

This is a self-archived version of the original publication.

The self-archived version is a publisher's pdf of the original publication.

To cite this, use the original publication:

**Jarva, J. (toim.), Eriksson, J.-E. (toim.), Larkela, L., Auri, J., Kronberg, T., Tarvainen, T.,  
Kuva, J., Järvinen, M., Hänninen, H., Lehtonen, M., Ketola, M. & Huhtinen, R. 2021. CircVol-projekti.  
Ruoppausmassojen stabiloinnin kenttäkoe Naantalin Matalahdella. Geologian tutkimuskeskus,  
Tutkimustyöraportti 19/2021.**

Link to the original publication: [URL](#)

All material supplied via Turku UAS self-archived publications collection in Theseus repository is protected by copyright laws. Use of all or part of any of the repository collections is permitted only for personal non-commercial, research or educational purposes in digital and print form. You must obtain permission for any other use.

# CircVol-projekti

## Ruoppausmassojen stabiloinnin kenttäkoe Naantalın Matalahdella

Jaana Jarva (toim.), Jan-Erik Eriksson (toim.), Liisa Larkela, Jaakko Auri, Thomas Kronberg, Timo Tarvainen, Jukka Kuva, Maarit Järvinen, Hanna Hänninen, Marja Lehtonen, Mari Ketola ja Reeta Huhtinen

GTK:n tutkimustyöraportti 19/2021



# GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS

Tutkimustyöraportti 19/2021

Jaana Jarva (toim.), Jan-Erik Eriksson (toim.), Liisa Larkela, Jaakko Auri, Thomas Kronberg,  
Timo Tarvainen, Jukka Kuva, Maarit Järvinen, Hanna Hänninen, Marja Lehtonen,  
Mari Ketola ja Reeta Huhtinen

## **CircVol-projekti**

### **Ruoppausmassojen stabiloinnin kenttäkoe Naantalin Matalahdella**

Ne kuvat, kartat ja kaaviot, joissa ei mainita tekijää, ovat julkaisun kirjoittajien tekemiä.

Kansikuva: Näytteenottoa maalle läjitetystä ruoppausmassasta huhtikuussa 2020.  
Kuvan ottaja: Thomas Kronberg, Åbo Akademi.

Taitto: Elvi Turtiainen Oy

Espoo 2021

Jarva, J. (toim.), Eriksson, J.-E. (toim.), Larkela, L., Auri, J., Kronberg, T., Tarvainen, T., Kuva, J., Järvinen, M., Hänninen, H., Lehtonen, M., Ketola, M. & Huhtinen, R. 2021. CircVol-projekti. Ruoppausmassojen stabiloinnin kenttäkoe Naantalin Matalahdella. *Geologian tutkimuskeskus, Tutkimustyöraportti 19/2021*, 85 sivua, 78 kuvaa, 35 taulukkoa ja 11 liitettä.

Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) 6Aika-ohjelman rahoittaman Suurivolyymisten sivuvirtojen ja maamassojen hyödyntäminen kaupungeissa (CircVol) -projektin tavoitteena oli edistää suurivolyymisten teollisten sivuvirtojen ja kaivettujen maamassojen hyödyntämistä infra- ja maarakentamisessa. Projektin kohderyhmänä olivat alan yritykset ja 6Aika-kaupungit (Helsinki, Espoo, Vantaa, Turku, Tampere ja Oulu). Projektissa tuettiin yrityksiä kiertotalouden mukaisten uusien tuotteiden ja palveluiden kehittämisessä sekä kehitettiin kaupungeille toimintamalleja kiertotalouden edistämiseksi.

CircVol-projektissa toteutettiin yhteensä kuusi yrityksille suunnattua pilot-kokeilua. Tässä tutkimustyöraportissa esitetään Turun seudun ruoppausmassojen stabilointiin ja hyödyntämiseen maarakentamisessa liittyneen kenttäkokeen tulokset. Kenttäkoe toteutettiin Naantalin Matalahdella ja työ tehtiin Åbo Akademin, Turun ammattikorkeakoulun, Suomen ympäristökeskuksen, Turku Science Park Oy:n ja Geologian tutkimuskeskuksen yhteistyönä. Suomessa ruopataan vuosittain keskimäärin lähes kaksi miljoonaa kuutiota sedimenttejä ja syntyneet ruoppausmassat on pääosin sijoitettu merialueilla sijaitseville läjityspaikoille. Ruoppausmassojen meriläjityksestä ollaan kuitenkin haitallisten ympäristövaikutusten vuoksi monin paikoin luopumassa ja ruoppattavat massat tullaan yhä enemmän läjittämään maalle. Esimerkiksi Turun satama Oy ja Turun kaupunki ovat luopumassa ruoppausmassojen meriläjityksestä kokonaan.

Meren pohjasta ruopattu maa-aines on lujuudeltaan useimmiten hyvin heikkoa, ja sen käyttö maalle läjitettyinä, kuormitettujen rakenteiden alla on ilman lujitustoimenpiteitä lähes mahdotonta. Merenpohjalta ruopattaviin sedimentteihin on usein kertynyt erilaisia haitta-aineita, ja ne saattavat sisältää myös happamoitumista aiheuttavaa sulfidimuotoista rikkiä. Suomessa ruoppausmassoja on käsitelty lähinnä massastabiloimalla ja hyödyntämällä niitä joko satamarakenteissa tai muissa maarakennuskohteissa. Stabilointia on perinteisesti tehty sementin, kalkin ja erilaisten kuonien avulla, mutta yhä enemmän stabiloinnissa pyritään hyödyntämään lähialueilla syntyviä teollisuuden sivutuotevirtoja, kuten tuhkia.

CircVol-projektin yhtenä tavoitteena oli identifioida sopivia sivuvirtoja ja muita kierrätysmateriaaleja, joilla voitaisiin korvata sementin määrää stabiloinnissa ja siten vähentää infraradon absorptiota CO<sub>2</sub>-päästöjä sekä neitseellisten raaka-aineiden käyttöä pitkällä aikavälillä. Naantalin Matalahdella toteutetussa kenttäkokeessa testattiin pienessä mittakaavassa ruoppausmassojen stabilointia kohtuullisen kuljetusmatkan päässä sijaitsevien yritysten toimittamilla sivutuote- tai jättepohjaisilla kierrätysmateriaaleilla, kuten tuhkillä ja kuonilla, jotka oli todettu toimiviksi ja turvallisiksi laboratorioissa tehdyissä esiselvityksissä.

Matalahdella toteutetun kenttäkokeen perusteella maalle läjitettyjä ruoppausmassoja voidaan stabiloida sementin, kalkin, kuonan ja tuhkan lisäksi myös muilla teollisuuden sivuvirroilla. Kenttäkokeessa testattiin yhdeksää erilaista reseptiä, jotka kaikki saavuttivat geoteknisiltä ominaisuuksiltaan hyvän ja kantavan maapohjan koetoiminta-alueella. Eri sideainein tehty stabilointi myös neutraloi tehokkaasti happoa tuottavan ruoppausmassan. Myös haitta-aineiden liukoisuus stabiloidusta massasta oli pääasiassa hyvin pientä.

Liitteet ovat saatavissa osoitteessa [https://tupa.gtk.fi/raportti/aineistotalenne/19\\_2021.zip](https://tupa.gtk.fi/raportti/aineistotalenne/19_2021.zip)

Asiasanat: ruoppaus, sedimentti, stabilointi, uusioraaka-aine, Naantali

Jaana Jarva  
Geologian tutkimuskeskus  
PL 96  
02151 Espoo  
Sähköposti: [jaana.jarva@gtk.fi](mailto:jaana.jarva@gtk.fi)

Liisa Larkela  
Turun ammattikorkeakoulu  
Joukahaisenkatu 3  
20520 Turku  
Sähköposti: [liisa.larkela@turkuamk.fi](mailto:liisa.larkela@turkuamk.fi)

Jan-Erik Eriksson  
Åbo Akademi  
Tuomiokirkontori 3  
20500 Turku  
Sähköposti: [jan-erik.eriksson@abo.fi](mailto:jan-erik.eriksson@abo.fi)

Reeta Huhtinen  
Turku Science Park Oy  
Joukahaisenkatu 3 A  
20520 Turku  
Sähköposti: [reeta.huhtinen@turkubusinessregion.com](mailto:reeta.huhtinen@turkubusinessregion.com)

## SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	5
1.1	Ruoppausmassat.....	5
1.2	Kenttäkoe Naantalin Matalahdella.....	6
1.3	Kenttäkokeen toteuttamiseen osallistuneet tahot ja heidän roolinsa.....	7
2	TUTKIMUSKOHTTEEN GEOLOGINEN KUVAUS.....	9
3	MAA-AINEKSEN STABILOINTI.....	12
4	KENTTÄKOKEEN SUUNNITTELU JA ESITESTIT.....	13
4.1	Esitestit.....	13
4.2	Käytetyt sideaineet.....	13
4.3	Näytteiden valmistus.....	14
4.4	Puristuslujuus.....	15
4.5	Diffuusiotestit.....	17
4.6	Koetoimintailmoitus.....	18
5	RUOPPAUSMASSA JA SEN OMINAISUUDET.....	19
5.1	Happamien sulfaattimaiden todentaminen.....	19
5.2	Ruoppausmassan rikkipitoisuus.....	19
5.3	Ruoppausmassan kloridipitoisuus.....	20
5.4	Ruoppausmassan pH ja sähkönjohtavuus.....	20
5.5	Ruoppausmassan asiditeetti.....	21
5.6	Ruoppausmassan orgaanisen aineksen määrä.....	22
5.7	Haitta-aineiden kokonaispitoisuus ja liukoisuus.....	22
5.8	Ruoppausmassan PAH-määritykset.....	24
5.9	Ruoppausmassan mineraloginen karakterisointi.....	25
5.10	Ruoppausmassan raekoko.....	27
5.11	Ruoppausmassan vesipitoisuus.....	27
6	SIDEAINEET JA NIIDEN OMINAISUUDET.....	28
6.1	Sideaineiden mineraloginen karakterisointi.....	29
7	KENTTÄKOKEEN TULOKSIA.....	32
7.1	Kenttäkokeen toteutus.....	32
7.2	Puristuslujuus.....	37
7.3	Stabiloitujen näytteiden rakenne.....	41
7.4	Kentän tiiviysmittaukset pudotuspainolaitteella ja levykuormituskokeella.....	45
7.5	$E_{50}$ -moduuli eli sekanttimoduulin määrittäjä jännitys-muodonmuutoskuvaajasta.....	46
7.6	Tomografiatutkimukset.....	46
7.7	Haitta-aineiden liukoisuus.....	51

8	MAA- JA VESINÄYTTEIDEN MAASTOMITTAUKSET .....	64
8.1	Pintavesien pH- ja sähkönjohtavuusmittaukset.....	64
8.2	Pintavesien sulfaattipitoisuus .....	66
8.3	Maaperän ja koeruutujen pH-mittaukset.....	67
8.4	Yhteenvedo kenttämittauksista .....	69
9	VALUMA- JA HULEVESIEN ANALYSOINTI .....	69
10	YHTEENVETO .....	81
11	KIITOKSET.....	83
	LÄHDE- JA KIRJALLISUUSLUETTELO.....	84

#### LIITTEET

- Liite 1. Puristuslujuuskokeiden esitestien tulokset
- Liite 2. Esitestien yhteydessä tehtyjen diffuusiotestien tulokset
- Liite 3. Ruoppausmassasta tehtyjen laboratorioanalyysien testausselostet
- Liite 4. Ruoppausmassan rakeisuusmääritysten tulokset
- Liite 5. Sideaineista tehtyjen laboratorioanalyysien testausselostet
- Liite 6. Puristuslujuuskokeiden tulokset
- Liite 7. Loadman- ja levykuormituskokeiden tulokset
- Liite 8. Liukoisuustestien uuttoliuosten Hg-määritysten testausselostet
- Liite 9. Liukoisuustestien testausselostet
- Liite 10. PAH-yhdisteiden laboratorioanalyysien testausselostet
- Liite 11. Valuma- ja hulevesinäytteiden laboratorioanalyysien testausselostet

## 1 JOHDANTO

Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) 6Aika-ohjelman rahoittaman Suurivolyymisten sivuvirtojen ja maamassojen hyödyntäminen kaupungeissa (CircVol) -projektin tavoitteena oli edistää suurivolyymisten teollisten sivuvirtojen ja kaivettujen maamassojen hyödyntämistä infra- ja maarakentamisessa. Projektin kohderyhmänä olivat yritykset ja 6Aika-kaupungit (Helsinki, Espoo, Vantaa, Turku, Tampere ja Oulu). Projektissa tuettiin yrityksiä muun muassa kehittämään kiertotalouden mukaisia tuotteita ja palveluita, jotka tyypillisesti tuottavat vähemmän CO<sub>2</sub>-päästöjä kuin perinteiset ratkaisut ja ovat myös ympäristöystävällisempiä.

CircVol-projekti toteutettiin 1.8.2018–31.12.2020, ja sitä koordinoi Turku Science Park Oy. Projektissa oli mukana yhteensä kymmenen partneria: Åbo Akademi, Turun ammattikorkeakoulu, Varsinais-Suomen liitto, Helsingin kaupunki, Geologian

tutkimuskeskus (GTK), Suomen ympäristökeskus (SYKE), Forum Virium Helsinki Oy, Tampereen yliopisto, Oulun ammattikorkeakoulu ja Oulun kaupunki. Lisätietoa projektista ja projektin aikana tuotetuista materiaaleista on koottuna projektin nettisivuille: [www.circvol.fi](http://www.circvol.fi)

CircVol-projektissa toteutettiin yhteensä kuusi yrityksille suunnattua pilot-kokeilua. Tässä tutkimustyöraportissa esitetään Turun seudun ruoppausmassojen stabilointiin ja hyödyntämiseen maarakentamisessa liittyneen pilot-kokeilun tulokset. Raportin kirjoittamisesta ovat vastanneet Jaana Jarva, Jaakko Auri, Timo Tarvainen, Jukka Kuva ja Marja Lehtonen GTK:sta, Jan-Erik Eriksson ja Thomas Kronberg Åbo Akademiasta, Liisa Larkela, Maarit Järvinen, Hanna Hänninen ja Mari Ketola Turun AMK:sta sekä Reeta Huhtinen Turku Science Park Oy:stä.

### 1.1 Ruoppausmassat

Ruoppauksella rakennetaan, syvennetään ja ylläpidetään vesiväyliä ja satama-alueita. Sedimenttejä poistetaan myös monista muista syistä, kuten vesirakentamisen ja rannoilla tapahtuvan rakentamisen vuoksi sekä tulvasuojeluhankkeiden yhteydessä. Suomen ympäristökeskus teki CircVol-projektissa taustaselvityksen kansainvälisistä käytännöistä ruoppausmassojen hallinnassa ja hyödyntämisessä (Häkkinen ym. 2020). Ruoppaustoiminnalla ja varsinkin mereen läjittämällä on vaikutuksia vesi- ja meriympäristölle. Siksi mereen läjittäminen ei ole suositeltava vaihtoehto, mikäli muita hyödyllisempiä kohteita ja käyttötapoja ruoppausmassoille on olemassa. Suomessa ruoppausmassoja on käsitelty lähinnä massastabiloimalla ja hyödyntämällä niitä joko satamarakenteissa tai muissa maarakennuskohteissa. Kansainvälisten käytäntöjen mukaan käsiteltyjä ruoppausmassoja voitaisiin käyttää myös esimerkiksi viherrakentamisessa ja kasvatusalustoina tai erilaisten tuotteiden, kuten laattojen ja tiilien, raaka-aineena.

Ruoppausmassojen stabilointia on tehty Suomessa jo pitkään esimerkiksi erilaisten kenttien pohjarakenteissa. Stabilointia on perinteisesti tehty sementin, kalkin ja erilaisten kuonien avulla, mutta yhä enemmän stabiloinnissa pyritään hyödyntämään lähialueilla syntyviä teollisuuden ja energian tuotannon sivuvirtoja, kuten tuhkia. Turun satama Oy ja Turun kaupunki ovat päättäneet luopua ruoppausmassojen meriläjityksestä. Meriläjitykset on tehty vesilain (587/2011) mukaisten lupien perusteella, mutta se ei välttämättä merkitse niiden haittamuutusta ympäristölle. Airistolle läjitetyt ruoppausmassat ovat pitkään aiheuttaneet huolta niin ammatinharjoittajien, tutkijoiden kuin asukkaidenkin keskuudessa. Meriläjityksen yhteydessä sedimentteihin kertyneet ravinteet ja haitta-aineet vapautuvat ja pääsevät uudelleen kierto. Yhtenä Saaristomeren suurimpana uhkana pidetään rehevöitymistä ja tähän on nyt haluttu puuttua meriläjitysten osalta. Meriläjityksen poliittista lopettamispäätöstä tuki kansalaisten mielipide asiasta.

Turun satama Oy on päättänyt olla hakematta uutta lupaa ruoppausmassojen meriläjitykselle nykyisen luvan loputtua kesäkuussa 2019.

Turun alueella on selvitetty vaihtoehtoisia sedimenttien läjitystapoja jo vuodesta 2006 alkaen, jolloin selvitettiin lähinnä ei-meriläjityskelpoisten massojen sijoittamisvaihtoehtoja. Silloin ja sen jälkeen tehdyt selvitykset osoittavat, että maaläjitysvaihtoehtoja on Turun seudulla rajoitetusti. Yksi lupaavimmista läjitysalueista on Lauttarannan alue Turun satamaa vastapäätä, jonne suunnitellaan pengerialjitysaltaiden rakentamista. Tavoitteena

on sijoittaa ja stabiloida ruoppauksista kertyvät sedimentit nykyiselle vesijättömaalle rakennettaviin pengeraltaisiin ja kaavoittaa alue tulevaisuudessa asuinrakennuskäyttöön. CircVol-projektissa käytettiin Turun sataman proomuväylillä teettämien ruoppausten ruoppausmassoja stabilointimenetelmien esiselvityksissä. Lauttarannan esirakentaminen oli projektin aikana kuitenkin ympäristölupavaiheessa, joten ruoppausmassojen stabilointipilottia ei voitu toteuttaa aikataulusyistä Turun Lauttarannassa.

## 1.2 Kenttäkoe Naantalın Matalahdella

CircVol-projektin toteuttamalle ruoppausmassojen stabilointipilotille löytyi sopiva kenttäkoepaikka Naantalın Matalahden tulevalta asuntomessualueelta, jossa matalan merenlahden ruoppaukset olivat käynnissä vuosina 2019–2020. Matalahden kunnostamiseen ruoppauksella on myönnetty kaksi vesilain mukaista lupaa. Etelä-Suomen aluehallintovirasto on 22.8.2016 myöntänyt Naantalın kaupungille ja Naantalın West End Oy:lle luvan (nro 158/2016/2) Matalahden veneväylän kunnostamiseen ruoppaamalla (Etelä-Suomen aluehallintovirasto 2016). Väylältä ruopattavan massan kokonaismäärä on lupahakemuksen mukaan vähintään 30 200 m<sup>3</sup> ktr. Lupahakemuksen mukaan ruopattavat massat sijoitetaan maalle, rannan tuntumassa oleville kuudelle läjitysalueelle. Tämän lisäksi Etelä-Suomen aluehallintovirasto on 1.3.2019 myöntänyt Naantalın kaupungille luvan Matalahden venesataman ruoppaukseen ja laiturien rakentamiseen (nro 73/2019) (Etelä-Suomen aluehallintovirasto 2019). Venesataman ruoppauksesta arveltiin syntyvän ruoppausmassoja noin 10 000 m<sup>3</sup>. Lupahakemuksen mukaan ruoppausmassat läjitetään tukiseinän taakse sekä sataman pohjoispuolella sijaitsevalle kaupungin omistamalle peltoalueelle. Tämä läjitysalue sijoittuu Naantalın vuoden 2022 asuntomessujen alueelle, josta osa rajattiin CircVol-projektin stabilointipilotin käyttöön. Asuntomessualueella on 28.3.2019 voimaan astunut asemakaava. CircVol-projektin kenttäkoetta varten osoitettu alue sijoittuu venesataman/venevalkaman alueelle. Asuntomessualueelle sijoituvan läjitysalueen koko on 7 700 m<sup>2</sup>, josta CircVol-projektin kenttäkoekäytössä oli 820 m<sup>2</sup>. Kuvassa 1 on esitetty Naantalın Matalahden ruoppaus- ja läjitysalueet. CircVol-projektin kenttäkoe toteutettiin "Läjitysalue satama" -nimisen läjitysalueen

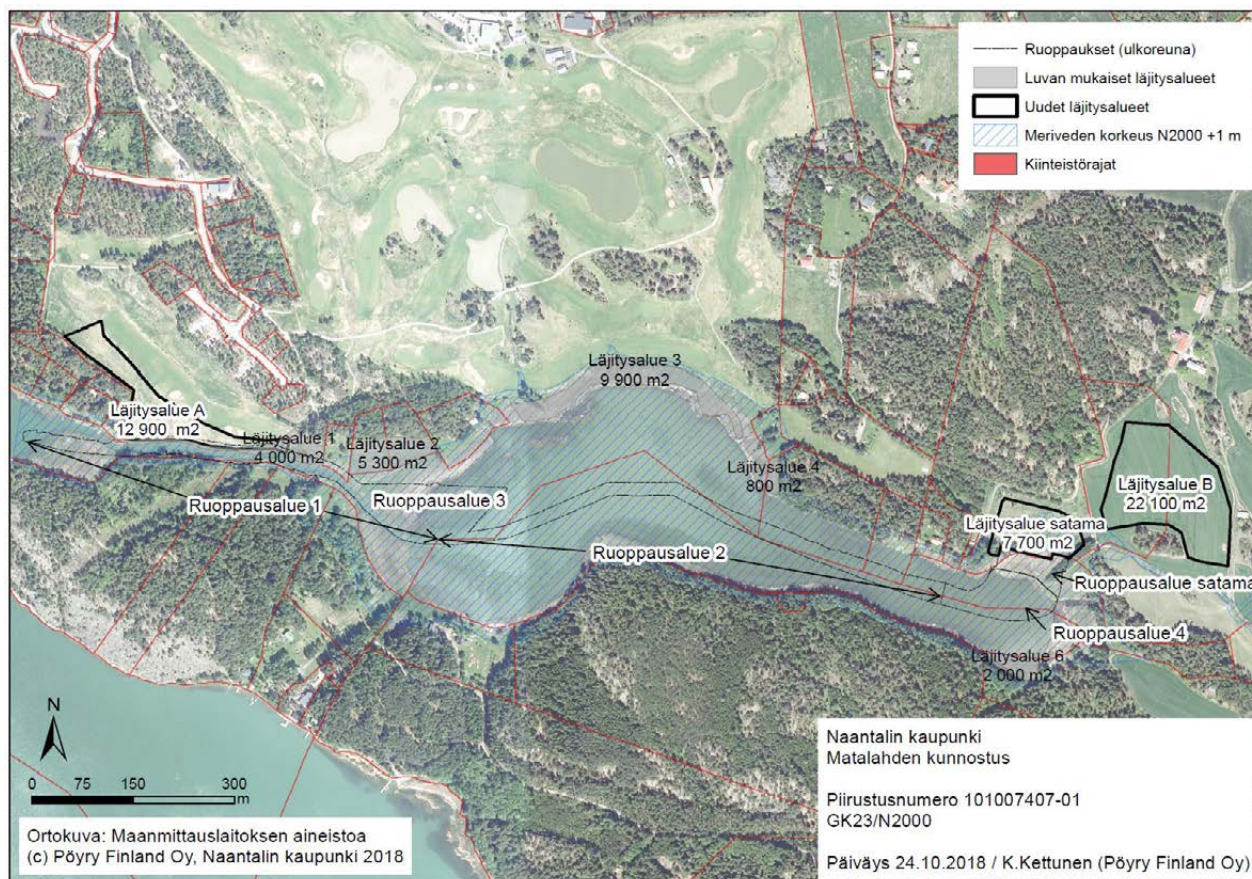
länsireunalla, jonne ruoppausmassa toimitettiin pääasiassa "Ruoppausalue 4" ja "Ruoppausalue satama" merkityiltä alueilta.

Naantalın kaupunki teki CircVol-projektin esityksen mukaisen lupahakemuksen koetoiminnasta 17.1.2020, ja sille saatiin myönteinen päätös 4.3.2020 (Naantalın kaupunki 2020a, viranhaltijan päätös Nro 1/2020). Koetoimintaan tehtiin päätöksen jälkeen pieniä muutoksia, jotka hyväksyttiin 28.4.2020 (Naantalın kaupunki 2020b, viranhaltijan päätös Nro 2/2020).

Ruoppausalueen 4 ruoppaus alkoi vuoden 2019 syyskuussa, ja ruoppausmassat oli läjitetty alueelle "Läjitysalue satama" ja "Läjitysalue B" (kuva 1) vuoden 2020 tammikuuhun mennessä. Kenttäkoalueen koeruutujen ruoppausmassat ehtivät tämän vuoksi hieman kuivua ennen varsinaisen koetoiminnan aloittamista. Ruoppausmassasta toimitettiin näytteet Turun AMK:lle ja ÅA:lle stabiloinnin esitestejä varten syyskuussa 2019. GTK:lle toimitettiin vastaavasta näyte-erästä ruoppausmassaa hapontuottopotentialin arviointia ja liukoisuustestejä varten. Näin ruoppausmassan geoteknisistä ja geokemiallisista ominaisuuksista saatiin alustavia tietoja huhtikuussa 2020 aloitetun kenttäkokeen tueksi.

CircVol-projektin yhtenä tavoitteena oli identifioida sopivia kierrätysmateriaaleja, joilla voitaisiin korvata sementin määrää stabilointituotteissa ja siten vähentää infrarakentamisen CO<sub>2</sub>-päästöjä pitkällä aikavälillä. Naantalın Matalahdella toteutetun kenttäkokeen tarkoituksena oli edistää uusiomateriaalien käyttöä ruoppausmassojen stabiloinnissa ja tarjota yrityksille referenssikohde tuotekehityksen tueksi. Kenttäkoekessa testattiin pienessä mittakaavassa ruoppausmassojen stabilointia yritysten toimittamalla sivutuote- tai jätepohjaisilla





Kuva 1. Naantalin Matalahden ruoppaus- ja läjitysalueet. CircVol-projektin kenttäkoe toteutettiin “Läjitysalue satama” -nimisen läjitysalueen länsireunalla. Kartta © Pöyry Finland Oy ja Naantalin kaupunki, Ilmakuva © Maanmittauslaitos.

kierrätysmateriaaleilla, kuten tuhilla ja kuonilla. Koetoiminnan sideaineeksi valittiin teollisuuden sivuvirtoja ja jätepohjaisia kierrätysmateriaaleja, joita on saatavana riittävän suurina määriä kohtuullisen kuljetusmatkan päässä kohteesta ja jotka on todettu toimiviksi ja turvallisiksi laboratoriossa tehdyissä esiselvityksissä.

### 1.3 Kenttäkokeen toteuttamiseen osallistuneet tahot ja heidän roolinsa

CircVol-projektin hankepartnerit (Turku Science Park Oy, Åbo Akademi, Turun ammattikorkeakoulu, Geologian tutkimuskeskus ja Suomen Ympäristökeskus) toteuttivat kenttäkokeen yhteistyössä Naantalin kaupungin ja alueen yritysten kanssa. Kenttäkokeeseen osallistuivat seuraavat yritykset: Lassila & Tikanoja, Finnsementti Oy, Nordkalk, Suomen Erityisjäte Oy, Renotech Oy ja Ecolan Oy. Tässä kappaleessa on kuvattu toimijoiden roolit Matalahden kenttäkokeessa.

Kenttäkoe saatiin päätökseen 6,5 kk sen aloituksen jälkeen marraskuussa 2020, jonka jälkeen Naantalin kaupunki on jatkanut alueen esirakentamista. Kenttäkoepaikalle tulee asfaltoitu parkkipaikka, jonka päällä toimii Naantalin asuntomessujen aikana vuonna 2022 messuravintola.

#### Naantalin kaupunki

- Kenttäkoepaikan maanomistaja ja kenttäkokeen mahdollistaja. Matalahdella oli Naantalin kaupungin tilaama ruoppaustyö käynnissä vuonna 2020.
- Kenttäkokeen koetoimintaluvan myöntäjä

#### Turku Science Park Oy

- Koetoimintailmoituksen laatiminen yhdessä muiden kenttäkokeen toteuttajien kanssa
- Toimijoiden välisen yhteistyön koordinoiminen kenttäkokeen aikana

### **Åbo Akademi**

- Esitettävät laboratorioissa ruoppausmassoilla ja yritysten toimittamilla sivuvirroilla
- Ruoppausmassan stabiloitumisen tutkiminen laboratorio-olosuhteissa
- Laboratoriomittaukset yritysten näytteille
- Tulosten raportointi ja analysointi yhdessä yritysten kanssa

### **Turku AMK**

- Ruoppausmassan stabiloitumisen tutkiminen laboratorio-olosuhteissa
- Stabiloitujen massojen standardin mukainen liukoisuuden ja puristuslujuuden mittaaminen
- Laboratoriomittaukset yritysten näytteille
  - Liukoisuustesteihin liittyvät alkuaineanalyysit (MP-AES, AAS)
  - Puristuslujuusmittaukset (laite: VjTech, Triplex II)
- Tulosten raportointi ja analysointi yhdessä yritysten kanssa

### **GTK**

- Maalle nostettujen ruoppausmassojen hapontuottopotentiaalimittaaminen kenttäolosuhteissa ja laboratorioissa
- Ruoppausmassan sisältämien potentiaalisten haitta-aineiden liukoisuuden selvittäminen tuoreesta ja hapettuneesta näytteestä
- Ruoppausmassan ja sideaineiden mineralogiset tutkimukset
- Kenttäolosuhteissa stabiloitujen koekappaleiden tomografiakuvaus laboratorio-olosuhteissa
- Tulosten raportointi ja analysointi yhdessä yritysten kanssa

### **SYKE**

- Koetoimintaluvan laatiminen yhdessä muiden toimijoiden kanssa
- Asiantuntijatuki kenttäkokeen ympäristövaikutusten analysointiin

### **Lassila & Tikanoja**

- Materiaalitoimittaja: Naantalimoniaainepolttolaitoksen tuhka
- Koetoimintaluvan hakeminen
- Kenttäkokeen tekninen toteutus
- Levykuormituskokeet ja tiiviyden mittaukset kenttäolosuhteissa

Lassila & Tikanoja on palveluyritys, jonka toiminta tukee ja edistää kiertotaloutta. Asiakas- ja palvelutoiminnassaan Lassila & Tikanoja pyrkii pitämään

materiaalit ja kiinteistöt mahdollisimman pitkään tuottavassa käytössä sekä tehostamaan raaka-aineiden ja energian käyttöä. Tavoitteena on jatkuvasti kasvattaa toiminnan hiilikädenjälkeä eli positiivista ilmastovaikutusta sekä mahdollistaa kiertotalouden mukaisia ratkaisuja.

### **Finnsementti Oy**

- Materiaalitoimittaja: Plussementti ja masuuni-kuonajauhe KJ400

Finnsementti Oy on laajan tuotevalikoiman omaava sementinvalmistaja, jolla on yli sadan vuoden kokemus sementin valmistuksesta. Sementin kotimaisuusaste on noin 90 prosenttia. Tuotevalikoimaan kuuluvat sementin lisäksi myös kuonajauhe, betonin seos- ja lisäaineet sekä kivirouheet. Yritys on kiinnostunut kehittämään tuotteitaan tukemaan kiertotalouden mukaista toimintaa.

### **Nordkalk**

- Materiaalitoimittaja: Paraisten uunipöly
- Aiempaa kokemusta uusiomateriaalien hyödyntämisestä stabiloinnissa

Nordkalk on kalkkikivipohjaisten tuotteiden ja sovellusten toimittaja, joka toimittaa raaka-aineita lukuisille teollisuudenaloille. Kalkkikivipohjaisia tuotteita ja ratkaisuja voidaan muun muassa hyödyntää parantamaan viljelysmaan tuottavuutta sekä ilman ja veden puhdistuksessa. Nordkalk kehittää kalkkikivitarjonnan lisäksi uusia kiertotaloustuotteita.

### **Suomen Erityisjäte Oy**

- Materiaalitoimittaja: yhdyskuntajätteen polton pohjakuona

Suomen Erityisjäte Oy on jätteenpolton pohjakuonien, pilaantuneiden materiaalien ja vaarallisten jätteiden käsittelyn, kierrätyksen ja loppusijoituksen asiantuntija. Yrityksen tavoitteena on lisätä jätteen hyötykäyttöä kiertotalousajattelun mukaisesti ja kehittää ympäristöystävällisiä palveluita ja tuotteita.

### **Renotech Oy**

- Materiaalin toimittaja: Renotech mix
- Aiempaa kokemusta uusiomateriaalien hyödyntämisestä stabiloinnissa

Renotech Oy tarjoaa ratkaisuja tuhkaan, kuonaan ja muihin sivuvirtoihin perustuviin sovelluksiin. Yrityksellä on pitkä kokemus varsinkin korkealämpötilakemian, uusien sideaineiden ja materiaali-kehityksen alalla. Erityisosaamisena on muun

muassa *in situ*-polton modifiointi biotuhkille, biotuhkan karakterisointi ja luokittelu uusiokäyttökohteen mukaan, kuonateknologia, zeoliitit sekä ravinteiden ja metallien talteenotto.

### Ecolan Oy

– Materiaalitoimittaja: Ecolan mix

Ecolan Oy on kiertotalouden yritys, joka jalostaa teollisuuden sivuvirroista materiaaleja ja tuotteita sekä infrarakentamiseen että metsälannoitukseen. Infrarakentamisen materiaaleja ovat rakeistettu

tuhkat sekä maaperän stabilointiaineet. Rakeistettu tuhka on osoittautunut hyväksi routaeristeeksi erilaisiin väyliin ja kenttiin sekä esimerkiksi varasto- ja teollisuusrakennuksien sisätäyttöihin. Ecolan Oy:n maaperän stabilointiaineita hyödyntämällä voidaan välttyä suurilta massanvaihdolta ja läjityksiltä sekä saavuttaa merkittäviä vähennyksiä hiilidioksidipäästöissä. Yritys tukee ja edistää uusiomateriaalien tutkimus- ja kehitystyötä kiertotalouden edistämiseksi ja Suomen hiilineutraali-suustavoitteiden saavuttamiseksi.

## 2 TUTKIMUSKOHTEN GEOLOGINEN KUVAUS

Matalahti on Naantalın Luonnonmaalla sijaitseva (kuva 2) vanha merenlahti, jolla on kapea, noin 500 metriä pitkä kaivettu, uomamainen yhteys mereen. CircVol-projektin stabilointipilottikohde sijaitsee lahden itäpäässä, noin 0,5–2,0 m korkeustasossa merenpinnan yläpuolella. “Läjitysalue satama” ja ”Läjitysalue B” (kuva 1) merkityillä alueilla sijaitsevien ruoppausmassa-aldaiden alapuolinen maa-

perä on vanhaa salaojitettua viljelysmaata, joiden valumavedet virtaavat Matalahteen.

Matalahden alue edustaa lounaissuomalaista maisemakuvaa, jolle on tyypillistä paljaaksi huuhtoutuneet kallioiset mäkialueet ja niiden väliset painanteet, joissa kallioperää peittävät paksut savikerrokset. Moreenia on alueella pintamaana vähän. Savikerrosten paksuus voi olla painanteissa useiden



Kuva 2. Naantalın Matalahden sijainti. Pohjakartta © Maanmittauslaitos ja HALTIK.

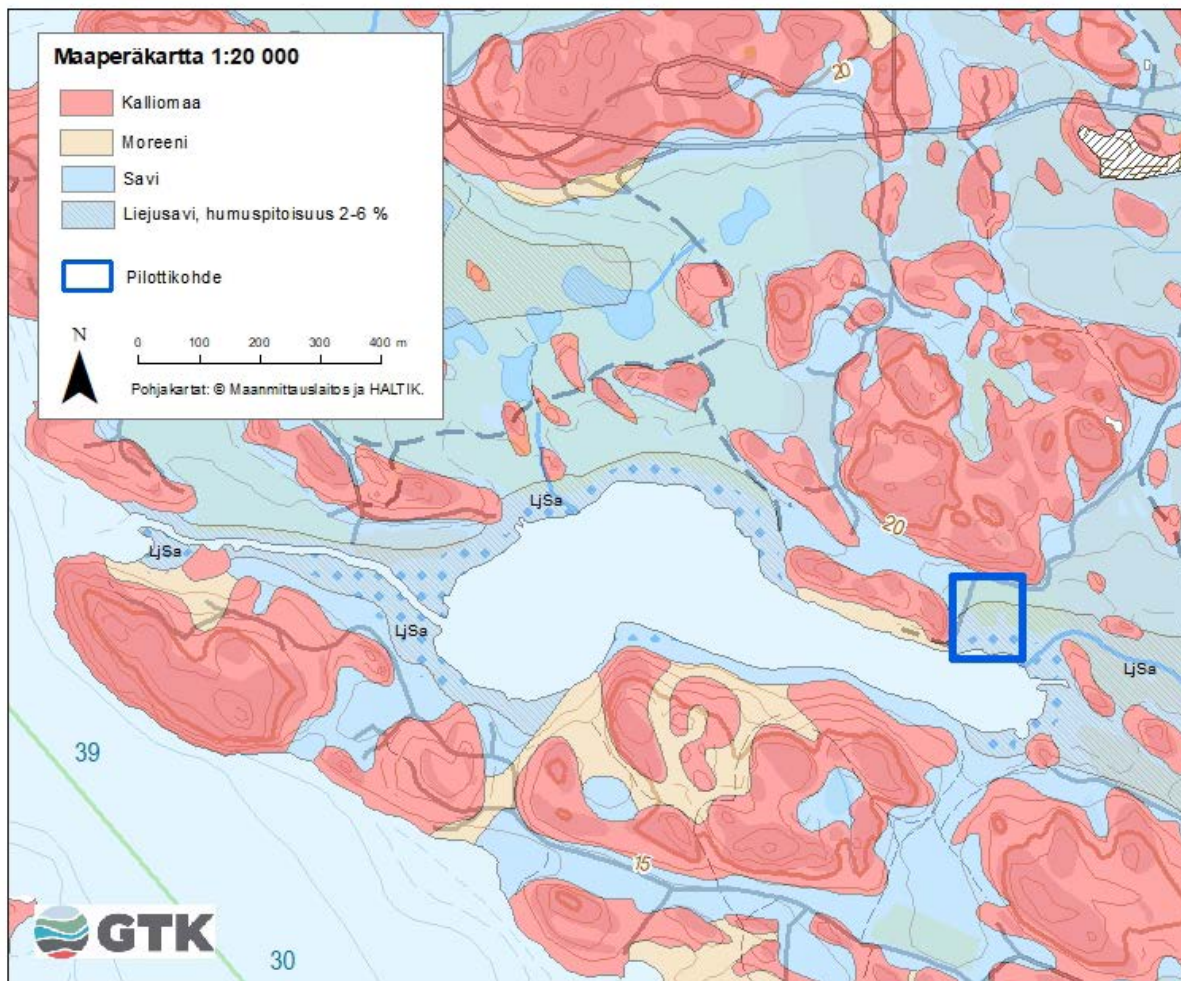
kymmenien metrien paksuinen, ja ne tasoittavat maan korkokuvaa merkittävästi. Alueen savien savespitoisuus on suuri, yleisesti yli 60 % (Niemelä ym. 1987). Matalahden pilottialueelta ei ollut saatavilla koko maaperän kerrossarjaa kattavia kairauksia, joten alueen maaperäkerrosten paksuudesta ja tarkemmista ominaisuuksista ei ole tarkkaa tietoa.

GTK:n tuottama 1:20 000 -maaperäkartta kuvaa maalajit yhden metrin syvyydelle maanpinnasta, ja sen mukaan Matalahden ympäröivät alavat maa-alueet ovat pääosin liejusavea (kuva 3), jonka esiintymisen todennettiin ruoppausten perusteella jatkuvan myös Matalahden pohjalle. Jääkauden jälkeinen maankohoaminen on alueella nykyisin noin 53 cm sadassa vuodessa (Kääriäinen 1962) ja se paljastaa lahden pohjan sedimenttejä kuivalle maalle. Maaperäkartan mukaista liejusavialuetta reunustavat savialueet, jotka nousevat topografisesti jonkin verran kalteville rinnealueille ja rajautuvat avokallioalueisiin. Matalahdesta ruopatut massat on läjitetty maaperäkartan mukaisille liejusavi- ja

savialueille. Myös pilottialueen (kuva 4) maaperä on liejusavea ja savea (kuva 5).

Matalahden alueen liejusavi on hyvin todennäköisesti muinaisen Litorina-meren kerrostumaa tai pintaosaltaan nykyisen Itämeren kerrostumaa, joka sisältää tyypillisesti runsaasti orgaanista ainesta ja rautasulfidiyhdisteitä. Rautasulfidien esiintyminen liejusavessa todettiin myös kenttäkokeiden yhteydessä tehdyissä kairauksissa, kun ruoppausmassojen alapuolisesta peltomaasta tunnistettiin pH-mittauksilla hyvin hapan maahorisontti. Rautasulfideista muodostuu hapekkaissa olosuhteissa rikkihappoa, joka alentaa maaperän pH:ta voimakkaasti. Liejusavialueita ympäröivät savialueet ovat todennäköisesti Litorina-vaihetta vanhempia savikoita, joissa sulfidi- ja liejupitoisuudet ovat tyypillisesti pienempiä.

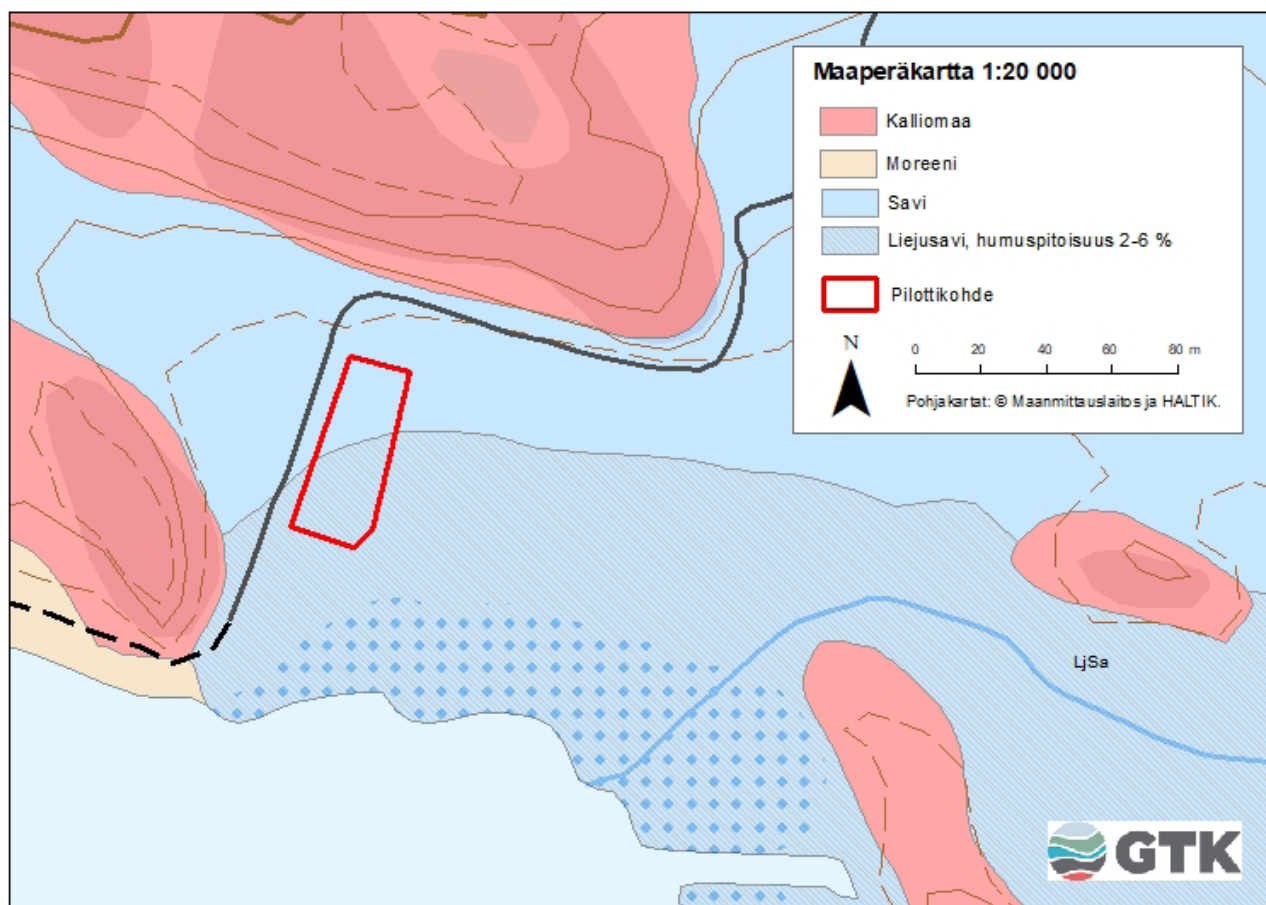
GTK:n kallioperäkarttojen mukaan pilottialueen kallioperä on mikrokliinigraniittia. Pilottialueen pohjoispuolella esiintyy kiillegneissia (Lindberg ym. 1994).



