

Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen

– HybArkt -hankkeen loppuraportti

Heini Postila, Elisangela Heiderscheidt, Anne Korhonen,
Kaisa Lehosmaa, Ritva Nilivaara, Anna-Kaisa Ronkanen,
Anna Liisa Ruotsalainen, Mirkka Visuri, Piippa Wäli

Suomen ympäristökeskuksen raportteja 1 / 2021

Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen

– HybArkt -hankkeen loppuraportti

**Heini Postila, Elisangela Heiderscheidt, Anne Korhonen,
Kaisa Lehosmaa, Ritva Nilivaara, Anna-Kaisa Ronkanen,
Anna Liisa Ruotsalainen, Mirkka Visuri, Piippa Wäli**



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

Suomen ympäristökeskuksen raportteja 1 | 2021

Suomen ympäristökeskus

Vesistöt ja vesivarat/Vesikeskus

Kirjoittajat: Heini Postila¹⁾, Elisangela Heiderscheidt¹⁾, Anne Korhonen²⁾, Kaisa Lehosmaa³⁾,
Ritva Nilivaara²⁾, Anna-Kaisa Ronkanen¹⁾, Anna Liisa Ruotsalainen³⁾, Mirikka Visuri²⁾, Piippa Wäli³⁾

¹⁾ Oulun yliopisto, Vesi- energia- ja ympäristötekniikan tutkimusyksikkö

²⁾ Suomen ympäristökeskus

³⁾ Oulun yliopisto, Ekologian ja genetiikan tutkimusyksikkö

Vastaava erikoistoimittaja: Ahti Lepistö

Rahoittaja/toimeksiantaja: Euroopan aluekehitysrahasto

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus (SYKE)

Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Taitto: Heini Postila

Kannen kuva: Adobe Stock

Julkaisu on saatavana veloitusetta internetistä: www.syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke sekä
ostettavissa painettuna SYKEN verkkokaupasta: syke.omapumu.com

ISBN 978-952-11-5344-0 (PDF)

ISBN 978-952-11-5343-3 (nid.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

ISSN 1796-1718 (pain.)

Julkaisu vuosi: 2021

Tiivistelmä

Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen (HybArkt)

Tyyppi ja/tai raskasmetallipitoista kuormitusta vesistöihin muodostuu mm. kaivostoiminnasta, jätevedenpuhdistamoilta, hulevesistä, maataloudesta ja turvetuotannosta. Monissa näistä kohteista passiiviset vesienkäsittelymenetelmät voivat olla ratkaisu tai osaratkaisu vesien puhdistamiseen. Yksittäisiä passiivisia puhdistusratkaisuja, kuten erilaisia kosteikkoja, onkin jo käytössä monissa paikoissa. Kuitenkaan yksittäisellä ratkaisulla ei usein pystytä optimaalisesti erilaisten aineiden puhdistamiseen. Tällöin erityyppisten passiivisten yksikkökomponenttien yhdistämisellä voitaisiin toteuttaa jäte- tai valumavesien puhdistusta siten, että puhdistusratkaisu huomioi paremmin kuormituslähteen vedenlaadun ja sen puhdistustarpeet. Uuden tiedon tuottaminen hybridiratkaisujen suunnittelusta ja mitoituksesta kylmiin olosuhteisiin olikin HybArkt -hankkeen yhtenä tarkoituksena. Lisäksi hankkeessa tarkoituksena oli tutkia ja optimoida pohjoisiin olosuhteisiin sopeutuneiden luonnonkasvien, sienten ja bakteerien kykyä pidättää vedestä typpeä ja raskasmetalleja. Näiden pohjalta tavoitteeksi asetettiin erilaisten toimintojen vesistökuormituksen pienentäminen kustannustehokkaasti passiivisilla menetelmillä.

HybArkt -hankkeessa toteutettiin aluksi kirjallisuuskatsaus erilaisien passiivisten vesienkäsittely-yksiköiden toimivuudesta. Tämän tiedon ja pilottikohteista (Pyhäsalmen kaivos, Kallon jätevedenpuhdistamo ja Levin hulevesiojasto), kerätyn tiedon perusteella suunniteltiin, mitoitettiin ja rakennettiin hybridipilottirakenteet. Pyhäsalmen kaivoksen pilottirakenteessa käsiteltiin ns. eristysojan vesiä, jotka koostuivat rikastushiekka-altaiden suotovesistä, metsäalueelta tulevasta valumavesistä ja vanhan metallilla kontaminoituneen alueen vesistä. Täällä erityisesti metallien, kuten kuparin, sinkin ja raudan, poisto oli olennaista. Kallon jätevedenpuhdistamolla keskityttiin typenpoiston tehostamiseen. Levin hulevesien purkupuutken suulle rakennetussa käsittelyrakenteessa tavoitteena oli sekä typen että metallien poisto. Pilottirakenteita seurattiin mm. vesinäytteenotoin 1–2 vuoden ajan. Lisäksi mitoitusta ja/tai suunnittelua toteutettiin myös muille toimijoille, ja hankkeen aikana kerätyn tiedon pohjalta laadittiin mitoitus- ja suunnittelutyökalu.

Tulosten perusteella Pyhäsalmen pilottiyksiköllä saatiin hyvin poistettua monia metalleja, kuten kuparia, sinkkiä ja rautaa. Kuitenkin havaittiin, että pH:n nostoyksikkö oli liian tukkeutumisherkkä ja rautaa pääsi vielä paljon myös bioreaktoreihin. Kallon jätevedenpuhdistamolla se osa ammoniumtypestä, mikä saatiin muutettua nitriitti-nitraattitypeksi, saatiin myös poistumaan pilottirakennekokonaisuuden avulla. Levin pilottirakenteessa huomattiin, että liian suuri virtausnopeus rajoittaa puhdistusprosesseja, sekä huleveden tason mukaisten metallipitoisuuksien poistossa on haasteita, mutta virtausnopeutta pienentämällä erityisesti typen puhdistusta saatiin tehostettua. Vaikka jokaisessa pilottirakenteessa oli omat haasteensa, saatiin niistä kuitenkin lupaavia tuloksia ja havaintoja, millä niiden toimivuutta voidaan parantaa. Tutkimus on toteutettu Euroopan Aluekehitysrahaston osarahoittamassa hankkeessa 'Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen' (HybArkt, 2018–2020).

Asiasanat: veden käsittely, puhdistusrakenteiden mitoitus, kaivosvedet, yhdyskuntajätevedet, hulevedet, pohjoiset olosuhteet

Sammandrag

Passiva hybridreningslösningar för rening av arktiska lakvatten från kväve och tungmetaller (HybArkt)

Många processer, bland annat gruvverksamhet, reningsverk, dagvatten, jordbruk och torvproduktion orsakar kväve- och/eller tungmetallbelastning i vattendrag. I många av dessa fall kan lösningen eller en dellösning vara passiva vattenreningsmetoder. Enskilda passiva reningslösningar såsom olika typer av våtmarker används redan på många håll. En enskild metod är dock ofta inte optimal för att avlägsna alla ämnen. I sådana fall kan avlopps- eller lakvatten renas genom en kombination av olika typer av passiva enhetskomponenter så att reningslösningen kan ta bättre hänsyn till vattenkvaliteten i belastningskällan och dess reningsbehov. Att producera ny kunskap om planering och dimensionering av hybridlösningar för kalla förhållanden var också ett av målen för HybArkt-projektet. Dessutom var avsikten med projektet att undersöka och optimera förmågan hos naturliga växter, svampar och bakterier som anpassat sig till nordiska förhållanden att uppta kväve och tungmetaller från vatten. Mot bakgrund av dessa blev målet att genom kostnadseffektiva passiva metoder minska belastningen från olika processer på vattendrag.

Det första steget i HybArkt-projektet var att gå igenom litteraturen för att ta reda på effekten av olika passiva vattenbehandlingsenheter. Utifrån denna kunskap och de kunskaper man samlat in från pilotprojektet vid Pyhäsalmi gruva, Kallio avloppsreningsverk och Levi dagvattensystem planerades, dimensionerades och byggdes systemet för hybridpiloten. Pilotsystemet vid Pyhäsalmi gruva behandlade vatten från så kallade isoleringsdiken som bestod av sippervatten från anrikningssandsdammar, lakvatten från skogsområden och vatten från vattendrag som blivit kontaminerad av gamla metaller. Här var det särskilt viktigt att ta bort metaller såsom koppar, zink och järn. På Kallio avloppsreningsverk fokuserade man på att effektivisera borttagningen av kväve. Syftet med behandlingssystemet som byggdes vid mynningen av utloppsröret för dagvatten i Levi var att ta bort både kväve och metaller. Pilotsystemen följdes upp bland annat genom vattenprov under 1–2 år. Dessutom utfördes dimensionering och/eller planering för andra aktörer enligt projektplanen och de kunskaper som samlats i projektet blev underlaget för ett dimensionerings- och planeringsverktyg.

Resultaten visar att pilotenheten i Pyhäsalmi fungerade bra för att ta bort många metaller såsom koppar, zink och järn. Det kunde dock konstateras att systemet för höjning av pH var för känsligt för igensättning och mycket järn hamnade i bioreaktorerna. På Kallio avloppsreningsverk kunde den del av ammoniumkväve som omvandlades till nitrit-nitrat-kväve också tas bort med hjälp av pilotsystemshelheten. Pilotsystemet i Levi visade att om strömningshastigheten är för hög, begränsar den reningsprocesserna. Även borttagning av metaller från dagvatten medför utmaningar, men genom att minska strömningshastigheten blev i synnerhet borttagning av kväve mer effektiv. Trots att varje pilotsystem hade sina egna utmaningar, gav de ändå lovande resultat och observationer som kan utnyttjas för att förbättra deras funktion. Studien har genomförts i projektet Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen (Passiva hybridreningslösningar för rening av arktiska lakvatten från kväve och tungmetaller, HybArkt, 2018–2020) som medfinansieras av Europeiska regionala utvecklingsfonden.

Nyckelord: vattenbehandling, dimensionering av reningssystem, gruvvatten, avloppsvatten från tätbebyggelse, dagvatten, nordiska förhållanden

Abstract

Passive hybrid treatment solutions to remove nitrogen and heavy metals from different types of waters in Arctic region (HybArkt)

Nitrogen and/or heavy metal-containing loads to recipient water bodies come from e.g., mining, sewage treatment plants, stormwater, agriculture and peat production. In many of these applications, passive water treatment methods can be a solution or sub-solution for water purification. Individual passive cleaning solutions, such as various wetlands, are common to use in many places. However, it is often not possible to optimally purify various substances with a single water purification solution. In this case, by combining different types of passive unit components, the treatment of wastewater or runoff water could be implemented with solutions that will better take into account the water quality and treatment needs. One of the aims of the HybArkt –project was to produce new information on the designing and measuring of hybrid solutions for cold climate conditions. In addition, the project aimed to study and optimize the ability of northern wild plants, fungi and bacteria to retain nitrogen and heavy metals from water. Furthermore, the main aim was to reduce the load to recipient water bodies of various activities in cost-efficient way by passive methods.

In the beginning of the HybArkt -project, literature survey on the functioning of various passive units was collected. Based on the literature and information collected from pilot sites, i.e., Pyhäsalmi mine, Kallo municipal wastewater treatment plant and Levi stormwater ditch, hybrid pilot structures were designed, dimensioned and built. The pilot structure of Pyhäsalmi mine treated water from so-called isolation ditch, which consisted of leachate from tailing ponds, surface runoff from surrounding forest area, and runoff from old metal-contaminated area. In Pyhäsalmi mine removal of metals, such as copper, zinc and iron, was aimed. In Kallo municipal wastewater treatment plant focus was on enhancing nitrogen removal. In Levi stormwater ditch, the aim was to remove both nitrogen and metals. The structures were monitored sampling water quality one or two years. In addition, sizing and/or designing of water purification solutions was carried out also to other actors as agreed on the project plan, and a sizing and design tool was developed based on the information gathered during the project.

Based on the results, the Pyhäsalmi pilot was able to remove many metals, such as copper, zinc and iron. However, it was found that the pH adjustment unit was not functioning as planned and a lot of iron still entered the bioreactors. At Kallo municipal wastewater treatment plant, the portion of ammonium nitrogen that was converted to nitrite-nitrate nitrogen was also removed by the pilot structure. In Levi pilot, it was found that high flow rate prevented the purification processes and it is challenging to purify small concentration of metals. However, by reducing the flow rate, especially nitrogen purification was more efficient. Although each pilot structure had its own challenges, the used hybrid solutions also produced promising results and observations to improve their performance are valuable. The research has been carried out in the project Passive hybrid treatment solutions to remove nitrogen and heavy metals from different types of waters in Arctic region (HybArkt, 2018–2020) co-financed by the European Regional Development Fund.

Keywords: water treatment, sizing of treatment structures, mining water, municipal wastewater, stormwater, northern conditions

Esipuhe

Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen (HybArkt) -hankkeen tavoitteena oli suunnitella ja mitoittaa passiivisia rakennekokonaisuuksia, joilla voidaan poistaa vesistä typpeä ja raskasmetalleja tarpeen mukaan ympärivuotisesti, ja testata näitä valituissa pilottikohteissa. Hankkeessa kerättiin saatavilla oleva tietämys pohjoisiin olosuhteisiin soveltuvista yksittäisistä passiivisista puhdistusmenetelmistä hybridipuhdistusratkaisujen toteuttamiseksi. Näiden tietojen sekä hankkeessa toteutettavien hybridiratkaisujen pilotoinnista saatujen kokemusten pohjalta laadittiin mitoitus- ja suunnittelutyökalu kaikkien käytettäväksi. Hankkeen tulokset koottiin yhteen tähän raporttiin. Hanke toteutettiin 1.1.2018–31.12.2020. Toteuttajatahoina olivat Oulun yliopisto ja Suomen ympäristökeskus.

HybArkt-hankkeen toteuttajat haluavat kiittää hankkeen kaikkia rahoittajia ja yhteistyökumppaneita. Näitä ovat olleet Euroopan Aluekehitysrahasto, Pohjois-Pohjanmaan Elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus, Pyhäsalmi Mine Oy, Carbons Finland Oy, Vapo Clean Waters Oy/Vapo Oy, Kallon vesi- ja viemäriosuuskunta, Levin Vesihuolto Oy, Tunturi-Lapin Vesi Oy, Lakeuden Keskuspuhdistamo Oy, Pohjois-Suomen Suunnittelupalvelu Oy, Agnico-Eagle Finland Oy, Mushroom Agent/Suomen Agrometsä Oy, Turveruukki Oy, Owatec Group Oy, Boliden Kevitsa Mining Oy, Pyhäjärven kaupunki, Kittilän kunta, Outokumpu Chrome Oy, Vesilaitosyhdistysten kehittämissrahasto, Oulun yliopisto ja Suomen ympäristökeskus. Ohjausryhmä muodostettiin yhteistyökumppaneiden edustajista, ja haluamme kiittää ohjausryhmää hankkeen toimintaa tukeneesta työskentelystä. Lisäksi haluamme kiittää SMA Mineral Oy:tä, Rudus Oy:tä, Pohjolan Peruna Oy:tä ja Brittni Crosier’ia, eri materiaalien lahjoittamisesta vesienpuhdistusratkaisujen toteuttamiseen. Erityiskiitokset Kallon kyläläisille, mm. Jarmo Poikelalle, Harri Hummille ja Erkki Ollikaiselle, rakennustöissä ja huollossa avustamisesta sekä Pyhäsalmi Mine Oy:n henkilökunnalle pilotin toimivuuden tarkastuskäynneistä. Lukuisat asiantuntijat, suunnittelijat ja muut yhteistyötahot ansaitsevat myös kiitoksen arvokkaista keskusteluista, rakentavasta palautteesta ja kehittämisideoista, joita olemme saaneet erilaisissa seminaari- ja keskustelutilaisuuksissa. Lämpimät kiitokset tämän hankkeen tutkijoille ja muille toimijoille: Sepideh Kiani, Katharina Kujala, Tuomo Reinikka, Tuomo Pitkänen, Anna Maria Pirttilä, Saija Ahonen, Satu Maaria Karjalainen ja Kaisa Heikkinen. Lämpimät kiitokset kaikille pilottien rakentamis- huolto-, laboratorio ja/tai muihin töihin osallistuneille henkilöille: Anna Antinoja, Senan Mauret, Justice Akanegbu, Joy Bhattacharjee, Hugo Laporte, Erwin Alejandro Garnica, Francisca Prieto Fernandez, Rupali Roy, Namrata Baruah, Jaanika Edesi, Annamari Markkola, Janne Koskimäki Oulun yliopistosta ja Mika Visuri, Anssi Karppinen, Annamari Fali, Anne Rahikainen, Katri Salonen, Virpi Vuorinen-Lindgren, Timo Sara-Aho, Laura Koskinen, Helena Kutramoinen, Eija Pyykönen, Joonas Kahiluoto, Katri Tolonen, Seppo Hellsten ja Raimo Ihme Suomen ympäristökeskuksesta.

Oulussa, 22.12.2020

Tekijät

Sisällys

1 Johdanto	10
2 Potentiaalisia vesienpuhdistusratkaisuja typen ja metallien poistoon	11
2.1 Laskeutusallas	11
2.2 Kosteikko	11
2.3 Sammalet ja niiden mikrobikumppanit.....	12
2.4 Sienihake.....	13
2.5 Neutralointi	14
2.6 Bioreaktorit	15
2.7 Putkilokasvit	15
3 Pilottikohteiden seurantamenetelmät	17
3.1 Vedenlaadun analyysit ja mittaukset	17
3.2 Virtaamamittaukset	17
3.3 Viipymämittaukset.....	17
3.4 Mikrobiologiset menetelmät	18
3.4.1 Molekyylibiologiset menetelmät (mikrobiomi)	18
3.4.2 Puhdasviljelymenetelmät	18
4 Suunnitellut ja toteutetut pilottikohteet	19
4.1 Pyhäsalmen kaivos.....	19
4.1.1 Lähtötilanne.....	19
4.1.2 Toteutettu rakenne.....	19
4.1.3 Seuranta	24
4.1.4 Tulokset.....	25
4.1.5 Johtopäätökset Pyhäsalmen pilottirakenteen toiminnasta	36
4.2 Kallon jätevedenpuhdistamo.....	37
4.2.1 Lähtötilanne.....	37
4.2.2 Toteutettu rakenne.....	38
4.2.3 Seuranta	41
4.2.4 Tulokset.....	42
4.2.5 Johtopäätökset Kallon pilottirakenteen toiminnasta	49
4.3 Levin huleveden purkuputken suu	50
4.3.1 Lähtötilanne.....	50
4.3.2 Toteutettu rakenne.....	51
4.3.3 Seuranta	56
4.3.4 Tulokset.....	56
4.3.5 Johtopäätökset Levin pilottirakenteen toiminnasta	61
4.4 Matkan varrella opittua	61
5 Hankkeessa mitoitettuja vesienkäsittelyratkaisuja	62
5.1 Outokumpu Chrome Oy/Kemin kaivos	62
5.2 Boliden Kevitsa Mining Oy kaivos	63
5.3 Lakeuden keskuspuhdistamo Oy jäteveden jälkikäsittely	65
5.4 Tunturi-Lapin Vesi Oy, Sieppijärven kylän jätevedenpuhdistamo, Kolari	66
5.5 Hituran kaivos.....	67

6 Käytettävyystarkastelu ja metallien talteenottomahdollisuudet	68
6.1 Pilottikohteiden kustannustarkastelu	68
6.1.1 Pyhäsalmen pilotti	68
6.1.2 Kallon pilotti	68
6.1.3 Levin Pilotti.....	69
6.2 Yksikkökohtainen käytettävyys tarkastelu	69
6.2.1 pH:n nostoyksikkö, hapetuskaivo ja laskeutusaltaat.....	69
6.2.2 Sienihakeyksikkö	70
6.2.3 Bioreaktorit	70
6.2.4 Sammalyksikkö	71
6.2.5 Kosteikko	71
6.3 Metallien talteenottomahdollisuudet.....	71
7 Mitoitus- ja suunnittelutyökalu	74
8 Yhteenveto ja johtopäätökset	75
Lähteet	77
Liitteet	82

1 Johdanto

Typpikuormitusta ja/tai raskasmetallikuormitusta vesistöihin aiheutuu Suomessa monesta lähteestä. Päästöjä syntyy mm. kaivostoiminnasta, jätevedenpuhdistamoilta, hulevesistä, maataloudesta ja turvetuotannosta. Joillekin näistä kuormitusta aiheuttavista toiminnoista, (esim. kaivosten jälkikäyttövaihe, lomakylvien pienjätevedenpuhdistamot, turvetuotannon ja maatalouden valumavedet, hulevedet), ei ole kuitenkaan kustannustehokasta rakentaa erityistä vesienkäsittelylaitosta. Tällaisissa kohteissa voitaisiin käyttää, ja osin käytetäänkin, passiivisia puhdistusratkaisuja, esim. kosteikkoja. Ongelmana usein kuitenkin on, että yhdellä ratkaisulla pyritään monen aineen kuormituksen hallintaan. Tämän seurauksena on saatu esim. fosforia poistumaan, mutta ei ole onnistuttu typpikuormituksen pienentämisessä. Yhdistämällä erityyppisiä passiivisia yksikkökomponentteja voisi jäte- tai valumavesien puhdistuksen toteuttaa siten, että puhdistusratkaisussa huomioidaan kuormituslähteen vedenlaatu ja erilaiset puhdistustarpeet. Tällaisia ratkaisuja, joissa yksikkökomponentteja on yhdistetty, voidaan kutsua hybridiratkaisuiksi. Näistä on Suomessa hyvin vähän kokemusta ja tietoa. Maailmalta löytyy kuitenkin onnistuneita esimerkkejä (mm. Vymazal & Kröpflova 2015, Zhai ym. 2016). Nämä kokemukset eivät ole suoraan hyödynnettävissä Suomen olosuhteisiin, sillä esimerkiksi talvi luo haasteita erityisesti biologisille prosesseille, jotka ovat usein lämpötilasta riippuvia.

Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien puhdistamiseen (HybArkt) -hankkeessa oli tavoitteena: 1. Tuottaa uutta tietoa hybridiratkaisujen suunnittelusta ja mitoituksesta kylmiin olosuhteisiin, ja 2. Tutkia ja optimoida pohjoisiin olosuhteisiin sopeutuneiden luonnonkasvien, sienten ja bakteerien kykyä pidättää vedestä tyyppiä ja raskasmetalleja. Kokonaistavoitteeksi asetettiin erilaisten toimintojen vesistökuormituksen pienentäminen kustannustehokkaasti passiivisilla menetelmillä.

Hankkeessa koottiin aluksi yhteen olemassa olevaa tietoa eri puhdistusmenetelmistä (kappale 2). Piilottikohteiksi valituille kohteille: 1. Pyhäsalmen kaivos, 2. Kallon jätevedenpuhdistamo ja 3. Levin hulevesien purkupiste, suunniteltiin, mitoitettiin ja rakennettiin hybridivesienkäsittely-yksiköt. Pyhäsalmen kaivoksen pilottirakenteessa käsiteltiin ns. eristysojan vesiä, jotka koostuivat rikastushiekka-altaiden suotovesistä, metsäalueelta tulevasta valumavesistä ja vanhan metalleilla kontaminoituneen alueen vesistä, ja erityisesti metallien poisto oli tärkeä asia. Kallon jätevedenpuhdistamolla keskityttiin typenpoiston tehostamiseen. Levillä sekä metallien että typen poisto oli tavoitteena. Pilottirakenteiden toimintaa seurattiin 1-2 vuoden ajan kappaleissa 3 ja 4 esitellyillä menetelmillä. Näiden kolmen kohteen lisäksi tarkasteltiin muiden kohteiden typen tai metallien poiston tehostamisen mahdollisuuksia (kappale 5). Kappaleessa 6 käydään läpi hybridirakenteiden käytettävyydestä tarkastelua ja metallien talteenottomahdollisuuksia, ja kappaleessa 7 esitellään lyhyesti hankkeessa luotu mitoitus- ja suunnittelutyökalu.

2 Potentiaalisia vesienpuhdistusratkaisuja typen ja metallien poistoon

2.1 Laskeutusallas

Laskeutusaltaan toiminta perustuu siihen, että veden mukana liikkuva partikkelimaisessa muodossa oleva aines laskeutuu virtausnopeuden hidastuessa laskeutusaltaassa (Ruohtula 1996). Laskeutusaltaan mitoitukseen vaikuttavat mm. partikkelien koko ja tiheys, jotka vaikuttavat partikkelien laskeutumisenopeuteen, sekä käsiteltävän veden määrä. Laskeutusaltaan toimintaa voidaan tehostaa mm. kelluvia hiukkasia pidättävillä pintapuomeilla (kuva 1) ja altaan loppupään patorakenteilla (Ympäristöministeriö 2015). Tärkeää on huolehtia myös altaan huollosta, kuten liettilan säännöllisestä tyhjentämisestä.

Laskeuttamalla voidaan poistaa vedestä mm. orgaanisessa ja epäorgaanisessa muodossa olevaa kiintoainetta, niihin sitoutunutta typpeä, fosforia ja metalleja partikkelimaisessa muodossa sekä patogeeneja (Clar ym. 2004, Kadlec & Wallage 2009). Liukoinen rauta voi hapettuessaan saostua luonnollisesti, ja esimerkiksi seuraavista lähteistä löytyy tietoa laskeutusaltaiden käytöstä raudan laskeutukseen (Hedin 2008, Younger ym. 2002).



*Kuva 1. Äijönnevan turvetuotantoalueen pintapuomillinen laskeutusallas.
Kuva: Heini Postila.*

2.2 Kosteikko

Kosteikot voivat olla kokonaan rakennettuja tai osittain luonnontilaisia kosteikkoja hyödyntäviä vedenpuhdistusratkaisuja (kuva 2). Yleensä ne voidaan jakaa vapaan vedenpinnan ja maanalaisenvirtauksen kosteikkoihin ja toisaalta horisontaalisen tai vertikaalisen virtauksen kosteikoiksi (Kadlec & Wallage 2009). Kosteikko voi poistaa vedessä olevia epäpuhtauksia fysikaalisilla (esim. laskeutus ja suotautuminen), kemiallisilla (esim. sorptio ja kationinvaihto) ja biologisilla prosesseilla (esim. nitrifikaatio-denitrifikaatio ja kasvien ravinteidenotto). Kosteikon suunnittelussa on otettava huomioon muun muassa kosteikon materiaalit, mahdollinen kasvillisuus, lämpötila, tarvittava viipymä ja lämpötila. Kosteikkoja on käytetty muun muassa ravinteiden poistossa (mm. Hadad ym. 2006, Heikkinen ym. 2018, Postila ym.

2014, Torrijos ym. 2016, Vymazal 2007) ja metallien poistossa (mm. Bavandpour ym. 2018, Hedin 2008, Khan ym. 2009, Maine ym. 2017, Zupančič Justin ym. 2008).



Kuva 2. Turvepohjainen kosteikko. Kuva: Heini Postila.

2.3 Sammalet ja niiden mikrobikumppanit

Sammalet ottavat vettä ja ravinteita suoraan ulkopintansa kautta. Monet sammallajit ovat sopeutuneet alhaisiin ravinnepitoisuuksiin ja lämpötiloihin, kuten HybArkt- hankkeessa tutkittu nevasirppisammal (*Warnstofia fluitans*, kuva 3) (Riis ym. 2010). Nevasirppisammal on suo- ja vesikasvi, jonka tiedetään adsorboivan arseenia (As) vedestä laboratorio-olosuhteissa ilman metalloidin myrkyllistä vaikutusta sammalen kasvuun (Sandhi ym. 2018). Nevasirppisammalen sekä elävät että kuolleet kasvinosat sitovat arseenia biomassaansa (Sandhi ym. 2018). Erityisesti pohjoiseen ilmastoon sekä lähde-ekosysteemeihin sopeutuneet sammalet pystyvät alhaisen lämpötilan fotosynteesiin, mikä voi mahdollistaa niille lähes ympärivuotisen puhdistustehokkuuden.

Biopuhdistuksessa hyödynnetään kasvin ja mikrobien kykyä muuntaa haitallisia yhdisteitä vaarattomampaan muotoon, tai niiden kykyä sitoa raskasmetalleja omaan biomassaansa tai vedestä sedimenttiin. Kasvien ja/tai mikrobien aineenvaihdunnan seurauksena haitta-aineet voivat myös poistua ilmakehään, esimerkkinä denitrifikaatio, jossa nitraatti muuttuu typpikaasuksi₂ (Ojuederie & Babalola 2017). Samalla kuten muissakin kasveissa elää erilaisia mikrobikumppaneita (bakteereja ja sieniä) eri puolella solu-koita, sekä sammalverson sisä- että ulkopuolella (Hardoim ym. 2015). Mikrobit ovat sopeutuneet erilaisiin ja biologisesti erittäin haasteellisiin olosuhteisiin, ja mikrobikumppanit, erityisesti kasvin sisällä elävät endofyytit, auttavatkin kasveja sopeutumaan äärimmäisiin olosuhteisiin. Endofyyttiset mikrobit pystyvät varastoimaan sekä muuntamaan haitallisia aineita vaarattomampaan muotoon, vähentäen niiden negatiivisia vaikutuksia kasvin aineenvaihdunnalle. HybArkt -hankkeen tavoitteena oli tunnistaa nevasirppisammalen mikrobikumppanit, ja niiden rooli metallien adsorboinnissa sekä tunnistaa mahdollisia kylmään ilmastoon sopeutuneita metalleja indikoivia bakteereja ja sieniä.



Kuva 3. Nevasirppisammal (*Warnstorfia fluitans*) Kallon luonnontilaisessa lähdepurossa. Kuvat: Kaisa Lehosmaa.

2.4 Sienihake

Sienirihmastolla ympärty puuhake (kuva 4) voi periaatteessa toimia sekä ravinteiden että metallien poistossa, mutta empiiristä tietoa sienihakkeen toiminnasta vesienpuhdistuksessa ei tiettävästi ole julkaistu. Tässä hankkeessa haluttiin testata ja saada tietoa sienihakkeen toimivuudesta, koska sitä ei ollut hankkeen alkaessa saatavana. Puhdistusprosessi voi teoriassa perustua sekä elävän sienirihmaston toimintaan (biosorption) että kuolleeseen sienirihmaston ja hakemateriaaliin itseensä tapahtuvaan adsorption. Puuhakkeeseen ympärty sieni ottaa tyypeä ja muita ravinteita elintoimintoihinsa samalla kun se lahottaa haketta ja käyttää sitä hiilen (ja myös ravinteiden) lähteenään. Osterivinokkaan (*Pleurotus ostreatus*) ja muiden vinokaslajien (*Pleurotus* spp.) tiedetään ottavan raskasmetalleja ja metalleja rihmastoonsa ja itiöemiinsä (biosorption ja adsorption, Jawaid ym. 2011, Arbanah ym. 2012, Boamponsem ym. 2013, Turkovic ym. 2015, Kapahi & Sachdeva 2017). Sienet ovat happea vaativia eliöitä, mistä syystä sienihake ei saa olla kokonaan tai pitkiä aikoja hapettomissa olosuhteissa veden alla. Valoa sienihakeyksikkö sen sijaan ei tarvitse. Sienirihmaston toiminta on mahdollista alhaisessakin lämpötilassa (Magan 2008), mutta parhaiten sienihakeyksikön voidaan odottaa toimivan kesä kautena, jolloin sienirihmastojen toiminta on aktiivisinta (Turkovic ym. 2015).



Kuva 4. Vasemmalla sienihakeyksikkö Pyhäsalmen pilottirakenteena ja oikealla lähikuva sienihakkeesta. Kuvat: Anna Liisa Ruotsalainen ja Heini Postila.

2.5 Neutralointi

Happamuuden neutraloimiseksi eli pH:n nostamiseksi on kehitetty erilaisia menetelmiä. Kulloinkin käytettävä menetelmä riippuu esimerkiksi kohteella käytettävissä olevasta tilasta, sähkön saatavuudesta sekä käsiteltävän veden laadusta. Tarvittavan neutralointimateriaalin määrä lasketaan käsiteltävän veden asiditeetin eli neutraloitavissa olevan kokonaishappamuuden perusteella (Kirby & Cravotta 2005 a ja b). Neutralointimenetelmien yleisimpiä ongelmia ovat virtauksen kanavoituminen, tekniset ongelmat, kalliit käyttökustannukset, riittävän reagointiajan saavuttaminen ja neutralointimateriaalin pinnoittuminen. Etenkin passiivisessa neutraloinnissa pinnoittuminen tuo menetelmän käyttöön haasteita ja laskee rakenteiden neutralointitehoa sekä ratkaisujen käyttöikää. Pinnoittuminen johtuu neutraloinnin aikana materiaalin pinnalle saostuvista metalliyhdisteistä ja kipsistä, jotka estävät materiaalin kontaktia käsiteltävän veden kanssa. Luonnon olosuhteissa käsiteltävän veden kemiallisten ominaisuuksien ja virtaamien suuri vaihtelu tuovat haasteita menetelmien toimivuudelle. Neutralointimateriaaleina käytetään pääasiassa lipeää ja kalkkikiveä (kuva 5). Tässä hankkeessa jouduttiin yhdellä pilottikohteella nostamaan käsiteltävän veden pH:ta ennen muita rakenteita. Koska tavoitteena oli testata nimenomaan passiivisia vesienkäsittelymenetelmiä, päädyttiin neutraloinnissa käyttämään suotimia, vaikka niiden pinnoittumis- ja tukkeutumisongelmat tiedettiin (esim. Hadzic ym. 2014, Hadzic ym. 2020). Suotimet ovat passiivisia neutralointimenetelmiä, joissa hapan vesi neutraloituu virratessaan neutralointimateriaalin läpi. Materiaaleiksi valittiin perinteinen kalkkikivi CaCO_3 ja uutena materiaalina betonimurske (esim. Wang ym. 2013).



Kuva 5. Kalkkisuodinpato. Kuva: Heini Postila.

2.6 Bioreaktorit

Bioreaktorin määritelmä on laaja. Yleisesti sillä tarkoitetaan mitä tahansa joko nestemäistä tai kiinteään materiaaliin pohjautuvaa reaktoria, jossa hapellisissa tai hapettomissa oloissa mikrobiologiset prosessit poistavat käsiteltävästä vedestä esimerkiksi metalleja (Liu ym. 2020, Gola ym. 2020) ja typpeä (Hamdani ym. 2020, Kiani ym. 2020). Bioreaktorit voivat toimia joko passiivisina reaktoreina tai aktiivisina, jolloin niihin lisätään esimerkiksi mikrobien tarvitsemaa hiiltä tai reaktorin lämpötila pidetään korkeana tavoitellun prosessin käynnistämiseksi (Cherchi ym. 2009, Rocher ym. 2015). Jatkuva hiilen (esim. metanoli) tai lämmön lisääminen vaatii tyypillisesti sähköä ja ulkopuolista energiaa, joista tulee ylläpitokustannuksia. HybArkt -hankkeessa lähtökohtana oli tutkia sellaisia prosessitekniisiä ratkaisuja, jotka eivät vaadi ulkopuolista energialähdettä tai jatkuvaa hiilen lisäämistä vaan toimivat passiivisina puhdistusratkaisuuina, joissa veden virtaus tapahtuu gravitaationaalisesti. Tämän vuoksi hankkeessa toteutettiin puuhakebioreaktoreita eri vesien metallien ja typen poistoon. Pääperiaate typpeä poistavassa puuhakebioreaktorissa (kuva 6) on, että puu toimii hiilen lähteenä denitrifioiville, heterotrofisille mikrobeille, jotka hapettomissa ja pimeissä olosuhteissa hapettavat nitraattityppeä typpikaasuksi. Tällaisten reaktoreiden on todettu toimivan jopa 15 vuotta (Schipper ym. 2010), ja sovelluskohteita on erilaisille vesille, kuten pohjavesille (Zhang ym. 2012) ja kalanviljelylaitosten poistovesille (Kujala ym. 2020).

Sulfaatin pelkistymisprosessin kautta on mahdollista saostaa useita eri metalleja sekä poistaa valumavedestä sulfaattia. Tämä prosessi vaatii hapettomat olosuhteet, riittävän kontaktiajan substraatin kanssa sekä oikeanlaisen orgaanisen aineen substraatiksi (esim. Willow & Cohen 2003). Näissä oloissa sulfaatin pelkistäjäbakteerien toiminta käynnistyy ja metalleja saostuu sulfideina (esim. Taketani ym. 2010). Tässä prosessissa veden alkaliniteetti lisääntyy, ja lähtökohdallisesti hyvinkin alhaisen pH:n taso nousee. Yleisesti orgaanisena aineena on käytetty mm. hevosen lantaa, turvetta, heinäpaaleja, sienikompostia, sahanpurua ja puuhaketta (Vile & Weider 1993, Gazea ym. 1996).



Kuva 6. Puuhakebioreaktori Laukaan kalanviljelylaitoksella. Kuva: Anna-Kaisa Ronkanen.

2.7 Putkilokasvit

Kasveilla tapahtuva vesienpuhdistus perustuu kasvien normaaliin ravinteidenottoon ja niiden aikaansaamaan vaikutukseen juurien ympäristössä, jolloin ravinteet ja metallit voivat sitoutua niiden juuristoalueelle (Marschner & Marschner 2012). Putkilokasvit, kuten esimerkiksi järviruoko (*Phragmites australis*, kuva 7) tai pajut (*Salix* spp.), tarvitsevat kasvualustan, johon juuret voivat kiinnittyä ja josta ottaa ravinteita. Kasvit tarvitsevat happea ja valoa, ja ne toimivat aktiivisesti lähinnä roudattomana kautena. Ravinteet kertyvät pääsääntöisesti kasvibiomassaan, joskin osa tyyppistä voi kasvien symbioottisten mikrobien toiminnan tuloksena poistua ilmaan (Ojuederie & Babalola 2017). Metallien kertyminen kasveihin on

monimutkainen ja monimuotoinen ilmiö, ja eri kasvilajit ottavat metalleja eri tavalla (esim. Marschner & Marschner 2012, Vymazal & Březinová 2016, Ryszka ym. 2019, Janeeshma & Puthur 2020). Kasvien mikrobikumppanien toiminnalla sekä maanpäällisessä versossa että juuristossa voi olla merkittävä rooli kasvien avulla tapahtuvaan vesienpuhdistukseen (Srivastava ym. 2017).



Kuva 7. Järviruoko (Phragmites australis). Vasemmalla ylivuotista kasvustoa (Kittilä, Ahvenjärvi, kontrollialue) ja oikealla Pyhäsalmen rakennettu kosteikko loppukesällä 2020. Kuvat Anna Liisa Ruotsalainen.

3 Pilottikohteiden seurantamenetelmät

3.1 Vedenlaadun analyysit ja mittaukset

Vedenlaadun jatkuvatoimisessa analysoinnissa on käytetty sähkönjohtavuuden jatkuvatoimisia mittalaitteita (HOBO U24-001 conductivity) ja lämpötilan jatkuvatoimisia mittalaitteita (HOBO UA-001 pendant temp). Näytteenottokäyntien yhteydessä pilottikohteilla seurattiin kenttämittauksin veden pH:ta, sähkönjohtavuutta, lämpötilaa, happipitoisuutta ja redox-potentiaalia. Vesinäytteistä analysoitiin hankkeen pilottikohteilla kohde- ja näytekertakohtaisesti valittu kokoelma seuraavista muuttujista: pH (kesäaikaan kenttämittauksin) ja sähkönjohtavuus (kesäaikaan kenttämittauksin), alkaliniteetti, asiditeetti, TOC, DOC, COD_{Mn}, BOD₇(ATU), kloridi- ja sulfaattipitoisuus, kiintoaine (GF/C) ja kiintoaineen hehikutushäviö, ravinnepitoisuudet (kokP, kokN, NO₂N, NO₃N, NH₄N, PO₄P) ja alkuainepitoisuudet (Al, Sb, As, Ba, Be, B, Ag, Cd, K, Ca, Co, Cr, Cu, Li, Pb, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pd, Pt, Fe, S, Rb, Se, Zn, Sr, Tl, Sn, Ti, U, V). Alkuaineiden osalta vesinäytteistä määritettiin kokonaispitoisuudet (ICP-MS, ICP-OES). Osasta näytteistä määritettiin myös rinnakkain suodatetut metalli- ja ravinnepitoisuudet (0,45 µm). Analyysivalikoima riippui pilottikohteesta ja testatusta rakenteesta. Levin pilottikohteella seurattiin lisäksi osalla näytteenottokerroista bromattujen palonestoaineiden, PAH-yhdisteiden, öljyhiilivetyjen ja perfluorialkyylihapojen pitoisuuksia. Vesinäytteet otettiin pilottirakenteiden ylä- ja alapuolelta. Vesinäytteet analysoitiin Suomen ympäristökeskuksen laboratoriossa. Laboratorio on FINAS-akkreditointipalvelun akkreditoima testauslaboratorio T003, akkreditointivaatimus SFS-EN ISO/IEC 17025. Akkreditoituun pätevyysalueeseen sisältyvä toiminta ja toimipaikat ovat nähtävissä verkkosivuilta www.finas.fi. BOD-näytteet analysoitiin SFS-EN 1899-1 standardin mukaisesti käyttäen ATU-lisäystä. Määritykset suoritettiin Oulun Yliopiston laboratoriossa OXITop-laitteistolla.

3.2 Virtaamamittaukset

Pilottirakenteiden virtaamaa seurattiin jatkuvatoimisten pinnankorkeusantureiden (Solinst 3001 LT Levelogger Edge, M5, tarkkuus ±0,3 cm) ja niiden kompensointiin käytettyjen Solinstin barologgerien (3001 LT Barologger Edge, tarkkuus ±0,05 kPa) ja v-mittapatojen avulla. Mittauksista virtaama laskettiin esim. Postila (2007) esitetyn yhtälön kautta. Käyntien yhteydessä tehtiin myös manuaalisia pinnankorkeusmittauksia mittanauhalla. Lisäksi toteutettiin astiamittauksia sekä vertailutarkoituksissa mittapadoilta että datan saamiseksi niistä pisteistä, joissa v-mittapatoja ei ole ollut. Näissä virtaama laskettiin tietyssä ajassa astiaan virranneen veden määrän avulla.

3.3 Viipymämittaukset

Joidenkin rakenteiden viipymämittaukset toteutettiin käyttäen ruokasuolaa (NaCl) merkkiaineena. Tällöin seurattiin jatkuvatoimisesti sähkönjohtavuuden muutosta, jonka perusteella viipymä voitiin laskea. Laskenta suoritettiin Postila ym. (2015) kuvatulla tavalla. Pyhäsalmeilla syötettiin 4 kg suolaa sekoitettuna 20 litraan vettä 5.9.2019 klo 19:12 alkaen ja 30 litraan vettä 17.9.2019 klo 17:20 alkaen noin 5 minuutin aikana pH:n nostoyksikköihin menevään putkeen. Kallossa molempiin bioreaktoreihin syötettiin noin 8 l merkkiaineliuosta 13.8.2019 noin klo 17.20–17.40 välisenä aikana matkien mahdollisimman hyvin luontaista pulssia. Merkkiaineliuosta varten 12.8.2019 otettiin sieniyksikön jälkeistä vettä ämpäreihin. Veteen liuotettiin reilun vuorokauden aikana 2 kg suolaa/ ämpäri, ja kummankin bioreaktorin syöttöputkeen lisättiin yksi ämpärillinen liuosta.

3.4 Mikrobiologiset menetelmät

Nevasirppisammalen mikrobikumppanit (bakteerit ja sienet) tunnistettiin molekyyli- ja puhdasviljelymenetelmillä. Analysoidut näytteet kerättiin Pyhäsalmen kaivokselta sekä Kallon kontrollilähteeltä. Kallon kontrollilähteen nevasirppisammalpopulaatiota hyödynnettiin Kallon jätevedenpuhdistamon ja Levin hu-
levesikohteen sammalyksikössä, Pyhäsalmen nevasirppisammalpopulaatiota Pyhäsalmen sammalyksikössä. Nevasirppisammalen mikrobiomia tutkittiin tarkemmin Pyhäsalmen kaivokselta löytyneestä altaasta, jossa kasvaa sammalta luontaisesti. Kaivosympäristöön ja erityisesti alhaisiin pH olosuhteisiin (pH 3,5) sopeutuneen sammalen mikrobiomia verrattiin Kallon kontrollialueen (pH 6,5) populaatioon. Tämän tavoitteena oli tunnistaa metalli-mikrobi -interaktioita. Sammalnäytteiden lisäksi hankkeessa tutkittiin Pyhäsalmen bioreaktorin mikrobiomia, mutta analyysien viivästyttyä tuloksia ei raportoida HybArkt -hankkeen loppuraportissa.

3.4.1 Molekyylibiologiset menetelmät (mikrobiomi)

Nevasirppisammalen ribosomaalinen DNA (rDNA) eristettiin kaupallisella DNA-eristyskitillä (NucleoSpin Plant II kit (Macherey-Nagel)). Mikrobeista bakteeriyhteisön tunnistamiseen käytettiin geenialuetta 16S rRNA v4 (Lane, 1991) ja sieniyhteisön kohdalla geenialuetta ITS2 (Martin & Rygielwicz 2005). Bakteerinäytteiden analysoinnissa hyödynnettiin PNA-oligo -teknologiaa estämään sammalen kloroplasti- ja mitokondriosekvenssien monistuminen. DNA:n emäsjärjestys edellä mainituilta geenialueilta selvitettiin sekvensoimalla näytteet Illuminan MiSeq sekvenssaattorilla Suomen Molekyyli- ja lääketieteen instituutissa Helsingissä (FIMM). Lisäksi analyysissä selvitettiin sammalen solukon sisällä elävien (endofyyttisten) bakteerien osuus verrattuna sammalen koko bakteeribiomiin (sis. endo- ja epifyyttiset bakteerit), mikä toteutettiin pintasteriloimalla puolet näytteistä. Pintasteriloinnilla hävitetään sammalen pinnalla oleva mikrobiyhteisö. Sekvenssit analysoitiin QIIME2- ohjelmalla (Bolyen ym. 2018), kun taas mikrobiyhteisöjen analysointiin käytettiin niin kutsuttuja monimuuttujamenetelmiä R-ohjelmointiympäristössä (Lehosmaa ym. 2018).

3.4.2 Puhdasviljelymenetelmät

Nevasirppisammalen puhdasviljelynäytteet keskittyivät sammalen sisällä kasvavien endofyyttisten mikrobien kasvatukseen ja tunnistamiseen. Pyhäsalmen kaivoksen ja Kallon kontrollialueen endofyyttinäytteitä kasvatettiin PDA (potato dextrose agar) ja TSA (tryptic soy agar) maljoilla seitsemän vuorokautta 28°C lämpötilassa. Kasvatuksen jälkeen endofyyttikannoista eristettiin DNA kaupallisella DNA-eristyskitillä, ja DNA emäsjärjestys selvitettiin sekvensoimalla ABI sekvenssaattorilla (Oulun yliopisto). Sekvenssit analysoitiin BioEdit-ohjelmalla ja taksonomia tunnistettiin verraten sekvenssejä NCBI:n geenitietokantaan (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>). Myös sieniyksiköstä otetusta sienihakenäytteestä tehtiin puhdasviljelymenetelmällä kokeiluluontoinen kasvatus [PDA & MMN (Melin-Norkans medium) maljat, 20°C lämpötila] ja tunnistus sekvenssin perustella.

4 Suunnitellut ja toteutetut pilottikohteet

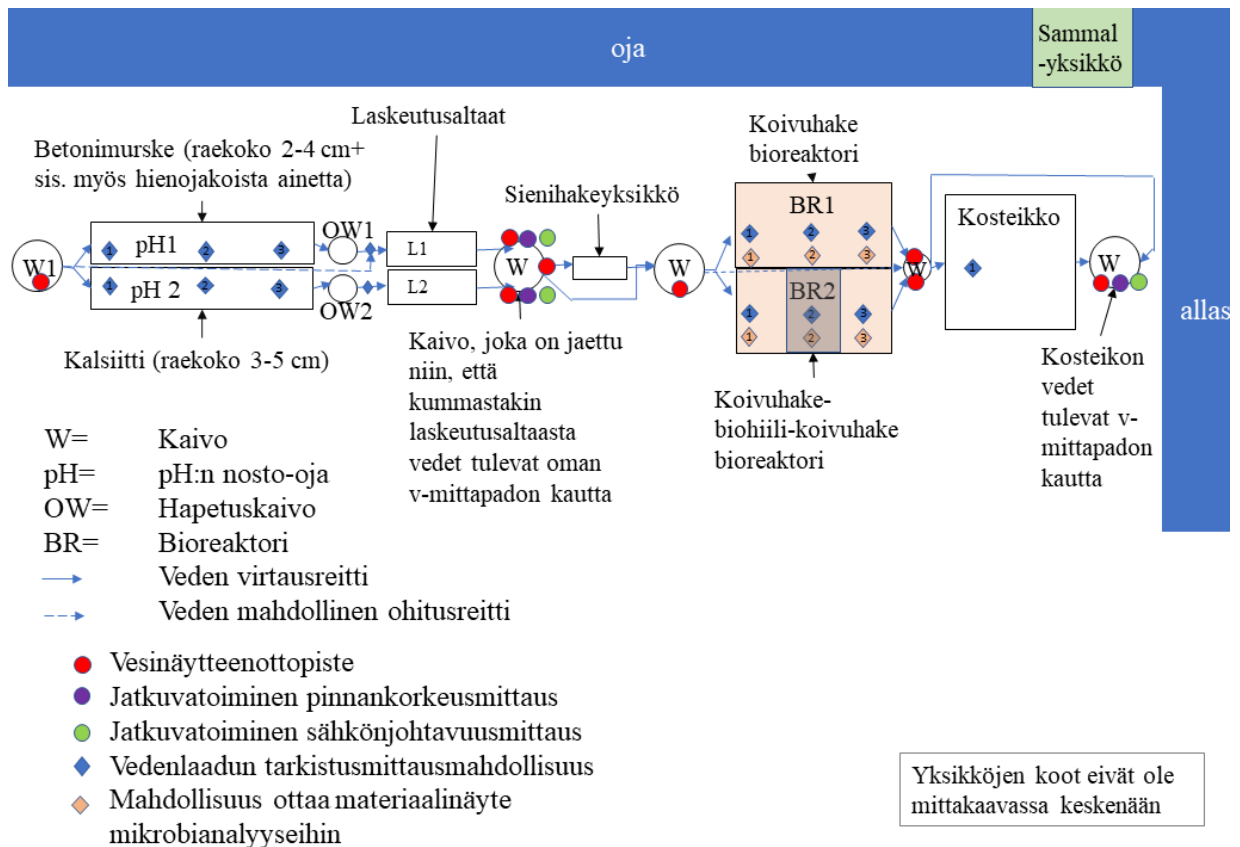
4.1 Pyhäsalmen kaivos

4.1.1 Lähtötilanne

Pyhäsalmen kaivoksella pilottirakenteessa käsiteltiin ns. eristysojan vesiä, jotka koostuivat rikastushiekka-altaiden suotovesistä, metsäalueelta tulevista valumavesistä ja vanhan metalleilla kontaminoituneen alueen vesistä. Keskimäärin ojassa oli virrannut vuosien 2013–2017 perusteella 150 m³/vrk (vaihteluväli 4–642 m³/vrk) kuukausiarvoista laskettuna. Ojan vedenlaadun aikaisemman tarkkailun perusteella (30 näytettä) pH:n ja sähkönjohtavuuden keskiarvot olivat 4,1 ja 81 mS/m. Vedessä oli keskimäärin (keskiarvoina) kuparia (Cu) 0,63 mg/l, sinkkiä (Zn) 2,7 mg/l, rautaa (Fe) 17,2 mg/l, mangaania (Mn) 2,93 mg/l ja sulfaattia (SO⁴) 376 mg/l. Kaivoksen ympäristöluvassa ei ole kyseisille aineille päästörajoja, mutta rikastushiekka-altailta sekä rikkipitoisen rikasteen varastoaltaalta muodostuvalle ylivuotovedelle on asetettu tavoitteeksi, että pH:n tulisi olla välillä 5,5–9,5, kuparipitoisuus alle 0,2 mg/l ja sinkkipitoisuus alle 1 mg/l (Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto, lupapäätös Nro 85/07/02). Pilottirakenteita suunniteltaessa otettiin kyseiset päästöraajat huomioon. Eristysojan vedet johdetaan lupamääräysten mukaisesti aktiiviseen vesienkäsittelyyn, johon pilottirakenteessakin käsitellyt vedet vielä menivät. Pilottirakennetta voitiin suunnitella ojan kaivoksen puoleiselle rannalle tai pumppausaltaan yhteyteen. Maanpinnan arvioitu etäisyys ojan ja altaan vedenpinnantasosta oli yli metrin mutta alle puolitoista metriä. Tällä tasolla myös pohjavedenpinnan arvioitiin olevan ojan vieressä.

4.1.2 Toteutettu rakenne

Pilottirakenne toteutettiin elo-syyskuussa 2018 ojan kaivoksen puoleiselle rannalle. Koko pilottirakenne suunniteltiin siten, että se voisi toimia myös alhaisissa lämpötiloissa ja talvella. Tämän vuoksi pilottirakenne sijoitettiin pääasiassa maan alle, ja kaikki osat eristettiin 12 cm kerroksella FinnFoamia kosteikon pintaa lukuun ottamatta. Kosteikon pinnalle eristeeksi laitettiin kerros Leca-soraa. Pilottirakenteen kaikkiin yksiköihin rakennettiin ohitusputket, joista vesi voi virrata ohjatusti tai häiriötilanteissa. Koko pilottijonon läpi ohitusputkia myöden kulkee lisäksi lämmityskaapeli, jota on käytetty talvina 2018–2019 ja 2019–2020. Pilottirakenteeseen päätettiin ottaa vain osa ojan vedestä, joten ojasta läheltä pohjaa johdettiin putki suoraan tulokaivoon, niin että tulokaivossa ja ojassa on samaa vettä. Tulokaivosta vesi pumattiin pilottirakenteeseen. Käsittelyyn suunnitellut yksiköt olivat pH:n nostoyksikkö, hapetuskaivot, laskeutusaltaat, sienihakeyksikkö, bioreaktorit ja kosteikko (kuva 8). Lisäksi ojaan erilleen muusta pilottirakenteesta asetettiin sammalpuhdistusyksikkö. Yksikköjen mitat ovat näkyvissä liitteen 1 Autocad-tiedostoissa, ja yksiköistä kerrotaan seuraavaksi tarkemmin omissa kappaleissaan.



Kuva 8. Pyhäsalmen pilottirakenne ja sen näytteenottopisteet.

Veden pH:n nostoyksikkö, hapetuskaivo ja laskeutusaltaat

Koska eristysojan vesi oli hapanta, ensimmäiseksi vesienkäsittely-yksiköksi pilottirakenteeseen sijoitettiin pH:n nostoyksikkö (kuva 9). pH:n nostoyksikköjä asetettiin kaksi erilaista rinnakkain, jotta voitiin verrata pH:n nostoon käytettävien eri materiaalien toimivuutta. Toisessa yksikössä käytettiin raekooltaan 2–4 cm betonimursketta ja toisessa kalsiittia, jonka raekoko oli 3–5 cm. Materiaalit sijoitettiin pituussunnassa halkaistuun rumpuputkeen (halkaisija 400 mm ja pituus 12 m) ja täytettiin siten, että materiaalikerroksen yläpinta ei ylittänyt halkaistua putken reunaa, jotta rakennelma voitiin eristää tiiviisti. Koska pH:n nostoyksiköt tukkeutuivat helposti metallihydroksidisakasta ja hienosta partikkeliaineksestä, ne puhdistettiin keväällä 2019. Kertynyt materiaali poistettiin vedenpaineen ja pöyhimisen avulla mahdollisimman hyvin. Syksyllä 2020 betonimurskeyksikkö puhdistettiin uudestaan, ja kalsiittiyksikön materiaali vaihdettiin toiseen. Toiseen yksikköön käytettiin nyt betonimursketta noin puolet rumpuputken mitasta, ja loppuosa täytettiin isoilla kivillä. Täten viipymä yksikössä ei merkittävästi kasvanut, mutta vesi voi virrata vapaammin. Molemmat pH:n nostoyksiköt tukkeutuivat kuitenkin uudelleen, ja ne ohitettiin kokonaan kesän 2020 alussa.

Seuraavaksi yksiköksi molempien pH:n nostoyksikköjen jälkeen asennettiin hapetuskaivot, joissa käytettiin muovisia rei'itettyjä hapetuslautasia (kuva 9). Lautasissa oli 43 reikää (halkaisija 0,3 cm) ja niitä oli molemmissa kaivoissa 4 kpl päällekkäin. Yksikön tarkoituksena on hapettaa vettä, jotta siihen johdetussa vedessä ollut rauta muuttuisi liukoisesta Fe^{2+} -muodosta liukenemattomaan Fe^{3+} -muotoon, jossa rauta saostuu. Syksyllä 2018 havaittiin, että vesi oli jo pH:n nostoyksikön jälkeen riittävän happi-toista, ja rautasakka tukki nopeasti hapetuslautaset, jolloin päädyttiin poistamaan ne käytöstä.

Hapetuskaivojen jälkeen rakennettiin laskeutusaltaat (2 kpl rinnakkain, kuva 10). Vesivanerista toteutettujen laskeutusaltaiden (pituus 1,25 m, leveys 0,3 m ja korkeus 1,25 m) vesisyvyys oli 1 m. Laskeutusaltaiden tarkoitus on poistaa laskeuttamalla partikkelimaisessa muodossa olevia metalleja, kuten rautaa. Laskeutusaltaiden jälkeen asetettiin mittakaivo. Mittakaivossa oli kaksi v-mittapatoa, jotta molempien pH:n nostoyksikköjen, hapetuskaivojen ja laskeutusallas -linjastojen vedenlaatua ja virtaamaa voitiin seurata erikseen. V-mittapatojen jälkeen vedet kertyivät kaivossa yhteiseen osaan, josta ne johdettiin seuraaviin yksiköihin (sienihakeyksikkö ja bioreaktorit).



Kuva 9. Vasemmalla olevassa kuvassa on näkyvissä pH:n nostoyksiköiden pääty ja oikealla olevassa kuvassa hapetuslautaset. Kuvat: Heini Postila.



Kuva 10. Laskeutusaltaat ja niiden jälkeinen mittakaivo. Kuva: Heini Postila.

Sienihakeyksikkö

Sienihakeyksikössä käytettiin hakkeeseen ympättyä eli lisättyä osterivinokassienen rihmastoja (kuva 11). Sienihake asetettiin juuttisäkeissä vesivanerista tehtyyn laatikkoon, jonka pituus on 1,5 m, leveys 0,6 m ja syvyys 0,4 m. Sienihakeyksikköön nostettiin laskeutusaltaiden jälkeisestä kaivosta vesi pumpaamalla ja tavoitteena oli pitää veden pinnankorkeus noin puolivälissä yksikköä, sillä sienet tarvitsevat myös happea toimiakseen. Yksikkö oli suljettu jäätyksen estämiseksi FinnFoam -kannella, koska valoa sienet eivät tarvitse. Sienet voivat poistaa käsiteltävästä vedestä metalleja aktiivisesti ottamalla niitä rihmastoonsa, ja niitä voi kertyä myös passiivisesti sienihakkeeseen (kts kpl 2.4). Sienihake voi myös toimia kasvualustana denitrifikaatiobakteereille ja denitrifikaatioon kykeneville mikrosienille. Sienihakeyksikön materiaali vaihdettiin keväällä 2020 (uudet säkit vaihdettiin entisten lahonneiden tilalle).



Kuva 11. Haketta, johon on ympätty osterivinokkaan rihmastoja. Kuva: Kaisa Lehosmaa.

Bioreaktorit

Bioreaktoreita toteutettiin 2 kpl rinnakkain (kuva 12). Niistä ojanpuolimmaiseen laitettiin koivupuuhaketta (tilavuus noin 10,2 m³) ja ojasta kauimmaiseen (tilavuus 10,5 m³) koivupuuhaketta alkuun ja loppuun ja keskelle kuusipohjaista biohiiltä noin 3,3 m³. Bioreaktoreissa vedenpitävänä kerroksena käytettiin 1,5 mm HDPE -kalvoa ja tätä rikkoutumisilta suojaamassa hienoa hiekkaa ja N3-suodatinkangasta. Bioreaktoreissa sulfaattia pelkistävät SRB -bakteerit voivat poistaa metalleja saostamalla niitä metallisulfideiksi ja metalleja poistuu vedestä myös adsorptiolla puuhakkeeseen. Nitraattimuodossa olevaa typpeä voi poistaa denitrifikaatiossa typpikaasuna ilmaan. Puuhake ja biohiili toimivat hiilen lähteenä SRB- ja denitrifikaatiobakteereille. Reaktoreihin tulee saada aikaisiksi hapettomat olosuhteet ja metallien poisto on optimaalista, kun pH on 5–7.



Kuva 12. Bioreaktorikaivannot. Kuva: Heini Postila.

Kosteikko

Bioreaktoreiden jälkeen toteutettiin kosteikko (kuva 13), johon johdettiin osa käsittelyrakenteen vesistä. Kosteikko on eristetty pohjalta ja sivuilta muusta maaperästä 1,5 mm HDPE-kalvolla, jonka suojaamiseen käytettiin hienoa hiekkaa ja N3-suodatinkangasta. Kosteikko on pystysuoran ylhäältä alaspäin tapahtuvan virtauksen kosteikko. Kosteikon pohjalle asetettiin 110 mm salaajaputket veden keruuseen. Kosteikon rakennekerroksia pohjalta ylöspäin tarkasteltuina oli neljä:

- 1) 25 cm kerros 20–40 mm soraa (mukana myös jonkin verran isompaa raekokoa),
- 2) 25 cm kerros 16–32 mm soraa, jossa lisäksi 1,1 mP3P kuusipohjaista biohiiltä,
- 3) 25 cm kerros 8–16 mm raekoon soraa (tähän kerrokseen asetettu rei'itetyt 18 mm ulkohalkaisijan jakopotket, kuva 13) ja
- 4) 10 cm kerros 4–10 mm Leca® -sora ehkäisemässä jakopotkien jäätymistä.

Kosteikkoon istutettiin lähimmältä järven rannalta haettuja järviruokojen juurakkoja niitä ympäröineen maan/sedimentin kera. Kosteikolla oli tavoitteena pystyä poistamaan mahdollista orgaanisen aineen huuhtoutumista puuhakebioreaktoreista, poistamaan ravinteita (fosforia ja typen kaikkia fraktioita) sekä pidättämään metalleja.



Kuva 13. Vasemmassa osakuvassa kosteikko osana pilottirakennetta ja oikeassa kosteikon kastelu-järjestelmä ennen kuin se peitetään soralla ja Leca®-soralla. Kuvat: Heini Postila ja Tuomo Pitkänen.

Sammalyksikkö

Sammalyksikössä käytettiin nevasirppisammalta *Warnstorfia fluitans* (kuva 14). Näyte-/testimateriaali otettiin pilottikohteen lähelle muodostuneesta altaasta, jossa kasvaa luontaisesti nevasirppisammalta. Sammal on sopeutunut kylmiin olosuhteisiin ja sitoo tehokkaasti raskasmetalleja omaan biomassaansa (Sandhi ym. 2018). Sammalen sisällä elää endofyyttisenä denitrifikaatiobakteereja, joista osa kykenee myös nitrifikaatioon (Hallin ym. 2015). Sammal sijoitettiin ojaan erilliseen rei'itettyyn kelluvaan laatikkorakenteeseen, josta vesi virtasi läpi, sillä ojaveden pH oli sammalelle jo valmiiksi sopiva.



Kuva 14. Nevasirppisammal, Warnstorfia fluitans vasemmalla, Pyhäsalmen kelluva laatikkorakenne keskimmissä kuvassa ja oikealla. Kuvat: Kaisa Lehosmaa ja Heini Postila.

