



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 86/2023

Biokiertotaloudesta uusia ratkaisuja kaivosten jälkihoitoon

Kierroksia biopeittoon -hankkeen loppuraportti (Biopeitto 2)

Marleena Hagner ja Marja Uusitalo (toim.)

Biokiertoaloudesta uusia ratkaisuja kaivosten jälkihoitoon

Kierroksia biopeittoon -hankkeen loppuraportti (Biopeitto 2)

Marleena Hagner ja Marja Uusitalo (toim.)

**Rainer Peltola, Kimmo Rasa, Juha Heiskanen, Hanna Ruhanen, Karri Uotila,
Karetta Vikki, Ilkka Leinonen, Kuisma Ranta, Jari Hietanen, Anna Tornivaara,
Raija Pietilä, Tatu Lahtinen, Jukka Kuva, Pasi Heikkilä ja Pauliina Liwata-Kenttälä**



Viittausohje: Hagner, M. & Uusitalo, M. (toim.) 2023. Biokiertotaloudesta uusia ratkaisuja kaivosten jälkihoitoon : Kierroksia biopeittoon -hankkeen loppuraportti (Biopeitto 2). Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 86/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 73 s.

Marleena Hagner ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0003-3617-2712>

ISBN 978-952-380-779-2 (Painettu)

ISBN 978-952-380-780-8 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-780-8>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Marleena Hagner ja Marja Uusitalo (toim.), Rainer Peltola, Kimmo Rasa, Juha Heiskanen, Hanna Ruhanen, Karri Uotila, Karetta Vikki, Ilkka Leinonen, Kuisma Ranta, Jari Hietanen, Anna Tornivaara, Raija Pietilä, Tatu Lahtinen, Jukka Kuva, Pasi Heikkilä ja Pauliina Liwata-Kenttälä

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2023

Julkaisu vuosi: 2023

Kannen kuva: Marleena Hagner

Tiivistelmä

Marleena Hagner¹, Marja Uusitalo², Rainer Peltola², Kimmo Rasa¹, Juha Heiskanen³, Hanna Ruhanen³, Karri Uotila³, Karetta Vikki⁴, Ilkka Leinonen⁴, Kuisma Ranta⁵, Jari Hietanen⁵, Anna Tornivaara⁶, Raija Pietilä⁷, Tatu Lahtinen⁶, Jukka Kuva⁶, Pasi Heikkilä⁶ ja Pauliina Liwata-Kenttälä⁷

Luonnonvarakeskus ¹ 31600 Jokioinen, ² 96200 Rovaniemi, ³ 77600 Suonenjoki, ⁴ 00700 Helsinki, ⁵ 95900 Kolari; Geologian tutkimuskeskus: ⁶ 02150 Espoo, ⁷ 96100 Rovaniemi

Kaivannaisjätealueiden peittäminen ja maisemointi ovat oleellinen osa kaivoksen sulkemista. Kuivapeitolla pyritään rajoittamaan kaivannaisjätteen läpi kulkeutuvan veden ja hapen määrää, estämään veden happamoitumista ja pidättämään vettä kasvien käyttöön. Pohjoisen äärevät olosuhteet tuovat sulkemiseen omat haasteensa ja uusia peittomateriaaleja ja -ratkaisuja tarvitaan.

Biopeitto 2 -hankkeessa tutkittiin, miten kuivapeittoon lisätyt orgaaniset sivuvirtamateriaalit vaikuttavat peiton rakenteeseen, kestävyYTEEN, materiaalien rapautumiseen ja kasvien kasvuun sekä metallien kulkeutumiseen pohjoisissa olosuhteissa. Tutkimus keskittyi erityisesti alueellisiin orgaanisiin sivuvirtoihin, joista mukaan valittiin jätevesiliete, siitä tuotettu biohiili ja poltossa syntyvä lietetuhka sekä purkupuusta ja metsän harvennuspuusta (kuusi) valmistettu biohiili ja energiatuotannon lentotuhka.

Tutkimus osoitti, että perinteisen moreenipeiton ominaisuuksia kasvualustana voidaan parantaa orgaanisilla sivuvirroilla. Hyvinvoiva kasvillisuus parantaa maan vedenpidätyskykyä ja tehostaa veden haihtumista kasvukauden aikana. Samalla peittorakenteen läpi suotautuvan veden määrä vähenee. Huolimatta eroista biohiilen laadussa, niiden vaikutukset maapatsaan läpi huuhtoutuvan suotoveden kemialliseen laatuun olivat pääosin vähäisiä. Toisin sanoen peittorakenteeseen lisätty biohiili ei lisää ravinteiden tai raskasmetallien huuhtoutumista. Kokeet osoittivat myös lento- ja lietetuhkan toimivan ravinteiden lähteenä kasveille.

Hankkeen aikana tutkittiin myös sitä, miten biohiili säilyttää rakenteensa vaihtelevissa olosuhteissa. Rapautumista tarkasteltiin röntgentomografian ja elektronimikroskopian avulla. Kun biohiiltä altistettiin lämpötilanmuutosten aiheuttamalle kuormitukselle, hiilen sisäinen huokosrakenne ei juuri muuttunut. Lisäksi havaittiin, että biohiilten sisäinen huokosrakenne täyttyy vedellä hitaasti. Siksi biohiilen suotuisat vaikutukset kasvillisuuteen voivat ilmetä viiveellä.

Hankkeessa toteutetussa arvoketjupilotissa purkupuuta jalostettiin biohiileksi, kompostoitettiin jätevesilietteen kanssa ja tuotettu kasvialusta päätyi kaivosalueen peittoratkaisuksi toimijaverkoston avulla. Biokierratotalouteen nojaava peittoratkaisu voidaan siis toteuttaa alueen yritysten yhteisvoimin.

Taloudellisessa tarkastelussa biohiileen perustuva peittoratkaisu oli kuutiohinnaltaan kallein, mutta toisaalta biohiiltä sisältävä peitto toimii hiilinieluna. Biokierratalous voi palvella kaivosalaa ja tuoda kuivapeiton perustamiseen lisää vaihtoehtoja.

Asiasanat: biohiili, kaivostoiminta, kierratotalous, biotalous, jätevesiliete, kaivosympäristö, maisemointi, kaivannaisjäte kuivapeitto

Abstract

Marleena Hagner¹, Marja Uusitalo², Rainer Peltola², Kimmo Rasa¹, Juha Heiskanen³, Hanna Ruhanen³, Karri Uotila³, Karetta Vikki⁴, Ilkka Leinonen⁴, Kuisma Ranta⁵, Jari Hietanen⁵, Anna Tornivaara⁶, Raija Pietilä⁷, Tatu Lahtinen⁶, Jukka Kuva⁶, Pasi Heikkilä⁶ ja Pauliina Liwata-Kenttälä⁷

Luonnonvarakeskus ¹ 31600 Jokioinen, ² 96200 Rovaniemi, ³ 77600 Suonenjoki, ⁴ 00700 Helsinki, ⁵ 95900 Kolari; Geologian tutkimuskeskus: ⁶ 02150 Espoo, ⁷ 96100 Rovaniemi

Covering and landscaping of mining waste areas are integral parts of mine closure. Dry covering of mining waste areas aims to limit the amount of water and oxygen passing through the cover, prevent acidification of seepage water, and retain water for plant use. Northern, often extreme climatic conditions present unique challenges to covering and landscaping, necessitating the development of new materials and solutions.

The Biopeitto 2 -project investigated how added organic byproducts affect composition, durability, decay of materials, plant growth, and metal mobility of mining waste dry covers in northern conditions. The emphasis was on utilizing local and regional organic byproducts, including wastewater sludge, biochar derived from it, sludge ash, as well as biochar made from demolition wood and forest thinning wood (spruce), and fly ash from energy production.

The research demonstrated that incorporating local organic byproducts into a traditional till cover can significantly enhance its capacity as a substrate for plant growth. Robust vegetation not only improve soil water retention but also promotes water evaporation throughout the growing season, thereby reducing the volume of leachate passing through the soil and reaching the waste rock. Despite differences in biochar quality, its effects on the chemical quality of leachate water were generally negligible, indicating that the addition of biochar to the cover structure does not significantly affect nutrient or heavy metal leaching.

The weathering of biochar was examined using X-ray tomography and electron microscopy. When biochar was subjected to temperature-induced stress, its internal pore structure remained largely unchanged. The experiments also found that the internal pore structure of biochars fills slowly with water. Thus, effects of biochar in the field may appear with delay.

During the project, a value chain pilot was conducted. In this pilot, a network of stakeholders transformed demolition wood into biochar, composted it with wastewater sludge, and produced a growth substrate that was used in the mine waste rock covering solution. The pilot demonstrated that implementing a covering solution based on a circular bioeconomy is feasible through collaboration among local businesses.

In an economic analysis, the biochar-based covering solution had the highest cubic price. However, it also functions as a carbon sink. Other cost-controlling methods were also identified. A circular bioeconomy holds the potential to serve the mining sector and provide additional options for establishing dry covers.

Keywords: biochar, mining, circular bioeconomy, wastewater sludge, mining environment, landscaping, mining waste dry cover

Sisällys

1. Johdanto	6
2. Biopeiton materiaalit.....	8
2.1. Moreeni	9
2.2. Biohiilet, tuhkat ja komposti.....	10
3. Tutkimusmenetelmät	12
3.1. Laboratoriokokeet	12
3.2. Kasvihuonekokeet	13
3.3. Lysimetrikokeet.....	15
3.4. Ruutukokeet.....	17
4. Tulokset.....	19
4.1. Biopeiton vesitalous.....	19
4.1.1. Biohiilten vedenpidätyskyky	20
4.1.2. Peittorakenteen vaikutus suotoveden määrään.....	20
4.1.3. Peittorakenteen vaikutus suotoveden laatuun.....	21
4.1.4. Peittokerroksen vesi- ja happipitoisuudet.....	24
4.2. Biohiilen rapautuminen	27
4.3. Biopeiton kasvillisuus	30
4.3.1. Ruohot ja puuvartist	31
4.3.2. Pohjoiset niittyajit	34
4.4. Metallien kulkeutuminen	35
4.4.1. Biohiilen metallienpidätyskyky.....	36
4.4.2. Biohiilten kuvantaminen.....	40
4.4.3. Metallien kertyminen kasveihin.....	43
4.4.4. Tuhkan sisältämien metallien suotautuminen	44
5. Biopeiton alueellinen tuotanto	46
5.1. Arvoketjun luominen ja pilotointi.....	47
5.2. Taloudellinen kannattavuus.....	51
5.3. Kasvialustan hiilijalanjälki	55
6. Johtopäätökset ja suositukset	60
6.1. Sivuvirrat parantavat peiton toimintakykyä.....	60
6.2. Teollinen mittakaava, hiilikompensaatio ja laikutus.....	62
Viitteet.....	65
Liitteet	70

1. Johdanto

Kaivannaisjätealueiden peittäminen ja maisemointi ovat oleellinen osa kaivoksen sulkemista. Pohjoiset olosuhteet tuovat peittämiseen ja maisemointiin omat haasteensa ja uusia ratkaisuja tarvitaan vastaamaan näihin tarpeisiin. Haitallisia suotovesiä syntyy erityisesti sulfidipitoisten kaivannaisjätteiden läjityksessä.

Tehokkaiden peittoratkaisujen avulla pyritään rajoittamaan mm. mahdollisten happamien ja metallipitoisten vesien suotautuminen tai valuminen ympäristöön. Vaikutusten vähentämiseksi osa jätealueista voidaan sulkea jo toiminnan aikana. Suomessa on pitkälti käytetty peittoratkaisuna ominaisuuksiltaan kriteerit täyttävää moreenia. Sopivaa moreenia ei välttämättä löydy kaivoksen lähialueilta etenkin, jos moreenin tarve on suuri, mikä lisää kuljetuskustannuksia. Peittorakenteen optimoinnilla pyritään myös vähentämään tarvittavaa moreenin määrää. Yksi keskeinen peittoratkaisun vaatimus on sen toimiminen suotuisana kasvualustana, mikä mahdollistaa alueen maisemoimisen kaivostoiminnan loputtua.

Vuonna 2017 EU:n tuella alkaneessa *Biopeitto 1* -hankkeessa¹ saatiin lupaavia tuloksia puupohjaisen biohiilen käytöstä rikastushiekka-alueiden peittoratkaisussa (Pietilä ym. 2020). Hanke oli Suomessa ja Pohjois-Euroopassa ensimmäisiä, joissa tutkittiin biohiilen hyödyntämistä kaivannaisjätteiden peittoratkaisussa. Hankkeessa valmistettiin moreenista ja kompostoidusta jätevesilietteestä kuivapeittokerros, johon sekoitettiin puubiohiiltä. Tällaisen orgaanista ainesta sisältävän "biopeiton" osoitettiin parantavan kasvien kasvua. Lisäksi biohiili pidätti vettä ja vähensi metallien kulkeutumista kasveihin ja suotoveteen. Tiedot perustuivat kuitenkin vain muutaman kasvukauden ja heinälajin (ei-paikallista alkuperää) havaintoihin (Pietilä ym. 2020).

Samaan aikaan biohiilen lisäämisestä maaperään on saatu lupaavia tuloksia maailmalta mm. saastuneiden maiden puhdistamisessa (Bolan ym. 2022; Penido ym. 2019). Tämän ohella on tutkittu biohiilen vaikutusta kasvien elinvoimaisuuteen (Ghosh ja Maiti 2021). Kokemukset *Biopeitto 1* -hankkeesta ja maailmalta sekä yritysten tarpeet ja huoli raaka-aineiden hupenemisesta kannustivat laajentamaan tutkimusta. *"Jos luonnonvarojen käyttäminen jatkuu entiseen tapaan, tarvitsimme vuoteen 2050 mennessä kolmen maapallon luonnonvarat"* (Euroopan parlamentti 2022)

Biopeitto 2 -hankkeessa² koetoimintaa jatkettiin Luonnonvarakeskuksen (Luke) ja Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) yhteistyönä tavoitteena tuottaa kaivannaisjätealueille pitkäaikainen ympäristöhaittoja vähentävä ja maisemointia edistävä peittoratkaisu. Tutkimukseen otettiin mukaan uusia biokiertoalouden materiaaleja. Toiminnalla haluttiin edistää Lapin alueella syntyvien orgaanisten jäte- ja sivuvirtamateriaalien hyödyntämistä, tuoda yhteen kaivostoimijoita sekä bio- ja kiertoalouden pk-yrityksiä ja samalla hillitä ilmastonmuutosta.

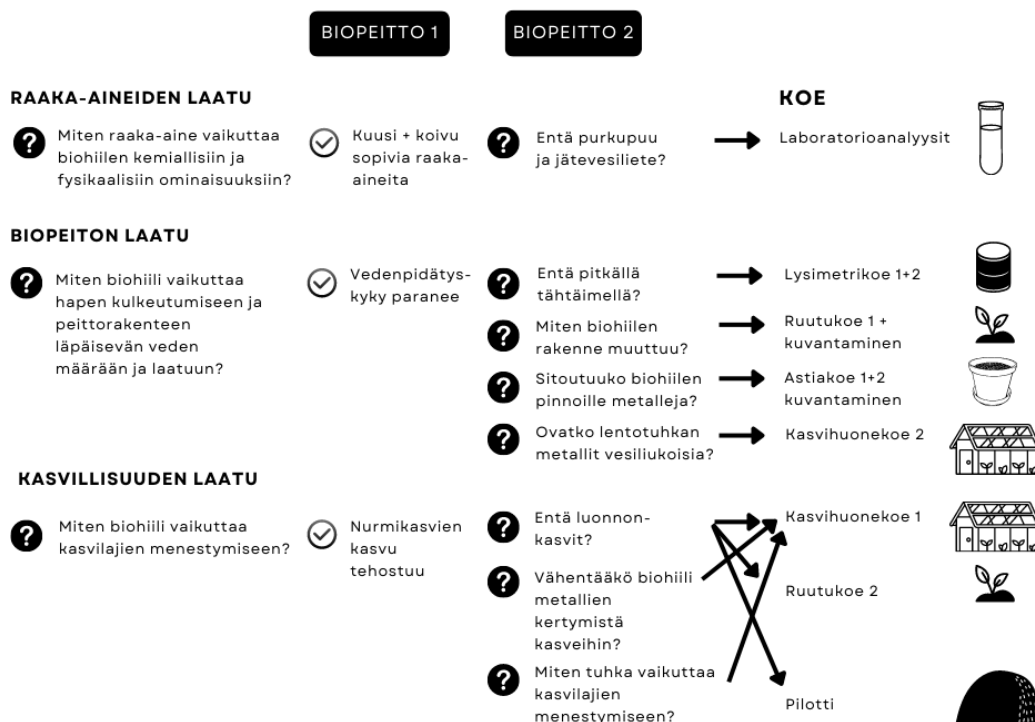
Hankkeessa tutkittiin, miten peittorakenteeseen lisätyt orgaaniset sivuvirtamateriaalit vaikuttavat kaivannaisjätteen kuivapeiton rakenteeseen, sen kestävyYTEEN, materiaalien rapautumiseen ja kasvien kasvuun sekä metallien kulkeutumiseen vaativissa olosuhteissa (Kuva 1). Hankkeen aluksi selvitettiin, millaisia biopeittoon soveltuvia raaka-aineita syntyy Lapin alueella. Kiinnostus kohdistui erityisesti orgaanisiin sivuvirtoihin, joista kokeisiin valittiin (kompostoitu) jätevesiliete, siitä tuotettu biohiili ja poltossa syntyvä lietetuhka sekä purku- puusta ja metsän harvennuspuusta (kuusi) valmistettu biohiili sekä energiatuotannon lentotuhka.

Biopeittoon toivotaan ensisijaisesti kasvilajeja, joiden avulla rikastushiekka- ja sivukivialueiden kasvillisuus kehittyi vähittäin (suksessio) monimuotoisiksi ekosysteemeiksi hyönteis-, lintu- ja nisäkäspopulaatioineen, mikä lisää alueiden elonkirjoa. Siksi testaukseen otettiin kylmään ilmastoon sopeutuneita paikallisia niittykasveja, jotka sietävät ääreviä olosuhteita ja leviävät valitsevilla olosuhteissa. Luonnonkasvien käyttöä puoltaa myös se, että markkinoilta saatavilla heinälajeilla on usein erilainen valorytmi. Siksi ne saavat syysvärinsä eri aikaan kuin kaivosaluetta ympäröivä kasvillisuus.

Hankkeessa etsittiin tehokasta peittoratkaisua, mutta edistettiin samalla metsätalouden, muun teollisuuden ja kotitalouksien sivuvirta- ja jätejakeiden käyttöä biokierratotalouden hengen mukaisesti. Siksi hankkeen aikana alueen kunnille, yrittäjille ja kehittäjille järjestettiin työpajoja, joissa valmisteltiin biopeiton demonstraatioaluetta Boliden Kevitsa Mining Oy:n sivukivien jäätysalueelle Sodankylään ja sen toteuttamiseen tarvittua toimitus- ja arvoketjua (pilotti).

Materiaalivirtojen hyötykäyttö tarjoaa uusia liiketoimintamahdollisuuksia kaivosteollisuudelle, jätteenkäsittelylaitoksille, kuljetusyrityksille ja biohiilen tuottajille. Lisäksi Pohjois-Suomen kestävän kaivostoiminnan osaaminen kasvaa ja samalla yritysten, viranomaisten ja tutkimuslaitosten yhteistyö tiivistyy.

Tämän raportin luvuissa 2 ja 3 esitellään hankkeessa tutkitut materiaalit sekä laboratorio-, kasvihuone- ja kenttäkokeet. Luvuissa 4 niiden tulokset. Pilotoitu arvoketju ympäristö- ja talousvaihtokutsineen kuvataan luvussa 5. Johtopäätökset ja suositukset on koottu lukuun 6.



Kuva 1. Biopeitto 2 -hankkeen tutkimuskysymykset ja -menetelmät (sis. Biopeitto 1 -hankkeen päätulokset) (Kuva Marja Uusitalo/Luke).

2. Biopeiton materiaalit

Materiaaleina kokeissa käytettiin moreenia, jätevesilietekompostia, rakeistettua energiapolton lentotuhkaa, lietetuhkaa ja kuusesta, lietteestä ja hakkeesta sekä purkupuusta valmistettua biohiiltä (Taulukko 1). Lisäksi tutkittiin materiaalseoksia ja purkupuubiohiilestä kahden eri raekoon eroja. Ruutu- ja lysimetrikokeet sijaitsevat Rautuvaaran vanhan kaivoksen suljetulla rikastushiekka-alueella Kolarissa ja arvoketjupilotti Boliden Kevitsa Mining Oy:n sivukivialueella Sodankylässä.

Rautaruukki Oyj:n moreenia käytettiin Rautuvaarassa peiton päämateriaalina. Se kaivettiin kaivosalueen läheisyydestä. Moreenien geokemia Rautuvaaran maan alla olevissa lysimetreistä analysoitiin *Biopeitto 1* -hankkeessa (Pietilä ym. 2020). Tässä hankkeessa toteutetuissa uusissa ruutukokeissa, maanpäällisissä lysimetreissä ja kasvihuonekokeissa käytettiin Kittilästä AJH Infra Oy:n toimittamaa moreenia. Kevitsan sivukivipilotissa käytettiin kaivosyhtiön omaa moreenia. Käytettyjen moreenien vedenläpäisevyyden k-arvo täyttää peittomoreenille säädetyn 1×10^{-8} m/s laatuvaatimuksen.

Biopeitto 2 -hankkeen aikana analysoitiin ruutukokeissa ja maanpäällisissä lysimetreissä käytetyn Kittilän moreenin (<2 mm raekoko) geokemia (Taulukko 2). Analyysi sisälsi raekokajakuman ja kuningasvesi- ja ammoniumasetaattiliukoiset alkuainepitoisuudet. Valtioneuvoston asetuksessa (Vna 214/2007) kuningasvesiuutteisille haitta-aineille (raskasmetalleille) on määritetty kynnysarvot maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista. Moreenille tehtiin myös kationinvaihtokapasiteetti (CEC), 2-vaiheinen ravistelutesti ja mitattiin kokonaisrikki pyrolyttisesti. Lisäksi analysoitiin karbonaattinen ja ei-karbonaattinen hiili ja hehkutushäviö orgaanisen aineen määrän selvittämiseksi.

Biohiiltä muodostuu, kun hiilipitoista eli orgaanista lähtömateriaalia kuumennetaan korkeaan lämpötilaan happirajoitteisissa olosuhteissa esimerkiksi pyrolyysissä eli kuivatislaamalla. Syntyvän biohiilen fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin vaikuttavat pyrolyysiprosessin olosuhteet ja lähtömateriaalin ominaisuudet, kuten huokoisuus, ravinnesisältö, kosteus ja palakoko. Hankkeessa valmistettujen biohiilten valmistusprosessi on kuvattu luvussa 5.

Materiaaleista kuusibiohiilen kokeisiin tuotti Noireco Oy (ent. BioCore Oy) mobiililla panosretortilla *Biopeitto 1* -hankkeelle vuonna 2017. Liete (+hake) ja purkupuubiohiilet valmistettiin uusia kokeita varten SoilCare Oy:n panosretortilla 500–650 °C lämpötilassa vuosina 2020–2021. Lietebiohiilen materiaalina oli Neve Oy:n jätevesiliete (50 %), johon lisättiin Sodankylän kunnan lämpölaitoksen metsäharvennushaketta (50 %). Purkupuubiohiilen raaka-aineena käytettiin AB-luokan purkupuuta, joka seulottiin pyrolysoinnin jälkeen kahteen raekokoon (<2 cm ja >2 cm). Kevitsan pilottiin ostettiin Biolan Oy:n lehtipuubiohiiltä. Neve Oy:n Suosiolan voimalaitokselta saatiin lentotuhka ja lietetuhka Endev Oy:n pilottilaitokselta. Jätevesilietekompostina käytettiin Levin Vesihuolto Oy:n vuoden 2018–2020 materiaaleja (Taulukko 1). Biohiilet, tuhka ja komposti täyttivät lannoitevalmisteasetuksen vaatimukset muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta, mistä tarkemmin seuraavassa luvussa.

Myös biohiilten haitta-aine- ja ravinnepitoisuudet selvitettiin. Biohiilet kuivattiin <40 °C:ssa ennen typpihappoliuotusta ja monialkuainemääristystä ICP-MS-tekniikalla. Biohiilten 0.01M CaCl₂-uuttoista mitattiin pH:t. Lisäksi hiilistä tehtiin vaitohappamuuden määrittäminen titraamalla sekä rikin määrittäminen rikkianalysaattorilla sekä C- ja N-määrittäykset polttoanalysaattorilla. Biohiilille tehtiin myös PAH- ja BET-analysit.

Kokeissa käytetty lentotuhka, rakeistettu lietetuhkaa sekä jätevesilietekomposti esikäsiteltiin ja analysoitiin samalla tapaa kuin biohiilet, lukuun ottamatta PAH-yhdisteitä ja BET-analyysiä.

Taulukko 1. Peiton materiaalit ja toimittajat kokeittain (KHK = kasvihuonekoe). Astiakokeet toteutettiin laboratoriossa. Ruutu- ja lysimetrikokeet sijaitsevat Rautuvaarassa Kolarissa. Pilotti Boliden Kevitsa Mining Oy:n sivukivialueella Sodankylässä.

Loppu- tuote	Lähtö- materiaali	Toimittaja	K H K 1	K H K 2	Astia- koe 1	Astia- koe 2	Ruutu koe 1	Ruutu koe 2	Lysimetri 1 (maan alla)	Lysimetri 2 (maan päällä)	Pilotti
Biohiili1 (Bh1)	Kuusi	Noireco Oy	x		x	x	x	x	x	x	
Biohiili2 (Bh2)	Jätevesi- liete + hake	Neve Oy + Sodankylän kunta	x		x	x	x	x		x	
Biohiili3 (Bh3 R1)	Purkupuu <2 cm	SoilCare Oy	x		x	x	x	x ^a		x	
Biohiili3 (Bh3 R2)	Purkupuu >2 cm	SoilCare Oy				x	x			x	
Biohiili3 (Bh3)	Purkupuu	Pohjaset Oy + Hettula Oy									x
Biohiili4 (Bh4)	Lehtipuu	Biolan Oy									x
Lento- tuhka (T1)	Turve, purkupuu	Neve Oy	x	x ^b							x ^b
Liete- tuhka (T2)	Jätevesi- liete	Neve Oy	x								
Komposti (Ko)	Jätevesi- liete + hake	Levin Vesi- huolto Oy	x	x			x	x	x		x
Moreeni (Mr1)	Kittilä	AJH Infra Oy	x	x	x		x	x		x	
Moreeni (Mr2)	Rautu- vaara	Rautaruukki Oyj							x		
Moreeni (Mr3)	Kevitsa	Boliden Kevitsa Mining Oy									x

^a molemmat <2 mm ja <2 mm fraktiot mukana, ^b eri erää (ks. kpl 4.4.1) kuin KHK 1

2.1. Moreeni

Kittilän moreenin pH oli 5,87–6,63, mikä on moreenille luontaista. Moreenissa oli hyvin vähän orgaanista ainesta (hehikutushäviön 1,38 %). Rikin ja epäorgaanisen hiilen pitoisuudet olivat alhaisia. Kationinvaihtokapasiteetti (6,1 cmol/kg), joka kertoo karkeiden kivennäismaa-ainesten kyvystä varastoida ravinteita, oli tyypillinen eli alle 10 cmol/kg. Myös ravinnepitoisuudet olivat alhaisia (Ca 3,5 mg/kg, Mg 1,97 mg/kg, Na 2,9 mg/kg, K 2,9 mg/kg, Fe <2 mg/kg, H+ <0,1 cmol/kg) (Taulukko 2).

Kaikki kuningasvesiliukoiset alkuainepitoisuudet ovat luontaisten pitoisuuksien rajoissa. Arseenipitoisuus (6,5 mg/kg) ylittää ainoana valtioneuvoston asetuksen kynnyksarvon. Arseenin

korkea luontainen pitoisuus on tyypillistä Keski-Lapin As-provinssista peräisin olevalle moreenille (<https://gtkdata.gtk.fi/Tapir/pages/arseniprovinssit.html>). As-pitoisuus poikkeaa lysimetrikoe 1:ssä käytetystä Rautuvaaran moreenista, jonka kuningasvesiliukoinen As-pitoisuus oli alle 2,0 mg/kg (Pietilä ym. 2020). Ammoniumasetaattiheikkouutoissa sekä ravistelutestissä liukenevat pitoisuudet ovat huomattavasti kuningasvesiliukoisia pienemmät. Siten helposti liukenevan biosaatavan ja vaihtokykyisen fraktion osuus on kokonaispitoisuuteen nähden pieni. Kadmiumia ja lyijyä lukuun ottamatta pH:n laskiessa haitta-aineiden liukoisuus oli hieman suurempaa (Taulukko 2).

Taulukko 2. Moreenin sisältämien alkuaineiden pitoisuudet eri testeissä, pitoisuuksien luontainen vaihtelu Suomen maaperässä (suluissa mediaani) sekä maaperän haitta-aineiden kynnysarvot (Vna 214/2007). Kynnysarvojen ylittävät pitoisuudet huomiovärillä. DOC = liukoinen orgaaninen hiili.

Alkuaine	Luontainen pitoisuus	Kynnysarvo	Kuningasvesiuutto	Ammoniumasetaatti, pH 4	Ammoniumasetaatti, pH 7	Ravistelutesti
As	0,1–25 (1)	5	6,5	0,23	0,09	0,30
Cd	0,01–0,15 (0,03)	1	0,10	0,02	0,02	< 0,005
Co	1–30 (8)	20	13,4	3,7	0,8	-
Cr	6–170 (31)	100	47,9	1,4	0,22	1,0
Cu	5–110 (22)	100	31,2	2,2	1,9	1,1
Ni	3–100 (17)	50	29,5	1,9	0,79	0,70
Pb	0,1–5 (5)	60	4,1	0,40	0,43	0,10
Sb	0,01–0,2 (0,02)	2	0,40	< 0,05	0,05	0,30
Zn	8–110 (31)	200	39,5	2,4	1,9	2,0
V	10–115 (38)	100	35,6	2,9	2,7	1,70
DOC						130
SO ₄						< 50

2.2. Biohiilet, tuhkat ja komposti

Biohiilten hiilipitoisuuksissa oli eroja vaihdellen 50 prosentista (Bh2) 91 prosenttiin (Bh3). Lieteperäisessä biohiilessä (Bh2) rikkipitoisuudet olivat jopa 40-kertaiset muiden biohiilten rikkipitoisuuksiin. Myös typpeä oli eniten. Kuusibiohiilen (Bh1) kationinvaihtokapasiteetti oli biohiilistä korkein 15,5 cmol/kg, muttei yllä ravinteikkaan kompostin kationinvaihtokapasiteettiin, jonka arvo voi olla jopa 300 cmol/kg. Lentotuhkan kationinvaihtokapasiteetti oli yli 100 cmol/kg, kun rakeistetulla lietetuhkalla se oli 3,5 cmol/kg ollen alhaisempi kuin yhdelläkään biohiilellä. Kompostin vastaava arvo oli 30,7 cmol/kg. Biohiilten pH:t (CaCl₂) olivat neutraaleja, purkupuu-biohiilet jopa selvästi emäksisiä (pH 9,0). Tuhkat olivat myös selvästi emäksisiä (7,6–9,3), komposti taas hapanta (4,8–5,2). Lietehiilen (Bh2) BET-pinta-ala oli vain 2,5 m²/g kun Bh1 ja Bh3 vastaava arvo oli >100 m²/g (Taulukko 3).

Lannoitevalmisteasetuksessa (EU 2019/1009) lannoitevalmisteet on jaettu seitsemään tuoteluokkaan (PFC), joiden käyttötarkoitukselle ja ominaisuuksille asetetut vaatimukset vaihtelevat. Esimerkiksi raja-arvot haitallisten metallien (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) enimmäismäärille on asetettu tuoteluokittain (MMM 2023).

Koska lainsäädäntö on luonnosvaiheessa, ei ole täyttä selvyyttä siitä, mihin tuoteluokkaan mikäkin materiaali kuuluu. Kokeissa käytetyistä materiaaleista biohiili ja komposti kuuluvat mahdollisesti tuoteluokkaan *PFC3 Maanparannusaine A: Orgaaninen maanparannusaine* ja tuhkaa on esitetty tuoteluokkaan *PFC1/C Epäorgaaninen lannoite*.

Lannoitevalmisteasetuksessa on myös määritelty, mistä ainesosaluokista (CMC) eri tuoteluokkiin kuuluvat CE-merkityt lannoitevalmisteet saavat koostua. Ainesosaluokissa on lueteltu niissä sallitut raaka-aineet ja käsittelyä vaativien raaka-aineiden osalta vaatimukset käsittelymenetelmille. Biohiili kuuluu ainesosaluokkaan *CMC14 Pyrolyysissä ja kaasutuksessa muodostuvat materiaalit* (biohiili). Komposti taas kuuluu ainesosaluokkaan *CMC10 Käsitelty jätevesiliete* ja käytetyt tuhkat todennäköisesti ainesosaluokkaan *CMC8 Tuhkat ja kuonat*. Suomessa kasvualusta- ja maanparannuskäyttöön sallitaan tällä hetkellä vain kasvibiomassasta tuotetut biohiilet sekä jatkossa todennäköisesti myös lietehiili (Ruokavirasto 2023). CMC14-luokkaan kuuluvilla aineilla on raja-arvot myös PAH16-yhdisteille (MMM 2023, Äystö ym. 2022).

Kaikkien haitallisten metallien pitoisuudet biohiilissä ja kompostissa jäivät alle sallittujen pitoisuuksien. PAH16-yhdisteille määritelty raja-arvo ylittyi Bh1 ja Bh2 osalta (Taulukko 3).

Taulukko 3. Biohiilten, kompostin ja tuhkien kemia. Lannoitevalmisteasetuksen laatuvaatimukset (3A biohiili ja komposti, 1C3 metsälannoitteena käytettävä tuhka). Raja-arvot ylittävät pitoisuudet merkitty huomiovärillä. Biohiilten (Bh) selitykset ks. Taulukko 1.