Kuva 3. Matalahden ja pilottikohteen sijainti 1:20 000 -maaperäkartalla. Maaperäkartta © Geologian tutkimuskeskus, Pohjakartta © Maanmittauslaitos ja HALTIK.



Kuva 4. Matalahden pilottikohteen sijainti. Ilmakuva © Maanmittauslaitos.

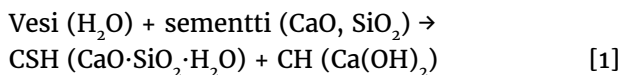


Kuva 5. Pilottikohteen sijainti 1:20 000 -maaperäkartalla. Maaperäkartta © Geologian tutkimuskeskus, Pohjakartta © Maanmittauslaitos ja HALTIK.

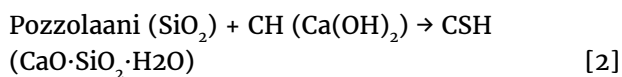
### 3 MAA-AINEKSEN STABILOINTI

Tässä kappaleessa on kuvattu maa-ainesten stabiloinnissa tyypillisesti käytettyjen sideaineiden reaktioita pohjautuen mm. Holopainen (2016), Keramatikerman ym. (2016) ja Firoozi ym. (2017) tekemiin yhteenvetoihin.

Sementti on hydraulinen sideaine, joka veden kanssa reagoidessaan muodostaa sementtiliimaa ja sitoo siten maapartikkeleita toisiinsa. Sementtiä voidaan käyttää useimpien maalajien stabiloimiseen, koska stabiloidun maan lujuuden kehittyminen perustuu sementin ja runkoaineessa olevan veden väliseen reaktioon. Hydrataatioksi kutsutussa reaktiossa sementin sisältämät kalsiumsilikaatit reagoivat veden kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraattia (CSH), joka sitoo maapartikkeleita yhteen lisäen käsitellyn materiaalin lujuutta.



Sementillä saavutettavat lujuudet ovat yleensä esimerkiksi lentotuhkalla stabilointia suurempia erityisesti ensimmäisten kuukausien aikana. Tämä johtuu siitä, että sementin ja veden hydrataatio tapahtuu selvästi nopeammin kuin esimerkiksi kalkin sisältämän kalsiumhydroksidin ja stabiloitavan maan savipartikkeleiden välinen pozzolaaninen reaktio. Sementin hydrataatiossa muodostuu myös kalsiumhydroksidia (Ca(OH)<sub>2</sub>), joka reagoi myöhemmässä vaiheessa pozzolaanisesti.



Reaktion vaikutus stabiloidun maan lujuuteen on kuitenkin pieni erityisesti vähän kivennäisainesta sisältävien orgaanisten ainesten stabiloinnissa. Sementtiliiman lujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi materiaalin huokoisuus sekä vesipitoisuus.

Sementin lisäksi stabiloinnin sideaineena voidaan käyttää kalkkia tai teollisuuden sivutuotteita, kuten masuunikuonaa tai lentotuhkaa. Lisäksi

voidaan käyttää sideaineseoksia, jotka koostuvat useasta sideainekomponentista.

Stabiloinnissa käytettävä kalkki on pääosin poltettua kalkkia. Sammutettu kalkki muodostuu kalkkikiveä polttamalla, jolloin kalkkikiven sisältämän kalsiumkarbonaatin reagoidessa lämmön kanssa muodostuu kalsiumoksidia (CaO) sekä hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>). Kalsiumoksidista käytetään nimeä poltettu kalkki. Poltettu kalkki reagoi veden kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia, jota kutsutaan sammutetuksi kalkiksi. Reaktiossa muodostuu lisäksi lämpöä, joka nopeuttaa myöhemmin tapahtuvia reaktioita. Sammutettu kalkki ei itsessään ole sitoutuva aine, vaan sitoutuminen ja maan lujittuminen tapahtuu pozzolaanireaktiossa kalsiumhydroksidin reagoidessa esimerkiksi käsiteltävän maan sisältämien aluminaattien ja silikaattien tai muun sideainekomponentin kanssa. Tällöin reaktiossa muodostuu sementin ja veden reaktion tavoin kalsiumsilikaattihydraattia (CSH) tai kalsiumalumiinilikaattihydraattia (CASH), jotka sitovat maapartikkeleita yhteen ja lisäävät siten maan lujuutta. Kalkkia käytetäänkin nykyisin usein stabiloinnissa yhtenä sideainekomponenttina sideaineseoksissa.

Tuhkat koostuvat pääosin piidioksidista ja alumiinidioksidista sekä muiden metallien, kuten raudan ja kalsiumin, oksideista. Lentotuhkan koostumus sekä metallipitoisuus vaihtelevat esimerkiksi hiilen koostumuksen tai palamisolosuhteiden mukaan. Lentotuhka on pozzolaaninen sideaine, joten se ei reagoi itsestään vaan tarvitsee kalkkia lujittuakseen.

Masuunikuona on raakauraudan valmistuksessa syntyvä sivutuote, joka sisältää piileviä hydraulisia ominaisuuksia. Piilevillä hydraulisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan tässä sitä, että materiaali voi reagoidessaan esimerkiksi kalsiumhydroksidin kanssa tuottaa maan lujuutta parantavia tuotteita. Masuunikuona sitoutuu itsestään reagoidessa veden kanssa, mutta käytännössä se tarvitsee aktivaattorin, joka kiihdyttää sitoutumisreaktiota. Aktivaattorina käytetään yleisimmin sementtiä.

## 4 KENTTÄKOKEEEN SUUNNITTELU JA ESITESTIT

Ruoppausmassojen stabiloinnin kenttäkokeen alkuperäiseksi suorituspaikaksi oli valittu Lauttarannan tuleva asuinalue Hirvensalossa, Turussa. Lauttarannan ympäristölupamenettelyn viivästyessä lopulliseksi kenttäkoe paikaksi valikoitui kuitenkin Naantalın asuntomessualueen Matalahti, jolloin myös runkoaineena toimiva ruoppausmassa vaihtui. Stabilointireseptien kehitys ehdittiin kui-

tenkin aloittaa käyttämällä Aurajoen jokisuistosta ruopattua massaa, ja saimme muokattua menetelmiä toimiviksi ja testattua referenssimateriaalien (sementti ja kuona) toimivuuden kyseisellä massalla. Kenttäkokeen paikan varmistuttua Aurajoen jokisuiston ruoppausmassalla testatut stabilointireseptit testattiin uudelleen Matalahdelta haetulta ruoppausmassalla.

### 4.1 Esitestit

Ruoppausmassan perusominaisuuksia stabiloinnin kannalta, stabiloituvuudesta sellaisenaan tai eri seosmateriaalien kanssa, sekä ruoppausmassan ja eri runko- ja sideaineiden ominaisuuksia selvitettiin laboratoriotutkimuksin. Teknistä kelpoisuutta on tutkittu käytettävien materiaalien perusominaisuuksien ja puristuslujuuksien suhteen sekä tarkastelemalla sekoitettua massaa visuaalisesti. Ympäristökelpoisuutta on tutkittu käytettyjen materiaalien ja seosten kokonaispitoisuuksien, käy-

tettyjen materiaalien liukoisuuksien sekä stabiloitujen massojen liukoisuuksien suhteen.

Lauttarannan ruoppausmassan stabiloitavuuteen liittyvien esitestien jälkeen testejä jatkettiin varsinaisen kenttäkoe kohteen maa-aineksella eli Matalahden ruoppausmassalla, jota haettiin kohteesta syksyllä 2019 (kuva 6). GTK ja Turun AMK tekivät itse runkoaineesta eli ruoppausmassasta laboratoriotutkimuksia, joiden tulokset on esitetty kappaleessa 5.



Kuva 6. Matalahden maalle läjitetystä ruoppausmassasta haettiin syyskuussa 2019 näytteitä esitestejä varten. Kuvat: Julius Manninen, Turku Science Park Oy.

### 4.2 Käytetyt sideaineet

Sideaineet voidaan jakaa niiden toimintaperiaatteen perusteella hydraulisiin sekä ei-hydraulisiin sideaineisiin. Hydrauliset sideaineet sitoutuvat reagoissaan veden kanssa. Ei-hydrauliset sideaineet tarvitsevat jonkin katalyytin, kuten savimineraalin,

sitoutumiseen. Kaupallisten sideaineiden lisäksi stabiloinnissa voidaan käyttää myös teollisuuden sivutuotteita. Kun perinteisiä sideaineita korvataan teollisuudesta saatavilla sivutuotteilla, voidaan säästää huomattavia kustannussäästöjä. Sideaineiden

vaikutus eri maalajeihin vaihtelee. Sideaineen laatu ja määrä riippuvat esimerkiksi stabiloitavan maan rakeisuudesta, vesipitoisuudesta sekä orgaanisen aineksen määrästä. Eri sideaineet toimivat siten eri tavoin maalajien ominaisuuksien mukaan.

Esitesteissä käytettiin kuutta yrityskumppanien toimittamaa sideainetta runkoaineen lisäksi. Näitä sideaineita testattiin sekä erikseen että yhdistelmällä eri tavoin toivottujen ominaisuuksien mukaan niin, että vaaditut lujuusominaisuudet täyttyivät. Yhtenä tavoitteena oli myös identifioida sopivia sideaineita, joilla voitaisiin korvata sementin määrää stabiloinnissa ja siten vähentää infrarakentamisen CO<sub>2</sub>-päästöjä pitkällä aikavälillä.

Stabilointipilottiin valitut sideaineet ja muut materiaalit ovat yleisellä tasolla nk. MARA-

asetuksen (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteidensä hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017) mukaisia materiaaleja, ja osa materiaaleista on kaupallisia jatkuvassa käytössä olevia tuotteita. Näin ollen riski ympäristön pilaantumisesta on lähtökohtaisesti vähäinen.

Side- ja runkoaineiden kokonaiskoostumus määritettiin Åbo Akademiella pyyhkäisyelektronimikroskooppia (SEM) ja energia-dispersiivistä spektrometriä (EDS) käyttäen. Koostumuksesta laskettiin myös vastaavat yleisesti käytetyt oksidimuodot materiaalien helpompaa vertailua varten. SEM-EDS-laitetta käytettiin lisäksi materiaalin morfologian ja stabiloitujen näytteiden rakenteen kuvantamiseen. Määritysten tulokset ilmoitettuna yleisinä oksideina on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kenttäkokeen sideaineiden oksidikoostumus (%) SEM/EDS-laitteella määritettynä.

%	Sementti	Kuona	Tuhka	Ecolan Mix	Renotech	Pohjakuona	Uunipöly
	Finnsementti Plus	Finnsementti KJ 400	L&T	Ecolan	Mix Renotech	Suomen Erityisjäte 0–2 mm	Nordkalk
Na <sub>2</sub> O	1,0	0,7	2,1	1,0	0,8	3,6	0,7
MgO	4,1	10,9	2,8	1,6	10,3	1,8	2,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,3	11,4	13,2	18,2	11,5	13,2	10,3
SiO <sub>2</sub>	20,7	31,9	39,4	41,1	29,9	19,0	20,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0	0,0	2,3	0,6	0,0	1,1	0,1
SO <sub>3</sub>	5,4	3,7	6,3	7,2	3,5	11,6	4,2
Cl	0,1	0,0	0,4	0,1	0,1	2,1	0,2
K <sub>2</sub> O	1,2	0,7	5,1	1,6	0,7	1,0	2,7
CaO	59,3	37,6	20,6	23,9	40,2	34,6	55,3
TiO <sub>2</sub>	0,1	2,0	1,2	0,8	2,1	1,3	0,6
MnO	0,1	0,4	0,6	0,1	0,3	0,3	0,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,8	0,6	5,9	3,8	0,7	8,2	3,0
ZnO	0,0	0,1	0,2	0,2	0,0	2,3	0,0

#### 4.3 Näytteiden valmistus

Testatut reseptit sekoitettiin Hobart-sekoittimella (kuva 7) yhteensä kaksi minuuttia: ensin minuutti 1-vaihteella, jonka jälkeen vielä minuutti 2-vaihteella. Tämän jälkeen näytteet sullottiin näyteputkiin lyömällä pöytää vasten. Åbo Akademiella näyteputket olivat kooltaan 56x28 mm ja putkien päissä käytettiin muovitulppia. Näytteitä säilytettiin ensin 2 vrk huoneen lämmössä, jonka

jälkeen ne siirrettiin jääkaappiin (+5 °C) odottamaan puristustestiä. Turun AMK:lla näytekoko oli standardin mukaisesti 50x100 mm ja menettelytapa oli muuten vastaava kuin Åbo Akademiella. Näytteiden valmistus ja säilytys tehtiin noudattaen Liikenneviraston ohjetta syvästabiloinnin suunnitteluun (Liikennevirasto 2018).





Kuva 7. Näytteiden valmistusta Hobart-sekoittimella.

#### 4.4 Puristuslujuus

Matalahden pilottialueen stabiloidun kentän tavoitepuristuslujuus oli 150 kPa. Näytteiden puristus tehtiin yksiakselisesti sekä Åbo Akademilla että Turun AMK:lla kuvassa 8 esitetyillä laitteistoilla. Åbo Akademilla näytteen puristusnopeus oli 1 mm/min ja laitteella rekisteröitiin maksimivoima (N), josta laskettiin lujuusarvo (kPa). Turun AMK:lla puristusnopeus oli myös 1mm/min. Käytetty VjTech Triplex III laite antoi lujuus- ja voima-arvojen lisäksi myös muodonmuutuskäyrän, josta saatiin laskettua E-moduuli eli kokoonpuristuvuusmoduuli.

Reseptikehitystä tehtiin kaikkien toimittajien tuotteilla. Tavoitteena oli 150 kPa:n puristuslujuus. Lopulta noin 40 reseptin ja testin joukosta kenttäkokeeseen valikoitui yhdeksän reseptiä, jotka testattiin tarkemmin (taulukko 2). Mukana oli kaikkien materiaalitoimittajien raaka-aineita. Lopullinen koostumus oli jokaisella reseptillä samassa suhteessa eli 1 m<sup>3</sup> ruoppausmassaa + 350 kg muita kuivia aineita.



Kuva 8. Näytteiden puristuslujuuden testaamiseen käytetyt laitteet. Turun AMK:n käyttämä laite, VjTech Triplex III (vasemmalla) ja Åbo Akademin käyttämä laite, L&W (oikealla).

Taulukko 2. Kenttäkokeessa koeruuduissa käytetyt reseptit ja sideaineiden määrät (kg/m<sup>3</sup>).

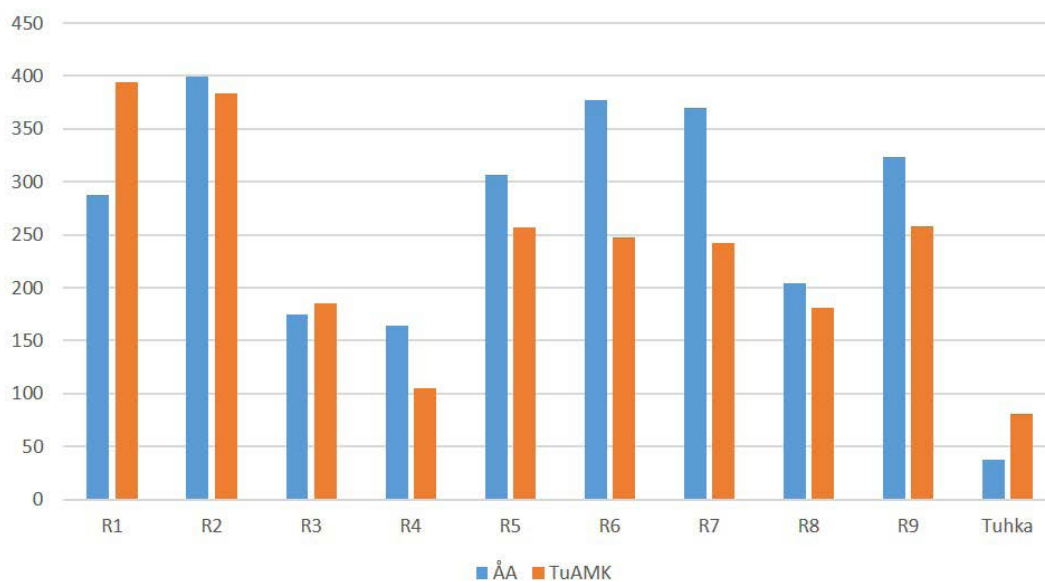
Resepti	Ruoppaus- massa Matalahti	Lento- tuhka Naantali	Sementti Finn- sementti	Kuona Finn- sementti	Uunipöly Nordkalk	Pohja- kuona Erityis- jäte	mix Renotech	mix Ecolan
1	1 200	200	150					
2	1 200	200	50	100				
3	1 200	200						150
4	1 200	200					150	
5	1 200	100	150			100		
6	1 200	100	50	100		100		
7	1 200	200	50	50	50			
8	1 200	200	25	75	50			
9	1 200	0	50	100	100	100		

Reseptit valittiin laajalla skaalalla erilaisia yhdistelmiä, joilla eri aineiden ominaisuuksia ja vaikutuksia stabiloinnissa oli mahdollista tutkia. Jokainen resepti sisälsi joko tuhkaa, pohjakuonaa tai näiden yhdistelmää ja lisäksi noin 150 kg/m<sup>3</sup> aktiivisempia sideaineita eri suhteissa. Resepteissä 8 ja 9 käytettiin esitesteissä kalkkituhkaa, jota valitettavasti ei ollut saatavissa kenttäkokeen aikana, ja se korvattiin kenttäkokeessa uunipölyllä.

Taulukossa 2 esitetyille yhdeksälle reseptille tehtiin laajat ennakkokokeet laboratorio-olosuhteissa.

Kaikki puristuslujuuskokeiden esitestien tulokset (ÅÅ, Turun AMK) on esitetty liitteessä 1 ja 28 vrk:n puristuslujuus on myös esitetty kuvassa 9. Kaikki lopulliset puristuslujuudet olivat asetettujen tavoitteiden mukaisia. Toivottuja pieniä eroja eri reseptien välillä saatiin, ja myös pelkkä tuhkan lisäys antoi ruoppausmassalle toivottua lujuutta. Åbo Akademin ja Turun AMK:n laboratoriomenetelmien pienten eroavaisuuksien vuoksi eroja on nähtävissä myös lujuusarvoissa, mutta lujuustrendit reseptien välillä ovat kuitenkin hyvin samanlaisia.

Puristuslujuus (28d) - Esitestit resepteille

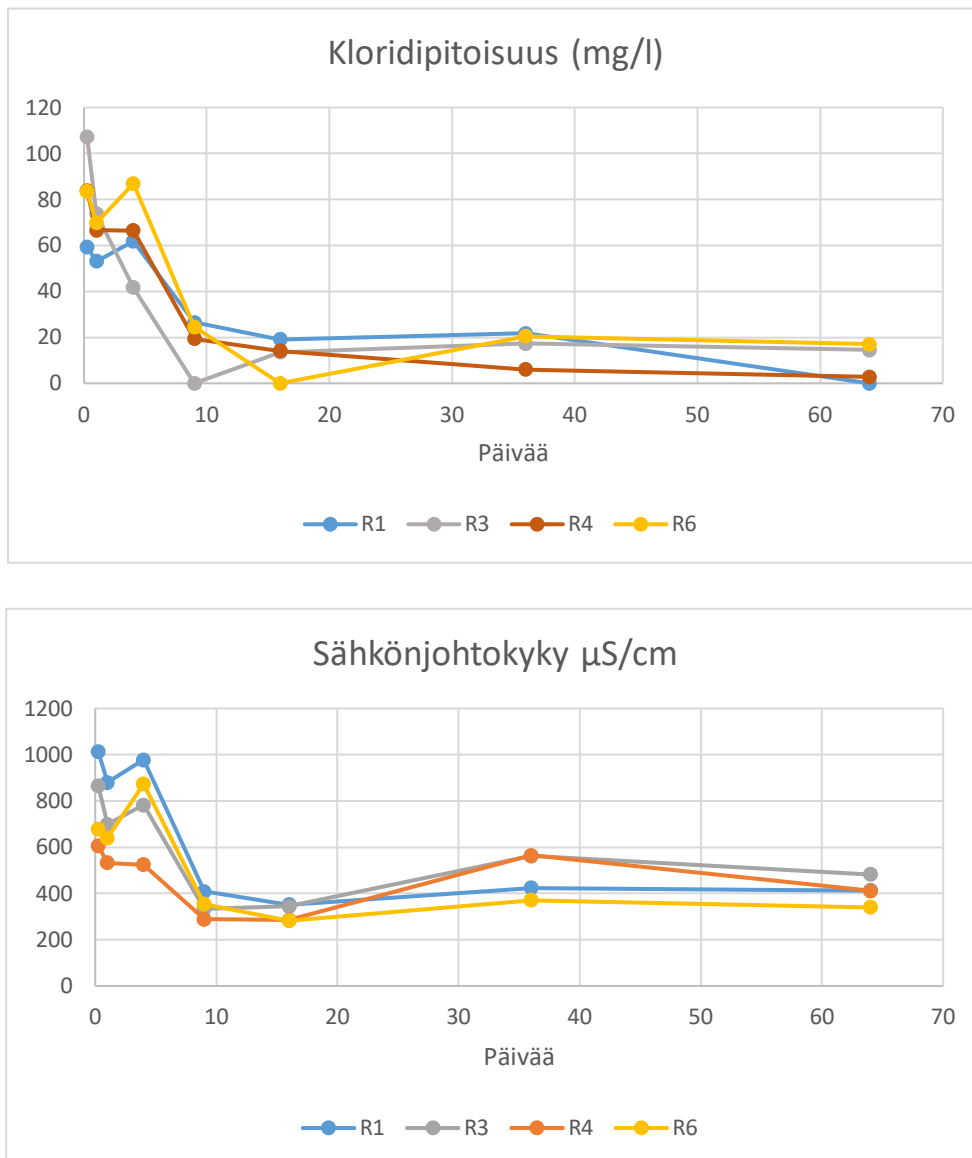


Kuva 9. Puristuslujuuskokeiden (28 vrk) esitestien tulokset yhdeksälle reseptille sekä pelkälle tuhkalle (ÅÅ, Turun AMK).

#### 4.5 Diffuusiotestit

Esitesteissä eri reseptein stabiloiduille koekappaleille tehtiin myös diffuusiotestejä ruoppausmassan ja sideaineiden sisältämien haitta-aineiden liukoisuuden selvittämiseksi. Esitesteihin valittiin reseptit 1, 3, 4 ja 6 (taulukko 2). Koekappaleita ikäännytetettiin 28 tai 36 vuorokautta ennen diffuusiotestin aloittamista. Diffuusiotestit toteutettiin standardin SFS-EN 15863 mukaisesti eli koekappaleita pidettiin 64 vuorokautta vedessä, jonka pH-arvo oli ennen koekappaleen upotusta säädetty hapolla arvoon 4. Kokeen aikana vesi vaihdettiin 6 tunnin, 1 vuorokauden (d), 2,25 d:n, 4 d:n, 9 d:n, 16 d:n, 36 d:n ja 64 d:n kuluttua kokeen aloittamisesta. Testatuissa koekappaleissa ei havaittu mer-

kittävä haitta-aineiden liukenemista ja mitatut pitoisuudet olivat pääasiassa alle käytetyn analyysimenetelmän määrittämissä rajoissa. Koska stabiloitavan merellisen ruoppausmassan kloridipitoisuus ja sähkönjohtokyky ovat korkeita, myös koekappaleiden kloridipitoisuus ja sähkönjohtokyky olivat korkeita diffuusiotestin lähtötilanteessa. Sideaineiden sekoittaminen ruoppausmassaan alensi kuitenkin merkittävästi koekappaleiden ja diffuusiotestin uuttoliuoksen kloridipitoisuutta ja sähkönjohtokykyä jo kymmenen päivää kokeen aloittamisen jälkeen (kuva 10). Esitetien diffuusiomäärittelytulokset on esitetty liitteessä 2.



Kuva 10. Resepteillä R1, R3, R4 ja R6 tehtyjen koekappaleiden diffuusiotestin uuttoliuoksen kloridipitoisuus ja sähkönjohtokyky 64 vuorokautta kestäneen kokeen aikana.

#### 4.6 Koetoimintailmoitus

CircVol-projektissa Matalahdelle suunnitellun kenttäkokeen tarkoituksena oli kokeilla jätepo- jaisten sideaineiden hyödyntämisen ja ympäristökelpoisuutta ruoppausmassan stabiloinnissa. Ympäristönsuojelulain (527/2014, YSL) 31 §:n mukaan lyhytaikainen toiminta, jonka tarkoituksena on esimerkiksi kokeilla uutta tekniikkaa toiminnan vaikutusten ja käyttökelpoisuuden selvittämiseksi, ei vaadi ympäristölupaa. Tämän perusteella Matalahdella toteutettavalle koeluonteiselle kenttäkokeelle haettiin lupa YSL:n 119 §:n mukaisella koetoimintailmoituksella.

Naantalın kaupunki teki CircVol-projektin esityksen mukaisen ilmoituksen koeluonteisesta toiminnasta 17.1.2020, ja se hyväksyttiin 4.3.2020 (Naantalın kaupunki 2020a, viranhaltijan päätös Nro 1/2020). Ilmoitusta täydennettiin 22.4.2020 ruoppausmassa-altaan koeruutujen ulkopuolisen alueen kiinteyttämällä pelkällä tuhalla. Muutos hyväksyttiin 28.4.2020 (Naantalın kaupunki 2020b, viranhaltijan päätös Nro 2/2020). Koetoimintailmoituksessa oli kuvattu ruoppausmassan stabiloinnin kenttäkokeessa käytettävät tuhkamäärät ja sideaineet sekä esitetty tarkempia tietoja käytettävien stabilointimateriaalien laadusta. Kenttäkoe aloitettiin 20.–24.4.2020.

Koetoimintaluvassa oli annettu yhteensä 11 mää- räystä, joiden mukaisesti toimintaa tuli harjoit- ta. Koeluontoista toimintaa koskevan päätöksen tarkkailumääräyksissä stabiloidusta massasta tuli määrittää 0, 3 ja 6 kk:n aikapisteissä liukoisuus seuraavista nk. MARA-asetuksen (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maa- rakentamisessa 843/2017) liitteen 2 taulukossa 1 esitetyistä haitallisista aineista: Sb, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Mo, Ni, V, Zn, Se, F<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> ja DOC. Lisäksi stabiloidusta massasta tuli määrittää PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus. Päätös myös edellytti, että koetoiminta-alueen valuma- ja hule- vesistä tuli määrittää pH, sähkönjohtokyky, kiin- toaineksen määrä ja arseenin pitoisuus vastaavissa aikapisteissä.

MARA-asetukseen ei ole sisällytetty jätteen käyt- töä huonolaatuisten maa-aineksen stabiloinnissa (Ympäristöministeriö 2017). Tarkoituksena on, että pehmeiden maa-ainesten, kuten savi, lieju ja turve, rakennettavuusominaisuuksia parantava stabilointi

sisällytettäisiin valmisteilla olevaan maa-aines- jätteiden hyötykäyttöä koskevaan lainsäädän- töön (Ympäristöministeriö 2017, 2018). Ehdotus nk. MASA-asetuksesta (Ehdotus valtioneuvoston asetukseksi maa-ainesejätteiden hyödyntämi- sestä maarakentamisessa) oli lausuntokierroksella 3.12.2018–18.1.2019 (Ympäristöministeriö 2018). Saadun palautteen sekä uusien tunnistettujen haas- teiden vuoksi sääntelytyötä päätettiin kuitenkin jatkaa pohtimalla mm. rekisteröintimenettelyn kor- vaamista ilmoitusmenettelyllä. Uusiin säännöksiin tulisi sisältyä MASA-asetusluonnoksen soveltamis- alaan kuuluvat maa- ja kiviainekset, mukaan lukien maa-alueelle sijoitettavat ruoppausmassat (siltä osin kuin niiden käsittely ei kuulu vesilain piiriin) sekä maaperän tai maa-ainesten kiinteytykseen soveltuvat sideaineet (Ympäristöministeriö 2020).

Koska MASA-asetuksen (tai sitä vastaavan lainsäädännön) valmistelutyö on vielä kesken, Matalahden kenttäkokeen tulosten arvioinnissa on käytetty vertailuarviona MARA-asetuksen liit- teen 2 taulukossa 1 esitettyjä haitallisten aineiden raja-arvoja ja muita laatuvaatimuksia päällystetylle kentälle, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on ≤ 1,5 metriä. Myös Naantalın kaupungin tekemässä päätöksessä koeluonteisen toiminnan aloittami- sesta Matalahdella (Naantalın kaupunki 2020a) viitataan MARA-asetuksen mukaisten periaattei- den noudattamiseen, jotta vaikutukset ympäristöön minimoidaan, ja stabiloidusta massasta otetuista näytteistä tuli tehdä MARA-asetuksen liitteen 3 taulukon 2 mukaiset määritykset. Ruoppausmassan sisältämien haitallisten aineiden ominaisuuksien arvioinnissa on käytetty MARA-asetuksen rinnalla MASA-asetusluonnoksessa esitettyjä raja-arvoja. Lisäksi ruoppausmassan sisältämien haitallis- ten aineiden kokonaispitoisuutta on verrattu nk. PIMA-asetuksen (Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista 214/2007) kynnys- ja ohjearvoihin, vaikka vesis- tön pohjakerrostumien pilaantuneisuuden ja puh- distustarpeen arviointi ei kuulu PIMA-asetuksen soveltamisalaan. Myös sideaineiden sisältämien haitta-aineiden kokonaispitoisuutta on verrattu PIMA-asetuksen kynnys- ja ohjearvoihin, vaikka kiinteytykseen käytettävät sideaineet eivät kuulu asetuksen soveltamisalaan.

## 5 RUOPPAUSMASSA JA SEN OMINAISUUDET

Naantalin Matalahden ruoppausten yhteydessä CircVol-projektille haettiin 19.9.2019 ruoppausmassaa esitestejä ja muita ennakkotutkimuksia varten (kuva 6). Ruoppausmassa kerättiin yhteensä 20 valkoiseen 10 litran ämpäriin, joita säilytettiin suljettuina Turku AMK:n kylmätiloissa. Erilaisia esiselvityksiä varten valmistettiin kokoomanäytteet, joihin otettiin osanäyte kustakin erillisestä

ämpäristä. Ruoppausmassasta analysoitiin rae-kojajakauma, vesi- ja humuspitoisuus, pH, sähkönjohtavuus ja happamuuspotentiaali. Tämän lisäksi määritettiin rikki- ja kloridipitoisuus, haitta-ainesten kokonaispitoisuus ja liukoisuus sekä ruoppausmassan mineralogia. Ruoppausmassasta tehtyjen laboratorioanalyysien testausselostet on esitetty liitteessä 3.

### 5.1 Happamien sulfaattimaiden todentaminen

Happamien sulfaattimaiden esiintyminen varmistettiin ruoppausmassasta tehdyissä pikahapetus-kokeissa ja inkubaatiotesteissä syyskuussa 2019 ja talvella 2019–2020 käyttäen kenttämittauksia ja laboratoriotestejä (Auri ym. 2020).

GTK:lle toimitetusta ruoppausnäytteestä (yksi 10 litran ämpäri) otettiin kolme osanäytettä, joille tehtiin pikahapetus vetyperoksidilla (30 %). Happamoitumista seurattiin mittaamalla pH-arvo ennen vetyperoksidilisäystä ja tämän jälkeen noin tunnin kuluttua reaktion lähes loputtua. Kaikkien osanäytteiden pH-arvo laski pikahapetuksessa yli 7,0 pH-arvosta alle kahteen.

Vetyperoksidikokeessa pH-arvoa 2,5 (IUSS Working Group WRB 2015) pidetään yleisesti raja-

arvona happamille sulfaattimaille, eli Matalahden massa happamoituu todennäköisesti voimakkaasti hapettuessaan myös ”luonnossa”. Näytteistä otettiin myös osanäytteet perinteiseen inkubaatiotestiin, joka kuvastaa vielä paremmin ja luotettavammin näytteiden luonnollista happamoitumista. pH-inkubaatiossa maaperänäytteiden annetaan hapettua huoneilmassa 9–19 viikon ajan. Näytteet pidetään ”luonnon kosteina” lisäämällä niihin tarvittaessa de-ionisoitua vettä. Perinteisessä inkubaatiossa pH-rajana käytetään pH-arvoa 4,0. Sekä vetyperoksidikokeen että inkubaatiotestin pH-arvot on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Matalahden ruoppaus sedimenttinäytteen pH-arvo lähtötilanteessa ennen vetyperoksidilisäystä 23.9.2019 sekä pH-arvo vetyperoksidikokeen lopussa 23.9.2019. Lisäksi on esitetty kolme pH-mittaustulosta inkubaatiotestin eri vaiheista.

	pH lähtöarvo 23.9.2019	pH H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 23.9.2019	Ink.-pH 17.10.2019	Ink.-pH 4.12.2019	Ink.-pH 22.1.2020
Osanäyte 1	7,7	1,3	3,9	2,9	2,7
Osanäyte 2	7,7	1,3	3,6	2,8	2,6
Osanäyte 3	7,8	1,3	3,6	2,8	2,7

### 5.2 Ruoppausmassan rikkipitoisuus

Rikkiä esiintyy luonnossa sekä orgaanisina että epäorgaanisina yhdisteinä. Happamat sulfaattimaat ovat usein entisiä merisedimenttejä. Niiden kerrostumisympäristössä on ollut sulfaattia merivedestä, jokien kuljettamaa rautaa mantereelta ja orgaanista ainesta. Kun mikrobit ovat hajottaneet pohjaan kertynyttä orgaanista ainesta, ne ovat samaan aikaan pelkistäneet sulfaatin sulfidiksi. Tyypillisiä sulfidimineraaleja sulfidisedimenteissä ovat pyriitti, mackinaviitti ja greigiitti. Hienojakoisissa happa-

missa sulfaattimaamateriaaleissa kokonaisrikkipitoisuus on yleensä yli 0,2 %.

Matalahden näytteistä tehtiin seuraavat rikki-, sulfidi- ja sulfaattianalyysit: kokonaisrikkimäärä määritettynä rikkianalyysaattorilla; sulfidisen rikin määritys (poltto 810 °C); kuningasvesiliukoisuuden määritys (modifioitu ISO 11466); kaksivaiheinen ravistelutesti (SFS-EN 12457-3), kumulatiivinen liukoisuuden rikin ja sulfaatin määrä kuiva-aineessa veden (L) ja kiinteän näytteen (S) L/S-suhteessa 10 l/kg;

sekä anionisen sulfaatin määrittäminen IC-tekniikalla. Suurin osa määrittämisistä tehtiin sekä tuorenäyt- teestä että hapettuneesta näytteestä. Analyysien tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Matalahden ruoppausmassan rikki-, sulfidi- ja sulfaattipitoisuusanalyysit. AR = kuningasvesiliotus.

	Anionien määrittäminen IC-tekniikalla	Ravistelutesti, kumulatiivinen pitoisuus kuiva-aineessa LS10	Ravistelutesti, kumulatiivinen pitoisuus kuiva-aineessa LS10	AR- ja monialkuainemäärittäminen ICP-OES-tekniikalla	Rikin määrittäminen rikki-analyysaattorilla	Sulfidisen rikin määrittäminen (polttu 810 °C)
Näyte	SO <sub>4</sub> mg/kg	S mg/kg	SO <sub>4</sub> mg/kg	S mg/kg	S %	Sulfidi S %
Tuore	863	614	847	17 700	1,86	1,65
Hapettunut	17 200	6 021	18 360	17 100	1,76	1,54

### 5.3 Ruoppausmassan kloridipitoisuus

Kloridin liukoisia pitoisuuksia tutkittiin kaksivaiheisella ravistelutestillä (SFS-EN 12457-3). Liukoisuus ilmoitettiin kumulatiivisena pitoisuutena kuiva-aineessa veden (L) ja kiinteän näytteen (S) L/S-suhteessa 10 l/kg. Matalahden merisedimentin kloridipitoisuudet olivat tuorenäytteessä 8 001 mg/kg ja hapettuneessa näytteessä 7 637 mg/kg. Liikenneviraston (2017) korroosiotutkimusohjelman esittämä raja-arvo vesiliukoiselle kloridille on 500 mg/kg, mikä ylittyy Naantalien ruoppausmassoissa noin 16-kertaisesti.

Kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien suhteella voidaan arvioida meriveden tai sulfaattimaiden vaikutusten näkymistä näytteissä. Merivedellä kyllästyneissä näytteissä on tyypillisesti enemmän kloridia kuin sulfaattia, mutta sulfaattimaidella suhde on toisinpäin. Matalahden tuorenäytteessä kloridia oli noin 10-kertainen määrä suhteessa sulfaattiin. Hapettumisen jälkeen suhde kääntyi toisinpäin, ja sulfaattia oli noin kaksinkertainen määrä suhteessa kloridiin.

### 5.4 Ruoppausmassan pH ja sähkönjohtavuus

Näytteiden pH mitattiin 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-uuton liuoksesta potentiometrisesti ravistamalla näytettä huoneenlämmössä kaksi tuntia. Maaperänäytteen pH määritetään usein vesiliuoksen sijaan CaCl<sub>2</sub>-liuoksesta, koska Ca<sup>2+</sup>-ioni on yleinen maaveden kationi, ja liuos kuvastaa paremmin maaveden koostumusta kuin vesiutu. Lisäksi pH ja sähkönjohtavuus EC (mS/m25°C) määritettiin kaksivaiheisen ravistelutestin (SFS-EN 12457-3) ensimmäisen vaiheen (liuos-kiinteä suhde 2) ja toisen vaiheen (liuos-kiinteä suhde 8) liuosfraktiosta (taulukko 5). Hapettuneen näytteen CaCl<sub>2</sub>-uuton pH-arvo oli alle 4,0, eli kyseessä on happamalle sulfaattimaalle

tyypillinen pH-arvo. Kaksivaiheisessa ravistelutestissä pH-arvo laski jo ensimmäisessä liuosfraktiossa. Tämä saattaa viitata siihen, että pH:n lasku voi olla nopeaa suotuisissa hapettavissa olosuhteissa.

Sähkönjohtavuus (EC) kasvoi näytteen hapettumisen jälkeen. EC-arvojen kasvaminen kuvastaa liuenneiden aineiden määrän lisääntymistä vesiliuoksessa. Yleensä EC-arvo korreloi liukoisen sulfaattipitoisuuden kanssa. Parametri EC on mukana Liikenneviraston korroosiotutkimusohjelmassa (Liikennevirasto 2017), ja sen raja-arvo on 50 mS/m. Sekä tuoreen että hapettuneen näytteen EC-arvot ylittävät korroosiotutkimuksen raja-arvon.

Taulukko 5. Matalahden ruoppausmassan pH-arvo ja sähkönjohtavuus (EC) määritettynä tuorenäytteestä ja hapettuneesta näytteestä. pH (CaCl<sub>2</sub>) = 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-uuton pH. pH (LS=2) ja pH (LS=8) perustuvat 2-vaiheiseen ravistelutestiin (SFS-EN 12457-3) ensimmäisen ja toisen vaiheen liuosfraktion pH-määrittelyyn. EC (LS=2) ja EC (LS=8) 2-vaiheiseen ravistelutestiin (SFS-EN 12457-3) ensimmäisen ja toisen vaiheen liuosfraktion EC-määrittelyt.

Mittaus	Tuore	Hapettunut
pH (CaCl <sub>2</sub> )	7,34	3,48
pH (LS=2)	7,71	3,37
pH (LS=8)	7,96	3,97
EC (LS=2) mS/m 25°C	1 400	2 050
EC (LS=8) mS/m 25°C	196	345

### 5.5 Ruoppausmassan asiditeetti

Näytteen asiditeetilla tarkoitetaan sen kykyä neutraloida vahva emäs tiettyyn pH-arvoon. Titrauksen perusteella voidaan laskea näytteessä oleva happomäärä (mmol H<sup>+</sup>/kg) ja sen perusteella voidaan arvioida riskin suuruutta ja laskea esim. neutralointiin vaadittava kalkkimäärä.

Tässä työssä vertailtiin sekä perinteisessä inkubaatiossa (Actual acidity ja TIA; Österholm & Nystrand 2016) että pika-inkubaatiossa muodostuvaa happomäärää (total acidity) titraamalla näytteen pH-arvoon 5,5 NaOH:lla. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää näytteissä hapettumisen myötä muodostuva happomäärä sekä arvioida myös pikahapetuksen luotettavuutta. Näytteissä tiedettiin olevan jonkin verran orgaanista ainesta, minkä vuoksi vetyperoksidihapetus voi liioitella syntyvää happomäärää.

Näytteiden happamoitumispotentiaalia voidaan arvioida alla olevan luokituksen perusteella, joka

perustuu Hadzicin ym. (2014) tutkimustuloksiin.

- > 100 mmol H<sup>+</sup>/kg: merkittävä happamoitumispotentiaali
- 10–100 mmol H<sup>+</sup>/kg: kohtalainen happamoitumispotentiaali
- < 10 mmol H<sup>+</sup>/kg: pieni happamoitumispotentiaali

Matalahden ruoppausmassanäytteessä oli inkubaation jälkeinen asiditeettiarvo (TIA) 158 mmol H<sup>+</sup>/kg, ja happamuuspotentiaali voidaan tulkita merkittäväksi (taulukko 6). Inkuboidun ja pikahapettujen näytteiden asiditeetissa oli havaittavissa huomattavat erot: pikahapettuneen näytteen asiditeetti oli noin 5-kertainen verrattuna inkuboituu. Tämä viittaa siihen, että näytteen sisältämä orgaaninen nostaa pikahapettuneen näytteen asiditeettiarvoa tai että inkuboitu näyte ei ole hapettunut täydellisesti.

Taulukko 6. Matalahden ruoppausmassan kuiva-aineksen määrä, hehkutushäviö (LOI), aloitus-pH ennen hapettumista ja asiditeettiarvot määritettynä tuorenäytteestä ja hapettuneesta näytteestä. Menetelmät: Actual acidity = perinteinen inkubaatiotesti; Total acidity = pikahapettumistesti.

Näyte tuore/hapettunut	Menetelmä	Kuiva-aines %	LOI %	Aloitus pH	Asiditeettiarvo pH 5,5 mmol H <sup>+</sup> /kg
tuore	Actual acidity	28 %	9 %	6,8	0
tuore	Total acidity (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	28 %	9 %	2,25	823
hapettunut	TIA	55 %	10 %	3,2	158
hapettunut	Total acidity (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	55 %	10 %	2,25	771

Turun AMK:lla valmistettiin 27.9.2019 ruoppausmassasta kokoomanäyte, joka kuivattiin ja hienonnettiin. Kuivattua ruoppausmassaa punnittiin 11–12

g ja siihen lisättiin 50 ml 0,02 mol/l kalsiumkloridiliuosta (CaCl<sub>2</sub>). Liuoksen pH mitattiin seuraavana päivänä, ja pH-arvo oli 6,5.

## 5.6 Ruoppausmassan orgaanisen aineksen määrä

Happamat sulfaattimaamateriaalit sisältävät yleensä aina myös orgaanista ainesta. Matalahden ruoppausmassanäytteistä määritettiin orgaanisen hiilen määrä (DOC) vesiliuoksesta IC-tekniikalla. Liukoisen orgaanisen hiilen määrä määritettiin 2-vaiheisella ravistelutestillä (SFS-EN 12457-3). Lisäksi hiilipitoisuus, epäorgaanisen hiilen kokonaismäärä ja orgaanisen hiilen kokonaismäärä määritettiin jätteen kaatopaikkakelpoisuuden määrittämisessä käytettävällä testillä (SFS-EN 13137). Hehkutushäviö (LOI) (550 °C) määritettiin rae-suuruustutkimusten ja asiditeettimittausten yhteydessä. Näytteen hiilipitoisuus on noin 4 %, ja lähes kaikki hiili on orgaanisessa muodossa. Liukoista orgaanista hiiltä on alle 0,1 %, ja hehkutushäviö on noin 10 % (taulukko 7).

Turun AMK:n laboratorioissa määritettiin hehkutushäviö (LOI, 550 °C) koekentälle keväällä 2020 läjitetystä ruoppausmassasta. Määritetyt arvot olivat huomattavasti pienempiä kuin syksyllä 2019 noudetuissa ja taulukossa 7 esitetyissä näytteissä. Arvot olivat 4,7 – 5,6 %.

