



UPACMIC – PILOTOINTI

MATERIAALIT, RAKENTAMINEN JA SEURANTATU- LOKSET



LIFE12 ENV/FI/000592 UPACMIC



Yhteenvetoraportti 5/2022 mennessä toteutuneista pilotoinneista (Action B1 final technical report on piloting)

Päivämäärä **19.5.2022**
Kirjoittaja **Emmi Ilonen**

Tarkastajat **Ari Mäkinen**
Harri Jyrävä

Kuvaus **Tulosraportti**

SISÄLTÖ

Summary	4
1. Johdanto	5
2. Lähtökohdat	6
3. Pyhäsalmen pintarakennepilotointi	7
3.1 Pyhäsalmen pilottirakenteissa käytetyt materiaalit	8
3.2 Pyhäsalmen pilotoinnissa käytettyjen materiaalien varastointi	9
3.3 Pyhäsalmen pilottien rakentaminen	10
3.4 Pyhäsalmen suotovesien seurantatulokset	14
3.5 Pyhäsalmen haihduntatulokset	24
3.6 Pyhäsalmen pilotoinnin peiterakennemateriaalien vertailu	25
3.7 Pyhäsalmen pilotoinnin purkuvaiheen tutkimustulokset	29
3.8 Johtopäätökset / Pyhäsalmen pilotointi	31
4. Hituran kuitusavipeiterakenteet / Fortum	32
4.1 Käytetyt materiaalit	32
4.2 Kuitusavella rakentaminen ja sen varastointi	33
4.3 Peiterakenteiden seuranta	35
5. Kuopion pystyeristerakenne / Fortum	36
5.1 Pystyeristeseinämässä käytetyt materiaalit	37
5.2 Pystyeristeseinämän rakentaminen	37
6. Hituran savipeiterakenne / Skarta	39
6.1 Savipeitteen rakentamiseen käytetyt materiaalit	39
6.2 Savipeitteen rakentaminen	39
7. Hituran reaktiiviset rakenteet / Skarta	41
7.1 Pilottirakenteet, passiivinen vesienkäsittely	41
7.2 Reaktiivisissa rakenteissa käytetyt materiaalit	42
7.3 Vesienkäsittelyjärjestelmien rakentaminen	44
7.4 Reaktiivisten rakenteiden seurannan sisältö	46
7.5 Seurantatulokset	46
7.5.1 Kalkkikivipatopilotoinnin seurantatulokset	46
7.5.2 Johtopäätökset / kalkkikivipato	52
7.5.3 Geopolymeeripilotoinnin seurantatulokset	53
7.5.4 Johtopäätökset / geopolymeeri	55
7.5.5 Reaktiivisten mattojen pilotoinnin seurantatulokset	56
7.5.6 Johtopäätökset / reaktiivinen mattorakenne	60

LIITTEET

LIITE 1. PYHÄSALMEN PINTARAKENNEPILOTOINNIN SUOTOVESIANALYYSIEN TULOKSET

LIITE 2. PYHÄSALMEN PINTARAKENNEPILOTOINNIN MATERIAALIEN LIUKOISET PITOISUUDET

LIITE 3. HITURAN KUITUSAVI- JA MOREENIRAKENTEET KARTALLA

LIITE 4. KUOPION PYSTYERISTERAKENTEEN POIKKILEIKKAUSKUVA

LIITE 4. KALKKIPATORAKENTEEN ANALYYSITULOKSET

SUMMARY

There have constructed six pilot during UPACMIC-project, three of them have been used in final massive structures. Only bottom structure wasn't constructed. Pilots were:

- Cover layers by ash and gypsum, fiber clay and surplus clay
- Vertical sealing barrier by surplus clay (sealing layer)
- Reactive structures by geopolymer, limestone and adsorbent mats

The first pilot was cover structures in Pyhäsalmi mine 2016. There have been made research from ash and gypsum utilization in cover layer. There were five different cover layers on coarse and fine tailing sands (volume 10 m³). Fly ash was used for neutralising purpose and gypsum was selected because of its good availability. Test monitoring period was 5/2016-8/2017, when the seepage water was taken the water samples. Pilot deconstructed in 10/2019 when were taken last water samples and soil samples layer by layer. Based on the results tailing sands activity vary between fine and coarse tailing sands, there leaching more metals from fine tailing and its more susceptible for oxidation which producing acids which lower pH. Ash neutralise pH level, but 100 mm layer is quite thin and its capacity doesn't been enough. Thin gypsum layer was tight and seeping water amount was small, so total metals leaching was also low. New materials worked as well than traditional moraine during the monitoring period.

There was constructed tailing sands basin sealing layer partly with fiber clay in Hitura in autumn 2017 and spring 2018. Sealing layer must be homogenous and water permeability value $k < 1 \times 10^{-8}$ m/s, layer thickness ≥ 250 mm and 100 mm growth layer above it. Compaction of sealing layer was performed by driving over 3 times it with tracked excavator and compacted layer thickness was at least 250 mm. It includes a tolerance against biodegradation. Area of cover layer by fiber clay was 148 850 m² in final structure.

Sealing layer in Sorsasalo constructing was started in autumn 2020 and construction will be continued at spring 2022. Surplus clay in sealing layer was compressed by mould and its demanded water permeability value is $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s, quality control was made by Troxler-measurement during construction work. Final structure vertical area will be 2000 m². Surplus clay pilot was also constructed in Hitura mine. Pre-crushing area is covered as landscaping purpose using surplus soil. Covered area was 33 941 m² and layer thickness 500 mm + 100 mm growth layer. There wasn't demands for water permeability. The pilot is constructed during summer of 2021.

Reactive structures were constructed in Hitura mine in summer 2021. First structure was constructed by recovered materials: limestone and industrial waste based geopolymer. Limestone barrier purpose is to rise water pH, when metals precipitate in barrier and in precipitation pond. Geopolymer adsorbent purpose was to adsorb metals from seeping water. Limestone barrier was tested using Hitura's runoff/seeping water, which were contaminated by high concentrate of nickel. Geopolymer adsorbent was too small for this amount of water and its adsorption capacity were used in one day. In the second structure were tested adsorbent mats. There was granular adsorbent (calcium aluminium silicate) inside the mats. By adsorbent mats can effectively lower the concentrate of metals of the seepage water. Mats worked well in Hitura during two month until those adsorption capacity were used.

1. JOHDANTO

UPACMIC-hankkeessa selvitettiin uusiomateriaalien soveltuvuutta kaivosalueen pinta-, pohja- ja reaktiivisiin rakenteisiin laboratorio-olosuhteissa, jolloin mittakaava lopulliseen käyttöön verrattuna oli huomattavasti pienempi ja olosuhteet stabiilit verrattuna Suomen todellisiin sääoloihin. Uusiomateriaalien toimivuutta olikin hyvin tärkeää testata myös maasto-olosuhteissa, jotka sadanнан, lämpötilan ja haihdunnan yms. rakennetta kuormittavien tekijöiden osalta vaihtelevat suu-
resti. Muuttuvat olosuhteet vaikuttavat myös materiaalien reaktiivisuuteen ja sitä kautta niiden toimivuuteen. Lisäksi erilaiset rasitustekijät kuten jäätymis-sulamisrasitus tai routa saattavat vaikuttaa mm. rakenteen vedenläpäisyominaisuuksiin. Pilotointien tavoitteena oli varmistaa, mitkä laboratoriossa toimineista ratkaisuista toimivat myös maasto-olosuhteissa parhaiten.

Hankkeen alkuvaiheissa pilotointisuunnitelmat kohdistuivat Hituran kaivosalueelle. Tarkoitus oli toteuttaa mm. pohja- ja reaktiivisia rakenteita uusille rikastushiekkojen läjitysalueille. Hituraan oli suunniteltu myös koeruutuja, joissa oli tarkoitus testata erilaisia tiivisrakennemateriaaleja ja niiden vedenläpäisy- ja liukoisuusominaisuuksia sekä rakennettavuutta. Kaivosyhtiön konkurssin myötä suunnitelmat jäivät toteutumatta. Lisäksi hankkeen aikana pilottisuunnitelmia tehtiin myös mm. Särkiniemen kaivosalueen sivukivikasojen peittämiseen ja neutralointiin, sekä Oriveden kaivoksen sivukivialueen laajennuksen pohjarakenteeseen. Erinäisistä syistä myös nämä hankkeet jäivät toteutumatta.

UPACMIC-hankkeen puitteissa toteutettiin lopulta kuusi pilotointia, joista kolmea käytettiin myös lopullisissa rakenteissa. Pilotoinneissa onnistuttiin tutkimaan käytännössä lähes kaikkia hankkeen tavoitteena olleita uudentyypisiä sovellutuksia. Ainoastaan pohjarakenteisiin liittyvä pilotointi jäi sellaisenaan toteuttamatta. Peite-/tiivisrakenteiden tuloksia voidaan kuitenkin hyödyntää ja soveltaa myös suunniteltaessa uudentyypisiä pohjarakenneratkaisuja, sillä pohjarakenteilta vaaditut ominaisuudet liittyvät suurelta osin kantavuuden lisäksi vedenläpäisykykyyn.

Ensimmäinen pintarakennepilotointi toteutettiin keväällä 2016 Pyhäsalmen kaivoksen alueella. Vuosina 2017-2018 Fortum Waste Solutions Oy (Fortum), rakensi UPACMIC-hankkeen puitteissa Hituran kaivosalueelle ensin koekenttiä, ja myöhemmin lopullisia rikastushiekka-aldaiden peiterakenteita paperiteollisuuden sivutuotteena muodostuvasta kuitusavesta. Peiterakenteita rakennettiin alueelle myöhemmin myös Skarta Finland Oy:n (Skarta) toimesta ylijäämäsavella. Syksyllä 2020 Fortum toteutti Kuopion Sorsasalon teollisuusjätekeskuksen alueelle ylijäämä-/jättemaista sekä teollisuuden jätteistä-/sivutuotteista pystyeristepilotoinnin. Viimeisin pilotointi toteutettiin loppukesästä 2021 reaktiivisiin vesienkäsittelyrakenteisiin liittyen Hituran kaivoksen toisessa sulkemisvaiheessa yhteistyössä KAIVASU-hankkeen (Kaivoksen sulkeminen -Vaikutukset ja uudet mahdollisuudet) kanssa.

Pilotoinneilla pystyttiin osoittamaan uusiomateriaaleista valmistettujen rakenneratkaisuiden käytännön toimivuus, joka oli esimerkiksi kuitusavella toteutettujen peiterakenteiden osalta perinteistä moreenipeitettä parempi. Lisäksi tuotettiin tietoa tarvittavista materiaalmääristä ja logistiikan suunnittelusta, kun perinteiset materiaalit korvataan uusiomateriaaleilla. Raportissa esitetyt tulokset toimivat esimerkkeinä vähäpäästöisemmistä ja ympäristöystävällisemmistä rakenneratkaisusta kaivosalueilla ja kaivostoiminnan haitallisten ympäristövaikutusten torjunnassa.

2. LÄHTÖKOHDAT

Pilotointien lähtökohtana oli testata kaivosalueella todellisissa käyttötarkoituksissaan uudentyypisiä kaivosalueiden peite- ja pohjarakenteita sekä reaktiivisia rakenteita purkuvesien käsittelyyn. Pinta- ja pohjasuojarakenteiden osalta oli tavoitteena osoittaa rakenteen laatuvaatimuksien mukaisten ominaisuuksien saavuttaminen/toteutuminen myös kenttäolosuhteissa sekä ominaisuuksien säilyminen (esimerkiksi vedenläpäisevyysarvo) käytön aikana. Lisäksi oli tarkoitus tuottaa tietoa rakennushankkeen kokonaisvaltaisista ympäristövaikutuksista mm. hiilijalanjäljen sekä neitseellisten luonnonvarojen ehtymisen näkökulmista ja kerätä tietoja hankkeen aikana esiin tulleista haasteista ja ongelmista niin rakennettavuuden kuin esimerkiksi logistiikan ja varastoinnin näkökulmista. Rakennushanketta oli tarkoitus arvioida kokonaisuudessaan suunnitteluvaiheesta toteutukseen ja lopullisen rakenteen toimivuuden seurantaan asti. Tällä tavoin voitiin vertailla vaihtoehtoisia materiaaleja perinteisiin materiaaleihin ja tuottaa tietoa hyvistä toimintatavoista kaikissa hankevaiheissa.

Pyhäsalmen kaivosalueella materiaaleiksi valikoitui fosforituotannon sivutuotteena muodostuva kipsi sekä energiatuotannosta muodostuva tuhka. Pilottirakenteissa kipsiä ja tuhkaa seostettiin rikastushiekkaan ja moreeniin simuloiden peiterakenteen muodostamista stabilointitekniikkaa soveltaen. Rakenteiden toimivuutta seurattiin niiden vedenläpäisevyyden sekä suotautuneen veden ominaisuuksien näkökulmista. Lähtökohtana oli tuottaa tietoa ns. reaktiivisen kerroksen (tuhka) sekä vakaavan kerroksen (kipsi) vaikutuksista suotoveden ominaisuuksiin vaihtelevilla kerrospaksuuksilla. Hiturassa kuitusavipilotoinnilla tuotettiin tietoa tarvittavista materiaalimääristä sekä tiheystavoitteiden täyttämiseksi vaadituista työtavoista, joilla saavutetaan riittävän alhainen vedenläpäisykyky käytettäessä kuitusavea tiivis-/peiterakenteissa. Sorsasalon pystyeristerakenteessa oli lähtökohtana osoittaa saven toimivuus tiivisrakenteessa sekä määritellä tiheystavoitteiden saavuttamiseksi vaaditut työtavat.

Reaktiivisia vesienkäsittelyrakenteita pilotoitiin Hituran sulkemisen toisessa vaiheessa, kun kiillegneissikasasta suotauvia vesiä käsiteltiin passiivisilla vesienkäsittelyratkaisuilla. Uusiomateriaaleista pilotoinnissa testattiin sivutuotteena muodostuvaa kalkkia sekä masuunikuonageopolymeeria, joiden lisäksi pilotoinnissa oli mukana kaupallisen toimijan reaktiivinen matto. Kalkkikiveä oli tutkittu materiaalitestausvaiheessa laboratoriossa ja pilotoinnin lähtökohtana olikin osoittaa kalkkikiven toimivuus Hituran happaman ja nikkelpitoisen veden käsittelyssä, sekä arvioida materiaalin käyttöikä kohteella.

3. PYHÄSALMEN PINTARAKENNEPILOTOINTI

Pyhäsalmen kaivoksen päätuotteet ovat sinkki- ja kupari, joiden rikastuksen sivutuotteena muodostuu pyriittiä. Tuotannosta muodostuneet rikastushiekat ovat sulfidipitoisia, herkästi hapettuvia ja happoa tuottavia materiaaleja. Pyhäsalmen rikastushiekat koostuvat suurimmaksi osaksi rikistä, raudasta, piistä ja bariumista. Raudan ja rikin määrä rikastushiekassa vaihtelee kaivoksen pyriittituotannon mukaan. Pyhäsalmen rikastushiekoja pidetään happamia valumavesiä tuottavina rikastushiekkoina, sillä rikastushiekan hapontuottopotentiaali on neutralointipotentiaalia paljon suurempi ja rikastushiekka happamoituu herkästi reagoidessaan hapen kanssa. Pilottirakenteissa tutkittiin erilaisia pintarakenneratkaisuja Pyhäsalmen karkealla ja hienolla rikastushiekkalaadulla.

Pintarakennepilotointia oli suunniteltu toteutettavaksi Hituran kaivosalueelle, johon myös materiaalistaus alun perin kohdistui. Tutkimustuloksia hyödynnettiin myös Pyhäsalmen rakenteiden suunnittelussa, sillä materiaalien tekniset ominaisuudet vaikuttavat rakennetyypin ja kerrospaksuuksien valintaan. Lopullisiin rakenteisiin vaikuttaa myös uusiomateriaalien ympäristökelpoisuus. Pintarakennepilotointi toteutettiin 9–16.5.2016 Pyhäsalmi Mine Oy:n kaivosalueella, jossa rakentamisen yhdyshenkilönä toimi Maria Hänninen. Rakentamisesta, siihen liittyvästä kalustosta ja materiaaleista vastasi Suomen Maastorakentajat Oy (nykyään Skarta Finland Oy). Suunnittelusta, teknisestä ohjeistuksesta, laadunvalvonnasta sekä raportoinnista vastasi Ramboll Finland Oy. Pilottirakenteita suunniteltaessa huomioitiin myös kanadalaisen konsulttifirma Klohn Crippen Bergerin ideat. Pilottirakenteet sijaitsivat kaivosalueella kuvassa 1 punaisella merkityssä paikassa, jossa jatkuva seuranta oli helposti toteutettavissa.



Kuva 1. Pyhäsalmen pintarakennepilotoinnin sijainti.

Pyhäsalmeilla toteutettujen pilottirakenteiden aktiivinen seuranta-aika oli 5/2016 – 8/2017, jolloin peitekerrosten läpi suotautuvasta vedestä kerättiin vesinäytteitä aluksi noin viikon välein ja loppuajan noin kuukausittain. Rakenteet purettiin 5.11.2019, jolloin materiaaleista ja suotovesistä otettiin viimeiset, yksittäiset, näytteet. Pilotoinnin tavoitteena oli veden määrän ja laadun seurannalla tuottaa lisätietoa laboratorioissa testattujen materiaaliratkaisuiden toimivuudesta ja käyttäytymisestä maasto-olosuhteissa. Painopisteenä oli materiaali-/rakenneratkaisujen vedenläpäisy- ja liukoisuusominaisuudet. Uusiomateriaalien käyttöön liittyen rakentamisen aikana tarkasteltiin lisäksi

käsiteltävyyttä, sekä vesipitoisuuden vaikutusta materiaalien käsiteltävyyteen, työstettävyyteen ja tiivistämiseen. Lisäksi kerättiin tietoa uusiomateriaalien logistiikasta sekä rakentamisen aikana esiin tulleista haasteista ja ongelmista. Pilotoinnissa referenssirakenteena oli perinteisesti moreenilla toteutettu peitekerros, johon vertailtiin uusiomateriaaleilla toteutettuja peiterakenneratkaisuja.

3.1 Pyhäsalmen pilottirakenteissa käytetyt materiaalit

Pilottirakenteisiin käytetyillä materiaaleilla oli tarkoitus vähentää Pyhäsalmen kaivoksen sulfidipitoisessa rikastushiekassa hapon muodostumista ja haitta-aineiden liukenemista eli käytännössä estää/hidastaa rikastushiekan hapettumista. Uusiomateriaaleista pilotointiin valittiin kasatuhka ja kipsi. Pilotoinnissa käytetyt materiaalit ja niiden tuottajat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Pyhäsalmen pilotoinnissa käytetyt materiaalit.

Materiaali	Materiaalin tuottaja
Hieno ja karkea rikastushiekka	Pyhäsalmi Mine Oy
Moreeni	Pyhäsalmi Mine Oy
Tuhka	Oulun Energia Oy
Kipsi	Yara
Kasvukerros	Rönkön Puutarha, Pyhäjärvi
Inertti materiaali	Tenhusen Maasiirto Oy

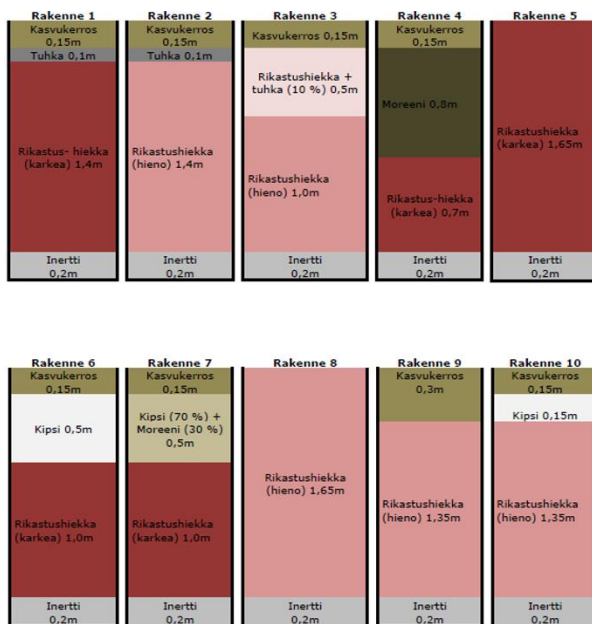
Taulukko 2. Pyhäsalmen pilotoinnissa käytettyjen materiaalien kokonaispitoisuudet.

Alku-aine	Kokonaispitoisuudet mg/kg ka.						
	Rikastushiekka (karkea)	Rikastushiekka (hieno)	Tuhka	Kipsi	Moreeni	Inertti	Kasvukerros
Elohopea, Hg	0,39	0,27	0,46	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
Alumiini, Al	6 910	7 180	52 400	340	12 800	11 000	5 340
Arseeni, As	400	370	40	15	4,7	4,2	< 3
Barium, Ba	130	110	1 150	370	110	130	81
Kalsium, Ca	20 700	25 400	72 100	277 000	5 040	6 570	4 720
Kadmium, Cd	7,4	5,2	2,8	< 0,3	0,38	< 0,3	< 0,3
Kromi, Cr	18	20	120	< 2	27	25	12
Kupari, Cu	720	680	120	13	55	20	4,6
Rauta, Fe	315 000	297 000	142 000	400	17 500	20 800	3 400
Kalium, K	1530	1 490	8 690	630	2 830	1 750	920
Mangaani, Mn	430	590	2 430	21	240	190	89
Molybdeeni, Mo	9,5	6,6	11	< 1	< 1	< 1	< 1
Nikkeli, Ni	11	11	62	< 1	9,7	12	3
Lyijy, Pb	120	100	41	8,6	17	< 3	< 3,0
Antimoni, Sb	3,4	3,8	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Seleeni, Se	28	21	10	< 3	< 3	< 3	< 3
Vanadiini, V	14	17	190	< 2	34	48	11
Sinkki, Zn	2 180	1 680	240	20	63	33	11
Rikki, S	310 000	294 000	12 800	215 000	350	210	930
Natrium, Na	280	280	3 250	1 030	360	260	96
Magnesium, Mg	9 940	11 500	14 200	570	4 160	5 950	1 910

Pilotoinnissa käytetyt rikastushiekat sisälsivät suuria määriä rikkiä (294 000-310 000 mg/kg) ja lisäksi niiden rauta-, alumiini- ja sinkkipitoisuudet olivat korkeita (taulukko 2). Uusiomateriaaleista tuhka sisälsi korkeina pitoisuuksina alumiinia, rautaa sekä rikkiä. Myös kipsin kohdalla korkein yksittäinen haitta-ainepitoisuus oli rikkillä, muiden raskasmetallien osalta esim. nikkeli-, sinkki- ja kuparipitoisuudet olivat selvästi muita materiaaleja matalammalla tasolla.

Pilottirakenteet koostuivat kymmenestä noin 10 m³:n sylinterimäisestä säiliöstä, jotka simuloivat aiemmin laboratoriossa tehtyjä kolonnitestejä. Ylin kerros oli puutarhamultaa, jonka päälle istutettiin siirtonurmi. Rikastushiekan peitekerroksena tuhkaa käytettiin sellaisenaan 100 mm paksuisena kerroksena ja rikastushiekkaan sekoitettuna 500 mm kerroksena. Tuhkan tarkoitus oli toimia rakenteissa reaktiivisena kerroksena, jonka avulla vaikutettiin suodatuvan veden pH-tasoon. Toinen testattu peitekerrosmateriaali oli kipsi, jonka kerrospaksuus rakenteissa oli 15 mm tai rikastushiekkaan seostettuna 500 mm.

Rakenteiden alin suodatinkerros oli inertti kiviaineskerros, joka ohjasi suodatuneet vedet pois rakenteesta. Inertin kerroksen päälle asennettiin suodatinkangas, joka esti yläpuolella olevien materiaalien sekoittumisen inerttiin kerrokseen. Suodatinkerrokseen asennettiin lisäksi lysimetriallas, johon rakenteen läpi suodatuva vesi kerääntyi, ja josta vesi johdettiin edelleen lysimetrikaivoon. Näytteenotto, sekä suotoveden määrän ja laadun seuranta tapahtui lysimetrikaivosta. Rakenteiden yläosaan asennettiin ylivuotoputket. Kerrosrakenteita on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Pyhäsalmen pintarakennepilotoinnin rakennekerrokset.

3.2 Pyhäsalmen pilotoinnissa käytettyjen materiaalien varastointi

Koerakenteissa käytetty hieno ja karkea rikastushiekka olivat Pyhäsalmen kaivoksen D rikastushiekka-altaasta altaan reunalle aumalle nostettua rikastushiekkaa. Aumatut rikastushiekat oli kaivettu rikastushiekka-altaasta noin 0–2,5 metrin syvyydeltä. Hieno rikastushiekka haettiin pyöräkuormaajalla suoraan aumasta ja karkea rikastushiekka toimitettiin Pyhäsalmen kaivoksen toimesta pressun päälle rakentamispaikalle. Hienossa rikastushiekassa esiintyi silmämääräisesti rakeisuuden vaihteluita, mikä oli seurausta rikastushiekan läjittämistavasta.

Pilotoinnissa käytetty kipsi välivarastoitettiin rakentamisalueella pressun päällä ja se oli silmämääräisesti homogeenista. Tuhka oli Oulun Energian toimesta siilosta purettua kostutettua tuoretuhkaa, joka varastoitettiin pressun päällä ja pressulla peitettynä. Materiaalien varastointi pilotointialueella on nähtävissä kuvassa 3. Taulukossa 3 on esitetty tiivistettynä materiaalien aistinvaraiseen tarkasteleluun ja varastointiin liittyviä huomioita.



Kuva 3. Materiaalien varastointia Pyhäsalmen pilotointialueella, jossa vasemmalla tuhka ja kipsi, oikealla rikastushiekkaa.

Taulukko 3. Pyhäsalmen pilotointiin käytettyjen materiaalien aistinvarainen tarkastelu.

	KYLLÄ	EI	HUOMIOT
Homogenisointi			
Kipsi	✗		Silmämääräisesti homogeenista
Tuhka	✗		Silmämääräisesti homogeenista
Kasvukerros	✗		Silmämääräisesti homogeenista
Inertti	✗		Silmämääräisesti homogeenista
Moreeni	✗		Silmämääräisesti homogeenista, sisälsi muutamia hieman suurempia rakeita
Rikastushiekat	✗		Hienossa rikastushiekassa rakeisuuden vaihtelua
Varastointi			
kipsi	✗		Kasalla
tuhka	✗		Pressu tuhkan alla ja päällä
Pölyävyys			
mm. tuhka	✗		Ei pölynnyt varastoinnin aikana, hieman käsiteltäessä
Materiaalien näytteenotto	✗		Näytteet otettu 10.5 ja 11.5

3.3 Pyhäsalmen pilottien rakentaminen

Pyhäsalmen pilottirakenteiden materiaalit asennettiin kerroksittain säiliöihin kuvan 2 mukaisiin rakennekerroksiin. Säiliöt asennettuna on esitetty kuvassa 4. Normaalin maarakennuskaluston lisäksi rakentamisessa käytettiin betonimyllyä materiaalien sekoittamiseen ja homogenisointiin. Materiaalit tiivistettiin kaivinkoneen kauhalla tai tärylätkällä, sekä säiliön reunoilta jaloilla tampaten. Pilotoinnissa toteutuneet ja tavoitellut tiheydet on esitetty taulukossa 4. Moreenin osalta tavoitettävyydestä jäätin seurantamittausten perusteella peräti 20 %, mikä huomioiden on mahdollista, että moreenin tavoitettävyyden määrittämisessä on esiintynyt jostain syystä epätarkkuutta.



Kuva 4. Pilottirakenteiden asentamista Pyhäsalmealla.

Taulukko 4. Pyhäsalmen pilottirakenteissa käytettyjen materiaalien tavoite- ja toteutuneet tiheydet.

Koe-rakenne	Materiaali	Toteutunut tiheys	Tavoite tiheys	Toteutunut tavoitteesta
1	Kasvukerros			
	Tuhka	960		
	Rkh karkea	2170	2380	91 %
2	Inertti			
	Kasvukerros			
	Tuhka	960		
	Rkh hieno	1940	1870	104 %
3	Inertti			
	Kasvukerros			
	rkh + tuhka	2010	2320	87 %
	Rkh hieno	2110	1870	113 %
4	Inertti			
	Kasvukerros			
	Moreeni	1850	2300	80 %
	Rkh karkea	2335	2380	98 %
5	Inertti			
	Rkh karkea	2060	2380	87 %
6	Inertti			
	Kasvukerros			
	Kipsi	1070	1290	83 %
	Rkh karkea	2330	2380	98 %
7	Inertti			
	Kasvukerros			
	Kipsi+moreeni	1730	1810	96 %
8	Rkh karkea	2330	2380	98 %
	Inertti			
9	Rkh hieno	2060	1870	110 %
	Inertti			
10	Kasvukerros			
	Rkh hieno	1880	1870	101 %
	Inertti			
10	Inertti			
	Kasvukerros			
	Kipsi	1200	1290	93 %
	Rkh hieno	2040	1870	109 %

Materiaalien käsittelyn kannalta haastavinta oli hienon rikastushiekan ja tuhkan sekoittaminen homogeeniseksi sekä rikastushiekan tiivistäminen. Huomioitavaa oli myös tuhkan vesipitoisuuden vaikutus tiivistymiseen, sillä liian alhaisessa vesipitoisuudessa tiivistäminen oli vaikeaa. Vesipitoisuus vaikutti huomattavasti myös hienon rikastushiekan tiivistämiseen. Karkean rikastushiekan tiivistäminen oli helpompaa.

Seosten valmistuksessa kipsi-moreeniseos sekoittui hyvin ja seoksesta tuli homogeenistä pienehköllä 5-10 minuutin sekoitustyömäärällä. Moreenista seulottiin isoimmat rakeet pois myllyn päällä olevan ritilän avulla, jonka jälkeen seokset valmistettiin kuudessa erässä. Seoksissa käytetyt materiaalmäärät on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Pyhäsalmen pilotoinnissa käytettyjen moreeni-kipsiseoksen materiaalmäärät.

Sekoitusera	Moreeni [kg]	Kipsi [kg]
1	550	800
2	280	400
3	280	400
4	280	400
5	280	400
6	150	200
yhteensä	1800	2600

Tuhka-rikastushiekkaseoksen sekoittamisessa ilmeni ongelmia. Tuhka erottui sekoitusastian reunoille ja sekoitettu materiaali oli paakkuista. Seoksesta saatiin homogeenista ja sekoittaminen onnistui parhaiten, kun materiaalit lisättiin pysäytettyyn myllyyn ja sekoittaminen toteutettiin suurella pyörimisnopeudella. Lopullinen seos oli koostumukseltaan sitkeää ja taikinamaista. Seoksessa käytetyt materiaalmäärät on esitetty taulukossa 6. Tuhka-rikastushiekkaseosten valmistusta ja siihen liittyviä ongelmia on havainnollistettu kuvassa 5.

Materiaalien vesipitoisuudet kentällä ja laboratoriossa, sekä rakentamisen aikaiset havainnot materiaaleista on tiivistetty taulukkoon 7.

Taulukko 6. Hienon rikastushiekan-tuhkan materiaalmäärät

Sekoitusera	Rikastushiekan märkämassa (kg)	Tuhkan märkämassa (w=15,5 %) (kg)
1	500	50
2	1000	100
3	1000	100
4	1000	100
5	1000	100
6	500	50
yhteensä	5000	500



Kuva 5. Pyhäsalmen pilotoinnissa käytetyn tuhka-rikastushiekkaseoksen paakkumaisuus vasemmalla ja pakeneminen myllyn reunoille oikealla.

Taulukko 7. Materiaalien vesipitoisuus rakennusvaiheessa sekä rakentamisen aikaiset havainnot.