4.1.3 Seuranta

Koekohdetta seurattiin ympärivuotisesti (kuva 15). Laajat vedenlaatuanalyysit pilottialueelta tehtiin syksyn 2018 ja kesän 2020 välisenä aikana (liitteet 2–34). Koekohteella pumpattavien vesien määrän arviointi tehtiin kenttäkäyntien astiamittausten tietojen perusteella, joten pumppausmäärät ovat suuntaa antavia. Koekohteella seurattiin jatkuvatoimisesti vedenpinnankorkeutta, sähkönjohtavuutta ja lämpötilaa kolmessa v-mittapadollisessa kaivossa, jotka sijaitsivat laskeutusaltaiden jälkeen (näytepisteet W2.1.1 ja W2.1.2) ja kosteikon jälkeen (W2.3) (kuva 8, taulukko 1). Lisäksi jatkuvatoimia lämpötila antureita (HOBO) oli tulokaivossa (W1) ja bioreaktorien jälkeisessä kaivossa (W3.3), bioreaktorin tarkastuskaivoissa ja kosteikolla (liite 2). Pilottialueen säädata ajalta 1.10.2018–4.8.2020 saatiin Pyhäjärven Ojakylän sääasemalta (Ilmatieteenlaitos 2020, liite 35). Virtaamaa kenttäkäyntien astiamittausten perusteella arviointiin myös bioreaktoreista ulostulevista putkista. Vesinäytteenottopisteitä (kuva 8, taulukko1) oli muutoin ennen ja jälkeen eri yksiköitä, mutta pH:n nostoyksiköiden ja laskeutusaltaiden välissä ei ollut pistettä, sillä tarkastelussa olimme kiinnostuneita niiden yhteisvaikutuksesta. Kenttämittareilla (pH, sähkönjohtavuus, happipitoisuus ja redox), voitiin havainnoida yksiköiden välisiä ja myös niiden sisällä olevia tarkkailupisteitä. Mikrobiologista seuranta varten otettiin sieniyksiköstä ja bioreaktorista materiaali- ja vesinäytteitä (4.9.2018, 11.10.2018, 27.11.2018, 13.5.2019, 12.11.2019, 2.6.2020). Sekvensointi-analyysiä varten materiaali- ja vesinäytteet jäädettiin välittömästi hiilihappojään avulla ja säilytettiin -80 °C:ssa, kun taas elävien mikrobin tutkimiseksi näytteet pidettiin jääkaappilämpötilassa (kylmälaukku ja +4 °C huone) ennen pintasterilointia ja maljausta puhdasviljelyalustalle.



Kuva 15. Pyhäsalmen pilottirakenne talvella näytteenoton aikana. Kuva: Anne Korhonen.

Taulukko 1. Pyhäsalmen näytteenottopisteet.

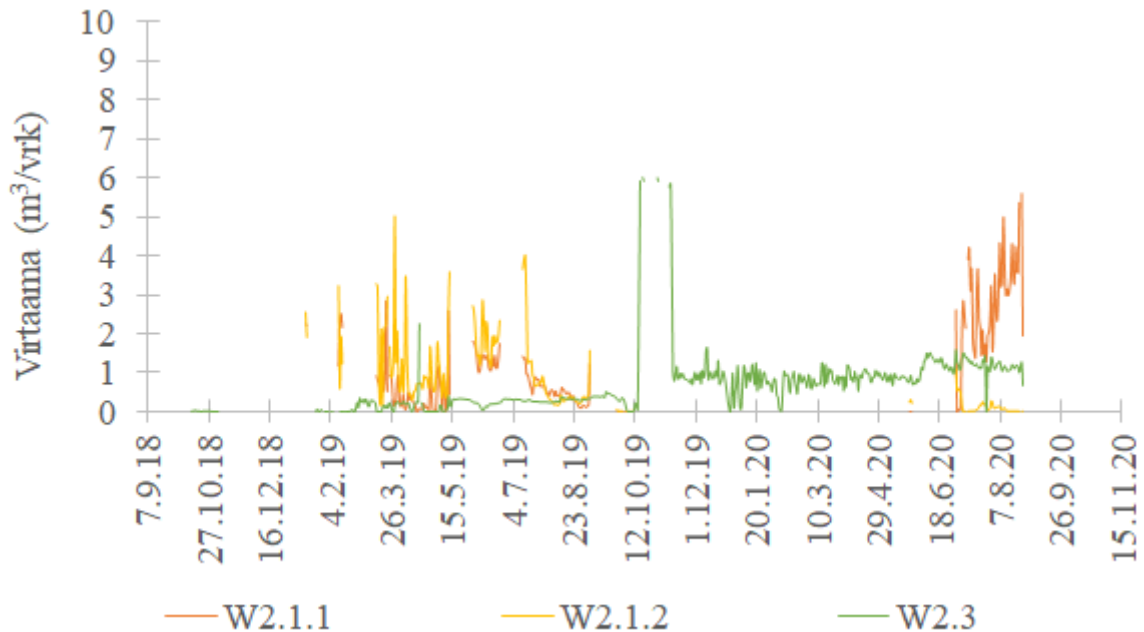
Näytteenottopiste	Määritelmä
W1	Hybridipilottirakenteeseen tuleva vesi
W2.1.1	Betonimurske pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan jälkeinen vesi
W2.1.2	Kalsiitti/ 5.9.19 alkaen betonimurske + iso kivi pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan jälkeinen vesi
W2.1	Yhdistelmä edellisistä ja sienihakeyksikköön otettu vesi
W2.2	Vesi bioreaktoriin menevästä kaivosta 12.11.2019 asti ja sen jälkeen sienihakeyksiköstä tullutta vettä
BR1	Koivupuuhakebioreaktorista tullutta vettä
BR2	Koivupuuhake-biohiili bioreaktorista tullutta vettä
W3.3	Bioreaktoreista yhteensä tullut vesi eli kosteikkoon johdettu vesi
W2.3	Kosteikon jälkeinen vesi

4.1.4 Tulokset

Virtaama ja viipymä

Pyhäsalmen pilottirakenteeseen pumpattiin tulokaivosta (W1) vettä keskimäärin noin 4,5 m³/vrk (minimi 0, kun pumpussa oli häiriöitä ja maksimi noin 5,8 m³/vrk). Ennen bioreaktoreita olevaan kaivoon (W2.2) asetetun pumpun toiminnassa oli usein häiriöitä, mikä näkyi veden padottumisena laskeutusaltaihin asti ja virtauksessa pilottirakenteiden yläreunan yli ojaan. Koska maksimi päiväpumppausmäärä oli vähän alle 6 m³/vrk, jätettiin huomioimatta tilanteet, joissa lasketusaltaan jälkeisten v-mittapatojen yhteinen virtaama ylitti 6 m³/vrk. Näin laskettuna betonimurske pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan jälkeisen kaivon mittapadon (W2.1.1) keskivirtaama oli 1,2 m³/vrk ja kalsiitti/ 5.9.19 alkaen betonimurske + iso kivi pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan jälkeisen kaivon mittapadon (W2.1.2) 0,9 m³/vrk (kuva 16).

Viipymä pH:n nostoyksikköjen ja laskeutusaltaan muodostamassa kokonaisuudessa vaihteli syyskuun 2019 merkkiainemittauksissa 5–12 tunnin välillä. Kosteikon jälkeiseltä mittapadolta (W2.3) vettä virtasi keskimäärin 0,7 m³/vrk, kun huomiotta on jätetty ensimmäinen talvi, jolloin todennäköisesti jäätyminen seurauksena vettä ei tullut yhtään läpi. Täten suurin osa virtaamasta ohitti kosteikon. Koivuhakebioreaktorista (BR1) keskimääräinen ulostulovirtaama mittausten (n=10) perusteella oli 0,6 m³/vrk ja koivuhakebiohiilibioreaktorista (BR2) 0,9 m³/vrk.



Kuva 16. Pyhäsalmen pilottirakenteen jatkuvatoimisten pinnankorkeusmittausten perusteella laskettu virtaamadata. Koska maksimi päiväpumppausmäärä oli vähän alle 6 m³/vrk, niin jos lasketusaltaan jälkeisten v-mittapatojen (W2.1.1 ja W2.1.2) yhteinen virtaama ylitti 6 m³/vrk, nämä vuorokausiarvot on poistettu.

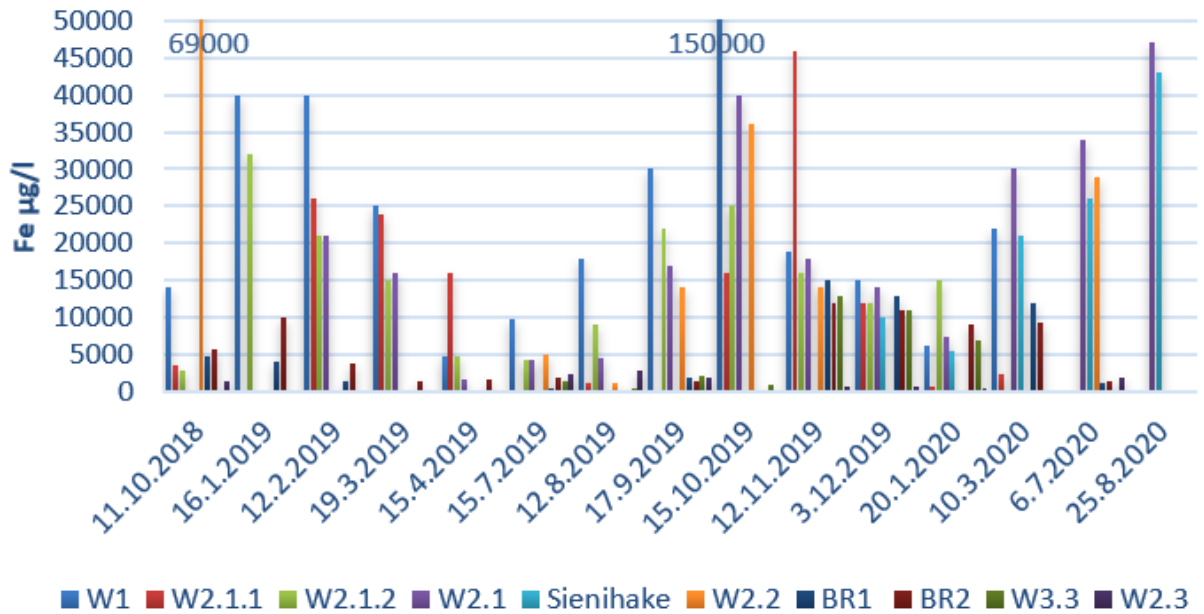
Vedenlaatu

Veden käsittelyssä tavoitteena oli erityisesti kaivoksen ympäristöluvassa mainittujen metallien eli kuparin ja sinkin sekä sulfaatin poistaminen. Vedessä oli kuitenkin lähtötietojen perusteella ajoittain hyvin matala pH ja korkea rautapitoisuus, joiden arveltiin tuottavan ongelmia biologisten puhdistusprosessien toimivuuteen, joten niihinkin pyrittiin vaikuttamaan pilottirakenteella. Kun käsittelyyn tulevan ojaveden laatua seurattiin pilotin toiminnan aikana (taulukko 2), keskiarvo pH oli hieman korkeampi, kuparipitoisuus noin puolet pienempi, sinkkipitoisuus samalla tasolla ja rautapitoisuus miltei kaksinkertainen, kuin vuosien 2013–2017 datassa, jota käytettiin lähtötietona suunnittelussa.

Taulukko 2. Pyhäsalmen pilottialueen tulevan veden laatu, pH ja metallit.

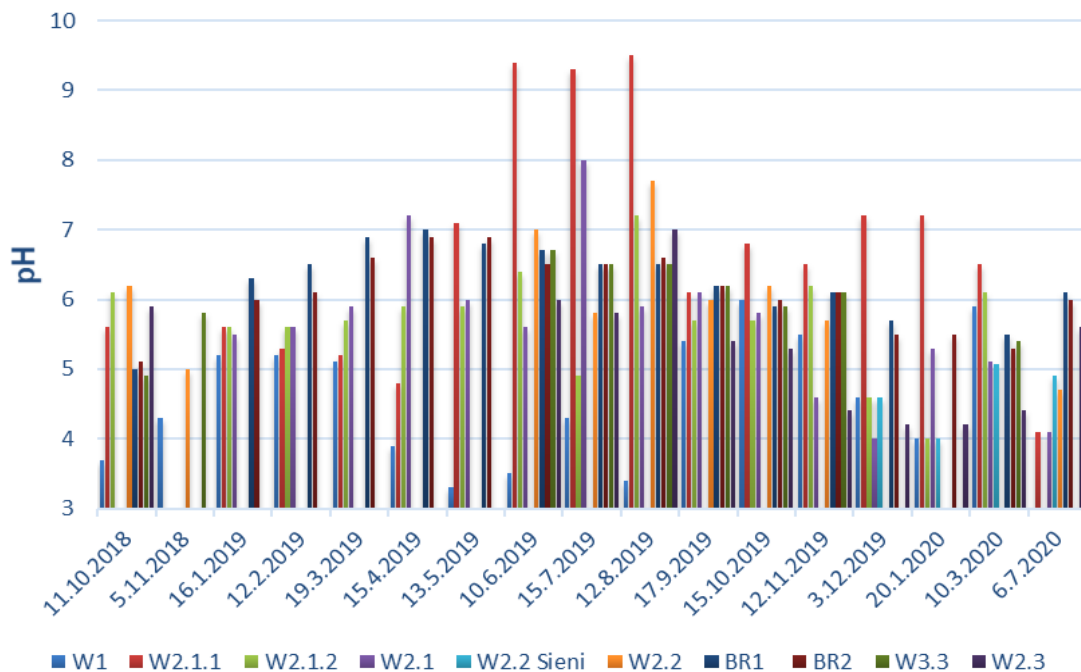
	Ka	Min	Max	Med	n
pH	4,6	3,3	6	4,6	15
Alumiini µg/l	1834,6	370	3100	1700	13
Kromi µg/l	0,9	0,4	2,2	0,8	13
Kupari µg/l	321,8	56	890	180	13
Nikkeli µg/l	24,6	6,2	40	24	13
Rauta µg/l	30300	4800	150000	19000	13
Sinkki µg/l	2782,3	770	5800	2900	13
Ammonium typpinä µg/l	474,1	15	1500	370	15
Kokonaistyyppi µg/l	1535,7	530	3800	1350	14
Nitraatti typpinä µg/l	61,9	< 5	360	13	14

Pilottirakenteen alkuosan pH:n nostoyksikön, sisältäen hapetuskaivot ja laskeutusaltaat, oli tarkoitus nostaa käsiteltävän veden pH:ta ja saostaa rautaa ja mangaania käsiteltävästä vedestä laskeutusaltaisiin. Etukäteen oli tiedossa, että käsiteltävän veden rauta- ja mangaanipitoisuudet ovat niin suuret, että ne aiheuttaisivat testattavissa pilottirakenteissa tukkeutumisongelmia. Samoin eristysojan pH oli ajoittain liian matala testattavien pilottirakenteiden optimaalisen toiminnan kannalta. Pilottirakenteen alkuosan toimivuutta seurattiin vesinäytteenotopisteillä W1 (hybridipilottirakenteeseen tuleva) ja W2.1.1 (betonimurske pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan alapuolinen) ja W2.1.2 (kalsiitti/5.9.2019 alkaen betonimurske + iso kivi pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan alapuolinen). Käsittelyyn tulevan veden rautapitoisuus vaihteli seuranta-aikana välillä 4800–150000 µg/l. Pääasiassa tämä pilottiyksikön alkuosa poisti rautaa käsitellystä vedestä. Kalsiitti/5.9.2019 alkaen betonimurske + iso kivi pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan muodostama linjasto poisti keskimäärin 64 % ja toinen linjasto keskimäärin 40 % käsiteltävän veden raudasta. Kuvasta (17) kuitenkin nähdään, että ajoittain niistä myös huuhtoutui rautaa. Tämä selittyy rakenteiden tukkeutumisongelmilla, ja sillä, että osa näytteenotoista on tehty liian pian huoltotoimien jälkeen eli systeemi ei ole ehtinyt stabiloitua puhdistuksen jälkeen. pH:n nostoyksikön jälkeiset laskeutusaltaat olivat todennäköisesti liian pienet, jotta rauta olisi ehtinyt laskeutua. Rautaa on myös vaikea laskeuttaa. Se muodostaa vedessä tyypillisesti kevyttä sakkaa, joka ei laskeudu nopeasti, vaan kulkee virtauksen mukana. Rautasakkaa menikin systeemissä runsaasti sienihakeyksikköön sekä bioreaktoreihin, joissa sakka saattoi aiheuttaa tukkeutumista ja estää yksikköjen optimaalisen toiminnan. Bioreaktori 1:ssä raudan puhdistusteho oli keskimäärin 66 % ja bioreaktori 2:ssa keskimäärin 56 %.



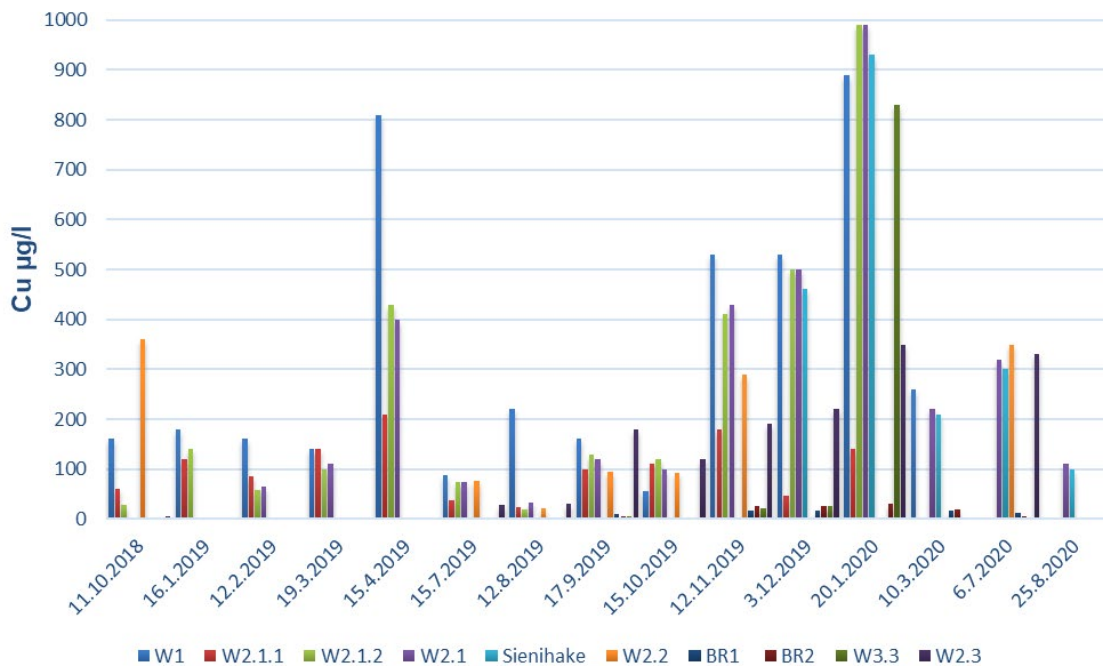
Kuva 17. Veden rautapitoisuuden (Fe) vaihtelu Pyhäsalmen pilottirakenteessa.

Käsittelyyn tulevan veden pH vaihteli välillä 3,3–6. Betonimurske pH:n nostoyksikkö nosti käsitellyn veden pH:ta keskimäärin kaksi yksikköä ja sen jälkeinen pH vaihteli välillä 4,1–9,5. Kalsiitti (5.9.2019 alkaen betonimurske + iso kivi) pH:n nostoyksikkö nosti käsitellyn veden pH:ta keskimäärin 0,7 yksikköä ja sen pH jälkeinen välillä 4–7,2 (kuva 18). Bioreaktoreilla ei ollut käytännössä ollut merkitystä veden neutraloitumisessa. Käsitellyn veden pH oli bioreaktori 1:n jälkeen keskimäärin 0,3 yksikköä korkeampi kuin ennen bioreaktoria; bioreaktori 2:ssa muutosta ei käytännössä havaittu.



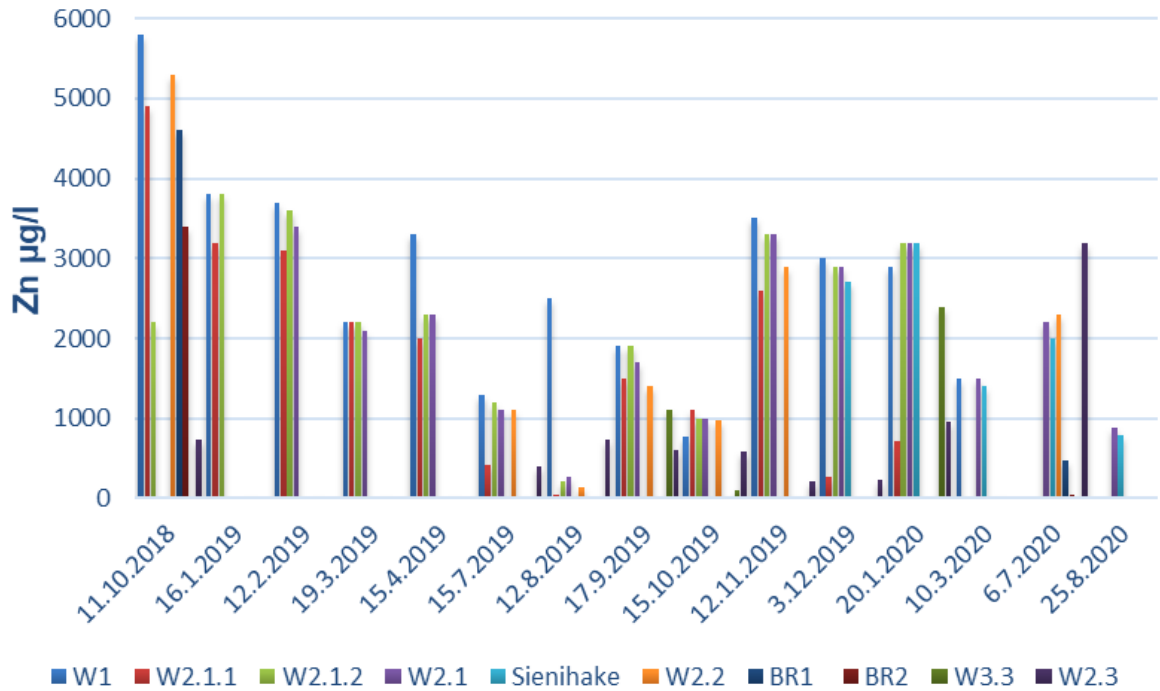
Kuva 18. Veden pH:n vaihtelu Pyhäsalmen pilottirakenteessa.

Käsittelyyn tulevan veden kuparipitoisuus vaihteli välillä 56–890 µg/l. Betonimurske pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan muodostama linjasto poisti kuparia keskimäärin 45 % ja toinen linjasto keskimäärin 23 % (kuva 19). Sienihakeyksikön puhdistusteho oli 7 % ja bioreaktoreissa kuparin puhdistusteho oli 96 %. Pilottirakenteen lopussa olevalla kosteikolla kuparipitoisuudet kohosivat keskimäärin 2300 % kosteikolta lähtevää ja kosteikolle tulevaa pitoisuutta verrattaessa. Kosteikolta lähtevät pitoisuudet olivat kuitenkin edelleen keskimäärin 29 % pienemmät kuin koko pilottirakenteeseen tulevan veden pitoisuudet. Kosteikolle on tulosten perusteella täytynyt rakentamisvaiheessa päätyä kontaminoitunutta materiaalia, joka aiheuttaa metallipitoisuuden nousun. Metallien lähteeksi arveltiin kosteikolle istutettujen järviruokojen juurakkopaakkuja, jotka otettiin pilottirakenteen viereisestä rannasta, johon on aiemmin päätyntä metallipitoista kuormitusta.



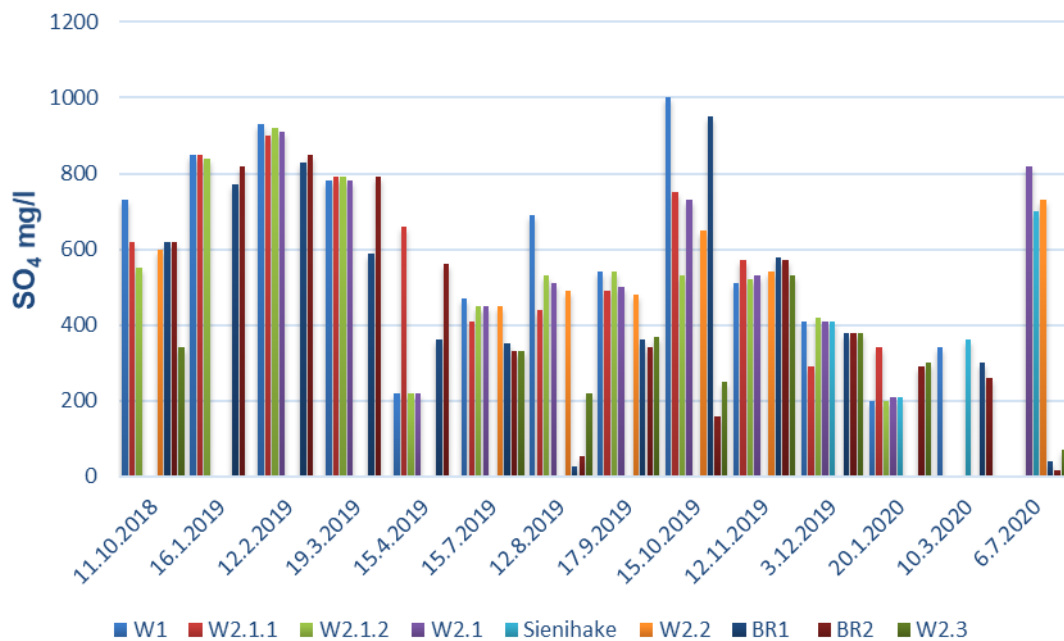
Kuva 19. Veden kuparipitoisuuden (Cu) vaihtelu Pyhäsalmen pilottirakenteessa.

Käsittelyyn tulevan veden sinkkipitoisuus vaihteli välillä 770–5800 µg/l. Betonimurske pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan muodostama linjasto poisti sinkkiä vedestä keskimäärin 35 % ja toinen linjasto 14 %. Sienihakeyksikössä poistuma oli 7 %, bioreaktori 1:ssä 97 % ja bioreaktori 2:ssa 99 % (kuva 20). Kosteikolla sinkkipitoisuus nousi keskimäärin 1200 %. Syynä tässäkin oli todennäköisesti metalleille kontaminoituneelta alueelta tuodut juuripaakut. Koko pilottirakenteen yhteenlaskettu sinkinpoistoteho oli kuitenkin keskimäärin 72 % (vaihteluväli 25–93 %).



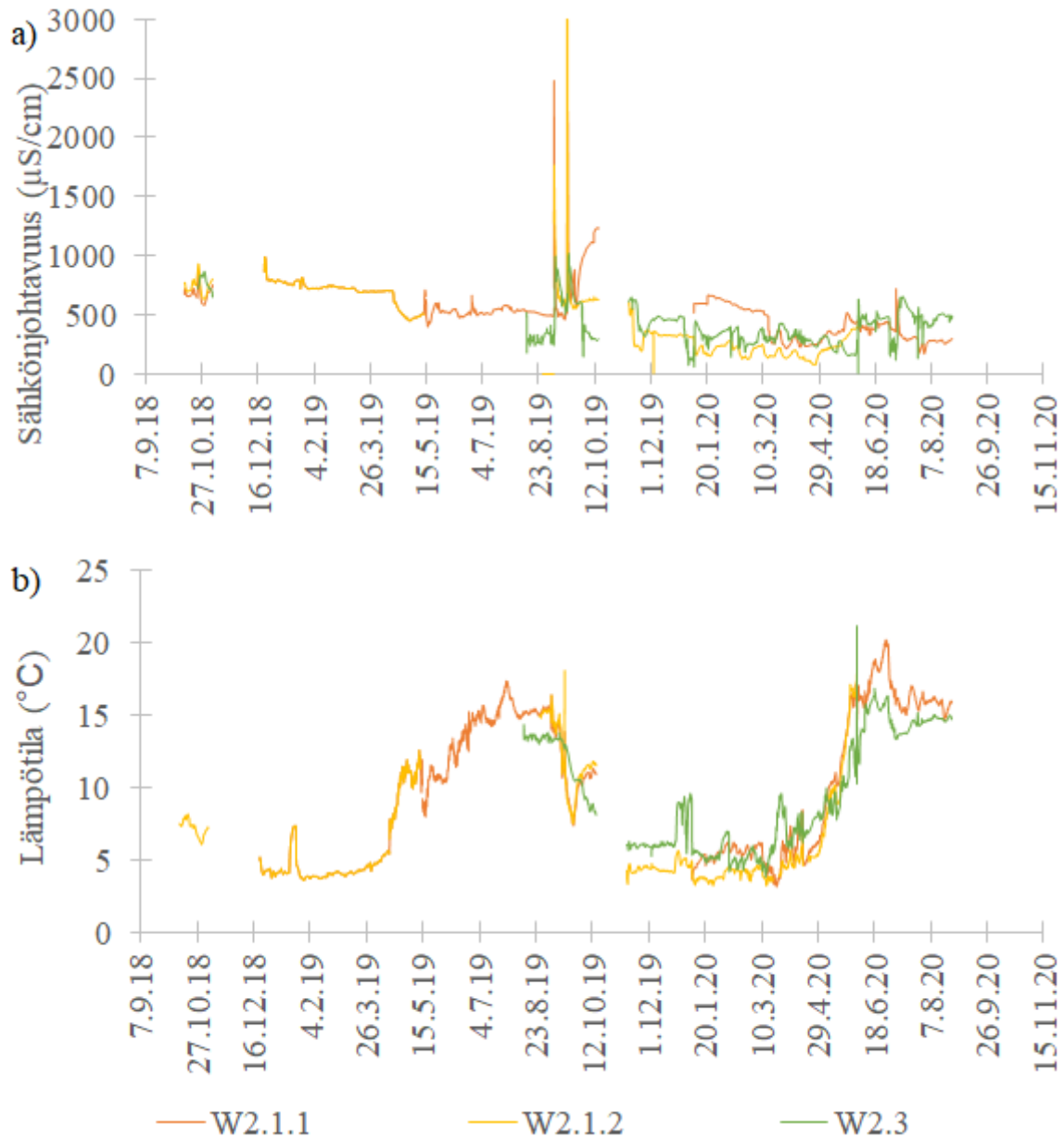
Kuva 20. Veden sinkkipitoisuuden (Zn) vaihtelu Pyhäsalmen pilottirakenteessa.

Käsittelyyn tulevan veden sulfaattipitoisuus vaihteli välillä 200–1000 mg/l. pH:n nostoyksikön ja laskeutusaltaan muodostamassa betonimurskettä sisältävässä linjastossa ei tapahtunut sulfaatin poistumista ja toinen linjasto poisti sulfaattia keskimäärin 8 %. Aikaisemmista tutkimuksista tiedettiin, että kalsiitti ja betonimurske eivät nosta pH:ta niin korkealle, että metallisulfidit saostuisivat. Sienihakeyksikön ei myöskään havaittu vaikuttavan käsiteltävän veden sulfaattipitoisuuteen. Bioreaktori 1:ssä sulfaatin poistoteho oli keskimäärin 14 % ja bioreaktori 2:ssa 16 % (kuva 21).



Kuva 21. Käsiteltävän veden sulfaattipitoisuuden (SO₄) vaihtelu Pyhäsalmen pilottirakenteessa.

Sähkönjohtavuus vaihteli noin 100–800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ välillä, syyskuussa 2019 toteutettuja merkkiainekokeita lukuun ottamatta (kuva 22a). Veden lämpötila nousi kesällä 15 °C tuntumaan ja jäi talvella noin 3–7 °C välille (kuva 22b). Kosteikon tarkkailuputkesta mitatut veden lämpötilat olivat talvella alle 5 °C ja tulevan veden lämpötilatkin pääosin, mutta bioreaktoreiden tarkkailuputkista mitatut vedenlämpötilat olivat 5 °C tietämissä ja jopa osin yli (liite 36).



Kuva 22. Pyhäsalmen pilottirakenteen a) sähkönjohtavuuden ja b) lämpötilan vaihtelu.

Alustavia tutkimustuloksia sammalyksiköstä ja sammalen mikrobikumppaneista

Sammalyksikköä seurattiin v. 2018–2019 vesinäytteillä (ennen-jälkeen yksikön). Pian todettiin, että ojan virtaaman vaihtelun vuoksi emme pystyneet kontrolloimaan virtausta sammalyksikön läpi. Kasvimateriaalista määritettiin raskasmetallipitoisuus 2018 ennen testauksen aloittamista sammalyksikössä ja vuoden käytön jälkeen. Useiden metallien osalta testaamamme kontaminoituneelta läheiseltä alueelta kerätty alkutilan sammalnäyte oli kyllästynyt (taulukko 3), jolloin vuoden testauksen aikana useat metallit olivat

lähteneet liukenemaan. Sammalyksikössä onkin syytä käyttää puhtaan kontrollialueen materiaalia, jolloin metallien adsorbointi ja absorbointi ovat mahdollisia.

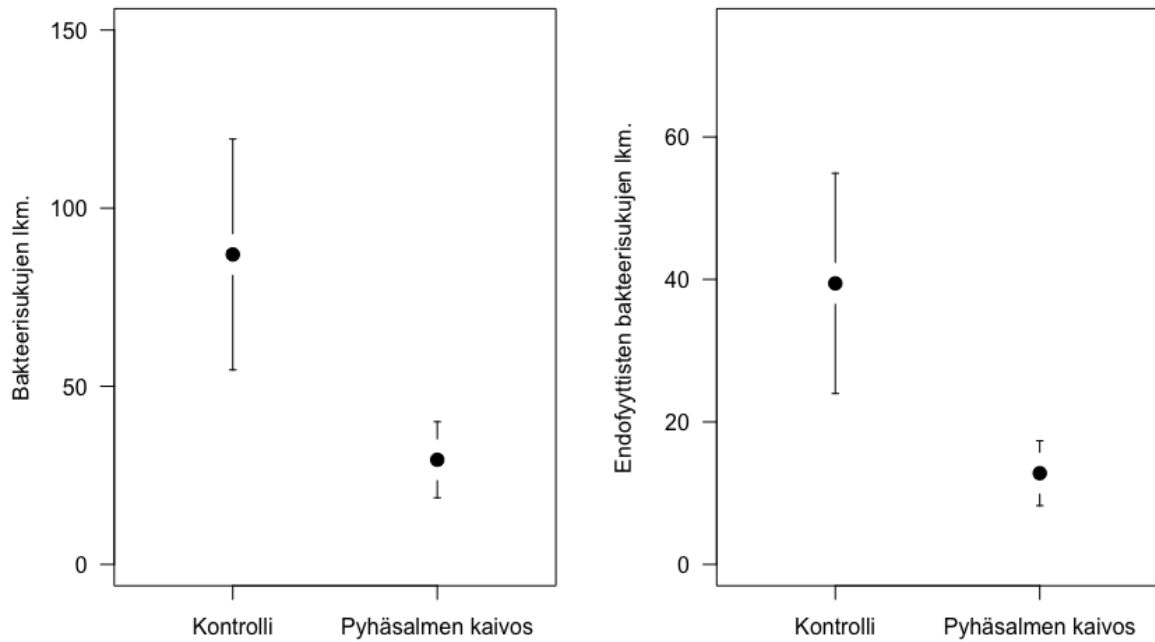
Molekyylibiologisilla menetelmillä nevasirppisammalelta (sis. Kallon kylän läheiseltä luonnontilaiselta lähteeltä haetun kontrollin ja Pyhäsalmen kaivoksen 2018 näytteet) löytyi 1025 bakteerikumppania, joista suhteellisen runsauden perusteella 44 % kuului Proteobakteereihin, 7 % Bacteroideta-, 7 % Actinobacteriota- ja 5 % Planctomycetota -pääjaksoihin. Endofyyttisistä bakteereista 39 % kuului Proteobakteereihin, 5 % Planctomycetota- ja Bacteroideta -pääjaksoihin, ja 4 % Actinobacterioihin.

Pyhäsalmen kaivoksen nevasirppisammal populaatiosta löydettiin 812 bakteeria, joista 57 % kuului Proteobakteereihin, 9 % oli Actinobacteriota, 5 % Planctomycetota ja 2 % Bacteroideta. Pyhäsalmen sammalpopulaation endofyyttisistä bakteereista 50 % oli Proteobakteereja, 6 % Actinobacteriobiota, 3 % Planctomycetota ja 1 % Bacteroideta.

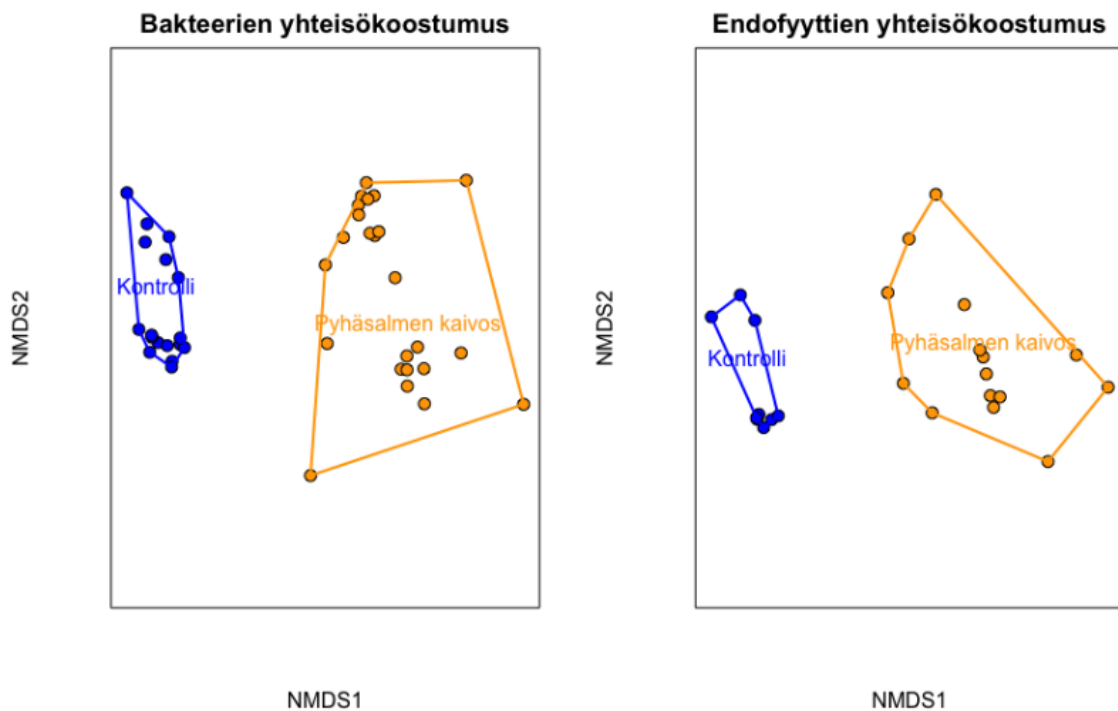
Taulukko 3. Nevasirppisammalen metallipitoisuudet kuiva-ainetta kohti.

Metalli (mg/kg)	Sammal kontrolli (mg/kg)	Pyhäsalmen kaivosalueelta 2018 kerätty sammal (mg/kg)	Sammal Pyhäsalmen pilotissa vuoden käytön jälkeen (v.2019; mg/kg)
Alumiini (Al)	92	6800	2200
Arseeni (As)	0,13	6,4	3,5
Barium (Ba)	160	46	53
Fosfori (P)	3000	1400	1300
Kadmium (Cd)	0,059	22	0,94
Kalium (K)	21000	4900	14000
Kalsium (Ca)	12000	1200	1800
Koboltti (Co)	0,13	10	1,4
Kromi (Cr)	1,6	5	4,9
Kupari (Cu)	7,6	1800	560
Lyijy (Pb)	0,48	16	5,4
Magnesium (Mg)	3100	760	1400
Mangaani (Mn)	34	67	78
Natrium (Na)	1000	450	490
Nikkeli (Ni)	4	22	3,6
Rauta (Fe)	230	15000	86000
Rikki (S)	2600	15000	10000
Sinkki (Zn)	28	8200	250
Strontium (Sr)	110	3,9	250
Titaani (Ti)	6,5	25	72
Uraani (U)	2,1	4,7	1,2

Bakteerien lajirunsaus erosi (ANOVA; $P < 0,05$) Pyhäsalmen kaivoksen ja Kallon kontrollinäytteiden välillä (kuva 23). Bakteerien yhteisökoostumuksessa nähtiin selkeä ero kontrollin ja Pyhäsalmen nevasirppisammalpopulaatioiden välillä (kuva 24, PERMANOVA $P < 0,05$); samankaltaisesti endofyyttisten bakteerien yhteisökoostumus erosi kontrolli- ja Pyhäsalmen kaivosnäytteiden välillä (PERMANOVA; $P < 0,05$).



Kuva 23. Bakteerisukujen ja endofyyttisten bakteerisukujen lajimäärä kontrollialueella ja Pyhäsalmen kaivoksella.



Kuva 24. Bakteerisukujen ja endofyyttisten bakteerisukujen yhteisökoostumuksen ero kontrollialueen ja Pyhäsalmen kaivoksen välillä.

Pyhäsalmen kaivoksen nevasirppisammalen endofyyttisistä bakteereista löytyi viisi taksonia, jotka indikoivat korkeita metallipitoisuuksia (Indval $P < 0.05$; taulukko 4). Erityisesti Isosphaeraceae on

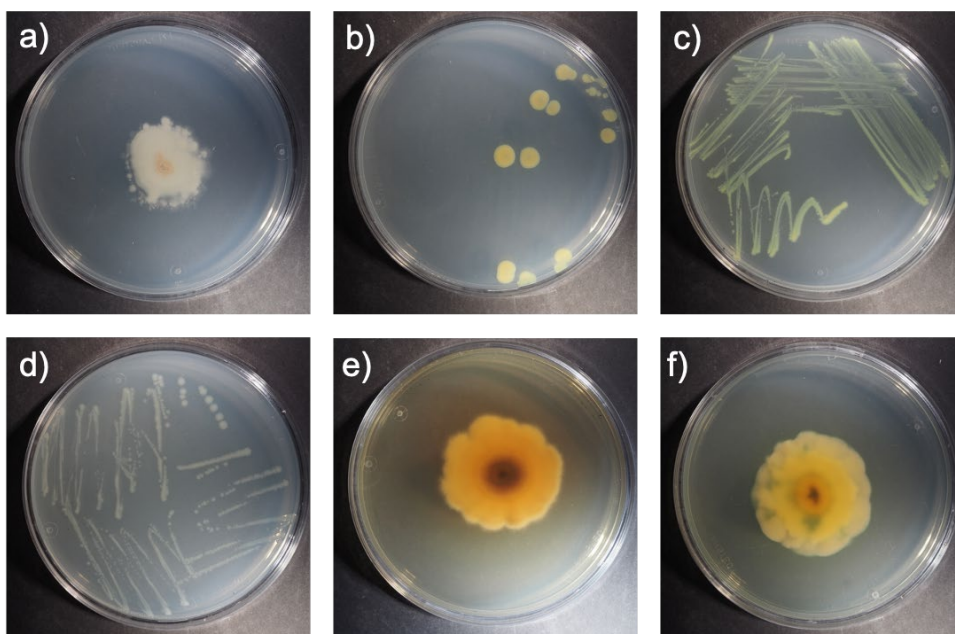
eristetty aiemmin pohjoisesta rauhkasammalpopulaatiosta (Kulichevskaya ym. 2016) ja Sideroxydans sp. on aiemmin löydetty saksalaiselta ruskohiilikaivokselta, ja kyseinen kanta on sopeutunut alhaiseen happamuuteen (pH 3,5) (Mühling ym. 2016). Tutkimusta nevasirppisammalen mikrobikumppaneista jatketaan.

Taulukko 4. Nevasirppisammalen endofyyttisten bakteeritaksoneiden metalli-indikaattorit (IndVal analyysi R ohjelmointiympäristö).

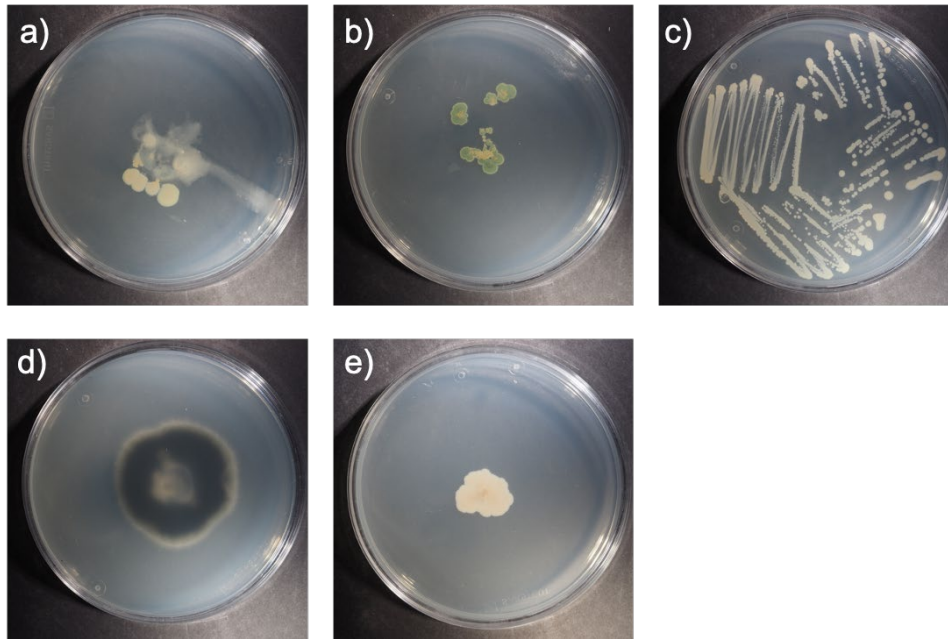
Bakteeritaksoni	Al	Fe	Cu	Cr	S	Zn	As	U
<i>Desulfosporosinus</i> sp.	x	x	x	x	x	x	x	x
WPS2 (<i>Eremiobacterota</i>)	x	x	x	x	x	x	x	x
Rhodanobacteraceae	x				x	x		
Isosphaeraceae		x					x	
<i>Sideroxydans</i> sp.				x		x	x	

Nevasirppisammalen puhtasviljelynäytteet

Pyhäsalmen kaivokselta ja kontrollialueelta eristettiin endofyyttiset mikrobit puhtasviljelymenetelmillä. Pyhäsalmen kaivokselta eristettiin ja tunnistettiin *Bacillus cereus* group sp., *Rhodanobacter* sp., *Leifsonia* sp. ja *Paraburkholderia* sp. bakteerit, ja *Pezoloma* sp. ja *Helotiales incertae sedis* sp. sienikantoja (kuva 25). Kontrollialueelta tunnistettiin *Bacillus cereus* group sp., *Yersinia* sp. ja *Pseudomonas* sp. bakteerit ja *Helotiales incertae sedis* sp. ja *Phialocephala* sp. sienet (kuva 26).



Kuva 25. Pyhäsalmen kaivoksen nevasirppisammalen endofyyttiset puhtasviljelynäytteet; a) Bacillus cereus group sp., b) Rhodanobacter sp., c) Leifsonia sp., d) Paraburkholderia sp., e) Pezoloma sp. ja f) Helotiales incertae sedis sp. Kuvat: Rupali Roy, Namrata Baruah ja Kaisa Lehosmaa.



Kuva 26. Kontrollialueen nevasirppisammalen endofyyttiset puhtasviljelynäytteet; a) *Basillus cereus* group sp., b) *Yersinia* sp., c) *Pseudomonas* sp., d) *Helotiales incertae sedis* sp., e) *Phialocephala* sp. Kuvat: Rupali Roy, Namrata Baruah ja Kaisa Lehosmaa.

Sienihakeyksikkö

Sienihakeyksiköstä havainnoitiin puhtasviljelytekniikalla (näytteenotto 2.9.2019, maljattu ja siirrostettu edelleen: 13.9., 23.9., ja 14.10.2019), että makroskooppisesti osterivinokkaalle tyypillisennäköistä rihmastoja lähti runsaasti ja odotetulla nopeudella kasvuun hakemateriaalista. Sieni tunnistettiin kapillaarisekvensoinnilla (ABI sekvenssaattori, Oulun yliopisto), ja se olikin *Mortierella*-suvun sientä (kuva 27). On silti mahdollista, että hakkeessa on myös elävää osterivinokasta, mutta sitä ei vain maljaamalla saatu esille. Tämä voi johtua esimerkiksi siitä, että nopeampikasvuinen *Mortierella* -sieni ei mahdollistanut osterivinokkaan kasvua maljalle. On myös mahdollista, että osterivinokasta ei enää ollut elossa sienihakkeessa, koska materiaali oli ollut kauan veden alla.



Kuva 27. Sienihakemateriaalin puhtasviljelmä. Sieni tunnistettiin sekvensoimalla Mortierella-suvun sieneksi. Kuva: Saija Ahonen.

4.1.5 Johtopäätökset Pyhäsalmen pilottirakenteen toiminnasta

Pyhäsalmen kaivosalueelle toteutetulla vesienpuhdistusratkaisulla saatiin metalleja poistettua käsitellystä vedestä hyvin. Poikkeuksena tähän oli järviruokosteikko, josta huuhtoutui metalleja. Syynä tähän todennäköisesti oli se, että järviruo'on juuripaakut oli kerätty lähialueelta, jonka maaperä oli kontaminoitunut metalleilla. Bioreaktoreiden jälkeen otetuista vesinäytteistä havaitaan, että sinkin ja kuparin osalta päästiin lupaehtojen asettamiin tavoitteisiin ($Zn < 1 \text{ mg/l}$ ja $Cu < 0,2 \text{ mg/l}$), lukuun ottamatta ensimmäistä näytteenotokertaa heti pilotin käynnistämisen jälkeen. Pilottirakenteesta lähtevän veden pH oli myös tavoitteen mukainen eli välillä 5,5–9,5. pH:n nostoyksiköt kuitenkin olivat liian tukkeutumisherkkiä ja vaativat useamman kerran vuodessa huoltoa. Tämä tulee huomioida, jos vastaavanlaista rakennetta käytetään. Pilottiyksikköön tulevan raudan keskiarvopitoisuus vedessä oli miltei kaksikertainen siihen pitoisuuteen nähden, jolla pilottirakennetta alettiin suunnittelemaan. Rautaa päätyi vielä paljon myös sienihakeyksikköön ja bioreaktoreihin, kun laskeutusaltaat eivät pystyneet pidättämään sitä tarpeeksi. Parempi raudan pidättäminen olisikin tärkeää, jottei seuraavat vesienkäsittely-yksiköt tukkeudu rautasakalla, ja ettei niiden pitkäaikainen toiminta heikkene. Bioreaktorit poistivat hyvin metalleja ja myös nitraattityppimuodossa ollutta typpeä. Bioreaktoreiden välillä ei ollut toimivuudessa merkittäviä eroja, eli pelkkä koivu-puuhake toimi aivan yhtä tehokkaasti kuin reaktori, jossa osaksi käytettiin biohiiltä. Kosteikko oli suunniteltu ensisijaisesti pidättämään mahdollista orgaanisen aineen huuhtoutumista hakebioreaktorista, poistamaan ravinteita (fosforia ja typen kaikkia muotoja) sekä pidättämään metalleja. Kuten aiemmin on todettu, metallien suhteen kosteikko ei toiminut toivotulla tavalla, mihin pääsyyksi arvioitiin kontaminoituneelta alueelta kerätyt järviruo'on juuripaakut sekä se, että kosteikko kärsi kuivuudesta (järviruo'ot eivät kasvaneet toivotulla tavalla). Kuitenkin yhtä näytteenotokertaa lukuun ottamatta myös kosteikon jälkeen otetuissa vesinäytteissä päästin sinkin osalta tavoitteeseen ($Zn < 1 \text{ mg/l}$), mutta kuparin osalta vain osan aikaa.

Sammalyksikössä todettiin, että tärkeää olisi käyttää puhtaalta alueelta kerättyjä sammalia, sillä muuten niissä ei ole enää niin hyvin kapasiteettia sitoa metalleja käsiteltävästä vedestä. Kuitenkin sammal

pystyy pidättämään näiden tutkimusten perusteella esimerkiksi rautaa 86 g/kg, kuparia 1,8 g/kg ja sinkkiä 8,2 g/kg kuivapainoa kohden (taulukko 3). Pilotissa kokeiltu sammalallasrakenne ei toiminut kovin hyvin, sillä vesi pystyi kiertämään yksikön. Mittaustulosten mukaan sillä ei juuri ollutkaan vaikutusta vedenlaatuun, ja tulosten perusteella on vaikea vetää tarkkoja johtopäätöksiä. Käytetty sammalmateriaali oli kyläinen, joten hankkeen aikana ei tapahtunut metallien sitomista. Sammalbiomassan lähtötilanteen raskasmetallipitoisuus (taulukko 3) ja meneillään olevat kolonnitestaukset osoittavat kuitenkin nevasirppi-sammalen korkeaa metallien sitoutumiskykyä (Kiani et al. julkaisematon).

Sienihakkeen osalta olisi tärkeää huolehtia, että olosuhteet olisivat osittain hapelliset, sillä hapettomat olosuhteet eivät suosi sieniä, ja lisäyksellä tavoiteltu sienirihmasto joutuu väistymään muiden mikrobien tieltä. Koko tarkastelujakson aineistossa on otettava huomioon se, että yksikkö ei toiminut koko aikaa normaalisti eli välillä vettä ei tullut yksikköön (esim. talvi 2018–2019) ja välillä se tulvi. Kesän 2020 tulosten perusteella sienihake pystyi pidättämään ammoniumia noin 25 % ja sinkkiä noin 10 %, kuparia ja rautaa alle 10 % (25.8.2020 käyntikerran mittaukset). Koko vuoden 2020 tulosten perusteella ammoniumia poistui 16 %, sinkkiä 5 %, kuparia 6 % ja rautaa 19,2 %. Kiintoaine väheni 33 %, mutta kokonaistyyppi lisääntyi hieman (6 %). pH ja lämpötila nousivat (4,70 -> 4,98 ja 3,5 °C -> 8,2 °C). Fosforin määrä sen sijaan lisääntyi yli 200 %.

Veden johtamisen suhteen isoimmaksi haasteeksi osoittautui pH:n nostoyksiköiden tukkeutumisen lisäksi useamman pumpun käyttö. Koko rakenteen vesiä pumpattiin kahdesti (tulokaivo ja bioreaktoreihin menevä). Jos toisena oleva pumppu petti, aiheutti tämä tulvimista aiempiin yksiköihin. Pintavipan avulla saatiin kuitenkin normaalitilanteessa korjattua se ero, mikä aiheutuu siitä, että kahden pumpun pumppausmäärät eivät voi olla täsmälleen samoja.

4.2 Kallon jätevedenpuhdistamo

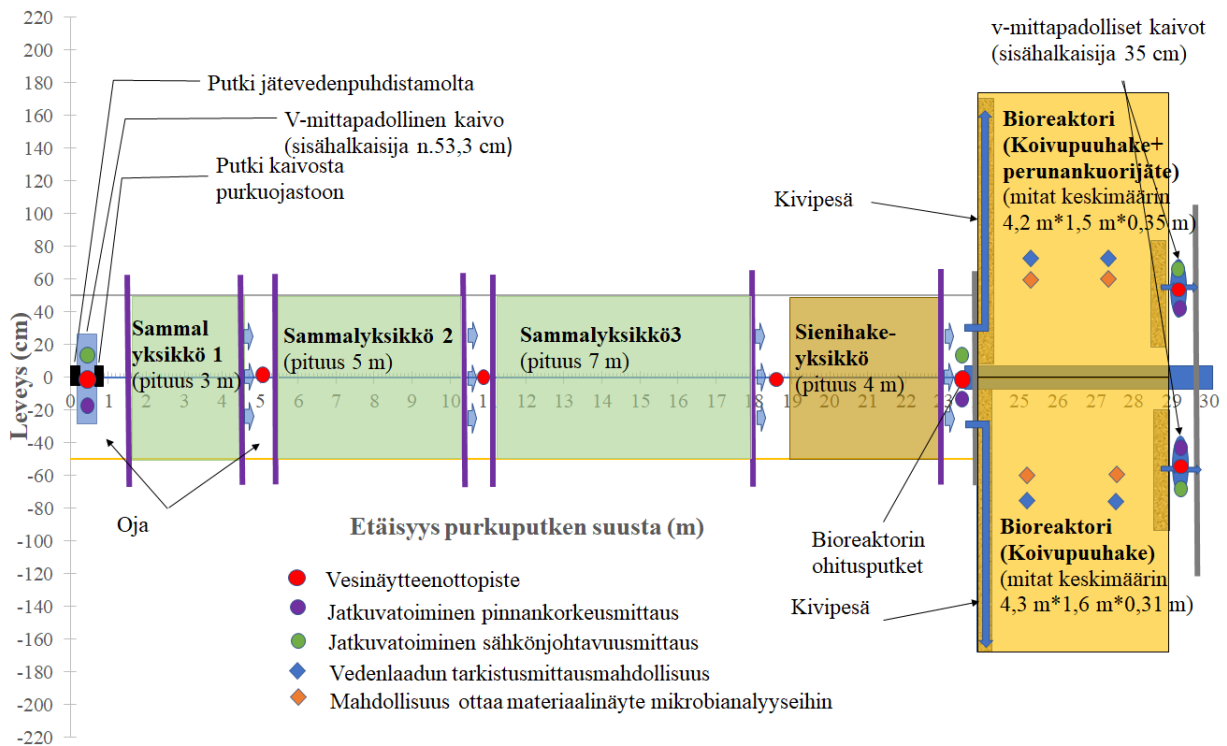
4.2.1 Lähtötilanne

Kallon jätevedenpuhdistamo on 1993 valmistunut ns. TAPIO-pienpuhdistamo, jonka mitoituksen lähtökohtana on ollut asukasvastikeluku (AVL) 300. Jätevedenpuhdistamossa ensimmäisenä yksikkönä on etuselkeytysallas, josta vedet johdetaan biologiseen käsittelyyn (biomattoallas). Seuraavaksi jätevesi käsitellään kemiallisesti kaivossa, jossa on kemikaalipumppu, jätevesipumppu ja flokkausputki. Kemikaloinnin jälkeen vesi virtaa jälkiselkeytysaltaaseen, ja sieltä edelleen purkuojan ja serpentiinijoston kautta Kallojokeen n. 600 m:n päässä puhdistamolta. Puhdistamon ympäristöluvassa (Pohjois-Suomen Aluehallintovirasto, Ympäristölupa Nro 128/2013/1) on määritelty, että vuositasolla tarkasteltuna lähtevän veden BOD₇ (ATU) saa olla enintään 30 mg O₂/l ja puhdistustehon tulee olla yli 70 % ja lähtevän veden kokonaisfosforipitoisuus saa olla enintään 1,0 mg/l ja puhdistustehon tulee olla yli 90 %. Typenpoiston osalta jäteveden käsittelyssä on pyrittävä mahdollisimman hyvään kokonaistypen poistoon.

Suunnittelussa pilottirakenteen tavoitteeksi asetettiin typenpoiston tehostaminen. Aiempina vuosina otettujen velvoitetarkkailunäytteiden perusteella jätevedenpuhdistamolta huuhtoutui kokonaistyyppiä ja ammoniumtyppiä (NH₄-N). Jätevedenpuhdistamolle tuleva tyyppi (pitoisuus vuosina 2009–2018 vaihdellut välillä 22–58 mg/l) oli pääosin ammoniumtyyppinä (vuosikeskiarvot mg tarkkuudella samat, kuin kokonaistyyppellä), mikä on tyypillistä yhdyskuntajätevesille. Tämä asetti haasteita typen poiston tehostamiselle laitoksen ulkopuolella, sillä nitraattimuodossa se olisi paremmin poistettavissa erilaisilla passiivisilla ratkaisuilla. Puhdistamolla käsiteltävän veden määrästä ei ollut tarkkoja tietoja, sillä tiedot perustuivat pumpun käyttötehoon ja arvion oli todettu sisältävän epävarmuutta. Alkuelvityksissä oli myös huomattu, että laitoksen fosforin kemiallisen saostuksen annostusta tulisi myös tarkastella, sillä lähtevissä vesissä oli kemikaalijäämiä. Kemikaalijäämät voivat häiritä biologista typen poistoa.

4.2.2 Toteutettu rakenne

Pilotti rakennettiin touko-kesäkuussa 2019. Rakennusvaiheista on tehty diaesitys (Suomen ympäristökeskus 2020). Jätevedenpuhdistamon sisälle biologisen ja kemiallisen osan väliin rakennettiin ilmastettu leijupetibioreaktori, jonne jätevesi pumpattiin biomattoaltaasta. Muutoin yksiköt sijoitettiin puhdistamon ulkopuolella sijainneeseen purkuojastoon (kuva 28) ja pumppuja ei käytetty. Heti purkuputken suulle asetettiin v-mittapadollinen kaivo, jotta virtaamia voidaan arvioida tarkemmin. Seuraavaksi rakennettiin pieni laskeutusallas ja 3 eri mittaista nevasirppisammal -yksikköä. Nevasirppisammal -yksiköiden perään sijoitettiin sieni-hakeyksikkö ja viimeiseksi bioreaktorit. Nevasirppisammal -yksiköitä ja sienihakeyksikköä ei eristetty, mutta muut yksiköt ja mittakaivot eristettiin Finnfoamilla (pääasiallisesti 12 cm kerros Finnfoamia). Veden virtaamista myös talven pakkasilla turvaamaan ja jäätymisiltä suojaamaan asetettiin lämmityskaapeli, jota käytettiin lyhytaikaisesti ehkäisemään jäätymistä talvella 2019–2020 kovimpien pakkasten aikana.



Kuva 28. Kallon jätevedenpuhdistamon purkuojastoon rakennettu pilottirakenne ja sen näytteenotuspisteet.

Ilmastettu leijupetibioreaktori

Ilmastettu leijupetibioreaktori (eng. moving bed biofilm reactor, MBBR) ei ole passiivinen yksikkö vaan se vaatii ilmastuksen. Leijupetibioreaktorissa nitrifikaatio eli ammoniumtyypen muuttaminen nitraattitypeksi voidaan kuitenkin saada aikaan pienessä tilassa, koska säiliön koko tilavuus hyödynnetään biomassan kasvuun, ja siinä ei tarvita lietteen kierrätystä (Rusten ym. 2006). Yksikön on havaittu toimivan myös kylmissä olosuhteissa (Hoang 2013). Bioreaktorin toimintaan ja nitrifikaatioasteeseen vaikuttavat orgaanisen aineen määrä, liuennan hapen ja ammoniumtyypen pitoisuus, lämpötila, pH, alkaliniteetti ja biofilmin aikaisempi historia (Rusten ym. 2006).

Kallon jätevedenpuhdistamolla ilmastettu leijupetibioreaktori toteutettiin puhdistamorakennuksen sisälle kahteen 1 m³ IBC-konttiin (kuva 29). Niissä käytettiin Kaldnes K3 muoviraksuja kantoaineena ja säiliöihin laitettiin muoviraksuja noin 40 % niiden tilavuudesta. Säiliöön vesi pumpattiin biomattoaltaasta niin, että uppopumppu pumppaa 15 min ja on 15 min pumppaamatta. Pumpun tuotto oli alkuvaiheessa 10

l/min ja kesäkuun 2020 huoltokäynnin mittauksissa 8 l/min, joten säiliöihin on pumpattu 7200–5760 l /vrk jätevettä. Pumppu pumpppaa veden ensimmäisen säiliön pohjalle (putkessa on ilma-aukko korkeimmalla kohdalla ylöspäin). Sieltä se virtaa pinnalta seuraavan säiliön pohjalle ja sieltä pinnalta ylivuotona putkessa kaivoon, josta vesi menee kemikalointiin. Putket ovat 50 mm halkaisijaltaan olevaa kiinteistöviemäriputkea.

Käytännön kokemuksena huomattiin, että lähtöpäähän tarvitaan pitkä rei'itetty putki, jotta liettyneet raksut eivät kuukausien myötä ajaudu poistoputken suulle ja tuki tätä putkea. Säiliöitä ilmastettiin ensimmäinen vuosi Taskilan jätevedenpuhdistamolta käytöstä jääneillä ilmakivillä (yksi ilmastuskivi/säiliö). Näihin ilma pumpattiin aluksi puhdistamon omalla pumpulla, jolla ilmastetaan muutakin. Jotta tämä pumppu ei ylikuormittuisi, vaihdettiin myöhemmin kummallekin ilmakivelle oma ilmastuspumppu. Koska BOD -kuorma suhteessa tuotettuun happipitoisuuteen oli liian suuri, putkiin ja rakenteisiin kertyi talven 2019–2020 aikana ylimäärin lietettä eikä nitrifikaatio myöskään ollut tavoitellulla tasolla. Tästä syystä kesäkuussa 2020 osa rakuista puhdistettiin vedellä erillisessä astiassa ja säiliöihin laskeutunutta lietettä pumpattiin pois. Osaan rakuista taas ei koskettu, jotta mikrobisto säilyisi. Kesäkuun 2020 alussa säiliöihin myös asetettiin aiempien ilmakivien lisäksi uudet 21 cm ilmakivet kumireunuksella (1 per säiliö) ja uudet ilmapumput (BOYU SES-60). Ilmastuksessa pumput ilmastavat vettä 45 min ja sitten niiden toiminnassa on 15 min tauko, pumppujen ylikuumentumisen estämiseksi. Biomattoallas myös tyhjennettiin sinne kertyneestä lietteestä 21.8.2020, minkä pitäisi selvästi vähentää ylimääräistä BOD:n kuormaa leijupetibioreaktoriin.