Orgaaninen aines puskuroi syntyvää happamuutta. Maaperän happamoitumisen alkuvaiheessa H<sup>+</sup>-ioneja sitoutuu orgaaniseen ainekseen, ja maan kationinvaihtokapasiteetti samalla pienenee. Hehkutushäviön (LOI) arvoa 8 % on käytetty raja-arvona happamuutta puskuroivalle orgaanisen aineksen määrälle. Hehkutushäviö (LOI) on mukana myös Liikenneviraston korroosiontutkimusohjelmassa (Liikennevirasto 2017).

Taulukko 7. Matalahden ruoppausmassan hiilipitoisuudet ja hehkutushäviö määritettynä tuorenäytteestä ja hapettuneesta näytteestä. Liukoinen DOC perustuu 2-vaiheiseen ravistelutestiin (L/S=10, SFS-EN 12457-3).

Mittaus	Tuore näyte	Hapettunut näyte
Orgaaninen hiili vesiliuoksesta (DOC) mg/kg	760	400
Liukoinen DOC (LS=10) mg/kg	835	306
Hehkutushäviö (LOI) %	10,2	-
Hiilipitoisuus (SFS-EN 13137) %	3,8	3,7
Epäorg. hiili (SFS-EN 13137) %	< 0,1	< 0,1
Orgaaninen hiili (SFS-EN 13137) %	3,8	3,7

## 5.7 Haitta-aineiden kokonaispitoisuus ja liukoisuus

Mahdollisesti haitallisten metallien ja puolimetallien pitoisuuksia ruoppausmassassa tutkittiin uuttamalla näytteet kuumalla kuningasvedellä (modifioitu ISO-11466), mikä on yleisesti käytetty liuotusmenetelmä maaperän pilaantuneisuuden tutkimuksissa. Näytteet kuivattiin kylmäkuivaustekniikalla ja niistä määritettiin 39 alkuaineen kuningasvesiliukoiset (AR-liuotus) pitoisuudet ICP-OES- tai ICP-MS-tekniikalla. Elohopeapitoisuus määritettiin pyrolyyttisesti.

Metallien ja puolimetallien liukoisia pitoisuuksia tutkittiin kaksivaiheisella ravistelutestillä (SFS-EN 12457-3). Liukoisuudet ilmoitettiin kumulatiivisena pitoisuutena kuiva-aineessa veden (L) ja kiinteän näytteen (S) L/S-suhteessa 10 l/kg.

Matalahden ruoppausmassan (lähes)kokonaispitoisuuksia on esitetty taulukossa 8. Lähes-kokonaispitoisuudet perustuvat kuningasvesiliuotukseen. Pitoisuuksia on verrattu nk. PIMA-asetuksen (Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista 214/2007) kynnys- ja ohjearvoihin. Ohjearvot eivät ylittyneet kummassakaan näytteessä. Arseenin pitoisuus ruoppausmassassa on suurempi kuin PIMA-asetuksen kynnysarvo 5 mg/kg. Naantali kuuluu geologisesti Etelä-Suomen arseeniprovinssiin, jossa noin 10 mg/kg pitoisuudet ovat maaperässä tavanomaisia. Kobolttin ja nikkelin pitoisuus on samaa suuruusluokkaa kuin PIMA-asetuksen kynnysarvo. Bariumille, molybdeenille



ja seleenille ei ole määritelty kynnys- ja ohjearvoja. Hapettuneen näytteen haitta-aineiden kokonaispitoisuudet olivat samaa suuruusluokkaa kuin tuore-

näytteestä määritetyt pitoisuudet. Hapettuminen ei muuta haitta-aineiden kokonaispitoisuuksia.

Taulukko 8. Matalahden ruoppausmassan lähes-kokonaispitoisuudet (kuningasvesiliuotus). Kynnysarvo ja alempi ohjearvo PIMA-asetuksesta (VNa 214/2007). Kynnysarvon ylittävät pitoisuudet on lihavoitu.

Haitallinen aine	Kynnysarvo mg/kg	Alempi ohjearvo mg/kg	Tuore mg/kg	Hapettunut mg/kg
Antimoni	2	10	0,62	0,34
Arseeni	5	50	<b>9,94</b>	<b>11,5</b>
Barium			136	22,0
Elohopea	0,5	2	0,027	0,027
Kadmium	1	10	0,33	0,30
Koboltti	20	100	<b>20,7</b>	19,1
Kromi	100	200	81,4	75,6
Kupari	100	150	47,5	45,0
Lyijy	60	200	17,4	20,0
Molybdeeni			2,41	2,09
Nikkeli	50	100	<b>50,7</b>	43,3
Seleeni			3,63	2,10
Sinkki	200	250	181	170
Vanadiini	100	150	86,1	75,7

Matalahden tuoreen ruoppausmassan ja laboratoriossa hapettuneen ruoppausmassan metallien ja puolimetallien liukoisia pitoisuuksia tutkittiin kaksivaiheisella ravistelutestillä (SFS-EN 12457-3). Liukoisuudet ilmoitettiin kumulatiivisena pitoisuutena kuiva-aineessa veden (L) ja kiinteän näytteen (S) L/S-suhteessa 10 l/kg. Näytteistä määritetyt metallien liukoiset pitoisuudet on esitetty taulukossa 9. Kaksivaiheiseen ravistelutestiin perustuvia liukoisia pitoisuuksia on verrattu nk. MASA-asetusluonnoksessa esitettyihin peitetyn ja päällystetyn kenttärakenteen liukoisuusraja-arvoihin. Useiden mahdollisesti haitallisten aineiden liukoisuudet lisääntyvät selvästi, kun hapan sulfaattimaa hapettuu (vertaa esim. Peltola & Åström 2002). Naantalissa tuoreen ruoppausmassan kaikki liukoisuudet olivat pieniä, mutta hapettuneen näytteen liukoiset kadmium-, nikkeli- ja sinkki-pitoisuudet ylittivät peitetylle kenttärakenteelle

ehdotetut MASA-asetusluonnoksen raja-arvot. Hapettuneen ruoppausmassan kadmiumin liukoisuus oli 0,20 mg/kg (päällystetyn kenttärakenteen raja-arvo 0,06 mg/kg), nikkelin liukoisuus oli 6,4 mg/kg (raja-arvo 1,2 mg/kg) ja sinkin liukoisuus 27,7 mg/kg (raja-arvo 12 mg/kg). Sulfaattipitoisuus kasvoi paljon hapettuneessa näytteessä ja pH laski selvästi alle 4,0:n.

PIMA-asetuksessa (VNa 214/2007) ja MASA-asetusluonnoksessa mainittujen haitallisten aineiden lisäksi liukoisuustestissä voidaan selvittää muidenkin alkuaineiden liukoisuuden muutoksia. Alumiinin liukoisuus kasvaa pH:n laskiessa alle 4,0:ään. Liukoinen alumiini voi olla haitallista kalojen kiduksille ja puiden juurille. Naantalın Matalahden ruoppausmassan liukoisen alumiinin pitoisuus kasvoi arvosta 47,8 mg/kg arvoon 346 mg/kg näytteen hapettuessa inkubaatiotestin aikana.

Taulukko 9. Naantalın Matalahden ruoppausmassan liukoisia alkuainepitoisuuksia määritettynä tuorenäytteestä ja hapettuneesta näytteestä. Vertailukohtana on esitetty MASA-asetusluonnoksessa ehdotetut liukoisuusraja-arvot peitetyille ja päällystetyille kenttärakenteelle, jotka ovat pääosin samat kuin nk. MARA-asetuksen (VNa 843/2017) liitteen 2 taulukossa 1 esitetyt raja-arvot peitetyille tai päällystetyille kentälle, jossa jätteen kerrospaksuus on alle 1,5 metriä. MASA-asetusluonnoksesta poikkeava MARA-asetuksen raja-arvo on esitetty taulukossa MASA-asetusluonnoksen raja-arvon perässä. MASA-asetusluonnoksen raja-arvot ylittävä liukoinen pitoisuus on tummennettu.

Haitallinen aine	Peitetty kenttä mg/kg MASA- asetusluonnos	Päällystetty kenttä mg/kg MASA-asetusluonnos / MARA-asetus	Tuore mg/kg	Hapettunut mg/kg
Antimoni	0,3	0,7	0,05	< 0,05
Arseeni	0,5	1,5 / 2	0,1	< 0,07
Barium	20	60 / 100	0,4	0,4
Elohopea	0,01	0,03	< 0,05	< 0,01
<b>Kadmium</b>	0,04	0,06	< 0,02	<b>0,20</b>
Kromi	0,5	5 / 10	< 0,1	< 0,1
Kupari	2	10	< 0,2	0,5
Lyijy	0,5	2	< 0,05	< 0,05
Molybdeeni	0,5	6	0,9	< 0,05
<b>Nikkeli</b>	0,4	1,2 / 2	0,1	<b>6,4</b>
Seleeni	0,4	1	< 0,05	< 0,05
<b>Sinkki</b>	4	12 / 15	< 0,6	<b>27,7</b>
Vanadiini	2	3	0,4	< 0,2
Kloridi			8001	7637
Sulfaatti			846,6	18360
Fluoridi			11,6	8,1
pH näyte			7,34	3,48
pH ravistelutesti			7,71	3,37

### 5.8 Ruoppausmassan PAH-määritykset

Ruoppausmassasta määritettiin myös PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus. Ruoppausmassan PAH-yhdisteiden pitoisuudet olivat alle käytetyn

analyysimenetelmän määrittämisen rajan (taulukko 10). PAH-analyysien analyysitodistus on esitetty liitteessä 10.

Taulukko 10. Naantalın Matalahden ruoppausmassan PAH-määritykset.

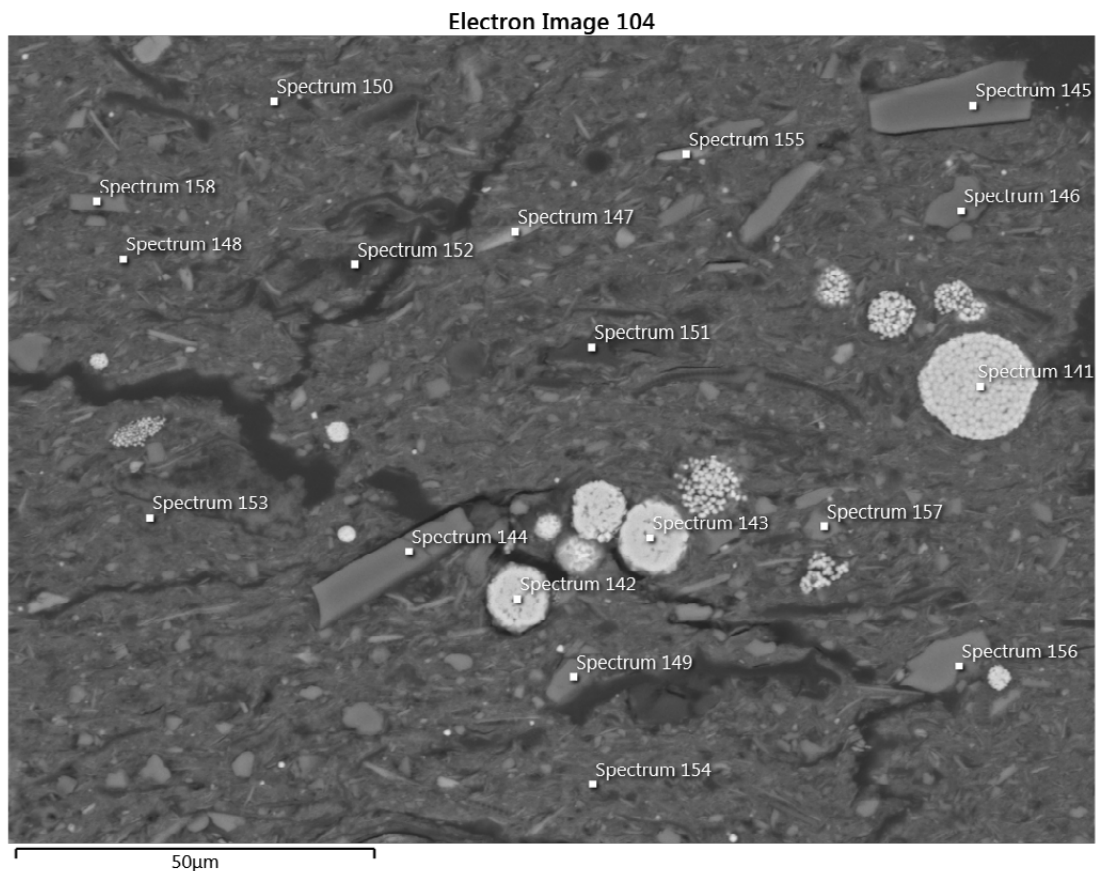
PAH-yhdiste	mg/kg	PAH-yhdiste	mg/kg
Asenafteni	< 0,0090	Fenantreeni	< 0,0090
Asenaftyleeni	< 0,0090	Fluoreeni	< 0,0090
Antraseeni	< 0,0090	Fluoranteeni	< 0,0090
Bentso(a)antraseeni	< 0,0090	Kryseeni	< 0,0090
Bentso(b/j)fluoranteeni	< 0,0090	Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	< 0,0090
Bentso(k)fluoranteeni	< 0,0090	Naftaleeni	< 0,015
Bentso(a)pyreeni	< 0,0090	Pyreeni	< 0,0090
Bentso(g,h,i)peryleeni	< 0,0090	Summa 16 EPA-PAH (lower pound)	0
Dibentso(a,h)antraseeni	< 0,0090	Summa 16 EPA-PAH (upper bound)	< 0,15

## 5.9 Ruoppausmassan mineraloginen karakterisointi

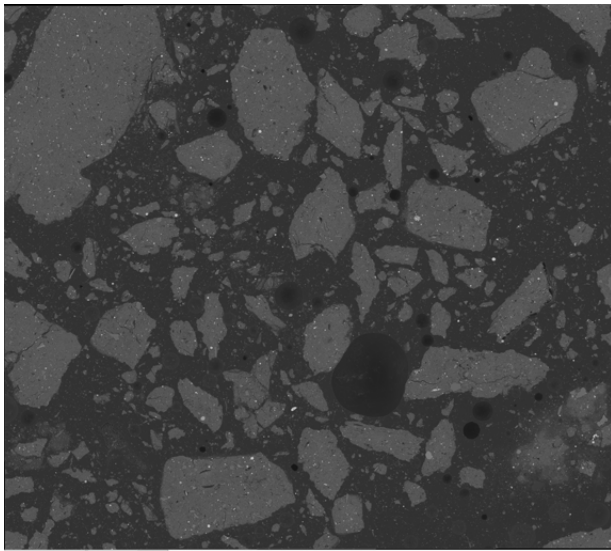
Matalahden ruoppausmassalle tehtiin mineraloginen karakterisointi GTK:n tutkimuslaboratoriossa. Näytteet analysoitiin kenttäemissio-pyyhkäisy-elektronimikroskoopilla (FE-SEM) JEOL JSM 7100F Schottky, johon on liitetty Oxford Instrumentsin energia-dispersiivinen spektrometri (EDS) X-Max 80 mm<sup>2</sup> (SDD).

Elektronimikroskooppikuvan perusteella ruoppausmassa on hienojakoista pohjamassaa, joka sisältää savimineraaleja ja orgaanista materiaa-

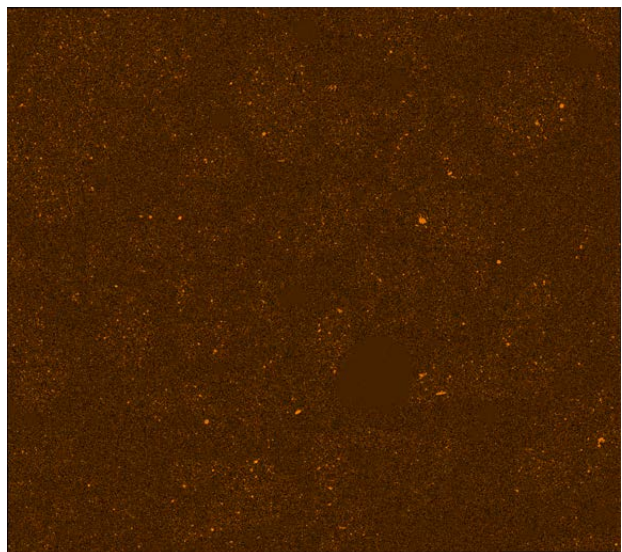
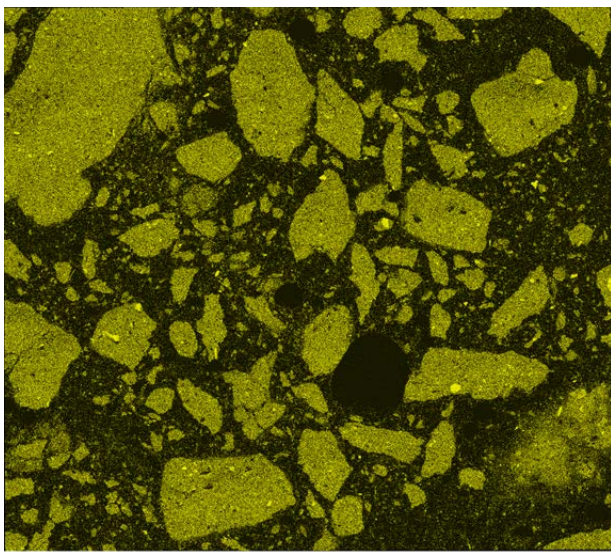
lia sekä paikoin rikkiä (kuva 11). Pohjamassan koostumus on lähinnä illiittiä tai hydrobiotiittia. Lisäksi pyriittiframboideja esiintyy rakeina. Modaalimineraloginen koostumus määritettiin perustuen 10 000 EDS-spektriin (kuva 12). Tulos on semikvantitatiivinen. Sulfideja esiintyy noin 0,5 % tilavuusprosenttia, mutta orgaanisen aineksen ja kloridien määrää ei pystytty kvantifioimaan (taulukko 11).



Kuva 11. Elektronimikroskooppikuva Matalahden ruoppausmassasta.



Sum Spectrum		
	Wt%	$\sigma$
O	46.4	0.1
Si	25.8	0.0
Al	9.8	0.0
Fe	6.1	0.0
K	3.4	0.0
Cl	2.2	0.0
Mg	2.0	0.0
S	1.5	0.0
Na	1.3	0.0
Ca	1.0	0.0
Ti	0.5	0.0



Kuva 12. Elektronien takaisinsirontakuva (BSE) ja kuva-alueelta mitattu EDS-summaspektri ruoppausmassasta (yllä) sekä piin (Si) (alavasen) ja rikin (S) (alaoikea) alkuainejakaumakartat.

Taulukko 11. Matalahden ruoppausmassan mineraloginen koostumus.

Mineraali / faasi	Vol-%
Savipitoinen pohjamassa	84,1
Kvartsi	2,7
Plagioklaasi	1,0
Kalimaasälpä	1,0
Sulfidit	0,5
Muu mineraaliaines	5,2
Luokittelematon	5,5
Totaali	100,0

Ruoppausmassan kokonaiskoostumus määritettiin myös Åbo Akademiella SEM-EDS-laitteistoa käyttäen. Koostumuksesta laskettiin yleisesti käytetyt oksidimuodot, jotka on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Matalahden ruoppausmassan oksidikoostumus (%) SEM/EDS-laitteistolla määritettynä.

Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
3,62	3,20	16,8	55,4	0	4,43	1,08	3,95	1,59	0,84	0,01	9,07

### 5.10 Ruoppausmassan raekoko

Ruoppausmassan raekokojakauma on esitetty taulukossa 13 lajitekoostumuksena. Partikkeli-kokoanalyysin tutkimusseloste on esitetty liitteessä 4. Syksyllä 2019 (19.9.2019) Matalahdesta nostettu ruoppausmassa oli vähän karkeampaa (A), ja sen geotekninen maalajiluokitus oli laiha savi (laSa). Kenttäkoealueelta huhtikuussa 2020 haetun ruoppausmassan (B) maalajiluokitus oli lihava savi (liSa). Runsas orgaanisen aineksen osuus (> 2–6 %) massassa muuttaa maalajin nimen geoteknisen maalajiluokituksen mukaan liejuiseksi saveksi (ljSa), kun huomioidaan näytteen kideveden osuus.

Taulukko 13. Naantalın Matalahden ruoppausmassan lajitekoostumus. (A) = syyskuu 2019, (B) = huhtikuu 2020.

Lajite	Läpimitta (mm)	Lajitteen osuus (%)	
		A	B
Muut yhteensä	> 30,0	0	0
Keskisora (Sr)	6,0–20,0	0	0
Hienosora (Sr)	2,0–6,0	0,1	0
Karkeahiekka (Hk)	0,6–2,0	0,3	0,3
Keskihiekka (Hk)	0,2–0,6	0,6	0,2
Hienohiekka (Hk)	0,06–0,2	8,0	0,7
Karkeasiltti (Si)	0,02–0,06	16,5	12,2
Keskisiltti (Si)	0,006–0,02	12,8	12,5
Hienosiltti (Si)	0,002–0,006	16,6	21,8
Savi (Sa)	< 0,002	45,1	52,3

### 5.11 Ruoppausmassan vesipitoisuus

Syksyllä 2019 (19.9.2019) Matalahdesta haetusta sedimentinäytteestä tutkittiin Turun AMK:ssa vesipitoisuus. Näyteämpäreitä oli yhteensä 50 kappaletta, joista valmistettiin viisi kokoomanäytettä. Jokaisesta kokoomanäytteestä tutkittiin yhteensä kaksi rinnakkaisnäytettä. Näiden näytteiden vesipitoisuus oli 274–284 %.

Matalahdesta ruopattua massaa läjitettiin maaliskuussa 2020 Matalahden koekenttäalueelle. Tältä kentältä huhtikuussa 2020 (20.4.2020) noudetuista ruoppausmassanäytteistä tutkittiin jälleen vesipitoisuus. Viiden alueelta poimitun kokoomanäyteämpärin vesipitoisuus oli 97,5–122,6 %.

Ennakkokokeisiin käytetyn stabiloidun ruoppausmassan vesipitoisuus muuttui merkittävästi koekenttäalueelta otettujen ja stabiloitujen näytteisiin verrattuna. Näyte oli kentällä kuivunut, ja sen orgaanisen aineksen määrä (ks. luku 5.6) oli myös yli kaksi kertaa pienempi syksyllä otettuihin näytteisiin verrattuna. Merkittävästi pienempi orgaanisen aineksen määrä kenttäkoealueella johdettiin oletettavasti siitä, että tälle kentälle oli valikoitu tarkoituksella massaa, jossa ei ollut näkyvää kasvillisuutta.

## 6 SIDEAINEET JA NIIDEN OMINAISUUDET

Ruoppausmassan stabilointiin käytettiin yhteensä seitsemää eri sideainetta yhdeksällä eri reseptillä. Sideaineiden kemiallisesta koostumuksesta saatiin ennakkotiedot materiaalien toimittajilta koetointailmoitusta varten. Lisäksi kaikista kenttäkokeeseen käytetyistä sideaineista määritettiin alkuaineiden kokonaispitoisuuksia kuningasvesiliuotukseen perustuen. Lisäksi PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuudet määritettiin kolmesta käytetystä sideaineesta: pohjakuona, Ecolan Mix ja Renotech Mix.

Sideaineiden sisältämien mahdollisten haitallisten metallien ja puolimetallien pitoisuuksia tutkittiin uuttamalla näytteet kuumalla kuningasvedellä (ISO 11466). Uuttoa varten näytteet kuivattiin alle 40 °C:ssa ja seulottiin alle 2 mm:n raekokoon. Jokaisesta sideaineesta määritettiin yhteensä 39 alkuaineen kuningasvesiliukoiset pitoisuudet ICP-OES- tai ICP-MS-tekniikalla. Elohopean pitoisuus määritettiin pyrolyyttisesti.

Tutkituista sideaineista mitattiin PIMA-asetuksen ylemmän ohjearvon ylittäviä pitoisuuksia kuparia (pohjakuona), lyijyä (pohjakuona), vanadii-

nia (kuona, Renotech mix) ja sinkkiä (lentotuhka, pohjakuona). PIMA-asetuksen alempi ohjearvo ylittyi nikkelin (pohjakuona), antimonin (pohjakuona) ja sinkin (sementti) osalta. Lisäksi eri metallien ja puolimetallien PIMA-asetuksen kynnyksarvo ylittyi useissa näytteissä.

Kuningasvesiuuttoon perustuvat pitoisuudet kuvastavat sideaineiden sisältämien mahdollisten haitallisten aineiden (lähes)kokonaispitoisuutta. Se ei kerro, kuinka liukoisessa muodossa ko. metallit tai puolimetallit sideaineessa ovat.

Taulukkoon 14 on koottu sideaineiden sisältämien mahdollisten haitallisten metallien ja puolimetallien mitatut pitoisuudet ja verrattu niitä PIMA-asetuksen kynnyks- ja ohjearvoihin. Taulukossa on lisäksi mukana alkuaineet, joiden liukoisuutta stabiloidusta massasta Naantalın kaupungin ympäristöviranomainen on velvoittanut tarkkailemaan koetoiminnan aikana mutta joille ei ole esitetty PIMA-asetuksessa kynnyks- ja ohjearvoja (Ba, Mo, Se) (Naantalın kaupunki 2020a,b). Kuningasvesianalyysien analyysitodistus on esitetty liitteessä 5.

Taulukko 14. Sideaineista mitatut alkuaineiden kokonaispitoisuudet (AR-uutto, < 2mm) sekä PIMA-asetuksessa (VNa 214/2007) esitetyt kynnyks- ja ohjearvot: musta = kynnyksarvo, oranssi = alempi ohjearvo, punainen = ylempi ohjearvo. Sideaineiden pitoisuuksien kynnyks- ja ohjearvojen ylitykset on merkitty vastaavin värein taulukkoon.

Parametri mg/kg	Lentotuhka	Sementti	Kuona	Uunipöly	Pohjakuona	Renotech mix	Ecolan mix	PIMA-asetus
As	32,4	22,4	0,82	13,1	11,1	2,82	16,0	5/50/100
Ba	246	208	664	383	242	676	211	-
Cd	4,55	0,41	< 0,01	1,14	2,70	0,26	0,53	1/10/20
Co	18,7	20,6	2,90	13,8	48,3	3,00	15,7	20/100/250
Cr	64,9	49,1	25,0	29,0	174	33,0	27,2	100/200/300
Cu	145	137	< 1	30,4	1 730	23,0	60,6	100/150/200
Hg	0,839	0,036	< 0,005	0,033	0,014	0,044	0,435	0,5/2/5
Mo	9,67	29,6	0,13	5,04	11,7	1,25	10,9	-
Ni	61,5	42,8	3,90	37,5	140	6,30	41,1	50/100/150
Pb	128	40,0	< 0,1	70,4	886	15,5	21,4	60/200/750
S	11 300	10 500	6 970	8 300	9 960	5 410	14 700	-
Sb	3,77	3,61	< 0,02	1,46	48,5	0,22	2,74	2/10/50
Se	2,82	0,72	3,37	1,72	0,61	1,82	1,13	-
V	73,1	118	396	58,8	29,4	436	61,4	100/150/200
Zn	911	268	2,00	79,0	6 170	89,0	150	200/250/400

PAH-yhdisteiden pitoisuudet analysoitiin kaasukromatografisesti (ISO 18287). Tutkituista sideaineista Ecolan Mix:ssä havaittiin PIMA-asetuksen kynnysarvon ja alemman ohjearvon ylittäviä pitoisuuksia yksittäisiä PAH-yhdisteitä. Lisäksi PAH-yhdisteiden summapitoisuus oli yli PIMA-asetuksen kynnysarvon.

Taulukkoon 15 on koottu tutkittujen sideaineiden sisältämien PAH-yhdisteiden mitatut pitoisuudet ja verrattu niitä PIMA-asetuksen kynnys- ja ohjearvoihin. PAH-analyyysien analyysitodistus on esitetty liitteessä 10.

Taulukko 15. Sideaineista mitatut PAH-yhdisteiden pitoisuudet sekä PIMA-asetuksessa (VNa 214/2007) esitetyt kynnys- ja ohjearvot: musta = kynnysarvo, oranssi = alempi ohjearvo, punainen = ylempi ohjearvo. Sideaineiden PAH-yhdisteiden pitoisuuksien kynnys- ja ohjearvojen ylitykset on merkitty vastaavin värein taulukkoon.

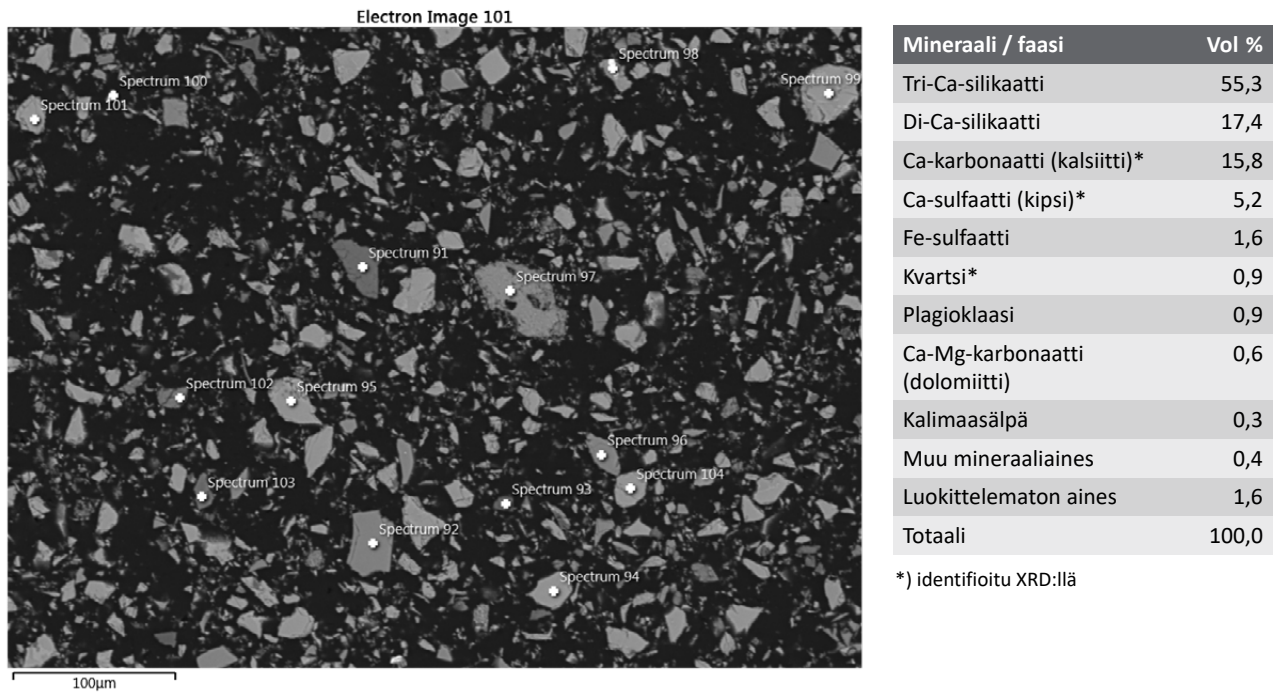
PAH EPA 16 yhdisteet mg/kg	Pohjakuona	Ecolan Mix	Renotech Mix	PIMA-asetus
Asenafteni	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-
Asenaftyleeni	0,010	0,73	< 0,01	-
Antraseeni	< 0,01	0,23	< 0,01	<b>1/5/15</b>
Bentso(a)antraseeni	< 0,01	0,35	< 0,01	<b>1/5/15</b>
Bentso(b,j)fluoranteeni	0,011	0,22	< 0,01	-
Bentso(k)fluoranteeni	< 0,01	0,054	< 0,01	<b>1/5/15</b>
Bentso(a)pyreeni	< 0,01	<b>2,5</b>	< 0,01	<b>0,2/2/15</b>
Bentso(g,h,i)peryleeni	0,012	< 1,0	< 0,01	-
Dibentso(a,h)antraseeni	< 0,01	< 1,0	< 0,01	-
Fenantreeni	0,039	<b>2,6</b>	< 0,01	<b>1/5/15</b>
Fluoreeni	< 0,01	< 0,01	< 0,01	-
Fluoranteeni	0,021	<b>1,5</b>	< 0,01	<b>1/5/15</b>
Kryseeni	< 0,01	0,39	< 0,01	-
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	< 0,01	< 1,0	< 0,01	-
Naftaleeni	0,083	<b>13</b>	< 0,02	<b>1/5/15</b>
Pyreeni	0,028	0,64	< 0,01	-
Summa 16 EPA-PAH	0,29	<b>25</b>	< 0,17	<b>15/30/100</b>

## 6.1 Sideaineiden mineraloginen karakterisointi

Neljälle stabilointiin käytetylle sideaineelle tehtiin mineraloginen karakterisointi GTK:n tutkimuslaboratoriossa. Karakterisointi tehtiin lentotuhkalle (Naantalin voimalaitos), sementille (Finnsementti), kuonalle (Finnsementti) ja uunipölylle (Nordkalk). Näytteet analysoitiin kenttäemissio-pyyhkäisy-elektronimikroskoopilla (FE-SEM) JEOL JSM 7100F Schottky, johon on liitetty Oxford Instrumentsin energia-dispersiivinen spektrometri (EDS) X-Max 80 mm<sup>2</sup> (SDD). Lisäksi tehtiin kiteisten faasien identifiointi röntgendifraktiolla (XRD). Käytetty laitteisto oli Bruker D8.

FE-SEM-tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää ja tuoda lisäinformaatiota mm. eri materiaalien tunnistamiselle tomografiakuvissa (ks. luku 7.6) sekä näytteiden faasikoostumuksesta, raakoosta ja alkuaineiden sitoutumisesta.

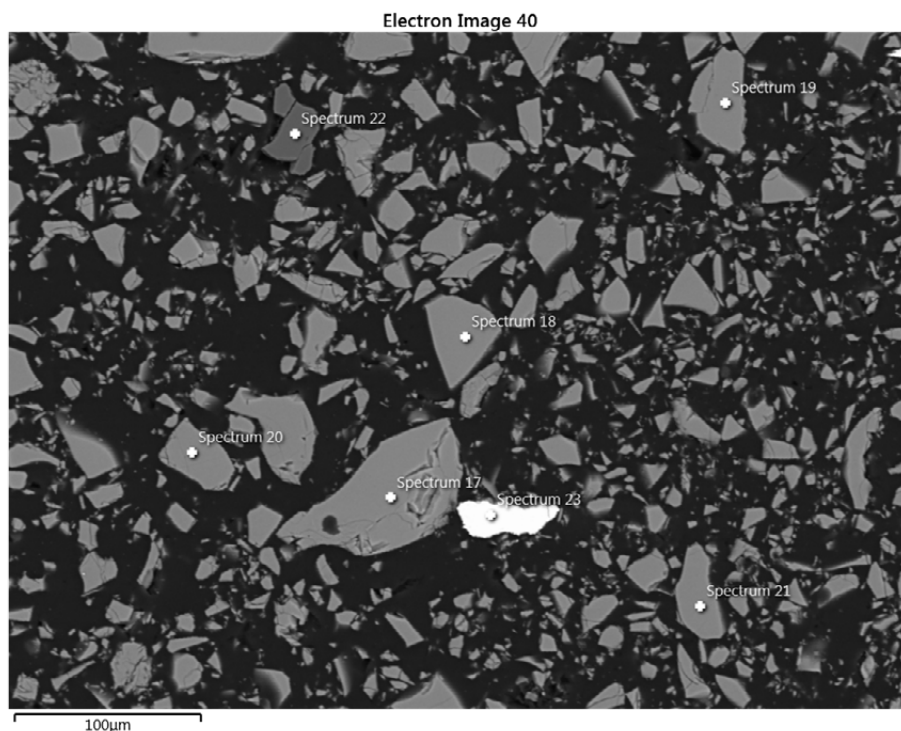
Finnsementin sementti oli hienojakoista ja tasalaatuista. Sen pääkomponenteiksi tunnistettiin klinkkerimineraalit eli Ca-silikaatit ja Ca-karbonaatit (kalsiittia). Lisäksi havaittiin Fe-sulfaattia ja Ca-sulfaattia (kipsiä). Kuvassa 13 on esitetty elektromikroskooppikuva sementistä sekä sementin mineraloginen koostumus



Kuva 13. Elektronimikroskooppikuva Finnsementin sementistä sekä sementin mineraloginen koostumus.

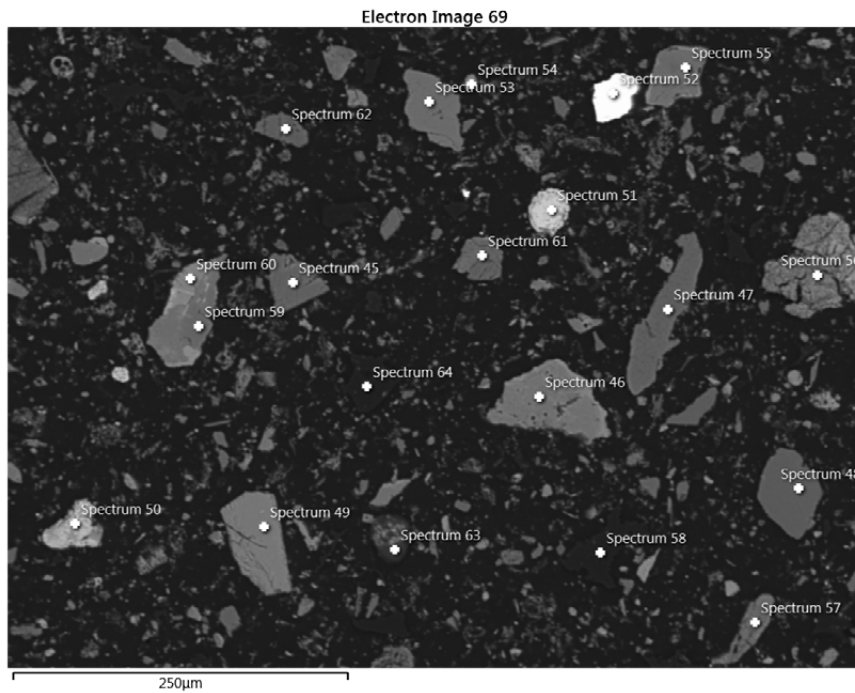
Finnsementin kuona oli melko tasalaatuista raekooltaan ja hienoaines puuttui lähes täysin (kuva 14). Materiaali oli Al-Mg-Ca-silikaattikuonaa (99,3 %), joka sisälsi pieninä pitoisuuksina mm. S, K ja Ti. Epäpuhtauksina havaittiin mm. metallista rautaa ja Al-oksidia, jotka muodostivat loput 0,7 % faasikoostumuksesta. XRD-mittausten perusteella kyseessä oli amorfinen näyte.

Naantalain polttolaitoksen tuhka oli hyvin heterogeenistä, ja siinä oli suurta raekovaihtelua. Tuhkassa havaittiin mineraalirakeita, amorfista ainesta (XRD), monifaasisia partikkeleita sekä orgaanista materiaalia. Kuvassa 15 on esitetty elektronimikroskooppikuva tuhkasta sekä tuhkan mineraloginen koostumus.



Kuva 14. Elektronimikroskooppikuva Finnsementin kuonasta.





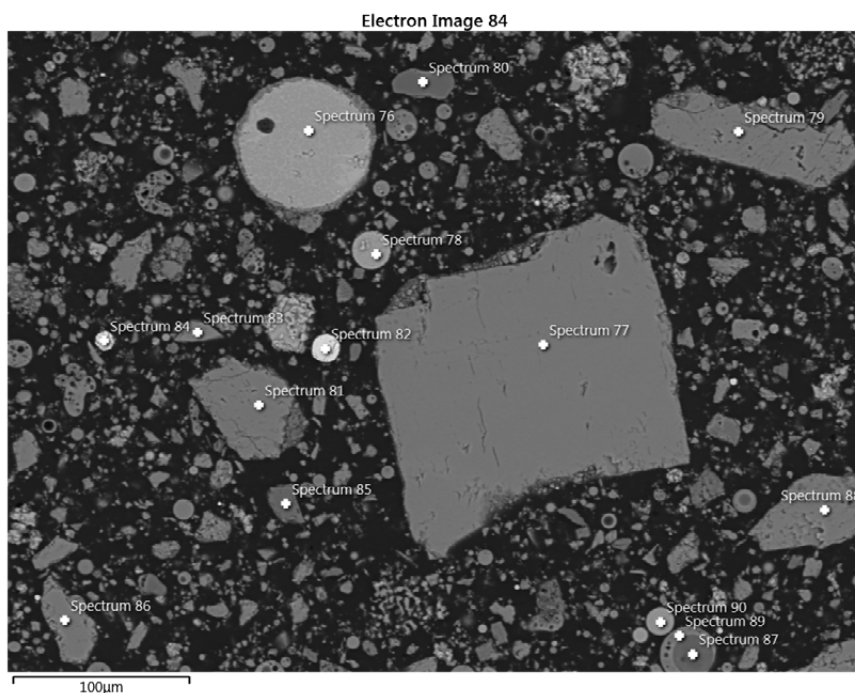
Mineraali / faasi	Vol %
Al-K-Ca-silikaattiyhdisteet	55,0
Kvartsi*	17,2
Kalimaasälpä*	8,0
Plagioklaasi*	5,9
Ca-karbonaatti (kalsiitti)*	4,6
Kiilteet*	3,1
Kaoliniitti	1,4
Ca-Mg-karbonaatti	0,9
Ca-sulfaatti (anhytriitti)*	0,4
Fe-oksidi*	0,3
Kloridit	0,1
Muu mineraaliaines	0,5
Luokittelematon aines	2,5
Totaali	100,0

\*) identifioitu XRD:llä

Kuva 15. Elektronimikroskooppikuva Naantalin polttolaitoksen tuhkasta sekä tuhkan mineraloginen koostumus.

Nordkalkin uunipölyssä oli suurta raekokovaihtelua. Pääkomponentti oli Ca-karbonaatti (kalsiitti), joka esiintyi max. 0,5 mm:n kiteinä. Seuraavaksi yleisin oli Ca-Mg-karbonaatti (dolomiitti), mutta

materiaalissa havaittiin myös silikaattista ainesta. Hiili ei näkynyt spektrissä päällystyksen vuoksi. Kuvassa 16 elektronimikroskooppikuva uunipölystä sekä uunipölyn mineraloginen koostumus.



Mineraali / faasi	Vol %
Ca-karbonaatti (kalsiitti)*	84,1
Ca-Mg-karbonaatti (dolomiitti)*	4,4
Al-K-Ca-silikaattiyhdisteet	2,9
Kiilteet*	2,0
Kvartsi*	1,2
Al-silikaatti (mulliitti)*	0,7
Ca-sulfaatti (anhytriitti)*	0,5
Fe-oksidi	0,2
Muu mineraaliaines	2,6
Luokittelematon aines	1,4
Totaali	100,0

\*) identifioitu XRD:llä

Kuva 16. Elektronimikroskooppikuva Nordkalkin uunipölystä sekä uunipölyn mineraloginen koostumus.

## 7 KENTTÄKOKEEN TULOKSIA

### 7.1 Kenttäkokeen toteutus

Kenttäkokeessa tarvittavat materiaalit toimitettiin suursäikeissä kenttäkoepaikalle suurimmaksi osaksi viikkoa ennen kenttäkokeen aloittamista.