	Laatuvaatimukset tuoteluokassa		Bh1	Bh2	Bh3 R1 <2cm	Bh3 R2 >2 cm	Komposti	Lentotuhka	Lietetuhka
	3A	1C3							
As mg/kg	40	40	0,4	0,9	16,5	2,9	7,3	57,1	1,7
Cd mg/kg	2,5	25	1,2	0,9	< 0,01	< 0,01	0,2	3,7	0,5
Co mg/kg	-	-	1,0	7,8	1,8	0,5	5,9	19,3	10,8
Cr mg/kg	300	300	2,9	21,2	49,6	2,9	24	132	116
Cu mg/kg	600	600	8,1	297	30,8	6,7	134	225	303
Ni mg/kg	70	120	3,9	25,7	8,6	3,4	16,3	60,8	65,8
Pb mg/kg	100	150	1,4	11,0	18,9	1,7	7,9	12,7	11,5
Sb mg/kg	-	-	< 0,1	0,6	< 0,1	< 0,1	0,3	0,3	< 0,1
V mg/kg	-	-	171	615	178	211	162	1 170	610
Zn mg/kg	1 500	4 500	< 1	28,6	5,3	< 1	21,5	73,5	39
S mg/kg	-	-	383	4 210	244	106	2 850	12 650	48
C %	-	-	74,7	50,2	87,0	91,4	24,5	0,65	0,05
N %	-	-	0,7	2,3	0,8	0,1	1,36	0,025	< 0,02
CEC cmol/kg	-	-	15,5	6,0	7,9	4,0	30,7	106	3,5
pH CaCl ₂	-	-	7,0	7,1	8,8	9,0	5,2	9,2	8,1
BET cm ² /g	-	-	180	2,5	137	-	-	-	-
PAH-yhdisteet (summa) cmol/kg	6	-	13,0	100	3,8	-	-	1,4	-

3. Tutkimusmenetelmät

Rautuvaaran vanhalla kaivosalueella jatkettiin *Biopeitto 1* -hankkeen aikana perustettua maahan kaivettujen lysimetrien koetta (lysimetrikoe 1). Sitä täydennettiin uudella maanpinnan yläpuolelle sijoitetulla lysimetrikokeella (lysimetrikoe 2). Lisäksi toteutettiin kaksi laboratoriokoetta, kaksi kasvihuonekoetta ja kaksi ruutukoetta. Tässä luvussa kuvataan käytetyt tutkimusmenetelmät.

3.1. Laboratoriokokeet

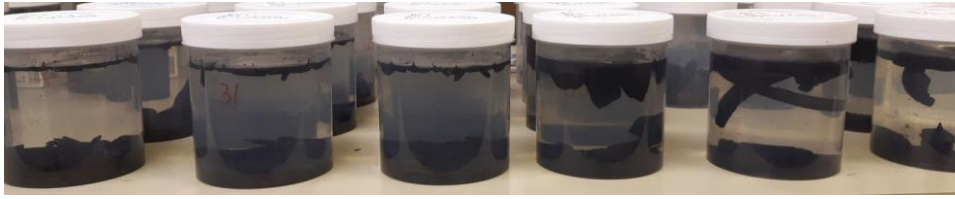
Biohiili voi materiaalina olla polton jälkeen vettä hylkivää, jolloin se ei myöskään heti pidätä vettä kasvien käyttöön. Tämän selvittämiseksi biohiilten (Bh1, Bh2, Bh3) kostumista tutkittiin laboratoriossa astiakokeessa 1. Metallilieriöt täytettiin biohiilillä, niin että näytteet olivat tiivistyksen jälkeen reunan ylätasolla (Kuva 2). Lieriöt aseteltiin altaisiin, joiden pohjalla oli 0,5 cm vettä, minkä jälkeen ne altistettiin sumukastelulle 15 s ajan 45 min välein (Kuva 2). Biohiilet saivat sumukastelua yhteensä 18 h/vrk ja niiden kostumista seurattiin 64 vrk:n ajan.



Kuva 2. Näytelieriöt (halkaisija 5 cm, tilavuus 155 ml) kostutuskokeessa. Kustakin biohiilityypistä oli kolme toistoa ja lisäksi moreenikontrollit (Kuva Hanna Ruhanen/Luke).

Astiakokeessa 2 selvitettiin pidättävätkö biohiilet (Bh1, Bh2, Bh3 R1 ja R2) suotoveden sisältämiä metalleja itseensä. Kokeessa kannellisiin muoviasioihin lisättiin 800 ml Rautuvaaran vanhan kaivoksen rikastushiekka-alueelta kerättyä suototovettä sekä 20 g kutakin biohiiltä (Kuvat 3 ja 4). Jokaisesta biohiilityypistä oli kolme toistoa. Koeastiat pidettiin laboratoriossa, jossa lämpötilavaihtelu mittauskertojen välillä oli $<1^{\circ}\text{C}$ – 5°C .

Biohiilten ja suotoveden kemia analysoitiin ennen astiakoetta. Kokeen keston (18 kk) aikana suotoveden ominaisuuksia (pH, sähkönjohtavuus, hapetus-pelkistyspotentiaali, lämpötila) mitattiin 1–6 kertaa kuukaudessa, alussa tiheämmin. Suotoveden kemia analysointiin neljä kertaa: 1 vk, 1 kk, 6 kk ja 18 kk kokeen aloituksesta. Kokeen lopuksi suotovedessä olleista biohiilistä analysoitiin haitta-aine- ja ravinnepitoisuudet monialkuainemäärityksellä (ICP-MS/ICP-OES), rikki rikkianalysointorilla sekä C- ja N-määritykset polttoanalysointorilla. Myös pelkän suotoveden (vesi purkeissa ilman biohiiltä) kemiallinen koostumus määritettiin kokeen loputtua. Lisäksi näyteastioille tehtiin kokeen päätyttyä ionivaihdetulla vedellä liuotuskoe, jossa tutkittiin liukeneeko purkeista kontaminaatiota näytteeseen. Lopuksi osa Bh1-näytteistä kuvattiin pyyhkäisy-elektronimikroskoopilla ja röntgentomografiolla rakennetarkastelua varten.



Kuva 3. Biohiilillä täytetyt muoviastiat (halkaisija 118 mm, tilavuus 1 000 ml) metallienpidätyskokeessa (astiakoe 2). Näyttemateriaalit vasemmalta oikealle ovat 3 x Bh3 R1 ja 3 x Bh3 R2 (Kuva: Pauliina Liwata-Kenttälä/GTK).

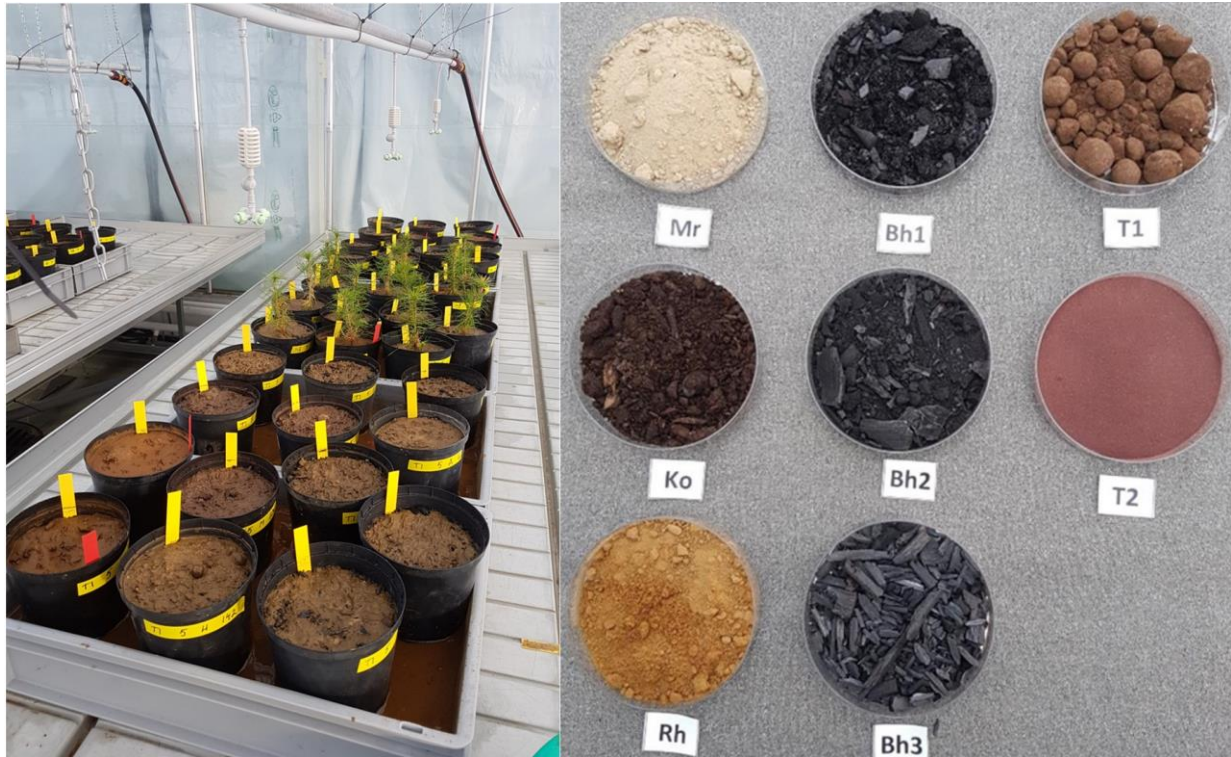
	Bh1: kuusi	Bh2: liete + hake	Bh3: purkupuuhake		Analyysit		XCT + SEM Bh1
			R1 Ø < 2 cm	R2 Ø > 2 cm	Vesi	Bh	
0 vko					X	X	X
1 vko					X		
1 kk					X		
0,5 v					X		
1,5 v					X	X	X

Kuva 4. Astiakokeessa 2 ja kuvantamisessa testatut materiaalit ja analysointiohjelma (vesi: vesi-analyysi, Bh: biohiilitutkimukset, XCT: röntgentomografia, SEM: pyyhkäiselektronimikroskoopi). Toistojen määrä kolme astiaa jokaisena ajankohtana (Kuva: Anna Tornivaara & Pauliina Liwata-Kenttälä/GTK).

3.2. Kasvihuonekokeet

Ensimmäisellä kasvihuonekokeella oli kaksi päätavoitetta. Siinä selvitettiin 1) eri raaka-aineista valmistettujen biohiilten ja tuhkien vaikutuksia eri kasvilajien menestymiseen sekä 2) jätekiiviaineksesta, lietebiohiilestä ja tuhkista peittorakenteeseen mahdollisesti nousevien metallien bio-saatavuutta kasveille (tulokset julkaistu Heiskanen ym. 2022).

Aluksi moreenin, kompostin, biohiilten (Bh1-3) ja tuhkien (T1-2) sekä materiaaliseosten (Kuva 5, Taulukko 4) fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet määritettiin. Kasvualustojen vaikutuksia timotein (*Phleum pratense* L.), valkoopilin (*Trifolium repens* L.) ja männyntaimien (*Pinus sylvestris* L.) kasvuun ja alkuaineiden kertymistä kasveihin seurattiin yhden kasvukauden ajan. Kokeessa kasvatusruukut täytettiin eri kasvualustaseoksilla (Taulukko 4) ja ne asetettiin teräsaltaisiin, joiden pohjalle oli levitetty Rautuvaaran vanhan kaivoksen rikastushiekka-altaan hapettunutta pintakerrosta (Kuva 5). Ruukkujen pohja oli rei'itetty ja harsolla peitetty, joten ruukun kasvualustalla oli yhteys alla olevaan rikastushiekkaan (Kuva 5).



Kuva 5. Vasemmassa kuvassa kasvihuonekokeiden materiaalit 9 cm:n petrimaljalla (Mr = mooreeni, Ko = komposti, Rh = rikastushiekka, Bh1 = kuusibiohiili, Bh2 = liete+hakebiohiili, Bh3 = purkupuubiohiili, T1= lentotuhka, T2 = lietetuhka). Oikean kuvan keskellä erottuvat männyn- taimet erilaisilla kasvualustoilla täytetyissä ruukuissa (ruukun tilavuus 2000 ml, halkaisija 12,5 cm, kasvualustan paksuus 12 cm) ja teräsaltaissa (45 x 45 cm, syvyys 8 cm, rikastushiekkaa pohjalla 4 cm) kasvihuonekoe 1:ssä (Kuva: Hanna Ruhanen/Luke).

Taulukko 4. Kasvihuonekokeessa 1 testatut kasvualustat. Jokaista käsittelyä viisi ruukkua. Lyhen- teet ks. Taulukko 1 ja Kuva 5.

Kasvialustat	Tilavuus, %
Mr	100
MrKo	95+5
Rh	100
RhKo	95+5
MrKoBh1	90+5+5
MrKoBh2	90+5+5
MrKoBh3	90+5+5
MrKoT1	90+5+5
MrKoT2	90+5+5
MrKoBh1T1	85+5+5+5
MrKoBh1T2	85+5+5+5
MrKoBh3T1	85+5+5+5
MrKoBh3T2	85+5+5+5

Hankkeen aikana tehtiin myös toinen kasvihuonekoe. Sen tavoitteena oli selvittää, miten kasvualustan happamuus vaikuttaa siihen lisätyn lentotuhkan sisältämien metallien (Pb ja As) liukoisuuteen eli pysyvätkö metallit sitoutuneessa muodossa vai muuttuvatko ne vesiliukoisiksi pH:n muuttuessa. Testattava lentotuhka oli eri erää kuin Taulukossa 3 kuvattu tuhka. Suurin ero oli se, että nyt testattavan erän Pb ja As pitoisuudet olivat yli lannoitevalmistelain raja-arvojen ollen Pb 310 ja As 71 mg/kg, muiden metallien osalta raja-arvot alittuivat.

Kasvialustojen (Taulukko 5) pH-arvon säätämiseksi (kontrolli, jonka pH oli 7,0 ja tavoite pH-arvot: 5,0; 4,0 ja 3,0) tehtiin neljä erilaista sitruunahappokäsittelyä kasvialustan tuoremassaa kohti: 1) 0,00 M/kg (= kontrolli), 2) 0,10 M/kg, 3) 0,25 M/kg ja 4) 0,50 M/kg.

Viikon kuluttua kasvialustojen hapotuksesta jokaiseen ruukkuun koulittiin viisi kappaletta neljän viikon ikäistä timotein (*Phleum pratense* L.) tainta. Kasvien selviämistä ja kasvialustan pH:ta ja johtokykyä seurattiin joka toinen viikko. Ruukkujen läpi suotautuneet vedet analysointiin kokeen alussa, keskellä ja lopussa. Kokeen kesto oli vajaa 3 kk. Kokeen lopussa määritettiin kasvien biomassat.

Taulukko 5. Kasvialustan pH:n vaikutusta tuhkan sisältämien metallien liukoisuuteen selvittäneessä kasvihuonekokeessa käytetyt kasvialustat. Kutakin kasvialustaa oli kuusi kolmen litran ruukkuja neljällä eri sitruunahappokäsittelyllä.

Kasvialustat	Lyhenne
Moreeni	Mr
Moreeni + komposti 5 %	MrKo
Moreeni + tuhka 3000 kg/ha	MrT1
Moreeni + komposti 5 % + tuhka 3 000 kg/ha	MrKoT1

3.3. Lysimetrikokeet

Lysimetrikoe 1: Maan alla olevat lysimetrit (Luke)

Lysimetrikoe 1:ssä maahan kaivettiin 24 valumavesikeräintä Kolarin vanhan Rautuvaaran kaivoksen rikastushiekka-altaalle perustetulla koealalla jo vuonna 2018 (Kuva 6). Tavoitteena oli seurata lysimetreihin kylvettyjen nurmikasvien itävyyttä ja kasvua erilaisissa peittokerroksissa. Lisäksi selvitettiin peittokerroksen ja kasvillisuuden vaikutuksia lysimetreistä suotautuvan veden määrään ja laatuun sekä peittokerroksen ja rikastushiekan kosteus- ja lämpöoloihin ja huokosilman happipitoisuuteen.

Lysimetrit upotettiin koealueelle siten, että niiden pinta oli koealueen maan pinnan tasolla. Kunkin lysimetrin pohjalla on 10 cm rikastushiekkaa ja päällä 20 cm erilaisia peittokerroksia (kasvialustoja) (Taulukko 6). Puoleen lysimetreistä kylvettiin heinäseosta, joka sisälsi punanataa (*Festuca rubra*, 80 %), englanninraiheinää (*Lolium perenne*, 6 %), niittynurmikkaa (*Poa pratensis*, 5 %), jäykkänataa (*Festuca brevipila*, 5 %), nurmirölliä (*Agrostis capillaris*, 2 %) ja valkoapilaa (*Trifolium repens*, 2 %) (Kuva 6).

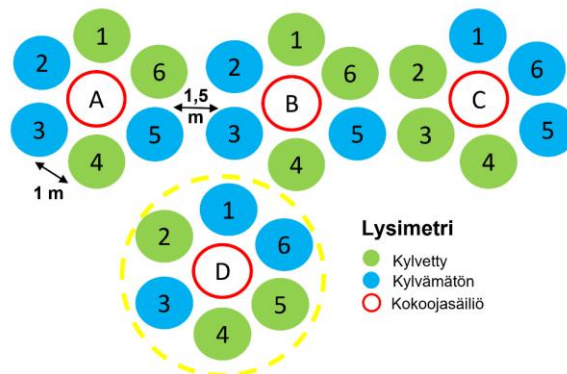
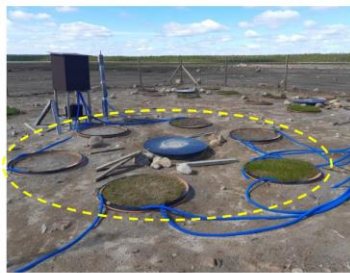
Peittokerroksen ja rikastushiekkakerroksen läpäisseen, lysimetreistä valuvan suotoveden määrää ja laatua seurattiin kolme kertaa kesässä vuosina 2018–2022. Myös kasvillisuuden peittävyys ja biomassa mitattiin vuosittain.

Lisäksi osaan lysimetreistä (Mr kylvetty ja MrKoBh kylvetty) asennettiin mitta-antureita, joilla seurattiin lämpötilaa, kosteutta sekä huokosilman happipitoisuutta kasvukaudella 2022. Lämpö- ja kosteusanturit asennettiin 5, 15 ja 25 cm:n syvyyteen. Happianturit asennettiin rikastushiekkakerroksen pintaan (20 cm:n syvyydelle) ja rikastushiekkakerroksen sisään (25 cm:n syvyydelle).

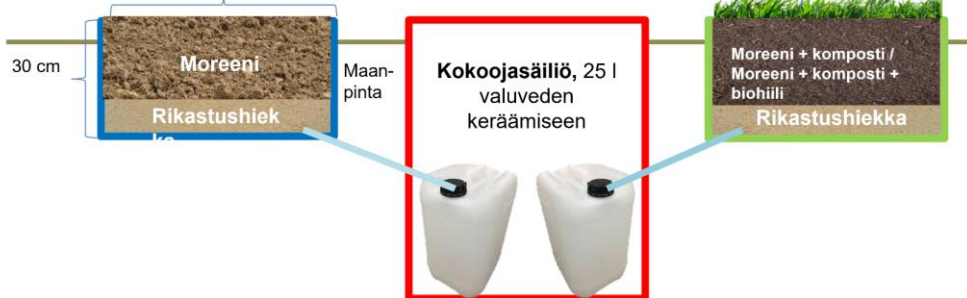
Taulukko 6. Lysimetrien materiaalikerrokset ja kasvillisuuskäsittely. Jokaista käsittelyä on neljä lysimetriä.

Lyhenne	Peittokerroksen koostumus	Heinäseos kylvetty
Mr	Moreeni	
Mr	Moreeni	x
MrKo	Moreeni, johon lisätty 10 % (v/v) Levin vesihuollon lietekompostia	
MrKo	Moreeni, johon lisätty 10 % (v/v) Levin vesihuollon lietekompostia	x
MrKoBh	Moreeni, johon lisätty 10 % (v/v) Levin vesihuollon lietekompostia ja kuusibiohiiltä 10 % (v/v)	
MrKoBh	Moreeni, johon lisätty 10 % (v/v) Levin vesihuollon lietekompostia ja kuusibiohiiltä 10 % (v/v)	x

Koeasetelma:



Sivukuva: Lysimetri 100 cm



Kuva 6. Lysimetrikokeen koejärjestely (lysimetrien tilavuus 200 l, halkaisija 100 cm) ja kokeen poikkileikkaus (Kuva: Marja Uusitalo/Luke).

Lysimetrikoe 2: Maanpinnalle sijoitetut uudet lysimetrit (GTK)

Lysimetrikoe 2:n tavoitteena oli selvittää biohiilen vaikutus peittokerroksen vedenlaatuun, kosteusolosuhteisiin, sekä veden ja hapen läpäisevyyteen. Rautuvaaran suljetulle rikastushiekka-alueelle perustetulle koealalle sijoitettiin 15 lysimetriä kesäkuussa 2021 neljälle noin 80 cm korkealle pöydälle. Jokaisesta lysimetristä johdettiin kolme putkea suoraan 10 litran vedenkeruupöydäihin (Kuva 7). Mustien, muovisten lysimetrien pohjalle aseteltiin suodatinkerros kvartsi-rakeista sekä suodatinkangas, ja ne täytettiin 30 cm moreenikerroksella. Kolme rinnakkaislysimetriä sisälsi aina saman peittoratkaisun. Kutakin biohiilityyppiä (Bh1, Bh2, Bh3 R1 tai Bh3 R2) sekoitettiin 10 cm pintakerrokseen 5 % ja lopuissa kolmessa kontrollilysimetrissä oli pelkkä moreenikerros.

Kymmeneen lysimetriin eli aina kahteen rinnakkaislysimetriin asennettiin happi- (Apogee Instruments SO-110) ja kosteuslämpötila-sähköjohtavuussensorit (Campbell CS650) veden ja hapen kulkeutumisen seuranta varten. Sensorit asetettiin 5 cm:n syvyydelle moreenin pinnasta. Dataloggeri keräsi dataa sulan maan aikana eli noin 8–9 kk ajan vuodessa. Sensoridatan tarkastelua varten mittauksista laskettiin päivittäiset keskiarvot.



Kuva 7. Kuvan yläreunassa lysimetrikokeet (mustat sylinterit vesienkeruupöydillä, halkaisija 60 cm) ja sensoriaineiston tiedonkeruuasema (Logger). Kuvan alareunassa ruutukokeet, jossa ruutun koko 1 m² (Kuva: Pauliina Liwata-Kenttälä & Riitta Turunen/GTK).

3.4. Ruutukokeet

Ruutukokeet perustettiin Rautuvaaran suljetulle rikastushiekka-altaalle alkukesästä vuonna 2021. Tavoitteena oli tutkia biohiilen mahdollista rapautumista ja vaikutusta peittokerroksen vesi- ja happitalouteen. Koe perustettiin suoraan rikastushiekan ja sitä peittävän n. 10 cm paksuisen moreenikerroksen päälle, jolloin kasvualustat (sisältäen biohiilirakeet) altistuivat sääolosuhteille, kuten tuulelle ja lumen sulamiselle, luontaisemmin kuin maanpinnan yläpuolelle nostetuissa lysimetreissä. Neljä moreeniä täytettyä koeruutua jaettiin neljään osaruutuun (Kuva 7). Testattavana oli biohiilityypit (Bh1, Bh2, Bh3 R1 ja Bh3 R2), joiden lisäysmäärä oli 5 % ja moreeni (Mr). Osaan rinnakkaisnäytteistä lisättiin myös kompostia (10 %). Peiton kokonaispaksuus rikastushiekan päällä oli n. 15 cm. Ruutuihin E ja F asennettiin happi- ja kosteuslämpötila-sähköjohtavuussensorit 5 cm syvyydelle (Kuva 7).

Ruutukoe 2 perustettiin samaan aikaan ruutukoe 1 kanssa ja sen tavoitteena oli selvittää pohjoista alkuperää olevien niittykasvien menestymistä ja sukkessiota biopeitossa. Tutkimuksessa seurattiin miten valitut kasvilajit kasvavat ja leviävät siemenestä tai kasvullisesti eri kasvualustaseoksissa. Kokeeseen valittiin kahdeksan Tunturi-Lapin luonnossa esiintyvää kasvilajia (Taulukko 7). Koeruuduissa käytettiin neljää kasvualustaseosta: 1) moreeni + komposti (MrKo), 2) MrKoBh1, 3) MrKoBh2 tai 4) MrKoBh3. Biohiilen määrä oli aina 5 % kasvualustan tilavuudesta ja kompostin 10 %, kasvualustan paksuus on 15 cm. Jokainen koeruutu jaettiin kahtia ja yhdelle puolelle istutettiin taimia ja toiselle kylvettiin samat kasvilajit siemenestä. Kustakin kasvualustaseoksesta perustettiin neljä toistoa (Kuva 8). Taimien kasvu (pituus, leveys, kukkavanojen määrä) mitattiin ja siementen itäminen laskettiin heinä- ja elokuussa 2022 ja 2023.



Kuva 8. Vasemmassa kuvassa kasvualustaruudut Rautuvaaran koalueella ruutukokeessa 2. Oikeassa kuvassa 1 m² kokoinen koeruutu, jonka vasemmalle puolelle on istutettu taimet ja oikealle kylvetty siemenet (Kuva: Marleena Hagner/Luke).

Taulukko 7. Niittykasvikokeeseen valitut kasvilajit (mpy=metriä merenpinnan yläpuolella).

Lajinimi (latinalainen nimi)	Alkuperä	Luontaiset kasvupaikat
Jäkki (<i>Nardus stricta</i>)	Lappi	happamat niityt, laitumet, polut, rannat, painanteet ja lumenviipymäpaikat
Keväthanhikki (<i>Potentilla cranzii</i>)	Pohjois-Ruotsi, 590 mpy	happamat–rehevät niityt, ahot, kalliokedot, metsäaukot, tunturien paljakkavyöhyke
Kissankello (<i>Campanula rotundifolia</i>)	Pohjois-Norja, 500 mpy	niityt, laitumet, joutomaat, tienvarret, pientareet, kallioid, harjut, valoisat metsät, puronvarret, tunturikankaat
Nuokkuhelmikkä (<i>Melica nutans</i>)	Pohjois-Norja, 300 mpy	rehevät, valoisat metsät, lehtoniityt, rehevät korpisuot
Pohjantähkiö (<i>Phleum alpinum</i>)	Pohjois-Norja, 400 mpy	tunturiniityt, koivikot, lumenviipymäpaikat, rannat, puronvarret, pihat, tienvarret
Puna-ailakki (<i>Silene dioica</i>)	Pohjois-Norja, 500 mpy	niityt, pientareet, pihat, metsiköt, jokivarret, tunturien koivikko- ja paljakkavyöhykkeet
Rantatädyke (<i>Veronica longifolia</i>)	Meri-Lappi, 10 mpy	kiviset ja soraiset rannat, rantapensaikot, tulvamaat, kallionraot, hyönteiskasvi
Tunturikurjenherne (<i>Astragalus alpinus</i>)	Pohjois-Norja, 10 mpy	tunturien koivu- ja paljakkavyöhykkeet

4. Tulokset

4.1. Biopeiton vesitalous

Miten biopeiton komposti, biohiili ja kasvit vaikuttavat hapen kulkeutumiseen ja peittorakenteen läpi suotautuvan veden määrään ja laatuun?

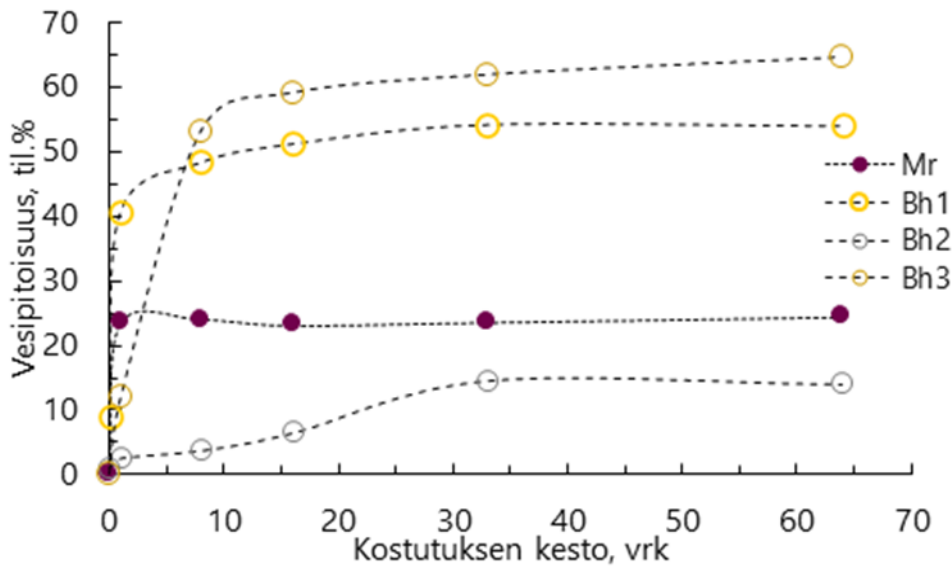
Keskeisiä metallimalmikaivostoiminnan ympäristöriskin aiheuttajia ovat kaivosalueiden kontaminoituneet vedet sekä pölyäminen. Kaivannaisjätteisiin sovellettavassa lainsäädännössä ei kuitenkaan aseteta vaatimuksia kaivannaisjätealueen peiton paksuudelle ja fysikaalisille tai kemiallisille ominaisuuksille, toisin kuin esimerkiksi kaatopaikan jätealueen pintarakenteille (Heikkinen & Noras 2005, VNa 190/2013, Vna 331/2013). Peittorakenneratkaisut ovat kaivosaluekohtaisia ja riippuvat pitkälti kaivannaisjätteen ominaisuuksista. Vanhoilla, suljetuilla alueilla ne ovat myös noudattaneet sulkemisen aikaista lainsäädäntöä. Kaivosten jätealueiden tyypillinen kerrospaksuus vaihtelee 0,3–1,5 m välillä (MWEI BREF 2018). Suomen suljettujen kaivannaisjätealueiden peittoratkaisu on perinteisesti ollut moreenista koostuva yksikerrosrakente, jonka pinta on jätetty sellaiseksi tai nurmetettu. Nämä ratkaisut eivät vastaa nykyisen lainsäädännön ja valitsevien BAT-käytäntöjen vaatimuksia (Tornivaara ym. 2018).

Kaivoslaki edellyttää, että toiminnanharjoittaja saattaa kaivosalueen kahden vuoden kuluessa kaivostoiminnan päättymisestä yleisen turvallisuuden vaatimaan kuntoon, huolehtii alueen kunnostamisesta, siistimisestä, maisemoinnista ja suorittaa kaivosluvassa ja kaivosturvallisuusluvassa määrätyt toimenpiteet siten, että suljetusta kaivoksesta ei aiheudu merkittäviä haitallisia vaikutuksia ihmisten terveydelle tai ympäristölle (Kaivoslaki 2011). Nykyään sulfidipitoisille kaivannaisjätteille edellytetään monikerroksista peittoa ja tapauskohtaisesti jätealueen pohjarakenteeksi tiivistyskerrosta tai kalvoja. Kaivoksen sulkemisen toimenpiteet määritellään tapauskohtaisesti riippuen kaivannaisjätteen ominaisuuksista ja peiton tavoitteista, joita voivat olla esimerkiksi pölyämisen estäminen, happamien ja/tai haitta-ainepitoisten suoto- ja valumavesien ympäristövaikutusten vähentäminen tai jätealueen nopea kasvittuminen eroosion ehkäisemiseksi. Pintarakente voi olla alkuun hyvin herkkä eroosiolle, mikäli kasvien juurtuminen ja leviäminen alueelle hidastuu tai estyy. Vastaavasti puiden syvät juuret voivat rikkoa peittorakenteiden kerroksia mikä mahdollistaa veden vapaamman virtauksen juurikanavia pitkin syvemmälle jätekerrokseen. Tämän takia osassa jätealueista suositaan puiden sijaan ruohovartista kasvillisuutta ja alueen jälkihoitoon voi kuulua säännöllinen puuston kaataminen.

Kaivannaisjätteen sisältämien mineraalien hapettumisesta johtuvaa valuma- ja suotovesien happamoitumista ja haitta-aineiden leviämistä pyritään estämään valitsemalla olosuhteisiin parhaiten soveltuvat peittoratkaisut. Kaivannaisjätealueet ovat muodoltaan ja rakenteeltaan erilaisia, joten sulkemisen suunnittelussa kuten peittorakenteen valinnassa tulee huomioida myös valitut pohja- ja patoratkaisut sekä niiden vaikutukset jätealueen vesitalouteen. Ympäristön luonnon herkkyyden ja kaivannaisjätteiden määrien lisäksi ympäristövaikutukset ovat pitkälti kiinni sulfidien ja muiden haitta-aineita sisältävien mineraalien hapettumisesta sekä veden roolista happamuuden ja haitta-aineiden kuljettajana. Tärkeänä tekijänä on veden suotautumisnopeutta säätelevät tekijät, hapen diffuusion estäminen tai hidastaminen ja tavoitteena vähintäänkin hidastaa hapen etenemistä kaivannaisjätteeseen asti. Peittomateriaalin ominaisuuksilla vaikutetaan veden ja hapen kulkeutumiseen. Näihin ominaisuuksiin kuuluu myös peittomateriaalin kasvillisuus, joka voi kuluttaa ja haihduttaa suotautuvaa vettä ennen kuin se saavuttaa varsinaisen kaivannaisjätekerroksen.

4.1.1. Biohiilten vedenpidätyskyky

Astiakokeessa 1 moreeni ja puuperäiset biohiilet (B1 ja Bh3) kastuivat kokonaan muutamassa päivässä (Kuva 9). Sen sijaan kaikki Bh2 näytteet olivat lieriön sisäosiltaan kuivia vielä 64 vrk kastelun aloituksesta. Syinä tähän lienevät materiaalin fysikaaliskemialliset ominaisuudet, kuten Bh2:n pieni ominaispinta-ala ja todennäköisesti kuivan pintarakenteen hydrofobisuus sekä ennen kaikkea karkea partikkelikoko, joka aiheutti veden epätasaista kanavoitumista (Bh2 sisältää eniten yli 10 mm partikkeleita). Kenttäoloissa ja maahan sekoittuneena biohiilen vedenhylkivyyks voi kuitenkin ajan myötä heiketä.



Kuva 9. Kastelun vaikutus biohiilten vesipitoisuuteen astiakokeessa 1 (n=3). Bh1 = kuusihiili, Bh2 = liete + hakebiohiili, Bh3 = purkupuubiohiili, Mr = moreeni.

Astiakoe 2 vahvisti saman asian: biohiilestä riippuen se joko kertyi astian pohjalle (oli suspensiona hydrofiilinen) tai kellui vedessä (hydrofobinen). Kelluvista suurin osa oli materiaalia Bh3 R2 eli isompaa yli 2 cm raekoon purkupuuhiiltä. Hienojakoinen biohiili kertyi astian pohjalle tai oli suspensiona vedessä (Kuva 3). Tomografiakuvantamisessa (Luku 4.2) havaittiin kuusihiilen huokosten vettyvän erittäin hitaasti, eikä vettyminen ollut vielä pitkänkään ajan jälkeen täydellistä.