Materiaali	Vesipitoisuus kentällä ja laboratoriossa	Homogeenisuus	Käsiteltävyys, rakennettavuus
Inertti	laboratoriossa 2,6 %	Silmämääräisesti homogeeninen	
Rikastushiekka (hieno)	28,6 % / 25,8 % 24,0 % / 24,8 %		Käyttäytyi savimaisesti, tiivistäminen hankalaa. Rikastushiekkassa vesipitoisuus vaihteluita
Rikastushiekka (karkea)	11,8 % / 15,5 %		Tiivistäminen hienoa rikastushiekkaa helpompaa
Tuhka	15,5 % / 15,2 % (alkuperäinen vesipitoisuus)	Silmämääräisesti homogeeninen	Vesipitoisuuden ollessa n. 15 %, tiivistäminen hankalaa, jäi löyhäksi, vaatii veden lisäämistä
Kipsi	laboratoriossa	Silmämääräisesti homogeeninen	Käsiteltävyys hyvä
Moreeni	6,1 % / 6,3 %	Silmämääräisesti homogeeninen	Sisälsi muutamia suurempia rakeita
Kasvukerros		Silmämääräisesti homogeeninen	

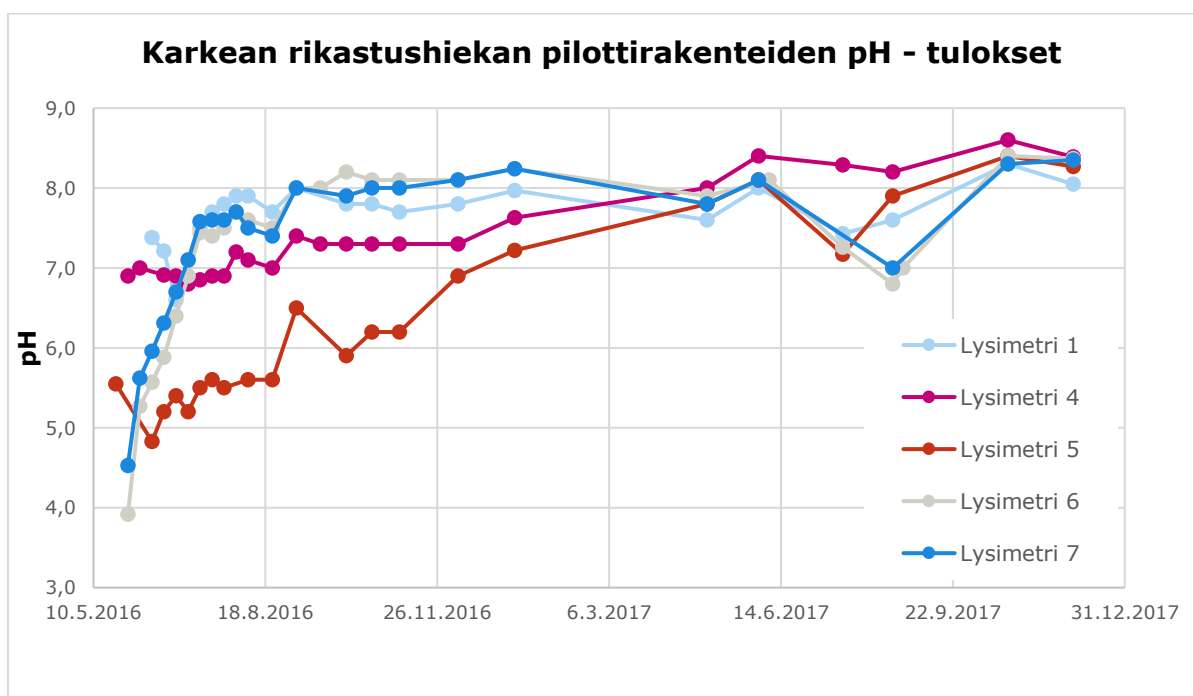
Pilottirakenteiden välittömään läheisyyteen rakennettiin kaksi mikrolysimetriä, joiden tehtävänä oli antaa tietoa alueen haihdunnasta. Mikrolysimetrit rakennettiin kahdesta eri kokoisesta ämpäristä, joista pienempi ämpäri täytettiin rakennusmateriaalilla (kasvukerros ja rikastushiekka) ja laitettiin suuremman ämpäriin sisälle (kuva 6). Haihdunnasta saatiin tietoa seuraamalla ämpärien painon muutosta huomioiden samalla alueen sadanta. Seurannan aikana ämpäreihin jäi kuitenkin materiaalien tiivistettyä seisomaan vettä, jolloin tuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina.



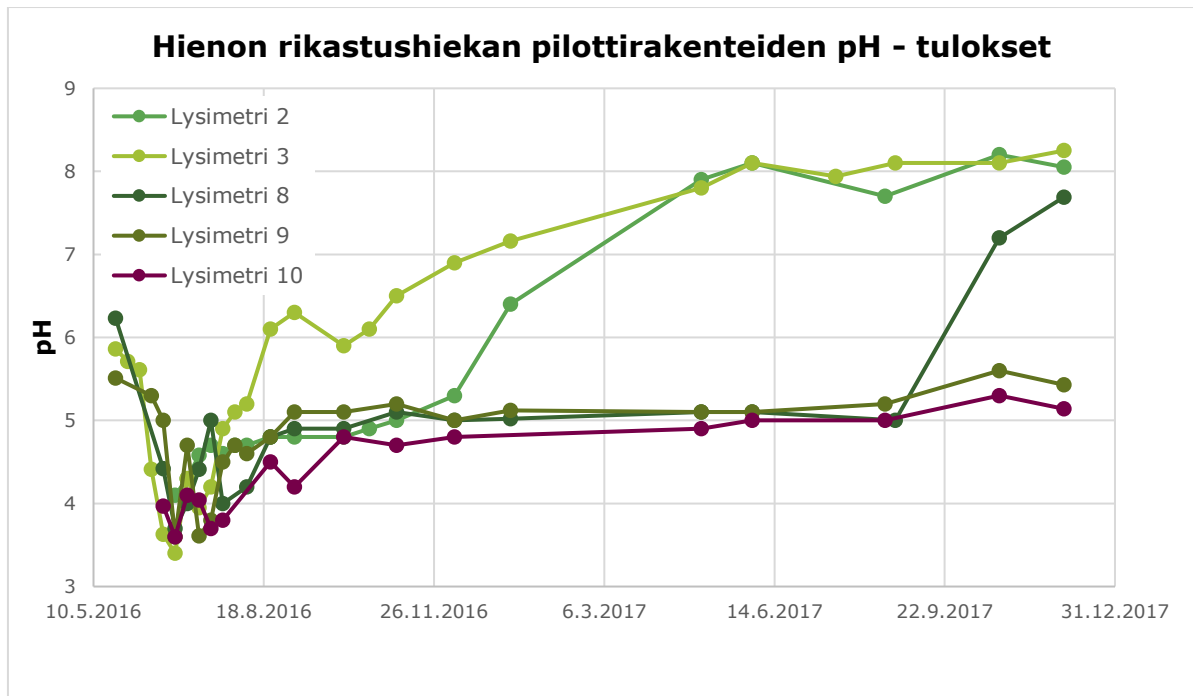
Kuva 6. Pyhäsalmen pilotointialueelle rakennetut mikrolysimetrit, vasemmalla kasvukerroksen materiaalia oikealla rikastushiekkaa.

3.4 Pyhäsalmen suotovesien seurantatulokset

Pilottirakenteista analysoidun suotovesien analyysitulokset olivat hyvin vaihtelevia. Talviaikaan kaivoissa havaittiin sulamisvesiä, jotka vaikuttivat näytteenottoon eikä talviajan seuranta voitua toteuttaa suunnitelmien mukaisesti. Pohjakaivon putkien ollessa jässä tyhjennys tehtiin sangoilla, kaivoa ei saatu kokonaan tyhjäksi ja L/S-suhteen laskemiseen käytetty vesimäärä ei tällöin vastannut todellista vesimäärää. Seuraavassa on esitetty ja analysoitu pilotoinnin keskeisimmät tulokset, kaikki suotovesistä tehtyjen kenttämittauksien ja laboratorioanalyysien tulokset on esitetty liitteessä 1.



Kuva 7. Pyhäsalmen pilottirakenteiden suotovesien pH-arvot (karkea rikastushiekka).

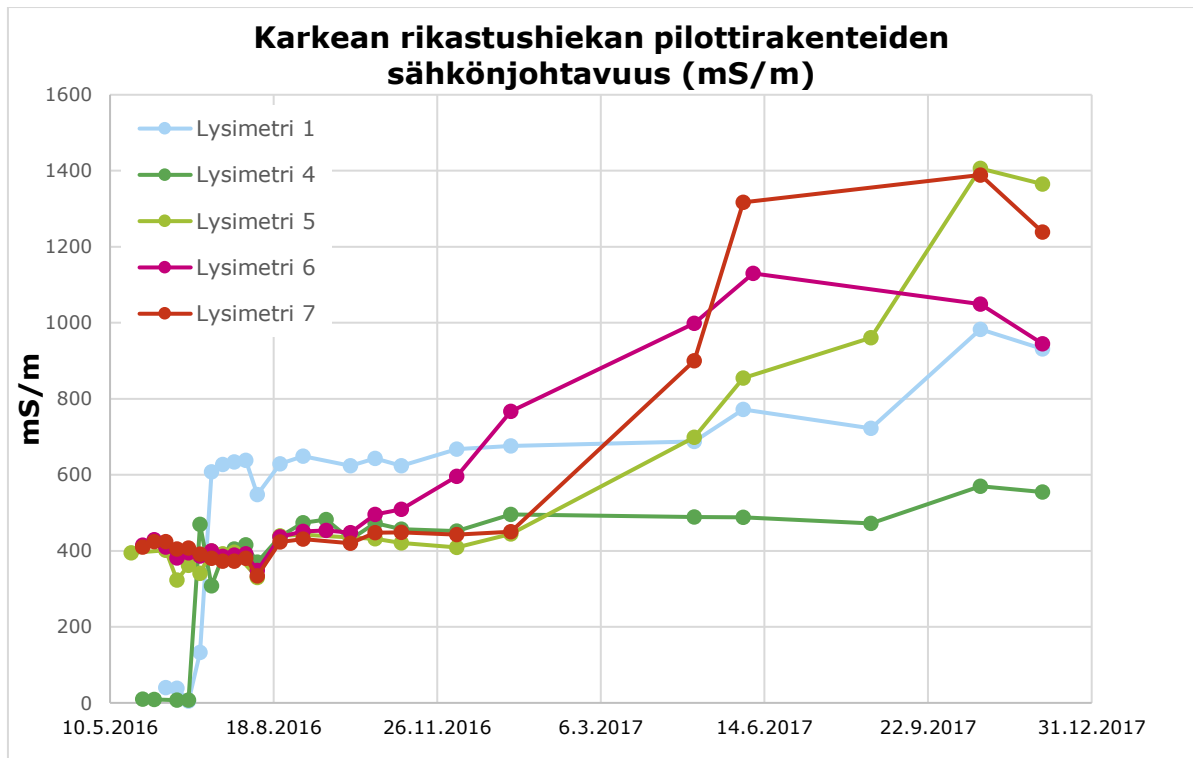


Kuva 8. Pyhäsalmen pilottirakenteiden suotovesien pH-arvot (hieno rikastushiekka).

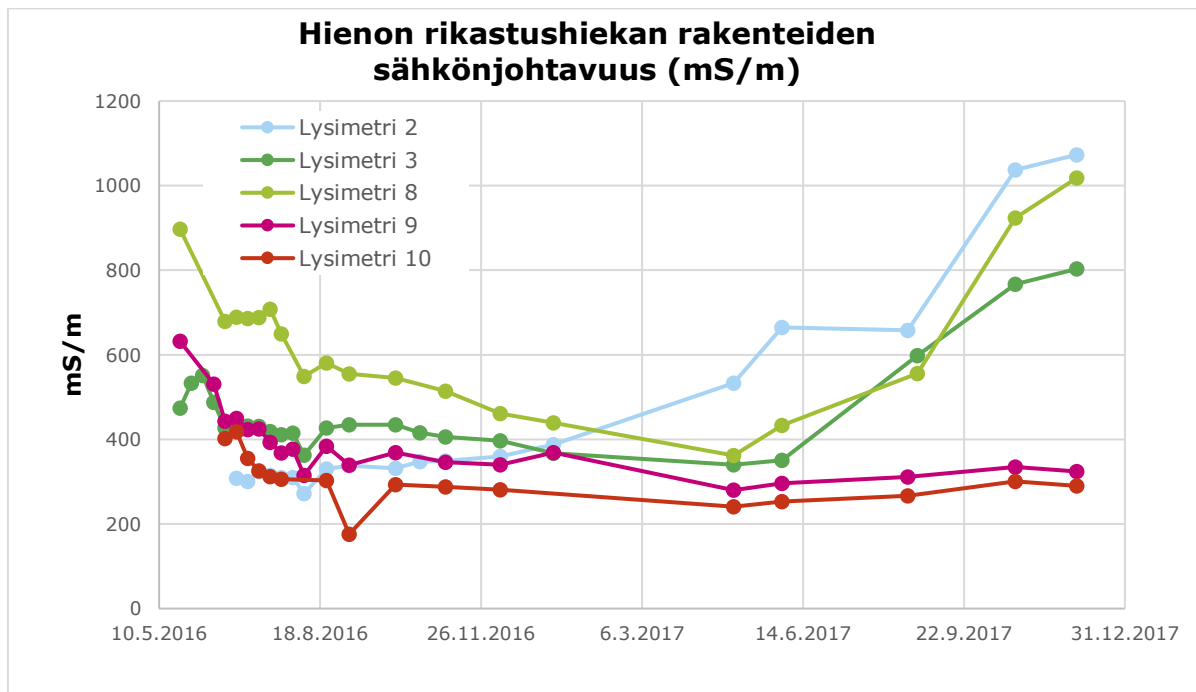
Pilottirakenteista suotautuvan veden pH-seurannan perusteella happamuuden suhteen hienorakeisemman rikastushiekan (lysimetrit 2, 3, 8, 9 ja 10) vaikutus happamampaan suuntaan oli selvästi suurempi kuin karkearakeisen rikastushiekan (lysimetrit 1, 4, 5, 6 ja 7) (kuvat 7 ja 8). Ensimmäisen seurantakuukauden aikana hienorakeisen rikastushiekan pilottirakenteiden läpi suotautuneen veden pH-taso laski, kun karkearakeisen rikastushiekan pilottirakenteista läpi suotautuneen veden pH-taso pääosin nousi tai pysyi lähes alkuperäisellä tasolla. Pilotoinnin loppupuolella karkearakeisen rikastushiekan pilottirakenteiden suotoveden pH oli kaikissa rakenteissa >8, hienorakeisen rikastushiekan suotoveden pH-taso oli välillä 5,1-8,3. Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida myös vaihtelevat suotovesimäärät ja hienomman rikastushiekan mahdollinen hapettuminen osittain jo ennen pilottien rakentamista.

Suotoveden happamuuteen vaikuttavana materiaalina tuhka toimi kaikissa rakenteissa kipsiä tehokkaammin. Happaimimmat suotovedet olivat ohuen kipsikerroksen sisältäneessä rakenteessa sekä kasvukerroksella peitetystä rakenteesta (lysimetrit 9 ja 10). Kipsistä valmistettujen peiterakenteiden suotovedet olivat karkean rikastushiekan osalta nousseet kahdessa kuukaudessa noin 4 pH-yksiköstä yli 7 pH-yksikköön ja hienon rikastushiekan osalta vuodessa noin 4 pH-yksiköstä yli 5 pH-yksikköön. Kipsin alkuperäinen pH oli alle 3, mikä aiheutti kipsipeiterakenteiden suotovesiin happamuutta seurannan alkuvaiheissa.

Hienon rikastushiekan pilottirakenteissa tuhkasta valmistetun peitekerroksen suotoveden pH oli vuoden seurannan jälkeen noin 8 eli lähes kolme yksikköä suurempi kuin vastaavan kipsistä valmistetun peitekerroksen suotoveden pH. Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida, että lysimetrissä 10 suotautuneen veden määrä oli huomattavasti pienempi (vaikutus L/S suhteeseen), jolloin kipsin happamuuden huuhtoutuminen on ollut hitaampaa (suotovesimäärät esitetty raportissa myöhemmin).

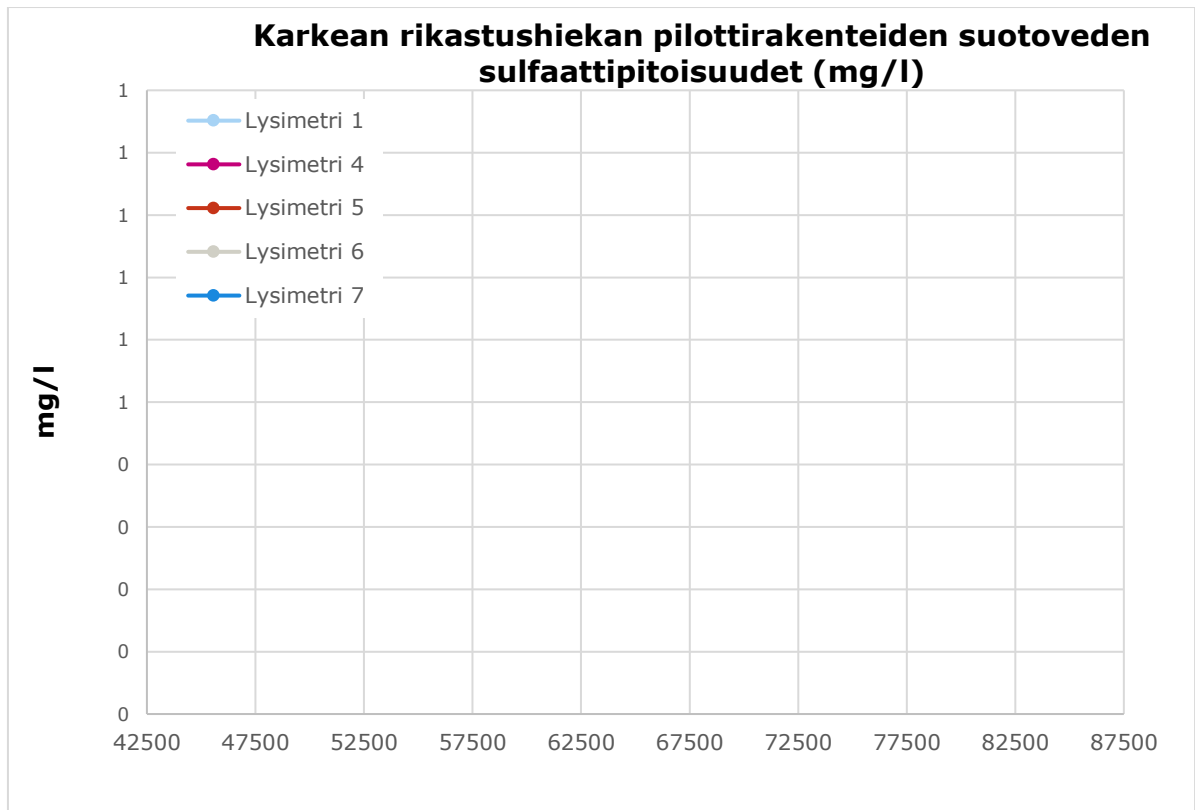


Kuva 9. Pyhäsalmen karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien sähkönjohtavuustulokset.

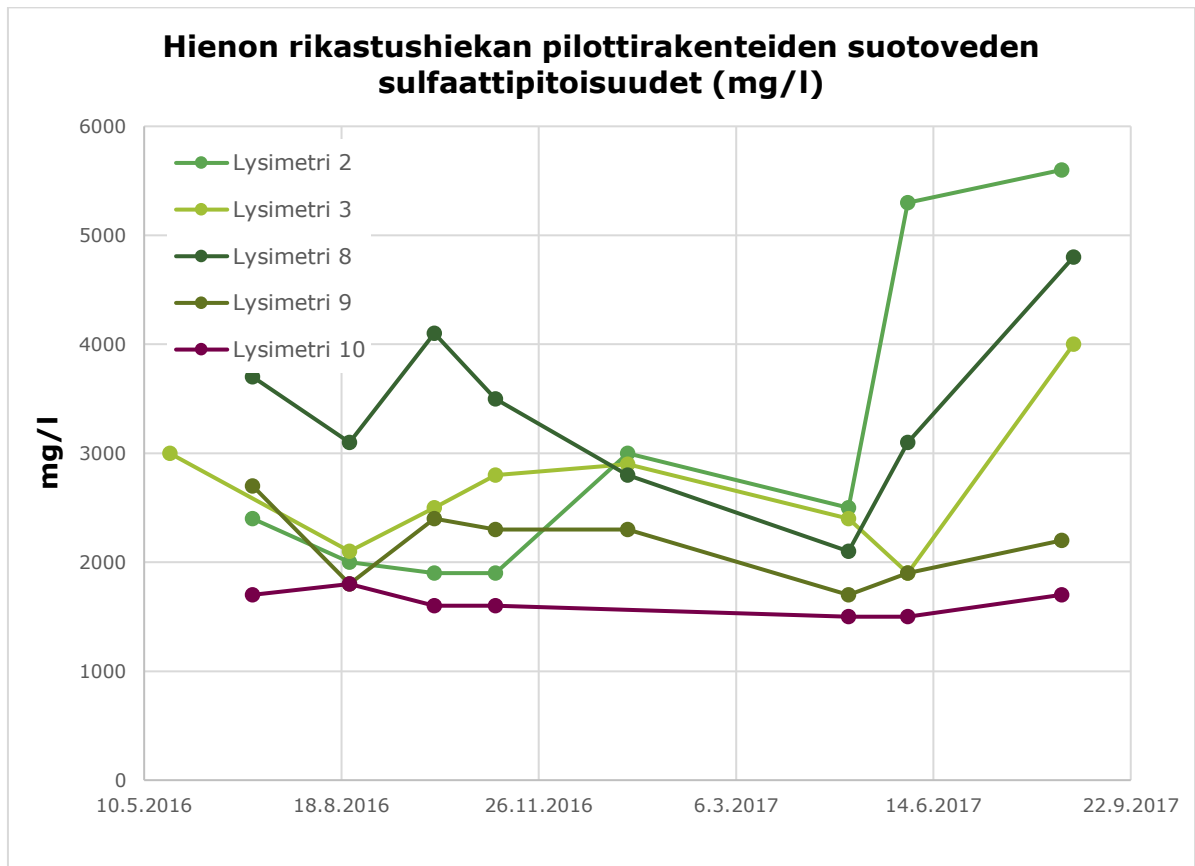


Kuva 10. Pyhäsalmen hienon rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien sähkönjohtavuustulokset.

Sähkönjohtavuus oli aluksi karkean rikastushiekan rakenteissa pienempi kuin hienon rikastushiekan rakenteissa (kuvat 9 ja 10). Lähes kaikissa rakenteissa sähköjohtavuus nousi seurantajakson aikana, mikä kertoo veteen liuenneiden suolojen eli tässä tapauksessa todennäköisesti sulfaattipitoisuuden kasvamisesta.



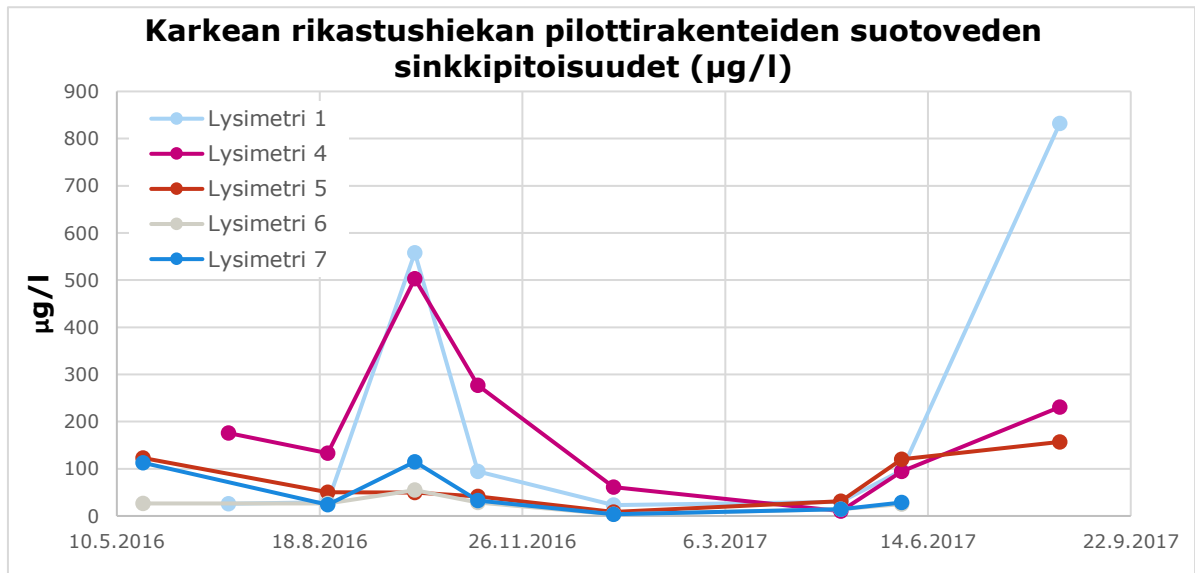
Kuva 11. Pyhäsalmen karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien sulfaattipitoisuudet.



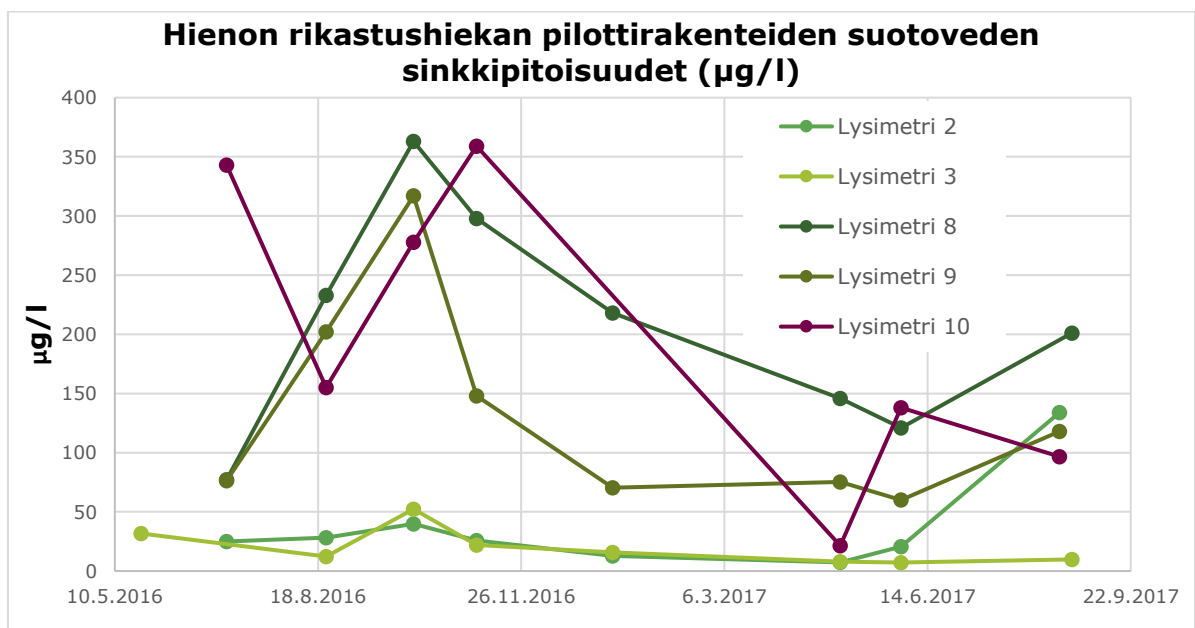
Kuva 12. Pyhäsalmen hienon rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien sulfaattipitoisuudet.

Sulfaattipitoisuuden nousun aiheuttaa rikastushiekan sisältämien sulfidien hapettuminen sulfaateiksi. Karkearakeinen rikastushiekka hapettui eli suotoveden sulfaattipitoisuus kasvoi pilotoinnin aikana (kuva 11). Kuvasta 12 nähdään, että hienorakeinen rikastushiekka oli jo jonkin verran hapettunut pilotoinnin alkaessa. Rikastushiekkojen sisältämät alkuperäiset liukoiset sulfaattipitoisuudet olivat myös korkeat: 17 300 mg/kg (karkea rikastushiekka) ja 18 100 mg/kg (hieno rikastushiekka), liukoisuustestien tulokset on esitetty liitteessä 2. Myös tuhkan liukoinen sulfaattipitoisuus oli korkea 16 600 mg/kg (liite 2).

Rikastushiekkojen sisältämien alkuaineiden liukoisten pitoisuuksien perusteella rakenteista liukee suotovesiin herkimmin sinkkiä ja mangaania (liite 2). Lisäksi tuhkassa alumiinin ja kipsissä kuparin liukoiset pitoisuudet olivat korkeammat kuin muissa pilotoinneissa käytetyissä materiaaleissa. Seurannan aikana suotovesissä havaittiin myös kohonneita nikkelpitoisuuksia.

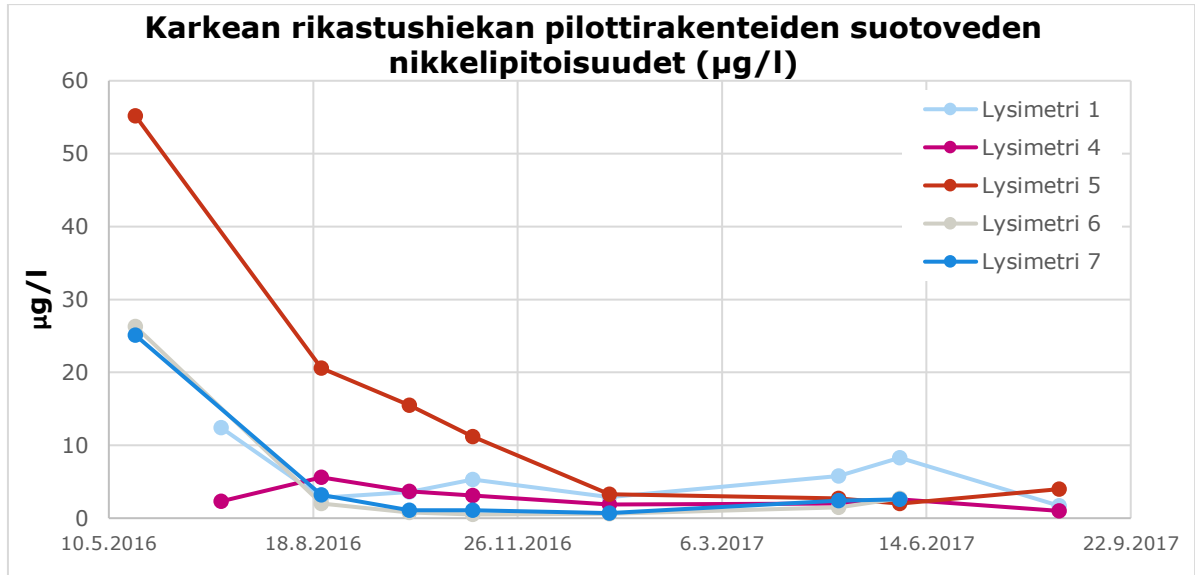


Kuva 13. Pyhäsalmen karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien sinkkipitoisuudet.

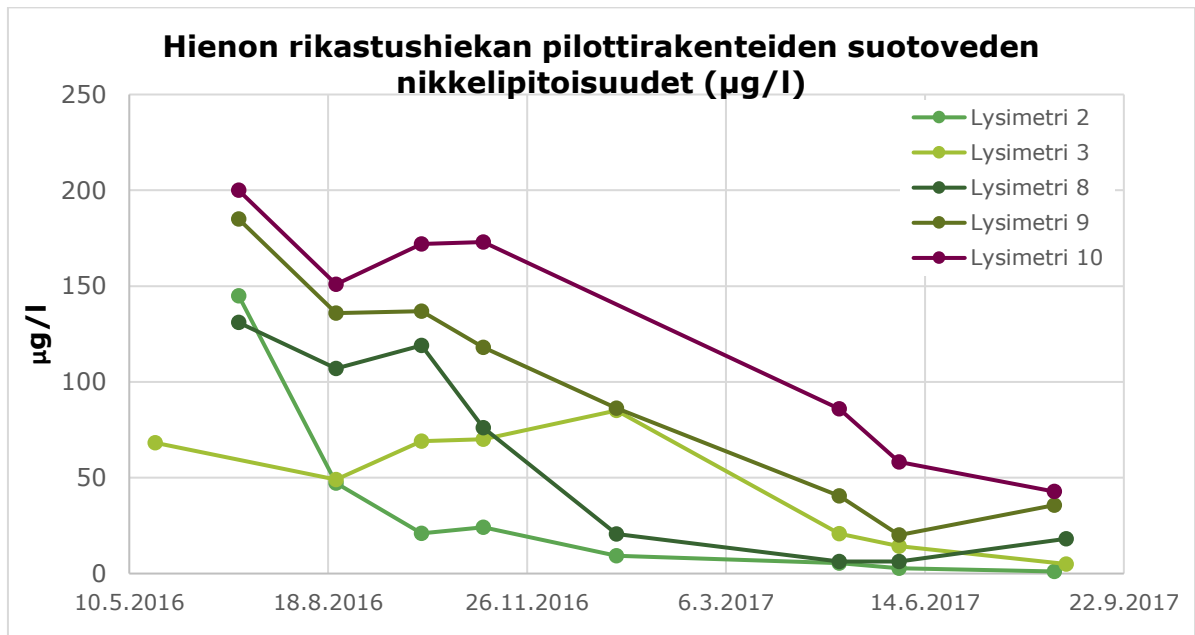


Kuva 14. Pyhäsalmen hienon rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien sinkkipitoisuudet.

Sinkin liukoisuus väheni pH:n muuttuessa emäksisemmäksi, mikä on nähtävissä sinkkipitoisuuksien osalta lähes kaikkien pilottirakenteiden suotovesitutkimuksissa (kuva 13 ja 14). Lysimetreissä 8, 9 ja 10 pH:n muutos on ollut maltillisempi, jolloin sinkkiäkin on liuennut enemmän. Tuloksiin vaikuttaa myös rakenteen läpäisseen suotoveden vaihteleva määrä.

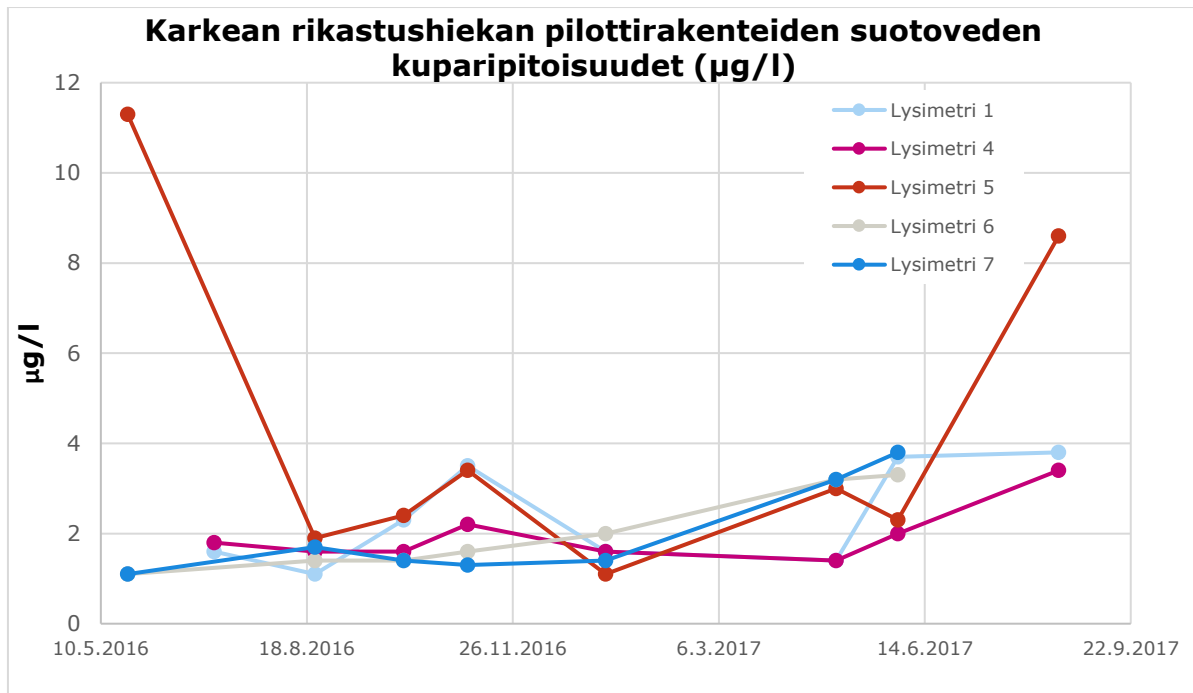


Kuva 15. Pyhäsalmen karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien nikkelpitoisuudet.