- Ruoppausmassa (Matalahti, Naantali)
- Lentotuhka (Fortum Naantali, Lassila & Tikanoja)
- Sementti (Finnsementti)
- Masuunikuona (Finnsementti)
- Pohjakuona (Suomen Erityisjäte)
- Uunipöly (Nordkalk)
- Ecolan Mix (sementin ja tuhkan sekoitus) (Ecolan)
- Renotech Mix (kuonan, tuhkan ja kipsin sekoitus) (Renotech)

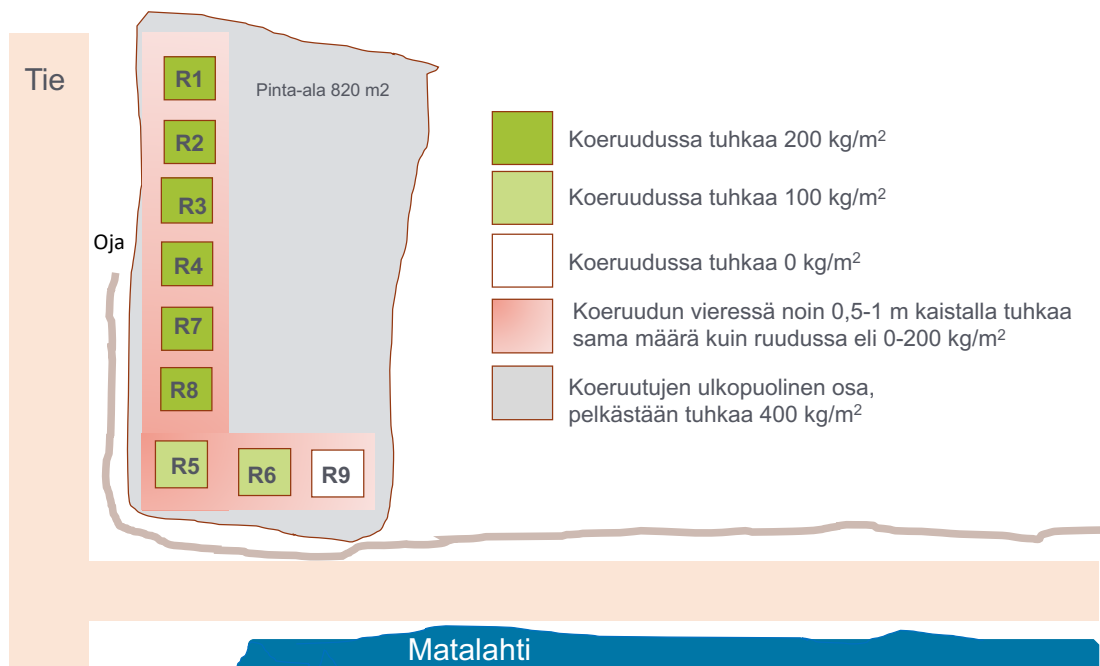
Kenttäkokeelle osoitettuun ruoppausaltaaseen läjitettiin ruoppausmassaa 15.–21.1.2020, ja se oli koskemattomassa tilassa siihen asti, kunnes varsinainen kenttäkoe aloitettiin 20.–24.4.2020 (kuva 17). Kenttäkokeen jo käynnistyttyä Naantalın kaupungin pyynnöstä päätettiin hakea lupaa myös koeruutujen ulkopuolisen alueen kiinteytämiseen pelkällä tuhalla (Naantalın kaupunki 2020b). Luvan saatuaamme 27.4.2020 aloitettiin noin 400 kg/m<sup>3</sup> lentotuhkan lisääminen testiruutujen ulkopuoliselle koekentän osalle. Kenttäkokeen

alussa läjitysaltaan ruoppausmassan vesi- ja humuspitoisuus sekä pH mitattiin Turun AMK:n laboratoriossa (ks. luku 5).

Kenttäkokeessa tutkittiin uusiomateriaalien vaikutusta stabiloidun ruoppausmassan ominaisuuksiin. Referenssinä käytettiin ruoppausmassan sekoitusta lentotuhkaan sekä lentotuhkan ja sementin sekoitukseen. Tutkittavia koeruutuja oli yhdeksän, ja ne on merkitty kuvaan 18. Koeruutujen koko oli 5x5 metriä, ja ne merkittiin GPS-mittalaitteella. Ruoppausmassan syvyys altaassa oli noin 1,7 metriä (oletettu maksimisyvyys). Allas oli kuitenkin pohjastaan kalvea siten, että sen syvyys kasvoi merenlahteen päin mentäessä. Uusioaineita sekoitettiin päältäpäin ruoppausmassaan vain noin yhden metrin syvyydelle asti käytössä olleen kaluston teknisten rajoitusten takia (kuvat 19 ja 20). Stabiloidun massan alla on siten paikoin stabiloimatonta ruoppausmassaa. Lopullinen sekoitussuhde oli 1 m<sup>3</sup> ruoppausmassaa + 350 kg/m<sup>3</sup> kuivia sideaineita. Kenttäkokeeseen käytetyt materiaalmäärät (kg) on esitetty taulukossa 16. Tarvittavat materiaalmäärät on laskettu koeruudun pinta-alan 25 m<sup>2</sup> ja syvyyden 1 m mukaan.



Kuva 17. Kenttäkokeeseen osoitettuun ruoppausaltaaseen läjitetty ruoppausmassa ennen tuhkan ja sideaineiden sekoittamista.



Kuva 18. Kenttäkokeen reseptit sekä koeruuduissa käytetyn tuhkan määrä.

Taulukko 16. Kenttäkokeessa käytettävät materiaalit ja niiden kokonaismäärät. Renotech mix koostuu kuonasta, tuhkasta ja kipsistä. Ecolan mix sisältää sementtiä ja tuhkaa.

Resepti	Ruoppaus- massa	Tuhka	Sementti	Kuona	Uunipöly	Pohja- kuona	Mix	Mix
	Matalahti	Naantali	Finn- sementti	Finn- sementti	Nordkalk	Erityis- jäte	Renotech	Ecolan
<b>1</b>	30 000	5 000	3 750	0	0	0	0	0
<b>2</b>	30 000	5 000	1 250	2 500	0	0	0	0
<b>3</b>	30 000	5 000	0	0	0	0	0	3 750
<b>4</b>	30 000	5 000	0	0	0	0	3 750	0
<b>5</b>	30 000	2 500	3 750	0	0	2 500	0	0
<b>6</b>	30 000	2 500	1 250	2 500	0	2 500	0	0
<b>7</b>	30 000	5 000	1 250	1 250	1 250	0	0	0
<b>8</b>	30 000	5 000	625	1 875	1 250	0	0	0
<b>9</b>	30 000	0	1 250	2 500	2 500	2 500	0	0
<b>Summa [kg]</b>	270 000	35 000	13 125	10 625	5 000	7 500	3 750	3 750



Kuva 19. Sideaineen levitys suursäkistä (vasemmalla) ja koeruutu sideaineiden lisäyksen jälkeen (oikealla).



Kuva 20. Sideaineiden sekoitusta koeruutuun kaivinkoneen jrsijäpäällä.

Kenttäkokeessa tuhka levitettiin ensin koeruu-  
duille, jonka jälkeen muut sideaineet ja massa  
sekoitettiin ruoppausmassan ja tuhkan sekoitukseen  
(kuvat 20 ja 24). Sekoitetuista koeruuista otettiin  
välittömästi Åbo Akademin ja Turun AMK:n toi-  
mesta lapiolla ämpäriin näyte kolmesta eri pisteestä  
koeruuista. Paikat merkittiin työmaapöytäkirjoi-

hin. Näytteet pyrittiin ottamaan koeruidun kes-  
keltä, vähintään metrin päästä koeruidun reunasta.  
Näytteitä ei homogenisoitu ämpäreissä, mutta osa  
näytteistä valmistettiin heti näytteenoton jälkeen  
paikan päällä. Paikalla oli työmaakoppeja, joissa  
näytteiden käsittely voitiin tehdä. Tuhkakentästä  
käytiin hakemassa näytteitä noin viikkoa myöhem-

min, kun kenttä oli valmis. Kokonaisnäytemäärä viikon aikana oli: 110 kpl AA, 120 kpl Turku AMK ja 20 kpl GTK. Koeruuduissa sekoitettua massaa otettiin lisäksi ämpäreissä talteen näytteiden valmistusta varten laboratorioissa. Oppilaitoksille toimitettiin myös stabiloimatonta ruoppausmassaa laboratorioissa tehtäviä jatkotutkimuksia varten. Kuvassa 23 on esitetty Matalahden stabilointipilotin eri työvaiheet ja testeissä käytetyt materiaalit.

Koeruutuihin asennettiin näyteputket, jotka kaivettiin ylös aikapisteissä 3 ja 6 kk (kuva 21). Koeruutujen massa oli kovettunut niin paljon, että koeputket piti nostaa ylös rautakankea apuna käyttäen. Liukoisuusmäärittäjä varten kerättiin näytemateriaali koeputkien ympäriltä (kuva 22). Koeputkien näytteille oli tarkoitus tehdä laboratorioissa puristuskokeet. Materiaali ei kuitenkaan ollut sekoittunut ja stabiloitunut putkien sisällä tasaisesti, ja muun muassa putken reunoille oli massan

kuivuessa tullut rakoja. Tämän vuoksi puristuskokeita ei voitu tehdä suunnitellusti koeputkien näytteistä.

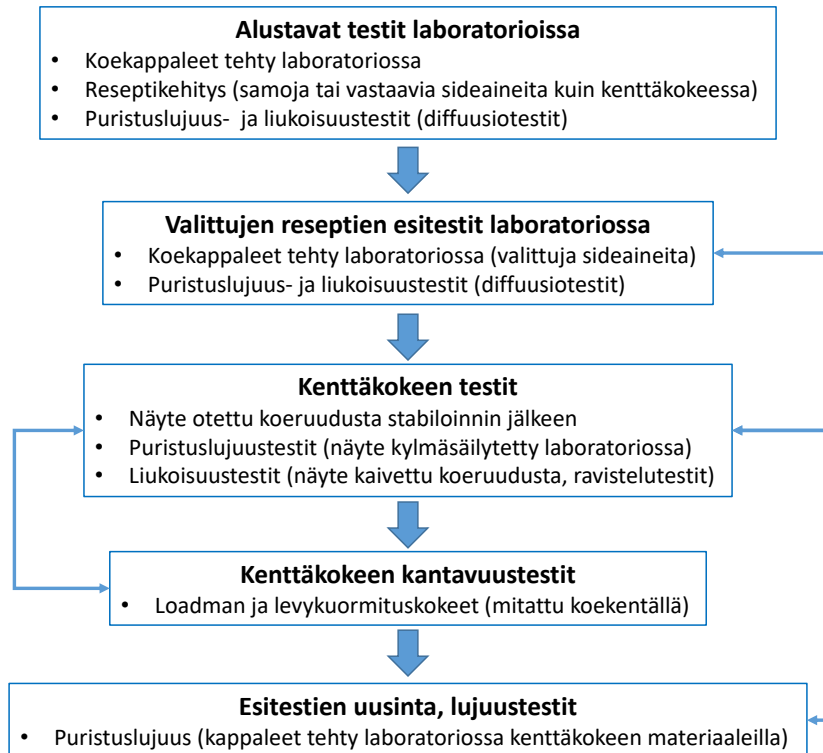


Kuva 21. Näyteputkien asentaminen koeruutuihin sideaineiden sekoittamisen jälkeen.



Kuva 22. Koeputkien irrotus koekentiltä. Liukoisuustestiin koottiin materiaali koeputken ympäriltä irronneesta massasta.





Kuva 23. Työkuvaus esiteistä ja kenttäkokeen aikana tehdyistä testeistä.

Koeruutuja ja niiden ulkopuolista osaa seurattiin 6 kuukautta kenttäkokeen aloittamisesta. Kenttäkokeen kaikki työvaiheet valokuvattiin tai videoitiin ja dokumentoitiin. Kenttäkokeessa seurattiin muun muassa seuraavia ominaisuuksia:

- puristuslujuus: 7 vrk, 28 vrk, 91 vrk, 180 vrk, 2 vuotta (ÅÅ, Turku AMK), kentällä huhtikuussa 2020 tehty massa
- metallien liukoisuus (kaksivaiheinen ravistelutesti SFS-EN 12457-3), liukoinen orgaaninen hiili (DOC), PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus (Turku AMK)
- valuma- ja hulevesien kemialliset analyysit (Turku AMK)

- näytteiden sisäisen rakenteen muutosten seuranta röntgentomografialla (GTK)
- stabiloitujen näytteiden rakenne (ÅÅ)
- stabiloitujen näytteiden pH (GTK)
- geotekniset ominaisuudet:
  - vesipitoisuus ja hehkutushäviö, stabiloimaton ruoppausmassa (Turku AMK)
  - stabiloidun massan kimmomoduuli (E-moduuli) (Turku AMK)
  - stabiloidun kentän tiiviys ja E-moduuli, pudotuspainolaitetestit ja levykuormitustestit, 1 kk, 4 kk, 6,5 kk (Lassila & Tikanoja).



Kuva 24. Koeruudut valmiina (vasemmalla) ja koko koekenttä valmiina tuhkalisäyksen jälkeen (oikealla).

## 7.2 Puristuslujuus

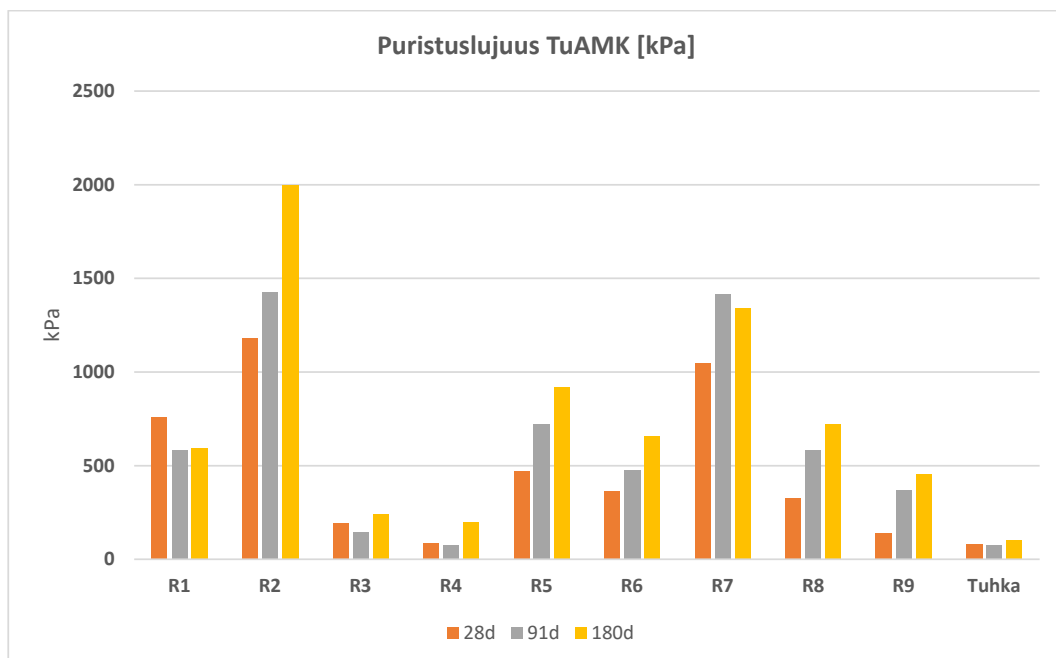
Kaikkien koeruutujen ämpärinäytteistä sullottiin koekentän reunalla muotteihin puristuslujuusnäytteet. Näytteet toimitettiin laboratorioon säilytykseen. Turun AMK määrittä standardin ISO/TS 17892-7 ja Liikenneviraston ohjeen (Liikennevirasto 2018) mukaisilla koekappaleilla ja menetelmillä puristuslujuuden (qu) 1 kk:n, 3kk:n sekä 6kk:n aikapisteissä. Åbo Akademi määrittä pienemmistä (28x56 mm) koekappaleista myös 7 vuorokauden ljuudet. Turun AMK:lla säilytetään näytteet myös kahden vuoden aikapisteestä testausta varten.

Turun AMK:ssa yksiaksiaalisella puristimella määritetyt standardin mukaiset puristuslujuuksien keskiarvot 1, 3 ja 6 kuukauden jälkeen on esitetty kuvassa 25. Kaikki puristuslujuuskokeiden tulokset ovat liitteessä 6. Puristuslujuuksien keskiarvot vaihtelivat koeruutujen välillä noin 200 kPa:sta noin 2 000 kPa:iin. Puristuslujuudelle asetettu tavoitearvo 150 kPa täyttyi kaikista koeruuduista jo 6 kk:n aikapisteessä. Sideainemääriä olisi näiden tulosten perusteella voitu hyvin pienentää, koska kuuden koeruudun ljuus on noussut 6 kk:n aikapisteessä jo yli 500 kPa:n. Pelkällä tuhalla stabiloitu koeru-

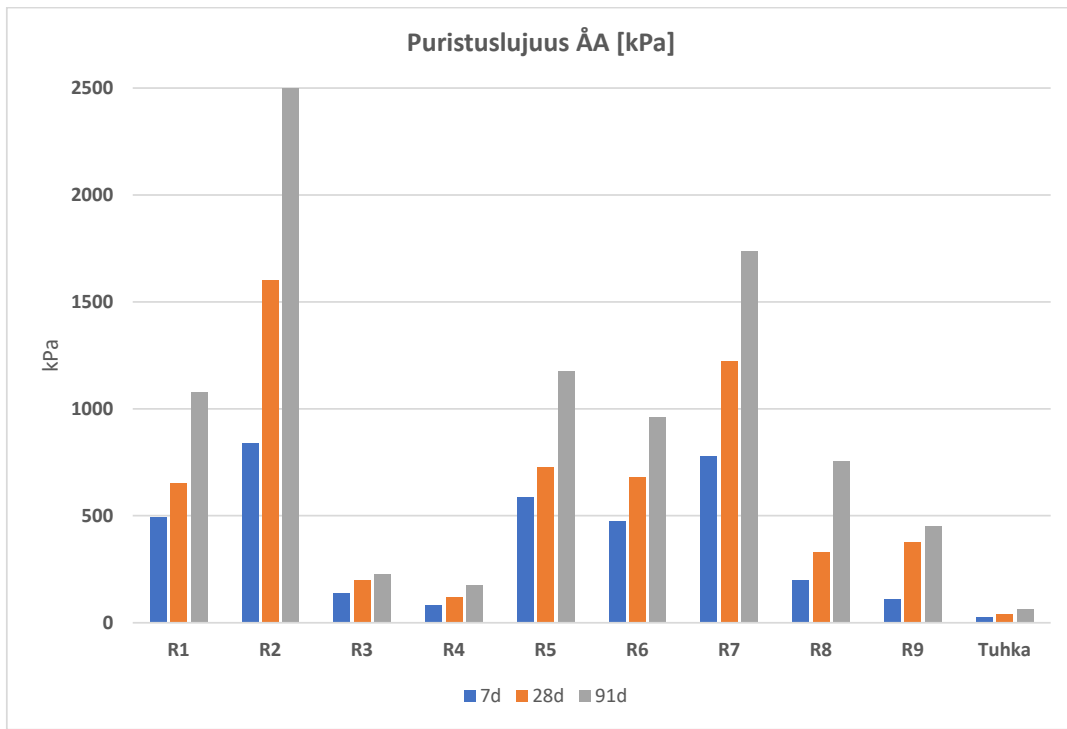
tujen viereinen aluekin saavutti puristuslujuuden 104 kPa. Stabiloidun kentän geoteknistä ljuutta kuvaava leikkauslujuuden arvo, Su (kPa), on karkeasti tuloksissa esitetty puristuslujuus jaettuna kahdella. Leikkauslujuuden arvoa käytetään mm. maan kantavuus- ja liukupintalaskelmiin.

Åbo Akademin puristimella määritetyt puristuslujuuksien keskiarvot 7, 28 sekä 91 vuorokauden aikapisteissä on esitetty kuvassa 26. Tulokset korreloivat hyvin Turun AMK:n määrittämien puristuslujuuksien kanssa. Joitakin eroja on havaittavissa, mutta tämä oli odotettavissa, kun otetaan huomioon näytteiden heterogeenisyys sekä laboratoriomenetelmien pienet erot.

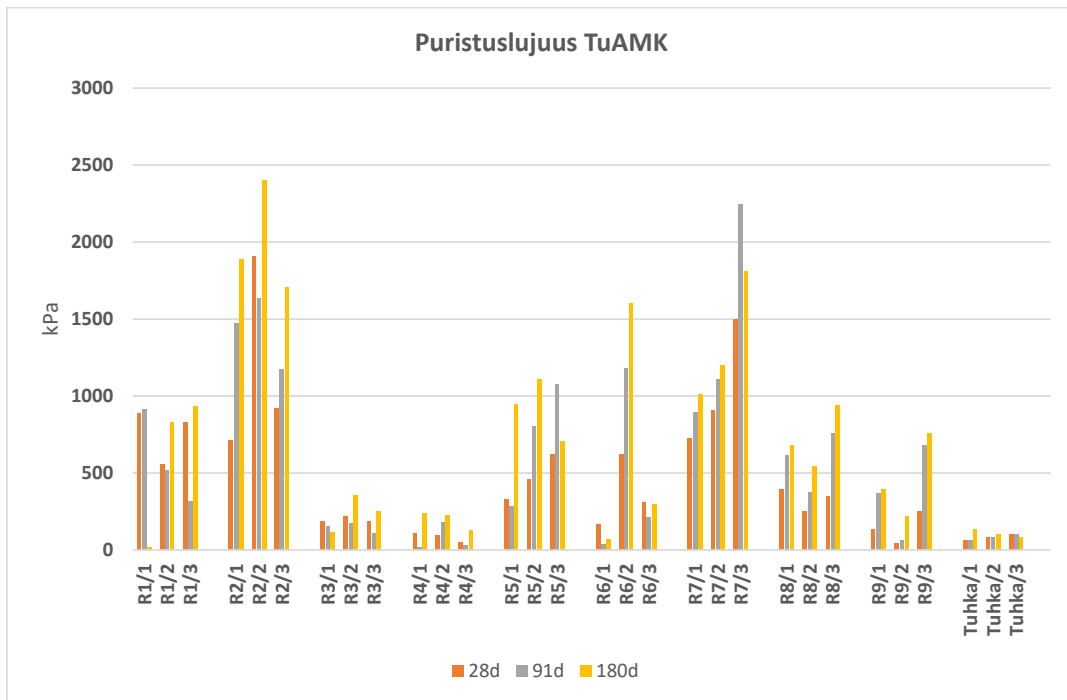
Hajonta puristuslujuustulosten välillä eri ruutujen sisällä oli melko suuri. Vaihtelut kolmen osanäytteen välillä näkyvät kuvassa 27 (Turun AMK) ja kuvassa 28 (ÅA). Vaihtelu johtui osin kentällä käytetystä sideaineiden levitys- ja sekoitustavasta, näytteenottotavasta ja siitä, että näytteitä ämpäreissä ei pyrittykään homogenisoimaan. Myös näytteen tiivistys kenttäolosuhteissa oli haastavaa ja työlästä.



Kuva 25. Turun AMK:n määrittämä eri reseptien puristuslujuus (kPa) 1, 3 ja 6 kk:n aikapisteissä (28 d, 91 d ja 180 d). Kaaviossa "Tuhka"-termi viittaa vain tuhalla stabiloituun alueeseen.

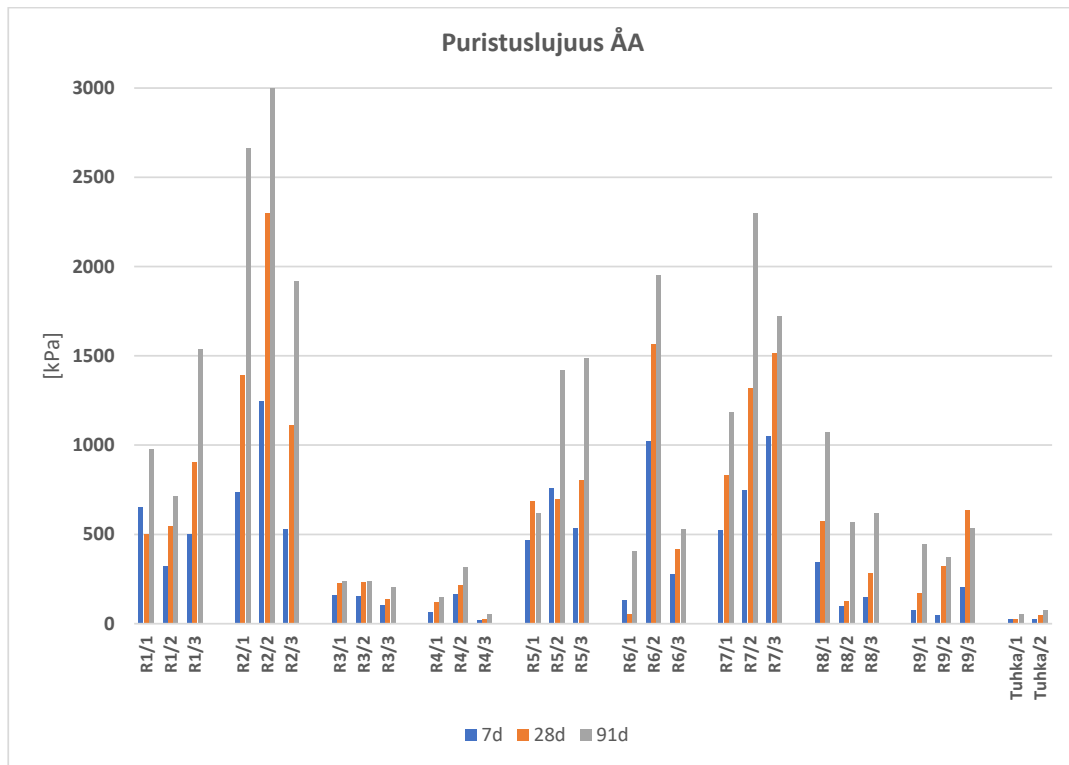


Kuva 26. Åbo Akademin määrittämä eri reseptien puristuslujuus (kPa) 7, 28 ja 91 vuorokauden aikapisteissä. Kaaviossa “Tuhka”-termi viittaa vain tuhalla stabiloituun alueeseen.



Kuva 27. Puristuslujuus (kPa) 1, 3 ja 6 kk (28 d, 91 d ja 180 d) sekä näytteiden välinen hajonta. Turun ammatti-korkeakoulun tekemät määrittymiset. “Tuhka”-termi viittaa vain tuhalla stabiloituun alueeseen.

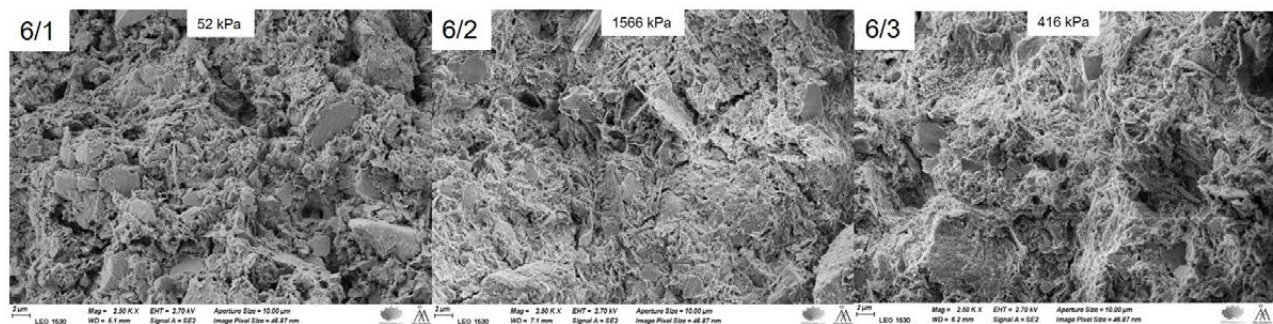




Kuva 28. Puristuslujuus (kPa) 7, 28 ja 91 vuorokauden jälkeen ja näytteiden välinen hajonta. Åbo Akademin tekemät määrittelyt. "Tuhka"-termi viittaa vain tuhalla stabiloituun alueeseen.

Osanäytteiden erot koerutujen sisällä näkyvät myös pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvissa (kuva 29). Näytteessä 6/1 (resepti 6/ämpäri 1), jossa on selvästi matalampi lujuus (52 kPa), "geelimäisyys" on paljon vähäisempää kuin näytteissä 6/2 ja 6/3, joissa oli parempi lujuus (1 566 kPa, 416 kPa). Lujuus selittyy selvästi verkkomaisemalla rakenteella. Oletettavasti näissä kohdissa massassa on ollut enemmän sideaineita, jotka ovat mahdollisesti voimakkaammat hydrataatioreaktiot.

Tutkimussuunnitelmassa ei ollut ennakoitu, miten paljon ruoppausmassa oli kuivunut huhtikuussa 2020 verrattuna näytteisiin, jotka saimme ruoppausvaiheessa syyskuussa 2019 laboratorioon esitestejä varten. Tämä oli yksi syy, miksi kenttäkokeessa saatiin huomattavasti suurempia lujuuksia esitesteihin nähden. Tästä syystä Åbo Akademiä päätettiin tehdä esitestejä uudestaan kenttäkokeessa käytettyjen raaka-aineiden kanssa. Niissä kävi ilmi, että pienetkin erot sideainemateriaaleissa

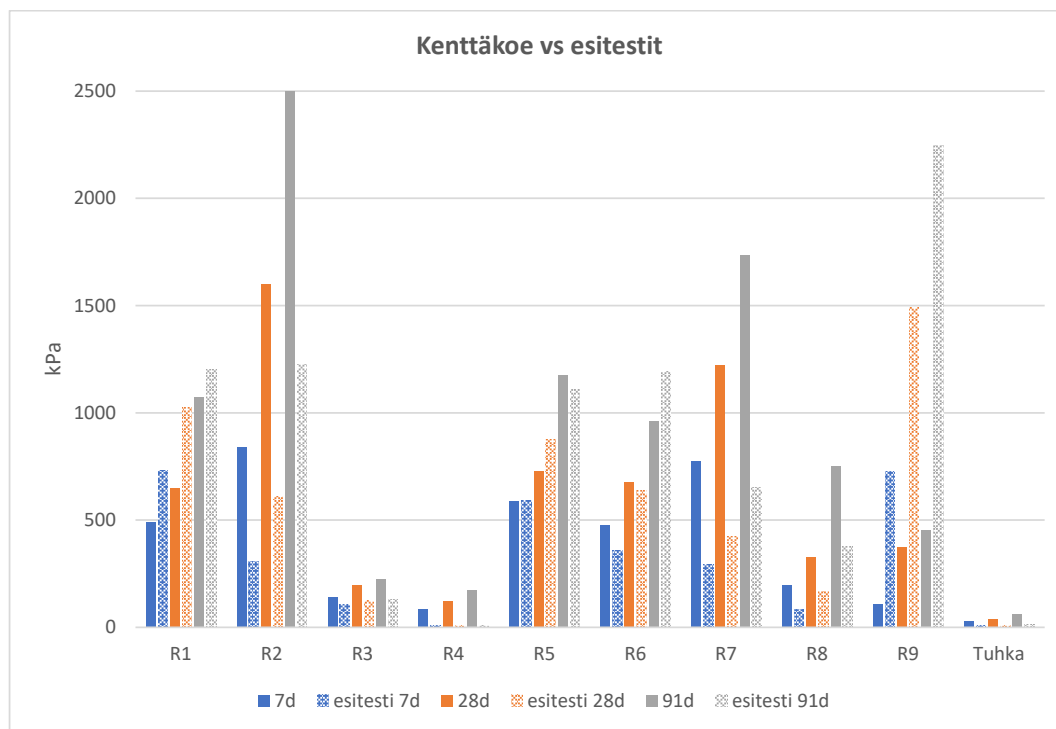


Kuva 29. Pyyhkäisyelektronimikroskoopi (SEM) -kuvia reseptin 6 osanäytteistä 6/1–6/3 aikapisteessä 28 vrk. Osanäytteistä määritetty puristuslujuus on esitetty SEM-kuvien yläreunassa.

tai runkoaineissa voivat vaikuttaa lopputulokseen suuresti. Kun reseptit toistettiin laboratoriossa kentältä otettujen sideaineiden sekä kenttäkokeen altaasta otetulla ruoppausmassalla, korrelaatio kenttäkokeen tuloksiin oli huomattavasti parempi. Näissä uusintatesteissä käytettiin myös uunipölyä kalkkituhkan sijaan resepteissä 8 ja 9, kuten kenttäkokeessa tehtiin. Kenttäkokeiden ja uusintaesitestien vertailu on esitetty kuvassa 30. Reseptien 2 ja 7 lujuudet olivat kenttäkoeolosuhteissa vieläkin paljon korkeammat kuin esitesteissä. Reseptin 9 erittäin korkea lujuus laboratorikokeessa yllätti, ja testi uusittiin. Uusinnassa saatiin vastaavanlainen tulos. Syytä tähän suureen eroon ei ole selvitetty tarkemmin tässä tutkimuksessa.

Kaiken kaikkiaan kenttäkoe oli toteutukseltaan onnistunut ja kaikki reseptit toimivat myös käytännössä. Eroavaisuudet eli kentällä yleensä huomattavasti suuremmat lujuusarvot verrattuna laboratoriotesteihin selittyvät useammalla eri tekijällä. Esitesteissä käytetty runkoaine eli ruop-

pausmassa oli huomattavasti märempää (~ 275 %) kuin kenttäkokeessa ollut massa (~ 115 %), ja ero johtui massan muutaman kuukauden kuivumisesta altaassa lämpimän kevään aikana. Veden määrän vähentäminen nostaa tunnetusti mm. betonin puristuslujuutta. Lisäksi oletus on, että kenttäkokeessa käyttämämme sekoitustapa (sideaineet koeruudun päälle ja sekoitus päältäpäin) ei vastaa täysin laboratoriossa tehtävää sekoitusta varsinkaan syvyysuunnassa. Koeruudun pintaan jäi suhteessa enemmän sideaineita kuin sekoitettavan massan pohjalle. Lisäksi laboratorionäytteet säilytettiin kylmässä ja pimeässä. Tämä ei vastaa kenttäkokeen olosuhteita, jolloin sää oli huomattavan aurinkoinen ja lämmin, ja reaktiot varsinkin massan pintaosissa olivat huomattavasti voimakkaampia kuin vertailevissa laboratoriotesteissä. Aurinkoinen ja kuiva keli edesauttoi myös sitä, että vaikka kenttäkokeen viereinen "tuhkakenttä" oli laboratoriossa lujuudeltaan vaatimaton, oli kantavuus kentällä kuitenkin todella hyvä.



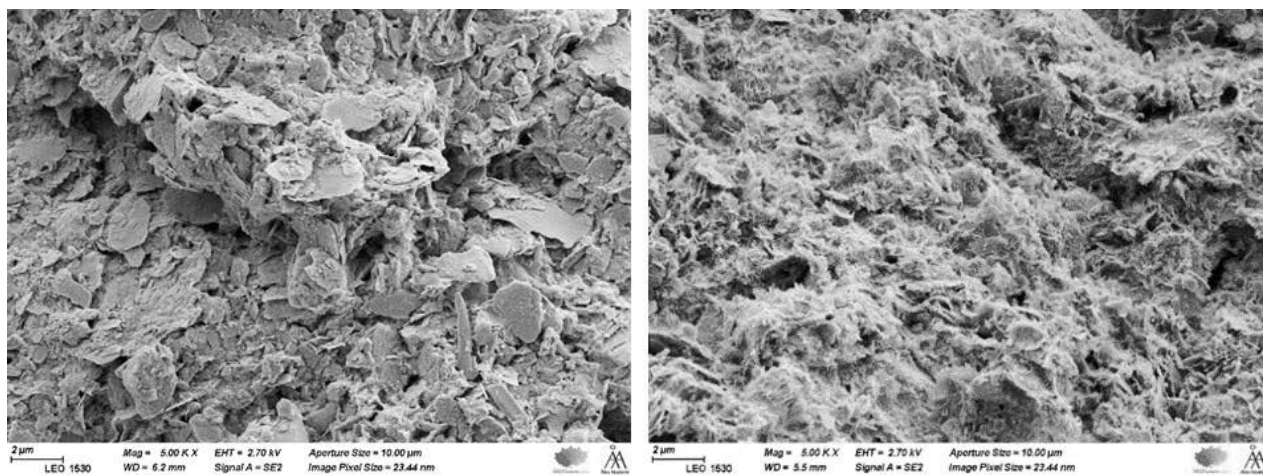
Kuva 30. Esitestien ja kenttäkokeen puristuslujuuden vertailu (KPa) 7, 28 ja 91 vuorokauden jälkeen.

### 7.3 Stabiloitujen näytteiden rakenne

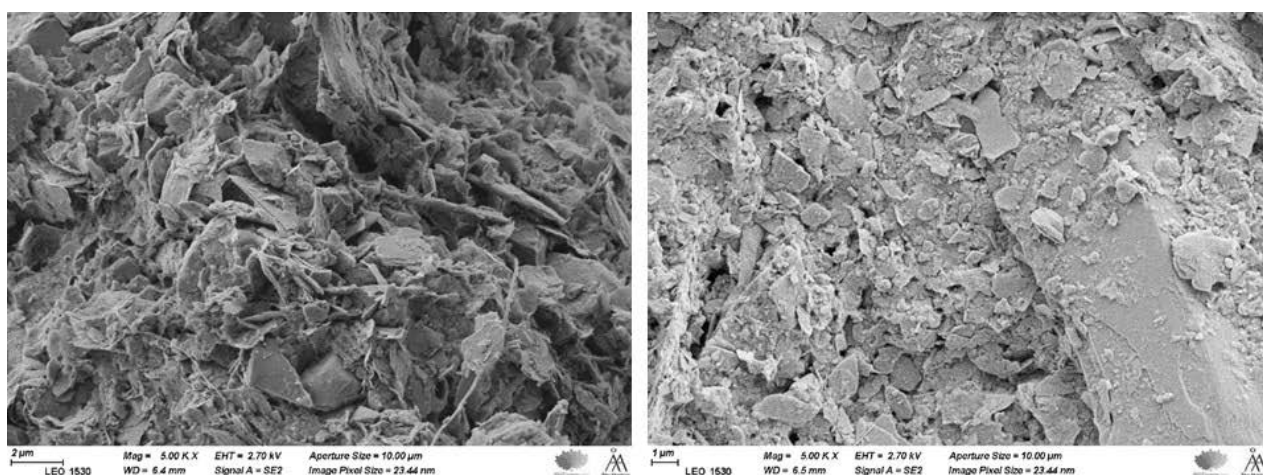
Stabiloitujen näytteiden rakennetta tutkittiin myös pyyhkäisyelektronimikroskoopilla (SEM). Yleisesti voidaan sanoa, että alkuvaiheessa yksittäiset savi-partikkelit erottuvat helposti, mutta lujittumisen edetessä syntyy verkkomainen liima partikkeliin väliin. Tämä näkyy hyvin reseptissä 7, jossa vielä 28 vuorokauden jälkeen voidaan hyvin erottaa levy-mäiset savikappaleet, mutta 91 vuorokauden jälkeen ne ovat suurimmaksi osaksi jääneet verkkomaisen liiman peittämiksi (kuva 31).

Tässä kokeessa käytetty tuhka ei juurikaan reagoi ruoppausmassan kanssa. Tämä näkyi jo puristuslujuustuloksissa, joissa pelkällä tuhalla stabiloidun

kentän lujuus oli noin 100 kPa. Tuhka pääasiassa kuivattaa ja tiivistää kenttää. Vaikka puristuslujuus oli aika matala, kesti pelkällä tuhalla stabiloitu kenttä erittäin hyvin kävelyä ja jopa raskaampaa kuormaa. SEM-kuvista näkee hyvin, että koeruu-tujen näytteissä havaittuja verkkomaisia liimoja ei ole syntynyt partikkeleiden väliin. Kuvassa 32 näkyy tuhkakentän rakennetta 28 ja 91 vuorokauden aikapisteissä. 28 vuorokauden aikapisteessä savi-partikkelit erottuvat hyvin ja rakenne on vielä aika huokoinen. Kolmen kuukauden jälkeen rakenne on tullut paljon tiiviimmäksi ja kiinteämmäksi.



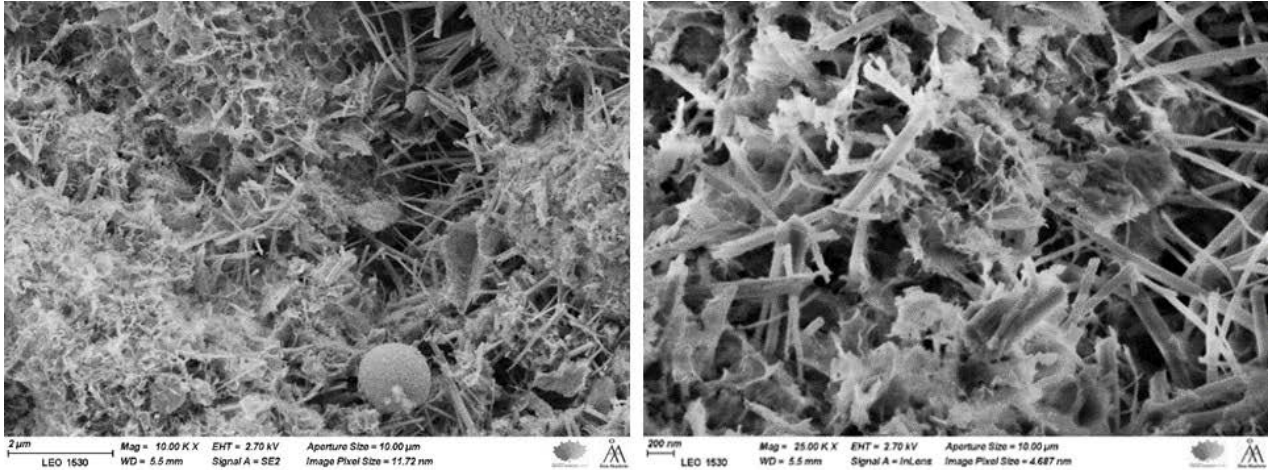
Kuva 31. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM) -kuvat reseptin 7 osanäytteestä 7/2 aikapisteissä 28 ja 91 vrk.



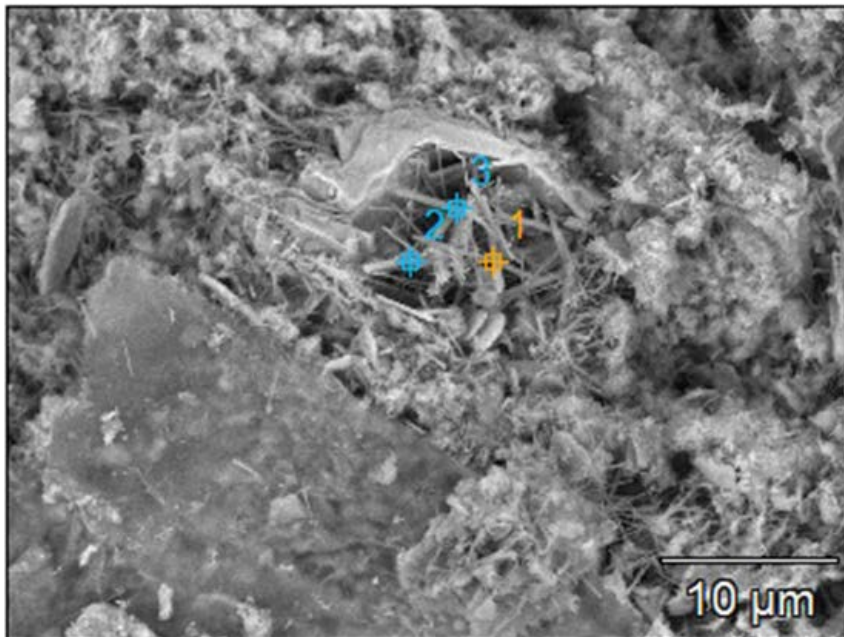
Kuva 32. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM) -kuvat tuhkakentästä aikapisteissä 28 ja 91 vrk.

Melkein kaikissa stabiloiduissa näytteissä näkyi ohuita ja neulamaisia partikkeleita (kuva 33). Nämä neulamaiset rakenteet esiintyivät jo seitsemän vuorokauden jälkeen, usein ryppäinä näytteen sisällä. SEM/EDS-analyysit osoittivat niiden koostuvan pääosin kalsiumista (Ca), rikistä (S), ja alumiinista

(Al) (kuva 34, taulukko 17). Lisäksi analyyseissä näkyi myös pieniä määriä muita käytetyissä raaka-aineissa olevia alkuaineita, kuten piitä (Si) ja magnesiumia (Mg). Analyysit viittaavat ettringiitin ( $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$ ) muodostumiseen.



Kuva 33. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM) -kuvat reseptin 5 näytteistä, joissa näkyy ettringiittikiteitä ja muita neulamaisia kiteitä.



