen B.2** kapillaarikatkokerroksesta purkautuvan veden (mittakaivo B2.5) pH-arvot ovat tarkkailujakson aikana selvästi muita korkeimpia, välillä 10,6–11,6 (kuva 41).

Myös tarkkailukerroksesta purkautuvan veden pH-arvot ovat kenttä- ja laboratoriomittauksien perusteella maaliskuusta toukokuuhun olleet yli 11. Korkea pH-arvo johtuu todennäköisesti veden suotautumisesta emäksisten kuonakerrosten läpi (taulukko 4).

Muista rakennekerroksista purkautuvien vesien pH-arvot ovat olleet myös emäksisiä, mutta kapillaarikatko- ja tarkkailukerrokseen verrattuna pienempiä. Ne ovat vaihdelleet välillä 8–9,6. Myös koerakenteen B.2 pH-tuloksissa on jonkin verran eroa kenttämittausten ja laboratoriomääritysten välillä. Laboratoriomääritysten tulokset ovat pääasiassa pienempiä 0,5–1 pH-arvoa. Mittakaivoon asennetun anturin mukainen pH on pääsääntöisesti suurempi kuin kenttä- ja laboratoriomitatut arvot. Huhtikuussa 2021 jatkuvan mittauksen mukaan pH oli suurimmillaan 1,8 yksikköä suurempi kuin laboratoriossa määritetty pH (kuva 41). Mitta-anturin ilmoittama pH-arvo laski huomattavasti kalibroinnin jälkeen kesäkuussa.



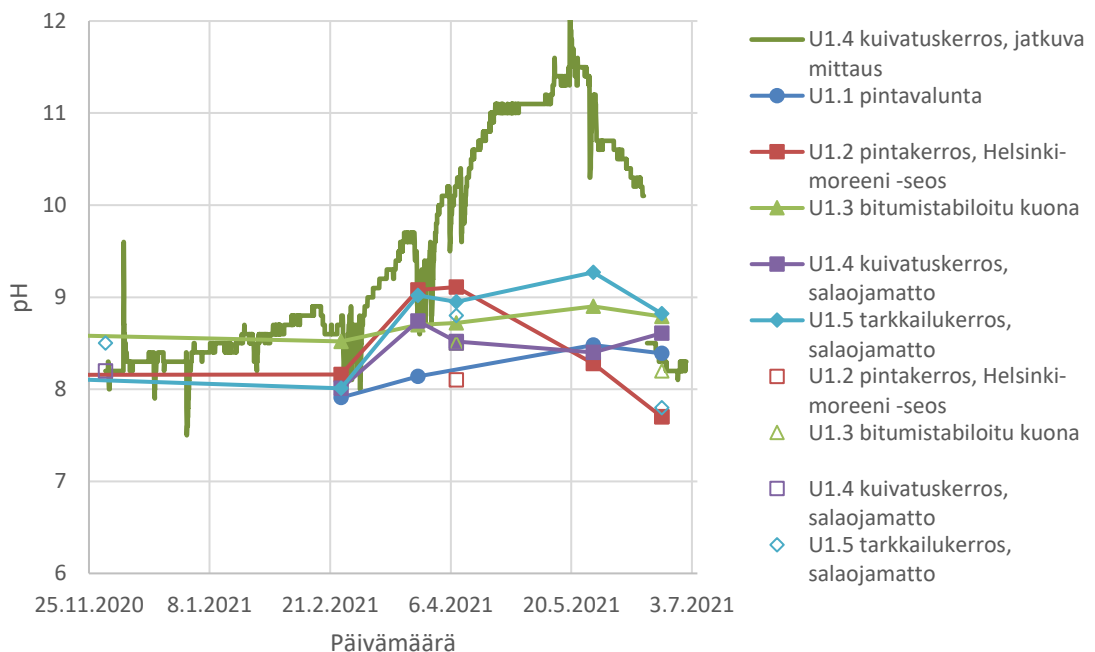
**Kuva 41.** Koerakenteesta B.2 purkautuvien vesien pH:n kenttä- ja laboratoriomittaukset ja jatkuva mittaus mittakaivossa tarkkailujaksolla. Taustatiedoksi kuvassa on myös joulukuun 2020 näytteenoton tulokset.

**Koerakenteen U.1** pH-tulokset poikkeavat muiden kuonaa sisältävien koerakenteiden tuloksista, sillä bitumikuonakerroksesta purkautuvien vesien pH-arvot ovat alle 9,5. Pintakerroksesta purkautuneen veden kenttämittarilla mitatut pH-arvot ovat korkeampia verrattuna muista kerroksista purkautuneisiin vesiin maalisi- ja huhtikuun kenttämittauksissa (kuva 42). Huhtikuussa laboratorioanalyysin perusteella pintakerroksen veden pH-arvo on ollut 8,1, mikä on pienempi kuin kenttämittarilla saatu arvo 9,0. Tarkkailukerrokseen



suotautuneen veden pH-arvot ovat oletetusti muiden kerroksien mitattuja arvoja suurempia, sillä vesi on suotautunut bitumistabiloidun kuonan läpi, jonka pH on emäksinen.

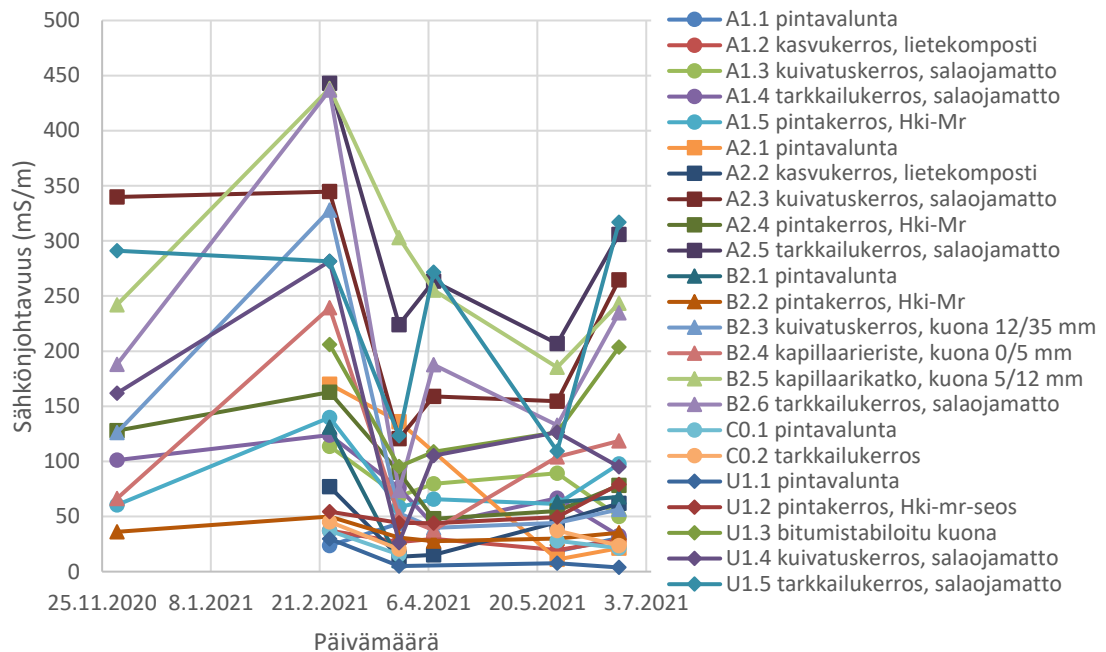
Koerakenteesta U.1 purkautuvien vesien pH-tuloksissa on jonkin verran eroa kenttämittausten ja laboratoriomääritysten välillä. Suurin ero, noin 1,5 yksikköä, on tarkkailukerroksesta purkautuvan veden pH-arvossa kesäkuussa. Mittausanturin ilmoittama pH on pääsääntöisesti suurempi kuin kenttä- ja laboratoriomitatut pH. Ero on toukokuussa ollut yli 2 yksikköä (eli noin 100-kertainen, koska pH-asteikko on logaritminen) kenttämittarilla mitatun ja mitta-anturin tuloksen välillä (kuva 42).



**Kuva 42.** Koerakenteesta U.1 johdettujen vesien pH:n kenttä- ja laboratoriomittaukset ja jatkuva mittaus tarkkailujaksolla 1.12.2020–30.6.2021. Taustatiedoksi kuvassa on myös joulukuun 2020 näytteenoton tulokset.

### 5.3.3 Veden sähkönjohtavuus

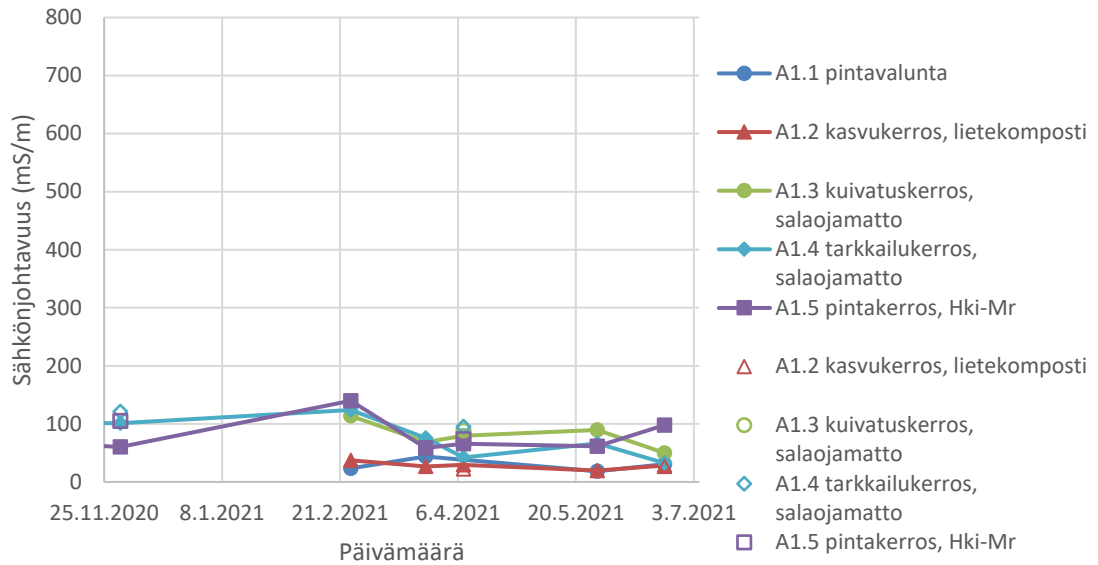
Tarkkailujakson aikaisten sähkönjohtavuuskenttämittauksien tulokset kaikista koerakenteiden mittakaivoista on esitetty kuvassa 43. Yleisesti tuloksien perusteella johtokyvyssä on helmikuusta maaliskuuhun tapahtunut selvä pudotus. Tämä on todennäköisesti seurausta lumien sulamisesta aiheutuvista virtaamien kasvuista, jolloin rakenteista purkautunut vesi on ollut laimeampaa ja johtokyky näin ollen pienempää. Useimmissa mittakajoissa laskua on edeltänyt sähkönjohtavuuden kasvu mittauksen välillä marraskuusta helmikuuhun. Virtaamamäärien pienentyessä johtokykytulokset pääsääntöisesti lähtevät kesäkuun kenttämittausten perusteella nousuun tarkkailujakson lopulla (Kuva 43).



**Kuva 43.** Koerakenteiden rakennekerroksista johdettujen vesien sähkönjohtavuuden kenttä- ja laboratoriomittaukset tarkkailujaksolla 1.12.2020–30.6.2021.

Sähkönjohtavuus kuvaa liuenneiden suolojen määrää ja se korreloi kloridipitoisuuden kanssa. Kuvissa 44–47 on esitetty sähkönjohtavuustulokset koerakenteittain.

Mittaustuloksien perusteella **koerakenteessa A.1** pintavalunnan ja kasvukerroksesta purkautuneen veden sähkönjohtavuudet ovat olleet tarkkailujaksolla pienempiä ja vaihdelleet vähemmän verrattuna koerakenteen muista rakennekerroksista purkautuviin vesiin (kuva 44). Pintakerroksesta purkautuneen veden sähkönjohtavuus on kenttämittauksien perusteella ollut suurempi kuin tarkkailukerroksesta purkautuneen veden helmi-, huhti- ja kesäkuun mittauksissa. Huhtikuun laboratoriomittauksessa tarkkailukerroksesta purkautuneen veden sähkönjohtavuus on ollut suurempi. Kasvukerroksesta purkautuvan veden sähkönjohtavuus oli kevään 2021 aikana noin 20–25 mS/m. Yleisesti koerakenteesta A.1 purkautuneiden vesien mitatut sähkönjohtavuudet ovat olleet pieniä muihin pintakoerakenteisiin verrattuna, sillä kaikki mitatut sähkönjohtavuudet ovat alle 150 mS/m. Kenttä- ja laboratoriomittaus vastaavat hyvin toisiaan.



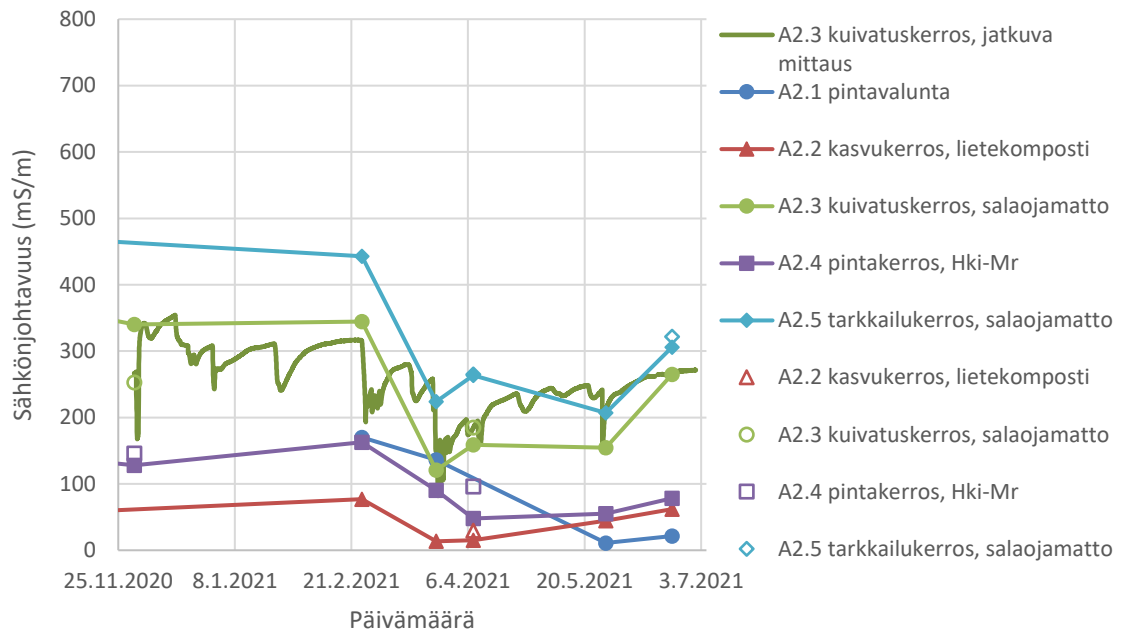
**Kuva 44.** Koerakenteesta A.1 purkautuneiden vesien sähkönjohtavuuden kenttä- ja laboriomiittaustulokset tarkkailujaksolla.

**Koerakenteesta A.2** purkautuvien vesien mittaustuloksien perusteella vesien sähkönjohtavuudet ovat laskeneet helmikuun kenttämittauksien jälkeen virtaaman noustessa lumien sulaessa ja taas nousseet hieman kesäkuussa (kuva 45). Tarkkailu- ja kuivatuskerroksista purkautuneiden vesien sähkönjohtavuudet ovat mittaustuloksien perusteella olleet korkeimmat. Kyseisistä kerroksista purkautuvien vesien sähkönjohtavuuksiin ovat todennäköisesti vaikuttaneet tiivistyskerroksen kuonabentoniitti, josta liuenneet suolat ovat oletettavasti nostaneet veden sähkönjohtavuutta tiivistyskerroksen alapuolisessa kerroksessa. Suoloja on ilmeisesti kulkeutunut myös kuonabentoniitin yläpuoliseen kuivatuskerrokseen, mikä näkyy kuivatuskerroksen veden kohonneena sähkönjohtavuutena koerakenteeseen A.1 verrattuna. Myös pintakerroksen sähkönjohtavuus on suurempi kuin koerakenteessa A.1, mikä voi johtua rakenteen alapäädyn tulvimisesta ennen syksyllä 2020 tehtyjä korjaustoimenpiteitä tai Helsinki-moreenin laatuvaihtelusta. Yksi mahdollinen selitys on myös suolojen kulkeutuminen kuonakerroksesta diffuusion kautta ohuen salaojamaton läpi.

Pintavalunnan sähkönjohtavuus on ollut helmi- ja maaliskuun kenttämittauksissa myös korkeampi kuin koerakenteessa A.1, mutta se on myöhempien mittaustuloksien perusteella tasaantunut pienempiin arvoihin (noin tasolle 10–20 mS/m). Kasvukerroksen sähkönjohtavuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin koerakenteessa A.1.

Kenttä- ja laboriomiittausten välillä on pientä eroa. Laboratoriossa vesinäytteestä määritetty sähkönjohtavuus on pääsääntöisesti hieman suurempi, mutta kuivatuskerroksen vesistä joulukuussa 2020 otetussa näytteessä saatiin laboratoriossa lähes 100

mS/m pienempi sähkönjohtavuus. Jatkuvatoimisen mitta-anturin mittaama sähkönjohtavuus on pääsääntöisesti linjassa kenttä- ja laboratoriomitatus pH:n kanssa. Suurimmillaan ero on ollut joulukuussa, jolloin kenttämitattu sähkönjohtavuus on ollut noin 70 mS/m suurempi.

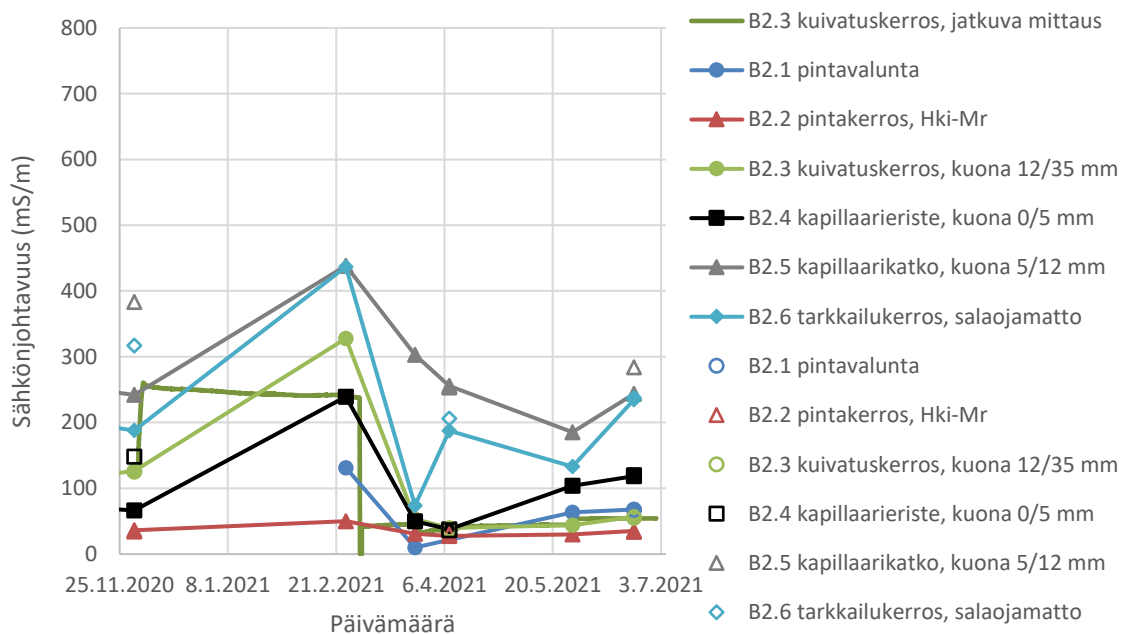


**Kuva 45.** Koerakenteesta A.2 purkautuneiden vesien sähkönjohtavuuden kenttä- ja laboratoriomittauksien tulokset sekä jatkuvan mittauksen tulokset kaivossa A2.3 tarkkailujaksolla.

**Koerakenteesta B.2** purkautuvien vesien sähkönjohtavuusmittauksien perusteella kaikista rakennekerroksista purkautuneiden vesien sähkönjohtavuudet ovat ensin nousseet syksyn ja alkutalven aikana. Ne ovat olleet korkeimmillaan helmikuussa, laskeneet kevään aikana suunnilleen samalle tasolle kuin edellisenä syksynä ja kesän aikana taas lievästi nousseet (kuva 46). Sähkönjohtavuuden vaihtelu on pienintä, noin 30–50 mS/m, pintakerroksen vedessä ja suurinta, noin 70–440 mS/m, tarkkailukerroksesta purkautuvissa vesissä. B.2 rakenteen pintakerroksesta purkautuvien vesien sähkönjohtavuus on hieman pienempi kuin samasta materiaalista rakennettujen A.1 ja A.2 pintarakenteissa. Tarkkailukerroksesta ja kapillaarikatkokerroksesta purkautuneiden vesien sähkönjohtavuudet ovat muihin purkautuviin vesiin verrattuna suurempia seurantajaksolla. Jätteenpolton kuonasta liukenevat suolat ovat nostaneet suotautuvien vesien sähkönjohtavuutta. Tulosten perusteella kuivatuskerroksessa käytetystä karkeasta jätteenpolton kuonasta liukenee liukoisuusteorian mukaisesti vähemmän sähkönjohtavuuteen vaikuttavia suoloja verrattuna hienorakeisempaan keskikarkeaan jätteenpolton kuonaan. Hie-

norakeisinta kuonasta purkautuvan veden sähkönjohtavuus on ollut pienempi kuin karkeammista kuonista purkautuneen veden. Pintavaluntavesien sähkönjohtavuudessa on nähtävissä samanlainen nousu helmikuun kenttämittauksissa.

Kenttä- ja laboratoriomittausten tulosten välillä on jonkin verran eroja. Laboratoriossa vesinäytteestä määritetty sähkönjohtavuus on pääsääntöisesti hieman suurempi. Ero on suurimmillaan joulukuussa 2020 otetuissa näytteissä, jolloin kapillaarikatkerroksen veden sähkönjohtavuudessa on eroa jopa 141 mS/m. Jatkuvatoimisilla antureilla mitattu sähkönjohtavuus on pääsääntöisesti samaa suuruusluokkaa kuin kenttämittarin ja laboratorioanalyysien tulokset. Suurimmillaan ero jatkuvatoimiseen mittaukseen verrattuna on helmikuun mittauskerralla.

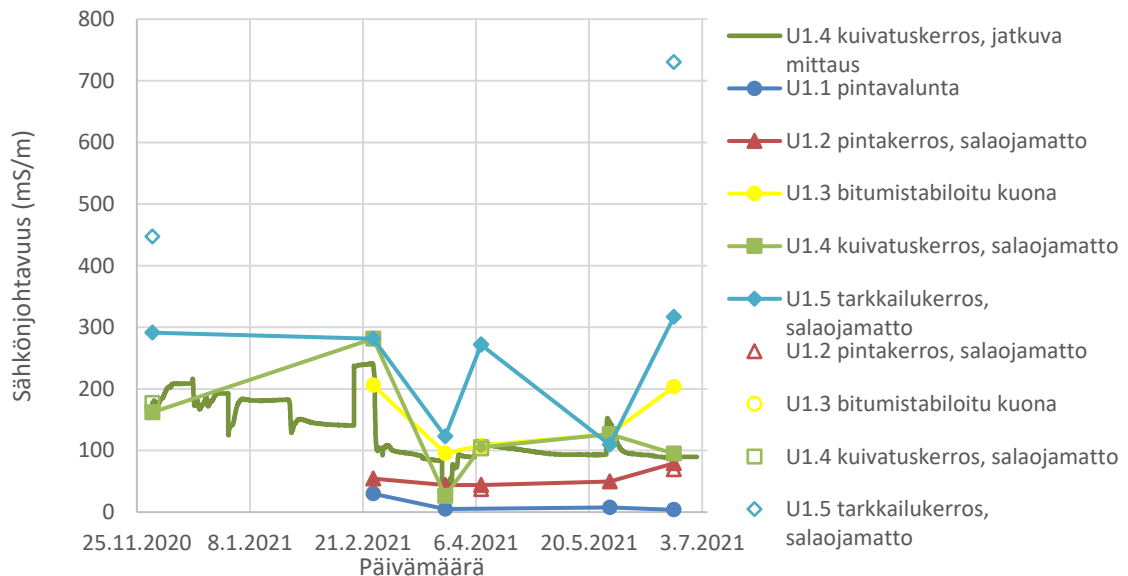


**Kuva 46.** Koerakenteesta B.2 purkautuneiden vesien sähkönjohtavuuksien kenttä- ja laboratoriomittauksien tulokset sekä jatkuvan mittauksen tulokset kaivossa B2.3 tarkkailujaksolla.

**Koerakenteen U.1** vesien mittaustuloksien perusteella tarkkailukerroksesta purkautuneen veden (mittakaivo U1.5) sähkönjohtavuus on ollut seurantajaksolla korkeimmalla tasolla (kuva 47). Myös kuivatuskerroksesta purkautuvien vesien sähkönjohtavuus on ollut pääosin yli 100 mS/m tarkkailujakson aikana. Sähkönjohtavuustulosten suuruuteen on todennäköisesti vaikuttanut bitumistabiloidusta kuonasta lienneet suolat. Kuonan vaikutus näkyy myös yläpuolisen kuivatuskerroksen sähkönjohtavuudessa etenkin talvella, sillä tulosten perusteella pintakerroksesta purkautuvien vesien sähkönjohtavuus on pieni eikä siten selitä kuivatuskerroksesta purkautuvien vesien korkeita sähkönjohtavuusarvoja.

Jatkuvatoimisella mitta-anturilla mitattu sähkönjohtavuus on pääsääntöisesti linjassa kenttä- ja laboratoriomittattujen arvojen kanssa. Laboratorio- ja kenttämittausten tuloksissa on tarkkailukerroksen mittakaivon tuloksissa merkittävä ero kesäkuun mittauksissa: kenttämittauksen mukaan sähkönjohtavuus on 317 mS/m ja vesinäytteestä tehdyn laboratoriomäärityksen mukaan 730 mS/m. Myös joulukuussa tehdyssä rinnakkaisessa määrittäyksessä oli suuri ero, sillä kenttämittarilla saatiin tulokseksi 291 mS/m ja laboratoriossa 447 mS/m. Pintavaluntavesien sähkönjohtavuus on pienin, alle 55 mS/m, ja se laskee kevään ja kesän aikana. Pintakerroksesta purkautuneen veden sähkönjohtavuus on pysynyt melko tasaisesti alle 70 mS:ssä/m koko seurantajakson ajan. Pintakerroksesta purkautuneen veden sähkönjohtavuus on pääosin melkein samaa suuruusluokkaa kuin koerakenteen A.2 kasvukerroksesta purkautuneella vedellä.

Kesäkuussa tiivistyskerroksesta purkautuvasta vedestä (U1.3) laboratoriossa määritetty sähkönjohtavuus on laboratoriotuloksen perusteella ollut alle määrittäysrajan. Tämä tulos on todennäköisesti virheellinen, sillä saman vesinäytteen kloridi- ja sulfaattipitoisuudet ovat selvästi kohonneita, jolloin sähkönjohtavuudenkin pitäisi ylittää selvästi määrittäysraja.



**Kuva 47.** Koerakenteesta U.1 purkautuneiden vesien sähkönjohtavuuksien kenttä- ja laboratoriomittauksien tulokset sekä jatkuvan mittauksen tulokset kaivossa U1.4 tarkkailujaksolla.

### 5.3.4 Veden kloridipitoisuus

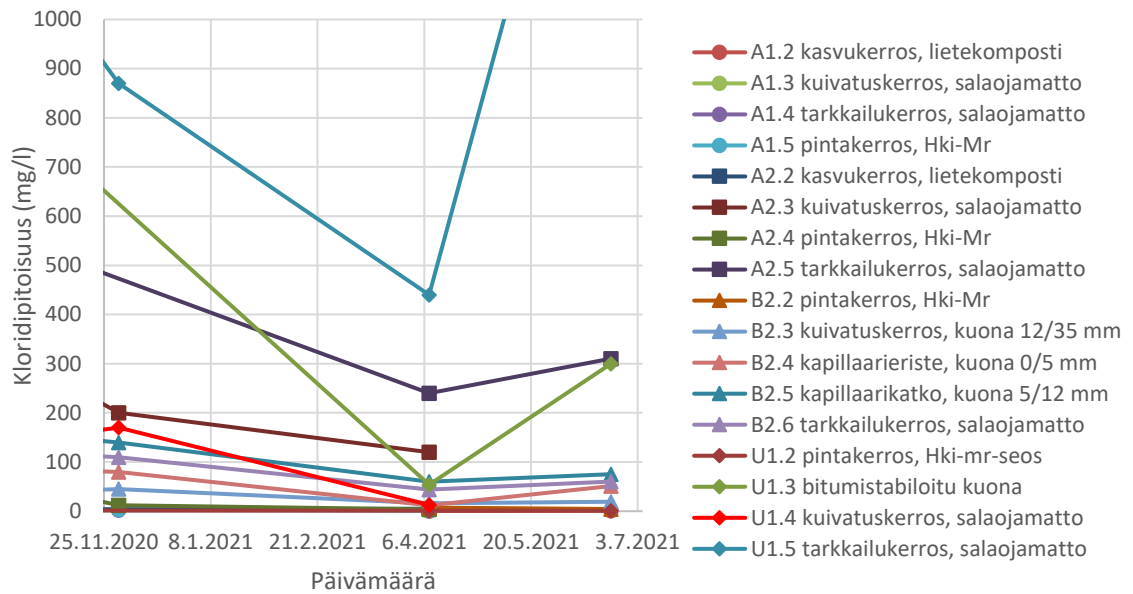
Koerakenteiden rakennekerroksista purkautuneiden vesien laboratoriossa vesinäytteistä määritetyt kloridipitoisuudet on esitetty kuvassa 48. Suurin osa tarkkailujaksolla mitatuista kloridipitoisuuksista on pienimmillään huhtikuussa, jolloin todennäköisesti korkeimmat virtaamat ovat laimentaneet pitoisuuksia. Tarkkailukerroksen U1.5 vesinäytteen kesäkuun vesinäytteen laboratoriotulos, 1800 mg/l, on rajattu kuvan ulkopuolelle muiden tulosten luettavuuden takia.