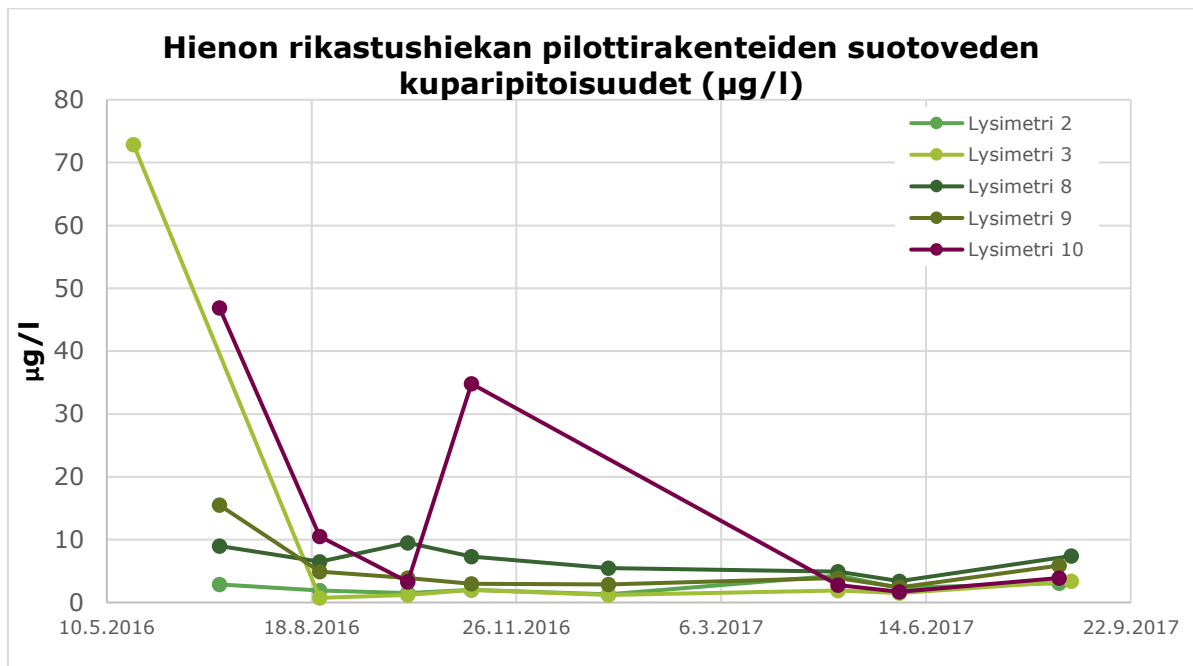


Kuva 16. Pyhäsalmen hienon nikkeli-rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien nikkelpitoisuudet.

Seurantajakson aikana pilottirakenteiden suotovesien nikkelpitoisuus pääsääntöisesti väheni (kuvat 15 ja 16). Karkean rikastushiekan suotovesien nikkelpitoisuus oli koko seurannan ajan hyvin pieni ($<20 \mu\text{g/l}$). Hienon rikastushiekan pilottirakenteissa suotovesien nikkelpitoisuus on ollut alkutilanteessa huomattavasti korkeampi kuin karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesissä ($>50 \mu\text{g/l}$), mihin todennäköisesti vaikutti hienon rikastushiekan happamuus, jolloin nikkeliäkin liukeni enemmän.

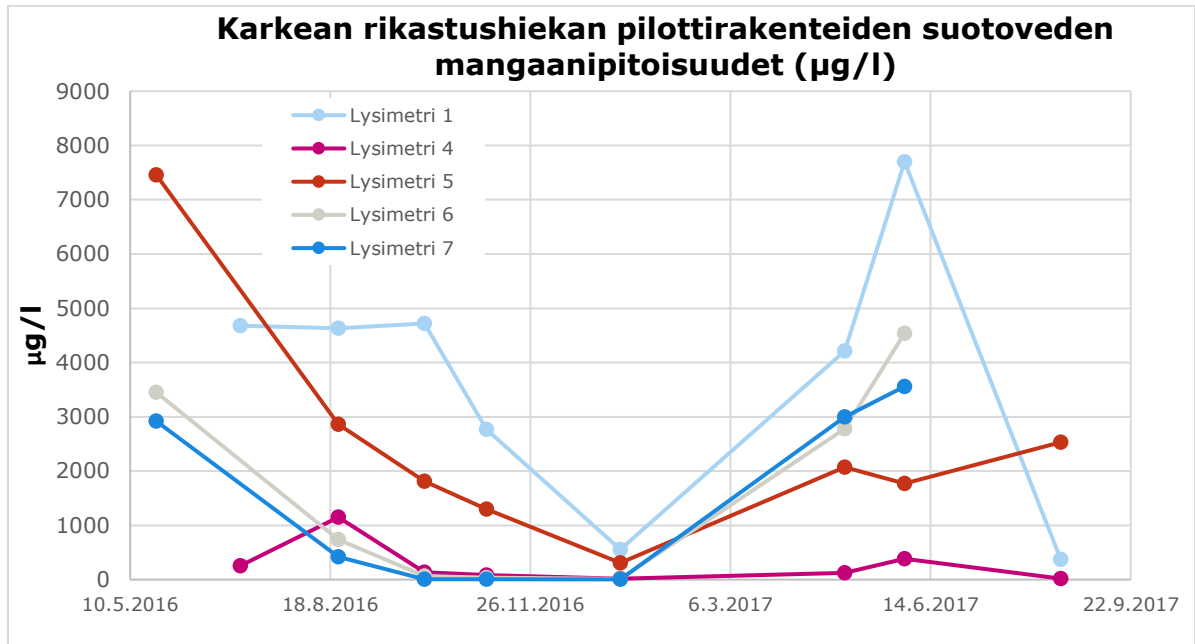


Kuva 17. Pyhäsalmen karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien kuparipitoisuudet.

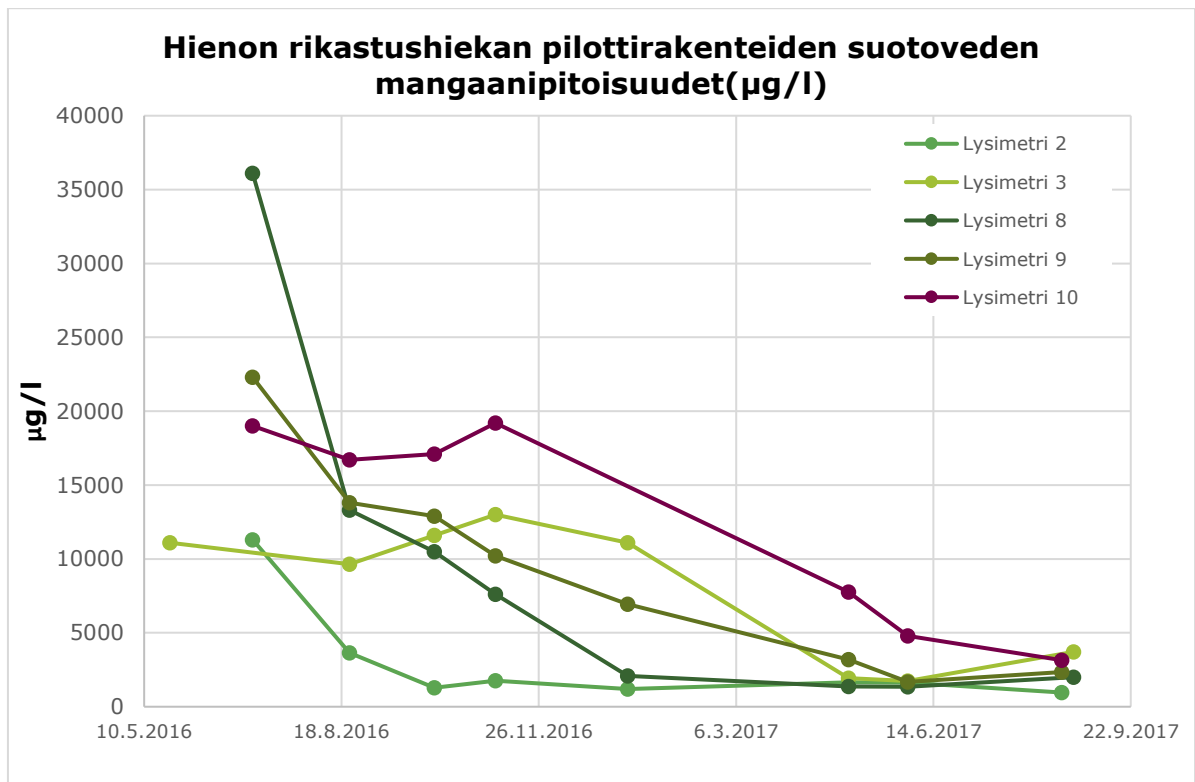


Kuva 18. Pyhäsalmen hienon rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien kuparipitoisuudet.

Määritetyt kuparipitoisuudet olivat karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesissä erittäin pieniä (noin $1 < 4 \mu\text{g/l}$), jolloin pitoisuuksien vaihtelut selittää todennäköisimmin tavallinen mittausepävarmuus (kuva 17). Suurimmat pitoisuudet olivat peittämättömän rakenteen suotovesissä (lysimetri 5). Korkeimmat kuparipitoisuudet havaittiin hienon rikastushiekan suotovesissä lysimetrissä 3 ($72,9 \mu\text{g/l}$) ja lysimetrissä 10 ($46,9 \mu\text{g/l}$), mikä saattaa selittyä muita rakenteita pienemmällä suotautuneen veden määrällä (kuva 18). Pääosin myös hienon rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien kuparipitoisuudet olivat vähäisiä ($< 10 \mu\text{g/l}$) ja pitoisuuksien vaihteluväli erittäin pieni.

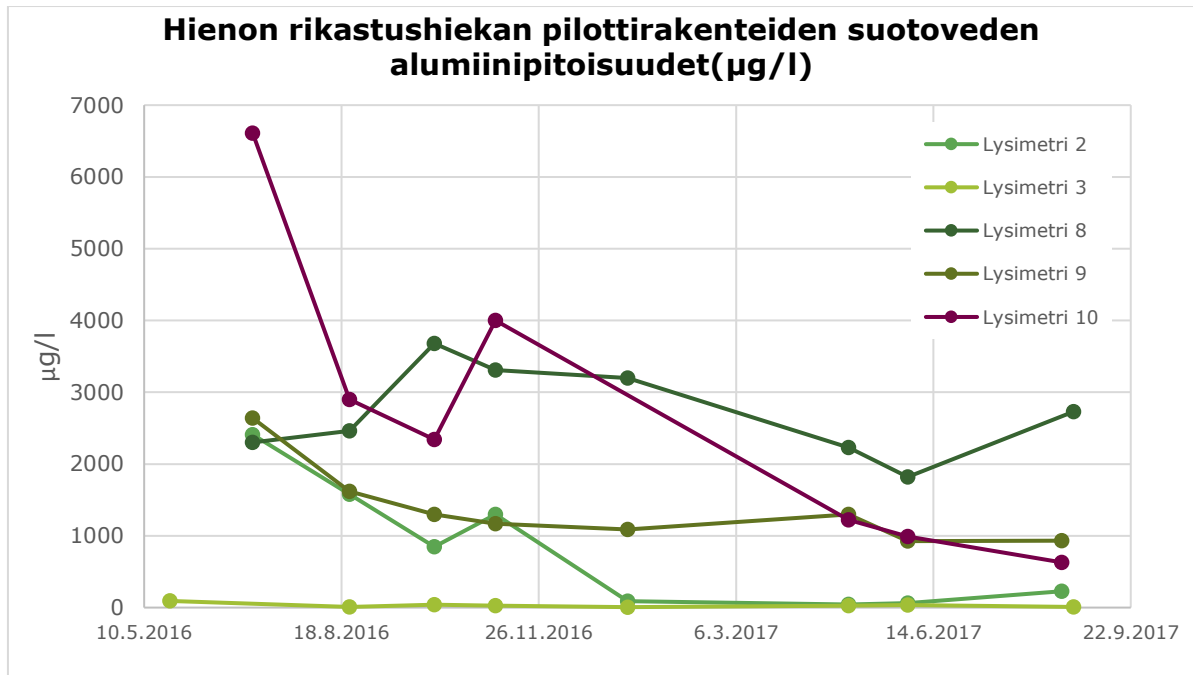


Kuva 19. Pyhäsalmen karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien mangaanipitoisuudet.



Kuva 20. Pyhäsalmen hienon rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesien mangaanipitoisuudet.

Materiaaleista tutkitut mangaanin liukoiset pitoisuudet olivat korkeita molempien rikastushiekkojen lisäksi kipsissä (liite 2). Mangaanin pitoisuudet karkean rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesissä olivat vaihtelevia ja alkutilanteessa huomattavasti hienomman rikastushiekan koerakenteita matalampia (kuvat 19 ja 20). Hienomman rikastushiekan rakenteiden suotovesissä mangaanipitoisuudet laskivat alkutilanteen jälkeen huomattavasti.



Kuva 21. Pyhäsalmen hienon rikastushiekan pilottirakenteiden alumiinipitoisuudet.

Seurannan aikana hienon rikastushiekan pilottirakenteiden suotovesissä todettiin vaihtelevia alumiinipitoisuuksia (kuva 21). Kaikki materiaalit sisälsivät alumiinia, jonka korkein liukoinen pitoisuus oli tuhkassa 110 mg/kg (liite 2). Pilottirakenteiden suotovesissä korkein alumiinipitoisuus oli kuitenkin kipsistä valmistetun peitekerroksen 10 suotovesinäytteessä (6610 $\mu\text{g/l}$). Korkeaan pitoisuuteen vaikuttaa todennäköisesti rakenteen läpi suotautuneen veden vähäinen määrä. Tuhkasta valmistettujen peitekerrosten suotovesien alumiinipitoisuudet olivat vähäisiä, jolloin alumiini ei liuenut merkittävässä määrin tuhkasta suotovesiin.

Taulukko 8. Pyhäsalmen pilottirakenteiden suotovesien määrät 18.8.2017 mennessä.

Rakenteen nro	Suotautunut vesi (l)			
	Lysimetri	Pohjakaivo	Yhteensä	
Säiliö 1	218	1051	1268	<div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="width: 20px; height: 20px; background-color: #d3d3d3; border: 1px solid black;"></div> Hieno rikastushiekka </div> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="width: 20px; height: 20px; background-color: #f5deb3; border: 1px solid black;"></div> Karkea rikastushiekka </div>
Säiliö 2	353	652	1005	
Säiliö 3	486	1214	1540	
Säiliö 4	142	1158	1299	
Säiliö 5	376	1132	1508	
Säiliö 6	514	487	1001	
Säiliö 7	414	1137	1551	
Säiliö 8	349	1250	1599	
Säiliö 9	179	1285	1463	
Säiliö 10	122	156	278	

Taulukko 9. Pyhäsalmen pilotointi, veden pidättyminen rakenteeseen verrattuna sadantaan (ei huomioida haihduntaa), ylärivissä karkean rikastushiekan pilottirakenteet, alarivissä hienon rikastushiekan pilottirakenteet.

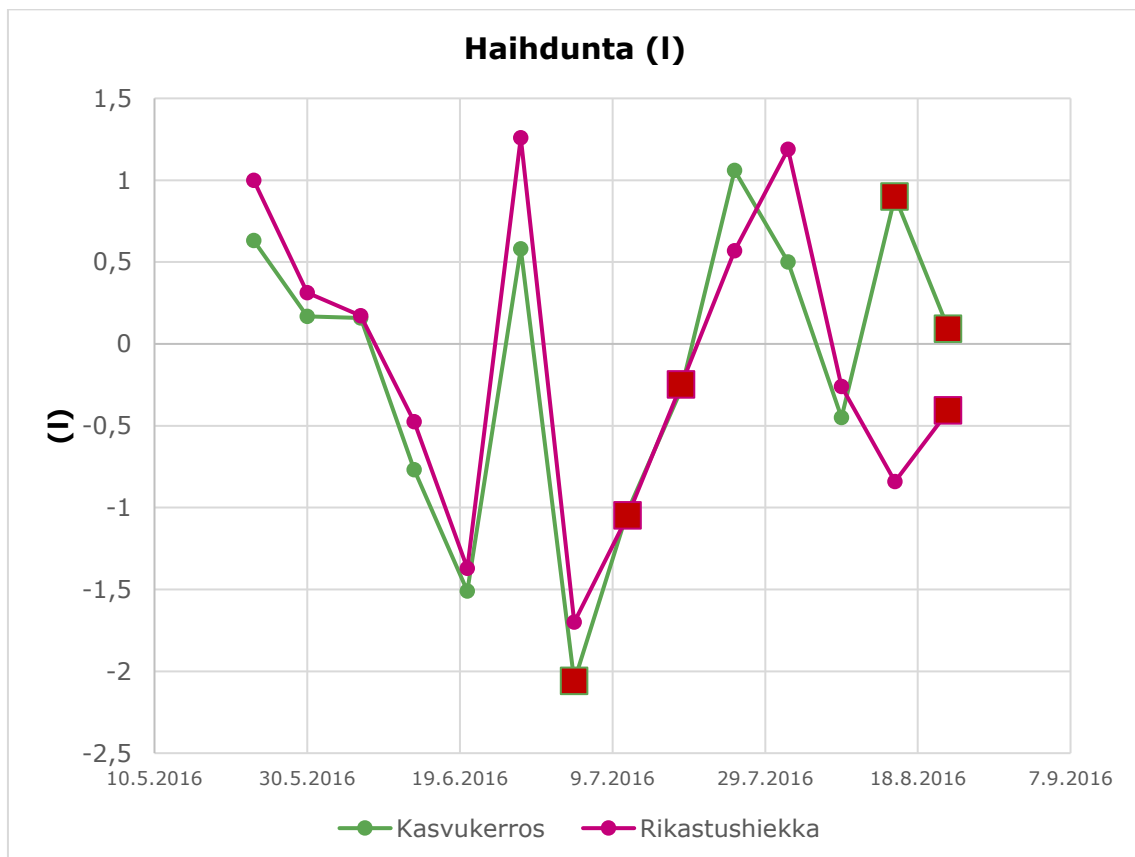
Sadeveden määrä säilötä kohden (l):					
4.7.2016	22.8.2016	4.10.2016	4.11.2016	10.1.2017	1.5.2017
545	986	1161	1214	1332	1532
Rakenteen läpäisseen vedenmäärä (l):					
	Lysimetri 1	Lysimetri 2	Lysimetri 3	Lysimetri 4	Lysimetri 5
4.7.2016	16	32		31	48
22.8.2016	215	173	356	183	240
4.10.2016	68	228	436	103	107
4.11.2016	71	70	90	55	83
10.1.2017	205	347	619	185	320
1.5.2017	172	244	236	159	192
	Lysimetri 6	Lysimetri 7	Lysimetri 8	Lysimetri 9	Lysimetri 10
4.7.2016			74	227	3
22.8.2016	218	452	205	206	25
4.10.2016	55	87	102	95	6
4.11.2016	32	73	74	65	11
10.1.2017	86	186	291	176	
1.5.2017	61	169	186	167	48
Rakenteen pidättämän veden osuus:					
	Lysimetri 1	Lysimetri 4	Lysimetri 5	Lysimetri 6	Lysimetri 7
4.7.2016	97 %	94 %			
22.8.2016	78 %	81 %	76 %	78 %	54 %
4.10.2016	94 %	91 %	91 %	95 %	93 %
4.11.2016	94 %	95 %	93 %	97 %	94 %
10.1.2017	85 %	86 %	76 %	94 %	86 %
1.5.2017	89 %	90 %	87 %	96 %	89 %
	Lysimetri 2	Lysimetri 3	Lysimetri 8	Lysimetri 9	Lysimetri 10
4.7.2016	94 %		86 %	58 %	99 %
22.8.2016	82 %	64 %	79 %	79 %	97 %
4.10.2016	80 %	62 %	91 %	92 %	99 %
4.11.2016	94 %	93 %	94 %	95 %	99 %
10.1.2017	74 %	54 %	78 %	87 %	
1.5.2017	84 %	85 %	88 %	89 %	97 %

Pilottirakenteiden läpi suotautuneen veden määrää seurattiin pilotoinnin aikana. Tulokset on esitetty taulukoissa 8 ja 9. Säiliössä 10 ohuen kipsipeitteen rakenteessa suotoveden määrä oli selvästi vähäisin verrattuna muihin peiterakennearkaisuihin. Säiliössä 6 ja 2 vettä suotautui muiden säiliöiden keskiarvoon verrattuna (7 eniten vettä läpäissyttä säiliötä keskiarvo \approx 1500 litraa) noin 500 litraa vähemmän ja säiliössä 1 noin 300 litraa vähemmän. Tuloksissa tulee huomioida säiliön 6 hajoaminen, mikä havaittiin vasta pilotin purkuvaiheessa. Perinteisessä moreenipeiterakenteessa 4 vettä suotautui seurantajakson aikana noin 200 litraa keskiarvoa vähemmän.

Peittorakenteina kasvukerroksen alla RHk+tuukka (hienon rikastushiekan päällä, säiliö 3) ja kipsi+Mr (karkean rikastushiekan päällä, säiliö 7) vettä suotautui keskiarvoa hieman enemmän. Tämä voi selittyä sekoitettavien materiaalien väliin jääneillä kanavilla, eli seoksia ei saatu täysin homogeeniksesi. Pelkän kasvukerroksen läpi (säiliö 9) vesi vaikuttaisi kulkeutuvan lähes yhtä hyvin kuin peittämättömien rakenteiden. Säiliöihin oli asennettu ylivuotoputket, mikä selittää hyvin tiivistettyjen peitekerrosten rakenteiden vähäistä suotovesimäärää. Kovilla sateilla veden suotautuminen on ollut niin hidasta, että osa vedestä on valunut ylivuotoputken kautta pois rakenteesta.

Taulukon 9 perusteella tiiveimmät peiterakenteet saatiin eri vahvuisilla kipsikerroksilla. Ohuemman kipsikerroksen peiterakenteen (lysimetri 10) vedenläpäisyominaisuudet pysyivät lähes muuttumattomina vaihtelevista olosuhteista huolimatta. Paksumman kipsikerroksen rakenteen (lysimetri 6) läpi menneen veden määrä väheni eli käytännössä rakenne tiivistyi seurannan edetessä, tuloksissa tulee kuitenkin huomioida rakenteen hajoaminen, jonka ajankohta ei ole tiedossa. Myös muiden rakenteiden osalta vettä pidätty enemmän vuoden seurannan jälkeen. Ohuet tuhkapeitekerrokset olivat rakentamisen aikaisesta kastelusta huolimatta niin kuivia, että ne imivät seurannan alkuvaiheissa vettä itseensä. Tällöin tuhkapeiterakenteiden suotoveden pidättyminen oli tehokkaampaa seurannan alkutilanteessa verrattuna lopputilanteeseen. Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida rakenteiden mahdollinen jäätyminen loka-tammikuun aikana.

3.5 Pyhäsalmen haihduntatulokset

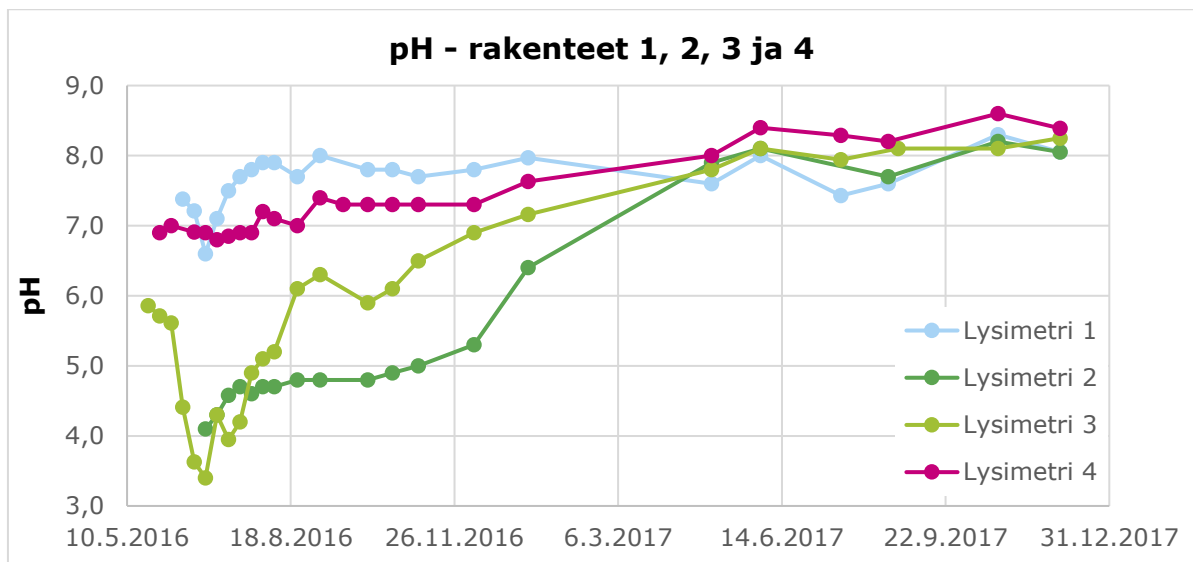


Kuva 22. Pyhäsalmen haihduntatulokset pilottirakenteiden läheisyyteen asennetuista mikrolysimetristä. Epäluotettavat tulokset merkattu punaisella neliöllä.

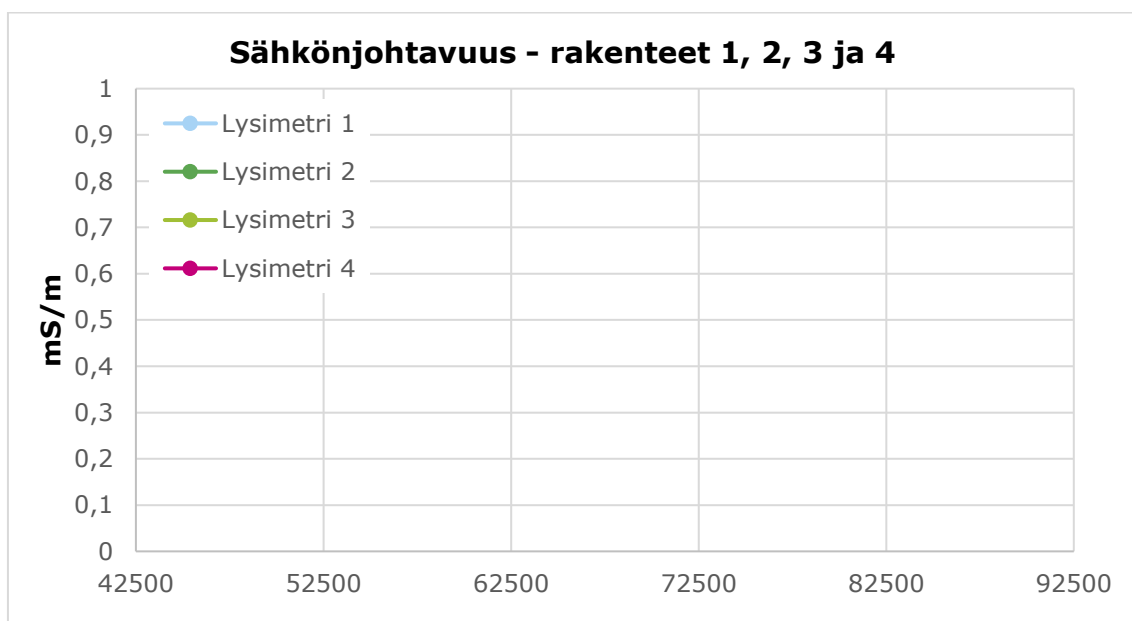
Pilotointialueen veden haihduntaa seurattiin kesän ajan viikoittain punnitsemalla mikrolysimetriämpärit. Haihdunta rikastushiekasta oli aluksi lähes kaksinkertainen verrattuna kasvukerroksen haihduntatuloksiin (kuva 22). Haihduntaan vaikuttaa materiaalien ominaisuuksien lisäksi väri, joka oli rikastushiekassa tummempi kuin kasvukerroksen väri.

Heinäkuussa ja elokuun lopulla tuloksia vääristää lysimetrien päälle seisomaan jäänyt vesi, vääristyneet tulokset on merkitty kuvaan 22 isommalla neliöllä. Materiaaleista kasvukerros oli tiivistynyt ajan kuluessa, jolloin ämpäriin jäi seisomaan vesikerros reunakorkeuden kasvaessa. Todennäköisesti tästä syystä elokuun kahdella viimeisellä punnituskerralla kasvukerroksen haihdunta on ollut rikastushiekkaan verrattuna suurempaa. Elokuun viimeisillä punnituskertoilla kasvukerrosämpäristä on kaadettu pois seissyttä vettä noin 1-1,5 litraa.

3.6 Pyhäsalmen pilotoinnin peiterakennemateriaalien vertailu



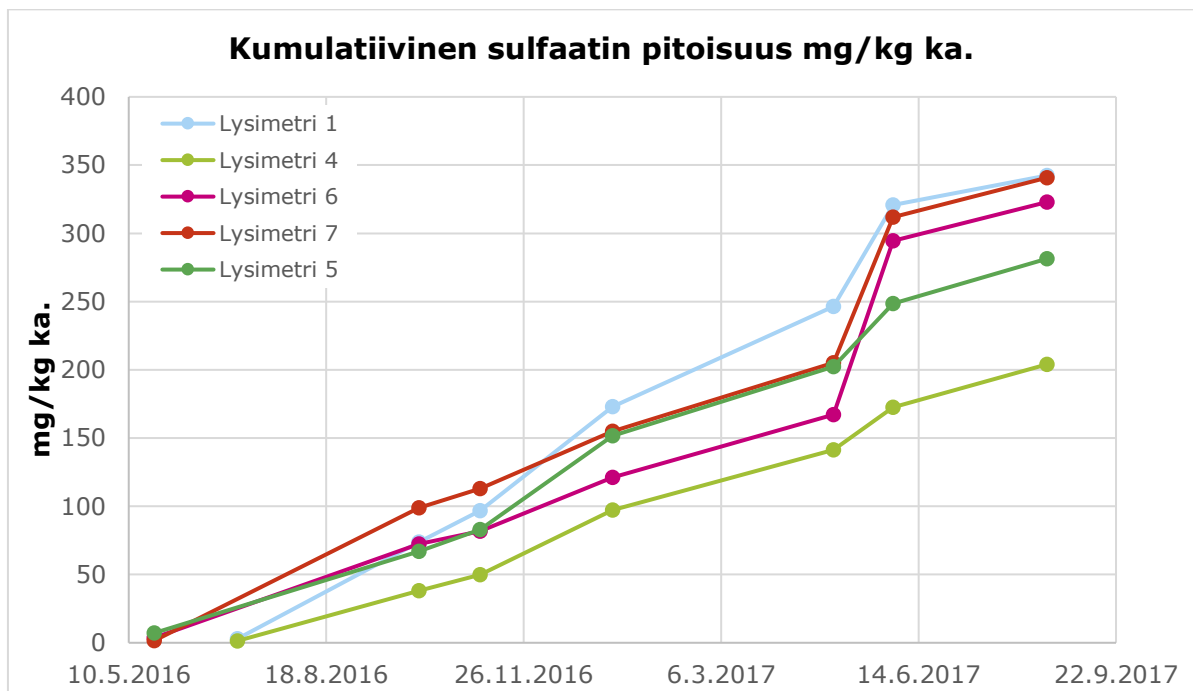
Kuva 23. Tuhkan vaikutus pH-arvoon.



Kuva 24. Tuhkan vaikutus sähkönjohtavuuteen.