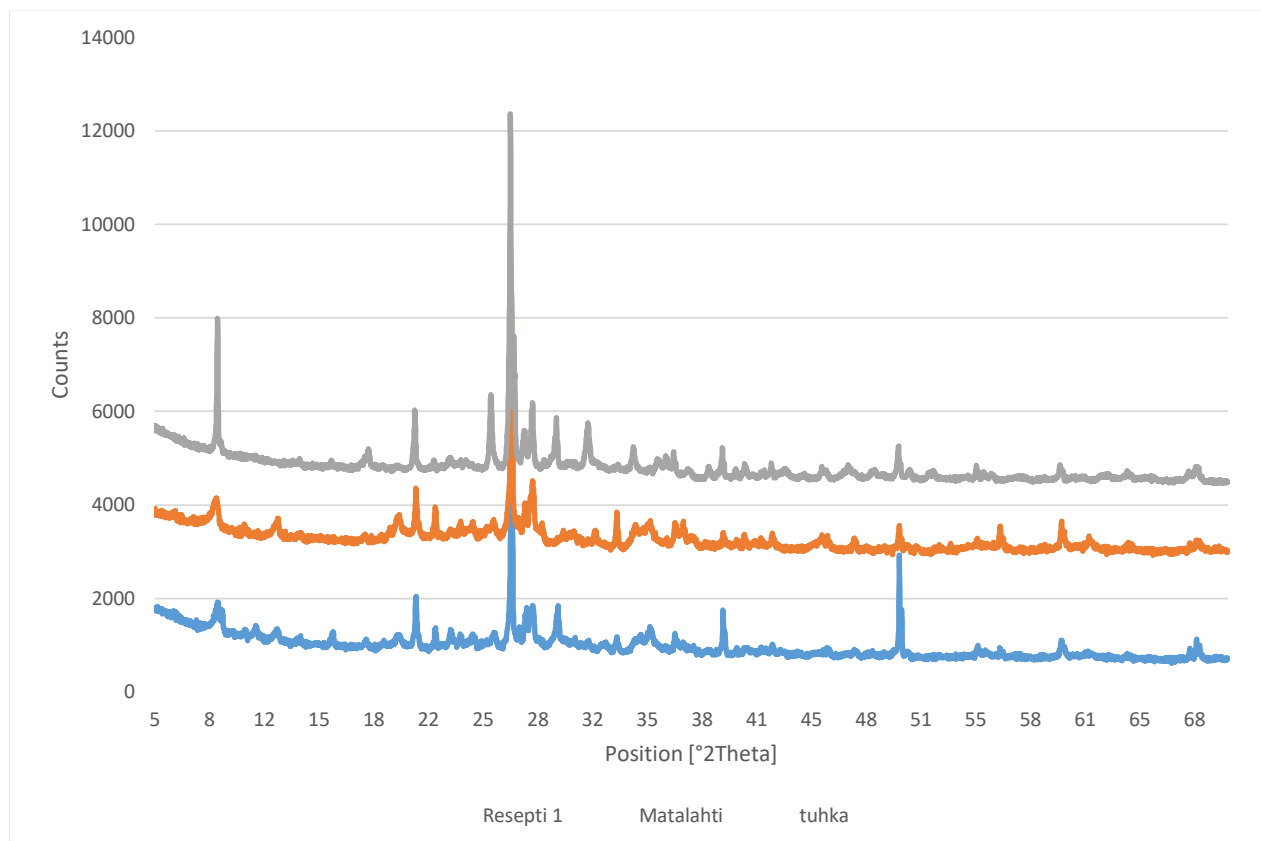
Kuva 34. Pyyhkäisyelektronimikroskooppi (SEM) -kuva reseptin 5 näytteestä aikapisteessä 28 vrk. EDS-analyysi on tehty pisteistä 1, 2 ja 3. EDS = energiaerotteinen röntgenanalysaattori.

Taulukko 17. EDS-analyysi kuvan 30 pisteistä 1, 2 ja 3 (resepti 5, 28 vrk). EDS = energiaerotteinen röntgenanalyysaattori.

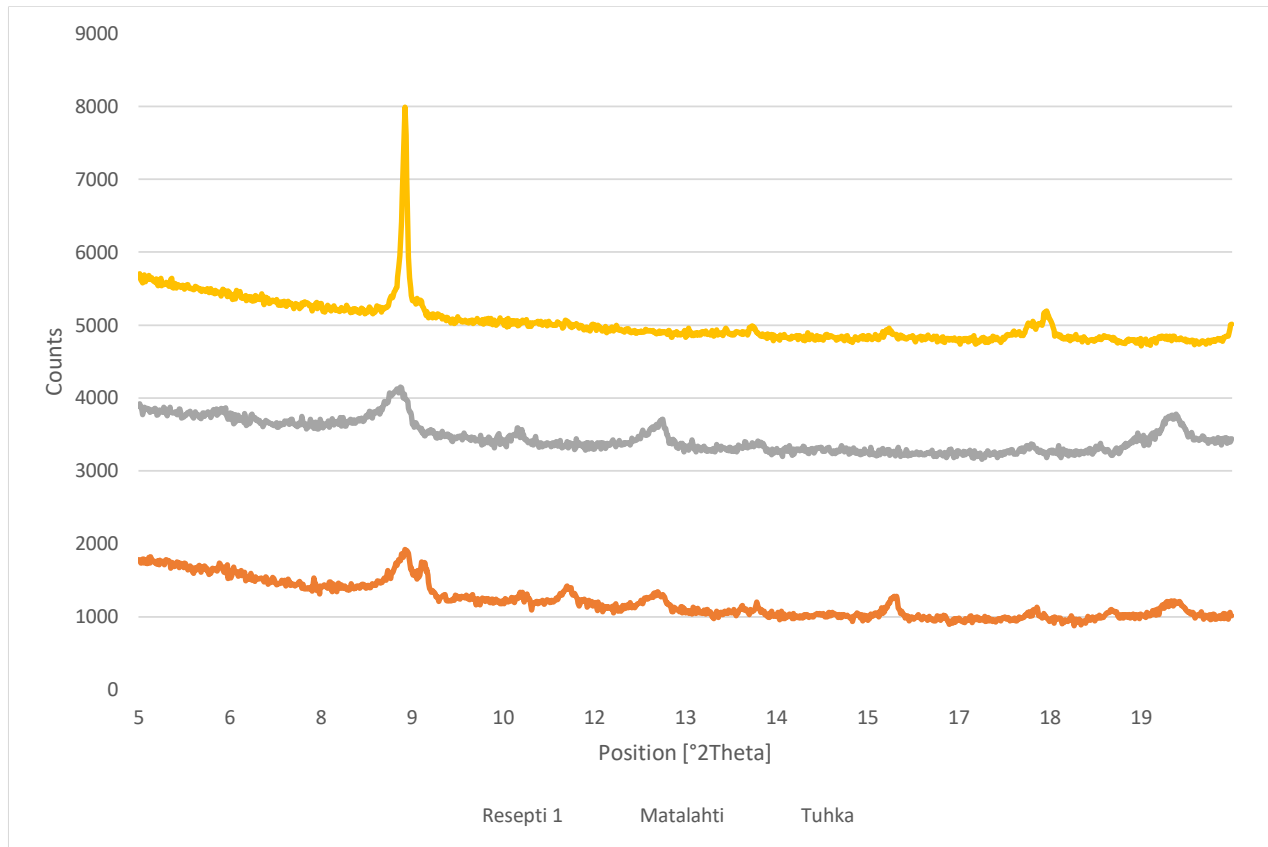
	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca
pt1	1,25	7,37	1,85	12,9		34,2
pt2	5,85	7,36	2,39	6,76	1,92	37,5
pt3	0,94	7,14	2,48	9,91	0,91	38,6
	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	CaO
pt1	2,07	13,9	3,96	32,2	-	47,9
pt2	9,70	13,9	5,12	16,9	1,92	52,5
pt3	1,56	13,5	5,30	24,8	0,91	54,0

Näytteitä tutkittiin myös röntgendiffraktiomet-  
rillä (XRD), jotta saatiin varmuus näytteissä olevista  
yhdisteistä. Kuvassa 35 on esitetty röntgendiffrak-  
tiogrammit reseptistä 1, Matalahden ruoppausmas-  
sasta ja Naantalın tuhka. Reseptin 1 ainoat uudet  
piikit ovat paikoissa 9,09 ja 15,75 (2Theta). Tämä  
näkyä paremmin kuvassa 36, jossa kuvaajan alue on  
suurennettu. Ettringiitin tunnusomaiset voimak-

kaimmat piikit esiintyvät juuri näissä paikoissa.  
Kaikissa resepteissä oli havaittavissa ettringiittiä.  
Pieniä eroja piikin intensiteetissä ja näytteiden ajan  
funktiossa kuitenkin voitiin todeta. Muita, tyyppi-  
lisiä sementin hydrataatiotuotteita (CSH, CASH) ei  
löydetty. Todennäköisesti niiden määrät olivat liian  
pieniä näkyäkseen XRD-analyysissä.



Kuva 35. Röntgendiffraktiogrammit (XRD) (5–70 °2theta). Resepti 1, Matalahden ruoppausmassa ja tuhka, aika-  
piste 28 vrk.



Kuva 36. Röntgendiffraktiogrammit (XRD) (5–20 °2theta). Resepti 1, Matalahden ruoppausmassa ja tuhka, aikapiste 28 vrk. Ettringiittiä erottuvat x-akselilla kohdissa 9,09 sekä 15,75 °2theta.

Ettringiitti on sementin tärkeä hydrataatiotuote, joka vaikuttaa alkuvaiheessa lujuuskehitykseen ja jatkossa stabiilisuuteen. Kalsiumsulfaattilähteitä, kuten esimerkiksi kipsiä, lisätään tarkoituksellisesti sementtiin säätelämään näitä ominaisuuksia. Sulfaattia ja aluminaattia voi myös olla läsnä muissa lisäaineissa. Kipsi ja muut sulfaattiyhdisteet reagoivat sementissä olevan kalsiumaluminaatin kanssa muodostaen ettringiittiä jo muutaman tunnin jälkeen. Suurin osa sulfaatista kulutetaan tavallisesti jo varhaisessa iässä. Ettringiitin muodostuminen tuoreessa betonissa on mekanismi, joka kontrolloi jäykistymistä. Varhaisessa iässä muodostuvaa ettringiittiä kutsutaan usein ”ensisijaiseksi” ettringiitiksi, joka on välttämätön ja hyödyllinen osa sementissä.

Sulfaattia sisältävät maat voivat myös johtaa ettringiitin muodostumiseen, joka pahimmassa

tapauksessa voi laajentua ja siten vahingoittaa stabiloitumista kalsiumia sisältävien sideaineiden lisäaineilla (Rajasekaran 2005). Tätä ei ole havaittu tässä tutkimuksessa. Ettringiitin määrä, joka muodostuu sementin reaktiossa veden kanssa, ei aiheuta laajenemista materiaalissa, koska sitä rajoittaa sementin koostumus. Lisää ettringiittiä voi muodostua, jos sulfaatteja lisätään ulkopuolelta. Jos ettringiitin määrä lisääntyy riittäväksi, materiaali voi laajentua. Stabiloiduille, sulfideja sisältäville maille sulfidin hapettuminen sulfaatiksi voi johtaa ettringiitin muodostumiseen. Tämä edellyttää kuitenkin hapen saantia maaperässä. Kun reseptiin lisätään tuhkaa tai kuonaa, paisuntasuhdetta voidaan vähentää sulfaattia sisältävillä mailloilla, jotka on stabiloitu kalkilla ja sementillä (Wild ym. 1998, 1999).

#### 7.4 Kentän tiivysmittaukset pudotuspainolaitteella ja levykuormituskokeella

Lassila & Tikanoja teki kenttäkokeen aikana (1 kk, 4 kk ja 6,5 kk) koelueella (9 koeruutua ja tuhalla vahvistettu ruoppausmassa) E-moduuli- ja tiivysmittauksia. Ensimmäisen kuukauden mittaukset tehtiin pudotuspainolaitteella (Loadman) ja jälkimmäiset levykuormituskokeella. Molemmilla laitteistoilla kentän päälle tuodaan kuorma ja samanaikaisesti seurataan maarakenteen painumaa. Koe tehdään kahdessa vaiheessa niin, että ensimmäisen kuormituksen ja painuman avulla lasketaan  $E_1$ -arvo ja tämän jälkeen koe toistetaan samassa mittauspisteessä ja edelleen määritetään kuorman ja painuman avulla  $E_2$ -arvo. Näiden arvojen suhde ( $E_2/E_1$ ) kuvaa maan tiivyyttä. Yleensä  $E_2/E_1$ -arvolle pidetään vastaavissa kohteissa tavoitearvona  $E_2/E_1 < 2,2$ .

Kentällä tehtyjen tiivysmittausten mittaus-tulokset pistekohtaisesti on esitetty taulukossa

18. Tuloksista näkee, että kentän kantavuusarvot (E-moduuli) ovat kasvaneet merkittävästi ajan myötä. Parhaimmat E-kantavuusarvot saavutettiin resepteillä 1, 3, 7 ja 9 stabiloiduissa koeruuduissa ja kaikkein pienimmät reseptillä 4 stabiloidussa koeruudussa ja tuhalla stabiloidulla kenttäalueella. Osa mittauksista ei onnistunut, koska suurellakaan kuormalla maa ei painunut (taulukossa 18 merkitty tähdellä). Viimeisimmissä 6,5 kk:n mittauksissa koeruutujen tiivysmittausten arvot lähentelivät jo kolmasosaa betonin kimmomoduulista. Varsinaisen kenttäkokeen viereisellä tuhkatulla alueellakin kantavuusarvot olivat 34–36 MPa, mikä vastaa keskitiiviin hiekan lukemia (esim. kantavuusluokat RIL132). Tiivyyden  $E_2/E_1$ -arvot ovat pääosin hyviä.

Taulukko 18. Taulukossa on esitetty kentällä tehtyjen tiivysmittausten (L&T) tuloksia. Ensimmäisen kuukauden (1 kk) mittaus-tulokset on tehty Loadman-laitteella ja 4 kk:n ja 6,5 kk:n mittaukset levykuormituskoe-laitteella. Tähdellä (\*) merkityistä mittauksista ei saatu tulosta, koska maa ei painunut maksimikuormituksen aikana.

	1 kk	Loadman		4 kk			6,5 kk		
Resepti	$E_1$ (MPa)	$E_{max}$ (MPa)	$E_2/E_1$	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$E_2/E_1$	$E_1$ (MPa)	$E_2$ (MPa)	$E_2/E_1$
R1	63	88	1,92	88	165	1,9	9 549	19 099	*
R2	180	217	1,24	434	531	1,2	*	*	*
R3	64	90	1,41	161	1736	10,8	9 549	9 549	*
R4	47	56	1,19	21	33	1,6	531	76	0,1
R5	150	224	1,67	19 099	*	*	19 099	*	*
R6	69	191	3,07	269	335	1,2	637	106	0,2
R7	296	352	1,36	*	*	*	9 549	*	*
R8	144	271	2,06	92	120	1,3	*	*	*
R9	65	121	1,95	289	398	1,4	6 366	19 099	3
Tuhka1	13	14	1,04	18	20	1,1	32	36	1,1
Tuhka2	11	18	1,82	18	20	1,1	33	34	1

Joiltakin osin tulokset osoittavat, että stabiloidun kentän alla saattaa olla painuvaa pehmeää pohjamaata tai stabiloitu maa ei ole tiivis. Esimerkiksi reseptillä 9 stabiloidun koeruudun 6,5 kk:n kantavuuskokeen toistokuormituksen kantavuusarvo on kolminkertainen ensimmäiseen kantavuus-

arvoon verrattuna. Vastaavasti samassa aikapisteessä resepteillä 4 ja 6 stabiloitujen koeruutujen toistokuormituksen arvo on huomattavasti ensimmäistä kuormitustulosta alhaisempi. Pääsääntöisesti tulokset ovat hyvin korkeita ja osoittavat, että stabiloitu kenttä on tiivis ja kantava.

## 7.5 E<sub>50</sub>-moduuli eli sekanttimoduulin määrittäminen jännitys-muodonmuutoskuvaajasta

Kaikista kentällä tehdyistä massastabilointinäytteiden puristuslujuuskokeista määritettiin Turun AMK:ssa E<sub>50</sub>-moduuli. Tutkittavat näytteet olivat stabiloidulta kentältä otettuja näytteitä, jotka ikäännytettiin laboratorion kylmiössä.

E-moduuli eli kokoonpuristuvuusmoduuli on määritettävissä puristuslujuusmittauksen yhteydessä tulostuvasta jännitys-muodonmuutoskuvaajasta. Liikenneviraston ohjeistuksen (Liikennevirasto 2018) mukaisesti E-moduuli määritetään ns. sekanttimoduulina, ts. jännityksen ja muodonmuutoksen suhde huomioidaan vain 50 % maksimipuristuslujuudesta. E<sub>50</sub>-moduulin avulla voidaan arvioida rakennusaikaista alkupainumaa ja pohjamaan kantavuusluokkaa. E-moduuli kuvastaa siis rakenteen jäykkyyttä, mutta sen avulla voidaan myös tehdä painumalaskelmia.

Lasketut E-moduuliarvot vastasivat hyvin kenttien puristuslujuuksien arvoja, ts. kentällä, jossa puristuslujuuksien arvot olivat suuria, myös kokoonpuristuvuusmoduuli oli korkea. Kokoonpuristuvuusmoduulien arvot kasvoivat iän

myötä. Arvoja voidaan verrata levykuormituskokeen tuloksiin, mutta ne ovat suuntaa antavia, koska levykuormituskoe huomioi koko kuormitusportaan, kun taas E<sub>50</sub>-laskentamenetelmä huomioi vain alkumatkan ja -puristuman. Toisaalta kentän arvot kuvaavat parhaiten pintakerrosten arvoja, jotka ovat voineet lujittua auringon paisteesta poikkeuksellisen lujiksi. Laboratoriossa määritetyt kimmomodulit on määritetty jääkaapissa säilytetyistä näytteistä ja kuvaavat paremmin syvempien kerrosten kokoonpuristumisominaisuuksia.

Suurimmat E<sub>50</sub>-arvot saavutettiin resepteillä 2, 5 ja 7 stabiloiduissa näytteissä, joissa E-moduulin arvo oli 118–214 MPa, mikä vastaa arvoltaan tiivistä soraa. Alhaisimmat arvot saatiin tuhkatusta kentästä, 7,4 kPa. Lukema vastaa maalajarvoltaan sitkeää savea. Reseptillä 2 stabiloidun koeruudun laskettu E-moduuli oli 23 MPa ja reseptillä 4 laskettu E-moduuli oli 12 MPa. Lukemat vastaavat maalajeja kova savi ja silttinen savi. Tulokset on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. E<sub>50</sub>-moduulit koeruuduittain. Arvot ovat kolmen eri pisteen laskettuja keskiarvoja. Arvot on määritetty laboratorion jääkaapissa ikääntyneistä näytteistä.

Resepti	Resepti (kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>50</sub> (MPa) 1kk	E <sub>50</sub> (MPa) 3 kk	E <sub>50</sub> (MPa) 6kk
R1	150sem+200tuh	56,9	45,3	45,5
R2	50sem+200tuh+100kuo	151,8	161,3	214,4
R3	200tuh+150ecolan	15,7	8,8	23,0
R4	200tuh+150renotech	3,6	7,1	12,0
R5	150sem+100tuh+100PK	77,9	93,1	118,8
R6	50sem+100tuh+100kuo+100PK	31,7	56,1	97,2
R7	50sem+200tuh+50kuo+50NKpöly	89,6	98,6	150,6
R8	25sem+200tuh+75kuo+50NKpöly	22,0	35,3	76,4
R9	50sem+100kuo+100PK+100NKpöly	7,7	11,7	49,6
Tuhka	400tuh	4,9	6,8	7,4

## 7.6 Tomografiatutkimukset

Röntgentomografialla voidaan mitata näytteen sisäistä rakennetta näytettä vahingoittamatta. Menetelmä soveltuu siksi erinomaisesti esimerkiksi muutosten seurantaan näytteessä ajan kuluessa. Tomografiamittauksia tehtiin projektissa kolmesta eri näytesarjasta, käyttäen näytteille 35 cm pitkiä ja halkaisijaltaan 10 cm:n muoviputkia.

1. Laboratorionnäytteet, yksi kustakin koeruudusta, kerättiin kentällä sekoitetuista näytteistä näyteputkiin kokeen alussa ja säilytettiin sen jälkeen GTK:lla +3 °C:n lämpötilassa.
2. Kenttänäytteet, neljä kustakin koeruudusta, kerättiin kentällä sekoitetuista näytteistä näyteputkiin kokeen alussa ja säilytettiin



ulkoilmassa pystyssä ilman kansia. Yksi näyte kustakin ruudusta toimitettiin GTK:lle mitattavaksi mahdollisimman lähellä mittaushetkeä.

3. Laboratoriosekoitetut näytteet, yksi kutakin reseptiä, sekoitettiin jälkeinpäin laboratorioolosuhteissa näyteputkiin ja säilytettiin sen jälkeen GTK:lla +3 °C:n lämpötilassa.

Mittapisteet laboratorio- ja kenttänäytteille olivat noin 0, 30, 90 ja 180 päivää kenttäkokeen alkamisesta. Näytteet kuvattiin näyteputkissaan (kuva 37).

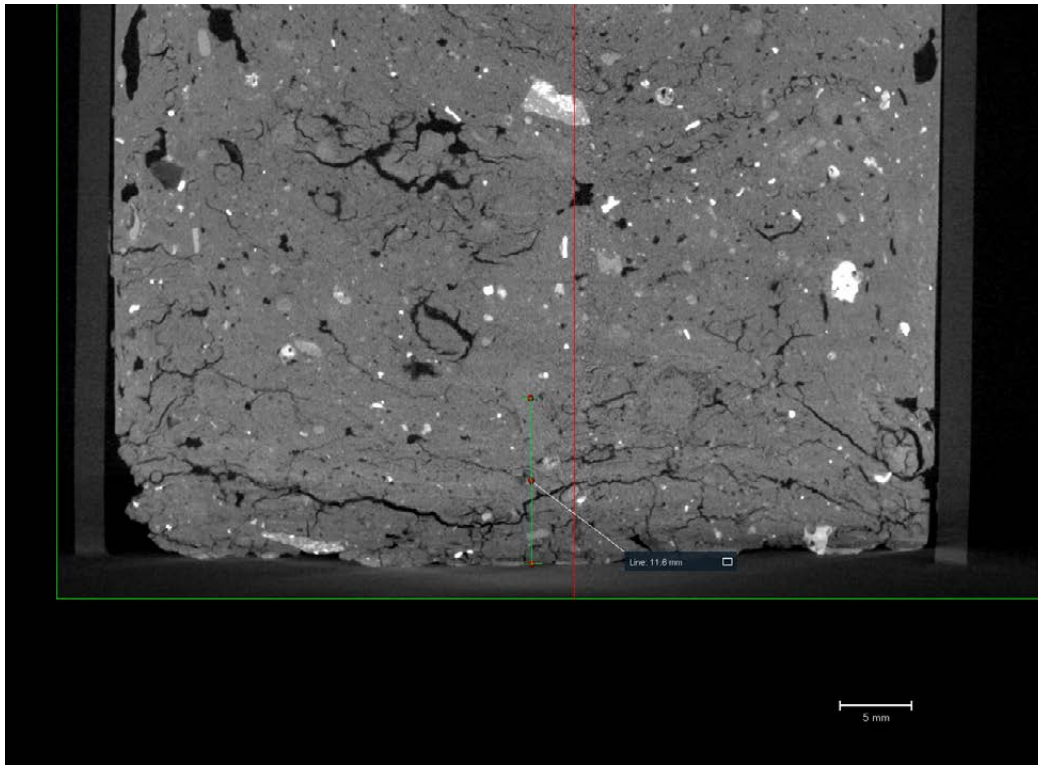


Kuva 37. Ruoppausmassanäyte koeruudusta 1 (resepti 1) valmiina kuvattavaksi tomografialaitteessa.

Näytteet kuvattiin GTK:n GE phoenix v|tome|x s -laitteen 240 kV mikrofokusputkella. Kiihdytysjännite oli 100 kV ja virta 825  $\mu$ A, jolloin käytetty kuvausteho oli 82,5 W. Suodattimena käytettiin 0,5 mm kuparia. Jokainen näyte kuvattiin neljässä osassa niin, että joka osassa kulma-askelia oli 2 000 / 360° ja joka kulmassa laite odotti ensin yhden valotusajan ja otti sitten kolme kuvaa, joista otettiin keskiarvo. Yksittäinen valotusaika oli 133 ms, ja kokonaisuudessaan yhden näytteen kuvaamiseen kulunut aika oli 133 minuuttia. Vokselikoko oli useimmilla näytteillä 60,1  $\mu$ m, mutta osalla kuvauskerroista / näytteistä inhimillisen virheen vuoksi 63,72  $\mu$ m. Tällä oli kuitenkin hyvin vähän vaikutusta tuloksiin ja niiden analysointiin. Varjokuvat rekonstruoidtiin 3D-kuviksi phoenix datos 2 rec -ohjelmalla ja analysoitiin ThermoFisher PerGeos 2020.2 -ohjelmalla. Analyysissä määriteltiin näyt-

teille kokonaishuokoisuudet sekä huokoisuudet jokaisessa XY-suunnan tasossa, joista saatiin laskehtua huokoisuus paikan funktiona näytteissä. Kenttänäytteistä määritettiin myös pinnassa havaitun merkittävemmän rakoilun syvyys (kuva 38).

Kokeen aikana analyysimenetelmää saatiin GTK:lla kehitettyä siten, että saadut huokoisuustulokset ovat vertailukelpoisia toistensa kanssa. Yhden kuvauksen data oli kuitenkin sillä välin kadonnut, joten reseptin 5 30 päivän mittapiste puuttuu tuloksista. Huokoisuuksien epävarmuutta on vaikea määrittää. Suhteellisen virheen voidaan ajatella olevan 10 %:n luokkaa, mutta suhteessa toisiinsa arvot ovat tarkkoja, ts. ne kertovat tarkasti huokoisuuden muutoksista etenkin laboratorionäytteissä. Eri reseptien laboratorionäytteiden kokonaishuokoisuudet on listattu taulukkoon 20.



Kuva 38. Koeruudusta 5 (resepti 5) otetun kenttänäytteen pääty 180 päivää kokeen aloittamisesta. Voimakas pinnalta lähtevä rakoilu ulottuu 11 mm:n syvyydelle näytteen pinnasta.

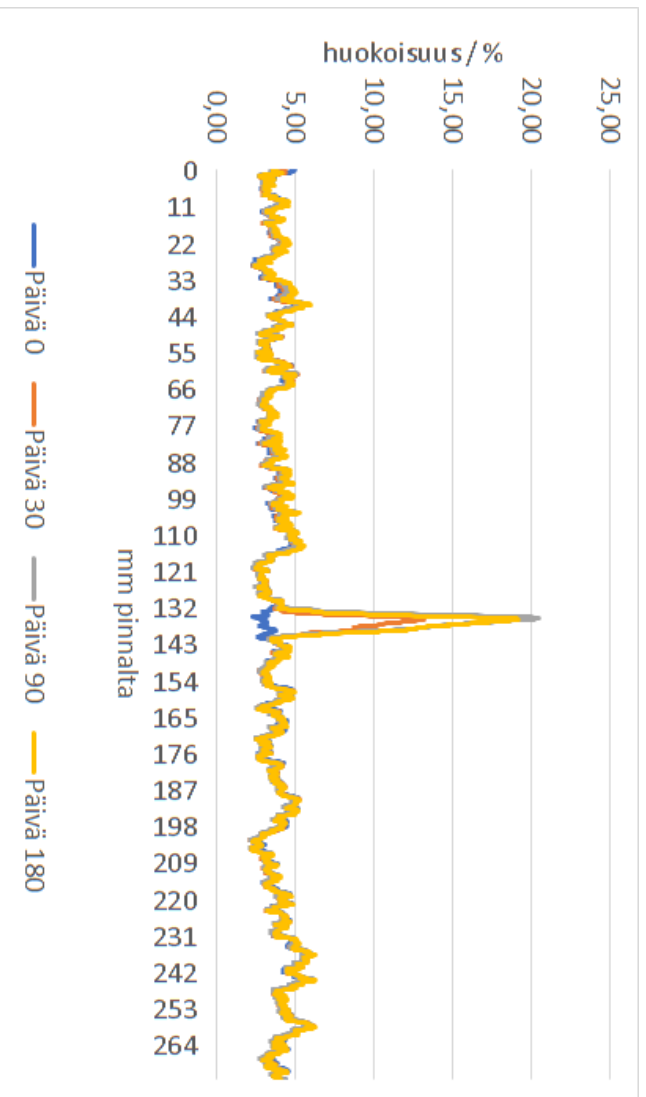
Taulukko 20. Eri reseptien laboratorionäytteiden kokonaishuokoisuudet (%) eri aikapisteissä.

Resepti	Päivä 0 / %	Päivä 30 / %	Päivä 90 / %	Päivä 180 / %
1	2,5	2,7	2,8	2,8
2	2,6	2,6	3,2	3,3
3	2,9	3,4	4,1	4,2
4	3,8	4,0	4,1	4,2
5	2,6	N/A	2,6	2,6
6	2,8	2,8	2,9	3,0
7	2,5	2,6	2,6	2,6
8	2,4	2,4	2,3	2,6
9	2,8	3,0	2,8	2,9

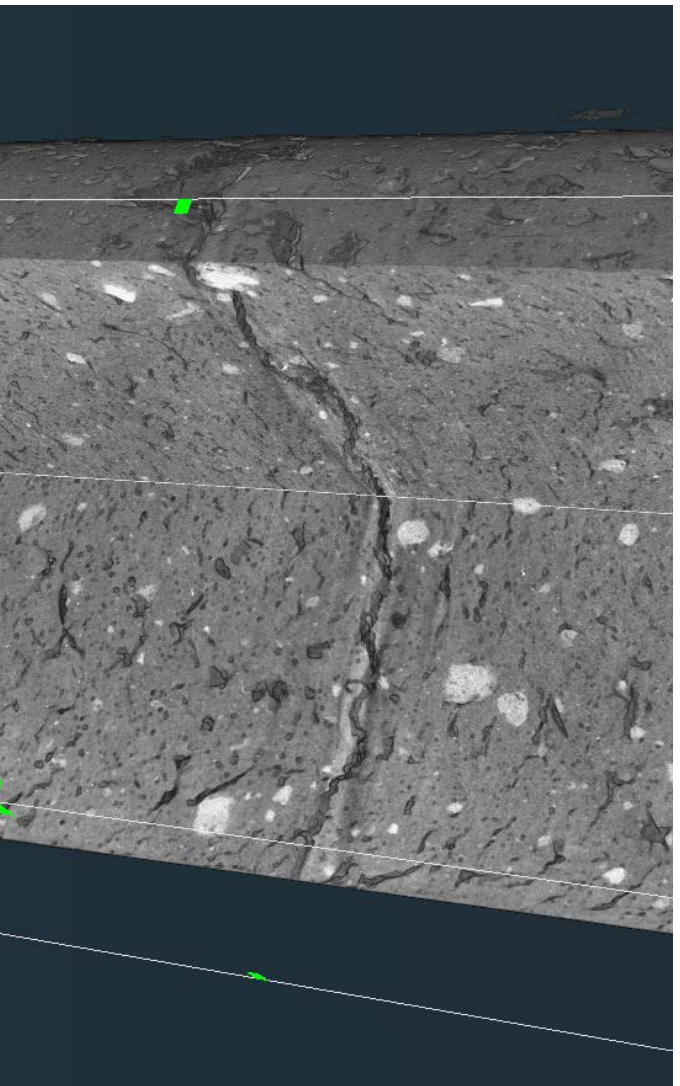
Taulukosta 20 nähdään, että harvoja poikkeuksia lukuun ottamatta huokoisuudet nousivat ajan myötä näytteiden kuivuessa. Rakojen umpeutuminen laski huokoisuutta joissain tapauksissa, mutta se oli ilmiönä harvinainen. Suhteessa suurinta huokoisuuden nousu oli reseptillä 3 ja pienintä reseptillä 5. Kun huokoisuuden muutoksia tarkkailtiin paikan funktiona, voitiin joissain tapauksissa havaita suuriakin paikallisia muutoksia, kuten reseptin 4

näytteeseen syntynyt suuri rako (kuva 39). Tämä rako näkyy kuvassa 40.

Huokoisuuden laskenta paikan funktiona oli hyödyllisimmillään, kun vertailtiin laboratoriossa ja kentällä sekoitettujen näytteiden eroja. Taulukkoon 21 on listattu kullakin reseptillä kenttäsekoitetun ja laboratoriosekoitetun näytteen ”päivä 0” -huokoisuudet ja näiden keskihajonnat paikan funktiona.



Kuva 39. Reseptin 4 näytteeseen syntyi pian kokeen aloituksen jälkeen suuri rako näytteen puoleen väliin.



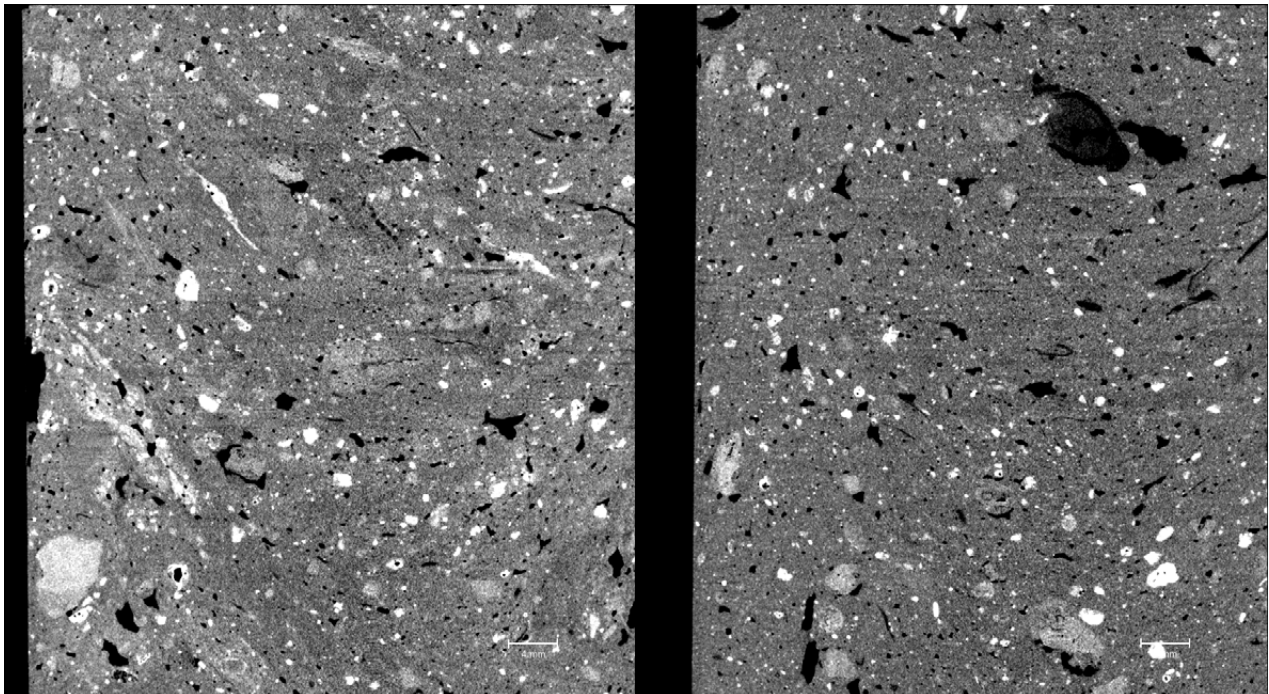
Kuva 40. Reseptin 4 näytteeseen kokeen alun jälkeen syntynyt paksu rako leikattuna 3D-kuvana.

Taulukko 21. Eri reseptien kentällä (KenttäS) ja laboratoriossa (LaboS) sekoitettujen näytteiden ”päivä 0” huokoisuudet (KA) ja huokoisuuksien keskihajonnat (KH) paikan funktiona.

Resepti	KenttäS KA	KenttäS KH	LaboS KA	LaboS KH
1	2,5	0,78	3,8	0,71
2	2,6	0,91	3,8	0,58
3	2,9	0,58	3,7	0,61
4	3,8	0,71	4,7	0,70
5	2,6	0,83	3,7	0,73
6	2,8	0,94	3,1	0,58
7	2,5	0,68	3,7	0,67
8	2,4	0,58	3,5	0,52
9	2,8	0,63	3,0	0,53

Taulukosta 21 nähdään, että yhtä poikkeusta lukuun ottamatta keskihajonta on pienempi laboratoriosekoitetussa näytteessä eli laboratoriossa sekoitetut näytteet ovat tasalaatuisempia. Ero ei kuitenkaan useimmilla näytteillä ole merkittävä. Ero homogeenisuudessa näkyi joillain näytteillä myös massaa silmämääräisesti tarkastelemalla, kuten kuvasta 41 nähdään. Samalla nähdään, että laboratoriosekoitetut näytteet ovat joka reseptillä

huokoisempia kuin kentällä sekoitetut, joillain ruuduilla hyvinkin selvästi. Voitaneen olettaa, että huolellisemmalla sekoituksella massaan jää myös hieman enemmän ilmaa. Toisaalta kyseessä voi olla myös sattuma, sillä kenttäkokeen koeruutujen koostumus osoittautui hyvin heterogeeniseksi, ainakin huokoisuuksilta. Tämä käy ilmi taulukosta 22, jossa on listattuna eri reseptien kenttänäytteiden huokoisuudet.



Kuva 41. Reseptin 6 näyte kentällä (vasen) ja laboratoriossa (oikea) sekoitettuna. Laboratoriossa sekoitettu näyte on tasalaatuisempi mutta myös huokoisempi.

Taulukko 22. Eri reseptien kenttänäytteiden kokonaishuokoisuudet.

Resepti	Päivä 30 / %	Päivä 90 / %	Päivä 180 / %
1	4,3	4,2	3,3
2	3,7	4,5	3,1
3	7,0	9,1	8,0
4	5,8	5,4	4,1
5	3,1	4,7	3,2
6	5,9	6,8	6,4
7	3,9	4,8	3,3
8	2,9	8,6	3,2
9	3,1	5,5	4,1

Taulukosta 22 nähdään, että kaikki kenttänäytteet olivat jo 30 päivää kokeen alusta huokoisempia kuin vastaavat laboratorionäytteet 180 päivää kokeen alusta. On kuitenkin vaikea vetää johtopäätöksiä huokoisuuden lisääntymisnopeudesta kenttäolosuhteissa, sillä tarkastelua ei päästy toistamaan samalle näytteelle useita kertoja. Usealla

reseptillä huokoisuus vaikuttaa laskeneen 90 ja 180 vuorokauden välillä, mikä voi johtua mittausruutujen heterogeenisyydestä tai jostain tällä välin tapahtuneesta sääilmästä, esim. voimakkaasta kasumisesta. Lopuksi tarkasteltiin vielä eri kenttänäytteiden pinnoilla olleen rakoilun syvyyttä. Nämä syvyydet on listattu taulukkoon 23.

Taulukko 23. Eri reseptien kenttänäytteiden pintarakoilun syvyys.

Resepti	Päivä 30 / mm	Päivä 90 / mm	Päivä 180 / mm
1	0	0	4
2	7	14	9
3	3	6	15
4	0	3	4
5	2	8	11
6	2	0	6
7	6	23	19
8	8	26	21
9	0	2	7

Pintarakoilussa havaittiin suuria eroja eri reseptien välillä. Etenkin resepteillä 7 ja 8 rakoilu oli huomattavaa, kun taas resepteillä 1 ja 4 sitä hädin

tuskin havaittiin. Pintarakoilusta ei kuitenkaan löydetty selvää yhteyttä muihin saman reseptin tomografiatuloksiin.

### 7.7 Haitta-aineiden liukoisuus

Eri reseptien stabiloiduista näytteistä selvitetiin, kuinka paljon mahdollisesti haitallisia anioneita, metalleja ja hiiltä niistä saattaa liueta veteen. Turun AMK:lla määritettiin eri haitta-aineiden pitoisuuksia kaksivaiheisella ravistustestillä (SFS-EN 12457-3) käyttäen kuiva-aineen (S) ja veden (L) kokonaissuhdetta L/S = 10 l/kg. Liuenneiden aineiden pitoisuudet määritettiin ravistelutestin 1. vai-

heesta, jossa käytettiin suhdetta L/S = 3,5 l/kg, sekä 2. vaiheesta, jossa käytettiin suhdetta L/S = 6,5 l/kg. Näiden perusteella laskettiin kunkin aineen liukoisuus 1. ravisteluvaiheesta sekä kokonaisliukoisuus eli kumulatiivinen liukoisuus. Liukoisuustestit tehtiin kolmessa eri aikapisteessä, 0, 3 ja 6 kk. Tuorenäytteet eli aikapisteen 0 kk näytteet otettiin koeruuduista heti kentällä tapahtuneen sekoituksen

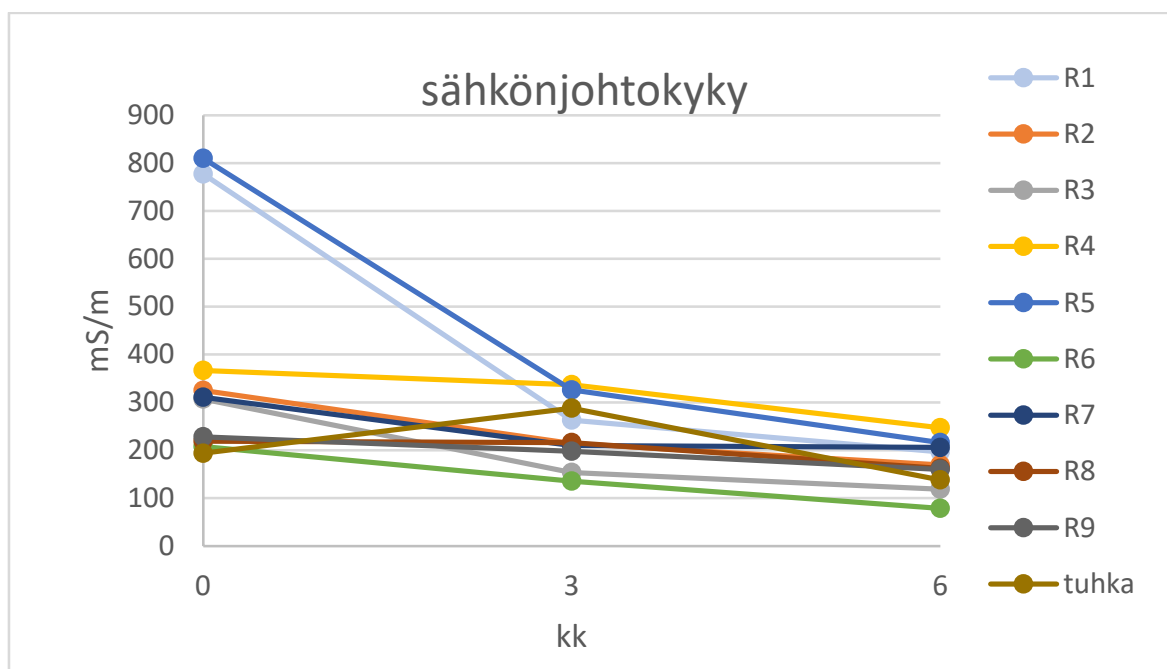
jälkeen. Aikapisteissä 3 ja 6 kk analysoitiin kentällä massa-asennettujen näyteputkien ympäriltä kerätty stabiloitunut materiaali (kuva 22). Yhdeksän koereseptin lisäksi analysoitiin koeruutujen ulkopuoliselta tuhkakentältä otetut näytteet. Näytteet otettiin kentältä Turun AMK:n (0 kk) ja ÅA:n (3 ja 6 kk) toimesta. Ravistelutestien suodosvesien elohopeamääritys tilattiin erikseen Eurofins Ahma Oy:n laboratoriosta. Aikapisteen 6 kk reseptien R3, R4, R5 ja R9 näytteiden liukoisuus määritettiin lisäksi ulkopuolisessa akkreditoidussa laboratoriossa Eurofins Labtium Oy:ssä kaksivaiheisella raviste-

lutestillä (SFS-EN 12457-3). Ulkopuolisissa laboratorioissa teetettyjen analyysien testausselostet on esitetty liitteissä 8 ja 9.

Uuttonäytteistä mitattiin sähkönjohtokyky (taulukko 24 ja kuva 42) ja pH (taulukko 25 ja kuva 43). Sähkönjohtavuus laski kaikissa näytteissä ajan myötä, ja se osoitti stabiloidusta massasta liuenneiden ionien määrän vähenemistä. Myös pH-arvo laski kaikissa näytteissä ajan myötä mutta oli selvästi emäksinen (pH > 10). Tämä osoittaa, että käytetyt sideaineet ja stabilointi neutraloivat tehokkaasti happoa tuottavan ruoppausmassan.

Taulukko 24. Liukoisuustestin uuttonäytteiden sähkönjohtokyky (mS/m) aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteille (R1-R9) ja tuhkakentälle.