4.1.2. Peittorakenteen vaikutus suotoveden määrään

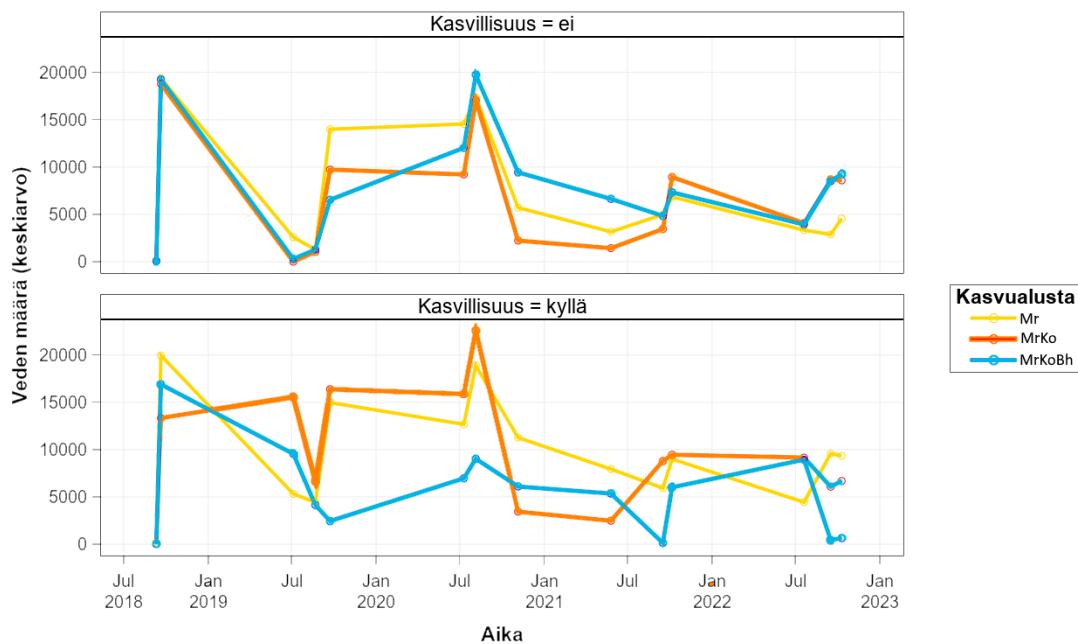
Lysimetrikoe 1: Maanalaiset lysimetrit (Luke)

Kylvettyjen ja kylvämättömien lysimetrien välillä ei ollut merkittävää eroa rakenteen läpi valuneen suotoveden määrässä. Kylvämättömissä lysimetreissä peittokerrokseen lisätty komposti ja biohiili eivät vaikuttaneet läpi suotautuvan veden määrään. Sen sijaan kylvetyissä lysimetreissä kuusihiilen lisääminen peittokerrokseen vähensi merkittävästi peittokerroksen läpi suotautuvan veden määrää (Kuva 10).

Kylvetyissä lysimetreissä kasvillisuuden peittävydessä oli suuria eroja eri peittokerrosten välillä, mikä aiheutti suurta hajontaa myös niiden läpi valuneen suotoveden määrässä. Kun mukana on kaikki näytteenotokerrat neljän vuoden (2019–2022) ajalta (3 kertaa/vuosi), biohiiltä sisältävien kasvillisten peittokerrosten läpi tuli noin kolmanneksen vähemmän vettä kuin pelkkää moreenia sisältävästä peittokerroksesta. Vuosittainen vaihtelu on kuitenkin suurta biohiiltä sisältävien

kasvillisten lysimetrien läpi suotautuneen veden määrän ollessa 45–95 % moreenia sisältävän lysimetrien suotoveden määrästä. Pelkällä kompostillisäyksellä ei ollut vaikutusta suotoveden määrään neljän vuoden seurannassa myöskään kylvetyissä lysimetreissä (Kuva 10).

Peittokerroksiin tehdyt lisäykset eivät siten suoraan vaikuttaneet lysimetrikokeessa suotautuneen veden määrään, sen sijaan peittokerroksen lisäykset – etenkin komposti ja biohiili yhdessä – vaikuttivat siihen kylvetyin heinäkasvillisuuden menestymiseen ja peittävytyteen (Luku 4.3.1). Todennäköisesti kasvillisuuden suuri määrä lysimetreissä, joiden peittokerros koostui moreenin lisäksi kompostista ja biohiilestä, lisäsi suotoveden pidättymistä peittokerrokseen ja haihtumista peittokerroksesta, mikä näkyi peittokerroksen läpi suotautuneen veden vähenemisenä.



Kuva 10. Keskimääräinen suotoveden määrä (ml) eri kasvualustaa sisältävistä kylvetyistä ja kylvämättömistä lysimetreistä. Mr = Moreeni, MrKo = Moreeni + komposti, MrKoBh = Moreeni + komposti + biohiili (n=4).

4.1.3. Peittorakenteen vaikutus suotoveden laatuun

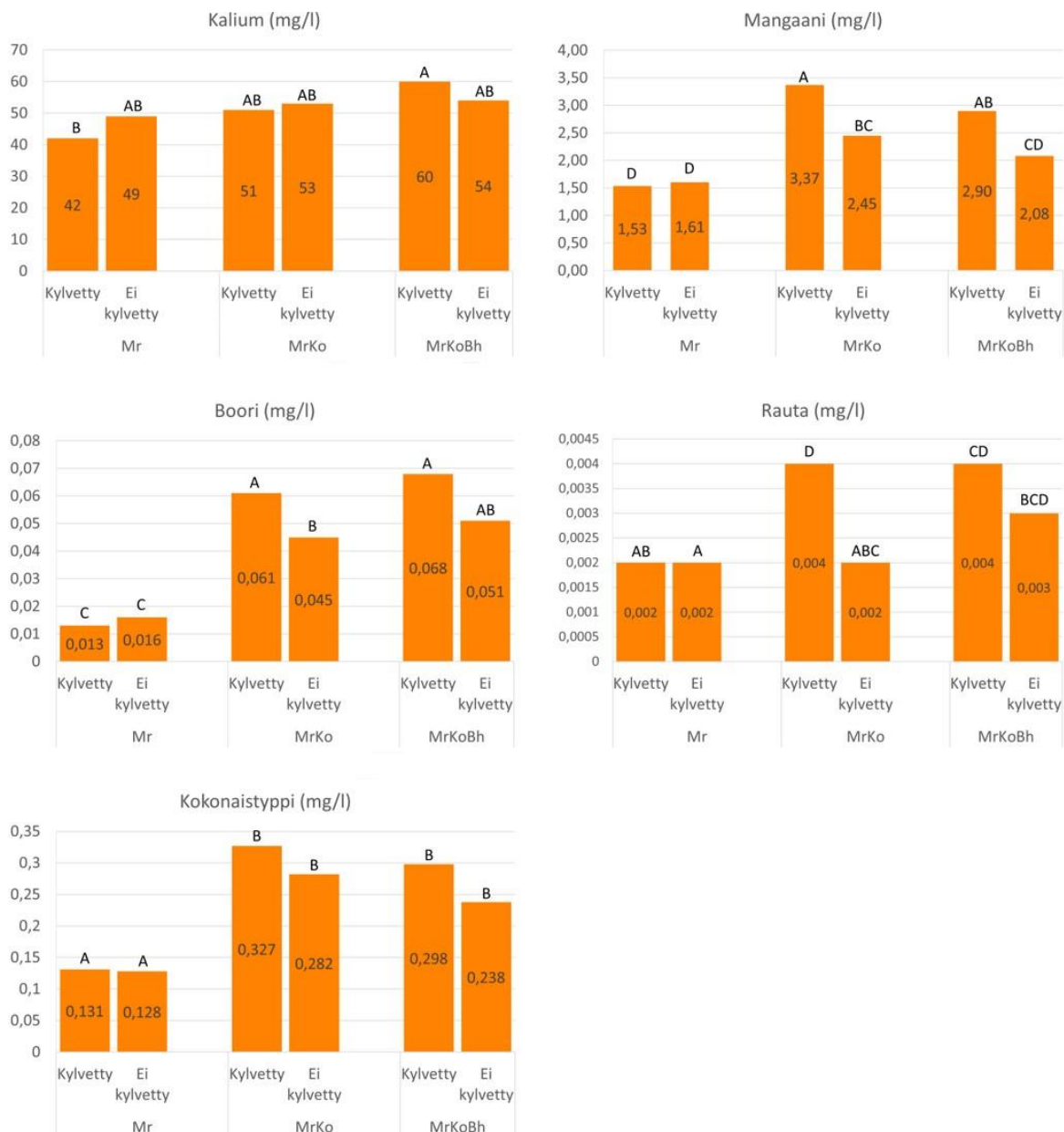
Lysimetrikoe 1: Maanalaiset lysimetrit

Jokaisen lysimetrin läpi suotautuneesta vedestä otettiin näytteitä 12 kertaa vuosina 2018–2022, näytteistä tehtiin useita kemiallisia analyysejä (Liite 1). Osa suotovesien raskasmetallipitoisuuksista (As, Cd, Cr, Pb) oli alle määrittämissä raja-arvoissa. Määrittämissä raja-arvojen ylittäneistä raskasmetallipitoisuuksista sinkin (0,29–0,55 mg/l), kuparin (0,07–0,19 mg/l) ja nikkelin (0,57–0,89 mg/l) pitoisuuksissa ei havaittu tilastollisesti merkittäviä eroja eri lysimetrien suotovesien välillä. Näiden raskasmetallien pitoisuudet suotovesissä olivat samaa luokkaa kuin rikastushiekka-alueen reunusojan pintaveden vastaavat pitoisuudet. Peittokerrokseen tehdyt komposti- ja biohiillisäykset sekä heinäseoksen kylväminen eivät siten vaikuttaneet raskasmetallien liukenemiseen ja mobilisoitumiseen rikastushiekasta seuranta-aikana.

Osa ravinnepitoisuuksistakin (NH₄-N ja NO₂ + NO₃-N) oli alle määrittämissä raja-arvoissa. Määrittämissä raja-arvojen ylittäneistä ravinnepitoisuuksista kalsiumin (42–60 mg/l), magnesiumin (496–1133 mg/l), rikin (963–1808 mg/l), natriumin (24–33 mg/l), liukoisen fosforin (0,01–0,05 mg/l), kokonaisfosforin (0,01–0,05 mg/l) ja ammoniumtyypen (0,07–0,22 mg/l) pitoisuuksissa ei havaittu tilastollisesti

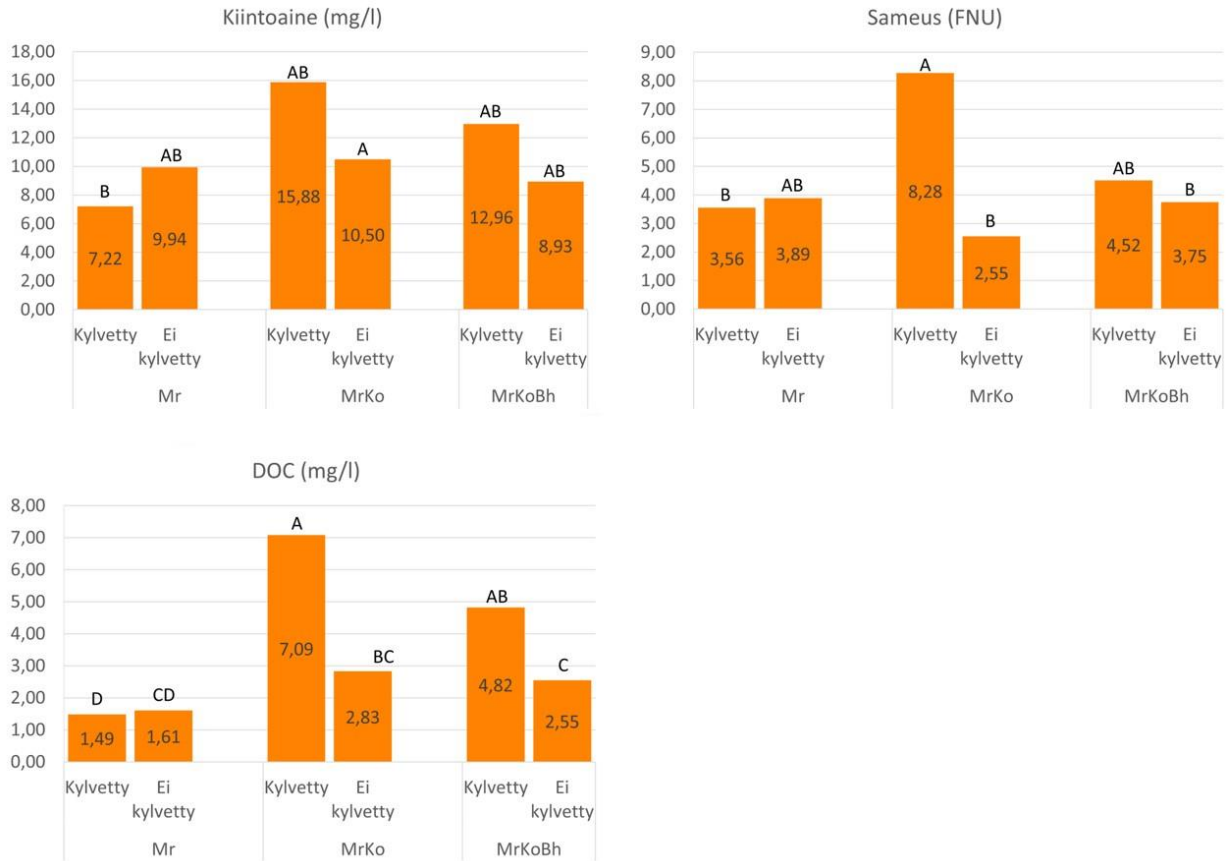
merkittäviä eroja lysimetrien suotovesien välillä. Nämä pitoisuudet olivat samaa luokkaa kuin rikastushiekka-alueen reunusojan pintaveden vastaavat pitoisuudet.

Tilastollisesti merkittäviä eroja lysimetrien peittokerrosten läpi suotautuneissa vesissä havaittiin kaliumin, mangaanin, boorin, raudan ja kokonaistypen pitoisuuksissa. Näiden ravinteiden pitoisuudet suotovesissä sekä lysimetrien väliset erot on esitetty kuvassa 11. Kuvasta nähdään, että peittokerroksen kompostilisäys nostaa jonkin verran suotoveden ravinnepitoisuuksia, ja kasvillisuus lysimetreissä lisää jonkin verran mangaanin, boorin ja raudan pitoisuuksia. Vaikka nämä ravinnepitoisuuksien nousut ovatkin olleet tilastollisesti merkitseviä, niiden käytännön merkitys jää vähäiseksi koska suotovesien ravinnepitoisuudet olivat joka tapauksessa samaa luokkaa kuin rikastushiekka-alueen reunusojan pintaveden tai luonnontilaisen järveden vastaavat pitoisuudet. Veden laadun indikaattoreista nitriittitypen pitoisuudet olivat alle määrittäysrajan.



Kuva 11. Kaliumin, mangaanin, boorin, raudan, ja kokonaistypen pitoisuudet lysimetrien suotovesissä (2018–2022 otettujen 12 näytteen keskiarvo, n=4). Pylväiden päällä olevat kirjaimet kuvaavat tilastollisesti merkittävää ryhmää. Mr = moreenipeitto, MrKo = Moreeni + kompostipeitto, MrKoBh = Moreeni + komposti + biohiilipeitto.

Kiintoaineen ja liuenneen orgaanisen hiilen pitoisuuksissa sekä sameudessa havaittiin tilastollisesti merkittäviä eroja. Kuvassa 12 nähdään, että suotovesien kiintoaine- ja DOC – pitoisuuksien sekä sameuden nousu näyttäisi olevan jossain määrin yhteydessä peittokerroksen kompostilisäykseen, ja edellä mainitut pitoisuudet / ominaisuudet vaikuttaisivat olevan suuremmat kylvetyissä lysimetreissä, etenkin moreeni + kompostipeittokerroksissa. Suotovesien laatu oli kuitenkin näiden indikaattoreiden perusteella samanlainen kuin alueen luonnonvesienkin.

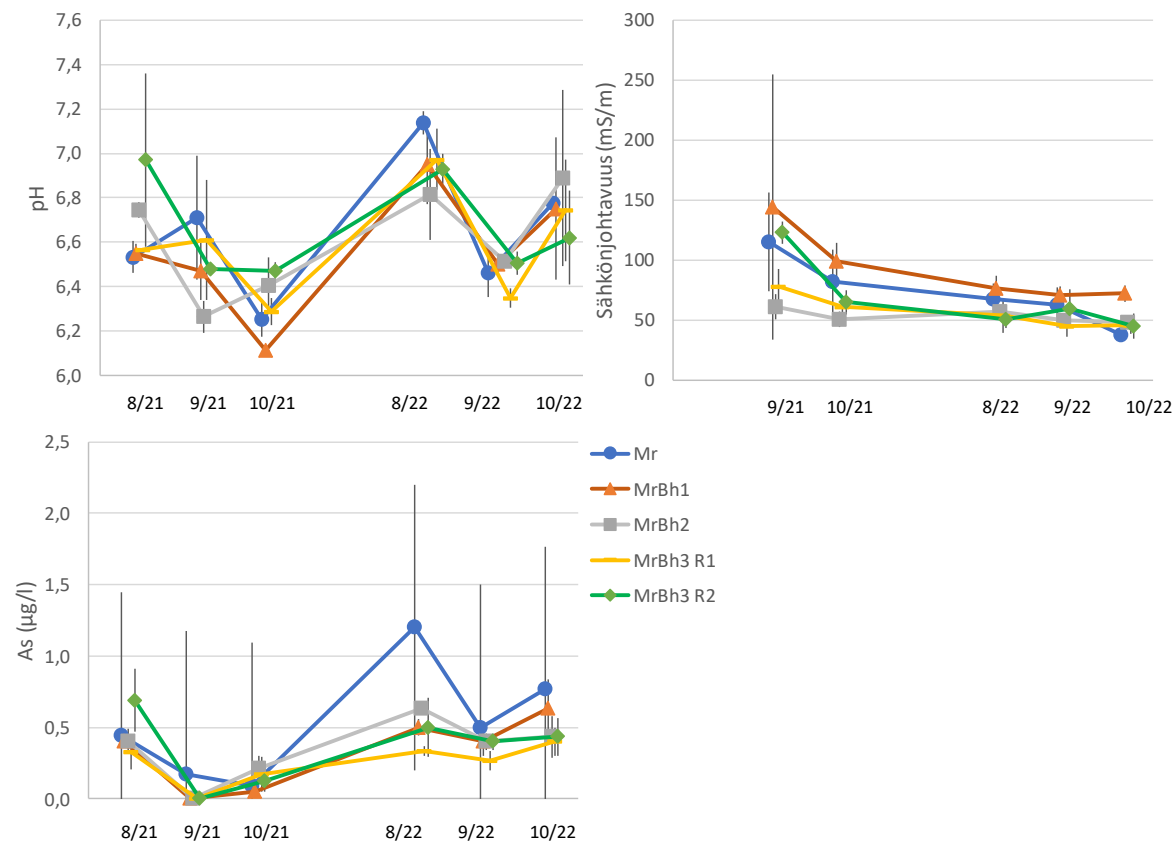


Kuva 12. Kiintoaine- ja liukoisen orgaanisen hiilen (DOC) pitoisuus suotovesissä sekä suotovesien sameudet (keskiarvo, n=4). Pylväiden päällä olevat kirjaimet kuvaavat tilastollisesti merkittävää ryhmää. Mr = moreenipeitto, MrKo = Moreeni + kompostipeitto, MrKoBh = Moreeni + komposti + biohiilipeitto.

Lysimetrikoe 2: Maanpinnalle sijoitetut uudet lysimetrit (GTK)

Vaikka moreeni oli kaikissa kokeen lysimetreissä samasta erästä, niin varsinkin alussa vedenläpäisevyys vaihteli eri lysimetrien välillä. Osasta lysimetreistä ei tullut aluksi ollenkaan vettä läpi, kuitenkin neljällä viimeisellä näytteenotokerralla suotovesinäytteet saatiin kaikista lysimetreistä. Kuivan kesäkauden jälkeen, varsinkin vuonna 2022, lysimetriessä olevan moreenin kastuminen ja veden suotautuminen näyteastiaan kesti selkeästi pidempään kuin samoissa lysimetreissä syys- ja lokakuussa. Biohiilellä ei havaittu olevan vaikutusta lysimetreistä suotautuneen veden määrään, joten vedenläpäisevyyden erot johtuvat todennäköisemmin moreenin heterogeenisuudesta. Biohiilillä ei näytä olevan vaikutusta myöskään suotovesien laskennallisiin sulfaattipitoisuuksiin (1,8–108 mg/l), suurimmat pitoisuudet havaittiin käsittelystä riippumatta C-pöydän lysimetreissä syksyllä 2021. Tämäkin tekijä voi selittyä pitkälti moreenin laatueroilla. Keräysastioissa havaittiin aluksi pohjalla pientä saostumaa ja kuumimpaan aikaan ensimmäisenä kesänä orgaanista aineista.

Lysimetrivesien pH vaihteli 2021–2022 tarkastelujaksolla 6,1 ja 7,7 välillä. Peittoratkaisutyypin välillä ei havaittu eroa, joten kahden vuoden tarkastelujakson aikana biohiilet eivät vaikuttaneet valumaveden pH-arvoon (Kuva 13). Sähkönjohtokyky pysytteli useimmissa suotovesinäytteissä 70 mS/m tuntumassa. Bh1 sisältävän peittokerroksen läpi valuneen veden sähkönjohtavuus on säännönmukaisesti korkeammalla kuin muiden, mutta ero ei ole tilastollisesti merkitsevä (Kuva 13). Arseenin pitoisuus on moreenin läpi suotautuvissa vesinäytteissä alhainen, mutta noususuuntainen. Vertailuna kaivovesille asetetusta raja-arvosta 10 µg/l ollaan kuitenkin vielä kohtalaisen kaukana, vaikka lysimetrikokeen 2 moreeni on lähtöisin Kittilän arseeniprovinssista. Moreenin sisältämä arseeni on siten heikkoliukoinen lysimetrien olosuhteissa. Lysimetreissä, joissa ei ole biohiilisiä, oli havaittavissa vuoden 2022 kohdalla korkeammat arseenipitoisuudet kuin biohiilellisissä lysimetreissä (Kuva 13). Raudan määrä varsinkin kokeen alkuvaiheessa oli määrittäysrajan alapuolella ja myöhemminkin varsin pieni. Myös muiden metallien, kuten kobolttin, kuparin, nikkelin ja vanadiinin pitoisuudet olivat pieniä eikä selkeää systemaattista nousua ajan funktiona eikä eroja käsittelyjen välillä ollut havaittavissa.



Kuva 13. Eri peittorakenteiden läpi valuneiden suotovesien pH-arvon, sähkönjohtavuuden ja arseenipitoisuuden kehitys ajan suhteen (2021–2022) lysimetrikokeessa 2 (keskiarvo, \pm SE, $n=3$). Mr = moreeni, Bh1 = kuusibiohiili, Bh2 = liete + hakebiohiili, Bh3 = purkupuubiohiili. R1 = raekoko <2 cm, R 2 = raekoko >2 cm.

4.1.4. Peittokerroksen vesi- ja happipitoisuudet

Lysimetrikokeessa 1 ei havaittu lämpötilaeroja eroja lysimetrien (Mr kylvetty ja MrKoBh kylvetty) peitto- tai rikastushiekkakerrosten välillä (Kuva 14). Peittokerrosten ja rikastushiekkakerrosten tilavuuskosteudet sen sijaan erosivat tilastollisesti merkitsevästi toisistaan seurantajakson

alussa (Kuva 14). Tällöin niissä lysimetreissä, joissa peittokerros koostui moreenista, kompostista ja biohiilestä, sekä peittokerroksen että rikastushiekkakerroksen tilavuuskosteus oli suurempi kuin lysimetreissä, joiden peittokerros oli pelkkää moreenia. Ero selittynee kompostin ja biohiilen vedenpidätyskapasiteettia lisäävällä vaikutuksella eli talven sulamisvedet pidättyivät tehokkaammin kompostia ja biohiiltä sisältäviin peittokerroksiin, mikä näkyi myös rikastushiekan suurempana kosteutena. Kasvukauden lopulla tilavuuskosteuksissa (Mr kylvetty ja MrKoBh kylvetty) ei ollut eroa.

Lysimetrien rikastushiekkakerroksen happipitoisuudet (5 ja 15 cm syvyydellä) eivät eronneet toisistaan kasvukausien aikana, joten tulosten perusteella happea ei kulkeutunut merkittäviä määriä rikastushiekkakerrokseen kasvien juurikanavia pitkin. Talvisaikaan rikastushiekan pinta-kerroksen happipitoisuus oli jonkin verran korkeampi lysimetreissä, joiden peittokerros koostui moreenista, kompostista ja biohiilestä. Tulos voi kuitenkin heijastaa myös happimittausten teknisiä haasteita mitattavan materiaalin jäätyessä.

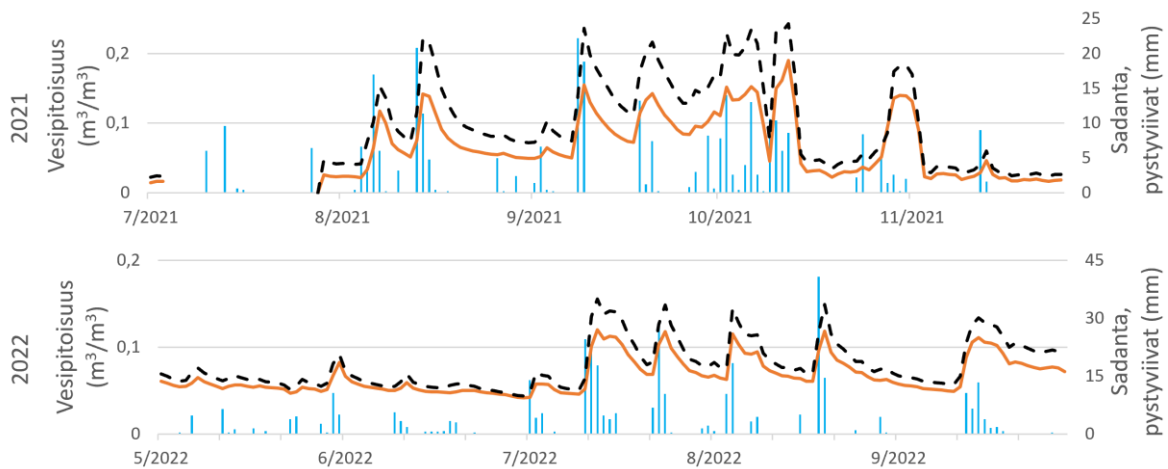


Kuva 14. Lysimetrien peittokerroksien (5 cm ja 15 cm) sekä rikastushiekkakerroksen (25 cm) keskimääräiset keskimääräiset lämpötilat (°C) ja tilavuuskosteudet seurantavuoden 2021 aikana Lysimetrikokeessa 1 (n=4).

Lysimetrikokeiden 2 ja ruutukokeiden 1 jatkuvatoimisen seurannan tulokset heijastavat paikallisia ilmasto-olosuhteita ja suurta vuodenaikaisvaihtelua. Molemmissa kokeissa näkyi peittokerroksen nopea reagointi sateisiin (anturit 5 cm syvyydellä) ja etenkin syksyn voimakkaat yksittäiset sateet näkyvät datassa selkeinä vesipitoisuuden kasvun piikkeinä. Peittomateriaali kuivuu sateen jälkeen aluksi melko nopeasti (ts. vettä valuu lysimetrien/ruutujen läpi), mutta voimakkaimpien sateiden jälkeen materiaaliin pidättyneen veden kuivuminen kestää kauemmin –

keskimäärin noin kaksi viikkoa. Lysimetreissä vesipitoisuuden muutokset tapahtuvat hitaammin kuin ruuduissa. Nämä erot ovat todennäköisesti seurausta lysimetrien pienemmästä avoimesta pinta-alasta, joka tekee niistä vähemmän herkkiä yksittäisille sateille, ja siitä että pohja ei ole ruutukokeiden tavoin avoin. Maan pinnan yläpuolella olevat, mustasta muovista valmistetut lysimetrit lämpenevät etenkin kuumina kesäpäivinä, joka nopeuttaa veden haihtumista lysimetreistä. Muilta osin lysimetrien ja ruutukokeiden maaperän lämpötilatulokset seuraavat melko tarkasti ilman lämpötilan vaihteluita.

Lysimetrikokeessa 2 ja ruutukokeessa 1 peittokerroksen kosteuksissa ei ollut suurta eroa pelkän moreenin tai eri biohiiliä sisältävien peittokerrosten välillä (Kuva 15) vaikka aiemmissa tutkimuksissa biohiilen on havaittu pääsääntöisesti lisäävän maan kosteutta (mm. Edeh ym. 2020). Biohiilen vettymistä tutkittiin tarkemmin laboratoriomittakaavassa astiakokeiden avulla (Kappale 4.1.1.) ja kuvantamalla (Kappale 4.2).



Kuva 15. Vesipitoisuuden vaihtelusta laskettu kahden mittaustuloksen keskiarvo pelkkää moreenia (katkoviiva) sekä kuusibiohiiltä (Bh1) ja moreenia (yhtenäinen oranssi viiva) sisältävissä lysimetreissä (lysimetrikoe 2). Kuvassa esitetty sinillä palkeilla sadanta (mm), joka heijastuu suoraan vesipitoisuuden kasvuun.

Lysimetrikokeiden 2 ja ruutukokeiden 1 jatkuvatoimiset maaperän sähkönjohtavuusmittaukset seuraavat samaa kaavaa vesipitoisuuden kanssa. Tämä on luonnollista, sillä maan kosteuden lisääntyminen vaikuttaa kuivahkossa materiaalissa suoraan myös maan sähkönjohtavuuden kasvuun. Myös sähkönjohtavuuden osalta erot käsittelyjen välillä ovat pääsääntöisesti pieniä. Purkupuusta tehtyä biohiiltä sisältävissä rinnakkaismittauksissa on kuitenkin havaittavissa jonkin verran vaihtelua etenkin vuoden 2022 tuloksissa. Vastaavaa vaihtelua ei ole havaittavissa pelkässä moreenissa tai kuusi- ja lietepohjaista biohiiltä sisältävien ruutujen/lysimetrien rinnakkaismittauksissa. Mainittavaa sähkönjohtavuuden osalta on myös se, että pelkän moreenin sähkönjohtavuus pysyttelee systemaattisesti kuusi ja lietebiohiiltä sisältävien lysimetrien yläpuolella. Vastaavaa tulosta ei ole kuitenkaan havaittavissa lysimetrien suotovesistä tehdyissä sähkönjohtavuusmittauksissa (Kuva 13).

Jatkuvatoimisten happipitoisuuden mittausten kohdalla erot käsittelyjen välillä ovat vielä vesipitoisuutta ja sähkönjohtavuuttakin pienempiä (lysimetrikoe 2 ja ruutukoe 1). Materiaalien happipitoisuus on kevään, kesän ja syksyn aikana pysytellyt kaikissa mittauksissa 15–20 % välillä. Talvi on laskenut happipitoisuutta kaikissa mittauksissa noin 5 %. Hapen korrelointi muiden mitattujen parametrien kanssa on vähäistä. Happi on myös mittausten aikana osoittautunut parametrinä melko haastavaksi ja happipitoisuuden mittauksissa on runsaasti yksittäisiä virheellisiä ja poikkeavia tuloksia etenkin talven ajalta.

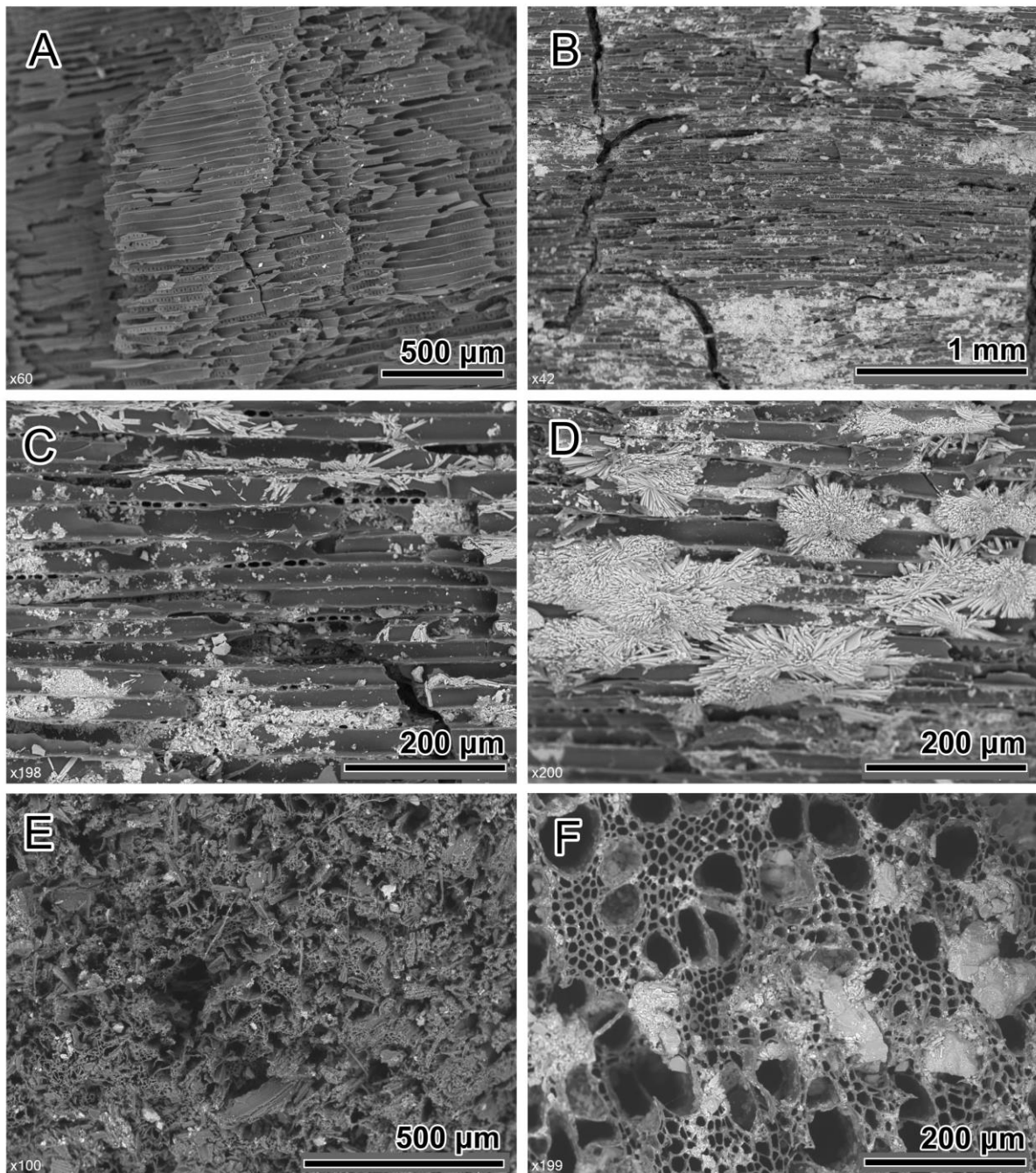
4.2. Biohiilen rapautuminen

Miten biohiilen rakenne muuttuu biopeitossa ajan kuluessa?