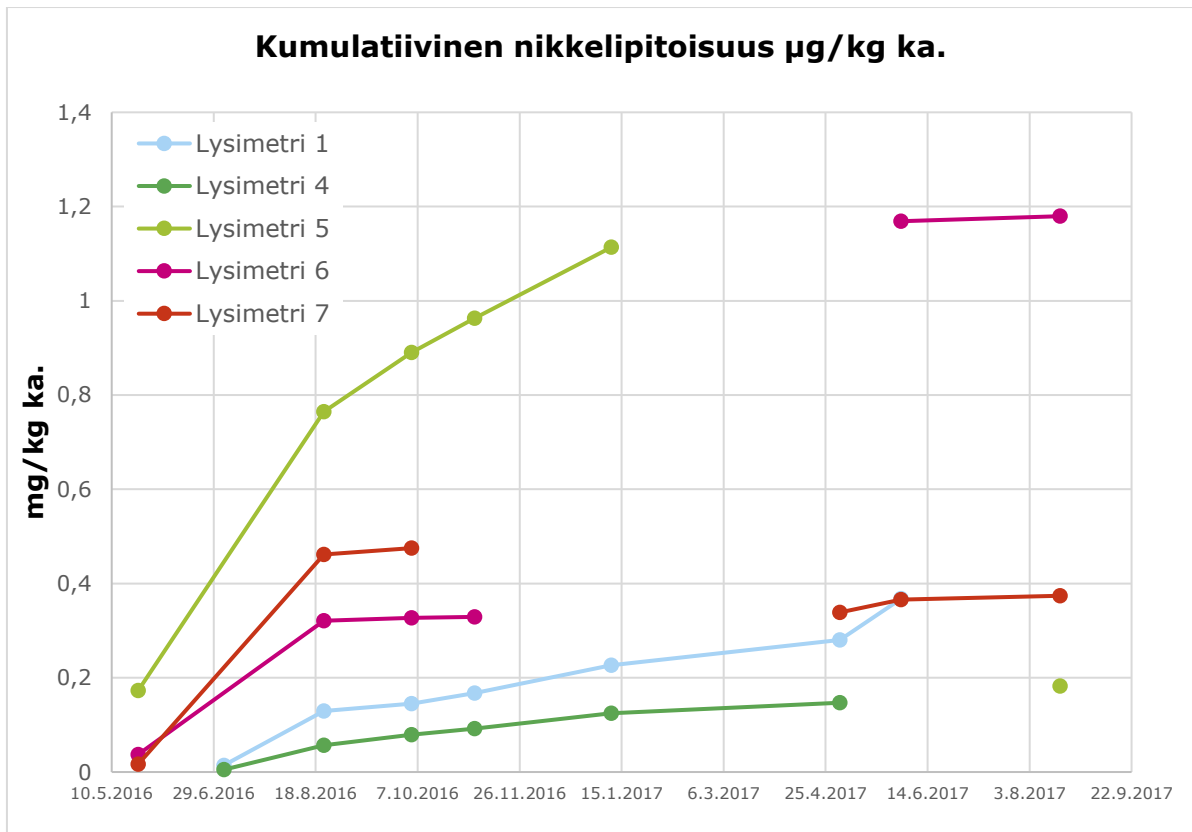
Tuhkaa sisältävissä rakenteissa tuhkamäärät olivat samat, mutta viipymäaikaan aktiivisessa tuhkakakerroksessa vaikutettiin sekoittamalla tuhka hienoon rikastushiekkaan pilottirakenteessa 3 (lysimetri 3). Tuhkan tarkoitus oli toimia rakenteessa reaktiivisena kerroksena, jonka tehokkuus on nähtävissä kuvasta 23. Tuhka-rikastushiekkakerros nosti lysimetrissä 3 suotoveden pH-tasoa kahdessa kuukaudessa lähes kolme yksikköä. Noin 100 mm tuhkakeroksella (lysimetrit 1 ja 2), jolloin reagoivan kerroksen paksuus oli noin viidesosa verrattuna rakenteeseen kolme, tuhkan vaikutus suotoveden pH-tasoon kahden kuukauden aikana oli noin yhden pH-yksikön tasoa. Tuhkasta valmistetun peitekerroksen vaikutus pH-tasoon oli perinteisen moreeni-peitekerroksen tasolla (lysimetri 4).

Tuhkan neutraloivaa vaikutusta suotovesiin voidaan arvioida myös sähkönjohtavuuden perusteella, sillä happamoitumisen hidastuminen vähentää sähkönjohtavuutta lisäävän sulfaatin liukenemistä suotoveteen. Toisaalta tuhka sisältää alun perin paljon liukoista sulfaattia. Karkean rikastushiekan rakenteen (rakenne 1) osalta sähkönjohtavuus selvästi nousee, kun vastaavasti pidemmän reaktiomatkan pilottirakenteen (rakenne 3) osalta suotoveden sähkönjohtavuus pysyy lähes muuttumattomana vuoden ajan (kuva 24). Hienon rikastushiekan ohuemman tuhka-peiterakenteen (rakenne 2) suotoveden sähkönjohtavuus alkoi nousta puolenvuoden seurannan jälkeen. Vastaava sähkönjohtavuuden nousu rakenteissa 1 ja 3 havaittiin noin vuoden päästä seurannan aloittamisesta. Tuhkasta valmistettujen peiterakenteiden suotovesien sähkönjohtavuus oli korkeampi kuin moreenirakenteella (rakenne 4).

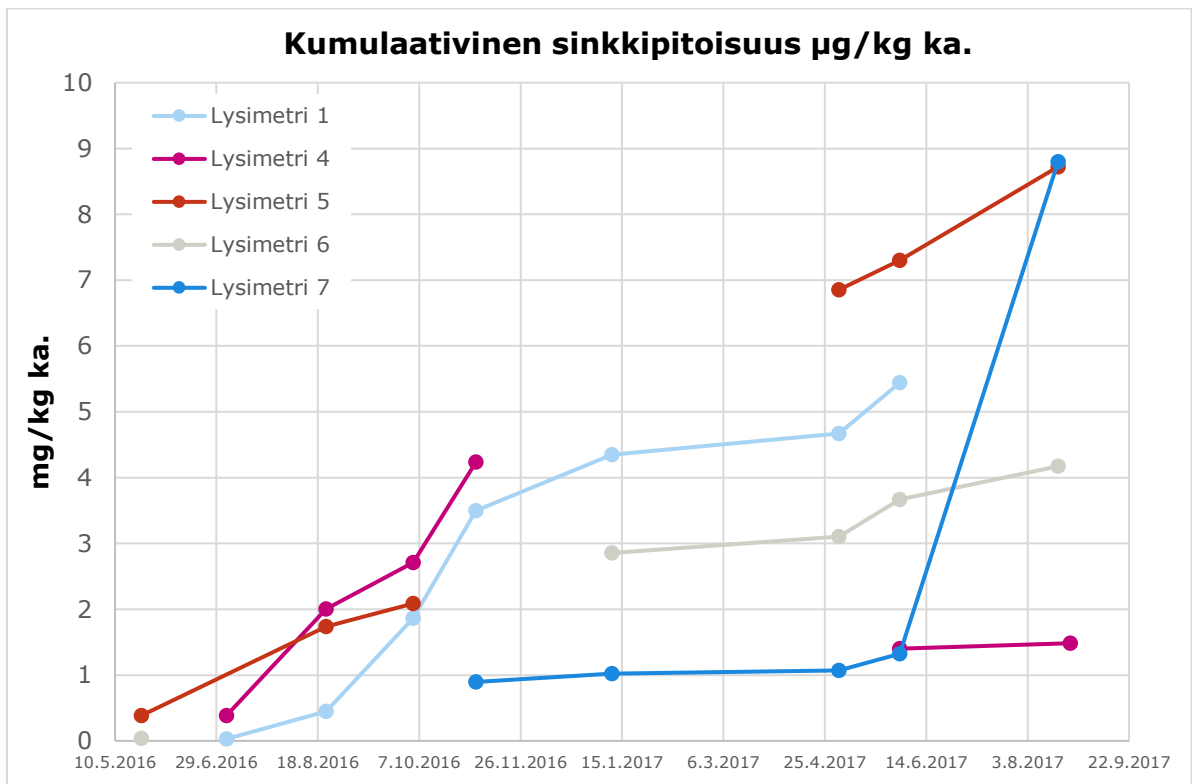


Kuva 25. Peitekerrosten vaikutus suotoveden sulfaatin määrään (karkea rikastushiekka).

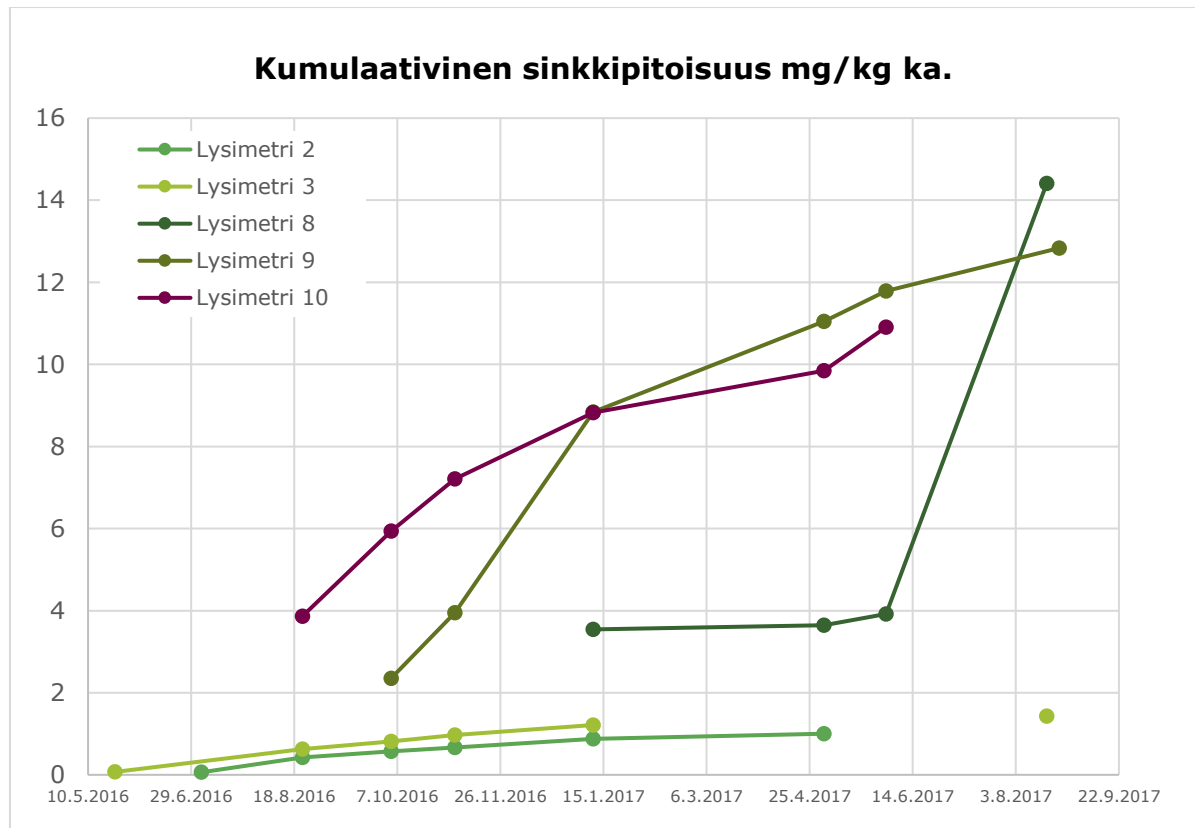
Karkearakeisen rikastushiekan pilottirakenteista sulfaatin liukenemiseen vaikutti parhaiten kipsi-peiterakenteet (lysimetrit 6 ja 7), jotka toimivat perinteiseen moreeni-peiterakenteeseen verrattuna ensimmäisen vuoden lähes yhtä tehokkaasti (kuva 25). Tuloksissa tulee huomioida moreeni-peiteen paksuus, jolloin rikastushiekan määrä rakenteessa on pienempi kuin kipsirakenteissa. Tuhka itsessään sisälsi paljon liukoista sulfaattia, jolloin sulfaattipitoisuuksien tarkastelu ei anna realistista kuvaa tuhkan toimivuudesta rakenteessa.



Kuva 26. Peitekerrosten vaikutus suotoveden nikkelin määrään (karkea rikastushiekka).



Kuva 27. Peitekerrosten vaikutus suotoveden sinkin määrään (karkea rikastushiekka).



Kuva 28. Peitekerrosten vaikutus suotoveden sinkin määrään (hieno rikastushiekka).

Haitallisista metalleista nikkelin liukeneminen karkean rikastushiekan pilottirakenteista oli seurannan aikana vähäistä (kuva 26). Uusiomateriaaleista valmistetuilla peitemateriaaleilla voitiin vaikuttaa liukoisuuteen selvästi. Nikkelin liukeneminen tuhkaitekerrosrakenteen suotovesiin (lysimetri 2) oli huomattavasti vähäisempää kuin peittämättömässä rakenteessa (lysimetri 5). Kipsipeitekerros (lysimetri 6) vähensi nikkelin liukoisuutta moreeni-peitekerrosta (lysimetri 4) tehokkaammin. Moreeni-kipsiseoksesta valmistettu peiterakenne vaikutti nikkelin liukoisuuteen vähiten.

Sinkin liukoisuus karkean rikastushiekan rakenteista oli vähäistä, sillä pH-olosuhteet olivat vain hetkellisesti selvästi happamat. Kuvan 27 perusteella sinkin liukoisuus lisääntyy noin puolenvuoden seurannan jälkeen moreeni- ja tuhkaiteiterakenteissa (lysimetrit 1 ja 4). Sinkin liukoisuus on vähäisintä 500 mm kipsipeitekerroksen vaikutuksesta (lysimetri 6). Kipsin sekoittaminen moreeniin (lysimetri 7) lisää hieman sinkin liukenemistä.

Uusiomateriaaleista valmistetuilla peitekerroksilla oli selkeä vaikutus sinkin liukoisuuteen hienon rikastushiekan pilottirakenteissa (kuva 28). Tuhkaitekerroksen (lysimetri 2) vaikutus sinkin liukenemiseen oli todennäköisesti neutralointitehon ansiosta noin kymmenkertainen verrattuna peittämättömään rakenteeseen (lysimetri 8). Tuhka-rikastushiekkaseoksella (lysimetri 3) sekä ohuella kipsikerroksella (lysimetri 10) vaikutus oli selvästi parempi kuin pelkällä kasvukerroksella (lysimetri 9) ja vähän ohutta tuhkaitekerrosta heikompi (noin 0,5 mg/kg).

3.7 Pyhäsalmen pilotoinnin purkuvaiheen tutkimustulokset

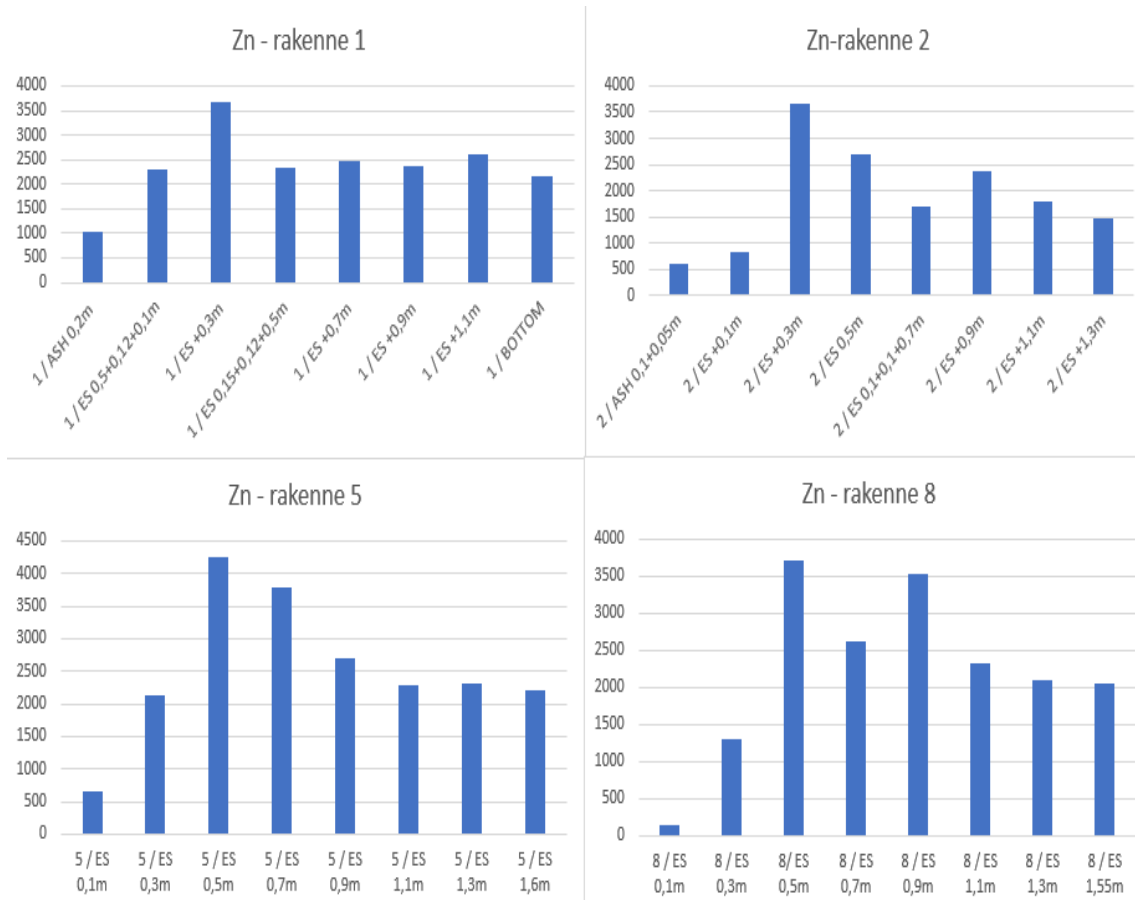
Pyhäsalmen pilotointi purettiin marraskuussa 2019. Rakenteiden purkamisen yhteydessä suotoveinäytteen lisäksi otettiin näytteet säiliöiden materiaalikerroksista. Näytteiden perusteella voitiin arvioida peiterakenteiden pitkäaikaista toimivuutta rikastushiekan hapettumisen perusteella.

Taulukko 10. Materiaalien pH-arvot pilotoinnin purkuvaiheessa (11/2019).

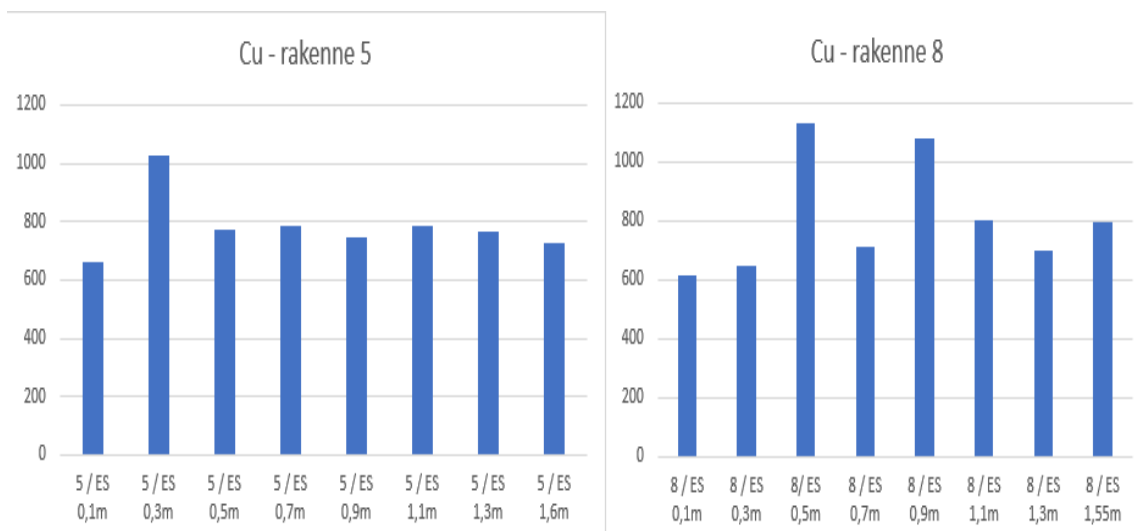
Rakenne 1		Rakenne 2		Rakenne 3		Rakenne 4		Rakenne 5					
Materiaali/Syvyys (m)	pH	Materiaali/Syvyys (m)	pH	Materiaali/Syvyys (m)	pH	Materiaali/Syvyys (m)	pH	Materiaali/Syvyys (m)	pH				
LT/0,2	7,1	LT/0,15	7,2	HRHK+LT 0,1	2,5	Moreeni-kerroksesta ei näytteitä		KRHK/0,1	2,8				
KRHK/0,27	3,0	HRHK/0,25	2,6	HRHK+LT/0,2	3,2			KRHK/0,3	2,9				
KRHK/0,3	5,7	HRHK/0,3	4,4	HRHK+LT/0,3	4,2			KRHK/0,5	4,6				
KRHK/0,32	7,2	HRHK/0,5	6,7	HRHK/0,65	5,8			KRHK/0,7	5,3				
KRHK/0,7	7,3	HRHK/0,7	7,1	HRHK/0,85	5,9			KRHK/0,9	6,7				
KRHK/0,9	7,4	HRHK/0,9	7,1	HRHK/1,05	7,5			KRHK/1,05	7,4	KRHK/1,1	5,6		
KRHK/1,1	7,2	HRHK/1,1	7,2	HRHK/1,25	6,2	KRHK/1,3	7,4	KRHK/1,3	6,8				
KRHK/1,3	6,5	HRHK/1,3	7,4	HRHK/1,45	6,5	KRHK/1,6	7,3	KRHK/1,6	7,3				
Rakenne 6		Rakenne 7		Rakenne 8		Rakenne 9		Rakenne 10					
Materiaali/Syvyys (m)	pH	Materiaali/Syvyys (m)	pH	Materiaali/Syvyys (m)	pH	Materiaali/Syvyys (m)	pH	Materiaali/Syvyys (m)	pH				
Kipsi-kerroksesta ei näytteitä		Moreeni+kipsikerroksesta ei näytteitä		HRHK/0,1	2,4	Kasvukerroksesta ei näytteitä		Kipsistä ei näytteitä					
				HRHK/0,3	2,8					HRHK/0,6	8,8	HRHK/0,4	8,0
				HRHK/0,5	5,0					HRHK/0,8	8,6	HRHK/0,6	8,4
KRHK/0,7	4,9	KRHK/0,75	7,1	HRHK/0,7	5,7	HRHK/1,0	8,4	HRHK/0,8	8,1				
KRHK/0,9	6,9	KRHK/1,05	7,2	HRHK/0,9	6,8	HRHK/1,2	8,5	HRHK/1,0	7,7				
KRHK/1,1	5,2	KRHK/1,25	7,2	HRHK/1,1	7,0	HRHK/1,4	8,5	HRHK/1,2	7,9				
KRHK/1,3	5,4	KRHK/1,45	7,3	HRHK/1,3	6,9	HRHK/1,6	8,4	HRHK/1,4	8,9				
KRHK/1,5	5,7	KRHK/1,55	7,2	HRHK/1,55	7,6	HRHK/1,8	7,8	HRHK/1,6	8,1				

Rakennekerrosten näytteiden pH-tulosten perusteella voimakas happamoituminen ($\text{pH} \leq 4$) rikastushiekassa ei ole edennyt 3,5 vuoden aikana yli 500 mm syvyyteen yhdessäkään kerrosrakenteessa (taulukko 10). Peittämättömässä karkean rikastushiekan rakenteessa (rakenne 5), pH on laskenut pH-arvon 3 alapuolelle noin 300 mm:n syvyydeltä, vastaava happamoituminen on havaittavissa myös peittämättömässä hienon rikastushiekan rakenteessa (rakenne 8). Peitekerroksen vaikutus rikastushiekan happamoitumiseen on havaittavissa moreeni-peiterakenteesta (rakenne 4), osasta kipsipeiterakenteista (rakenteet 7 ja 10) sekä 300 mm kasvukerroksen rakenteesta (rakenne 9), joissa kaikissa rikastushiekan pH on pysynyt neutraalina.

Tuhkerakenteen alapuolella materiaali on happamoitunut noin 50-100 mm matkalta (rakenteet 1 ja 2). Peitekerros, jossa tuhka on sekoitettu rikastushiekkaan, happamoitumista havaitaan 300 mm syvyyteen ja viitteitä happamoitumisesta on 700 mm syvyydessä asti, jossa pH on alle 6 (rakenne 3). Koerakentamisraportin perusteella materiaalien tiivistäminen on ollut vaihtelevaa, jonka lisäksi erityisesti hienon rikastushiekan raekoko on vaihdellut. Seosrakenteissa tuhkan ja rikastushiekan seoksen valmistaminen homogeeniseksi oli haastavaa. Epähomogeenin seos saattaa jättää rakenteeseen ilmataskuja, jotka mahdollistavat rikastushiekan hapettumisen ja siitä seuraavan happamoitumisen pidemmällä aikavälillä.



Kuva 29. Materiaalien sinkkipitoisuudet purkuvaiheessa (11/2019).



Kuva 30. Rikastushiekköjen kuparipitoisuudet purkuvaiheessa (11/2019).

pH-olosuhteet vaikuttavat materiaaleista suotoveden liukenevien metallien määrään. Kuvassa 29 on havainnollistettu sinkin liukoisuutta, kun pH-olosuhteet materiaalissa ovat olleet happamat. Pintakerroksen rikastushiekasta on happamissa olosuhteissa huuhtoutunut suurin osa sinkistä seuraavaan rikastushiekkakerrokseen. Tämän kerroksen jälkeen rikastushiekan sinkkipitoisuus on ollut rakenteen syvimmissä kerroksissa samaa tasoa. Vastaava tilanne on havaittavissa myös rikastushiekan kuparipitoisuuksien osalta (kuva 30).

3.8 Johtopäätökset / Pyhäsalmen pilotointi

Pyhäsalmen pintarakennepilotoinnissa käytettyjen karkean ja hienon rikastushiekan välillä on havaittavissa selkeä aktiivisuusero. Hienosta rikastushiekasta liukenee huomattavasti enemmän metalleja, lisäksi sen pH:ta alentava vaikutus on voimakkaampi kuin karkean rikastushiekan. Tämä selittyy materiaalin suuremmalla reaktiopinta-alalla, sillä liukenemisreaktiot ovat hiekan tapauksessa pintareaktioita. Karkean rikastushiekan kokonaispinta-ala on pienempi, jolloin myös materiaalin haittavaikutukset ovat pienemmät.

Tuhka toimii hyvin pH:ta nostattavana reaktiivisena peitekerroksena. Kipsikerroksen tarkoitus on toimia rakenteissa "kantena", joka vaikuttaa vedenläpäisevyyttä pienentävästi ja toisaalta kipsi vähentää myös veden haihtumista. Rakenteissa käytetyn kipsin pH oli hapan ($< 3,0$), jolloin pilotoinnin alkuvaiheissa muodostui hapanta suotovettä ja metalleja liukeni suotoveteen runsaammin.

Tiivein rakenne muodostui ohuella kipsipeitekerroksella hienon rikastushiekan päällä. Metallien liukoisuus selvästi heikkeni, kun suotoveden määrä oli vähäinen eikä vesi päässyt huuhtomaan hapanta rikastushiekkaa. Paksumman kipsikerroksen tiivistäminen todettiin hankalaksi, mikä vaikutti myös rakenteen vedenläpäisevyyteen eikä ohutta kerrosta vastaavaa "kansiominaisuutta" heti muodostunut. Rakenne kuitenkin tiivistyi seurannan edetessä. Kipsirakenteet olivat selvästi perinteistä moreenipeitettä tiiviimpiä.

Kipsi-moreeniseoksella vedenläpäisevyyteen ei voitu vaikuttaa, vaikka seos saatiin hyvin homogeenisoitua ja tavoitteiden mukaisesti tiivistettyä. Tiiveys oli samaa tasoa moreenirakenteeseen verrattuna. Rakenteiden kosteuteen vaikuttaa myös materiaalien erilaiset kapillaariset ominaisuudet, joiden ansiosta hieno rikastushiekka säilytti kosteuden karkeaa rikastushiekkaa paremmin.

Pilotoinnin tulosten perusteella uusiomateriaalit toimivat tutkitulla aikavälillä rikastushiekka-altaiden peiterakenteina yhtä hyvin kuin perinteinen moreenirakenne. Tutkimuksessa olosuhteiden muutokset eivät vaikuttaneet peitekerrosmateriaalien toimivuuteen, ja vedenläpäisevyysominaisuudet olivat samalla tasolla talven jälkeen kuin seurannan alkaessa.

Paksummalla reaktiivisella kerroksella (tuhka) voidaan tehokkaimmin vaikuttaa rikastushiekoista suotautuvien vesien pH-tasoon ja sitä kautta myös metallien liukoisuuksiin. Karkean hyvin vettä läpäisevän rikastushiekan peitekerroksena 100 mm tuhkerakos on liian pieni, jolloin tuhkan neutraloiva vaikutus ei riitä estämään rikastushiekan hapettumista pidemmällä aikavälillä. Hienon rikastushiekan peitekerroksena tuhkan reaktioaika pitenee rakenteen tiiveyden ansiosta, jolloin sen vaikutus esimerkiksi sinkin liukoisuuden vähentämiseen on vastaavaa kipsikerrosta tehokkaampi.

4. HITURAN KUITUSAVIPEITERAKENTEET / FORTUM

Belvedere Mining Oy:n Hituran kaivosalueella on noin 108 ha laajuinen nikkelin rikastuksen yhteydessä muodostuvan rikastushiekan loppusijoittamista varten muodostunut allasalue. UPACMIC-hankkeen aikana konkurssiin menneen kaivosyhtiön jälkitoimet siirtyivät Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskuksen vastuulle, ja alueen rikastushiekka-altaat oli peitettävä niiden ympäristövaikutusten minimoimiseksi. Kaivoksen sulkeminen suoritettiin kahdessa vaiheessa, joista ensimmäisessä alueen toinen suuri rikastushiekka-allas peitettiin. ELY-keskuksen projektikilpailutuksen voitti 1.vaiheen urakan osalta Fortum.

Alun perin peiterakenne piti toteuttaa mineraalimateriaalista: kuivakuorisavesta, siltistä tai silttimoreenista. Vaatimuksena oli, että kerros on homogeeninen ja vedenläpäisevyysarvo $k < 1 \times 10^{-8}$ m/s. Peittokerroksen paksuuden tuli olla ≥ 200 mm ja mineraalimateriaalin päälle tuli asentaa vielä 100 mm kasvukerros. Fortum ehdotti peiterakenteeksi alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen UPACMIC-hankkeeseen sopivaa ratkaisua, jossa peitekerroksessa hyödynnettiin paperiteollisuuden sivutuotteena muodostuvaa kuitusavea. Tämä vaihtoehtoinen rakenne hyväksyttiin ELY-keskuksella.

Kuitusavea oli tutkittu UPACMIC-hankkeen alkuvaiheissa laboratoriossa materiaalitestausvaiheessa, jossa luokitteluominaisuuksien lisäksi selvitettiin kuitusaven vaikutusta erilaisten runkoainemateriaalien (rikastushiekka ja moreeni) vedenläpäisevyyteen ja lujuteen. Lisäksi suotovesikokeessa tutkittiin kuitusavesta läpi suotautuvan veden ominaisuuksia ja niiden muutoksia. Fortum teki vielä lisätutkimuksia kuitusaven teknisistä ja ympäristöllisistä ominaisuuksista, jotta materiaalin soveltuvuus peitekerrokseen saatiin todennettua.

Hituran toisen rikastushiekka-altaan peittorakenteet toteutettiin Fortumin toimesta kuitusavesta sekä jäte- ja ylijäämämaista syksyn 2017 ja kevään 2018 aikana. Peiterakenteiden tilaajana toimi Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus, urakoitsijana Fortum Waste Solutions Oy ja suunnittelijana Ramboll Finland Oy.

4.1 Käytetyt materiaalit

Ennen varsinaisia peiterakenteita jokaista kuitusavimateriaalia testattiin noin 10 m x 20 m koekentissä, joiden avulla selvitettiin tarvittavan materiaalikerroksen paksuutta ennen tiivistystä ja tavoiteteiveyden saavuttamiseksi tarvittavat toimintatavat. Lisäksi rakenteiden säänkestävyyttä seurattiin noin kolme viikkoa kenttien rakentamisen jälkeen. Koerakentät tehtiin erikseen jokaiselle kolmelle kuitusaven toimittajalle (Metsä Tissue Mänttä, Stora Enso Oyj Oulu ja Metsä Board Oyj Äänekoski). Rakenteissa käytetyt kuitusavet täyttivät kaatopaikka- ja maarakennuskelpoisuuden.

Peitekerroksen tiivistäminen suoritettiin yliajamalla 20-30 tonnin painoisella telakaivinkoneella. Rakenteissa tiivistyksen jälkeen kerrospaksuus oli minimissään 250 mm, jolloin huomioitiin myös kuitusaven biohajoavuus. Muita tavoiteltuja ominaisuuksia olivat materiaalikohtaisesti määritellyn kuivatiheyden saavuttaminen ja vedenläpäisevyyden $1,0 \times 10^{-8}$ m/s alitus. Koekentissä laadunvalvonta tehtiin Troxler-mittauksilla. Tulosten perusteella kolmen yliajokerran jälkeen saavutettiin jokaisella kuitusavella tarvittava tiheys, joka johtaa ennakkoon tehtyjen laboratoriotutkimusten perusteella vaaditun vedenläpäisevyysarvon saavuttamiseen. Mittauksiin käytetyn Troxler-mittarin vesipitoisuuden ero uunikuivattuihin näytteisiin oli noin ± 10 %, jonka perusteella tarkkuus

arvioitiin, kuitusaven vaihteleva vesipitoisuus huomioiden, riittäväksi. Troxler-mittaustulokset on esitetty taulukoissa 11-13.

Taulukko 11. Mäntän tehtaan kuitusavella tehdyn koerakenteen kenttämittaukset 14.9.2017.

Troxler-pisteet	Yliajokerrat (edestakaisin)	Kerrospaksuus (mm)	Kuivatiheys (kg/m ³)	Märkätiheys (kg/m ³)	Vesipitoisuus (%)
TRX1-5	1	320	441	1200	173
TRX6-10	2	290	475	1222	162
TRX11-14	3	280	542	1248	131

Taulukko 12. Äänekosken tehtaan kuitusavella tehdyn koerakenteen kenttämittaukset 27.3.2018.

Troxler-pisteet	Yliajokerrat (edestakaisin)	Kerros-paksuus (mm)	Kuivatiheys (kg/m ³)	Märkätiheys (kg/m ³)	Vesipitoisuus (%)
TRX15	3	290	489	1257	156,8
TRX16	3	280	493	1272	158,2
TRX17	3	300	493	1272	158,7

Taulukko 13. Oulun tehtaan kuitusavella tehdyn koerakenteen kenttämittaukset 22.5.2018.