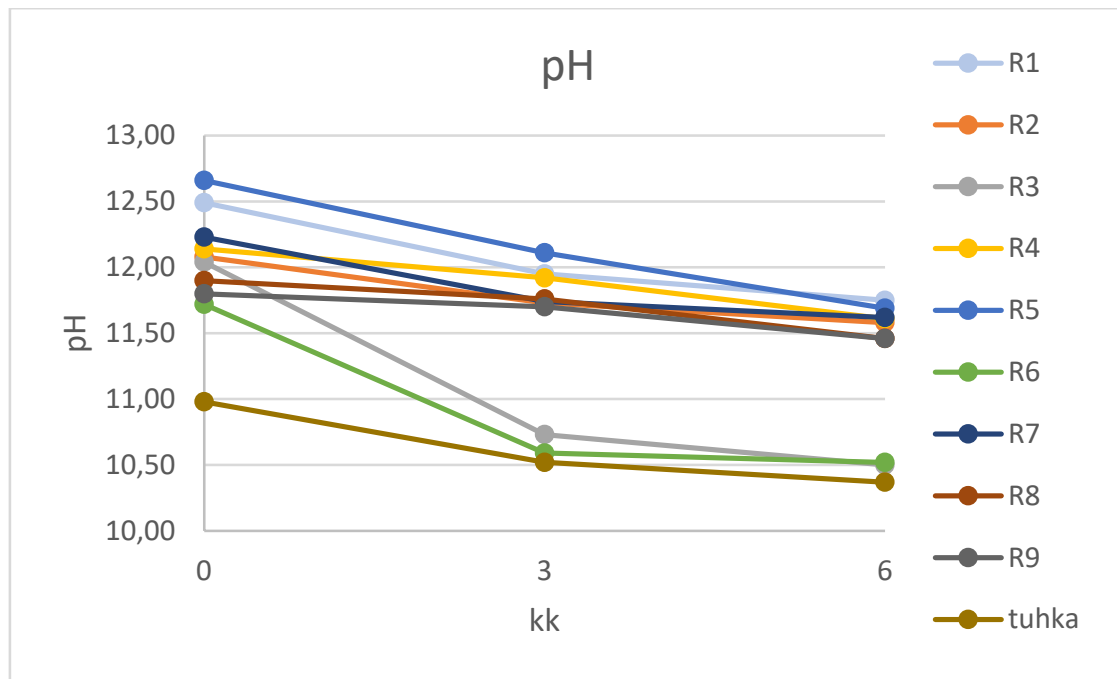
Aikapiste kk	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	777	325	307	367	810	208	311	219	228	194
3	263	214	154	337	326	136	210	216	198	288
6	197	170	119	247	216	79	206	162	160	138



Kuva 42. Liukoisuustestin uuttonäytteiden sähkönjohtokyky (mS/m) aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk.

Taulukko 25. Liukoisuustestin uuttonäytteiden pH-arvo aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteille (R1-R9) ja tuhkakentälle.

Aika-piste kk	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	12,49	12,08	12,04	12,14	12,66	11,72	12,23	11,9	11,80	10,98
3	11,95	11,73	10,73	11,92	12,11	10,59	11,74	11,76	11,70	10,52
6	11,75	11,58	10,5	11,61	11,69	10,52	11,62	11,46	11,46	10,37



Kuva 43. Liukoisuustestin uuttonäytteiden pH-arvo aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk.

Koeluontoista toimintaa koskevan päätöksen tarkkailumääräysten mukaisesti stabiloiduille näytteille tehtiin MARA-asetuksen (VNa 843/2017) liitteen 2 taulukon 1 mukaiset määritykset. Stabiloituista näytteistä uutetuista vesinäytteistä mitattiin Turun AMK:ssa 0, 3 ja 6 kk:n aikapisteissä seuraavat pitoisuudet: liukoinen orgaaninen hiili (DOC), anioneista sulfaatti ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), kloridi ( $\text{Cl}^-$ ) ja fosfaatti ( $\text{F}^-$ ) sekä metalleista seleeni (Se), elohopea (Hg), arseeni (As), sinkki (Zn), antimoni (Sb), kadmium (Cd), kupari (Cu), nikkeli (Ni), molybdeeni (Mo), lyijy (Pb), kromi (Cr), vanadiini (V) ja barium (Ba).

Taulukossa 26 on esitetty eri resepteillä stabiloiduista näytteistä ja tuhkakentästä Turun AMK:ssa aikapisteissä 0, 3 ja 9 kk määritetyt liuenneen orgaanisen hiilen (DOC), fluoridin, kloridin ja sulfaatin kumulatiiviset liukoisuudet. Aikapisteen 6 kk

reseptien R3, R4, R5 ja R9 näytteiden liukoisuustestit teetettiin lisäksi ulkopuolisessa akkreditoidussa laboratorioissa. MARA-asetuksen mukaan päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus liuenneelle orgaaniselle hiillelle (DOC) on 500 mg/kg. Tämä arvo ei ylittynyt yhdessäkään tutkitussa näytteessä. Matalahden koetoiminta-alueen fluoridin, kloridin ja sulfaatin pitoisuuksia ei ole verrattu MARA-asetuksen raja-arvoihin, koska asetuksen liitteen 2 taulukossa 1 on todettu, että kloridille, sulfaatille ja fluoridille asetettuja raja-arvoja ei sovelleta rakenteeseen, joka täyttää kaikki seuraavat edellytykset: sijaitsee enintään 500 m:n etäisyydellä merestä, rakenteen läpi suotautuvan veden purkautumissuunta on mereen sekä rakenteen ja meren välillä ei ole talousvedenottoon käytettäviä kaivoja.

Taulukko 26. Liuenneen orgaanisen hiilen (DOC), fluoridin, kloridin ja sulfaatin liukoisuus (mg/kg) eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1–R9) ja tuhkakentällä (tuhka+rm) aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk (Turku AMK). Aikapisteen 6 kk resepteillä R3, R4, R5 ja R9 stabiloitujen näytteiden liukoisuustestit teetettiin lisäksi ulkopuolisessa akkreditoitussa laboratorioissa (Eurofins Labtium Oy).

	Kumulatiivinen liukoisuus, mg/kg										
<b>0 kk määrittäysraja</b>		<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>	<b>R7</b>	<b>R8</b>	<b>R9</b>	<b>tuhka+rm</b>
	DOC	120	60	76	251	68	148	97	135	140	64
20 mg/kg	fluoridi	< 20	1 820	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
20 mg/kg	kloridi	370	2 300	1 260	1 770	800	1 180	1 300	940	1 710	760
20 mg/kg	sulfaatti	< 20	2 520	1 590	4 570	< 20	1 610	410	930	1 110	7 190
<b>3 kk määrittäysraja</b>		<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>	<b>R7</b>	<b>R8</b>	<b>R9</b>	<b>tuhka+rm</b>
	DOC	6	230	180	100	482	238	211	344	178	55
20 mg/kg	fluoridi	< 20	< 20	< 20	< 20	40	< 20	40	< 20	< 20	< 20
20 mg/kg	kloridi	890	1 790	2 000	2 720	1 650	1 530	1 230	1 560	2 490	2 610
20 mg/kg	sulfaatti	1 240	1 680	6 800	9 900	2 340	1 840	1 220	7 880	1 890	21 500
<b>6 kk määrittäysraja</b>		<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>	<b>R6</b>	<b>R7</b>	<b>R8</b>	<b>R9</b>	<b>tuhka+rm</b>
	DOC	200	160	60	370	330	80	220	160	160	40
20 mg/kg	fluoridi	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
20 mg/kg	kloridi	860	1 060	1 960	1 890	1 370	830	1 630	1 300	1 800	1 890
20 mg/kg	sulfaatti	560	1 180	4 550	6 650	880	5 770	2 060	1 730	1 230	8 750
<b>6 kk/ Labtium määrittäysraja</b>				<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>				<b>R9</b>	
1 mg/kg	DOC			88	491	393				183	
0,1 mg/kg	fluoridi			4	7	17				12	
1 mg/kg	kloridi			2 418	2 376	1 954				2 064	
1 mg/kg	sulfaatti			7 396	9 962	2 554				2 657	

Taulukossa 27 ja kuvissa 44–56 on esitetty eri resepteillä stabiloiduista näytteistä (R1–R9) ja tuhkakentästä (tuhka) Turun AMK:lla aikapisteissä 0, 3 ja 9 kk määritetyt liukoisuudet (Sb, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Mo, Ni, V, Zn ja Se). Ravistelutestien suodosvesien elohopeamääritys määritettiin ulkopuolisessa akkreditoitussa laboratorioissa. Aikapisteen

6 kk reseptien R3, R4, R5 ja R9 näytteiden liukoisuustestit teetettiin lisäksi ulkopuolisessa akkreditoitussa laboratorioissa. Mitattuja liukoisuuksia on taulukossa ja kuvissa verrattu MARA-asetuksen raja-arvoihin, jotka on annettu päällystetyille kentälle, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1).



Taulukko 27. Haitta-aineiden liukoisuudet (mg/kg) aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka) (Turku AMK). Käytettyjen mittauslaitteiden detektorajan alittavat arvot on merkitty “<” -merkillä. Tyhjäksi jätettyjä määrittämiä ei tehty pienen näytetilavuuden takia. Ne aikapisteen 6 kk reseptien R3, R4, R5 ja R9 tulokset, jotka ovat Eurofins Labtium Oy:n määrittämiä, on merkitty taulukkoon harmaalla. Kaikki elohopeamääritykset on tehty ulkopuolisessa laboratorioissa (Eurofins Ahma Oy). Taulukkoon on merkitty punaisella ne liukoisuudet, jotka ylittävät päällystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurimman sallitun liukoisuuden (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1).

**Kumulatiivinen liukoisuus**

Se	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,06
3	0,09	< 0,06	< 0,06		< 0,06	0,1	< 0,06	0,09	< 0,06	< 0,06
6	< 0,06	0,1	0,1	0,1	< 0,06	0,1	0,1	0,1	< 0,06	0,1

Hg	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
3	< 0,01	< 0,01	< 0,01		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
6	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01

As	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
3	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
6	0,1	0,1	0,1	0,1	< 0,06	0,1	0,053	0,051	< 0,05	0,1

Zn	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
6	< 0,5	< 0,5	< 0,6	< 0,6	< 0,7	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,6	< 0,5

Sb	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
6	< 0,5	< 0,5	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,05	< 0,5

Cd	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
3	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
6	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,02	< 0,05

Cu	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	0,5	0,5	< 0,5	1,8	< 0,5	0,9	0,8	0,8	0,6	< 0,5
3	2,6	1,6	0,5	3,6	5,0	1,4	1,7	1,5	2,1	0,7
6	2,2	1,8	0,4	5,6	7,2	0,9	2,2	1,8	3,1	< 0,5

## Taulukko 27. Jatkuu

## Kumulatiivinen liukoisuus

Ni	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
3	0,9	< 0,5	< 0,5	0,8	0,5	0,6	1,0	< 0,5	< 0,5	< 0,5
6	0,8	< 0,5	< 0,07	1	0,8	< 0,5	0,8	0,6	0,6	< 0,5

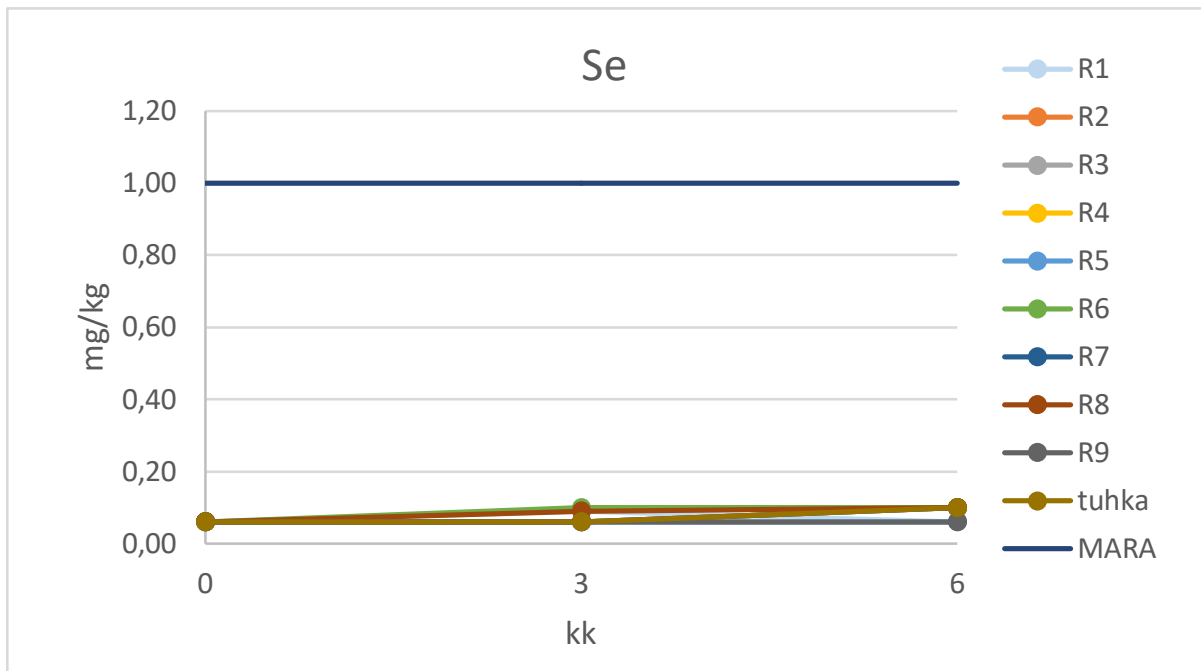
Mo	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	0,5	1,2	2,0	1,0	< 0,5	1,1	1,2	1,2	1,0	1,0
3	1,6	0,7	0,9	0,6	0,9	0,8	1,3	0,8	0,7	2,4
6	1,2	1,3	2,4	2,1	2,7	0,7	1,4	1,1	1,5	1,3

Pb	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,7
3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
6	< 0,5	< 0,5	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,05	< 0,5

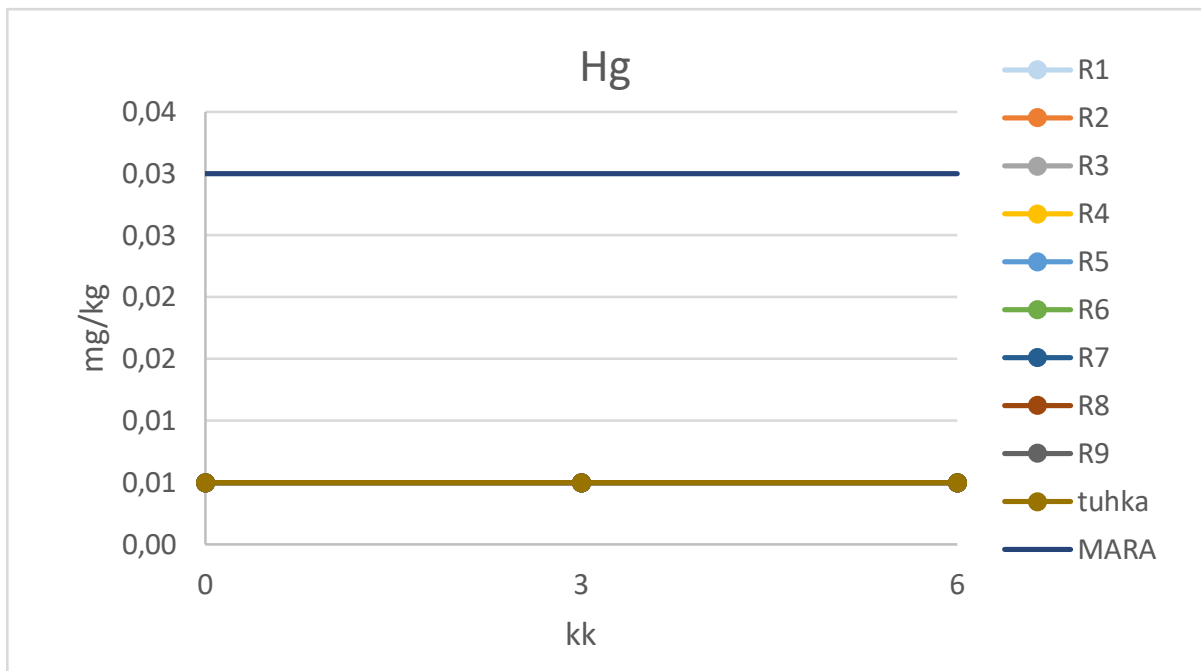
Cr	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
6	< 0,5	< 0,5	0,1	0,1	0,3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,1	< 0,5

V	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	< 0,5	< 0,5	< 0,5	2,6	< 0,5	1,1	< 0,5	1,8	0,8	0,7
3	1,9	1,3	6,8	4,5	3,0	1,7	2,1	0,6	0,9	< 0,5
6	0,581	2,188	0,6	5,8	0,5	3,3	2,4	3,0	1,1	0,745

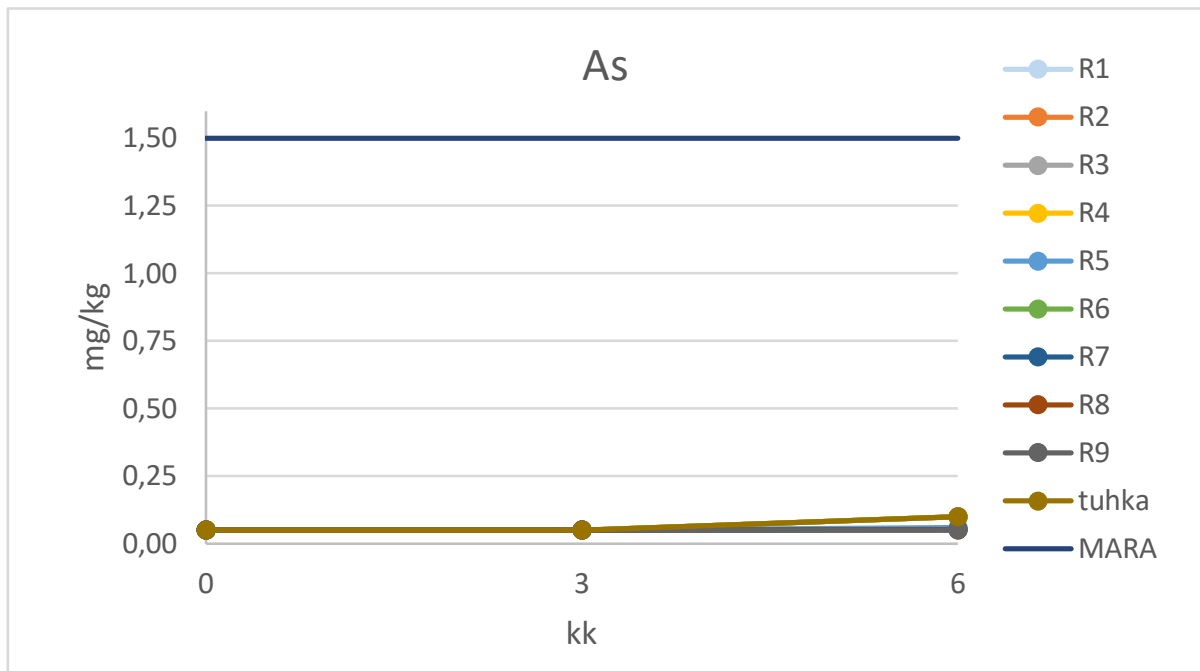
Ba	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	tuhka
0	1,1	< 0,5	< 0,5	< 0,5	1,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
3	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
6	0,6	0,9	0,8	0,4	0,6	< 0,5	0,6	0,7	1	1,7



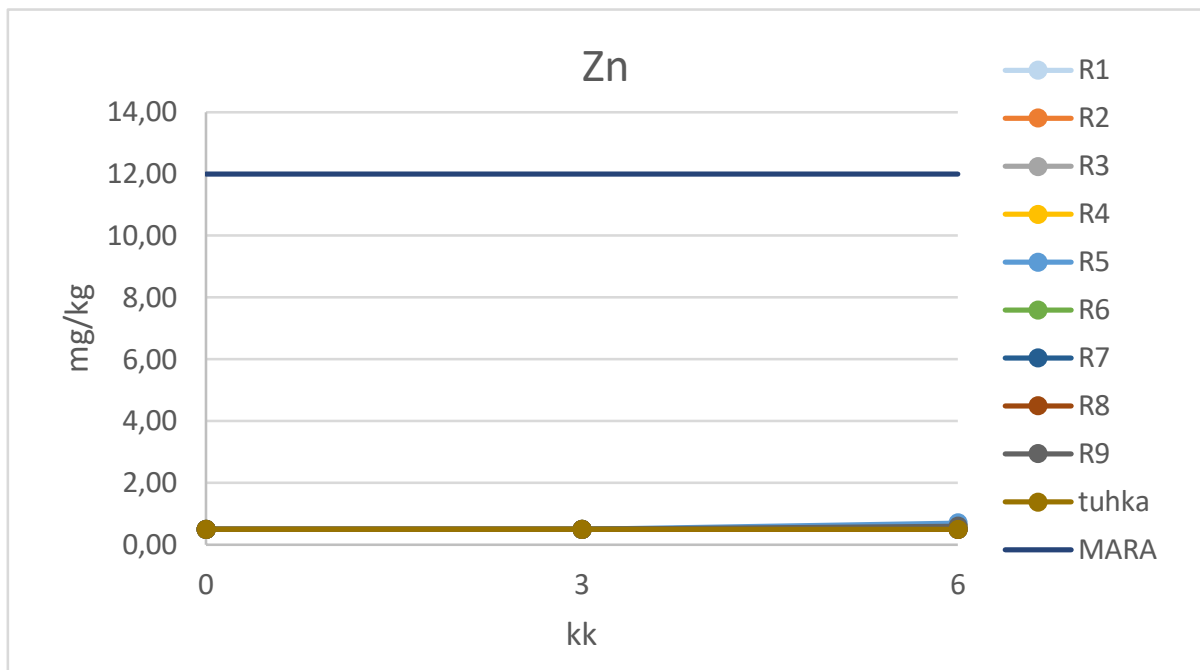
Kuva 44. Selenin (Se) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusallalla (tuhka). Suurin osa mitatuista pitoisuuksista oli alle käytetyn analyysimenetelmän määrittäysrajan 0,06 mg/kg. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus selenille on 1 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



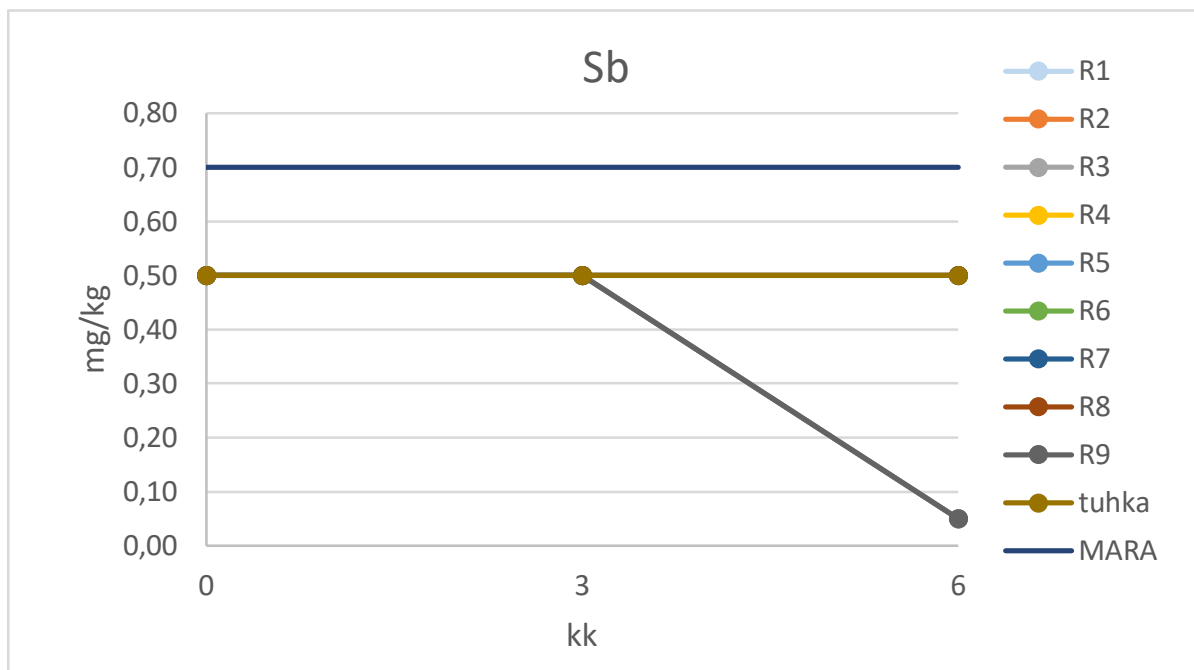
Kuva 45. Elohopean (Hg) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusallalla (tuhka). Kaikki mitatut pitoisuudet olivat alle käytetyn analyysimenetelmän määrittäysrajan 0,01 mg/kg. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus elohopealle on 0,03 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



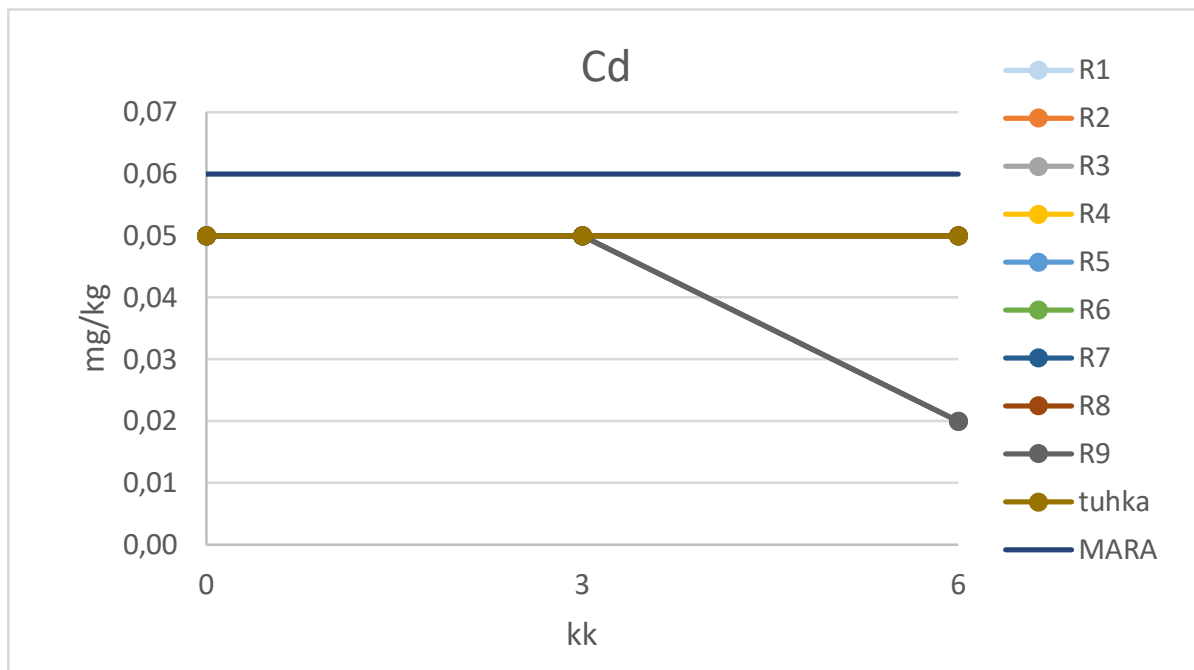
Kuva 46. Arseenin (As) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Suurin osa mitatuista pitoisuuksista oli alle käytetyn analyysimenetelmän määrittämissä rajoissa 0,05 mg/kg tai 0,06 mg/kg. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus arseenille on 1,5 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



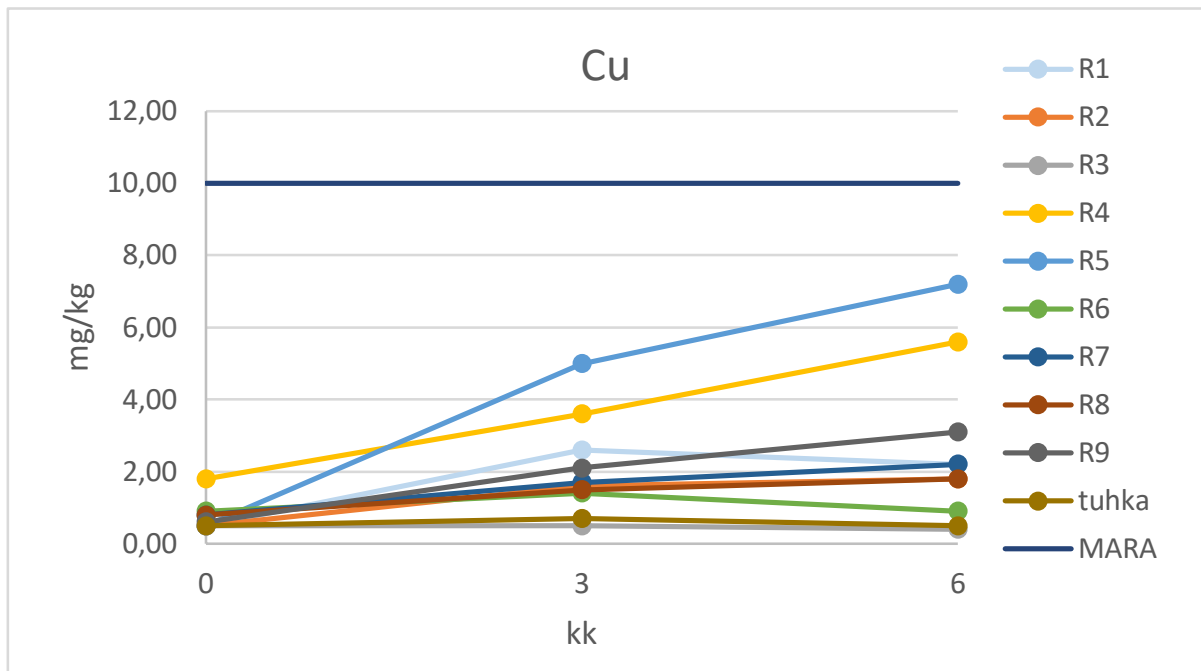
Kuva 47. Sinkin (Zn) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Kaikki mitatut pitoisuudet olivat alle käytetyn analyysimenetelmän määrittämissä rajoissa 0,5 mg/kg, 0,6 mg/kg tai 0,7 mg/kg. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus sinkille on 12 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



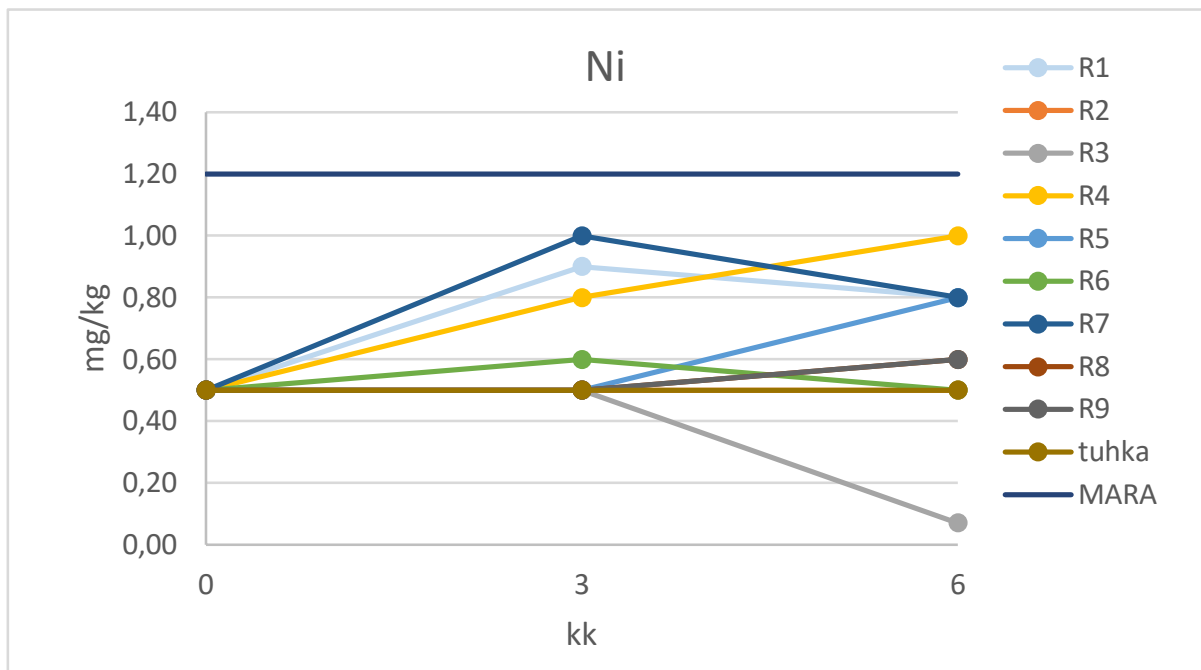
Kuva 48. Antimonin (Sb) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Kaikki mitatut pitoisuudet olivat alle käytetyn analyysimenetelmän määrittäysrajan 0,5 mg/kg tai 0,05 mg/kg. Päällystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus antimonille on 0,7 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



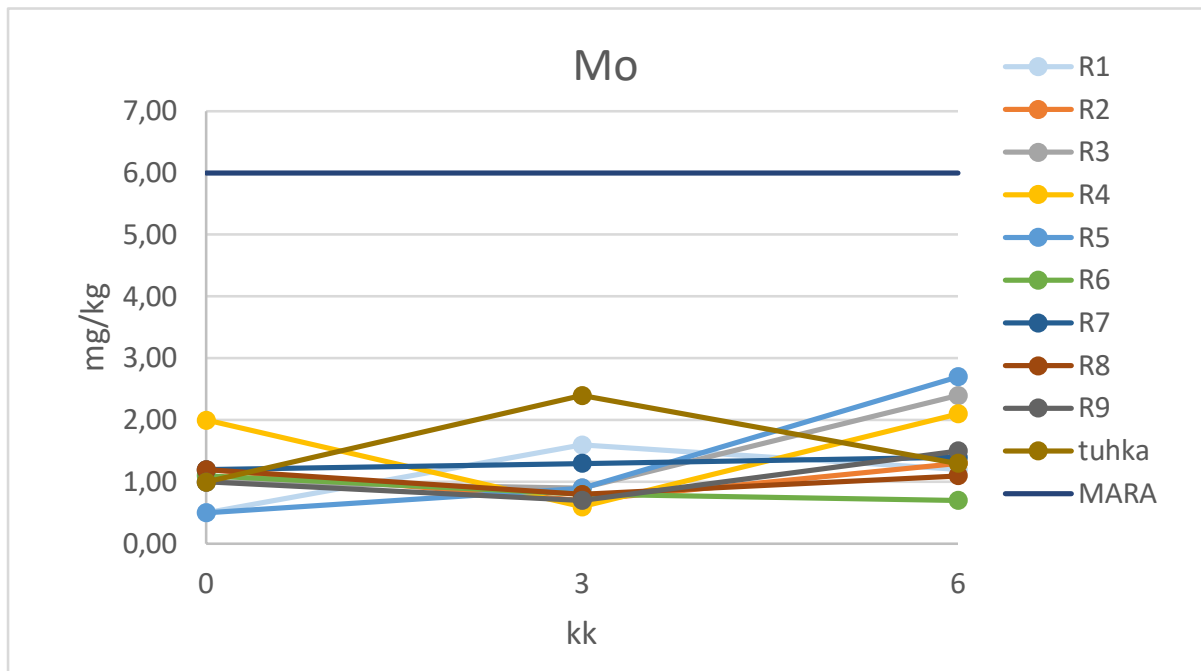
Kuva 49. Kadmiumin (Cd) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Kaikki mitatut pitoisuudet olivat alle käytetyn analyysimenetelmän määrittäysrajan 0,05 mg/kg tai 0,02 mg/kg. Päällystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus kadmiumille on 0,06 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



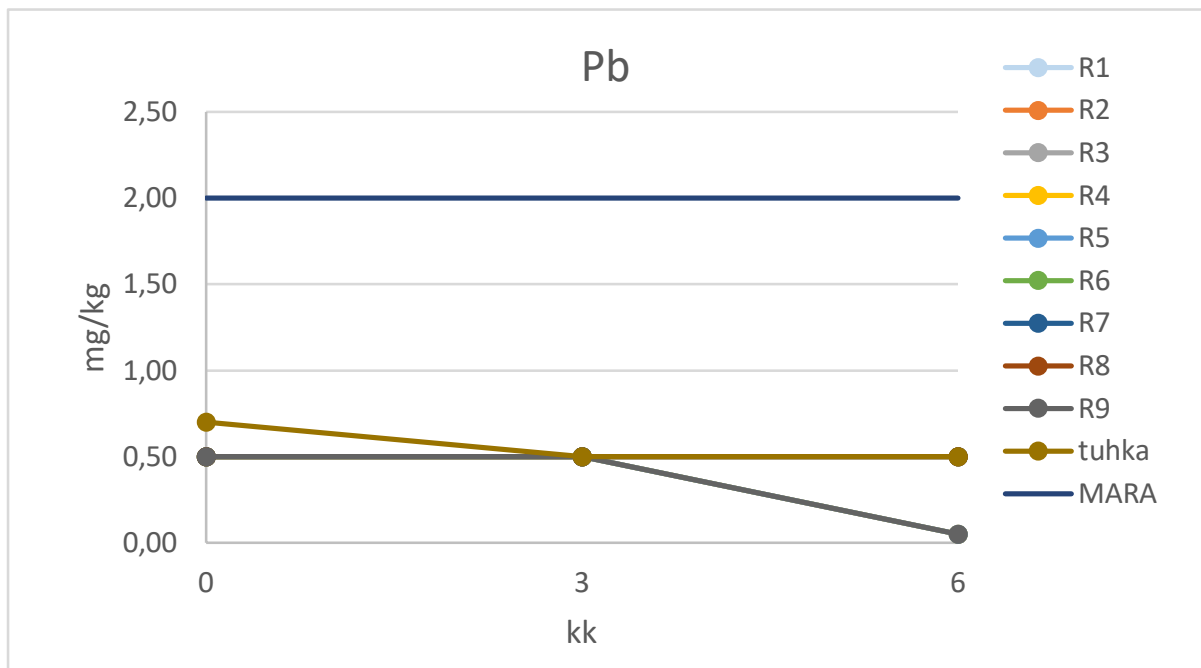
Kuva 50. Kuparin (Cu) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus kuparille on 10 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



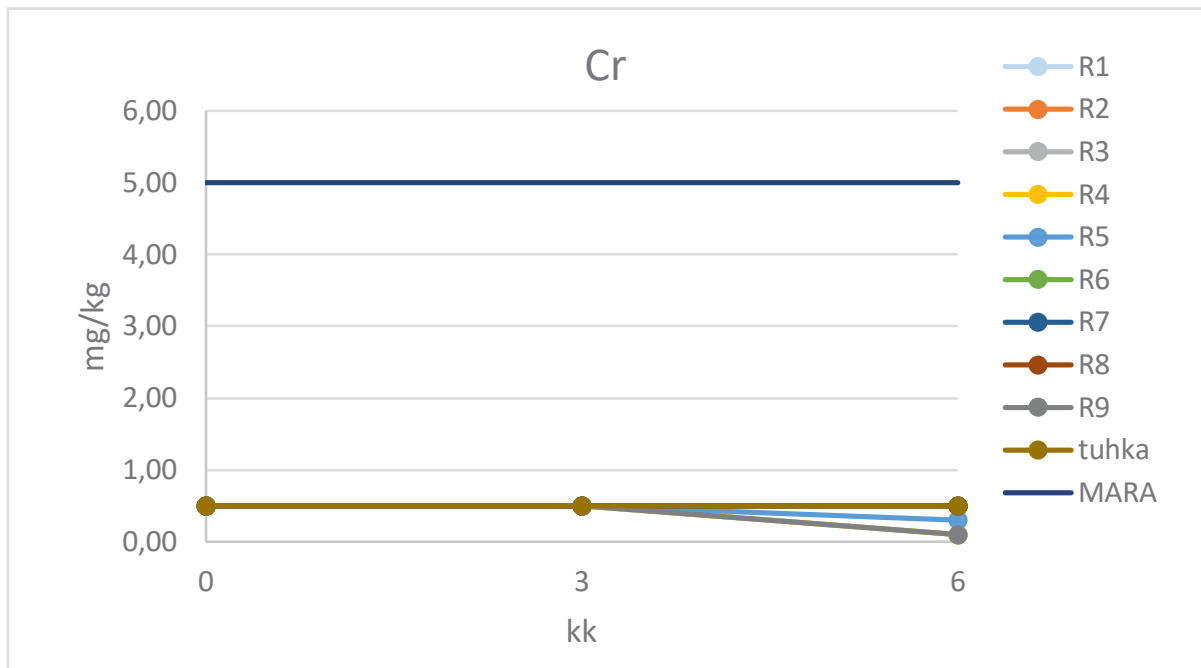
Kuva 51. Nikkelin (Ni) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Suurin osa mitatuista pitoisuuksista oli alle käytetyn analyysimenetelmän määrittämissä rajoissa 0,5 mg/kg tai 0,07 mg/kg. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus nikkelille on 1,2 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



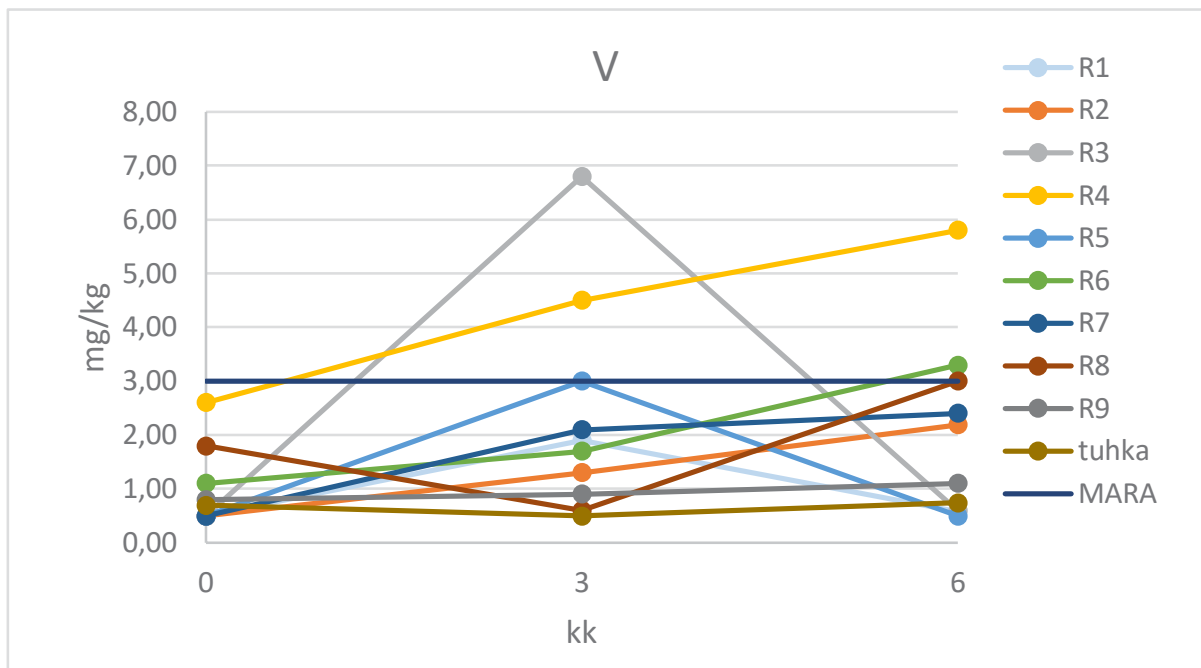
Kuva 52. Molybdeenin (Mo) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus molybdeenille on 6 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



Kuva 53. Lyijyn (Pb) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Kaikki mitatut pitoisuudet tuhkakentän 0 kk:n aikapisteen mittausta lukuun ottamatta olivat alle käytetyn analyysimenetelmän määrittäysrajan 0,5 mg/kg tai 0,05 mg/kg. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus lyijylle on 2 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).

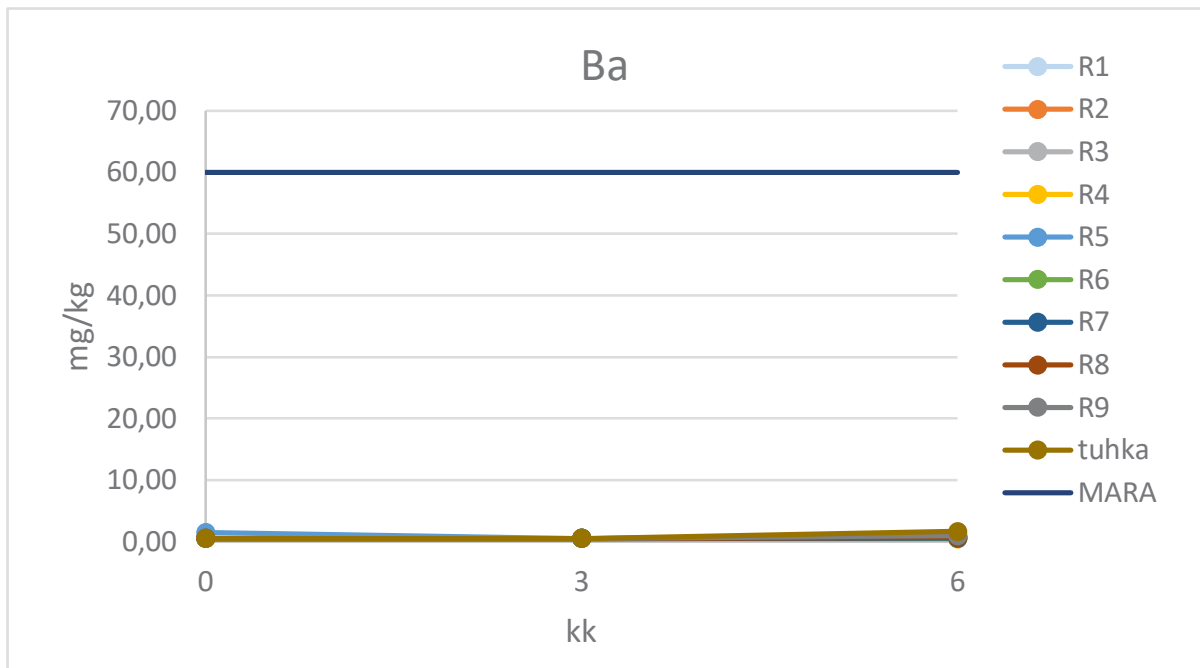


Kuva 54. Kromin (Cr) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Suurin osa mitatuista pitoisuuksista oli alle käytetyn analyysimenetelmän määrittämissä rajoissa 0,5 mg/kg tai 0,1 mg/kg. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus kromille on 5 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).