Laboratoriotulosten perusteella tarkkailukerroksesta U1.5 purkautuneen veden kloridipitoisuus on selvästi suurin verrattuna muihin tutkittuihin vesinäytteisiin tarkkailujaksolla (kuva 48). Tähän on todennäköisesti vaikuttanut tarkkailukerroksen yläpuolella olevan tiivistyskerroksen bitumistabiloitu kuona, jonka sisältämästä jätteenpolton kuonasta voi liueta kloridia veteen. Tulosten perusteella suurin osa korkeimmista kloridipitoisuuksista on mitattu vesinäytteistä, jotka ovat purkautuneet jätteenpolton kuonaa sisältävistä rakennekerroksista tai niiden alapuolisista kerroksista. Tällaisia vesiä on esimerkiksi mitattakäivissä A2.5, B2.3-B2.6 ja U1.3 ja U1.5. Pinta- ja kasvukerroksista purkautuvien vesien kloridipitoisuudet ovat alle 15 mg/l (kuva 48).

Erilaisia jätteenpolton kuonan raekokolajitteita sisältävässä koerakenteessa B.2 liuenneet kloridipitoisuudet ovat olleet suurempia hienorakeisemman kuonan alapuolisesta tarkkailukerroksesta purkautuvassa vedessä (mittakaivot B2.5 ja B2.6) kuin karkearakeisimmassa kuonaa sisältävästä rakennekerroksesta purkautuvassa vedessä ja sen alapuolisissa vesissä (B2.3 ja B2.4). Liukenemiseen vaikuttaa luvussa 3.1.2. kuvattujen olosuhteiden lisäksi muun muassa alkupitoisuus, erityisesti liukenevan aineen määrä, vedenläpäisevyys, joka on karkearakeisilla suurempi ja siten läpivirtaava vesi kulkee nopeammin kerroksen läpi, ja rakeiden tarjoama reaktiopinta-ala, joka on hienorakeisilla yleensä suurempi. Rakenteissa käytetyt sideaineet, bentoniitti ja bitumi, vaikuttavat hienorakeisen kuonan ominaisuuksiin. Liukoisuustesti tulosten perusteella Vantaan jätteenpolttolaitoksen käsittelystä jätteenpolton pohjakuonasta liukenevan kloridimäärä vaihtelee minimi- ja maksimiarvot ovat 947–4841 mg/kg L/S-suhteella 10 (taulukko 4). Kapillaarisulkurakenteessa käytetystä keskikarkeasta kuonasta purkautuvan veden kloridipitoisuus on suuruusluokaltaan noin 20–100 mg/l suurempi kuin karkearakeisesta ja hienorakeisesta kuonasta liukenevat pitoisuudet.

Vaikutuksen arvioimiseksi vesien pitoisuuksia voidaan verrata talousveden laatuvaatimuksiin (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 1352/2015). Kloridin laatuvaatimus talousvedessä on enintään 250 mg/l ja vesijohtomateriaalien syöpyäminen ehkäisemiseksi enintään 25 mg/l (STMa 1352/2015).

Laatutavoite 250 mg/l alittuu suurimmassa osassa purkautuvissa vesissä. Tarkkailukerroksesta U.1 purkautuvan veden lisäksi vain A.2 tarkkailukerroksesta ja U.1 tiivistyskerroksesta purkautuvien vesien kloridipitoisuudet ylittävät laatutavoitteet kesäkuun näytteenottokierroksella. Näissä kaivoissa on havaittu ennen tarkkailujaksoakin talousveden laatuvaatimuksen ylittäviä kloridipitoisuuksia.



**Kuva 48.** Koerakenteista purkautuneiden vesien kloridipitoisuudet mittakaivoista otettujen vesinäytteiden laboratorioanalyysien perusteella tarkkailujaksolla. Kuvasta on rajattu U1.5:n tulos 22.6.2021 1800 mg/l.

### 5.3.5 Veden sulfaattipitoisuus

Laboratoriossa vesinäytteistä mitattujen sulfaattipitoisuuksien perusteella myös sulfaattia on eniten jätteenpolton kuonaa sisältävistä kerroksista purkautuneista (mittakaivo B2.5) tai kuonakerroksen alapuolisista tarkkailukerroksista (mittakaivot U1.5, B2.6 ja A2.5) purkautuvissa vesissä (kuva 49). Tuloksien perusteella sulfaatteja on koerakenteessa A.2 kulkeutunut myös kuonabentoniittikerroksen yläpuolelle, sillä sen yläpuolisen kuivatuskerroksen veden sulfaattipitoisuustulokset ovat 670 ja 490 mg/l, ja Helsinki-moreenista purkautuvien vesien sulfaattipitoisuus on tyypillisesti pienempi. Mitatut korkeat sulfaattipitoisuudet ovat todennäköisesti seurausta pohjakuonasta liuenneesta sulfaateista. Tuloksien perusteella myös sulfaatin liukenemiseen on vaikuttanut jätteenpolton kuonan raekoko. Karkearakeisinta kuonaa sisältävästä kuivatuskerroksesta purkautuneiden vesien sulfaattipitoisuudet ovat pääsääntöisesti pienempiä kuin hienorakeisem-

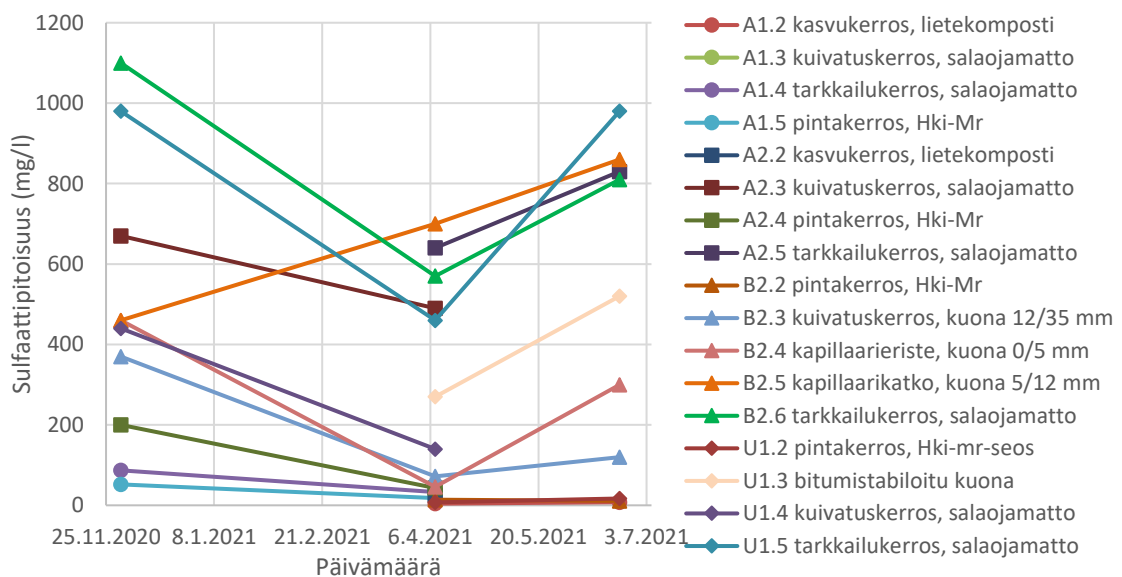


mista kuonista purkautuneiden vesien pitoisuudet. Liukoisuuskokeiden tulosten perusteella Vantaan jätteenpolttolaitoksen käsitellystä jätteenpolton pohjakuonasta liukeneva sulfaattimäärä vaihtelee 1883–5007 mg/kg L/S-suhteella 10 (taulukko 4).

Melkein kaikkien tutkittujen vesinäytteiden sulfaattipitoisuudet ovat laskeneet joulukuusta 2020 huhtikuuhun 2021 ja nousseet huhtikuusta kesäkuuhun. Lasku johtuu todennäköisesti kevään suuremmasta virtaamasta, jolloin vesi on laimeampaa ja pitoisuudet pienempiä. Kapillaarikatkokerroksesta (B2.5) purkautuvan veden tulokset poikkeavat tästä trendistä: sen sulfaattipitoisuus lähes kaksinkertaistuu tarkkailujakson aikana joulukuun 2020 460 mg:sta/l kesäkuun 2021 860 mg:aan/l.

Kasvu- ja pintakerrosten vesien sulfaattipitoisuudet ovat pääsääntöisesti suuruusluokaltaan alle 50 mg/l. Koerakenteen A.2 pintakerroksen (A2.4) sulfaattipitoisuus oli 200 mg/l, mikä poikkeaa muista pinta- ja kasvukerroksen tuloksista. Selityksenä saattaa olla kulkeutuminen alapuolisesta kuonakerroksesta.

Vaikutusten arvioimiseksi vesien pitoisuuksia voidaan verrata talousveden laatuvaatimuksiin (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 1352/2015). Sulfaatin laatuvaatimus talousvedessä on alle 250 mg/l (STMa 1352/2015). Tämä ylittyy tarkkailukerrosien (B2.6, U1.5, A2.5), kapillaarikatkokerroksen (B2.5), tiivistyskerroksen (U1.3) ja kuivatuskerroksen (A2.3) vesissä kaikissa tuloksissa. Lisäksi kuivatuskerroksen (B2.3, U1.4) vesissä suositus ylittyy kertaalleen ja kapillaarieristeen vedessä (B2.4) kahdesti. Vesijohtomateriaalien syöpymisen ehkäisemiseksi sulfaattipitoisuuden tulisi talousvedessä olla alle 150 mg/l (STMa 1352/2015).



**Kuva 49.** Koerakenteista purkautuneiden vesien sulfaattipitoisuudet mittakaivoista otettujen vesinäytteiden laboratorioanalyysien perusteella tarkkailujaksolla.

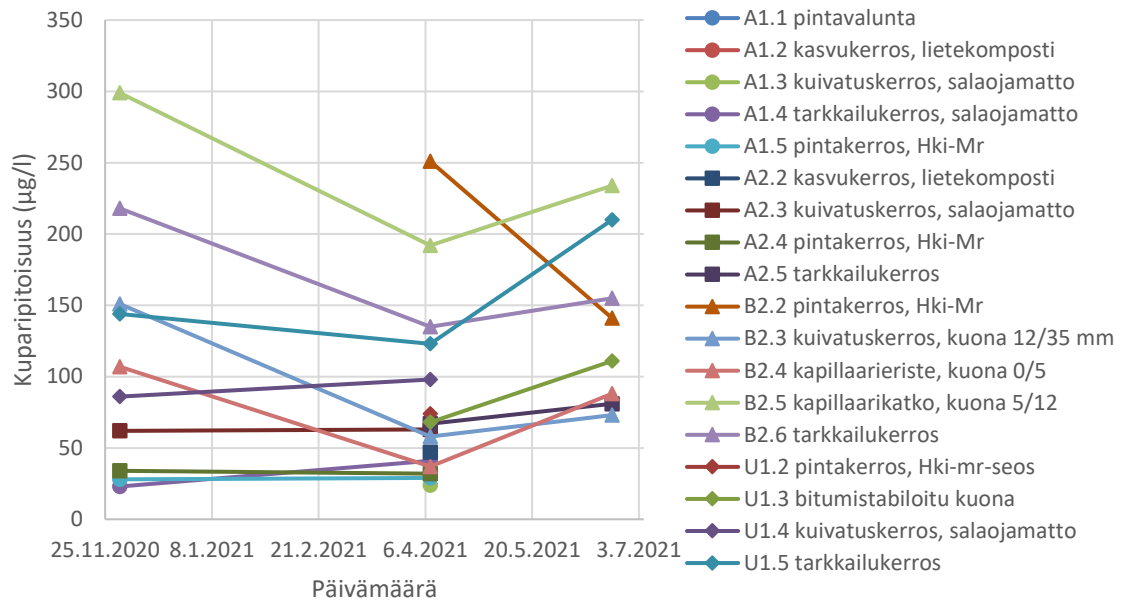
### 5.3.6 Veden metallipitoisuudet

Vesistä tutkittiin arseeni-, barium-, kadmium-, kromi-, kupari-, nikkeli-, lyijy-, vanadiini-, sinkki-, antimoni-, alumiini-, kalsium-, rauta-, magnesium-, mangaani-, molybdeeni-, seleeni- ja elohopeapitoisuuksia. Tässä tarkastelussa on keskitytty kuonan hyötykäyttöä rajoittaviin metalleihin sekä kalsiuminiin ja magnesiumiin, joiden liukoisuus on suurinta.

Vesinäytteiden laboratoriomittauksien perusteella korkeimmat **kuparipitoisuudet** ovat pääsääntöisesti koerakenteen B.2 kapillaarikatkosta ja tarkkailukerroksesta sekä koerakenteen U.1 tarkkailukerroksesta purkautuneissa vesissä (kuva 50). Kyseisistä kerroksista purkautuneiden vesien kuparipitoisuuksiin on todennäköisesti vaikuttanut jätteenpolton pohjakuonan kuparipitoisuudet, sillä molempien tarkkailukerroksien yläpuolella on jätteenpolton kuonaa sisältävät kerrokset ja kapillaarikatkoerros on tehty keski- karkeasta jätteenpolton kuonasta.

Koerakenteen B.2 pintakerroksesta purkautuneen veden (B2.2) kuparipitoisuus on yllättäen ollut suurin huhtikuun vesinäytteenotossa (251 µg/l) ja neljänneksi suurin kesäkuun vesinäytteenotossa (141 µg/l). Tämä on voinut johtua Helsinki-moreenin sisältämästä mineraalisesta rakennusjätteestä tai maa-aineksesta liukenevasta kuparista. Muiden vesinäytteiden pitoisuustrendeistä poiketen kyseisestä pintakerroksesta purkautuneen veden kuparipitoisuus on ollut huhtikuussa korkeampi kuin kesäkuussa. Muiden kasvu- ja pintakerrosten vesien kuparipitoisuudet ovat olleet suuruusluokaltaan noin 30–80 µg/l.

Liukoisuuskokeiden tulosten perusteella Vantaan jätteenpolttolaitoksen käsitellystä jätteenpolton pohjakuonasta liukeneva kuparimäärä vaihtelee välillä 0,18–1,79 mg/kg L/S-suhteella 10 liukoisuustestattuna (taulukko 4). Kuparin enimmäisarvo talousvedessä on 2000 µg/l (STMa 1352/2015). Kaikkien tutkittujen vesinäytteiden kuparipitoisuudet alittavat tämän enimmäispitoisuuden.

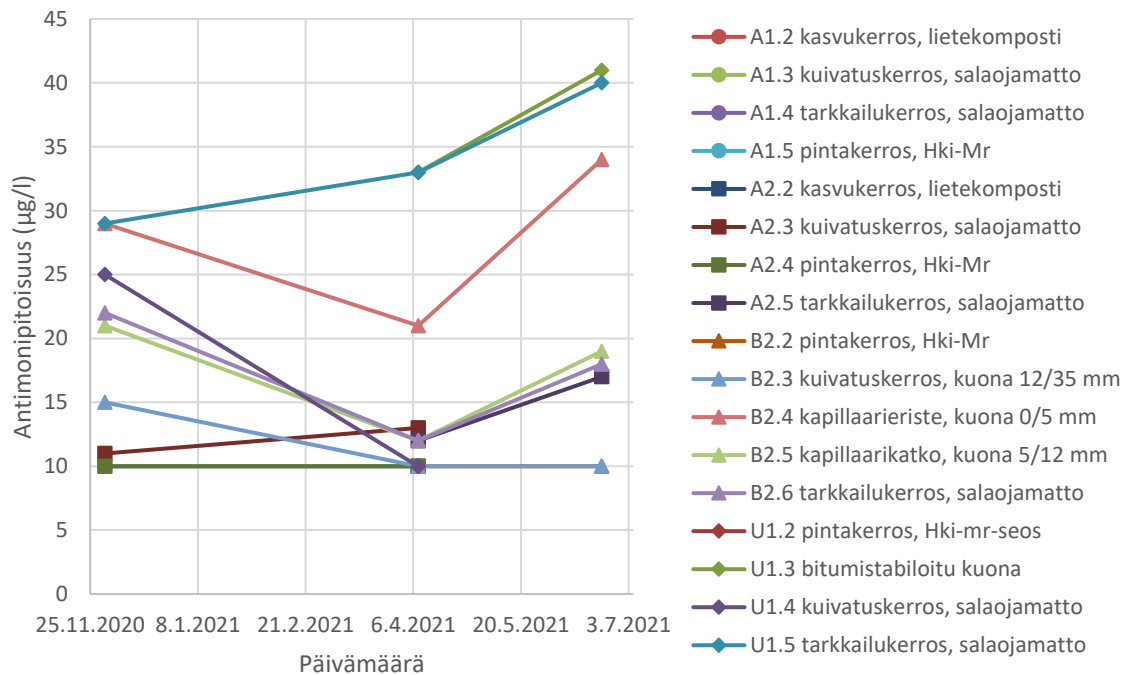


**Kuva 50.** Koerakenteista purkautuneiden vesien kuparipitoisuudet mittakaivoista otettujen vesinäytteiden laboratorioanalyysien perusteella tarkkailujaksolla.

Koerakenteiden rakennekerroksista purkautuneiden vesien laboratoriossa määritetyt **antimonipitoisuudet** on esitetty kuvassa 51. Antimonin laboratoriomittauksen määrittäjärajana (10 µg/l) alittavat pitoisuudet on esitetty kuvassa arvoina 10 µg/l. Laboratoriomittauksien perusteella seurantajakson suurimmat antimonipitoisuudet on havaittu koerakenteen U.1 tarkkailukerroksesta ja tiivistyskerroksesta eli bitumistabiloidusta kuonasta purkautuneissa vesissä. Kyseisten vesien antimonipitoisuuksiin on todennäköisesti vaikuttanut tiivistyskerroksessa käytetty bitumistabiloitu jätteenpolton kuona, sillä mittakaivoon U1.3 johdetaan tiivistyskerroksesta purkautuneet vedet ja tarkkailukerrokseen on suodatun bitumistabiloidun kuonan läpäisseet vedet. Tulosten perusteella keväällä, ylivirtaamakautena pitoisuudet ovat usein pienempiä. Kolmannella näytteenotokerralla kesäkuussa otettujen näytteiden antimonipitoisuudet ovat näiden kaivojen vesinäytteissä suurempia kuin joulukuussa otetuissa vesinäytteissä todetut pitoisuudet. Pinta- ja kasvukerrostien tutkittujen vesinäytteiden antimonipitoisuudet ovat alle määrittäjärajan.

Liukoisuustestien tulosten perusteella Vantaan jätteenpolttolaitoksen käsittelystä jätteenpolton pohjakuonasta liukenevan antimonimäärä vaihtelee 0,12–0,63 mg/kg L/S-suhteella 10 (taulukko 4).

Talovesien laatuvaatimus on antimonipitoisuudelle 5 µg/l (STMa 1352 2015). Antimonin suositeltu vertailuarvo pohjavedessä tärkeillä ja muilla vedenhankintaan soveltuvilla pohjavesialueilla on 20 µg/l (Ympäristöministeriö 2014, s. 87). Tämä arvo ylittyy koerakenteiden U.1 (U1.5, U1.3) ja B.2 (B2.4) vesinäytteissä kaikilla näytteenotokierroksilla ja kaivojen U1.4, B2.5 ja B2.6 vesinäytteissä joulukuun tuloksissa (kuva 51).



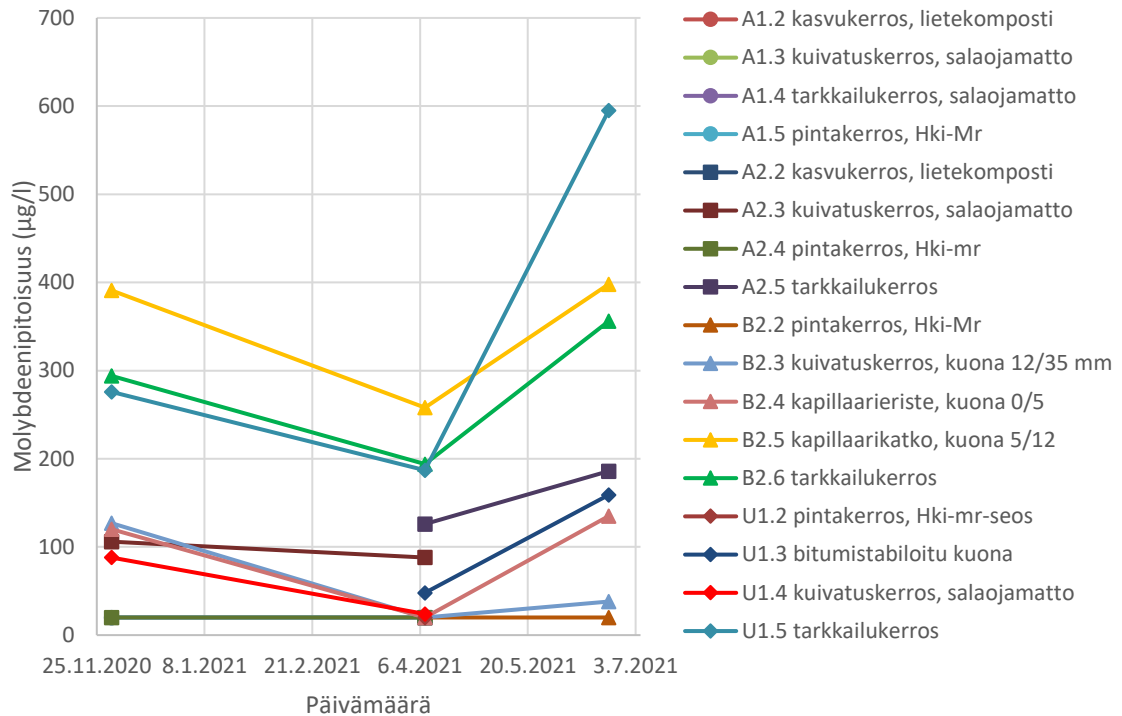
**Kuva 51.** Koerakenteista purkautuneiden vesien antimoniipitoisuudet mittakaivoista otettujen vesinäytteiden laboratorioanalyysien perusteella tarkkailujaksolla

Koerakenteiden rakennekerroksista purkautuneiden vesien laboratoriossa määritetyt **molybdeenipitoisuudet** on esitetty kuvassa 52. Molybdeenin laboratoriomittauksen määrittäjärajana (20 µg/l) alittavat pitoisuudet on esitetty kuvassa arvoina 20 µg/l. Laboratoriotuloksien perusteella koerakenteen B.2 kapillaarikatkosta sekä tarkkailukerroksesta ja koerakenteen U.1 tarkkailukerroksesta purkautuvien vesien molybdeenipitoisuudet olivat seurantajaksoilla suurimmat vaihdellen noin 190–600 µg/l. Pitoisuudet ovat pääosin pienempiä kevään ylivirtaamakaudesta

Kesäkuussa mitattu U.1:n tarkkailukerroksesta purkautuneen veden molybdeenipitoisuus, noin 600 µg/l, on selvästi koko seurantajakson suurin molybdeenipitoisuus. Edellä mainituista kerroksista purkautuneiden vesien molybdeenipitoisuudet ovat laskeneet huhtikuussa ja pitoisuudet ovat nousseet kesäkuussa. Koerakenteen B.2 kapillaarikatkon ja kuivatuskerroksen korkeimmat molybdeenipitoisuudet liittyvät todennäköisesti jätteenpolton kuonaan, jota on käytetty kuivatuskerroksessa, kapillaarieristeessä ja kapillaarikatkossa. Koerakenteen A.1, jossa ei ole käytetty jätteenpolton pohjakuonaa rakennekerroksissa, vesien molybdeenipitoisuudet ovat olleet alle määrittäjärajan.

Vantaan jätteenpolttolaitoksen käsitellystä jätteenpolton pohjakuonasta liukenevan molybdeenipitoisuuden arvot vaihtelevat välillä 0,20–1,30 mg/kg L/S-suhteella 10 (taulukko

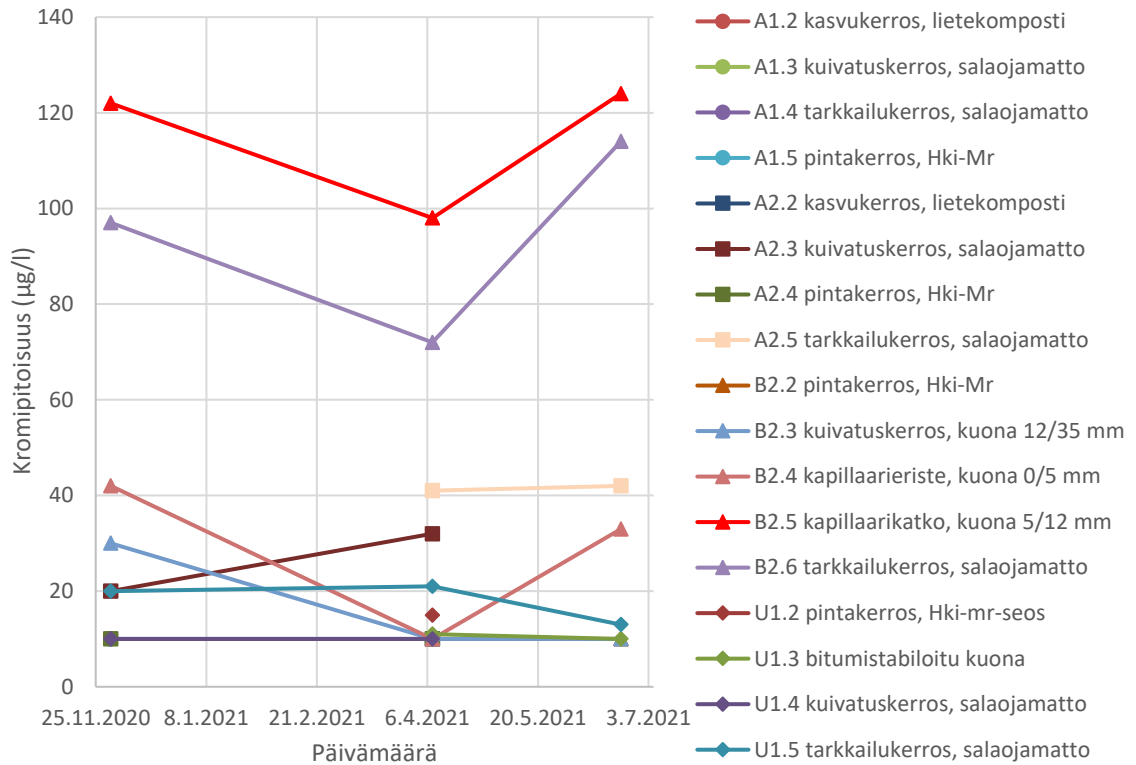
4). Kasvu- ja pintakerroksien vesien molybdeenipitoisuudet ovat alle määrittäjärajan. Molybdeenin enimmäispitoisuus talousvedessä on alle 70 µg/l (STMp 953/1994). Enimmäispitoisuus ylittyy kaikissa vesissä vähintään yhdessä näytteessä lukuun ottamatta koerakenteen A.1 vesiä sekä pinta- ja kasvukerrosten vesiä.



**Kuva 52.** Koerakenteista purkautuneiden vesien molybdeenipitoisuudet mittakäytävistä otettujen vesinäytteiden laboratorioanalyysien perusteella tarkkailujaksolla.

Koerakenteiden rakennekerroksista purkautuneiden vesien laboratoriomitattut **kromipitoisuudet** on esitetty kuvassa 53. Kromin laboratoriomittauksen määrittäjärajan (10 µg/l) alittavat pitoisuudet ovat kuvassa esitetty arvoina 10 µg/l. Pintarakenteen B.2 kapillaarikatkosta ja tarkkailukerroksesta purkautuneiden vesien kromipitoisuudet olivat suurempia kuin muiden analysoitujen vesinäytteiden. Ne vaihtelivat noin tasolla 70–120 µg/l. Kromipitoisuuteen on todennäköisesti vaikuttanut kapillaarikatkokerroksessa käytetty keskikarkea kuona ja muut kuonaa sisältävät yläpuoliset kerrokset, joista on liuennut kromia tarkkailukerrokseen suotautuvaan veteen. Muiden tutkittujen vesinäytteiden kromipitoisuudet olivat alle 45 µg/l.