Troxler-pisteet	Yliajokerrat (edestakaisin)	Kuivatiheys (kg/m ³)	Märkätiheys (kg/m ³)	Vesipitoisuus (%)
TRX18	3	860	1287	49,6
TRX19	3	970	1463	50,8
TRX20	3	985	1441	46,3
TRX21	3	999	1445	44,6
TRX22	3	1004	1404	39,9

Hituran kaivoksen sulkutoimenpiteiden ensimmäisessä vaiheessa peitetyn rikastushiekka-altaan kokonaispinta-ala oli 265 092 m², josta kuitusavella peitettiin noin 148 850 m² (alueet rajattu karttaan liitteessä 3). Noin 250 mm kerrospaksuudella peiterakenteisiin on käytetty vähintään 37 213 m³ kuitusavimateriaalia (tilavuus laskettu tiivistetystä materiaalista). Loput altaan pinta-alasta peitettiin käyttäen jäte- ja ylijäämämaita. Kuitusaven käytöllä moreenia säästettiin vähintään 29 770 m³ (tilavuus laskettu lopullisesta tiivistetystä rakenteesta).

4.2 Kuitusavella rakentaminen ja sen varastointi

Kuitusavet kuljetettiin talven aikana rakennuspaikalle ja ne varastoitettiin kolmeen kasaan eri materiaalin toimittajien mukaisesti (kuva 31). Materiaalit pyrittiin pitämään erillään toisistaan, sillä materiaalit olivat erilaisia olomuodoltaan ja ominaisuuksiltaan, erilaisen syntyprosessinsa seurauksena ja esimerkiksi materiaalien vesipitoisuudet vaihtelivat. Aistinvaraisesti voitiin havaita esimerkiksi materiaalien väreissä eroavaisuuksia.



Kuva 31. Kuitusaven varastointi.

Kuitusavella rakentaminen ei vaatinut tavanomaisesta rakentamiskalustosta poikkeavia laitteita. Materiaalin tiivistäminen tavoitetiheyteen sekä materiaalin tasoittaminen onnistui tavallisella telakaivinkoneella. Suurin haaste rakentamisen aikana oli kuitusaven pitkä kuljetusmatka ja rakennusalueen reitittäminen kuljetusajoneuvoille.

Rakentaminen onnistui parhaiten kuivissa olosuhteissa, pienikin vesisade keskeytti rakentamistyöt. Levitetty ja tiivistetty kuitusavi tulee peittää välittömästi, jotta estetään materiaalin kuivuminen. Parhaimmillaan kuitusavipeittokerrosta voitiin rakentaa noin 1 ha/12 h. Kuitusavipeitekerroksen rakentamista on havainnollistettu kuvassa 32.



Kuva 32. Peittokerroksen rakentamista kuitusavella.

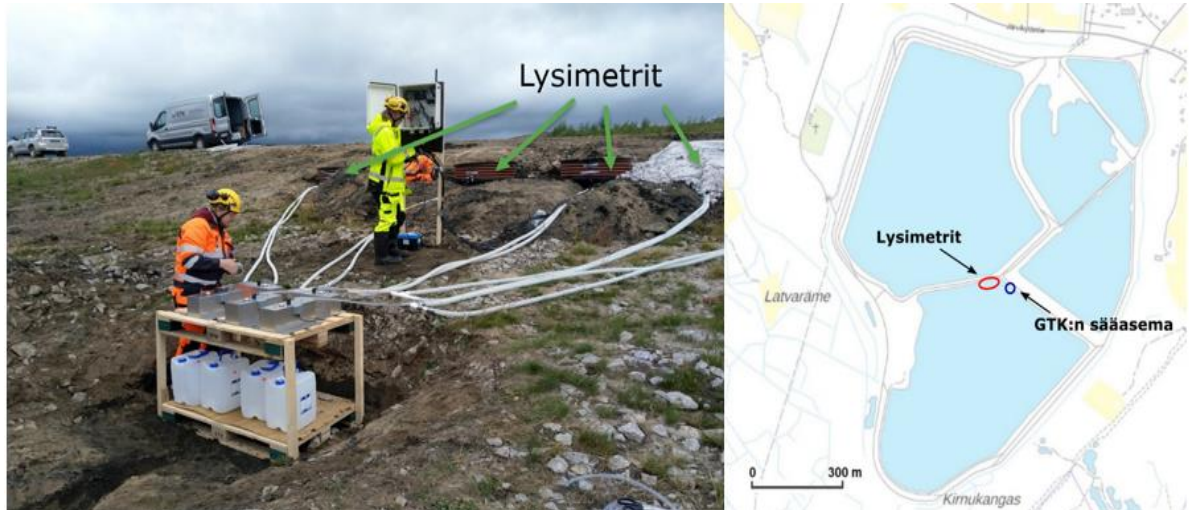
Taulukko 14. Kuitusavien rakentamisen aikaiset toteutuneet ja tavoite tiheydet.

Kuitusavi	Tavoitetiheys (kg/m³)	Toteutunut tiheys (keskiarvo kg/m³)
Oulu (OPAsakka)	860	976
Äänekoski	485	544
Mänttä	445	497

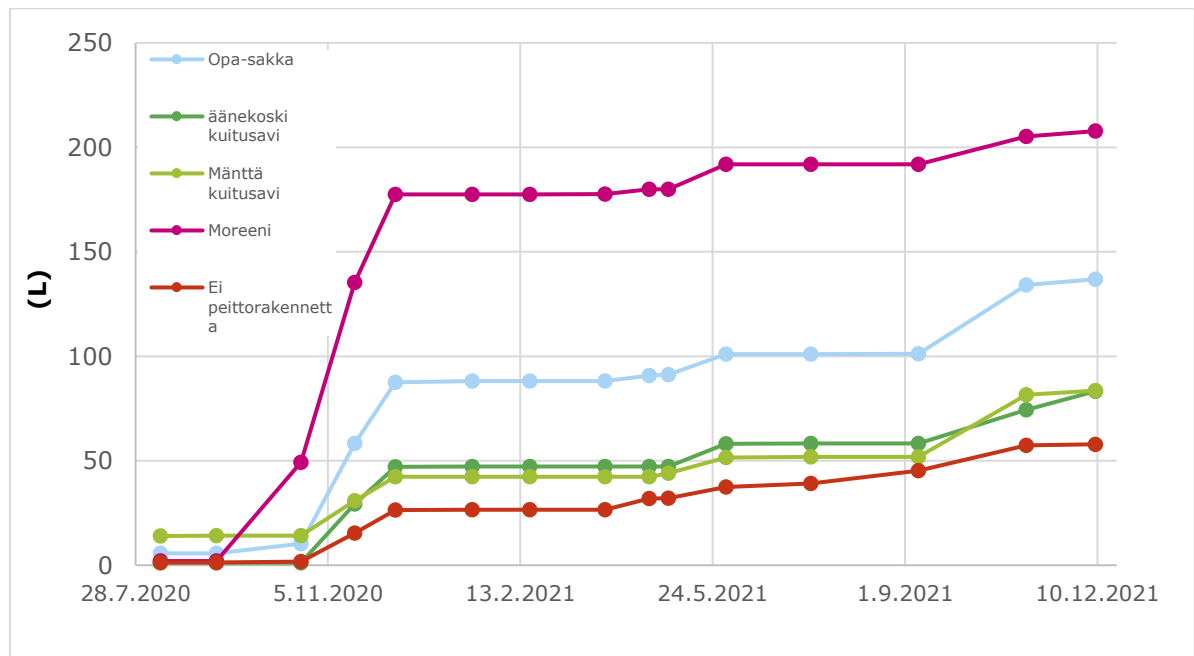
Rakentamisen aikana kuitusavipeitekerrosten toteutunutta tiheyttä seurattiin. Taulukossa 14 esitettyjen tulosten perusteella tiheystavoitteet saavutettiin kaikilla käytetyillä kuitusavimateriaaleilla.

4.3 Peiterakenteiden seuranta

Kuitusavipeiterakenteiden toimivuutta testattiin noin 300 mm korkeista ja 1000 mm halkaisijaltaan olevilla lysimetreillä, jotka rakennettiin Geologian tutkimuskeskuksen toimesta 9-10.7.2020 rikastushiekka-altaan reunaan todellisia peiterakenteita vastaavilla materiaalikerroksilla. Lysimetrien 1-4 päälle asennettiin erilaiset 250 mm tiivistyskerrokset (kuitusavet ja moreeni), joiden päälle tasettiin noin 200 mm moreeni- ja 100 mm kasvukerros. Referenssirakenne (lysimetri 5) toteutettiin pelkällä rikastushiekalla. Peiterakenteiden toimivuutta kuvasi alhainen vedenläpäisevyys.



Kuva 33. Lysimetrien asennus vasemmalla (GTK 2020) ja sijainti kohteella oikealla.



Kuva 34. Peiterakenteen läpäisseen veden kumulatiivinen määrä (GTK 2021).

Vedenläpäisevyytulosten perusteella (kuva 34) perinteinen moreenipeiterakenne päästi selkeästi eniten vettä läpi noin puolenvuoden seurannan aikana. Kuitusavipeitteistä Mäntän ja Äänekosken kuitusavet olivat lähes yhtä tiiviitä. Oulun kuitusaven läpi vettä pääsi noin 50 l enemmän kuin Mäntän ja Äänekosken kuitusavista. Toimivuuden pitkäaikaisseurannan sekä kaikki vedenlaatuun liittyvät tutkimustulokset on esitetty raportissa *B3 Quality control summarising report 2022*.

5. KUOPION PYSTYRISTERAKENNE / FORTUM

Kuopion Sorsasalon pystyeristerakenteen tehtävänä oli estää suotovesien ja niiden mukana haitta-aineiden valuminen vaarallisen jätteen läjitysalueelta tavanomaisen jätteen läjitysalueelle. Rakenteen avulla kaksi läjitysalueita voidaan erottaa toisistaan. Pystyeristerakenteelta vaadittava vedenläpäisy arvo oli $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Rakennetta testattiin 7.10.2020 koekentällä, jossa tarvittava tiiveys saavutettiin tiivistämällä savimateriaali kaivinkoneen kauhalla. Savimateriaali tiivistettiin muottiin (kuvassa 35), jonka avulla myös lopullisen seinämän tiiviskerros rakennettiin.



Kuva 35. Pystyeristeseinämän rakentamista muotilla.

Varsinaisen pystyeristeseinämän rakentaminen aloitettiin syksyn 2020 aikana ja rakenteesta noin puolet valmistui joulukuussa 2020. Seinämän tiiviskerroksen materiaalina käytettiin kahden eri alueen ylijäämäsavea, jonka tiheystavoitteet ja siihen vaadittavat työtavat selvitettiin ennen rakentamista koekentällä. Pystyeristerakennetta jatketaan keväällä 2022, kun jätekeskukseen läjitetyn materiaalin määrä kasvaa.

Savesta rakennetun seinämän ympärille läjitettiin uusiomateriaaleja tuki- ja kuivatuskerroksiksi. Rakenteessa käytettyjä materiaaleja on havainnollistettu liitteessä 4 esitetyssä poikkileikkauskuvassa. Kuivatuskerrosten väliin nouseva seinämä ei ole jatkuvasti veden alla vaan sitä vasten suotautuva vesi imeytyy kuivatuskerroksen läpi pohjalla oleviin salaojaputkiin, josta se kulkeutuu kaatopaikan hulevesijärjestelmään. Rakenteen toteutti Fortum Waste Solution Oy, suunnittelusta vastasi Afry Finland Oy ja laadunvalvonnasta Envineer Oy.

5.1 Pystyeristeseinämässä käytetyt materiaalit

Rakenteessa käytetyt materiaalit olivat ylijäämäsavea kahdesta eri kohteesta. Ennakkokokeiden perusteella savi oli todettu rakenteeseen sopivaksi. Savimateriaalille (Mäkelän savi) tehtiin koekenttä, jonka avulla selvitettiin työskentelytavat tarvittavan vedenläpäisevyysarvon saavuttamiseksi. Toista savimateriaalia (Hamulan savi) oli käytetty aiemmin vaarallisen jätteen pohjarakenteen laajennuksessa, jonka yhteydessä tehtiin myös koetiivistys ja selvitettiin tavoiteteiheyden vaadittavat työskentelytavat. Mäkelän savesta rakennetulla koekentällä tiiveysmittaukset tehtiin Troxlerilla, jonka tulosten perusteella tavoiteteiheydestä jäätin jonkin verran. Mutta koekentästä otetuista näytteistä tiivistettyjen vedenläpäisevyyskappaleiden testaamisen perusteella vedenläpäisevyystavoitteet kuitenkin saavutettiin.

Tiiviskerroksen viereen rakennettiin noin 500 mm leveä kuivatuskerros Riikinvoima Oy:n karkeasta pohjatuhkasta. Rakenteen tukitäytössä käytettiin vaarallisen jätteen läjitysalueen puolella Hituran vesienkäsittelysakkaa ja tuhkaa. Tavanomaisen jätteen läjitysalueen puolella käytettiin tuhkan lisäksi muuta loppusijoitettua jätettä kuten pilaantuneita maita ja raidesepeliä. Käytetyt materiaalit ja niiden määrät on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Valmiin pystyeristerakenteen materiaalimäärät.

Materiaali	Kerros	Määrä (m³)
Mäkelän alueen savi	Tiivis	300
Hamulan alueen savi	Tiivis	1700
Riikinvoima Oy:n tuhka	Kuivatus	1950
Hituran vesienkäsittelysakka	Tuki	2250
Mondi Powerflute Oy:n tuhka	Tuki	2250
Jäte-/ylijäämämaat	Tuki	19 000

5.2 Pystyeristeseinämän rakentaminen

Pystyeristerakenteen tiivistyskerros rakennettiin savesta 1,010 m levyisen muotin avulla. Rakenne tehtiin vanhan pohjarakenteen puhdistetun HDPE-muovikalvon päälle. Ensimmäisen kerroksen rakentamisen apuna käytettiin muovikalvon päällä lankkuja, jotta muovikalvo ei vaurioituisi muotin reunoista. Muotin nostamisen jälkeen lankut poistettiin ja muotti siirrettiin eteenpäin. Töiden edessä työskentelytapaa muutettiin siten, että muovikalvon päälle tuleva ensimmäinen noin 200-300 mm paksuinen savikerros rakennettiin ilman muottia ja tiivistettiin kauhalla. Työskentelytapaa muutettiin, jotta muovikalvon rikkoutumisen riski olisi mahdollisimman pieni.

Yhdellä muotillisella rakentui noin 3-4 metriä valmista tiivistyskerrosta. Tiivistäminen tehtiin noin 500 mm kerroksissa kaapelikauhalla painaen ja toteutunutta tiheyttä seurattiin Troxler-mittarilla. Tiivistyskerros tuettiin kuivatuskerroksen materiaalilla ennen muotin siirtämistä, jotta savirakenne ei romahtaisi. Kuivatuskerros rakennettiin vähintään 500 mm leveänä karkeasta pohjatuhkasta. Tiivistys- ja kuivatuskerrosta tuettiin 4-5 metrin tukitäytöllä, joka toimi samalla kaivinkoneen työskentelyalustana ja dumpperien kulkureittinä. Tukitäytön ja kuivatuskerroksen väliin asennettiin N3 suodatinkangas. Rakentamista on havainnollistettu kuvissa 36 ja 37.



Kuva 36. Vasemmalla tiivistyskerroksen ensimmäinen kerros tuettuna kuivatuskerroksen materiaalilla, oikealla tiivistyskerroksen toisen kerroksen rakentaminen.



Kuva 37. Pystyeristysseinämän tukikerros.

6. HITURAN SAVIPEITERAKENNE / SKARTA

Hituran kaivosalueella toteutettiin Skartan toimesta alueen sulkemiseen liittyviä peiterakenteita ylijäämäsavesta (sinisellä merkitty alue kuvassa 38). Peiterakenteen toteutti aliurakointina Koneurakointi M. Sikala kesän 2021 aikana. Peiterakenne oli noin 500 mm paksuinen savikerros, jonka päälle tuli noin 100 mm paksuinen kasvukerros. Valmiin peitekerroksen tuli olla tasainen, eikä siihen saanut jäädä vettä kerääviä painanteita. Rakenteessa käytettävää savimateriaalia tutkittiin laboratoriossa ennen rakentamista. Luokitteluominaisuuksien ja vedenläpäisevyydestäuksen avulla selvitettiin savimateriaalin soveltuvuus suunniteltuun rakenteeseen.



Kuva 38. Esimurskausalueen sijainti Hiturassa merkitty karttaan sinisellä.

6.1 Savipeitteen rakentamiseen käytetyt materiaalit

Peitetyn esimurska-alueen pinta-ala oli 33 941 m². Puolenmetrin savikerroksella käytetty materiaalmäärä on noin 16 970 m³ltr. Kasvukerrokseen käytettiin noin 3 394 m³ltr paikallista humusmaata.

6.2 Savipeitteen rakentaminen

Peitekerroksen rakentaminen toteutettiin kaivinkone- ja puskukonetyönä. Työn aikana peittokerroksen vahvuutta seurattiin koneohjauksen ja pistokoeluontoisten tarkastusten avulla. Kasvukerros tiivistettiin jyrällä sille määritettyjen ylijokertojen mukaisesti. Ennen peitekerroksen rakentamista pohjamaa tasoitettiin, jonka jälkeen savimateriaali tiivistettiin kaivinkoneen kauhalla tasaiseksi kerrokseksi pohjamaan päälle (kuva 39). Tasoitetun savikerroksen päälle rakennettiin kasvukerros. Peitekerroksen rakennusvaiheita on havainnollistettu kuvassa 40.



Kuva 39. Savipeitekerroksen rakentamista.



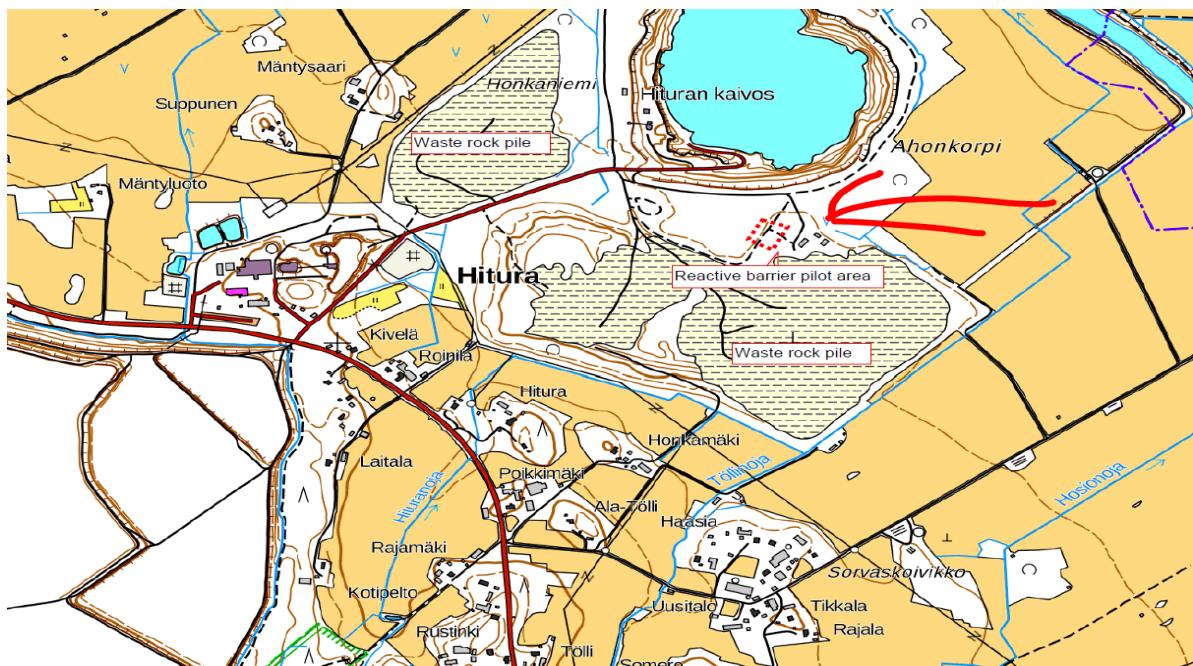
Kuva 40. Savipeitekerroksen rakennusvaiheet.

7. HITURAN REAKTIIVISET RAKENTEET / SKARTA

Kaivosteollisuuden sivukivikasoista liukenee sadevesien mukana vaihtelevia määriä raskasmetalleja ja muita epäpuhtauksia. Aktiivinen vesienkäsittely on kallista ja sivukivikasoista suotautuvat vesimäärät ovat suuria. Passiivisilla vesienkäsittelyrakenteilla voidaan puhdistaa kaivosteollisuuden vesiä ilman jatkuvaa energian tarvetta. UPACMIC-hankkeen puitteissa Hituran suljetulle kaivosalueelle sijoitettiin reaktiivisia rakenteita, jotka koostuivat pääasiassa uusiomateriaaleista ja teollisuuden sivuvirroista. Lisäksi pilotoinnissa oli mukana kaupallisen toimijan reaktiivinen matto-rakenne.

Pilottirakenteet sijaitsivat Hituran kaivosalueella kiellegneissikasan läheisyydessä. Pilottirakenteisiin johdettiin vesi sivukivikasan kuivatusojasta, joka virtaa Hituran vanhaan avolouhokseen. Virtaus pilottirakenteisiin toteutettiin painovoimaisesti, jolloin ulkopuolista energiaa ei tarvittu. Pilottirakenteilla pyrittiin vaikuttamaan suotautuvan veden korkeaan nikkelpitoisuuteen ja samalla arvioitiin erilaisten vesienkäsittelyratkaisujen käyttöä todellisissa olosuhteissa.

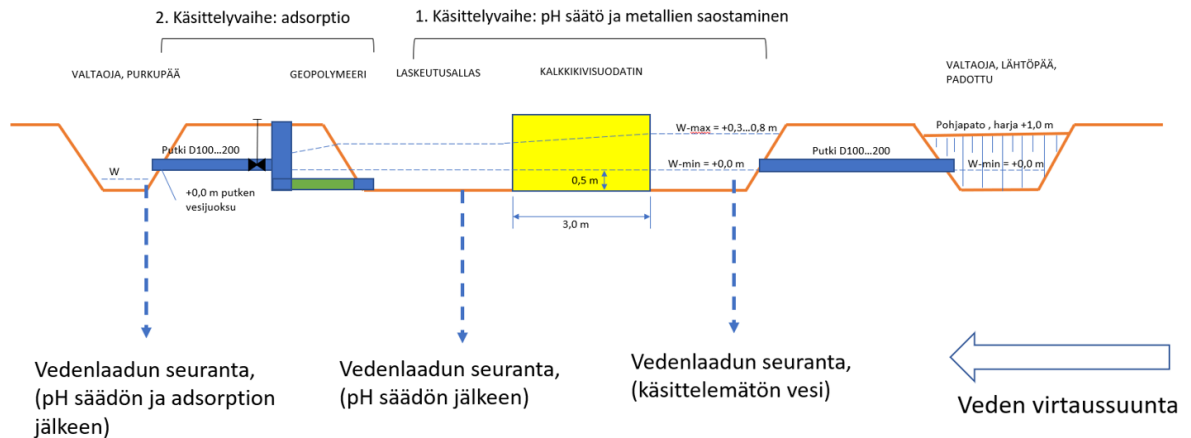
Pilottirakenteet rakennettiin loppukesästä 2021 Skartan toimesta, pilotoinnin sijainti on merkitty karttaan punaisella (kuva 41). Pilotoinnin seurannasta ja vesinäytteiden analysoinnista vastasi Feasib Analytics Oy, pilotoinnin suunnittelusta ja tulosten raportoinnista vastasi Ramboll Finland Oy.



Kuva 41. Reaktiiviset rakenteet, Hiturassa toteutettujen pilottirakenteiden sijainti kartalla.

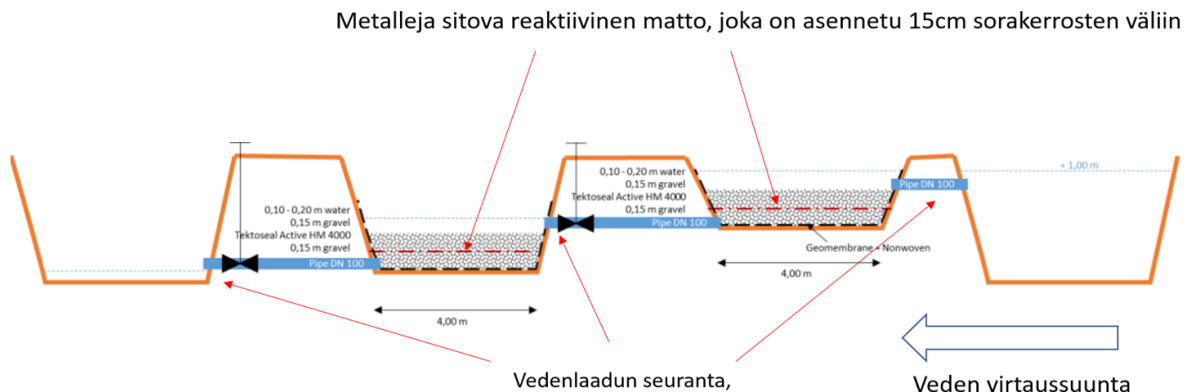
7.1 Pilottirakenteet, passiivinen vesienkäsittely

Uusiomateriaaleja käyttäen toteutettu pilointi koostuu kahdesta erillisestä vaiheesta. Ensimmäisessä vaiheessa kalkkikivipadolla nostetaan veden pH:ta, jolloin veden sisältämät metallit saostuvat niukkaliukoisina suoloina padon karkean kalkkikivimateriaalin pinnalle ja padon perässä olevaan laskeutusaltaaseen. Toisessa vaiheessa vesi virtaa geopolymeerin läpi, jolloin vaikutetaan edelleen pH-tasoon, jonka lisäksi metallien poisto perustuu geopolymeerin adsorptiokykyyn. Pilotin periaatekuva on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42. Passiivinen vedenkäsittely uusiomateriaaleja käyttäen, pilotoinnin periaate (Hitura).

Kaupallisen toimijan valmistamasta materiaalista toteutettu pilotointi koostuu kahdesta peräkkäisestä altaasta, joihin asennettiin sorakerrosten väliin reaktiivinen matto. Vesi suotautuu painovoimaisesti maton läpi ja samalla veden sisältämät metallit adsorboituvat maton sisältämien kalsiumalumiinisilikaattirakeiden pinnalle. Ensimmäisestä altaasta läpi suotautunut vesi siirtyy painovoimaisesti seuraavaan alempana sijaitsevaan altaaseen, jossa vesi suotautuu uudestaan reaktiivisen maton läpi. Rakennetta on havainnollistettu kuvassa 43.



Kuva 43. Passiivinen vedenkäsittely reaktiivista mattorakennetta käyttäen periaatekuva (Hitura).

7.2 Reaktiivisissa rakenteissa käytetyt materiaalit

Uusiomateriaalien pilotoinnissa käytetty kalkkikivi oli raekooltaan noin 2-20 mm ja se oli ylijäämä-materiaalia SMA Minerals Oy:n kalkkikivikaivokselta, padoon materiaalia kului noin 15 m³ (padon mitat rakenteen pinnassa 4x3x1,2 m, pohjan pinta-ala jonkin verran suurempi). Kalkkikiven toimivuutta tutkittiin alustavasti materiaalitestaustavaiheessa laboratoriossa läpivirtaustestinä ja pilotoinnin tavoitteena oli tutkia padon toimivuutta käytännössä, kun esimerkiksi veden lämpötila ja muut ominaisuudet vaihtelevat. Kalkkikivipadon valittiin toimitetusta materiaalista karkearakeisinta, jotta vesi virtaa padon läpi riittävällä nopeudella.

Kalkkipatoaltaan jälkeiseen kaivoon asetettiin teollisuuden jätteistä valmistettu masuunikuona-geopolymeeri. Geopolymeeri oli Oulun Yliopiston tuottama ja sen kehitystyö oli osa KAIVASU-hanketta. Pilotissa käytetty geopolymeeri valmistettiin masuunikuonajauheesta ja alkaliliuoksesta, jotka pestiin ennen pilotointia. Pilotoinnissa käytetyt uusiomateriaalit ovat nähtävissä kuvassa 44.



Kuva 44. Hituran reaktiivisissa rakenteissa käytetyt uusiomateriaalit: kalkkikivimateriaali vasemmalla ja geopolymeeri oikealla.

Kaupallinen mattorakenne Tektoseal® Active HM 4000 on aktiivinen geokomposiitti, joka koostuu kahdesta geotekstiilikerroksesta ja niiden välissä olevasta kationisesta rakeisesta adsorbentista. Mattojen toimittaja/valmistaja on saksalainen yritys Huesker. Pilottirakenteeseen Hiturassa asennettiin Tektoseal Active HM 4000 geopolymeeri matto, jolloin matossa oli 4000 g adsorbenttia jokaista neliometriä kohden. Rakeinen adsorbentti Tektoseal Active HM:ssä on kalsiumalumiinisiliikaatti (kuva 45 vasemmalla), jonka tehtävä oli metallien poistaminen vedestä. Pilotointialtaissa maton ylä- ja alapuolella käytetty sora on 16/32 mm kokoista singeliä. Singeli mahdollisti esteettömän veden virtauksen mattorakenteen läpi. Vesien käsittelyaltaan pohjalle asennettu reaktiivinen matto on nähtävissä kuvassa 45 oikealla.



Kuva 45. Reaktiivinen mattorakenne (Hitura): vasemmalla maton sisältämää rakeista adsorbenttia ja oikealla matto asennettuna altaan pohjalle.

7.3 Vesienkäsittelyjärjestelmien rakentaminen

Veden painovoimaisen virtaamisen mahdollistamiseksi sivukivikasasta tulevaan ojaan rakennettiin pato. Ojasta vedet johdettiin putkilla vesienkäsittelyaltaisiin. Padottu oja on nähtävissä kuvassa 46.



Kuva 46. Padottu oja Hiturassa.

Kalkkikivipatoaltaan pohja ja seinämät olivat paikallista pohjamaata, joka tiivistettiin heikosti vettä läpäiseväksi. Altaiden virtaus säädettiin venttiilien avulla noin tasolle 4 m³/vrk. Kalkkikivipadon asentamista käsittelyaltaaseen on havainnollistettu kuvassa 47.



Kuva 47. Kalkkikivipadon asennustyötä.

Geopolymeeri asennettiin kalkkikivialtaan jälkeiseen kaivoon kahtena eri ajanjaksona. Ensin geopolymeeriä testattiin ilman kalkkikivipatoa ja pidempiaikainen seuranta toteutettiin kalkkikivipadon asentamisen jälkeen. Geopolymeeri asetettiin verkon sisään, jotta rakeet eivät lähtisi kaivon läpi virtaavan veden mukaan. Geopolymeerin asennusta on havainnollistettu kuvassa 48.



Kuva 48. Geopolymeerin asennus.

Mattoaltaiden pohjalle asennettiin geomembraani, joka esti veden imeytymisen maaperään. Geomembraanin päälle asennettiin suodatinkangas, jonka päälle tuli sorakerros ja reaktiivinen matto. Reaktiivisen maton päälle asennettiin vielä noin 150 mm sorakerros. Reaktiivisen maton pilotointia on havainnollistettu kuvassa 49.



Kuva 49. Reaktiivisen maton pilotointi Hiturassa.

7.4 Reaktiivisten rakenteiden seurannan sisältö

Pilotoinnissa seurattiin veden pH:ta, sähkönjohtokykyä (EC) sekä sulfaattipitoisuutta. Näiden yleismittausten lisäksi vedestä analysoitiin alumiini Al, kalsium Ca, koboltti Co, kupari Cu, rauta Fe, magnesium Mg, mangaani Mn, nikkeli Ni ja sinkki Zn. Näistä metalleista mielenkiintoisimpia ovat alumiini-, kupari-, rauta-, mangaani-, nikkeli- ja sinkkipitoisuudet. Rakenteisiin suotautuneen oja-veden suurin pitoisuus oli nikkelillä, jonka liukenemiseen vesienkäsittelyjärjestelmillä haluttiin erityisesti vaikuttaa.

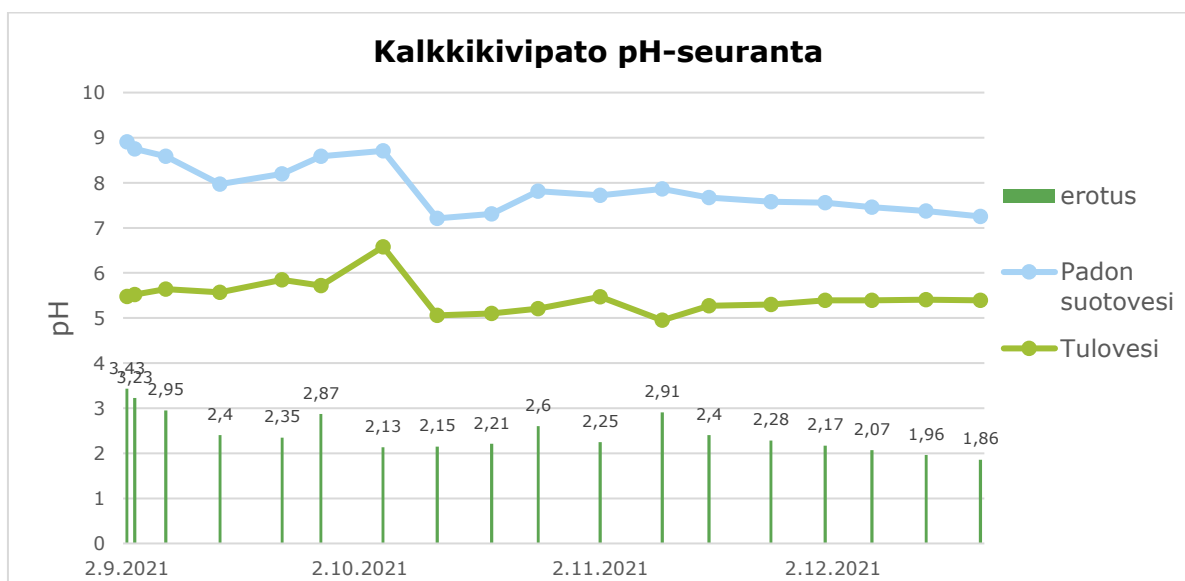
Uusiomateriaaleista valmistetun vesienkäsittelyjärjestelmän seuranta aloitettiin geopolymeerin asentamisella myöhemmin asennetun kalkkipatoaltaan jälkeiseen kaivoon. Seuranta toteutettiin neljän kuukauden ajan heinä-joulukuussa, kunnes allas jäättyi. Geopolymeerisuodattimen toimivuutta, eli metallien pidätyskykyä pH-tason muutoksen ja adsorption vaikutuksesta, tutkittiin päivittäisillä vesinäytteillä viikon ajan. Tämän jälkeen geopolymeerikaivoa edeltävään altaaseen rakennettiin kalkkikivipato ja geopolymeerin ja kalkkikivipadon yhteisvaikutusta veden ominaisuuksiin seurattiin noin neljän kuukauden ajan. Näytteitä otettiin altaaseen tulevasta vedestä ns. nollanäyte, kalkkipadosta suotautuneesta vedestä ja geopolymeerin läpi suotautuneesta vedestä (vesinäytepisteet nähtävissä kuvassa 42). Geopolymeerikaivosta näytteitä otettiin päivittäin, ja kalkkikivipatoon johdetusta vedestä viikoittain.