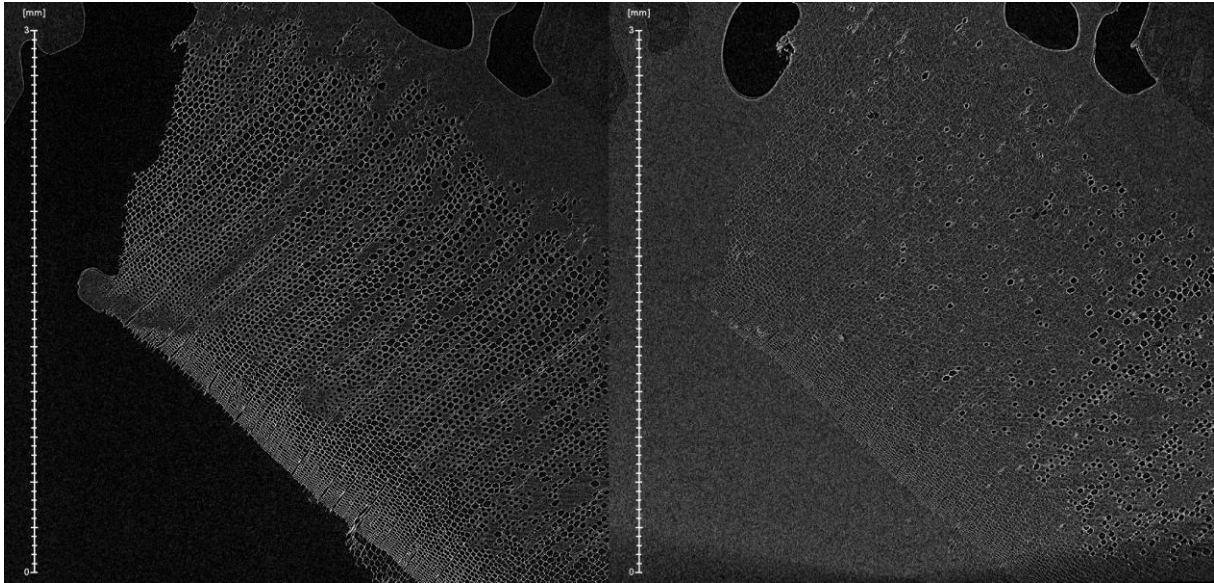
Biohiilinäytteistä valittiin elektronimikroskooppitutkimukseen (SEM-BSE) kuusihiilinäyte Bh1, josta tutkittiin sekä lähtötilanne että ruutukokeessa 1 kahden kasvukauden ajan olleen biohiilen kappaleita. Lähtömateriaalissa erottui hyvin puun alkuperäinen solukkorakenne, jonka pinnalla näkyi paikoin pieniä, hiiltä tiheämpiä kiteisiä partikkeleita (Kuva16A), jotka koostuivat ED-spektrin perustella etupäässä kalsiumista, hapestasta ja jotkut myös fosforista. Myös ruutuko-keissa 18 kk olleen biohiilen solukkorakenne näytti muuttumattomalta, mutta sen pinnalla erottui runsaasti biohiiltä tiheämpää mineraaliainesta (Kuva16B). Tämä koostui neulasmaisista kalsiumsulfaattikiteistä, jotka tulkittiin koostumuksen ja kidemuodon perusteella kipsiksi, ja siliikaattimineraalien kuten savimineraalien, kvartsin ja maasälpien rakeisesta materiaalista (Kuva 16C). Myös etupäässä raudasta ja piistä koostuvia silikaattipartikkeleita oli runsaasti. Silikaatit tulkittiin olevan pintaan tarttunutta moreenin mineraaliainesta, mutta voivat osin olla myös hiilen pintaan saostunutta mineraaliainesta. Kipsin kiteytyminen biohiilinäytteiden pinnalle oli paikoin hyvinkin näyttävää (Kuva 16D). Kipsin syntyä tarkastellaan lähemmin luvussa 4.4.2.

Ruutukokeen biohiilinäytteissä ei havaittu merkkejä rapautumisen tai muun mekaanisen kuorituksen aiheuttamasta halkeilusta. Näin ollen elektronimikroskooppikuvista voitiin hyvin arvioida hiilen alkuperää. Tarkempi tutkimus osoitti, että oletetussa Bh1 kuusihiilinäytteessä oli merkittäviä määriä myös mahdollista purkupuuta (Kuva 16E) ja lehtipuuainesta (Kuva 16F).

Kuusibiohiilen (Bh1) rapautumista tutkittiin myös jäädytys-sulatus-kokeilla, joiden aikana näytteiden rakenteen muutoksia seurattiin röntgentomografialla. Biohiilipalat liimattiin vesipurkin pohjalle pienellä määrällä pikaliimaa kellumisen estämiseksi. Näytteet kuvattiin ensin kuivana, minkä jälkeen purkki täytettiin vedellä. Näytteiden annettiin kastua 24 tuntia ennen ensimmäistä jäädytystä, ja sen jälkeen jokainen jäädytys ja sulatus oli vähintään 24 tuntia, usein kuvausajatauluista johtuen useampia vuorokausia. Kaksi näytettä kävi läpi kolme jäädytys-sulatus -sykliä, kolmas näyte 25 sykliä. Näytteiden rakenteissa ei kahden ensimmäisen näytteen osalta havaittu muutoksia ollenkaan, sen sijaan koe osoitti huokosten täyttymisen vedellä olevan todella hidasta. Kaksi viikkoa sulassa vedessä ollut noin 2 mm halkaisijainen biohiilipala ei ollut edelleenkaan täysin vettänyt (Kuva 17). Kolmen syklin näytteissä ei havaittu mitään rakennemuutoksia. 25 syklin näytteessä nähtiin todella pieniä rakennemuutoksia kokeen lopuksi (Kuva 18).

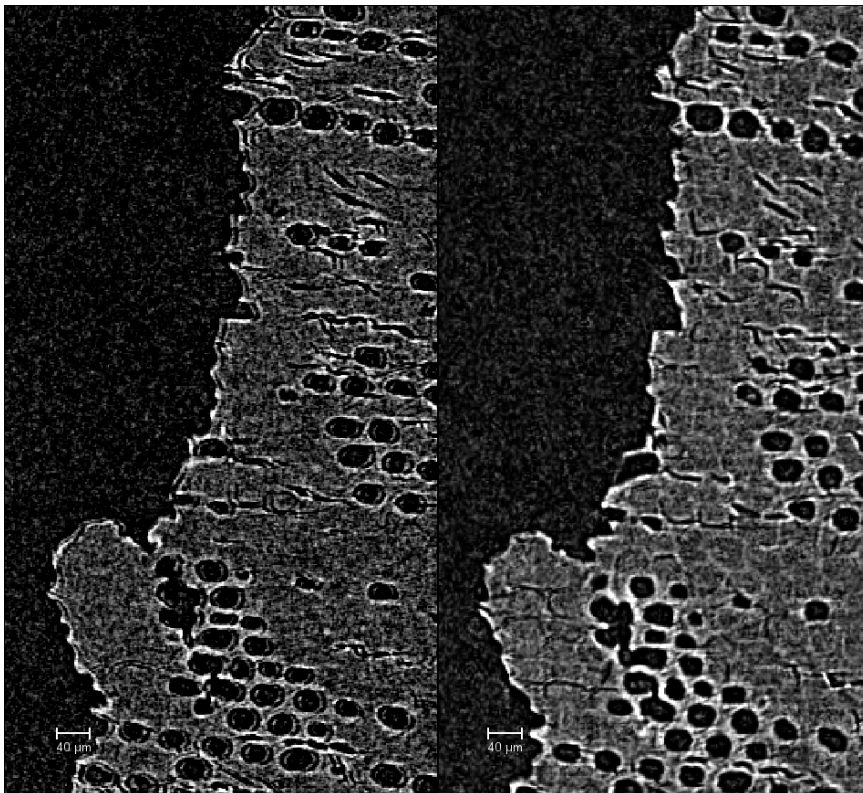


Kuva 16. Kuusihielestä koostuvan näytteen Bh1 elektronimikroskooppikuvia (SEM-BSE). A. Lähtömateriaalissa erottuu kuusen solukkorakenne ja BSE-kuvassa vaaleina erottuvia pieniä tiheitä Ca-rikkaita partikkeleita. B. Ruutukokeen hiilinäytteen pinnalla on runsaasti hiiltä tiheämpää, eli kuvassa vaaleaa, mineraaliainesta. C. Mineraaliainesta koostuu neulasmaisista kipsikiteistä ja rynnimäisestä savi- ja silikaattimineraalien partikkeleista. D. Joillakin hiilinäytteiden pinnoilla kipsiruusukkeet peittävät valtaosan näytepinnasta. E. Bh1 näytteen tutkituissa hiilipaloissa oli kuusen lisäksi mukana myös puristettua puuainesta ja F. lehtipuumateriaalia, jossa näkyy lehtipuulle tyyppinen kuitu/putkilorakenne (Rasa ym. 2021). Näytteen vaaleana erottuvat silikaattikasaumat ovat rautarikkaita, mahdollisesti rautaoksidin ja piidioksidin saostumia.



Kuva 17. Biohiilinäytteen poikkileike ennen jäädytys-sulatussyklejä (vasen) ja kolmen syklin jälkeä märkänä (oikea). Huokokset ovat täyttyneet vedellä suurelta osin, mutta eivät kokonaan.

Tutkittaessa elektronimikroskopiolla tarkemmin 25 syklin näytettä selvisi, että näytteen pinnalle oli muodostunut jonkinlainen kalvo, mahdollisesti pikaliimasta. Kalvo on todennäköisesti vaikuttanut kokeen tuloksiin, mutta tuskin merkittävästi, sillä näytepalan huokokset ovat kuitenkin päässeet vettymään.



Kuva 18. Poikkileikkaus biohiilinäytteestä ennen (vasen) ja jälkeen (oikea) 25 jäädytys-sulatus syklin. Havaitut rakenteen muutokset ovat todella vähäisiä.

4.3. Biopeiton kasvillisuus

Miten biohiili- tai tuhkalisä vaikuttavat eri kasvilajien menestymiseen biopeitossa?

Pohjoisilla leveysasteilla mineraalimaan pinnalle kehitty orgaaninen humuskerros hyvin hiitaasti kylmän ja lyhyen kasvukauden aikana podsolimaannostumisen myötä. Tällaisiin olosuhteisiin geneettisesti sopeutuneet kasvit pystyvät kasvattamaan juurensa suoraan mineraalimaan, mutta koska ne panostavat erityisesti juuriston kasvuun on maanpäällisten osien kasvu hidasta (Haapasaari 1984). Siksi kasvillisuuden luontainen leviäminen rikastushiekka- ja sivukivialueille niitä ympäröiviltä metsä-, suo- tai tunturialueilta on hidasta. Näissä olosuhteissa kasvillisuuden palautuminen voi kestää vuosikymmeniä (Rydgren ym. 2011).

Yksinomaan moreeni, on harvoin toimiva ratkaisu kaivosten sivu- ja jätekivialueiden peitossa. Maa-aineena moreeni on eri raekokoja sisältävää kiviainesseosta, jossa on pääosin niukasti orgaanista ainesta. Siten moreenipeitto on herkkä pintavalunnan aiheuttamalle eroosiolle, mikä osaltaan hidastaa kasvien juurtumista. Kasvillisuuden kehittymiseen tarvitaan eloperäistä ainesta, joka parantaa moreenipeiton ravinnepitoisuutta ja vedenpidätyskykyä. Kosteassa ja runsaravinteisessa maassa kasvien juuret pystyvät siirtämään maahiukkasia tieltään helpommin kuin kuivassa maassa (Myllys ym. 2014). Kun kasvit menestyvät kaivosten peittoratkaisuissa, veden suotautuminen alempiin kerroksiin vähenee kasvien haihduttaessa sade- ja hulevettä.

Kasvien luontaisiin kasvupaikkavaatimuksiin ja kasvutapaan tulee kiinnittää huomiota, kun rikastushiekka- ja sivukivialueille valitaan kasveja, vaikka biopeitolla saataisiinkin parannettua kasvuolosuhteita. Ihanteellinen laji on sellainen, joka viihtyy niukkaravinteisessa maassa, on nopeakasvuinen sekä lisääntyy ja haihduttaa vettä tehokkaasti. Myös maanpinnan sitomis- ja peittokyky ovat tärkeitä ominaisuuksia. Lisäksi paahteen, hallan, tuulen ja raskasmetallien sieto tukee kasvien menestymistä kaivosalueilla. On myös kiinnitettävä huomiota juuriston kasvutapaan, sillä juuret eivät saa rikkoa sulkurakenteita.

Juuristojen kasvutavoissa on eroja. Kaksisirkkaiset kasvit parantavat maan rakennetta yleensä yksisirkkaisia heiniä tehokkaammin, sillä niiden paksu pääjuuri pystyy tunkeutumaan tiiviiseen maahan paremmin kuin yksisirkkaisten hajajuuret. Monivuotiset kasvit taas ehtivät kasvattaa runsaan juuriston vuosien mittaan. Heinien etuna on tiheä juuristo, joka synnyttää maahan runsaasti reikiä ja tuottaa orgaanista ainesta tasaisesti (Myllys ym. 2014). Ne myös kasvattavat laajan juuriverkon vetolujuudeltaan kestävästä maanpinnanmyötäisesti kasvavista ohuista juurista, jotka pystyvät sitomaan pintamaata tehokkaasti (Shahriar ym. 2016). Siksi peittoratkaisuissa usein suositaan heinäkasveja. Isot juuret nähdään myös riskinä sulkukerrosten eheydelle ja mahdollisena hapen ja pintavesien oikotienä sivukivi- tai rikastushiekkakerroksiin.

Kasvien valinnassa tulisi ottaa huomioon myös laajempi mittakaava. Tapauskohtaisesti voidaan pyrkiä joko alkuperäisten ekosysteemien (esim. metsä) palauttamiseen tai vaihtoehtoisiin luonnon ekosysteemeihin (esim. niitty). Tällaisissa kokonaisvaltaisissa ratkaisuissa suljettava kaivosalue pyritään kytkemään osaksi ekosysteemien verkostoa käyttämällä mm. paikallisia luonnonkasveja ja geomorfologista muotoilua.

4.3.1. Ruohot ja puuvartistiset

Miten rikastushiekkan päällä olevaan moreenipeitteeseen sekoitettu komposti, biohiili ja tuhka vaikuttavat kasvien kasvuun ja alkuaineiden kertymiseen kasveihin (phytoakkumulaatio)?

Kasvihuonekoe 1

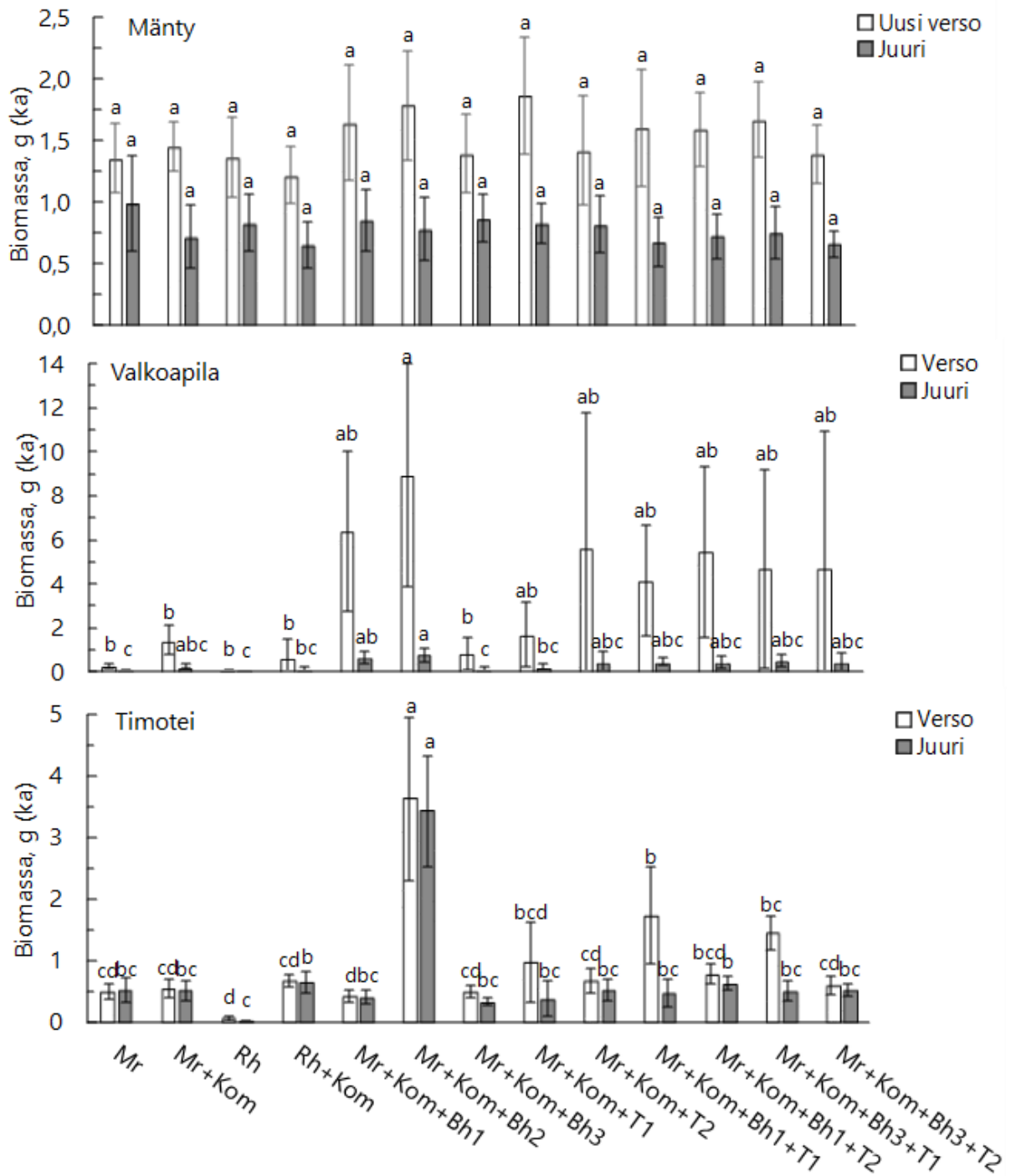
Timotei ja valkoapila itivät hyvin kaikissa kasvualustoissa, myös pelkässä kosteassa rikastushiekassa, jonka partikkelikoko oli pieni ja sähkönjohtavuus korkea (Taulukko 8). Ruohovartisten kasvien myöhempi kasvu pelkässä rikastushiekassa oli kuitenkin heikkoa. Kompostin lisääminen rikastushiekkaan paransi erityisesti timotein kasvu.

Kasvualustaan lisättyjen biohiilten vaikutukset kasvien kasvuun olivat erilaisia ja kasvilajit reagoivat lisäyksiin eri tavalla. Istutetut männynntaimet kasvoivat suhteellisen hyvin kaikilla kasvualustoilla ensimmäisen kasvukauden aikana, eikä tilastollisesti merkittäviä eroja havaittu kasvualustojen välillä. Sen sijaan apila tuotti huomattavasti suuremman biomassan Bh1, Bh2 ja liete-tuhkaa (T2) sisältävissä kasvualustoissa sekä kasvualustoissa, jotka sisälsivät puubiohiilten ja tuhkien seoksia. Timotein ja apila tuottivat suurimman biomassan kasvaessaan moreenin, kompostin ja Bh2:n (liete+hake) seoksessa (Kuva 19) (tulokset julkaistu Heiskanen ym. 2022).

Kokeista saatiin tietoa purkupuu- ja lietebiohiilen sekä tuhkien lyhytaikaisista vaikutuksista. Tulokset tukevat käsitystä, että moreeniin ja rikastushiekkaan lisätty komposti typen lähteenä edistää kasvien kasvu alkukehitysvaiheessa. Lisäksi sopivan biohiilen ja tuhkan lisäys näyttää edelleen edistävän kasvien kasvuun lähtöä ja selviytymistä kasvualustalla johtuen mm. maan tiiviyn vähentymisestä sekä veden- ja ravinteiden pidätyskyvyn lisääntymisestä. Tuhkan todettiin lisäävän kasvien kasvu, mutta tulevaisuudessa tarvitaan uutta näyttöä tuhkan vaikutuksista, kun turpeen osuus poltossa vähenee ja tuhkan ominaisuudet (mm. ravinteet, pH) muuttuvat.

Taulukko 8. Kasvihuonekokeessa1 käytettyjen kasvualustojen keskimääräinen hehikutushäviö (Org), tiheys (Db), aineistiheys (Ds), huokostila (TP) ja vedenpidätys -0.3 kPa matriisipotentialilla (WC03), sekä sähkönjohtavuus (EC) ja pH vesisuspensiossa (n = 3). Kasvualustojen lyhenteet ks. Taulukko 1.

Kasvualusta	Org, %	Db, g/cm ³	Ds, g/cm ³	TP, vol.%	WC03, vol.%	EC, µS/cm	pH
Mr	0,56	1,80	2,64	31,9	27,3	9,7	7,74
MrKo	1,62	1,76	2,63	33,2	27,9	26,8	7,82
Rh	1,98	1,12	2,63	57,5	49,7	1 013,3	6,30
RhKo	2,61	1,11	2,62	57,7	51,6	916,3	6,48
MrKoBh1	1,56	1,60	2,63	39,3	32,0	38,1	7,18
MrKoBh2	1,40	1,63	2,63	38,1	32,8	50,6	6,73
MrKoBh3	1,11	1,64	2,64	37,8	31,3	29,8	7,04
MrKoT1	1,09	1,72	2,64	34,8	30,4	147,2	6,89
MrKoT2	1,18	1,66	2,64	37,0	32,0	69,2	6,93
MrKoBh1T1	1,68	1,60	2,63	39,1	31,6	370,3	6,89
MrKoBh1T2	1,47	1,57	2,63	40,4	34,1	332,0	7,09
MrKoBh3T1	2,03	1,62	2,63	38,3	31,8	82,8	7,52



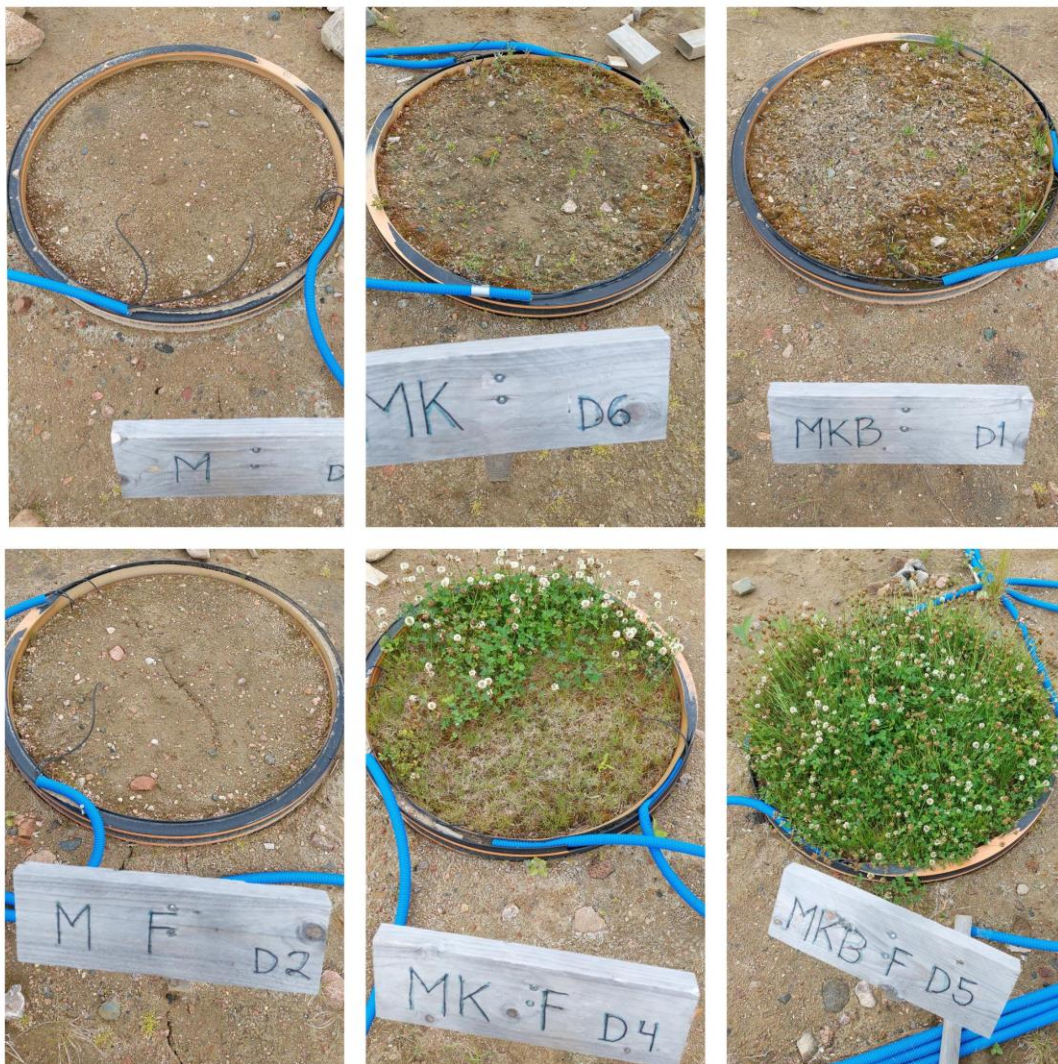
Kuva 19. Kasvien biomassa (kuiva-ainetta) kasvatuksen jälkeen (keskiarvo ± kh, n=5–6). Kirjaimet pylväiden päällä osoittavat ei-merkittävää eroa kasvuolustojen välillä (p > 0.05 Bonferroni).

Lysimetrikoe 1

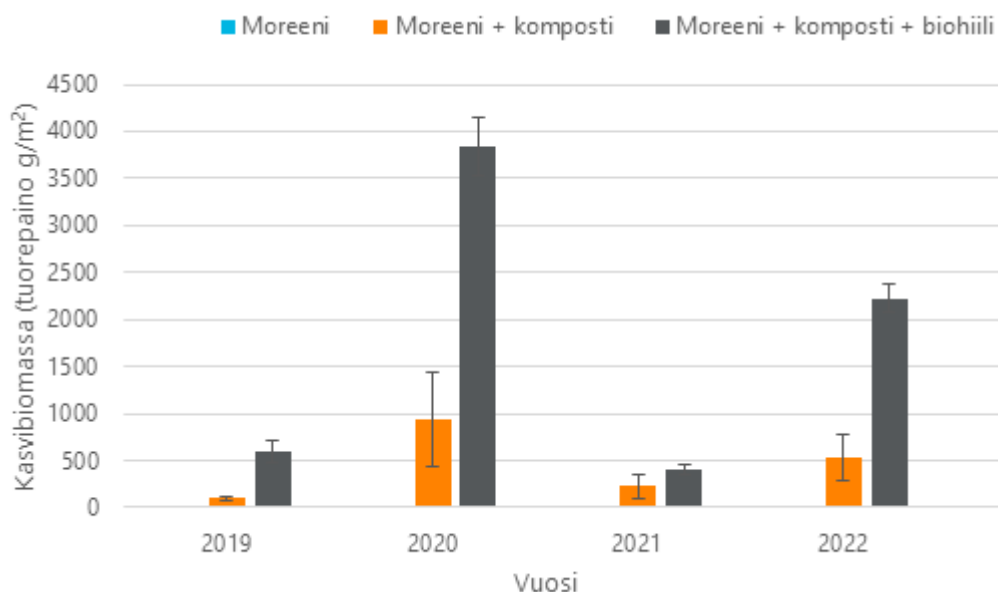
Rautuvaaraan 2018 perustettujen lysimetrien kasvillisuuden peittävyttä ja biomassaa on seurattu vuosittain (2019–2022). Pelkässä moreenipeitteessä kasvien itäminen oli vielä viiden vuoden kuluttua erittäin heikkoa ja kasvillisuuden peittävyys pieni (<5 %) (Kuva 20).

Kompostin lisääminen kasvualustaan edisti kasvien kasvua merkittävästi. Peittävyys nousi parhaimmillaan yli 90 %. Kuusipohjaisen biohiilen lisääminen paransi kasvua edelleen peittävyden ollessa lähes 100 % (Kuva 20). Kasvibiomassa oli biohiiltä sisältäneessä biopeitossa 20–200 % (vuodesta riippuen) suurempi verrattuna moreenin ja kompostin seokseen (Kuva 21).

Lysimetreissä, joissa moreenin sekaan oli lisätty kompostia tai kompostia ja biohiiltä ja joihin ei kylvetty nurmuseosta on kuuden vuoden aikana (2018–2023) alkanut pikkuhiljaa saapua pioneerilajeja. Sammalista vuonna 2023 runsaana kasvoivat kulosammal ja nuokkuvarstasammal sekä pieniä määriä karhunsammalta ja keuhkosammalta. Sammalten peittävyys vaihteli välillä 45–75 %. Ruhovartisten kasvien peittävyys oli kylvämättömissä lysimetreissä oli vuonna 2023 1–7 % (Kuva 20).



Kuva 20. Kasvillisuuden peittävyys lysimetreissä elokuussa 2023. Käsittelyt vasemmalta Mr, MrKo ja MrKoBh. Ylärivin lysimetreihin ei ole kylvetty kasvillisuutta. Alarivin lysimetreihin kylvetty kaikkiin nurmisiemenseos kesällä 2018.



Kuva 21. Eri kasvualustoissa kasvavien kasvien tuorepaino kasvukauden lopussa (2019–2022), kasvillisuus kylvetty 2018. Pylväiden järjestys kunkin vuoden kohdalla Mr (pylväs ei näy koska biomassa niin pieni), MrKo ja MrKoBh (n=4).

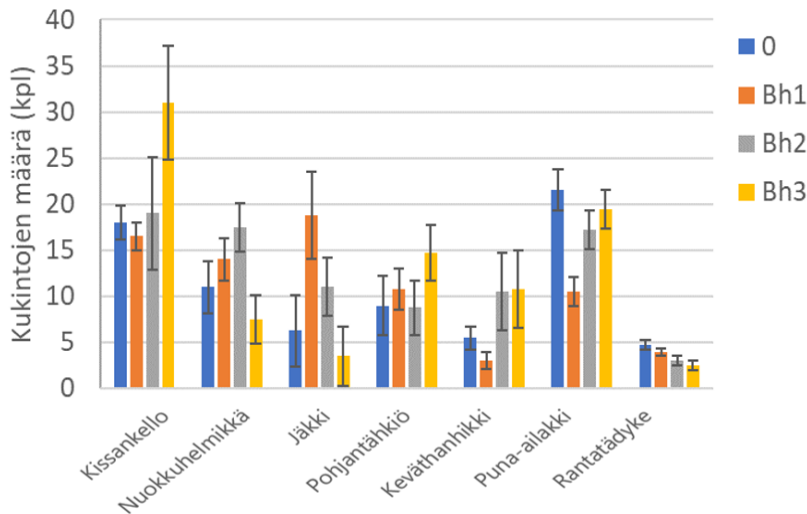
Lisäksi biohiilillä vaikutti kasvien kasvutapaan siten, että kasvit panostavat maanpäällisten osien kasvuun juuriston jäädessä pienemmäksi (tulokset julkaistu Hagner ym. 2021). Muutos kasvutavassa on hyödyllinen, koska peittorakenteessa kasvien juuret eivät saa rikkoo vettä eristäviä sulkukerroksia. Suuri kasvibiomassa myös haihduttaa enemmän vettä, jolloin suotoveden määrä vähenee.

4.3.2. Pohjoiset niittyajit

Erityisesti ketokasvit ovat geneettisesti sopeutuneet vaihteleviin olosuhteisiin. Rautuvaaran ruutukokeeseen valituista lajeista suurin osa selviytyy kohtalaisesti tai hyvin pelkkää kompostia sisältävässä kasvualustassa ensimmäiset vuosien tulosten perusteella. Vain istutetuista tunturikurjenherneistä kuoli suurin osa ensimmäisenä kesänä.

Kasvun perusteella biohiilet auttavat kasveja selviämään äärevissä olosuhteissa. Puna-ailakki ja jäkki ovat kasvaneet eniten vuoden 2023 mittausten perusteella. Myös keväthanhikki menestyy hyvin. Kasvilajien vaste biohiilillisiin vaihteli. Kukkavarsien lukumäärää tarkasteltaessa lietebiohiilestä näyttää hyötyvän erityisesti nuokkuhelimikki ja jäkki, kuusibiohiilestä jäkki ja keväthanhikki sekä purkupuubiohiilestä kissankello, pohjantähkiö ja keväthanhikki (Kuva 22).

Pohjoiset kasvit itävät ja kasvavat hitaasti ja kokeesta on saatu vasta alustavia tuloksia. Siemenet, erityisesti puna-ailakin ja kissankellon, alkoivat itää paremmin vasta kolmannella kasvukaudella. Heinistä parhaiten on itänyt pohjantähkiö. Myös yksittäisiä rantatädykkeen ja nuokkuhelimikän taimia esiintyi. Niinpä tarvitaan lisätietoa luontaisen sukcession nopeudesta ja siitä, millä keinoin kehitystä voidaan tukea. Siksi kasvien kasvullisen leviämisen ja siementämisen seuranta tulee jatkaa.



Kuva 22. Pottitaimien tuottamien kukintojen määrä kolmannella kasvukaudella (heinäkuussa 2023) (keskiarvo \pm SE, n=4).