Kuva 29. Vasemmalla puolella olevassa kuvassa on säiliöihin toteutettu ilmastettu leijupetibioreaktori, keskimmaisessa kuvassa kesäkuun 2020 alussa pidennetty säiliön veden poistopään reikäputki ja raksut ja oikealla ilmapumput. Kuvat: Anne Korhonen ja Tuomo Reinikka.

Sammalyksiköt

Sammalyksiköt (3 m, 5 m ja 7 m) toteutettiin purkuojastoon pienen laskeutusaltan tilavuuden jälkeen. Sammalet suosivat tyypen yhdisteistä ammoniumtyyppiä, jonka vuoksi sammalyksikkö sijoitettiin laskeutusaltan jälkeen poistamaan ja erityisesti muuttamaan mahdollinen ammoniumtyppi nitriittitypeksi. Sammalyksiköt erotettiin toisistaan vesivanerilevyillä, siten että sisäänvirtaus niihin tapahtui levyn yli (talvella mahdollisuus avata myös alemmaa reikiä) ja poisto alemman levyn reikien kautta (kuva 30). Näin voitiin varmistaa, että vesi virtaa varmasti sammalpatjan läpi. Sammalena käytettiin nevasirppisammalta *Wartornia fluitans*, joka haettiin Kallon kylän läheisyydessä sijaitsevalta luonnontilaiselta lähteeltä. Paikka sijaitsee valtion mailla ja sammalen nostoon oli Metsähallituksen lupa. Ennen rakenteeseen laittamista sammalta pidettiin muutamia päiviä vesijohtovedessä pienissä altaissa ulkona valoisissa ja viileissä olosuhteissa. Sammalta sijoitettiin tasaisesti yksiköiden pohjalle ja lähtötilanteessa sammalen peittävyys oli noin 40 %. Sammalen odotettiin lähtevän kasvuun ja valtaavan suuremman alan altaassa. Lisäksi sammalen pysymistä altaassa varmistettiin 10 mm reikäkoon kalaverkolla. Sammal on sopeutunut kylmiin olosuhteisiin (Riis ym. 2010). Sammalen sisällä elää endofyyttisenä denitrifikaatiobakteereita, joista osa kykenee myös nitrifikaatioon (Hallin ym. 2015).

Elo-syyskuussa 2019 sammalyksiköt alkoivat täyttyä lietteestä, sillä puhdistamon jälkiselkeytysallas oli liian täynnä. Lokakuun 2019 alussa niistä kerättiin kaikki mahdollinen sammal talteen ja yksiköt sekä puhdistamon jälkiselkeytysallas tyhjennettiin lietteestä. Sammalen peittävyys oli tällöin 24 % altaan pinta-alasta. Talteen saatu sammal asetettiin takaisin jälkimmäiseen 7 m sammalyksikköön lokakuun loppupuolella. Kaksi ensimmäistä sammalyksikköä jäivät tämän jälkeen laskeutusaltaan tilavuudeksi. Sammalyksikköön (7 m) toteutettiin kesäkuussa 2020 neljä ohjauslevyä hidastamaan veden virtausta ja siten tehostamaan kontaktia (kuva 30).



Kuva 30. Vasemmanpuoleisessa kuvassa sammalyksiköiden väliset vesivaneripatorakenteet nähtävissä ennen jäteveden johtamista ojastoon. Oikeanpuoleisessa kuvassa 7 m sammalyksikkö kesäkuussa 2020, kun siihen oli asennettu ohjauslevyt. Kuvat: Heini Postila ja Tuomo Reinikka.

Sienihakeyksikkö

Sienihakeyksikössä ojaan asennettiin neljässä juuttisäkissä (kukin noin 20–30 kg tuorepainona) puuhaketta, johon oli ympätty osterivinokasta. Kesän 2019 käyttökokemusten perusteella juuttisäkki on rakenteena liian tiivis, jolloin vesi kiertää sen (kuva 31) ja lisäksi säkkimateriaali alkaa hajoamaan. Tästä syystä lokakuun 2019 loppupuolella sienihake asetettiin katiskoissa takaisin ojastoon. Puuhakkeeseen ympätty sieni ottaa typpeä ja muita ravinteita elintoimintoihinsa samalla, kun se lahottaa haketta ja käyttää sitä hiilen (ja myös ravinteiden) lähteenään. Sienihake voi myös toimia kasvualustana denitrifikaatiobakteereille ja denitrifikaation kykeneville mikrosienille. Keväällä 2020 sienihakemateriaali vaihdettiin uuteen.



Kuva 31. Sienihake juuttisäkeissä elokuussa 2019 ja katiskoissa heinäkuussa 2020. Kuvat: Heini Postila ja Piippa Wäli.

Bioreaktorit

Sienihakeyksikön jälkeen purkuojastoon rakennettiin kaksi denitrifioivaa bioreaktoria (kuva 32), jotka voivat muuttaa nitraattityyppien tyypikaasuksi. Denitrifioivat mikro-organismit tarvitsevat hiilenlähteen, kuten puuhakkeen denitrifikaatioon. Prosessi tarvitsee hapettomat olosuhteet ja toimii parhaiten, jos veden pH on suurin piirtein neutraali. Bioreaktori eristetään mahdollisimman hyvin, jotta lämpötilat saadaan pysymään enemmän plussan puolella.

Molempien bioreaktoreiden tilavuus on noin 2 m³ ja puuhakepatjan korkeus 31–35 cm. Bioreaktorit erotettiin pohjalta ja sivuilta maaperästä 1,5 mm HDPE-kalvolla, ja kalvoa rikkoutumisilta suojaamaan käytettiin hienoa hiekkaa ja N3-suodatinkangasta. Bioreaktoreista etelänpuoleiseen asetettiin koivupuuhaketta (palakoko noin 3 × 1,5 × 0,4 cm). Pohjoisenpuoleiseen asetettiin pääasiassa samaa puuhaketta, mutta lisäksi 13 kg perunankuorimateriaalia, koska sen on havaittu laboratoriotesteissä tehostavan denitrifikaation käynnistymistä (Kiani ym. 2020). Bioreaktoreiden väliin asetettiin kaksi 110 mm ohitusputkea, jota pitkin osa vedestä menee suoraan alapuoliseen purkuojastoon. Ohitusputkien kohdalla oli v-mittapadot. Bioreaktoreihin menevät säätöventtiililliset putket on sijoitettu siten, että niiden keskiosa on 2 cm v-mittapadon 0-kohdan alapuolella. Vedenjako tapahtuu kivipesään asetettujen rei'itettyjen putkien (ulkohalkaisija 32 mm) kautta. Reikien halkaisija suurennettiin 2019 elokuussa 6 mm:iin aiemmasta 4 mm:stä. Näitä jakoputkia jouduttiin välillä avaamaan puhdistamolta ojaan kertyneen lietteen tukittua niitä. Bioreaktoreihin asetettiin tarkkailuputket, joista voi ottaa hakenäytteet tai tarkkailla veden laatua. Bioreaktoreiden jälkeen rakennettiin v-mittapadolliset kaivot. Bioreaktoreiden tavoitevirtaamaksi oli asetettu noin 1 m³/d/bioreaktori.



Kuva 32. Vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy koko bioreaktorirakenne suojattuna kesällä 2020, keskimmaisessä bioreaktori tekovaiheessa ja oikealla bioreaktorin alkupään rei'itetty vedenjakoputki. Kuvat: Piippa Wäli, Anne Korhonen ja Heini Postila.

4.2.3 Seuranta

Koekohteella toteutettiin jatkuvatoimista vedenpinnankorkeuden ja sähkönjohtavuuden seuranta kolmelta v-mittapadolliselta kaivolta, joista ensimmäinen sijaitsi heti purkuputken suussa ja kaksi muuta bioreaktoreiden jälkeen (kuva 28). Lisäksi jatkuvatoimista seuranta suoritettiin denitrifioivia

bioreaktoreja ennen, eli niiden ohitusputkien v-mittapatojen kohdilla. Näissä mittareissa on myös lämpötilaloggeri. Lisäksi HOBOn lämpötilaloggereita oli sammalyksiköiden välisissä patolevyissä ja molemmassa bioreaktorissa. Vesinäytteenottopisteitä olivat laitoksen sisällä biomattoaltaasta ilmastettuihin leijupetibioreaktoreihin tuleva ja niistä lähtevä vesi, sekä purkuojastossa ennen ja jälkeen eri yksiköitä (kuva 28, taulukko 5). Kenttämittareilla mitattiin pH, sähkönjohtavuus, happi ja redox-potentiaali yksikköjen välistä ja myös niiden sisällä olevista tarkkailupisteistä. Vedenlaadun seuranta toteutettiin pilottialueella ajalla 24.6.2018–17.9.2020 (liitteet 37–50).

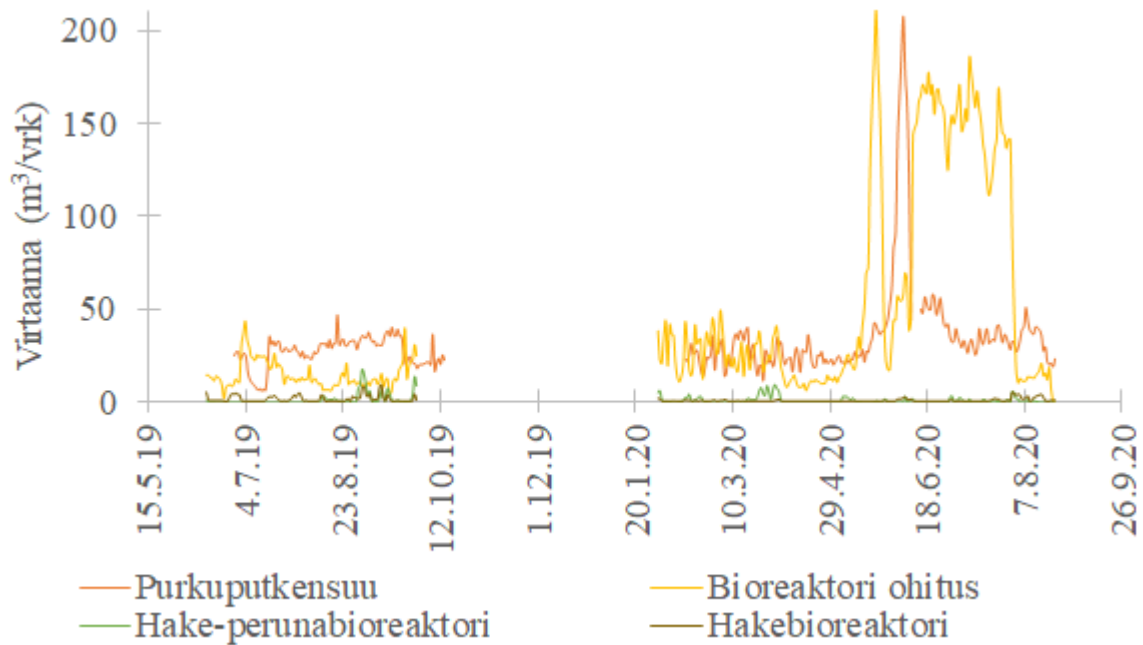
Taulukko 5. Kallon pilottirakenteen näytteenottopisteet.

Näytteenottopiste	Määritelmä
Biomatto	Biomattoaltaasta ilmastettuun leijupetibioreaktoriin otettava vesi
Nitrifikaatio	Ilmastetusta leijupetibioreaktorista lähtevä vesi
Purkuputki	Puhdistamolta tulevasta purkuputkesta ojaan purkautuva vesi
Sammal 1	Sammalyksikön 1 jälkeinen vesi (purkuputken suun ja yksikön välissä on ollut myös pieni laskeutusallastila)
Sammal 2/Sammal YP	Sammalyksikön 2 (muuttui syksystä 2019 alkaen laskeutusaltaaksi) jälkeinen vesi
Sammal 3	Sammalyksikön 3 jälkeinen vesi
Sieni	Sienihakeyksikön jälkeinen vesi
Bioreaktori 1	Koivupuuhake-perunankuorijäte bioreaktorista tullutta vettä
Bioreaktori 2	Koivupuuhake bioreaktorista tullutta vettä

4.2.4 Tulokset

Virtaama ja viipymä

Kallon jätevedenpuhdistamolalta purkuputkensuusta mitattu vuorokausivirtaaman keskiarvo oli noin 28 m³/vrk kesäkuun 2019 - elokuun 2020 välisenä mittausaikana. Hakebioreaktorissa virtaaman keskiarvo oli 0,8 m³/vrk ja hake-perunabioreaktorissa 1,1 m³/vrk. Elokuussa 2019 toteutetun merkkiainekokeen perusteella hake-perunabioreaktorin keskimääräinen veden viipymä oli noin 7,5 tuntia, kun keskimääräinen virtaama (2,2 m³/vrk) oli keskimääräistä vuorokausivirtaamaa puolet korkeampi. Hakebioreaktorista vedentulo loppui melko pian merkkiaineen syötön jälkeen, joten siitä ei saatu tulosta. Loppukevällä/alkukesästä 2020 näkyy tulvien aiheuttama virtaamapiikki ensin bioreaktoreiden ohitusputken mittauksissa (kuva 33). Tämä selittyy ojaan kertyneestä korkeasta vedenpinnasta. Seuraava piikki näkyy purkuputken suun mittauksissa, mikä kertonee jätevesiverkoston valuma-alueelta puhdistamolle tulleesta lisääntyneestä vesimäärästä. Tämän jälkeen bioreaktorin ohitusputken mittauspisteessä virtaama-arvo jää korkealle (pinnankorkeus noin 3 cm korkeampi, kuin esim. elokuussa) ja tälle ei ole selkeää selitystä.



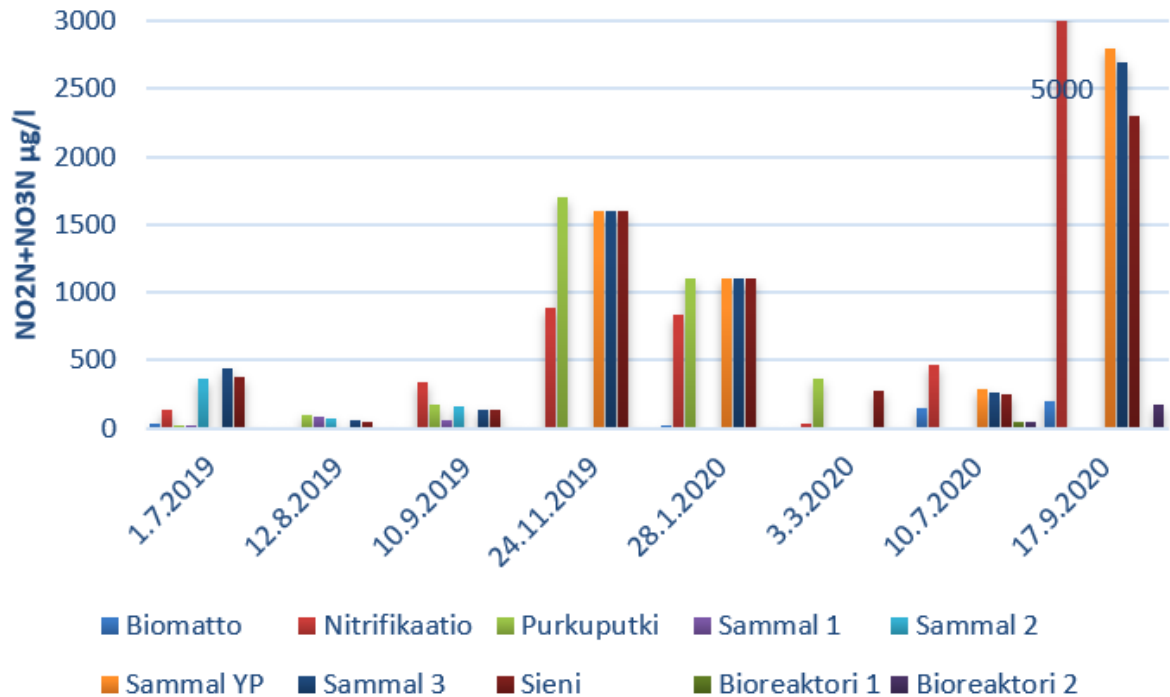
Kuva 33. Kallon jätevedenpuhdistamon pilottirakenteen virtaamat.

Vedenlaatu

Nitriitti-nitraattitypen pitoisuuksien $\mu\text{g/l}$ vaihtelu eri rakenteissa esitetään taulukossa 6 ja kuvassa 34. Nitriitti-nitraattitypen määrä saatiin ilmastetussa leijupetibioreaktorissa lisääntymään keskiarvona hieman vajaan 1 mg/l . Vasta syyskuussa 2020, kun elokuun 2020 lopussa oli poistettu biomattoaltaasta kaikki sinne vuosien varrella kertynyt ylijäämäliete, pitoisuus saatiin nostettua 5 mg/l . $\text{BOD}_7(\text{ATU})$ -pitoisuus biomattoaltaassa ennen puhdistusta oli kolmen näytteen perusteella keskimäärin 74 mg/l . Kun ilmastetun leijupetibioreaktorin jälkimmäisestä säiliöstä mitattiin keväällä 2020 happi kahdella kertaa, arvot olivat 3,7 ja 7,4 $\text{mg O}_2/\text{l}$. Vastaavasti kolmella kesäkuun 2020 mittauskerralla sen jälkeen, kun säiliöihin oli asetettu myös toinen ilmakivi ja ilmastuspumppu, pitoisuus oli 10,8–11,3 $\text{mg O}_2/\text{l}$. Purkuojustoon tulevan purkupuutken nitriitti-nitraattityypipitoisuus vaihteli välillä 2,5–1700 $\mu\text{g/l}$. Sieniyksikön puhdistusteho oli keskimäärin 10 %. Bioreaktori 1:n nitriitti-nitraattitypen puhdistusteho oli keskimäärin 96 % ja bioreaktori 2:n keskimäärin 95 % eli bioreaktoreissa denitrifikaatioprosessilla saatiin poistettua lähes kokonaan se typpi, mikä oli saatu sitä ennen muutettua nitraattitypeksi.

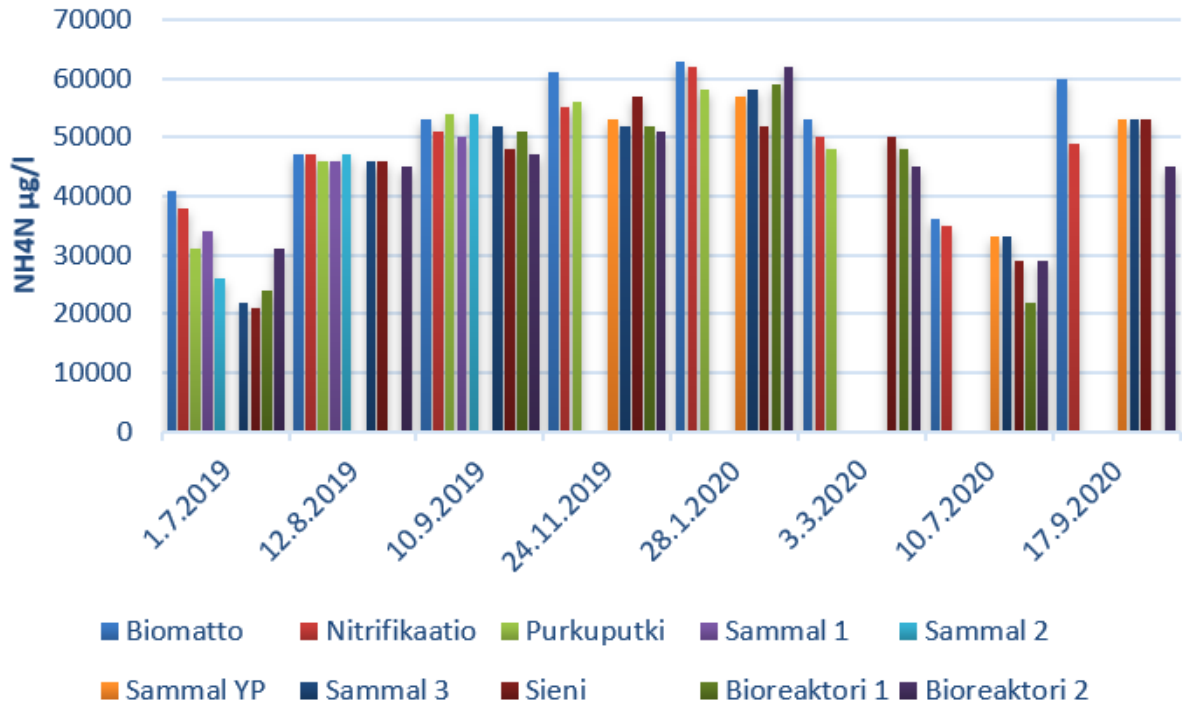
Taulukko 6. Nitriitti-nitraatti tyypin pitoisuuksien vaihtelu $\mu\text{g/l}$ Kallon pilottirakenteessa.

Kallo	Min	Max	Keskiarvo	n
Biomatto	< 5	200	53	8
Nitrifikaatio	< 5	5000	959,8	8
Purkupuutki	20	1700	573	6
Sammal 1	19	79	50,3	3
Sammal 2	68	360	196	3
Sammal YP	290	2800	1447,5	4
Sammal 3	53	2700	899	7
Sieni	46	2300	759,5	8
Bioreaktori 1	< 5	50	10,4	6
Bioreaktori 2	< 5	170	30,6	8



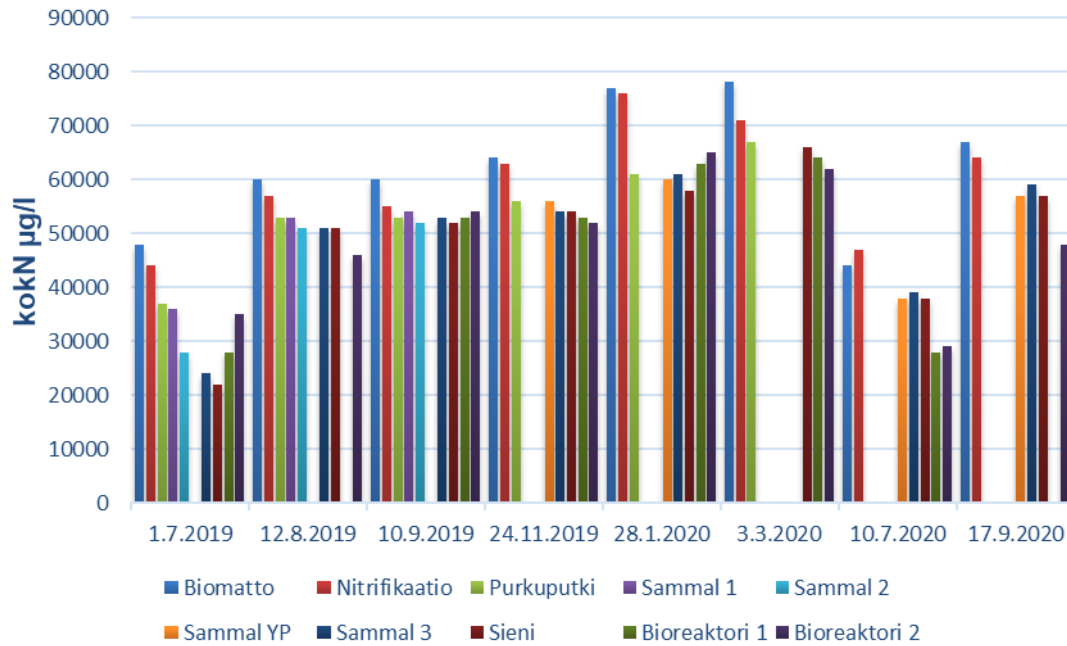
Kuva 34. Nitriitti-nitraattityypen pitoisuuden ($\text{NO}_2\text{N}+\text{NO}_3\text{N}$) vaihtelu Kallon pilottirakenteessa.

Purkuojastoon tulevan purkupuutken ammoniumtyyppipitoisuus vaihteli välillä 31000–58000 $\mu\text{g/l}$. Purkupuutkea ennen sijaitsevaan ilmastettuun leijupetibioreaktoriin tulevan veden ammoniumtyyppipitoisuus vaihteli välillä 31000–63000 $\mu\text{g/l}$ ja yksikön puhdistusteho oli keskimäärin noin 7 %. Sammalyksiköiden yhteenlaskettu puhdistusteho oli ammoniumtyypelle keskimäärin 6 % ja sieniyksikön puhdistusteho keskimäärin 3 % (kuva 35). Denitrifioivat bioreaktorit eivät puhdistaneet ammoniumtyyppiä, sillä bioreaktoreissa hapettomissa oloissa nimenomaan nitraattityppi voi poistua denitrifikaatiolla.



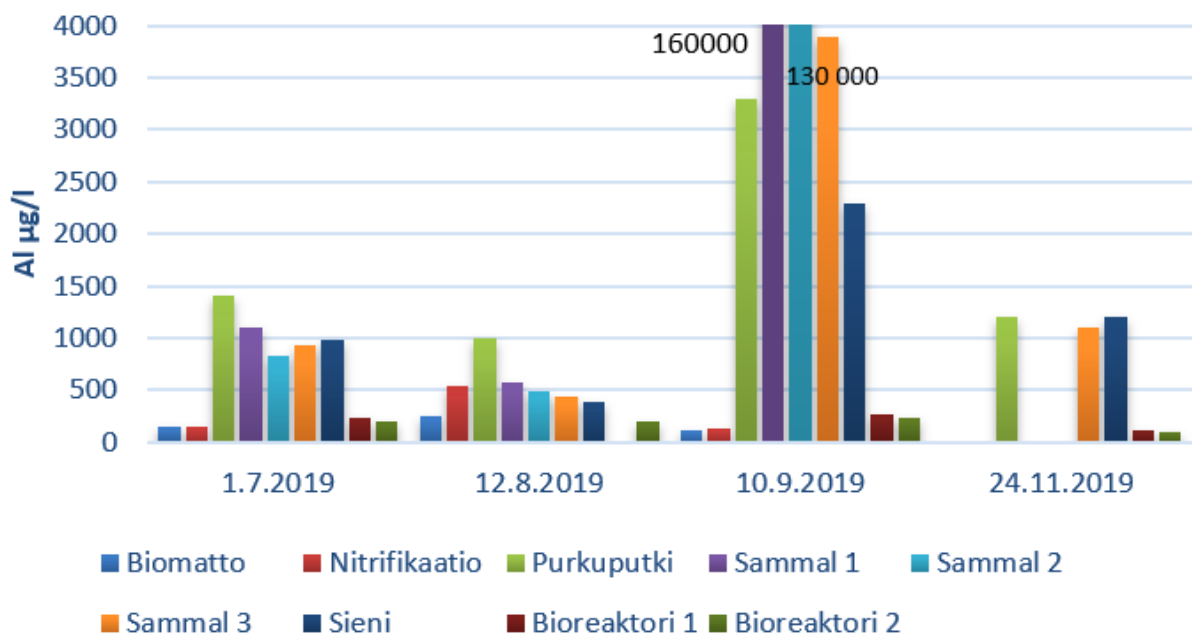
Kuva 35. Ammoniumtyyppipitoisuuden (NH₄N) vaihtelu Kallon pilottirakenteessa.

Kokonaistyyppipitoisuus vaihteli purkuojastossa sijaitsevassa pilottirakenteeseen tulevassa purkuputkessa välillä 37000–67000 µg/l. Purkuputkea ennen tyypin pitoisuutta tarkkailtiin ilmastetun leijupetibioreaktorin jälkeen, jossa kokonaistypen poistoteho oli keskimäärin noin 4 %. Tällä yksiköllä ei tavoiteltu kokonaistypen poistumaa, vaan nitrifikaatioprosessia eli ammoniumtyypin muuttumista nitraattitypeksi. Sammalyksikköjen ja niitä edeltävän laskeutusaltaan tilavuuden yhteenlaskettu puhdistusteho oli kokonaistypelle keskimäärin 8 % ja sieniyksikön puhdistusteho keskimäärin 3 % (kuva 36). Bioreaktori 1:n kokonaistypen puhdistusteho oli melkein koko seuranta-ajan negatiivinen ja keskimäärin -1 %. Tästä poiketen heinäkuussa 2020 (viimeinen näytteenottokerta kyseiseltä seurantapaikalta) bioreaktori 1:n tyypin poistoteho oli 26 %. Bioreaktori 2:ssa vuoden 2019 seurantatulosten mukaan kokonaistypen puhdistusteho oli lähinnä hieman negatiivinen. Vuonna 2020 puhdistusteho vaihteli välillä 6–23 %. Denitrifioivissa bioreaktoreissa tyypestä saatiin poistettua lähinnä nitraattimuodossa oleva tyyppi, ja koska tämä oli vain pieni osa kokonaistypestä, kokonaistypen poistumia ei saatu ennen kuin kesällä 2020, jolloin nitrifikaatioprosessi oli ollut myös toimivampi.



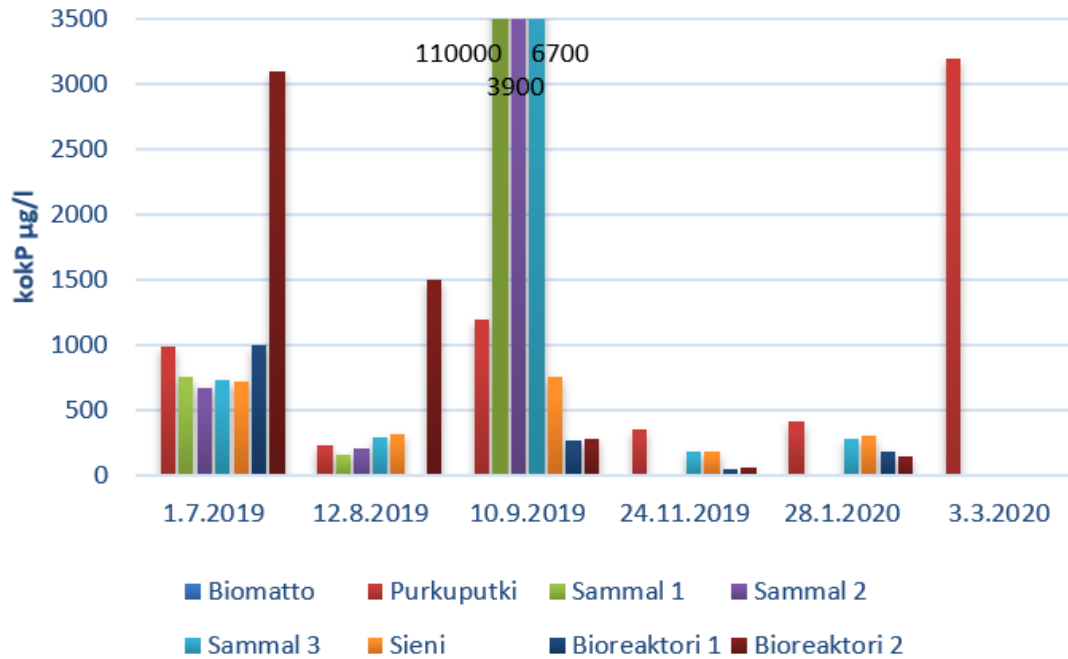
Kuva 36. Kokonaistyyppipitoisuuden (kokN) vaihtelu Kallon pilottirakenteessa.

Purkuojastoon puhdistamolta tulevan veden alumiinin pitoisuus vaihteli pilottirakenteen seuranta-aikana 1000–3300 µg/l (kuva 37). Alumiinipitoisuus johtui alumiinipohjaisesta kemikaalista, jota puhdistamolla käytetään fosforin poistoon. Purkuputken ja sammal 3-yksikön välillä alumiinin reduktio oli keskimäärin 20 %. Sammal- ja sienihakeyksikön välinen reduktio oli keskimäärin 9 %. Sienihakkeen ja bioreaktori 1:n välillä reduktio oli keskimäärin (keskiarvo) 85 % ja sienihakkeen ja bioreaktori 2:n välillä reduktio oli keskimäärin (keskiarvo) 78 %. Bioreaktoreilla on siis merkittävä vaikutus myös alumiinin pitoisuuden vähenemään.



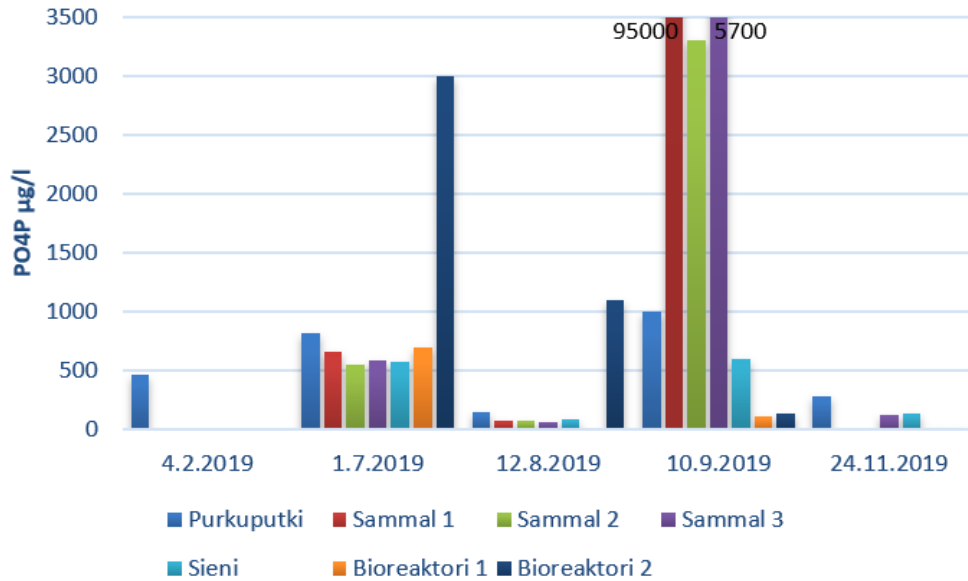
Kuva 37. Alumiinipitoisuuden (Al) vaihtelu Kallon pilottirakenteessa.

Purkupuutkesta ojastoon tulevan veden kokonaisfosforipitoisuus vaihteli välillä 230–7900 µg/l. Sammalyksikköjen yhteenlaskettu puhdistusteho oli kokonaisfosforipitoisuudelle vaihteleva välillä -458–50 % ja keskimäärin -75 % ja sieniyksikön puhdistusteho keskimäärin 15 % (vaihteluväli -10–89 %) (kuva 38). Bioreaktori 1:n kokonaisfosforin puhdistusteho oli keskimäärin 35 % ja vaihteluväli -39–75 % ja bioreaktori 2:n keskimäärin -104 % (vaihteluväli -369–68 %). Bioreaktoreissa huuhtoutumista havaittiin ensimmäisillä kerroilla käytön aloittamisen jälkeen. 10.9.2019 käyntikerralla sammalyksiköihin oli jo tullut paljon jälkiselkeytysaltaasta ylihuuhtoutunutta lietettä.



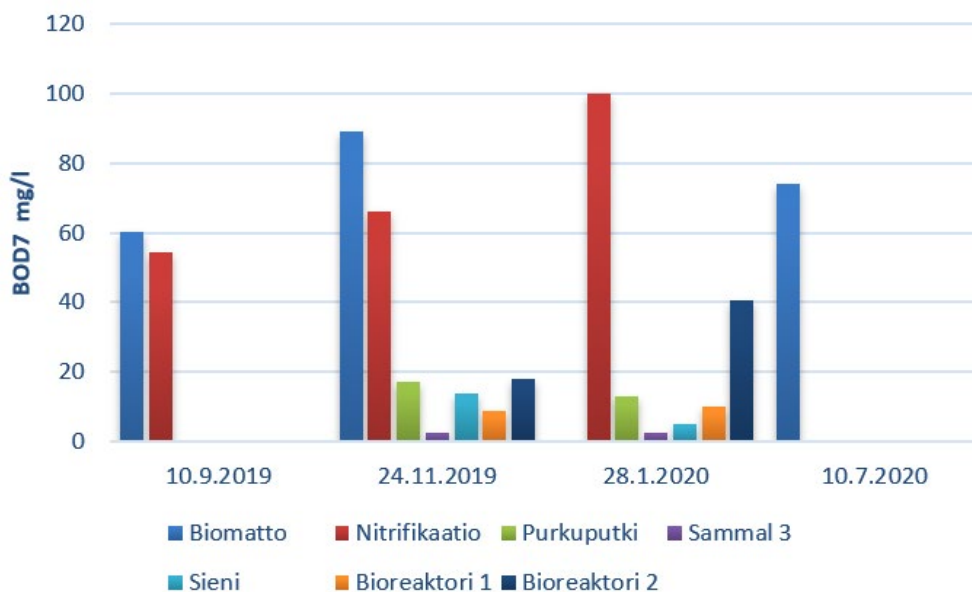
Kuva 38. Kokonaisfosforipitoisuuden (kokP) vaihtelu Kallon pilottirakenteessa.

Purkupuutken fosfaattifosforin pitoisuus vaihteli välillä 150–5600 µg/l. Laskeutusaltaiden ja sammalyksikköjen muodostaman kokonaisuuden yhteenlaskettu puhdistusteho oli fosfaattifosfori -pitoisuudelle vaihteleva välillä -470–57 % ja keskimäärin -58 % ja sieniyksikön puhdistusteho keskimäärin 10 % (vaihteluväli -22–89 %) (kuva 39). Bioreaktori 1:n kokonaisfosforin puhdistusteho oli keskimäärin 53 % (vaihteluväli -21–93 %) ja bioreaktori 2:n keskimäärin -281 % (vaihteluväli -1225–90 %). Bioreaktoreissa huuhtoutumista havaittiin ensimmäisillä kerroilla käytön aloittamisen jälkeen. 10.9.2019 käyntikerralla sammalyksiköihin oli jo tullut paljon jälkiselkeytysaltaasta ylihuuhtoutunutta lietettä.



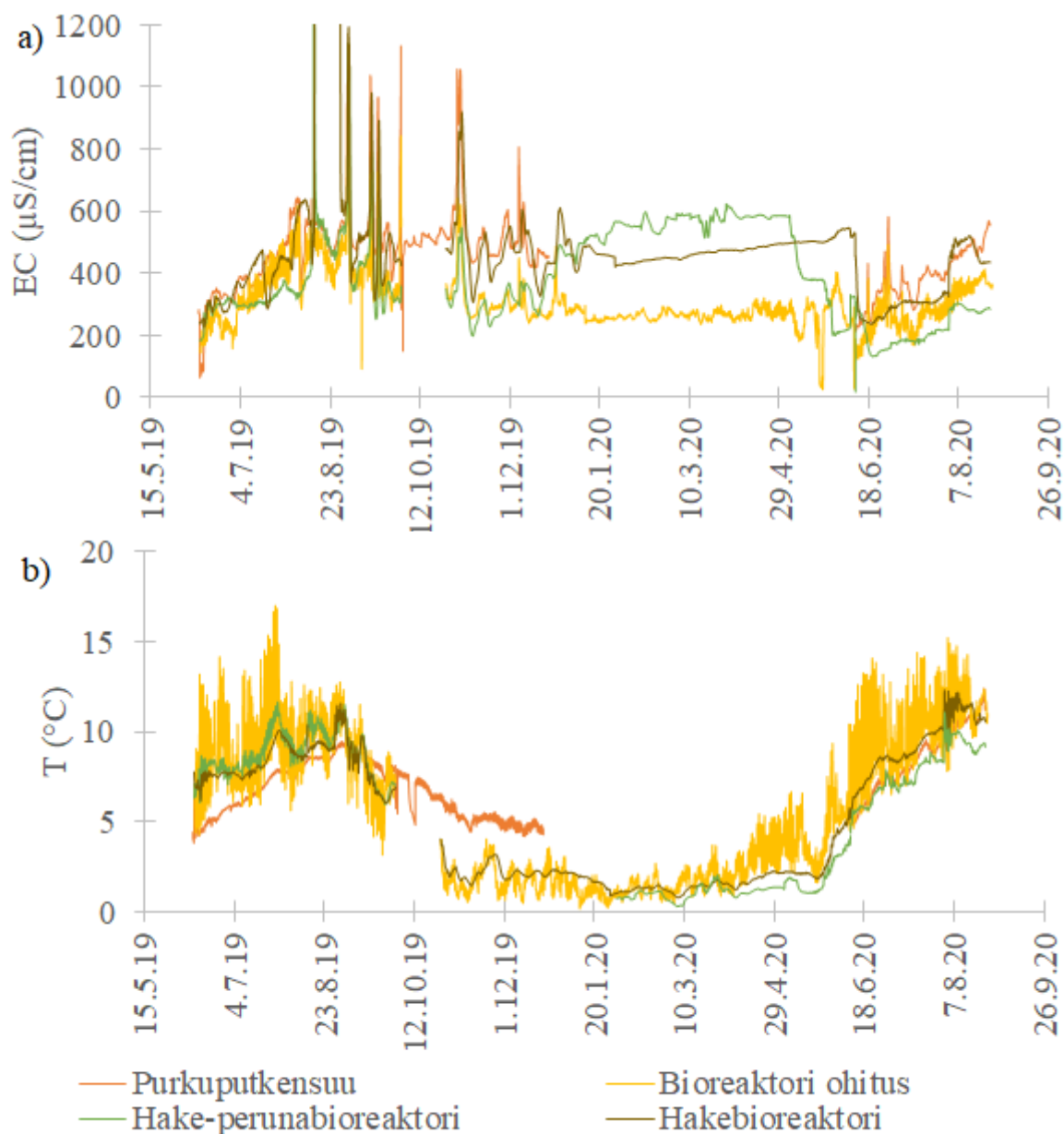
Kuva 39. Fosfaattifosforipitoisuuden (PO₄P) vaihtelu Kallon pilottirakenteessa

Purkutupken biologinen hapenkulutus BOD₇(ATU) määritettiin kahdesti ja se vaihteli välillä 13–17 mg/l. Sammalyksikköjen yhteenlaskettu puhdistusteho oli biologiselle hapenkulutukselle keskimäärin 83 % ja sammalyksiköiden jälkeen biologinen hapenkulutus oli molemmilla määrityskerroilla alle määritysrajan. Biologisen hapenkulutuksen pitoisuus nousi jälleen sieniyksikön jälkeen tasolle 14 ja 5,2 mg/l (kuva 40). Bioreaktoreissa BOD pitoisuus kasvaa bioreaktori 1:n ensimmäistä mittausta lukuun ottamatta.



Kuva 40. Biologisen hapenkulutuksen (BOD₇) vaihtelu Kallon pilottirakenteessa.

Sähkönjohtavuuksien suhteen ojassa tapahtuu hieman laimenemista, kun verrataan purkutupkensuun ja bioreaktorin ohituksen välisiä arvoja (kuva 41a). Lämpötiloista näkyy, että veden lämpötila säilyy kaikissa yksiköissä plussan puolella. Ojaveden lämpötiloissa (bioreaktori ohitus), näkyy selkeästi vuorokauden sisäinen vaihtelu erityisesti kesäaikaan (kuva 41b). Bioreaktorien sisällä olevissa tarkkailuputkissa veden lämpötila oli talvella noin 2 °C ja kesällä korkeimmillaan 10–12 °C tienoilla (liite 51). Sammalyksiköissä talven lämpötilat olivat pääsääntöisesti 2–4 °C ja kesällä maksimissaan noin 12 °C.



Kuva 41. Kallon jätevedenpuhdistamon pilottirakenteen a) sähkönjohtavuudet ja b) lämpötilat mittauspisteissä.

4.2.5 Johtopäätökset Kallon pilottirakenteen toiminnasta

Kallon pilottirakenteessa se osa tuestä, joka saatiin muuttumaan ammoniumtuestä nitriitti-nitraattitypeksi ennen denitrifioivia bioreaktoreja (koivupuuhake-perunankuorijäte ja koivupuuhake), saatiin myös poistumaan. Koivupuuhake-perunankuoribiojäte bioreaktorissa ei havaittu aiemmin (Kiani ym. 2020) todettua nopeampaa denitrifikaation käynnistymistä, mikä voinee johtua mm. pienistä nitriitti-nitraattityypen pitoisuuksista. Haasteeksi nitrifikaation käynnistämiseksi osoittautui biomattoaltaasta tulevan veden erittäin korkea BOD-pitoisuus. Kun biomattoaltaasta saatiin poistettua elokuun 2020 lopussa sinne vuosien varrella kertynyt ylimääräinen liete, ja kun kesäkuussa 2020 oli bioreaktoreiden ilmastusta lisätty, saatiin nitrifikaatiota lisättyä niin, että noin 8 % ilmastetusta leijupetibioreaktorista lähtevästä kokonaistuestä oli nitriitti-nitraattityppimuodossa. Haasteita aiheutti myös jälkiselkeytysaltaiden lietteiden tulviminen purkuojustoon, mistä syystä sen yksiköitä jouduttiin puhdistamaan ja sammalyksiköistä ainoastaan

viimeinen voitiin jättää toimimaan, jotta sitä ennen on laskeutustilaa enemmän. Lisälaskeutustilan muodostaminen onkin suositeltavaa, ja toki olemassa olevien altaiden lietteen tarpeeksi tiheä tyhjentäminen. Typenpoistoon suunniteltu purkuojaston puhdistusrakenne pidatti myös puhdistamon kemikaloinnista veteen jäänyttä alumiinia.

4.3 Levin huleveden purkuputken suu

4.3.1 Lähtötilanne

Levillä hybridipilottirakenne suunniteltiin huleveden purkuojastoon, ja sen oli tarkoitus olla vain sulan maan aikana toimiva. Levin Vesihuolto Oy:n mukaan kyseiselle alueelle tulee vesiä yhteensä 24,1 ha valuma-alueelta Levin keskustasta. Suunnitellussa tavoiteltiin mahdollisimman hyvin maastoon mukautuvaa rakennetta. Purkuojaston kaunis alkupää (kuva 42) jätettiin luonnontilaan. Tällöin myös rakenteiden padotuskorkeudet jäivät selvästi purkuputken suun alapuolelle, jolloin ne eivät missään tilanteessa voi aiheuttaa padotusta purkuputkistoon. Jotta saatiin alustavaa tietoa purkuputken suun vedenlaadusta, siitä otettiin vesinäytteitä vuonna 2018 ja toukokuun 2019 alussa analysoitavaksi laboratorioon yhteensä 7 kertaa.

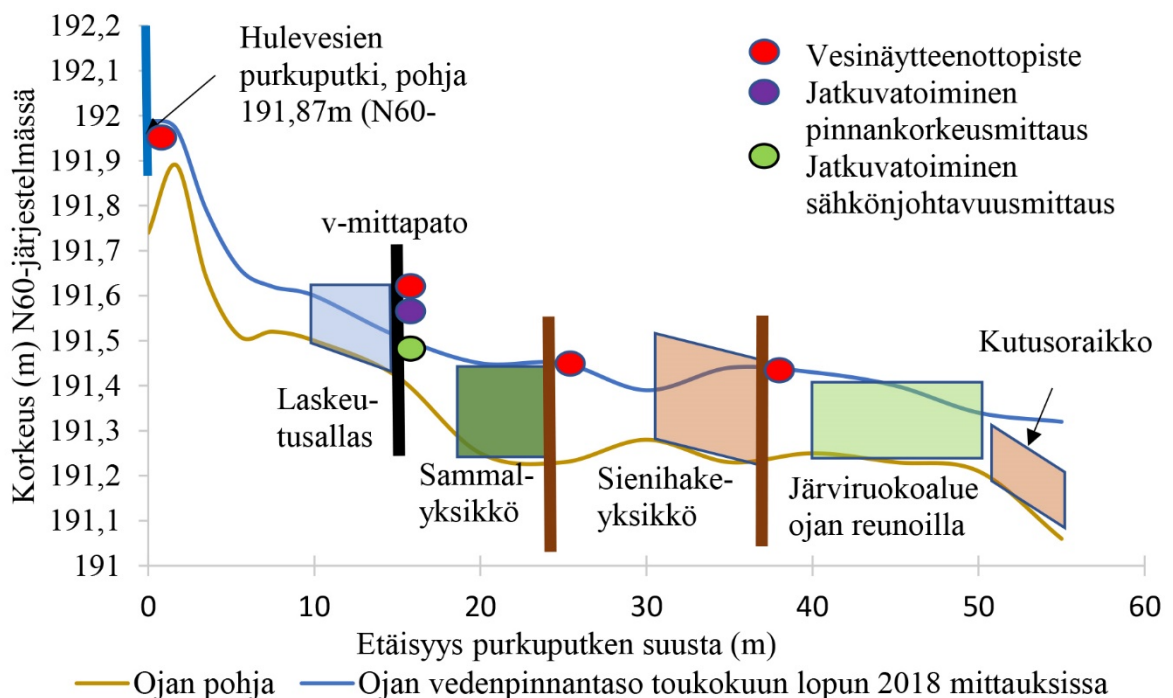
Tulevassa vedessä havaittiin näytteiden perusteella keskimäärin (keskiarvo) 5,7 mg/l kiintoainepitoisuuksia, joten suunnitellun hybridipilottirakenteen tavoitteeksi asetettiin lisätä hieman kiintoaineen pidätystä. Kiintoaineen raekokojakaumasta ei kuitenkaan ollut suunnitteluvaiheessa tietoa, mutta pienen kiven ja karkean hiekan kerrostumista ojan pohjalle oli nähtävissä. Suodatettujen näytteiden (<0,45 µm) metallipitoisuuksia pitoisuuksia voidaan verrata koko Suomen kattavaan purovesiaineistoon (Tenhola & Tarvainen 2008), jonka perusteella nikkelpitoisuus (mediaani 0,6 (tai keskiarvo 0,7 µg/l)) oli samalla tasolla, mutta kuparipitoisuus (mediaani 1,5 (tai keskiarvo 2,6 µg/l)) ja sinkkipitoisuus (mediaani 12 (tai keskiarvo 27 µg/l)), olivat koholla. Laajemmin tarkasteltaessa hulevesien metallipitoisuuksia erilaisista vesistä, liikekeskuksista, asuinalueilta, teiltä yms., on havaittu vaihteluväli, jonka sisällä tutkittujen metallien pitoisuuden kokonaisarvot (keskiarvot Ni=1,3 µg/l, Cu=3,7 µg/l, Zn=21,5 µg/l) olivat, eli ne ovat siltä osin hulevedelle potentiaalisia pitoisuuksia (Søberg 2014). Myös typen pitoisuudet (keskiarvo 0,82 mg/l) olivat samansuuntaisia hulevedessä kaupunkialueilla aiemmin havaittuihin pitoisuuksiin (Airola 2014). Typpi oli pääasiassa nitraattityppimuodossa. Tavoitteena suunnitellulla hybridipilottirakenteella olikin vähentää metallien (Ni, Cu ja Zn) ja typen pitoisuuksia.



Kuva 42. Levin hulevesien purkuputken suu ja sitä seuraava ojasto toukokuun 2018 lopussa. Paikalla kasvoi esimerkiksi hieskoivua (*Betula pubescens*), kiiltopajua (*Salix phylicifolia*) ja väinönputkea (*Angelica archangelica*) sekä lukuisia vesisammalia. Kuva: Heini Postila.

4.3.2 Toteutettu rakenne

Alkukesästä 2019 rakennettiin pilottivesienkäsittelyrakenne vesivanerista tehtyjen pato/tukilevyjen avulla suoraan ojastoon (kuva 43). Rakenne koostui laskeutusaltaasta, sammalyksiköstä, sienihakeyksiköistä, ja järviruokakasvustosta, jota oli ojan reunoilla. Koska ojassa oli havaittu pieniä kaloja, sinne toteutettiin Kittilän kunnan toiveesta pieni kutusoraikko, jolla ei kuitenkaan ole vedenpuhdistuksellisia tavoitteita. Rakennusvaiheista on tehty diaesitys (Suomen ympäristökeskus 2019).



Kuva 43. Levin hulevesien purkuojastoon alkukesästä 2019 toteutettu pilottirakenne.

Laskeutusallas

Laskeutusaltaan mitoituksessa käytettiin laskennallista keskimääräistä vuorokausivirtaamaa, joka arvioitiin alueen pinta-alan, Ilmatieteenlaitoksen tilastoista saadun Kittilän alueen 1981–2010 kuukausittaisen keskimääräisen sadannan, 35 % vuotuisen haihdunnan, josta 82 % touko-lokakuussa (oletus), mukaan. Tällöin keskimääräiseksi hulevesimääräksi saatiin noin 236 m³/vrk. Koska mukana on todennäköisesti myös pohjavesiä, ojaan purkautuvana keskimääräisenä vesimääränä käytettiin laskelmissa 280 m³/vrk. Suunnitellun pienen laskeutusaltaan kohdalla oli valmiiksi tasaisempi alue, johon oli laskeutunut karkeaa hiekkaa ja pientä kiveä. Padotuksella ja osittaisella pienellä leventämisellä/pohjaan jo kertyneen hiekan ainakin osittaisella poistamiselle tilavuuden kasvattamisen kautta voitaisiin saada viipymää pidennettyä ja tehostettua laskeutumista. Suunnitellun laskeutusaltaan vesitilavuus oli noin 1000 l. Laskeutusaltaan pituus oli noin 5 m ja leveys keskimäärin 1 m ja korkeus noin 20 cm. 1000 l altaan viipymä olisi keskimääräisellä virtaamalla 5 min. Tämä riittää laskeuttamaan yli 0,1 mm kokoisia ja sitä vähän pienempiä mineraalimaapartikkeleita, mutta ei enää 0,01 mm kokoisia mineraalimaapartikkeleita. Käytännössä siis pystytään laskeuttamaan hienoa hiekkaa ja sitä karkeampia maalajeja. Toki tulvatilanteissa nämä voivat taas lähteä huutoutumaan alavirtaan.

Toteutetussa laskeutusaltaassa (kuva 44) alapuolisena patorakenteena käytettiin v-mittapatoa, jonka 0-kohta on 16,2 cm patolevyn yläosasta alaspäin. Tällä kohdalla v-mittapadon 0 kohdasta on 22 cm ojan pohjaan, joten vesisyvyys on vähintäänkin sen verran vedenpinnantason ollessa matalimmillaan ja tällöin laskeutusaltaan padosta kauimmaisessa päässä vesisyvyys on keskimäärin 7 cm. Altaan keskimääräinen leveys on noin 115 cm.



Kuva 44. Laskeutusallas syyskuussa 2019. Kuva. Anne Korhonen

Sammalyksikkö

Sammalena käytettiin nevasirppisammalta *Warnstorfia fluitans*, jota oli haettu Kallon kylän läheisyydessä sijaitsevalta luonnontilaiselta lähteeltä. Paikka sijaitsee valtion mailla ja sammalen nostoon oli Metsähallituksen lupa. Sammalta asetettiin yksikköön niin, että se peitti noin 40 % pohjasta. Sammalyksikköön, jonka kokonaispituus oli 3,9 m ja keskileveys noin 1,25 m, asetettiin alapuolelle selvästi ojan ulkopuolelle asti ulottuva patolevy 21 mm vesivanerista. Patolevyssä alempi osa oli 20 cm korkea ja ylempi 15 cm korkea, ja niiden välissä oli 5 cm rako. Rako, samoin kuin koko sammalyksikkö, peitettiin 10 mm reikäkoon kalaverkolla, ettei sammal pääse karkaamaan (kuva 45). Lisäksi yksikkö jaettiin neljään osaan

väliverkoilla, sillä asennusvaiheessa huomattiin, että virta on niin voimakas, että kaikki sammal pyrkii pakkautumaan alavirtaan. Sammal on sopeutunut kylmiin olosuhteisiin ja sitoo tehokkaasti raskasmetalleja omaan biomassaansa (ks. taulukko 3; Pyhäsalmen nevasirppisammalen metallipitoisuudet; Sandhi ym. 2018). Sammalen sisällä elää myös endofyyttisenä denitrifikaatiobakteereita, joista osa kykenee myös nitrifikaatioon (Hallin ym. 2015).



Kuva 45. Sammalyksikkö verkotettuna. Kuva: Heini Postila.

Sienihakeyksikkö

Sienihakeyksikössä ojaan asennettiin neljässä juuttisäkissä puuhaketta, johon oli ympätty osterivinokasta. Sienihakkeen määrä oli noin 20–30 kg/säkki. Sienihakesäkkien alapuolelle asetettiin 21 mm vesivanerista patolevy, jonka molemmat osat olivat noin 15 cm ja niiden välissä oli 5 cm rako. Kesän 2019 käyttökemusten perusteella juuttisäkki on rakenteena liian tiivis, jolloin vesi kiertää sen ja lisäksi säkkimateriaali alkaa hajoamaan. Tästä syystä lokakuussa 2019 sienihake asetettiin verkkokatiskoissa takaisin ojastoon. Sienihakkeen typenpuhdistus perustuu siihen, että se voi toimia kasvualustana denitrifikaatiobakteereille ja denitrifikaatioon kykeneville mikrosienille. Sienet voivat poistaa käsiteltävästä vedestä metalleja aktiivisesti ottamalla niitä rihmastoonsa ja passiivisesti, kun metalleja kertyy sienihakkeeseen.

Järviruokoalue ja kutusoraikko

Järviruokoistutus (kuva 46) toteutettiin ojan reuna-alueille noin 8,5 m matkalle, jolloin se voi puhdistaa haitta-aineita vedestä erityisesti vedenpinnan noustessa esim. tulvien seurauksena laajemmalle alueelle. Järviruoko sitoo tehokkaasti itseensä haitta-aineita (mm. raskasmetalleja) ja juurakossa elävät levät sitovat ravinteita. Järviruoko on sopeutunut pohjoisiin ja vaihteleviin olosuhteisiin ja sietää häiriötä. Se voi olla kuitenkin herkkä jäätymiselle, mistä syystä istutukset toteutettiin ojan reuna-alueille. Järviruoko tuottaa paljon biomassaa ja lähtee hyvin kasvamaan. Järviruokoa esiintyy myös Kittilän Lapissa, ja sillä on vahva juuristo, jolla se hapettaa pohjasedimenttejä. Lupa kasvimateriaalin nostoon haettiin maanomistajalta.

Kutusoraikkoon (kuva 46) rakennettiin 4,9 m pitkä 2–4 mm halkaisijan pyöreiden kivien osa ja sen jälkeen 0,4 m alavirtaan päin isojen kivien osuus, joka ehkäisee myös pienempiä kiviä karkaamasta. Lisäksi joitakin isompia ja pienempiä kiviä lisättiin uoman monimuotoisuuden kasvattamiseksi. Kutusoraikko päättyy lähelle alapuolisen pyörätien reunaan. Ojaa syvennettiin ennen kivien laittamista niin, että

sen vesisyvyys oli 30–35 cm, ja kiviä asetettiin noin 20 cm syvyydeltä. Kivet haettiin käsin poimimalla Jolhikon soranottopaikalta.

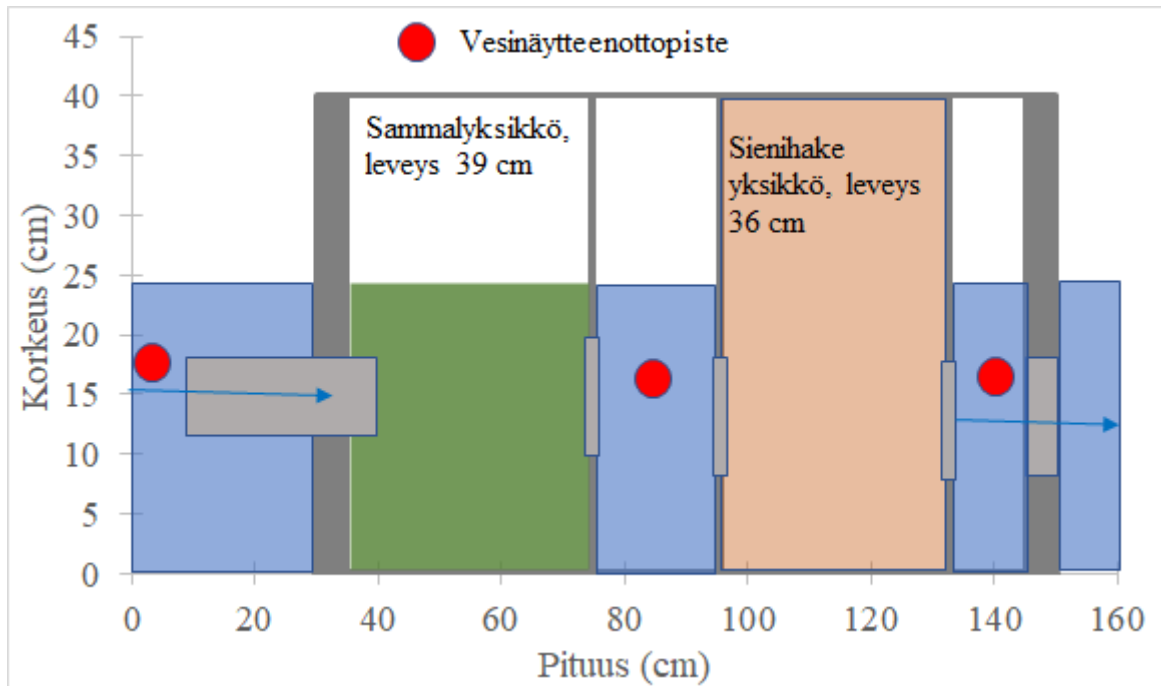


Kuva 46. Vasemmanpuoleisessa kuvassa järviruokoistutus, jossa järviruokojuurakkoja nuolella merkittynä ja oikeanpuoleisessa kuvassa ojaan kutusoraikoksi asetettua kivimateriaalia. Kuvat: Anna Liisa Ruotsalainen ja Heini Postila.

Toteutetut rakennemuutokset kesällä 2020

Kesän 2019 seurantojen perusteella jouduttiin toteamaan, että virtausnopeus ojassa oli liian iso, jotta sammal- tai sienihakeyksikössä ehtisi mitään puhdistusprosesseja tapahtumaan. Lisäksi sammalet verkkorakenteesta huolimatta pyrkivät karkaamaan ison virtauksen mukana. Kesällä 2020 päädyttiin toteuttamaan rakenne, johon otettaisiin vain osa virtaamasta virtausnopeuden hidastamiseksi ja puhdistusprosessien tarvitseman viipymän lisäämiseksi. Uusi rakennelma toteutettiin valmiiseen ojaan sijoitettavaan laatikkorakenteeseen.

Alkukesästä 2020 toteutetussa Levin laatikkorakenteessa käytettiin ulkomitoiltaan 40x45x120 cm puuarkkua, johon oli rakennettu erilliset osat sammalelle, sienihakkeelle ja vesinäytteenotolle (kuvat 47 ja 48). Sisäänmenoputken sisähalkaisija oli 6,9 cm ja siinä oli venttiili, jolla virtauspinta-alaa voidaan vielä pienentää. Venttiili asetettiin niin, että aukosta noin 1/3 oli auki. Sisäänmenoputken ja venttiilin avulla voidaan vaikuttaa laatikkoon virtaavaan vesimäärään, ja siten pienentää virtausnopeutta ja lisätä viipymää. Virtaama- tai virtausnopeusmittauksia laatikossa ei kuitenkaan tehty. Laatikon etureuna on 165 cm laskeutusaltaan v-padon vesivanerilevystä alavirtaan, ja laatikon sisäänmenoputken yläosa oli 11,5 cm patolevyn yläosan alapuolella. Laatikko asetettiin noin kolmen prosentin kaltevuuteen, jotta virtaus pysyisi mahdollisimman hyvin halutussa suunnassa. Sammalta sammalyksikköön asetettiin noin 10 kg (märkäpaino) ja sienihaketta sienihakeyksikköön noin 20 kg (tuorepaino).



Kuva 47. Levillä toteutettu laatikkorakenne. Laatikon sisäleveys oli 30,7 cm, sisäpituus 109,5 cm ja sisäkorkeus 39 cm. Välilevyt tehtiin 12–13 mm vesivanerista. Venttiilillisen sisääntuloputken sisähalkaisija oli 6,9 cm ja muiden verkotettujen reikien sisähalkaisija 10,0 cm. Rei'issä käytettiin 3 mm reikäkoon nailonverkkoa. Nämä reiät haluttiin isommiksi kuin ensimmäinen sisääntuloputken reikä, jotta ne eivät aiheuttaisi padotusta. Sammalyksikön molemmin puolin reikien keskiosassa oli 15 cm korkeudella sisäpohjasta ja sen jälkeen loppuissa 13 cm korkeudella sisäpohjasta. Sammalyksikön päälle asetettiin nailonverkko (reikäkoko 3 mm), joka estää sammalen karkaamisen mahdollisissa tulvatilanteissa. Sienihakeyksikön päällä on kansi, koska sienihake ei tarvitse valoa.



Kuva 48. Vasemmanpuoleisissa kuvassa laatikkorakenne tyhjänä ja oikeanpuolimmaisessa kuvassa laatikkorakenne ojaan asennettuna. Kuvat: Tuomo Reinikka.