Kuva 55. Vanadiinin (V) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1-R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus vanadiinille on 3 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).





Kuva 56. Bariumin (Ba) liukoisuus aikapisteissä 0, 3 ja 6 kk eri resepteillä stabiloiduissa näytteissä (R1–R9) sekä laajennusalalla (tuhka). Suurin osa mitatuista pitoisuuksista oli alle käytetyn analyysimenetelmän määrittämisen raja-arvon 0,5 mg/kg. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu liukoisuus bariumille on 60 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1) (MARA).

Vanadiinia lukuun ottamatta kaikkien mitattujen aineiden liukoisuudet olivat pieniä kaikissa aikapisteissä ja alle MARA-asetuksessa päälystetyille kentälle, jonka jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, asetetun suurimman sallitun liukoisuuden. Vanadiinin liukoisuus ylitti tämän raja-arvon resepteillä 3, 4, 5 ja 7 stabiloiduissa näytteissä. Resepteillä 3 ja 5 vanadiinin liukoisuus oli kuitenkin pienentynyt 6 kk:n aikapisteessä eikä liukoista vanadiinia enää havaittu yli MARA-asetuksen raja-arvon. Vanadiinia havaittiin vain osalla resepteillä stabiloiduissa näytteissä, ja ruoppausmassan sisältämän vanadiinin kokonaispitoisuus sekä vanadii-

nin liukoisuus eivät olleet suuria. Stabiloiduista näytteistä ravistelutestissä havaitut liukoiset vanadiinin pitoisuudet eivät siis johtune ruoppausmassasta vaan käytetyistä sideaineista.

Koetoimintapäätöksen mukaisesti analysoitiin myös eri reseptein stabiloitujen näytteiden PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus. Analyysit teetettiin Eurofins Environment Testing Finland Oy:n laboratoriossa. PAH-yhdisteiden summapitoisuus on esitetty taulukossa 28. Laboratorion testausseleste, jossa näkyvät myös yksittäisten yhdisteiden mitatut pitoisuudet, on liitteessä 10.

Taulukko 28. Eri reseptein (R1–R9) stabiloitujen näytteiden ja tuhkakentän (tuhka+rm) PAH-yhdisteiden summapitoisuus (mg/kg) sisältäen 16 yhdistettä\*. Päälystetyn kentän, jonka sisältämän jätteen kerrospaksuus on  $\leq 1,5$  metriä, suurin sallittu PAH-yhdisteiden summapitoisuus on 30 mg/kg (VNa 843/2017, liite 2, taulukko 1).

PAH EPA 16 yhdisteet summapitoisuus	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	Tuhka+rm
mg/kg ka	< 0,10	< 0,10	1,4	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,15

\*Asenaftteeni, Asenaftyleeni, Antraseeni, Bentso(a)antraseeni, Bentso(b/j)fluoranteeni, Bentso(k)fluoranteeni, Bentso(a)pyreeni, Bentso(g,h,i)peryleeni, Dibentso(a,h)antraseeni, Fenantreeni, Fluoreeni, Fluoranteeni, Kryseeni, Indeno(1,2,3-cd)pyreeni, Naftaleeni ja Pyreeni

## 8 MAA- JA VESINÄYTTEIDEN MAASTOMITTAUKSET

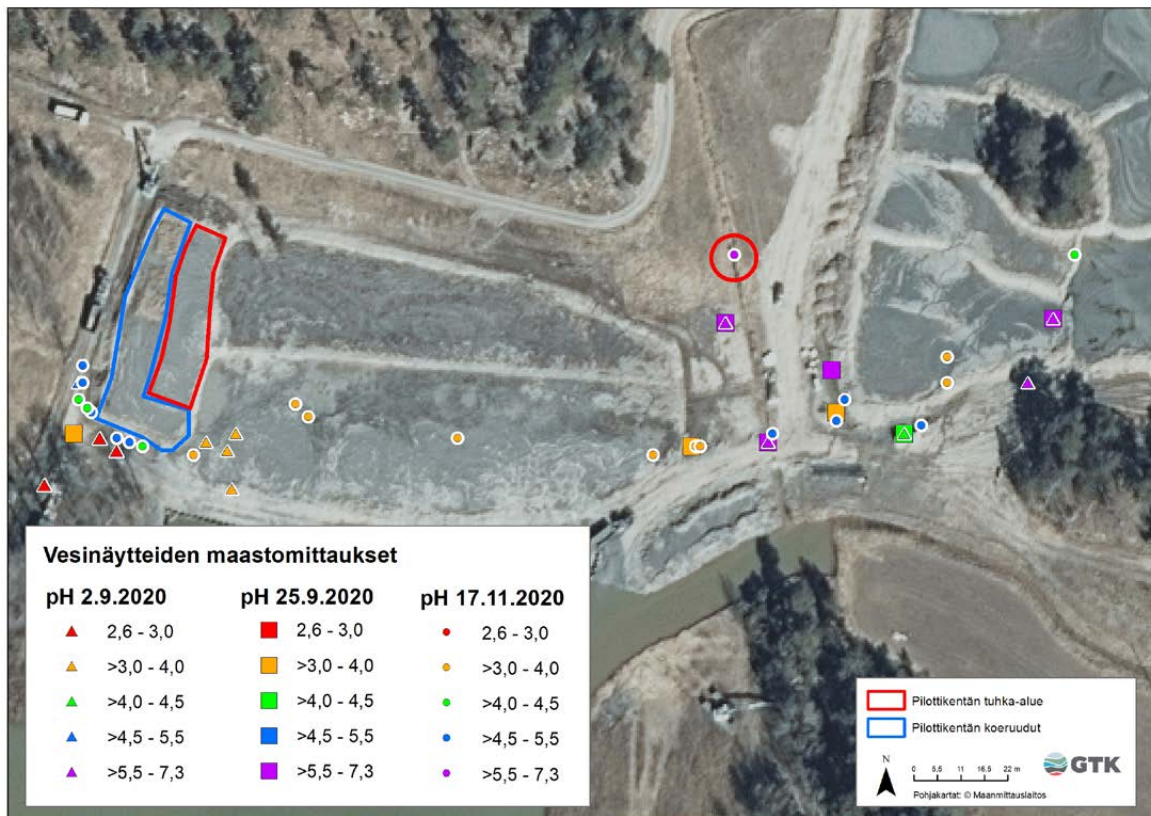
Matalahden pilottikohteella ja tämän viereisellä ruoppausmassojen läjitysalueella tehtiin maastotutkimuksia kolmena eri ajankohtana syksyllä 2020 (2.9., 25.9. ja 17.11.). Tutkimuksiin kuuluivat pintavesien pH-, sähkönjohtavuus- ja sulfaattipitoisuusmittaukset sekä maanäytteiden pH-mittaukset. Mittausten perusteella arvioitiin pilottikohteen koeruutujen sekä ympäröivien läjitysalden ikäänntymisen vaikutusta maaperään ja valumavesiin. Käsittelemättömän ruoppausmassan tiedettiin edeltävien laboratoriokokeiden perusteella

happamoituvan voimakkaasti kuivnessaan ja hapettuessaan. Happamoitumisen syynä on ruoppausmassan korkea sulfidirikipitoisuus ja rikkihapon muodostuminen siihen hapekkaissa olosuhteissa. Maaperässä muodostunut happamuus liuottaa tyypillisesti maaperästä metalleja, jotka huuhtoutuvat ja kulkeutuvat valumavesiin. Lisäksi laboratoriokokeissa havaittiin, että massoihin muodostui hapettumisen myötä paljon sulfaattia, joka kulkeutuu helposti vesistöihin mutta toisaalta myös lisää maaperän korroosio-ominaisuuksia.

### 8.1 Pintavesien pH- ja sähkönjohtavuusmittaukset

Pintavesien pH- ja sähkönjohtavuusmittauksia tehtiin erityisesti pilottikohteen koeruutujen etelä- ja länsireunalla olevasta ojasta (kuvat 57 ja 60), johon pääosa koeruuduilta tulevasta vedestä valuu. Ojaa ei ole eristetty muilta valumavesiltä eikä ruoppausmassojen alapuolelta suotautuvilta vesiltä. Oja on kaitvettu osin ruoppausmassojen alapuoliseen vanhaan peltomaahan, ja vettä saattaa suotautua ojaan myös näistä maakerroksista. Koeruutujen viereisen ojan lisäksi mittauksia tehtiin läjitysalden ympäröivistä

ojista, vesilammikoista ja vedellä täyttyneistä kuivumisraoista läjitettyjen ruoppausmassojen päältä. Ruoppausmassojen päältä pH- ja sähkönjohtavuusarvoja päästiin mittaamaan vain 17.11.2020, jolloin lammikoihin ja kuivumisraokoihin oli sateiden myötä kertynyt vettä (kuvat 58 ja 59). Yksi mittauspiste valittiin vertailupisteeksi, jonka olosuhteisiin ja valumavesiin maalle läjitetyt ruoppausmassat eivät vaikuta. Vesien pH-mittauksia tehtiin yhteensä 48 kpl ja sähkönjohtavuusmittauksia yhteensä 38 kpl.



Kuva 57. Vesinäytteiden kentällä mitatut pH-arvot. Vertailupiste, jonka olosuhteisiin ja valumavesiin maalle läjitetyt ruoppausmassat eivät vaikuta, on ympyröity kuvaan punaisella. Ilmakuva © Maanmittauslaitos.



Kuva 58. Kuivuneeseen ruoppausmassaan syntyneitä kuivumisrakoja (2.9.2020) (vasemmalla) ja sateiden myötä veden alle joutunutta ruoppausmassaa (17.11.2020) (oikealla).

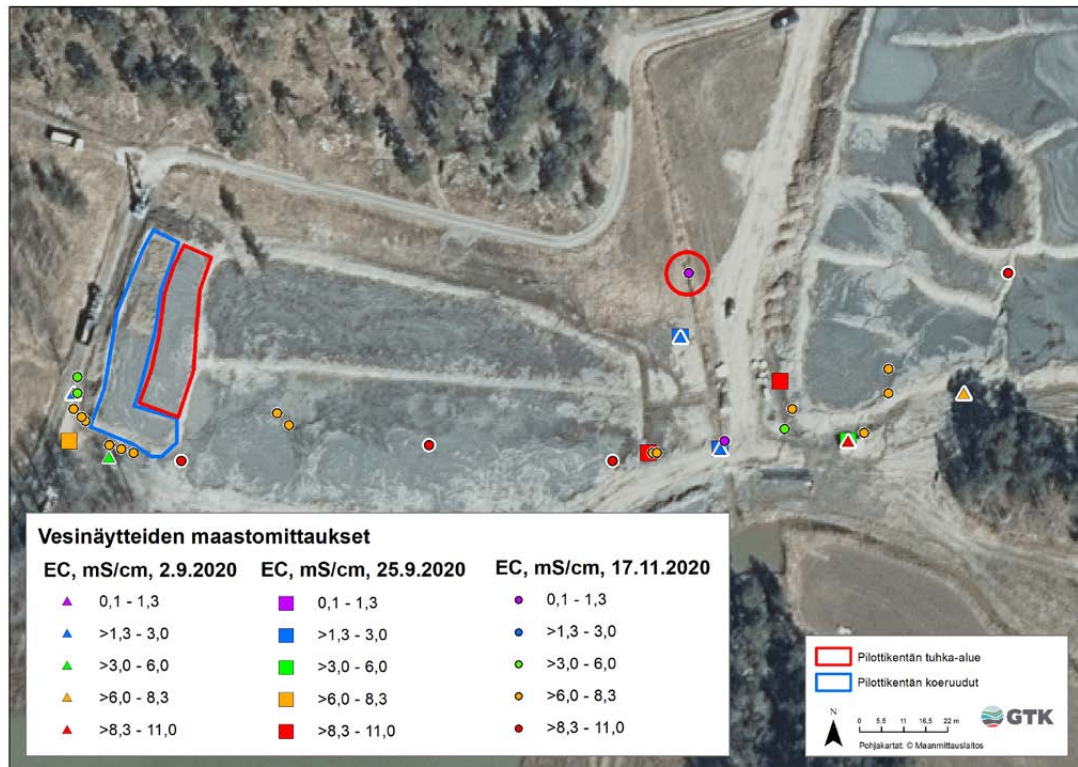


Kuva 59. Alkusyöksystä ruoppausmassa oli kuivunut ja se rakoili voimakkaasti (2.9.2020) (vasemmalla). Syysateiden myötä vesi pidättyi ja lammikoitui ruoppausmassan päälle (17.11.2020) (oikealla).

Vesi oli monin paikoin hyvin hapanta (pH-arvot 2,6–3,6), erityisesti ensimmäisellä mittauskerralla 2.9.2020 (kuva 57). Pienimmät mitatut pH-arvot (pH < 3) mitattiin pilottikohteen eteläreunalla olevan ojan vedestä. Yleisesti vedet olivat happamia (pH-arvot alle 4) eri puolilla koko läjitysalueutta. Viimeisellä mittauskerralla 17.11.2020 ojavesien pH-arvot olivat suuremmat kuin aiemmilla kerroilla. Myös pilottikohteen viereisen ojan vedessä mitatut pH-arvot olivat nousseet yli neljän. Pilottialueen ulkopuolisten vesilätäköiden ja kuivumisrakojen vedet olivat kuitenkin 17.11.2020 hyvin happamia (pH alle 4). Läjitysalden ulkopuolisesta vertai-

lupisteestä vesinäytteen pH-arvo mitattiin vain kerran, 17.11.2020. Vertailupisteen vesi oli lievästi emäksistä (pH-arvo 7,3).

Sähkönjohtavuusarvot vesissä olivat vertailupisteen vettä lukuun ottamatta yleisesti hyvin suuria ja vaihtelivat 1,0 mS/cm (100 mS/m) ja 12,4 mS/cm (1 240 mS/m) välillä (kuva 60). Vertailupisteessä veden sähkönjohtavuusarvo oli 0,12 mS/cm (12 mS/m). Happamien sulfaattimaiden valumavesissä sähkönjohtavuusarvojen on todettu olevan usein yli 0,2 mS/cm (20 mS/m). Erityisesti merestä ruopatuissa massoissa kuitenkin myös meriveden suolat nostavat sähkönjohtavuusarvoja huomattavasti.



Kuva 60. Vesinäytteiden sähkönjohtavuusarvot. Vertailupiste, jonka olosuhteisiin ja valumavesiin maalle läjitetyt ruoppausmassat eivät vaikuta, on ympyröity kuvaan punaisella. Ilmakuva © Maanmittauslaitos.

## 8.2 Pintavesien sulfaattipitoisuus

Vesinäytteiden liukoisia sulfaattipitoisuuksia mitattiin kenttäanalysaattorilla ensimmäisellä maastotutkimuskäynnillä 2.9.2020 kahdesta pisteestä ja 17.11.2020 yhteensä yhdeksästä pisteestä (kuva 62). Analyysijä varten vesinäytteet suodatettiin 0,45 µm:n suodattimella. Sulfaatti saostettiin näytteistä bariumkloridilla ja analysoitiin fotometrisesti (kuva 61). Vesinäytteitä jouduttiin laimentamaan runsaasti analysaattorin määrittäysrajan vuoksi, ja laimennukset puutteellisilla välineillä maasto-olosuhteissa lisäsivät analyysin virhemarginaalia. Tuloksia voidaan siten pitää vain suuntaa antavina. Näytteenotokerralla 17.11.2020 otetuista näytteistä sulfaattipitoisuudet analysoitiin kuitenkin myös IC:llä laboratorio-olosuhteissa. Mitatut sulfaattipitoisuudet on esitetty kuvassa 62 ja taulukossa 33.

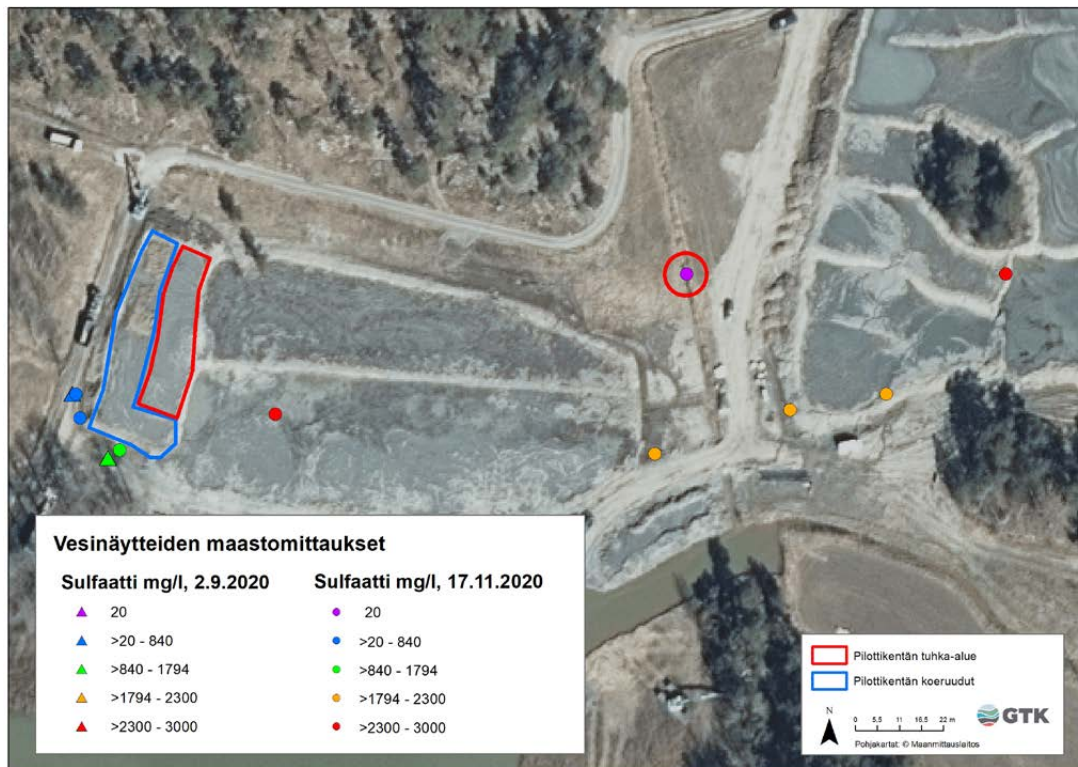
Analysoitujen näytteiden sulfaattipitoisuudet olivat suuria lukuun ottamatta vertailupisteen näytettä, jossa sulfaattipitoisuus oli 20 mg/l. Pilottikentän länsipuolen näytepisteillä sulfaattipitoisuudet olivat 110–840 mg/l ja eteläpuolen pisteillä 999 mg/l ja 1 794 mg/l välillä (kuva 62). Suurimmat pitoisuudet (2 300–3 000 mg/l) mitattiin käsittelemättömien ruoppausmassa-altaiden pinnalla olevien lätäköiden vedestä. Myös käsittele-



Kuva 61. Maastokäyttöinen sulfaattianalysaattori.

mättömien ruoppausmassa-aldaiden ympärillä olevissa ojissa sulfaattipitoisuudet olivat hyvin suuria. Analysoidut sulfaattipitoisuudet ovat varsin suuria, sillä esimerkiksi Väyläviraston korroosiotutkimusohjelmassa (Liikennevirasto 2017) ympäristön aggressiivisuutta määritettäessä pohja- ja maavedelle käytetään sulfaattipitoisuudelle raja-arvoa 250 mg/l.

musohjelmassa (Liikennevirasto 2017) ympäristön aggressiivisuutta määritettäessä pohja- ja maavedelle käytetään sulfaattipitoisuudelle raja-arvoa 250 mg/l.

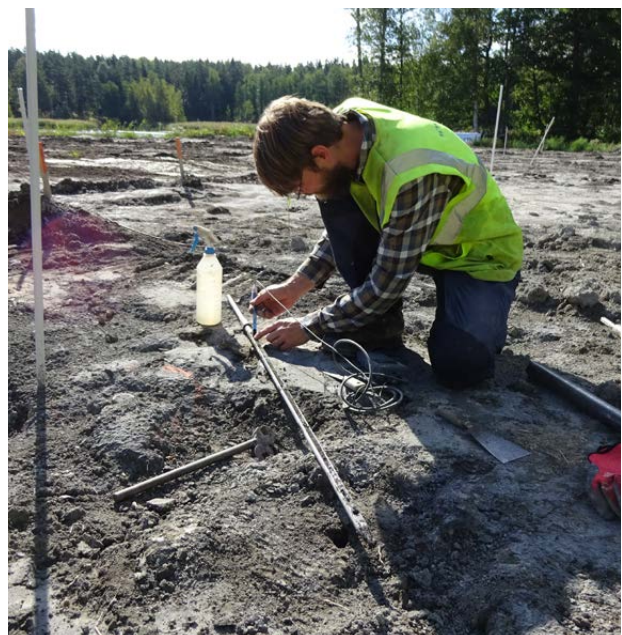


Kuva 62. Vesinäytteiden sulfaattipitoisuudet. Vertailupiste, jonka olosuhteisiin ja valumavesiin maalle läjitetyt ruoppausmassat eivät vaikuta, on ympäröity kuvaan punaisella. Ilmakuva © Maanmittauslaitos.

### 8.3 Maaperän ja koeruutujen pH-mittaukset

Maaperän happamuutta mitattiin pilottikohteen ruutujen, tuhkakentän ja käsittelemättömän ruoppausmassan pinnasta (noin 0–5 cm syvyydeltä) yhteensä 21 pisteessä ((kuvat 63 ja 64). Tämän lisäksi kairattiin kahden koeruudun pinnalta, käsittelemättömän ruoppausmassan pinnasta sekä massoja reunustavan vallin pinnalta yhteensä viisi, noin 200 cm syvää profiilia, joista mitattiin pH-arvot 10–20 cm:n välein.

Kaikkien koeruutujen pintakerroksen maa-aines oli hyvin emäksistä (pH-arvot 8–11) (taulukko 29). Myös tuhkakäsitellyn kentän pinta oli emäksinen (pH yli 8). Kahden koeruudun läpi kairatut profiilit osoittivat, että pH-arvot ovat hyvin suuria (pH yli 8) koko metrin paksuisessa stabiloidussa läjitysmassakerroksessa. Stabiloidun kerroksen alapuolella on vanhaa peltomaata, jonka pH-arvo on paikoin pieni (alimmillaan pH 4,2). Läjitysallasta reunustavassa maavallissa ei havaittu kairauksen yhteydessä aktiivista happamuutta.



Kuva 63. Käsikairalla otetusta maaperäprofiilista mitattiin maastossa pH-arvot.

Käsittelemättömien läjitysaltaiden pintakerroksen maa-aineksessa pH-arvot olivat kaikissa mittauksissa hyvin pieniä (pH < 4). Kairausten yhteydessä havaittiin myös pilottialueen viereisen läjitysalueen pintakerroksen maa-aineksen olevan hyvin hapanta (pH-arvot 3,2–3,8), mutta jo 5–20 cm:n syvyydeltä alkaen pH-arvot olivat yli 5.

Tämä osoittaa, että käsittelemättömän ruoppausmassakerroksen pinnasta varsin ohut kerros on hapettunut ja happamoitunut. Ruoppausmassaltaiden pintaan on kuitenkin muodostunut suuria kuivumisrakoja, joiden kautta hapettuminen ja happamoituminen pääsevät todennäköisesti jatkossa etenemään nopeammin.



Kuva 64. Maanäytteiden kentällä mitatut pH-arvot. Ilmakuva © Maanmittauslaitos.

Taulukko 29. Eri reseptien stabiloitujen koeruutujen kentällä 2.9.2020 mitatut pH-arvot.

Resepti	pH
1	11,9
2	11,8
3	12,0
4	11,9
5	12,3
6	11,8
7	12,0
8	11,9
9	11,8

#### 8.4 Yhteenveto kenttämittauksista

Sekä maa- että vesinäytteiden kenttämittausten perusteella voitiin havaita, että käsittelemättömät ruoppausmassat ovat alkaneet hapettua ja niissä on alkanut muodostua happamuutta, joka vaikuttaa alueen pintavesiin. Alueen vesiä voivat kuormittaa myös ruoppausmassojen alla olevat vanhan peltomaan rikki-pitoiset kerrokset, joiden vaikutus saattaa näkyä osassa ojavesiä, kuten pilottikohteen eteläreunalla olevassa ojassa. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan pystytty selkeästi osoittamaan happamuuden lähdettä kyseisessä ojassa. Vesien happamuuteen vaikuttavat myös sääolosuhteet. Runsaiden sateiden aikana ojissa saattaa näkyä pintavaluntana tulevan veden laimentava vaikutus.

Pidemmillä aikavälillä sateet kuitenkin huuhtovat maaperässä olevaa happamuutta ojaverkostoon.

Vesien suuret sähkönjohtavuusarvot alueella johtuvat korkeasta sulfaattipitoisuudesta (ja liuenneista metalleista) mutta myös meriveden suoloista, joita ruopatut massat sisältävät. Sähkönjohtavuuden perusteella ei siten voida suoraan arvioida sulfidi-peräistä happamoitumista.

Stabiloitujen massojen pH-arvot olivat yleisesti hyvin suuria, eivätkä ne siten muodosta samanlaista happamoitumisriskiä kuin käsittelemättömät massat. Lisäksi stabiloidut massat ovat rakenteeltaan niin tiiviitä, että niiden läpi ei juurikaan suotaudu vesiä.

### 9 VALUMA- JA HULEVESIEN ANALYSOINTI

Koetoimintaluvassa kenttäkokeen mahdollisia paikallisia ympäristövaikutuksia lähiympäristössä velvoitettiin tarkkailemaan pintavesinäytteisiin perustuen. Vesinäytteistä tuli päätöksen mukaan analysoida pH, sähkönjohtavuus, kiintoaine ja arseenin pitoisuus. Tarkkailua varten koekentän viereen rakennettiin hulevesikaivo. Tämä kaivo kokoaa vettä kolmesta eri suunnasta suotautuvasta vedestä. Lisäksi tarkkailuun otettiin mukaan koekentän länsipuolella kulkeva avo-oja. Elokuussa 2020 koekentän eteläpuolelle kaivettiin oja, joka liitettiin osaksi tarkkailua.

Syyskuussa 2020 GTK mittasi veden pH-arvoja kentällä koetoimintakenttää laajemmalta alueelta (ks. luku 8.1). Mittaukset osoittivat, että

vesi on hyvin hapanta (pH-arvot alle 3,0) laajalla alueella todennäköisesti peittämättömien, rikkipitoisten ruoppausmassojen hapettumisen vuoksi. Marraskuussa 2020 myös varsinainen vesinäytteenotto päätettiin ulottaa koetoimintakenttää laajemmalle alueelle (kuvat 65 ja 66). Näin pyrittiin selvittämään, mikä vaikutus koko alueelta syntyvillä valumavesillä on alueen hulevesien laatuun suhteessa koetoimintakentältä syntyviin valumavesiin. Kolmen tarkkailupisteen lisäksi alueelta valittiin kuusi näytepistettä laajempiin analyysihin (kuva 65). Lisäksi pH- ja sähkönjohtavuusarvoja mitattiin kentällä vielä muutaman lisäpisteen vedestä (kuva 67).



Kuva 65. Vesinäytepisteiden sijainti 17.11.2020. Näytepisteiden tunnukset: JAJA-2020-100 = allas/oja, JAJA-2020-101 = uusi oja, JAJA-2020-102 = (hulevesi)kaivo, JAJA-2020-103 = tausta, JAJA-2020-104 = peltoalue koekentän vieressä ja JAJA-2020-105 = kokoomaoja, JAJA-2020-106–JAJA-2020-108 = lisäpisteet. Ilmakuva © Maanmittauslaitos.



Kuva 66. Näytteenottoa 17.11.2020 hulevesikaivosta (näytepiste JAJA-2020-102 kuvassa 65) (vasemmalla) ja käsittelemättömän ruoppausmassan päällä olevasta vedestä (näytepiste JAJA-2020-107 kuvassa 65) (oikealla).

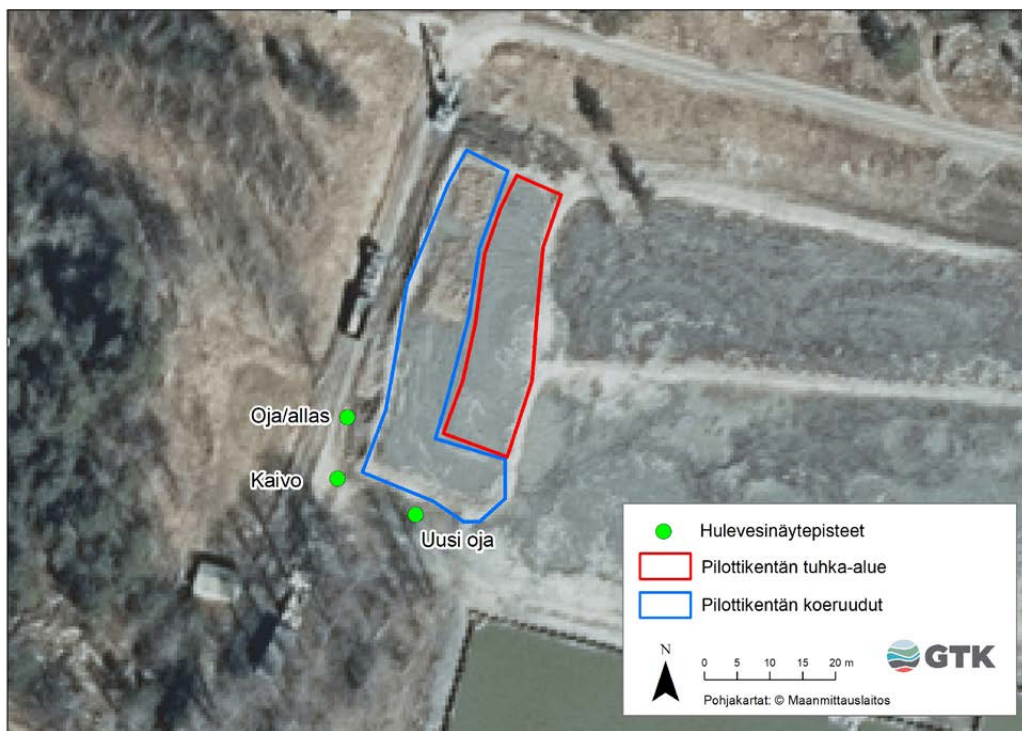




Kuva 67. Matalahden tutkimusalueen valuma- ja hulevesien kenttämittauksia (pH ja EC) 2.9.2020 ja 25.9.2020.

Koelalla ja sen laajennusalalla muodostuneesta sade- ja hulevedestä otettiin näytteet 0, 3 ja 6(7) kk:n aikapisteissä (kuva 68). Näytteistä analysoitiin koetointaluvan mukaisesti pH, sähkönjohtavuus, liuenneen arseenin pitoisuus ja kiintoaineksen määrä (vain 7 kk) Turun AMK:n laboratoriossa. Aikapisteen 7 kk vesinäytteille tehtiin laajempi analytiikka Eurofins Labtium Oy:n akkreditoidussa laboratoriossa Espoossa.

Turun AMK:n laboratoriossa arseenin pitoisuudet määritettiin suodatetusta näytteestä AAS:lla. pH ja sähkönjohtokyky määritettiin suodatetuista näytteistä välittömästi suodatuksen jälkeen. Eurofins Labtium Oy:n käyttämät analyysimenetelmät on selitetty jäljempänä tässä luvussa. Taulukoihin 30–32 on koottu eri aikapisteissä mitatut koetointaluvan mukaiset parametrit kuvaan 68 merkityissä kolmessa tarkkailupisteessä.



Kuva 68. Koetointaluvan mukaisesti tarkkailussa olleiden hulevesinäytenpisteiden sijainti koetointa-alueella. Ilmakuva © Maanmittauslaitos.

Taulukko 30. Koetoiminta-alueen länsipuolella olevaan ojaan kertyneestä sade- ja hulevedestä mitatut parametrit. Tutkimuspiste merkitty kuvaan 68 ”Oja/allas”.

Näytepaikka	Oja/allas 1 vko	Oja/allas 1 kk	Oja/allas 1,5 kk	Oja/allas 3 kk	Oja 7 kk (Labtium)
Ominaisuus					
As (mg/l)	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,0049
pH (kenttä)					4,99
pH (lab.)	5,71	6,15	5,2	3,95	3,2
EC (mS/m) (kenttä)					370
EC (mS/m) (lab.)	87 / 94	108,5	130,5	191	410
Kiintoaine (mg/l)					120

\* Kiintoaine on jäänyt mittaamatta aikapisteissä 0 ja 3 kk.

Taulukko 31. Koetoiminta-alueen eteläpuolelle toukokuussa 2020 rakennettuun hulevesikaivoon kertyneestä sade- ja hulevedestä mitatut parametrit. Tutkimuspiste merkitty kuvaan 68 ”Kaivo”.

Näytepaikka	Kaivo 1 kk	Kaivo 3 kk	Kaivo 7 kk (Labtium)
Ominaisuus			
As (mg/l)	< 0,005	< 0,005	0,0056
pH (kenttä)			4,50
pH (lab.)		2,70	3,1
EC (mS/m) (kenttä)			650
EC (mS/m) (lab.)		417	580
DOC (mg/l)			
Kiintoaine (mg/l)			170

Taulukko 32. Koetoiminta-alueen eteläpuolelle kesällä 2020 kaivettuun ojaan kertyneestä sade- ja hulevedestä mitatut parametrit. Tutkimuspiste merkitty kuvaan 68 ”Uusi oja”.

Näytepaikka	Uusi oja 7 kk (Labtium)
Ominaisuus	
As (mg/l)	0,0096
pH (kenttä)	4,59
pH (lab.)	3,4
EC (mS/m) (kenttä)	782
EC (mS/m) (lab.)	900
Kiintoaine (mg/l)	120

Marraskuussa 2020 toteutetussa laajemmassa selvityksessä tehtiin kenttämittauksia kolmen tarkkailupisteen lisäksi kuudesta muusta näytestä (kuva 65). Kaikista näytteistä mitattiin kentällä

pH- ja sähkönjohtavuusarvot sekä sulfaattipitoisuus. Taulukkoon 33 on koottu näytteistä tehtyjen kenttämittausten tulokset.

Taulukko 33. Hule- ja valumavesistä tehdyt kenttämittaukset marraskuussa 2020.

Näytetunnus	Selite	°C	pH	EC (mS/cm)	EC (mS/m)	O <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
JAJA-2020-100	Allas/oja	8,1	4,99	3,7	370	2,81	508
JAJA-2020-101	Uusi oja	8,6	4,59	7,82	782	4,48	1 794
JAJA-2020-102	Hulevesi(kaivo)	8,1	4,5	6,5	650	5,46	840
JAJA-2020-103	Tausta	8	7,3	0,115	11,5	11,5	20
JAJA-2020-104	Peltoalue	8,3	3,4	8,04	804	11,16	2 620
JAJA-2020-105	Kokoomaaja	8,2	3,7	8,2	820	12,2	2 100
JAJA-2020-106	Lisäpiste	8,1	4,0	7,1	710	-	2 300
JAJA-2020-107	Lisäpiste	8,1	4,1	9,5	950	-	3 000
JAJA-2020-108	Lisäpiste	8,2	5,1	8,1	810	-	2 100

Kuudesta näytepisteestä toimitettiin vesinäytteet ulkopuoliseen akkreditoituun laboratorioon analysoitavaksi. Näistä näytteistä analysoitiin alkuaineiden liukoiset ja kokonaispitoisuudet. Lisäksi näytteistä analysoitiin kokonaistyyppi ja -fosfori, PAH-yhdisteet, sulfaatin pitoisuus, asiditeetti sekä muita veden laatua ja mahdollista alkuperää kuvaavia parametrejä (sameus, kiintoaine, pH, EC, alkaliniteetti). Pääosa analyyseistä teetettiin Eurofins Labtiumin Espoon laboratoriossa. PAH-yhdisteet analysoitiin Eurofins Environment Testing Finland Oy:n laboratoriossa ja asiditeettimääritykset tehtiin GTK:n Kokkolan toimipisteessä. Liukoiset alkuainepitoisuudet on määritetty suodatetuista (< 0,45 µm) vesinäytteistä ICP-OES- ja ICP-MS-

tekniikoilla (SFS-EN ISO 11885, SFS-EN ISO 17294-2). Vesinäytteiden kokonaisalkuainepitoisuudet on määritetty typpihapolla 90 °C:ssa märkäpoltetuista näytteistä (SFS-EN ISO 15587-2) ICP-OES- ja ICP-MS-tekniikoilla. Bromidin, kloridin, nitraatin ja sulfaatin pitoisuudet on määritetty ionikromatografisesti käsittelemättömästä vesinäytteestä. Vesinäytteen pH ja johtokyky on mitattu potentiometrisesti (SFS 3021, SFS-EN 27888), alkaliteetti ja kaliumpermanganaattiluku on määritetty titrimetrisesti ja väriluku on määritetty komparatiivisesti. Taulukkoon 34 on koottu marraskuussa 2020 toteutetun laajemman näytteenoton tulokset. Laboratorion testausselostukset on esitetty liitteessä 11.

Taulukko 34. Kuuden tutkimuspisteen vesinäytteiden analyysituloksia ja vertailukohtana Suomen pienten latvapurojen veden alkuainepitoisuuksien mediaaniarvoja (Lahermo ym. 1996). Näytepisteiden tunnukset kuvan 65 kartassa: JAJA-2020-100 = allas/oja, 101 = uusi oja, 102 = (hulevesi)kaivo, 103 = tausta, 104 = peltoalue koekentän vieressä ja 105 = kokoomaaja. Suomen latvapuroista on määritetty vain alkuaineiden liukoiset pitoisuudet.

Näytepaikka		Allas 180 d	Oja 180 d	Kaivo 180 d	Tausta 180 d	Peltoalue 180 d	Kokooma- oja 180 d	Puro- vedet Suomi Md
Ominaisuus	Yksikkö							
Lämpötila (kenttä)	°C	8,1	8,6	8,1	8,0	8,3	8,2	
pH (kenttä)		4,99	4,59	4,50	7,32	3,4	3,7	
pH (lab.)		3,2	3,4	3,1	6,6	3,2	3,4	5,91
Johtokyky (kenttä)	mS/m	370	782	650	11,5	804	820	
Johtokyky (lab.)	mS/m 25°C	410	900	580	16	870	930	
Happi (O <sub>2</sub> )(kenttä)	mg/l	2,81	4,48	5,46	11,5	11,16	12,2	
Alkaliteetti	mmol/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,35	< 0,1	< 0,1	
Asiditeetti	mmol/l	5,71	19,8	8,1	0,12	13	16,3	
Kiintoaine	mg/l	120	130	170	120	32	31	
Väri-luku	mg Pt/l	18	69	37	83	61	40	
KMnO <sub>4</sub> -luku	mg/l	62	320	140	79	71	77	80
Tot-N	mg/l	2,7	9,7	5,5	1	4,3	4,4	
PO <sub>4</sub>	µg/l	20	19	26	280	20	25	0,03
Br	mg/l	5,3	8,7	6,4	< 0,1	6	5,5	
Cl	mg/l	710	1 400	890	7,8	1 200	1 100	1,4
F	mg/l	1,9	0,99	1,5	0,15	3,8	5,6	0,08
NO <sub>3</sub>	mg/l	2,7	2,9	3,2	0,24	2,7	2,4	0,5
SO <sub>4</sub> (kenttä)	mg/l	508	1 794	840	20	2 620	2 100	
SO <sub>4</sub> (lab.)	mg/l	430	1 900	1 000	14	2 600	3 000	3,5
<b>Liukoiset pitoisuudet</b>								
Al	mg/l	7,04	14,1	7,01	0,51	73,3	114	0,134
As	µg/l	4,87	9,56	5,58	0,7	13,6	16	0,36
B	µg/l	187	911	564	23	1 180	1 140	2,78
Ba	µg/l	101	55,5	78,6	15,2	6,94	18,4	10
Ca	mg/l	148	213	186	8,02	287	306	4,06
Cd	µg/l	0,86	0,81	0,78	0,04	2,36	3,4	< 0,02
Co	µg/l	97	125	89,7	0,81	366	515	0,17
Cr	µg/l	1,24	5,41	1,94	2,11	11,5	7,1	0,5
Cu	µg/l	6,96	10,7	9,78	6,19	55,1	48,7	0,64
Fe	mg/l	79,9	396	162	0,49	44	11,7	0,68
Hg	µg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	
Li	µg/l	46,9	193	104	2,32	782	1080	1,02
Mg	mg/l	53,6	246	124	4,41	379	440	1,39
Mn	mg/l	3,36	6,52	4,04	0,04	11,7	12	0,029
Mo	µg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,15
Ni	µg/l	145	175	141	3,7	674	901	0,52
Pb	µg/l	0,5	3,29	0,99	4,8	0,4	2,39	0,23
Rb	µg/l	22,9	83,2	51	3,52	46	30,4	

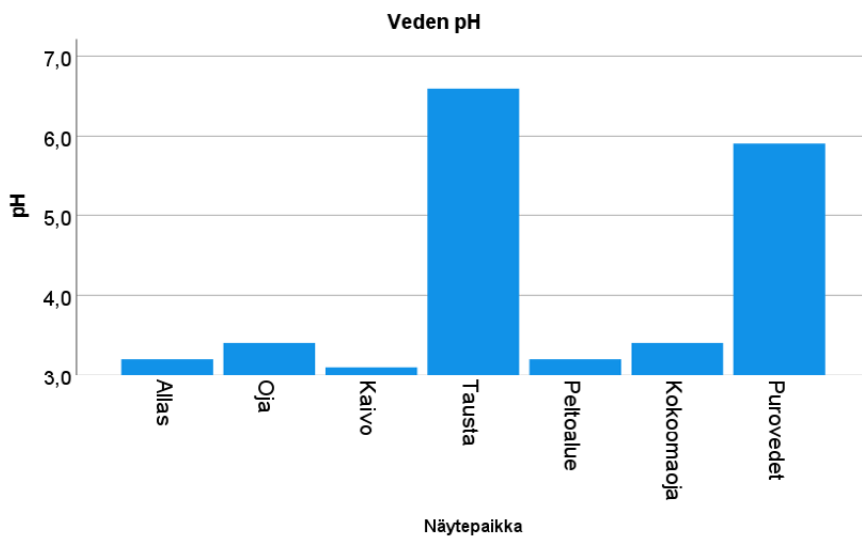
Taulukko 34. Jatkuu

Näytepaikka		Allas	Oja	Kaivo	Tausta	Peltoalue	Kokoo- ma-oja	Puro- vedet
		180 d	180 d	180 d	180 d	180 d	180 d	Suomi Md
Ominaisuus	Yksikkö							
S	mg/l	163	750	370	5,25	988	1 150	
Sb	µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	0,028
Se	µg/l	25,4	52,1	31,5	<0,5	82,7	102	0,067
Si	mg/l	17,4	22,7	18,1	7,29	32,6	28,3	
Sr	mg/l	0,95	1,97	1,35	0,05	2,6	2,87	22,4
Th	µg/l	< 2	< 2	< 2	< 2	2,47	< 2	
Tl	µg/l	0,27	0,27	0,17	0,03	0,18	0,17	< 0,015
U	µg/l	1,65	2,32	4	0,37	13,8	11,8	0,073
V	µg/l	0,29	3,59	0,37	2,16	1,82	0,66	0,53
Zn	µg/l	229	229	226	8,47	1 200	1 700	3,6
<b>Kokonaispitoisuudet</b>								
Al	mg/l	12,4	17,1	11,2	10,4	84,5	128	
As	µg/l	5,51	10,3	6,16	1,91	14,9	18,1	
B	µg/l	201	914	564	26,2	1 200	1 110	
Ba	µg/l	107	58,4	85	67,9	7,64	18,6	
Ca	mg/l	163	236	205	9,44	309	318	
Cd	µg/l	0,83	0,77	0,77	< 0,2	2,2	3,13	
Co	µg/l	103	125	91,6	3,08	385	527	
Cr	µg/l	2,92	5,96	3,17	15,2	12,6	7,45	
Cu	µg/l	11,5	15,9	14,1	12,5	57,5	49,2	
Fe	mg/l	88,5	431	180	8,46	52,1	12,8	
Li	µg/l	60,5	204	109	12,2	851	1 110	
Mg	mg/l	58,8	274	137	7,17	407	457	
Mn	mg/l	4,42	9,26	5,03	0,14	16,2	15,8	
Mo	µg/l	2,57	2,74	1,67	< 0,2	< 0,2	< 0,2	
Ni	µg/l	152	173	144	10,1	700	905	
Pb	µg/l	1,52	4,44	2,36	4,88	< 1	2,79	
Rb	µg/l	25,6	84,2	53,5	24,5	50,6	31,7	
S	mg/l	168	834	381	4,82	1 060	1 130	
Sb	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
Se	µg/l	26,8	52,3	31,1	1,05	89,7	108	
Si	mg/l	22,5	27,9	20,8	23,7	40	32,6	
Sr	mg/l	1,04	2,16	1,51	0,07	2,92	3,07	
Th	µg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	
Tl	µg/l	< 0,2	0,27	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	
U	µg/l	1,91	2,66	4,62	0,89	14,6	11,3	
V	µg/l	2,43	6,05	2,24	17	2,5	0,74	
Zn	µg/l	271	281	271	26	1 560	2 080	

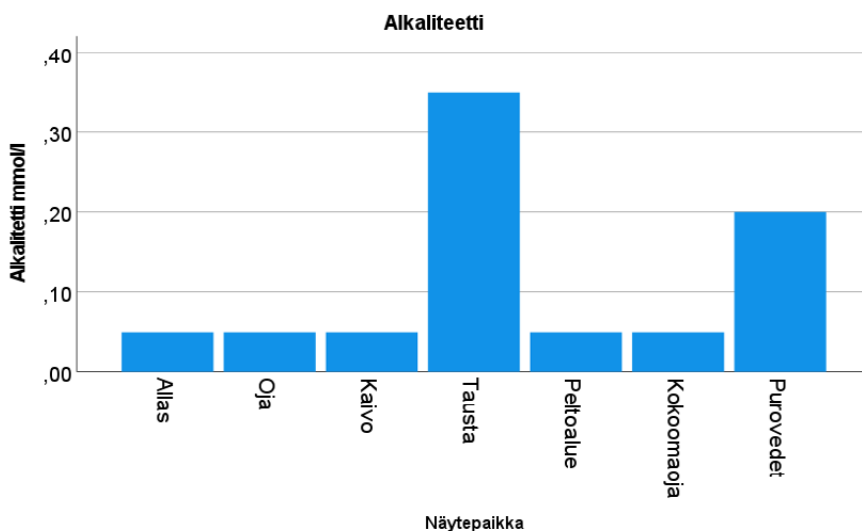
Tutkimuspisteistä oja, allas ja hulevesikaivo sijaitsevat koetoiminta-alueen lähellä, mutta niidenkin veden laatuun voi vaikuttaa laajemmalta alueelta tulevat valumavedet. Taustapisteeksi valittu näytepiste antaa suhteellisen hyvän kuvan sellaisen pintaveden laadusta, johon maalle läjitetyt ruoppausmassat eivät vaikuta. Peltoalue koekentän vieressä ja kokoomaaja sijaitsevat koetoiminta-alueen itäpuolella, ja niihin vaikuttavat myös valumavedet, jotka tulevat muihin altaisiin läjitetyistä ruoppausmassoista.