4.4. Metallien kulkeutuminen

Haitta-aineiden kuten eri metallien kulkeutumista maaperässä sääteleviä prosesseja on useita. Aineiden ominaisuuksien lisäksi prosessien voimakkuuteen vaikuttavat maaperän ominaisuudet sekä ilmasto-olosuhteet. Fysikaalisia prosesseja maaperässä ovat mm. advektio, dispersio, diffuusio ja haihtuminen, kemialliset reaktiot liittyvät puolestaan vahvemmin kompleksien ja kolloidien muodostukseen. Haitta-aineita kulkeutuu maaperässä kaasuna, liukoisessa muodossa vapaina ioneina tai metallikomplekseina sekä suspensiossa humukseen tai maahiukkasiin kiinnittyneenä. Kaasut pois lukien, maaperässä haitta-aineiden pääasiallisena kuljettajana toimii vesi, tehostaen liukoisten haitta-aineiden kulkeutumista. Vedellä kyllästyneissä ja kyllästymättömissä maaperän vyöhykkeissä vallitsevat erilaiset kuljetusmekanismit (Young ym. 1992, Heikkinen 2000).

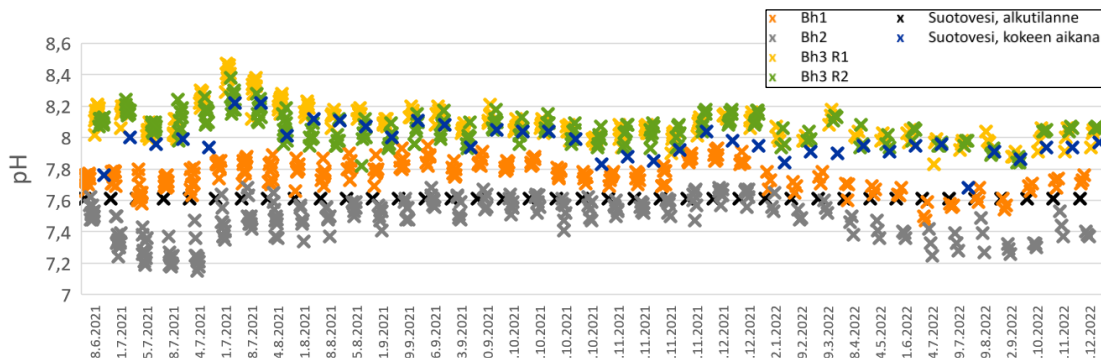
Maaveteen liuenneessa muodossa metallit liikkuvat maaperän veden liikkeiden mukana joko vertikaalisesti syvemmälle maaperään tai horisontaalisesti. Haihdunnan ja sadannan suhteesta riippuen veden virtausta alemmista maakerroksista voi tapahtua myös ylempiin. Liuenneet metallit voivat myös sitoutua maaperään kuten orgaaniseen ainekseen, savimineraaleihin ja hydroksideihin ja muodostaa saostumia. Haitta-aineiden pidättymiseen ja kulkeutumiseen vaikuttavat maaperän olosuhteet kuten orgaanisen aineksen määrä, mineraalikoostumus ja partikkelikoko, rakenne ja vedenläpäisevyys, ioninvaihtokapasiteetti sekä kemialliset olosuhteet (esim. pH ja hapetus-pelkistysolot). Olosuhteiden pysyvyys yhdessä muodostuneiden sidosten lujjuuden kanssa vaikuttavat haitta-aineiden pidättymisen tehokkuuteen. Metallien kulkeutuminen veden mukana kasveihin riippuu useista tekijöistä, kuten metallien liukoisuudesta maaperässä, maaperän pH:sta, kasvien juuriston ominaisuuksista ja kasvien metabolisesta aktiivisuudesta. Lisäksi kationivaihtomekanismi voi vaikuttaa metallien ottoon, kun kasvit korvaavat tarvitsemansa ravinteet maaperän ionivaihdolla.

4.4.1. Biohiilen metallienpidätyskyky

Sitovatko erilaiset biohiilet metalleja pinnoilleen?

Astiakokeet

Kaivosveden ja biohiilen välisiä reaktioita tutkivassa astiakokeessa 2, biohiiltien ominaisuudet (Taulukko 3) vaikuttivat selvästi suotoveden pH-arvoon. Selvästi emäksisen Bh3:n suotoveden pH oli koko kokeen ajan muita emäksisempi (Kuva 23). Vastaavasti Bh2:n pH oli alhaisin, mikä näkyi myös suotoveden alempana pH:na. pH-arvoissa ei tapahtunut selkeitä muutoksia kokeiden aikana vaan arvot pysyivät kohtalaisen vakaina koko testin ajan. Neutraali pH voi edesauttaa joidenkin metallien kuten nikkelin pidättymistä biohiiliin (Shen ym. 2017), kun taas vastaavasti metallimalmikaivostoiminnan suotovesille tyypillisillä alhaisilla pH-lukemilla olisi esimerkiksi nikkelin pidättymistä mahdollisesti heikentävä vaikutus.



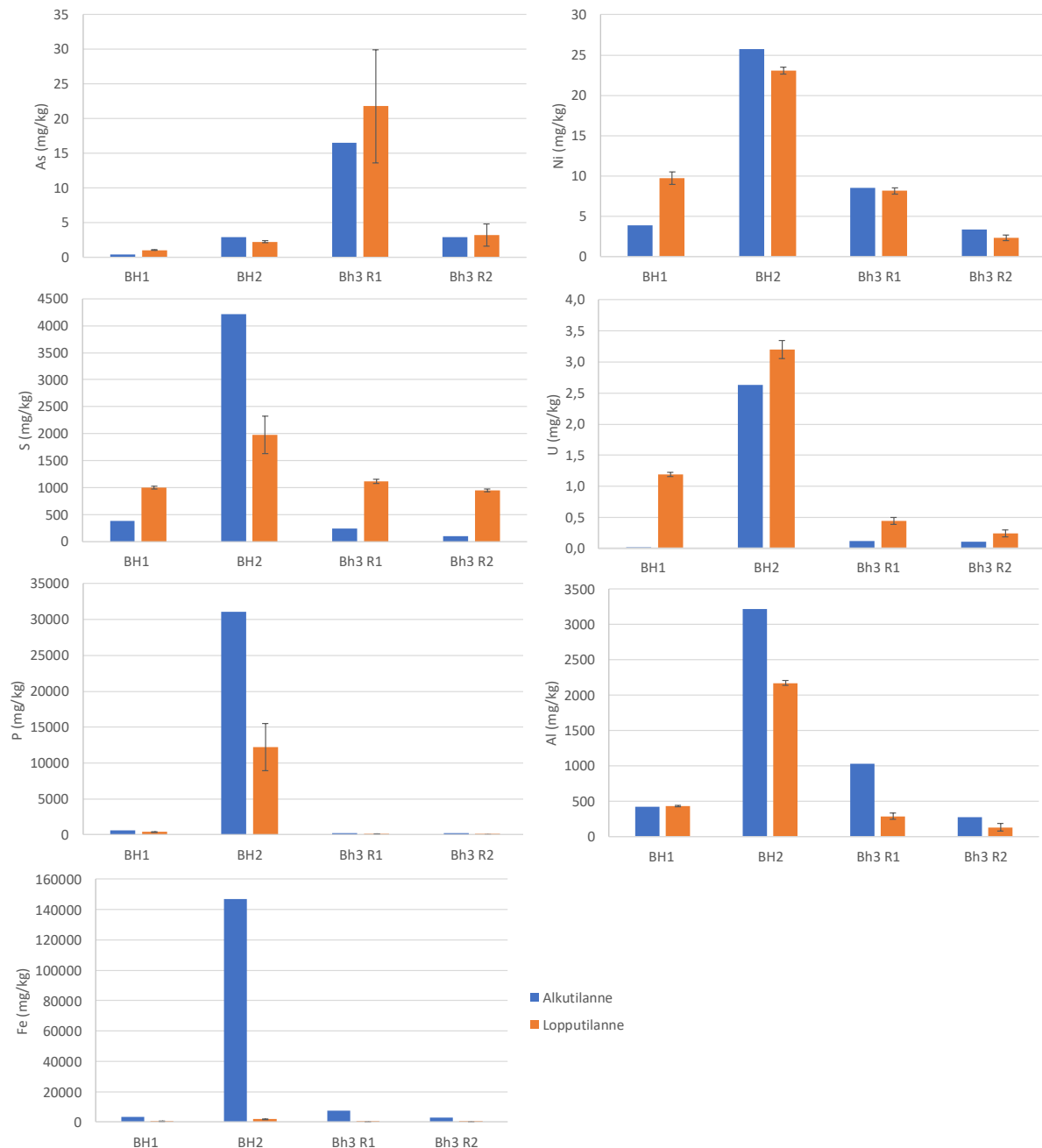
Kuva 23. Rautuvaaran sivukivialueen kaivosveden sekä eri biohiilijakeiden vuorovaikutusta tutkivan astiakokeen suotovesinäytteiden pH välillä 26.6.2021–13.12.2022. Keskenään samanväriset merkinnät kullakin ajankohdalla kuvaavat eri materiaalien rinnakkaisnäytteitä. Kokeen alussa rinnakkaisia näytteitä on 12 kappaletta, ja kokeen lopussa kolme.

Sähkönjohtavuudessa on erotettavissa aleneva trendi ajan suhteen. Ensimmäisen viikon aikana näytteiden sähkönjohtavuus on suotoveden alkutilanteen sähkönjohtavuutta korkeammalla, sen sijaan kokeen lopulla alkutilannetta korkeammalla ovat ainoastaan Bh3 R1 ja R2 sisältävät vedet. Eri biohiilimateriaaleja vertailtaessa, erottuu purkupuumateriaalista tehty Bh3 muista korkeammalla sähkönjohtavuudella. Vastaavaa tulosta ei ole selkeästi havaittavissa lysimetrien suotovesissä (Kuva 13). Korkeampi sähkönjohtokyky on todennäköisesti seurausta purkupuu-biohiilen sisältämistä epäpuhtauksista. Bh3:n rinnakkaisnäytteiden tulokset vaihtelevat kuitenkin vain vähän, toisin kun ruutukokeiden ja lysimetrien rinnakkaismittaukset, jossa vaihtelu oli selvästi suurempaa Bh3:n osalta. Astiakokeen hapetus-pelkistyspotentiaalimittauksien osalta tutkitut biohiilet eivät eroa juurikaan toisistaan.

Astiakokeissa käytettyjen biohiiltien alkuainekoostumus määritettiin ennen ja jälkeen 1,5 vuotta rikastushiekka-altaan suotovedessä seisomista. Tarkoituksena oli selvittää miten biohiilet sitovat/saostavat suotovedessä olevia haitta-aineita. Kokeen lopussa Bh1:n arseenin, nikkelin, rikin ja uraanin pitoisuus kasvoi moninkertaiseksi, mutta rikkiä lukuun ottamatta pitoisuudet ovat melko pieniä. Sen sijaan Bh2:n pitoisuudet kokeen lopussa ovat pienentyneet eli hiili oli luovuttanut alkuaineita veteen. Erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä lukuun ottamatta rikkiä, fosforia, alumiinia ja rautaa, jotka kaikki ovat todennäköisesti peräisin raaka-aineena käytetystä lietteestä (fosforin saostuksessa käytetään rauta- ja alumiinisulfaatteja). Bh3:ssa on enemmän hajontaa alku- ja lopputilanteen välillä, erityisesti suuremmissa partikkelikoossa (R2).

Puupohjaisissa biohiilissä rikin määrä kokeen lopuksi oli selkeästi suurempi kuin alkutilanteessa (Kuva 24).

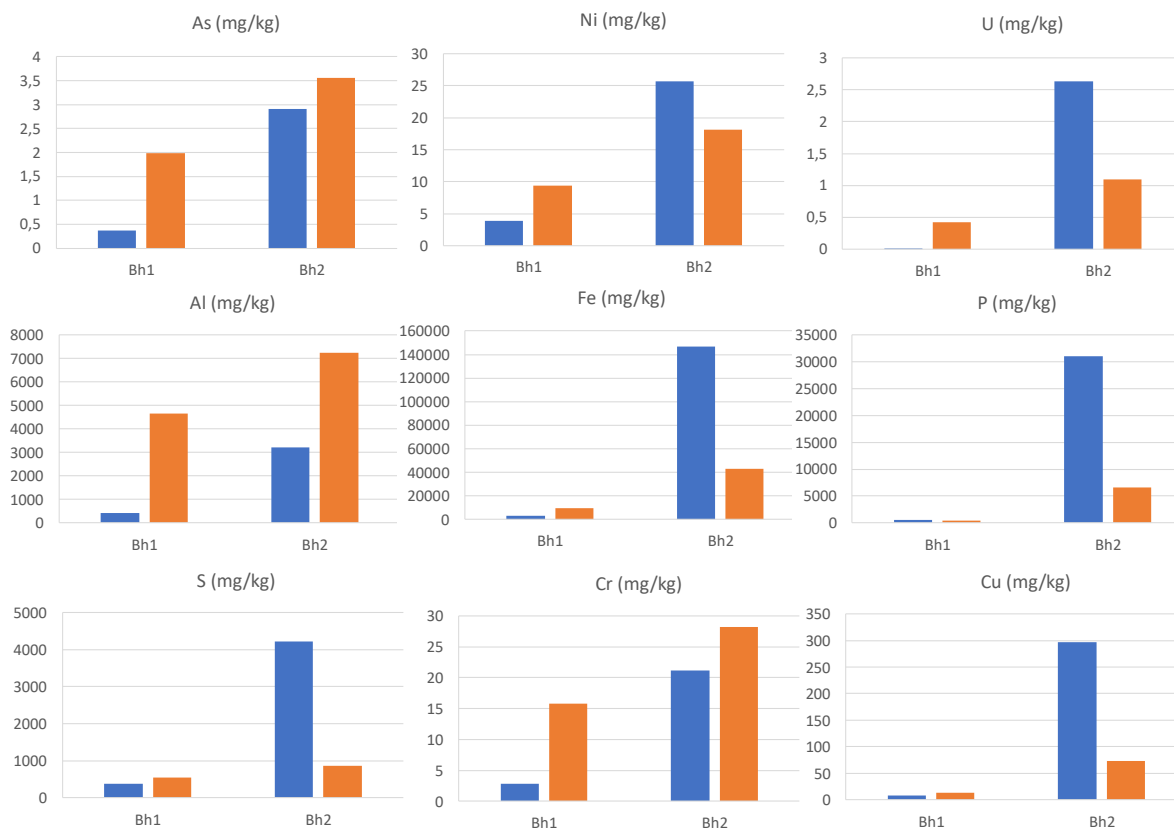
Purkupuubiohiilen (Bh3) kaksi eri raekokoa (R1 <2 cm ja R2 >2 cm) käyttäytyivät eri tavalla useimpien alkuaineiden osalta. Pitoisuuksissa oli analysoitujen kappaleiden välillä osin isoja vaihteluja. Vaihtelussa ei myöskään havaittu trendiä, mikä viittaa heterogeeniseen lähtömateriaaliin (Kuva 24).



Kuva 24. Valittujen alkuaineiden pitoisuudet astiakokeessa, jossa eri biohiilijakeita seisotetaan Rautuvaaran rikastushiekka-alueen suotovedellä täytetyissä näytenäytteissä. Pitoisuudet määritettiin biohiilissä ennen veteen laittoa (sininen pylväs; kunkin käsittelyn kohdalla vasemmalla; n=1) ja 1,5 vuoden inkuboinnin jälkeen (oranssi pylväs; oikealla; n = 3-4) (keskiarvo ± SE).

Valittujen alkuaineiden pitoisuudet astiakokeessa, jossa eri biohiilijakeita seisotetaan Rautuvaaran rikastushiekka-alueen suotovedellä täytetyissä näytepurkeissa. Pitoisuudet määritettiin biohiilissä ennen veteen laittoa (sininen pylväs; kunkin käsittelyn kohdalla vasemmalla; n=1) ja 1,5 vuoden inkuboinnin jälkeen (oranssi pylväs; oikealla; n = 3-4) (keskiarvo ± SE).

Ruutukokeissa seurattiin Bh1- ja Bh2-jakeiden alku- ja lopputilanteen alkuainepitoisuuksien mahdollisia muutoksia. Ruutukokeissa biohiilet olivat astiakokeita vastaavan aikajakson Rautuvaaran koealalla luonnonolosuhteissa alkukesästä vuonna 2021 kesän loppuun 2022. Hiilet kerättiin jatkotutkimuksiin elokuussa 2022 ruuduista, joissa ei ollut kompostilisää (ks. Kuva 7). Ruutukokeissa alku- ja lopputilanteen pitoisuuksien välillä oli enemmän vaihtelua kuin astiakokeissa. Koska ruutukokeen osalta näytteitä analysoitiin vain kaksi kappaletta per hiili, tarkasteluun otettiin vain ne alkuaineet, joissa oli eroja näkyvissä myös astiakokeessa sekä kromi ja kupari (Kuva 25). Bh1 sisälsi ruutukokeiden jälkeen enemmän alumiinia ja rautaa, jotka todennäköisesti peräisin ruutukokeen moreenista biohiilen pintaan tarttuneista savi- ja rautamineraaleista. Lietepohjainen Bh2 vapautti rautaa ja fosforia. Molemmat hiilet näyttivät pidättäneen itseensä kromia ja kuparia, mutta tulkinta epävarma moreenikontaminaation ja toistojen vähyyden vuoksi (Kuva 25).

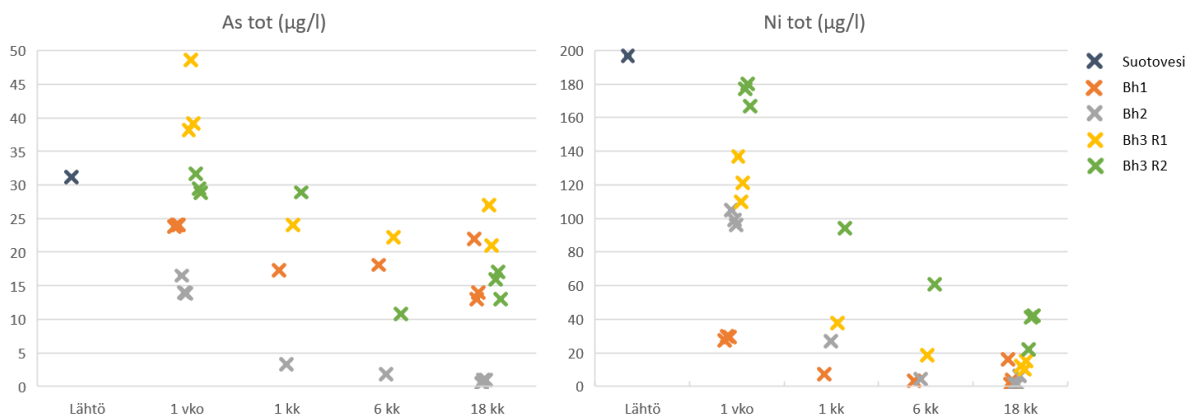


Kuva 25. Rautuvaaran koealueella ruutukokeessa 2 olleiden biohiilten (Bh1 = kuusibiohiili; Bh2 = liete+hakebiohiili) alkuainepitoisuudet (keskiarvo) kokeen alussa ja 1,5 vuotta kokeen perustamisen jälkeen. Alkutilannetta kuvaa sininen pylväs (kunkin käsittelyn kohdalla vasemmalla; n=1) ja lopputilanne (oranssi pylväs; oikealla; n = 2).

Astiakokeiden tuloksista voidaan todeta, että märkä kuusibiohiili sisältää rikastushiekka-alueen suotovedessä olevaa liukoista rikkiä (sulfaatti-ioneja, mm. liukoista Na-sulfaattia). Uraani

saostuu pelkistävässä oloissa, joten orgaaninen hiili sitoo sitä. Muutoin metalli-ionien adsorptio kuusibiohiileen oli melko vähäistä (As, Ni) tai sitä ei tapahdu (mm. Cd, Co, Cu, Zn). Lietteestä ja hakkeesta tehdyn biohiilen osalta ei havaita samoja piirteitä kuin kuusibihiilellä, vaan biohiili on tasaisesti luovuttanut suotoveteen lähes kaikkia mitattuja alkuaineita. Purkupuu on lähtömaterialina hyvin heterogeenistä, rinnakkaisten osanäytteiden koostumus voi vaihdella paljon. Rikin (sulfaatin) ja uraanin osalta havaitaan kuitenkin sama suuntaus kuin kuusibihiilellä, eli vettynyt purkupuubiohiili sisältää huokosveteen liuennutta sulfaattia ja sitoo uraania. Lisäksi se luovuttaa suotoveteen ainakin fosforia, rautaa, kaliumia ja alumiinia, eli myös kasviraivanteita.

Rautuvaaran rikastushiekka-alueen suotoveden pitoisuus analysoitiin ennen astiakoetta veden lähtötilanteen ominaisuuksien selvittämiseksi. Veden ja biohiilen vuorovaikutuksen selvittämiseksi ja mahdollisten pitoisuusmuutoksen tunnistamiseksi suotovesi analysoitiin 4 kertaa (1 vko, 1kk, 6 kk, 18 kk) koejärjestelmän aikana. Viimeinen näytteenotto tapahtui astiakokeen lopettamisen yhteydessä, jolloin kokeen aloituksesta oli kulunut 1,5 vuotta. Kuvassa 26 on esitetty suotoveden totaalipitoisuudet arseenin ja nikkelin osalta eri mittausajankohtina. Suotoveden totaalipitoisuus samoin, kun liukoiset pitoisuudet laskevat alkutilanteesta ajanfunktiona, ainoastaan As-pitoisuudessa poikkeus 1. viikon kohdalla purkupuubiohiilen pienemmän raekoon osalta (Bh3 R1). Lasku on nopeinta arseenin osalta biohiilessä 2 ja nikkelin osalta biohiilessä 1 ja sama suuntaus on nähtävissä myös liukoisten pitoisuuksien mittaustuloksissa. Rikkipitoisuus pysyy koko astiakokeen ajan lähes samassa, ja näyttysi kohoavan ainoastaan lietettä sisältävässä biohiilessä (Bh2). Tämä tulos tukee biohiilipalasten rikkipitoisuuden laskua astiakokeen jälkeisessä mittauksessa (vrt. Kuva 25). Sulfaatin nousu on koko koejärjestelmän ajan mallista, lähtötilanne 945 mg/l nousi jokaisen biohiilijakeen osalta viimeisessä mittauksessa 1 100 mg/l. Uraanipitoisuus laskee monen muun alkuaineen tavoin tutkimuksen edetessä. Haitta-aineista kromin ja sinkin pitoisuudet nousevat astiakokeen aikana, kromin pitoisuus vaihtelut ovat kuitenkin pieniä (0,25–4 µg/l) ja sinkkipitoisuudet vaihtelevat selvästi eri mittauskertojen välillä 2,5–477 µg/l. Alumiinin ja raudan totaalipitoisuudet eivät poikenneet juurikaan kokeen loputtua alkutilanteesta. Tulosten perusteella eri biohiili laadut vaikuttavat hieman eritavoin kaivoksen suotoveden haitta-ainekoostumukseen. Biohiilijakeet näyttäisivät sekä sitovan alkuaineita, mutta myös vapauttavan alkuaineita suotoveteen.

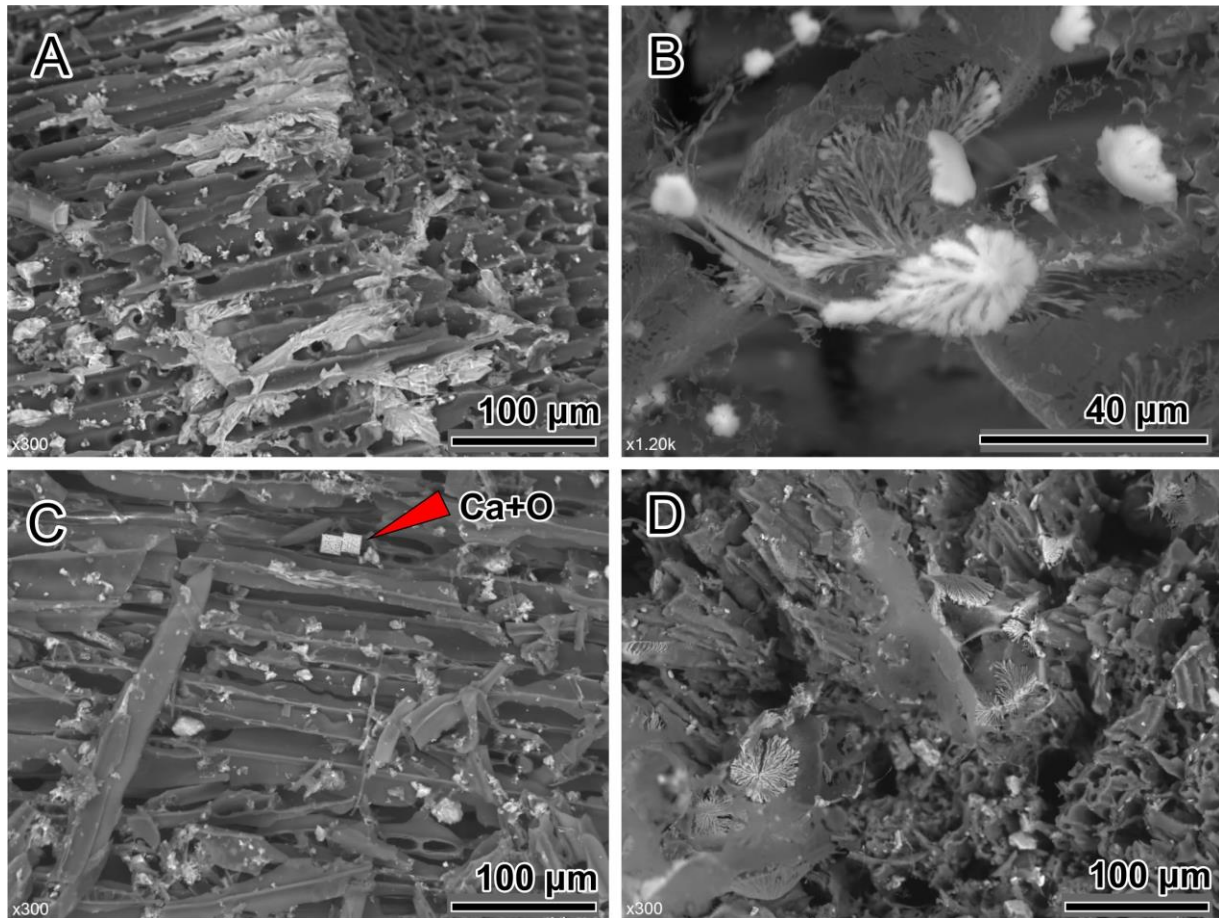


Kuva 26. Astiakokeen suotovesien arseenin ja nikkelin laboratorioissa mitatut totaalipitoisuudet eri näytteenottoajankohtina. Bh1 = kuusibiohiili; Bh2 = liete+hakebiohiili, Bh3 purkupuubiohiilen raekoot (R1 <2 cm ja R2 >2 cm).

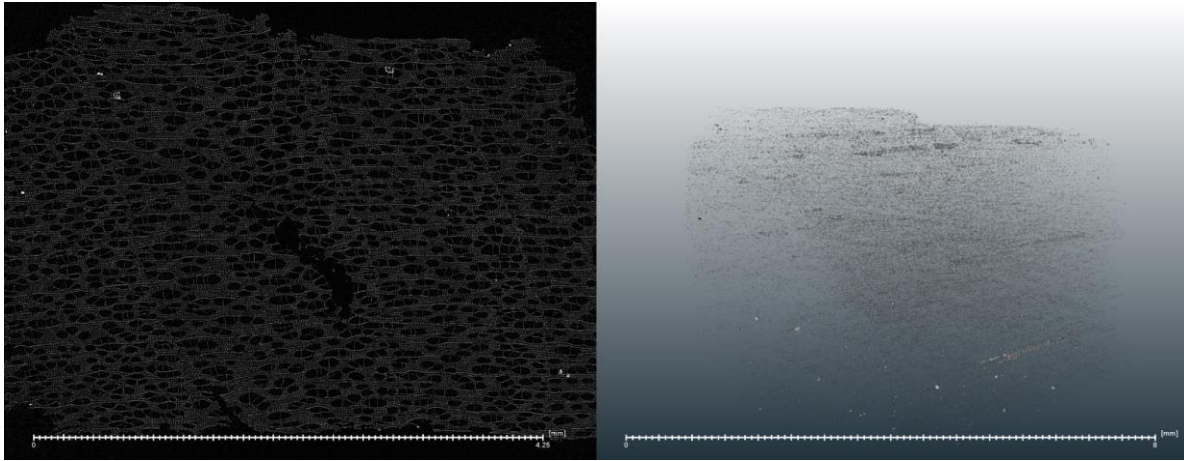
4.4.2. Biohiilten kuvantaminen

Astiakokeen 1 kuusibiohiilinäytteitä (Bh1) kuvannettiin elektronimikroskoopilla, jotta nähtäisiin mm. mahdollisia pintasaostumia. Kuvattavaksi valittiin näytteitä kolmesta rinnakkaisesta astiasta. Kuvaamista varten näytteistä valittiin ja kuivattiin rinnakkaiset hiilipalat vetokaapissa haihduttamalla ja pakastekuivaimella. Vetokaapissa kuivattujen näytteiden pinnalla havaittiin runsaasti ED-spektrin perusteella kipsiksi tunnistettuja kalsiumista, rikistä ja hapesta koostuvia ruusukemaisia tiheään aineen keskittymiä (Kuva 27A). Yksittäisten kipsikiteiden paksuus oli 10 µm luokkaa ja pituus alle 100 µm. Niiden runsauden oletettiin johtuvan siitä, että hiilen pinnalta tapahtuva hidaskuivuminen vetokaapissa rikastaa näytepinnalle sen sisältä diffuusion kautta nousevan huokosveden mukanaan tuomia sulfaatti-ioneja. Pakastekuivatuissa näytteissä jäädytetty vesi sublimoituu kaasumaiseksi suoraan näytteen sisältä, joten pintaan oli kehittynyt vain vähäisiä haaraisia kipsisaostumia (Kuva 27B), jossa mikroniluokan paksuisten lankamaisten kipsikiteiden pituus on selvästi alle 10 µm.

Sekä pakkas- että vetokaappikuivatuissa näytteissä näkyi pinnalla myös toisenlaisia hiiltä tiheämpiä ja halkaisijaltaan <20 µm olevia tunnistamattomia kiteitä, joiden ED-spektrissä erottui vain kalsium ja happi (Kuva 27C). Yksi tällainen hiilipala kuvattiin myös tomografialla. Tarkoituksena oli pyrkiä havaitsemaan vastaavia tihentymiä myös kolmiulotteisesti, ja ennen kaikkea myös näytteen sisällä. Tihentymiä myös havaittiin, ja samalla saatiin varmuus, että kuvattu pala ei ollut kokonaan kuusihiltä (Kuva 28). Myös elektronimikroskoopilla tutkituissa Bh1 astiakokeen kuusihilinäytteissä havaittiin rakenteeltaan silppuuntunutta puuainesta, mahdollisesti purkupuuta (Kuva 27D).

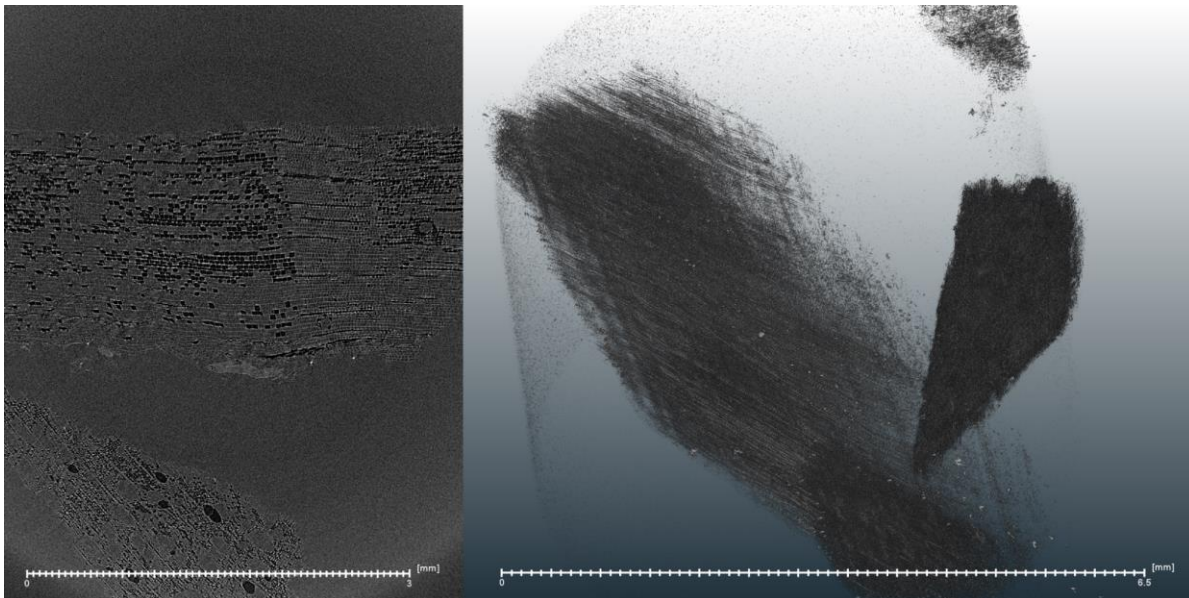


Kuva 27. BH1 kuusi biohiilen astiakokeissa kasvaneita kiteymiä elektronimikroskooppikuvissa (SEM-BSE). A. Astiakokeiden hiilen kuivaessa vetokaapissa näytteestä diffuusion kautta poistuva vesi muodostaa haihtuessaan pintaan kipsikiteymiä, jotka näkyvät BSE-kuvassa vaaleina alueina tumman kuusihien pinnalla. B. Pakkaskuivauksessa vastaavaa piirrettä on havaittavissa vai hyvin pienipiirteisinä dendriittisinä kiteyminä. C. Pieniä ja tiheitä kalsiumista ja hapesta koostuvia kiteitä (nuoli) oli havaittavissa astiakokeiden näytteissä kuivatustavasta riippumatta ja myös Bh1 lähtömateriaalissa. Tässä vetokaappikuivatussa näytteessä muut vaaleana näkyvät tiheet partikkelit ovat kipsiä, ja mineraalikontaminaatiota kuten kvartssia ja muita silikaatteja. D. Astiakokeiden BH1 kuusinäytteissä oli rakenteeltaan rikkoutunutta puristetun näköistä puuainesta. Pinnalla näkyy hentoja dendriittisiä kipsisaostumia pakkaskuivauksen jäljiltä.