4.3.3 Seuranta

Koekohteella toteutettiin 2019 jatkuvatoimista vedenpinnankorkeuden, sähkönjohtavuuden ja lämpötilan seuranta laskeutusaltaan jälkeen asetetulta v-mittapadolta (kuva 43). Lisäksi Hobon lämpötilaloggereita oli sedimentaatio-, sammal- ja sieniyksikön alapuolisissa patolevyissä. Kevään tulvan jäljiltä löytyi 2020 vain yksi lämpötilaloggeri ja sekin maalta (liite 52). Vesinäytteenottopisteitä vuonna 2019 olivat hulevesien purkupuutken suu, laskeutusaltaan jälkeen, sammalyksikön jälkeen ja sienihakeyksikön jälkeen (taulukko 7, kuva 43). Näistä pisteistä mitattiin kenttämittareilla pH:ta, sähkönjohtavuutta, happea ja redoxia. Koska järviruokokosteikko oli ojan reuna-alueilla, ja sen tavoitteena oli lähinnä tehostaa tulvien aikaista puhdistustehokkuutta eikä sen jälkeen otettu vesinäytteitä. Kesällä 2020 pilottirakenteessa ei ollut jatkuvatoimista seuranta ja vesinäytteenottopisteet olivat laskeutusaltaan v-mittapadolta/purossa ennen laatikkorakennetta, sammalyksikön jälkeen ja sienihakeyksikön jälkeen (kuva 47). Vedenlaadun seuranta alueella on tehty ajalla 25.4.2018-24.8.2020 (liitteet 53–67).

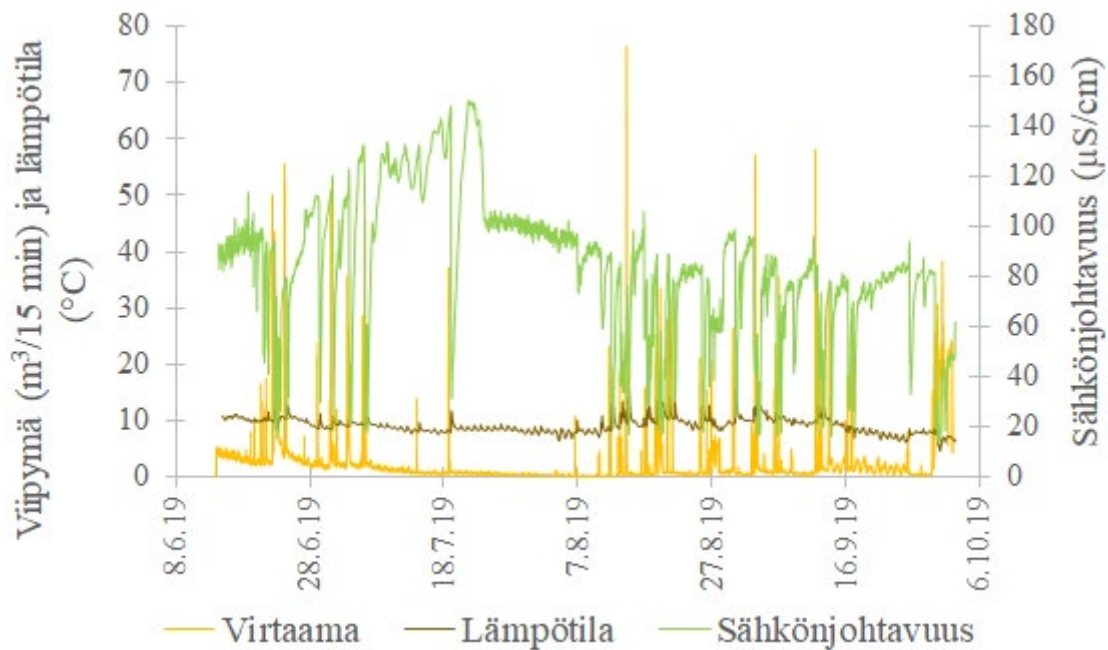
Taulukko 7. Levin pilottirakenteen näytteenottopisteet.

Näytteenottpiste	Määritelmä
Hulevesipurkupuutken suu	Hulevesien purkupuutkesta ojastoon tuleva vesi
Sedimentaatioallas	Laskeutusaltaan jälkeiseltä v-mittapadolta tuleva vesi
Sammalyksikkö	Sammalyksikön jälkeinen vesi (ojassa 2019 ja laatikkorakenteen sisältä 2020)
Sieniyksikkö	Sienihakeyksikön jälkeinen vesi (ojassa 2019 ja laatikkorakenteen sisältä 2020)

4.3.4 Tulokset

Virtaama sekä jatkuvatoimisen sähkönjohtavuuden ja lämpötilan mittaus

Levin hulevesiojaston keskimääräinen virtaama (keskiarvo) oli laskennallisesti 238 m³/vrk, mutta koska mittapadolta voitiin virtaamat mitata luotettavasti vain mittapadon v-aukon (16,2 cm) korkeudelta, niin sitä isompien virtaamien osuus tulee aliarvioitua, koska siinä vaiheessa vedet ovat menneet jo kaikkialta padon yli. Tällöin todellinen keskiarvo on isompi. Virtaaman mediaaniarvo oli 149 m³/vrk. Minimivirtaamat olivat alle 20 m³/vrk ja virtaamissa oli paljon vaihtelua (kuva 49). Virtaamien nousu pienensi veden sähkönjohtavuutta. Lämpötilat pysyivät läpi tarkkailuajanjakson melko tasaisina. Kuitenkin ojassa mittapadon jälkeen olleeseen lämpötilaloggeriin tallennetut lämpötilamittausten arvot vuoden 2019 kesällä-syksyllä vaihtelivat noin 5–15 °C välillä (liite 52).



Kuva 49. Levin laskeutusaltaan jälkeiseltä mittapadolta mitatut virtaama-, lämpötila- ja sähkönjohtavuustiedot.

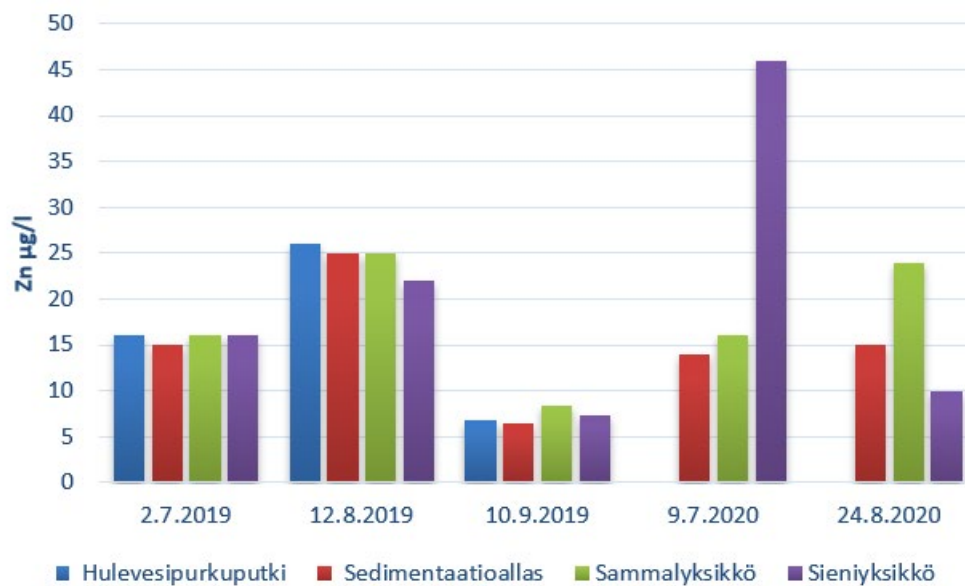
Vedenlaatu

Purkuputkesta tulevan veden nikkelpitoisuus vaihteli vuosien 2018 ja 2019 seuranta-aikana välillä 0,5–4 µg/l (suodatettu 0,45 µm pitoisuus välillä 0,32–1,0 µg/l) ja kuparipitoisuus 0,5–11 µg/l (suodatettu 0,45 µm pitoisuus välillä 1,2–5,5 µg/l). Nikkelpitoisuus oli Levin hulevedessä samaa tasoa, mutta kuparipitoisuus oli hieman koholla verrattaessa valtakunnallisesta puroaineistosta vuonna 2006 määritettyihin metallien suodatettuihin (<0,45 µm) mediaanipitoisuuksiin (nikkeli 0,60 µg/l ja kupari 0,55 µg/l; Tenhola & Tarvainen 2008). Pilottirakenteen osalta nikkelin ja kuparin pidättymistä tarkkailtiin kahdella näytteenotokerralla kesällä 2020 (taulukko 8). Pilottirakenteen osalta seurattiin metalleista kokonaispitoisuuksia, joten arvot eivät ole suoraan verrattavissa taustapitoisuuksiin. Sammalyksikkö ei pidättänyt kuparia (puhdistusteho –43 % ja –117 %). Nikkelin puhdistusteho oli heinäkuun näytteenotokerralla 17 % ja elokuun näytteenotokerralla -31 %. Sienihakeyksikön kuparin puhdistusteho oli 40 % ja 23 % ja nikkelin puhdistusteho –10 % ja 12 %.

Taulukko 8. Levin pilottirakenteen veden nikkelpitoisuudet (Ni) ja kuparipitoisuudet (Cu) kesällä 2020.

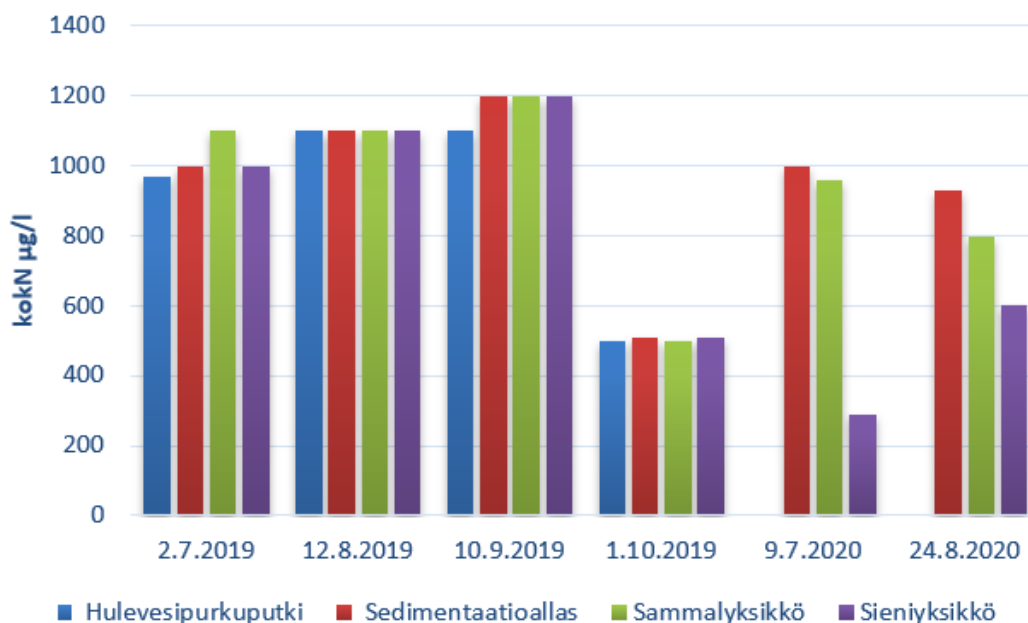
Päivämäärä		Sedimentaatioallas	Sammalyksikkö	Sienihakeyksikkö
9.7.2020	Ni (µg/l)	1,2	1,0	1,1
	Cu (µg/l)	2,1	3,0	1,8
24.8.2020	Ni (µg/l)	1,3	1,7	1,5
	Cu (µg/l)	1,8	3,9	3,0

Purkuputkesta pilottirakenteeseen tulevan veden sinkkipitoisuus vaihteli välillä 6,8–610 µg/l (suodatettu 0,45 µm pitoisuus 5,8–87 µg/l). Sinkkipitoisuus oli myös koholla verrattaessa valtakunnallisesta puroaineistosta vuonna 2006 määritettyihin metallien suodatettuihin (<0,45 µm) mediaanipitoisuuksiin (sinkki 3,58 µg/l; Tenhola & Tarvainen 2008). Laskeutusaltaan sinkin puhdistusteho oli keskimäärin 5 %. Sammalyksikön sinkin puhdistusteho oli koko seuranta-ajan negatiivinen –22 %. Sienihakeyksikön puhdistusteho vaihteli välillä -188–58 % (kuva 50).



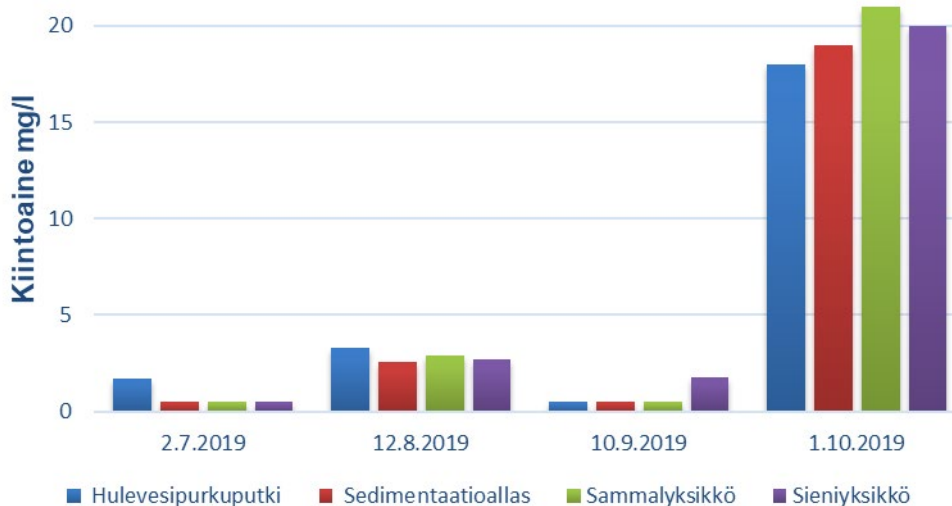
Kuva 50. Sinkkipitoisuuden (Zn) vaihtelu Levin puhdistusrakenteessa. Kesällä 2020 sammal ja sienihake oli asetettu laatikkoratkaisuun, jossa virtausnopeus oli hitaampi kuin ojan virtausnopeus.

Purkputkesta tulevan veden kokonaistyyppipitoisuus vaihteli välillä 200–1500 µg/l. Laskeutusaltaan kokonaistypen puhdistusteho oli keskimäärin -4 %. Sammalyksikön puhdistusteho oli keskimäärin 2 % ja sienihakeyksikön keskimäärin 17 % vaihdellen välillä -2–70 % (kuva 51). Sienihakeyksikössä puhdistumista tapahtui vasta yksikön muutostöiden jälkeen. Kahden näytteen keskiarvon perusteella vuonna 2020 kokonaistypen määrä väheni sammalyksikössä 9 % ja sienihakeyksikössä 47 %. Nitriitti-nitraattityypen poistumat olivat 24 % ja 97 % ja ammoniumtypen muutos -2450 % (tuleva pitoisuus toisella keralla alle määrittäysrajan) ja 99 %, sammalyksikössä ja sienihakeyksikössä. Tulevassa vedessä kokonaistyyppistä 84 % oli nitriitti-nitraattityyppinä ja noin 1 % ammoniumtypenä.



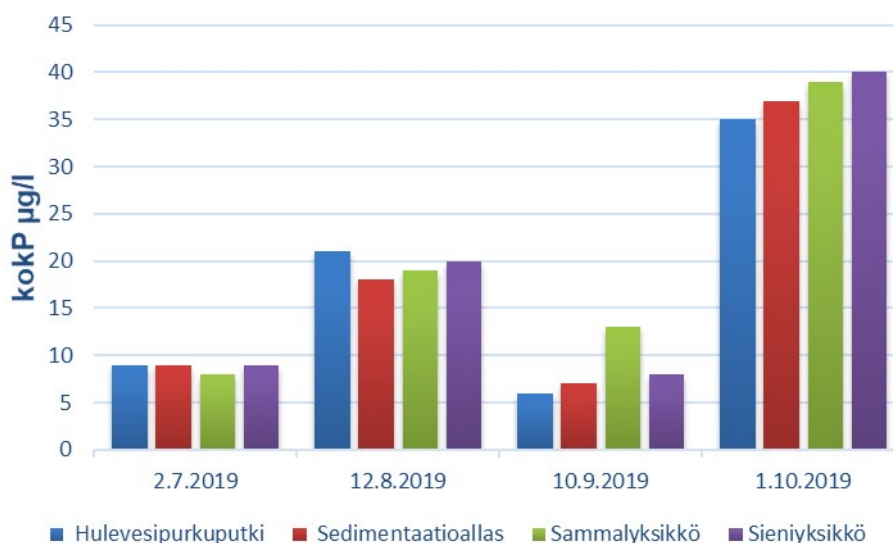
Kuva 51. Kokonaistyyppipitoisuuden (kokN) vaihtelu Levin puhdistusrakenteessa. Kesällä 2020 sammal ja sienihake oli asetettu laatikkoratkaisuun, jossa virtausnopeus oli hitaampi kuin ojaassa.

Purkuputkesta tulevan veden kiintoainepitoisuus vaihteli välillä 0,5–18 mg/l. Laskeutusaltaan kiintoaineen puhdistusteho oli keskimäärin 21 %, sammalyksikön keskimäärin -5 % ja sieniyksikön vaihteluväli -260–7 %. Kiintoainepitoisuudet olivat ajoittain määritysrajan alapuolella tai lähellä määritysrajaa, joka voi tuoda virhelähdettä reduktioiden laskentaan. Vedestä mitatut kiintoainepitoisuudet olivat suurimmaksi osaksi hyvin matalia (kuva 52). Vesinäytteestä mitattu kiintoainepitoisuus ei välttämättä kerro pohjakulkeumasta tai rannoille kertyvästä kiintoaineesta, joten kiintoainetuloksia pitää tulkita harkiten.



Kuva 52. Kiintoainepitoisuuden vaihtelu Levin pilottirakenteessa.

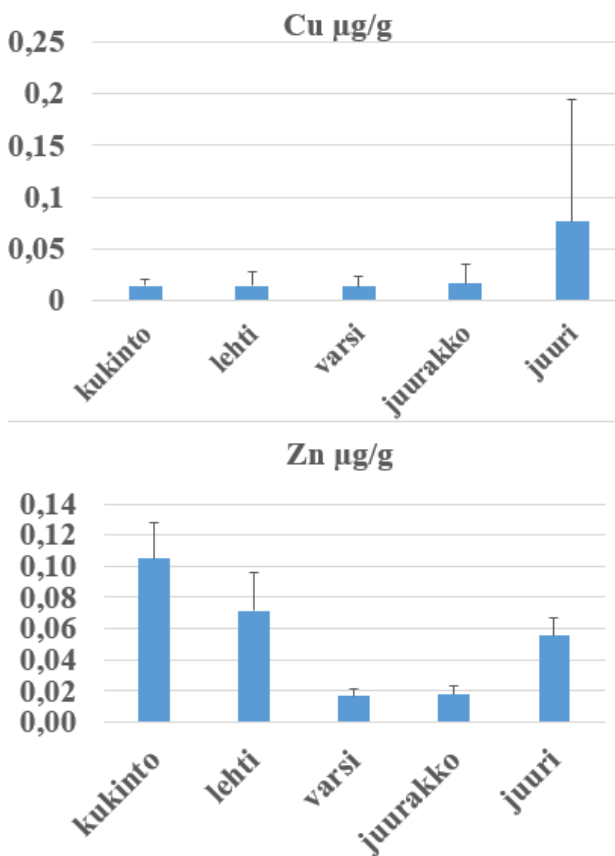
Levin pilottirakennetta ei ollut suunniteltu fosforin reduktiota ajatellen, eikä siellä sitä myöskään tapahtunut (kuva 53). Hulevesipurkuputkesta tulevan veden fosforipitoisuus vaihteli välillä 6–120 µg/l, josta suurin pitoisuus oli mittauksissa yksittäinen ja ajoittui ajalle ennen pilottirakenteen rakentamista. Muutoin hulevedestä mitatut kokonaisfosforipitoisuudet olivat matalia ja pilottirakenteen seuranta-ajan jatkuvasti alle 40 µg/l.



Kuva 53. Kokonaisfosforipitoisuuden vaihtelu Levin pilottirakenteessa.

Järviruoko Levillä

Syksyllä 2020 ei löydetty yhtään elossa olevaa järviruo'on maanpäällistä versoa, joten istutukset eivät onnistuneet. Kittilän Ahvenjärvestä syksyllä 2020 kerätyistä järviruo'oista, joita tässäkin testi-istutuksessa käytettiin, tutkittiin kupari- ja sinkkipitoisuudet eri kasvinosista (kuva 54). Näiden perusteella näyttäisi, että kuparin ja sinkin välillä voisi olla eroa niiden kertymisessä eri kasvinosiin niin, että sinkkiä löytyy nimenomaan kukinnoista ja kuparia eniten taas juuristosta. Yksilöllinen vaihtelu kupari- ja sinkkipitoisuuksissa oli kuitenkin suurta etenkin juuriston ja kuparin kohdalla. Kun tuloksia verrataan kirjallisuudesta tunnettuihin arvoihin kasvien metallipitoisuuksista, sekä kuparin että sinkin mitatut pitoisuudet järviruokonäytteissä olivat ylipäätään erittäin alhaiset (<0,01 % normaaleista arvoista Marschner & Marschner 2012, Du Laing ym. 2009). Tämä voi osin johtua myöhäisestä näytteiden keruuajankohdasta (syyskuu). Järviruo'olla metallien on havaittu kertyvän enemmän juuristoon kuin maanpäällisiin osiin (Bonanno & Lo Giudice 2010). Maanpäällisiin osiin metalleista taas on raportoitu kertyvän eniten sinkkiä (Vymazal & Březinová 2016). Yleisesti ottaen sekä kupari että sinkki ovat kasvien tärkeitä hivenravinteita mutta niiden liiallinen saanti on kasveille myrkyllistä ja kasveilla on erilaisia mekanismeja sietää korkeita pitoisuuksia (Marschner & Marschner 2012).



Kuva 54. Kuparipitoisuudet (Cu) ja sinkkipitoisuudet (Zn) (\pm SD) järviruo'ossa sen eri osissa (Kittilä, Ahvenjärvi, kontrollialue). Näytemäärä N = 4. Näytteet kerätty myöhään syksyllä.

4.3.5 Johtopäätökset Levin pilottirakenteen toiminnasta

Levin kesän 2019 pilottirakenteella onnistuttiin pidättämään ainoastaan kiintoainetta, sillä ojaveden virtausnopeus oli liian suuri, jotta sammal tai sienihakeyksiköt olisivat ehtineet toimimaan. Jotta saataisiin sammalen tai sienihakkeen puhdistuspotentiaalista tietoa, asetettiin ne kesällä 2020 laatikkoratkaisuun, jossa aikaansaatiin pienempi virtausnopeus ja pidempi viipymä. Näillä oli positiivinen vaikutus typen poistumiin. Metallien poiston suhteen sienihake vaikutti toimivammalta. Kuitenkin pienistä tulevista metallipitoisuuksista ne eivät välttämättä pystyneet pidättämään mitään, vaan huuhtoutumista tapahtui osittain, eli materiaalin oma pitoisuus vaikuttaa, kun käsiteltävän veden pitoisuudet ovat pieniä. Luonnossa nämä ratkaisut voitaisiin asentaa esim. ojan viereen tehtäviin sivu-uomiin, jos ojan virtaus on liian suuri.

4.4 Matkan varrella opittua

Kaikkein parasta olisi, että yksiköt voitaisiin rakentaa siten, että vesi virtaisi painovoimaisesti niiden läpi. Tällöin ei tarvittaisi pumppuja, jotka monesti ovat rakenteen vikaantumisherkin osa. Kuitenkin käytännössä osa alueista on niin tasaisia, että pumppu tarvitaan nostamaan vesi käsittelyrakenteeseen. Tällöinkin olisi hyvä pyrkiä siihen, että toista pumppua veden tason uudelleenkohottamiseksi ei tarvita, tai jos tarvitaan, niin se tulee varustaa pintavipalla.

Tärkeää on huolehtia, että olemassa olevista puhdistusrakenteista ja altaista liete poistetaan ajoissa, ettei se päädy muihin käsittely-yksiköihin ja estä niiden toimintaa. Myös uusia hybridirakenteita suunniteltaessa tulisi huomiota kiinnittää erilaisten tukkeutumista aiheuttavien materiaalien (sakka, liete) laskeuttamiseen/puhdistukseen yksiköiden alkupäässä, koska ongelmat alussa moninkertaistavat ongelmat yksiköiden loppupäässä, jolloin hyvin toimivista yksiköistä ei saada tehoa irti. Tämä oli tiedossa etukäteenkin, mutta vasta projektin aikana opittiin, että esim. rautasakan laskeuttamiseen rakennetut altaat olivat liian pienet.

Sienihakkeessa sieniympäristö todennäköisesti nopeuttaa puuhakkeen lahoamista, mitä toki tapahtuu myös ilman ympäröivää sientäkin. Sienihakkeesta lähtee lahoamisen vuoksi irtomateriaalia virtauksen mukana, mikä aiheuttaa helposti putkien tukkeutumista. Sienihakkeen pakkaaminen juuttisäkkiin ei ole pitkäaikainen ratkaisu, etenkin valoissa ulko-olosuhteissa, koska myös säkki lahoaa nopeasti (kuukausissa). Verkkokatiska vaikutti kuitenkin sopivalta ratkaisulta hakkeen sijoittamiseen, ja tällöin saatiin myös vettä virtaamaan paremmin materiaalin läpi. Juuttisäkki oli liian tiivis, jolloin vesi helpommin 'etsi' muita virtausreittejä. Materiaalin vaihtoon, hankkeen tulosten perusteella noin kerran vuodessa, tulee sienihaketta käytettäessä varautua. Lahotusprosessin edetessä sienihake voi toisaalta muodostaa eräänlaisen "elävän biofilmin", jolloin materiaalin pinnalle voisi muodostua ravinteita ja metalleja sietävä/poistava mikrobioyhteisö, mutta tämän merkitystä veden puhdistamisessa ei tiedetä, ja asia vaatii enemmän tutkimusta.

Järviruokomateriaalin hankinnassa tulee painottaa materiaalin keruuta ja hankintaa puhtaalta alueelta, koska tällöin ei tuoda juuriston mukana tahattomasti metalleja mukaan puhdistusyksikköön. Tässä hankkeessa suunnitteluvaiheessa painotettiin järviruokomateriaalin sopeutuneisuutta metallipitoiseen kivi- ja saven ympäristöön, koska sen ajateltiin takaavan kosteikon nopean kasvuun lähdön. Kuitenkin tuloksena olivat puhdistusyksikön jälkeiset kohonneet metallipitoisuudet.

Sammalmateriaalin käytössä erilaiset laatikko-/allasratkaisut ovat toimivimpia. Tärkeää on, että sammal ei lähde veden virtauksen mukana liikkeelle, viipymäaika on tarpeeksi pitkä ja vesi kiertää tehokkaasti sammalmaton kautta. Tällöin näistä yksiköistä saataisiin paras puhdistusteho, ja pystytään paremmin tutkimaan niiden toimintaa kenttäolosuhteissa. Kiintoaineen poisto tai vähentäminen esim. laskeutuslaitteilla ennen sammalyksikköä on välttämätöntä sammalyksikön toiminnan turvaamiseksi. Myös sammalmateriaalin käytössä tulee muistaa hankkia materiaali puhtaalta (kontrolli)alueelta. Typen osalta sammal suosii tyyppiä ammoniummuodossa.

5 Hankkeessa mitoitettuja vesienkäsittelyratkaisuja

HybArkt -hankkeessa kerätyn tiedon ja muun olemassa olevan tiedon perusteella arvioitiin, millä tavoin eri yhteistyökumppaneiden vedenkäsittelyhaasteita voitaisiin ratkaista. Haasteita kysyttiin mukana olevilta yhteistyökumppaneilta, joiden kanssa osin myös yhdessä pohdittiin sopivia ratkaisuja. Kaiken kaikkiaan tapauksia oli viisi (taulukko 9). Kolme kohteesta oli kaivoskohteita, jossa kahdessa toivottiin suunnitelmia ja mitoitusta typenpoiston tehostamiseen passiivisilla vesienkäsittelyratkaisuilla ja yhdessä projektisuunnitelman mukaisesti arvioitiin, mitkä menetelmät yleisesti voisivat toimia ko. kohteen vesienkäsittelyssä. Kaksi muuta kohdetta oli jätevedenpuhdistamoja, joista toisessa toiveena oli selvittää pH:n noston vaikutusta nitraattitypen poiston tehostamiseen jälkikäsittelykosteikoilla ja suunnitella testausratkaisu tähän. Toisessa jätevedenkäsittelykohteessa pyydettiin yleisesti arvioimaan, miettimään, miten olemassa olevaa jätevesien puhdistusprosessia voitaisiin tehostaa eli varsinaista uutta vesienkäsittely-yksikköä ei mitoitettu.

Taulukko 9. Kohteet, joihin HybArkt -hankkeessa mitoitettiin vesienkäsittely-yksikkö tai selvitettiin mahdollisuuksia tehostaa typen tai metallien poistoa eri menetelmillä.

Kohteen nimi	Puhdistettava aine	Vesien puhdistuksen tehostaminen	Tuleva vesimäärä (m ³ /vrk)	Tuleva pitoisuus (mg/l)
Kemin kaivos	N	Koivupuuhakebioreaktori	10700	28 (Kok. N)
Kevitsan kaivos	N, Ni	Koivupuuhakebioreaktori	2000	23 (NO ₂ -N)
Hituran kaivos	Ni	Koivupuuhakebioreaktori	150	1,2 (Ni)
Lakeuden keskuspuhdistamo	N	pH:n nosto	5260 (v. 2019)	74 (Kok. N, v.2011–2018)
Sieppijärven jätevedenpuhdistamo	N	Kokonaisuuden tehostaminen	36 (v. 2018)	67 (Kok. N, v 2018)

5.1 Outokumpu Chrome Oy/Kemin kaivos

Kemin kaivos Elijärvellä on Euroopan ainoita kromia louhivia kaivoksia, joka on avattu 1960-luvun lopulla ja jonka toiminta on arvioitu jatkuvan aina 2030-luvulle. Se on myös Suomen mittakaavassa maamme laajin maanalainen kaivos, jonka vuosituotto on n. 2,5 milj. tonnia kromimalmia ruostumattoman teräksen valmistukseen (Outokumpu Chrome, 2020). Kaivosvesien sisältämä räjähdysaineperäinen tyyppi on katsottu yhdeksi merkittävimmäksi alueen pohja- ja pintavesiä kuormittavaksi tekijäksi, jonka määrät kaivoksen vireillä olevan laajennuksen myötä arvioidaan edelleen lisääntyvän tulevaisuudessa (Lapin ELY-keskus, 2020). Kaivosalueella ei ole varsinaisia typen poistoon suunniteltuja vesienkäsittelyratkaisuja, mutta laajoissa altaissa on todettu tapahtuvan luontaista typen poistumista ja tyyppikuorman vähentymistä (Kujala ym. 2019)

HybArkt -hankkeessa mitoitettiin puuhakebioreaktori kaivoksen tyypipäästöjen vähentämiseen. Koska käsiteltävien kaivosvesien määrä on suuri, biologisiin ja passiivisiin puhdistusratkaisuihin pohjautuvat menetelmät ovat kustannuksiltaan lähes ainoita mahdollisia toteuttamiskelpoisia vesienkäsittelyratkaisuja. Denitrifioivan puuhakebioreaktorin katsottiin soveltuvan hyvin tähän tarkoitukseen, sillä kaivoksen suotovesissä nitraatti-nitriittitypen osuus typen kokonaiskuormituksesta on tyyppillisesti 80–100 % vaihdellen kaivoksen eri alueilla (Mehtälä, 2018). Varsinaiseksi puhdistettaviksi vesiksi valittiin

maalaisesta kaivoksesta pumpattavat kuivanapitovedet, joissa typpipitoisuus on tyypillisesti korkea ja noin 70 % typestä on nitraattimuodossa.

Mitoituspaikaksi valittiin rikastushiekka-altaan ja altaan 4 välimaasto, jossa oli luontaisesti tilaa hakebioreaktoreille, valmiina tie sekä mahdollista testausta varten myös saatavilla sähköä. Suunnittelun lähtökohdaksi oli altaalle 4 tuleva vuotuinen vesimäärä (3,9 milj. m³) sekä keskimääräinen typpipitoisuus näissä vesissä vuoden 2019 aineiston pohjalta. Hakebioreaktorin koko on suhteessa tavoiteltuun puhdistustehokkuuteen. Mitoituksen lähtökohdaksi oli noin 50 % poistuma roudattoman kauden tilanteessa, sillä lumen sulamisen aikaan vesien typpipitoisuudet ovat tyypillisesti pieniä. Näillä laskelmilla bioreaktorin haketilavuudeksi laskettiin 4 770 m³, joka voitaisiin toteuttaa kahdella rinnakkaisella yksiköllä, joiden leveys olisi 10 m, pituus 120 m ja hakesyvyys 2 m. Kaksi rinnakkaista yksikköä yhden ison yksikön sijaan lisää hoitovarmuutta sekä helpottaa veden ohjaamista hakkeeseen tasaisesti.

Hakereaktorin mitoituslaskelmien pohjalta kaivoksella toteutettiin Outokumpu Kemin kaivos -yhtiön toimesta hakebioreaktorin testaus kesällä 2020 (kuva 55). Pilotoinnissa testattiin rinnakkain kahta vaihtolavaan rakennettua reaktoria, joissa toisessa mitoitusvirtaamana oli 13 m³/vrk ja toisessa aluksi 26 m³/vrk. Laskennalliset viipymät olivat silloin 21 h ja 10 h, jotka olivat selvästi lyhyempiä mitä HybArkt-hankkeen laskelmissa käytetty 48 tuntia.



Kuva 55. Koivuhakkeella toteutetut denitrifioivat bioreaktorit Outokummun Kemin kaivoksella kesällä 2020. Kuva: Marjo Karnaatti.

Nitraatin poistuma hakebioreaktoreissa oli selvästi parempi pienemmällä virtaamalla (70–80 %) kuin suuremmalla (10–35 %). Puhdistusteho kuitenkin laski testauksen aikana selvästi. Puhdistustehon laskua ei selittänyt lämpötila tai muu ympäristömuuttuja, jonka vuoksi R1 hakebioreaktorissa toteutettiin merkkiainekoe veden viipymän ja mahdollisten oikovirtausten määrittämiseksi. Kokeessa selvisi, että hakebioreaktorin todellinen viipymä oli mitoitusviipymiä selvästi lyhyempi (noin 10 h), kun laskennallinen olisi ollut 21 h ja veden virtausnopeus reaktorin sisällä jakautui epätasaisesti. Tulosten perusteella puhdistustehokkuuden heikkenemisen arveltiin johtuvan oikovirtausreitien muodostumisesta hakkeeseen, mikä näkyi selvästi arvioitua lyhyempänä viipymänä. Oikovirtaus on todennäköisesti seurausta liian suuresta virtauksesta hakebioreaktorin sisällä. Veden virtausreittejä ja koko hakkeen tehokasta hyödyntämistä voidaan tehostaa erilaisilla rakenteilla, kuten veden virtausta ohjaavilla seinämillä, sekä tulo- ja lähtöosien huolellisella suunnittelulla, joihin tulee kiinnittää huomiota puuhakebioreaktorin teknisissä toteutuksissa.

5.2 Boliden Kevitsa Mining Oy kaivos

Kevitsan kaivos on yksi Suomen suurimmista avolouhoksista, ja se on perustettu vuonna 2012. Kaivos sijaitsee Sodankylässä ja siellä rikastettiin n. 7,5 milj. tonnia malmia vuonna 2019 (Boliden, 2020). Sen päätuotteet ovat nikkeli ja kupari, mutta rikasteesta hyödynnetään myös kulta, platina ja palladium.

Kaivoksen merkittävimmät vesistökuormitusta aiheuttavat vedet ovat sivukivikasojen typpipitoiset valumavedet, joissa kokonaistyppipitoisuus on tyypillisesti ollut 25 mg/l ja keskimäärin lähes 47 mg/l (Boliden, 2020). Typpipitoisuudesta lähes 90 % on nitraattityyppinä ja mahdollista poistaa denitrifioivalla hakereaktorilla. Näissä vesissä on myös metalleja, kuten nikkeliä (keskimäärin 1,5 mg/l), kuparia (0,014 mg/l), sinkkiä (0,025 mg/l) ja kobolttia (0,010 mg/l) sekä rikkiä (460 mg/l). Sulfaatin pelkistysprosessin kautta hakebioreaktorilla voidaan tavoitella myös metallien poistoa. Kaivoksen luvassa on tällä hetkellä vaatimuksena, että nikkelin pitoisuus tulee olla alle 5 mg/l. Vaikka luvassa ei ole vielä typen poistolle vaatimuksia, yhtiö varautuu, että sellaisia vaatimuksia voi tulevaisuudessa tulla.

Mahdolliseksi hakebioreaktorin paikaksi suunniteltiin kaivosalueen KevP-2 pisteen alue, johon sivukivikasojen valumavedet kerätään. Tulevat vesimäärät vaihtelevat ja ovat suurimmat lumensulamisen aikaan. Vesimäärät olivat KevP-2 pisteessä noin 730 000 m³ vuodessa, ja suunnitteluun valittiin nitraattityypin pitoisuus 23 mg/l, joka oli mediaani ko. pisteen vesille. Näillä laskelmilla hakebioreaktorin hakkeen määräksi laskettiin 2 248 m³. Tämän voisi toteuttaa muun muassa 2 m syvällä hakebioreaktorilla, jonka tehollinen leveys olisi 10 m ja pituus 112 m. Koska typpipitoisia vesiä syntyy eri puolilla kaivosaluetta, useampi erillinen hakebioreaktori olisi puhdistustehokkuuden kannalta parempi vaihtoehto kuin yksi iso. Tällainen hajautettu toteutus mahdollistaisi myös, että vesimäärät eivät kasvaisi liian suuriksi, ja että pitoisuudet olisivat mahdollisimman suuria, kun ollaan kuormituksen syntyajan lähetyvillä.

Näiden laskelmien pohjalta Kevitsan kaivoksen KevP-2 valumavesiä testattiin Renlundin säätiön rahoittamassa hakebioreaktoripilotissa Oulun yliopiston laboratoriossa. Kaivosyhtiö toimitti näitä varten vedet. Testauksissa yhdistettiin koivupuuhakebioreaktori vesisammalyksikön kanssa siten, että veden virtaus pakotettiin kulkemaan kummankin yksikön läpi erillisillä seinämillä (kuva 56). Ajatuksena oli hyödyntää hakkeen lisäksi vesisammalten kykyä poistaa metalleja, mutta myös tehostaa typenpoistoa mahdollistamalla ammoniumtyypin hapettumista nitrifikaatiolla. Tällöin tyyppiä olisi enemmän nitraattityppimuodossa, josta denitrifioiva hakebioreaktori voisi poistaa sen typpikaasuksi, ja kokonaistypen poistuma saataisiin paremmaksi. Testauksen ajatuksena oli löytää ratkaisuja niille vesille, joissa tyyppiä on paljon myös ammoniumtyppimuodossa. Lisäksi testauksissa haluttiin tutkia typen ja metallien poistoa alhaisessa lämpötilassa (5–10 °C), sillä tällaiset olosuhteet ovat tavanomaisia Suomessa.

Testauksissa kaivoksen suotovesien typpipitoisuus oli korkeimmillaan 55 mg/l, ja tästä typpipitoisuudesta keskimäärin 48 % poistui testauksessa. Kuitenkin nitraattityypin poistuma oli suurempi eli noin 78 %. Puhdistusyksiköstä lähtevän veden typpipitoisuus oli keskimäärin 16,7 mg/l. Kevitsan veden testaus kesti kokonaisuudessaan noin kaksi kuukautta. Kokeessa myös metalleja poistui vedestä, ja alustavien tulosten perusteella sinkkiä pidättyi noin 64 %, kuparia 35 % ja nikkeliä 56 %. Nikkelin pitoisuus kaivosvedessä oli keskimäärin noin 1,8 mg/l ja puhdistuksen jälkeen pitoisuus laski pitoisuuteen 0,79 mg/l (lämpötila vakioitu arvoon +5 °C). Tämä on jonkin verran korkeampi kuin kaivoksen luvannukainen nikkelpitoisuus 0,5 mg/l. Koska metallien poistuma on riippuvainen lämpötilasta, mitattua suurempi poistuma, ja siitä seuraava alhaisempi lähtövesien pitoisuus on mahdollista kesäaikaisilla lämpötiloilla.



Kuva 56. Vesisammal- ja koivuhakereaktorin testaukset Kevitsan suotovesille typen ja metallien poiston tehostamiseksi keväällä 2020 Oulun yliopistolla. Kuva: Sepideh Kiani.

5.3 Lakeuden keskuspuhdistamo Oy jäteveden jälkikäsittely

Lakeuden keskuspuhdistamo Oy käsittelee Hailuodon, Oulunsalon, Kempeleen, Tyrnävän, Limingan ja Lumijoen jätevesiä Kempeleessä sijaitsevalla puhdistamolla. Käsiteltävien jätevesien määrä on ollut 2019 vuonna 1,92 miljoonaa m³/vuodessa eli 5260 m³/vrk (Lakeuden keskuspuhdistamo Oy 2020). Jätevedenpuhdistusprosessiin kuuluvat puhdistamolla välppien ja hiekanerotuksen jälkeen, esiselkeytys, ilmastus, väliselkeytys, flokkaus ja jälkiselkeytys (Savikuja 2012). Tämän jälkeen vedet johdetaan järviruokokosteikolle jälkikäsittelyyn. Kosteikon ensimmäinen osa, 4,4 ha, on otettu käyttöön 1996 ja laajennusosa 12,6 ha vuonna 2009.

Puhdistamolta tuli toiveeksi miettiä typenpuhdistuksen tehostamista jälkikäsittelyssä, ja erityisesti nitrifikaatioprosessin tehostamismahdollisuuksia pH:n noston avulla, koska sitä aihepiiriä oli puhdistamolla mietitty jo aiemmin. Tätä varten toteutettiin aluksi hieman lisää kirjallisuusselvitystä. Metcalf & Eddy (2003) mukaan optimi pH nitrifikaatioprosessille on 7,5–8,0 ja Le ym. (2018) mukaan 6,5–7,5. Kosteikolle tulevan veden pH vuosina 2011–2018 oli keskimäärin noin 7,5, alkaliniteetti 6 mmol/l ja BOD₇ (ATU) 5,3 mg/l. Kokonaistypen pitoisuus kosteikolle tulevassa vedessä oli keskimäärin 74 mg/l ja tästä ammoniumtyyppinä (NH₄⁺-N) oli noin 95 %.

Kirjallisuusselvityksen perusteella pH on jo optimilla tasolla nitrifikaatioprosessille, mutta toki sitä voisi noin puoli pH yksikköä nostaa. Koska tätä asiaa oli puhdistamolla mietitty jo pidempään, tehtiin kesälle 2020 suunnitelma pH:n nostolle yhdessä puhdistamon henkilökunnan kanssa. Eri vaihtoehtoja mietittiin, mutta lopulta päädyttiin lisäämään 20 t CaCO₃ (Nordkalk Filtra A5 (5–8 mm)) kosteikon alkuun (suunnitelman mukaan noin 20 m x 1,5 m x 0,4 m kerrokseksi). Puhdistamon henkilökunta toteutti muutostyön. Kosteikkoa seurattiin kesän ja alkusyksyn ajan tehostetusti puhdistamon henkilökunnan ja Ravinteiden ja mikromuovien poistaminen puhdistetuista jätevesistä kylmän ilmaston kosteikoilla (RaMiKo, 2019–2021) -hankkeen tiimoilta, sillä hankkeessa kyseinen kosteikko on yksi tutkimuskosteikoista. Tulokset tullaan käsittelemään RaMiKo -hankkeessa.

5.4 Tunturi-Lapin Vesi Oy, Sieppijärven kylän jätevedenpuhdistamo, Kolari

Sieppijärvi on Kolarin kunnassa, Länsi-Lapissa sijaitseva järvikylä. Kylässä on n. 300 asukasta. Kylässä on alun perin 1970-luvulla rakennettu jätevedenpuhdistamo, joka on saneerattu vuosien 2013 ja 2014 aikana. Puhdistamo on aiemmin ollut kemikaloitu lammikkopuhdistamo, jonka jälkeen on käsitteilyä ollut Dortmund pystyselkeytys ja jälkiselkeytys. Vuonna 2013 suunnitellussa saneerauksessa puhdistamo on muutettu niin, että lammikko/tasausallas on poistettu käytöstä. Kemikaalinsyötön jälkeen on asetettu linjaan ilmastusaltaat (biologinen puhdistusprosessi), ja sieltä veden johdetaan Dortmund-pystyselkeytykseen, ja sieltä purkukaivon kautta purkupuutkeen ja sitä pitkin edelleen vastaanottavaan vesistöön. Kemikaali sekoitetaan jätevedeen juuri ennen jäteveden johtamisesta biologisen puhdistuksen ilmastusaltaiisiin. Kemikaaleista on käytetty sekä ferrisulfaattia (PIX) että polyalumiinikloridia (PAX). Jätevedet vastaanottava vesistö on Naamijoki. Puhdistamolle tuleva jätevesi on tavanomaista yhdyskuntajätevettä. Viemäriverkkoon ei johdeta erityisiä teollisuusjätevesiä. Puhdistamon toiminnalle on Pohjois-Suomen aluehallintoviraston 22.10.2013 myöntämä ympäristölupa. Puhdistamo on mitoitettu 150–300 henkilön jätevesille.

Sieppijärven jätevedenpuhdistamoa hallinnoi ja hoitaa Tunturi-Lapin Vesi Oy. Tunturi-Lapin Vesi Oy:n kanssa käytyjen keskustelujen mukaan jäteveden puhdistamon toiminnassa ilmenneitä haasteita ovat:

1. tulevan veden korkea pH, jonka alentamisessa optimaaliselle tasolle on haasteita ja siitä johtuva
2. runsas puhdistuskemikaalin määrä sekä
3. biologisessa puhdistuksessa lietekierron säätäminen ja lietteen iän pysyminen sopivana

Yhtenä suurena puhdistamon toiminnan säätelyä vaikeuttava tekijä on tulevan veden määrän ja laadun suuri vaihtelu. Tunturi-Lapin Vesi Oy on pohtinut toimenpiteinä viemäriverkoston kunnan tarkistusta ja jälkisuodatuksen asentamista.

HybArkt -hankkeen työryhmä antoi puhdistamolle seuraavia toimenpide-ehdotuksia:

- A. Viemäriverkoston kunnan tarkastaminen
- B. Kemikaalimäärän vähentäminen ja kemikaalinsyöttöpaikan vaihtaminen ainakin väliaikaisesti viimeiseen ilmastusaltaaseen kemikaaliannoksen sopivuuden testaamiseksi

Suuri suhteellinen kemikaalimäärä voi heikentää biologisen puhdistuksen tehoa mm. laskemalla veden fosfori (fosfaatti)pitoisuuden liian alhaiseksi, sillä mikrobit tarvitsevat jonkin verran fosforia toimintaan. Jos fosforipitoisuus laskee liian alhaiseksi, lietteen kierrätystä pitää lisätä ja biologisen yksikön toiminnan säätely vaikeutuu. Liian suuri kemikaalipitoisuus vähentää myös toimivan mikrobilietteen määrää (lietteestä suuri osa on tällöin epäorgaanista lietettä), ja siten saattaa heikentää biologisen puhdistuksen tehoa. Sopivan kemikaalimäärän haarukoiminen voi parantaa myös typen poistumista jätevedestä. Sopiva PAX annostelu on arvioilta 80–150 mg/l, kun tuotteen PAX pitoisuus on 50 %. Kemikaaliannostuksen haarukoiminen paremmaksi voisi auttaa sekä lietekierron ja aktiivisen lietemäärän ongelmiin että laskea puhdistamon käyttökustannuksia.

Kemikaalinsyöttöpaikan muuttaminen pysyvästi vaatisi rakenteellisia muutoksia. Siksi kemikaalin syöttömäärän säätö ja syöttöpaikan vaihtamisen vaikutus kannattaisi testata kesäaikaan väliaikaisin syöttöjärjestelyin, ennen kuin tehdään mahdollisia pysyviä muutoksia järjestelmään.

- C. Jälkipuhdistuksessa voisi harkita sekä hakebioreaktoria, että käytöstä poistettuihin altaiisiin rakennettavaa puhdistuskosteikkoa (esim. järviruoko-sammalkasvustolla).

Kumpikin näistä ratkaisuista vaatisi uusia rakenteita, sillä purkupuutki johtaa nyt vedet Naamijokeen niin, että purkupaikka on joessa vesipinnan alapuolella. Vanhoihin altaiisiin on yhteys edelleen olemassa vararatkaisuna, mutta kosteikon rakentamisesta tulisi kustannuksia. Kallossa purkuojaan rakennettu hakebioreaktori on viimeistellyt puhdistusta poistamalla purettavasta puhdistetusta jätevedestä vedestä tehokkaasti mm. nitraattityyppä ja kemikaalikäsittelyn ylijäämäalumiinia.

5.5 Hituran kaivos

Hituran kaivosalue on Nivalassa sijaitseva nikkeli-kaivos, jonka toiminta loppui vuonna 2013. Kaivoksen sulkemistoimenpiteet ovat meneillään ja niiden odotetaan valmistuvan vuoden 2021 aikana. Sulkemistoimia valvoo Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus ja vesienkäsittelyn arvioidaan kestävän kaivosalueella vielä vuosia.

Tässä hankkeessa toteutettujen puhdistusratkaisujen toiminta on tämän tutkimuksen pohjalta tunnettu vain kohtuullisen pienillä metallipitoisuuksilla. Tämän vuoksi päädyttiin miettimään ratkaisuja Hituran kaivosalueella olevan Ryysynojan suotovesiojan vesien käsittelyyn. Ryysynojan vedessä on nikkeliä vuoden 2019 ja 2020 seurannan perusteella keskimäärin 1,2 mg/l. Suotovesiojan vesi on peräisin Hituran omasta rikastushiekasta, ja siinä näkyy jonkin verran jarosiittialueen vaikutus. Ryysynojan vedessä on mitattu touko-marraskuu 2019 välillä lisäksi keskimäärin 6018 mg/l sulfaattia, 8,6 mg/l rautaa, 0,4 mg/l kobolttia, 0,1 mg/l sinkkiä ja 0,04 mg/l kuparia. Ryysynojan veden pH on ollut tarkastelujaksolla keskimäärin 6,76. Hituran ympäristöluvan päästöraja nikkelille on 0,5 mg/l. Ryysynojan virtaama oli vuonna 2020 keskimäärin 4608 m³/kk (vaihteluväli vuonna 2020 tammi-lokakuussa 2477–6382 m³/kk).

Metallien poistoon Hiturassa parhaiten soveltuva menetelmä olisi koivupuuhakebioreaktori. Ryysynojan veden pH on jo optimaalisella tasolla sulfaattia pelkistävien bakteerien toiminnan kannalta. Rautaa olisi hyvä saostaa ennen bioreaktoria ilmastusratkaisulla ja laskeutusaltaalla bioreaktorin tukkeutumisongelmien välttämiseksi. Tässä hankkeessa toteutetun mitoitustyökalun laskelmien perusteella Ryysynojan keskimääräisen virtaaman ollessa 150 m³/vrk, puuhakebioreaktorin koko olisi 1518 m³. Reaktorin toimivuudesta näin suurilla nikkeli- ja kuparipitoisuuksilla ei kuitenkaan ole tietoa. Pyhäsalmen käsittelyn kaivosveden nikkeli- ja kuparipitoisuus oli korkeimmillaan 40 µg/l, ja Ryysynojan nikkeli- ja kuparipitoisuus on keskimäärin noin 50 kertaa suurempi. Pyhäsalmen puuhakebioreaktori poisti tehokkaasti sinkkiä ja kuparia, joiden osalta bioreaktori soveltuisi myös Hituran Ryysynojan vesien käsittelyyn näiden pitoisuuksien ollessa Ryysynojassa huomattavasti alhaisempia kuin Pyhäsalmen. Korkeat metallipitoisuudet voivat olla SRB bakteereille toksisia estäen osittain niiden toiminnan.

6 Käytettävyystarkastelu ja metallien talteenottomahdollisuudet

6.1 Pilottikohteiden kustannustarkastelu

6.1.1 Pyhäsalmen pilotti

Pyhäsalmen kaivoksen yhteyteen rakennetun pilottirakenteen rakennuskustannukset olivat noin 31 500–36 500 euroa (taulukko 10). Kustannuksissa ei ole huomioitu tienrakentamista, mittalaitteita eikä suunnittelua. Näissä kustannuksissa ei ole myöskään huomioitu seurannan ja huoltotoimenpiteiden vaikutusta.

Rakenteeseen pumpattiin keskimäärin 4,5 m³ käsiteltävää kaivosvettä päivässä. Ensimmäiset näytteet rakenteesta otettiin 11.10.2018 ja viimeinen laajempi näytteenotto oli 6.7.2020 (elokuussa 2020 seurattiin vielä sieni-hakeyksikköä). Lokakuun 2018 alkupuolelta heinäkuun alkupuolelle tarkasteltuna, rakenne ehti toimia noin 440 vrk, joten yhteensä sinne johdettiin vesiä noin 1980 m³ pilotin käytön aikana. Kuparin keskimääräinen pitoisuus käsittelyyn tulevassa vedessä oli 0,32 mg/l (vaihteluväli 0,056–0,890 mg/l). Pilotin seurannan aikana käsittelyyn tuli 637 g kuparia, josta keskimääräisen reduktion ollessa 29 %, poistettiin 180 g. Sinkkipitoisuus käsittelyyn tulevassa vedessä oli keskimäärin 2,78 mg/l (vaihteluväli 0,77–5,8 mg/l) ja sinkkiä tuli käsittelyyn yhteensä 5,51 kg. Keskimääräisen reduktion ollessa 72 %, pilottirakenne pidatti 3,97 kg sinkkiä.

Pilotointi- ja käynnistysvaiheessa vesienkäsittelyrakenteen toimivuuden seurantaan tarvitaan tiheämmin kuin vakituudessa käytössä oleville käsittelyratkaisuille. Pyhäsalmen pilotissa käsiteltiin rautapitoisia vesiä, jotka aiheuttavat haasteita rakenteiden toimivuudelle rautasakan runsaan muodostumisen vuoksi. Tällaisissa kohteissa huoltokustannukset voivat olla huomattavat. Pyhäsalmen suurimpia haasteita oli raudan saostuminen rakenteisiin sekä pumppujen toiminnan häiriöt ja niistä johtuneet katkokset pilottirakenteen toiminnassa.

6.1.2 Kallon pilotti

Kallon kyläjätevedenpuhdistamon yhteyteen rakennetun pilottirakennelman rakennuskustannukset olivat arviolta noin 26 500–31 500 euroa sisältäen rakennustyön mutta ei suunnittelua (taulukko 10). Vesiosuuskunta tarjosi talkooapua. Myös kaivinkonetyöt saatiin talkoilla, joten niiden hinnasta on esitetty arvio Pyhäsalmen pilotinrakennuskustannusten perusteella. Lisäksi tulevat seurannan ja huollon kustannukset, joita ei ole tässä huomioitu.

Kyläjätevedenpuhdistamoiden toiminta on usein kyläläisten muodostaman vapaaehtoisen vesiosuuskunnan tai muun vastaavan tahon vastuulla. Puhdistamolla kemikaloinnista ja pumppujen toiminnasta huolehditaan melko säännöllisesti pari kolme kertaa viikossa, mutta esim. laskeutus-/selkeytysaltaiden täyttymisen seuranta ja tyhjennystarpeen arviointi on satunnaista. Tällaisissa vapaaehtoistoimintaan perustuvissa yhteisöissä puhdistamon toiminnan häiriötilanteet voivat jäädä huomaamatta päiviksi tai viikoiksi. Lisäksi toimintaa pyörittävillä henkilöillä ei välttämättä ole kokonaisvaltaista tietoa harvemmin tehtävien puhdistustoimenpiteiden tarpeellisuudesta ja riittävästä puhdistustiheydestä. Nämä aiheuttavat luonnollisesti haasteita jätevedenpuhdistusjärjestelmien optimaaliselle käytölle. Haja-asutusalueilla pienissä yhteisöissä myös puhdistamolle tulevan jäteveden määrä ja laatu vaihtelee voimakkaasti eri vuorokauden aikoina sekä kausittain mm. lomakausien vuoksi. Tällöin myös passiivisten käsittelyratkaisujen mitoitus on haastavaa.

Kallon pilotin toiminnan arviointi on haastavaa johtuen puhdistamon oman toiminnan ongelmista. Hankkeen lähestyessä loppua vaikutti siltä, että nämä ongelmat saatiin ratkaistua, mutta suuntaa antavia tuloksia tyyntä poistosta tämän jälkeen ehdittiin saada vain yhdeltä näytteenotokerralta.

6.1.3 Levin Pilotti

Levin hulevesijärjestelmän purkuputken suulle rakennetun pilottirakenteen rakennuskustannukset olivat arviolta noin 5000–7000 euroa (taulukko 10). Tässä ei ole huomioitu suunnittelun, seurannan ja huolto-toimenpiteiden kustannuksia.

Levin pilotin suhteen törmättiin mitoitusongelmiin. Ensimmäisen kesän tuloksista ei pystytty arvioimaan pilotin toimintaa johtuen enimmäkseen liian suuresta virtaamasta. Seuraavan kesän aluksi käsittelyyn otettiin vain osa vesistä, ja ratkaisu vaikutti toimivammalta.

Taulukko 10. Pilottirakenteiden rakennuskulut.

	Pyhäsalmi (€)	Kallo (€)	Levi (€)
Tarvikkeet	12 000 – 14 000	7 000 – 9 000	1 000
Kaivinkone	4 500	4 500	-
Työkustannukset	15 000 – 18 000	15 000 – 18 000	4 000 – 6 000
Yhteensä	31 500 – 36 500	26 500 – 31 500	5 000 – 7 000

Työkustannuksiin ei ole huomioitu suunnittelua, tien ja parkkialueen rakentamista eikä seurantaa. Kallossa kaivinkonetyöt saatiin Kallon vesi- ja viemäriosuuskunnan tekemillä talkootöillä, joten niiden kustannukset on arvioitu Pyhäsalmen pilotin kaivinkonekustannusten perusteella.

6.2 Yksikkökohtainen käytettävyystarkastelu

6.2.1 pH:n nostoyksikkö, hapetuskaivo ja laskeutusaltaat

Jos käsiteltävä vesi on hapanta, useiden muiden käsittelyprosessien optimaalisen käytön vuoksi on suositeltavaa käyttää pH:n nostoyksikköä. pH:n nosto on tarpeen myös, mikäli hapan vesi sisältää paljon rautaa, ja muiden käsittelymenetelmien toimivuuden kannalta on tarpeen saostaa rauta mahdollisimman hyvin ennen muuta käsittelyä. pH:ta voidaan nostaa erilaisilla teollisuuden sivutuotteilla mm. OPA-sakka, betonimurske tai kaupallisilla kalkkivalmisteilla, kuten kalsiittirakeilla. Passiivisen pH:n noston kustannukset ovat suhteellisen pieniä, mutta passiiviset menetelmät soveltuvat lähinnä pienille vesimäärille. pH:n säätämiseen käytettäviä materiaaleja on helposti saatavilla ja niiden toiminta tunnetaan.

Rauta saostuu helposti, kun veden pH nousee ja vedessä on riittävästi happea. Happea voidaan lisätä veteen mm. hapetuslautasten avulla. Hapettamiseen käytettävät menetelmät ovat yksinkertaisia ja halpoja. Usein riittää veden juoksuttaminen pienen pudotuskorkeuden yli esimerkiksi tasoa pitkin. Ilmastukselle on kuitenkin varattava jonkin verran maapinta-alaa isomman mittakaavan vesienkäsittelyrakenteessa.

Kun liukoinen kahdenarvoinen rauta on saatu hapetettua kolmenarvoiseksi raudaksi, se saostuu ja voidaan laskeuttaa laskeutusaltaaseen. Raudan määrän mukaan laskeutusallas voi hyvin nopeasti täytyä sakasta, jolloin sen huoltoväli on pieni. Toisaalta saostumien laskeuttaminen vaatii riittävän suuren laskeutusaltaan mikä on haaste etenkin, jos käsiteltävä vesimäärä on suuri, ja maapinta-alaa vesienkäsittelylle on rajallisesti. Muodostuvan rautapitoisen lietteen määrä on usein suuri ja sen kuiva-ainepitoisuus pieni. Lietteen jatkokäsittely ja loppusijoitus on haastavaa. Liette voidaan läjittää lähialueelle mutta tämä vaatii taas lisää maapinta-alaa.

Kaikkien edellä mainittujen prosessien suurin haaste on raudan nopea saostuminen. Muodostuva rautasakka tukkii passiivisessa pH:n säädössä käytettävien emäksisten kalkki- ja/tai betonimateriaalien pinnan heikentäen niiden tehoa. Materiaaleja täytyy puhdistaa tai vaihtaa aika-ajoin. Pyhäsalmissa huoltoväli pH:n nostoyksiköille olisi ollut noin 3 kk. Myös hapetusratkaisujen rakenteet tukkiutuvat helposti rautasakasta ja ne tulisi puhdistaa säännöllisesti. Laskeutusallas voi täytyä nopeasti, jolloin sen huoltovälin täytyy olla riittävän tiheä. Kaikki nämä huoltotoimenpiteet lisäävät vesienkäsittelyn kustannuksia.

6.2.2 Sienihakeyksikkö

Sienihakeyksikkö tässä hankkeessa koostui puuhakkeesta ja siihen ympätystä osterivinokkaasta. Rakennelma tulee rakentaa siten, että se on vain osittain vedenpinnan alapuolella. Tasaisempien lämpötilaolosuhteiden saavuttamiseksi sienihakeyksikkö voidaan peittää eristysmateriaalilla, sillä sienet eivät tarvitse valoa. Sienihake tulee asentaa riittävän ilmavaan rakenteeseen, jotta vesi pääsee virtaamaan sen läpi. Sienien kasvualustana toimiva puuhake lahoaa vesienkäsittelyssä, ja on vaarana, että siitä irtoava kiintoaines karkaa rakenteesta. Viipymän tulisi olla suhteellisen pitkä, joten rakenne tulee suunnitella riittävän isoksi virtaamaan nähden, ja se soveltuu käytännössä vain pienille virtaamille.

Hankkeessa Pyhäsalmele toteutetussa sienihakeyksikössä ollut materiaali vaihdettiin 1,5 vuoden käytön jälkeen, koska materiaali alkoi lahoamaan nopeasti ja sienirihmasto oli todennäköisesti myös kärsinyt upoksissaolo -tilanteiden vuoksi. Kallossa sienihake puolestaan oli kärsinyt lietteen ylitulvimisesta ja lahonnut pitkälle, joten sienihake vaihdettiin uuteen vuoden päästä käytön aloituksesta. Sienihakkeen loppusijoituksessa yksi vaihtoehto on polttolaitos, jossa siihen kertyneet metallit ja haitta-aineet käsitellään asianmukaisesti, mutta myös muut metallien talteenottomenetelmät voivat olla potentiaalisia (kts. 6.3).

6.2.3 Bioreaktorit

Tässä hankkeessa tutkitut passiiviset bioreaktorit olivat koivupuuhakebioreaktoreita. Bioreaktoreissa käytettiin koivupuuhaketta ja Pyhäsalmele toisessa osin myös kuusipohjaista biohiiltä hiilenlähteenä ja Kallossa perunankuorimateriaalia. Bioreaktorin rakenne tulee eristää sekä tasaisempien lämpötilaolosuhteiden saavuttamiseksi, mutta myös, jotta bioreaktoriin saadaan sulfaattia pelkistävien SRB bakteerien ja nitrifikaatiobakteerien toiminnan kannalta tarpeelliset hapettomat ja pelkistävät olosuhteet. Eristämiseen voidaan käyttää muussa Finnfoam -eristyslevyä tai kuivaa puuhakekerrosta (esim. noin 0,5 m) ja Kadlec & Wallage (2009) mukaan 15 cm kate esim. oljesta on ollut riittävä eristyskerros horisontaalisen maanalaisen virtauksen kosteikolla jopa -45 °C lämpötilassa. Rakentamisvaiheen kaivannot vaatinevat kaivinkonetyötä.