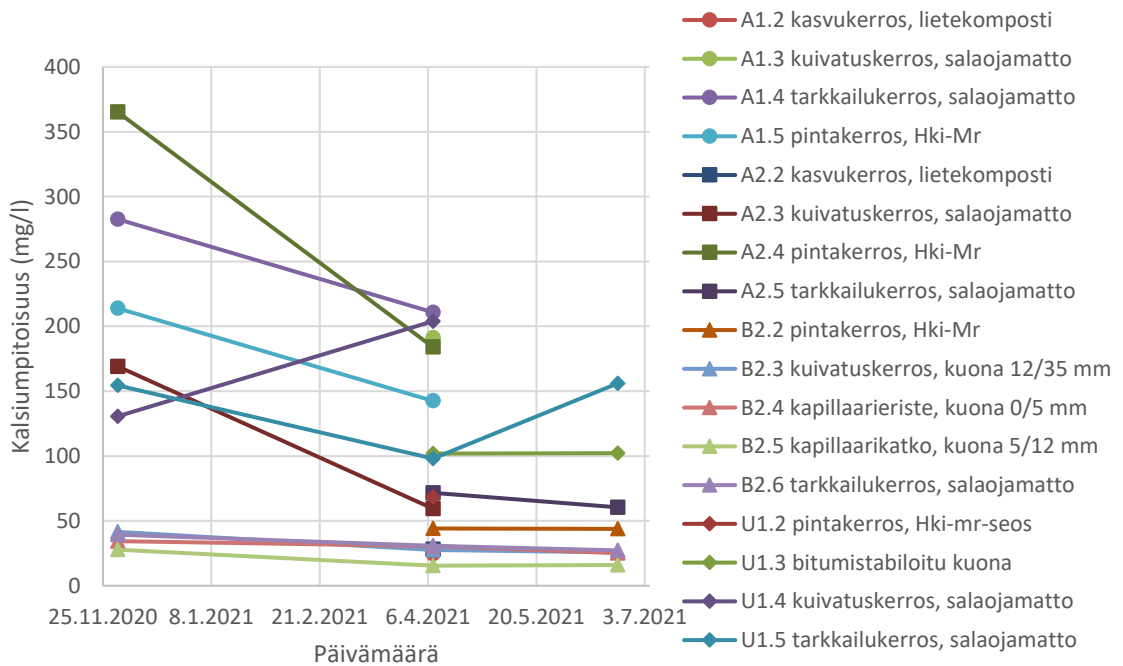
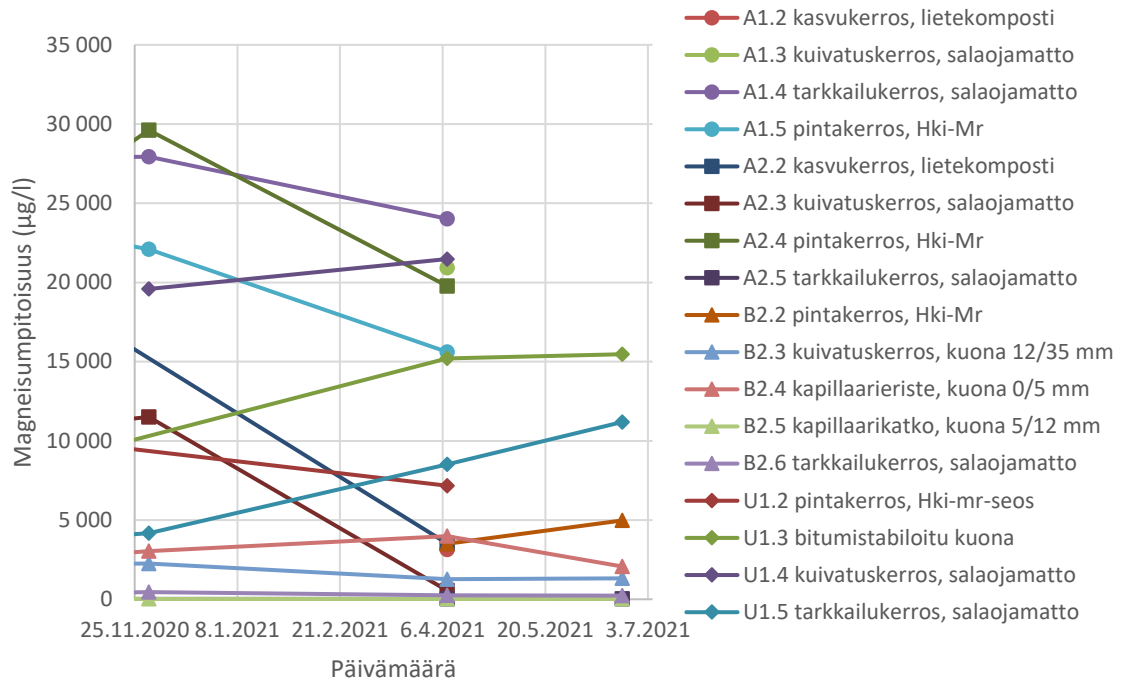
Vantaan jätteenpolttolaitoksen käsitellystä jätteenpolton pohjakuonasta liukenevan kromipitoisuudet vaihtelevat välillä 0,05–2,63 mg/kg L/S-suhteella 10 liukoisuustestattuna (taulukko 4). Kromin enimmäisarvo talousvedessä on 50 µg/l (STMa 1352/2015). Tämä ylittyy vain pintarakenteen B.2 kapillaarikatkosta ja tarkkailukerroksesta purkautuvista vesissä.



**Kuva 53.** Koerakenteista purkautuneiden vesien kromipitoisuudet mittakaivoista otettujen vesinäytteiden laboratorioanalyysien perusteella tarkkailujaksolla.

Tuloksien perusteella suurimmat **magnesium- ja kalsiumpitoisuudet** ovat pääasiassa koerakenteiden A.1 ja A.2 Helsinki-moreenista rakennetuista pintakerroksista purkautuvissa vesissä ja koerakenteessa A.1 (kuva 54). Toisaalta B.2 koerakenteen pintakerroksesta purkautuvissa vesissä pitoisuustasot olivat selvästi pienempiä. Lisäksi koerakenteessa A.1 magnesiumpitoisuudet ovat kohonneita purkautuvissa vesissä, mikä saattaa johtua jätteenpolton kuonasta.

Kalsium- ja magnesiumpitoisuudet voivat olla johtua Helsinki-moreenin sisältämästä sementistä ja laastista. Sementin klinkkerissä on kalsiumia sisältäviä kalsiumsilikaatteja ja kalsiumalumiinaatteja sekä magnesiumia sisältävää magnesiumoksidia (Finnsementti 2012). Myös bentoniitti sisältää kalsiumia, jota voi esimerkiksi ioninvaihdon kautta kulkeutua veden mukana. Lisäksi magnesium ja kalsium ovat luonnonmaassa runsaasti esiintyviä alkuaineita (Chandler 1997). Kuonalajitteet sisältävät liukoista kalsiumia, mutta tulosten perusteella tarkkailujaksolla kuonaa sisältävien rakennekerrosten läpi suotautuneiden vesien kalsiumpitoisuudet ovat selvästi pienempiä kuin Helsinki-moreenikerrosten.



**Kuva 54.** Koerakenteista purkautuneiden vesien magnesium- ja kalsiumpitoisuudet mittakaivoista otettujen vesinäytteiden laboratorioanalyysien perusteella tarkkailujaksolla.

## 5.4 Rakennekerrosten kuormituslaskelmat

Vesinäytteistä tehtyjen laboratorioanalyysien tulosten ja mittakaivoista mitattujen virtaamien avulla on laskettu rakennekerroksissa käytetyistä materiaaleista aiheutuvaa kuormitusta. Kuormituslaskelmien avulla pyritään ottamaan huomioon yksittäisten laboratorioissa mitattujen pitoisuuksien lisäksi rakennekerroksista purkautuvien vesimäärien vaikutusta rakennekerroksissa käytettävistä materiaaleista aiheutuvaan kuormitukseen. Tarkastelu on rajattu rakennekerroksien materiaaleista aiheutuviin kloridi-, sulfaatti-, kupari-, molybdeeni-, magnesium-, kalsium- ja kromikuormitusten laskemiseen (kuvat 55–61). Kuormituslaskelmissa on käytetty virtaamana vesinäytteenottopäivän tuntikohtaisten virtaamien keskiarvoa ja pitoisuutena näytteenottopäivän laboratoriotulosta. Kuormitus on lopuksi muunnettu yksikköön grammaa tai milligrammaa päivässä.

Kuormituslaskelmissa on lisäksi tutkittu Helsinki-moreenia ja jätteenpolton kuonaa sisältävistä rakennekerroksista liukenevien kloridi-, sulfaatti-, kupari, kromi- ja molybdeenimäärien liukenemisaikoja. Liukenemisaikatarkastelun avulla pyritään teoreettisesti arvioimaan, kuinka kauan rakennekerroksissa käytetyistä materiaaleista liukenee metalleja ja suoloja. Rakennekerrosten rakenneteoreettiset tilavuudet on laskettu rakennekerrosten pinta-alojen tarkemittaustulosten ja suunniteltujen kerrospaksuuksien avulla (liite 8). Tilavuuden ja kuivairtitiheyden avulla on laskettu rakennekerrosten kokonaiskuivapainot. Liukenevien metallien tai suolojen määrät on laskettu kokonaiskuivapainon ja liukoisuustestituloksien perusteella. Liukenemisajat on laskettu jakamalla liukeneva määrä tarkkailujakson aikana määritetyillä minimi- ja maksimikuormituksilla.

### 5.4.1 Tarkkailujakson laskennalliset kuormitukset

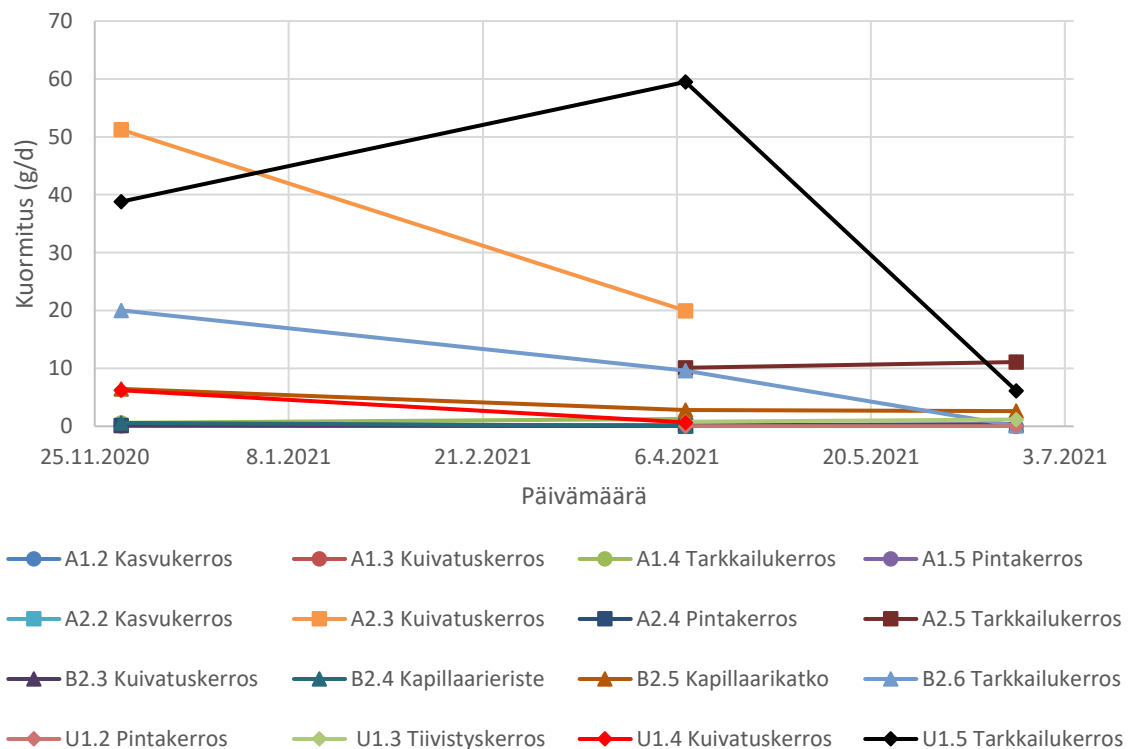
Tarkkailujakson vesinäytteenottopäivien virtaamia ja pitoisuuksia vastaavat kloridi-, sulfaatti-, kupari-, molybdeeni-, magnesium-, kalsium- ja kromikuormitukset on esitetty kuvissa 55–61. Koerakenteen B.2 tarkkailukerroksesta (B2.6) purkautuvan veden sulfaatti-, kupari- ja molybdeenikuormitukset ovat suurimpia joulukuun ja huhtikuun vesinäytteissä (kuvat 56–58). Tuloksiin vaikuttaa suurehkojen pitoisuuksien lisäksi tarkkailukerroksesta purkautuvan veden suuri virtaama, sillä mittakaivosta B2.6 otetun vesinäytteen kupari- ja molybdeenipitoisuudet eivät ole laboratorioanalyysien perusteella suurimpia (kuvat 57 ja 58). Suuren virtaaman vaikutus näkyy myös koerakenteen U.1 tarkkailukerroksesta (U1.5) purkautuvan veden kuormituksessa, sillä kaikki kuormituslaskelmissa tarkastellut pitoisuudet ovat huhtikuun laboratoriomittauksissa pienempiä kuin joulukuussa mittauksissa. Kuivuminen ja pienemmät virtaamamäärät laskevat tuloksien perusteella kuormi-



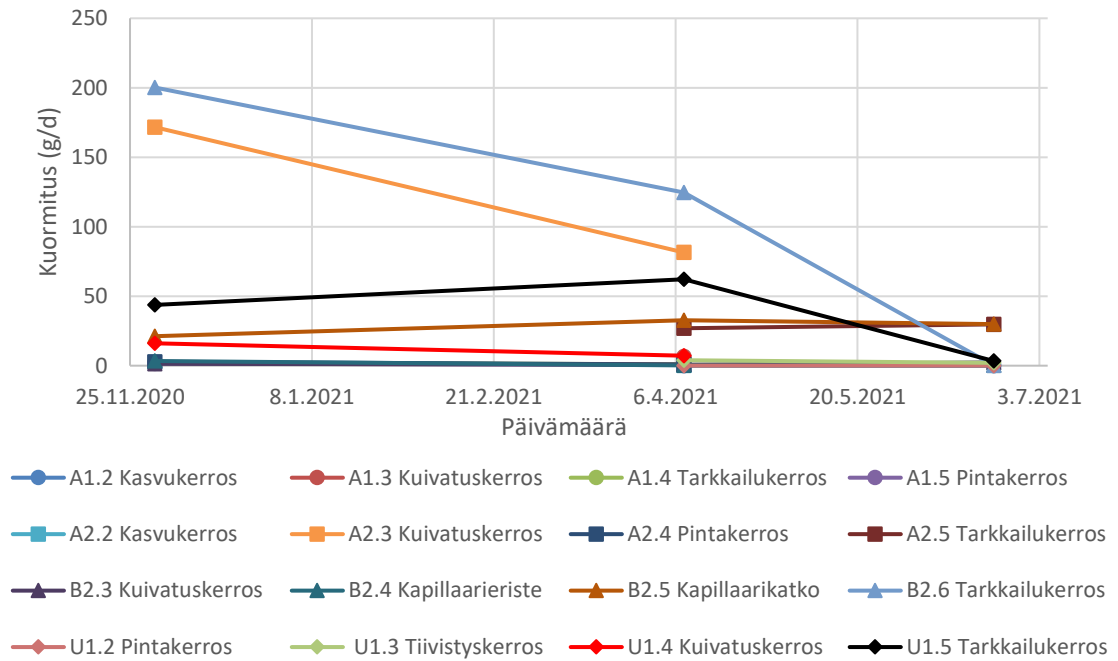
tusta kesällä eniten niissä rakennekerroksista, joissa huhtikuun virtaamat ovat olleet suuria. Tällaisia rakennekerroksia ovat muun muassa A2.3 ja U1.5. Tuloksien perusteella muissa kerroksissa kuormituksen muutokset ovat vähäisempiä.

Suurimmat magnesium- ja kalsiumkuormitukset tulevat laskelmien mukaan koerakenteen A.1 kuivatuskerroksesta (A1.3) 1.12.2020 ja koerakenteen A.2 kuivatuskerroksesta (A2.3) 8.4.2021 (kuvat 59 ja 60). Koska joulukuun vesinäytteenoton aikaan kaivoon A1.3 kerääntyi vielä molempien koerakenteiden A.1 ja A.2 kuivatuskerroksien vedet, vaikuttaa tuloksien perusteella magnesium- ja kalsiumkuormituksen aiheutuvan pääsääntöisesti koerakenteesta A.2. Kuormitukseen on voinut vaikuttaa kuivatuskerroksen yläpuolella oleva Helsinki-moreeni, joka on nostanut veden magnesium- ja kalsiumpitoisuuksia.

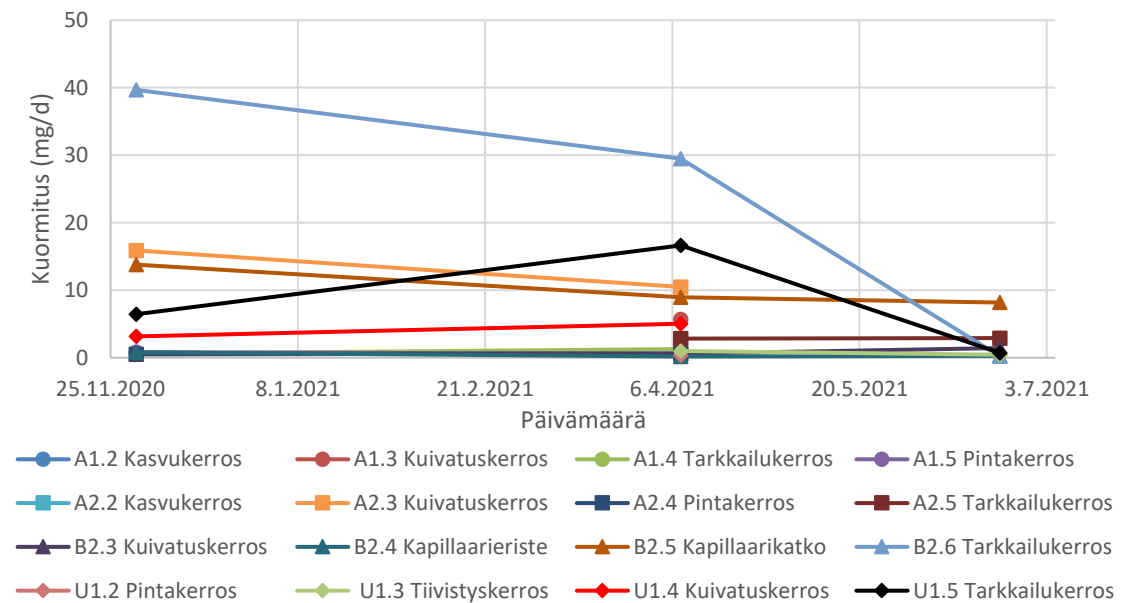
Selvästi suurin kromikuormitus tulee laskelmien mukaan koerakenteen B.2 tarkkailukerroksesta (kuva 61). Kuormitukseen on voinut vaikuttaa tiivistyskerroksen kuonabentonniitti, joka on nostanut veden kromipitoisuuksia.



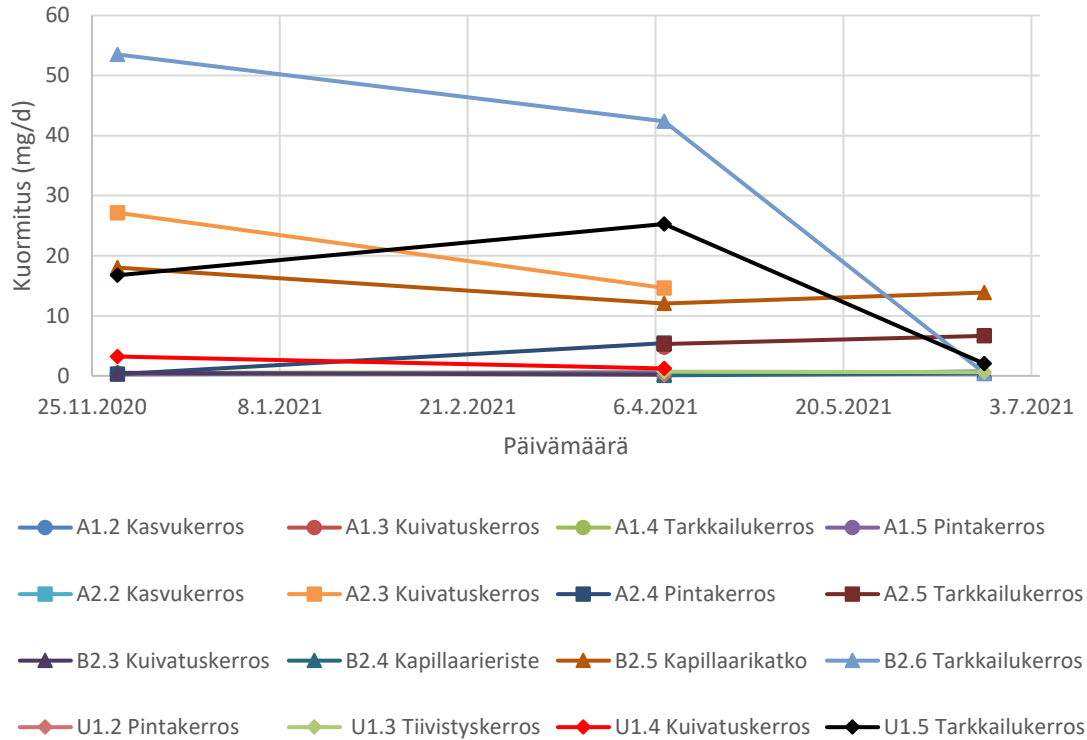
**Kuva 55.** Koerakenteista purkautuvien vesien laskennalliset kloridikuormitukset (g/d) tarkkailujakson vesinäytteenottopäivinä.



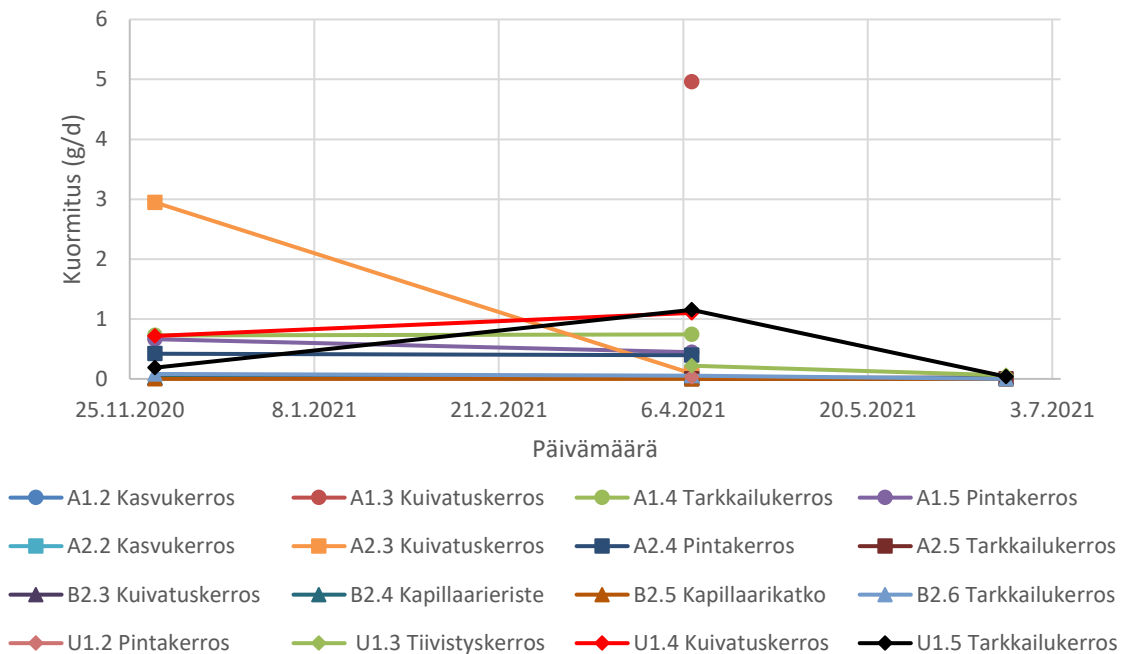
**Kuva 56.** Koerakenteista purkautuvien vesien laskennalliset sulfaattikuormitukset (g/d) tarkkailujakson vesinäytteenottopäivinä.



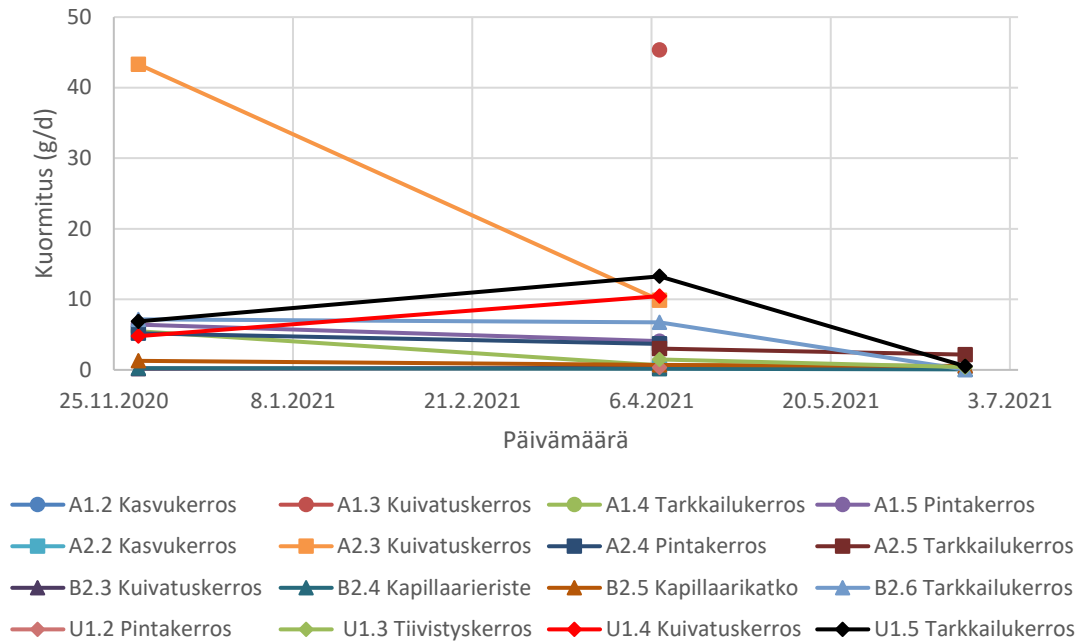
**Kuva 57.** Koerakenteista purkautuvien vesien laskennalliset kuparikuormitukset (mg/d) tarkkailujakson vesinäytteenottopäivinä.



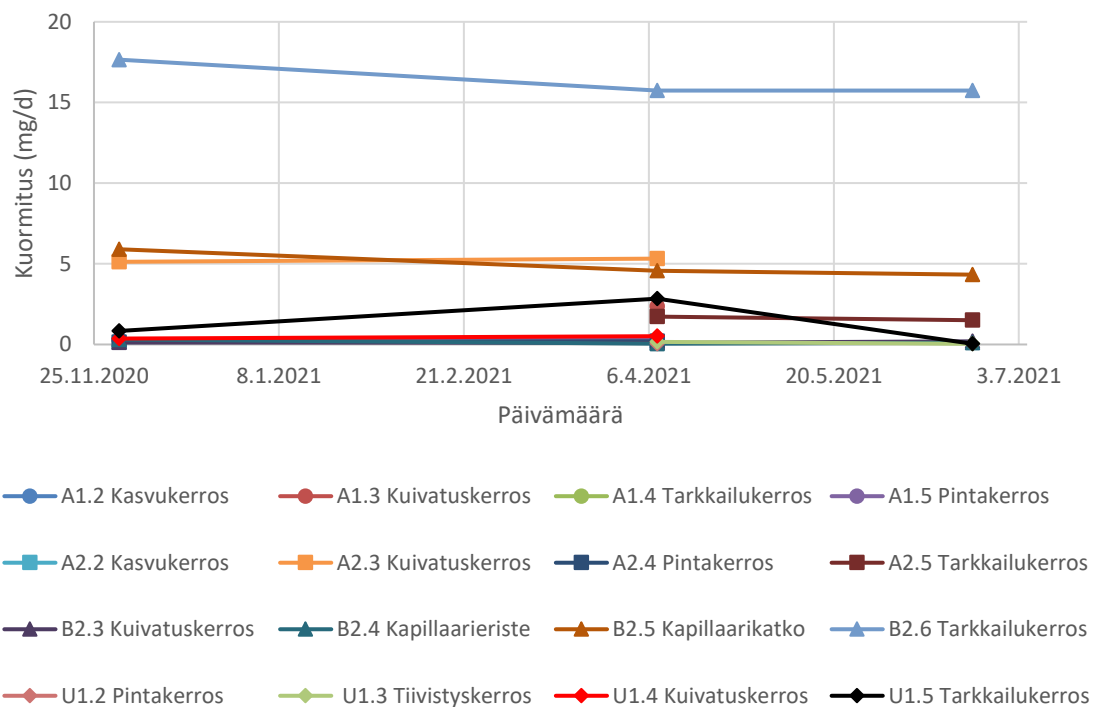
**Kuva 58.** Koerakenteista purkautuvien vesien laskennalliset molybdeenikuormitukset (mg/d) tarkkailujakson vesinäytteenottopäivinä.