Kuva 28. Poikkileike tomografiakuvasta kuivana kuvatusta biohiilestä, jossa näkyy tiheää materiaalia hiilen sisällä ja kuusesta poikkeava solukkorakenne (vasen), sekä kolmiulotteinen kuva tiheästä aineesta saman hiilipalan sisällä (oikea).

Myös tomografialla kuvattiin muutama biohiilipala (Bh1), joita oli säilytetty astiakokeen vedessä. Palat pysyivät märkinä myös kuvatessa ja niiden materiaali sisälsi selkeästi ainakin kahta eri puulajia. Molempien pinnalla oli reilustikin tiheämpiä rakeita, mutta kummankaan sisältä niitä ei kosteassa näytteessä havaittu (Kuva 29). Tämä saattoi johtua myös näytteiden pienuudesta. Lisäksi kostean näytteen kuvauksissa havaittiin, ettei pitkänkään astiakokeen jälkeen biohiili ole sataprosenttisesti saturoitunut vedellä.



Kuva 29. Poikkileike tomografiakuvasta märkinä kuvatuista biohiilipaloista, jotka vaikuttavat olevan kahta eri puulajia ja joiden pinnalla näkyy tiheitä rakeita, mutta sisällä ei (vasen), sekä kolmiulotteinen kuva samoista hiilipaloista (oikea).

4.4.3. Metallien kertyminen kasveihin

Vaikuttaako biohiili metallien biosaatavuuteen kasveille?

Kasvihuonekokeessa 1 analysoitiin rikastushiekkakerroksen päälle perustetuissa kasvualustoissa (12 cm) kasvaneiden kasvien (timotei, apila ja mänty) alkuaineiden pitoisuudet. Lentotuhkaa (T1) sisältävissä kasvualustoissa männyntaimien solukoihin kertyi lähinnä B, Ca, Mg, K, Na ja S. Kohonnut As-pitoisuus rikastushiekassa ilmeni kertymisena kasvisolukoihin vain heikosti: lähinnä vain vanhoissa männyn neulasissa As-tasot olivat koholla. Kasvit eivät näytä akkumuloivan solukoihinsa tavanomaisista poikkeavia alkuainepitoisuuksia tutkituista alustoista (tulokset julkaistu Heiskanen ym. 2022). Sama tulos on saatu aiemmin myös Biopeitto 1 -hankkeen aikana Rautuvaaran koealueella kasvavista heinistä otetuista kasvinäytteistä, joiden metallipitoisuudet olivat tavanomaisia (Hagner ym. 2021).

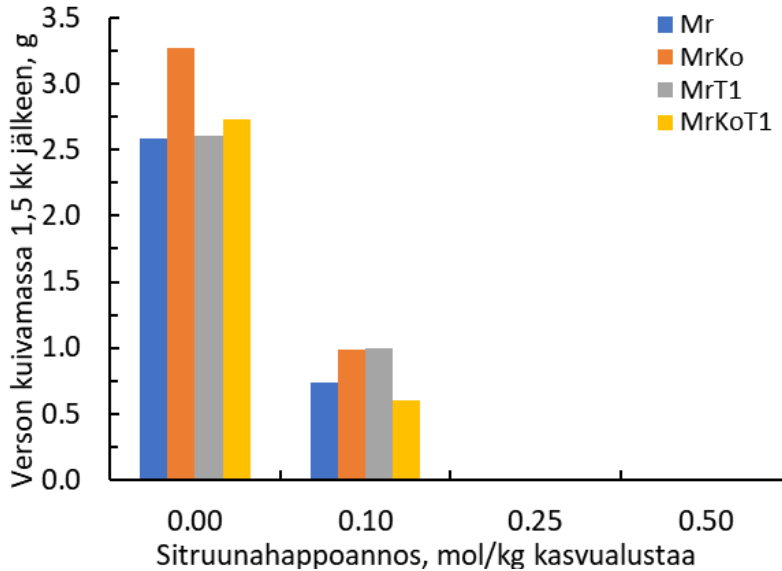
Kasvualustaan lisätyt biohiilet eivät vaikuttaneet yhdenmukaisesti alkuaineiden kertymiseen kasveihin. Joidenkin metallien pitoisuudet kasvisolukoissa laskivat, mutta vaikutus näytti vaihtelevan lisätyn biohiilen, kasvilajin ja solukoiden mukaan. Yleensä alkuainepitoisuudet olivat solu-koissa suhteellisen yhdenmukaisia ja tavanomaisilla tasoilla eri kasvatusalustoissa kasvaneilla kasveilla (Hagner ym. 2021; Heiskanen ym. 2022).

As-pitoisuus oli suhteellisen korkea rikastushiekassa (104 mg/kg) ja T1:ssä (52 mg/kg). As:n luonnollinen taso maaperässä vaihtelee yleensä välillä 0,1–25 mg/kg, mediaanin ollessa 1 mg/kg (VnA 214/2007). Pysyvän jätteen liukoisuuskriteerien perusteella määritetty maaperän viitearvo on 5 mg/kg (Reinikainen 2007). Silti As oli akkumuloitunut vain kohtalaisesti rikastushiekassa kasvaneiden männyn juurien ja vanhojen neulasten solukoihin (2,06–4,63 mg/kg kuiva-ainetta; Heiskanen ym. 2022). Näissä kasvualustoissa myös timoteilla oli kohonnut As-taso juurissa, mutta ei versoissa. Juurinäytteisiin kiinnittyneiden rikastushiekkahiukkasten aiheuttama kontaminaatio (huolimatta juurien pesusta) on voinut myötävaikuttaa kohonneeseen As-tasoon (Heiskanen & Rikala, 2000).

Kuten aiemmin Hagner ym. (2021) ovat osoittaneet, Rautuvaaran suljetulla rikastushiekka-altaalla raskasmetallien (Al, Cr, Cu, Ni, Pb, As) pitoisuudet kertyvät versojen sijaan enimmäkseen juuriin (jopa 5–40 kertaa enemmän). Tästä syystä on todennäköistä, että Rautuvaarassa sijaitsevan koealueen rikastushiekkakerroksesta ei siirry haitallisia pitoisuuksia raskasmetalleja yläpuoliseen kasvualustaan tai kerry kasvien versoihin. Siten kasvien karikkeessakaan ei voi odottaa esiintyvän haitallisia pitoisuuksia em. alkuaineita. Joseph ym. (2021) mukaan biohiilen levittäminen maaperään voi vähentää raskasmetallipitoisuuksia kasvisolukoissa 17–39 %. Tässä tutkimuksessa kasvualustaan lisätyllä biohiilellä ei ollut selvää vaikutusta alkuaineiden biokertymiseen ensimmäisen kasvukauden aikana. Kasvualustaan lisätty biohiili saattaa kuitenkin myöhemmin vähentää kasvin raskasmetallien ottoa (Natasha ym. 2021).

4.4.4. Tuhkan sisältämien metallien suotautuminen

Miten kasvualustan happamuus vaikuttaa lentotuhkan sisältämien metallien liukoisuuteen ja biosaatavuuteen?



Kuva 30. Kasvualustan happamuuden vaikutus timotein kuivamassaan.

Kokeessa kasvualustaa lisättiin eri määriä sitruunahappoa. Korkeimmassa 0,50 mol/kg sitruunahappokäsittelyssä timoteit kurjistuvat välittömästi. Käsittelyssä 0,25 mol/kg timoteit alkoivat kärsiä jo vuorokauden kuluttua lisäyksestä. Myös 0,10 mol/kg käsittelyssä timoteit osoittivat heikentyneitä kasvua ja kuntoa sekä kloroottisuutta (Kuva 30).

Sitruunahappo laskee kasvualustan pH:ta sekä nostaa johtokykyä. Korkea johtokyky (suolapitoisuus) on kasveille haitallista, koska väkevä liuos pidättää vettä osmoottisesti ja korkeat ainekonsentraatiot ovat toksisia. Alhainen pH on kasveille myös toksista. Toisaalta alhainen pH vapauttaa alkuaineita moreenista, tuhkasta ja kompostista, mikä puskuroi kasvualustaa pH:n laskua vastaan. Siten mm. vapautunut Ca, Mg ja K alkavat nostaa kasvualustan pH-arvoa: esimerkiksi käsittelyssä 0,25 M/kg läpivaluntaveden pH nousi karkeasti ottaen tasolta pH 3 vajaassa kuukaudessa tasolle pH 5.

As-pitoisuudet läpivaluntanesteessä olivat kontrollissa alle määritysrajan (0,01 mg/L). Korkein happokäsittelytaso (0,50 mol/kg) nosti As-pitoisuuden suurimmillaan tasolle 0,09 mg/L. Lisäksi vajaassa kahdessa kuukaudessa korkeimmat pitoisuudet laskivat alle 0,07 mg/L. Myös laimeammat happokäsittelytasot (0,10 ja 0,25 mol/kg) nostivat aluksi läpivaluntanesteen As-pitoisuutta enimmillään pitoisuuteen 0,07 mg/l, mutta kokeen edetessä ja pH:n noustessa Al-pitoisuudet laskivat alle määritysrajan.

Kontrollissa Pb-pitoisuudet suotovesissä olivat alle määritysrajan (0,005 mg/L), kun taas suurimmalla happokäsittelyllä (0,50 mol/kg) Pb-pitoisuus nousi korkeimmillaan tasolle 0,47 mg/L, joka laski puolessatoista kuukaudessa alle 0,29 mg/L. Tasolla 0,25 mol/kg Pb-pitoisuus suotovedessä oli kokeen alussa, 0,29 mg/L, mutta kokeen kuluessa laski pitoisuuteen 0,16 mg/l. Suomen pohjavesissä on lyijyä keskimäärin 0,02–2,3 µg/l (Lahermo ym. 1996). Juomaveden raja-arvo lyijylle on <0,01 mg/L (STM 461/2000).

Johtopäätöksenä voi todeta, että happamuus ja sen aiheuttama korkea johtokyky ja korkeat metallipitoisuudet (erit. lyijy) olivat toksisia ja estivät siten timotein kasvua. Erittäin happamissa olosuhteissa lyijyä voi myös huuhtoutua veden mukana. On kuitenkin huomioitava, että 0,25 ja 0,50 mol/kg happolisäykset olivat suuria laskien kasvualustan pH:n alle kolmeen, nostivat maan suolapitoisuutta ja vaikuttivat myös maan rakenteeseen eivätkä tulokset näin ollen ole verrattavissa kenttäolosuhteisiin vaan asia vaatii lisätutkimusta.

5. Biopeiton alueellinen tuotanto

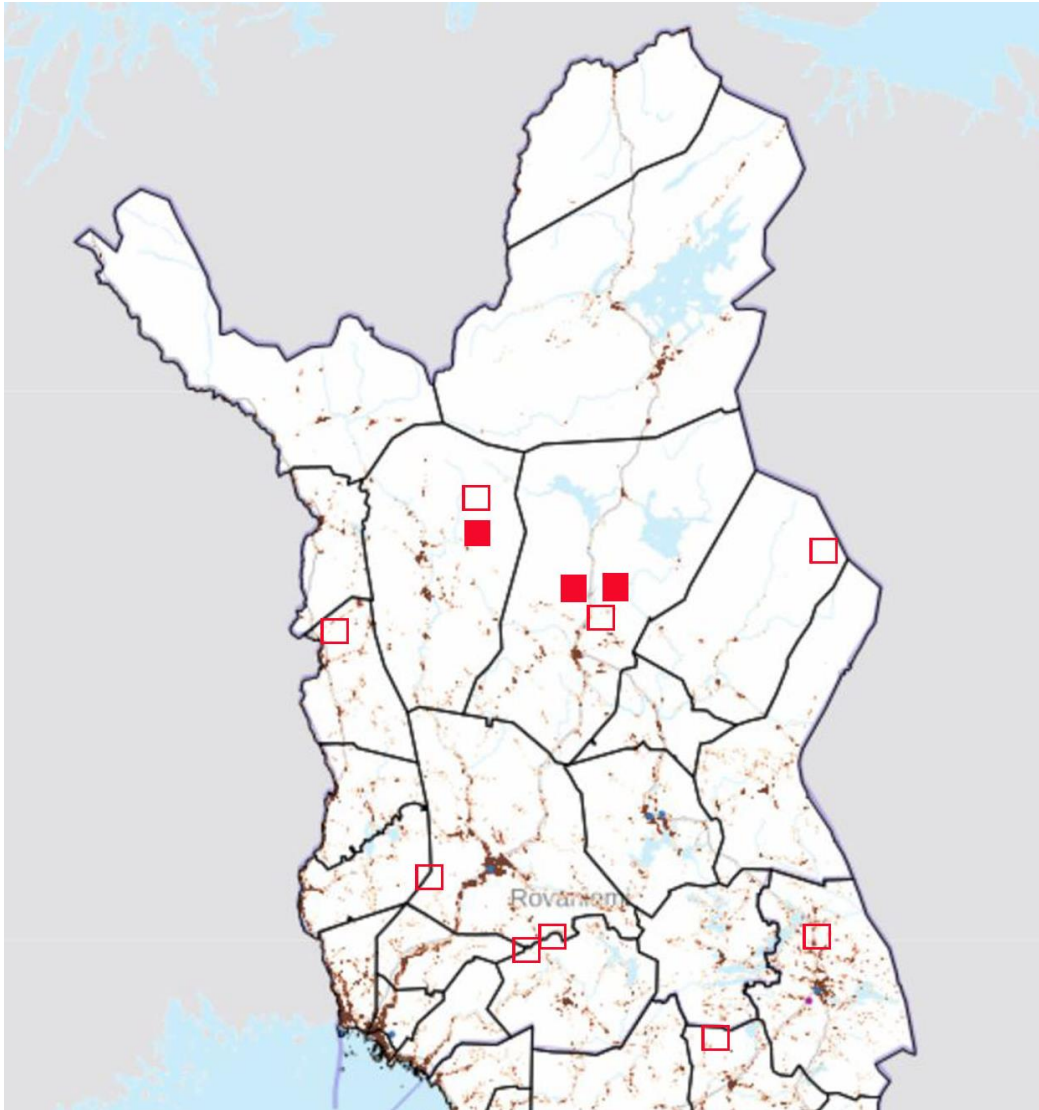
Kiertotalous on kokonaisvaltainen talousjärjestelmän murros, joka perustuu raaka-aineita, sivuvirtoja ja jätteitä hyödyntäviin teollisiin symbiooseihin ja aineiden kiertoon perustuvaan hiili-neutraaliin talouteen. Murroksen tavoitteena on saada talous toimimaan luonnon kantokyvyn rajoissa ja hillitä ilmastonmuutosta (Jyske ym. 2023; Winqvist ym 2023). EU:n ja kansallinen sääntely ohjaavat vähentämään jätteen syntymistä ja tehostamaan kierrätystä muun muassa jätemaksujen korotuksilla ja orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellolla. Niinpä jätteiden hallinnasta on tullut nopeasti kasvava kustannus yhdyskunnille ja teollisuudelle.

Kaivosalueet ovat Suomessa keskittyneet Lapin ja Itä-Suomen alueille ja biotalousyritykset Etelä-Suomeen. Pitkät etäisyydet eri toimijoiden välillä jarruttavat kaivosteollisten symbioosien syntyä mm. kuljetuskustannusten vuoksi. Esimerkiksi Lapin alueella syntyy vuosittain lähes 100 000 tonnia biopeittoon soveltuvia orgaanisia sivuvirtoja (osa aivan kaivosalueiden läheisyydessä, Kuva 31), joille voi olla haastavaa löytää käyttökohteita.

Biohiilestä ja lietekompostista valmistettujen kasvualustojen käyttöä kaivosalueilla jarruttaa niiden hinta. Biopeittoa tarvitaan kaivostoiminnassa paljon, koska alueet ovat laajoja. Siksi biopeiton tuotannon kustannustekijöiden tunteminen ja kustannusten hallinta on tärkeää.

Kaivosmaakunnissa tuotettu biohiili, komposti ja tuhka vähentävät kuljetuksen ja varastoinnin kustannuksia, ja purkupuun käyttö biohiilen valmistukseen pitää jätetuun kierrossa pidempään verrattuna siihen, että se poltettaisiin heti energiaksi. Myös lietteen kompostoituminen voi nopeutua, mikäli biohiili sekoitetaan mukaan kompostoinnin alussa (Nguyen ym. 2022).

Biopeiton valmistuskustannuksia voidaan hallita sen tuotantoon räätälöidyn yritysverkoston avulla. Siksi hankkeessa törmäytettiin kaivosalan ja biokiertotalouden toimijoita. Purkutyön kohteena olevasta rakennuspuusta ja jätevesilietepohjaisesta kompostista syntyi kasvualustaa kaivokselle, kun kahdeksan yritystä ”puhalsi yhteen hiileen”. Yhdessä tuotetut biohiiltä ja tuhkaa sisältävät kasvualustat päätyivät Boliden Kevitsa Mining Oy:n kaivosalueella toteutettuun sivukiven peittokokeeseen. Lisäksi hankkeessa arvioitiin valmistusketjun toiminnan talous- ja ympäristövaikutuksia.



Kuva 31. Sivuvirtojen syntyäpaikat ja kaivokset Lapissa. Ruskea väri = vuonna 2017 Lapissa syntynyt yhdyskuntabiojäte (70 800 tn), lentotuhka (21 800 th) ja purkupuu (2 300 tn), täyspunainen neliö = toimiva kaivos, punareunainen neliö = suunnitella oleva kaivos (Lähde: Luken biomassatlas, Paliskuntain yhdistys 2021).

5.1. Arvoketjun luominen ja pilotointi

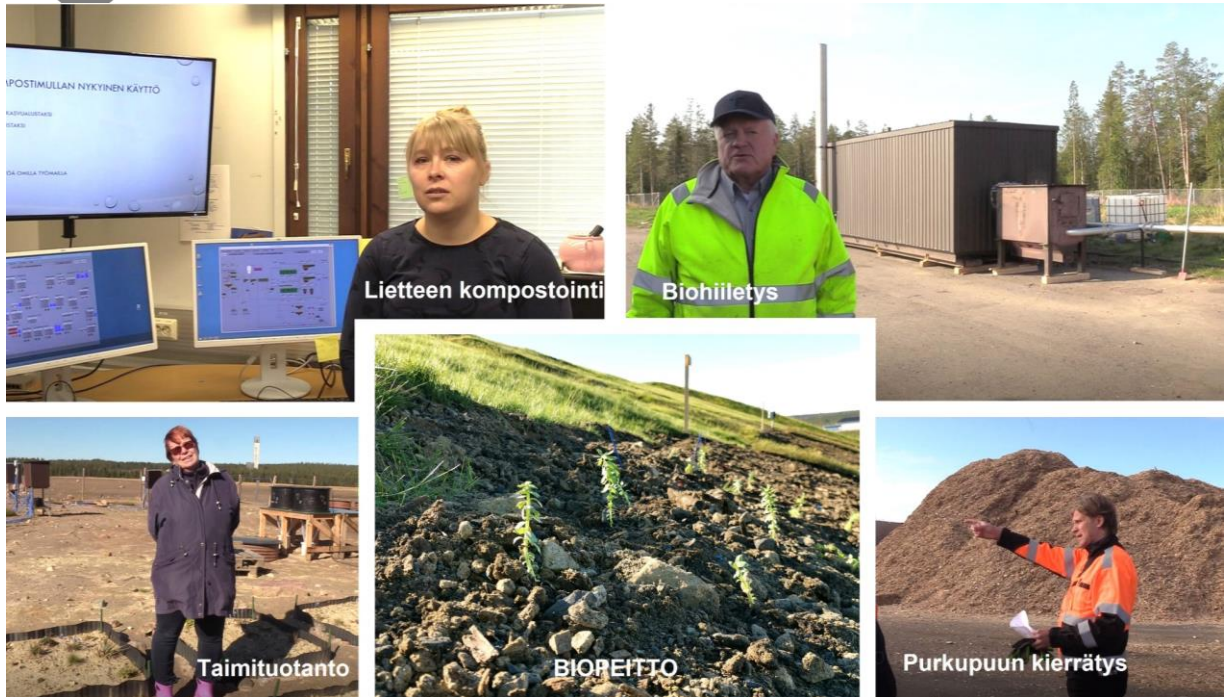
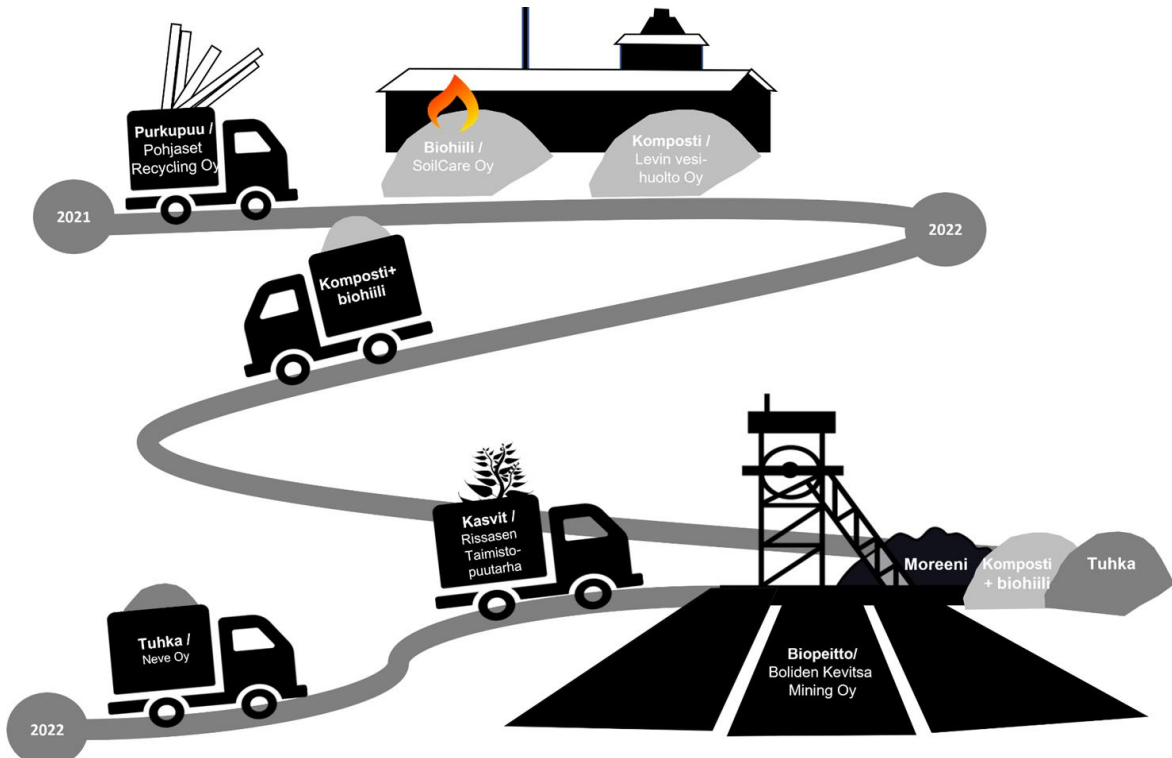
Hanke järjesti yrittäjille webinaareja, työpajoja ja vierailuja. Webinaareissa perehdyttiin biohiileen ja tuhkaan sekä pohdittiin niiden käyttöä kaivosten peittoratkaisuissa. Tapaamisten ja keskustelujen pohjalta syntyi Boliden Kevitsa Mining Oy:n sivukivien läjitysalueen biopeittokokeilu ja pohjoinen kiertotalousketju, jonka yrityksissä myös vierailtiin. Ketjusta tuotettiin myös video (<https://youtu.be/NwYUgB4yb6s>) yhdessä Oulun ammattokorkeakoulun KASVU-hankkeen <https://www.oamk.fi/fi/tutkimus-ja-kehitys/teki-ja-hanketoiminta/kasvu> kanssa. Video esittelee purkupuun ja kompostoidun jätevesilietteen prosessointia ja matkaa kaivosalueen biopeitoksi (Kuva 32).

Ketju alkoi purkupuusta ja sen varastointiin tutustuttiin Pohjaset Oy:ssä Keminmaalla. Jätejakeet kuten liimapuu eivät sovi biohiileen raaka-aineeksi, joten purkupuu tulee lajitella eri laatu- luokkiin. Alkupään raaka-ainetuotantoon kuului myös jätevesiliete, josta Levin Vesihuolto Oy

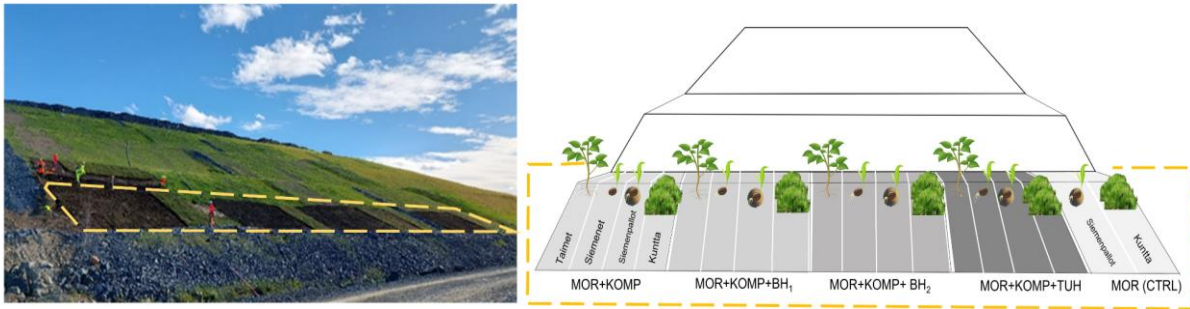
valmisti kompostia. Kittilän jätevedenpuhdistamolle oli tuotu SoilCare Oy:n panostoiminen orgaanisen biomassan hiillostuslaite eli pyrolyysiretortti. Purkupuusta valmistettiin pyrolyysissä purkupuubiohiiltä, joka myöhemmin sekoitettiin Levin Vesihuolto Oy:n jätevesilietekompostiin. Mobiili pyrolyysiretortti toimi hyvin pienen koe-erän valmistamisessa, mutta se ei välttämättä sovi teollisuusmittakaavaiseen tuotantoon. Yritykset tutustuivat myös vedenpuhdistamon ja pyrolyysiretortin toimintaan. Hankkeen aikana hankeväki vieraili myös Neve Oy:n Suosiolan voimalaitoksella, joka tuottaa sähköä ja lämpöä paikallisilla polttoaineilla, puulla ja turpeella. Niiden poltosta syntyvä lentotuhka on mukana toimintaketjupilotissa.

Boliden Kevitsa Oy oli rakentanut sivukiven läjitysalueelle bentoniittimatosta, lujiteverkosta ja 0,5–1 m vahvuisesta moreenikerroksesta kuivapeiton, jonka pintaan levitettiin 10 cm eri raaka-aineista valmistettua kasvualustaa. Seos sisälsi pelkkää jätevesilietekompostia tai siihen sekoitettua AB-luokan purkupuusta valmistettua biohiiltä, lehtipuubiohiiltä (kaupallinen kontrolli) tai puun- ja turpeenpoltossa syntyvää lentotuhkaa.

Tuhkaa lukuun ottamatta kasvualustan raaka-aineet täyttivät EU:n lannoitusvalmisteasetuksen laatu- ja turvallisuusvaatimukset. Jätevesilietekompostin ja kuusibiohiilen kasvualustakäytölle on olemassa tyyppinimi hyväksyntä, ja myös lentotuhkaa voidaan nykyisin käyttää metsälannoitteena. Energiantuotannossa syntyy kuitenkin myös sellaista lentotuhkaa, jonka raskasmetallipitoisuudet ylittävät lannoitevalmisteasetuksen raja-arvot. Kiertotaloudessa myös sille tarvitaan käyttökohteita. Aiheesta keskusteltiin Lapin Ely:n kanssa ja lentotuhkan testaamiseen sivukiven kuivapeitossa saatiin lupa, sillä käyttömäärä ja pinta-ala oli pieni ja tuhka sisälsi vain pieniä määriä raskasmetalleja (vain As ja Pb yli raja-arvon) liukoisessa muodossa. Näin ollen pienen mittakaavan pilottikäytön ei katsottu aiheutuvan merkittäviä päästöjä ympäristöön.



Kuva 32. Yläkuva: kiertotalouden arvoketjun pilotointi (Piirros: Marja Uusitalo/Luke). Alakuva: Biopeaton valmistajiin kuuluvat *Pohjaset Oy* Torniossa (purkupuuvu), *Levin Vesihuolto Oy* Kittilästä (komposti), *Neve Oy* Rovaniemeltä (tuhka), *SoilCare Oy* Mikkelistä (biohiilen pyrolysointi), *Rissanen Taimistopuutarha* Sodankylästä (kasvit) ja *Napapiirin Kuljetus Oy* Rovaniemeltä (logistiikka).



Kuva 33. Sodankylään Boliden Kevitsa Mining Oy:n sivukiven läjitysalueelle perustettiin koe, jossa testataan erilaisia kasvualustaseoksia ja kasvillisuutta. Se oli arvoketjun päätepiste.

Kasvualustaseokset levitettiin lohkoihin, joiden viherryttämisessä käytettiin osin samoja luonnonkasveja kuin Rautuvaaran koalueen kasvillisuuskokeissa. Testaukseen valittiin kasvutavoiltaan ja kasvupaikkavaatimuksiltaan erilaisia metsävarpuja, heiniä ja ruohovartisia lajeja (Kuva 33). Kokeessa haluttiin selvittää, miten erilaiset kasvualustat vaikuttavat luonnonkasvien menestymiseen. Lisäksi tutkittavana oli erilaiset kasvillisuuden perustamistavat, joita olivat siemenkylvö, pottitaimien istutus, kuntan siirto ja siemenpallojen levitys dronesta. Siemenpallojen levityksen ja tuotannosta vastasi Xamk:n BioGo-hanke (<https://www.youtube.com/watch?v=-2FDzCwnd9E>). Vertaamalla lajeja toisiinsa saadaan lisätietoa siitä, millä kasvilajeilla on juurtumis- ja leviämiskykyä kyseisissä vaativissa olosuhteissa.

Valituista luonnonkasvilajeista suurin osa oli ns. pintajuurisia niittykasveja, joiden juuret muodostuvat lähelle maan pintakerrosta, 10–15 cm syvyyteen. Testatut lajit olivat punanata, ajuruoho, kissankello, keväthanhikki, päivänkakkara, nurmivihvilä, kultapiisku, puna-ailakki ja ruusujuuri, joita kaikkia lisättiin sekä pottitaimina että siemeninä. Lisäksi siemenenä kylvettiin lampaannataa. Puna- ja lampaannadat olivat koalueelle valituista kasveista syväjuurisimpia. Niitä tarvittiin niittysiemeneseoksessa ns. tukiheininä, jotka itävät nopeasti ja sitovat tehokkaasti pintamaata estäen maapartikkeleiden huuhtoutumisen veden mukana rinnettä alas. Natojen juuristosta suurin osa on ravinnejuuria, jotka sijaitsevat ylimmässä 20 cm:ssä. Vesijuuret ulottuvat syvemmälle. Kun heinät saavat ravinteita ja vettä pintamaasta, syvemmälle suuntautuvia vesijuuria muodostuu vähän, jos ollenkaan. Muun muassa tähän pyritään lisäämällä peittokerroksen pintaan kompostia ja biohiiltä (Kuva 34).



Kuva 34. Vasemmalla kasvusto, jossa nurmikasvit ovat kasvaneet biohiiltä sisältäneessä kompostissa ja oikealla pelkässä kompostissa, jolloin kasvit muodostavat enemmän juurimassaa tavoitellessaan vettä ja ravinteita (Hagner ym. 2022) (Piirros: Marja Uusitalo/Luke).

5.2. Taloudellinen kannattavuus

Tavoitteena oli verrata kolmen eri biokiertotalouteen perustuvan kasvualustan kustannuksia kaivosalueella levitetynä, sekä verrata näitä kustannuksia perinteisesti käytettyyn ratkaisuun, eli turpeen ja moreenin sekoituksen kustannuksiin. Talouslaskelmat tehtiin elinkaarikustannuslaskennan mukaisesti biohiilen tuotantoketjun sekä kaikkien kuljetus- ja kuormauskustannusten osalta. Elinkaarikustannukset huomioivat kustannustekijät koko tuotannontekijän eliniän ajalta. Markkinahintoja käytettiin muille kustannustekijöille, esimerkiksi kompostille, tuhkalle, turpeelle ja moreenille sekä muille tuotantopanoksille, biohiilen kaupallisille sivutuotteille (terva, tisle) sekä päästöoikeuksille. Markkinahinnat eivät sisältäneet arvonlisäveroa eivätkä kuljetus tai lastauskustannuksia. Markkinapohjainen hinnoittelu lähdetietoineen on kuvattu tarkemmin liitteessä 2. Kustannukset on arvioitu vuoden 2021 hintatason mukaan.

Moreeni

Moreenin kustannus määriteltiin markkinahinnan mukaan noutopaikalta noudettuna. Lisäksi huomioitiin materiaalin kuljetus, sekoitus- ja levityskustannukset noutopaikalta kasvualustan levitykseen.

Kompostointi

Jäteveden kompostointi on osa jätevedenpuhdistuksen prosessia, huolimatta siitä hyödynnetäänkö kompostia kasvualustana kaivosalueella vai ei, eikä tuotantokustannuksia ole järkevää jyvittää kompostille. Kompostilla on kuitenkin taloudellinen arvo maanparannusaineena, joka on syytä huomioida eri kasvualustojen kustannusvertailussa. Talouslaskelmissa kompostoidun jätevesilietteen kustannus biopeittomateriaalina määriteltiin markkinahinnan mukaan. Materiaalihinnan lisäksi kompostin kustannuksiin huomioitiin myös materiaalin kuljetus, sekoitus- ja levityskustannukset noutopaikalta kasvualustan levitykseen.

Tuhka

Tuhka on energiapolton jätevirtaa eikä sillä katsottu laskelmissa olevan taloudellista arvoa. Polttoprosessissa muodostuvan tuhkan kustannukset nähdään kuuluvan energiantuotannon kustannuksiin eikä niitä otettu siten huomioon tässä kasvualustan valmistuksen ja käytön kustannuslaskennassa.