Reaktiivisten mattojen pilotoinnin seuranta kesti noin neljä kuukautta, kunnes altaat jäättyivät joulukuun lopulla 2021. Näytteitä otettiin ensimmäiseen altaaseen tulevasta vedestä eli ns. nollanäyte, ensimmäisen maton läpi suotautuneesta vedestä ja toisesta altaasta kahden maton läpi suotautuneesta vedestä. Näytteenotto tehtiin viikoittain.

Molempien pilotointien näytteenoton yhteydessä veden virtausta seurattiin ja tarvittaessa säädettiin tavoitetason 4 m³/vrk saavuttamiseksi. Lisäksi kirjattiin huomioita lämpötilasta ja muista mahdollisista veden laatuun vaikuttavista tekijöistä.

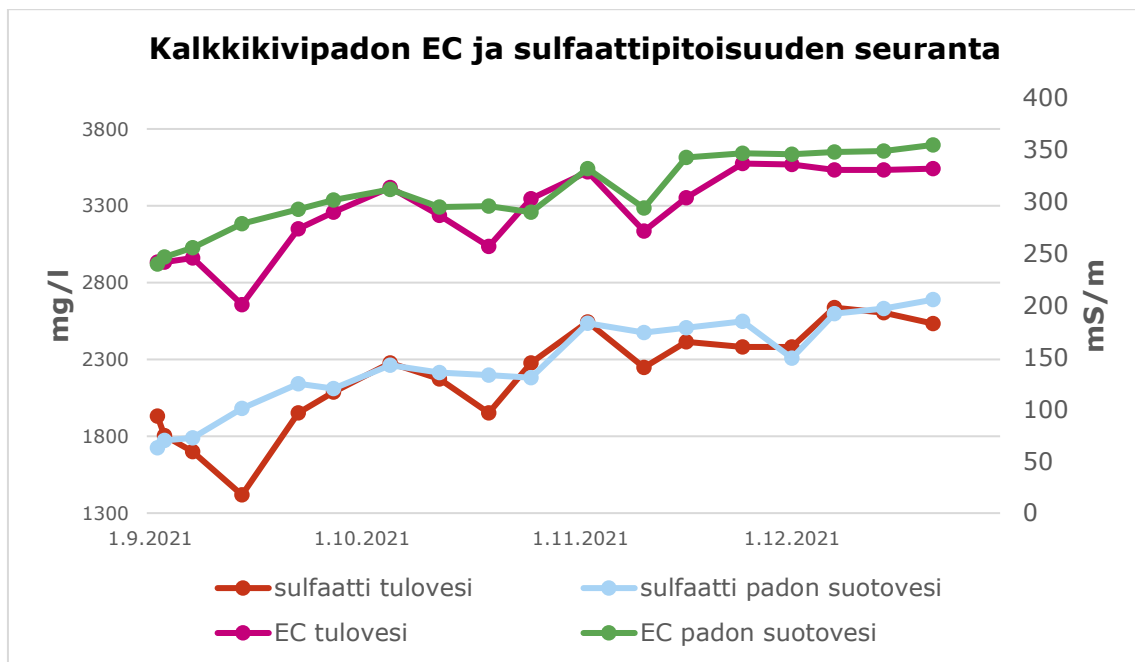
7.5 Seurantatulokset

7.5.1 Kalkkikivipatopilotoinnin seurantatulokset



Kuva 50. Kalkkikivipilotoinnin pH-tulokset.

Kalkkikivipadon tarkoitus oli nostaa sen läpi suotautuvan veden pH-tasoa, jolloin osa haitallisista metalleista saostuu ja pidättyy patoon sekä sen jälkeiseen laskeutusaltaaseen. Rakenteeseen tulevan veden pH oli seurantajakson ajan noin välillä 5-5,5. Ensimmäisen kuukauden ajan patorakenne nosti veden pH:ta 2,4-3,4 yksikköä, jolloin padon suotoveden pH oli välillä 8-8,9 (kuva 50). Seurantajakson tulosten perusteella kalkkikivipatorakenteella pH:ta voidaan nostaa noin 2,5 yksikköä (tulosten keskiarvo 4 kuukauden ajalta). Viimeisen seurantakuukauden aikana tulevan veden pH pysyttelee lähes samana, mutta pH-tason muutos laskee alle kahteen yksikköön. Tilannetta saattaa selittää patorakenteeseen (kalkkirakeiden pinnalle) saostuneet aineet, jotka heikentävät padon tehoa pidemmällä aikavälillä. Lisäksi läpi suotautuva vesi huuhtoo mukanaan myös kalkkikiven sisältämiä vettä neutraloivia aineita, mikä edelleen heikentää rakenteen tehoa.

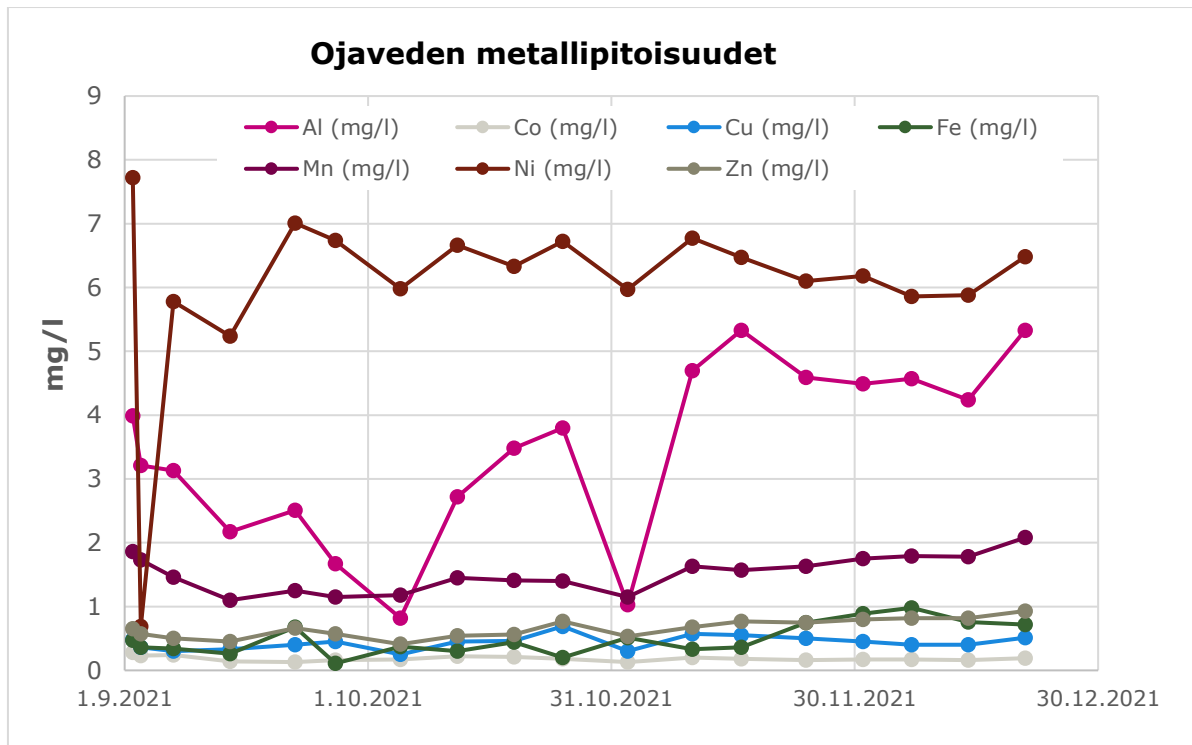


Kuva 51. Kalkkikivipilotoinnin sähkönjohtavuus ja sulfaattipitoisuudet.

Patoaltaaseen johdetun ojaveden sähkönjohtavuus vastasi muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta padosta suotautuneen veden sähkönjohtavuutta (kuva 51). Seurantajakson edetessä veden sähkönjohtavuus kasvaa noin 100 mS/m ja tasaantuu joulukuun aikana tasolle 350 mS/m. Vaihtelevat sade-/sulamisvesimäärät "laimentavat" vettä, mikä nähdään sähkönjohtavuuden selkeänä madaltumisena (14.9, 19.10 ja 10.11).

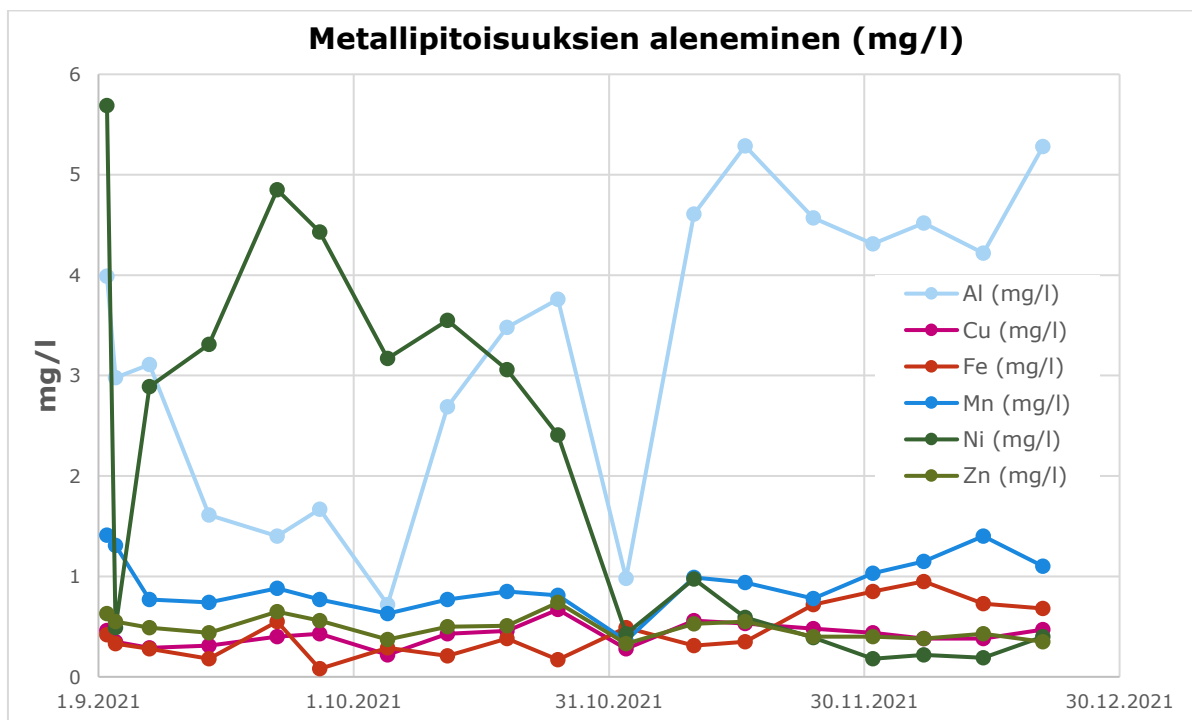
Todennäköisesti patorakenteeseen saostuvat metallit ja padosta liukenevat aineet kumosivat toistensa vaikutusta sähkönjohtavuuteen, jolloin ojaveden sähkönjohtavuus pysyi lähes muuttumattomana padon läpi suotautumisen jälkeen. Kalkkikivipadosta liukeni suotoveteen kalsiumia, joka lisäsi suotoveden sähkönjohtavuutta (suotovedestä tutkittujen aineiden kokonaispitoisuudet on esitetty liitteessä 5). Aineiden liukenemiseen vaikuttaa myös olosuhteet kuten virtaaman heikkeneminen (reaktioaika pitenee) sekä veden lämpötila.

Sulfaattipitoisuuden nähdään kuvan 51 perusteella kasvavan seurantajakson edetessä ja samalla tavalla kuin sähkönjohtavuuden kohdalla pitoisuus on korkeampi padon suotovedessä kuin patoon johdetussa ojavedessä. Altaan vaihteleva vesitilanne on havaittavissa myös sulfaattipitoisuuksien laimentuessa voimakkaiden sateiden tai sulamisvesien vaikutuksesta.

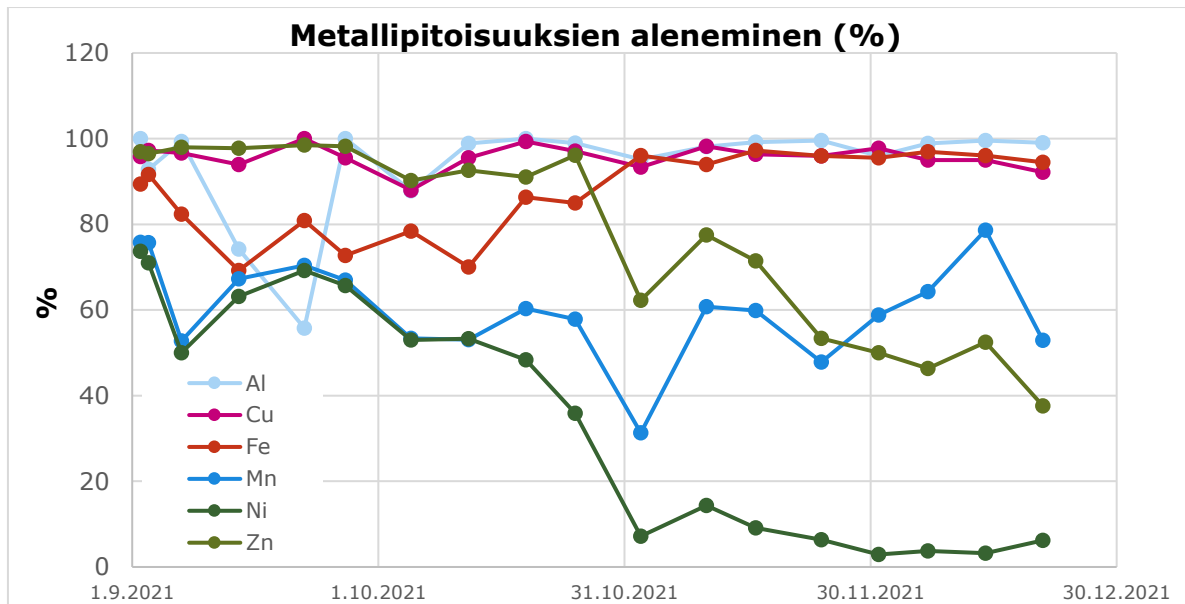


Kuva 52. Kalkkivirakenteeseen johdetun ojaveden metallipitoisuudet.

Kuvan 52 perusteella pilottirakenteeseen johdetun ojaveden suurimmat metallien pitoisuudet havaittiin nikkellillä (noin 5,2-7,7 mg/l), alumiinilla (0,8-5,3 mg/l) sekä mangaanilla (1,1-2,08 mg/l). Näiden aineiden kokonaispitoisuudet ojavedessä olivat selvästi muita metalleja korkeampia koko seurantajakson ajan. Nikkelipitoisuus oli korkein ja alumiinin pitoisuus vaihteli jonkin verran, mangaanipitoisuuden vaihtelu oli selvästi vähäisempää. Muiden tutkittujen metallien pitoisuudet olivat <1 mg/l.

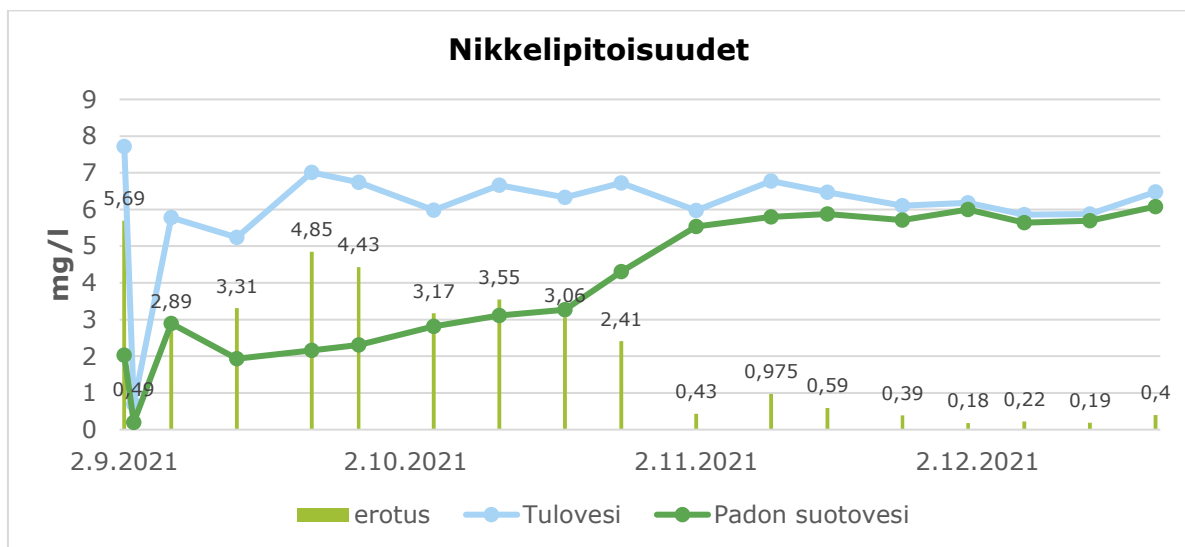


Kuva 53. Ojaveden metallipitoisuuksien muutos (mg/l) padosta suotautumisen jälkeen.



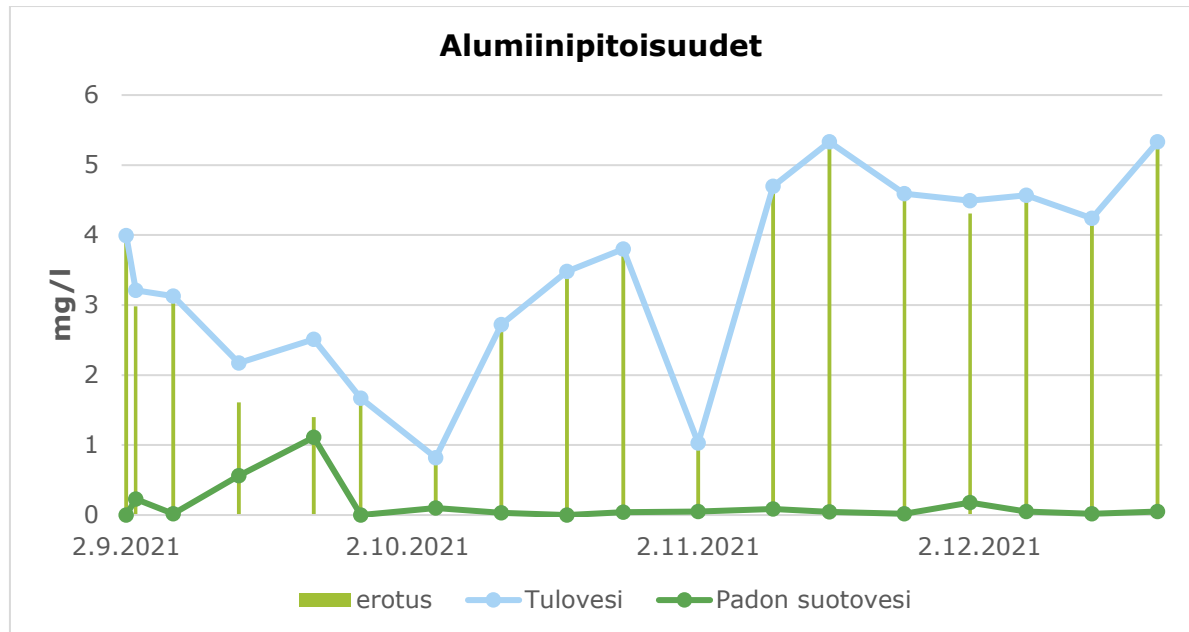
Kuva 54. Ojaveden metallipitoisuuksien muutos (%) kalkkikivirakenteesta suotautumisen jälkeen.

Pilottirakenteen toimivuudesta kertoo kuvissa 53 ja 54 esitetty metallien pitoisuuksien muutos, eli rakenteeseen tulevan ja sieltä läpi suotautuneen veden metallipitoisuuksien erotus. Kuvassa 53 esitetty prosentuaalinen alenema kertoo kalkkikivipadon poistaneen vedestä alumiinin ja kuparin lähes täysin (>90 %) koko seurantajakson ajan. Alussa veden virtauksen säätö saattoi vaikuttaa heikompaan poistotehoon.



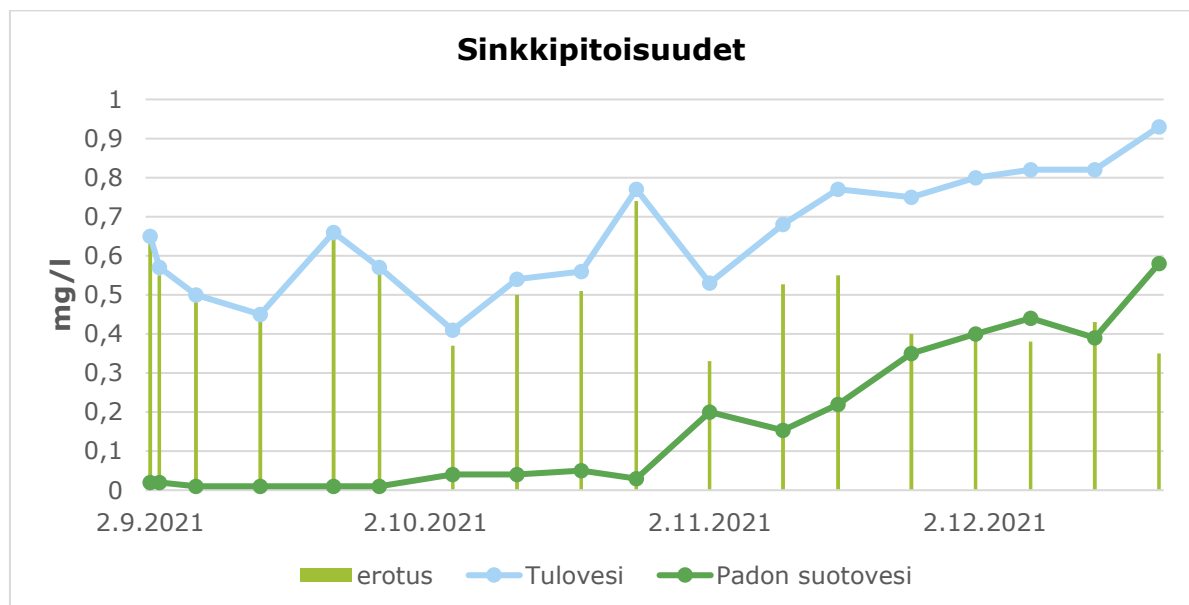
Kuva 55. Kalkkikivipilotoinnin nikkelipitoisuudet ja sen pidättyminen.

Nikkelin ja sinkin suhteen muutos prosentuaalisesti heikkeni selvästi jo kahden ensimmäisen seurantakuukauden aikana ja seurantajakson lopussa (viimeisen seurantakuukauden aikana) kalkkikivipadon vaikutus nikkelipitoisuuden pienentämisessä oli enää alle 10 % luokkaa. Parhaimmillaan kalkkikivipadolla ja laskeutusaltaalla voitiin saostaa ja poistaa suotautuvan veden nikkeliä noin 70 % (kuva 54) ja poistoteho loppuu täysin kolmen kuukauden päästä (kuva 55). Tuloveden sinkkipitoisuus oli koko seurannan ajan alhainen, mutta sen pidättyminen heikkeni selvästi viimeisen seurantakuukauden aikana. Marraskuun alussa altaat olivat runsaiden sateiden jäljiltä täynnä vettä, jolloin metallien pidättymistä rakenteeseen saattoi heikentää myös kovempi virtaama.



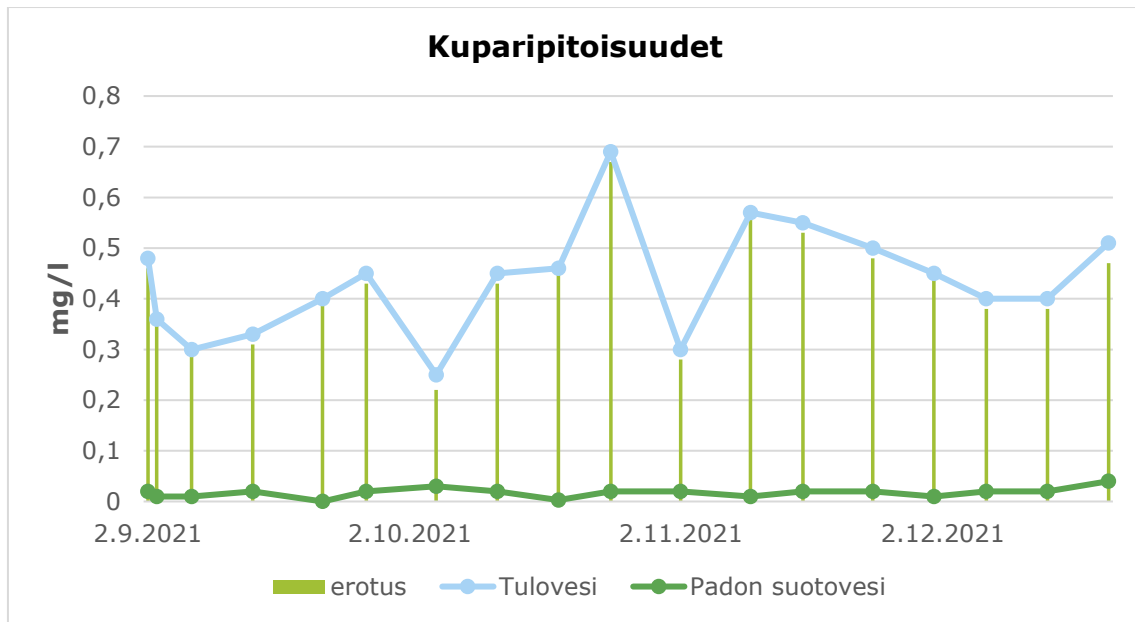
Kuva 56. Kalkkikivipilotoinnin alumiinipitoisuudet ja sen pidättyminen.

Alumiini pidättyi kuvan 56 perusteella kalkkikivirakenteeseen lähes täydellisesti koko pilotoinnin ajan. Tuloveden alumiinipitoisuudet olivat korkeimpia seurannan loppupuolella, mutta lähes kaikki ojaveden alumiini pidättyi patoon ja sen jälkeiseen laskeutusaltaaseen. Padosta suotautuneen veden alumiinipitoisuudet olivat ensimmäistä seurantakuukautta lukuun ottamatta $<0,2$ mg/l.



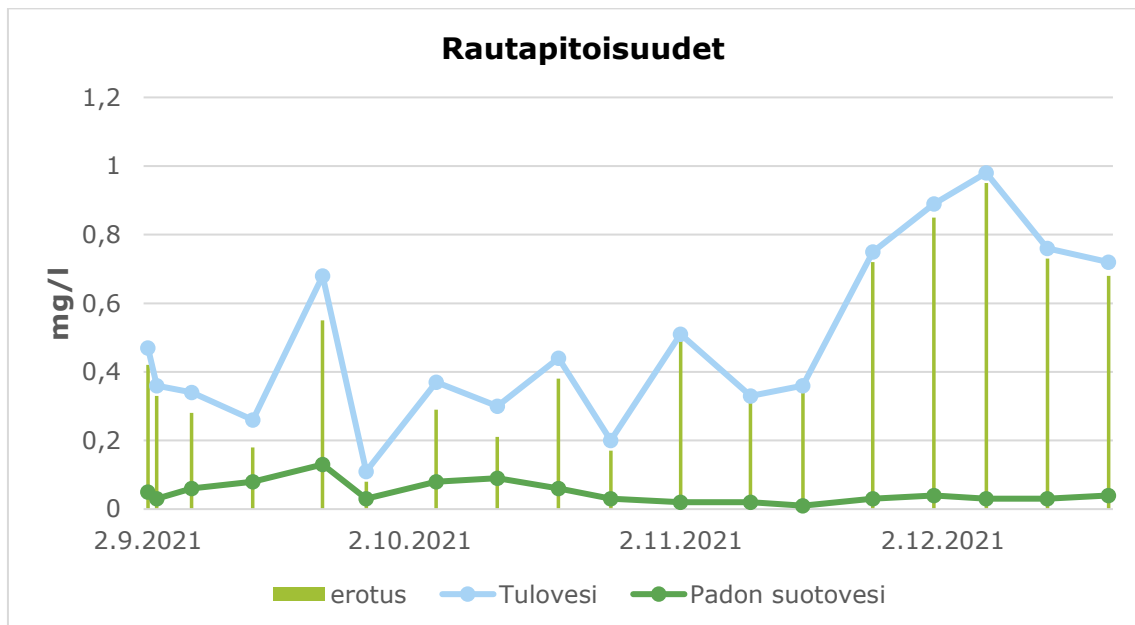
Kuva 57. Kalkkikivipilotoinnin sinkkipitoisuudet ja sen pidättyminen.

Kuva 57 perusteella sinkki pidättyi kalkkikivirakenteeseen erittäin hyvin ensimmäisen kahden kuukauden aikana ja suotoveden sinkkipitoisuus oli $<0,1$ mg/l. Seurantajakson toisella puoliskolla suotoveden pH ei enää noussut yli 8, jolloin sinkki ei enää saostu yhtä tehokkaasti ja suotoveden sinkkipitoisuus lähti nousuun.



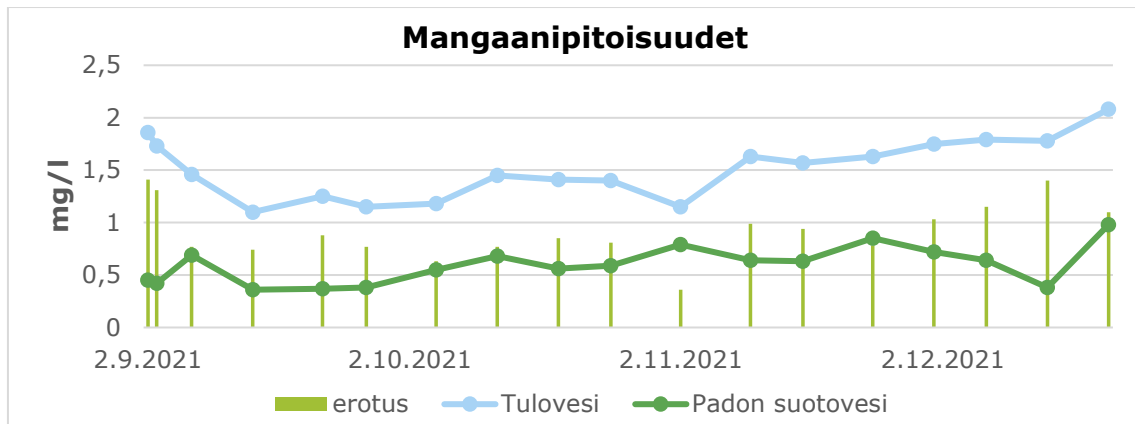
Kuva 58. Kalkkikivipilotoinnin kuparipitoisuudet ja sen pidättyminen.

Raskasmetalleista kupari pidättyi kalkkikivirakenteeseen hyvin koko seurantajakson ajan pH-muutoksista huolimatta. Padon suotoveden kuparipitoisuus oli korkeimmillaankin < 0,05 mg/l (kuva 58). Ojaveden sisältämästä kuparista on pidättynyt kalkkikivipatoon ja laskeutusaltaaseen noin 90 % koko seurantajakson ajan.



Kuva 59. Kalkkikivipilotoinnin rautapitoisuudet ja sen pidättyminen.

Kuvan 59 perusteella rauta pidättyi kalkkikivirakenteeseen hyvin koko seurannan ajan. Ojaveden rautapitoisuus kasvoi seurannan loppupuolella, mutta suotoveden rautapitoisuus pysyi kuitenkin <0,1 mg/l. Suotoveden rautapitoisuuksissa oli pientä vaihtelua seurannan alkuvaiheissa, mutta pienten pitoisuuksien vaihtelun saattoi aiheuttaa tavallinen mittausepätaarkkuus.



Kuva 60. Kalkkikivipilotoinnin mangaanipitoisuudet ja sen pidättyminen.

Mangaanin pidättyminen kalkkikivirakenteeseen oli vaihtelevaa ja pidättymisprosentti mukaili nikkelin pidättymistä viimeistä kahta kuukautta lukuun ottamatta. Yli puolet ojaveden sisältämästä mangaanista pidättyi rakenteeseen myös seurannan viimeisten kuukausien aikana.