**Kuva 59.** Koerakenteista purkautuvien vesien laskennalliset magnesiumkuormitukset (g/d) tarkkailujakson vesinäytteenottopäivinä.



**Kuva 60.** Koerakenteista purkautuvien vesien laskennalliset kalsiumkuormitukset (g/d) tarkkailujakson vesinäytteenottopäivinä.



**Kuva 61.** Koerakenteista purkautuvien vesien laskennalliset kromikuormitukset (mg/d) tarkkailujakson vesinäytteenottopäivinä.

## 5.4.2 Rakennekerroksista liukenevien metallien ja suolojen liukenemisajat

Kuormitusten ja liukoisuustulosten perusteella lasketut rakennekerroksista liukenevien kloridi-, sulfaatti-, kupari-, molybdeeni- ja kromimäärien teoreettiset liukenemisajat on esitetty kuvissa 62–66. Liukenemisajat vaihtelevat alle kymmenestä vuodesta tuhansiin vuosiin. Katkoviivoilla on esitetty tarkkailujakson pitoisuus- ja virtaamatuloksien perusteella lasketuilla minimikuormituksilla lasketut liukenemisajat ja yhtenäisillä viivoilla on esitetty maksimikuormituksilla lasketut liukenemisajat. Alkupitoisuutena on käytetty liukoisuuskokeilla määritetyn suurimman liunneen haitta-aineen määrän ja rakennekerroksen kuivapainon perusteella laskettua maksimimäärää. Tuloksia tarkastellessa tulee ottaa huomioon, että ne on laskettu tarkkailujakson aikana vallinnutta tilannetta kuvaavilla lähtötiedoilla. Liukenemisolosuhteet kuitenkin muuttuvat rakenteissa ajan kuluessa esimerkiksi pitoisuuksien tai pH:n muuttuessa.

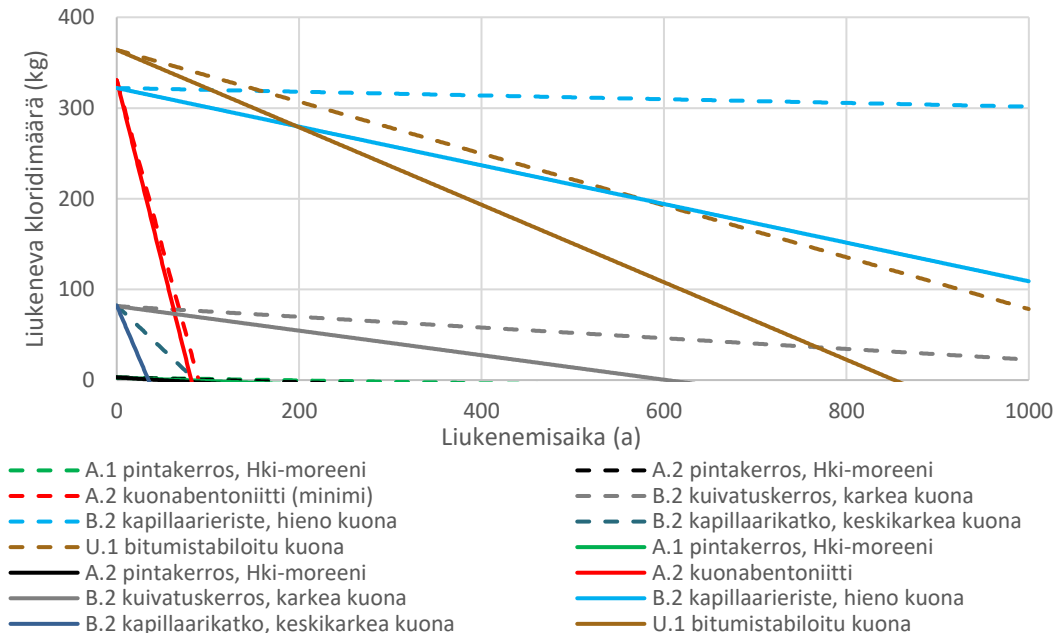
Pisimmät liukenemisajat ovat pääasiassa koerakenteiden B.2 kapillaarieristeestä ja kuivatuskerroksesta ja U.1 tiivistyskerroksesta liukenevilla haitta-aineilla, joiden liukenemisajat ovat jopa tuhansia vuosia. Tähän vaikuttaa jätteenpolton kuonien suuremmat pitoisuudet verrattuna Helsinki-moreeniin, jolloin myös liukenevat määrät ovat suurempia. Lisäksi kyseisten rakennekerrosten kuormitus on muihin jätteenpolton kuonaa sisältäviin kerroksiin verrattuna pienempi eli liukeneminen on hitaampaa.

Kapillaarikatkon keskikarkeasta kuonasta metallien liukenemisajat ovat laskelmien perusteella lyhyimpiä. Kapillaarikatkokerroksen liukenemisaikoihin vaikuttaa pieni liukoisuus, jolloin kerroksesta liukenevat määrät ovat pieniä, ja virtaamasta johtuva kuormitus on suuri. Kaikki lasketut liukenemisajat on esitetty liitteessä 8.

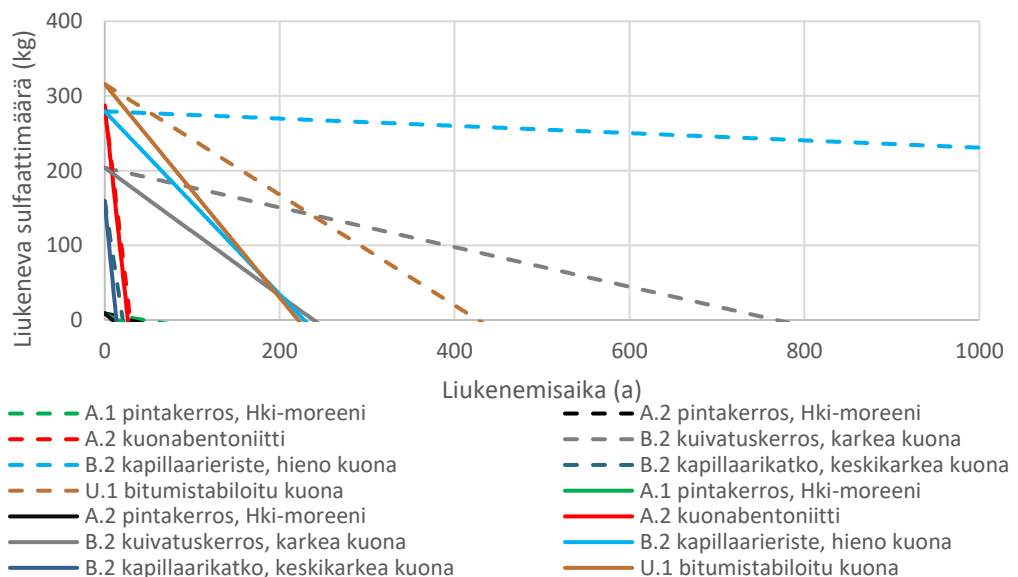
Nopeimmin kloridi liukenee koerakenteen B.2 kapillaarikatkokerroksesta, jossa liukenemisaika on noin 35 vuotta maksimikuormituksella laskettuna (kuva 62). Pisin kloridin liukenemisaika on koerakenteen B.2 kapillaarieristekerroksesta, josta kloridin liukenemisaika on noin 15 646 vuotta minimikuormituksella laskettuna. Sulfaatti liukenee nopeimmin A.2 pintakerroksesta, jossa liukenemisaika on noin 9 vuotta maksimikuormituksella. Hitaimmin sulfaatti liukenee kapillaarieristeestä, jossa liukenemisaika on noin 5739 vuotta minimikuormituksella laskettuna (kuva 63).

Kupari liukenee nopeimmin koerakenteen B.2 kapillaarikatkokerroksesta, jossa liukenemisaika on noin 8 vuotta (kuva 64). Hitaimmin kupari liukenee koerakenteen B.2 kapillaarieristeestä, jossa liukenemisaika on noin 1876 vuotta. Molybdeeni liukenee no-

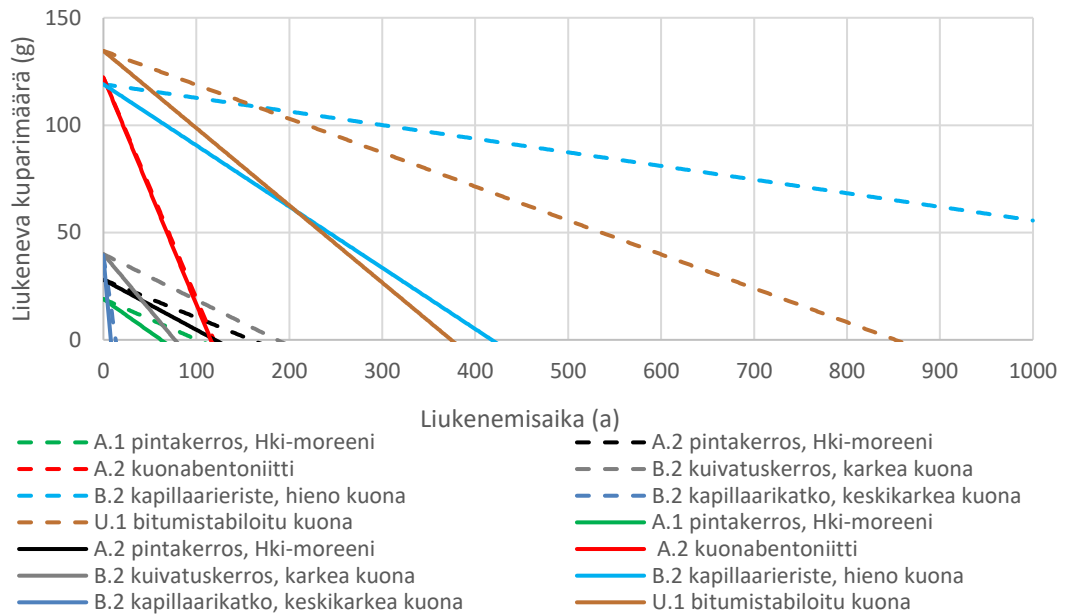
peimmin koerakenteen B.2 kapillaarikatkosta, jossa liukenemisaika on noin 5 vuotta. Hi-  
 taimmin molybdeeni liukenee koerakenteen B.2 kapillaarieristeestä, jossa liukenemisaika on noin 2 521 vuotta (kuva 65). Kromi liukenee nopeimmin koerakenteen B.2 kapillaarieristeestä, jossa liukenemisaika on noin 4 vuotta. Pisin liukenemisaika kromilla on koerakenteen B.2 kapillaarieristeestä, jossa se on noin 12 100 vuotta (kuva 66).



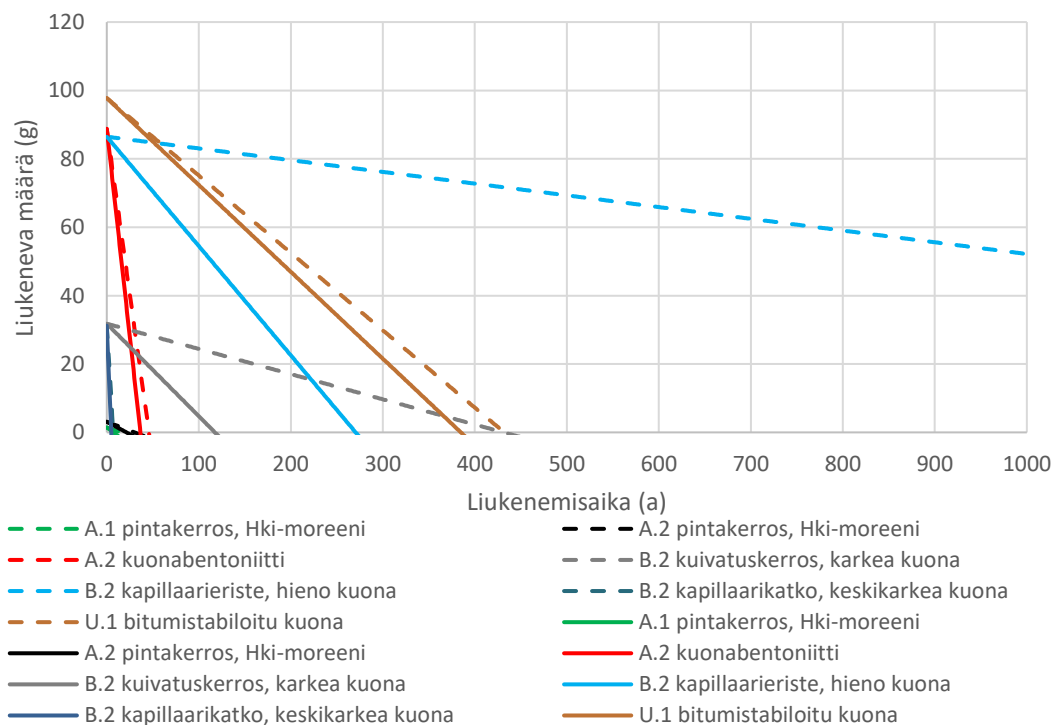
**Kuva 62.** Jätteenpolton kuonaa ja Helsinki-moreenia sisältävistä rakennekerrok-  
 sista liukenevien kloridimäärien laskelmalliset liukenemisajat. Yli tuhannen vuo-  
 den liukenemisajat on rajattu kuvasta.



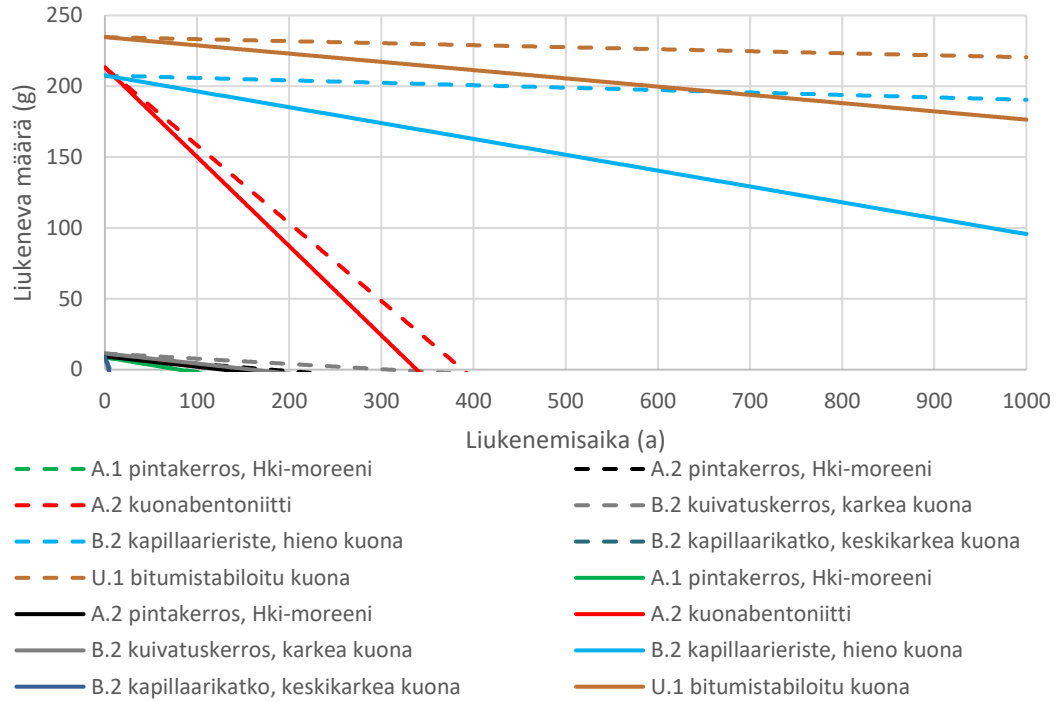
**Kuva 63.** Jätteenpolton kuonaa ja Helsinki-moreenia sisältävistä rakennekerrok-  
 sista liukenevien sulfaattimäärien laskelmalliset liukenemisajat. Yli tuhannen  
 vuoden liukenemisajat on rajattu kuvasta.



**Kuva 64.** Jätteenpolton kuonaa ja Helsinki-moreenia sisältävistä rakennekerroksista liukenevien kuparimäärien laskelmalliset liukenemisajat. Yli tuhannen vuoden liukenemisajat on rajattu kuvasta.



**Kuva 65.** Jätteenpolton kuonaa ja Helsinki-moreenia sisältävistä rakennekerroksista liukenevien molybdeenimäärien laskelmalliset liukenemisajat. Yli tuhannen vuoden liukenemisajat on rajattu kuvasta.



**Kuva 66.** Jätteenpolton pohjakuonaa ja Helsinki-moreenia sisältävistä rakennekerroksista liukenevien kromimäärien laskelmalliset liukenumisajat. Yli tuhannen vuoden liukenumisajat on rajattu kuvasta.



## 6. TULOSTEN TARKASTELU

### 6.1 Vesitasetarkastelu

Koerakenteista tarkkailujaksolla purkautuvat kokonaisvesimäärät olivat virtaamamittausten perusteella suurempia kuin Ämmässuon säähavaintoasemalla havaittu sadanta. Ero oli kuitenkin selvästi pienempi kuin ensimmäisen raportoidun tarkkailujakson vesimäärätuloksissa havaittiin (Reiman 2019). Rakenteita on korjattu joulukuussa 2020 sivulta tulevien vesien ohjaamiseksi koerakenteen ohi. Pumppausmenetelmää on kehitetty ja vesimäärien seuranta on kattavampaa lukuun ottamatta kaivoa B2.2, jossa ei ole virtaamamittausta. Tulosten perusteella ei ole havaittavissa laskennallista haihduntaa, vaikka esimerkiksi Ämmässuolla tehtävien mikrometeorologisten mittausten perusteella haihdunta nousee kevään aikana vuodesta riippuen tammikuun 1 mm/kk:sta 30–60 mm:iin/kk:ssa (Laurila et al. 2014). Yhtenä mahdollisena selityksenä on ennen tarkkailujaksoa rakenteisiin satanut lumi ja varastoitunut kosteus, joka on purkautunut tarkkailujakson aikana.

Kumulatiivisten kokonaisvirtaamien ero tarkkailujakson aikana suhteessa sadantaan oli pienin koerakenteessa B.2, jossa virtaama oli noin 8 % sadantaa suurempi, ja suurin koerakenteessa U.1, jossa virtaama oli noin 44 % sadantaa suurempi. Koerakenteessa B.2 kokonaisvirtaama on mahdollisesti aliarvioitu, koska kaivosta B2.2 ei mitata virtaamaa.

Sadantaa suuremmat virtaamamäärät voivat johtua pumpattavan veden osittaisesta palautumisesta takaisin mittakaivoon, jolloin mitattu virtaama on liian suuri. Tarkkailujakson aikaisten pumppausmäärien, kumulatiivisten kokonaisvirtaamien ja sadannan avulla laskettuna kaivoon palautuva laskennallinen vesimäärä pumppauskertaa kohden on noin 0,41–0,49 l/pumppauskerta koerakenteissa, jossa kaikissa kaivoissa on pumpput (taulukko 8). Koerakenteen B.2 tulos, 0,12 l/pumppauskerta, on oletetusti todellista pienempi, koska kaivossa B2.2 ei ole virtaamamittausta eikä pumppausta. Koska koerakenteista purkautuneiden vesien kokonaismäärät ovat suurempia kuin sadanta, teoreettinen vesitase ei todennäköisesti täysin kuvaa todellista tilannetta. Vesitaseen laskeminen edellyttää virtaamatietoja kokonaiselta vuodelta, koska vuodenaikojen väliset erot, kuten lumipeite, sulaminen ja jäätyminen, vaikuttavat tuloksiin.

**Taulukko 8.** *Pumppausmäärät koerakenteista purkautuvien vesien mittakaivoissa tarkkailujakson ajalta 29.1.2021–30.6.2021. Pumppausmäärät on laskettu lähteestä Hämäläinen 2021.*

<b>Koerakenne</b>	<b>A.1</b>	<b>A.2</b>	<b>B.2</b>	<b>U.1</b>
Pumppujen lukumäärä	5	5	5 (6 kaivoa)	5
Pumppauskertojen lukumäärä	18 513	18 513	24 021	36 720
Koerakenteista purkautuneiden kumulatiivisten vesimäärien ja sadannan erotus (I)	7 659	8 993	2 909	16 928
Vesimäärä pumppauskertaa kohden (I/pumppaus)	0,41	0,49	0,12	0,46

Kuten Saarelan 1997 väitöskirjan laskelmissa on todettu, tehokas kuivatuskerros ja tiivistyskerros yhdessä muodostavat tehokkaan pintarakenteen, joka vähentää sade- ja sulamisvesien pääsyä jätetäyttöön (Saarela 1997). Koerakenteiden A.1 ja A.2 vesitaseen perusteella tiivistyskerroksen läpäisee tarkkailujakson aikana 16,9 % ja 11,9 % kokonaisvirtaamasta. Taulukossa 9 on esitetty koerakenteista tehtyjen virtaamamittausten perusteella vesitaseen prosentuaalinen jakauma. Huonosti vettäläpäisevän tiivistyskerroksen päällä oleva tehokas kuivatuskerros johtaa seurantalosten perusteella yli 60 % rakenteeseen imeytyneestä vedestä pois. Jos kuivatuskerroksen alla on kohtuullisen hyvin läpäisevä kerros, kuten B.2 rakenteessa, ei vesi purkautukaan kuivatuskerroksen kautta kaltevuuden suuntaan, vaan se imeytyy alapuoliseen kerrokseen. Tarkkailujakson aikaiset koerakenteiden läpi suotautuvat vesimäärät ovat osittain samaa suuruusluokkaa kuin Henken-Mellies & Schweizer 2011 tulokset, joissa Saksassa tutkituissa pintarakenteissa läpisuotautuneet vesimäärät ovat noin 2–23 % sadannasta (Henken-Mellies & Schweizer 2011).

Koerakenteista tehokkaimmin veden suotautumista jätetäyttöön estivät VNa 331/2013:n periaatteiden mukaiset (ohennettu kuivatuskerros) koerakenteet A.2, jossa tiivistyskerroksen läpäisevä vesimäärä oli mittausten perusteella tarkkailujakson aikana 0,24 l/m<sup>2</sup>/d, ja A.1, jossa tiivistyskerroksen läpäisevä vesimäärä oli mittausten perusteella tarkkailujakson aikana 0,32 l/m<sup>2</sup>/d. Tuloksen perusteella puolen metrin paksuinen kuonabentoniittikerros esti jonkin verran tehokkaammin veden suotautumista jätetäyttöön kuin bentoniittimatto. Koerakenteissa U.1 ja B.2 läpäisevät vesimäärät olivat noin kolmin- ja viisinkertaisia (0,71 ja 1,17 l/m<sup>2</sup>/d) verrattuna koerakenteeseen A.2. Rakennekerroksista purkautuvien vesimäärien perusteella jätteenpolton pohjakuonasta rakennettu kapillaarieriste (koerakenne B.2) ei ole tehokas kaatopaikan pintarakenne, sillä suurin osa, noin 68 %, koerakenteeseen päätyvästä vedestä suotautuu rakenteen läpi. Koerakenteiden

tiivistyskerroksien tehokkuudet eivät ole A.1 ja A.2 rakenteita lukuun ottamatta suoraan keskenään vertailtavissa, sillä koerakenteissa on käytetty erilaisia pintakerrosmateriaaleja ja -paksuuksia.

Pintavaluntojen osuudet purkautuvien vesien kokonaisvirtaamasta olivat oletettua pienempiä. Pintarakenteet ovat nurmetettuja (kuva 67). Kaikkien koerakenteiden pintavalunnat alittivat tarkkailujakson aikana kirjallisuudessa nurmelle yleisesti esitetyn valumarkertoimen arvoa 0,15–0,35 (Ilmastokestävä kaupunki -hanke 2013) vastaavan pintavalunnan määrän. Pintavalunnan suuruuteen vaikuttaa ilmastotekijöiden ja luiskakaltevuuden lisäksi ylimmän rakennekerroksen huokoisuus ja materiaali, mahdollinen ohivirtaus sekä kasvillisuuden kehittyminen. Pintavalunnat olivat A.1-rakenteessa 1,1 %, A.2:ssa 2,2 % ja B.2:ssa 7,5 % kokonaisvirtaamasta. Melko vastaavia pintavaluntoja on havainnut myös Melchior et al. (2010) tutkimuksessaan, jonka tuloksien mukaan kaatopaikan pintarakenteen pintavalunnat olivat kolmen ensimmäisen vuoden ajalta keskimäärin 0,5–0,7 % sadannasta nurmetetuissa koerakenteissa (Melchior et al. 2010).

Lähimpänä nurmelle kirjallisuudessa esitettyä pintavalunnan suurusluokkaa olivat koerakenteen U.1:n tulokset, joiden perusteella pintavalunta oli noin 11 % kokonaisvirtaamasta. Tässä rakenteessa oli karkearakeisin materiaali ja yhdistetty pinta- ja kasvukerros. Pintarakennetta B.2 lukuun ottamatta pintavaluntojen kumulatiivisissa määrissä ei tapahtunut selkeää kasvua suurten hetkellisten sademäärien aikaan, mikä voi viitata mahdollisiin ongelmiin pintavaluntojen mittaamisessa tai kuvata kasvillisuuden ja kasvukerroksen mikrohuokosrakenteen pienentävää vaikutusta pintavaluntaan.

Pintakerroksen ja sen yläosassa olevan kasvukerroksen läpäisevyys, vedenpidätyskyky ja paksuus vaikuttavat pintakerroksen läpi suotautuvan veden määrään. Koerakenteissa A.1 ja A.2 on samanlainen, VNa 331/2013:n vaatimuksen mukainen, pintakerros, jonka yläosassa on kasvukerros. Niissä kerroksissa tapahtuu evapotranspiraation lisäksi luiskan suunnassa vaakavirtausta, jonka osuus on tarkkailujaksolla A.1 rakenteessa 19,4 % ja A.2 rakenteessa 13,4 % virtaamasta. Koerakenteessa U.1 ei ole erillistä kasvukerrosta, vaan ohuempi, 0,5 m:n paksuinen pintakerros, jonka seosmateriaali sisältää 30 % hiekoitushiekkaa ja on siten moreenia paremmin vettäläpäisevää. Siinä vaakavirtauksen osuus on tulosten perusteella vain 1,6 % eli kaltevuudella 1:7 virtaus tapahtuukin pääasiassa alaspäin eikä luiskan suuntaan. Toisaalta koerakenteessa U.1 pintavalunnan osuus on selvästi muita suurempi, noin 11,4 %.



**Kuva 67.** Ilmakuva koerakenteista vuodelta 2020 (HSY 2020).

**Taulukko 9.** Virtaamien prosentuaalinen jakautuminen pintakoerakenteissa tarkkailujaksolla 29.1.2021 - 30.6.2021.

<b>Koerakenne</b>		<b>A.1</b>	<b>A.2</b>	<b>B.2</b>	<b>U.1</b>
Pintavalunta	%	1,1	2,2	7,5	11,4
Vaakavirtaus kuivatuskerroksen yläpuolisissa rakennekerroksissa	%	19,4	13,4	0,1	1,6
Purkautuu kuivatuskerroksesta	%	62,7	72,5	3,5	31,5
Vaakavirtaus kuivatuskerroksen alla	%	ei mitata	ei mitata	21,1	25,2
Jätetäyttöön purkautuu	%	16,9	11,9	67,8	30,4

## 6.2 Lämpötilaprofiilit

Tulosten perusteella lumipeitteisenä talvena ohennettukin (0,5 m:n paksuinen) pintakerros on riittävä suojaamaan tiivistyskerrosta jäätymiseltä. Koerakenteiden instrumentoituloksien perusteella vain koerakenteen A.1 kasvukerros (lietekompostiseos) ja koerakenteen U.1 pintakerros (lietekompostin, jätepitöisen maan ja hiekoitushiekan seos) jäätivät hetkellisesti tarkkailujakson aikana. Lumipeitteen ansiosta rakenteiden lämpötila nousi pakkasesta huolimatta nollan yläpuolelle.

Jäätyminen näkyi myös kasvukerroksen johtokyky- ja maankosteustuloksien alenemisinä kyseisinä hetkinä, sillä mittaus ei sovellu jäätyneeseen maahan. Sulamisaikana oli vastaavasti hetkellisiä piikkejä johtokyvyn ja maankosteuden tuloksissa.

Lämpötila-antureiden tulosten perusteella syvyys maanpinnasta on merkittävin tekijä rakennekerrosten lämpötilan kehityksessä suhteessa ilman lämpötilaan. Merkittävää eroa eri materiaalien välillä, esimerkiksi materiaalien lämmönjohtavuuserojen takia, ei ollut

havaittavissa ulkoilman lämpötilan laskiessa tai noustessa (kuvat 22, 24), vaikka kirjallisuuden perusteella (esim. Klein et al. 2001 ja Sormunen & Rantsi 2015) jätteenpolton kuonalla on jonkin verran pienempi lämmönjohtavuus, luokkaa 0,3–1,27 W/(m\*K), kuin maa- tai kiviaineksella.