Biohiili

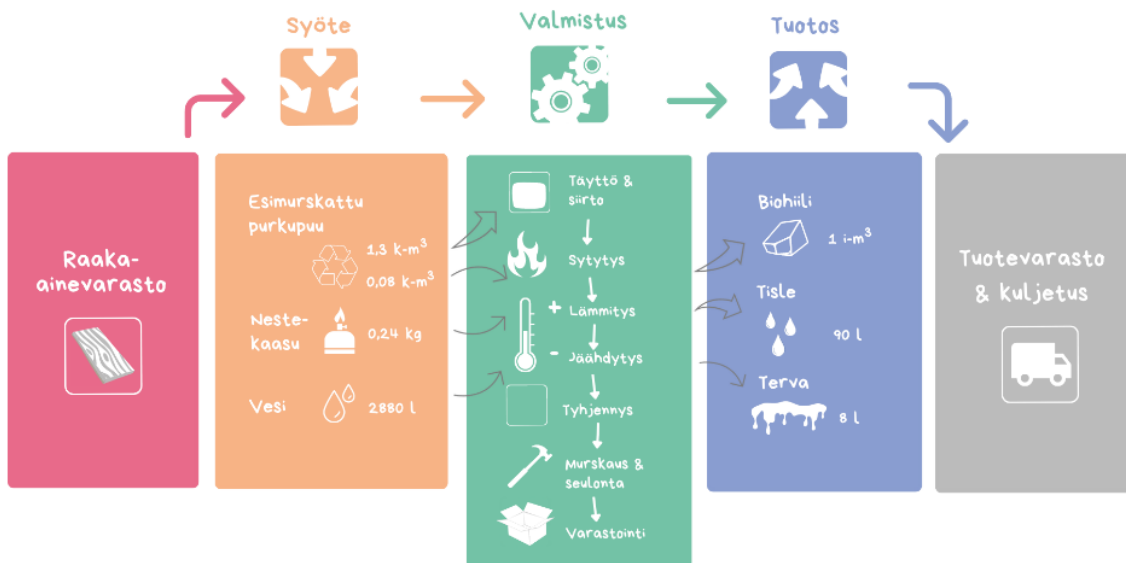
Purkupuu käsitetään kierrätyspuuna eli kierrätettynä päätuotteena ja jätteenä eikä sillä ole taloudellista arvoa. Purkutyön ja jätteen kuljetusten kustannukset ekoasemalle kuuluvat rakennuksen purun kustannuksiin, eikä niitä huomioitu tässä kustannuslaskennassa.

Laskelmissa oletetaan, että pyrolyysiretortti on ekoaseman/purkupuuyrityksen pihassa. Pyrolyysiprosessin osalta huomioitiin esimurskauksen kustannukset, kuormaus häkkiin pyöräkuormaimella, sekä sytytysaine ja polttopuukustannukset, jäähdytys vedellä, purku häkistä, sekä seulauksen ja loppumurskauksen kustannukset. Lisäksi huomioitiin lastaus, kuljetus, purku sekä sekoitus- ja levityskustannukset biohiilen noutopaikalta kasvualustan levitykseen.

Purkupuun esimurskauksessa käytettiin järeää murskainta. Murskaimen kustannustekijät ja tuottavuus on esitetty liitteessä 3. Jälkimurskauksen ja siihen yhdistetyn seulonnan kustannus oletettiin olevan 75 % esimurskauksen kustannuksista.

Murskattu purkupuu pyrolysoitiin SoilCare Oy:n valmistamalla kuorma-autokuljetettavalla panneskäyttöisellä siirrettävällä retortilla (Liite 3). Retortti soveltuu pienimuotoiseen teollisen

mittakaavan biohiilen tuotantoon ($\leq 850 \text{ m}^3/\text{a}$). Pyrolyysiprosessi retortilla on esitetty kaaviona kuvassa 35. Tyypillinen tuotantocykli kestää 12 tuntia. Raaka-ainepanos on 6,5 kuutiota murskattua tai haketettua puun kiintoainesta ($411 \text{ kg}/\text{m}^3$), jolla valmistuu irtotilavuutena 5 kuutiota biohiiltä ($240 \text{ kg}/\text{m}^3$). Sivutuotteina valmistuu tervaa ja tisleenesteitä. Raaka-ainepanoksen lisäksi retortti kuluttaa yhdessä tuotantocyklissä 0,4 kuutiota puuta ja 1,2 kg nestekaasua retortin sytytykseen. Jäähdytykseen kuluu vajaa kolme kuutiota vettä tuotantocykliä kohden. Henkilötyöajanmenekki on yhteensä 16 h tuotantocykliä kohden, sisältäen 1 h 20 min pyöräkuormaintyötä. Retortin tekninen käyttöikä on kahdeksan vuotta.



Kuva 35. Materiaalivirrat pyrolyysissä. Pilotin panostoismissa retortissa yksi panos on n. 6,5 kiinto-m³ esimurskattua puuta, jonka biohiilituotos on n. 5 irtto-m³ (Piiros: Marja Uusitalo/Luke).

Kuljetukset, kuormaus, sekoitus ja levitys

Kasvualustojen eri komponenttien (moreeni, komposti, tuhka ja biohiili) sekä turpeen kuljetukset, kuormaus, sekoitus ja levitys on laskettu kaluston elinkaarikustannusten ja eri työläjien tuottavuuksien perusteella. Koneiden kustannukset ja tuottavuudet on esitetty Liitteessä 3. Kuormauksessa ja maansiirtotöissä käytettiin keskikokoisia koneita. Kaivosalueen sisäisessä kuormauksessa pyöräkuormaajan odotusaika kuormausten välissä oli 3 min, muissa kuormauksissa ei huomioitu odotusaikaa pyöräkuormaajalle.

Kuljetuksiin on sovellettu Laitilan (2016) kuljetuskaluston kustannuksia päivitettyinä vuoden 2021 polttoaine- ja työvoimakustannuksiin. Oletuksena on, että kuljetukset tapahtuvat kaikki täydellä kuormalla ja paluukuorma on tyhjä. Kustannukset lasketaan keskimääräisellä kustannustasolla (kuorma ei vaikuta kustannustasoon, vain matka ja aika). Kuljetusetäisyydet ja eri materiaalien kuljetuskapasiteetit on esitetty Liitteessä 4. Maantiekuljetuksissa käytettiin täysperävaunuyhdistelmää (76 t). Nopeus maantiekuljetuksissa oli 60 km/h. Terminaalissa vietetty aika riippui kuormauksen tuottavuudesta ja odotusaika oli lisäksi 6 minuuttia. Murskain siirrettiin puoliperävaunuyhdistelmällä (48 t) työmaalta toiselle. Siirtoa kohden valmistelu-aikaa kului tunti. Kuljetuskalusto odotti murskauksen ajan työn valmistumista kohteella. Kaivosalueella sisäisissä kuljetuksissa (sekoitettu kasvualustamateriaali) käytettiin sora-autoa. Kuljetusten

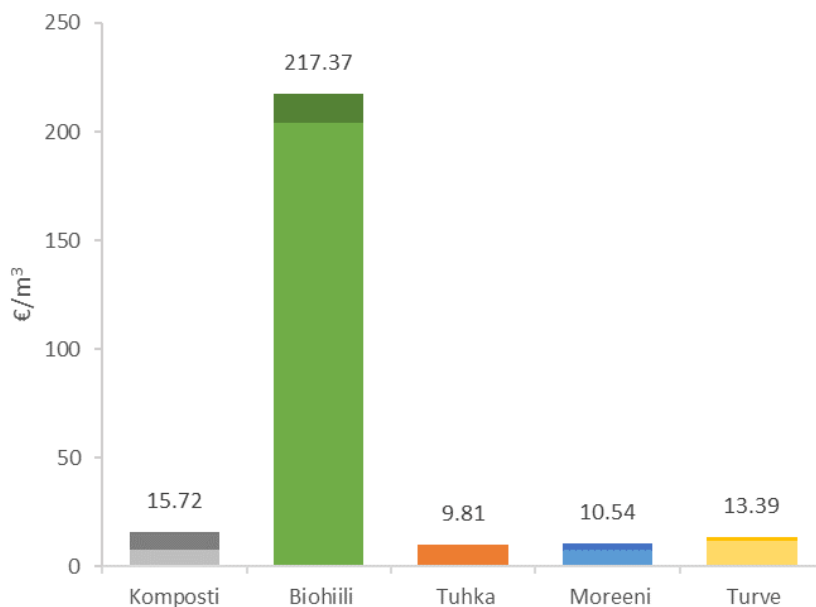
nopeus kaivosalueella oli 30 km/h. Kaivosalueen terminaalissa vietetty aika riippui kuormauksen tuottavuudesta ja odotusaika oli lisäksi 3 minuuttia.

Kasvualustasekoitteet

Lopulliset talous- ja LCA-tarkastelun kasvualustat sekoitettiin eri ainesosilla ja sekoitussuhteilla moreenista, biohiilestä, kompostista ja lentotuhkasta. Tarkasteltavat skenaariot seuraavilla ainesosien sekoitussuhteilla olivat 1) komposti-moreeni (50–50 %), 2) biohiili-komposti-moreeni (10–40–50 %), 3) tuhka-komposti-moreeni (0,3–49,7–50,0 %) sekä kontrollina 4) turve-moreeni (50–50 %).

Materiaalien kustannukset toimitettuna kaivosalueelle

Talouselaskelmat osoittivat biohiilen olevan kallein kasvualustoihin käytetyistä ainesosista tuotanto ja toimituskustannuksiltaan (Kuva 36). Biohiilen kustannus toimitettuna kaivosalueelle oli noin 217 €/m³ (906 €/tonni) (päästökompensaatiota tai sivutuotehyvityksiä ei ole huomioitu). Muiden kasvualustoissa käytettyjen ainesosien (komposti, tuhka, moreeni, turve) kustannukset kaivosalueelle toimitettuna olivat n. 10–16 € kuutiolta. Tuhka oli tarkastelluista kasvualustojen ainesosista edullisin materiaali.



Kuva 36. Kasvualustoissa käytettyjen eri materiaalien yksikkökustannukset kaivosalueelle toimitettuna (ei sisällä sekoitus ja levityskustannuksia kaivosalueella). Tummempi värisävy pylväässä ilmaisee materiaalin kuljetus- ja kuormauskustannukset valmistuspaikalta käyttöpaikkaan ja vaaleampi väri ilmaisee tuotantokustannukset. Tuhkalla ei ollut varsinaisia tuotantokustannuksia, joten sen osalta on kertynyt ainoastaan kuljetus- ja kuormauskustannuksia.

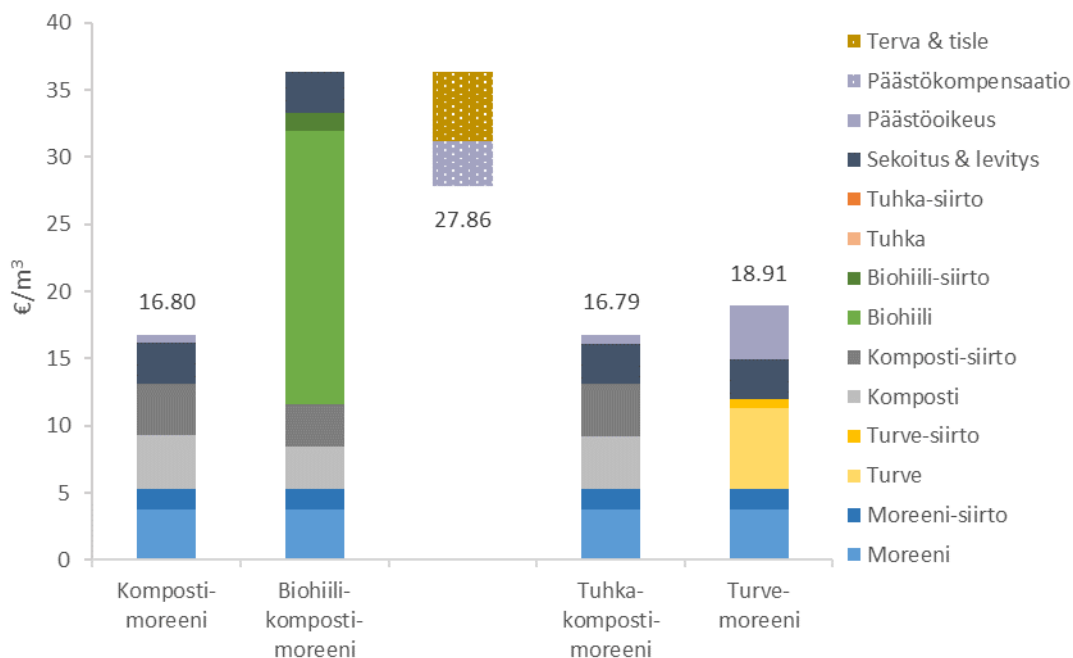
Kasvualustaratkaisujen kustannukset kaivosalueen peitossa

Kaivosalueen peittoratkaisua tarkastellaan tässä yhteydessä raaka-ainemateriaalien tuotannosta tai hankinnasta kasvualustan levitykseen asti. Ensinnäkin tulokset tarkastellaan vain käytettyjen päätuotteiden tuotanto- tai hankinta- sekä kuljetus- ja käsittelykustannusten osalta. Sen jälkeen tarkastellaan miten toimenpiteen hiilitaseesta aiheutuva päästöoikeuskustannus tai -kompensaatio sekä biohiilen tuotannon sivutuotteiden huomiointi kustannusvähennyksinä vaikuttavat kustannuksiin.

Ilman kompensatiovaikutuksia kasvualustavaihtoehtojen kustannukset kaivosalueelle levitetynä olivat korkeimmasta edullisimpaan 1) biohiili-komposti-moreeni 36,32 €/m³, 2) komposti-moreeni 16,14 €/m³, 3) tuhka-komposti-moreeni 16,12 €/m³ ja 4) turve-moreeni 14,97 €/m³. Kuvasta 37 näkyy, että biohiili-komposti-moreenisekoitteessa biohiiliainekseen materiaali aiheuttaa suuren kustannuksen, selkeästi yli puolet kasvualustaratkaisun kokonaiskustannuksesta, vaikka biohiilen tilavuus kasvualustasta on vain kymmenys. Muiden kasvualustojen osalta erot peittoratkaisujen kustannusrakenteissa ovat verraten vähäisiä.

Biohiili varastoi hiiltä pitkäaikaisesti maaperään. Kaivosalueen biohiili-komposti-moreenikasvualustaan pohjautuva peittoskenaario on tämän raportin elinkaarilaskennan mukaan hiilinielu, kun muut skenaariot ovat hiililähteitä (Luku 5.3. Hiilijalanjälki). Biohiili-komposti-moreeniskenaarion hiilensidonnan kustannuksia kompensoiva vaikutus on 3,36 € levitettyä kasvualustakuutiota kohden. Hiilijalanjälkivaikutusten kustannushyvitykset huomioden, kyseinen skenaario on edelleen tarkastelun kallein kasvualustavaihtoehto. Hiilipäästöllä on puolestaan huomattava kustannusta nostava vaikutus turve-moreeniskenaariossa, jossa päästöoikeuskustannus nostaa levitetyn kasvualustan kustannusta 3,93 € kuutiota kohden. Muissa käsittelyissä päästöoikeuskustannuksen hintaa nostava vaikutus on vain 0,67 € kuutiolta. Hiilijalanjäljen huomiointi nostaa turve-moreeniskenaarion kustannuksiltaan tarkastelun toiseksi korkeimmaksi, ja edullisimmat vaihtoehdot ovat kompostiin ja moreeniin sekä tuhkaan, kompostiin ja moreeniin perustuvat peittoratkaisut (Kuva 37).

Biohiilen tuotannossa syntyy sivutuotteina tervaa ja tisenesteitä, joilla on kaupallinen arvo. Tervan ja tisenesteiden hyvitys kustannuksista on laskelmassa 5,10 € levitettyä biohiili-komposti-moreenikasvualustakuutiota kohde. Huomioiden sekä sivutuotteen kustannushyvityksen että hiilipäästöstä aiheutuneet kustannukset ja kompensaaion, biohiili-komposti-moreenivaihtoehto säilyy vertailun kalleimpana kaivosalueen kasvualustaratkaisuna (Kuva 37).



Kuva 37. Kaivosalueen peittoratkaisujen kasvualustakustannukset kaivosalueelle levitetynä eriteltyinä materiaalin ja työvaiheen mukaan. Sisältää myös kompensaaion biohiilen tuotannon sivutuotteista ja hiilensidonnan kustannus- tai kompensatiovaikutuksen. Kustannuksiin

negatiivinen tuloja aiheuttava kompensatiovaikutus on esitetty alkuperäisen pylvään oikealla puolella.

Taloudellisen tarkastelun tulokset osoittavat biohiileen perustuvan peittoratkaisun olevan kuu-tiohinnaltaan kallein ratkaisu. Hiilikompensaation huomioiminen alensi hieman biohiilen poh-jautuvan ratkaisun kustannuksia, ja nosti muiden skenaarioiden hintaa (Kuva 37). On syytä huo-mioida, että hiilensidonnan kustannukset ja kompensatiosta saatavat tulot ovat tulevaisuu-nessa alttiita muutoksille. Biohiilen tuotannon sivuvirtojen (terva ja nestemäinen orgaanisia happoja sisältävä tisle) voidaan katsoa alentavan biohiilipohjaisen peittoratkaisun kustannuksia. Näiden tuotteiden hintoihin ja markkinoihin liittyy epävarmuuksia, mutta yhtä lailla mahdolli-suuksia uusien lisäarvoa tuovien käyttökohteiden löytymiselle. Keskeisiin kustannuksiin liittyvä jatkotutkimuksen ja teknologisen kehityksen kohde on itse pyrolyysiprosessi. Tuotannon mitta-kaavan skaalaaminen ja integrointi muuhun teolliseen toimintaa, sekä raaka-ainepohjan laajen-taminen luovat mahdollisuuksia biohiileen liittyvien tuotantokustannusten alentamiseen.

5.3. Kasvualustan hiilijalanjälki

Tavoitteena oli laskea kolmen eri kasvualustan elinkaarinen hiilijalanjälki eli ilmastovaikutukset (hiilidioksidiekvivalentti, kg CO₂-ekv.) panoksien tuotannosta kasvualustan käyttöön kaivosalu-eella ja verrata niitä turpeen ja moreenin sekoitukseen (kasvualustaratkaisut ja niiden kusan-nukset on esitetty edellä kappaleessa Taloudellinen kannattavuus). Ilmastopäästöjen lasken-nassa huomioitiin kasvihuonekaasuista hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) ja typpioksiduuli (N₂O) ja ne yhteismitallistettiin ilmastovaikutusluokkaan näiden menetelmien mukaisilla ekvivalentti-kertoimilla (Munoz & Schmidt 2016). Laskennassa noudatetaan kansainvälisiä elinkaariarviointi-menetelmän standardeja (ISO 2006a, ISO 2006b) ja IPCC:n (2006 ja 2019) laskentaohjeistuksia, sekä soveltaen tässä raportissa esitettyjä rajauksia ja oletuksia. Päästöjen arvioinneissa ei otettu huomioon laitoksen tai muun infrastruktuurin (ajoneuvot, tiehuollot ym.) valmistamisen/raken-tämisen päästöjä.

Moreeni

Moreenin maa-ainesotolle sovelletaan Ecoinventin päästökerrointa kaivosalueen hiekalle "Sand, at mine/CH U".

Kompostointi

Jätevesilietteen kompostointi on osa jätevedenpuhdistuksen prosessia, huolimatta siitä hyö-dynnetäänkö kompostia kasvualustana kaivosalueella vai ei. Jätevedenpuhdistusprosessi ja sen päästöt ovat osa monen eri tuoteketjun loppupään jätteenkäsittelyvaihetta. Jäteveden käsittely ja veden puhdistaminen on toisaalta myös palveluhyödyke, josta laitos saa tuottoa jätemaksu-jen kautta. Tämän lisäksi sivutuotteena muodostuu kompostia, jolla on taloudellinen arvo. Tästä huolimatta prosessin kokonaispäästöt ml. kompostoinnin päästöt jakautuvat taloudelli-sen allokoinnin kautta pääosin kokonaan päätuotteelle/palvelulle, jättäen itse kompostituot-teen päästöosuuden marginaalisen pieneksi ja laskennallisesti merkityksettömäksi.

Kompostin hiili ei sitoudu maaperään niin pitkäksi aikaa (kuten esim. biohiili), mutta toimii tila-päisenä hiilivarastona. Kompostin hiilipitoisuuden ja kemiallisen laadun (Heikkinen ym. 2021) perusteella arvioitiin hiilen hajoamisnopeus pelto-olosuhteissa. Hiilivaraston muutokset arvioi-tiin Yasso-mallilla, joka huomioi maahan lisätyn hiilisyötteen määrän ja laadun, sekä ilmasto-olosuhteet.

Tuhka

Tuhka on energiapolton sivu-/jätevirtaa eikä sillä ole varsinaisesti taloudellista arvoa. Poltto-prosessissa muodostuvan tuhkan päästöt nähdään kuuluvan energiantuotantolaitoksen päästölaskentaan eikä otettu siten huomioon tässä kasvualustan valmistuksen ja käytön päästölaskennassa. Tuhka päätyy yleensä rakeistuksen kautta metsälannoitteeksi tai maarakennushyötykäyttöön. Jos tuhka päätyy kaivosalueelle kasvualustaksi, ei rakeistusta todennäköisesti tarvita.

Biohiili

Purkupuun käsitetään kierrätyspuuna eli kierrätettynä päätuotteena ja jätteenä eikä sillä ole taloudellista arvoa. Purkupuun päästöjen laskentaan ei lasketa itse puuaineksen tuotannon päästöjä sillä ne kuuluvat osana päätuotteen eli puuntuotannon ja rakennuksen päästölaskentaan. Purkutyön ja jätteen kuljetusten päästöt ekoasemalle kuuluvat rakennukselle ja jätteen käsittelyn välttäminen ja siitä vältetyt päästöt myös rakennukselle. Pyrolyysiprosessin päästöjen laskennassa ei siis myöskään otettu huomioon purkupuun kuljetusten päästöjä ekoasemalle jätteenkäsittelyyn, sillä tämä tapahtuu kasvualustan valmistuksesta huolimatta.

Laskelmissa oletetaan, että pyrolyysiretortti on ekoaseman/purkupuufirman pihassa. Pyrolyysiprosessin osalta huomioitiin esimurskauksessa käytetyn sähkön päästöt, kuormaus häkkiin pyöräkuormaimella, sekä sytytys (sytytyspuun valmistuksen ja kuljetusten päästöt, joka ei ole kierrätyspuuta, sytytysnesteen valmistus, kuljetus ja käyttö), jäähditys vedellä, seulauksen ja loppumurskauksen sähkön kulutus. Esimurskauksen päästöt laskettiin haketuksen sähkön kulutuksen mukaisesti hyödyntäen "Wood chipping, industrial residual wood, stationary electric chipper {RER}| processing | Cut-off, U" joka hyödynsi keskimääräistä suomalaista sähköä. Sähkön päästöt on laskettu vuoden 2020 tietojen perusteella (Energiateollisuus 2020). Sytytyspuun valmistuksen päästöjen osalta hyödynnettiin Ecoinvent-tietokannan dataa: mäntyhakkeen osalta "Bundle, energy wood, measured as dry mass {SE}| softwood forestry, pine, sustainable forest management | Cut-off, S" ja kuusesta tehdyn hakkeen osalta "Bundle, energy wood, measured as dry mass {SE}| softwood forestry, spruce, sustainable forest management | Cut-off, S". Pyrolyysiprosessin käynnistämiseksi käytetään propaania tukikaasuna, jonka valmistuksen päästöjen arvioinneissa hyödynnettiin Simapron Ecoinvent dataa "Propane, burned in building machine {GLO}| market for | APOS, S" johon sisältyy siten myös sen polttamisen päästöt käytön aikana.

Seulan ja loppumurskauksen sähkön kulutuksen tietojen mukaisesti hyödynnettiin keskimääräistä suomalaista sähköä. Panosten (sytytyspuu ja nestekaasu) kuljetukset retortille sisällytettiin myös osaksi purkupuun polton/retortin päästöjä. Kuljetusten dieselin käytön päästöissä hyödynnetään LIPASTO -tietokantaa puoliperävaunulle (kokonaismassa 40 t ja kantavuus 25 t) (LIPASTO 2017). Ajoneuvojen oletettiin tuovan panokset osana suurempaa logistiikkaketjua. Lisäksi huomioitiin myös dieselin valmistuksen päästöt (Ecoinvent 3).

Pyrolyysiretortin lämmittämiseen käytettävän puun polton myötä muodostuu CO₂ päästöjä. Ne nähdään kuitenkin biogeenisenä ja siten laskennallisesti nollapäästöisinä, sillä ne hyödyntävät uusiutuvia biomassoja. Kaasun sisältämän metaanin määrä arvioitiin myös olemattomaksi, joten metaanipäästöjä ei laskettu mukaan. Pyrolyysiprosessin kokonaispäästöt kohdistettiin kolmelle myytäväksi päätyvälle eri lopputuotteelle (biohiili, terva, tisle) taloudellisen allokoinnin mukaisesti. Pyrolyysiprosessissa ei tuotettu sähköä tai kaukolämpöä verkkoon, joten siten energiasektori "jää ennalleen" eikä laskelmissa huomioitu korvattavasta energiasta muodostuvia päästövähennyksiä.

Pyrolyysiprosessissa ei katsota tapahtuvan varsinaista hiilensidontaa, mutta se muuttaa poltettavan puun sisältämän hiilen pysyvyyttä. Jos tätä lopputuotteena hyödynnettävää biohiiltä käytetään maanparannusaineena tai kasvualustan komponenttina, sen katsotaan palauttavan ja sitovan hiiltä maaperään pidemmäksi aikaa kuin puuhun sitoutunut hiili, jonka sisältämä hiili vapautuu puun lahotessa ilmakehään. Tässä tapauksessa biohiilen hiilijalanjälkeen otetaan mukaan päästöjen lisäksi hiilensidonnin tarkastelu eli kuinka paljon hiilidioksidia on sitoutuneena biohiileen.

Kuljetukset, sekoitus ja levitys

Kasvialustojen eri komponenttien (moreeni, komposti, tuhka ja biohiili) sekä turpeen kuljetukseen on sovellettu VTT:n LIPASTO-tietokannan päästökertoimia samoin ajoneuvo-oletuksin ja etäisyyksin kuin taloudellisessa arvioinnissa. Oletuksena on, että kuljetukset tapahtuvat kaikki täydellä kuormalla ja paluukuorma on tyhjä. Sekoituksille vedenpuhdistuslaitoksella ja kaivosalueella käytettiin VTT:n LIPASTO -tietokannan päästökertoimia maataloustraktorille (6tn), jonka dieselin kulutus arvioitiin olevan asiantuntija-arvion mukaan 0,32 l/tonni sekoitettavaa massaa. Kasvialustan levityksestä aiheutuvat polttoaineen kulutuksen suorat päästöt oletetaan tapahtuvan myös maataloustraktorilla (6tn). Maataloustraktorin polttoaineen kulutuksen litra-kohtaiset päästöt perustuvat LIPASTO -tietokantaan. Kuljetusten, sekoitusten ja levityksien polttoainekulutuksen päästöihin on sisällytetty myös polttoaineen valmistuksen ja jakelun päästökertoimet Ecoinvent 3 -tietokannasta (Wernet ym. 2016).

Kasvialustan käytön aikaiset N₂O -päästöt

Kaivosalueelle lisäystä kasvialustasta syntyy suoria, että epäsuoria kaasumaisia N₂O -päästöjä. Arvioissa sovellettiin orgaanisen lannoitteen IPCC (2019) oletuskertoimia. Suoria kaasumaisia N₂O -päästöjä muodostuu kasvialustan sisältämästä typestä, kun se levitetään maaperään. Nämä arvioidaan kasvialustan kokonaistyyppimäärään perustuen. Epäsuoria N₂O-päästöjä muodostuu typestä haihtuvasta ammoniakista ja typen huuhtoumista.

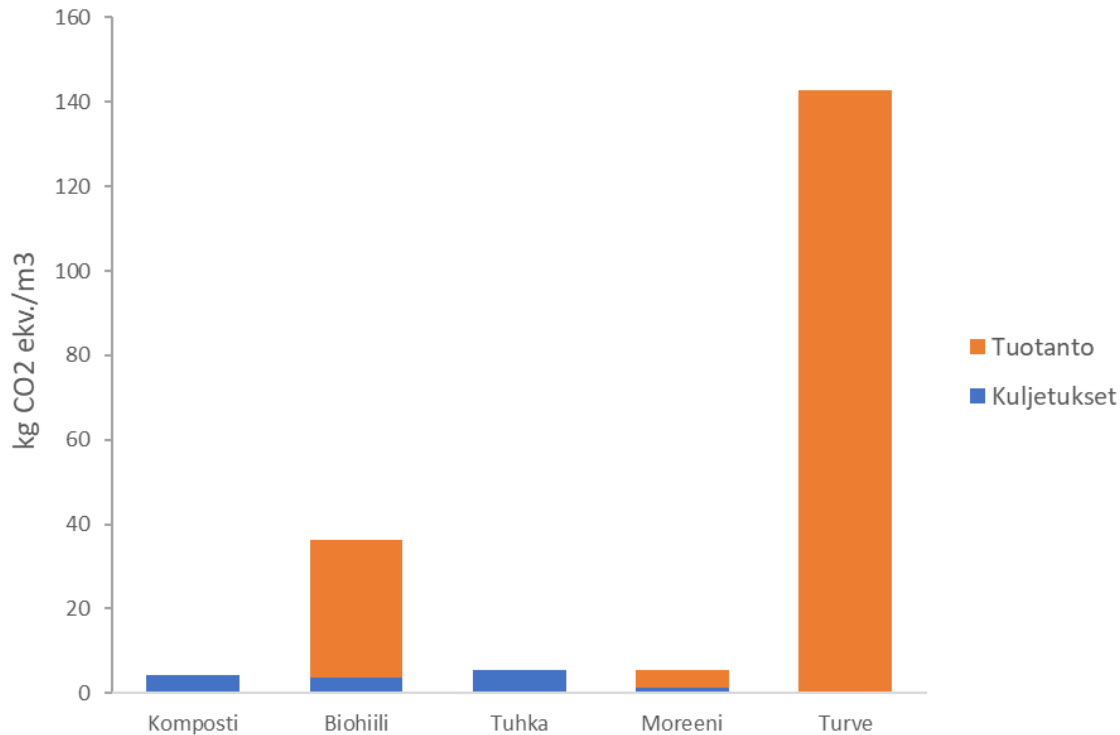
Referenssi

Kasvialustan hiilijalanjälkien tuloksia verrataan kasvuturpeen ja moreeniin sekoitukseen (50/50) per m³ tuotetta. Turpeen päästöjen laskennassa huomioitiin valmistuksen osalta kasvuturpeen kaivamisen sekä hajoamisen päästöt. Asiantuntija-arvio (Silvenius Frans, Luke) pohjaa Kirkinen ym. (2007a), Kirkinen ym. (2007b), Seppälä ym. (2010), Silvan ym. (2012), Silvan (2016) ja Pohjola (2014) tietoihin ja arvion mukaan kasvuturpeen kaivamisen päästöt olivat 19,4 kg CO₂eq/m³ (sisältää turpeen hiilidioksidi- ja metaanipäästöt kaivamisen ajalta sekä päästöt kevyen polttoöljyn ja veden kulutuksesta). Tämän lisäksi turpeen hajoamisen päästöt ovat 123 kg CO₂-ekv/m³ turvetta, oletuksena, että turpeen sisältämä hiili hajoaa 100 %:sti hiilidioksidiksi. Turve rinnastetaan laskelmissa fossiiliseksi päästöiksi, sillä turpeen uusiutuminen pysähtyy kokonaan, kun suo ojitetaan. Kasvuturpeen typpipitoisuus on vain noin 1–3 % ja tästä oletetaan kaivamisen aikana hajoavan typpioksiduulina (N₂O) ilmakehään vain 1 % (typen reagoidessa ilman hapen kanssa) eikä näitä ole huomioitu laskelmissa. Luonnontilassa soilla tapahtuvat N₂O -päästöt ovat myös erittäin pienet eikä niitä ole mallinnuksessa otettu huomioon. Turvekasvialustaan kuuluu vielä kuivaus, joka kuluttaa paljon energiaa, mutta nykytilanteessa kuivaus toimii lähes nollapäästöisellä uusiutuvalla energialla.

Materiaalien ilmastovaikutukset toimitettuna kaivosalueelle

Kun tarkastellaan kasvialustassa hyödynnettäviä jakeita erikseen, on turpeella huomattavasti suuremmat päästöt kuin muilla jakeilla. Turpeen päästöt muodostuvat lähes täysin turpeen kaivamisesta ja hajoamisesta, kun taas kuljetusten päästöt ovat lähes olemattomat lyhyestä

etäisyydestä ja turpeen keveydestä johtuen. Tästä seuraavaksi suurimmat päästöt olivat biohiillä johtuen sen tuotannon eli pyrolyysiprosessin aikaisista päästöistä. Tuhkalle ei jätevirtana tuotannon aikaisia päästöjä laskettu sillä ne nähdään kuuluvan energiantuotantolaitoksen päästölaskentaan. Kompostin tuotannon aikaiset päästöt taas olivat marginaalisen pienet johtuen jätevedenpuhdistusprosessin (ml. kompostointi) päästöjen jakautumisesta lukuisalle eri tuoteketjulle (ja niiden jätteenkäsittelylle) (Kuva 38).



Kuva 38. Kasvualustoissa käytettyjen eri materiaalien yksikköpäästöt kaivosalueelle toimitettuna (ei sisällä sekoituksen ja levityksen päästöjä kaivosalueella). Oranssi väri ilmaisee materiaalin prosessoinnin aikaiset päästöt ja sininen niiden kuljetukset käyttöpaikkaan kaivokselle.