Taustanäytteen pH on yli 6 ja alkaliteetti 0,35 mmol/l. Kaikkien muiden vesinäytteiden pH on alle 4 ja alkaliteetti alle 0,1 mmol/l (kuvat 69 ja 70). Taustanäytteen suurempi alkaliteetti ker-

too sen paremmasta kyvystä neutraloida happamuutta. Taustanäytteessä on enemmän fosfaattia ja vanadiinia kuin muissa näytteissä, mutta muiden alkuaineiden pitoisuudet taustanäytteessä ovat pienempiä tai korkeintaan samaa suuruusluokkaa kuin muissa tutkituissa vesinäytteissä. Maapartikkeleihin sitoutuneen fosfaatin vapautuminen kasvaa, kun pH-arvo on yli 6,5, mikä osaltaan selittänee taustapisteeseen muita näytteitä suuremman fosfaatin pitoisuuden. Vanadiinin liukoisuus veteen pienenee, kun pH-arvo laskee alle 7. Vanadiinia on tyypillisesti runsaasti savissa, ja taustanäytteen suuri vanadiinin kokonaispitoisuus kuvaa savipartikkeleihin sitoutuneen vanadiinin määrää.



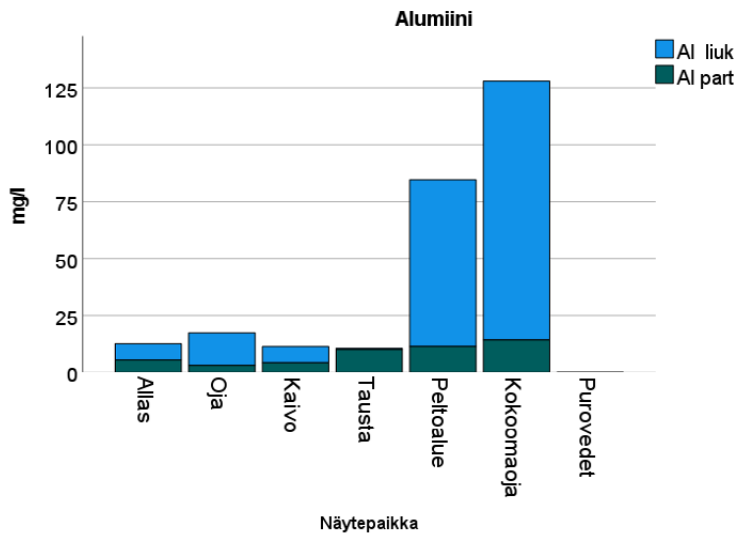
Kuva 69. Matalahden vesinäytteiden pH-arvo (laboratoriomittaus) ja Suomen purovesien pH-määrittysten mediaaniarvo v. 1990 (Lahermo ym. 1996).



Kuva 70. Matalahden vesinäytteiden alkaliteetti (mmol/l) ja Suomen purovesien alkaliteettimäärittysten mediaaniarvo v. 1990 (Lahermo ym. 1996). Viiden näytteen alkaliteetti on pienempi kuin käytetyn analyysimenetelmän määrittäysraja 0,1 mmol/l. Kaaviossa määrittäysraja on jaettu kahdella (0,05 mmol/l).

Alumiini on taustanäytteessä suurimmaksi osaksi partikkelimuodossa. Liukoista alumiinia on vähän. Pitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin Suomen pienten latvapurojen keskimääräinen liunneen alumiinin määrä (kuva 71). Stabiloidun kenttäkoealueen lähellä (oja, allas, kaivo) partikkelimuotoisen alumiinin määrä on pienempi kuin taustanäytteessä mutta liukoisen alumiinin määrä

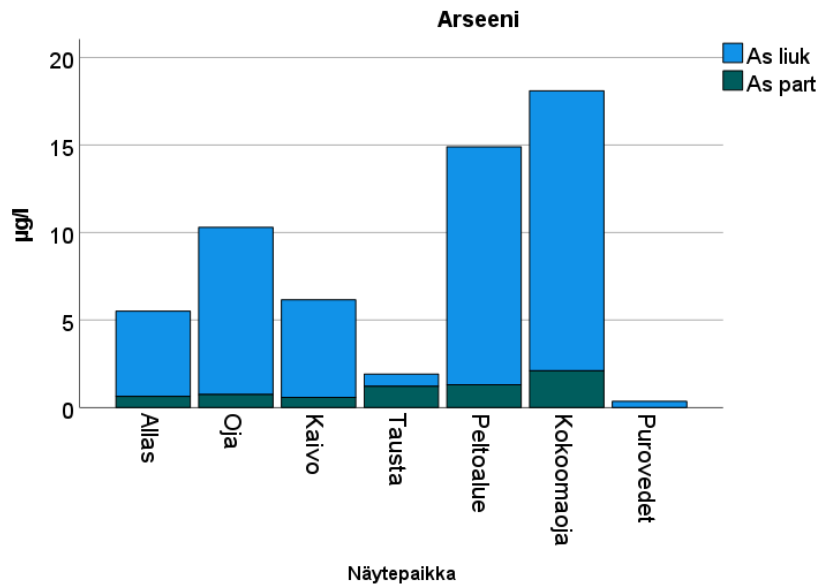
on kasvanut. Alumiinin kokonaismäärä on koealueen lähistön vesissä samaa suuruusluokkaa kuin taustanäytteessä. Koealueen ulkopuolella avointen ruoppausmassa-altaiden vaikutuspiirissä liukoisen alumiinin määrä on paljon suurempi kuin muissa näytteissä. Liukoinen alumiini voi olla haitallista kaloille ja puiden juurille.



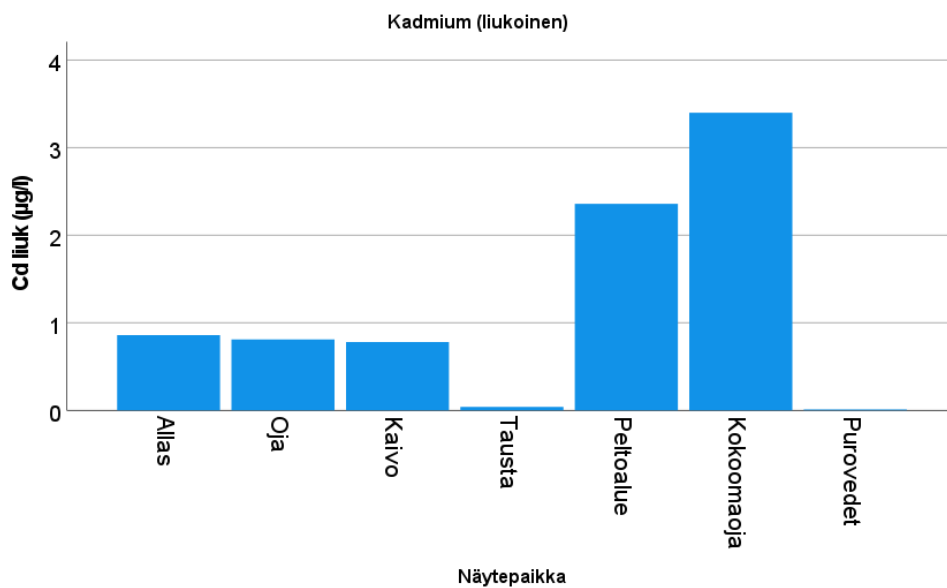
Kuva 71. Matalahden vesinäytteiden alumiinipitoisuus (mg/l) ja Suomen purovesien alumiinipitoisuuksien mediaaniarvo v. 1990 (Lahermo ym. 1996). Sininen osa palkista kuvaa liunneessa muodossa olevaa määrää ja vihreä osa veden mukana kulkevien partikkeleiden pitoisuuksia. Suomen purovesistä on määritetty vain liukoisen pitoisuus.

Suurimmat mahdollisesti haitallisten metallien pitoisuudet havaittiin koetoiminta-alueen ulkopuolella peltoalueen ja kokoomaajan näytteissä. Asiditeetti on suuri, samoin sulfaatin määrä. Nämä kuvastavat todennäköisesti happamien sulfaattimaiden hapettumisen seurauksena ruoppausmassasta liunnutta sulfaattia. Arseni on usein helpommin liikkuvaa korkeassa pH:ssa, mutta Matalahdella arsenipitoisuudet ovat matalan pH-arvon ruoppausmassa-alueilla suurempia kuin taustanäytteessä (kuva 72). Happaman valumaveden mukana ruoppausmassasta kulkeutuu muun muassa alumiinia (kuva 71), kadmiumia (kuva 73), kuparia (kuva 74), lyijyä (kuva 75), nikkeliä (kuva 76) ja sinkkiä (kuva 77). Lyijypitoisuus on kaikissa ruoppausmassan läheltä otetuissa näytteissä samaa suuruusluokkaa kuin taustapisteen lyijypitoisuus. Esimerkiksi nikkelistä voidaan havaita, että liukoiset nikkelpitoisuudet ovat lähes yhtä suuret kuin

veden kokonaisnikkelpitoisuus. Kyseessä ei ole siis nikkelin kulkeutuminen veden mukana partikkeleina vaan liukoinen nikkeli. Myös kadmium esiintyy vesinäytteissä lähes yksinomaan liukoisessa muodossa. Kadmium-, kupari-, nikkeli- ja sinkkipitoisuudet ovat erityisen suuria peltoalueen ja kokoomaajan näytteissä, jotka on otettu koetoiminta-alueen ulkopuolelta. Kadmium, nikkeli ja lyijy ovat vesipolitiikan puitteiden direktiivin (2000/60/EY) prioriteettiaineita. Niiden ympäristölaatumit rannikkovesissä on määritetty näiden metallien liukoisten pitoisuuksien vuosikeskiarvolle (AA-EQS). Taustapitoisuudet huomioden rannikkovesien AA-EQS-arvo kadmiumille on 0,22 µg/l, nikkeli 9,6 µg/l ja lyijylle 1,33 µg/l (VNa 1308/2015). Nämä arvot ylittyivät kaikissa vesinäytteissä taustanäytettä lukuun ottamatta. Matalahden merivedestä ei ole otettu näytettä.

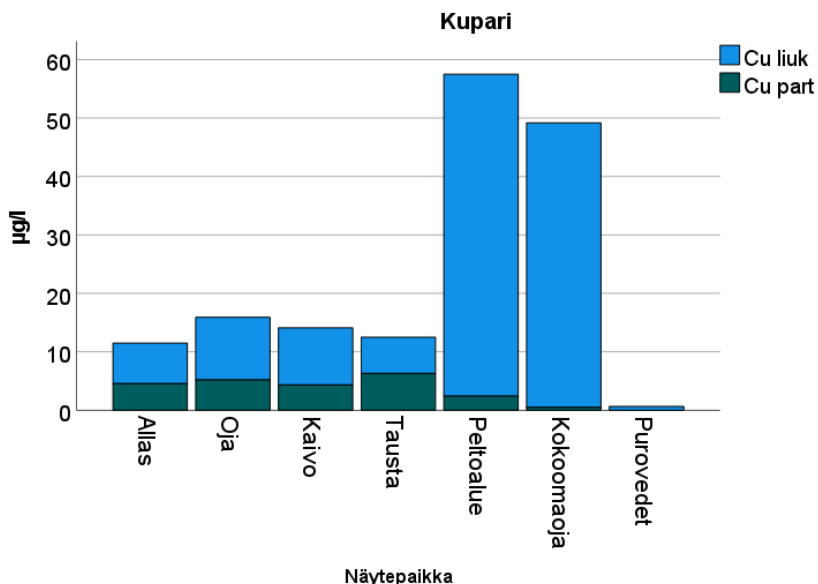


Kuva 72. Matalahden vesinäytteiden arseenipitoisuus ( $\mu\text{g/l}$ ) ja Suomen purovesien arseenipitoisuuksien mediaaniarvo v. 1990 (Lahermo ym. 1996). Sininen osa palkista kuvaa liuenneessa muodossa olevaa määrää ja vihreä osa veden mukana kulkevien partikkeleiden pitoisuuksia. Suomen purovesistä on määritetty vain liukoinen pitoisuus.

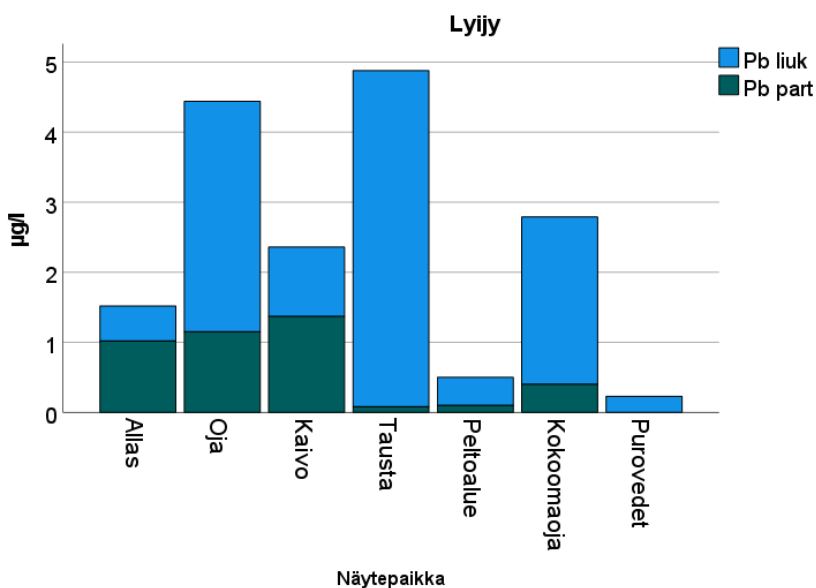


Kuva 73. Matalahden vesinäytteiden kadmiumpitoisuus ( $\mu\text{g/l}$ ) ja Suomen purovesien kadmiumpitoisuuksien mediaaniarvo 1990 (Lahermo ym. 1996). Kuvassa on esitetty vain liukoinen pitoisuus, koska partikkeleihin sitoutuneen kadmiumin määrä oli hyvin pieni.

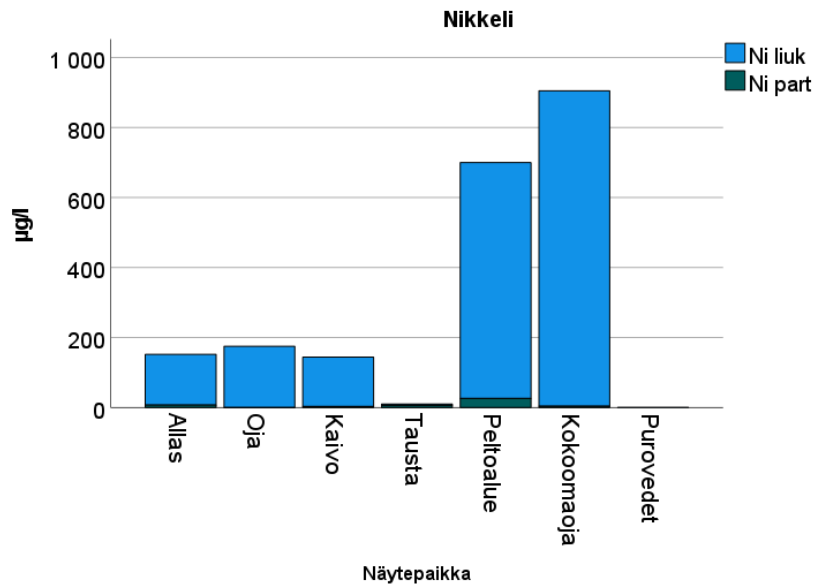




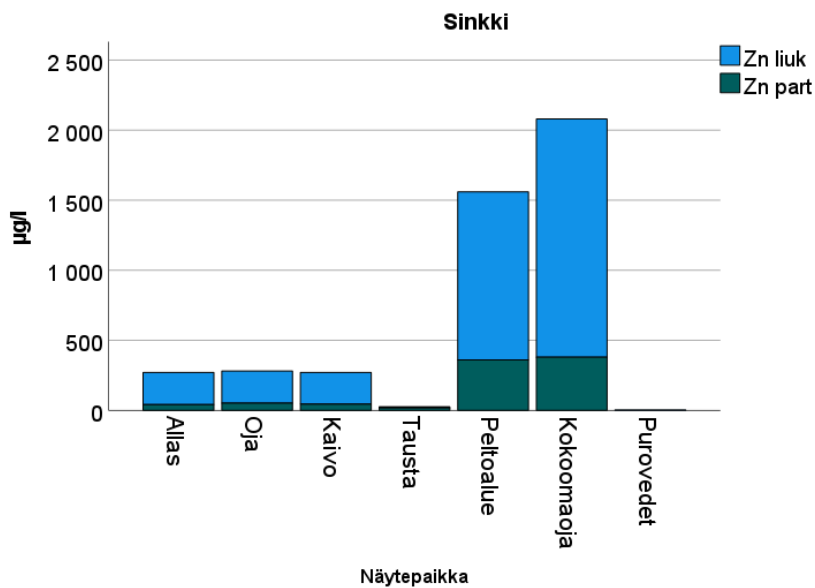
Kuva 74. Matalahden vesinäytteiden kuparipitoisuus ( $\mu\text{g/l}$ ) ja Suomen purovesien kuparipitoisuuksien mediaaniarvo v. 1990 (Lahermo ym. 1996). Sininen osa palkista kuvaa liuenneessa muodossa olevaa määrää ja vihreä osa veden mukana kulkevien partikkeleiden pitoisuuksia. Suomen purovesistä on määritetty vain liukoinen pitoisuus.



Kuva 75. Matalahden vesinäytteiden lyijypitoisuus ( $\mu\text{g/l}$ ) ja Suomen purovesien lyijypitoisuuksien mediaaniarvo v. 1990 (Lahermo ym. 1996). Sininen osa palkista kuvaa liuenneessa muodossa olevaa määrää ja vihreä osa veden mukana kulkevien partikkeleiden pitoisuuksia. Suomen purovesistä on määritetty vain liukoinen pitoisuus.



Kuva 76. Matalahden vesinäytteiden nikkelpitoisuus ( $\mu\text{g/l}$ ) ja Suomen purovesien nikkelpitoisuuksien mediaaniarvo v. 1990 (Lahermo ym. 1996). Sininen osa palkista kuvaa liuenneessa muodossa olevaa määrää ja vihreä osa veden mukana kulkevien partikkeleiden pitoisuuksia. Suomen purovesistä on määritetty vain liukoinen pitoisuus.



Kuva 77. Matalahden vesinäytteiden sinkkipitoisuus ( $\mu\text{g/l}$ ) ja Suomen purovesien sinkkipitoisuuksien mediaaniarvo v. 1990 (Lahermo ym. 1996). Sininen osa palkista kuvaa liuenneessa muodossa olevaa määrää ja vihreä osa veden mukana kulkevien partikkeleiden pitoisuuksia. Suomen purovesistä on määritetty vain liukoinen pitoisuus.

Tutkimuspisteiden vesinäytteistä määritettiin myös PAH-yhdisteiden pitoisuudet Eurofins Environment Testing Finland Oy:n laboratoriossa Lahdessa (taulukko 35). PAH-yhdisteiden pitoi-

suudet olivat hyvin pieniä tai alle käytetyn analyysimenetelmän määritysrajan. Laboratorion tutkimusseloste on liitteessä 11.

Taulukko 35. Kuuden tutkimuspisteen vesinäytteiden PAH-yhdisteiden pitoisuudet.

PAH EPA 16 yhdisteet	yksikkö	Allas	Oja	Kaivo	Tausta	Peltoalue	Kokooma-oja
Asenaftteeni	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Asenaftyleeni	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Antraseeni	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Bentso(a)antraseeni	µg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001
Bentso(b,j)fluoranteeni	µg/l	< 0,001	0,002	0,002	< 0,001	0,009	0,002
Bentso(k)fluoranteeni	µg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001
Bentso(a)pyreeni	µg/l	0,00041	0,00071	0,00091	0,00023	0,0033	0,00085
Bentso(g,h,i)peryleeni	µg/l	< 0,0005	0,001	0,001	< 0,0005	0,004	0,001
Dibentso(a,h)antraseeni	µg/l	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
Fenantreeni	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,006	< 0,005
Fluoreeni	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Fluoranteeni	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,005	< 0,005
Kryseeni	µg/l	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003	< 0,001
Indeno(1,2,3-cd)pyreeni	µg/l	< 0,0005	0,001	0,001	< 0,0005	0,004	0,001
Naftaleeni	µg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pyreeni	µg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005

## 10 YHTEENVETO

Ruoppausmassojen meriläjityksestä ollaan ympäristövaikutusten vuoksi luopumassa ja ruopattavat massat tullaan yhä enemmän läjittämään maalle. Esimerkiksi Turun satama Oy ja Turun kaupunki ovat luopuneet ruoppausmassojen meriläjityksestä ja Turun satama Oy on päättänyt olla hakematta uutta lupaa ruoppausmassojen meriläjitykselle nykyisen luvan päätyttyä.

Varsinais-Suomen savikerrostumien leikkauslujuuden arvo on tyypillisesti 10–30 kPa:n luokkaa. Meren pohjasta ruopattu savi on häiriintynyt, ja sen suljetun leikkauslujuuden arvo on lähellä nolaa. Ruoppausmassa on siis lujuudeltaan hyvin heikkoa, ja sen käyttö maalle läjitettyinä, kuormitettujen rakenteiden alla on ilman lujitustoimenpiteitä lähes mahdotonta. CircVol-projektin toteuttamassa Naantalın Matalahden kenttäkokeessa ruoppausmassa läjitettiin merenrannan läheisyyteen ja sitä lujitettiin eri sideaineilla. Stabiloidun kentän

leikkauslujuuden arvoksi oli asetettu tavoitelujuus 75 kPa, joka voidaan ilmaista myös puristuslujuuden arvona 150 kPa.

Kenttäkokeen yhteydessä eri reseptein stabiloitu ruoppausmassa tutkittiin laboratoriossa puristuslujuuksien osalta. Kaikki stabiloidut näytteet saavuttivat keskimääräisesti tavoitepuristuslujuuden 150 kPa. Osittain arvot nousivat erittäin suuriksi, jopa 2 000 kPa:iin. Saavutetut suuret lujuudet johtuivat siitä, että esitesteissä, joissa stabiloinnin kenttäkokeessa käytettävät eri reseptit testattiin, käytetyn ruoppausmassan vesipitoisuus oli huomattavasti läjitysaltaissa muutaman kuukauden seissyttä ruoppausmassa korkeampi. Kenttäkokeen alkaessa ruoppausmassa oli ehtinyt jo kuivua ja stabilointiin käytetyn sideaineen määrää olisi voinut vähentää esitesteihin verrattuna. Myös puristuslujuuksien yhteydessä määritetyt kimmomoduulien arvot kuvastivat stabiloinnin jälkeen enemmän hiekan

kuin saven jäykkyysarvoja. Kentältä myöhemmin tehdyt tiiviys- ja kantavuusmittaukset pudotuspainolaitteella ja levykuormituskokeella kertoivat myös hyvästä tiiviydestä ja keskimäärin hiekkaa vastaavista kantavuusluokista.

Suuret lujuudet voivat osittain olla valmiissa rakenteessa haitallisiakin, esimerkiksi putkijohtojen kaivaminen voi hankaloitua tai ero luonnonmaan ja stabiloidun maan välillä voi aiheuttaa painumaeroja. Pääsääntöisesti suuri lujuus on kuitenkin rakennetulla alueella tavoiteltavaa, koska silloin maa kantaa paremmin kuormia ja se myös painuu vähemmän. Sideaineiden määrää ei kuitenkaan kannata kohuttomasti kasvattaa, koska samalla sideaineiden sisältämät mahdolliset haitta-ainepitoisuudet kasvavat. Matalahden kenttäkokeessa suurimmassa osassa koekenttiä sideainemääriä olisi voinut huomattavasti pienentää, mikä jatkotutkimuksissa tuleekin ottaa huomioon.

Happamat sulfaattimaat ja potentiaaliset happamat sulfaattimaat tulisi tunnistaa ja huomioida maarakentamisen kiertotaloushankkeissa jo hyvin aikaisessa vaiheessa, mieluiten jo ennen kuin niitä lähdetään kaivamaan tai ruoppaamaan. Happamat sulfaattimaat ovat maarakentamisen ja kiertotalouden kannalta haasteellisia, koska ne ovat usein geoteknisiltä ominaisuuksiltaan heikkolaatuisia mm. niiden sisältämän orgaanisen aineksen vuoksi. Lisäksi hapettuessaan niistä syntyy happamia valumavesiä ja tätä kautta haitallisia metallipäästöjä maaperään ja vesistöihin. Kaivettujen maamassojen uusiokäytössä ja kierrätyksessä on otettava huomioon happamien sulfaattimaiden esiintymispotentiaali ja niiden hapontuottopotentiaalin aiheuttamat haasteet ja vaatimukset. GTK:n ylläpitämien julkisten karttapalveluiden avulla voidaan arvioida (potentiaalisten) happamien sulfaattimaiden alueellista esiintymistä, mutta happamien sulfaattimaiden tarkka esiintyminen on syytä aina varmistaa paikallisella, kohdennetulla näytteenotolla ja tutkimuksilla. Myös vesistöjen pohjalla sijaitsevat sedimentit voivat olla hapanta sulfaattimaamateriaalia (todennäköisesti potentiaalista hapanta sulfaattimaamateriaalia), mikä on otettava huomioon, kun ruoppausmassoja läjitetään maalle. Maalle läjitetty ruoppausmassa kuivuu, mikä altistaa massan hapettumiselle. Tällöin ruoppausmassan mahdollisesti sisältämä sulfidirikki reagoi hapen kanssa ja alkaa muodostua rikkihappoa. Voimakas happo liuottaa ruoppausmassasta mutta myös alueen muusta maaperästä sen sisältämiä metalleja. Tutkimuskohteella ruoppausmas-

sasta ja ruoppausmassa-altaista suotautuva hapanta ja metallipitoinen vesi kulkeutuu pintavaluntana ja ojien kautta Matalahteen, jossa se saattaa aiheuttaa ongelmia eliöstölle. Vaikka merivesi puskuroi happamuutta melko hyvin, esimerkiksi liukoinen alumiini on erittäin haitallista kaloille. Happamat valumavedet voivat aiheuttaa ongelmia myös erilaisille rakenteille. Lisäksi pintamaan happamuus ja mahdolliset alumiinisulolat vaikuttavat maaperän kasvittumiseen ja viljelyskäyttöön.

Matalahden ruoppausmassojen happamoitumispotentiaalia tutkittiin vain yksittäisistä ruoppausnäytteistä. Ruoppausmassa-aldaiden laajemmasta happamoitumispotentiaalista saatiin kuitenkin viitteitä maastomittausten sekä hule- ja valumavesien laboratorioanalyysien perusteella. Jotta happamoitumispotentiaali voitaisiin todeta tarkemmin, tulisi tarkempia tutkimuksia tehdä kattavasti koko läjitysalueelta. Lisäksi aktiivista happamuutta läjitysaltaisissa voitaisiin seurata tekemällä tutkimuksia esimerkiksi haitta-aineiden kokonaispitoisuuksista ja liukoisuudesta eri syvyyksillä.

Matalahdella ruoppausmassoja stabiloitiin erilaisilla kiertotalouden materiaaleilla ja stabiloinnin todettiin ehkäisevän maamassojen happamoitumista ja niistä liukenevien mahdollisten haitallisten aineiden kulkeutumista vesistöihin. Lisäksi stabiloinneilla pystyttiin ehkäisemään haitallisen korroosioympäristön syntyminen maaperässä. Valtaosa Matalahden ruoppausmassoista on kuitenkin sijoitettu käsittelemättöminä läjitysaltaisiin, joissa ne pääsevät vapaasti hapettumaan ja happamoitumaan muodostaen kuormitusriskin vesistöille. Koska CircVol-projektin pilotin tarkoituksena oli selvittää ruoppausmassan stabiloitavuutta ja stabiloinnin vaikutuksia pinta-alaltaan pienellä koekentällä, alueelta ei esimerkiksi ole tehty hydrologista mallinnusta, jonka perusteella voitaisiin arvioida koko läjitysalueelta syntyvien valumavesien virtausreitit ja määrää. Matalahteen kohdistuvan metallikuormituksen selvittämiseksi muun muassa hydrologinen mallinnus, jossa on huomioituna myös alueen salaojat ja muut vedenvirtaukseen vaikuttavat rakenteet, antaisi tarkemman kuvan riskin suuruudesta. Myös syntyvien valuma- ja hulevesien sekä vastaanottavan Matalahden veden laadun tarkkailun tulisi olla jatkuvatoimista, sillä käsittelemättömistä altaista kuormitusta voi tulla pulssimaisesti useiden vuosien ajan. Tehokkain tapa ehkäistä ruoppausmassojen ympäristöhaittoja on käsitellä massat niin, että niissä ei pääse muodostumaan happamuutta. Tällaisia ovat esimer-

kiksi neutralointi kalkilla tai tuhkalla tai massojen peittäminen vähintään metrin paksuisella suhteellisen tiiviillä maakerroksella.

Matalahden kenttäkokeen perusteella maalle läjitettyjä ruoppausmassoja voidaan stabiloida sementin, kalkin, kuonan ja tuhkan lisäksi myös muilla teollisuuden sivuvirroilla. Kenttäkokeessa testattiin yhdeksää erilaista reseptiä, jotka kaikki saavuttivat geoteknisiltä ominaisuuksiltaan hyvän ja kantavan maapohjan (kuva 78). Eri sideainein tehty stabilointi myös neutraloi tehokkaasti happoa tuottavan ruoppausmassan. Myös haitta-aineiden

liukoisuus stabiloidusta massasta oli pääasiassa hyvin pientä. Sideaineiden sekoittaminen ruoppausmassaan olisi hyvä suunnitella tehtäväksi jo ennen ruoppausmassojen läjittämistä altaisiin, jolloin sideaineiden lisääminen olisi teknisesti helpompi toteuttaa ja sideaineet saataisiin sekoittamaan stabiloitavaan massaan tasaisemmin. Lisäksi stabiloitavan ruoppausmassan hapontuottopotentiaali olisi hyvä selvittää yhdessä haitta-aineiden kokonaispitoisuuksien kanssa jo ennen ruoppauksen aloittamista.



Kuva 78. Matalahden koekenttä 23.4.2021. Alue on tasattu ja peitetty murskekerroksella. Kenttä asfaltoidaan, ja sen päälle tulee tulevan asuinalueen pienvenesatamaa palveleva parkkipaikka.

## 11 KIITOKSET

Julius Manninen Turku Science Park Oy:stä laati koetoimintailmoituksen sekä osallistui kenttäkokeen suunnitteluun ja valmisteluun. Naantalin kaupungista pilotin toteutukseen osallistuivat Heikki Voutilainen, Saija Kajala ja Tiina Kemppi sekä Naantalin asuntomessutiimistä Timo Tirri. Jari Saarinen Lassila & Tikanoja Oy:stä osallistui kenttäkokeen suunnitteluun ja valmisteluun sekä vastasi 4 ja 6 kk:n aikapisteiden levykuormituskokeista yhdessä Marko Rantasen kanssa. Koeruutujen rakentamisesta ja sideaineiden sekoittamisesta koeruutuihin vastasivat Kalevi Kylä-Kaila, Jari Kylä-Kaila ja Tenho Rantanen Maanrakennus Kylä-Kaila Oy:stä. Lisäksi Jari Kylä-Kaila teki kenttäkokeen 0 kk:n aikapisteen Loadman-kokeen.

Kenttäkokeen suunnitteluun ja ympäristövaikutusten arviointiin antoivat asiantuntija-apua Outi Pyy, Jussi Reinikainen, Jani Salminen ja Jani Häkkinen Suomen ympäristökeskuksesta. Turun ammattikorkeakoulussa laboratorio- ja kenttäko-

keissa ovat olleet kirjoittajien lisäksi mukana Jani Sintonen, Emilia Suvanto ja Matleena Punkkinen sekä useita rakennustekniikan ja prosessi- ja materiaalitekniikan insinööriopiskelijoita. Geologian tutkimuskeskuksessa työn toteutukseen osallistuivat raportin kirjoittajien lisäksi Pasi Heikkilä (XRD-mittaukset), Minna Myllyperkiö (tomografiakuvaukset), Lasse Heikkinen (preparaattien valmistus ja näytekäsittelyt), Anton Boman (vesinäytteiden asiditeettimääritykset), Stefan Mattbäck (näytteenotto ja kenttämittaukset), Onerva Valo (kenttämittaukset) ja Tarja Hatakka (vesinäytteenotto ja analyysitulosten tulkinta). Åbo Akademiassa tutkimustyöhön osallistuivat kirjoittajien lisäksi prof. Leena Hupa, Oskar Karlström, Patrik Yrjas, Linus Silvander (SEM-analyysit), Peter Backman (DTA/TGA analyysit), Jaana Paananen (XRD-analyysit) ja Luis Bezerra (ICP-OES-analyysit). Kiitämme myös Marja Muittaria kielentarkistuksesta.

## LÄHDE- JA KIRJALLISUUSLUETTELO

- Auri, J., Tarvainen, T., Lehtonen, M., Räisänen, J., Mattbäck, S. & Jarva, J. 2020.** Happamat sulfaattimaat kiertotaloushankkeissa: Case Välimaa ja Matalahti. GTK, Työraportti 49/2020. 47 s. Saatavissa: [https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/49\\_2020.pdf](https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/49_2020.pdf)
- Etelä-Suomen aluehallintovirasto 2016.** Matalahden kunnostaminen, Naantali. Päätös Nro 158/2016/2. Dnro ESAVI/1405/2015.
- Etelä-Suomen aluehallintovirasto 2019.** Matalahden venesataman vesialueen ruoppaus ja laituriin rakentaminen sekä valmistelulupa, Naantali. Päätös Nro 73/2019. Dnro ESAVI/10711/2018.
- Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A. & Baghini, M. S. 2017.** Fundamentals of soil stabilization. International Journal of Geo-Engineering 8. 26. Saatavissa: <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Hadzic, M., Postila, H., Österholm, P., Nystrand, M., Pahkakangas, S., Karppinen, A., Arola, M., Nilivaara-Koskela, R., Häkkinen, K., Saukkoriipi, J., Kunnas, S. & Ihme, R. 2014.** Sulfaattimailla syntyvän happaman kuormituksen ennakointi- ja hallintamenetelmät – SuHE-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17/2014. 88 s. + 1 liite. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/135520>
- Holopainen, M. 2016.** Stabiloidun o-kuidun geotekniset ominaisuudet ja pitkäaikaiskestävyys. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto. 102 s. + 1 liite. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201602243573>
- Häkkinen, J., Pyy, O. & Salminen, J. 2020.** Selvitys kansainvälisistä käytännöistä ruoppausmassojen hallinnassa ja hyödyntämisessä. CircVol-projektin taustaselvitys. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 43/2020. 61 s. + 1 liite. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/320202>
- ISO 11466:1995.** Soil quality — Extraction of trace elements soluble in aqua regia.
- ISO 18287:2006.** Soil quality — Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) — Gas chromatographic method with mass spectrometric detection (GC-MS).
- ISO/TS 17892-7:2004.** Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 7: Unconfined compression test on fine-grained soils.
- IUSS Working Group WRB 2015.** World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. Saatavissa: <http://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>
- Keramatikerman, M., Chegenizadeh, A. & Nikraz, H. 2016.** Effect of GGBFS and lime binders on the engineering properties of clay. Applied Clay Science 132–133, 722–730. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.08.029>
- Kääriäinen, E. 1962.** Land uplift in Finland computed by the aid of precise levellings. Fennia 89, No 1, 15–19.
- Lahermo, P., Väänänen, P., Tarvainen, T. & Salminen, R. 1996.** Suomen geokemian atlas, Osa 3: Ympäristögeokemia – purovedet ja sedimentit. Geologian tutkimuskeskus. 150 s. Saatavissa: [https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej\\_020.pdf](https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_020.pdf)
- Liikennevirasto 2017.** Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7 Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet 21.4.2017. Liite 5. Korroosio. Liikenneviraston ohjeita 13/2017. 91 s. + 10 liitettä. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2017-13\\_ncci7\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf)
- Liikennevirasto 2018.** Syvästabiloinnin suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 17/2018. 128 s. + 8 liitettä. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2018-17\\_syvastabiloinnin\\_suunnittelu\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-17_syvastabiloinnin_suunnittelu_web.pdf)
- Lindberg, B., Ehlers, C. & Edén, P. 1994.** Turku. Suomen geologinen kartta 1:100 000, kallioperäkartta, lehti 1043. Geologian tutkimuskeskus. Saatavissa: [https://tupa.gtk.fi/kartta/kallioperakartta100/kp\\_1043.pdf](https://tupa.gtk.fi/kartta/kallioperakartta100/kp_1043.pdf)
- Naantalin kaupunki 2020a.** Päätös ympäristönsuojelulain 119 §:n mukaisesta koeluonteisen toiminnan ilmoituksesta, Naantalin kaupunki. Viranhaltijan päätös nro 1/2020.
- Naantalin kaupunki 2020b.** Ympäristönsuojelulain 119 §:n mukaisen koeluonteista toimintaa koskevan päätöksen muuttaminen, Naantalin kaupunki. Viranhaltijan päätös nro 2/2020.
- Niemelä, J., Stén, C.-G., Taka, M. & Winterhalter, B. 1987.** Turun-Salon seudun maaperä. Summary: Quaternary deposits in the Turku-Salo map-sheet areas. Suomen geologinen kartta 1:100 000, maaperäkartojen selitykset, lehdet 1043, 2021. Geologian tutkimuskeskus. 83 s. Saatavissa: [https://tupa.gtk.fi/kartta/maaperakartta100/mps\\_1043\\_2021.pdf](https://tupa.gtk.fi/kartta/maaperakartta100/mps_1043_2021.pdf)
- Peltola, P. & Åström, M. 2002.** Concentrations and leachability of chemical elements in estuarine sulfur-rich sediments, W. Finland. The Science of the Total Environment, 284 (1–3), 109–122. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00872-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00872-5)
- Rajasekaran, G. 2005.** Sulphate attack and ettringite formation in the lime and cement stabilized marine clays, Ocean Engineering, 32, 8–9, 1133–1159. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.08.012>
- SFS 3021.** Veden pH-arvon määrittäminen.
- SFS-EN 12457-3.** Jätteiden karakterisointi. Liukoisuus. Rakeisten jättemateriaalien ja lietteiden liukoisuuden laadunvalvontatesti. Osa 3: Kaksivaiheinen ravistelu-testi uuttoliuoksen ja kiinteän jätteen suhteessa 2 l/kg ja 8 l/kg materiaaleille, joiden kiintoaineksen osuus on suuri ja raekoko alle 4 mm (raekoon pientäminen tarvittaessa).
- SFS-EN 13137.** Characterization of waste. Determination of total organic carbon (TOC) in waste, sludges and sediments.
- SFS-EN 15863:2015.** Characterization of waste. Leaching behaviour test for basic characterization. Dynamic monolithic leaching test with periodic leachant renewal, under fixed conditions.
- SFS-EN 27888.** Veden laatu. Sähkönjohtavuuden määrittäminen.
- SFS-EN ISO 11885.** Water quality. Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES).
- SFS-EN ISO 15587-2.** Water quality. Digestion for the determination of selected elements in water. Part 2: Nitric acid digestion.
- SFS-EN ISO 17294-2.** Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Part 2: Determination of selected elements including uranium isotopes.
- Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. I. & Higgins, D. D. 1998.** Effects of partial substitution of lime with ground granulated blast furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils. Engineering Geology, 51 (1), 37–53. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00039-8)
- Wild, S., Kinuthia, J. M., Jones, G. L. & Higgins, D. D. 1999.** Suppression of swelling associated with ettringite

formation in lime stabilized sulphate bearing clay soils by partial substitution of lime with ground granulated blastfurnace slag (GGBS). *Engineering Geology*, 51 (14), 257–277. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(98\)00069-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00069-6)

**Ympäristöministeriö 2017.** Ehdotus Valtioneuvoston asetukseksi eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Muistio 28.11.2017. Saatavissa: <http://www.gles.fi/wp-content/uploads/2018/01/MARA-asetuksen-perustelumuihistio.pdf>

**Ympäristöministeriö 2018.** Ehdotus Valtioneuvoston asetukseksi maa-ainesjätteen hyödyntämisestä maarakentamisessa. Muistio / Luonnos 28.11.2018. Saatavissa: <https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/ParticipationNonJsShowReport?proposalId=1c6a5969-09d7-4c75-8c80-b405b7063b42>

**Ympäristöministeriö 2020.** Rakentamisen maa-ainesten hyödyntämistä koskevan sääntelyn kehittäminen. Muistio 8.9.2020. Saatavissa: [https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/d80e737a-d426-42f9-9e5f-b5dc787c0fd7/77e38062-97c9-40ff-9ff9-9f7f40e91373/KIRJE\\_20200909100454.PDF](https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/d80e737a-d426-42f9-9e5f-b5dc787c0fd7/77e38062-97c9-40ff-9ff9-9f7f40e91373/KIRJE_20200909100454.PDF)

**Österholm, P. & Nystrand, M. 2016.** Titratable incubation acidity for acid sulfate soil materials. Abstract. In: 8th International Acid Sulfate Soil Conference, July 17–23 2016, Maryland.

### **Lainsäädäntö:**

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi yhteisön vesipolitiikan suuntaviivoista (2000/60/EY, VPD) eli nk. vesipuitedirektiivi

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (843/2017) eli nk. MARA-asetus

Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (214/2007) eli nk. PIMA-asetus

Valtioneuvoston asetus vesiympäristölle vaarallisista ja haitallisista aineista annetun valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta (1308/2015)

Vesilaki (587/2011, VL)

Ympäristönsuojelulaki (527/2014, YSL)



Kaikki GTK:n julkaisut verkossa [hakku.gtk.fi](http://hakku.gtk.fi)