Koivupuuhake on suhteellisen edullinen materiaali bioreaktoreihin. Kuitenkin koivupuuhakkeen kuljetuskustannukset voivat nousta merkittävän korkeiksi, jos sitä ei ole lähialueelta saatavissa. Tällöin vaihtoehtoina voi olla hakettimen yms. vuokraus. Tässä hankkeessa saimme puuhakkeen valmiina, mutta CircVol -hankkeen puitteissa Välimaan kiertotalousalueelle rakennettuun hulevesien käsittelyyn tarkoitettuun puuhake-biohiilisuodattimeen hake tehtiin paikan päällä. Tässä oli käytössä mallimerkinnältään BRUKS 605PT haketin, jonka haketusteho on noin $100\text{--}150\text{ m}^3/\text{h}$ hakettavan materiaalin mukaan, ja jonka käyttövoima tulee traktorista NH 7060 n.350 hv moottorista (Niemelä 2020). Lisäksi käytettiin seulaa (Metso ST 3.5) erottelemaan hieno ja ylisuuri puuaines pois. Hakettimen tuntihinta oli 175 € (+alv) ja seulan 115 € (+ alv). Näiden lukujen perusteella voi arvioida oman haketuksen kustannuksia.

Molemmat typen ja metallien poistoon suunnitellut bioreaktorit perustuvat biologisiin prosesseihin, joten bioreaktorin käynnistysvaiheessa on varattava aikaa bakteeriyhteisöjen muodostumiselle ja biologisten prosessien käynnistymiselle. Puuhake toimii bioreaktoreissa hiilen lähteenä, jolloin puuhakkeen hajoaminen on välttämätöntä bakteerien toiminnalle. Puuhakkeen hajoaminen on hidasta, mikä voi osaltaan hidastaa bioreaktorin käynnistymisvaihetta. Bioreaktorissa voidaan käyttää myös muita helpommin mikrobien käytettävissä olevia hiilenlähteitä, esimerkiksi biohiiltä, kuten tässä hankkeessa on käytetty. Biologisten prosessien tehostamiseksi bioreaktoriin voi lisätä myös bakteeriympästä, eli materiaalia, jossa on valmiiksi tarvittavaa bakteerikantaa, jolloin prosessin käynnistyminen nopeutuu. Kallon bioreaktorissa tällaisena bakteeriympästä käytettiin perunankuorimateriaalia.

Typen poistoon tarkoitettussa bioreaktorissa typpi haihtuu kaasuna ilmaan eikä kerry rakenteisiin. Typen poistoon tarkoitettut bioreaktorit ovat pitkäikäisiä ja niiden huoltoväli on pitkä. Metallien poistoon tarkoitettussa bioreaktorissa metallit poistuvat vedestä saostumalla bioreaktoriin, jolloin saostumia kertyy rakenteisiin. Tämä voi aiheuttaa haasteita bioreaktorin virtausolosuhteisiin eli saostumat voivat tukkia

puuhakkeen. Bioreaktori vaatii huoltoa ja puuhake tulee huuhdella tai vaihtaa aika ajoin. Tämän hankkeen aikana tällaista puuhakkeen huuhtelu- tai vaihtotarvetta ei vielä tullut vähän vajaan kahden vuoden testauksen aikana, joten vaihtovälistä ei voida vielä sanoa. Metallien talteenottoon tarkoitetuissa bioreaktoreissa metallit osittain myös adsorptoituvat puuhakkeeseen. Käytetty puuhake on suositeltavaa toimittaa asianmukaiseen polttolaitokseen, jolloin siihen kertyneet metallit ja haitta-aineet on mahdollista kerätä talteen tuhkasta tai voidaan käyttää muita metallien talteenottomenetelmiä (kts. 6.3).

6.2.4 Sammalyksikkö

Hankkeen sammalyksiköt olivat pieniä, ja niihin tehtiin tutkimuksen edetessä useita rakenteellisia muutoksia. Kasvupaikaltaan siirretyn sammalkasvuston kanssa haasteena on kiinnittää se verkko- ja allasratkaisuille maastoon siten, etteivät sammat lähde veden virtauksen mukana liikkeelle. Nevasirppisammal on vapaasti vedessä kelluva vesikasvi, joka kiinnittyy juurtumahapsillaan yhteen. Sammalyksikköä suunniteltaessa materiaalia on oltava riittävästi, mutta altaiden ja verkkojen tulee olla riittävän harvarakenteisia, että veden virtaus ohjautuu sammalyksikön läpi eikä kierrä niitä. Myös mitoitus tulee kiinnittää huomiota siten, että viipymä on riittävän suuri ja virtaama pienehkö.

Sammalten käyttäminen on suhteellisen edullista mutta luvanvaraista toimintaa. Sammalen keruupaikka tulee valita käsittelypaikan lähistöltä siten, että sammal on puhdasta eikä siihen ole kertynyt vielä haitta-aineita. Sammal voidaan loppusijoittaa polttolaitokseen.

6.2.5 Kosteikko

Tämän hankkeen rakennetulla kosteikolla käytettiin järviruokoa. Uusiin rakennelmiin siirrettävän kasvi-biomassan hankintaan tulee kiinnittää huomiota siten että se siirretään puhtaalta kasvupaikalta, jolloin siihen tai juurakoihin ei ole valmiiksi kertynyt metalleja tai muita haitta-aineita. Kun kasvimateriaali siirretään puhtaalta alueelta esim. kaivosjäteveeteen, tulee varautua kasvin ns. sopeutumiseen erilaisiin kasvuolosuhteisiin. Osa kasveista ei välttämättä selviä erilaisissa kasvuolosuhteissa ja kuolleet kasvit tulisi tarvittaessa vaihtaa uusiin.

6.3 Metallien talteenottomahdollisuudet

Elinkaariajattelun, kiertotalouden sekä luonnonvarojen kestävä käytön näkökulmasta puhdistusratkaisussa käytettyjen materiaalien kierrätettävyyden, puhdistusprosessien uudelleen käynnistäminen sekä pädätyneiden aineiden hyödyntäminen ovat keskeisiä teemoja. Erityisesti kriittisiksi tunnistettujen raaka-aineiden (EU, 2020) talteenotto ja hyödyntäminen vähentävät paineita neitseellisten raaka-aineiden käytöstä, mutta samalla mahdollistavat mm. sähköautojen, akkuteollisuuden ja vihreän teknologian kehittämisen, mikä on avainasemassa siirryttäessä kohti ilmastoneutraalia taloutta. Vuoden 2020 tiedoksiannossa EU listasi yhteensä 28 kriittistä raaka-ainetta, joiden joukossa on mm. koboltti ja fosfori (EU, 2020), joita analysoitiin myös HybArkt -hankkeessa. Lisäksi listassa on mukana esimerkiksi antimoni, joka on Suomessa tunnistettu yhdeksi merkittäväksi kaivosvesien ongelmaksi ja luontoa pilaavaksi alkuaineeksi. Näiden lisäksi kuparin saatavuuden on arvioitu merkittävästi vähenevän tulevaisuudessa (Prior ym. 2013) ja siksi sen talteenottoon soveltuvia menetelmiä kehitellään.

HybArkt -hanke keskittyi yleisesti metallien ja typen poiston tehostamiseen erilaisilla puhdistusratkaisuille siitä näkökulmasta, mitä aineita hankkeen testauksiin valituissa vesillä oli. Hakebioreaktorissa, kuten myös muissa denitrifikaatioprosesseihin perustuvissa menetelmissä, typen puhdistuksen lopputuotteenä syntyy typpikaasua, joka vapautuu ilmaan. Näin ollen siinä ei ole potentiaalia talteenoton kehittämiseksi. Kasvien ravinteiden otto sen sijaan kerryttää typpeä kasvibiomassaan, josta sitä voidaan edelleen hyödyntää ravinteina. On kuitenkin syytä huomata, että metalleja sisältävissä vesissä metallipitoisuudet voivat rajoittaa biomassan käyttöä. Tätä tulisi erikseen selvittää.

Metallien poistuminen passiivisissa puhdistusratkaisuissa perustuu joko erilaisiin kemiallisiin tai mikrobiologisiin prosesseihin, jonka seurauksena vedessä alkujaan liuenneet metallit saostuvat ja pidättyvät vesienkäsittely-yksikköön. Erityisesti metallien talteenotto sulfaatin pelkistysbakteerien avulla on viime vuosina saanut paljon huomiota (esim. Kumar ym. 2020). Sen hyötyinä verrattuna perinteisiin menetelmiin nähdään olevan se, että 1) lopputuotteena syntyy liukenemattomia suoloja alhaisessa pH:ssa (< 3), 2) prosessi on selektiivinen, jolloin voidaan keskittyä tiettyihin metalleihin ja, että 3) syntyneellä metallisakalla on hyvä laskeutumisnopeus, se tiivistyy helposti ja ylimääräinen vesi saadaan helposti pois (Djedidi ym. 2009). Näiden lisäksi menetelmän kustannukset ovat matalia verrattuna muihin metallien talteenottomenetelmiin (Kumar ym. 2020). Metalleja poistuu myös adsorptiossa, jossa aineet kiinnittyvät partikkelien pinnalle. Nämä molemmat prosessit mahdollistavat metallien talteenoton puhdistusyksiköstä. Erityisesti kaivosvesien käsittelyssä kiinnostusta on herännyt selvittää metallien rikastamisen tehostamisen mahdollisuuksia hyödyntämällä myös vesienkäsittely-yksikköön pidättyneet metallit. Metallien talteenoton kannattavuuden tarkastelussa tulee huomioida ainakin seuraavat asiat:

- Kuinka paljon metallia kertyy yksikköön?
- Kuinka usein vesienkäsittely-yksikkö (e tulisi puhdistaa ja saostuneet aineet kerätä pois?)
- Millaisessa muodossa metallit ovat?
- Mitkä ovat kokonaiskustannukset materiaalin vaihdosta, esikäsittelystä ja metallien talteenotosta kokonaisuudessa suhteessa saatuun alkuainemäärään?

Luonnonmateriaalien, kuten puuhakkeen ja kasvibiomassan käyttö metallien keräämiseen edellyttää yleensä materiaalin polttamista ennen kuin metallit voidaan ottaa talteen. Esimerkiksi turvetta tai muuta orgaanista ainetta polttavien Suomen lämpövoimaloiden tuhkan sisältämällä harvinaisia maa-alkuaineita on selvitetty, ja nähty niissä potentiaalia alkuaineiden talteenotolle. Kuitenkin vain yhdessä tutkittujen viiden laitoksen tuhkassa pitoisuudet olivat riittävän suuret, jotta alkuaineiden hyödyntäminen olisi kustannuksiltaan kannattavaa (Perämäki ym. 2020). Huomattavaa on kuitenkin, että yleiset polttolaitokset eivät käsittele materiaalia, jota on käytetty aineiden poistamiseen eli oletettavaa on, että metalleja puhdistavan yksiköstä peräisin olevassa tuhkassa pitoisuudet olisivat korkeammat kuin yleisissä polttolaitoksissa. Esimerkiksi yhdyskuntajätevesien puhdistusprosessissa syntyvän lietteen polttolaitoksen tuhkasta on tunnistettu potentiaalia metallien talteenottoon, mutta lietteen esikäsittelyllä on suuri vaikutus metallien talteenoton kannattavuuteen (Šyc ym. 2020).

Polton lisäksi puuhakkeesta metallisakan peseminen tai huuhteleminen voisi olla yksi tapa erottaa saostumat hakkeesta. Tällöin perinteiset metallien talteenoton menetelmät, jotka perustuvat liotukseen kontrolloiduissa olosuhteissa, voisivat olla potentiaalisia. VTT:n vetämässä laajassa METGrow+ -hankkeessa testattiin ja kehitettiin metallien talteenottoa metallijalostamoiden sivuvirroista (Spooren ym. 2020). Esimerkiksi kuparin, nikkeli ja sinkin osalta bioliuotukseen perustuvat tulokset olivat lupaavia ja saanto optimaalisissa oloissa jopa 70 % jätteen sisältämästä metallista (Williamson ym. 2021).

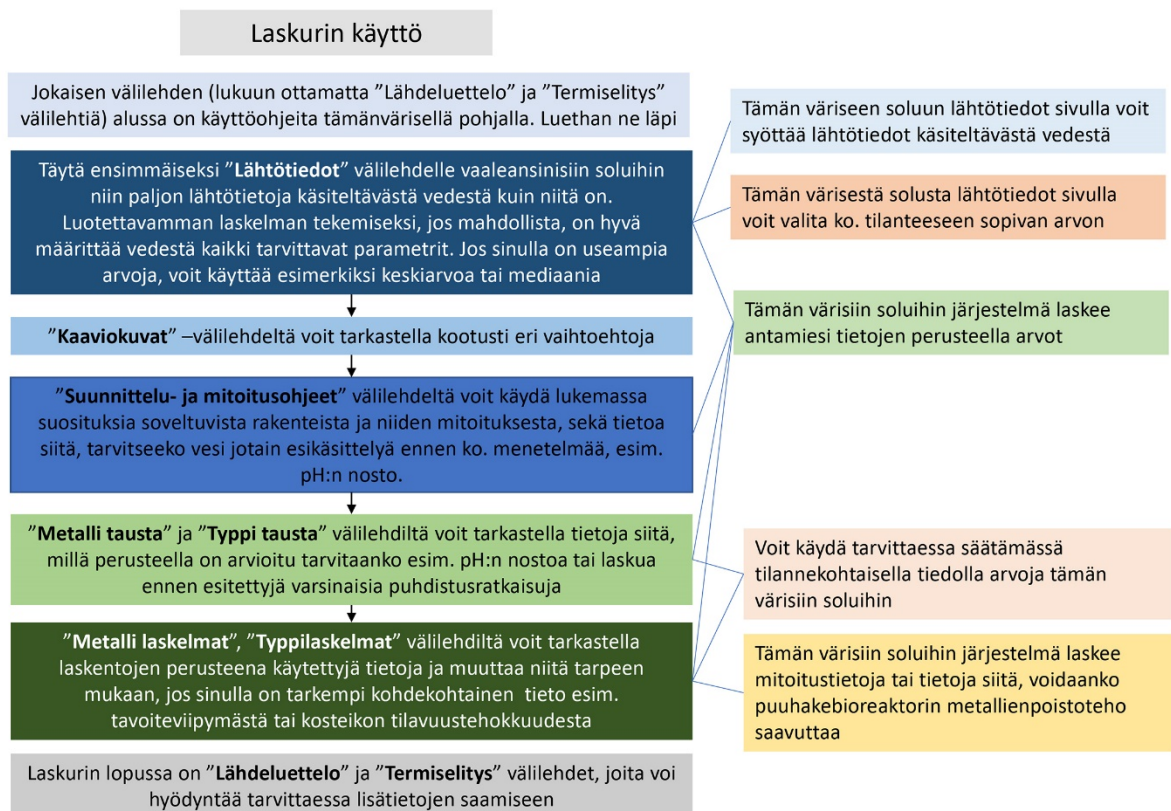
HybArkt -hankkeessa Pyhäsalmen koivupuuhake (+biohiili) bioreaktoreiden metallipoistumien avulla arvioitiin, että nikkeliä kerääntyi 634 päivän aikana noin 12 kg, kuparia 205 kg, kobolttia 13 kg, alumiinia 1250 kg, kromia 0,5 kg, kadmiumia 3 kg ja sinkkiä noin 170 kg (taulukko 11). Nämä metallimäärät eivät ole suuria, mutta esimerkiksi kuparin (6010 €/tonni) ja sinkin (2241 €/tonni) maailmanmarkkinahinnat (<https://www.metalcentergroup.fi/metallihinnat>) huomioiden ja huomioiden myös sen, että näitä metalleja pidättyi hakereaktoriin määrällisesti eniten, täyden mittakaavan metallienpoistoyksikössä metallien määrät voivat olla jo merkittäviä. Kuitenkin metallien talteenoton potentiaalin arvioimiseen tarvitaan lisää mittauksia, selvityksiä, testauksia sekä kustannuslaskelmat toiminnan kannattavuudesta.

Taulukko 11. Eri metallien pidättyneet määrät Pyhäsalmen koivupuuhake(+biohiili)bioreaktoreissa.

Metalli	Keskimääräinen tulo- ja lähtöpitoisuuden ero (mg/m3)	Pidättynyt määrä (kg)	Pidättynyt määrä haketilavuudessa (kg/m3)
Nikkeli	13	12,4	1,2
Kupari	216	205	20
Koboltti	14	13,3	1,3
Alumiini	1320	1255	123
Kromi	0,55	0,52	0,1
Kadmium	3,3	3,1	0,3
Sinkki	186	177	17

7 Mitoitus- ja suunnittelutyökalu

Hankkeessa on suunniteltu excel-pohjainen mitoitus- ja suunnittelutyökalu, jolla voidaan arvioida eri puhdistusmenetelmien soveltuvuutta typen ja metallien (rauta, alumiini, kupari, nikkeli, sinkki, kromi) puhdistamiseen. Kun laskurin ”Lähtötiedot” välilehdelle syöttää käsiteltävän veden tiedot ja puhdistustavoitteet, voi ”Suunnittelu- ja mitoitusohjeet”- välilehdeltä katsoa minkä kokoisia eri yksiköiden tulisi olla ja tarvitsevatko ne jotakin esikäsitelyä esim. pH:n nosto tai lasku (kuva 57). Jos käyttäjällä on tarkempia tilannekohtaisia tietoja, niitä voi käyttää muuttamassa ”Metalli tausta”, ”Typpi tausta”, ”Metalli laskelmat” ja ”Typpilaskelmat”- välilehdille.



Kuva 57. Mitoitus- ja suunnittelutyökalun rakenteen kuvaus ja käytön ohjeistus.

Typen poistamisessa vaihtoehtoina käydään läpi nitrifikaatioprosessin osalta sammalyksikkö, ilmastettu leijupetibioreaktori ja kosteikko. Denitrifikaatioprosessin osalta käydään läpi puuhakebioreaktori ja kosteikko. Lisäksi tarkastellaan laskeutusta kiintoaineen/kiintoaineeseen sitoutuneen typen poistajana. Metallien osalta käydään aluksi läpi lasketusallas, kiintoaineessa tai kiintoainemuodossa olevien metallien poisto ja ilmastusportaattien raudan hapettamiseen. Tämän jälkeen käydään läpi eri mahdollisuuksia: puuhakebioreaktori, sammalyksikkö tai sienihakeyksikkö metallin poistossa.

8 Yhteenveto ja johtopäätökset

Typpikuormitusta ja/tai raskasmetallipitoista kuormitusta vesistöihin muodostuu mm. kaivostoiminnassa, jätevedenpuhdistamoilla, hulevesistä, maataloudesta ja turvetuotannosta. Monissa näissä kohteista passiiviset vesienkäsittelymenetelmät voivat olla ratkaisu tai osaratkaisu vesien puhdistamiseen kustannustehokkaasti. Kosteikkoja käytetäänkin jo usein vesienpuhdistukseen. Kuitenkaan yksittäisiä ratkaisuja ei voida useinkaan käyttää optimaalisesti erilaisten aineiden puhdistamiseen. Tällaisessa tilanteessa erityyppisten passiivisten yksikkökomponenttien yhdistämisellä (ns. hybridiratkaisulla) voitaisiin jäte- tai valumavesiä puhdistaa siten, että ratkaisu huomioi paremmin kuormituslähteen vedenlaadun ja puhdistustarpeet. Suomen olosuhteissa hybridiratkaisuista ei ole juurikaan tietoa, mutta lämpimämmissä olosuhteissa niistä on saatu onnistuneita kokemuksia. HybArkt –hankkeen tarkoituksena olikin uuden tiedon tuottaminen hybridiratkaisujen suunnittelusta ja mitoituksesta kylmiin olosuhteisiin. Lisäksi hankkeessa oli tarkoituksena tutkia ja optimoida pohjoisiin olosuhteisiin sopeutuneiden luonnonkasvien, sienten ja bakteerien kykyä pidättää vedestä typpeä ja raskasmetalleja. Näiden pohjalta tavoitteeksi asetettiin erilaisten toimintojen vesistökuormituksen pienentäminen kustannustehokkaasti passiivisilla menetelmillä.

HybArkt -hankkeessa kerättiin aluksi yhteen kirjallisuustietoa erilaisien passiivisten yksiköiden toimivuudesta erityisesti typen ja/tai metallien puhdistuksen suhteen. Tällaisia puhdistusyksiköitä olivat laskeutusaltaat, kosteikot, sammalet ja niiden mikrobikumppanit, sienihake, putkilokasvien käyttö, bioreaktorit ja neutralointiyksiköt. Nitrifikaation tehostamiseen liittyen tarkasteltiin myös aktiivisia menetelmiä.

Käsittelymenetelmistä kootun kirjallisuustiedon ja hankkeen pilottikohteista, eli Pyhäsalmen kaivoksesta, Kallon jätevedenpuhdistamolta ja Levin hulevesiojastosta, kerätyn tiedon perusteella suunniteltiin, mitoitettiin ja rakennettiin hybridipilottirakenteet. Pyhäsalmen kaivoksen pilottirakenteessa käsiteltiin ns. eristysojan vesiä, jotka koostuivat rikastushiekka-aldaiden suotovesistä, metsäalueelta tulevista valumavesistä ja vanhan metalleilla kontaminoituneen alueen vesistä. Täällä erityisesti metallien, kuparin, sinkin ja raudan poisto oli tavoitteena. Suunniteltu rakennekokonaisuus koostui pH:n nostoyksiköistä, hapetuskaivoista, laskeutusaltaista, sienihakeyksiköstä, koivupuuhake (+biohiili) bioreaktoreista ja kosteikosta. Lisäksi erillisenä ojassa testattiin nevasirppisammal -yksikköä. Kallon jätevedenpuhdistamolla keskityttiin typenpoiston tehostamiseen. Täällä nitrifikaation tehostamiseen asetettiin laitoksen sisälle biologisen ja kemiallisen osan väliin ilmastettu leijupetibioreaktori, joka ei ole passiivinen yksikkö. Puhdistamon jätevesien purkuojastoon rakennettiin laskeutusallas, sammalyksiköt, sienihakeyksikkö ja koivupuuhake (+perunankuorimateriaali) bioreaktorit. Levin hulevesien purkurakenteessa tavoitteena oli sekä typen että metallien poisto. Levin suunniteltiin ja rakennettiin laskeutustilaa, sammalyksikkö, sienihakeyksikkö ja järviruokokasvustoa ojan reunoille tehostamaan tulva-aikaista vesienkäsittelyä. Rakenteita seurattiin mm. vesinäytteenotoin 1–2 vuoden ajan ja lisäksi v-mittapadoille asetettiin pinnankorkeusmittareita virtaamien mittaamiseksi.

Mitoitusta ja/tai suunnittelua toteutettiin myös muille hankesuunnitelmassa sovituille toimijoille. Kolmessa kaivoskohteessa tavoitteena oli typen tai nikkelin poistomahdollisuuksien arviointi. Kahdessa jätevedenpuhdistamossa tavoitteena oli typenpoiston tehostaminen. Lisäksi hankkeesta saadun ja kirjallisuuslähteistä löytyvän tiedon pohjalta laadittiin mitoitus- ja suunnittelutyökalu typen ja/tai metallien poiston tehostamiseksi.

Tulosten perusteella Pyhäsalmen pilottiyksiköllä saatiin hyvin poistettua monia metalleja, kuten kuparia, sinkkiä ja rautaa. Kuitenkin havaittiin, että pH:n nostoyksikkö oli liian tukkeutumisherkkä ja rautaa pääsi vielä paljon myös bioreaktoreihin. Kallon jätevedenpuhdistamolla se osa ammoniumtypestä, mikä saatiin muutettua nitriitti-nitraattitypeksi, saatiin myös poistumaan pilottirakenne -kokonaisuuden avulla. Ylimääräisen lietteen poisto olemassa olevan puhdistamon prosesseista säännöllisesti havaittiin erittäin tärkeäksi, sillä muutoin se kuormittaa ja heikentää turhaan typenpoistoon tarkoitettujen yksikköjen toimivuutta. Levin pilottirakenteessa huomattiin, että liian suuri virtausnopeus rajoittaa puhdistusprosesseja, ja että hulevedessä havaittujen alhaisten metallipitoisuuksien poistossa on haasteita. Kuitenkin

virtausnopeutta pienentämällä erityisesti typen puhdistusta saatiin tehostettua sammal- ja sienihakeyksi-
kössä. Vaikka jokaisessa pilottirakenteessa oli omat haasteensa, saatiin niistä kuitenkin lupaavia tuloksia
ja havaintoja, joiden avulla niiden toimivuutta voidaan parantaa. Hankkeen aikana seurantaan voitiin tehdä
vain enimmillään 1-2 vuoden ajan, mutta pitkäaikaisen toimivuuden, käyttöiän ja huoltovälien arvioi-
miseksi olisikin tärkeää saada pidempiaikaista seurantatietoa rakenteista. Tämä tieto on edellytys sille,
että soveltuvimpia ratkaisuja alettaisiin hyödyntämään laajamittaisemmin vesienkäsittelyssä. Pidempiai-
kaisten seurantatietojen ja muista rakenteista mahdollisesti tulevaisuudessa saatavien tietojen perusteella
myös mitoitus- ja suunnittelutyökalua voitaisiin päivittää.

Hankkeesta saatujen tulosten ja kirjallisuustiedon perusteella rakenteiden eristämällä voidaan hyvin
mahdollistaa rakenteiden toimintaa myös pohjoisissa kylmissä olosuhteissa. Esimerkiksi bioreaktoreissa
biologiset puhdistusprosessit toimivat läpi talven. Kuitenkin esimerkiksi kosteikolla havaittiin jäätyminen
aiheuttamia haasteita. Sammalet ovat sopeutuneet kylmiin olosuhteisiin ja pystyvät toimimaan niissä.
Tärkeää on kuitenkin huolehtia, että käsiteltävä vesi pysyy sulana, eikä jäädy esim. putkistoihin, ja että
vedelle on suunniteltu varavirtausreitit rakenteen ohi. Tämä tarve korostuu passiivisissa hybridipilottira-
kenteissa, joissa ei tyypillisesti ole aktiivisten laitosten sisätilan mukanaan tuomaa lämmitystä.

Hyvin toimivien passiivisten hybridiratkaisujen osalta isoin etu tulee siitä, että ne eivät tarvitse jat-
kuvaa huoltoa ja/tai jonkun aineen lisäämistä. Esimerkiksi hankkeessa testatut pH:n nostoyksiköt eivät olleet
huoltotarpeensa vuoksi tällaisia, toisin kuin esim. puuhakebioreaktorit. Passiivisissa hybridiratkaisuissa
ei myöskään tule sähkön kulutusta, jos vesi saadaan virtaamaan painovoimaisesti rakenteeseen, eikä sitä
tarvitse pumpata. Kaikissa paikoissa tämä ei kuitenkaan maanpinnanmuotojen takia onnistu. Jos passiivi-
sissa hybridiratkaisuissa käytetään luonnonmateriaaleja, kuten puuhake, tai sivutuotemateriaaleja, kuten
perunankuorimateriaali tai betonimurske, voidaan edistää kiertotaloutta ja välttää vedenpuhdistuskemi-
kaalien valmistuksen kustannukset ja ympäristöhaitat, esim. kasvihuonekaasupäästöt. Todennäköisesti
tuotteet myös saadaan lähempää, jolloin kuljetuskustannukset ja kuljetuksen kasvihuonekaasupäästöt pie-
nenevät. Kun puhdistetaan metallipitoisia vesiä, jäljelle jää menetelmästä riippumatta metallipitoista ma-
teriaalia, jonka jälkikäyttömahdollisuudet tulee selvittää.

Testatuista hybridiratkaisujen osista joidenkin nähdään soveltuvan myös isoille vesivolyyymeille, esi-
merkiksi laskeutusaltaiden, kosteikkojen ja puuhakebioreaktoreiden muodostamat kokonaisuudet. Osa
ratkaisuista toimii paremmin pienemmille vesimäärille. Passiivisia ratkaisuja voi helpommin hajasijoittaa
kuin aktiivisia vedenkäsittelylaitoksia, jolloin voidaan kohdistaa vedenkäsittelyä esimerkiksi kaivosalu-
eilla niihin kohtiin, joissa pitoisuudet ovat korkeampia, ja käsiteltävät vesimäärät yksikköä kohden pie-
nempiä. Esimerkiksi kaivosalueella tai kaupungin hulevesienkäsittelyssä puhdistusrakenteita voisi sijoit-
taa niihin ojiin, joissa vedenlaadun puhdistustarvetta on eniten. Tällöin kuormitusta voidaan vähentää
tehokkaammin, kun jos käsiteltäisiin isompia laimentuneita vesimääriä.

Lähteet

- Airola, J., Nurmi, P., & Pellikka, K. 2014. Huleveden laatu Helsingissä. Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkaisuja 12/2014. 68 s.+liitteet. ISBN 978-952-272-730-5
- Arbanah M., Miradatul Najwa, M. R., Ku Halim K. H. 2013. Utilization of *Pleurotus ostreatus* in the removal of Cr(VI) from chemical laboratory waste. *International Refereed Journal of Engineering and Science* 2:29-39.
- Bavandpour, F., Zou, Y., He, Y., Saeed, T, Sun, Y. & Sun, G. 2018. Removal of dissolved metals in wetland columns filled with shell grits and plant biomass. *Chemical Engineering Journal* 331: 234–241.
- Boamponsem, G.A., Obeng, A.K., Osei-Kwateng, M., Badu, A.O. 2013. Accumulation of heavymetals by *Pleurotus ostreatus* from soils of metal scrap sites. *International Journal of Current Research and Review* 5: 1-9.
- Boliden 2020. <https://www.boliden.com/fi/operations/mines/boliden-kevitsa> (sivuilla vierailtu 4.11.2020)
- Bolyen, E., Rideout, JR., Dillon, MR., Bokulich, NA., Abnet, C., Al-Ghalith, GA. et al. 2018. QIIME 2: Reproducible interactive scalable and extensible microbiome data science. *PeerJ Preprints*; Oct. Report No.: e27295v1; doi:10.7287/peerj.preprints.27295v1
- Bonanno, G., Lo Giudice, R. 2010. Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* (common reed) and their potential use as contamination indicators. *Ecological Indicators* 10:639-645.
- Cherchi, C., Onnis-Hayden, A., El-Shawabkeh, I., Gu, A.Z., 2009. Implication of using different carbon sources for denitrification in wastewater treatments. *Water Environ. Res.* 81, 788–799. <https://doi.org/10.2175/106143009X12465435982610>
- Clar, M.L., Barfield, B.J. & O'Connor, T.P. 2004. Stormwater Best Management Practice Design Guide. National Risk Management Research Laboratory, Office of research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH. 179 s.
- Djedidi, Z., Khaled, J.B., Cheikh, R.B., Blais, J.-F., Mercier, G., Tyagi, R.D., 2009. Comparative study of dewatering characteristics of metal precipitates generated during treatment of monometallic solutions. *Hydrometallurgy* 95, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.04.014>.
- Du Laing, G., Van de Moortel, A.M.K., Moors, W., De Grauwe, P., Meers, E., Tack, F.M.G., Verloo, M.G. 2009. Factors affecting metal concentrations in reed plants (*Phragmites australis*) of intertidal marshes in the Scheldt estuary. *Ecological Engineering* 35:310–318.
- EU, 2020. Kriittisiin raaka-aineisiin liittyvä häiriönsietokyky: miten lisätä toimivuusvarmuutta ja kestävyyttä. Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Auroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle.
- Gazea, B., Adam, K., Kontopoulos, A., 1996. A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage. *Miner. Eng.* 9 (1), 23–42.
- Gola D., Chawla P., Malik A., Ahammad S.Z. 2020. Development and performance evaluation of native microbial consortium for multi metal removal in lab-scale aerobic and anaerobic bioreactor. *Environmental Technology & Innovation* 18, 100714. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100714>
- Hadad, H.R., Maine, M.A. & Bonetto, C.A. 2006. Macrophyte growth in a pilot-scale constructed wetland for industrial wastewater treatment. *Chemosphere* 63: 1744–1753.
- Hadzic M., Postila H., Österholm P., Nystrand M., Pahkakangas S., Karppinen A., Arola M., Nilivaara-Koskela R., Häkkinen K., Saukkoriipi J., Kunnas S. & Ihme R. 2014. Sulfaattimailla syntyvän happaman kuormituksen ennakointi- ja hallintamenetelmät. SuHE-hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 17/2014.
- Hadzic, M., Nystrand, M., Auri, J., Österholm, P., Korppoo, M., Laamanen, T., Korhonen, A., Räisänen, J., Huttunen, M., Vento, T. & Ihme, R. 2020. Toimintamallit happamuuden ennakoinniseksi ja riskien hallitsemiseksi turvetuotannossa. Sulfa II -hankkeen loppuraportti. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 16/2020. 117 s.
- Hallin, S., Hellman, M., Choudhury M.I., Ecke, F. 2015. Relative importance of plant uptake and plant associated denitrification for removal of nitrogen from mine drainage in sub-arctic wetlands. *Water research* 85:377-383.
- Hamdani A., Amrane A., Yettefti I.K, Mountadar M., Assobhei O. 2020. Carbon and nitrogen removal from a synthetic dairy effluent in a vertical-flow fixed bed bioreactor, *Bioresource Technology Reports*, 12, 100581, <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100581>.

- Hardoim, P.R., van Overbeek, L.S., Berg, G., Pirttilä, A.M., Compant, S., Campisano, A., Döring, M., Sessitsch, A. 2015. Hidden world within plants: ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. *Microbiology and Molecular biology reviews* 79:293-319.
- Hedin, R. 2008. Iron Removal by a Passive System Treating Alkaline Coal Mine Drainage. *Mine Water Environ* 27. 200–209.
- Heikkinen, K., Karppinen, A., Karjalainen, S.M., Postila, H., Hadzic, M., Tolkkinen, M., Marttila, H., Ihme, R. & Kløve, B. 2018. Long-term purification efficiency and factors affecting performance in peatland-based treatment wetlands: An analysis of 28 peat extraction sites in Finland. *Ecological engineering* 117:153-164.
- Hoang, V. 2013. MBBR Ammonia Removal: An Investigation of Nitrification Kinetics, Biofilm and Biomass Response, and Bacterial Population Shifts During Long-Term Cold Temperature Exposure. Master thesis, University of Ottawa, Canada. 139 s.
- Ilmatieteen laitos, 2020. Pyhäsalmen pilottialueen säädata ajalta 1.10.2018–4.8.2020, Pyhäjärven Ojakylä (8/2020). <https://ilmatieteenlaitos.fi/>
- Janeeshma, E., Puthur, J.T. 2020. Direct and indirect influence of arbuscular mycorrhizae on enhancing metal tolerance of plants. *Archives in Microbiology* 202:1–16 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01730-z>
- Javaid, A., Bajwa, R., Shafique, U. & Anwar, J. 2011. Removal of heavy metals by adsorption on *Pleurotus ostreatus*. *Biomass and bioenergy* 35: 1675-1682.
- Kapahi, M., Sachdeva, S. 2017. Mycoremediation potential of *Pleurotus* species for heavy metals: a review. *Bioresources and bioprocessing* 4: 32.
- Kadlec, R.H. & Wallage, S.D. 2009. *Treatment wetlands* (second edition). CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton. 1016 s. ISBN: 978-1-56670-526-4
- Khan, S., Ahmad, I., Shah, M.T., Rehman, S. & Khaliq, A. 2009. Use of constructed wetland for the removal of heavy metals from industrial wastewater. *Journal of Environmental Management* 90: 3451–3457.
- Kiani, S., Kujala K., Pulkkinen, J.T., Aalto, S.L., Suurnäkki, S., Kiuru, T., Tiirola, M., Kløve, B., Ronkanen, A.-K., 2020. Enhanced nitrogen removal of low carbon wastewater in denitrification bioreactors by utilizing industrial waste toward circular economy. *Journal of Cleaner Production* 254: 119973
- Kirby, C.S., Cravotta III, C.A. 2005a. Net alkalinity and net acidity 1: Theoretical considerations. *Applied Geochemistry*. 20:1920–1940
- Kirby, C.S., Cravotta III, C.A. 2005b. Net alkalinity and net acidity 2: Practical considerations. *Applied Geochemistry*. 20:1941–1964
- Kujala K., Karlsson T., Nieminen S., Ronkanen A.-K. 2019. Design parameters for nitrogen removal by constructed wetlands treating mine waters and municipal wastewater under Nordic conditions. *Science of the Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.124>
- Kujala K., Pulkkinen J., Vielma J. 2020. Discharge management in fresh and brackish water RAS: Combined phosphorus removal by organic flocculants and nitrogen removal in woodchip reactors. *Aquacultural Engineering*. 90, 102095. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102095>
- Kulichevskaya, I.S., Ivanova, A.A., Suzina, N., Rijpstra, W.I.C., Damsté, J.S.S., Dedysh, S.N. 2016. *Paludisphaera borealis* gen. Nov., sp. Nov., a hydrolytic planctomycete from northern wetlands, and the proposal of *Isosphaeraceae* fam. Nov. *International journal of systematic and evolutionary microbiology*. 66: 837–844.
- Lakeuden keskuspuhdistamo Oy, 2020. Tilinpäätös ajalta 1.1-31.12.2019.
- Lane, D.J., 1991. 16S/23S rRNA sequencing. In: Stackebrandt, E., Goodfellow, M. (Eds.), *Nucleic Acid Techniques in Bacterial Systematics*. John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom, pp. 115–175.
- Lapin ELY-keskus. 2020. Yhteysviranomaisen lausunto Outokumpu Oy, Kemin kaivoksen laajentamisen ympäristövaikutusten arviointihjelmasta.
- Le, T.T.H., Fettig, J., Meon, G., 2019. Kinetics and simulation of nitrification at various pH values of a polluted river in the tropics. *Ecology & Hydrobiology* 19: 54–65
- Lehosmaa, K., Jyväsjärvi, J., Ilmonen, J., Rossi, P.M., Paasivirta, L., Muotka, T. 2018. Groundwater contamination and land drainage induce divergent responses in boreal spring ecosystems. *Science of the Total Environment* 639: 100-109

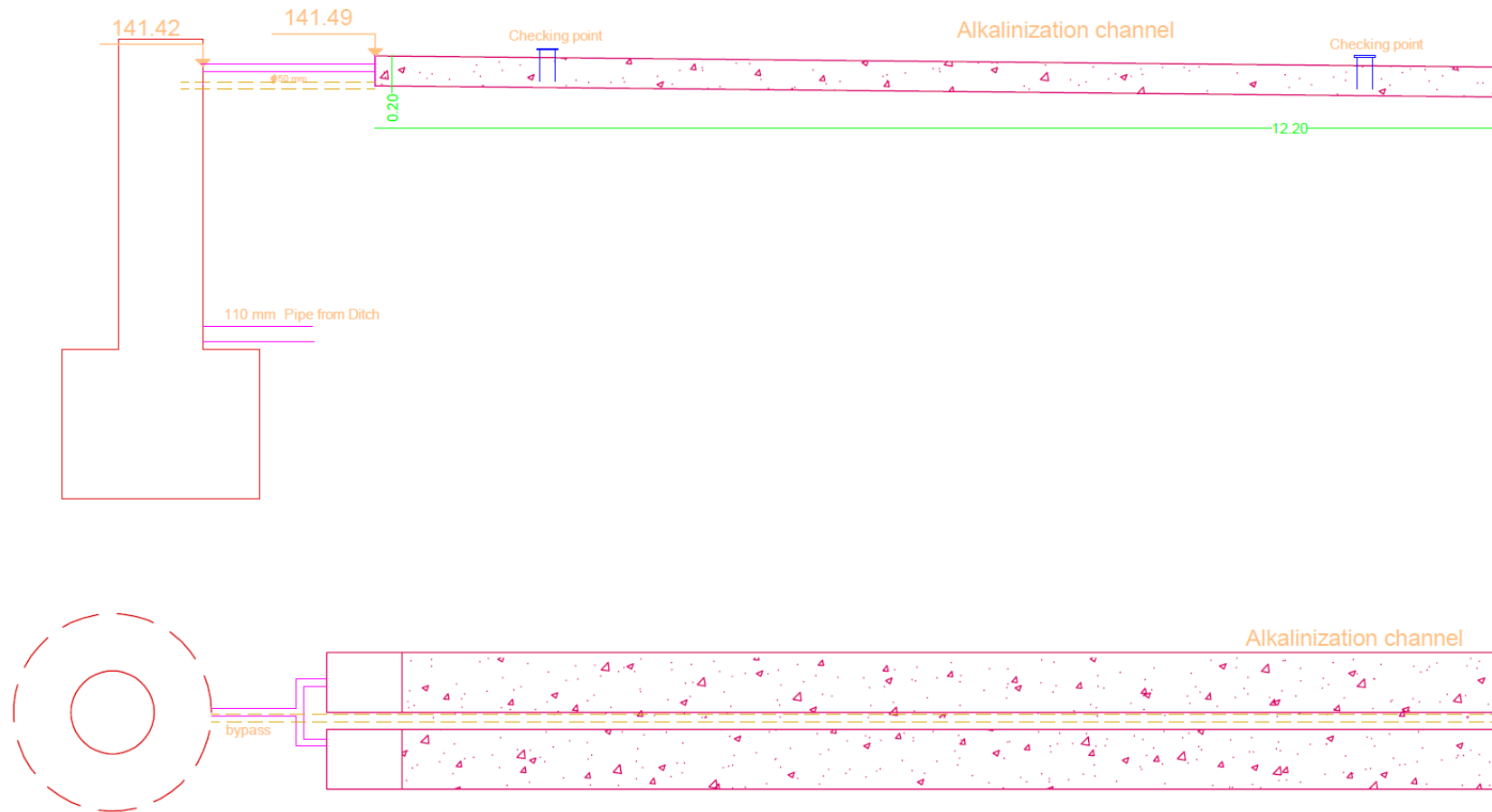
- Liu Y., Vaughan J., Southam G., Serrano A., Marcellin E., Nancucheo I., Villa-Gomez D.K. 2020. Enhanced metal recovery by efficient agglomeration of precipitates in an up-flow fixed-bed bioreactor, *Chemical Engineering Journal*, 127662, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127662>
- Magan, N. 2008. Ecophysiology: Impact of environment on growth, synthesis of compatible solutes and enzyme production. Kirjassa: Boddy, L., Frankland, J., van West, P., (toim.) *Ecology of saprotrophic basidiomycetes*. Elsevier. s. 64 - 78.
- Maine, M.A., Hadad, H.R., Sánchez, G.C., Di Luca, G.A., Mufarrije, M.M, Caffaratti, S.E, Pedro, M.C. 2017. Long-term performance of two free-water surface wetlands for metallurgical effluent treatment. *Ecological Engineering* 98: 372–377
- Marschner, P., Marschner, H. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. 3 painos.
- Martin, K.J., Rygielwich, P. 2005. Fungal-specific PCR primers developed for analysis of the ITS region of environmental DNA extracts. *BMC Microbiology* 5: 115–175
- Mehtälä M. 2018. Typen esiintyminen Kemin kaivoksella. Diplomityö, Oulun yliopisto, <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-201805312011>
- Metcalf & Eddy, 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, fifth edition. 1408 s. ISBN-13 : 978-0071241403
- Mühling, M., Poehlein, A., Stuhr, A., Matthias, V., Rolf, D., Schlömann, M. 2016. Reconstruction of the metabolic potential of acidophilic sideroxydans strains from the metagenome of an microaerophilic enrichment culture of acidophilic iron-oxidizing bacteria from a pilot plant for the treatment of acid mine drainage reveals metabolic versatility and adaptation to life at low pH. *Frontiers in microbiology*. 7: 2082. Doi:10.3389/fmicb.2016.02082
- Niemelä, V., 2020. VS: Välimaan kiertotalousalueelle vesienkäsittelyrakenteeseen tehty puun haketus?. Sähköpostiviesti Ville Niemelältä, Maarakennus Ville Niemelä Oy, 8.10.2020 15.55
- Ojuederie, O.B., Babalola, O.O. 2017. Microbial and plant-assisted bioremediation of metal polluted environments: a review. *Environmental research and public health* 14:1504.
- Outokumpu Chrome 2020. <https://www.kaivosvastuu.fi/yrityskortti/outokumpu-chrome-oy/>. Sivulla vierailtu 10.11.2020.
- Perämäki S., Tiihonen A. Väisänen A. 2020. Occurrence and recovery potential of rare earth elements in Finnish peat and biomass combustion fly ash. *Journal of Geochemical Exploration*, 201: 71-78. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.03.002>
- Pohjois-Suomen Aluehallintovirasto, lupapäätös Nro 128/2013/1. Kallon jätevedenpuhdistamon ympäristöluvan lupamääräysten tarkistaminen, Kittilä.
- Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto, lupapäätös Nro 85/07/02. Pyhäsalmen kaivoksen ympäristö- ja vesitalouslupa, Pyhäjärvi.
- Postila, H. 2007. Soistuvien metsäojitettujen turvemaiden käyttö vesiensuojelurakenteena turvetuotannon vesienpuhdistuksessa. Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskuksen raportteja 6/2007. 111 s.
- Postila, H., Saukkoriipi, J., Heikkinen, K., Karjalainen, S.M., Kuoppala, M., Marttila, H. & Klöve, B. 2014 Can treatment wetlands be constructed on drained peatlands for efficient purification of peat extraction runoff? *Geoderma* 228–229: 33–43.
- Postila, H., Ronkanen, A.-K., Marttila, H. & Klöve, B. 2015. Hydrology and hydraulics of treatment wetlands constructed on drained peatlands. *Ecological Engineering* 75: 232–241.
- Prior, T., Daly, J., Mason, L., Giurco, D. 2013. Resourcing the future: using foresight in resource governance. *Geoforum*, 44, 316–328, 10.1016/j.geoforum.2012.07.009
- Riis, T., Olesen, B., Katborg, C.K., Christoffersen, K.S. 2010. Growth rate of an aquatic bryophyte (*Warnstorfia fluitans* (Hedw.) Loeske) from a high arctic lake: effect of nutrient concentration. *Arctic* 63:100–106.
- Rocher, V., Laverman, A.M., Gasperi, J., Azimi, S., Guerin, S., Mottelet, S., Villieres, T., Pauss, A., 2015. Nitrite accumulation during denitrification depends on the carbon quality and quantity in wastewater treatment with biofilters. *Environ.Sci. Pollut. Res.* 22, 10179e10188. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4196-1>
- Ruohtula, J. (toim.) 1996. Kosteikkojen ja laskeutusaltaiden suunnittelu. Suomen ympäristökeskus, 1996. Suomen ympäristökeskuksen moniste 11. 50 s.
- Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y. & Lygren, E. 2006. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering* 34: 322–331.
- Ryszka P, Lichtscheidl I, Tylko G et al. 2019. Symbiotic microbes of *Saxifraga stellaris* ssp. *alpigena* from the copper creek of Schwarzwand (Austrian Alps) enhance plant tolerance to copper. *Chemosphere* 228:183-194.

- Sandhi, A., Landberg, T., Greger, M. 2018. Phytofiltration of arsenic by aquatic moss (*Warnstorfia fluitans*). *Environmental pollution* 237:1098–1105.
- Savikuja, M., 2012. Typenpoisto jätevedenpuhdistamoiden jälkeisillä laajoilla kosteikoilla. Oulun yliopisto, diplomityö. 115 s.+ liitteet
- Schipper, L.A., Robertson, W.D., Gold, A.J., Jaynes, D.B., Cameron, S.C., 2010. Denitrifying bioreactors—An approach for reducing nitrate loads to receiving waters. *Ecol. Eng.* 36, 1532–1543. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.04.008>
- Søberg, L., 2014. Metal Pathways in Stormwater Treatment Systems. Licentiate thesis, Luleå University of Technology. 66 s.
- Spooren, J., Binnemans, K., Björkmalm, J., Breemers, K., Dams, Y., Folens, K., González-Moya, M., Horckmans, L., Komnitsas, K., Kurylak, W., Lopez, M., Mäkinen, J., Onisei, S., Oorts, K., Peys, A., Pietek, G., Pontikes, Y., Snellings, R., Tripijana, M., Varia, J., Willquist, K., Yur-ramendi, L., Kinnunen, P. 2020. Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: technology development trends, *Resources, Conservation and Re-cycling*, 160, 104919, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104919>.
- Srivastava, J.K., Chandra, H., Kalra, S.J.S., Mishra, K., Khan, H., Poonam, Y. 2017. Plant–microbe interaction in aquatic system and their role in the management of water quality: a review. *Applied Water Science*. 7:1079–1090.
- Suomen ympäristökeskus, 2019. Levin huleveden käsittelyn hybridipilottirakenteen tekeminen 12.-14.6.2019, päätekiä Korhonen, A. <https://www.syke.fi/download/noname/%7BD2F4CFB7-850A-475C-82E4-EFCE5820908B%7D/158695>
- Suomen ympäristökeskus, 2020. Kallon jäteveden puhdistamo - typenpoiston tehostamisen pilottiyksiköiden rakennus 27.5.-12.6.2019, päätekiä Korhonen, A. <https://www.syke.fi/download/noname/%7B04DDA88A-8929-4A7F-91CF-2BE433590D21%7D/158927>
- Šyc, M., Simon, F., Hykš, J., Braga, R., Biganzoli, L., Costa, G., Funari, V., Grosso, M. 2020. Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. *Journal of Hazardous Material* 393, 122433, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122433>
- Taketani, R.G., Yoshiura, C.A., Dias, A.C.F., Andreote, F.D., Tsai, S.M., 2010. Diversity and identification of methanogenic archaea and sulphate-reducing bacteria in sediments from a pristine tropical mangrove. *Antonie Van Leeuwenhoek* 97 (4), 401–411.
- Tenhola M. & Tarvainen T. 2008. Purovesien ja orgaanisten purosedimenttien alkuainepitoisuudet Suomessa vuosina 1990, 1995, 2000 ja 2006. *Geologian tutkimusraportti* 172. 60 s.
- Torrijos, V., Gonzalo, O.G, Trueba-Santiso, A., Ruiz, I & Soto, M. 2016. Effect of by-pass and effluent recirculation on nitrogen removal in hybrid constructed wetlands for domestic and industrial wastewater treatment. *Water Research* 103: 92-100.
- Turkovič, S. 2015. Mycelial growth rate and yield of oyster mushroom - *Pleurotus ostreatus* fruitful part (Jacquin:Fr.) Kumm at different temperatures. *Bulletin of the Chemists and Technologists of Bosnia and Herzegovina* 44: 53-58.
- Vile, M.A., Wieder, R.K., 1993. Alkalinity generation by Fe (III) reduction versus sulfate reduction in wetlands constructed for acid mine drainage treatment. *Water Air Soil Pollut.* 69 (3), 425–441.
- Vymazal, J. 2007. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment* 380: 48–65.
- Vymazal, J., Březinová, T. 2016. Accumulation of heavy metals in aboveground biomass of *Phragmites australis* in horizontal flow constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Journal* 290:232–242.
- Vymazal J. & Kröpfelova L., 2015. Multistage hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen. *Ecological engineering* 84:202–208.
- Wang, Y., Sikora, S. & Townsend, T.G. 2013. Ferrous iron removal by limestone and crushed concrete in dynamic flow columns. *Journal of Environmental Management* 124: 165-171.
- Williamson, A., Verbruggen, F., Rico, V.S.C., Bergmans, J., Spooren, J., Yurramendi, L., Laing, G. D., Boon, N., Hennebel, T. 2021. Selective leaching of copper and zinc from primary ores and secondary mineral residues using biogenic ammonia. *Journal of Hazardous Material*, 403, 123842
- Willow, M.A., Cohen, R.R., 2003. pH, dissolved oxygen, and adsorption effects on metal removal in anaerobic bioreactors. *J. Environ. Qual.* 32 (4), 1212–1221.

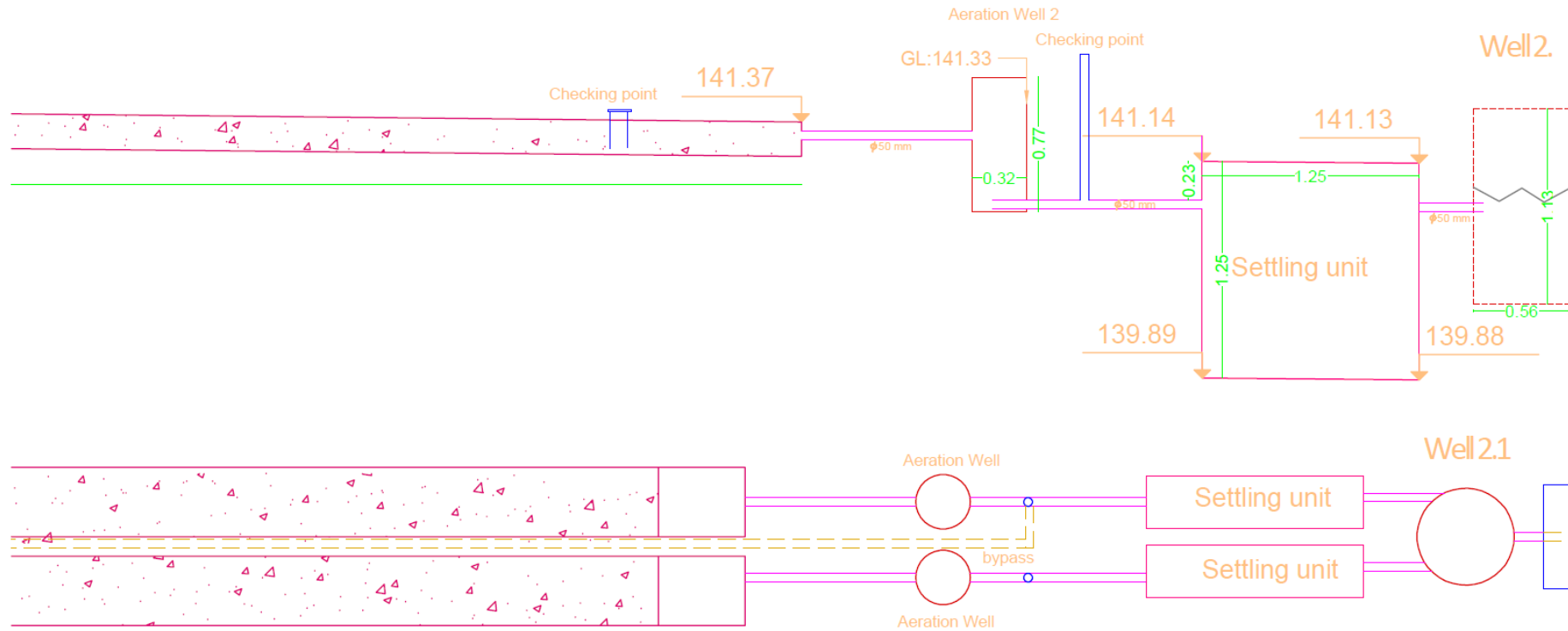
- Ympäristöministeriö. 2015. Turvetuotannon ympäristönsuojeluohje. Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2015.
- Younger, P.L., Banwart, S.A. Hedin, R.S. 2002. Mine water; hydrology, pollution, Remediation. Springer Netherlands. Environmental pollution 5. 442 s. ISBN: 978-1-4020-0138-3
- Zhai, J., Hasibur Rahaman, Md. Chen, X., Xiao, H., Liao, K., Li, X, Duan, C., Zhang, B., Tao, G., John, Y., Vymazal, J. 2016. New nitrogen removal pathways in a full-scale hybrid constructed wetland proposed from high-throughput sequencing and isotopic tracing results. Ecological Engineering 97:434-443.
- Zhang, J., Feng, C., Hong, S., Hao, H., Yang, Y., 2012. Behavior of solid carbon sources for biological denitrification in groundwater remediation. Water Sci. Technol. 65, 1696–1704. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.070>
- Zupančič Justin, M., Šajn Slak A.& Griessler Bulc. T. 2008. Removal of Cu, Cd, Zn, Ni and Fe from wastewater comparison of three different substrates used in model scaled constructed wetland. International Journal of Sanitary Engineering Research, Vol 2, NO 1/2008.