### 6.3 Veden laadun seuranta

Tässä tutkimuksessa käytettyjen erilaisten veden laadullisten mittausten menetelmien tulokset (mittakaivojen jatkuva instrumentointi, kenttämittaukset ja laboratoriomittaukset) olivat melko hyvin samaa suuruusluokkaa toisiinsa verrattuina. Suurimmat poikkeavuudet havaittiin pH-tuloksissa, jotka olivat kenttä- ja laboratoriomittauksissa pienempiä kuin kaivoihin asennettujen jatkuvatoimisten pH-antureiden tulokset. Tulosten eroon vaikuttaa todennäköisesti kaivoissa olevien mitta-antureiden asteittainen tukkeutuminen. Antureiden puolivuotiskalibroinnin jälkeen kesällä antureiden ilmoittamat pH-arvot laskivat kaikissa kaivoissa. Eroja laboratorio- ja kenttämittaustulosten välille on voinut aiheuttaa kaivoveden sekoittaminen ennen näytteenottoa ja vesinäytteiden muuttuminen ennen laboriotestausta. Tuloksien tarkkuuteen vaikuttavat mittausmenetelmien ja -laitteiden mittaustarkkuudet sekä laboratorioanalyysien edellyttämä näytteiden esikäsittely, kuten suodattaminen tai laimentaminen.

Mittakaivon B2.3 veden laadulliset tulokset eivät ole luotettavia 3.3.2021 lähtien, sillä mittakaivoon jouduttiin lisäämään hanavettä, koska mittakaivo tyhjentyi huollon yhteydessä, kun pumppu oli asennettu hetkellisesti liian syväälle. Jatkuvatoiminen mittaus antaa kattavamman kuvan koerakenteista purkautuvan veden laadun vaihteluista kuin kenttä- ja laboratoriomittaukset, joita tehdään muutamia kertoja vuodessa ja tarjoavat vain hetkellisen tiedon. Vesien laatua on kuitenkin tarpeellista seurata säännöllisesti myös muilla menetelmillä, jotta esimerkiksi anturien mahdolliset häiriöt havaitaan.

Mitattavat parametrit ja laboratoriossa vesinäytteistä analysoitavat aineet on valittu käytettävien materiaalien ominaisuuksien perusteella. Tässä työssä ei ole tarkasteltu kaikkia tuloksia, vaan on keskitytty olennaisimmiksi tunnistettuihin parametreihin.

### 6.4 Materiaalin hyötykäyttökelpoisuus

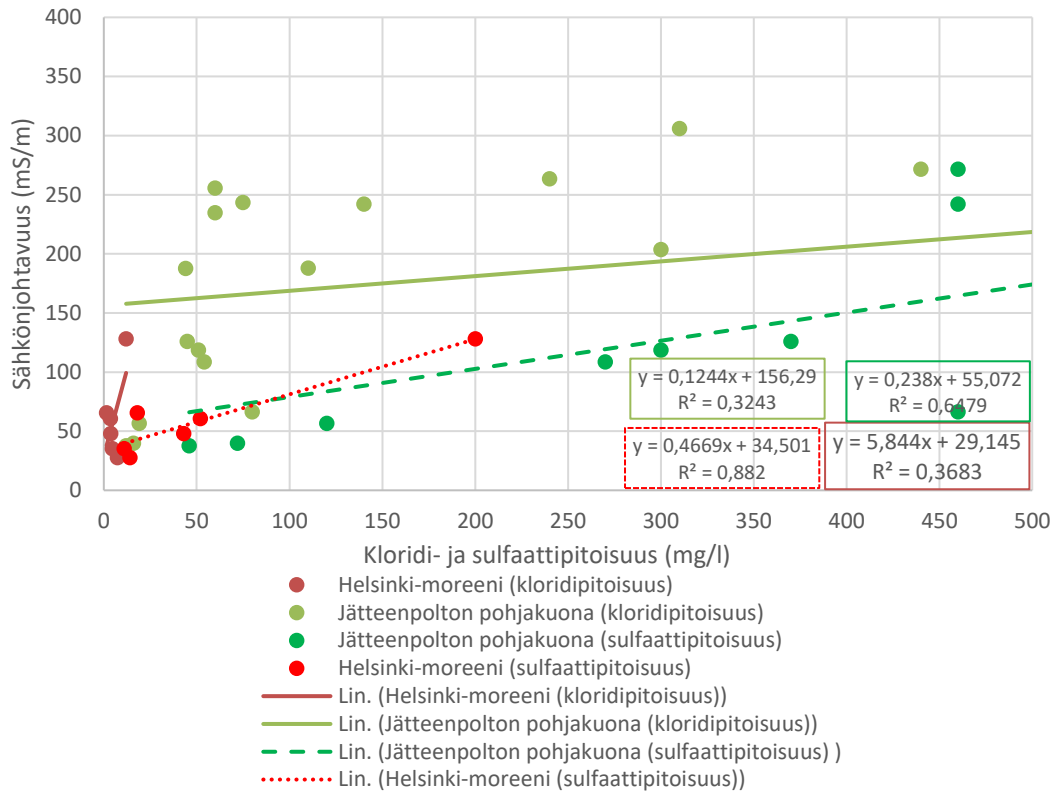
Jättemateriaalien hyötykäyttökelpoisuuteen vaikuttavat käyttökohteen tekniset vaatimukset, materiaalin ympäristökelpoisuus, rakennettavuus ja ominaisuuksien pysyvyys sekä materiaalin vaikutukset muihin materiaaleihin ja rakenteen elinkaareen, kunnossapitoon, korjaamiseen sekä käytöstäpoistoon. Kaatopaikkarakentaminen ja erityisesti pintaraken-

teet ovat yleinen käyttökohde lievästi pilaantuneille maille ja muille rakenteisiin soveltuville materiaaleille. Liitteessä 9 on esitetty yhteenvetotaulukko koerakenteista purkautuvan veden pH-, sähkönjohtavuus-, kloridi-, sulfaatti-, kupari-, antimoni-, kromi- ja molybdeenipitoisuuksista tarkkailujakson ajalta sekä mainittujen suolojen ja alkuaineiden MARA-asetuksen mukaiset hyötykäytön raja-arvot.

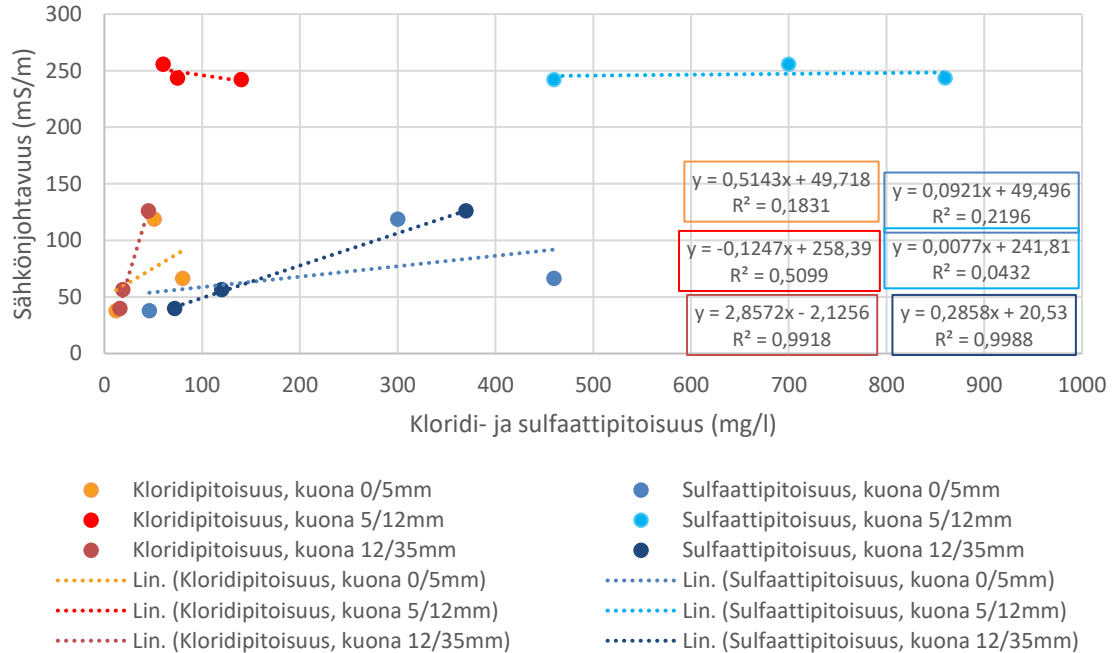
Helsinki-moreeni soveltuu teknisiltä ominaisuuksiltaan hyvin kaatopaikan pintakerrokseen, jolle ei ole asetettu juurikaan teknisiä vaatimuksia ja jossa materiaaliterve on suuri. Helsinki-moreeni soveltuu myös esipeitto- ja muotoilukerrokseen. Rakentamista ja luisien stabiliteettia voi heikentää korkea savipitoisuus ja korkea vesipitoisuus.

Käsittelyn jätteenpolton pohjakuonan lajitteet soveltuvat teknisesti kaatopaikan pintarakenteisiin, esimerkiksi muotoilu- ja esipeittokerrokseen. Karkea lajite soveltuu esimerkiksi kaasunkeräys- ja kuivatuskerrokseen ja hienorakeinen lajite tiivistyskerrokseen runkoaineeksi, mutta haitta-aineiden liukoisuudet ja korkea pH voivat rajoittaa sen käyttöä tai edellyttää rakenteesta purkautuvien vesien käsittelyä. Kuonan sisältämä kloridi ja sulfaatti aiheuttavat korroosioriskiä.

Helsinki-moreenista ja jätteenpolton pohjakuonasta rakennetuista kerroksista purkautuvien vesien kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien voi havaita korreloivan sähkönjohtavuuden kanssa (kuva 68). Lineaarinen korrelaatio on suurempi jätteenpolton pohjakuonakerrosten ja Helsinki-moreenin vesien sulfaattipitoisuuden suhteen (0,80 ja 0,94) kuin kloridipitoisuuden suhteen (0,57 ja 0,61). Paras korrelaatio koerakenteessa B.2 käytetyistä eri kuonalajitteista on karkearakeisen kuonan #12/35 mm kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien ja sähkönjohtavuuden välillä, jotka molemmat ovat noin 1,0 (kuva 69).



**Kuva 68.** Jätteenpolton pohjakuona- ja Helsinki-moreenikerrosten vesien kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien korrelaatiot sähköjohtavuuteen.



**Kuva 69.** Koerakenteen B.2 eri kuonalajitteita sisältävistä rakennekerroksista purkautuvien vesien kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien korrelaatio sähköjohtavuuden kanssa tarkkailujaksolla.

### 6.4.1 Käsitellyn jätteenpolton kuonan ympäristövaikutukset

Koerakenteesta purkautuvien vesien kenttämittauksien ja laboratorioanalyysien perusteella rakennekerroksissa käytetyistä jätteenpolton kuonan lajitteista liukenee kloridia, sulfaattia ja joitakin raskasmetalleja. Verrattuna ensimmäisen raportoidun tarkkailujakson tuloksiin (Reiman 2019) vuodelta 2018 kuonakerroksista purkautuvan veden sähkönjohtavuus on selvästi laskenut. Esimerkiksi koerakenteen B.2 keskikarkean ja hienon jätteenpolton pohjakuonan lajitteita sisältävistä rakennekerroksista purkautuvien vesien sähkönjohtavuudet olivat marraskuussa 2018 tasolla 2 500–2 800 mS/m (Reiman 2019) ja kesäkuussa 2021 ne olivat tasolla 120–240 mS/m (kuva 46).

Liukoisuustestitulosten perusteella raekoolla on vaikutus liukenevien haitta-aineiden määrään. Tyypillisesti hienorakeisista lajitteista liukenee liukoisuuskokeissa suurempia pitoisuuksia. Esimerkiksi eri raekokoisten jätteenpolton pohjakuonien liukoisuustestituloksissa on havaittavissa kyseinen ilmiö (Sormunen 2017, s.57). Pintakoerakenteiden vedenlaadun seurantatulosten perusteella hienorakeisista ja keskikarkeista rakennekerroksista purkautuneiden vesien pitoisuudet ovat pääsääntöisesti korkeampia kuin karkeista. Esimerkiksi koerakenteen B.2 karkearakeisimmasta kuonasta liukenevat pitoisuudet olivat pääsääntöisesti pienempiä kuin hienorakeisemmista kuonista liukenevat pitoisuudet. Kuparipitoisuustulokset poikkeavat tästä, sillä hienorakeisesta kuonasta liukenevat kuparipitoisuudet ovat pienimpiä kuonalajitteita sisältävien rakennekerrosten vesien tuloksista. Kuonarakennekerroksista purkautuvien vesien pH on korkea.

Kuormituslaskelmien perusteella tarkastelluista alkuaineista ja yhdisteistä suurimmat kuormitukset aiheutuivat kloridista ja sulfaatista. Tuloksien perusteella suurin kloridi- ja sulfaattikuormitus aiheutuu koerakenteen B.2 hienojakoista jätteenpolton kuonaa (0/5 mm) sisältävästä kapillaarieristeestä ja keskikarkeaa jätteenpolton kuonaa (5/12 mm) sisältävästä kapillaarikatkosta sekä bitumistabiloidusta kuonasta tehdystä tiivistyskerroksesta koerakenteessa U.1. Teoreettisten liukoisuusaikalaskelmien perusteella haitallisten aineiden liukeneminen kestää pitkään, jopa useita satoja vuosia. Toisaalta olosuhteiden muuttuminen, kuten pH:n lasku, voi vaikuttaa liukoisuusolosuhteisiin ja edelleen liukenemisnopeuteen.

Koerakenteessa A.2 kuivatuskerroksen veteen kulkeutuu tuloksien perusteella haitta-aineita alapuolisesta kuonabentoniittirakenteesta, sillä kuivatuskerroksen veden kloridi- ja sulfaattipitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin kuonakerroksista purkautuvien vesien pitoisuudet. Haitta-aineita kulkeutuu siis muutoinkin kuin veden mukana.



## 6.4.2 Helsinki-moreenin ympäristövaikutukset

Helsinki-moreeni on peräisin useista eri kaivukohteista ja sen koostumus tyypillisesti vaihtelee kohde- ja jopa kuormakohtaisesti, minkä takia sitä tutkitaan eräkohtaisesti. Siitä liukenevien metallien ja suolojen pitoisuudet ovat liukoisuustestien perusteella alhaisia verrattuna VNa 843/2017:n mukaisiin hyötykäyttöraja-arvoihin (taulukko 5). Helsinki-moreenista liukenevat kloridi-, sulfaatti- ja metallipitoisuudet olivat pääsääntöisesti pienempiä kuin kuonalajitteita sisältävistä rakennekerroksista purkautuvien vesien pitoisuudet tarkkailujakson aikaisten laboratoriotulosten perusteella.

Helsinki-moreenin sisältämät haitta-ainepitoisuudet pitäisivät olla alle VNa 214/2007:n mukaisten alempien ohjearvojen (Helsingin kaupungin ympäristölautakunta 2016). Helsinki-moreenin maa-aineksessa on mahdollista olla pieniä määriä rakennusjätettä, pääosin betonia ja tiiltä, joista voi liueta haitta-aineita. Liukoisuudet eivät usein rajoita Helsinki-moreenin hyötykäyttöä, mutta hyötykäyttöä useammin rajoittaa ylijäämämaan tekniset ominaisuudet ja sen sisältämä jäte. Helsinki-moreenista liukenevien pienien metalli-, kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien takia sen ei pitäisi vaikuttaa haitallisesti muihin pintarakenteissa käytettäviin materiaaleihin.

Helsinki-moreenin jäteluonne johtuu siinä olevasta mineraalisesta jätteestä, eikä siinä ole yleensä juurikaan liukenevia haitta-ainepitoisuuksia. Pintakoerakenteen seurantatuloksien perusteella Helsinki-moreenista liukenevat pitoisuudet olivat pääsääntöisesti kuonasta liukenevia pitoisuuksia pienempiä. Yksittäinen poikkeus oli koerakenteen B.2 Helsinki-moreenista rakennetusta pintakerroksesta purkautuvan veden kuparipitoisuus, joka oli huhti- ja kesäkuun vesinäytteenottojen perusteella korkea. Kohonnut arvo voi johtua esimerkiksi betonin palasta liuenneesta kuparista.

Kuormituslaskelmien perusteella Helsinki-moreenista liukenevien haitta-aineiden liukenemisajat ovat lyhyempiä kuin karkeasta ja hienosta jätteenpolton kuonasta sekä bitumistabiloidusta kuonasta liukenevien haitta-aineiden liukenemisajat. Myös haitallisten aineiden liukenevat määrät ovat liukoisuuskokeiden tulosten perusteella pienempiä.

Mikäli maan seassa on paljon betonia tai muuta rakennusjätettä, josta voi liueta kalsiumia, magnesiumia tai muita saostumia aiheuttavia aineita, pitää se huomioida kuivatusrakenteiden mitoituksessa. Samoin on huomioitava liukenevien aineiden ioninvaihtoa kiihdyttävä vaikutus mahdollisiin bentoniittirakenteisiin. Betonin tai laastin aiheuttama korkea pH voi myös vaikuttaa haitallisesti muihin materiaaleihin, mutta toisaalta tyypillisesti vähentää metallien liukoisuutta.

### 6.4.3 Kuivatuskerroksesta purkautuvien vesien laatu

Koerakenteiden kuivatuskerrosten vesien laatuun vaikuttaa rakennekerroksissa käytetty jätteenpolton pohjakuona ja Helsinki-moreeni. Helsinki-moreenin vaikutus kuivatuskerroksesta purkautuviin vesiin ilmenee kohonneina magnesium- ja kalsiumpitoisuuksina. Kuivatuskerrosten vesistä pienimmät kloridi-, sulfaatti- ja metallipitoisuudet ovat koerakenteessa A.1, jossa ei ole käytetty jätteenpolton pohjakuonaa. Korkeimmat kloridi- ja sulfaattipitoisuudet havaittiin koerakenteen A.2 kuivatuskerroksen vedessä. Myös koerakenteen A.1 kenttämittarilla mitattujen sähkönjohtavuuksien ja pH-tuloksien keskiarvot (80 mS/m ja 8,1) ovat muiden koerakenteiden kuivatuskerroksista purkautuviin vesiin verrattuna alhaisimpia (liite 9). Korkeimmat keskiarvot sähkönjohtavuudelle ja pH:lle (231 mS/m ja 9,3) ovat koerakenteen B.2 kuivatuskerroksen vedessä.

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tarkoituksena oli arvioida Ämmässuon pintakoerakenteiden toimintaa tarkkailujakson aikaisten seurantatuloksien ja niiden perusteella tehtyjen vesitaselaskelmien avulla. Lisäksi diplomityön tavoitteena oli tutkia koerakenteiden rakennekerroksissa käytettyjen jätteenpolton pohjakuonan ja Helsinki-moreenin vaikutuksia läpisuotautuvan veden laatuun ja siten arvioida niiden vaikutuksia ympäristöön. Diplomityössä otettiin vesinäytteitä ja tehtiin kenttämittauksia koerakenteiden rakennekerroksista purkautuvista vesistä.

### 7.1 Pintarakenteiden toiminta

Tarkkailujakson virtaamatuloksien perusteella *Valtioneuvoston asetuksen kaatopaikoista 331/2013* periaatteen mukainen pintarakenne A.2, jossa on kuonabentoniitista rakennettu tiivistyskerros, estää tutkimuksessa tarkastelluista pintarakenteista tehokkaimmin veden suotautumista jätetäyttöön. Koerakenne A.1, jossa tiivistyskerroksena on bentoniittimatto, toimii myös tehokkaasti. Kapillaarisulkurakenne B.2 ei virtaamatuloksien perusteella ollut tällaisenaan tehokas pintarakenne, koska suurin osa pintarakenteeseen päätyvästä vedestä suotautui sen läpi.

Pintakerroksen yläosa eli kasvukerros ja siihen muodostuva kasvillisuus on vesitaseen kannalta tärkeä kerros pintarakenteen toiminnassa. Pintavalunta oli tarkkailujaksolla pienempi niissä koerakenteissa, joissa on pintakerroksen päällä erillinen kasvukerros. Pintavalunta oli niissä suuruusluokkaa 1–2 % sadannasta tarkkailujakson aikana. Pintavalunta oli muutenkin pientä. Pintavalunta on suurinta keväällä lumen sulamisvaiheessa. Pintavalunnan ja pintakerroksen vesien osuus vesitaseesta koerakenteissa tarkkailujakson aikana vaihtelee tasolla 8–21 %. Virtaamatulosten perusteella rakenteissa ei havaittu tarkkailujakson aikana haihduntaa, sillä rakenteisiin oli jo varastoitunut vettä ennen tarkkailujakson alkua.

Myös tiivistyskerroksen päällä oleva kuivatuskerros on tärkeä, sillä sitä kautta vesi purkautuu pois rakenteesta. Tehokkaissa pintarakenteissa, joissa on huonosti vettä läpäisevä tiivistyskerros, yli 60 % koerakenteista suotautuvista vesistä purkautui kuivatuskerroksen kautta. Toisaalta rakenteissa, joissa tiivistyskerros oli läpäisevämpi, vesi kulkeutui hyvin vettä johtavassa kuivatuskerroksessa alaspäin ja imeytyi kuivatuskerroksesta suoraan alapuoliseen kerrokseen. Vettä purkautuu kuivatuskerroksesta eniten keväällä sulamisaikaan.

Kapillaarisulkurakenne ei tuloksien perusteella ollut tällaisenaan tehokas pintarakenne, koska lähes 70 % pintarakenteeseen päätyvästä vedestä suotautui sen läpi. Tehokkaan pintarakenteen edellytys on riittävän huonosti vettäläpäisevä tiivistyskerros. Hyvän tiivistyskerroksen sisältävät koerakenteet A.1 ja A.2 läpäisivät tarkkailujakson aikana alle 17 % sadannasta. Tulosten tarkastelussa on otettava huomioon, että tarkkailujakson pituus ei ollut koko vuosia vaan tammikuun lopusta kesäkuun loppuun, joten kevään sulamiskausi painottuu tuloksissa.

Lämpötilamittausten perusteella ohennettu 0,5 m:n paksuinen pintakerros on riittävä suojaamaan alapuolisia kerroksia jäätymiseltä lumipeitteisenä talvena Etelä-Suomen olosuhteissa. Lumettomana talvena pintakerroksen yläosa jäätynä hetkellisesti (liite 6, koerakenne U.1), samoin kuin jäätynä kasvukerroksen yläosa A-koerakenteissakin, mutta se suli uudelleen ulkolämpötilan noustessa plussan puolelle.

## 7.2 Jättemateriaalien vaikutukset läpivirtaavaan veteen

Rakennekerroksista purkautuvan veden laadunseurantatuloksien perusteella Helsinki-moreenista liukenevien haitta-aineiden pitoisuudet ja sähkönjohtavuus ovat pääsääntöisesti pieniä ja sähkönjohtavuus selvästi alle 250 mS/m. Vesien pH-arvot ovat hieman emäksisellä puolella. Helsinki-moreenista ei liukene kuivatusvesiin käsittelyä edellyttäviä haitallisia aineita. Vesissä on kuitenkin liuennutta kalsiumia ja magnesiumia, jotka voivat kiihdyttää bentoniitin ioninvaihtoa ja aiheuttaa saostumia. Mikäli maan seassa on paljon betonia tai muuta rakennusjätettä, josta voi liueta kalsiumia, magnesiumia tai muita saostumia aiheuttavia aineita, pitää se huomioida kuivatusrakenteiden mitoituksessa. Vedden laadunseurantatulosten perusteella käsitellystä jätteenpolton kuonasta liukenevat haitta-ainepitoisuudet olivat suurempia kuin Helsinki-moreenista lienneet pitoisuudet.

Jätteenpolton pohjakuonan rakeisuus vaikuttaa liukenevien haitta-aineiden määrään. Tutkimustuloksien perusteella karkearakeisen jätteenpolton kuonan läpi suotautuvan veden pitoisuudet ovat tarkkailujakson aikana pienempiä kuin hienorakeisen jätteenpolton pohjakuonan läpi suotautuvassa vedessä. Merkittävimmät haitta-aineet ovat kloridit ja sulfaattit, mutta myös antimoni-, molybdeeni- ja kromipitoisuudet ovat etenkin B.2-rakenteen kuonakerroksista purkautuvissa vesissä luonnonvesien pitoisuuksia korkeampia. Jätteenpolton kuonasta purkautuvien vesien kloridi- ja sulfaattipitoisuudet ovat sellaisella tasolla, että ne lisäävät korroosioriskiä. Suurimmat kloridi- ja sulfaattipitoisuudet on havaittu tarkkailukerroksissa, joka kuvaa jätettyttöön purkautuvia vesiä. Myös kuonarakenteenkerrosten päällä olevassa kuivatuskerroksessa (A2.3) on havaittu kohonneita pitoisuuksia, jotka kertovat, että haitta-aineita kulkeutuu myös kuonan yläpuolisiin rakennekerroksiin ja kuivatuskerroksen kautta myös ympärysojaan. Kun huomioidaan virtaama

ja muutetaan vesinäytteistä havaitut pitoisuudet kuormitukseksi, voidaan todeta, että tarkkailukerroksien jälkeen suurimmat kloridi-, sulfaatti- ja raskasmetallikuormitukset aiheuttavat kuonabentoniittirakenteen päällä olevan kuivatuskerroksen kautta purkautuvat vedet (koerakenne A.2, kuvat 55–61). Kuonamateriaalista aiheutuva kuormitus on otettava huomioon kuivatusvesien johtamisessa. Veteen lienneet kalsium- ja sulfaatti-ionit voivat muodostaa kalsiumsulfaattia eli kipsiä, jolloin muodostuu saostumia.

Seurantatuloksien perusteella eri kuonalajitteista rakennetun koerakenteen B.2 rakennekerroksista purkautuvien vesien sähkönjohtavuudet laskevat tulosten perusteella neljässä vuodessa yli 2000 mS:stä/m (Reiman 2019) tasolle 110–240 mS:iä/m (2021). Johtokyvyn pitkäaikavälin laskeva trendi näkyy myös rakennekerrosten jatkuvatoimisten antureiden tuloksissa (liite 6). Kuonarakennekerroksista purkautuvan veden pH on pysynyt mittausten perusteella edelleen korkeana, joten olosuhteet eivät ole muuttuneet raskasmetallien liukenemisen kannalta otollisemmiksi. Koerakenteessa U.1 on kuonakerroksien vesissä antimonipitoisuuksissa tarkkailujakson aikana nouseva trendi.

Kuonarakennekerroksista purkautuvien vesien pH on korkea, tyypillisesti yli 9. Bitumikuonarakennekerroksesta purkautuvien vesien pH on hieman pienempi vaihdellen välillä 8–9. Myös kuivatuskerroksista purkautuvien vesien pH on emäksistä. Korkea pH voi heikentää bentoniitin ja joidenkin geosynteettisten tuotteiden ominaisuuksia, joten se pitää huomioida materiaalivalinnoissa. Koerakenteissa kuonan haitalliset vaikutukset bentoniitin paisumiskykyyn on huomioitu polymeeriparannetulla bentoniitilla (Reiman 2019).

Teoreettisen liukoisuuskoetuloksiin (L/S 10) ja tarkkailujakson aikaisiin hetkellisiin laskennallisiin kuormituksiin perustuvan tarkastelun perusteella osa kuonan haitallisista päästöistä on ohi jo kymmenessä vuodessa ja osa kestää satoja vuosia. Liukoisuusolosuhteet rakenteissa muuttuvat ja kuormitus vaihtelee sadannan mukaan, joten tarkastelu on vain suuntaa antava. Tarkastelun perusteella esimerkiksi bitumikuonan haitta-ainepäästöt jakautuvat huomattavasti pidemmälle ajanjaksolle kuin kuonabentoniitin.

### 7.3 Jatkotoimenpiteet

Diplomityön tuloksien perusteella ehdotetaan uudelleenjärjestelyjä veden laadulliseen mittaukseen. Johtokykyä mittaavia antureita lisätään erityisesti niihin kaivoihin, joihin jätepolton pohjakuonasta oletetaan liukenevan tai kulkeutuvan suoloja. Jatkuvan instrumentoinnin johtokykytulokset sekä kenttä- ja laboratoriomittauksien tulokset olivat pääsääntöisesti linjassa keskenään. Jatkuvatoimiset pH-anturit sakkaantuvat ajan kuluessa ja eivät anna luotettavia tuloksia ennen puhdistamista ja uudelleenkalibroimista.

Koerakenteista purkautuvien vesien laadun seuraamista jatketaan myös kenttämittauksilla ja vesinäytteenotoilla. Seuraava kenttämittaus- ja vesinäytteenottokierros tehdään syksyllä 2021, jotta vuoden 2021 trendi saadaan selvitettyä. Vuodesta 2022 alkaen kenttämittauksia ja vesinäytteenottoja tehdään kaksi kertaa vuodessa, jolloin ne ajoittuvat keväälle ja syksylle.