7.5.2 Johtopäätökset / kalkkikivipato

Kalkkikivipato nosti maltillisesti Hituran kaivosalueen kiillegneissikivikasasta suotautuvan ojaveden pH-tasoa alkuperäisestä, noin 2,5 yksikön verran. Kahden seurantakuukauden jälkeen padosta suotautuneen happamamman veden (pH < 5) nousi lähes 8 yksikköön, mutta tämän jälkeen padon pH:ta nostattava vaikutus heikkeni. Tutkimustulosten perusteella laskennallisesti (testirakenteen olosuhteissa) kalkkikivipadon vaikutus ojaveden pH-arvoon loppuisi noin vuoden käyttöajan jälkeen, kun vesimäärä olisi noin 1460 m³ ja käsiteltävän veden pH-tason keskiarvo noin 5,5. Kalkkivirakenteen käyttöikänsä vaikuttaa suotautuvan veden laatu (pidättyvien aineiden pitoisuudet) ja määrä sekä virtaama. Hiturassa veden nikkelpitoisuus oli noin 6,2 mg/l ja siinä tilanteessa kalkkikivipadon nikkelin pidättämisteho heikkeni selvästi noin 212 m³ vesimäärän jälkeen. Laskennallisesti, pilotoinnin perusteella, voidaan arvioida kalkkikivimateriaalin pidättävän nikkeliä noin 4,3 g/m³, laskelmassa ei ole huomioitu muita metalleja eikä metallien sitoutumiseen vaikuttavia tekijöitä.

Haitallisten aineiden pidättyminen rakenteeseen esimerkiksi nikkelin ja sinkin osalta heikentyi selvästi seurannan puolivälissä, kun taas mangaanin pidättyminen vaihteli ja raudan pidättyminen seurannan edetessä lisääntyi. Pidättyminen ei tapahdu ainoastaan pH:n aiheuttaman saostumisen ansiosta vaan vaikuttavia tekijöitä ovat myös olosuhteet kuten lämpötila ja veden muut ominaisuudet kuten hapen määrä. Esimerkiksi veden sähkönjohtavuuden nousu kertoo veden ominaisuuksien muutoksista, jotka voivat osaltaan vaikuttaa aineiden pidättymiseen.

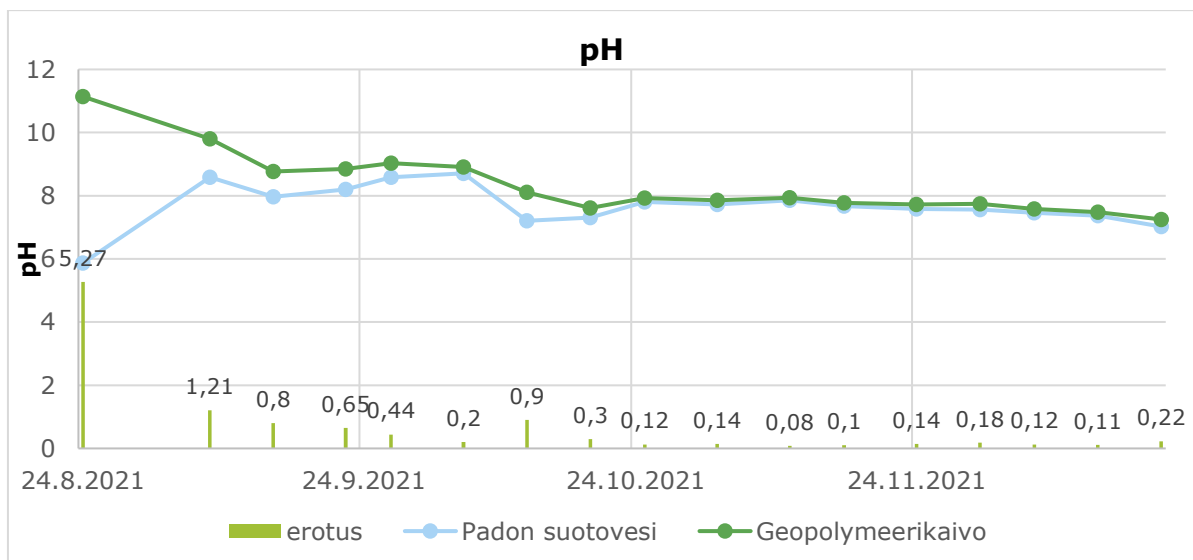
Kalkkikivipadon tekninen toteutus onnistui suunnitellusti, mutta pilotoinnin käynnistymiseen vaikutti vähäinen sademäärä. Seurannan aikana ongelmaksi muodostuivatkin vaihtelevat vesimäärät, joiden hallitseminen (tulvimisen ehkäisy) ja halutun virtaaman ylläpito aiheuttivat jonkin verran ylimääräistä virtauksen säätelyä ja tarkkailua. Kalkkimateriaalin raekoko tulee valita rakenteen vaatimusten mukaisesti, jotta liian hienoainespitoinen materiaali ei estä veden suotautumista padon läpi. Toisaalta pienemmän raekoon kalkkimateriaalin reaktiopinta-ala on suurempi, jolloin sen neutraloiva vaikutuskin on tehokkaampi. Raekokoa valittaessa tulee huomioida myös aineiden pinnottuminen kalkkirakeiden päälle. Kalkkikivipadon käyttäminen pidemmällä ajanjaksolla vaatii materiaalin ajoittaisen uusimisen tai puhdistamisen.

7.5.3 Geopolymeeripilotoinnin seurantatulokset

Taulukko. 16 Geopolymeeripilotoinnin analyysitulokset ensimmäisellä seurantaviikolla.

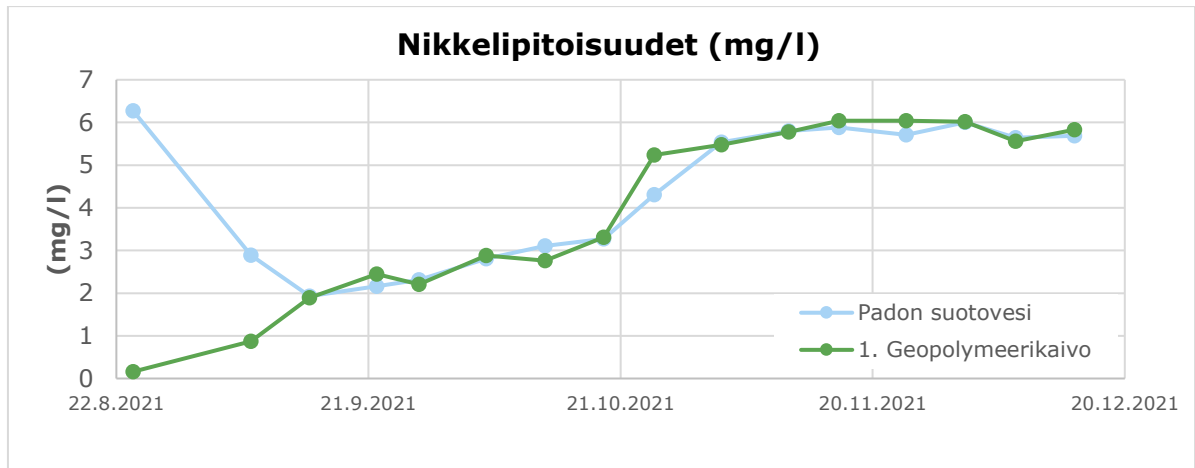
PVM ja KLO	Näyte	pH	EC mS/m	Fe (mg/l)	Mn (mg/l)	Ni (mg/l)
24.8.2020 KLO 10.45	Nolla (tuleva vesi)	5,87	226	0,144	1,66	6,27
24.8.2020 KLO 14.05	1. Geopolymeerikaivo	11,14	305	0,004	0,04	0,16
24.8.2020 KLO 15.30	2. Geopolymeerikaivo	10,9	289	0	0,02	0,13
25.8.2021 KLO 9.15	3. Geopolymeerikaivo	9,73	237	0,0003	1,03	4,14
25.8.2021 KLO 13.05	4. Geopolymeerikaivo	8,59	237	0,0008	1,15	4,65
25.8.2021 KLO 14.45	5. Geopolymeerikaivo	8,7	238	0,1648	1,33	5,33
26.8.2021 KLO 7.00	6. Geopolymeerikaivo	9,06	233	0,0773	0,94	3,95
26.8.2021 KLO 13.45	7. Geopolymeerikaivo	8,61	231	0,0112	0,88	3,69
27.8.2021 KLO 7.30	8. Geopolymeerikaivo	9,09	227	0,027	0,65	2,95
27.8.2021 KLO 12.00	9. Geopolymeerikaivo	9,26	224	0,0762	0,64	2,74
30.8.2021 KLO 08.00	10. Geopolymeerikaivo	9,61	235	0,0299	0,26	1,23
31.8.2021 KLO 09.55	11. Geopolymeerikaivo	9,57	241	0,0942	0,25	0,97
1.9.2021 KLO 9.50	12. Geopolymeerikaivo	9,38	240	0,0868	0,3	1,2

Ensimmäisen viikon ajan geopolymeeriä testattiin ilman kalkkikivipatoa ja virtaus oli säädetty tasolle 0,5 m³/vrk. Ensimmäisenä päivänä vaikutus pH-arvoon ja metallien pidättymiseen oli voimakkainta, ja esimerkiksi pH nousi jopa viisi yksikköä kaivon tulevan veden pitoisuuteen verrattuna (taulukko 16). Viikon seurannan aikana geopolymeerista suotautuneen veden pH oli >8,5 jokaisella näytteenotokerralla. pH-arvon muuttumisesta huolimatta geopolymeerin adsorptiokyky heikkeni esitettyjen tulosten perusteella jo seuraavana päivänä, kun nikkelin pidättyminen polymeeriin selvästi väheni. Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida, että polymeeriin tulevan veden ominaisuuksista ei ole mittaustietoa kuin ensimmäiseltä päivältä. Pidempiaikaisen seurannan perusteella tuloveden pH vaihtelee noin 5-5,5 välillä ja veden nikkelpitoisuuden keskiarvo on noin 6,2 mg/l.

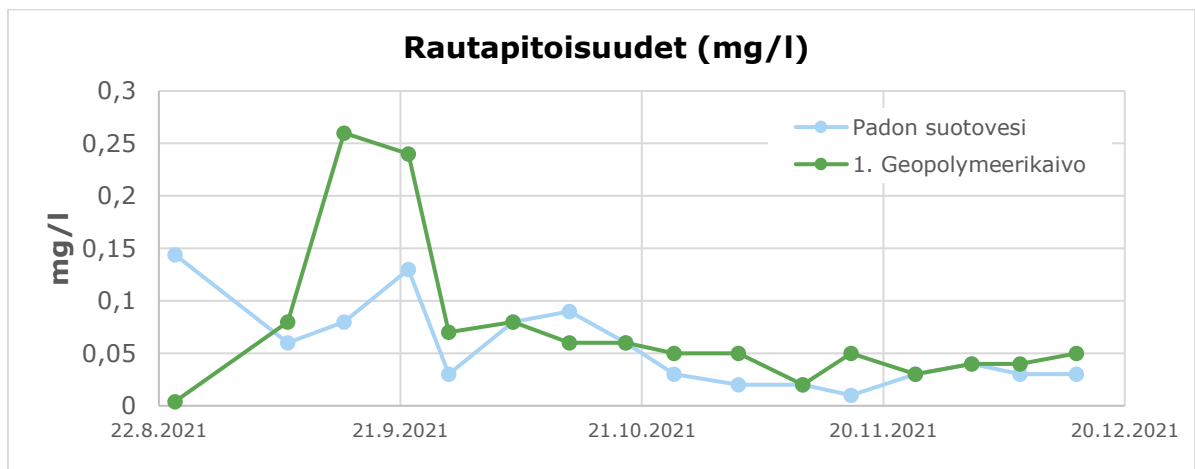


Kuva 60. Geopolymeeripilotoinnin pH-arvot ja muutos pH-yksiköinä.

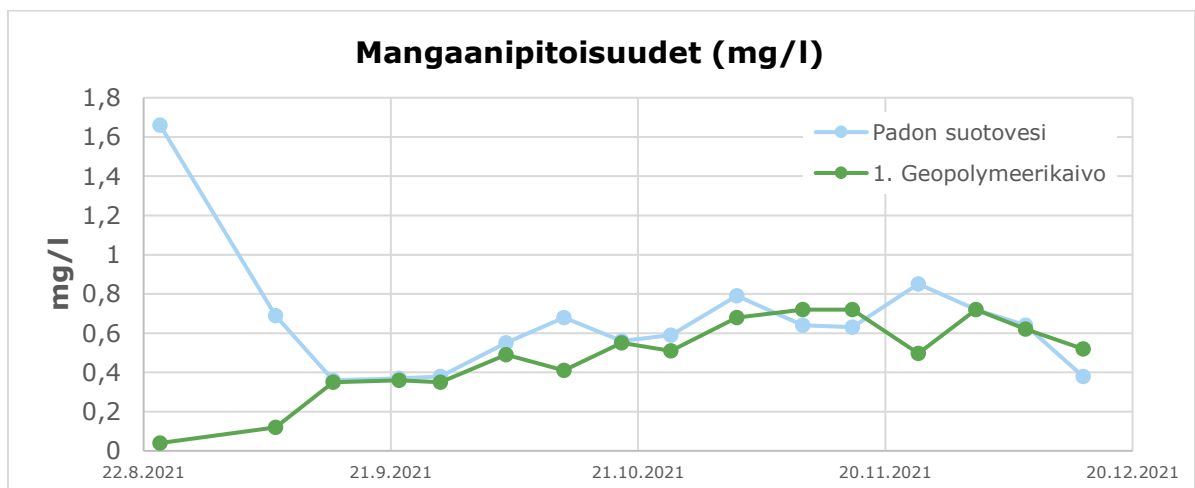
Pidemmän aikavälin pH-tulosten perusteella geopolymeeri nosti kalkkivivipadosta suotautuneen veden jo valmiiksi neutraalia pH-arvoa ensimmäisen viikon jälkeen noin 1,2 yksikköä (kuva 60). Tämän jälkeen pH-taso nousi geopolymeerin vaikutuksesta noin 0,5 yksikköä kuukauden ajan. Seurannan viimeisten kahden kuukauden ajan pH-muutos oli hyvin maltillinen enintään 0,22 yksikköä.



Kuva 61. Geopolymeeripilotoinnin nikkelipitoisuudet.



Kuva 62. Geopolymeeripilotoinnin rautapitoisuudet.



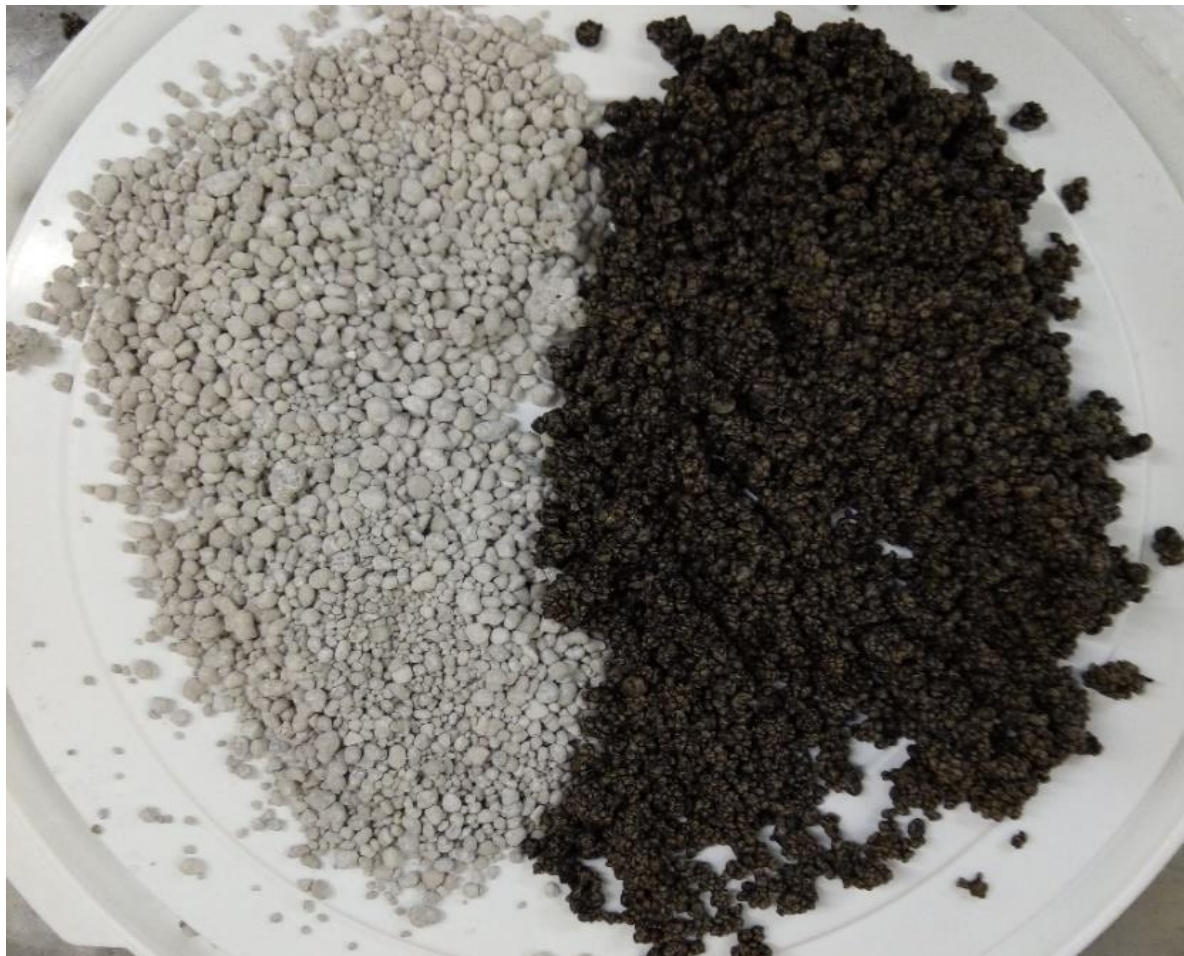
Kuva 63. Geopolymeeripilotoinnin mangaanipitoisuudet.

Geopolymeeri pidatti ojaveden sisältämää nikkeliä sekä rautaa ja mangaania hyvin ensimmäisen seurantaviikon aikana (kuvat 61-63). Kalkkikivipadon asennuksen jälkeen veden virtaamaa muutettiin 4 m³/vrk, jolloin geopolymeerin adsorptiokyky heikkeni. Tutkitut aineet eivät enää pidäty geopolymeeriin, ja pitoisuuksien vaihtelun padon suotoveden ja geopolymeerikaivosta suotautuneen veden välillä aiheuttaa todennäköisesti tavallinen mittausepävarmuus.

7.5.4 Johtopäätökset / geopolymeeri

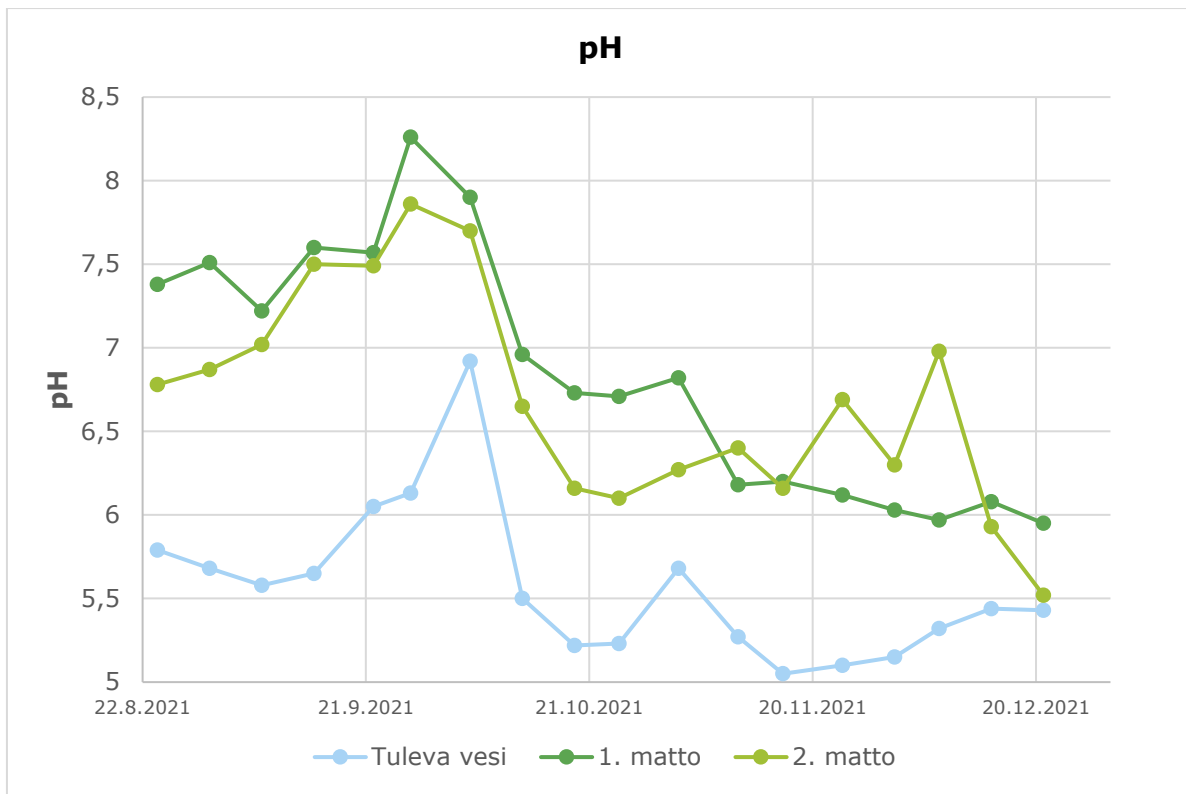
Ensimmäisen seurantaviikon aikana virtaus geopolymeerikaivon läpi oli säädetty tasolle 0,5 m³/vrk. Geopolymeerin nikkelin adsorptiokyky heikentyi huomattavasti jo ensimmäisen vuorokauden aikana. Pilotoinnin tulosten perusteella voidaan arvioida geopolymeerin sitovan nikkeliä noin 0,9 g/kg-geopolymeeria. Geopolymeeri poistaa tehokkaasti raskasmetalleja ja nostaa veden pH-tasoa, kun se on mitoitettu vesimäärän ja veden ominaisuuksien perusteella oikein. Tutkimusajanjakson aikana polymerin läpäissyt vesimäärä oli noin 480 m³, joka oli liian suuri materiaalin adsorptiokapasiteettiin verrattuna.

Geopolymeeri oli silmin nähden rapautunut metallien adsorboitumisen seurauksena neljän kuukauden käytön jälkeen, mutta se ei silti vapauttanut aiemmin sitomiaan metalleja takaisin läpi suotautuvaan veteen. Pitkäaikaisessa käytössä todellisissa olosuhteissa materiaali ei hajonnut/tukkeutunut, vaikka sen adsorptiokyky loppui. Kuvassa 64 on nähtävissä geopolymeeri ennen ja jälkeen pilotoinnin.

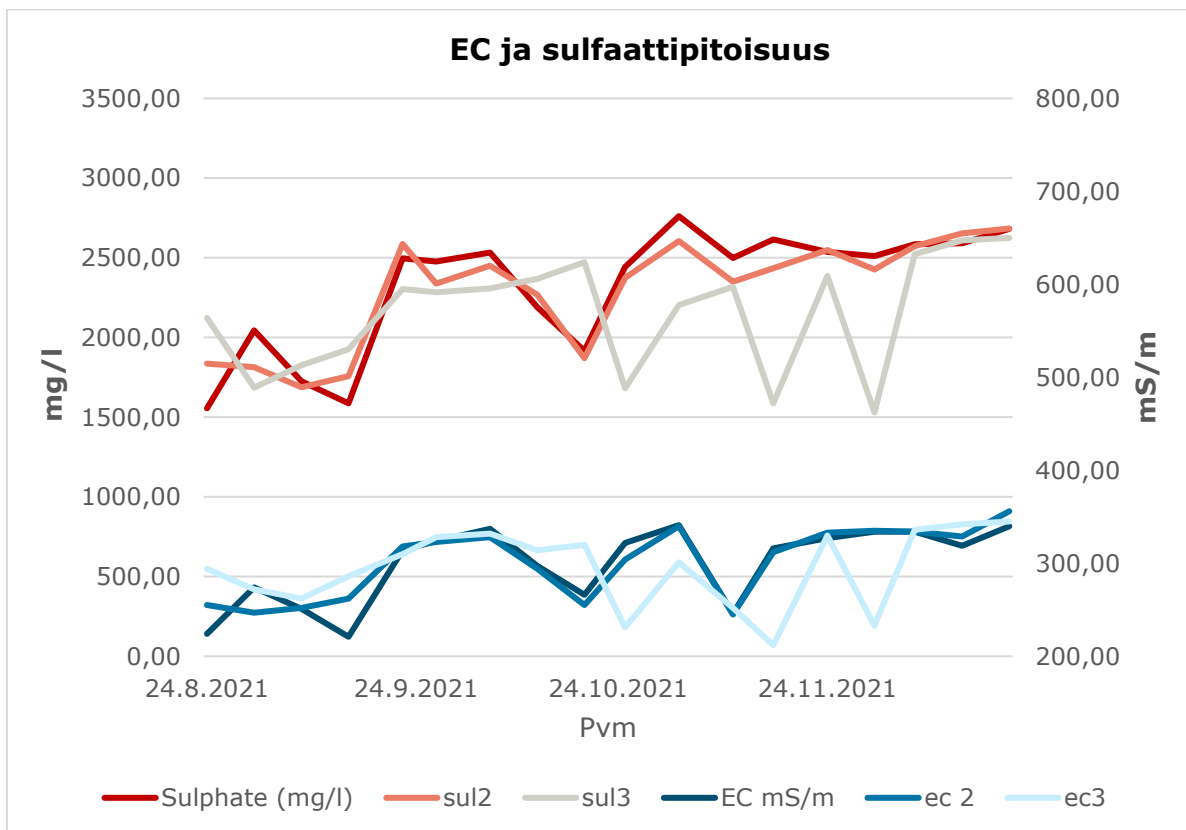


Kuva 64. Vasemmalla geopolymeeri ennen pilotointia ja oikealla pilotoinnin jälkeen.

7.5.5 Reaktiivisten mattojen pilotoinnin seurantatulokset



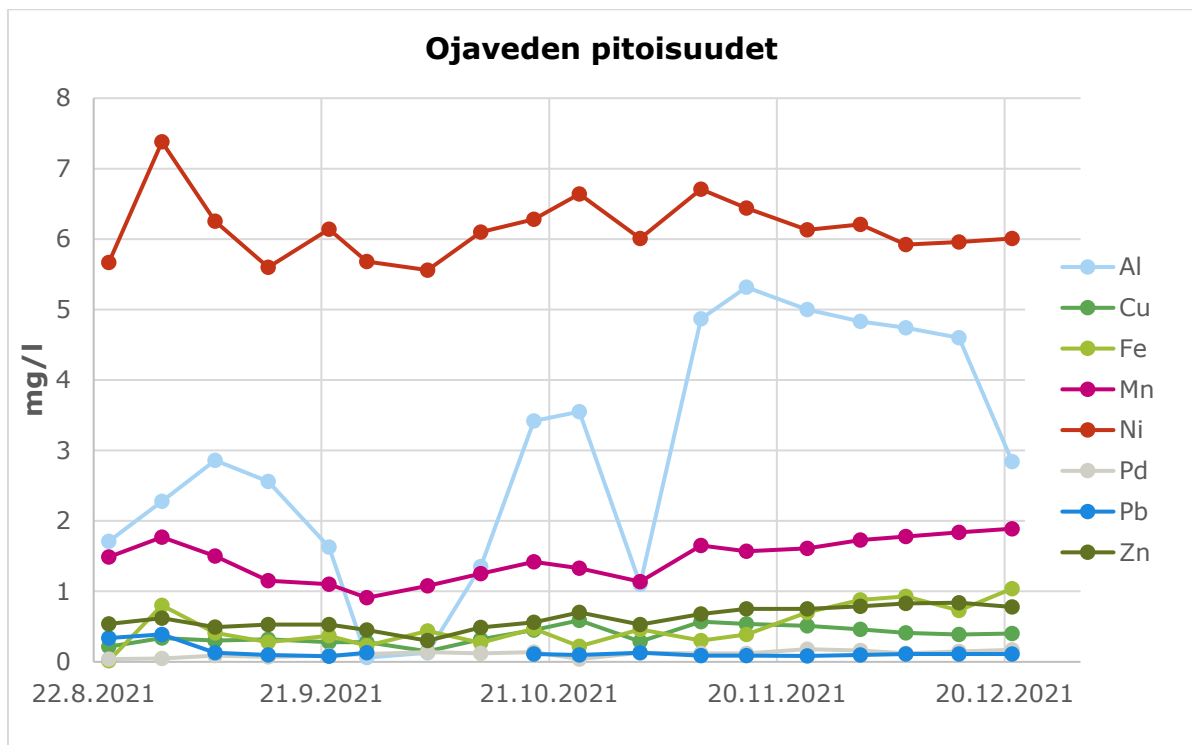
Kuva 65. Reaktiivisten mattojen pilotoinnin pH-arvot.



Kuva 66. Reaktiivisten mattojen pilotoinnin sähkönjohtavuus ja sulfaattipitoisuudet.

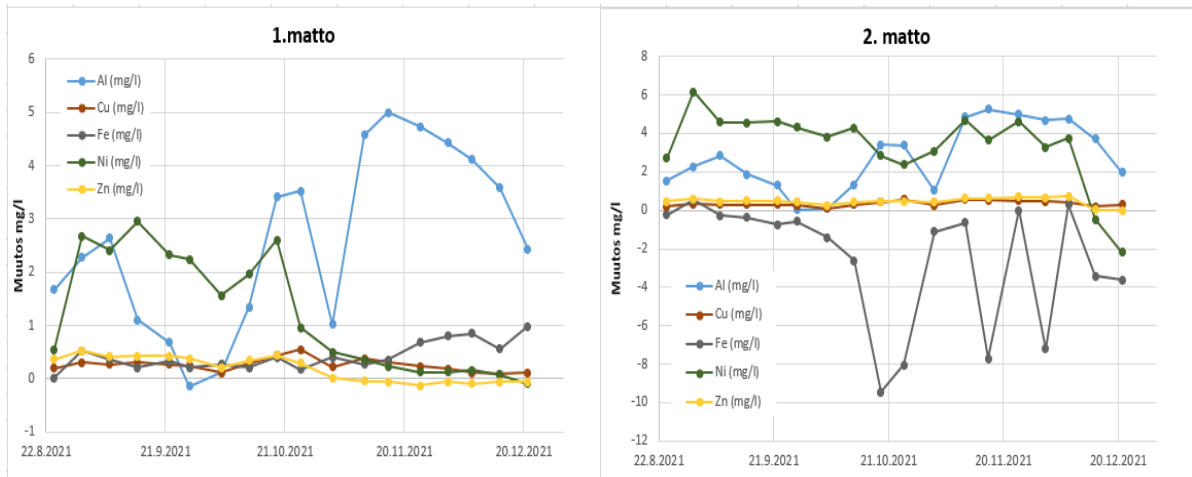
Reaktiivisten mattojen pilotoinnissa metallien poistaminen vedestä ei perustu pH-muutokseen, mikä on nähtävissä kuvasta 65. Seurannan aikana ensimmäisen maton läpi suotautuneen veden pH nousi neutraalille tasolle ja suotautuessa toisen maton läpi pH laski hieman. Seurannan loppuvaiheessa veden pH muutokset olivat huomattavasti maltillisempia. Lievään pH-muutokseen vaikuttaa todennäköisesti maton sisältämä kalsium.

Pilotoinnin alkupuolella molemmista matoista suotautuvan veden sähkönjohtavuus oli samaa tasoa kuin rakenteisiin tulevan veden sähkönjohtavuus (kuva 66). Kaikissa mittauspisteissä veden sähkönjohtavuus nousee seurannan edetessä alkuperäiseltä 250 mS/m tasolta noin tasolle 350 mS/m, mikä todettiin myös uusiomateriaalien pilottirakenteeseen johdetussa vedessä. Ensimmäisen maton osalta läpi suotautuneen veden sähkönjohtavuus pysyi koko seurannan ajan altaaseen tulevan veden tasolla (ec2). Toisen maton osalta veden sähkönjohtavuus vaihteli erityisesti seurannan loppupuolella (ec3). Toinen matto pidätti vaihtelevasti veteen liuenneita rautasulfaatteja, mikä on todettavissa kuvassa ylempänä suotautuneen veden sulfaattipitoisuuden muutoksina (sul3).

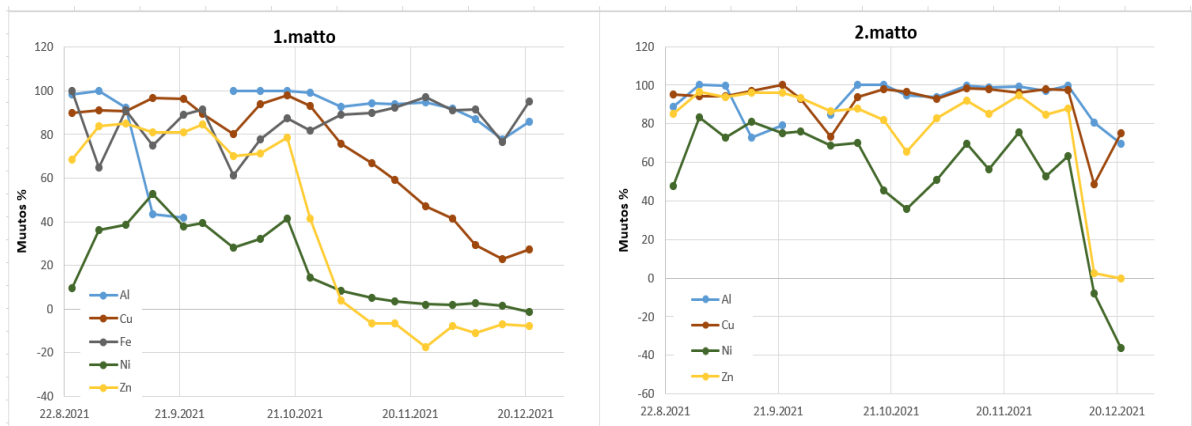


Kuva 67. Pilottirakenteisiin johdetun ojaveden metallipitoisuudet.