Liitteet

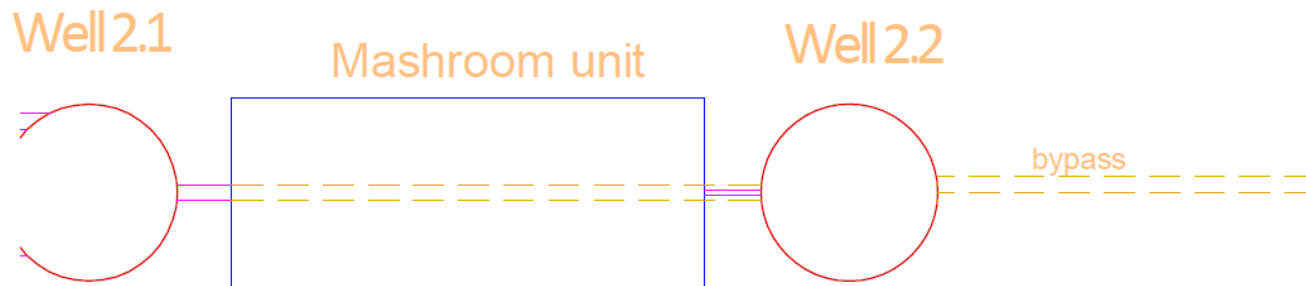
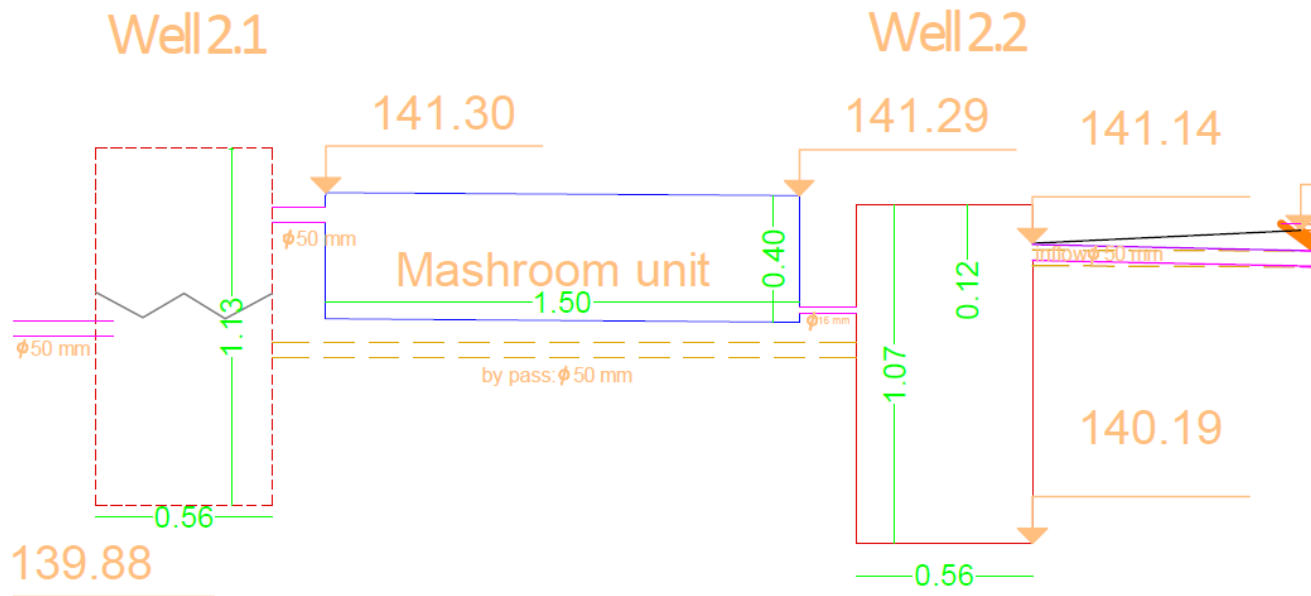
Liite 1.1 Pyhäsalmen pilottirakenne (tulokaivo ja pH:n nostoyksiköiden alkupää)



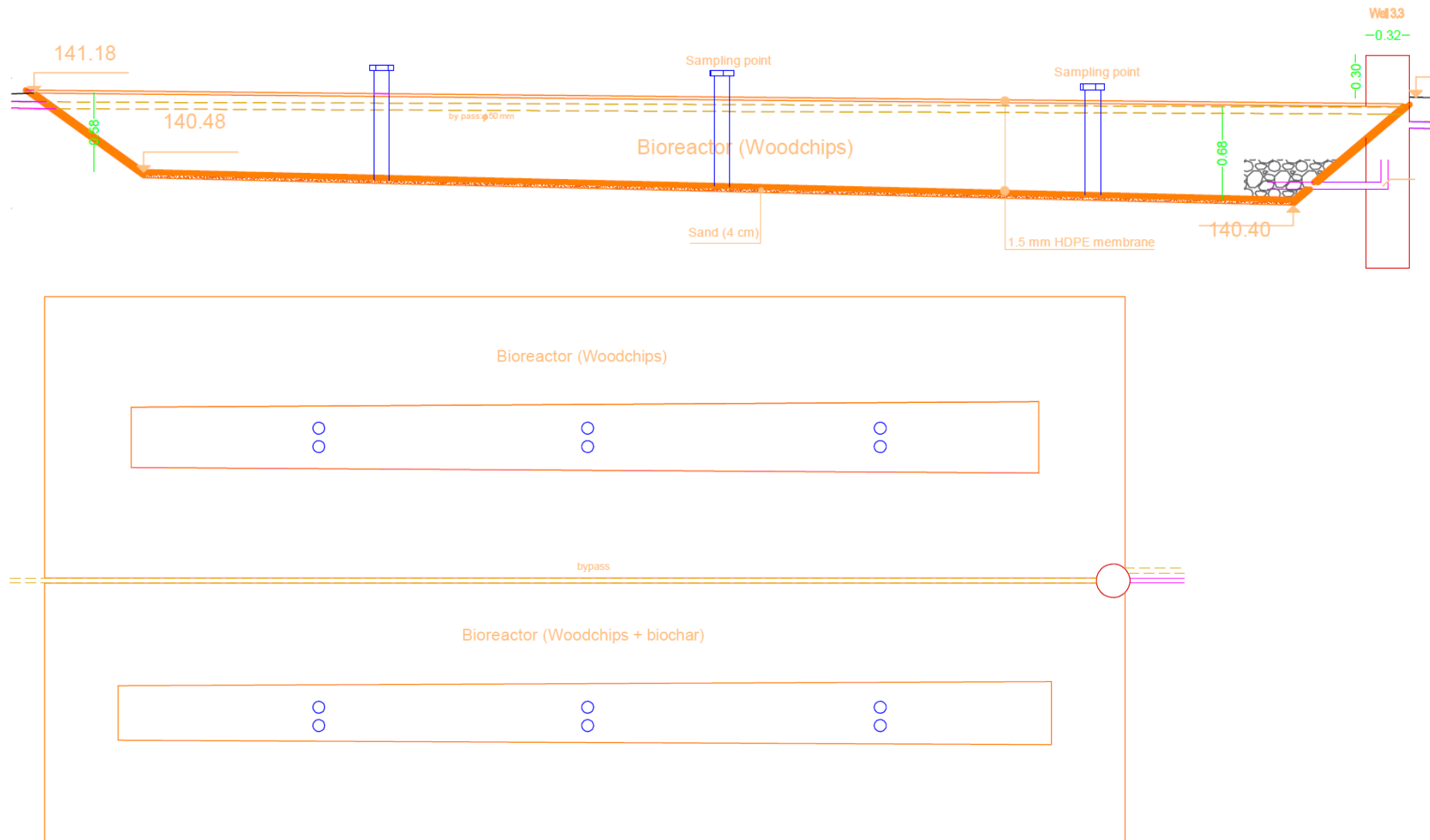
Liite 1.2. Pyhäsalmen pilottirakenne (pH:n nostoyksiköiden loppupää, laskeutusallas, ja W2.1)



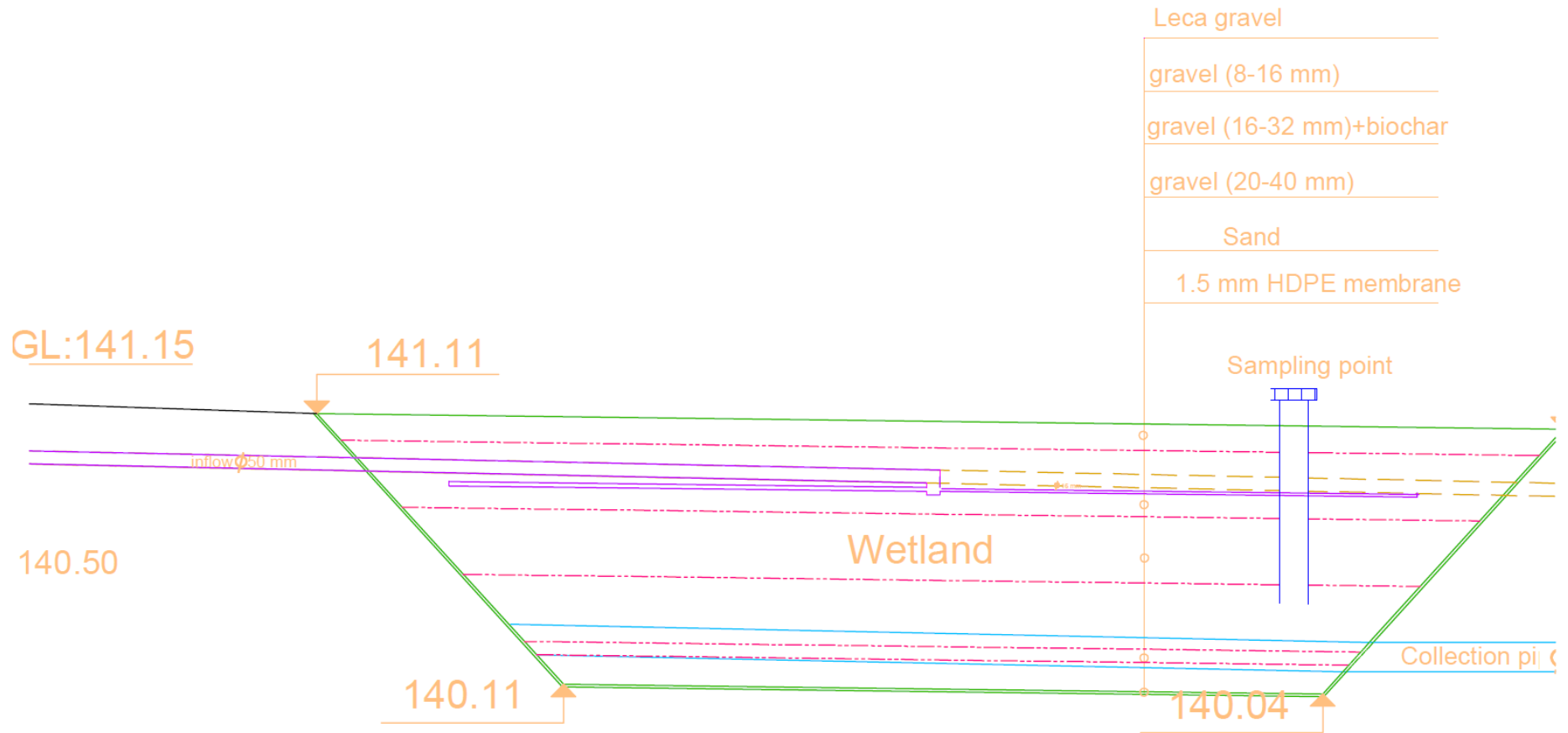
Liite 1.3. Pyhäsalmen pilottirakenne (W2.1, Sieni-hakeyksikkö ja W2.2)



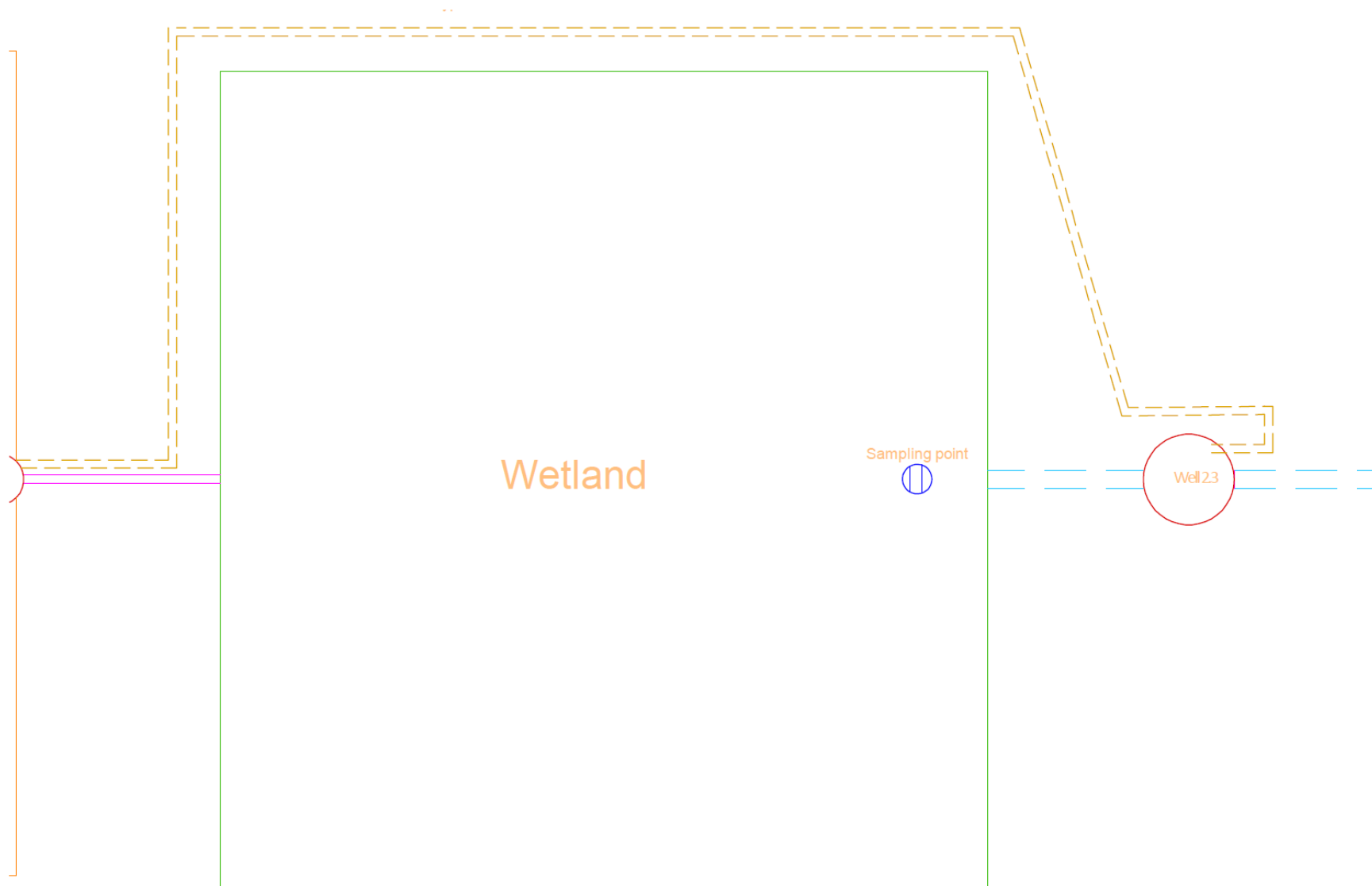
Liite 1.4 Pyhäsalmen pilottirakenne (Bioreaktorit ja kaivo W2.3)



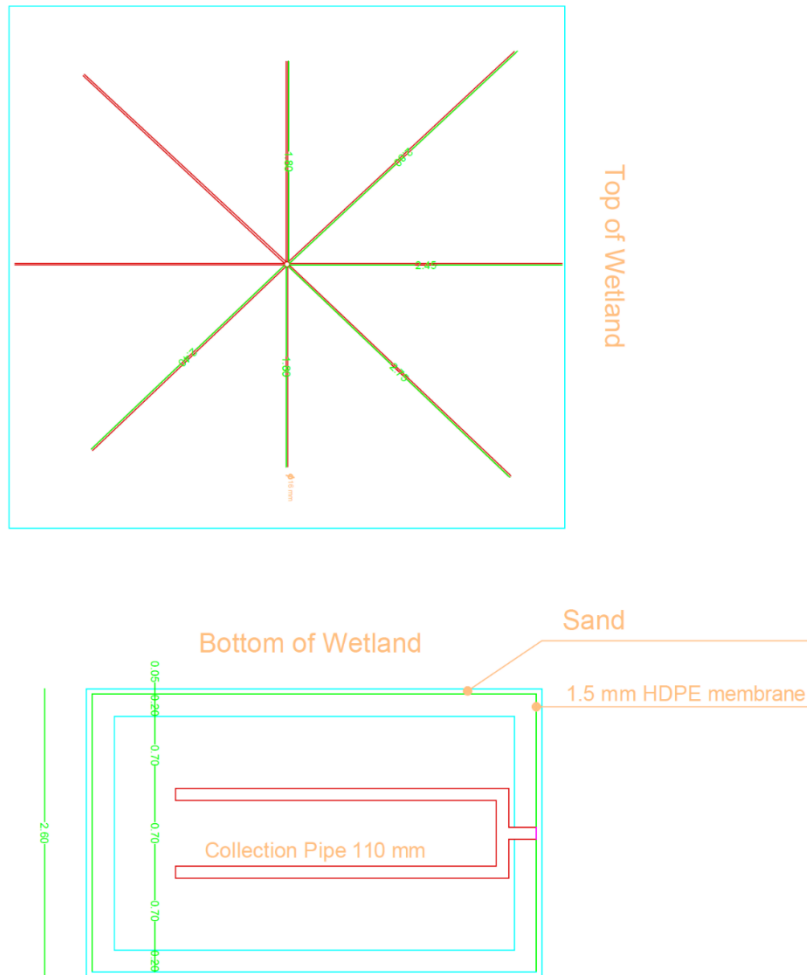
Liite 1.5 Pyhäsalmen pilottirakenne (Kosteikko sivukuva)



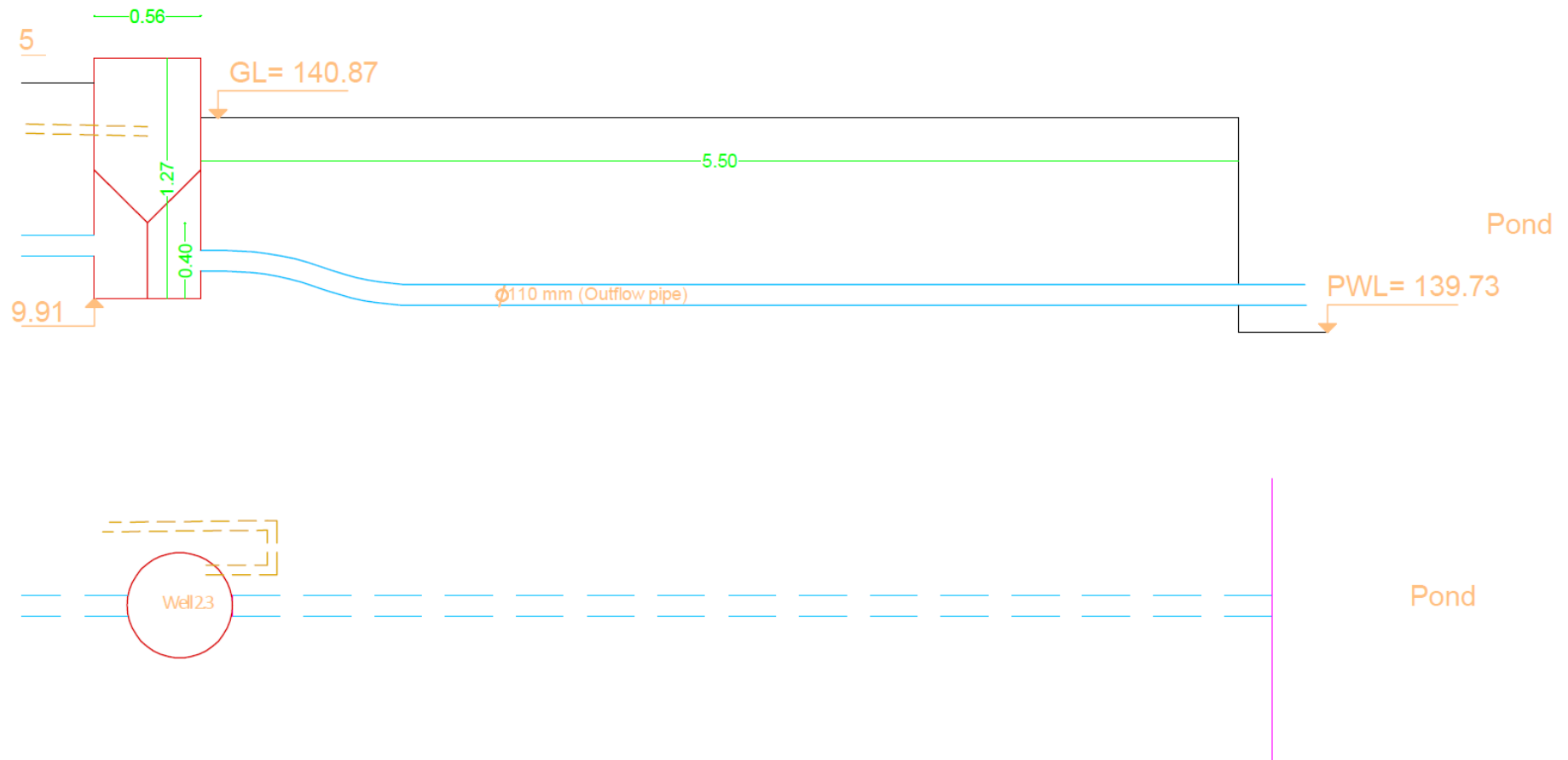
Liite 1.6 Pyhäsalmen pilottirakenne (Kosteikko, päältä päin kuvattu)



Liite 1.7 Pyhäsalmen pilottirakenne (Kosteikon putkitukset)



Liite 1.8 Pyhäsalmen pilottirakenne (lähtökaivo ja purkuputki pumppaamoaltaaseen)



Liite 2. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

		Alkaliniteetti	Ammonium- typpi	Asiditeetti	Fosfaatti fosforina	Fosfaatti fosforina suodatettu	Johto- kyky	Kemiallinen hapenkulutus	Kiinto- aine	Kiintoaine hehkutus- jäännös	Kokonais- fosfori	Kokonaisfosfori suodatettu
Paikka	pvm	mmol/l	µg/l	mmol/l	µg/l	µg/l	mS/m	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l
W1	11.10.2018	<0,001	15	1,24	3	4	119	8,8	16	10	22	7
W1	5.11.2018	<0,001	370	2,02	12				30	14	58	
W1	16.1.2019	0,139	340	2,26	4		147		16	9,2	10	3
W1	12.2.2019	0,061	870	1,93	5		158		27	16	10	5
W1	19.3.2019	0,039	1100	1,32	10		133		13	7,7	11	5
W1	15.4.2019	<0,001	1500	0,87	9		53		10	3	23	9
W1	13.5.2019	<0,001	160	1,65	13		164		43	5,7	370	18
W1	15.7.2019	<0,001	47	0,59	8				61	30	34	6
W1	12.8.2019	<0,001	260	0,93	15				31	16	39	6
W1	17.9.2019	0,146	210	1,09	9				70	34	37	9
W1	15.10.2019	1,13	310	3,23	18				190	100	110	12
W1	12.11.2019	0,022	460	1,02	8				21	9	16	5
W1	3.12.2019	<0,001	370	0,94	9		77,7		16	6,9	14	4
W1	20.1.2020	<0,001	540	0,86	9		41		18	3,5	21	7
W1	10.3.2020		560									
W2.1.1	11.10.2018	0,427	<2	0,31	2	4	119	6,9	11	6,9	20	5
W2.1.1	16.1.2019	0,187		1,22			147		36	25		
W2.1.1	12.2.2019	0,063		1,25			156		28	19		
W2.1.1	19.3.2019	0,038		0,83			144		11	6,9		
W2.1.1	15.4.2019	<0,001		0,36			126		4,5	2,7		
W2.1.1	13.5.2019	1,03		0,16			146		8,8	5,9		
W2.1.1	15.7.2019	0,914		<0,01					8,8	4,8		
W2.1.1	12.8.2019	0,843		<0,01					3,2	1,6		
W2.1.1	17.9.2019	0,624		0,35					68	39		
W2.1.1	15.10.2019	0,906		0,7					110	66		
W2.1.1	12.11.2019	0,327		0,29					32	19		
W2.1.1	3.12.2019	0,705		0,09			93,1		4,7	2,7		
W2.1.1	20.1.2020	0,69		0,09			111		7,6	4,5		

Liite 3. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

		Kokonais- typpi	Kokonaistyyppi suodatettu	Kloridi	Nitraatti typpenä	Nitriitti-nitraatti typpenä	Nitriitti typpenä	Orgaaninen kokonaishiili	Orgaaninen hiili liukoinen	pH	Sulfaatti
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	SFS 3021	mg/l
W1	11.10.2018	530	370	5,2	<5	<5	2	10	8,7	3,7	730
W1	5.11.2018	1400			89	93	4	14			
W1	16.1.2019	1400			12	12	<1	12		5,2	850
W1	12.2.2019	1600			15	18	3	13		5,2	930
W1	19.3.2019	1600			34	37	3	9,6		5,1	780
W1	15.4.2019	2400			360	370	12	15		3,9	220
W1	13.5.2019	2000			10	17	7	21		3,3	
W1	15.7.2019		770		<5	<5	12	18			470
W1	12.8.2019	880			13	14	1	19			690
W1	17.9.2019	1300			<5	6	11	35			540
W1	15.10.2019	3800			<5	9	16	99			1000
W1	12.11.2019	1100			13	23	10	16			510
W1	3.12.2019	990			110	110	2	12		4,6	410
W1	20.1.2020	1300			200	210	13	18		4	200
W1	10.3.2020	1200				29					340
W2.1.1	11.10.2018	500	360	5,7	<5	<5	4	10	8,5	5,6	620
W2.1.1	16.1.2019							9,8		5,6	850
W2.1.1	12.2.2019							11		5,3	900
W2.1.1	19.3.2019							9		5,2	790
W2.1.1	15.4.2019							7,6		4,8	660
W2.1.1	13.5.2019							13		7,1	
W2.1.1	15.7.2019							13			410
W2.1.1	12.8.2019							14			440
W2.1.1	17.9.2019							30			490
W2.1.1	15.10.2019							61			750
W2.1.1	12.11.2019							15			570
W2.1.1	3.12.2019							16		7,2	290
W2.1.1	20.1.2020							14		7,2	340

Liite 4. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

		Alkaliniteetti	Ammonium- typpi	Asiditeetti	Fosfaatti fosforina	Fosfaatti fosforina suodatettu	Johto- kyky	Kemiallinen hapenkulutus	Kiinto- aine	Kiintoaine hehkutus- jäännös	Kokonais- fosfori	Kokonaisfosfori suodatettu
Paikka	pvm	mmol/l	µg/l	mmol/l	µg/l	µg/l	mS/m	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l
W2.1.2	11.10.2018	0,351	<2	0,15	5	3	108	7,7	11	7,6	29	4
W2.1.2	16.1.2019	0,218		1,4			149		31	21		
W2.1.2	12.2.2019	0,15		1,08			156		36	26		
W2.1.2	19.3.2019	0,124		0,68			143		21	15		
W2.1.2	15.4.2019	0,087		0,29			50,5		18	8,6		
W2.1.2	13.5.2019	0,144		0,25			117		8,1	4,7		
W2.1.2	15.7.2019	<0,001		0,33					18	7,8		
W2.1.2	12.8.2019	1,31		0,31					29	17		
W2.1.2	17.9.2019	0,233		0,71					53	27		
W2.1.2	15.10.2019	0,439		0,4					76	41		
W2.1.2	12.11.2019	0,06		0,89					19	8,4		
W2.1.2	3.12.2019	<0,001		0,88			79,3		14	5,4		
W2.1.2	20.1.2020	<0,001		0,85			41,9		32	11		
W2.1.	5.11.2018	<0,001		1,04					22	9,9		
W2.1.	12.2.2019	0,087	1000		4		153		41	29	9	4
W2.1.	19.3.2019	0,09	1200		7		143		19	13	8	4
W2.1.	15.4.2019	0,081	1300		6		49,7		13	6,6	13	5
W2.1.	13.5.2019	0,947	160		<2		142		6,8	4,1	7	4
W2.1.	15.7.2019	0,052	180		6				14	6,4	16	7
W2.1.	12.8.2019	1,22	1700		5				17	10	19	6
W2.1.	17.9.2019	0,353	810		7				48	25	25	8
W2.1.	15.10.2019	0,769	1000		12				96	55	46	10
W2.1.	12.11.2019	0,054	470		8				27	13	17	5
W2.1.	3.12.2019	<0,001	A		7		77		23	10	14	<3
W2.1.	20.1.2020	<0,001	550		9		41,7		21	5,3	22	5
W2.1.	10.3.2020		520									
W2.1.	6.7.2020		490									
W2.1.	25.8.2020		240									

Liite 5. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

		Kokonais- typpi	Kokonaistyyppi suodatettu	Kloridi	Nitraatti typpinä	Nitriitti-nitraatti typpinä	Nitriitti typpinä	Orgaaninen kokonaishiili	Orgaaninen hiili liukoinen	pH	Sulfaatti
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	SFS 3021	mg/l
W2.1.2	11.10.2018	720	500	4,7	<5	9	5	9,6	8,4	6,1	550
W2.1.2	16.1.2019							11		5,6	840
W2.1.2	12.2.2019							11		5,6	920
W2.1.2	19.3.2019							8,9		5,7	790
W2.1.2	15.4.2019							19		5,9	220
W2.1.2	13.5.2019							8,9		5,9	
W2.1.2	15.7.2019							14			450
W2.1.2	12.8.2019							29			530
W2.1.2	17.9.2019							32			540
W2.1.2	15.10.2019							52			530
W2.1.2	12.11.2019							15			520
W2.1.2	3.12.2019							11		4,6	420
W2.1.2	20.1.2020							22		4	200
W2.1.	5.11.2018							11			
W2.1.	12.2.2019	1500	1400		<5	13	9	12	7,9	5,5	910
W2.1.	19.3.2019	1600	1500		26	37	11	8,6	7,2	5,6	780
W2.1.	15.4.2019	2100	770		410	420	7	11	9,1	5,9	220
W2.1.	13.5.2019	980	930		480	480	6	12	12	7,2	
W2.1.	15.7.2019	760	660		<5	16	12	15	11		450
W2.1.	12.8.2019	2300	2300		110	150	44	24	23		510
W2.1.	17.9.2019	1200	1000		<5	11	42	31	22		500
W2.1.	15.10.2019	2500	2200		47	94	47	51	41		730
W2.1.	12.11.2019	1000	920		26	37	11	16	10		530
W2.1.	3.12.2019	1000	950		130	150	21	13	11	4,6	410
W2.1.	20.1.2020	1300	1200		220	230	14	18	11	4	210
W2.1.	10.3.2020	1000				36					
W2.1.	6.7.2020	1600				40					820

Liite 6. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

		Alkaliniteetti	Ammonium- typpi	Fosfaatti fosforina	Fosfaatti fosforina suodatettu	Johtokyky	Kemiallinen hapenkulutus	Kiinto- aine	Kiintoaine hehkus- jäännös	Kokonais- fosfori	Kokonaisfosfori suodatettu
Paikka	pvm	mmol/l	µg/l	µg/l	µg/l	mS/m	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l
W 2.2	11.10.2018	0,553	14	42	4	116	24	160	120	110	5
W 2.2	5.11.2018	<0,001	650	16				110	65	81	
W 2.2	15.7.2019	0,037	160	6				17	7,9	25	6
W 2.2	12.8.2019	1,2	1600	3				5,1	2,5	11	6
W 2.2	17.9.2019	0,45	650	10				38	20	28	8
W 2.2	15.10.2019	0,781	940	12				84	48	45	11
W 2.2	12.11.2019	0,06	350	8				28	14	22	5
W 2.2	6.7.2020		400								
W 2.2 Sieni	3.12.2019	<0,001	450	7		77,9		11	4	13	4
W 2.2 Sieni	20.1.2020	<0,001	480	7		42,1		14	2,8	19	6
W 2.2 Sieni	10.3.2020		510								
W 2.2 Sieni	6.7.2020		350								
W 2.2 Sieni	25.8.2020		180								
BR1 (out)	11.10.2018	0,176	360	530	520	88,8	43	2,3	<1	650	590
BR1 (out)	5.11.2018	0,66	2	330				3	<1	440	
BR1 (out)	16.1.2019	0,812	210	33		146		8,8	5,4	54	27
BR1 (out)	12.2.2019	0,954	100	28		148		5,7	2,4	45	27
BR1 (out)	19.3.2019	5,02	20	120		135		5,5	2,8	130	130
BR1 (out)	15.4.2019	7,8	22	320		126		1,6	<1	350	350
BR1 (out)	13.5.2019	5,22	200	110		77		1,5	<1	110	85
BR1 (out)	15.7.2019	1,32	75	9				1,3	<1	30	20
BR1 (out)	12.8.2019	7,03	34	57				3,1	<1	100	76
BR1 (out)	17.9.2019	0,968	9	2				<1	<1	22	9
BR1 (out)	15.10.2019	2,86	49	23				<1	<1	37	28
BR1 (out)	12.11.2019	0,266	270	3				<1	<1	9	5
BR1 (out)	3.12.2019	0,083	320	3		75,8		1,2	<1	8	5
BR1 (out)	10.3.2020		150								
BR1 (out)	6.7.2020		36								

Liite 7. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	Kokonaisfosfori	Kokonais-	Kokonaistyyppi	Kloridi	Nitraatti	Nitriitti-nitraatti	Nitriitti	Orgaaninen	Orgaaninen hiili	pH	Sulfaatti
		suodatettu	typpi	suodatettu	mg/l	tyyppinä	tyyppinä	tyyppinä	kokonaishiili	liukoinen	SFS 3021	mg/l
		µg/l	µg/l	µg/l		µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l		
W 2.2	11.10.2018	5	1600	340	5,7	<5	7	11	26	9	6,2	600
W 2.2	5.11.2018		1300			60	68	8	21			
W 2.2	15.7.2019	6	790	680		<5	14	12	15	12		450
W 2.2	12.8.2019	6	2200	2200		160	210	43	22	22		490
W 2.2	17.9.2019	8	1200	1000		<5	11	39	30	23		480
W 2.2	15.10.2019	11	2400	2100		39	88	49	54	40		650
W 2.2	12.11.2019	5	930	810		24	34	10	15	11		540
W 2.2	6.7.2020		1700				41					730
W 2.2 Sieni	3.12.2019	4	930	880		100	110	9	11	8,1	4,6	410
W 2.2 Sieni	20.1.2020	6	1300	1100		190	200	13	16	11	4	210
W 2.2 Sieni	10.3.2020		1100				41					360
W 2.2 Sieni	6.7.2020		1900				54					700
W 2.2 Sieni	25.8.2020		2100				6					
BR1 (out)	11.10.2018	590	1400	1300	4,6	<5	<5	<1	47	39	5	620
BR1 (out)	5.11.2018		1100			<5	5	1	48			
BR1 (out)	16.1.2019	27	640	580		<5	<5	1	14	12	6,3	770
BR1 (out)	12.2.2019	27	630	510		<5	<5	<1	14	12	6,5	830
BR1 (out)	19.3.2019	130	700	570		<5	<5	1	22	22	6,9	590
BR1 (out)	15.4.2019	350	1000			<5	<5	<1	42	38	7	360
BR1 (out)	13.5.2019	85	790	770		<5	<5	2	36	31	6,8	
BR1 (out)	15.7.2019	20	590	510		<5	<5	<1	17	15		350
BR1 (out)	12.8.2019	76	1000	880		<5	<5	5	73	71		25
BR1 (out)	17.9.2019	9	870	830		<5	<5	1	28	27		360
BR1 (out)	15.10.2019	28	750	690		<5	<5	2	26	23		950
BR1 (out)	12.11.2019	5	720	700		<5	<5	<1	10	9,8		580
BR1 (out)	3.12.2019	5	1200	770		<5	<5	<1	8,6	A	5,7	380
BR1 (out)	10.3.2020		780				<5					300
BR1 (out)	6.7.2020		1400				58					41

Liite 8. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	Alkaliniteetti	Ammonium-typpi	Fosfaatti fosforina	Fosfaatti fosforina suodatettu	Johtokyky	Kemiallinen hapenkulutus	Kiintoaine	Kiintoaine hehkutusjäännös	Kokonaisfosfori	Kokonaisfosfori suodatettu
		mmol/l	µg/l	µg/l	µg/l	mS/m	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l
BR2 (out)	11.10.2018	0,433	59	630	590	113	43	2,9	<1	750	660
BR2 (out)	5.11.2018	1,12	11	250				2,4	<1	350	
BR2 (out)	16.1.2019	0,439	390	19		150		<1	<1	35	20
BR2 (out)	12.2.2019	0,332	540	17		151		<1	<1	30	23
BR2 (out)	19.3.2019	1,64	160	25		148		4,7	1,9	47	30
BR2 (out)	15.4.2019	3,93	160	140		135		6,9	3,1	160	140
BR2 (out)	13.5.2019	6,7	190	570		105		4,2	2,1	610	
BR2 (out)	10.6.2019										
BR2 (out)	15.7.2019	1,59	13	89				7,3	1,5	130	100
BR2 (out)	12.8.2019	6,55	58	100				3,8	<1	130	110
BR2 (out)	17.9.2019	1,47	49	19				2,5	<1	58	35
BR2 (out)	15.10.2019	4,6	45	46				1,5	<1	69	53
BR2 (out)	12.11.2019	0,162	220	3				<1	<1	8	5
BR2 (out)	3.12.2019	0,898	260	4		75,7		1	<1	10	6
BR2 (out)	20.1.2020	0,132	120	4		58,4		<1	<1	11	8
BR2 (out)	10.3.2020		200								
BR2 (out)	6.7.2020		28								
W 2.3	11.10.2018	0,564	310	170	9	87,3	17	13	6,7	240	19
W 2.3	5.11.2018	0,185	77	110				18	8,5	170	
W 2.3	15.7.2019	0,386	160	52				10	4,3	78	12
W 2.3	12.8.2019	2,24	<2	96				7,8	2,3	150	48
W 2.3	17.9.2019	0,161	140	4				2,9	<1	26	9
W 2.3	15.10.2019	0,096	230	4				1,4	<1	8	4
W 2.3	12.11.2019	<0,001	350	6				2,3	<1	12	6
W 2.3	3.12.2019	<0,001	360	4		75		<1	<1	8	4
W 2.3	20.1.2020	<0,001	350	3		57,9		<1	<1	7	5
W 2.3	6.7.2020		21								

Liite 9. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

		Kokonais- typpi	Kokonaistyyppi suodatettu	Kloridi	Nitraatti typpinä	Nitriitti-nitraatti typpinä	Nitriitti typpinä	Orgaaninen kokonaishiili	Orgaaninen hiili liukoinen	pH	Sulfaatti
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	SFS 3021	mg/l
BR2 (out)	11.10.2018	1200	1200	4,4	<5	<5	<1	53	47	5,1	620
BR2 (out)	5.11.2018	870			<5	<5	2	34			
BR2 (out)	16.1.2019	960	940		8	8	<1	9,8	8,9	6	820
BR2 (out)	12.2.2019	910	900		8	8	<1	9,5	9	6,1	850
BR2 (out)	19.3.2019	700	570		<5	<5	1	13	13	6,6	790
BR2 (out)	15.4.2019	740	490		<5	<5	1	29	25	6,9	560
BR2 (out)	13.5.2019	1200	1000		<5	<5	<1	63	56	6,9	
BR2 (out)	10.6.2019										
BR2 (out)	15.7.2019	650	500		<5	<5	<1	18	16		330
BR2 (out)	12.8.2019	880	770		<5	<5	5	43	42		55
BR2 (out)	17.9.2019	1000	870		<5	<5	<1	34	31		340
BR2 (out)	15.10.2019	840	800		<5	<5	2	31	30		160
BR2 (out)	12.11.2019	630	620		<5	<5	<1	9,9	9,4		570
BR2 (out)	3.12.2019	680	650		<5	<5	<1	9,3	9,5	5,5	380
BR2 (out)	20.1.2020	540	530		<5	<5	1	11	11	5,5	290
BR2 (out)	10.3.2020	620				<5					260
BR2 (out)	6.7.2020	1100				61					15
W 2.3	11.10.2018	1100	1100	2	42	51	9	17	14	5,9	340
W 2.3	5.11.2018	730			13	13	<1	20			
W 2.3	15.7.2019	710	640		11	17	6	13	11		330
W 2.3	12.8.2019	690	540		<5	<5	5	24			220
W 2.3	17.9.2019	770	740		8	10	2	18			370
W 2.3	15.10.2019	530	520		110	110	<1	8,2			250
W 2.3	12.11.2019	680	690		13	15	2	8,8			530
W 2.3	3.12.2019	620	620		7	15	8	7,5		4,2	380
W 2.3	20.1.2020	710	700		41	42	<1	7		4,2	300
W 2.3	6.7.2020	980				23					70

Liite 10. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	mmol/l	µg/l	mmol/l	µg/l	µg/l	mS/m	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	
W 3.3	11.10.2018						116						
W 3.3	5.11.2018	0,618	42		210				22	9,8	290		
YP (sammal)	11.10.2018						80,1						
Oja	21.5.2018	0,023	610	0,4	3	3		15	8,5	2,9	19	8	
		Koko- nais- typpi	Kloridi	Nitraatti tyyppinä	Nitriitti- nitraatti tyyppinä	Nitriitti tyyppinä	Orgaaninen kokonais- hiili	Orgaaninen hiili liukoinen	pH	Sulfaatti			
Paikka	pvm	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	SFS 3021	mg/l			
W 3.3	11.10.2018								4,9				
W 3.3	5.11.2018	1100		17	20	3	36						
AP (sammal)	11.10.2018								5,3				
YP (sammal)	11.10.2018								4,6				
Oja	21.5.2018	1600	3,5		95		17	15		230			
		Happi liukoi- nen	Johtokyky käsi- mittari	Lämpötila	ORP (V) YSI	pH käsi- mittari			Happi liukoinen	Johtokyky käsimitari	Lämpötila	ORP (V) YSI	pH käsi- mittari
Paikka	pvm	mg/l	mS/m	°C	mV		Paikka	pvm	mg/l	mS/m	°C	mV	
W1	11.10.2018	8,1		7			W1	12.11.2019	10,8	99	2,4	280	5,54
W1	5.11.2018	7,5	126		356	4,2	W1	3.12.2019	10,37		3,4	228,5	
W1	16.1.2019	6,4		2,8	186		W1	20.1.2020	10,3		2,4	198	
W1	12.2.2019	9,1		2,2	176		W1	10.3.2020	11,85	71	3,6	155	5,93
W1	19.3.2019	9,99		3,2	195		pH1.1	5.11.2018			6,5		3,56
W1	15.4.2019	11,5	48	3	(-289)	4,22	pH1.1	13.5.2019	7,16	121	10,7	464,4	4,21
W1	13.5.2019	9,84	161	10,9	474,5	3	pH1.1	10.6.2019	13,14		13,8	143,9	5,28
W1	10.6.2019	17,3	121	20	461,7	3,5	pH1.1	12.8.2019	7,5	104	20,5	318,5	4,18
W1	15.7.2019		68	15,2	332,5	4,28	pH1.1	17.9.2019		85	11,1		6
W1	12.8.2019	9,2	109	21	513,5	3,36	pH1.1	15.10.2019			2,6		5,52
W1	17.9.2019	7	101	11,1	147,6	5,4	pH1.1	10.3.2020	11,1	69	3,8	164	5,56
W1	15.10.2019	8,02	156	10	(-12)	5,97	pH1.2	5.11.2018			6,7		3,73

Liite 11. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	mg/l	mS/m	°C	mV		Paikka	pvm	mg/l	mS/m	°C	mV	
pH1.2	13.5.2019	7,78	89	9	460,3	5,36	pH2.3	15.10.2019		165	9,4		5,92
pH1.2	10.6.2019	8,64		13,2	427,5	6,66	pH2.3	10.3.2020	9,7	84	3,8	360	4,4
pH1.2	12.8.2019	5,91	87	17,2	128	6,68	W2.1.1	11.10.2018	8,3		6,9		
pH1.2	17.9.2019			11		6,2	W2.1.1	16.1.2019	7,6		3,7	137	
pH1.2	15.10.2019		20	8,6		6,01	W2.1.1	12.2.2019	8,6		2,9	144	
pH1.2	10.3.2020	10,15	59	3	82	6,5	W2.1.1	19.3.2019	10		5	197	
pH1.3	5.11.2018			6,6		3,83	W2.1.1	15.4.2019	9,26	131	4,9	(-184)	4,65
pH1.3	13.5.2019	8,9	107	8,8	468,1	5,69	W2.1.1	13.5.2019	9,31	141	8,1	359,5	6,62
pH1.3	10.6.2019	7,42		13,2	99,9	8,67	W2.1.1	10.6.2019	8,09	82	11,1	326,6	9,37
pH1.3	12.8.2019	6,3	84	18,5	43,8	9,37	W2.1.1	15.7.2019		64	13,7	27,2	9,3
pH1.3	17.9.2019		10	11,2		6,3	W2.1.1	12.8.2019	8	68	14,5	12	9,53
pH1.3	15.10.2019		21	10,5		6,04	W2.1.1	17.9.2019	6,5	103	11,4	95	6,1
pH1.3	10.3.2020	10,7	46	2,9	-5	10,55	W2.1.1	15.10.2019	2,3	126	7,9	(-7,7)	6,75
pH2.1	5.11.2018			6,7		5,85	W2.1.1	12.11.2019	10,01	114	3,3	133	6,52
pH2.1	13.5.2019	7,13	90	10,8	455,1	4,72	W2.1.1	3.12.2019	8,72		5,7	209	
pH2.1	10.6.2019	0,77		13,1	(-5)	5,56	W2.1.1	20.1.2020	6,6		4,1	199	
pH2.1	12.8.2019	5,92	14	16,9	420	4,15	W2.1.1	10.3.2020	12	57	6,8	66	6,53
pH 2.1	10.3.2020	9,9	41	3,5	345	4,25	W2.1.1	6.7.2020	5,35	107	13,4	410,7	4,1
pH2.2	5.11.2018			6,8		5,49	W2.1.2	11.10.2018	7,6		7		
pH2.2	13.5.2019	6,22	83	9,4	470	4,77	W2.1.2	16.1.2019	5,4		3	136	
pH2.2	10.6.2019	0,52		12,7	(-209,7)	7,26	W2.1.2	12.2.2019	8,5		3,5	146	
pH2.2	12.8.2019	7,4	97	17,1	153,3	6,52	W2.1.2	19.3.2019	10,5		3,8	196	
pH2.2	17.9.2019		85	11,2		6	W2.1.2	15.4.2019	12,66	55	4,6	(-176)	5,12
pH2.2	15.10.2019		142	7,7		5,77	W2.1.2	13.5.2019	8,57	121	9,2	351,3	5,43
pH2.2	10.3.2020	11,3	64	3,7	314	4,35	W2.1.2	10.6.2019	7,26	104	11,1	337	6,35
pH2.3	5.11.2018			6,9		5,86	W2.1.2	15.7.2019		90	14,7	252,7	4,93
pH2.3	13.5.2019	8,6	90	8,9	420,3	6,1	W2.1.2	12.8.2019	8	8	14	59	7,24
pH2.3	10.6.2019	0,43		12,4	(-108,1)	6,9	W2.1.2	17.9.2019	7,01	10	11,2	125	5,7
pH2.3	12.8.2019	8,29	97	15	73,2	6,79	W2.1.2	15.10.2019	4,87	90	7,9	65,9	5,7
pH2.3	17.9.2019		90	11,2		5,8	W2.1.2	12.11.2019	8,34	98	2,6	190	6,22

Liite 12. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

		Happi liukoinen	Johtokyky käsimittari	Lämpötila	ORP (V) YSI	pH käsimittari			Happi liukoinen	Johtokyky käsimittari	Lämpötila	ORP (V) YSI	pH käsimittari
Paikka	pvm	mg/l	mS/m	°C	mV		Paikka	pvm	mg/l	mS/m	°C	mV	
W2.1.2	3.12.2019	10,54		4	262		BR1 (out)	11.10.2018	0,5		8,2		
W2.1.2	20.1.2020	10,2		2,9	198		BR1 (out)	16.1.2019	1,01		5,5	(-271)	
W2.1.2	10.3.2020	12	72	4,4	145	6,05	BR1 (out)	12.2.2019	1,16		5,1	(-267)	
W2.1.	12.2.2019	8,7		3,3	143		BR1 (out)	19.3.2019	4,46		6	(-270)	
W2.1.	19.3.2019	11,3		3,9	160		BR1 (out)	15.4.2019	4,42	124	5,9	28	6,72
W2.1.	15.4.2019	12,61	48	4,4	(-159)	5,76	BR1 (out)	13.5.2019	3,25	87	6,5	354,5	6,44
W2.1.	13.5.2019	9,51	137	8,5	369,8	6,56	BR1 (out)	10.6.2019	0,17	80	10,2	(-236,7)	6,65
W2.1.	10.6.2019	7,35	97	11,7	347,9	6	BR1 (out)	15.7.2019		58	14,2	(-285,3)	6,47
W2.1.	15.7.2019		66	14,4	171,1	5,63	BR1 (out)	12.8.2019	2,34	74		(-226,8)	6,5
W2.1.	12.8.2019		79	15,3	12	8,04	BR1 (out)	17.9.2019		81	12	(-231)	6,2
W2.1.	17.9.2019	7,46	101	11,3	115	5,9	BR1 (out)	15.10.2019	1,58	74	8,7	(-278)	5,91
W2.1.	15.10.2019	4,81	112	8	5	6,09	BR1 (out)	12.11.2019	3,56	115	4,2	(-174)	6,12
W2.1.	12.11.2019	10,65	99	2,7	174,5	5,8	BR1 (out)	3.12.2019	1,36		5,2	(-374,5)	
W2.1.	3.12.2019	10,79		3,8	270		BR1 (out)	20.1.2020	1,8		4,6	21,9	
W2.1.	20.1.2020	9,7		3	201		BR1 (out)	10.3.2020	3,65	65	4,1	-206,5	5,53
W2.1.	10.3.2020	12,58	72	4	170	5,3	BR1 (out)	6.7.2020	0,22	34	12,5	(-263)	6,1
W2.1.	6.7.2020	6,3	106		409,7	4,1	BR1.1	13.5.2019	3,34	36	8,4	(-263,3)	6,22
W 2.2	11.10.2018	8,6		7			BR1.1	10.6.2019	0,76	76	13,4	(-222,8)	6,91
W 2.2	5.11.2018	6,2	117	13,6	230	5	BR1.1	15.7.2019		64	15,7	(-283,2)	6,28
W 2.2	10.6.2019	15,39	94	11,2	94,3	6,98	BR1.1	12.8.2019		65	14,9	(-277)	6,59
W 2.2	15.7.2019		66	14,6	155,3	5,8	BR1.1	17.9.2019	5,8	80	12,5	(-137)	5,8
W 2.2	12.8.2019		78	14,3	(-166)	7,71	BR1.1	10.3.2020	6,95	62	4,1	106,3	5,25
W 2.2	17.9.2019	8,37	100	12,1	106	6	BR1.2	13.5.2019	2,92	36	7,4	(-282,9)	6,4
W 2.2	15.10.2019	5,84	84	5,7	(-158,6)	6,18	BR1.2	10.6.2019	1,14	65	13,5	(-289,6)	6,44
W 2.2	12.11.2019	8,02	102	2,8	113	5,73	BR1.2	15.7.2019		59	15,8	(-315,5)	6,44
W 2.2	6.7.2020	7,44	100	15,8	255,6	4,7	BR1.2	12.8.2019		62	16,9	(-297)	6,73
W 2.2 Sieni	3.12.2019	6,8		3,3	298		BR1.2	17.9.2019	5,7	70	13,7	(-210)	5,9
W 2.2 Sieni	20.1.2020	10		3,8	208		BR1.2	10.3.2020	6,6	50	4,2	273	3,66
W 2.2 Sieni	10.3.2020	13,4	73	5,5	180	5,07	BR1.3	5.11.2018	1,1	88	9	(-210)	5,5
W 2.2 Sieni	6.7.2020	5,2	96	15,4	235,9	4,9	BR1.3	13.5.2019	2,75	46	7,3	(-295,7)	6,94

Liite 13. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	Happi	Johtokyky	Lämpötila	ORP (V) YSI	pH	Paikka	pvm	Happi	Johtokyky	Lämpötila	ORP (V) YSI	pH
		liukoinen	käsimittari	°C	mV	käsimittari			liukoinen	käsimittari	°C	mV	käsimittari
		mg/l	mS/m						mg/l	mS/m			
BR1.3	10.6.2019	0,99	173	12,8	(-263,3)	6,53	BR2.2	17.9.2019	0,73	73	13,5	(-25)	6,1
BR1.3	15.7.2019		54	15,5	(-327)	6,62	BR2.2	10.3.2020	3,9	47	4	428	3,89
BR1.3	12.8.2019		52	16,2	(-283)	6,61	BR2.3	5.11.2018	1	93	8,7	(-250)	6,1
BR1.3	17.9.2019	4,9	70	13,7	(-252)	6	BR2.3	13.5.2019	2,75	64	6,9	(-301,0)	6,58
BR1.3	10.3.2020	3,7	45	3,9	-183	4,44	BR2.3	10.6.2019	1,44	59		(-309,8)	6,59
BR2 (out)	11.10.2018	1,5		8,5			BR2.3	15.7.2019		26	15,3	(-269,8)	6,55
BR2 (out)	16.1.2019	0,64		5,3	(-224)		BR2.3	12.8.2019		52	15,1	(-273)	6,59
BR2 (out)	12.2.2019	0,8		6,1	(-229)		BR2.3	17.9.2019	0,08	72	14,5	(-262)	6,2
BR2 (out)	19.3.2019	4,73		6	(-257)		BR2.3	10.3.2020	3,9	21	2,7	-208	5,5
BR2 (out)	15.4.2019	3,81	125	5,6	(130--90)	6,65	W 2.3	11.10.2018	0,3		8,5		
BR2 (out)	13.5.2019	4	100	6,5	(-285,1)	7,5	W 2.3	10.6.2019	2,46	80	10,4	(-72,3)	5,98
BR2 (out)	10.6.2019	0,56	86	10,5	(-269,9)	6,54	W 2.3	15.7.2019		49	12,2	(-131,1)	5,77
BR2 (out)	15.7.2019		59	14,3	(-275,6)	6,51	W 2.3	12.8.2019		23	13,4	(-192)	7
BR2 (out)	12.8.2019	2,75	72		(-236,9)	6,55	W 2.3	17.9.2019	9,66	72	13,5	(-146)	5,4
BR2 (out)	17.9.2019		27	12,1	(-243)	6,2	W 2.3	15.10.2019	3,85	56	6,8	(-109,3)	5,27
BR2 (out)	15.10.2019	0,62	8	8,5	(-322)	5,96	W 2.3	12.11.2019	3,65	103	4,7	405	4,38
BR2 (out)	12.11.2019	3,91	11	4,7	(-152)	6,07	W 2.3	3.12.2019	2,65		4,4	(-361,8)	
BR2 (out)	3.12.2019	0,67		5,6	(-366,9)		W 2.3	20.1.2020	5,2		4,1	250	
BR2 (out)	20.1.2020	0,4		4,9	212		W 2.3	10.3.2020	10,89	49	3,5	388	4,4
BR2 (out)	10.3.2020	4,8	6	4	-187,8	5,3	W 2.3	6.7.2020	5,05	29	12,8	190	5,6
BR2 (out)	6.7.2020	0,15	27	11,7	(-273)	6	W2.3 wetland	5.11.2018	4	99	7,2	180	5,5
BR2.1	13.5.2019	4,35	48	8,2	(-140)	6,36	W2.3 bypass	5.11.2018	4,8	95		(-108)	5,6
BR2.1	10.6.2019	1,07	73	13,3	(-165,7)	6,23	W 3.3	11.10.2018	0,6		8,1		
BR2.1	15.7.2019		59	15,2	(-120,4)	6,41	W 3.3	5.11.2018	2	96	9,1	(-211)	5,8
BR2.1	12.8.2019		60	17,7	(-269)	6,98	W 3.3	16.1.2019	0,16		6,1	(-208)	
BR2.1	17.9.2019	2,4	83	12,5	(-122)	5,8	W 3.3	10.6.2019	1,35	82	10,5	(-314,6)	6,7
BR2.1	10.3.2020	3,5	61	5,3	-97,2	4,08	W 3.3	15.7.2019		59	14	(-266,6)	6,45
BR2.2	13.5.2019	5,54	46	7	(-212,2)	6,32	W 3.3	12.8.2019	2,09	54	13,2	(-312,4)	6,54
BR2.2	10.6.2019	0,85	87		150,9	6,56	W 3.3	17.9.2019		79	13,5	(-252,9)	6,2
BR2.2	15.7.2019		28	15,6	(-67,1)	6,44	W 3.3	15.10.2019	0,68	86	7,8	(-304,1)	5,93
BR2.2	12.8.2019		57	15,4	(-119)	7,15	W 3.3	12.11.2019	3,32	107	4,7	(-153)	6,08

Liite 14. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	mg/l	mS/m	°C	mV	
W 3.3	3.12.2019	1,84		5,5	(-380)	
W 3.3	20.1.2020	7,1		5,1	210	
W 3.3	10.3.2020	11,51	71	5,6	-112,9	5,36
AP (sammal)	11.10.2018			5,8		
AP (sammal)	13.5.2019	8,5	52	9,1	278,4	3,55
AP (sammal)	10.6.2019	14,72	78	19,7	491,4	3,82
AP (sammal)	15.7.2019		72	15,8		3,62
AP (sammal)	12.8.2019		80	18,6		3,46
AP (sammal)	17.9.2019		70	10,1		4,6
AP (sammal)	15.10.2019		54	2,8		3,72
YP (sammal)	11.10.2018			5,1		
YP (sammal)	13.5.2019	8,8	49	8,8	253	3,7
YP (sammal)	10.6.2019	20,4	63	19,2	433,6	3,62
YP (sammal)	15.7.2019		75	17,2		3,55
YP (sammal)	12.8.2019		76	17,4		3,46
YP (sammal)	17.9.2019		70			4,5
YP (sammal)	15.10.2019		57	2,4		4,26
Moss before	5.11.2018	10,6	58	1,1	375	4,4
Moss after	5.11.2018	12	58	1,1	300	4,4
Wetland	17.9.2019		38			6,5
Wetland	15.10.2019			4,1		5,47
OW1	5.11.2018	8,8	115	7,2	150	5,2
OW2	5.11.2018		127	6,8	110	6,1

Liite 15. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Alumiini	Alumiini suodatettu	Barium	Barium suodatettu	Fosfori	Fosfori suodatettu	Kalium	Kalium suodatettu	Kalsium	Kalsium suodatettu	Magnesium
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
W1	11.10.2018	1700	1600	36	35	<50	<50	3,6	3,6	115	112	58,5
W1	16.1.2019	2100	1000	30	30	<25	<25	5,5	5,5	142	142	91,2
W1	12.2.2019	1500	690	27	26	<25	<25	5,74	5,77	148	147	99,3
W1	19.3.2019	1300	900	25	25	<25	<25	5,76	5,77	135	135	86,9
W1	15.4.2019	3200	3100	51	49	<25	<25	4,84	4,78	34,7	34,8	20,3
W1	15.7.2019	680	640	36	36	<25	<25	8,36	8,49	75,7	76,5	50,2
W1	12.8.2019	1900	1800	31	29	33	<25	6,76	6,83	113	113	64
W1	17.9.2019	1700	620	30	25	<25	<25	7,12	7,12	88,8	90,7	56,2
W1	15.10.2019	370	59	41	39	44	<25	10,1	10,2	180	180	106
W1	12.11.2019	2500	1200	39	39	<25	<25	4,86	4,88	81,7	81,8	52,7
W1	3.12.2019	2700		37		<25		3,73		67,8		40,4
W1	20.1.2020	3100		40		<25		2,38		24,8		15
W1	10.3.2020	1100		37		<25		3,42		57,3		36,1
W2.1.1	11.10.2018	320	31	34	34	<50	<50	3,4	3,4	130	132	57,6
W2.1.1	16.1.2019	1000	230	35	33	<25	<25	5,7	5,7	160	159	86
W2.1.1	12.2.2019	460	320	30	30	<25	<25	5,78	5,81	161	161	93,9
W2.1.1	19.3.2019	1100	600	26	26	<25	<25	5,94	5,86	149	146	87,7
W2.1.1	15.4.2019	1100	1000	26	25	<25	<25	6,33	6,07	147	142	69,5
W2.1.1	15.7.2019	170	27	36	34	<25	<25	3,88	3,85	117	116	32,6
W2.1.1	12.8.2019	84	43	38	38	<25	<25	6,27	6,3	149	150	10,8
W2.1.1	17.9.2019	940	40	39	35	<25	<25	7,23	7,16	104	104	52,2
W2.1.1	15.10.2019	540	44	53	50	28	<25	9,1	9,14	151	153	74,4
W2.1.1	12.11.2019	1100	36	39	37	<25	<25	5,59	5,56	122	120	56,3
W2.1.1	3.12.2019	280		12		<25		4,59		112		11,8
W2.1.1	20.1.2020	590		18		<25		4,63		104		21,2
W2.1.2	11.10.2018	150	<10	42	40	<50	<50	4	4	130	126	40,7
W2.1.2	16.1.2019	1300	300	29	28	<25	<25	5,5	5,5	158	154	92,8
W2.1.2	12.2.2019	400	160	26	26	<25	<25	5,68	5,68	162	160	98,8
W2.1.2	19.3.2019	690	180	24	24	<25	<25	5,81	5,84	150	150	88,6

Liite 16. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Magnesium suodatettu	Mangaani	Mangaani suodatettu	Natrium	Natrium suodatettu	Rauta	Rauta suodatettu	Rikki	Rikki suodatettu	Sinkki 11885	Sinkki 11885 suodatettu
Paikka	pvm	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W1	11.10.2018	57,8	5900	5800	28,4	28,3	14000	9400	210000	200000	5600	5500
W1	16.1.2019	90,4	6800	6900	39,7	40,1	40000	34000	280000	280000		
W1	12.2.2019	98,2	6700	6700	43,3	43,4	40000	35000	300000	290000		
W1	19.3.2019	87,6	6300	6300	37,3	37,4	25000	21000	280000	280000		
W1	15.4.2019	19,8	2200	2200	11	10,9	4800	1400	77000	74000		
W1	15.7.2019	50,4	3500	3500	25,8	26,2	9900	3800	150000	160000		
W1	12.8.2019	64,2	4700	4700	31,7	32,2	18000	3500	230000	230000		
W1	17.9.2019	56,4	3300	3300	28,7	28,9	30000	9400	180000	180000		
W1	15.10.2019	107	5600	5600	48,8	49,5	150000	75000	340000	340000		
W1	12.11.2019	52,8	3700	3700	23,9	23,9	19000	15000	170000	170000		
W1	3.12.2019		2600		16,3		15000		140000			
W1	20.1.2020		1300		7,67		6200		55000			
W1	10.3.2020		2900		16		22000		120000			
W2.1.1	11.10.2018	57,3	5700	5700	28,8	28,5	3500	130	200000	200000	4600	4600
W2.1.1	16.1.2019	85,4	6200	6100	39,7	39,9	26000	15000	280000	280000		
W2.1.1	12.2.2019	93,1	6100	6100	43	43,2	24000	21000	290000	290000		
W2.1.1	19.3.2019	86,5	6100	6000	38,8	38	16000	11000	290000	290000		
W2.1.1	15.4.2019	67,4	4900	4800	38,6	37,3	1000	54	260000	250000		
W2.1.1	15.7.2019	32,2	1400	800	25,4	25,3	1100	30	140000	140000		
W2.1.1	12.8.2019	10,8	140	31	30,6	30,7	270	16	150000	150000		
W2.1.1	17.9.2019	52,4	3000	3000	47	47,1	16000	320	170000	170000		
W2.1.1	15.10.2019	75,3	3800	3800	174	178	46000	8400	260000	260000		
W2.1.1	12.11.2019	55,5	3400	3300	36,8	36,6	12000	660	200000	190000		
W2.1.1	3.12.2019		480		30,7		680		110000			
W2.1.1	20.1.2020		1100		94,7		2400		120000			
W2.1.2	11.10.2018	40,1	3100	2800	28,9	28,7	2900	7	170000	170000	2100	720
W2.1.2	16.1.2019	89,9	6900	6800	40,4	39,6	32000	20000	290000	280000		
W2.1.2	12.2.2019	97,3	6600	6600	42,6	42,7	21000	15000	290000	290000		
W2.1.2	19.3.2019	89,4	6200	6200	37,8	37,8	15000	8200	290000	290000		

Liite 17. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Sinkki 17294-2	Sinkki 17294-2 suodatettu	Strontium	Strontium suodatettu	Titaani	Titaani suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W1	11.10.2018	5800	5700	450	440	4,6	<1,0
W1	16.1.2019	3800	3700	530	530	0,5	<0,1
W1	12.2.2019	3700	3600	550	540	0,2	<0,1
W1	19.3.2019	2200	2200	500	500	0,4	<0,1
W1	15.4.2019	3300	3100	140	140	2,5	0,3
W1	15.7.2019	1300	1300	320	330	1	0,2
W1	12.8.2019	2500	2500	450	440	1,7	0,1
W1	17.9.2019	1900	2000	350	350	3,9	0,1
W1	15.10.2019	770	700	750	750	2,5	0,8
W1	12.11.2019	3500	3500	310	310	0,9	0,2
W1	3.12.2019	3000		260		1,7	
W1	20.1.2020	2900		94		4	
W1	10.3.2020	1500		210		3,1	
W2.1.1	11.10.2018	4900	4900	450	450	<1,0	<1,0
W2.1.1	16.1.2019	3200	3200	590	600	0,8	0,1
W2.1.1	12.2.2019	3100	3200	600	600	<0,1	<0,1
W2.1.1	19.3.2019	2200	2200	540	530	0,4	0,1
W2.1.1	15.4.2019	2000	1900	540	520	0,1	<0,1
W2.1.1	15.7.2019	410	11	480	470	0,8	<0,1
W2.1.1	12.8.2019	37	3,9	720	730	<0,1	<0,1
W2.1.1	17.9.2019	1500	1400	410	410	3,3	0,2
W2.1.1	15.10.2019	1100	900	690	690	3,3	0,3
W2.1.1	12.11.2019	2600	2400	470	460	0,8	0,1
W2.1.1	3.12.2019	270		420		0,2	
W2.1.1	20.1.2020	720		410		0,6	
W2.1.2	11.10.2018	2200	770	700	680	1,9	<1,0
W2.1.2	16.1.2019	3800	3600	520	540	0,3	<0,1
W2.1.2	12.2.2019	3600	3500	550	550	0,1	0,2
W2.1.2	19.3.2019	2200	2200	510	500	0,8	<0,1

Liite 18. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Alumiini	Alumiini suodatettu	Barium	Barium suodatettu	Fosfori	Fosfori suodatettu	Kalium	Kalium suodatettu	Kalsium	Kalsium suodatettu	Magnesium
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
W2.1.2	15.4.2019	2200	220	38	38	<25	<25	4,77	4,63	49,5	47,9	21,4
W2.1.2	15.7.2019	540	490	35	35	<25	<25	3,32	3,28	80,5	80,1	50,6
W2.1.2	12.8.2019	300	5,4	26	26	<25	<25	5,04	5,1	134	134	55,2
W2.1.2	17.9.2019	1300	280	34	31	<25	<25	7,29	7,32	100	100	57,7
W2.1.2	15.10.2019	670	110	33	27	<25	<25	7,48	7,38	106	105	54,4
W2.1.2	12.11.2019	1900	610	40	39	<25	<25	5,02	5,01	88,7	88,3	56
W2.1.2	3.12.2019	2500		35		<25		3,72		67,6		39,6
W2.1.2	20.1.2020	3400		43		<25		2,51		27,9		16,3
W2.1.	12.2.2019	420	210	28	28	<25	<25	5,75	5,75	160	163	95,2
W2.1.	19.3.2019	770	180	24	24	<25	<25	5,83	5,84	147	147	87,7
W2.1.	15.4.2019	1300	190	39	38	<25	<25	4,67	4,61	48,7	47,7	21,2
W2.1.	15.7.2019	540	280	35	34	<25	<25	3,44	3,42	83,8	83,3	49,1
W2.1.	12.8.2019	450	17	32	30	<25	<25	5,22	5,39	135	138	42,6
W2.1.	17.9.2019	1000	120	33	31	<25	<25	7,17	7,17	99,2	99,3	54,1
W2.1.	15.10.2019	480	62	46	44	30	<25	8,65	8,63	137	138	68
W2.1.	12.11.2019	2100	710	40	39	<25	<25	5,02	5,04	89,6	89	54,5
W2.1.	3.12.2019	2500		35		<25		3,81		69,8		38,7
W2.1.	20.1.2020	3300		42		<25		2,56		28,3		16,2
W2.1.	10.3.2020	1100		34		<25		3,55		60,6		37,7
W2.1.	6.7.2020	2300		33		39		6,37		139		77,2
W2.1.	25.8.2020	780		38		48		4		80,3		46,6
W 2.2	11.10.2018	3300	<10	63	35	72	<50	3,6	3,5	126	128	53,1
W 2.2	15.7.2019	600	240	35	35	<25	<25	3,47	3,43	83,6	84,1	49,7
W 2.2	12.8.2019	130	27	31	31	<25	<25	5,45	5,37	139	137	39,1
W 2.2	17.9.2019	860	71	32	31	<25	<25	6,98	7,16	96,6	97,7	51,1
W 2.2	15.10.2019	440	63	45	43	<25	<25	8,62	8,45	136	135	67,4
W 2.2	12.11.2019	1600	700	40	40	<25	<25	5	4,97	95,1	95,3	55,3
W 2.2	6.7.2020	2400		48		130		6,18		125		69,5

Liite 19. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W2.1.2	15.4.2019	21,1	2200	2200	11,4	11,1	4800	38	82000	78000		
W2.1.2	15.7.2019	49,9	3500	3500	25,8	25,8	4300	470	160000	150000		
W2.1.2	12.8.2019	54,8	2800	2700	29,7	29,9	9000	39	190000	190000		
W2.1.2	17.9.2019	58,4	3400	3300	31,1	31,9	22000	3700	180000	180000		
W2.1.2	15.10.2019	53,8	2700	2600	54,6	54,4	25000	2600	180000	180000		
W2.1.2	12.11.2019	55,8	3800	3700	25,2	25	16000	11000	170000	170000		
W2.1.2	3.12.2019		2500		16,3		12000		140000			
W2.1.2	20.1.2020		1400		8,34		15000		61000			
W2.1.	12.2.2019	95,9	6400	6400	43,1	43,2	21000	18000	280000	290000		
W2.1.	19.3.2019	87,4	6200	6200	37,9	37,9	16000	9000	280000	280000		
W2.1.	15.4.2019	20,8	2200	2200	11,2	11,1	1600	63	80000	78000		
W2.1.	15.7.2019	48,8	3300	3200	26,3	26,1	4400	390	150000	150000		
W2.1.	12.8.2019	43	2100	2100	29,3	29,7	4600	32	180000	180000		
W2.1.	17.9.2019	54,3	3100	3100	37,3	37,5	17000	800	170000	170000		
W2.1.	15.10.2019	68	3500	3400	143	144	40000	6300	230000	230000		
W2.1.	12.11.2019	54	3700	3700	24,9	24,9	18000	12000	180000	180000		
W2.1.	3.12.2019		2500		16,7		14000		140000			
W2.1.	20.1.2020		1400		8,47		7300		61000			
W2.1.	10.3.2020		2900		16,6		30000		120000			
W2.1.	6.7.2020		5100		37,3		34000		270000			
W2.1.	25.8.2020		3100		23,5		47000		150000			
W 2.2	11.10.2018	53,5	5100	5000	28,6	28,7	69000	30	190000	190000	4700	3500
W 2.2	15.7.2019	49,9	3300	3300	26,4	26,5	5100	390	150000	150000		
W 2.2	12.8.2019	38,8	1900	1800	29,6	29,1	1300	26	180000	170000		
W 2.2	17.9.2019	51,9	2800	2800	40,2	40,8	14000	1200	160000	160000		
W 2.2	15.10.2019	66,6	3400	3300	142	141	36000	6500	230000	230000		
W 2.2	12.11.2019	55	3700	3700	26,6	26,7	14000	9300	180000	180000		
W 2.2	6.7.2020		4800		34,3		29000		240000			

Liite 20. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Sinkki 17294-2	Sinkki 17294-2 suodatettu	Strontium	Strontium suodatettu	Titaani	Titaani suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W2.1.2	15.4.2019	2300	2200	150	150	1,8	<0,1
W2.1.2	15.7.2019	1200	1200	320	330	0,3	0,1
W2.1.2	12.8.2019	210	170	370	370	0,4	0,1
W2.1.2	17.9.2019	1900	1900	400	400	3	<0,1
W2.1.2	15.10.2019	1000	940	490	470	3,6	0,3
W2.1.2	12.11.2019	3300	3300	340	340	0,7	0,1
W2.1.2	3.12.2019	2900		260		1,2	
W2.1.2	20.1.2020	3200		110		5,8	
W2.1.	12.2.2019	3400	3400	570	570	0,2	<0,1
W2.1.	19.3.2019	2100	2100	510	500	0,4	<0,1
W2.1.	15.4.2019	2300	2200	150	150	0,9	<0,1
W2.1.	15.7.2019	1100	1100	330	340	0,3	0,1
W2.1.	12.8.2019	270	140	450	460	0,4	<0,1
W2.1.	17.9.2019	1700	1700	390	390	1,7	0,2
W2.1.	15.10.2019	1000	870	640	630	2,6	0,4
W2.1.	12.11.2019	3300	3300	350	340	0,8	0,2
W2.1.	3.12.2019	2900		270		1,6	
W2.1.	20.1.2020	3200		110		4,4	
W2.1.	10.3.2020	1500		230		3	
W2.1.	6.7.2020	2200		520		29	
W2.1.	25.8.2020	880		310		15	
W 2.2	11.10.2018	5300	3700	490	490	5,7	<1,0
W 2.2	15.7.2019	1100	1100	330	340	0,9	<0,1
W 2.2	12.8.2019	140	64	480	470	0,1	<0,1
W 2.2	17.9.2019	1400	1400	380	390	1,6	0,2
W 2.2	15.10.2019	970	840	620	610	2,1	0,3
W 2.2	12.11.2019	2900	2800	360	360	0,5	0,1
W 2.2	6.7.2020	2300		470		30	