Koerakenteesta U.1 purkautuvat vesimäärätulokset viittaavat mahdollisiin puutteisiin tai rakenteellisiin virheisiin vesien keruussa ja johtamisissa. Ehdotuksena on, että U.1 rakenteelle tehdään vastaavat korjaustoimenpiteet kuin tehtiin koerakenteille A.1 ja A.2 vuonna 2020 eli kaivetaan koerakenteen alapäästä rakenteet esiin tiivistyskerroksen yläpintaan saakka ja korjataan rakenteet tarvittaessa.

## LÄHTEET

Apiwantragoon, P., Benson, C.H., Albright, W.H. (2015). Field Hydrology of Water Balance Covers for Waste Containment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol.141(2)

ASROCKS-hanke: Kokonaispitoisuudet. verkkosivu Saatavissa (viitattu 5.2.2021): <http://projects.gtk.fi/ASROCKS/ohjeistus/suosituksia/Laboratorioanalyysit/Kokonaispitoisuudet/>

Astrup, T., Muntoni, A., Polettini, A., van Gerven, T., van Zomeren, A. (2016). Treatment and reuse of incineration bottom ash. A Chapter in a Book: Prasad, M.N.V., Shih, K. (eds.) *Environmental Materials and Waste: Resource Recovery and Pollution Prevention*. Academic Press. Amsterdam, 728 p.

Beck-Broichsitter, S., Gerke, H.H., Horn, R. (2018). Shrinkage Characteristics of Boulder Marl as Sustainable Mineral Liner Material for Landfill Capping Systems. *Sustainability*. Vol.10(11):4025–

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

Bröckl, M., Kiuru, H., Heads, S., Kämäräinen, K., Patronen, J., Luoma-aho, K., Armila, N., Sipilä, E., Semkin, N. (2021). Jätteenpolton kiertotalous- ja ilmastovaikutuksiin vaikuttaminen eri ohjauskeinoin. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:8. Helsinki, 164 s.

CEWEP (2017). Bottom ash fact sheet. Saatavissa (viitattu 17.11.2021): <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/09/FINAL-Bottom-Ash-factsheet.pdf>

Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hartlén, J., Hjelm, O., Kosson, D.S, Sawell, S.E., van der Sloot, H.A., Vehlow, J. (eds.) (1997) *Municipal Solid Waste Incinerator Residues*. Studies in Environmental Science. Vol.67, 974p.

Diotti, A., Galvin, A.P., Piccinalli, A., Plizzari, G., Sorlini, S. (2020). Chemical and Leaching Behavior of Construction and Demolition Wastes and Recycled Aggregates, *Sustainability*, Vol. 12(24): 10326

Domenico, P.A., Schwartz, F.W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wileys & Sons. New York, 494 p.

Elert, M., Fanger, G., Höglund, L.O., Jones, C., Suér, P., Wadstein, E., Bjerre-Hansen, J., Groen, C. (2006). Laktester för riskbedömning av förorenade områden. Huvudrapport och underlagsrapport 1a. Rapport 5535. Natursvårdverket. Stockholm, 82 p.

Finnsementti (2012). Suomalainen sementti. Saatavissa (viitattu 10.10.2021): [http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS\\_Suomalainen\\_sementti\\_kirjanen\\_071112.pdf](http://www.finnsementti.fi/files/pdf/FS_Suomalainen_sementti_kirjanen_071112.pdf)

Gavrilescu, M. (2014). Colloid-Mediated Transport and the Fate of Contaminants in Soils. A Chapter in a Book: Fanum, M. (ed.) *The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection*. Elsevier B.V., pp. 397-451

Heikkinen, P. (2000). Haitta-aineiden sitoutuminen ja kulkeutuminen maaperässä. Tutkimusraportti 150. Geologian Tutkimuskeskus, 74 s.

Helsingin kaupungin ympäristölautakunta (2016). Päätös 22.11.2016 Kiinteistöviraston ympäristölupahakemus kynnysarvomaiden hyötykäytölle Jätkäsaaren alueella. Päätös 22.11.2016. Diaarinumero HEL 2016-009366. Saatavissa (viitattu 16.11.2021): <https://dev.hel.fi/paatokset/asia/hel-2016-009366/ylk-2016-17/>

Henken-Mellies, W.-U., Schweizer, A. (2011). Long-term performance of landfill covers – results of lysimeter test fields in Bavaria (Germany). Waste management & research. Vol 29(1), pp. 59–68

Hiscock, K.M., Bense, V.F. (2014). Hydrogeology: principles and practice. 2<sup>nd</sup> ed. John Wileys & Sons, Chichester, 538 p.

Hjelmar, O. (1996). Disposal strategies for municipal solid waste incineration residues. Journal of Hazardous Materials 47, pp.345–368

Holm, O., Simon, F.-G. (2017) Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany. Waste Management. Vol 59, pp. 229–236

HSY (2020). Ilmakuva koerakenteiden kasvillisuudesta vuodelta 2020.

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

Hyks, J., Astrup, T., Christensen, T.H. (2009). Long-term leaching from MSWI air-pollution-control residues: Leaching characterization and modeling. Journal of Hazardous Materials, Vol.162(1), pp. 80–91

Hämäläinen, H. (2020). Tiedoksianto teams-keskustelussa 10.3.2020

Hämäläinen, H. (2021). Tiedoksianto sähköpostikeskustelussa 8.3.2021

Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M., Pohjakallio, M. (2018). Tekniikan kemia. 14., uudistettu painos. Edita:Helsinki, 420 s.

Ilmastokestävä kaupunki -hanke (2014). Alueellinen hulevesisuunnitelma: Turku, Kaarina, Lieto, Raisio ja Rusko. Euroopan unioni. Saatavissa (viitattu 4.12.2021): [https://ilmastotyokalut.fi/files/2014/11/3.1.Alueellinen-hulevesisuunnitelma\\_raportti.pdf](https://ilmastotyokalut.fi/files/2014/11/3.1.Alueellinen-hulevesisuunnitelma_raportti.pdf)

Ilmatieteenlaitos (2021). Säähavainnot Espoo Nuuksio (1.1.2018–30.6.2021). Saatavissa (viitattu 10.11.2021): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>

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

InfraRYL (2018). Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Maa-, pohja- ja kalliorakenteet. Rakennustietosäätiö RTS sr. 424 s.

Izquierdo, M., López-Soler, Á., Vazquez Ramonich, E., Barra, M., Querol, X. (2002). Characterisation of bottom ash from municipal solid waste incineration in Catalonia: Characterisation of bottom ash. Journal of chemical technology and biotechnology. Vol. 77(5), pp. 576-583



Jätelaki (646/2011). Saatavissa (viitattu 3.3.2021):  
[https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646?search\[type\]=pika&search\[pika\]=j%C3%A4telaki%202011](https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646?search[type]=pika&search[pika]=j%C3%A4telaki%202011)

Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J., Koivuhuhta, A., Korhonen, T., Luukkanen, S., Mörsky, P., Neitola, R., Punkkarinen, H., Wahlström, M. (2010). Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi. VTT Tiedotteita 2567, 98 s.

Kanti Sen, T., Khilar, K. C. (2006). Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media. *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 119(2), pp. 71–96

Kiirikki, M. (2021a). Tiedoksianto teams-palaverissa 28.6.2021

Kiirikki, M. (2021b). Tiedoksianto sähköpostikeskustelussa 8.7.2021

Kiirikki, M. (2021c). Tiedoksianto, teams-palaverissa 21.9.2021

Kjeldsen, P., Beaven, R. (2010). Landfilling: Hydrology. A Chapter in a Book: Christensen, T. H. (ed.) *Solid Waste Technology & Management*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. pp. 709–733

Klein, R., Baumann, T., Kahapka, E., Niessner, R. (2001). Temperature development in a modern municipal solid waste incineration (MSWI) bottom ash landfill with regard to sustainable waste management, *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 83(3), pp. 265–280

Kosson, D.S., van der Sloot, H.A., Eighmy, T.T. (1996). An approach for estimation of contaminant release during utilization and disposal of municipal waste combustion residues. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 47(1), pp. 43–75

Kuusela-Lahtinen, A., Tarvainen, T., Backman, B., Hänninen, P., Reinikainen, J., Niskala, K. (2012). Metalleilla pilaantuneiden maa-ainesten liukoisuusselvitykset. VTT Tutkimusraportti VTT-R-06935-12, 56 s.

Kuusela-Lahtinen, A., Vahanne, P. (2005). Maaperän heterogeenisuuden vaikutus haitta-aineiden kulkeutumiseen pilaantuneiden maiden riskiarvioinnissa. VTT Tiedotteita 2296, 56 s.

Laurila, T., Rainne, J., Hatakka, J., Tuovinen, J., Aurela, M., Kuisma-Granvik, S., Karhu, K., Juntunen, H., Kopalainen, S. (2014). Ämmäsuon jätteenkäsittelykeskuksen kaatopaikkojen metaanin ja hiilidioksidin sekä haihdunnan mikrometeorologiset päästömittaukset tammikuu – joulukuu 2014. Raportti HSY -kuntayhtymälle, 38 s.

Luo, H., Cheng, Y., He, D., Yang, E.-H. (2019). Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash. *Science of The Total Environment*. Vol. 668, pp. 90–103

Melchior, S., Sokollek, V., Berger, K., Vielhaber, B., Steinert, B. (2010). Results from 18 Years of In Situ Performance Testing of Landfill Cover Systems in Germany. *Journal of environmental engineering*. Vol136(8), pp. 815–823

Metropolilab (2019a). Helsinki-moreenin liukoisuustestitulokset.

Metropolilab (2019b). Helsinki-moreenin liukoisuustestitulokset.

Mäkelä, T. (2021a). Tiedoksianto sähköpostikeskustelussa 7.7.2021

Mäkelä, T. (2021b). Tiedoksianto sähköpostikeskustelussa 16.8.2021

Ong, S.K., Kolz, A. (2007). Chemical Treatment Technologies. A Chapter in A Book: Bhandari, A., Surampalli, R.Y., Champagne, P., Ong, S.K., Tyagi, R.D., Lo, I.M.C. (eds.) Remediation Technologies for Soils and Groundwater. American Society of Civil Engineers, pp. 79–132

Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P., Äijö, H. (2016). Maan vesi- ja ravinnetalous: ojitus, kastelu ja ympäristö. 2. täydennetty painos. Salaojayhdistys ry. Helsinki, s. 488

Ramboll (2018). Koekenttien rakentaminen – suunnitelmakartta 1:200

Ramboll (2021). Vantaan Energian jätevoimalan pohjakuonan vastaavuustestaus 2020. Käsitellyt kuonajakeet, 7 s.

Reiman, A. (2019). Kaatopaikan pintarakenteen toiminta: Ämmässuon koerakenteet. Diplomityö. Tampereen yliopisto, 180 s.

São Mateus, M. do S.C., Machado, S.L., Barbosa, M.C. (2012). An attempt to perform water balance in a Brazilian municipal solid waste landfill. Waste Management. Vol.32(3), pp. 471–481

Saveyn, H., Eder, P., Garbarino, E., Muchova, L., Hjelmar, O., van deer Sloot, H., Comans, R., van Zomeren, A., Hyks, J., Oberender, A. (2014). Study on methodological aspects regarding limit values for pollutants in aggregates in the context of the possible development of end-of-waste criteria under the EU Waste Framework Directive. Report EUR 26769. Luxembourg, 197 p.

Schaschke, C. (2014). A Dictionary of Chemical Engineering. Oxford: Oxford University Press, 421 p.

Scheutz, C., Kjeldsen, P. (2010). Landfill Top Covers. A Chapter in a Book: Christensen, T. H. (ed.) Solid Waste Technology & Management. Chichester, UK: John Wiley & Sons. pp. 830–840

SFS-EN 12457-3 (2002). Jätteiden karakterisointi. Liukoisuus. Rakeisten jättemateriaalien ja lietteiden liukoisuuden laadunvalvontatesti. Osa 3: kaksivaiheinen ravistelutesti uuttoliuksen ja kiinteän jätteen suhteessa 2 l/kg ja 8 l/kg materiaaleille, joiden kiintoaineksen osuus on suuri ja raekoko alle 4 mm (raekoon pienentäminen tarvittaessa). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 52 s.

SFS-EN 14405 (2017). Characterization of waste. Leaching behaviour test. Up-flow percolation test (under specified conditions). Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 37 p.

Sormunen, L.A. (2017). Recovered Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate-Like Products for Civil Engineering Structures. Tampere University of Technology. Publication 1503, 93 p.

Sormunen, L.A., Rantsi, R. (2015). To fractionate municipal solid waste incineration bottom ash: Key for utilisation? Waste Management & Research. Vol.33(11), pp. 995–1004

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. (1352/2015). Saatavissa (viitattu 28.11.2021):

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151352>

Sosiaali- ja terveysministeriön päätös pienten yksiköiden talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. (953/1994). Saatavissa (viitattu 1.12.2021):

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1994/19940953>

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

Suomen ympäristökeskus (2008). Kaatopaikan käytöstä poistaminen ja jälkihoito. Ympäristöhallinnon ohjeita 1. 155 s.

Suomen ympäristökeskus (2002). Kaatopaikan tiivistysrakenteet. Ympäristöopas 36. Helsinki, 142 s.

Todorovic, J., Ecke, H. (2006). Treatment of MSWI Residues for Utilization as Secondary Construction Minerals: A Review of Methods. Minerals & energy. Raw materials report. Vol.20(3-4), pp. 45–59

Travar, I., Lidelöw, S., Andreas, L., Tham, G., Lagerkvist, A. (2009). Assessing the environmental impact of ashes used in a landfill cover construction. Waste Management. Vol. 29(4), pp. 1336–1346

Uuksulainen, J., Korhonen, T., Kuisma-Granvik, S. (2021). Ämmässuon jätteenkäsittelykeskuksen toiminta vuonna 2020. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä.

Vaara, P. (2011). Ylijäämämassojen vastaanotto palvelutoimintana pääkaupunkiseudulla – hankintaklinikka. Loppuraportti 31.5.2011. Asunto- toimitila- ja rakennuttajaliitto RAKLI RY, 19 s.

Vahanen (2018). Valvontaraportti 27. –31.8.2018

Vahanen (2021). Kaivokaavio – Koepintarakenteet R1 alue. Kaivot ja instrumentit

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (843/2017). Saatavissa (viitattu 16.11.2021):

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista (331/2013). Saatavissa (viitattu 3.3.2021):

<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130331#L2P7>

Valvira (2020). Talousvesiasetuksen soveltamisohje. Osa 3: Enimmäisarvojen perusteet. Diaarinumero V/33102/2020, 54 s.

van Zomeren, A., Comans, R.N.J. (2009). Carbon speciation in municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash in relation to facilitated metal leaching. Waste Management, Vol. 29(7), pp.2059–2064

Wahlström, M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Leino-Forsman, H., Mäkelä, E., Olin, M., Juvankoski, M. (1999). Maarakentamisessa käytettävien teollisuuden sivutuotteiden riskinarviointi. VTT Tiedotteita 1995. Espoo, 79 s.

Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J. (1997). Ympäristötekijät ja niiden tutkiminen maarakentamisessa hyötykäytettävien materiaalien liukoisuustutkimuksissa. VTT Tiedotteita 1852, 78 s.

Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Eskola, P., Vahanne, P., Mäkelä, E., Vikman, M., Venelampi, O., Hämäläinen, J., Frilander, R. (2004). Kaatopaikkojen tiivistysmateriaaleina käytettävien teollisuuden sivutuotteiden ympäristökelpoisuus. VTT Tiedotteita 2246. 84 s.

Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Walavaara, M., Vahanne, P. (2001). Teollisuusjätteiden kaatopaikkakelpoisuus. VTT Tiedotteita 2086. Espoo, 69 s.

Westman C.J. (1991). Maaperä ja sen toiminta kasvualustana. Helsingin yliopiston metsänhoitotieteen laitoksen tiedonantoja N:o 67. Helsinki, 33 s.

YIT (2020). Koepintarakenteiden tarkemitatut pinta-alat.

Ympäristöministeriö (2014). Pilaantuneen maa-alueen riskinarviointi ja kestävä riskinhallinta. Ympäristöhallinnan ohjeita 6. Helsinki, 235 s.

Yong, R.N., Mohamed, A.M.O, Warkentin, B.P. (1992). Principles of Contaminant Transport in Soils. Developments in Geotechnical Engineering 73. Elsevier, 327 p.

## LIITE 1. VALOKUVALIITE



Yleiskuva koerakenteilta 02/2021



Koerakenteen A.1 lumipeite 03/2021



Yleiskuva lumimääristä koekentillä 03/2021



Sula koerakenne A.2 04/2021



Koerakenteen B.2 nurmi 05/2021



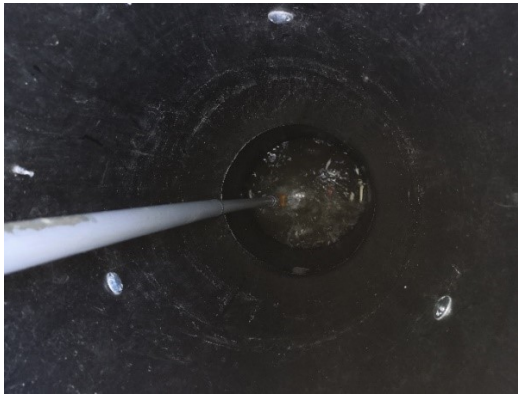
Koerakenteen U.1 kasvillisuus 06/2021



Vesinäytteen kaataminen näytteenottimesta  
06/2021



Kenttämittauksen aloittaminen kaivosta B2.3  
06/2021



Vesipatsaan homogenisointi sekoittamalla  
06/2021



Ysi Pro DDS -mittari säilytyskotelossaan  
06/2021

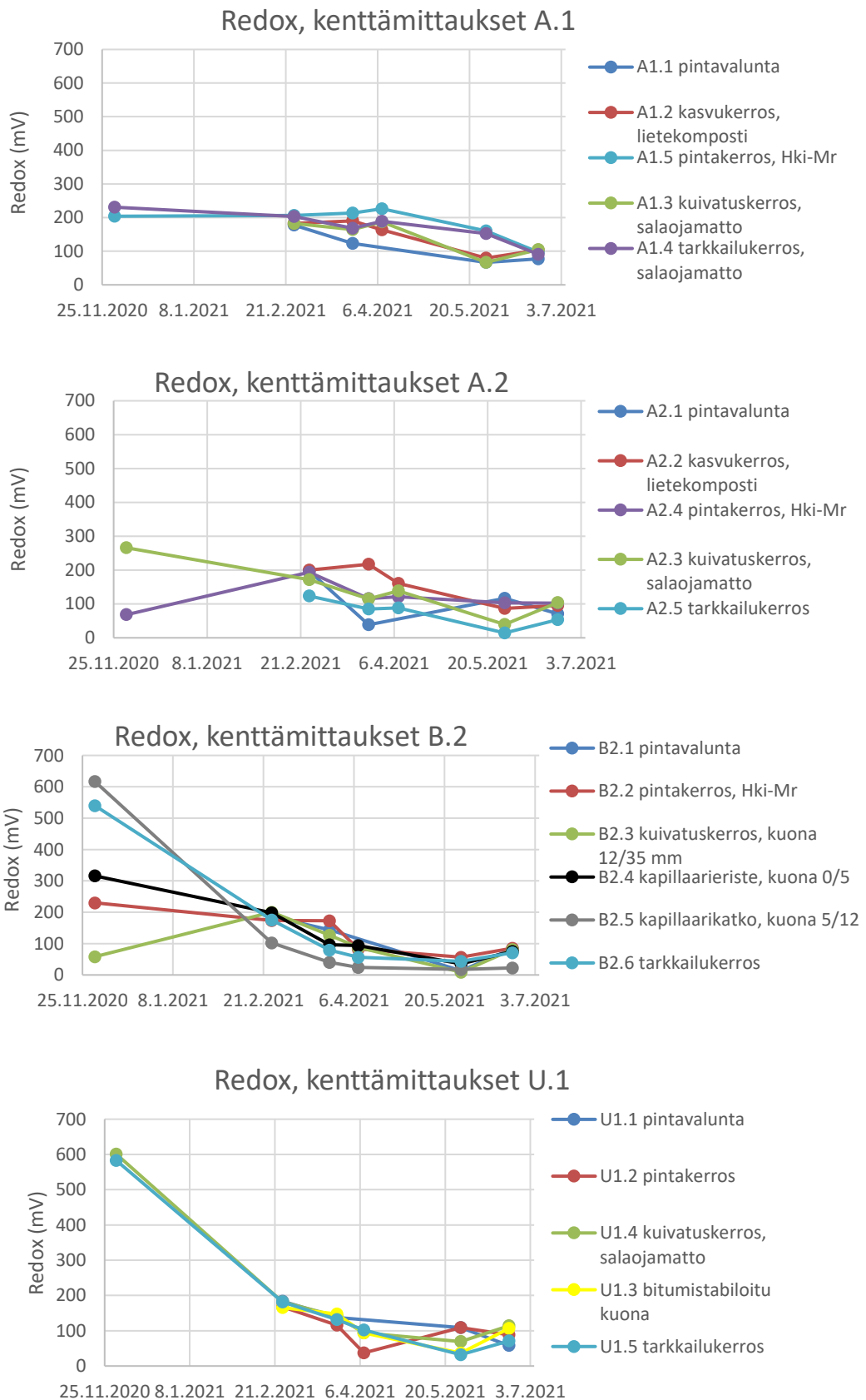


Veden pinnankorkeusmittari 06/2021



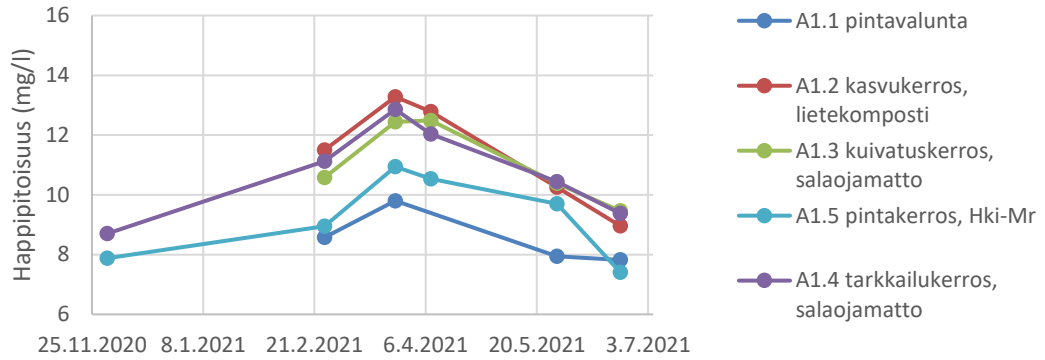
Vesinäytteen otin 06/2021

## LIITE 2. VEDEN REDOX-KENTTÄMITTAUSTEN TULOKSET

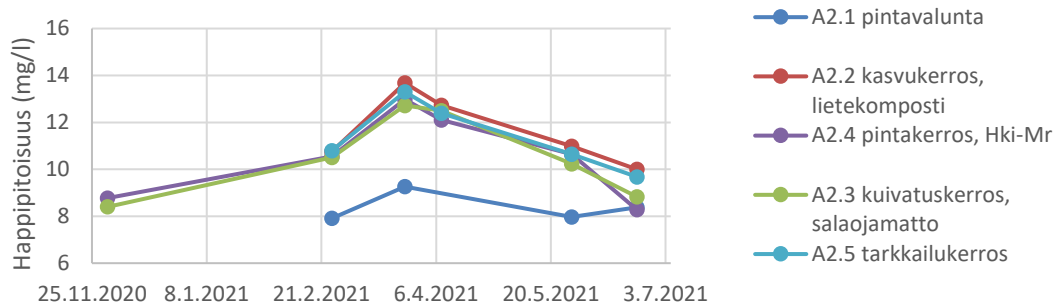


# LIITE 3. VEDEN HAPPIPITOISUUDEN KENTTÄMITTAUSTULOKSET

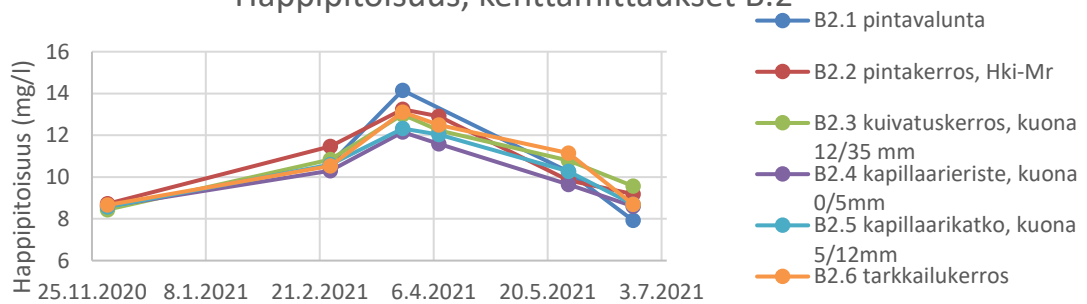
## Happipitoisuus, kenttämittaukset A.1



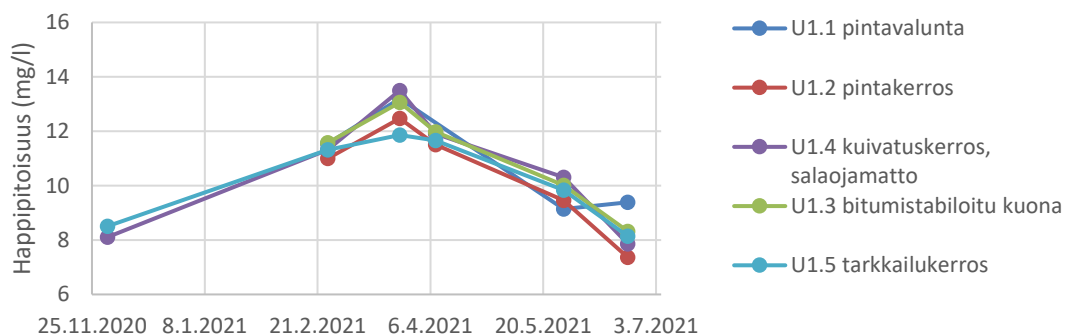
## Happipitoisuus, kenttämittaukset A2



## Happipitoisuus, kenttämittaukset B.2



## Happipitoisuus, kenttämittaukset U.1





## LIITE 4. LABORATORIOANALYYSIMENETELMÄT

<b>Analyysi</b>	<b>Menetelmä</b>
Liukoinen elohopea vesinäytteestä	SFS-EN 1483:2007(Kumottu)
Liukoiset metallit jätevesinäytteestä, ICP-AES	ISO 11885
Liunneen hiilen määrittäminen vedestä	SFS-EN 1484
pH vedestä	ISO 10523
Sähkönjohtavuus vesinäytteestä	SFS-EN 27888
Kemiallinen hapenkulutus COD(Mn) luonnonvedestä	SFS-3036
Liunneiden aineiden kokonaispitoisuus, TDS, vedestä	SFS-EN 15216
Nitraatti/Nitraattityppi vedestä, CFA	SFS-EN ISO 13395
Nitriitti/Nitriittityppi vedestä, CFA	SFS-EN ISO 13395
Ammonium/Ammoniumtyppi vedestä, CFA	SFS-EN ISO 11732
Sameus vedestä	ISO 7027-1
Kokonaisfosfori vedestä, CFA	ISO 15681-2
Kokonaistyyppi vedestä, CFA	ISO 29441
Anionit vedestä, IC	SFS-EN ISO 10304-1

## LIITE 5. KOERAKENNEKERROSTEN LÄMPÖTILAHAVAINNOT

Lämpötila (°C) (8.11.2018-31.12.2018)					
Anturin tunnus		Maksimi	Minimi	Keskiarvo	Keskihajonta
1	Kasvukerros 50 mm	8,0	-2,7	0,9	2,6
2	Kasvukerros 150 mm	7,6	-0,6	1,6	2,5
3	Pintakerros 50 mm	7,4	0,6	2,5	2,4
4	Pintakerros 250 mm	7,5	1,2	3,2	2,3
5	Pintakerros 450 mm	7,8	1,6	3,9	2,3
6	Pintakerros 650 mm	8,4	2,4	4,8	2,2
7	Hieno kuona 50 mm	10,1	4,2	6,8	2,0
8	Keskikarkea kuona 50 mm	10,4	4,7	7,4	1,9
9	Keskikarkea kuona 150 mm	11,0	5,3	7,9	1,9
10	Pintakerros 50 mm	11,6	6	8,7	1,8
12	Pintakerros 350 mm vasen	7,2	-0,8	1,3	2,5
13	Karkea kuona 150 mm	3	2,5	2,7	0,1
14	Karkea kuona 350 mm	5	4,1	4,5	0,2
15	Hieno kuona 150 mm oikea	12,7	7,3	9,8	1,8
16	Hieno kuona 150 mm vasen	12,7	7,3	9,9	1,8
17	Hieno kuona 350 oikea mm	13,3	7,8	10,4	1,8
18	Hieno kuona 350 vasen mm	13,1	7,7	10,3	1,8
19	Keskikarkea kuona 50 mm	11,5	9,8	10,6	0,5
20	Keskikarkea kuona 150 mm	11,1	9,5	10,2	0,4
21	Helsinki-moreeni 50 mm	8,3	-5,8	0,3	2,7
22	Helsinki-moreeni 150 mm	8,0	-4,4	0,8	2,6
23	Kasvukerros 50 mm	8,0	-3,6	-0,1	1,9
24	Kasvukerros 150 mm	7,5	-1,5	0,3	1,8
25	Bitumikuona (1)	10,2	5,6	8,2	1,7
26	Bitumikuona (2)	9,3	4,1	6,9	1,9
27	Bitumikuona (3)	8,8	3,2	6,0	2,1
28	Bitumikuona (4)	8,5	2,8	5,5	2,2
29	Bitumikuona (5)	7,8	0,7	3,3	2,5
30	Bitumikuona (6)	9,3	4,1	6,9	1,9
31	Yhdistelmäanturi, bitumi- kuona (1)	9	8,8	9	0,1
32	Yhdistelmäanturi, bitumi- kuona (2)	8,3	8	8,2	0,1