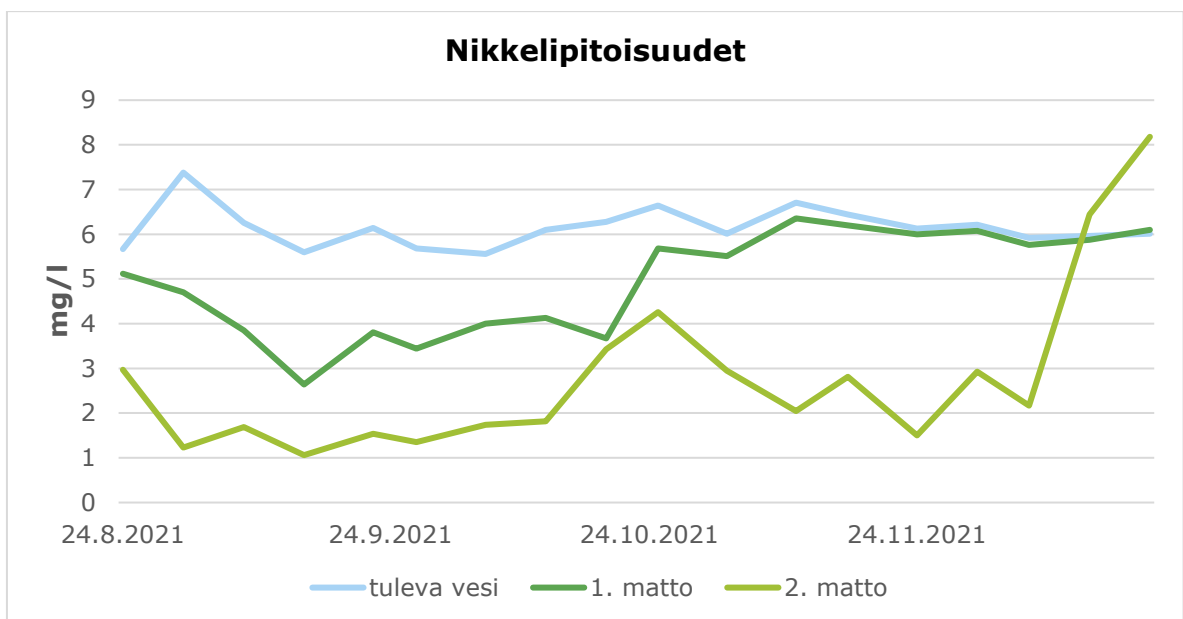
Ojaveden haitallisten metallien suurimmat pitoisuudet olivat vastaavalla tasolla kuin kalkkipatoaltaaseen johdetussa vedessä: nikkeli (5,56-7,38 mg/l), alumiini (0-5,3 mg/l) ja mangaani (0,91-1,89 g/l) (kuva 67). Nikkelipitoisuus oli selvästi muita metalleja korkeampi koko seurantajakson ajan, alumiinipitoisuus vaihteli ja mangaanipitoisuus oli noin tasolla 1-2 mg/l. Muista metalleista suurimmat pitoisuudet olivat sinkillä, raudalla ja kuparilla, joiden pitoisuudet olivat koko seurantaajan tasolla <1 mg/l.



Kuva 68. Ojaveden metallipitoisuuksien pieneminen (mg/l) matoista suotautumisen jälkeen (negatiivinen arvo kuvaa pitoisuuden kohoamista).



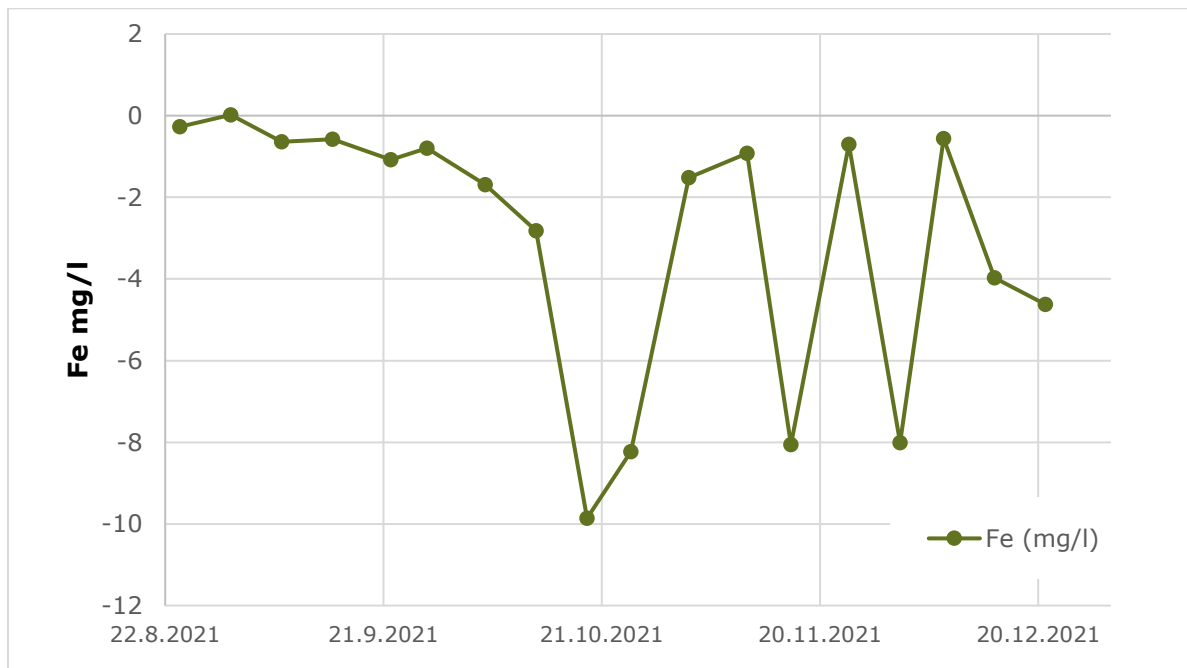
Kuva 69. Ojaveden metallipitoisuuksien pieneminen (%) matoista suotautumisen jälkeen (negatiiviset arvot kuvaavat pitoisuuden nousua).



Kuva 70. Reaktiivisen matorakenteen vaikutus läpisuotautuvan veden nikkelipitoisuuteen.

Mattojen toimivuudesta kertoo metallipitoisuuksien pieneneminen alkuperäisen ojaveden metallipitoisuuksiin verrattuna (kuvat 68 ja 69). Ojaveden nikkelpitoisuus laski reaktiivisten mattojen vaikutuksesta parhaimmillaan tasolle 1 mg/l (kuva 70). Hituran kaivosalueen purkuvesien nikkelpitoisuudelle asetettu maksimiraja-arvo on 2,5 mg/l, joka alittui seurannan alkuvaiheissa selvästi kahden maton pidättäessä tehokkaasti mattojen läpi suotautuvan veden nikkeliä. Seurannan loppuvaiheissa nikkelpitoisuus vaihteli raja-arvon molemmin puolin, kunnes toinenkin matto kyllästyi ja menetti kykynsä nikkelin sitomiseen, jonka jälkeen suotoveden nikkelpitoisuus lähti nousuun.

Ensimmäisen maton metallien poiston teho nikkelin ja sinkin osalta heikentyi noin kahden kuukauden jälkeen pilotoinnin aloittamisesta läpi virranneen veden määrän ollessa noin 240 m³, myös kuparin pidättyminen mattoon alkoi selvästi vähentyä (kuva 69). Ensimmäinen matto poisti ojaveden nikkelistä parhaimmillaan noin puolet, muiden metallien osalta poistoteho oli selvästi suurempi. Ojaveden alumiinia pidättyi mattoihin hyvin koko seurannan ajan. Ensimmäisen maton tehon heikentyessä metallien pidättyminen siirtyi seuraavan altaan mattoon. Maton kyllästymisestä huolimatta sen vedenläpäisyominaisuudet eivät muuttuneet.



Kuva 71. Ojaveden rautapitoisuuden pieneneminen (mg/l) 2. matosta suotautumisen jälkeen (negatiivinen arvo kuvaa pitoisuuden nousua).

Toisen maton osalta metallien poiston tehokkuus heikentyi pilotoinnin viimeisten mittauksien aikaan, noin neljä kuukautta seurannan aloittamisesta, jolloin matosta suotautuneen veden määrä oli noin 480 m³. Kahden viimeisen seurantakuukauden aikana toisesta matosta liukeni veteen rautaa, kun samalla mattoon adsorboitui tehokkaasti muita metalleja (kuva 71). Viimeisillä mittauskerroilla molempien mattojen läpi suotautuneen veden metallipitoisuuksien pieneneminen kääntyi -merkiseksi, jolloin matot alkoivat päästää sitomiaan metalleja takaisin suotoveteen ja metallipitoisuudet nousivat (kuvat 68 ja 69).

7.5.6 Johtopäätökset / reaktiivinen mattorakenne

Adsorptioon perustuva kaivosvedenkäsittely reaktiivisen maton avulla poistaa vedestä tehokkaasti suurempiakin metallipitoisuuksia. Maton huokoiset kalsiumsilikaattirakeet sitovat metallit materiaalin ulkopinnoille ja matto alkaa täyttyä metalli-ioneista. Maton kyllästyminen siihen sitoutuneista metalleista ei kuitenkaan vaikuta maton vedenläpäisyominaisuuksiin.

Pilotoinnissa käytetyt matot toimivat muuttuvissa olosuhteissa metalleilla kyllästymiseensä asti hyvin. Molempien mattojen arvioitu käyttöikä Hituran kaivosveden käsittelyssä (toteutuneissa testiolosuhteissa) on noin kaksi kuukautta, jonka jälkeen erityisesti nikkeli, sinkki ja kupari eivät enää sitoudu mattoon. Virtaaman ollessa noin 4 m³ päivässä ja muita metalleja tai niiden pidättymiseen vaikuttavia tekijöitä huomioimatta, pilotoinnin perusteella voidaan arvioida maton pidättävän nikkeliä noin 12 g/m².

Raudan liukeneminen toisesta matosta voi olla seuraus kontaminaatiosta asennuksen/varastoinnin yhteydessä tai valmistusvirheestä. Tulevaisuudessa tulisi tutkia tarkemmin mattojen identtisyttä raudan pidättämisen osalta. Muiden metallien pidättymisestä saadaan pilotoinnin avulla hyvä kuva ja tulevaisuudessa voidaan mitoittaa kohteeseen riittävä mattorakenne, kun suotautuvien metallien pitoisuudet on määritetty.

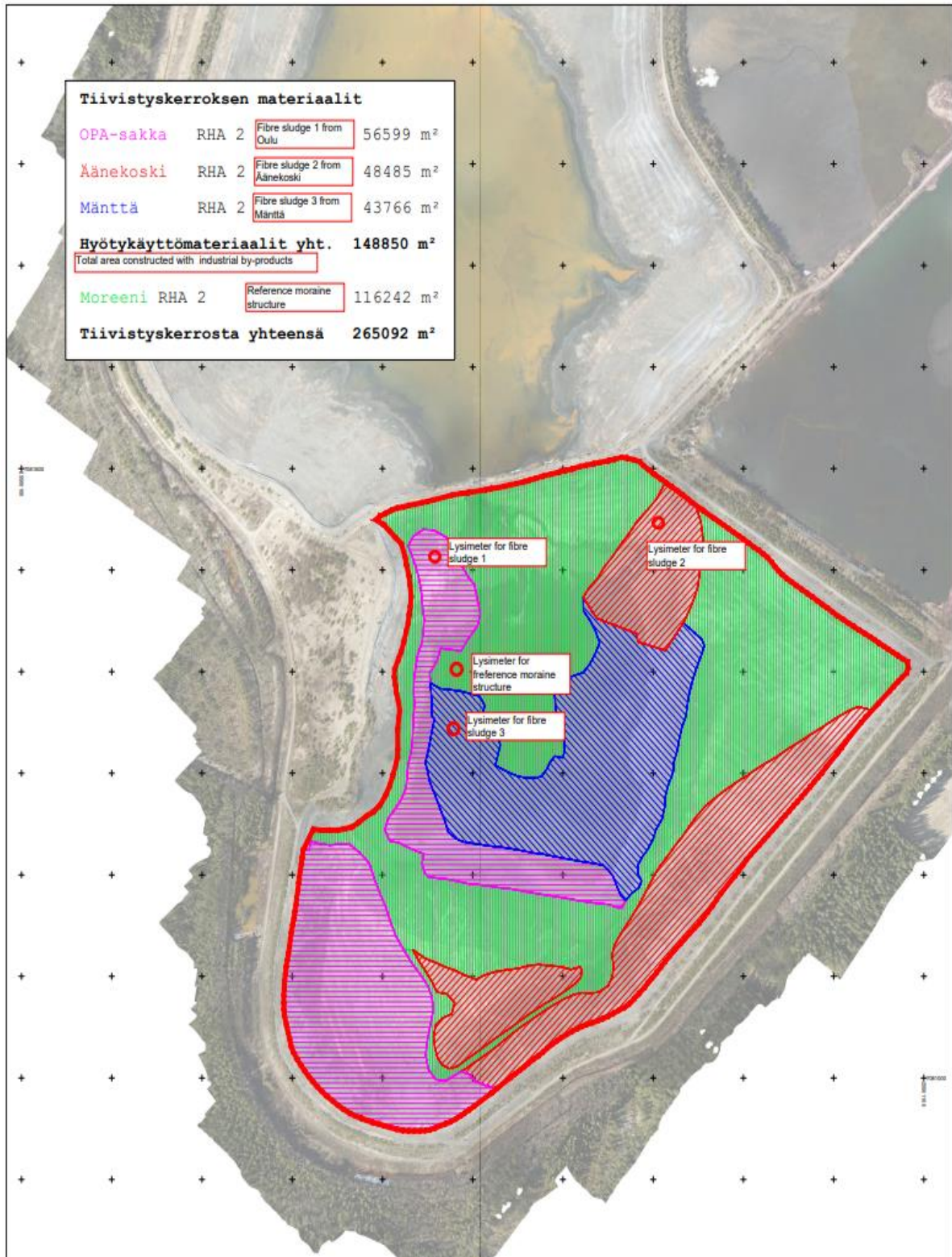
Olosuhteiden muutokset eivät vaikuttaneet mattojen toimivuuteen merkittävästi ja mattojen voidaan todeta soveltuvan suomalaisiin muuttuviin sääoloihin. Voimakkaiden sateiden aikana virtaaman ja vesimäärän kasvaessa, metallien poistoteho heikentyi jonkin verran. Altaiden pinnan jäätyminen ja veden lämpötilan laskeminen ei vaikuttanut metallien pidättymiseen.

Test-structure	Days	Date	Physical-chemical investigation (mg/l)					ELEMENTAL ANALYSIS (µg/l)																				
			TOC	DOC	Sulfate	Chloride	Fluoride	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	V	Zn	Ca (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	S (mg/l)
6	0	23.5.2016	9,7	2600	42	<1	84,1	0,37	46,2	0,68	<0,2	1,1	12,2	<0,1	3450	0,073	26,3	0,058	<0,05	0,51	0,18	26,7	782	20,5	211	32,6	896	0,28
	42	4.7.2016																										
	134	4.10.2016	11,3	10,5	2900	56	<1	<25	0,47	25,3	<0,1	<1	1,4	<15	<0,5	63,3	1,8	0,76	<0,25	<0,25	<0,5	<1	54,7	515	15,6	572	50,7	1150
	165	4.11.2016	7,4	7,3	3400	56	<1	<25	0,5	26,3	<0,1	<1	1,6	<15	<0,5	35,7	2,3	0,51	<0,25	<0,25	0,72	<1	28,5	536	15,9	783	60,8	1540
	233	10.1.2017			6600			<5		0,052		2	16,8			13,9		0,59					3,4					2040
	345	2.5.2017			9900			<25		0,2		3,2	<15			2780		1,5					14,3					3040
	375	1.6.2017			10000			<25		0,14		3,3	<15			4540		2,7					25,2					2960
	453	18.8.2017			2,7			5,7		0,068		12	7			27		0,22					2610					0,61
	459	24.8.2017																										
1262	5.11.2019		7,79	21500	4,54	1,19	<20	2,53	37,4	0,247	2,43	<10	42,4	0,008	19300	<10	4,67	<0,5	<0,5	<2	5,03	473	318000	82600	4430000	19100	6350	
7	0	23.5.2016	12	11,1	2400	33	<1	39,4	0,25	40,1	0,6	0,59	1,1	11,7	<0,1	2920	0,11	25,1	0,12	<0,05	0,68	0,18	113	690	16,7	186	26,3	783
	42	4.7.2016																										
	134	4.10.2016	8	7,6	2800	56	<1	<25	0,3	27,6	<0,1	<1	1,4	<15	<0,5	8,7	1,3	1,1	<0,25	<0,25	0,63	<1	115	507	15,3	497	51	1110
	165	4.11.2016	6,7	6,7	2800	52	<1	<25	0,38	23,4	<0,1	<1	1,3	<15	<0,5	6,9	2,2	1,1	<0,25	<0,25	0,61	<1	32,4	513	15,2	595	53,9	1300
	233	10.1.2017			3700			7,9		0,047		1,4	15,6			4,3		0,7					3,6					1240
	345	2.5.2017			4900			<25		0,2		3,2	<15			3000		2,4					14,1					3130
	375	1.6.2017			12000			<25		0,22		3,8	<15			3560		2,6					28,8					4460
	453	18.8.2017			130			6,5		0,18		26,2	8			138		0,98					4360					49,4
	459	24.8.2017																										
1262	5.11.2019		2,81	3340	1,13	0,258	<2	<1	12,5	0,056	0,239	1,9	2,7	<0,005	134	<1	<2	<0,5	<0,05	<1	0,58	107	186000	35100	571000	72700	1110	
8	0	23.5.2016																										
	42	4.7.2016	13	12,6	3700	38	<1	2300	0,89	36,5	3,8	0,75	9	144	<0,1	36100	0,23	202	0,5	<0,05	2,3	0,48	77,1	508	20,9	719	42,4	1380
	134	4.10.2016	8,3	7,6	4100	68	<1	3680	0,54	28,2	2,8	<1	9,5	51,9	<0,5	10500	<0,25	119	<0,25	<0,25	1,7	<1	363	442	47,9	805	75,7	1560
	165	4.11.2016	5,2	5,1	3500	60	<1	3310	0,42	20,6	1,9	<1	7,3	29,6	<0,5	7610	<0,25	76,1	<0,25	<0,25	1,2	<1	298	392	44,3	805	75,9	1560
	233	10.1.2017			2800			3200		0,91		5,5	39,1			2090		20,7					218					1180
	345	2.5.2017			2100			2230		0,42		4,9	15,9			1370		6,3					146					1150
	375	1.6.2017			3100			1820		0,4		3,4	19			1350		6,3					121					1010
	453	18.8.2017																										
	459	24.8.2017			4800			2730		0,8		7,4	38,8			2000		18,1					201					1720
1262	5.11.2019		10,1	20500	4,41	4,67	<20	<2	19,8	0,616	<2	<10	31,1	<0,005	11000	12,6	5,89	<0,5	<0,5	<2	1,05	490	216000	116000	4020000	15600	6320	
9	0	23.5.2016																										
	42	4.7.2016	32	29,3	2700	36	20	2640	37	41	2,2	0,53	15,5	108	<0,1	22300	0,15	185	0,42	0,49	1,7	0,34	76,4	633	21,2	387	41,7	1120
	134	4.10.2016	22,6	21,8	2400	55	<1	1300	2,7	26,2	2,4	<1	3,9	37,4	<0,5	12900	<0,25	137	<0,25	<0,25	0,81	<1	317	430	29,5	368	60,2	948
	165	4.11.2016	15,6	16,9	2300	55	<1	1170	2	21,3	2,4	<1	3	22,7	<0,5	10200	<0,25	118	<0,25	<0,25	0,67	<1	148	439	28,2	324	60,7	918
	233	10.1.2017			2300			1090		1,9		2,9	52,5			6940		86,3					70,5					826
	345	2.5.2017			1700			1300		1,6		3,9	15,9			3190		40,5					75,3					830
	375	1.6.2017			1900			926		0,91		2,4	<15			1680		20,1					60					664
	453	18.8.2017			2200			932		1,9		5,9	13,4			2350		35,7					118					968
	459	24.8.2017																										
1262	5.11.2019		2,42	1460	15,2	<0,2	7,67	<1	13,6	0,151	<0,2	1,2	2,4	<0,005	543	<1	2,2	<0,5	0,116	<1	0,169	95,6	356000	32100	152000	27300	488	
10	0	23.5.2016																										
	42	4.7.2016	93,7	94,9	1700	33	<1	6610	35,9	34,7	4,3	1	46,9	745	<0,1	19000	0,13	200	0,7	0,38	3,4	0,48	343	763	23,3	110	26,8	940
	134	4.10.2016	63,9	48,9	1600	48	<1	2340	3,1	31,2	2,1	<1	3,3	46	<0,5	17100	<0,25	172	<0,25	<0,25	0,81	<1	278	488	25,7	130	54,8	678
	165	4.11.2016	48,1	45,7	1600	43	<1	4000	1,8	27,3	2,8	<1	34,8	204	<0,5	19200	<0,25	173	<0,25	<0,25	0,64	<1	359	509	25,3	139	58,4	717
	233	10.1.2017																										
	345	2.5.2017			1500			1220		1,5		2,8	24,2			7770		85,9					21,4					610
	375	1.6.2017			1500			989		1,3		1,7	17,6			4790		58,3					138					524
	453	18.8.2017			1700			630		0,94		3,9	17,1			3150		42,8					96,7					581
	459	24.8.2017																										
1262	5.11.2019		1,55	1170	5,9	<0,2	311	<1	7,7	0,578	<0,2	3,7	6,3	<0,005	635	<1	19,3	<0,5	0,11	<1	0,067	149	163000	30100	85700	127000	458	

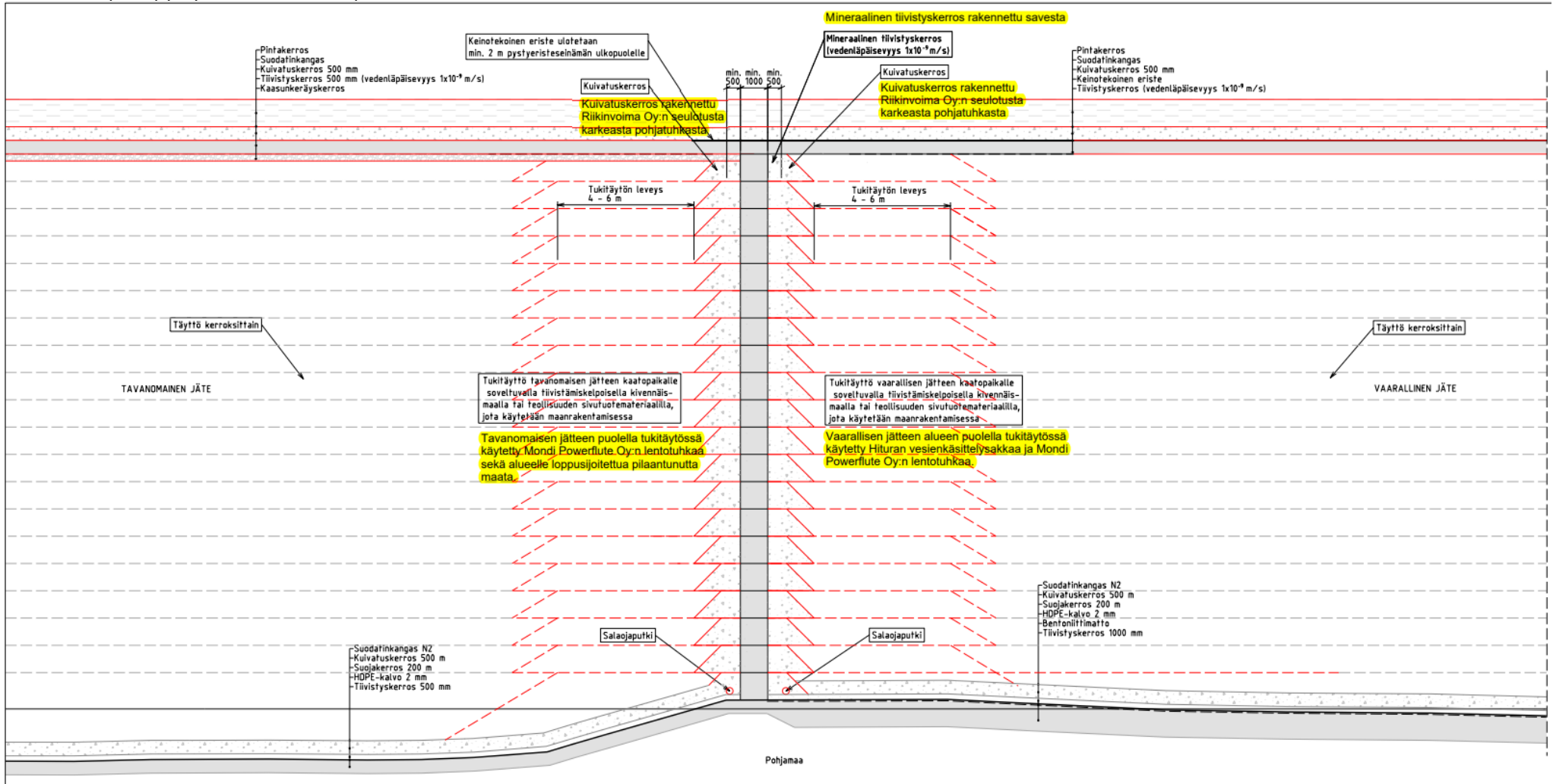
Liite 2. Pyhäsalmen pintarakennepilotoinnin materiaalien liukoiset pitoisuudet, jotka ylittivät laboratorion määrittämissä rajat

Haitta-aine	Kaatopaikkojen raja-arvot, L/S=10 l/kg, asetus 331/2013			kumulatiivinen L/S = 10 l/kg						
	Pysyvä jäte	Tavanomainen jäte	Vaarallinen jäte	Rikastushiekka (karkea)	Rikastushiekka (hieno)	Tuhka	Kipsi	Moreeni	Inertti	Kasvukerros
Alumiini, Al						110	4,1	0,94	0,63	1,3
Arseeni, As	0,5	2	25				1,5			
Barium, Ba	20	100	300	0,21	0,19	1	0,06	0,43		0,41
Kadmium, Cd	0,04	1	5	0,11	0,054		0,049			
Kromi, Cr	0,5	10	70			0,5				
Kupari, Cu	2	50	100				4,3	0,2		
Rauta, Fe							35,3	0,68	0,56	0,46
Mangaani, Mn				54	38		17	5,8		2,3
Molybdeeni, Mo	0,5	10	30			3				
Nikkeli, Ni	0,4	10	40	0,42	0,21		0,47	0,12		
Seleen, Se	0,1	0,5	7	0,023	0,02	0,065	0,031			
Vanadiini, V						0,1	0,11			0,073
Sinkki, Zn	4	50	200	21	11		20,9	2,1		0,23
Kloridi, Cl	800	15000	25000			924				70
Sulfaatti, SO ₄ ²⁻	1000	20000	50000	17300	18100	16600	17500	280		1000
Fluoridi	10	150	500		6,1		2190			
DOC	500	800	1000							150
Kalsium				6410	6390	6100	6620	49	15	470
Natrium				18,4	26	670	990	13	7,7	18
Kalium				135	168	1300	477	22,6	6,4	243
Magnesium				410	658	16	480	26,2	1,1	184
pH				6,7	7	9,5	2,8	4,8	7,5	5,6
Sähkönjohtavuus (mS/m)				236	245	270	170	4,3	767	22,8
Redox (mV)				200	290	210	410	290	270	260

Liite 3. Hituran kuitusavi- ja moreeni-peiterakenteet kartalla.



Liite 4. Kuopion pystyeristerakenteen poikkileikkauskuva.



Liite 5. Kalkkipatoaltaan vesinäytteiden analysitulokset.

PVM	Näyte	Virtaus (m ³ /d)	pH	EC mS/m	Sulfaatti (mg/l)	Al (mg/l)	Ca (mg/l)	Co (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	Mg (mg/l)	Mn (mg/l)	Ni (mg/l)	Zn (mg/l)
2.9.2021	Tulovesi	noin 4 m ³ /d	5,48	242	1932	3,99	143	0,28	0,48	0,47	54	1,86	7,72	0,65
2.9.2021	Padon suotovesi		8,91	240	1724	0	194	0,08	0,02	0,05	48	0,45	2,03	0,02
3.9.2021	Tulovesi	Säädetty	5,52	242	1805	3,21	155	0,23	0,36	0,36	241	1,73	0,69	0,57
3.9.2021	Padon suotovesi		8,75	247	1773	0,23	187	0,06	0,01	0,03	236	0,42	0,2	0,02
7.9.2021	Tulovesi	Virtausta nostettu	5,64	246	1699	3,13	142	0,24	0,3	0,34	266	1,46	5,78	0,5
7.9.2021	Padon suotovesi	> 4 m ³ /d	8,59	256	1790	0,02	172	0,13	0,01	0,06	264	0,69	2,89	0,01
14.9.2021	Tulovesi		5,57	201	1418	2,17	95	0,14	0,33	0,26	230	1,1	5,24	0,45
14.9.2021	Padon suotovesi		7,97	279	1981	0,56	172	0,05	0,02	0,08	333	0,36	1,93	0,01
22.9.2021	Tulovesi		5,85	274	1951	2,51	162	0,13	0,4	0,68	329	1,25	7,01	0,66
22.9.2021	Padon suotovesi		8,2	293	2141	1,11	184	0,02	0	0,13	366	0,37	2,16	0,01
27.9.2021	Tulovesi		5,72	290	2087	1,67	171	0,16	0,45	0,11	371	1,15	6,74	0,57
27.9.2021	Padon suotovesi		8,59	302	2111	0	193	0,06	0,02	0,03	380	0,38	2,31	0,01
5.10.2021	Tulovesi		6,58	314	2277	0,82	165	0,17	0,25	0,37	497	1,18	5,98	0,41
5.10.2021	Padon suotovesi		8,71	312	2263	0,1	190	0,1	0,03	0,08	496	0,55	2,81	0,04
12.10.2021	Tulovesi		5,06	287	2172	2,72	158	0,22	0,45	0,3	370	1,45	6,66	0,54
12.10.2021	Padon suotovesi		7,21	295	2215	0,03	174	0,11	0,02	0,09	378	0,68	3,11	0,04
19.10.2021	Tulovesi		5,1	257	1952	3,48	135	0,21	0,46	0,44	379	1,41	6,33	0,56
19.10.2021	Padon suotovesi		7,31	296	2197	0	184	0,09	0,003	0,06	444	0,56	3,27	0,05
25.10.2021	Tulovesi		5,21	303	2278	3,8	182	0,18	0,69	0,2	430	1,4	6,72	0,77
25.10.2021	Padon suotovesi		7,81	290	2182	0,04	169	0,08	0,02	0,03	430	0,59	4,31	0,03
2.11.2021	Tulovesi		5,47	329	2543	1,03	221	0,13	0,3	0,51	473	1,15	5,97	0,53
2.11.2021	Padon suotovesi		7,72	332	2535	0,05	238	0,11	0,02	0,02	449	0,79	5,54	0,2
10.11.2021	Tulovesi		4,95	272	2247	4,7	178	0,2	0,57	0,33	424	1,63	6,78	0,68
10.11.2021	Padon suotovesi		7,86	294	2476	0,087	221	0,12	0,01	0,02	458	0,64	5,8	0,153
16.11.2021	Tulovesi	15.11 Suljettu	5,27	304	2414	5,33	177	0,18	0,55	0,36	434	1,57	6,47	0,77
16.11.2021	Padon suotovesi	19.11 Avattu	7,67	343	2507	0,044	214	0,11	0,02	0,01	427	0,63	5,88	0,22
24.11.2021	Tulovesi	Pysynyt hyvänä	5,3	337	2382	4,59	181	0,16	0,5	0,75	455	1,63	6,1	0,75
24.11.2021	Padon suotovesi		7,58	347	2547	0,02	223	0,12	0,02	0,03	459	0,85	5,71	0,35
1.12.2021	Tulovesi		5,39	336	2382	4,49	189	0,17	0,45	0,89	487	1,75	6,18	0,8
1.12.2021	Padon suotovesi		7,56	346	2308	0,18	240	0,11	0,01	0,04	504	0,72	6	0,4
7.12.2021	Tulovesi		5,39	331	2637	4,57	194	0,17	0,4	0,98	448	1,79	5,86	0,82
7.12.2021	Padon suotovesi		7,46	348	2598	0,05	252	0,09	0,02	0,03	468	0,64	5,64	0,44
14.12.2021	Tulovesi		5,41	331	2604	4,24	191	0,16	0,4	0,76	455	1,78	5,88	0,82
14.12.2021	Padon suotovesi		7,37	349	2632	0,02	238	0,07	0,02	0,03	468	0,38	5,69	0,39
21.12.2021	Tulovesi		5,39	332	2533	5,33	199	0,19	0,51	0,72	446	2,08	6,48	0,93
21.12.2021	Padon suotovesi		7,25	355	2689	0,05	240	0,13	0,04	0,04	474	0,98	6,08	0,58