Liite 21. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Alumiini	Alumiini suodatettu	Barium	Barium suodatettu	Fosfori	Fosfori suodatettu	Kalium	Kalium suodatettu	Kalsium	Kalsium suodatettu	Magnesium
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
W 2.2 Sieni	3.12.2019	2400		36		<25		3,76		68,5		39,4
W 2.2 Sieni	20.1.2020	3200		41		<25		2,54		29,6		16,8
W 2.2 Sieni	10.3.2020	990		34		<25		3,54		60,9		38
W 2.2 Sieni	6.7.2020	2100		63		220		6,59		123		69,6
W 2.2 Sieni	25.8.2020	730		47		44		4,24		80,4		46,5
BR1 (out)	11.10.2018	57	60	95	93	580	500	3,2	3,1	124	125	53,7
BR1 (out)	16.1.2019	7,3	12	56	54	39	36	5,7	5,7	162	160	92,4
BR1 (out)	12.2.2019	8	4,7	47	47	36	31	5,67	5,65	161	161	89,1
BR1 (out)	19.3.2019	10	6,4	42	41	120	100	5,81	5,58	153	150	91,1
BR1 (out)	15.4.2019	8,2	7,1	49	48	280	270	5,9	5,67	142	140	81,3
BR1 (out)	15.7.2019	11	9,1	78	77	<25	<25	3,57	3,62	79,6	80,4	45,1
BR1 (out)	12.8.2019	23	17	280	280	72	49	4,04	3,87	78,6	77	43,7
BR1 (out)	17.9.2019	16	13	79	80	<25	<25	6,31	6,32	74,7	74,5	42,5
BR1 (out)	15.10.2019	12	12	63	65	<25	<25	5,87	5,85	61,1	61,6	39,2
BR1 (out)	12.11.2019	140	130	44	44	<25	<25	5,35	5,33	102	103	60,7
BR1 (out)	3.12.2019	340		44		<25		3,78		70,8		38,9
BR1 (out)	10.3.2020	390		33		<25		3,32		53,8		32,1
BR1 (out)	6.7.2020	270		61		39		2,53		29,7		16,8
BR2 (out)	11.10.2018	29	21	100	98	660	520	4,4	4,4	129	129	54,5
BR2 (out)	16.1.2019	52	48	52	50	36	<25	6,5	6,4	167	162	93,1
BR2 (out)	12.2.2019	82	84	42	41	27	<25	6,25	6,12	164	164	91,7
BR2 (out)	19.3.2019	47	14	40	39	39	<25	8,85	8,68	162	157	95,5
BR2 (out)	15.4.2019	14	11	40	40	140	120	7,82	7,74	144	143	83,5
BR2 (out)	15.7.2019	21	17	110	110	110	95	4,33	4,36	76,5	76,7	43,4
BR2 (out)	12.8.2019	25	17	320	320	93	83	4,95	4,91	76,5	76,7	44
BR2 (out)	17.9.2019	37	28	140	140	38	25	6,82	6,68	73,3	72,7	40,5
BR2 (out)	15.10.2019	12	11	140	140	39	37	7,3	7,27	66	66,2	41,2
BR2 (out)	12.11.2019	380	380	55	55	<25	<25	5,41	5,46	100	101	59,8
BR2 (out)	3.12.2019	750		55		<25		3,97		70,6		38,5
BR2 (out)	20.1.2020	580		32		<25		3,37		50,7		29,6

Liite 22. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Magnesium suodatettu	Mangaani	Mangaani suodatettu	Natrium	Natrium suodatettu	Rauta	Rauta suodatettu	Rikki	Rikki suodatettu	Sinkki 11885	Sinkki 11885 suodatettu
Paikka	pvm	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W 2.2 Sieni	3.12.2019		2500		16,4		10000		140000			
W 2.2 Sieni	20.1.2020		1500		8,65		5500		63000			
W 2.2 Sieni	10.3.2020		2900		16,7		21000		120000			
W 2.2 Sieni	6.7.2020		4800		33,8		26000		230000			
W 2.2 Sieni	25.8.2020		3100		23,8		43000		140000			
BR1 (out)	11.10.2018	53,3	7500	7500	27,3	27,3	4700	4600	200000	190000	4300	4300
BR1 (out)	16.1.2019	90,5	7000	7000	40,3	39,9	4100	990	330000	300000		
BR1 (out)	12.2.2019	89,6	6500	6300	41	41,4	1400	340	280000	270000		
BR1 (out)	19.3.2019	88,3	5900	5700	40,7	39,7	96	27	320000	360000		
BR1 (out)	15.4.2019	80,4	5400	5300	40,2	39,6	42	24	330000	460000		
BR1 (out)	15.7.2019	45,1	3200	3200	23,3	23,3	430	320	180000	180000		
BR1 (out)	12.8.2019	42,5	2900	2800	23,9	23,3	140	64	170000	160000		
BR1 (out)	17.9.2019	42,3	2500	2500	31,9	31,8	2000	1800	120000	120000		
BR1 (out)	15.10.2019	39,5	2200	2200	60,3	60	120	82	150000	89000		
BR1 (out)	12.11.2019	60,6	3800	3900	56,9	56,5	15000	15000	190000	190000		
BR1 (out)	3.12.2019		2800		16,7		13000		130000			
BR1 (out)	10.3.2020		2500		14,6		12000		130000			
BR1 (out)	6.7.2020		1200		11,2		1200		160000			
BR2 (out)	11.10.2018	54,7	8500	8500	26,3	26,4	5800	5300	200000	200000	3200	3200
BR2 (out)	16.1.2019	90	7000	6900	41	39,4	10000	9700	290000	280000		
BR2 (out)	12.2.2019	91,7	6400	6300	42,3	41,9	3800	3800	280000	270000		
BR2 (out)	19.3.2019	93,2	6400	6200	41,8	41,1	1500	360	290000	280000		
BR2 (out)	15.4.2019	82,7	5600	5500	40,9	40,3	1600	380	280000	300000		
BR2 (out)	15.7.2019	43,6	3400	3400	23,1	23	1900	590	140000	140000		
BR2 (out)	12.8.2019	43,6	2900	2900	24,1	23,8	110	28	270000	250000		
BR2 (out)	17.9.2019	39,7	2700	2600	28,3	27,7	1400	1200	110000	110000		
BR2 (out)	15.10.2019	41,4	2500	2500	31	30,8	61	34	200000	190000		
BR2 (out)	12.11.2019	60,2	3800	3800	26,1	26,2	12000	12000	190000	190000		
BR2 (out)	3.12.2019		2800		15,4		11000		130000			
BR2 (out)	20.1.2020		2100		13,8		9100		99000			

Liite 23. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Sinkki 17294-2	Sinkki 17294-2 suodatettu	Strontium	Strontium suodatettu	Titaani	Titaani suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W 2.2 Sieni	3.12.2019	2700		270		1,1	
W 2.2 Sieni	20.1.2020	3200		110		3,3	
W 2.2 Sieni	10.3.2020	1400		230		2,3	
W 2.2 Sieni	6.7.2020	2000		460		25	
W 2.2 Sieni	25.8.2020	790		310		15	
BR1 (out)	11.10.2018	4600	4500	500	490	<1,0	<1,0
BR1 (out)	16.1.2019	17	0,5	580	580	0,2	0,3
BR1 (out)	12.2.2019	8,5	1,1	580	570	0,3	0,2
BR1 (out)	19.3.2019	15	3,1	550	530	0,9	0,8
BR1 (out)	15.4.2019	18	9,1	470	460	0,6	0,7
BR1 (out)	15.7.2019	18	4,7	320	320	0,2	0,2
BR1 (out)	12.8.2019	16	9,7	320	310	1	0,9
BR1 (out)	17.9.2019	26	11	290	290	0,4	0,3
BR1 (out)	15.10.2019	3,6	1,1	240	240	0,5	0,4
BR1 (out)	12.11.2019	13	3,1	380	380	0,2	0,2
BR1 (out)	3.12.2019	5,5		280		0,4	
BR1 (out)	10.3.2020	4,3		200		0,4	
BR1 (out)	6.7.2020	470		120		0,6	
BR2 (out)	11.10.2018	3400	3400	530	530	<1,0	<1,0
BR2 (out)	16.1.2019	18	11	580	590	0,2	0,1
BR2 (out)	12.2.2019	15	6	580	580	0,1	0,1
BR2 (out)	19.3.2019	11	1	570	550	0,8	0,4
BR2 (out)	15.4.2019	17	2,3	480	480	0,4	0,4
BR2 (out)	15.7.2019	15	1,5	310	320	0,3	0,3
BR2 (out)	12.8.2019	5	2,4	320	320	1,6	1,4
BR2 (out)	17.9.2019	33	13	290	290	0,8	0,5
BR2 (out)	15.10.2019	7,5	3,3	260	260	0,4	0,4
BR2 (out)	12.11.2019	25	15	380	380	0,2	0,2
BR2 (out)	3.12.2019	16		280		0,4	
BR2 (out)	20.1.2020	8,3		190		0,4	

Liite 24. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Alumiini	Alumiini suodatettu	Barium	Barium suodatettu	Fosfori	Fosfori suodatettu	Kalium	Kalium suodatettu	Kalsium	Kalsium suodatettu	Magnesium
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
BR2 (out)	10.3.2020	400		31		<25		3,4		46,9		27,3
BR2 (out)	6.7.2020	270		47		32		3,78		23,5		13,4
W 2.3	11.10.2018	210	14	68	63	150	<50	17,7	17,5	43,6	43,7	17,5
W 2.3	15.7.2019	200	85	70	70	58	<25	6,01	6,07	70,3	70,5	36,3
W 2.3	12.8.2019	270	32	78	75	100	29	7,61	7,34	67,5	66,3	33,9
W 2.3	17.9.2019	750	640	35	36	<25	<25	6,6	6,61	69,3	70,7	34,8
W 2.3	15.10.2019	460	380	37	37	<25	<25	6,16	6,12	44,1	43,6	22,4
W 2.3	12.11.2019	2000	2000	36	36	<25	<25	5,56	5,55	97,9	98,8	54,7
W 2.3	3.12.2019	1900		28		<25		4,38		69,3		36,5
W 2.3	20.1.2020	1900		24		<25		3,8		50		27,4
W 2.3	6.7.2020	270		42		32		3,59		23,6		12,3
W 3.3	15.7.2019	17	15	95	94	71	59	4,08	4,01	78,1	77,3	45,2
W 3.3	12.8.2019	18	14	310	310	73	61	4,12	4,13	75,5	76,2	41,9
W 3.3	17.9.2019	30	23	110	110	25	<25	6,46	6,41	73,6	73,2	41,6
W 3.3	15.10.2019	23	21	94	94	27	<25	6,5	6,55	64,8	65,8	41,2
W 3.3	12.11.2019	320	310	54	54	<25	<25	5,31	5,35	101	101	58,9
W 3.3	3.12.2019	800		53		<25		3,88		69,4		38,2
W 3.3	20.1.2020	2600		40		<25		2,78		34,6		19,9
AP (sammal)	11.10.2018	51	42	10	10	<50	<50	0,4	0,4	12	12,6	8,4
AP (sammal)	15.7.2019	1700	1600	54	49	120	<25	4,69	4,47	84,5	84,1	50,9
AP (sammal)	12.8.2019	1300	1300	43	43	<25	<25	5,22	5,18	85,7	85,3	50,1
AP (sammal)	17.9.2019	1100	960	30	29	<25	<25	6,01	5,92	66,6	66,5	40,9
YP (sammal)	11.10.2018	1000	930	45	43	<50	<50	3,8	3,8	72,2	70,8	36,8
YP (sammal)	15.7.2019	1500	1400	49	46	<25	<25	4,2	4,16	80,4	80,6	49,7
YP (sammal)	12.8.2019	1300	1300	44	43	<25	<25	5,18	5,17	86,2	85,2	50
YP (sammal)	17.9.2019	730	520	25	25	<25	<25	6,09	6,16	53,9	55,5	37,7
Oja	21.5.2018	1100	910	52	51	<50	<50	4,8	4,7	39	38,6	22,3
Sammalalue	21.5.2018	3100	3100	51	50	<50	<50	2,6	2,5	26,6	26,6	15,5

Liite 25. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	Alkuaineet pvm	Magnesium	Mangaani	Mangaani	Natrium	Natrium	Rauta	Rauta	Rikki	Rikki	Sinkki 11885	Sinkki 11885
		suodatettu		suodatettu		suodatettu		suodatettu		suodatettu		suodatettu
		mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
BR2 (out)	10.3.2020		2300		11,9		9300		100000			
BR2 (out)	6.7.2020		980		10,3		1400		47000			
W 2.3	11.10.2018	17,4	2100	2100	8,2	8,3	1400	54	60000	60000	680	630
W 2.3	15.7.2019	36,4	3100	3100	20,9	21	2400	200	120000	120000		
W 2.3	12.8.2019	33,1	2200	2100	16,8	16,4	2800	550	80000	78000		
W 2.3	17.9.2019	35,1	3000	3000	36,7	36,9	1900	1600	120000	120000		
W 2.3	15.10.2019	22,2	1700	1700	30,1	29,8	290	200	75000	74000		
W 2.3	12.11.2019	54,4	3700	3700	27,6	27,6	790	750	180000	180000		
W 2.3	3.12.2019		3000		15		620		130000			
W 2.3	20.1.2020		2300		13		490		93000			
W 2.3	6.7.2020		890		8,29		2000		22000			
W 3.3	15.7.2019	44,5	3300	3200	23,8	23,5	1400	460	150000	150000		
W 3.3	12.8.2019	42,2	2800	2800	23,1	23,4	500	46	140000	130000		
W 3.3	17.9.2019	41,5	2600	2600	29,2	29,1	2100	1800	120000	120000		
W 3.3	15.10.2019	41,9	2400	2400	37,5	37,7	1000	450	130000	130000		
W 3.3	12.11.2019	58,9	3800	3900	31,9	32	13000	13000	190000	190000		
W 3.3	3.12.2019		2700		15,4		11000		130000			
W 3.3	20.1.2020		1600		10		6900		71000			
AP (sammal)	11.10.2018	8,5	680	690	5,4	5,3	1300	1200	22000	23000	85	85
AP (sammal)	15.7.2019	50,8	4200	4200	22,8	22,6	19000	2400	170000	170000		
AP (sammal)	12.8.2019	49,6	4300	4300	22,4	22,4	4500	4400	170000	170000		
AP (sammal)	17.9.2019	40,8	3000	2900	24,3	24,3	4800	2100	130000	130000		
YP (sammal)	11.10.2018	36,5	3700	3600	19,5	19,6	3800	980	130000	120000	3500	3500
YP (sammal)	15.7.2019	49,6	4000	3900	23,2	23	7800	4700	160000	160000		
YP (sammal)	12.8.2019	49,8	4300	4300	22,5	22,1	4300	4200	170000	170000		
YP (sammal)	17.9.2019	38,3	2400	2400	22,2	22,3	6300	1800	110000	110000		
Oja	21.5.2018	22,1	2000	1900	11,4	11,5	3000	1200	71000	71000	1400	1300
Sammalalue	21.5.2018	15,4	1800	1800	4,3	4,2	6400	6000	61000	60000	2800	2800

Liite 26. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Alkuaineet	Sinkki 17294-2	Sinkki 17294-2 suodatettu	Strontium	Strontium suodatettu	Titaani	Titaani suodatettu	
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	
BR2 (out)	10.3.2020	1,9		180		0,2	
BR2 (out)	6.7.2020	41		90		0,7	
W 2.3	11.10.2018	740	700	190	190	16	<1,0
W 2.3	15.7.2019	400	360	270	280	0,6	0,2
W 2.3	12.8.2019	740	150	270	260	1,6	0,3
W 2.3	17.9.2019	600	380	270	270	0,8	0,1
W 2.3	15.10.2019	580	590	170	170	0,5	<0,1
W 2.3	12.11.2019	220	220	370	370	0,5	0,3
W 2.3	3.12.2019	230		270		0,4	
W 2.3	20.1.2020	960		180		0,3	
W 2.3	6.7.2020	3200		87		1,3	
W 3.3	15.7.2019	14	1,3	310	310	0,2	0,2
W 3.3	12.8.2019	22	3,9	310	310	1	1
W 3.3	17.9.2019	1100	54	290	290	0,5	0,3
W 3.3	15.10.2019	110	14	250	260	0,4	0,3
W 3.3	12.11.2019	35	11	380	390	0,3	0,2
W 3.3	3.12.2019	14		270		0,3	
W 3.3	20.1.2020	2400		130		2,9	
AP (sammal)	11.10.2018	93	90	47	48	<1,0	<1,0
AP (sammal)	15.7.2019	1900	1800	320	320	4,3	0,1
AP (sammal)	12.8.2019	1800	1800	320	310	0,4	0,2
AP (sammal)	17.9.2019	1200	1300	240	240	0,8	<0,1
YP (sammal)	11.10.2018	3500	3500	290	290	4,3	<1,0
YP (sammal)	15.7.2019	1800	1800	300	300	1,9	0,1
YP (sammal)	12.8.2019	1800	1800	320	320	0,4	0,2
YP (sammal)	17.9.2019	1200	1200	210	220	0,8	0,2
Oja	21.5.2018	1400	1300	150	150	1,1	<1,0
Sammalalue	21.5.2018	2800	2800	79	79	<1,0	<1,0

Liite 27. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Raskasmetallit		Arseeni	Arseeni suodatettu	Kadmium	Kadmium suodatettu	Koboltti	Koboltti suodatettu	Kromi	Kromi suodatettu	Kupari	Kupari suodatettu	Lyijy
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W1	11.10.2018	0,61	0,39	6,7	6,6	41	40	0,75	0,47	160	150	0,37
W1	16.1.2019	0,61	0,3	8,5	8,5	34	34	0,73	0,32	180	170	0,25
W1	12.2.2019	0,45	0,2	7,4	7,4	32	32	0,46	0,26	160	140	0,15
W1	19.3.2019	0,68	0,48	3,7	3,6	23	23	0,44	0,23	140	130	0,45
W1	15.4.2019	0,6	0,4	8,2	7,9	20	19	1,8	1,3	810	770	0,6
W1	15.7.2019	0,7		1,9		14		0,41		88		0,22
W1	12.8.2019	1,1		6,4		30		0,7		220		0,43
W1	17.9.2019	0,94		5,4		18		0,74		160		0,48
W1	15.10.2019	3		0,8		8,1		0,99		56		0,18
W1	12.11.2019	0,69		8,3		23		0,84		530		0,25
W1	3.12.2019	0,72		7,5		21		1,1		530		0,5
W1	20.1.2020	0,71		8		15		2,2		890		0,7
W1	10.3.2020	0,81		3,3		13		0,97		260		0,43
W2.1.1	11.10.2018	0,29	0,22	4	3,9	39	39	0,26	0,15	60	33	0,086
W2.1.1	16.1.2019	0,44	0,17	7,4	7,4	31	30	0,9	0,16	120	75	0,11
W2.1.1	12.2.2019	0,26	0,2	6,1	6,1	29	29	0,3	0,17	86	81	0,052
W2.1.1	19.3.2019	0,5	0,28	3,8	3,7	22	22	0,63	0,17	140	130	0,3
W2.1.1	15.4.2019	0,19	0,17	4,1	3,9	19	19	0,28	0,22	210	200	0,039
W2.1.1	15.7.2019	0,52		0,64		4,7		0,22		37		0,042
W2.1.1	12.8.2019	0,59		0,088		0,63		0,47		24		0,038
W2.1.1	17.9.2019	0,84		3,3		15		0,76		100		0,25
W2.1.1	15.10.2019	1,7		1,5		10		1,6		110		0,24
W2.1.1	12.11.2019	0,59		5		20		0,89		180		0,21
W2.1.1	3.12.2019	0,55		0,66		3		6,6		46		0,2
W2.1.1	20.1.2020	0,45		1,8		6,3		4,1		140		0,076
W2.1.2	11.10.2018	0,28	0,24	1,7	0,87	18	16	1,4	0,82	29	8,8	0,083
W2.1.2	16.1.2019	0,61	0,2	8,6	8,5	33	33	0,58	0,21	140	100	0,15
W2.1.2	12.2.2019	0,24	0,16	7,7	7,5	32	31	0,21	0,15	58	43	0,051
W2.1.2	19.3.2019	0,53	0,21	3,9	3,8	23	23	0,32	0,12	100	76	0,89
W2.1.2	15.4.2019	0,69	0,3	5,5	5,3	17	16	1	0,18	430	320	0,5
W2.1.2	15.7.2019	0,54		1,8		13		0,27		75		0,099

Liite 28. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Raskasmetallit		Lyijy suodatettu	Nikkeli	Nikkeli suodatettu	Seleeni	Seleeni suodatettu	Uraani	Uraani suodatettu	Vanadiini	Vanadiini suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W1	11.10.2018	0,31	30	30	<0,1	<0,1	0,26	0,25	0,24	0,06
W1	16.1.2019	0,029	40	40	<0,1	<0,1	0,3	0,2	0,2	0,06
W1	12.2.2019	0,032	37	37	<0,1	<0,1	0,27	0,18	0,1	0,06
W1	19.3.2019	0,068	22	21	0,2	<0,1	0,3	0,22	0,13	0,04
W1	15.4.2019	0,49	28	27	0,2	<0,1	0,31	0,28	0,58	0,08
W1	15.7.2019		14		0,1		0,15		0,18	
W1	12.8.2019		24		<0,1		0,52		0,21	
W1	17.9.2019		19		0,2		0,37		0,4	
W1	15.10.2019		6,2		0,5		0,93		2	
W1	12.11.2019		35		<0,1		0,21		0,39	
W1	3.12.2019		27		<0,1		0,29		0,38	
W1	20.1.2020		23		<0,1		0,33		0,89	
W1	10.3.2020		15		0,1		0,17		0,53	
W2.1.1	11.10.2018	0,006	28	28	<0,1	<0,1	0,14	0,068	0,1	0,05
W2.1.1	16.1.2019	0,015	44	39	0,1	<0,1	0,19	0,062	0,13	0,05
W2.1.1	12.2.2019	0,025	34	34	<0,1	<0,1	0,1	0,079	0,07	0,05
W2.1.1	19.3.2019	0,028	22	21	<0,1	<0,1	0,25	0,16	0,09	0,04
W2.1.1	15.4.2019	0,021	18	18	<0,1	<0,1	0,28	0,26	0,04	0,03
W2.1.1	15.7.2019		7,1		<0,1		0,089		0,28	
W2.1.1	12.8.2019		3		<0,1		0,038		0,43	
W2.1.1	17.9.2019		16		<0,1		0,29		0,38	
W2.1.1	15.10.2019		11		0,2		0,61		1,2	
W2.1.1	12.11.2019		28		<0,1		0,17		0,35	
W2.1.1	3.12.2019		6		0,1		0,14		0,19	
W2.1.1	20.1.2020		9,6		0,2		0,16		0,31	
W2.1.2	11.10.2018	0,006	15	12	0,1	0,1	0,089	0,069	0,25	0,09
W2.1.2	16.1.2019	0,016	40	39	<0,1	<0,1	0,23	0,082	0,11	0,05
W2.1.2	12.2.2019	0,01	36	36	<0,1	<0,1	0,097	0,051	0,07	0,05
W2.1.2	19.3.2019	0,023	22	22	0,1	<0,1	0,19	0,074	0,1	0,03
W2.1.2	15.4.2019	0,023	23	22	<0,1	<0,1	0,21	0,047	0,38	0,08
W2.1.2	15.7.2019		16		<0,1		0,13		0,1	

Liite 29. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Raskasmetallit		Arseeni	Arseeni suodatettu	Kadmium	Kadmium suodatettu	Koboltti	Koboltti suodatettu	Kromi	Kromi suodatettu	Kupari	Kupari suodatettu	Lyijy
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W2.1.2	12.8.2019	0,85		0,42		5,5		0,2		19		0,11
W2.1.2	17.9.2019	1		4,9		18		0,6		130		0,26
W2.1.2	15.10.2019	1,4		1,4		9,5		1,1		120		0,29
W2.1.2	12.11.2019	0,58		7,5		23		0,68		410		0,17
W2.1.2	3.12.2019	0,62		7,3		20		0,94		500		0,66
W2.1.2	20.1.2020	1,1		8,6		16		3		990		1,1
W2.1.	12.2.2019	0,23	0,2	7,2	7,3	30	31	0,23	0,17	65	56	0,031
W2.1.	19.3.2019	0,5	0,24	3,7	3,6	23	22	0,39	0,12	110	77	0,44
W2.1.	15.4.2019	0,39	0,25	5,5	5,2	17	16	0,6	0,19	400	330	0,21
W2.1.	15.7.2019	0,55		1,7		12		0,3		75		0,12
W2.1.	12.8.2019	0,74		0,49		4,9		0,29		34		0,12
W2.1.	17.9.2019	0,9		4,1		16		0,63		120		0,22
W2.1.	15.10.2019	1,6		1,4		9,7		1,4		99		0,24
W2.1.	12.11.2019	0,75		7,4		23		0,81		430		0,24
W2.1.	3.12.2019	0,65		7,1		20		1,4		500		0,4
W2.1.	20.1.2020	0,82		8,8		16		2,4		990		0,85
W2.1.	10.3.2020	1,1		3		13		1,4		220		0,54
W2.1.	6.7.2020	1,8		6,3		29		1,5		320		1,4
W2.1.	25.8.2020	1,5		1,7		14		1,4		110		0,52
W 2.2	11.10.2018	1,5	0,26	4,6	2,9	39	34	6,1	0,13	360	14	1,2
W 2.2	15.7.2019	0,51		1,7		12		0,31		77		0,16
W 2.2	12.8.2019	0,71		0,38		3,9		0,23		22		0,18
W 2.2	17.9.2019	0,94		3		14		0,61		95		0,2
W 2.2	15.10.2019	1,6		1,3		9,3		1,3		92		0,19
W 2.2	12.11.2019	0,56		6,4		21		0,6		290		0,15
W 2.2	6.7.2020	1,7		6,3		28		1,7		350		1,8
W 2.2 Sieni	3.12.2019	0,53		6,7		19		0,91		460		0,26
W 2.2 Sieni	20.1.2020	0,71		8,5		16		2		930		0,65
W 2.2 Sieni	10.3.2020	0,77		3		13		1,1		210		0,37
W 2.2 Sieni	6.7.2020	1,6		5,6		26		1,4		300		1,2
W 2.2 Sieni	25.8.2020	1,5		1,5		13		1,4		100		0,49

Liite 30. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Raskasmetallit		Lyijy suodatettu	Nikkeli	Nikkeli suodatettu	Seleeni	Seleeni suodatettu	Uraani	Uraani suodatettu	Vanadiini	Vanadiini suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W2.1.2	12.8.2019		4,6		0,1		0,33		0,08	
W2.1.2	17.9.2019		19		0,2		0,35		0,35	
W2.1.2	15.10.2019		12		0,2		0,47		0,57	
W2.1.2	12.11.2019		35		0,2		0,19		0,31	
W2.1.2	3.12.2019		27		0,2		0,3		0,36	
W2.1.2	20.1.2020		24		<0,1		0,42		1,3	
W2.1.	12.2.2019	0,008	35	36	<0,1	<0,1	0,091	0,056	0,07	0,05
W2.1.	19.3.2019	0,013	22	21	<0,1	0,1	0,2	0,077	0,09	0,04
W2.1.	15.4.2019	0,022	23	22	0,1	0,1	0,13	0,047	0,22	0,08
W2.1.	15.7.2019		14		<0,1		0,14		0,13	
W2.1.	12.8.2019		4,4		<0,1		0,22		0,37	
W2.1.	17.9.2019		17		0,3		0,3		0,3	
W2.1.	15.10.2019		10		0,2		0,57		1,1	
W2.1.	12.11.2019		34		0,2		0,22		0,39	
W2.1.	3.12.2019		26		<0,1		0,3		0,45	
W2.1.	20.1.2020		24		0,1		0,39		0,99	
W2.1.	10.3.2020		15		<0,1		0,19		0,68	
W2.1.	6.7.2020		24		0,1		0,57		1,1	
W2.1.	25.8.2020		14		0,2		0,39		0,92	
W 2.2	11.10.2018	0,014	29	24	0,2	<0,1	0,96	0,029	2,6	0,05
W 2.2	15.7.2019		14		<0,1		0,15		0,16	
W 2.2	12.8.2019		3,9		<0,1		0,18		0,15	
W 2.2	17.9.2019		16		<0,1		0,27		0,25	
W 2.2	15.10.2019		10		0,2		0,51		0,92	
W 2.2	12.11.2019		30		<0,1		0,16		0,26	
W 2.2	6.7.2020		24		0,2		0,55		1,1	
W 2.2 Sieni	3.12.2019		25		<0,1		0,26		0,3	
W 2.2 Sieni	20.1.2020		25		<0,1		0,36		0,76	
W 2.2 Sieni	10.3.2020		15		<0,1		0,16		0,47	
W 2.2 Sieni	6.7.2020		22		<0,1		0,53		0,94	
W 2.2 Sieni	25.8.2020		14		0,2		0,39		0,91	

Liite 31. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
BR1 (out)	11.10.2018	0,97	0,87	2,1	2	38	38	0,26	0,26	2	1,7	0,31
BR1 (out)	16.1.2019	0,21	0,21	0,042	<0,003	0,84	0,44	0,25	0,25	1,5	0,23	0,011
BR1 (out)	12.2.2019	0,16	0,15	0,023	<0,003	0,31	0,17	0,21	0,22	0,77	0,11	0,15
BR1 (out)	19.3.2019	0,64	0,64	0,028	0,007	0,26	0,17	0,19	0,16	0,34	0,3	0,028
BR1 (out)	15.4.2019	0,6	0,61	0,035	0,02	0,39	0,29	0,13	0,13	0,9	0,51	0,025
BR1 (out)	15.7.2019	0,34		0,053		0,21		0,19		1,7		0,011
BR1 (out)	12.8.2019	0,66		0,026		0,48		0,14		0,77		0,018
BR1 (out)	17.9.2019	0,49		0,13		0,38		0,29		9,4		0,03
BR1 (out)	15.10.2019	0,45		<0,003		0,25		0,29		0,6		0,036
BR1 (out)	12.11.2019	0,21		0,096		22		0,35		16		0,019
BR1 (out)	3.12.2019	0,18		0,037		35		0,4		18		0,062
BR1 (out)	10.3.2020	0,26		0,038		13		0,38		16		0,035
BR1 (out)	6.7.2020	0,54		1,7		1,7		0,57		13		0,13
BR2 (out)	11.10.2018	1,2	1,2	0,95	0,48	40	41	0,31	0,31	1,2	0,99	0,13
BR2 (out)	16.1.2019	0,15	0,15	0,03	0,024	40	40	0,22	0,23	1,6	0,59	0,022
BR2 (out)	12.2.2019	0,2	0,16	0,022	0,011	28	27	0,24	0,24	1,6	0,6	0,095
BR2 (out)	19.3.2019	0,36	0,36	0,019	<0,003	1,2	0,63	0,29	0,26	0,48	0,3	0,2
BR2 (out)	15.4.2019	0,3	0,32	0,046	0,005	0,63	0,36	0,18	0,17	0,45	0,17	0,065
BR2 (out)	15.7.2019	0,34		0,05		0,39		0,2		1,5		0,044
BR2 (out)	12.8.2019	0,98		0,012		0,29		0,2		0,39		0,015
BR2 (out)	17.9.2019	0,48		0,093		0,45		0,3		4,8		0,06
BR2 (out)	15.10.2019	0,47		0,008		0,27		0,21		0,48		0,022
BR2 (out)	12.11.2019	0,18		0,22		21		0,33		25		0,033
BR2 (out)	3.12.2019	0,17		0,084		27		0,43		26		0,084
BR2 (out)	20.1.2020	0,2		0,066		13		0,41		30		0,034
BR2 (out)	10.3.2020	0,18		0,028		6,7		0,35		20		0,032
BR2 (out)	6.7.2020	0,47		0,086		0,56		0,51		4,6		0,094
W 2.3	11.10.2018	1,7	0,59	0,49	0,4	11	11	0,88	0,22	5,9	3,1	0,37
W 2.3	15.7.2019	1,4		0,88		11		0,28		29		0,1
W 2.3	12.8.2019	2,7		1,2		3,2		0,3		30		0,62
W 2.3	17.9.2019	1,2		3,3		19		0,43		180		0,22

Liite 32. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Raskametallit		Lyijy suodatettu	Nikkeli	Nikkeli suodatettu	Seleeni	Seleeni suodatettu	Uraani	Uraani suodatettu	Vanadiini	Vanadiini suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
BR1 (out)	11.10.2018	0,29	17	17	<0,1	<0,1	0,012	0,01	0,25	0,25
BR1 (out)	16.1.2019	0,027	0,43	0,32	<0,01	<0,01	0,006	0,005	0,08	0,07
BR1 (out)	12.2.2019	0,021	0,64	0,62	<0,1	<0,1	0,003	0,003	0,08	0,07
BR1 (out)	19.3.2019	0,019	0,73	0,62	0,2	<0,1	0,012	0,01	0,32	0,28
BR1 (out)	15.4.2019	0,023	0,95	0,87	<0,1	<0,1	0,017	0,015	0,26	0,22
BR1 (out)	15.7.2019		0,63		<0,1		0,005		0,07	
BR1 (out)	12.8.2019		1,7		0,1		0,012		0,31	
BR1 (out)	17.9.2019		0,71		0,2		0,011		0,07	
BR1 (out)	15.10.2019		0,65		0,1		0,005		0,1	
BR1 (out)	12.11.2019		4,4		<0,1		0,01		0,07	
BR1 (out)	3.12.2019		33		<0,1		0,015		0,09	
BR1 (out)	10.3.2020		14		<0,1		0,016		0,14	
BR1 (out)	6.7.2020		3,4		<0,1		0,038		0,17	
BR2 (out)	11.10.2018	0,075	17	17	<0,1	<0,1	0,017	0,013	0,42	0,37
BR2 (out)	16.1.2019	0,018	36	35	<0,1	<0,1	0,007	0,007	0,08	0,07
BR2 (out)	12.2.2019	0,078	29	30	<0,1	<0,1	0,006	0,006	0,08	0,09
BR2 (out)	19.3.2019	0,05	3	1,5	<0,1	0,1	0,01	0,009	0,24	0,2
BR2 (out)	15.4.2019	0,023	1,1	0,95	<0,1	<0,1	0,008	0,008	0,21	0,18
BR2 (out)	15.7.2019		0,67		<0,1		0,004		0,09	
BR2 (out)	12.8.2019		1,7		<0,1		0,018		0,52	
BR2 (out)	17.9.2019		1		<0,1		0,01		0,11	
BR2 (out)	15.10.2019		0,85		<0,1		0,004		0,1	
BR2 (out)	12.11.2019		20		<0,1		0,016		0,08	
BR2 (out)	3.12.2019		37		<0,1		0,017		0,12	
BR2 (out)	20.1.2020		18		0,1		0,023		0,11	
BR2 (out)	10.3.2020		9,5		<0,1		0,021		0,1	
BR2 (out)	6.7.2020		1,8		0,1		0,038		0,23	
W 2.3	11.10.2018	0,029	5,5	5,1	0,2	0,2	4,1	2,8	1,6	0,3
W 2.3	15.7.2019		5,2		<0,1		0,31		0,36	
W 2.3	12.8.2019		4,1		<0,1		1,6		1,1	
W 2.3	17.9.2019		8,9		0,2		0,8		0,25	

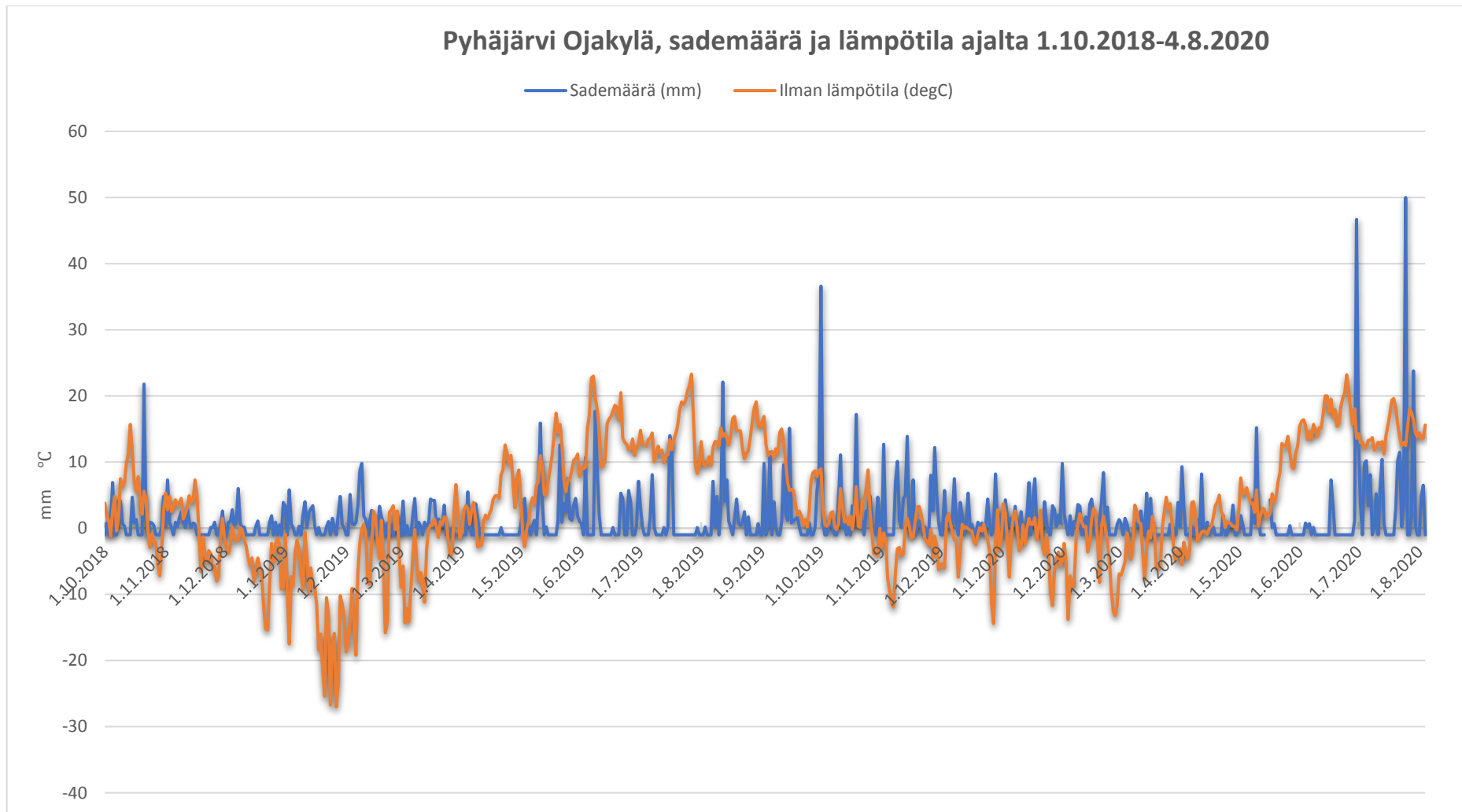
Liite 33. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	Raskas-	Arseeni	Arseeni	Kadmium	Kadmium	Koboltti	Koboltti	Kromi	Kromi	Kupari	Kupari	Lyijy
	metallit	µg/l	suodatettu	µg/l	suodatettu	µg/l	suodatettu	µg/l	suodatettu	µg/l	suodatettu	µg/l
	pvm											
W 2.3	15.10.2019	0,58		2,1		10		0,33		120		0,12
W 2.3	12.11.2019	0,22		1,2		19		0,46		190		0,25
W 2.3	3.12.2019	0,24		1,3		26		0,5		220		0,4
W 2.3	20.1.2020	0,23		3,1		24		0,53		350		0,23
W 2.3	6.7.2020	0,8		7,9		4,1		0,55		330		0,25
W 3.3	15.7.2019	0,37		0,044		0,33		0,21		1,7		0,024
W 3.3	12.8.2019	0,53		0,022		0,4		0,14		0,44		0,026
W 3.3	17.9.2019	0,51		0,15		0,57		0,33		6,5		0,051
W 3.3	15.10.2019	0,43		0,08		0,52		0,22		3,2		0,02
W 3.3	12.11.2019	0,2		0,19		21		0,33		21		0,21
W 3.3	3.12.2019	0,17		0,079		28		0,41		26		0,024
W 3.3	20.1.2020	0,57		9,2		16		1,8		830		0,71
AP (sammal)	11.10.2018	0,35	0,34	0,25	0,23	1,6	1,6	0,17	0,14	16	13	0,077
AP (sammal)	15.7.2019	1,1		2,6		25		0,74		200		0,71
AP (sammal)	12.8.2019	0,46		2,5		25		0,23		160		0,31
AP (sammal)	17.9.2019	0,36		2,3		15		0,39		140		0,26
YP (sammal)	11.10.2018	0,51	0,41	5	5	23	23	0,59	0,32	210	200	0,31
YP (sammal)	15.7.2019	0,62		2,6		23		0,37		180		0,58
YP (sammal)	12.8.2019	0,39		2,4		25		0,25		160		0,34
YP (sammal)	17.9.2019	0,48		2,1		11		0,46		150		0,34
Oja	21.5.2018	0,67	0,67	3,8	3,7	14	14	0,47	0,43	400	360	0,093
Sammalalue	21.5.2018	0,5	0,52	6,8	6,8	15	15	0,3	0,32	330	340	1,8

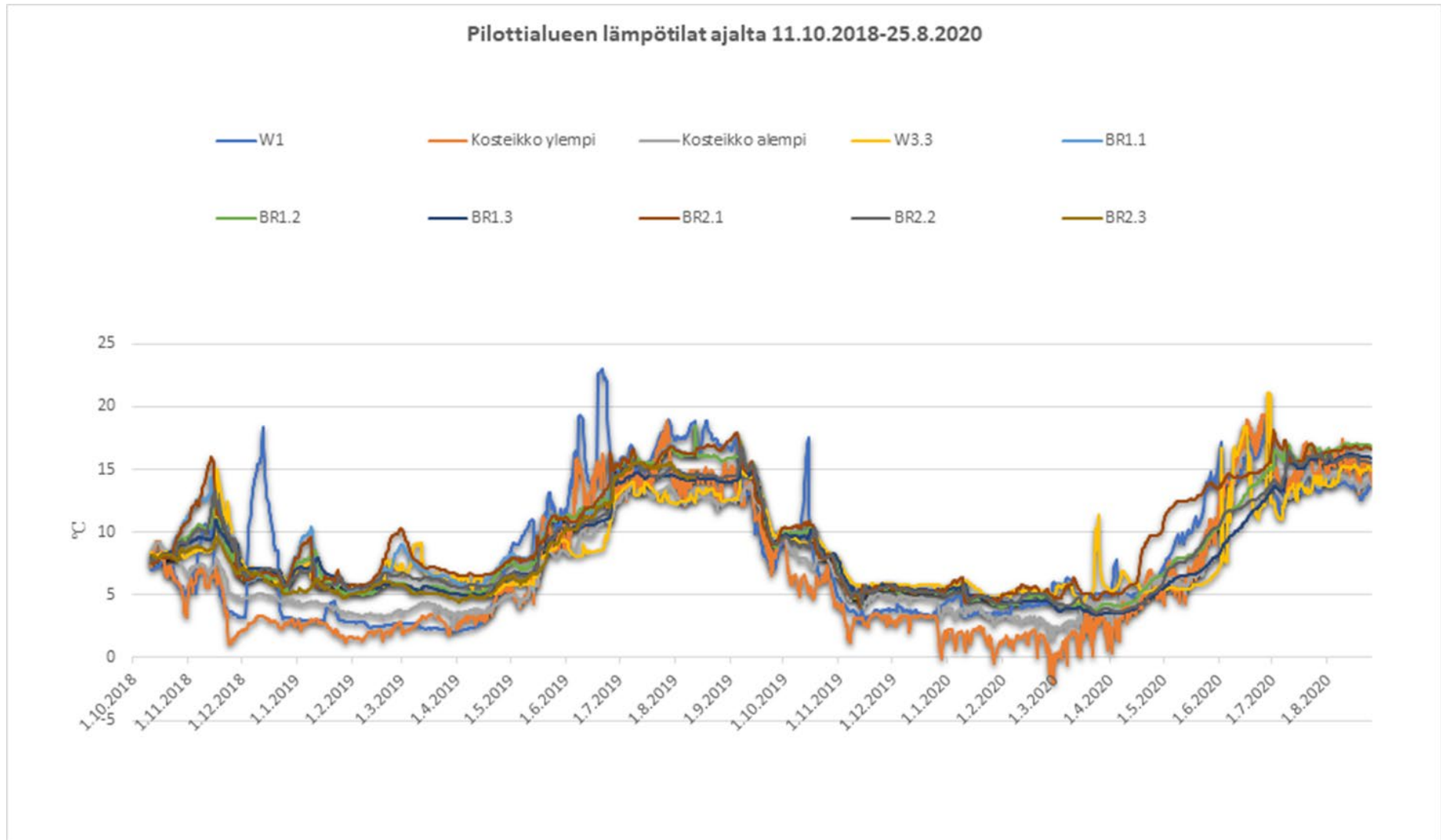
Liite 34. Pyhäsalmen vedenlaatutulokset

Paikka	Raskas-	Lyijy suo-	Nikkeli	Nikkeli	Seleeni	Seleeni	Uraani	Uraani	Vanadiini	Vanadiini
	metallit	datettu	µg/l	suodatettu	µg/l	suodatettu	µg/l	suodatettu	µg/l	suodatettu
	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
W 2.3	15.10.2019		5		<0,1		0,47		0,11	
W 2.3	12.11.2019		11		0,1		0,75		0,06	
W 2.3	3.12.2019		16		<0,1		0,71		0,07	
W 2.3	20.1.2020		19		<0,1		0,55		0,09	
W 2.3	6.7.2020		6,7		<0,1		0,31		0,19	
W 3.3	15.7.2019		1,4		<0,1		0,004		0,06	
W 3.3	12.8.2019		1,2		<0,1		0,01		0,31	
W 3.3	17.9.2019		0,98		0,1		0,012		0,09	
W 3.3	15.10.2019		0,85		0,1		0,007		0,12	
W 3.3	12.11.2019		16		<0,1		0,015		0,09	
W 3.3	3.12.2019		38		<0,1		0,018		0,1	
W 3.3	20.1.2020		23		0,2		0,29		0,65	
AP (sammal)	11.10.2018	0,042	0,89	0,85	<0,1	<0,1	0,03	0,023	0,06	0,03
AP (sammal)	15.7.2019		32		<0,1		0,36		0,77	
AP (sammal)	12.8.2019		23		<0,1		0,28		0,02	
AP (sammal)	17.9.2019		16		<0,1		0,14		0,07	
YP (sammal)	11.10.2018	0,11	21	21	0,2	<0,1	0,13	0,12	0,25	0,05
YP (sammal)	15.7.2019		23		<0,1		0,25		0,23	
YP (sammal)	12.8.2019		22		<0,1		0,27		0,03	
YP (sammal)	17.9.2019		15		0,1		0,093		0,11	
Oja	21.5.2018	0,031	17	17	<0,1	<0,1	0,14	0,11	0,16	0,8
Sammalalue	21.5.2018	1,8	21	21	<0,1	<0,1	0,51	0,51	0,04	0,03

Liite 35. Pyhäsalmen säädäta ajalta 1.10.2018-4.8.2020 (Ilmatieteen laitos, Ojakylä 8/2020)



Liite 36. Pyhäsalmen pilottirakenteiden HOBO-lämpötilaloggeridata



Liite 37. Kallon vedenlaatu tulokset

		Alkaliniteetti	Ammonium- typpi	Biologinen hapenkulutus	Fosfaatti fosforina	Fosfaatti fosforina suodatettu	Happi liukoinen	Johtokyky	Johtokyky 27888	Kemiallinen hapenkulutus	Kiinto- aine	Kiintoaine hehkutus- jäännös
Paikka	pvm	mmol/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mS/m	mS/m	mg/l	mg/l	mg/l
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	0,064	49000		8500	70	8,2	91,3		180	210	91
Biomatto allas	4.2.2019		31000						72,4	43	47	
Biomatto allas	1.7.2019	3,86	41000									
Biomatto allas	12.8.2019	5,34	47000									
Biomatto allas	10.9.2019	5,06	53000	60,1								
Biomatto allas	24.11.2019	5,48	61000	89								
Biomatto allas	28.1.2020	5,75	63000						80,7			
Biomatto allas	3.3.2020	5,76	53000									
Biomatto allas	10.7.2020	3,72	36000	74								
Biomatto allas	17.9.2020	5,46	60000	57								
JVP poistuva kaivo	4.2.2019		31000						87,9	12	19	
JVP pumpukaivo	4.2.2019		31000						71	41	46	
JVP tuleva kaivo	4.2.2019		31000						68,2	47	48	
Purkputken suu	26.7.2018	3,02	57000		5600	110	3,6	75,6		110	310	90
Purkputken suu	27.8.2018	1,76	36000		730	36		49,2	52,3	29	76	14
Purkputken suu	16.10.2018	2,59	28000		2800	2600	0,2	25,2		36	35	3,7
Purkputken suu	4.2.2019		31000		460	19			88,4	13	39	21
Purkputken suu	1.7.2019	2,34	31000		820						17	
Purkputken suu	12.8.2019	1,44	46000		150	4					8,3	
Purkputken suu	10.9.2019	2,38	54000		1000	15					31	
Purkputken suu	24.11.2019	1,9	56000	17	280	4					24	
Purkputken suu	28.1.2020	1,13	58000	13	280	4			87,5	14	15	
Purkputken suu	3.3.2020	2,65	48000							29		
Nitrifikaatioyksikkö	1.7.2019	3,81	38000									
Nitrifikaatioyksikkö	12.8.2019	5,31	47000									
Nitrifikaatioyksikkö	10.9.2019	5,06	51000	54,5								
Nitrifikaatioyksikkö	24.11.2019	5,25	55000	66								
Nitrifikaatioyksikkö	28.1.2020	5,66	62000	100					80,5	73		
Nitrifikaatioyksikkö	3.3.2020	5,72	50000									

Liite 38. Kallon vedenlaatutulokset

		Kokonais- fosfori	Kokonais- fosfori suodatettu	Kokonais- typpi	Kokonais- typpi suo- datettu	Kloridi	Läm- pötila	Nitraatti typpenä	Nitriitti- nitraatti typ- penä	Nitriitti typ- penä	Orgaani- nen koko- naishiili	Orgaani- nen hiili liukoinen	pH	pH	Sulfaatti
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	°C	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l		SFS 3021	mg/l	
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	11000	120	47000	46000	31			29		23	16	4,4		410
Biomatto allas	4.2.2019	7900		62000				6	8	2	50	25		7,5	
Biomatto allas	1.7.2019			48000	41000			35	38	3	41	25			19
Biomatto allas	12.8.2019			60000	54000		7,7	<5	<5	<1	64	28			18
Biomatto allas	10.9.2019			60000	54000			<5	<5	<1	48	21			19
Biomatto allas	24.11.2019			64000	60000			7	7	<1	28	22			15
Biomatto allas	28.1.2020			77000	65000			13	17	4			7,5		20
Biomatto allas	3.3.2020			78000					7						
Biomatto allas	10.7.2020			44000					150						
Biomatto allas	17.9.2020			67000					200						
JVP poistuva kaivo	4.2.2019	160		56000				54	72	18	15	13		4,7	
JVP pumppukaivo	4.2.2019	7900		60000				11	12	<1	50	25		7,5	
JVP tuleva kaivo	4.2.2019	8300		60000				5	11	6	57	30		7,4	
Purkutupken suu	26.7.2018	7900	170	56000		37	8,8	<5	<5	10	4,2	4	6,1		110
Purkutupken suu	27.8.2018	1300	78	40000	31000	23	9,5	5	7	2	44	34	6,4	6,7	91
Purkutupken suu	16.10.2018	3700	2800	34000	A	20	8,6	66	69	3	38	23	6,4		13
Purkutupken suu	4.2.2019	550	37	57000	28000			68	87	19	15	13		4,7	310
Purkutupken suu	1.7.2019	990	170	37000	36000			12	20	8	20	16			88
Purkutupken suu	12.8.2019	230	23	53000	51000		8,4	69	90	21	14	12			210
Purkutupken suu	10.9.2019	1200	35	53000	52000			150	170	22	15	11			150
Purkutupken suu	24.11.2019	360	19	56000	54000			1500	1700	200	11	9,7			170
Purkutupken suu	28.1.2020	410	28	61000	61000			860	1100	240	15	17		6,7	240
Purkutupken suu	3.3.2020	3200		67000					360						
Nitrifikaatioyksikkö	1.7.2019			44000	39000			89	130	41	29	20			21
Nitrifikaatioyksikkö	12.8.2019			57000	53000		8,5	<5	<5	4	35	21			17
Nitrifikaatioyksikkö	10.9.2019			55000	55000			300	340	33	24	19			14
Nitrifikaatioyksikkö	24.11.2019			63000	60000			600	890	290	23	19			15
Nitrifikaatioyksikkö	28.1.2020			76000	63000			470	830	360	36	29		7,6	21
Nitrifikaatioyksikkö	3.3.2020			71000					26						

Liite 39. Kallon vedenlaatu tulokset

		Alkaliniteetti	Ammonium- typpi	Biologinen hapenkulutus	Fosfaatti fosforina	Fosfaatti fosforina suodatettu	Johtokyky 27888	Kemiallinen hapenkulutus	Kiintoaine
Paikka	pvm	mmol/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mS/m	mg/l	mg/l
Nitrifikaatioyksikkö	10.7.2020	3,64	35000						
Nitrifikaatioyksikkö	17.9.2020	4,65	49000						
Sammalyksikkö 1	1.7.2019		34000		660				
Sammalyksikkö 1	12.8.2019		46000		78				
Sammalyksikkö 1	10.9.2019		50000		95000				
Sammalyksikkö 2	1.7.2019		26000		550				
Sammalyksikkö 2	12.8.2019		47000		78				
Sammalyksikkö 2	10.9.2019		54000		3300				
Sammalyksikkö YP	24.11.2019		53000						5,8
Sammalyksikkö YP	28.1.2020		57000				87		9,9
Sammalyksikkö YP	9.7.2020		33000						
Sammalyksikkö YP	17.9.2020		53000						
Sammalyksikkö 3	1.7.2019	1,5	22000		590				19
Sammalyksikkö 3	12.8.2019	1,72	46000		68	10			12
Sammalyksikkö 3	10.9.2019	2,36	52000		5700	15			29
Sammalyksikkö 3	24.11.2019	1,91	52000	<5	120	4			15
Sammalyksikkö 3	28.1.2020	1,16	58000	<5	170	4	87,7	14	15
Sammalyksikkö 3	9.7.2020		33000						
Sammalyksikkö 3	17.9.2020		53000						
Sieniyksikkö	1.7.2019	1,49	21000		580				11
Sieniyksikkö	12.8.2019	1,86	46000		83	14			11
Sieniyksikkö	10.9.2019	2,37	48000		600	15			22
Sieniyksikkö	24.11.2019	1,87	57000	14	130	4			6,6
Sieniyksikkö	28.1.2020	1,17	52000	5,2	190	3	87,7	13	14
Sieniyksikkö	3.3.2020		50000					18	
Sieniyksikkö	9.7.2020		29000						
Sieniyksikkö	17.9.2020		53000						
Bioreaktori 1	1.7.2019	1,19	24000		700				13

Liite 40. Kallon vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	Kokonaisfosfori µg/l	Kokonaisfosfori suodatettu µg/l	Kokonais-typpi µg/l	Kokonais-typpi suodatettu µg/l	Lämpötila °C	Nitraattityppinä µg/l	Nitriittinitraattityppinä µg/l	Nitriittityppinä µg/l	Orgaaninen kokonaishiili mg/l	Orgaaninen hiili liukoinen	pH SFS 3021	Sulfaatti mg/l
Nitrifikaatioyksikkö	10.7.2020			47000				460					
Nitrifikaatioyksikkö	17.9.2020			64000				5000					
Sammalyksikkö 1	1.7.2019	760		36000	32000		11	19	8				
Sammalyksikkö 1	12.8.2019	160		53000	52000	8,8	60	79	19				
Sammalyksikkö 1	10.9.2019	110000		54000	53000		8	53	45				
Sammalyksikkö 2	1.7.2019	670		28000	26000		350	360	9				
Sammalyksikkö 2	12.8.2019	210		51000	52000	9,8	53	68	15				
Sammalyksikkö 2	10.9.2019	3900		52000	52000		140	160	18				
Sammalyksikkö YP	24.11.2019			56000	55000		1400	1600	200				170
Sammalyksikkö YP	28.1.2020			60000	60000		860	1100	240			6,4	
Sammalyksikkö YP	9.7.2020			38000				290					
Sammalyksikkö YP	17.9.2020			57000				2800					
Sammalyksikkö 3	1.7.2019	730	160	24000	22000		430	440	12	15	12		55
Sammalyksikkö 3	12.8.2019	290	41	51000	51000	10,6	39	53	14	19	13		
Sammalyksikkö 3	10.9.2019	6700	36	53000	A		96	140	42	18	11		
Sammalyksikkö 3	24.11.2019	180	20	54000	53000		1400	1600	200	11	9,7		
Sammalyksikkö 3	28.1.2020	280	27	61000	59000		870	1100	230	15	12	6,6	
Sammalyksikkö 3	9.7.2020			39000				260					
Sammalyksikkö 3	17.9.2020			59000				2700					
Sieniyksikkö	1.7.2019	720	82	22000	22000		360	380	16	15	12		54
Sieniyksikkö	12.8.2019	320	47	51000	50000	11	28	46	18	17	14		190
Sieniyksikkö	10.9.2019	760	37	52000	52000		120	130	16	14	11		150
Sieniyksikkö	24.11.2019	180	20	54000	53000		1400	1600	200	11	9,7		170
Sieniyksikkö	28.1.2020	300	28	58000	58000		880	1100	220	14	17	6,6	250
Sieniyksikkö	3.3.2020			66000				270					
Sieniyksikkö	9.7.2020			38000				250					
Sieniyksikkö	17.9.2020			57000				2300					
Bioreaktori 1	1.7.2019	1000	680	28000	26000		<5	<5	<1	170	160		91

Liite 41. Kallon vedenlaatutulokset

		Alkaliniteetti	Ammonium- typpi	Biologinen hapen- kulutus	Fosfaatti fosforina	Fosfaatti fosforina suodatettu	Happi liukoinen	Johto- kyky	Johtokyky 27888	Kemiallinen hapenkulutus	Kiinto- aine	Kiintoaine hehketus- jäännös
Paikka	pvm	mmol/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mS/m	mS/m	mg/l	mg/l	mg/l
Bioreaktori 1	10.9.2019	2,72	51000		110	93					4,5	
Bioreaktori 1	24.11.2019	1,71	52000	9	9	3					7	
Bioreaktori 1	28.1.2020	2,24	59000	9,9	77	10			85,9	18	5,2	
Bioreaktori 1	3.3.2020		48000							36		
Bioreaktori 1	9.7.2020		22000									
Bioreaktori 2	1.7.2019	2,99	31000		3000						14	
Bioreaktori 2	12.8.2019	2,68	45000		1100	1100					19	
Bioreaktori 2	10.9.2019	2,53	47000		130	82					4,1	
Bioreaktori 2	24.11.2019	1,66	51000	18	13	3					3	
Bioreaktori 2	28.1.2020	4,09	62000	40,4	56	9			80,9	41	4,1	
Bioreaktori 2	3.3.2020		45000							14		
Bioreaktori 2	9.7.2020		29000									
Bioreaktori 2	17.9.2020		45000									
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	0,963	14000		1200	97	16,6	21,2	21,1	38	72	22
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018	0,442	5400		220	120	6,7	5,3		34	5,6	1,3
Serpentiiniojasto loppu	27.8.2018	0,612	8800		390	120	3,9	14	14	32	14	3
Serpentiiniojasto loppu	16.10.2018	0,172	3300		200	100	4,7	4,2		31	7,8	1,8

Liite 42. Kallon vedenlaatutulokset

		Kokonais- fosfori	Kokonais- fosfori suodatettu	Kokonais- typpi	Kokonais- typpi suo- datettu	Kloridi	Läm- pö- tila	Nitraatti typpenä	Nitriitti- nitraatti typpenä	Nitriitti typpenä	Orgaani- nen koko- naishiili	Orgaani- nen hiili liukoinen	pH	pH	Sulfaatti
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	°C	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l			SFS 3021	mg/l
Bioreaktori 1	10.9.2019	270	130	53000	53000			<5	<5	<1	23	21			130
Bioreaktori 1	24.11.2019	45	19	53000	52000			<5	<5	<1	11	10			170
Bioreaktori 1	28.1.2020	180	42	63000	60000			<5	<5	<1	15	14		6,8	200
Bioreaktori 1	3.3.2020			64000					<5						
Bioreaktori 1	9.7.2020			28000					50						
Bioreaktori 2	1.7.2019	3100	2900	35000	32000			7	9	2	330	320			56
Bioreaktori 2	12.8.2019	1500	1200	46000	45000		8,8	<5	<5	3	240	210			110
Bioreaktori 2	10.9.2019	280	120	54000	52000			<5	<5	<1	18	15			130
Bioreaktori 2	24.11.2019	57	25	52000	53000			5	6	<1	14	12			170
Bioreaktori 2	28.1.2020	150	52	65000	62000			<5	<5	<1	31	26		7,1	110
Bioreaktori 2	3.3.2020			62000					<5						
Bioreaktori 2	9.7.2020			29000					50						
Bioreaktori 2	17.9.2020			48000					170						
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	1700	150	36000	13000	9,1	8,6	15	31	16	29	19	5,8	6,9	26
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018	320	160	6700	A	4,7	3,5	100	120	14	27	25	5,8		6,8
Serpentiiniojasto loppu	27.8.2018	470	150	19000	9400	6,1	9,3	220	240	21	23	21	6	6,7	16
Serpentiiniojasto loppu	16.10.2018	260	140	7200	A	4,1	3,7	840	850	13	24	22	5,7		8,4

Liite 43. Kallon vedenlaatutulokset

Paikka	Alkuaineet pvm	Alumiini	Alumiini suodatettu	Barium	Barium suodatettu	Fosfori	Fosfori suodatettu	Kalium	Kalium suodatettu	Kalsium	Kalsium suodatettu
		µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	37000	25000	5	7	860	130	18,5	18,7	8	8,5
Biomatto allas	1.7.2019	150	86	12	9,3	5300	5000	16,6	16,4	8,4	8,4
Biomatto allas	12.8.2019	250	83	13	8,7	8100	7200	23,7	22,8	10,2	9,9
Biomatto allas	10.9.2019	110	62	12	10	7400	6900	19,9	19,4	10,1	9,8
Nitrifikaatioyksikkö	1.7.2019	140	78	10	7,7	5000	4800	16,3	16,4	8,3	8,2
Nitrifikaatioyksikkö	12.8.2019	530	79	21	8,5	8600	7500	23,5	23,4	11,1	10
Nitrifikaatioyksikkö	10.9.2019	130	45	13	6	7500	7000	19,8	19,7	10,1	9,5
Purkuputken suu	26.7.2018	8700	260	12	5	4500	500	20,5	19,9	8,9	8,9
Purkuputken suu	27.8.2018	4200	93	13	4,1	1700	56	13,8	13,6	7,6	6,9
Purkuputken suu	16.10.2018	400	200	5,5	4,4	3000	2800	10,5	10,5	6,7	6,8
Purkuputken suu	4.2.2019	13000	7600	3,7	3,6	290	27	20,8	20,7	8,6	8,8
Purkuputken suu	1.7.2019	1400	210	3,7	2,7	770	150	16	15,8	8,5	8,6
Purkuputken suu	12.8.2019	1000	53	3,2	3,2	180	<25	23,8	23,5	10,1	10,2
Purkuputken suu	10.9.2019	3300	38	3,2	2,2	930	38	19,5	19,7	9,7	9,9
Purkuputken suu	24.11.2019	1200		1,9		180		20		9,4	
Sammalyksikkö 1	1.7.2019	1100	220	6,1	4,6	670	170	15,1	15,1	8,1	8,3
Sammalyksikkö 1	12.8.2019	570	53	3,1	3,2	110	<25	24,3	24	10,2	10,2
Sammalyksikkö 1	10.9.2019	160000	20	39	5,8	29000	26	20,5	19,8	12,4	10,5
Sammalyksikkö 2	1.7.2019	820	180	14	11	460	120	10,3	10,3	5,9	6,2
Sammalyksikkö 2	12.8.2019	490	49	3,3	3,5	130	<25	23,9	24	10,2	10,4
Sammalyksikkö 2	10.9.2019	13000	29	6,4	2,8	2800	34	19,4	19,4	10	9,8
Sammalyksikkö 3	1.7.2019	930	200	14	11	550	140	10,8	10,7	6,2	6,5
Sammalyksikkö 3	12.8.2019	430	54	3,1	3,3	180	34	23,3	23,5	10	10,2
Sammalyksikkö 3	10.9.2019	3900	39	3,9	2,3	1100	42	19,5	19,5	9,7	9,7
Sammalyksikkö 3	24.11.2019	1100		2,1		150		20,2		9,5	
Sieniysikkö	1.7.2019	980	210	15	12	560	150	10,6	10,7	6,1	6,3
Sieniysikkö	12.8.2019	390	64	3,3	3,4	170	39	23,7	23,3	9,9	9,9
Sieniysikkö	10.9.2019	2300	36	2,9	2,3	650	31	19,5	19,5	9,6	9,7
Sieniysikkö	24.11.2019	1200		2,3		190		19,7		9,4	