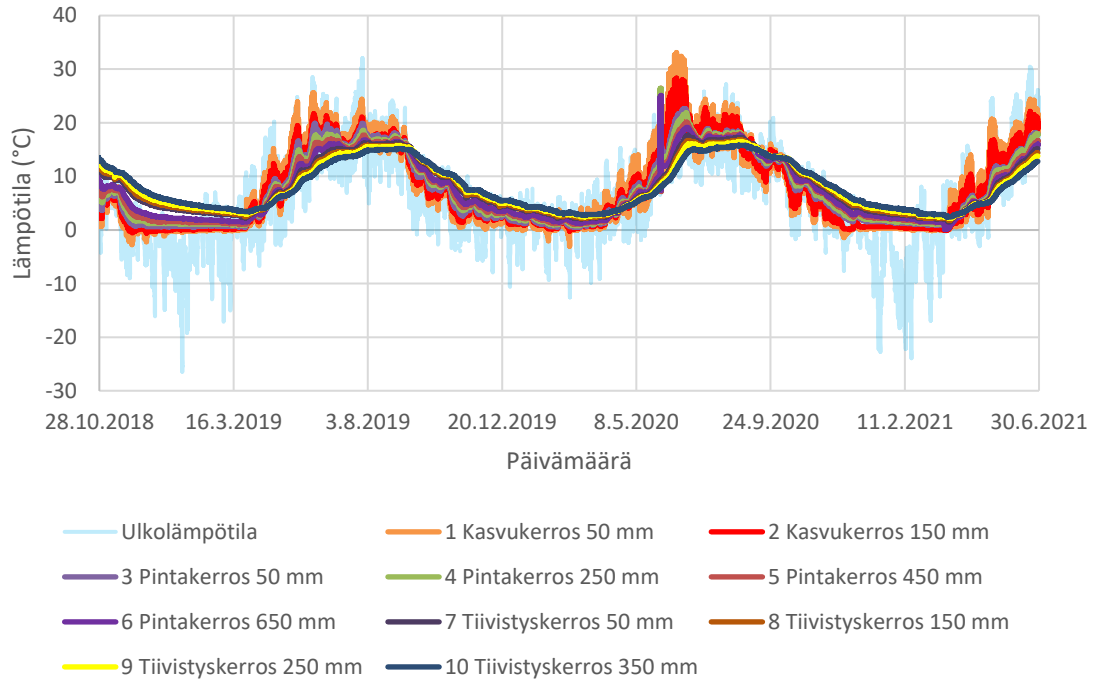
<b>Lämpötila (°C) (1.1.2019-31.12.2019)</b>					
<b>Anturin tunnus</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Minimi</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>Keskihajonta</b>	
1	Kasvukerros 50 mm	25,6	-1,1	8,1	7,6
2	Kasvukerros 150 mm	21,7	-0,1	8,0	7,0
3	Pintakerros 50 mm	19,9	0,5	8,2	6,7
4	Pintakerros 250 mm	18,6	0,9	8,2	6,3
5	Pintakerros 450 mm	17,7	1,1	8,2	6,0
6	Pintakerros 650 mm	16,8	1,5	8,2	5,6
7	Hieno kuona 50 mm	16,2	2,3	8,8	4,9
8	Keskikarkea kuona 50 mm	15,8	2,5	8,7	4,7
9	Keskikarkea kuona 150 mm	15,7	3,0	8,8	4,5
10	Pintakerros 50 mm	15,2	3,4	8,8	4,1
12	Pintakerros 350 mm vasen	28,3	-0,3	8,7	8,6
13	Karkea kuona 150 mm	23,7	1,6	9,4	7,2
14	Karkea kuona 350 mm	21,7	2,6	9,7	6,4
15	Hieno kuona 150 mm oikea	17,7	4,4	10,0	4,5
16	Hieno kuona 150 mm vasen	17,7	4,4	10,0	4,6
17	Hieno kuona 350 oikea mm	17,3	4,7	10,0	4,3
18	Hieno kuona 350 vasen mm	17,2	4,5	9,9	4,3
19	Keskikarkea kuona 50 mm	15,5	5,8	10,2	3,3
20	Keskikarkea kuona 150 mm	16,2	5,7	10,3	3,5
21	Helsinki-moreeni 50 mm	33,8	-1,1	8,1	8,6
22	Helsinki-moreeni 150 mm	33,4	0,1	8,6	8,4
23	Kasvukerros 50 mm	34,9	-1,4	8,8	9,0
24	Kasvukerros 150 mm	31,1	-0,3	8,7	8,5
25	Bitumikuona (1)	19,5	2,7	11,0	5,5
26	Bitumikuona (2)	21,3	2,1	11,1	6,1
27	Bitumikuona (3)	22,6	1,7	11,2	6,6
28	Bitumikuona (4)	23,0	1,5	11,1	6,8
29	Bitumikuona (5)	26,6	0,9	11,2	7,7
30	Bitumikuona (6)	21,3	2,1	11,1	6,1
31	Yhdistelmäanturi, bitumi-kuona (1)	19,8	1,9	10,4	5,8
32	Yhdistelmäanturi, bitumi-kuona (2)	21,4	1,4	10,4	6,3

<b>Lämpötila (°C) (1.1.2020-31.12.2020)</b>					
<b>Anturin tunnus</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Minimi</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>Keskihajonta</b>	
1 Kasvukerros 50 mm	33,1	-3,0	8,3	7,8	
2 Kasvukerros 150 mm	28,3	-0,2	8,5	7,5	
3 Pintakerros 50 mm	26,2	0,5	8,6	6,8	
4 Pintakerros 250 mm	26,4	0,8	8,6	6,6	
5 Pintakerros 450 mm	24,2	1,1	8,6	6,2	
6 Pintakerros 650 mm	25,1	1,3	8,6	6,0	
7 Hieno kuona 50 mm	17,7	2,1	8,8	5,5	
8 Keskikarkea kuona 50 mm	16,8	2,2	8,8	5,2	
9 Keskikarkea kuona 150 mm	16,5	2,5	8,8	5,0	
10 Pintakerros 50 mm	15,8	2,8	8,7	4,7	
12 Pintakerros 350 mm vasen	26,2	-0,1	8,7	7,6	
13 Karkea kuona 150 mm	21,7	1,3	9,0	6,5	
14 Karkea kuona 350 mm	19,3	2,1	9,1	5,8	
15 Hieno kuona 150 mm oikea	15,7	3,2	9,0	4,5	
16 Hieno kuona 150 mm vasen	15,7	3,2	9,0	4,5	
17 Hieno kuona 350 oikea mm	15,4	3,5	9,0	4,3	
18 Hieno kuona 350 vasen mm	15,4	3,4	8,9	4,3	
19 Keskikarkea kuona 50 mm	14,1	4,4	9,0	3,5	
20 Keskikarkea kuona 150 mm	14,7	4,2	9,2	3,7	
21 Helsinki-moreeni 50 mm	34,2	-5,9	8,2	7,7	
22 Helsinki-moreeni 150 mm	30,1	-3,3	8,7	7,5	
23 Kasvukerros 50 mm	30,1	-4,0	8,8	7,5	
24 Kasvukerros 150 mm	25,6	-1,5	8,6	7,0	
25 Bitumikuona (1)	16,4	3,1	10,9	4,4	
26 Bitumikuona (2)	17,8	2,5	11,1	4,8	
27 Bitumikuona (3)	19,1	2,2	11,3	5,1	
28 Bitumikuona (4)	19,5	2,0	11,2	5,2	
29 Bitumikuona (5)	22,7	1,2	11,5	5,9	
30 Bitumikuona (6)	17,8	2,6	11,1	4,8	
31 Yhdistelmäanturi, bitumi-kuona (1)	16,2	2,3	10,3	4,5	
32 Yhdistelmäanturi, bitumi-kuona (2)	17,6	1,8	10,5	4,9	

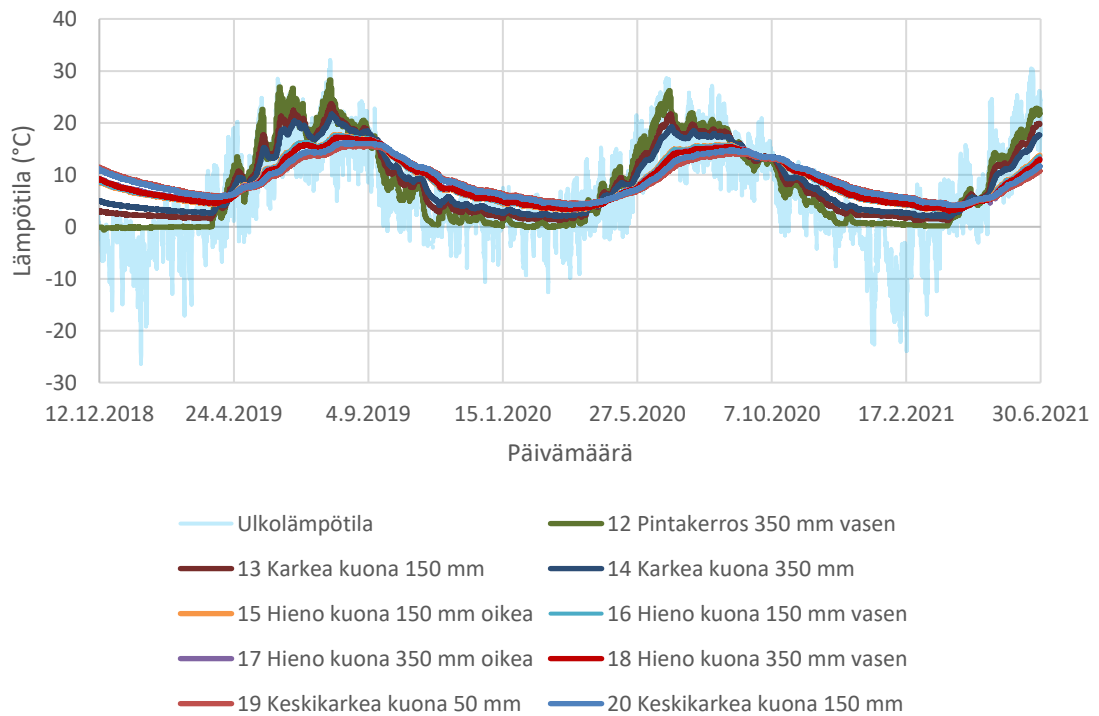
<b>Lämpötila (°C) (1.1.2021-30.6.2021)</b>					
<b>Anturin tunnus</b>	<b>Maksimi</b>	<b>Minimi</b>	<b>Keskiarvo</b>	<b>Keskihajonta</b>	
1 Kasvukerros 50 mm	24,4	-0,1	5,9	7,2	
2 Kasvukerros 150 mm	22,1	0	5,7	6,6	
3 Pintakerros 50 mm	18,2	0,7	5,5	5,5	
4 Pintakerros 250 mm	17,9	0,7	5,4	5,2	
5 Pintakerros 450 mm	16,7	0,7	5,2	4,7	
6 Pintakerros 650 mm	16,0	0,1	5,1	4,4	
7 Hieno kuona 50 mm	16,8	1,5	5,3	3,8	
8 Keskikarkea kuona 50 mm	17,7	1,5	5,2	3,5	
9 Keskikarkea kuona 150 mm	13,8	2,2	5,3	3,2	
10 Pintakerros 50 mm	12,8	2,4	5,3	2,8	
12 Pintakerros 350 mm vasen	22,8	0,2	5,8	7,1	
13 Karkea kuona 150 mm	19,9	1,2	5,9	5,6	
14 Karkea kuona 350 mm	17,7	1,9	5,8	4,6	
15 Hieno kuona 150 mm oikea	13,8	3,2	5,8	2,8	
16 Hieno kuona 150 mm vasen	13,7	3,1	5,7	2,8	
17 Hieno kuona 350 oikea mm	13,1	3,4	5,8	2,5	
18 Hieno kuona 350 vasen mm	13,0	3,1	5,7	2,5	
19 Keskikarkea kuona 50 mm	10,8	4,2	6,1	1,6	
20 Keskikarkea kuona 150 mm	11,7	4,1	6,2	1,9	
21 Helsinki-moreeni 50 mm	28,6	0,0	6,0	7,6	
22 Helsinki-moreeni 150 mm	25,9	0,3	6,4	7,3	
23 Kasvukerros 50 mm	23,9	-0,1	5,7	6,9	
24 Kasvukerros 150 mm	21,5	0,1	5,5	6,4	
25 Bitumikuona (1)	14,9	2,7	5,9	3,3	
26 Bitumikuona (2)	16,4	2,1	5,8	4,1	
27 Bitumikuona (3)	17,5	1,8	5,9	4,6	
28 Bitumikuona (4)	17,8	1,6	5,8	4,8	
29 Bitumikuona (5)	20,2	0,9	6,0	5,9	
30 Bitumikuona (6)	16,5	2,1	5,8	4,1	
31 Yhdistelmäanturi, bitumi-kuona (1)	15	1,9	5,2	3,6	
32 Yhdistelmäanturi, bitumi-kuona (2)	16,1	1,4	5,2	4,2	

## LIITE 6. LÄMPÖTILA-, MAANKOSTEUS- JA JOHTOKYKYINSTRUMENTOINNIN TULOKSET

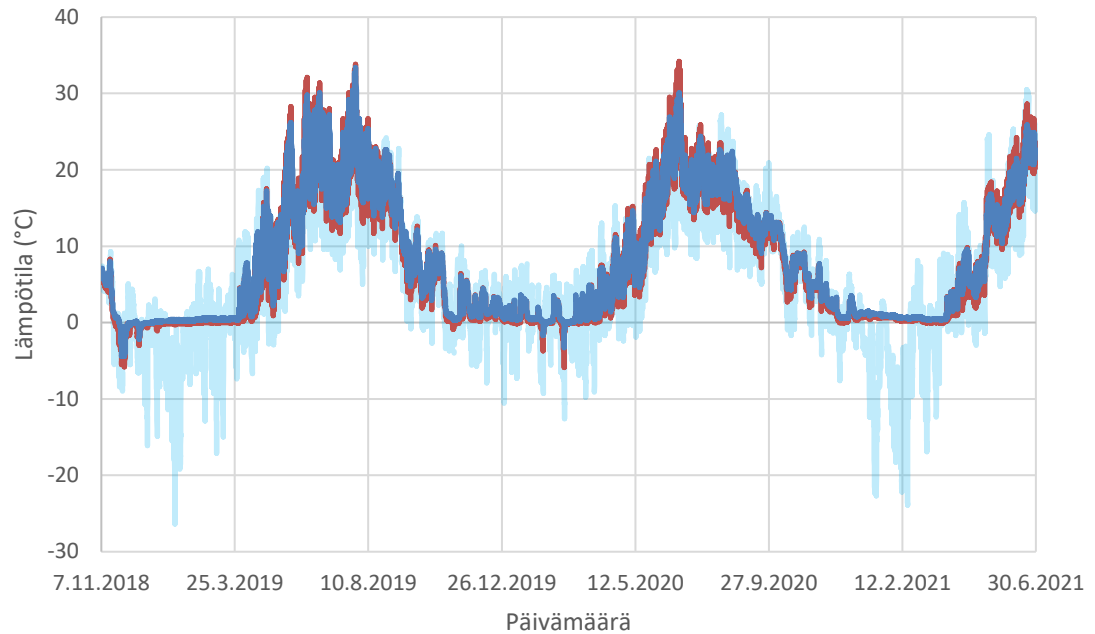
Lämpötila A.1 ja A.2



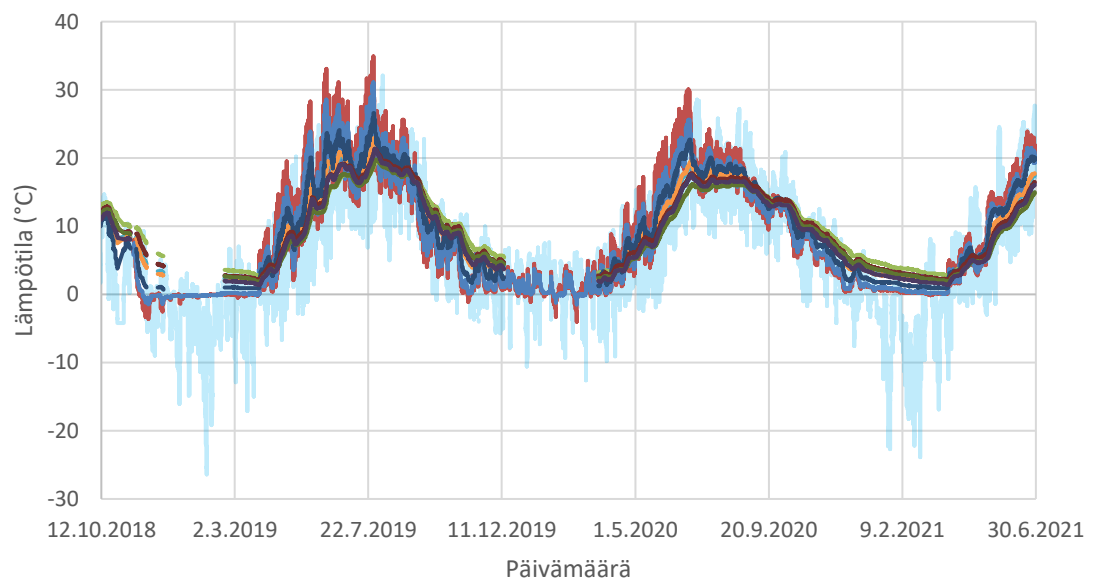
Lämpötila B.2



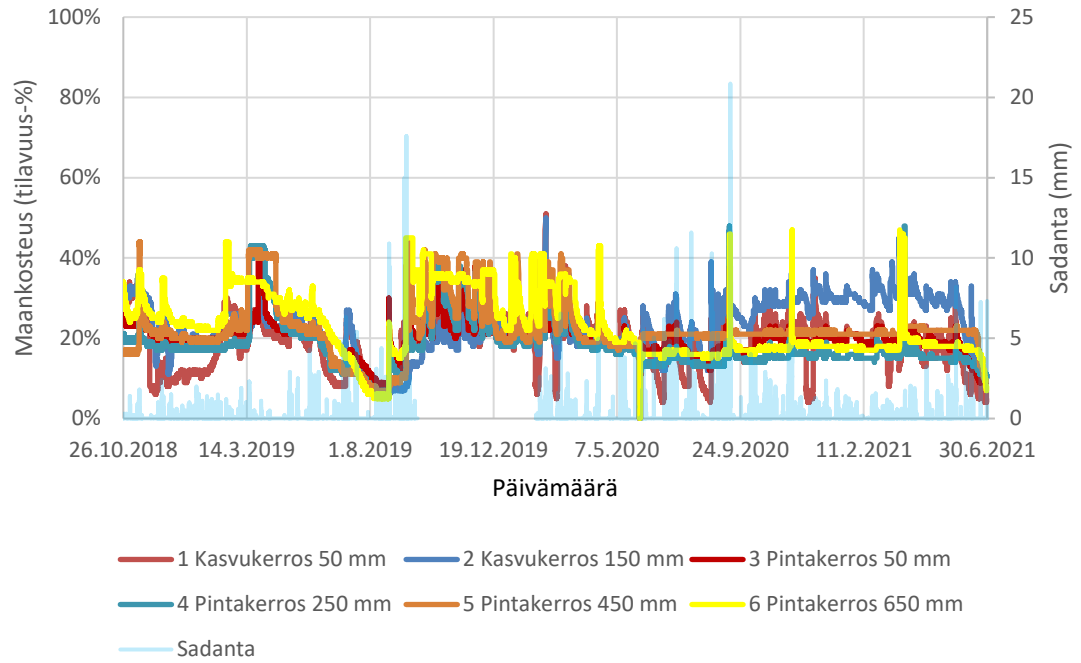
## Lämpötila C.0



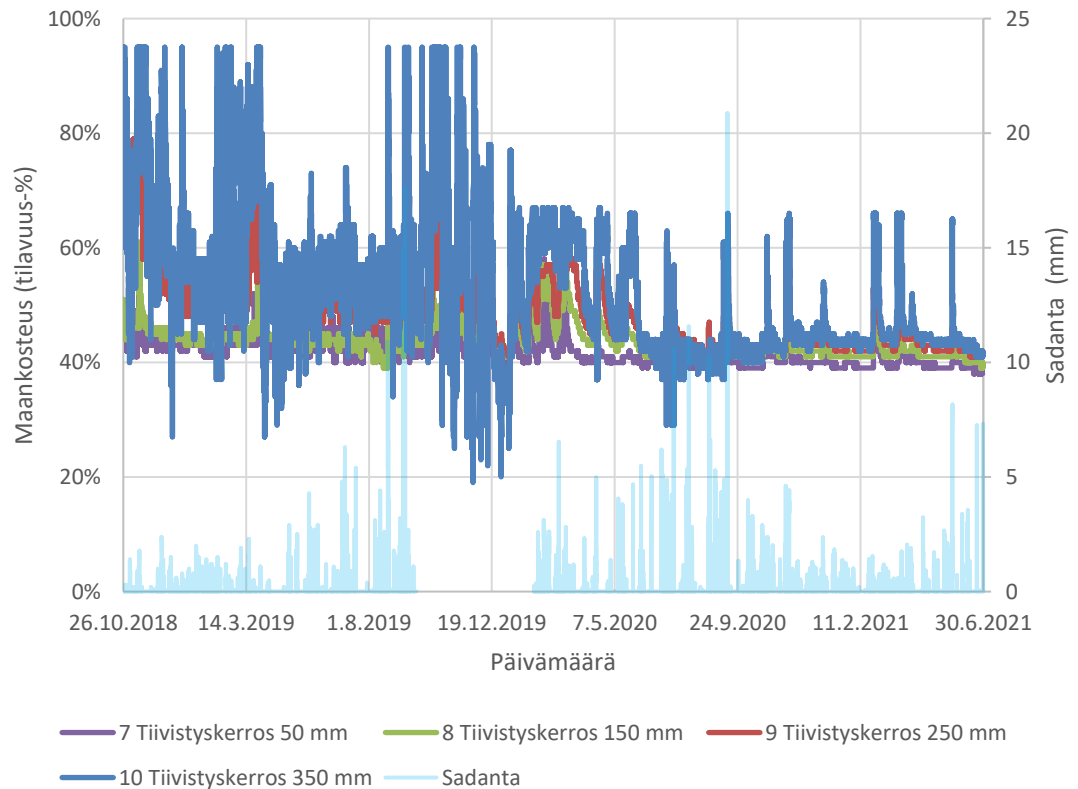
## Lämpötila U.1



## Maankosteus A.1

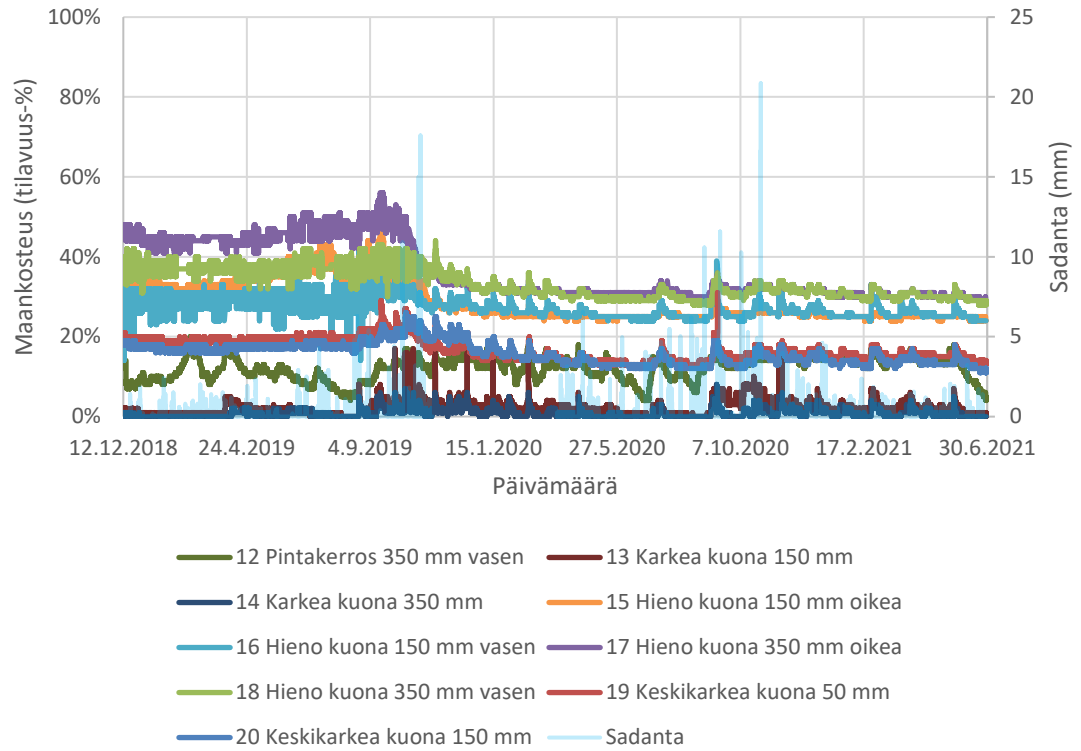


## Maankosteus A.2

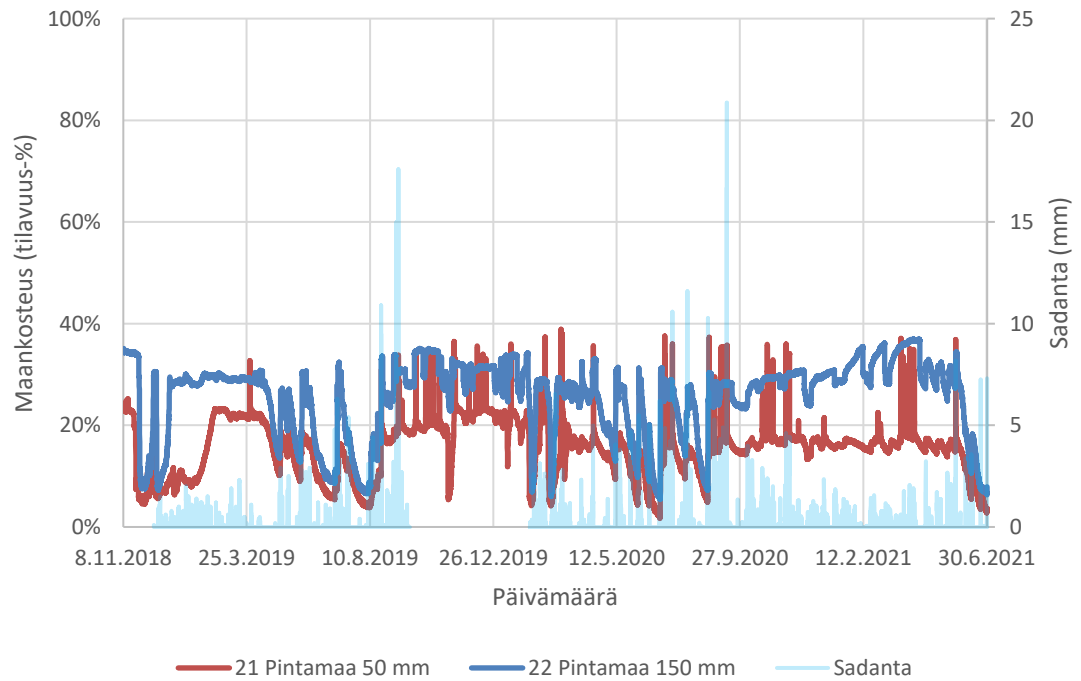




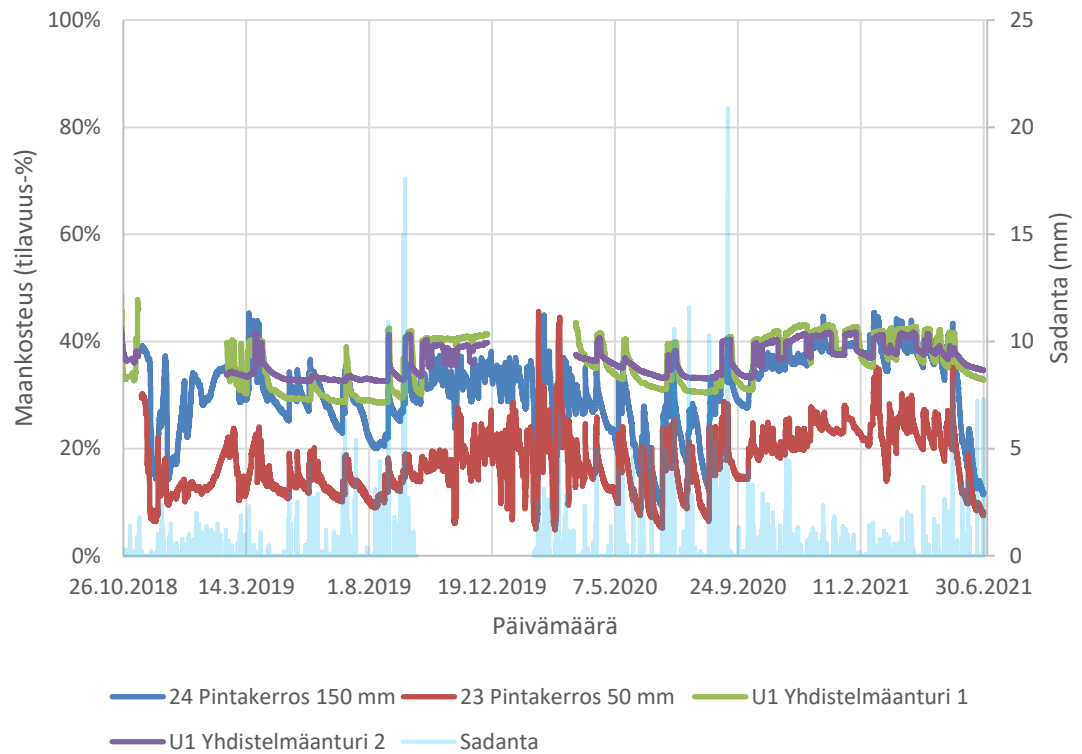
## Maankosteus B.2



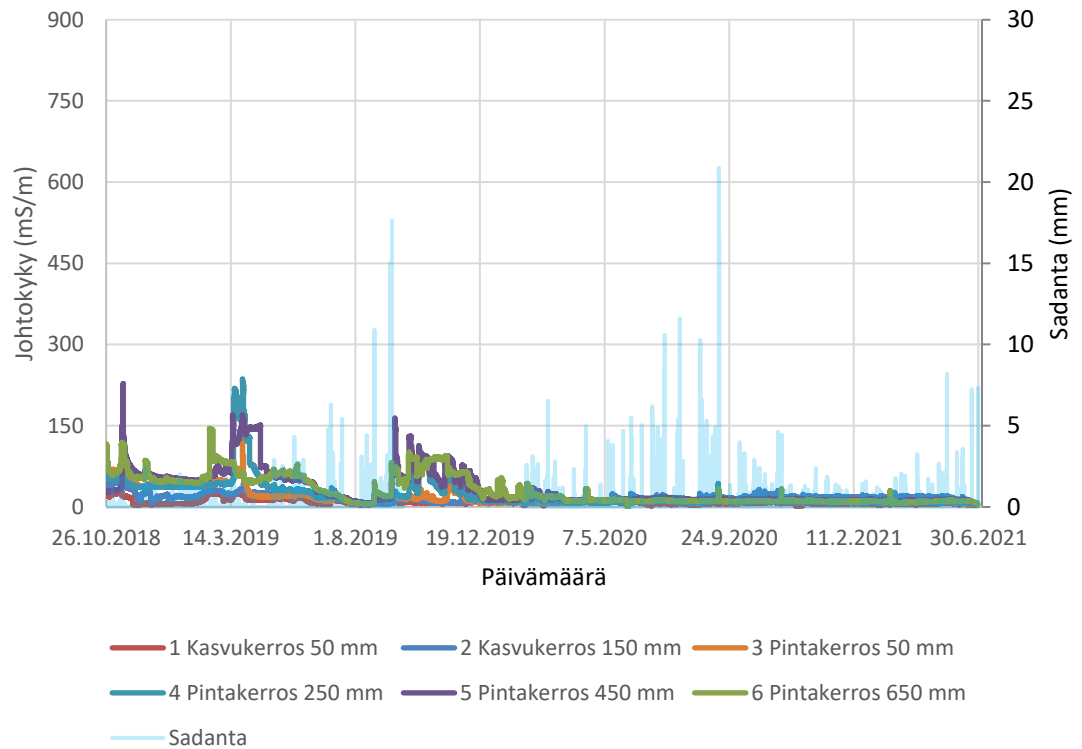
## Maankosteus C.0



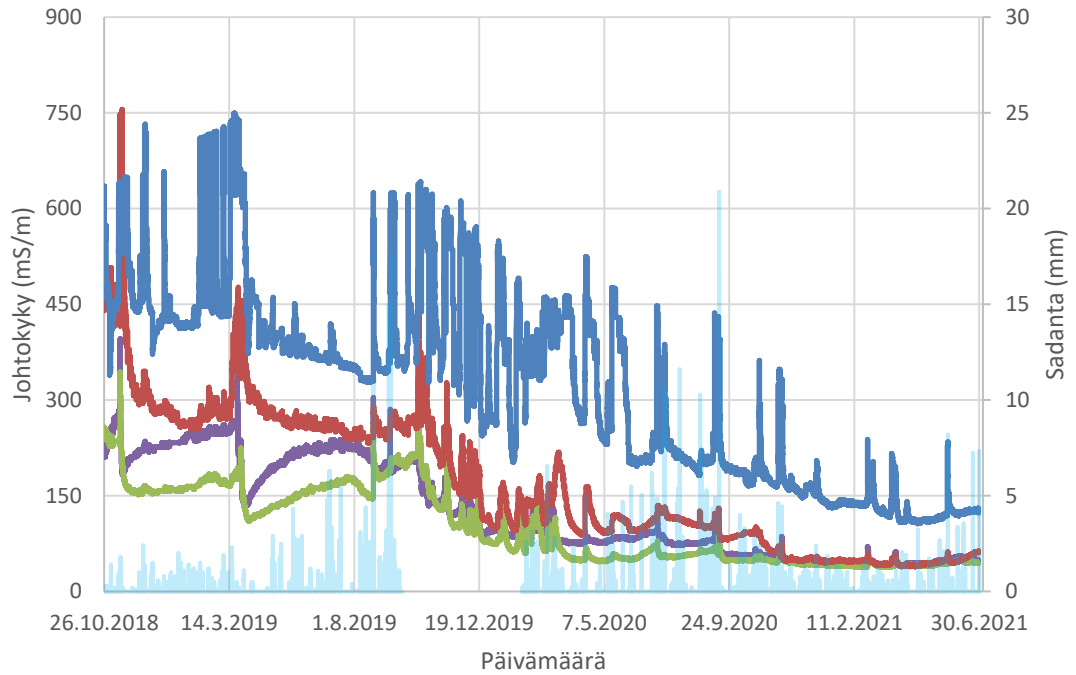
## Maankosteus, U.1



## Johtokyky A.1

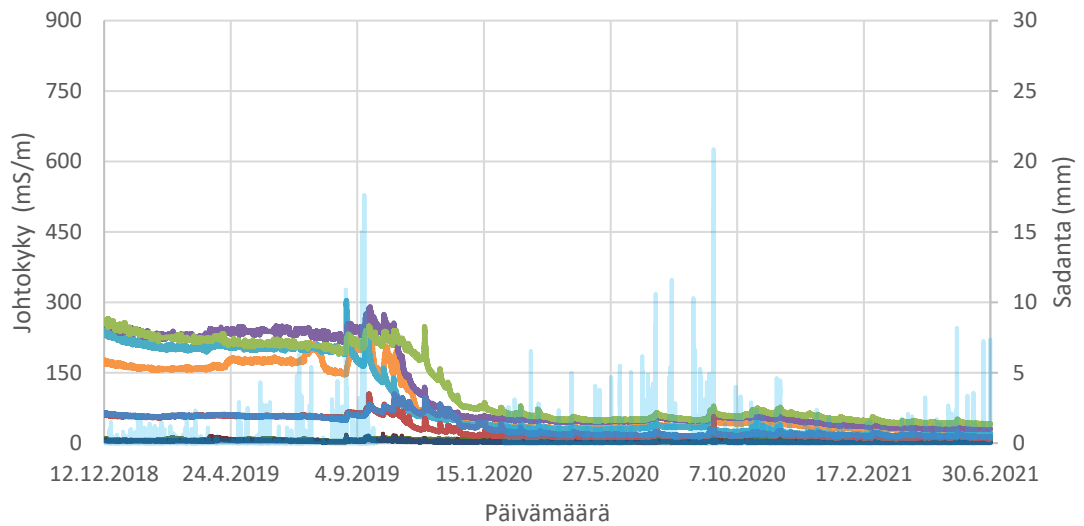


## Johtokyky A.2



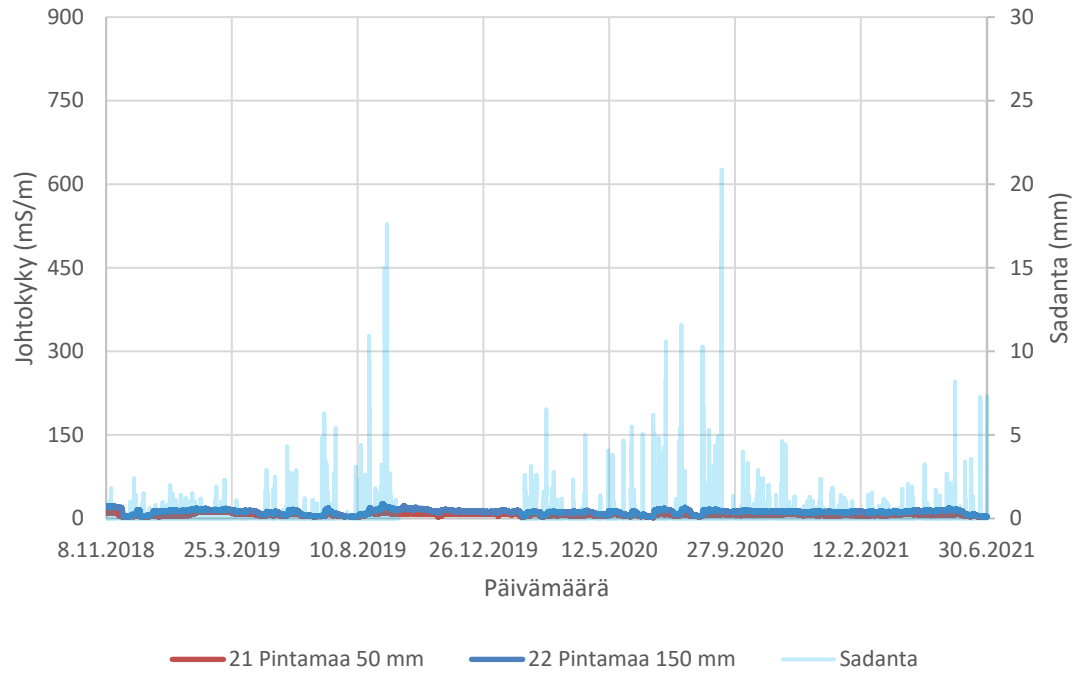
— 7 Tiivistyskerros 50 mm — 8 Tiivistyskerros 150 mm — 9 Tiivistyskerros 250 mm  
 — 10 Tiivistyskerros 350 mm — Sadanta

## Johtokyky B.2

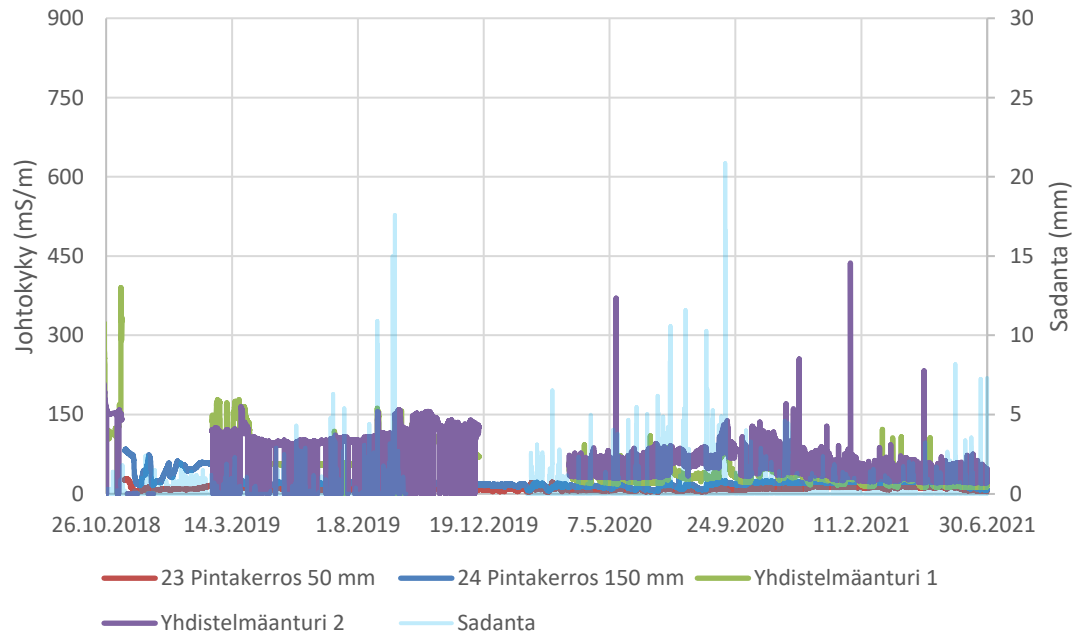


— 12 Pintakerros 350 mm vasen — 13 Karkea kuona 150 mm  
 — 14 Karkea kuona 350 mm — 15 Hieno kuona 150 mm oikea  
 — 16 Hieno kuona 150 mm vasen — 17 Hieno kuona 350 mm oikea  
 — 18 Hieno kuona 350 mm vasen — 19 Keskikarkea kuona 50 mm  
 — 20 Keskikarkea kuona 150 mm — Sadanta

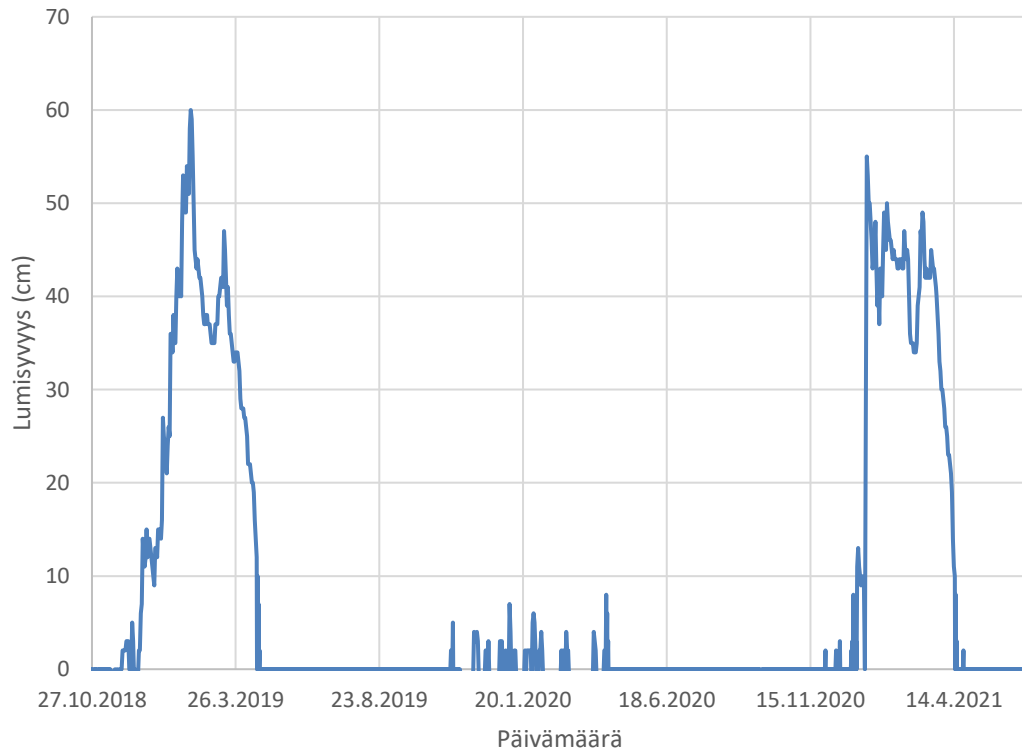
## Johtokyky C.0



## Johtokyky U.1



## LIITE 7. LUMISYVYYS NUUKSION HAVAINTOASEMALLA (ILMATIETEENLAITOS 2021)



# LIITE 8. PINTARAKENTEIDEN RAKENNEKERROSTEN MITTOJA JA HAITALLISTEN AINEIDEN LASKENNALLISIA LIUKOISUUSAIKOJA

Koerakenne	A.1			A.2			B.2				C.0	U.1	
	Rakennekerros	Kasvukerros, lietekomposti	Pintakerros, Hki-moreeni	Kasvukerros, lietekomposti	Pintakerros, Hki-moreeni	Kuonabentonitiitti	Pintakerros, Hki-moreeni	Kuivatuskerros, karkea kuona	Kapillaarieriste, hieno kuona	Kapillaarikatko, keskikarkea kuona	Pintakerros, Hki-moreeni	Pintakerros, Hki-moreeni-seos	Bitumistabiloitu kuona
Kerrospaksuus	m	0,2	0,8	0,2	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,5	0,5
Alapinnan ala	m <sup>2</sup>	125	94	122	108	83	130	113	94	94	94	117	75
Yläpinnan ala	m <sup>2</sup>	143	125	146	122	108	153	130	113	94	101	141	117
Tilavuus	m <sup>3</sup>	27	87	27	92	48	71	61	52	47	20	64	48
Vesipitoisuus (paino-%)		32,3	7,9	35,3	7,3	22,3	8,2	2,5	20,6	6,1	7,6	em.	23,1
Märkä-irtotiheys	kg/m <sup>3</sup>	1 590	1 805	1 518	1 816	1 751	1 789	1 378	1 555	1 435	1 726	em.	1 936
Kuivalirto-tiheys	kg/m <sup>3</sup>	1 202	1 673	1 122	1 692	1 432	1 653	1 342	1 289	1 352	1 604	em.	1 573
Kokonais-kuivapaino	kg	32 124	146 207	30 080	155 773	68 329	117 103	81 520	66 532	63 669	31 280	em.	75 215
Huokoisuus n (%)		54,6	36,9	57,7	36,1	46,0	37,6	49,3	51,3	49,0	39,5	em.	40,7
Huokosluku e	-	1,2	0,6	1,4	0,6	0,9	0,6	1,0	1,1	1,0	0,7	em.	0,7
<b>Kloridi</b>													
Liukeneva määrä	g	em.	2 763	em.	2 944	330 781	2 213	81 520	322 083	82 196	591	em.	364 114
Minimikuormitus	g/d	0,01	0,04	em.	0,07	10,10	em.	0,16	0,06	2,62	em.	em.	0,78
Maksimikuormitus	g/d	0,01	0,105	0,060	0,17	11,10	em.	0,37	0,58	6,45	em.	em.	1,17
Liukenevimiisaika minimikuormituksella	a	em.	176	em.	109	90	em.	1 382	15 646	86	em.	em.	1 274
Liukenevimiisaika maksimikuormituksella	a	em.	72	em.	47	82	em.	603	1 511	35	em.	em.	853
<b>Sulfaatti</b>													
Liukeneva määrä	g	em.	8480	em.	9035	286982	6792	203799	279436	159172	1814	em.	315901
Minimikuormitus	g/d	0,04	0,51	em.	0,86	26,94	em.	0,73	0,13	21,21	em.	em.	2,03
Maksimikuormitus	g/d	0,08	1,56	0,31	2,84	29,71	em.	2,34	3,36	32,69	em.	em.	3,92
Liukenevimiisaika minimikuormituksella	a	em.	45	em.	29	29	em.	768	5 739	21	em.	em.	427
Liukenevimiisaika maksimikuormituksella	a	em.	15	em.	9	26	em.	239	228	13	em.	em.	221
<b>Kupari</b>													
Liukeneva määrä	g	em.	19,0	em.	28,0	122,3	21,1	39,9	119,1	39,5	5,6	em.	134,6
Minimikuormitus	mg/d	em.	0,51	em.	0,48	2,82	em.	0,59	0,17	8,17	em.	em.	0,43
Maksimikuormitus	mg/d	1,17	0,84	0,55	0,64	2,90	em.	1,42	0,78	13,78	em.	em.	0,99
Liukenevimiisaika minimikuormituksella	a	em.	101	em.	159	119	em.	187	1 876	13	em.	em.	852
Liukenevimiisaika maksimikuormituksella	a	em.	62	em.	120	116	em.	77	418	8	em.	em.	374
<b>Molybdeeni</b>													
Liukeneva määrä	g	em.	1,5	em.	3,1	88,8	2,3	31,8	86,5	31,2	0,6	em.	97,8
Minimikuormitus	mg/d	em.	0,26	em.	0,28	5,30	em.	0,20	0,09	12,05	em.	em.	0,62
Maksimikuormitus	mg/d	0,37	0,57	0,236	0,40	6,66	em.	0,74	0,88	18,03	em.	em.	0,70
Liukenevimiisaika minimikuormituksella	a	em.	15	em.	30	46	em.	431	2 521	7	em.	em.	432
Liukenevimiisaika maksimikuormituksella	a	em.	7	em.	21	37	em.	118	271	5	em.	em.	385
<b>Kromi</b>													
Liukeneva määrä	g	em.	8,8	em.	9,3	213,2	7,0	11,4	207,6	8,9	1,9	em.	234,7
Minimikuormitus	mg/d	em.	0,29	em.	0,14	1,50	em.	0,10	0,05	4,33	em.	em.	0,04
Maksimikuormitus	mg/d	0,18	0,30	0,118	0,20	1,73	em.	0,20	0,31	5,90	em.	em.	0,16
Liukenevimiisaika minimikuormituksella	a	em.	84	em.	180	388	em.	310	12 100	6	em.	em.	16 485
Liukenevimiisaika maksimikuormituksella	a	em.	80	em.	128	338	em.	160	1 855	4	em.	em.	4 031

em. = ei määritetty

# LIITE 9. KOERAKENTEISTA PURKAUTUVIEN VESIEN LAADULLISIA TULOKSIA JA HYÖDYNNETÄVÄN JÄTTEEN SALLITUT LIUKOISUUDET PEITETYSSÄ KENTTÄRAKENTEESSA (L/S 10) (VNA 843/2017)

	A.1					A.2					B.2					U.1							
	A1.1 pintavalkuuta	A1.2 käsivälillä latauskomppi	A1.5 pintavälillä MSI- sar	A1.3 käsivälillä salaajamatto	A1.4 tarttuvälillä salaajamatto	A2.1 pintavalkuuta	A2.2 käsivälillä latauskomppi	A2.4 pintavälillä MSI- sar	A2.3 käsivälillä salaajamatto	A2.5 tarttuvälillä salaajamatto	B2.1 pintavalkuuta	B2.2 pintavälillä MSI- sar	B2.3 käsivälillä kuona 12/75 mm	B2.4 käsivälillä kuona 0/75 mm	B2.5 käsivälillä kuona 5/12 mm	B2.6 tarttuvälillä salaajamatto	U1.1 pintavalkuuta	U1.2 pintavälillä MSI- sar	U1.4 käsivälillä salaajamatto	U1.5 käsivälillä kulumatila kuona	U1.3 tarttuvälillä salaajamatto		
<b>pm* (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	7,0	7,0	6,7	7,5	7,3	7,9	7,6	7,9	6,7	8,8	6,5	6,6	6,1	6,1	10,6	9,0	7,9	7,7	6,0	6,5	6,0	6,0	
maksimi	-	9,5	8,1	7,4	6,4	7,6	9,5	9,0	9,5	9,7	11,0	9,7	9,5	9,7	9,6	11,7	11,6	9,5	9,1	9,7	8,9	9,3	
keskiarvo	-	6,5	7,9	7,2	8,1	7,6	6,6	7,6	8,2	9,5	10,4	9,9	9,0	9,9	9,8	11,9	10,6	8,2	8,9	8,9	8,7	8,8	
<b>Säilytysvaivat* (1.12.2020 - 9.6.2021)</b>																							
mittaus	ms/m	18	20	59	30	55	11	14	48	121	207	10	30	40	58	185	74	5	46	28	95	123	
maksimi	ms/m	44	37	140	114	124	270	77	283	645	449	115	50	528	239	456	427	30	79	282	206	317	
keskiarvo	ms/m	29	25	81	80	74	25	42	94	231	289	68	35	108	105	278	209	11	54	115	148	232	
<b>Kromi (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	mg/l	em.	0,6	1,5	em.	1,9	em.	em.	3,7	120	240	em.	4,5	16,0	12,0	44,0	em.	1,0	13,0	54,0	440	440	
maksimi	mg/l	em.	1,0	3,5	1,9	2,1	em.	5,1	12,0	200	310	em.	7,5	45,0	80,0	140	110	em.	3,3	170	500	1800	
keskiarvo	mg/l	em.	0,8	1,5	1,6	2,0	em.	5,1	7,9	240	279	em.	5,8	26,7	41,7	91,7	71,5	em.	1,2	91,5	177	1086,7	
VNA 843/2017																							
rajavu*	mg/kg	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
<b>Sulfatti (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	mg/l	em.	4,2	18,0	em.	33,0	em.	em.	43,0	490	640	em.	11	72	46	460	570	em.	7,3	140	270	460	
maksimi	mg/l	em.	7,7	33,0	23,0	67,0	em.	26,0	200	670	830	em.	14	370	490	890	1.200	em.	17,0	440	520	980	
keskiarvo	mg/l	em.	6,0	33,0	23,0	60,0	em.	24,0	112	580	735	em.	12,5	187	289	673	877	em.	12,2	290	395	807	
VNA 843/2017																							
rajavu**	mg/kg	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
<b>Kupari (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	µg/l	em.	em.	em.	23	em.	23	em.	32	62	67	em.	141	58	37	192	135	em.	em.	66	68	123	
maksimi	µg/l	em.	64	29	24	41	em.	47	34	69	81	em.	235	151	107	299	218	em.	74	99	111	210	
keskiarvo	µg/l	em.	64	29	24	32	em.	47	33	69	74	em.	196	94	77	242	189	em.	74	92	90	196	
VNA 843/2017																							
rajavu**	mg/kg	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>Antimoni (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	µg/l	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	11	12	em.	10	10	11	11	11	em.	em.	10	33	29	em.	
maksimi	µg/l	em.	10	10	10	em.	10	10	13	17	em.	10	10	11	11	11	em.	10	25	41	40	em.	
keskiarvo	µg/l	em.	10	10	10	em.	10	10	12	15	em.	10	12	13	17	17	em.	10	18	37	34	em.	
VNA 843/2017																							
rajavu**	mg/kg	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Kromi (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	µg/l	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	20	41	em.	em.	10	10	98	72	em.	em.	em.	10	13	em.	
maksimi	µg/l	em.	10	10	10	em.	10	10	32	42	em.	10	30	42	124	114	em.	10	10	11	21	em.	
keskiarvo	µg/l	em.	10	10	10	em.	10	10	16	42	em.	10	17	28	115	84	em.	10	10	11	18	em.	
VNA 843/2017																							
rajavu**	mg/kg	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>Molybdääni (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	µg/l	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	88	126	em.	em.	20	20	258	184	em.	em.	em.	24	48	187	
maksimi	µg/l	em.	20	10	20	em.	20	20	206	166	em.	20	127	135	386	356	em.	20	88	159	595	em.	
keskiarvo	µg/l	em.	20	10	20	em.	20	20	97	158	em.	20	62	92	349	281	em.	em.	em.	56	104	353	em.
VNA 843/2017																							
rajavu**	mg/kg	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>Kalium (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	µg/l	em.	em.	142 500	em.	210 800	em.	em.	184 000	59 400	60 407	em.	44 130	25 688	25 142	15 450	27 258	em.	em.	130 600	103 900	96 040	
maksimi	µg/l	em.	24 520	213 800	191 200	282 000	em.	28 110	395 200	199 100	71 630	em.	43 804	41 530	34 360	19 977	39 970	em.	48 420	209 900	102 201	154 900	
keskiarvo	µg/l	em.	24 520	179 200	181 300	246 700	em.	28 110	274 600	114 375	66 049	em.	43 967	31 693	29 897	19 742	32 466	em.	48 420	187 350	103 051	136 278	
VNA 843/2017																							
rajavu**	µg/l	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	
<b>Magnesium (1.12.2020 - 22.6.2021)</b>																							
mittaus	µg/l	em.	em.	15 610	em.	24 020	em.	em.	19 780	547	em.	em.	3 507	1 317	2 064	em.	233	em.	em.	15 200	19 980	4 162	
maksimi	µg/l	em.	3 138	22 200	22 920	27 840	em.	3 315	29 610	11 500	10	em.	4 978	2 298	3 916	10	426	em.	7 459	14 470	21 400	11 390	
keskiarvo	µg/l	em.	3 138	18 939	20 920	25 980	em.	3 315	24 699	6 024	20	em.	4 242	1 654	3 091	20	311	em.	7 189	13 333	20 333	7 959	
VNA 843/2017																							
rajavu**	µg/l	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	em.	

\*mu ei määritetty  
\*\*mu ja pH:näytteiden otokset ovat kenttämittauksia  
\*\*VNA 843/2017 hyödynnettävään jätteen suurin sallittu luokitus kenttäraakenteissa (peitetty)