Liite 44. Kallon vedenlaatutulokset

Paikka	Alkuaineet pvm	Magnesium	Magnesium suodatettu	Mangaani	Mangaani suodatettu	Natrium	Natrium suodatettu	Rauta	Rauta suodatettu	Rikki	Rikki suodatettu
		mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	3	3,1	91	95	35,1	35	770	1000	130000	130000
Biomatto allas	1.7.2019	2,93	2,88	99	86	31,7	31,4	2500	2000	7800	7600
Biomatto allas	12.8.2019	3,41	3,36	100	86	41,1	40,8	2900	2200	5300	5700
Biomatto allas	10.9.2019	3,43	3,38	110	91	38,9	38,7	2800	2300	5900	5700
Nitrifikaatioyksikkö	1.7.2019	2,8	2,81	93	83	31	31,5	2000	1600	8000	7800
Nitrifikaatioyksikkö	12.8.2019	3,53	3,35	120	88	40,5	41	3800	2300	6100	5800
Nitrifikaatioyksikkö	10.9.2019	3,42	3,29	110	87	37,6	37,7	2300	1500	5300	6000
Purkuputken suu	26.7.2018	3,2	3,2	98	70	38,9	38,4	3200	610	36000	35000
Purkuputken suu	27.8.2018	2,6	2,5	97	87	27,4	27,3	1700	61	30000	30000
Purkuputken suu	16.10.2018	2,3	2,3	61	57	19,1	19,3	1400	990	4600	4600
Purkuputken suu	4.2.2019	3,2	3,2	82	83	35,4	35,3	390	280	95000	93000
Purkuputken suu	1.7.2019	2,8		2,85	98	29,6	29,3	1200	320	31000	31000
Purkuputken suu	12.8.2019	3,33	3,39	99	99	41,1	40,6	250	140	74000	75000
Purkuputken suu	10.9.2019	3,35	3,35	100	98	37,5	38,1	460	61	52000	52000
Purkuputken suu	24.11.2019	3,25		88		43,4		270		60000	
Sammalyksikkö 1	1.7.2019	2,73	2,73	150	140	27,5	27,6	1500	440	29000	29000
Sammalyksikkö 1	12.8.2019	3,41	3,39	100	100	41,3	40,8	250	170	75000	74000
Sammalyksikkö 1	10.9.2019	3,79	3,56	150	120	38,1	37,8	11000	2600	90000	72000
Sammalyksikkö 2	1.7.2019	2,09	2,12	130	120	19	19	1100	350	19000	19000
Sammalyksikkö 2	12.8.2019	3,44	3,43	110	110	40,8	41,2	300	210	73000	73000
Sammalyksikkö 2	10.9.2019	3,41	3,36	110	100	37,1	37,1	1400	80	53000	52000
Sammalyksikkö 3	1.7.2019	2,14	2,17	150	140	19,9	19,8	1400	420	20000	20000
Sammalyksikkö 3	12.8.2019	3,36	3,4	100	100	39,7	40,1	330	200	67000	68000
Sammalyksikkö 3	10.9.2019	3,36	3,35	110	100	37,1	37,2	830	69	51000	51000
Sammalyksikkö 3	24.11.2019	3,3		92		43,9		260		60000	
Sieniyksikkö	1.7.2019	2,12	2,18	170	160	1,4	19,7	1600	460	20000	20000
Sieniyksikkö	12.8.2019	3,42	3,33	100	100	40,2	39,8	370	230	66000	64000
Sieniyksikkö	10.9.2019	3,34	3,33	100	100	36,9	37,2	580	87	51000	51000
Sieniyksikkö	24.11.2019	3,25		91		43		280		60000	

Liite 45. Kallon vedenlaatutulokset

Paikka	Alkuaineet	Sinkki 17294-2	Sinkki 17294-2 suodatettu	Strontium	Strontium suodatettu	Titaani	Titaani suodatettu
	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	21	28	31	37	<1,0	<1,0
Biomatto allas	1.7.2019	33	16	33	40	2,7	2,7
Biomatto allas	12.8.2019	150	86	36	45	48	11
Biomatto allas	10.9.2019	43	17	34	43	1,6	2,6
Nitrifikaatioyksikkö	1.7.2019	29	30	31	34	3,4	2,3
Nitrifikaatioyksikkö	12.8.2019	170	65	39	41	17	4,6
Nitrifikaatioyksikkö	10.9.2019	49	17	33	31	2	2
Purkupuutken suu	26.7.2018	51		36	45	10	1
Purkupuutken suu	27.8.2018	58	2,5	33	31	2,1	<1,0
Purkupuutken suu	16.10.2018	29	24	27	30	2,9	2,5
Purkupuutken suu	4.2.2019	11	10	30	32	0,3	0,1
Purkupuutken suu	1.7.2019	8,2	6	30	35	1,3	0,4
Purkupuutken suu	12.8.2019	12	9,6	34	35	0,6	<0,1
Purkupuutken suu	10.9.2019	11	4,6	31	32	0,5	<0,1
Purkupuutken suu	24.11.2019	9		28		0,2	
Sammalyksikkö 1	1.7.2019	10	7,4	30	33	1	0,3
Sammalyksikkö 1	12.8.2019	9,9	9,2	34	36	0,5	<0,1
Sammalyksikkö 1	10.9.2019	190	2,5	46	39	8,4	<0,1
Sammalyksikkö 2	1.7.2019	8,4	6	28	31	1,2	0,3
Sammalyksikkö 2	12.8.2019	9,4	8,5	35	36	0,3	0,1
Sammalyksikkö 2	10.9.2019	22	3,5	32	32	1,5	<0,1
Sammalyksikkö 3	1.7.2019	9,6	7,8	28	32	1,4	0,3
Sammalyksikkö 3	12.8.2019	8,2	6,7	34	35	0,5	<0,1
Sammalyksikkö 3	10.9.2019	11	4,3	31	31	3,7	0,1
Sammalyksikkö 3	24.11.2019	8,8		29		0,2	
Sieniyksikkö	1.7.2019	11	7,9	28	32	1,8	0,3
Sieniyksikkö	12.8.2019	6,5	5,5	33	34	0,5	0,1
Sieniyksikkö	10.9.2019	7	3,5	30	31	0,8	<0,1
Sieniyksikkö	24.11.2019	10		28		0,9	

Liite 46. Kallon vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Alumiini	Alumiini suodatettu	Barium	Barium suodatettu	Fosfori	Fosfori suodatettu	Kalium	Kalium suodatettu	Kalsium	Kalsium suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Bioreaktori 1	1.7.2019	230	140	67	65	870	780	19,8	19,5	9,7	9,9
Bioreaktori 1	10.9.2019	270	110	15	15	190	85	20,3	20,3	5,3	5,5
Bioreaktori 1	24.11.2019	110		6,8		34		19,8		5,8	
Bioreaktori 2	1.7.2019	200	120	110	110	2900	2800	25,7	25,3	16,8	16,8
Bioreaktori 2	12.8.2019	200	140	120	120	1300	1200	23	23,2	18,4	19
Bioreaktori 2	10.9.2019	230	73	15	15	170	61	20	19,9	6,3	6,9
Bioreaktori 2	24.11.2019	92		6,4		39		19,6		4,5	
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	5400	490	12	7,1	1300	130	5,6	5,5	4	3,7
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018	760	470	6,9	6,3	240	150	2,5	2,4	2,1	2,3
Serpentiinijasto loppu	27.8.2018	1300	620	6,1	4,6	440	170	4	3,9	2,2	2,1
Serpentiinijasto loppu	16.10.2018	990	660	6,4	5,9	220	110	2	2	1,9	2
Alkuaineet		Magnesium	Magnesium suodatettu	Mangaani	Mangaani suodatettu	Natrium	Natrium suodatettu	Rauta	Rauta suodatettu	Rikki	Rikki suodatettu
Paikka	pvm	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Bioreaktori 1	1.7.2019	3,59	3,61	1300	1300	25,3	25,2	950	840	32000	32000
Bioreaktori 1	10.9.2019	2,48	2,51	160	160	37	37,5	340	310	44000	44000
Bioreaktori 1	24.11.2019	2,56		83		44,2		71		59000	
Bioreaktori 2	1.7.2019	6,39	6,38	2500	2500	27,8	27,6	530	320	20000	20000
Bioreaktori 2	12.8.2019	5,86	5,99	2000	2000	39,7	40,4	1200	960	39000	39000
Bioreaktori 2	10.9.2019	2,96	2,93	130	130	36,6	36,9	320	240	47000	47000
Bioreaktori 2	24.11.2019	2,14		70		43,6		110		60000	
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	1,5	1,4	80	71	11,7	11,6	4900	2500	8900	8600
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018	0,9	0,9	43	42	5,1	5,2	2200	1600	2400	2400
Serpentiinijasto loppu	27.8.2018	0,9	0,9	24	22	8,8	8,7	2700	1100	5500	5500
Serpentiinijasto loppu	16.10.2018	0,7	0,8	25	23	4,6	4,7	1700	980	3000	3000

Liite 47. Kallion vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Sinkki 17294-2	Sinkki 17294-2 suodatettu	Strontium	Strontium suodatettu	Titaani	Titaani suodatettu				
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Bioreaktori 1	1.7.2019	270	260	34	38	2,6	1,1				
Bioreaktori 1	10.9.2019	2,9	1,5	17	19	0,3	0,2				
Bioreaktori 1	24.11.2019	1,9		18		<0,1					
Bioreaktori 2	1.7.2019	260	260	59	63	2,6	1,1				
Bioreaktori 2	12.8.2019	82	36	72	79	1,8	1,5				
Bioreaktori 2	10.9.2019	2,9	2,1	20	22	0,2	0,1				
Bioreaktori 2	24.11.2019	1,3		14		0,1					
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	18	2,5	25	23	5,5	3,1				
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018	6	5,2	14	16	3,5	3				
Serpentiiniojasto loppu	27.8.2018	3,1	1,9	15	14	4,3	2,6				
Serpentiiniojasto loppu	16.10.2018	4,6	4,2	12	15	3,7	2,6				
Alkuaineet		Beryllium	Beryllium suodatettu	Hopea	Hopea suodatettu	Litium	Litium suodatettu	Molybdeeni	Molybdeeni suodatettu	Palladium	Palladium suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1	0,99	0,09	0,05	<0,02	<0,02
Purkupuutken suu	26.7.2018	0,1		<0,02		1		0,21		<0,02	
Purkupuutken suu	27.8.2018	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	1,2	1,1	0,18	0,12	<0,02	<0,02
Purkupuutken suu	16.10.2018										
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	0,03	<0,02	<0,02	<0,02	0,96	0,95	0,09	0,08	<0,02	<0,02
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018										
Serpentiiniojasto loppu	27.8.2018	<0,02	0,02	<0,02	<0,02	0,79	0,79	0,09	0,07	<0,02	<0,02
Serpentiiniojasto loppu	16.10.2018										
Alkuaineet		Platina	Platina suodatettu	Rubidium	Rubidium suodatettu	Sinkki 11885	Sinkki 11885 suodatettu				
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	<0,01	<0,01	24	24	15	25				
Purkupuutken suu	26.7.2018	<0,01		25		49	6				
Purkupuutken suu	27.8.2018	<0,01	<0,01	18	18	67	2				
Purkupuutken suu	16.10.2018					27	22				
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	<0,01	<0,01	9,5	9,2	16	2				
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018					6	5				
Serpentiiniojasto loppu	27.8.2018	<0,01	<0,01	6,6	6,5	2	<2				
Serpentiiniojasto loppu	16.10.2018					4	4				

Liite 48. Kallon vedenlaatutulokset

Raskasmetallit		Arseeni	Arseeni suodatettu	Kadmium	Kadmium suodatettu	Koboltti	Koboltti suodatettu	Kromi	Kromi suodatettu	Kupari	Kupari suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	0,44	0,4	0,012	0,004	1,1	1,1	0,66	0,38	10	0,51
Biomatto allas	12.8.2019										
Biomatto allas	10.9.2019										
Purkupuutken suu	26.7.2018	0,43		0,047		0,75		1,1		57	
Purkupuutken suu	27.8.2018	0,42	0,24	0,036	<0,003	0,56	0,34	0,79	0,21	47	1,4
Purkupuutken suu	16.10.2018	0,37	0,36	0,022	0,016	0,72	0,64	1,1	1,1	57	46
Purkupuutken suu	4.2.2019	0,24		<0,003		0,62		0,19		1,8	
Purkupuutken suu	1.7.2019	0,26	0,23	0,007	<0,003	0,68	0,61	0,43	0,28	12	5,6
Purkupuutken suu	12.8.2019	0,19	0,21	<0,003	<0,003	0,35	0,33	0,13	0,11	1,7	0,53
Purkupuutken suu	10.9.2019	0,25	0,19	0,008	<0,003	0,48	0,42	0,4	0,23	10	1,1
Purkupuutken suu	24.11.2019	0,22		<0,003		0,48		0,18		2,4	
Sammalyksikkö 3	1.7.2019	0,18	0,2	0,005	0,004	1,6	1,5	0,35	0,23	11	6,7
Sammalyksikkö 3	12.8.2019	0,21	0,2	<0,003	<0,003	0,37	0,36	0,16	0,19	1,4	0,49
Sammalyksikkö 3	10.9.2019	0,2	0,18	0,007	<0,003	0,52	0,43	0,5	0,17	11	1,2
Sammalyksikkö 3	24.11.2019	0,21		<0,003		0,47		0,21		2,2	
Sieniyksikkö	1.7.2019	0,53	0,37	0,012	0,007	1,8	1,7	0,51	0,33	11	6,7
Sieniyksikkö	12.8.2019	0,23	0,25	<0,003	<0,003	0,36	0,36	0,16	0,16	1,5	0,74
Sieniyksikkö	10.9.2019	0,19	0,21	0,004	<0,003	0,46	0,43	0,29	0,15	6,4	0,87
Sieniyksikkö	24.11.2019	0,23		<0,003		0,47		0,18		2,6	
Bioreaktori 1	1.7.2019	0,53	0,48	0,25	0,22	1,7	1,7	0,35	0,27	5,6	2,9
Bioreaktori 1	10.9.2019	0,25	0,21	0,005	<0,003	0,36	0,33	0,24	0,2	1,4	0,92
Bioreaktori 1	24.11.2019	0,17		<0,003		0,25		0,1		0,65	
Bioreaktori 2	1.7.2019	0,46	0,46	0,53	0,47	1,5	1,4	0,39	0,3	7,8	5,8
Bioreaktori 2	12.8.2019	0,46	0,41	0,097	0,029	2	1,9	0,41	0,46	13	7,4
Bioreaktori 2	10.9.2019	0,18	0,23	<0,003	0,004	0,41	0,4	0,19	0,18	1,3	0,85
Bioreaktori 2	24.11.2019	0,15		<0,003		0,24		0,09		0,48	
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	0,31	0,22	0,028	<0,003	0,76	0,55	4,3	3,1	18	2,1
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018	0,18	0,18	0,008	0,006	0,62	0,58	2,2	2,1	10	8,7
Serpentiiniojasto loppu	27.8.2018	0,22	0,18	0,006	0,004	0,3	0,26	2,5	2,2	6	4
Serpentiiniojasto loppu	16.10.2018	0,18	0,17	0,005	0,004	0,35	0,32	2,2	2	8,4	7,5

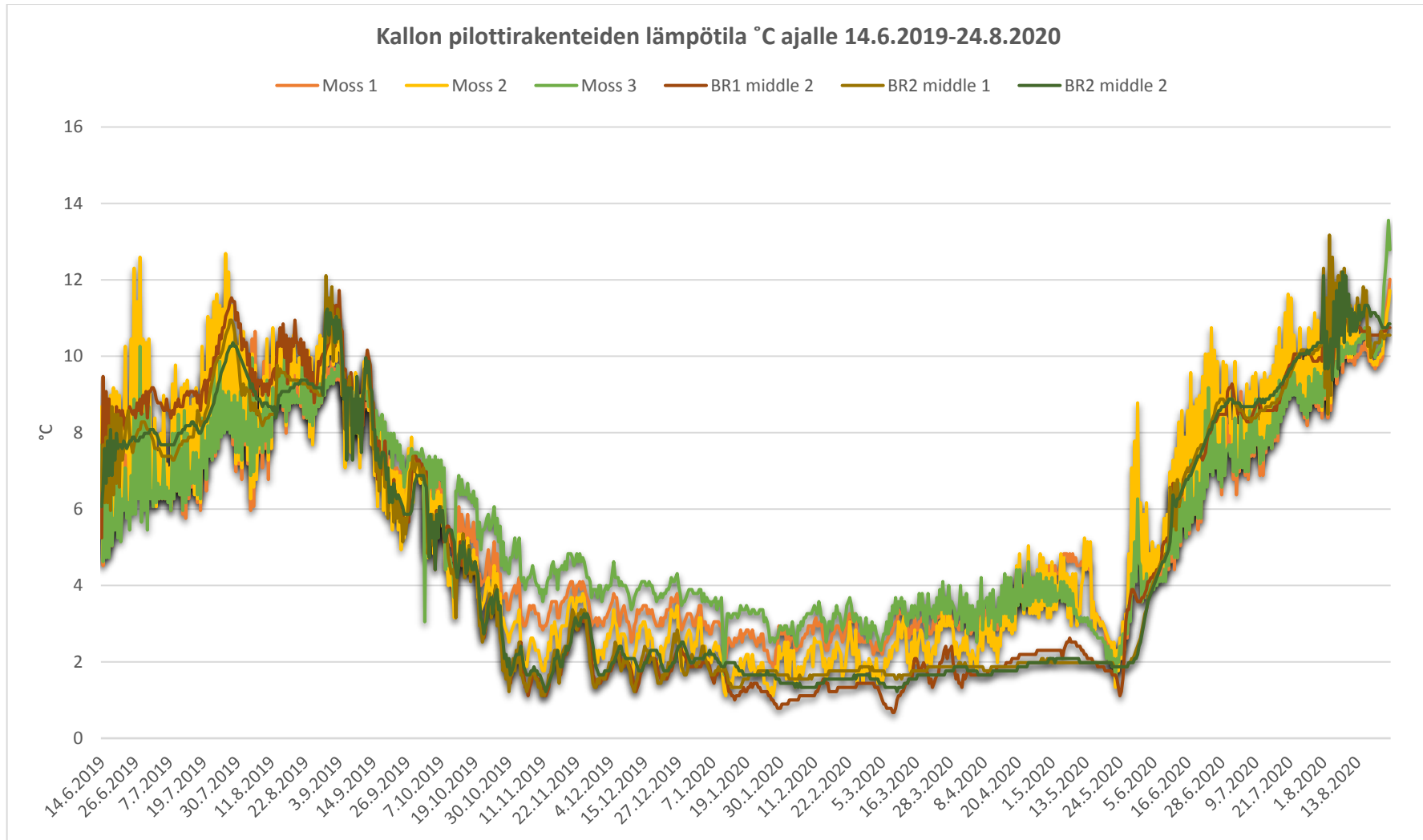
Liite 49. Kallon vedenlaatutulokset

Paikka	pvm	Raskasmetallit		Lyijy		Nikkeli		Seleeni		Uraani		Vanadiini	
		µg/l	Lyijy suodatettu µg/l	µg/l	Nikkeli suodatettu µg/l	µg/l	Seleeni suodatettu µg/l	µg/l	Uraani suodatettu µg/l	µg/l	Vanadiini suodatettu µg/l		
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	0,3	0,033	2	2,1	0,1	<0,1	0,031	0,02	0,73	0,32		
Biomatto allas	12.8.2019	0,89	0,59										
Biomatto allas	10.9.2019	0,69	0,51										
Purkupuutken suu	26.7.2018	0,78		1,9		<0,1		0,051		1,2			
Purkupuutken suu	27.8.2018	0,61	0,011	1,3	1,2	<0,1	<0,1	0,04	<0,003	1,2	0,25		
Purkupuutken suu	16.10.2018	0,41	0,26	1,5	1,4	<0,1	<0,1	0,04	0,029	1,1	0,99		
Purkupuutken suu	4.2.2019	0,05		1,2		0,1		0,026		0,25			
Purkupuutken suu	1.7.2019	0,24	0,066	2,1	1,1	0,1	<0,1	0,014	0,008	0,41	0,26		
Purkupuutken suu	12.8.2019	0,039	0,057	1,3	1,2	<0,1	<0,1	0,004	<0,003	0,19	0,15		
Purkupuutken suu	10.9.2019	0,14	0,039	1,2	1,4	<0,1	<0,1	0,012	<0,003	0,48	0,32		
Purkupuutken suu	24.11.2019	0,056		1,5		<0,1		0,003		0,47			
Sammalyksikkö 3	1.7.2019	0,4	0,13	1,3	1,5	<0,1	<0,1	0,021	0,011	0,37	0,18		
Sammalyksikkö 3	12.8.2019	0,04	0,039	2,1	1,5	<0,1	<0,1	0,003	<0,003	0,21	0,15		
Sammalyksikkö 3	10.9.2019	0,18	0,033	1,3	1,2	<0,1	<0,1	0,024	<0,003	0,67	0,26		
Sammalyksikkö 3	24.11.2019	0,15		1,4		<0,1		0,004		0,45			
Sieniyksikkö	1.7.2019	0,4	0,12	1,2	1,3	<0,1	<0,1	0,026	0,012	0,41	0,18		
Sieniyksikkö	12.8.2019	0,048	0,046	1,1	1,2	<0,1	<0,1	0,005	0,004	0,22	0,17		
Sieniyksikkö	10.9.2019	0,096	0,024	1,2	1,1	<0,1	0,1	0,011	<0,003	0,42	0,23		
Sieniyksikkö	24.11.2019	0,11		1,4		<0,1		0,005		0,47			
Bioreaktori 1	1.7.2019	2,8	1,7	2,4	3,2	<0,1	<0,1	0,019	0,018	0,52	0,38		
Bioreaktori 1	10.9.2019	0,038	0,057	0,93	0,87	<0,1	<0,1	0,004	0,005	0,12	0,09		
Bioreaktori 1	24.11.2019	0,019		1		<0,1		<0,003		0,05			
Bioreaktori 2	1.7.2019	3,9	2,3	3,3	3	<0,1	<0,1	0,014	0,012	0,36	0,27		
Bioreaktori 2	12.8.2019	0,66	0,48	2,1	1,8	<0,1	<0,1	0,014	0,012	0,36	0,3		
Bioreaktori 2	10.9.2019	0,038	0,045	0,96	0,96	<0,1	<0,1	0,003	0,004	0,09	0,09		
Bioreaktori 2	24.11.2019	0,018		1		<0,1		<0,003		0,04			
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	0,29	0,089	0,92	0,86	<0,1	<0,1	0,1	0,057	5,2	2,4		
Ennen serpentiini ojastoa	16.10.2018	0,17	0,13	0,89	0,79	<0,1	<0,1	0,051	0,049	1,9	1,4		
Serpentiiniojasto loppu	27.8.2018	0,16	0,07	0,56	0,91	<0,1	<0,1	0,044	0,035	2,5	1,6		
Serpentiiniojasto loppu	16.10.2018	0,16	0,12	0,67	0,64	<0,1	<0,1	0,042	0,038	1,6	1,1		

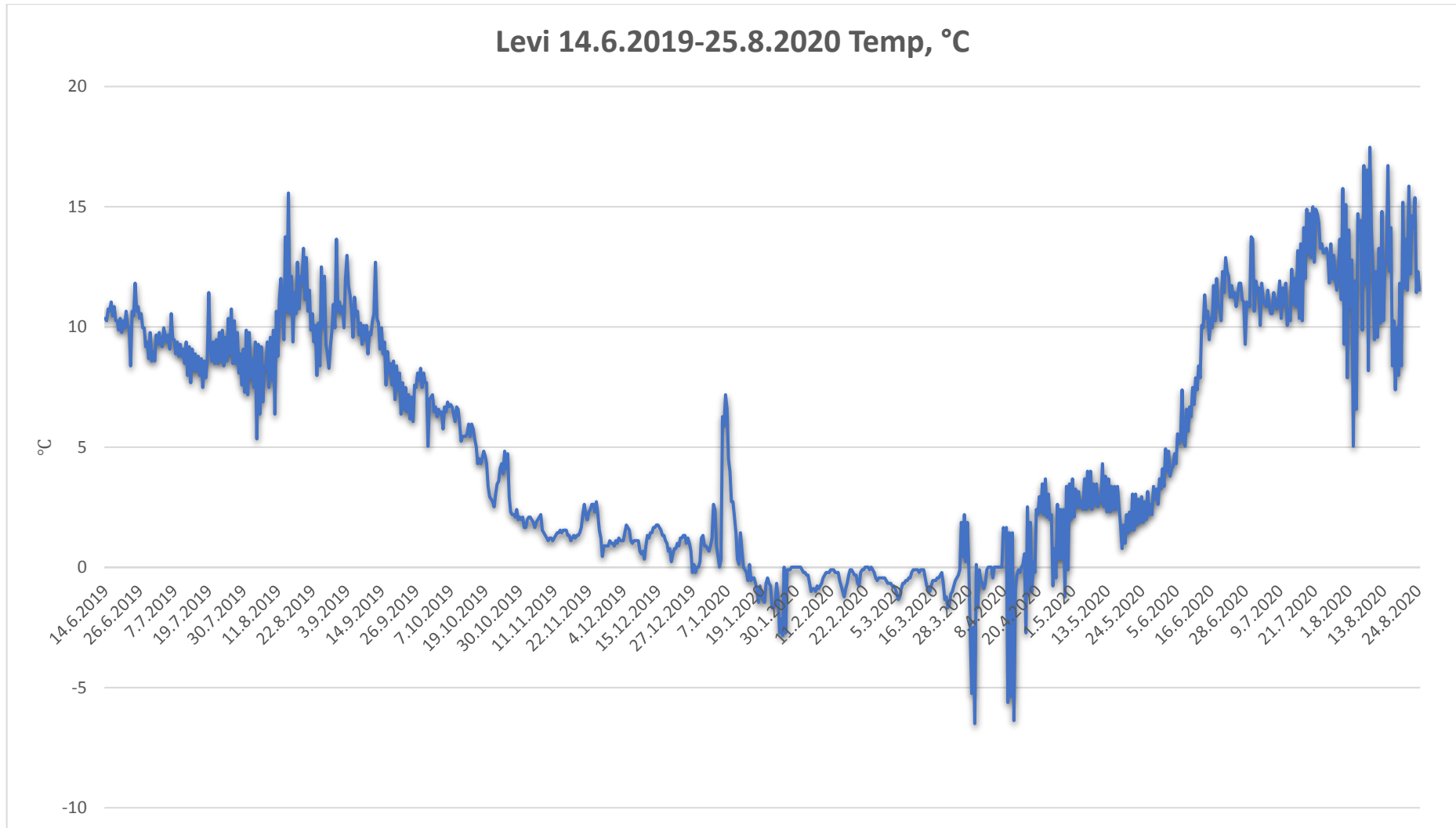
Liite 50. Kallon vedenlaatu tulokset

Raskasmetallit		Antimoni	Antimoni suodatettu	Boori	Boori suodatettu	Tallium	Tallium suodatettu	Tina	Tina suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Jätevedenpuhdistamo	24.6.2018	0,04	0,03	13	13	<0,003	<0,003	0,16	<0,05
Purkuputken suu	26.7.2018	0,08		14		0,004		0,24	
Purkuputken suu	27.8.2018	0,11	0,11	14	14	0,004	<0,003	0,18	0,16
Ennen serpentiini ojastoa	27.8.2018	0,04	0,04	5,6	5,5	0,003	<0,003	0,09	0,12
Serpentiiniojasto loppu	27.8.2018	0,02	0,02	4,6	4,4	<0,003	<0,003	0,05	0,18

Liite 51. Kallon pilottirakenteiden HOBO-lämpötilaloggeridata



Liite 52. Levin hulevesialueen pilottirakenteiden HOBO-lämpötilaloggeridata



Liite 53. Levin vedenlaatutulokset. Vaaleansiniset, yksiköiden rakennemuutos

Paikka	pvm	Kiintoaine								
		µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hulevesipurkupuutki	3.5.2018	68	72				120		1100	
Hulevesipurkupuutki	30.5.2018	75	3	3	2,2	1	13	6	730	
Hulevesipurkupuutki	24.6.2018	44	<2	3	<1	<1	8	5	840	
Hulevesipurkupuutki	26.7.2018	46	7		1,4	<1	9	5	1500	
Hulevesipurkupuutki	27.8.2018	3	4		13	9,4	22	4	200	
Hulevesipurkupuutki	16.10.2018	340	5		7,4	6,1	12	4	980	
Hulevesipurkupuutki	22.1.2019	73	11		1,5	1,2	16	10	500	
Hulevesipurkupuutki	2.5.2019	70	3		8,5	7,2	23		710	
Hulevesipurkupuutki	2.7.2019	23	<2		1,7	<1	9	6	970	930
Hulevesipurkupuutki	12.8.2019	48	10		3,3	2,1	21	11	1100	1100
Hulevesipurkupuutki	10.9.2019	83	3		<1	<1	6	3	1100	1100
Hulevesipurkupuutki	1.10.2019	57	15		18	13	35	5	500	460
Sedimentaatioallas	2.7.2019	29	3		<1	<1	9	5	1000	1000
Sedimentaatioallas	12.8.2019	57	8		2,6	1,5	18	10	1100	1100
Sedimentaatioallas	10.9.2019	73	4		<1	<1	7	4	1200	1200
Sedimentaatioallas	1.10.2019	70	16		19	14	37	7	510	480
Sedimentaatioallas	9.7.2020	24							1000	
Sedimentaatioallas	24.8.2020	<2							930	
Sammalyksikkö	2.7.2019	28	5		<1	<1	8	5	1100	1100
Sammalyksikkö	12.8.2019	54	8		2,9	1,7	19	9	1100	1100
Sammalyksikkö	10.9.2019	78	5		<1	<1	13	5	1200	1200
Sammalyksikkö	1.10.2019	55	19		21	15	39	6	500	480
Sammalyksikkö	9.7.2020	25							960	
Sammalyksikkö	24.8.2020	50							800	
Sieniyksikkö	2.7.2019	24	3		<1	<1	9	5	1000	1000
Sieniyksikkö	12.8.2019	54	9		2,7	1,6	20	10	1100	1100
Sieniyksikkö	10.9.2019	69	4		1,8	<1	8	4	1200	1100
Sieniyksikkö	1.10.2019	35	19		20	15	40	6	510	480
Sieniyksikkö	9.7.2020	<2							290	
Sieniyksikkö	24.8.2020	<2							600	

Liite 54. Levin vedenlaatutulokset. Vaaleansiniset, yksiköiden rakennemuutos

		Lämpötila	Nitraatti typpinä	Nitriitti-nitraatti typpinä	Nitriitti typpinä	Orgaaninen kokonaishiili
Paikka	pvm	°C	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l
Hulevesipurkupuutki	3.5.2018			600		8,8
Hulevesipurkupuutki	30.5.2018			470		2,8
Hulevesipurkupuutki	24.6.2018			600		3,7
Hulevesipurkupuutki	26.7.2018	9,1		1300	10	82
Hulevesipurkupuutki	27.8.2018	12,9		81		2,5
Hulevesipurkupuutki	16.10.2018	5,6		400		5,6
Hulevesipurkupuutki	22.1.2019			170		4,9
Hulevesipurkupuutki	2.5.2019			400		4,3
Hulevesipurkupuutki	2.7.2019		720	720	2	3,6
Hulevesipurkupuutki	12.8.2019	9,2	830	840	7	7,8
Hulevesipurkupuutki	10.9.2019		940	940	4	3,6
Hulevesipurkupuutki	1.10.2019		220	230	9	5,6
Sedimentaatioallas	2.7.2019		810	810	2	3,5
Sedimentaatioallas	12.8.2019	9,3	780	790	8	7,8
Sedimentaatioallas	10.9.2019		970	970	5	3,4
Sedimentaatioallas	1.10.2019		220	230	8	5,9
Sedimentaatioallas	9.7.2020			850		
Sedimentaatioallas	24.8.2020			780		
Sammalyksikkö	2.7.2019		870	870	2	3,5
Sammalyksikkö	12.8.2019	9,5	780	790	8	7,6
Sammalyksikkö	10.9.2019		950	950	5	3,8
Sammalyksikkö	1.10.2019		240	250	8	5,8
Sammalyksikkö	9.7.2020			770		
Sammalyksikkö	24.8.2020			480		
Sieniyksikkö	2.7.2019		790	790	2	3,7
Sieniyksikkö	12.8.2019	9,5	760	770	8	7,7
Sieniyksikkö	10.9.2019		950	950	4	3,9
Sieniyksikkö	1.10.2019		270	280	8	5,7
Sieniyksikkö	9.7.2020			16		
Sieniyksikkö	24.8.2020			<5		

Liite 55. Levin vedenlaatutulokset

		Alkaliniteetti	Asiditeetti	Happi liu- koinen	Johtokyky	Kemiallinen hapenkulutus	Kloridi	pH	pH	Sameus	Sulfaatti
Paikka	pvm	mmol/l	mmol/l	mg/l	mS/m	mg/l	mg/l		SFS 3021	FNU	mg/l
Hulevesipurkupuut	3.5.2018	0,46			7,3		4,3		6,7		4,6
Hulevesipurkupuut	30.5.2018	0,99	0,05			2,5	1,9				3,7
Hulevesipurkupuut	24.6.2018	0,89	0,04		12,4	2,9	3,9		7,5		5,8
Hulevesipurkupuut	26.7.2018	0,928			15,2	2,8	6,4	6,8			9,2
Hulevesipurkupuut	27.8.2018	0,183		9,1	2,2	3,1	0,4	7,5	7		0,7
Hulevesipurkupuut	16.10.2018	0,828		9,6	6,5	4,3	2,4	6		11	2,8
Hulevesipurkupuut	22.1.2019	0,862			10	4,6			7,4		
Hulevesipurkupuut	2.5.2019	0,56			10,2	4			7,1		

Liite 56. Levin vedenlaatutulokset

Alkuaineet		Alumiini	Alumiini suodatettu	Barium	Barium suodatettu	Fosfori	Fosfori suodatettu	Kalium	Kalium suodatettu	Kalsium	Kalsium suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Hulevesipurkupuutki	3.5.2018	1200		75		100		2,2		10,3	
Hulevesipurkupuutki	30.5.2018	25	19	40	37	<50	<50	0,9	0,9	13,6	13,8
Hulevesipurkupuutki	24.6.2018	12	13	70	69	<50	<50	1,5	1,6	13,2	13,4
Hulevesipurkupuutki	26.7.2018	22	18	120	110	<50	<50	1,8	1,8	16,1	15,9
Hulevesipurkupuutki	27.8.2018	150	10	13	10	<50	<50	0,7	0,6	2,6	2,6
Hulevesipurkupuutki	16.10.2018	32	<10	85	84	<50	<50	1,5	1,5	11,6	11,5
Hulevesipurkupuutki	22.1.2019	13		67		<25		0,9		12,4	
Hulevesipurkupuutki	2.5.2019	45	17	62	60	<25	<25	1,57	1,58	12,5	12,2
Hulevesipurkupuutki	2.7.2019	23	15	80	81	<25	<25	1,78	1,83	16,1	16,3
Hulevesipurkupuutki	12.8.2019	47	16	90	88	<25	<25	2,35	2,37	11,2	11,3
Hulevesipurkupuutki	10.9.2019	18	11	120	110	<25	<25	2,15	2,17	13,3	13,2
Hulevesipurkupuutki	1.10.2019	570	32	58	44	<25	<25	1,35	1,27	8,5	8,6
Sedimentaatioallas	2.7.2019	23	17	87	86	<25	<25	1,86	1,84	16,7	16,8
Sedimentaatioallas	12.8.2019	39	14	86	85	<25	<25	2,45	2,49	11,3	11,3
Sedimentaatioallas	10.9.2019	16	9,9	120	120	<25	<25	2,15	2,11	13,6	13,6
Sedimentaatioallas	1.10.2019	700	34	58	42	<25	<25	1,51	1,38	9	8,6
Sammalyksikkö	2.7.2019	24	16	83	82	<25	<25	1,92	1,95	16,7	16,6
Sammalyksikkö	12.8.2019	44	15	89	87	<25	<25	2,46	2,39	11,5	11,3
Sammalyksikkö	10.9.2019	26	11	110	110	<25	<25	2,13	2,15	13,3	13,5
Sammalyksikkö	1.10.2019	670	38	53	40	36	<25	1,51	1,58	8,7	8,6
Sieniyksikkö	2.7.2019	25	17	86	85	<25	<25	1,88	1,9	16,7	16,8
Sieniyksikkö	12.8.2019	37	14	87	85	<25	<25	2,57	2,54	11,6	11,4
Sieniyksikkö	10.9.2019	21	11	110	110	<25	<25	2,12	2,07	13,4	13,3
Sieniyksikkö	1.10.2019	750	36	59	42	34	<25	1,45	1,33	8,8	8,5

Liite 57. Levin vedenlaatutulokset

Paikka	Alkuaineet	Magnesium	Magnesium suodatettu	Mangaani	Mangaani suodatettu	Natrium	Natrium suodatettu	Rauta	Rauta suodatettu	Rikki	Rikki suodatettu
	pvm	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hulevesipurkupuuti	3.5.2018	4,1		170		3,4		2200		1600	
Hulevesipurkupuuti	30.5.2018	3,5	3,5	530	490	2,4	2,4	730	190	1300	1400
Hulevesipurkupuuti	24.6.2018	3	3	490	480	3,8	3,9	730	530	1800	1800
Hulevesipurkupuuti	26.7.2018	3,6	3,6	310	260	6,6	6,6	1000	590	3100	3100
Hulevesipurkupuuti	27.8.2018	0,6	0,5	62	53	0,7	0,7	420	78	270	270
Hulevesipurkupuuti	16.10.2018	2,7	2,7	1100	1100	2,7	2,7	2300	1100	1000	1000
Hulevesipurkupuuti	22.1.2019	3,94		220		2,1		990		1100	
Hulevesipurkupuuti	2.5.2019	2,59	2,54	290	270	3,06	3,02	340	220	2300	2100
Hulevesipurkupuuti	2.7.2019	3,52	3,56	420	410	4,52	4,57	740	560	3500	3500
Hulevesipurkupuuti	12.8.2019	2,52	2,47	220	190	5,13	5,12	1400	950	3000	3100
Hulevesipurkupuuti	10.9.2019	3,22	3,25	460	450	5,74	5,74	690	420	2800	2500
Hulevesipurkupuuti	1.10.2019	2,16	1,96	350	290	1,91	1,97	1500	310	<400	440
Sedimentaatioallas	2.7.2019	3,56	3,58	410	400	4,47	4,55	700	560	3900	4000
Sedimentaatioallas	12.8.2019	2,5	2,48	220	210	5,02	5,14	1300	910	2900	2900
Sedimentaatioallas	10.9.2019	3,25	3,27	440	430	6,04	6,02	660	400	2500	2400
Sedimentaatioallas	1.10.2019	2,24	1,95	370	310	2	2	1800	340	<400	<400
Sammalyksikkö	2.7.2019	3,63	3,63	420	400	5,09	5,15	690	510	4100	3800
Sammalyksikkö	12.8.2019	2,54	2,52	250	210	5,15	5,06	1300	940	2900	2700
Sammalyksikkö	10.9.2019	3,25	3,28	450	420	5,85	5,93	730	420	2700	2600
Sammalyksikkö	1.10.2019	2,2	1,92	320	270	2,1	2,14	1700	320	<400	420
Sieniyksikkö	2.7.2019	3,67	3,64	460	460	4,78	4,82	730	580	3900	3900
Sieniyksikkö	12.8.2019	2,54	2,52	240	220	5,2	5,15	1200	800	2900	2600
Sieniyksikkö	10.9.2019	3,23	3,27	460	450	5,93	5,91	720	430	2700	2700
Sieniyksikkö	1.10.2019	2,33	2,03	310	220	2,22	2,31	1800	290	<400	570

Liite 58. Levin vedenlaatutulokset. Vaaleansiniset, yksiköiden rakennemuutos

Alkuaineet		Sinkki 17294-2	Sinkki 17294-2 suodatettu	Strontium	Strontium suodatettu	Titaani	Titaani suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hulevesipurkupuutki	3.5.2018	54	16	29		100	
Hulevesipurkupuutki	30.5.2018	25	12	36	37	1	<1,0
Hulevesipurkupuutki	24.6.2018	13		47	48	<1,0	<1,0
Hulevesipurkupuutki	26.7.2018	12	12	64	65	1,1	<1,0
Hulevesipurkupuutki	27.8.2018	20	9,8	8,2	7,9	10	<1,0
Hulevesipurkupuutki	16.10.2018	12		42	43	1,3	<1,0
Hulevesipurkupuutki	22.1.2019	610	87	27		0,4	
Hulevesipurkupuutki	2.5.2019	92	14	32	33	1,6	0,4
Hulevesipurkupuutki	2.7.2019	16	23	55	57	0,6	0,3
Hulevesipurkupuutki	12.8.2019	26	5,8	47	48	2,1	0,3
Hulevesipurkupuutki	10.9.2019	6,8	22	54	54	0,3	0,2
Hulevesipurkupuutki	1.10.2019		14	26	28	32	1,1
Sedimentaatioallas	2.7.2019	15	26	56	58	0,6	0,3
Sedimentaatioallas	12.8.2019	25	5,8	46	48	1,8	0,2
Sedimentaatioallas	10.9.2019	6,5	22	56	55	0,4	0,2
Sedimentaatioallas	1.10.2019			27	28	40	1,1
Sedimentaatioallas	9.7.2020	14					
Sedimentaatioallas	24.8.2020	15	15				
Sammalyksikkö	2.7.2019	16	22	58	59	0,6	0,3
Sammalyksikkö	12.8.2019	25	6,6	47	48	1,9	0,3
Sammalyksikkö	10.9.2019	8,4	23	55	55	0,9	0,3
Sammalyksikkö	1.10.2019			26	28	38	1
Sammalyksikkö	9.7.2020	16					
Sammalyksikkö	24.8.2020	24	15				
Sieniyksikkö	2.7.2019	16	20	57	59	0,7	0,3
Sieniyksikkö	12.8.2019	22	7,1	48	47	1,7	0,3
Sieniyksikkö	10.9.2019	7,3	27	54	55	0,7	0,3
Sieniyksikkö	1.10.2019			26	27	43	1,3
Sieniyksikkö	9.7.2020	46					
Sieniyksikkö	24.8.2020	10					

Liite 59. Levin vedenlaatutulokset. Vaaleansiniset, yksiköiden rakennemuutos

Alkuaineet		Beryllium	Beryllium suodatettu	Hopea	Hopea suodatettu	Litium	Litium suodatettu	Molybdeeni	Molybdeeni suodatettu	Palladium	Palladium suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hulevesipurkupaik	3.5.2018	0,05		<0,02		2,4		0,27		<0,02	
Hulevesipurkupaik	30.5.2018	<0,02	<0,02			0,42	0,43	0,1	0,1	<0,02	<0,02
Hulevesipurkupaik	24.6.2018	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,32	0,32	0,14	0,14	<0,02	<0,02
Hulevesipurkupaik	26.7.2018	0,05		<0,02		0,22		0,19		<0,02	
Hulevesipurkupaik	27.8.2018	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,66	0,33	0,16	0,17	<0,02	<0,02
Hulevesipurkupaik	16.10.2018										

Alkuaineet		Platina	Platina suodatettu	Rubidium	Rubidium suodatettu	Sinkki 11885	Sinkki 11885 suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hulevesipurkupaik	3.5.2018	<0,01		7,1		53	
Hulevesipurkupaik	30.5.2018	<0,01	<0,01	1,8	1,8	22	15
Hulevesipurkupaik	24.6.2018	<0,01	<0,01	3,3	3,3	12	11
Hulevesipurkupaik	26.7.2018	<0,01		4,2		12	9
Hulevesipurkupaik	27.8.2018	<0,01	<0,01	1,9	1,3	19	11
Hulevesipurkupaik	16.10.2018					11	9

Raskasmetallit		Antimoni	Antimoni suodatettu	Arseeni	Arseeni suodatettu	Boori	Boori suodatettu	Kadmium	Kadmium suodatettu	Koboltti	Koboltti suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hulevesipurkupaik	3.5.2018	0,16		0,54		4		0,02		2,3	
Hulevesipurkupaik	30.5.2018	0,03	0,03	0,24	0,18	3,7	4,9	<0,003	<0,003	0,89	0,73
Hulevesipurkupaik	24.6.2018	0,03	0,03	0,35	0,32	4,7	4,7	0,004	0,004	0,91	0,89
Hulevesipurkupaik	26.7.2018	0,05		0,69		4,6		0,005		0,76	
Hulevesipurkupaik	27.8.2018	0,08	0,05	0,25	0,15	2	2	0,05	<0,003	0,49	0,19
Hulevesipurkupaik	16.10.2018			0,34	0,27			0,003	<0,003	1,8	1,7
Hulevesipurkupaik	22.1.2019			0,49				0,006		0,24	
Hulevesipurkupaik	2.5.2019			0,22	0,19			0,006	0,006	0,44	0,37
Sedimentaatioallas	9.7.2020			0,27				0,004		0,65	
Sedimentaatioallas	24.8.2020			0,43				0,005		0,77	
Sammalyksikkö	9.7.2020			0,27				0,007		0,51	
Sammalyksikkö	24.8.2020			0,59				0,007		1,4	
Sieniysikkö	9.7.2020			0,37				0,024		1,9	
Sieniysikkö	24.8.2020			0,34				0,007		0,98	

Liite 60. Levin vedenlaatutulokset. Vaaleansiniset, yksiköiden rakennemuutos

Raskasmetallit		Kromi	Kromi suodatettu	Kupari	Kupari suodatettu	Lyijy	Lyijy suodatettu	Nikkeli	Nikkeli suodatettu	Seleeni	Seleeni suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hulevesipurkupuut	3.5.2018	3,8		11		1,5		4		<0,1	
Hulevesipurkupuut	30.5.2018	0,19	0,14	1,1	1,2	0,036	0,017	0,66	0,57	<0,1	<0,1
Hulevesipurkupuut	24.6.2018	0,15	0,15	1,5	3,7	0,015	0,049	1	1	<0,1	<0,1
Hulevesipurkupuut	26.7.2018	0,13		2,2		0,058		1,3		<0,1	
Hulevesipurkupuut	27.8.2018	0,71	0,15	10	5,5	0,23	0,015	0,78	0,32	<0,1	<0,1
Hulevesipurkupuut	16.10.2018	0,19	0,09	1,3	1,2	0,034	0,014	1,1	1	<0,1	<0,1
Hulevesipurkupuut	22.1.2019	0,17		0,45		0,56		0,47		<0,1	
Hulevesipurkupuut	2.5.2019	0,21	0,11	1,8	1,5	0,083	0,044	0,76	0,63	<0,1	<0,1
Sedimentaatioallas	9.7.2020	0,28		2,1		0,027		1,2		<0,1	
Sedimentaatioallas	24.8.2020	0,25		1,8		0,058		1,3		<0,1	
Sammalyksikkö	9.7.2020	0,48		3		0,1		1		<0,1	
Sammalyksikkö	24.8.2020	0,69		3,9		0,28		1,7		<0,1	
Sieniyksikkö	9.7.2020	0,15		1,8		0,051		1,1		<0,1	
Sieniyksikkö	24.8.2020	0,6		3		0,26		1,5		<0,1	

Raskasmetallit		Uraani	Uraani suodatettu	Vanadiini	Vanadiini suodatettu
Paikka	pvm	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Hulevesipurkupuut	3.5.2018	0,48		4,2	
Hulevesipurkupuut	30.5.2018	0,18	0,15	0,19	0,09
Hulevesipurkupuut	24.6.2018	0,093	0,092	0,2	0,16
Hulevesipurkupuut	26.7.2018	0,089		0,29	
Hulevesipurkupuut	27.8.2018	0,067	0,015	1,2	0,41
Hulevesipurkupuut	16.10.2018	0,024	0,016	0,21	0,08
Hulevesipurkupuut	22.1.2019	0,11		0,19	
Hulevesipurkupuut	2.5.2019	0,072	0,059	0,24	0,14
Sedimentaatioallas	9.7.2020	0,15		0,29	
Sedimentaatioallas	24.8.2020	0,12		0,32	
Sammalyksikkö	9.7.2020	0,16		0,42	
Sammalyksikkö	24.8.2020	0,16		0,87	
Sieniyksikkö	9.7.2020	0,062		0,2	
Sieniyksikkö	24.8.2020	0,078		0,44	

Liite 61. Levin vedenlaatutulokset

Bromatut palonestoaineet

Levi hulevesi	α -HBCD	α -HBCD	β -HBCD	γ -HBCD	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-85	BDE-99	BDE-100	BDE-153
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
25.4.2018	<0,10		<0,10	<0,10	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,2	<0,03	<0,03
26.7.2018	0,13	0,36	<0,10	<0,10	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,2	<0,03	<0,03
16.10.2018	<0,10		<0,10	<0,10	<0,03	0,8	0,17	0,079	0,42	0,23	0,1
2.5.2019	0,67		0,20	0,11	<0,03	<0,03	<0,03	n/a	<0,03	<0,04	n/a

Bromatut palonestoaineet

Levi hulevesi	BDE-154	BDE-183	BDE-209
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l
25.4.2018	<0,03	<0,03	11
26.7.2018	<0,03	<0,03	<0,03
16.10.2018	0,14	<0,03	*) a
2.5.2019	n/a	n/a	<0,04

α -heksabromisyklododekaani; rinnakkaismääritys. 2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-Dekabromidifenyylietteri: Huom. Tuloksessa epävarmuutta.

*) a = puuttuva tulos. Pitoisuutta ei voitu määrittää luotettavasti kyseisestä näytteestä

Bromatut palonestoaineet

Sedimentaatioallas	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-85	BDE-99	BDE-100	BDE-153	BDE-154	BDE-183	BDE-209
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
16.8.2019	<0,03	<0,03	<0,04	<0,04	<0,03	<0,03	0,30	<0,03	<0,03	0,94
10.9.2019	0,03	0,31	0,05	<0,04	0,50	0,50	0,06	<0,03	0,09	<0,04

Bromatut palonestoaineet

Sammalyksikkö	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-85	BDE-99	BDE-100	BDE-153	BDE-154	BDE-183	BDE-209
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
16.8.2019	<0,03	<0,03	<0,04	<0,04	<0,03	<0,03	0,30	<0,03	<0,03	0,38
10.9.2019	0,04	0,34	0,11	<0,04	0,23	0,24	<0,03	<0,03	<0,03	<0,04

Liite 62. Levin vedenlaatutulokset

Bromatut palonestoaineet

Sieniyksikkö	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-85	BDE-99	BDE-100	BDE-153	BDE-154	BDE-183	BDE-209
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
16.8.2019	<0.03	<0.03	<0.04	<0.04	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.04
10.9.2019	0,13	2,6	0,37	0,40	3,7	3,7	0,32	0,04	0,08	19

Bromatut palonestoaineet

Purkuputken suu	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-85	BDE-99	BDE-100	BDE-153	BDE-154	BDE-183	BDE-209
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
16.8.2019	<0.03	<0.03	0,14	<0.04	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.04
10.9.2019	0,04	0,87	0,13	<0.04	0,91	0,92	0,05	<0.03	<0.03	11

PAH-yhdisteet

Levi hulevesi	1MNA	2MNA	ANTR	ANP	ANY	BAA	BAP	BBF	BEP	BGHIP
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
25.4.2018	<5	<5	<10	<5	<5	<10	<10	<10	<10	<10
26.7.2018	<5	<5	<10	<5	<5	<10	<10	<10	<10	<10
16.10.2018	<5	<5	<10	9	<5	<10	<10	<10	<10	<10
2.5.2019	27	24	<10	<5	<5	<10	<10	<10	<10	<10

PAH-yhdisteet

Levi hulevesi	DBAHA	PHN	FLUO	FLURE	CHRY	NAFTA	PER	PYR	TRF
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
25.4.2018	<10	<5	<5	<10	<10	<5	<10	6	<10
26.7.2018	<10	<5	<5	<10	<10	<5	<10	<5	<10
16.10.2018	<10	12	7	<10	<10	5	<10	5	<10
2.5.2019	<10	24	8	11	<10	32	<10	6	<10

Liite 63. Levin vedenlaatutulokset

Öljyhiilivedyt

Levi hulevesi	C10-C20	C21-C40	Summa µg/l
Näyte pvm	µg/l	µg/l	µg/l
25.4.2018	<50	190	230
26.7.2018	<50	<50	<100
16.10.2018	<50	<50	<100
22.2.2019	<50	<50	<100
2.5.2019	<50	<50	<100

Perfluoralkyylihapot

Levi hulevesi	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUdA	PFDoA	PFTTrDA	PFTeDA
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
25.4.2018	3,22	4,04	6,19	3,57	5,55	2,13	3,99	1,57	2,21	<0,50	1,38
26.7.2018	2,23	3,17	4,41	2,16	4,44	0,648	0,736	<10	<0,20	<0,50	<0,50
16.10.2018	1,9	3,12	4,66	2,65	6,74	1,99	2,24	0,195	<0,20	<0,50	<0,50
2.5.2019	3,50	3,70	4,65	2,59	4,72	1,09	1,86	0,15	<0,20	<0,50	<0,50

Perfluoralkyylihapot

Levi hulevesi	PFHxDA	PFODA	PFBS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFDS
Näyte pvm	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
25.4.2018	<0,50	1,85	0,912	0,379	<0,10	0,799	<0,20
26.7.2018	<0,50	<0,50	1,37	1,43	<0,10	0,534	<0,20
16.10.2018	<0,50	<0,50	1,2	0,601	<0,10	0,924	<0,20
2.5.2019	<0,50	<0,50	1,08	0,29	<0,10	0,24	<0,20

Liite 64. Levin vedenlaatutulokset

Bromatut palonestoaineet		Öljyhilivedyt	
α -heksabromisyklododekaani	α -HBCD	Keskitsileet	C10-C20
β -heksabromisyklododekaani	β -HBCD	Raskaat jakeet	C21-C40
γ -heksabromisyklododekaani	γ -HBCD	PAH-yhdisteet	
2,4,4'-Tribromidifenyylieetteri	BDE-28	1-Metyyli-naftaleeni	1MNA
2,2',4,4'-Tetrabromidifenyylieetteri	BDE-47	2-Metyyli-naftaleeni	2MNA
2,3',4,4'-Tetrabromidifenyylieetteri	BDE-66	Antraseeni	ANTR
2,2',3,4,4'-Pentabromidifenyylieetteri	BDE-85	Asenaftteeni	ANP
2,2',4,4',5-Pentabromidifenyylieetteri	BDE-99	Asenaftyleeni	ANY
2,2',4,4',6-Pentabromidifenyylieetteri	BDE-100	Bentso(a)antraseeni	BAA
2,2',4,4',5,5'-Heksabromidifenyylieetteri	BDE-153	Bentso(a)pyreeni	BAP
2,2',4,4',5,6'-Heksabromidifenyylieetteri	BDE-154	Bentso(b)fluoranteeni	BBF
2,2',3,4,4',5',6-Heptabromidifenyylieetteri	BDE-183	Bentso(e)pyreeni	BEP
2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'-Dekabromidifenyylieetteri	BDE-209	Bentso(ghi)peryleeni	BGHI
Perfluoralkyylihapot		Bentso(k)fluoranteeni	BKF
Perfluoributaanihappo	PFBA	Dibentso(a,h)antraseeni	DBAH
Perfluoripentaanihappo	PFPeA	Fenantreeni	PHN
Perfluoriheksaanihappo	PFHxA	Fluoranteeni	FLUO
Perfluoriheptaanihappo	PFHpA	Fluoreeni	FLUR
Perfluorioktaanihappo	PFOA	Kryseeni	CHRY
Perfluorinonaanihappo	PFNA	Naftaleeni	NAFT
Perfluoridekaanihappo	PFDA	Peryleeni	PER
Perfluoriundekaanihappo	PFUdA	Pyreeni	PYR
Perfluoridodekaanihappo	PFDoA	Trifenyleeni	TRF
Perfluoritridekaanihappo	PFTrDA		
Perfluoritetradekaanihappo	PFTeDA		
Perfluoriheksadekaanihappo	PFHxDA		
Perfluorioktadekaanihappo	PFODA		
Perfluoributaanisulfonihappo	PFBS		
Perfluoriheksaanisulfonihappo	PFHxS		
Perfluoriheptaanisulfonihappo	PFHpS		
Perfluorioktaanisulfonihappo	PFOS		
Perfluoridekaanisulfonihappo	PFDS		

Liite 65. Levin vedenlaatutulokset

Luminäytteet 22.4.2019

Bromatut palonestoaineet

Paikka	ETRS N	ETRS E	α -HBCD	β -HBCD	γ -HBCD	BDE-28	BDE-47	BDE-66	BDE-85	BDE-99	BDE-100
			ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
Sirkka kontrolli lumi	7524826,007	407741,718	<0.10	<0.10	<0.10	<0.03	<0.03	<0.03	<0.04	<0.03	<0.04
Sirkka moottorikelkkareitti lumi	7522951,755	407072,977	n/a	n/a	n/a	<0.03	0,93	n/a	n/a	n/a	n/a
Sirkka hiihtolatu lumi	7522930,764	407068,978	1,0	<0.30	<0.30	n/a	<0.03	n/a	n/a	n/a	n/a

Bromatut palonestoaineet

Paikka	ETRS N	ETRS E	BDE-153	BDE-154	BDE-183	BDE-209
			ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
Sirkka kontrolli lumi	7524826,007	407741,718	<0.03	<0.03	<0.03	0,13
Sirkka moottorikelkkareitti lumi	7522951,755	407072,977	<0.03	n/a	0,092	n/a
Sirkka hiihtolatu lumi	7522930,764	407068,978	<0.03	<0.03	<0.03	4,90

n/a = Tulos ei saatavilla

PAH-yhdisteet

Paikka	ETRS N	ETRS E	1MNA	2MNA	ANTR	ANP	ANY	BAA	BAP	BBF	BEP
			ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
Sirkka kontrolli lumi	7524826,007	407741,718	<5	8	<10	<5	<5	<10	<10	<10	<10
Sirkka moottorikelkkareitti lumi	7522951,755	407072,977	220	390	120	15	<5	28	21	73	39
Sirkka hiihtolatu lumi	7522930,764	407068,978	<5	7	<10	<5	<5	<10	<10	<10	<10

Liite 66. Levin vedenlaatutulokset

PAH-yhdisteet

Paikka	ETRS N	ETRS E	BGHIP	BKF	DBAHA	PHN	FLUO	FLURE	CHRY	NAFTA	PER
			ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
Sirkka kontrolli lumi	7524826,007	407741,718	<10	<10	<10	40	23	9	<10	10	<10
Sirkka moottorikelkkareitti lumi	7522951,755	407072,977	55	31	13	1900	940	420	95	140	<10
Sirkka hiihtolatu lumi	7522930,764	407068,978	<10	<10	<10	47	18	10	<10	8	<10

PAH-yhdisteet

Paikka	ETRS N	ETRS E	PYR	TRF
			ng/l	ng/l
Sirkka kontrolli lumi	7524826,007	407741,718	12	<10
Sirkka moottorikelkkareitti lumi	7522951,755	407072,977	470	<10
Sirkka hiihtolatu lumi	7522930,764	407068,978	9	<10

Öljyhilivedyt

Paikka	ETRS N	ETRS E	C10-C20	C21-C40	Summa µg/l
			µg/l	µg/l	µg/l
Sirkka kontrolli lumi	7524826,007	407741,718	<50	<50	<100
Sirkka moottorikelkkareitti lumi	7522951,755	407072,977	140	970 ^{a)}	1100 ^{a)}
Sirkka hiihtolatu lumi	7522930,764	407068,978	52	970 ^{b)}	1000 ^{b)}

a) Näytteestä 1419-00725 mitatun kromatogrammin profiili poikkeaa tyypillisestä mineraaliöljystä. Näytteessä havaitaan suoraketjuisia hiilivetyjä alueella C20-C42.

b) Näytteestä 1419-00726 mitatun kromatogrammin profiili poikkeaa tyypillisestä mineraaliöljystä. Näytteessä havaitaan suoraketjuisia hiilivetyjä alueella C20-C49.

Liite 67. Levin vedenlaatutulokset

Perfluorialkylihapot

Paikka	ETRS N	ETRS E	PFBA	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFNA	PFDA	PFUdA	PFDoA
			ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
Sirkka kontrolli lumi	7524826,007	407741,718	0,72	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	1,30	<0.10	0,25	<0.20
Sirkka moottorikelkkareitti lumi	7522951,755	407072,977	<0.50	<0.10	0,25	0,13	0,25	10,7	1,03	6,97	4,61
Sirkka hiihtolatu lumi	7522930,764	407068,978	<0.50	0,50	2,33	1,51	4,42	20,2	50,7	26,8	26,0

Perfluorialkylihapot

Paikka	ETRS N	ETRS E	PFTTrDA	PFTeDA	PFHxDA	PFODA	PFBS	PFHxS	PFHpS	PFOS	PFDS
			ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l	ng/l
Sirkka kontrolli lumi	7524826,007	407741,718	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.20
Sirkka moottorikelkkareitti lumi	7522951,755	407072,977	3,01	4,70	<0.50	<0.50	0,12	<0.10	<0.10	0,49	<0.20
Sirkka hiihtolatu lumi	7522930,764	407068,978	10,1	16,5	10,8	4,42	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.20

Typpi ja/tai raskasmetallipitoista kuormitusta vesistöihin muodostuu mm. kaivostoi-
minnasta, jätevedenpuhdistamoilta, hulevesistä, maataloudesta ja turvetuotannosta.
Monissa näistä kohteista passiiviset vesienkäsittelymenetelmät voivat olla ratkaisu
tai osaratkaisu vesien puhdistamiseen. Yksittäisellä rakenteella, esim. kosteikko, ei
usein pystytä optimaalisesti erilaisten aineiden puhdistamiseen. Tällöin erityyppisten
passiivisten yksikkökomponenttien yhdistämisellä (hybridiratkaisu) voitaisiin toteut-
taa jäte- tai valumavesien puhdistusta siten, että puhdistusratkaisu huomioi paremmin
kuormituslähteen vedenlaadun ja sen puhdistustarpeet. Tässä hankkeessa on tuotettu
uutta tietoa hybridiratkaisujen suunnittelusta ja mitoituksesta kylmiin olosuhteisiin, ja
tutkittu ja optimoitu pohjoisiin olosuhteisiin sopeutuneiden luonnonkasvien, sienten ja
bakteerien kykyä pidättää vedestä typpeä ja raskasmetalleja.

Tutkimus on toteutettu Euroopan Aluekehitysrahaston osarahoittamassa hankkeessa
'Passiiviset hybridipuhdistusratkaisut arktisten valumavesien typen ja raskasmetallien
puhdistamiseen' (HybArkt, 2018–2020). Tutkimuksen toteuttajina ovat olleet Oulun
yliopisto (Vesi-, energia- ja ympäristötekniikan ja Ekologian ja genetiikan tutkimusyksik-
öt) sekä Suomen ympäristökeskus (Oulun toimipaikka).



ISBN 978-952-11-5344-0 (PDF)

ISBN 978-952-11-5343-3 (nid.)

ISSN 1796-1726 (verkkokj.)

ISSN 1796-1718 (pain.)