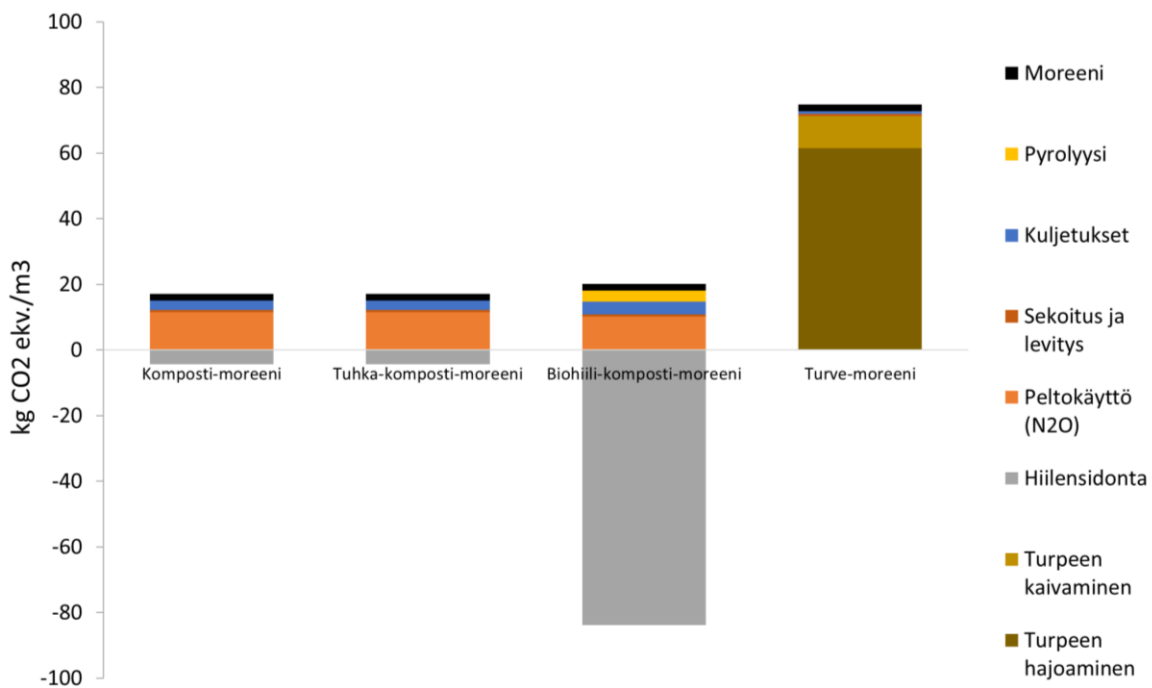
Kasvualustaratkaisujen ilmastovaikutukset kaivosalueen peitossa

Kun tarkastellaan kasvualustassa hyödynnettäviä kasvualustaseoksia, on turvetta sisältävällä seoksella edelleen huomattavasti suuremmat päästöt kuin muita materiaaleja sisältävillä seoksilla. Muiden seoksien välillä ei ollut merkittäviä eroja päästöissä, mutta seoksella, joka sisälsi biohiiltä, kompostia ja moreenia oli hieman suuremmat johtuen pyrolyysiprosessin muodostamista päästöistä. Tämä tarkastelu sisälsi myös sekoituksen ja levityksen päästöt kaivosalueella sekä levityksen jälkeen muodostuneet N₂O päästöt. Näistä jälkimmäiset ovat merkittävimmät päästölähteet, kun tarkastellaan kasvualustan elinkaaria päästöjä ketjuvaiheittain (Kuva 39).

Pysyvän hiilivaraston määritelmä on, että hiili pysyy varastossa yli 100 vuotta. Biohiilen hiili katsotaan täyttävän pysyvän hiilen määritelmän 100 %:sti ja sitoo maanparannusaineena hyödynnettynä hiiltä jopa -83,9 kg CO₂eq/m³. Kompostin hiili ei sitoudu maaperään niin pitkäksi aikaa, mutta toimii tilapäisenä hiilivarastona. Kompostin pysyvän hiilen määräksi saatiin keskimäärin 5 % kompostijakeen sisältämästä hiilestä (-4,4 kg CO₂eq/m³). Tuhkan hiilipitoisuus on niin alhainen, että hiilensidonnan potentiaali siksi merkityksetön. Turpeen sisältämä hiili puolestaan katsotaan hajoavan 100 %:sti hiilidioksidiksi ja lasketaan fossiiliseksi päästöiksi.

Kun biohiiltä ja kompostia sisältävien kasvualustojen hiilijalanjälkeen otetaan mukaan päästöjen lisäksi hiilensidonnan tarkastelu eli kuinka paljon hiilidioksidia on sitoutuneena biohiileen ja kompostiin, laskee kompostia (case 1; 12,7 kg CO₂eq/m³) ja lisäksi tuhkaa (case 2; 12,7 kg CO₂eq/m³) sisältävien kasvualustojen hiilijalanjälki jonkin verran. Huomioimalla hiilensidonta, biohiiltä sisältävä kasvualusta (case 3) muuttuu jopa hiilinieluksi (-63,85 kg CO₂eq/m³) (Kuva 38).

Hankkeen tulokset myös osoittavat, että kasvuston kehittyminen biohiilipohjaisessa peittoratkaisussa oli nopeinta. Tästä huolimatta ei kasvuston hiilensidontaa voitu suurten epävarmuuksien takia toistaiseksi huomioida laskelmissa. Kasvuston hiiltä sitova ja hiilivarantoa kerryttävä vaikutus riippuu mm. kasvilajista ja ympäristöoloista. Hiilen sitoutuminen eri kasveihin ja kasvilajien sukessio peittoalueella on vuosikymmeniä kestävä prosessi, johon pääsee käsiksi vain mallisimulointien avulla. Tähän tarkoitukseen tehtyjä malleja ei toistaiseksi ole, ja oletettavasti käytössä olevat maaperämallit eivät armaankaan pysty riittävällä tarkkuudella tarkastelemaan hankkeessa tarkasteltujen vaihtoehtojen eroja.



Kuva 39. Kaivosalueen peittoratkaisujen päästöt kaivosalueelle levitetynä eriteltyinä materiaalin ja työvaiheen mukaan. Sisältää myös biohiilen hiilensidonnan.

6. Johtopäätökset ja suositukset

Hankkeessa tutkittiin vaihtoehtoisia ratkaisuja moreenista koostuvalle peittokerrokselle, jota käytetään yleisesti kaivannaisjätealueiden sulkemiseen ja maisemointiin. Korvaavia ratkaisuja haettiin biokiertoalouden hengen mukaisesti alueella syntyvistä tai siellä mahdollisesti tulevaisuudessa tuottavista materiaalivirroista.

Jäteveden puhdistuksessa syntyvän lietekompostin ja polttolaitoksen tuhkan ohella tutkittiin biohiiltä, jonka valmistamista tai tuotannon laajentamista moni yritys harkitsee parhaillaan. Tärkeänä osana tutkimusta oli myös peittoratkaisujen vaikutukset peitettyjen kaivannaisjätealueiden suotovesien laatuun sekä siihen, miten alueelle luonteenomaista kasvillisuutta voidaan hyödyntää kaivosalueiden viherryttämisessä.

Tutkimustiedon pohjalta syntyneitä peittoratkaisuja tarkasteltiin sekä kannattavuuden että ympäristövaikutusten näkökulmista. Tarkasteluissa hyödynnettiin biopeiton valmistamiseen osallistunutta toimijaverkostoa. Pilotoinnin avulla voitiin osoittaa, että biokiertoalouteen nojaavan peittoratkaisun toteuttaminen on mahdollista alueen yritysten yhteisvoimin. Toiminta tuottaisi yrityksille uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja alueelle uusia työpaikkoja.

6.1. Sivuvirrat parantavat peiton toimintakykyä

Tutkimus osoitti, että perinteisen moreenia sisältävän peittoratkaisun kykyä toimia kasvien kasvualustana voidaan parantaa uusilla kasvualustakomponenteilla, ja että menestyvällä kasvustolla on suotuista vaikutus peittoratkaisun toimintakykyyn.

Biohiilen vaikutus kasvien kasvuun on keskeistä peittoratkaisun toiminnassa. Sen tulisi olla lähtökohtana peittoratkaisua valittaessa. Kasvillisuus sitoo pintakerroksen maa-ainesta ehkäisten eroosiota. Lisäksi runsas kasvillisuus tehostaa veden haihtumista kasvukauden aikana, mikä havaittiin myös lysimetrikokeissa. Lysimetreissä, joissa kasvualustaseos oli moreenia, kompostia ja kuusibiohiiltä ja kasvien kasvu voimakasta, maapatsaan läpi virtaavan veden määrä väheni neljän vuoden tutkimusjaksolla kolmanneksen pelkkää moreenia sisältävään peittoratkaisuun verrattuna. Pelkkä kompostilisa ei vaikuttanut suotoveden määrään, mikä myös osoittaa biohiilen hyödyn osana peittoratkaisua. Erialaisten biohiilten vertailu ja käyttösuositusten tarkentaminen edellyttävät, että kasvun seuranta koealueilla jatkuu.

Myös energiapolton ylijäämänä syntyvä lentotuhka sekä lietteenpoltossa muodostuva lietetuhka lisäävät kasvien kasvua, mikä näkyi kasvihuonekokeissa apilan ja timotein kodalla. Kasvien kasvussa oli kuitenkin isoja eroja mikä viittaa siihen, että lähtömateriaali tai kasvualusta ei ollut täysin tasalaatuista. Apila näytti reagoivan erityisesti lietetuhkaan ja timotein kasvu lisääntyi eniten, kun lentotuhka sekoitettiin puubiohiiliin. Näin ollen myös liete- ja lentotuhka soveltuvat lannoitevalmisteasetuksen raja-arvot alittaessaan suljettavilla kaivosalueilla käytettäväksi lannoitteiksi. Asetuksen raja-arvot tiettyjen metallien osalta ylittävän tuhkakakeen osalta tarvitaan jatkotutkimusta.

Tutkittuja kasvualustakomponentteja voidaan hyödyntää peittoratkaisussa tietyin reunaehdoin. Erityisesti jätevesilietepohjaisen biohiilen osalta on varmistettava, ettei polyaromaattisten hiilivetyjen (PAH) pitoisuudet ole liian korkeita. Sekä PAH-yhdisteiden että muiden orgaanisten haitta-aineiden pitoisuuksia biohiilessä voidaan kuitenkin hallita prosessiteknologian avulla (Sarvi ym. 2023). Myös raskasmetallipitoisuuksiin on syytä kiinnittää huomiota, ja luontevimmin

tämä tapahtuu biohiilen raaka-aineita valittaessa. Myös peittoratkaisussa mahdollisesti käytettävä tuhkakomponentti tulee valita siten, että raskasmetallipitoisuudet pysyvät raja-arvoissa.

Kemiallisten ominaisuuksien ohella tarkasteltiin biohiilten rakenteen säilymistä edistyneen kolmiulotteisen kuvantamismenetelmän (röntgentomografia) ja tarkkoja yksityiskohtia havaitsevan elektronimikroskopian avulla (SEM). Biohiiltä altistettiin sekä laboratorioissa että kenttäolosuhteissa lämpötilanmuutosten aiheuttamalle kuormitukselle. Hiilen sisäinen huokosrakenne ei kuitenkaan näyttänyt juuri muuttuvan. Siten biohiilen voidaan olettaa säilyttävän hyvin sisäisestä huokosrakenteesta riippuvan toiminnallisuutensa (mm. vedenpidätyskyky) myös äärevissä pohjoisissa olosuhteissa (Hyväluoma ym. 2022).

Toisaalta kuvantamismenetelmät antoivat selkeitä viitteitä siitä, että biohiilten sisäinen huokosrakenne täyttyy vedellä hyvin hitaasti. Voikin olla, että biohiilen vaikutukset kenttäolosuhteissa ilmenevät viiveellä, esimerkiksi siinä, miten nopeasti kasvillisuus hyötyy biohiilestä. Hiilten pinnalle havaittiin syntyvän myös kipsipitoisia saostumia, mutta ilmiön käytännön merkitystä ei pystytty arvioimaan. Lisäksi kenttäolosuhteissa biohiilen huokoiselle pinnalle kiinnittyi mineraaliainesta, mikä osaltaan voi täyttää huokosia ja heikentää niiden kykyä varastoida ja kuljettaa vettä.

Erialaisten biohiilten vedenpidätyskyky vaihteli merkittävästi, mikä vaikuttaa kasvualustan vesitalouteen. Lietepohjaisen biohiilen vedenpidätyskyky oli jopa moreenia alhaisempi. Sen huokoisuuden onkin todettu olevan huomattavasti pienempi kuin puupohjaisten biohiilten (Turunen ym. 2021). Biohiilen valmistuksen energiataseen ja syntyvän biohiilijakeen vedenpidätyskyvyn parantamiseksi on aiemmin ehdotettu, että lietteen joukkoon sekoitetaan puupohjaista materiaalia ennen pyrolyysiä. Tätä tapaa käytettiin hankkeessa, mutta biohiilijakeen vedenpidätysominaisuuksien kannalta seoksen yhteispyrolyysi ei tuottanut merkittävää parannusta.

Tärkeä kuvantamismenetelmällä tehty havainto oli se, että jokainen biohiilityyppi oli materiaalina heterogeeninen sisältäen eri raaka-aineista olevia hiilikappaleita. Tasalaatuista biohiiltä voidaankin tuottaa vain tunnetusta raaka-aineesta stabiililla prosessilla (Rasa ym. 2021; Turunen ym. 2021a, Turunen ym. 2021b).

Huolimatta eroista biohiilen laadussa, niiden vaikutukset maakerrosten läpi huuhtoutuvan suotoveden kemialliseen laatuun olivat pääosin vähäisiä. Tulokset antavat viitteitä siitä, ettei biohiilisiä aiheuta ravinteiden tai raskasmetallien huuhtoutumisen suhteen huolta. Toisaalta testattujen biohiilten kyky pidättää haitallisia aineita oli heikko. Koska peittoalueelle lisättävä biohiilen määrä on pieni suhteessa peittokerroksen paksuuteen, jäänee biohiililäisän vaikutus suotovesien laatuun hyvin vähäiseksi.

Biohiilen vaikutuksista peittoratkaisun kasvillisuuteen saatiin pitkäaikaista aineistoa vain kuusi-biohiilestä. Sen lisääminen kompostin ja moreenin sekaan kasvatti kasvibiomassan jopa kolminkertaiseksi. Pelkässä moreenissa kasvien itämien oli hyvin heikkoa, mutta jo pelkkä komposti lisäsi kasvillisuuden peittävyuden moninkertaiseksi. Lyhytaikaiset kasvihuonekokeet antoivat myös viitteitä siitä, että kuusihiilen lisäksi muutkin biohiilet nopeuttavat kasvillisuuden kehittymistä, mutta hyöty vaihtelee kasvilajista ja biohiilestä riippuen.

6.2. Teollinen mittakaava, hiilikompensaatio ja laikutus

Hankkeen tuottama luonnon- ja taloustieteellinen tieto rohkaisee hakemaan ratkaisuja kaivosalueiden maisemointiin kiertotaloudesta. Toimijaverkoston kokoaminen on edellytys uudentyyppisen peittoratkaisun toteutukselle. Vain tiiviillä yritysysteillä voidaan hallita uuden tuotteen kustannuksia ja ympäristövaikutuksia. Pilotti osoitti, että toimivan yritysekosysteemin syntyminen vaatii vielä ponnisteluja. Myös tutkimusta ja kehittämistyötä tarvitaan lisää biopeiton tuotannosta ja käytöstä. Siinä voidaan hyödyntää hankkeen tuottamaa tietoa, tuotantomallia ja yhteistyöverkostoa.

Taloudellisessa tarkastelussa, jossa hyödynnettiin toimijaverkostosta saatua tietoa, biohiileen perustuva peittoratkaisu oli kuutiohinnaltaan kallein. Biohiilen käyttö lähes kaksinkertaisti peittoratkaisun hinnan, kun se laskettiin panostyyppisen retortin kustannusten perusteella. Sitä, kannattaako biohiiltä käyttää kaivosalueen peittoratkaisussa, voi tarkastella monesta näkökulmasta.

Vaihtoehtoisten biomassojen käyttö tai jatkuvatoiminen pyrolyysiteknologia integroituna muuhun teolliseen toimintaan kuten energiantuotantoon voi vähentää biohiilen hankintakustannuksia ja laajentaa valmistuksessa käytettävää raaka-ainepohjaa. Itse pyrolyysiprosessi onkin yksi tärkeimmistä jatkotutkimuksen ja teknologisen kehityksen kohde tuotannon mittakaavan skaalaamiseksi ja kustannusten hallitsemiseksi.

Biohiiltä sisältävä peittoratkaisu toimii hiilinieluna, joka voi lisätä kaivostoiminnan yhteiskunnallista hyväksyttävyyttä. Hiilinielulla on markkinahinta päästökompensaatiokaupan kautta. Siksi hiilikompensaation (hiilensidonnan kustannukset ja kompensaatiosta saatavat tulot) sisällyttäminen alensi jonkun verran biopeiton kustannuksia ja nosti muiden peittoratkaisujen hintaa. Hiilensidonnasta saatavan taloudellisen hyödyn voidaan olettaa olevan nousujohteinen, ja toisaalta päästöjen kustannusten kasvavia. Biohiilen lisääminen peittoratkaisuun tehosti kasvillisuuden kehittymistä, joka on kaivosalueiden jälkihoidon yksi tärkeimmistä tavoitteista. Tehokas vihertyminen lisää alueen hiilensidontaa.

Myös biohiilen tuotannon sivuvirtojen eli tervan ja nestemäisen orgaanisia happoja sisältävän tisleen voidaan katsoa alentavan valmistuskustannuksia. Biohiilen tuotannon sivuvirtojen hyödyntämismahdollisuudet ovat toistaiseksi rajalliset ja niin sivuvirtojen kuin hiilikompensaationkin markkinoihin liittyy epävarmuutta. Toisaalta uusien käyttökohteiden löytyminen erilaisille sivuvirroille tuo lisäarvoa koko biokiertoalouteen.

Biopeiton perustaminen laikutuksella voi olla myös yksi varteen otettava keino hallita kustannuksia. Tämä tarkoittaa sitä, että sivukiven tai rikastushiekan läjitysalueille perustetaan saarekkeitä, joissa biohiiltä on lisätty moreeniin ja kompostiin. Laikutusta voidaan käyttää myös kasvillisuuden perustamisessa, missä ruohoja kylvetään heinien joukkoon saarekkeiksi, joista ne leviävät ympäristöön (Kuva 40).

Erityisesti pienisiemeniset lajit voivat hyötyä keinotekoisista suojapaikoista. Sellaisia voi perustaa asettelemalla maanpintaan kivikasoja ja lahoppuuta sekä laikuttaen biohiiltä sisältävää kasvualustaa ja tarjota näin suojaisia ja kosteampia itämispaikkoja. Saarekkeet toimivat samalla ruokapöytänä pölyttäjille. Kaivosalueista voi parhaimmillaan kehittyä pölyttäjähabitatteja.

Pottitaimien käyttöä yhdessä biohiililisyksen kanssa voi harkita alueilla, joissa eroosio on poikkeuksellisen voimakasta. Silloin pystytään ohittamaan kasvien kehitysvaihe siemenestä sirkkaimiksi, joka on erityisen herkkä olosuhdemuutoksille, kuten äkilliselle kuivuudelle. Myös Etelä-Euroopassa menestyksellisesti käytettyä niittysilppua siemenlähteenä kannattaa testata. Samalla biopeiton perustamiseen saadaan lisää vaihtoehtoja



Kuva 40. Peiton kasvillisuuden laikutus. Biodiversiteettiä voidaan lisätä kylvämällä heinien sekaan ruohoja moni- tai yksilajisiin laikkuihin. Samalla houkutellessa alueelle pölyttäjiä. Saarekkeitä voi perustaa myös istuttamalla pottitaimia, mikä nopeuttaa kasvien leviämistä. Saarekkeista lajit sekoittuvat ajan myötä heinäkasvustoon (Kuva: Marja Uusitalo/Luke).

YHTEENVETO

- Lisäämällä biohiiltä kasvualustaan parannetaan kasvien kasvua ja biopeiton vesienhallintaa
- Biohiilen käyttö nostaa kasvualustan hintaa
- Biohiiltä käytettäessä kasvualusta voi toimia hiilinieluna
- Tulevaisuudessa tutkimuksen tulee suuntautua
 - moreenin menekin pienentämiseen orgaanisten sivuvirtojen ja kasvillisuuden avulla
 - alueelle tunnusomaisten ekosysteemien kehityksen tukemiseen peittoratkaisujen avulla
 - biohiilituotannon teknologiseen ja taloudelliseen kehittämiseen

Kiitokset

Tekijät haluavat kiittää projektin rahoittajia: Euroopan aluekehitysrahastoa/Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskusta, Hannukainen Mining Oy:tä, Boliden Kevitsa Mining Oy:tä, Napapiirin Kuljetus Oy:tä, Neve Oy:tä, Sodankylän kuntaa ja Kittilän kuntaa. Purkupuulahjoituksista kiitos Pohjaset Recycling Oy:lle., Levin Vesihuolto Oy:lle kiitos jätevesilietekompostista ja erityiskiitos Sanna Pesolalle ja Juha-Matti Löfille n korvaamattomasta avusta kasvualustojen valmistusprosessissa ja tilasta niiden säilytyksessä. Kiitos SoilCare Oy, Mayt Oy ja Rissasen Taimistopuutarha Oy hyvästä yhteistyöstä. Projektin ohjauksesta ja onnistuneesta yhteistyöstä kiitämme ohjaus- ja asiantuntijaryhmäämme.

Viitteet

- Bolan, N., Hoang, S.A., Beiyuan, J., Gupta, S., Hou, D., Karakoti, A., Joseph, S., Jung, S., Kim, K.-H. & Kirkham, M. 2022. Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International Material Reviews* 67: 150–200. <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1922047>
- Direktiivi 2012/27/EU: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi energiatehokkuudesta. Euroopan unionin virallinen lehti 14.11.2012. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=O-J:L:2012:315:0001:0056:FI:PDF>
- Edeh, I.G., Mašek, O. & Buss, W. 2020. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties –New insights and future research challenges. *Science of the Total Environment* 714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>
- EU 2019. Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2019/1009. EU-lannoitevalmisteiden asettamista saataville markkinoilla koskevien sääntöjen vahvistamisesta ja asetusten (EY) N:o 1069/2009 ja (EY) N:o 1107/2009 muuttamisesta sekä asetuksen (EY) N:o 2003/2003 kumoamisesta. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX%3A320-19R1009>
- Euroopan parlamentti 2022. Miten EU aikoo saavuttaa kiertotalouden vuoteen 2050 mennessä? <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20210128STO96607/miten-eu-aikoo-saavuttaa-kiertotalouden-vuoteen-2050-menessa> (Viitattu 18.8.2023)
- Ghosh, D. & Maiti, S.K. 2021. Biochar-assisted eco-restoration of coal mine degraded land to meet United Nation Sustainable Development Goals. *Land Degradation & Development* 32: 4494–4508. <https://doi.org/10.1002/ldr.4055>
- Hagner, M., Uusitalo, M., Ruhanen, H., Heiskanen, J., Peltola, R., Tiilikkala, K. & Mäkitalo, K. 2021. Amending mine tailings cover with compost and biochar: effects on vegetation establishment and metal bioaccumulation in the Finnish subarctic. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14865-8>
- Heiskanen, J. & Rikala, R. 2000. Effect of beat-based container media on establishment of Scots pine, Norway spruce and silver birch seedlings after transplanting in contrasting water conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15: 49–57. <https://doi.org/10.1080/02827580050160466>
- Heikkinen, P. & Noras, P. (toim.) 2005. Kaivoksen sulkemisen käsikirja. Kaivostoiminnan ympäristötekniikka, 165 s. ISBN 951-690-941-8. https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_053.pdf
- Heikkinen, P. 2000. Haitta-aineiden sitoutuminen ja kulkeutuminen maaperässä, *Geologian tutkimuskeskus, tutkimusraportti* 150. 74 s.
- Heikkinen J., Ketoja, E., Seppänen, L., Luostarinen, S., Fritze, H., Pennanen, T., Peltoniemi, K., Velmala, S., Hanajik P. & Regina K. 2021. Chemical composition controls the decomposition of organic amendments and influences the microbial community structure in agricultural soils, *Carbon Management*, 12(4): 359–376, DOI: 10.1080/17583004.2021.1947386

- Heiskanen, J., Ruhanen, H. & Hagner, M. 2022. Effects of compost, biochar and ash mixed in till soil cover of mine tailings on plant growth and bioaccumulation of elements: A growing test in a greenhouse. *Heliyon* e08838. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08838>
- Hyväluoma, J., Miettinen, A., Keskinen, R., Rasa, K. & Lindberg, H. 2022. Structural and chemical changes of pyrogenic organic matter aged in boreal forest soil. *Pedosphere*. <http://dx.doi.org/10.2139/-ssrn.4094006>
- IPCC 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. (eds). IGES, Japan. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_11_Ch11_N2O&CO2.pdf
- IPCC 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Intergovernmental panel on climate change. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch11_Soils_N2O_CO2.pdf
- ISO 2006a. International Organization for Standardization. ISO 14040. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework. International Organization for Standardization, Brussels.
- ISO 2006b. International Organization for Standardization. ISO 14044. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Brussels.
- Joseph S., Cowie, A.L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M.L., Graber, E.R., Ippolito, J.A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y.S., Palansooriya, K.N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z. & Lehmann, J. 2021. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy* 13, 17311764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>
- Jyske, T., Rasa, K., Korkalo, P. & Kohl, J. (toim.). *Kaskadivisio: Alueellisesti mukautuva biokierto-talous – kaskadiprosessoinnilla biomassoista lisäarvoa, hyvinvointia ja resurssiviisautta. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 9/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 28 s.* <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-608-5>
- Kaivoslaki 2011. 10.6.2011/621. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110621>
- Kirkinen, J., Hillebrand, K. & Savolainen, I. 2007a. Turvemaan energiakäytön ilmastovaikutus: maankäyttöskenaario. VTT tiedotteita 2365. 58 s.
- Kirkinen, J., Minkkinen, K., Penttilä B, T., Kojola, S., Sievänen, R. Alm, J., Saarnio, S., Silvan, N., Laine, J. & Savolainen, I. 2007b. Greenhouse impact due to different peat fuel utilisation chains in Finland: a life-cycle approach. *Boreal Environment Research* 12: 211–223.
- Lahermo, P., Väänänen, P, Tarvainen, T. & Salminen R. 1996. Suomen geokemian atlas, Osa 3: Ympäristögeokemia - purovedet ja sedimentit. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. 150 s.
- Laitila, J., Asikainen, A. & Ranta, T. 2016. Cost analysis of transporting forest chips and forest industry by-products with large truck-trailers in Finland. *Biomass and Bioenergy* 90: 252–261.

- LIPASTO 2017. LIPASTO yksikköpäästöt -tietokanta 2017. Työkoneiden keskimääräinen päästö ja energia polttoainelitraa kohden Suomessa vuonna 2016. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/muut/tyokoneet/tyokoneet_litra.htm
- MMM 2023. Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista. VN/6234/2023 Luonnos. [https://mmm.fi/documents/1410837/1895908/ASETUSLUONNOS+FI+\(1\).pdf/-77437f13-d9d9-186d-5895-54b4aff492d9/ASETUSLUONNOS+FI+\(1\).pdf?t=168378-9408188](https://mmm.fi/documents/1410837/1895908/ASETUSLUONNOS+FI+(1).pdf/-77437f13-d9d9-186d-5895-54b4aff492d9/ASETUSLUONNOS+FI+(1).pdf?t=168378-9408188) (Viitattu 8.8.2023)
- Munoz, I. & Schmidt, J.H. 2016. Methane oxidation, biogenic carbon, and the IPCC's emission metrics. Proposal for a consistent greenhouse-gas accounting. The International Journal of Life Cycle Assessment 21. <https://doi.org/10.69-1075.1007/s11367-016-1091-z>
- MWEI BREF 2018. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries, in accordance with Directive 2006/21/EC; EUR 28963 EN; Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018; ISBN 978-92-79-77178-1; JRC109657. 250 s. <https://doi.org/10.2760/35297>
- Myllys, M., Gustafsson, M., Koppelmäki, K., Känkänen, H., Palojärvi, A. & Alakukku, L. 2014. Juuristotietopaketti – juuret maan rakenteen parantajina. Ravinnehuhtoutumien hallinta (RaHa). Fakta 8. Elokuu 2014, <https://www.doria.fi/handle/10024/103454>
- Natasha, N., Shahid, M., Khalid, S., Bibi, I., Naeem, M.A., Niazi, N.K., Tack, F.M.G., Ippolito, J.A. & Rinklebe, J. 2021. Influence of biochar on trace element uptake, toxicity and detoxification in plants and associated health risks: a critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 1-41. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1894064>
- Nguyen M.K., Lin, C., Hoang, H.G., Sanderson, P., Dang, B.T., Bui, X.T., Nguyen, N.S.H., Vo, D.-V. N. & Tran, H.T. 2022. Evaluate the role of biochar during the organic waste composting process: A critical review. Chemosphere 299, 134488 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134488>
- Paliskuntain yhdistys 2021 Teollinen maankäyttö. <https://paliskunnat.fi/poro/poronhoito/poronhoidon-haasteet/teollinen-maankaytto/> (Viitattu 18.8.2023)
- Penido, E.S., Martins, G.C., Mendes, T.B. M., Melo, L.C.A., de Rosário Guimarães, I. & Guilherme, L.R.G. 2019. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils. Ecotoxicology and Environmental Safety 172: 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.110>
- Pietilä, R., Hagner, M., Heiskanen, J., Juutinen, M., Lahtinen, T., Liwata-Kenttälä, P., Mäkitalo, K., Nuottimäki, K., Peltola, R., Ruhanen, H., Sarala, P., Seitsaari, M., Tornivaara, A. & Uusitalo, M. 2020. Biopeitto-projekti. Biohiilen hyödyntäminen kaivannaisjätteiden peittomateriaaleissa ja viherrakentamisessa. GTK:n tutkimustyöraportti 51/2020. 81 s. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/51_2020.pdf
- Pohjala, M. 2014. Mikä on energia- ja kasvuturpeen elinkaaren ympäristövaikutus.? Pro gradu tutkielma, Helsingin yliopisto.

- Rasa, K., Viherä-Aarnio, A., Rytönen, P., Hyväluoma, J., Kaseva, J. & Jyske, T. 2021. Quantitative analysis of feedstock structural properties can help to produce willow biochar with homogeneous pore system. *Industrial Crops & Production* 166, 113475. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113475>
- Reinikainen, J. 2007. Maaperän kynnys- ja ohjearvojen määrittämisperusteet. Suomen Ympäristö 23/2007. Helsinki. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/e345a78f-a0be-4c83-95b7-0af9a4b744e5/content>
- Ruokavirasto 2023. LUONNOS: LANNOITEVALMISTEIDEN KANSALLINEN AINESOSALUETTELO. <https://www.ruokavirasto.fi/globalassets/kasvit/lannoitevalmisteet/ainesosaluettelo-julkaistu-luonnos-6.6.2023.pdf> (Viitattu 8.8.2023)
- Rydgren, K., Halvorsen, R., Odland, A. & Skjerdal, G. 2011. Restoration of alpine spoil heaps: Successional rates predict vegetation recovery in 50 years. *Ecological Engineering* 37(2): 294–301. doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.11.022
- Sarvi, M., Kainulainen, A., Malk, V., Kaseva, J. & Rasa, K. 2023. Industrial pilot scale slow pyrolysis reduces the content of organic contaminants in sewage sludge. *Waste Management* 171: 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.08.018>
- Seppälä, J., Grönroos, J., Koskela, S., Holma, A., Leskinen, P. & Liski, P. 2010. Climate impacts of peat fuel utilization chains – a critical review of the Finnish and Swedish life cycle assessments. *The Finnish environment* 16/2010. Suomen ympäristökeskus.
- Shahriar, M.M., Wang, J.X., Alam, S. & Patterson, W.B. 2016. Soil-binding ability of vegetation roots in enhancing erosion resistance of a shallow slope. *International Journal of Geotechnical Engineering* 10(4): 409–417. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1168608>
- Shen, Z., Zhang, Y., McMillan, O., Jin, F. & Al-Tabbaa, A. 2017. Characteristics and mechanisms of nickel adsorption on biochars produced from wheat straw pellets and rice husk. *Environmental Science and Pollution Research* 24, 12809–12819. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8847-2>
- Silvan, N., Silvan, K., Väisänen, S., Soukka, R. & Laine, J. 2012. Excavation-drier method of energy-peat extraction reduces long-term climatic impact. *Boreal Environment Research* 17: 263–276.
- Silvan, N. & Jokinen, K. 2016. Early snowmelt enhances the carbon sequestration of hummock-forming Sphagnum mosses on Boreal Wetlands. *Open Journal of Ecology* 6: 103–112.
- Turunen, M., Hyväluoma, J., Keskinen, R., Kaseva, J., Nikama, J., Reunamo, A. & Rasa, K. 2021a. Pore structure of wastewater sludge chars and their water retention impacts in different soils. *Biosystems Engineering* 6–18. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.03.010>
- Turunen, M., Urbano Tenorio, F., Rasa, K., Hyväluoma, J., Rytönen, P., Kaseva, J., Beuker, E., Suhonen, H. & Jyske, T. 2021b. How clonal differences and within tree heterogeneity affect pore properties of hybrid aspen wood and biochar? *Biomass Conversion and Biorefinery*, <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01464-3>

- Tornivaara, A., Räisänen, M. L., Kovalainen, H. & Kauppi, S. 2018. Suljettujen ja hylättyjen kaivosten kaivannaisjätealueiden jatkokartoitus (KAJAK II). Suomen ympäristökeskuksen raportteja 12/2018. Suomen ympäristökeskus. 155 s.
- Vna 214/2007. Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista. Asetus nro 214/2007, annettu 1.3.2007
- Vna 190/2013. Valtioneuvoston asetus kaivannaisjätteistä. Asetus nro 190/2013, annettu 14.3.2013.
- Vna 331/2013. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista. Asetus nro 331/2013, annettu 1.6.2013
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. & Weidema, B. 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21: 1218–1230. <http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Winqvist, E., Horn, S., Tuovila, H., Lavikko, S., Sorvari, J., Joutsjoki, V., Karhu, M., Slotte, P., Kautto, P., Kivikytö-Reponen, P., Ilvesniemi, H. 2023. R-strategies in circular economy : Textile, battery, and agri-food value chains. *Natural Resources and Bioeconomy Studies* 57/2023. Natural Resources Institute Finland (Luke). <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-716-7>
- Yong, R.N., Mohamed, A.M.O. & Warkentin, B.P. 1992. Principles of contaminant transport in soils. *Developments in geotechnical engineering* 73. Amsterdam, Elsevier. 327 s
- Äystö, L., Högmander, P., Fjäder, P. & Salminen, J. 2022. Haitalliset aineet kierrätyslannoitteissa ja niiden raaka-aineissa. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 27/2022. <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/456ee6d4-b33c-41a1-b151-29272f9cbdec/content>

Liitteet

LIITE 1. Lysimetrikokeen vesinäytteistä tehdyt analyysit, analyyttien pitoisuudet rikastushiekassa ja laskennalliset⁽¹⁾ pitoisuudet peittokerroksessa

Analyytti	Pitoisuus rikastushiekassa (mg kg ⁻¹)	Laskennallinen pitoisuus peittokerroksessa (mg kg ⁻¹)	Merkitys
Sinkki, Zn	22	22	2,3
Kupari, Cu	176	18	2
Nikkeli, Ni	487	9,8	2
Arseeni, As	376	3,2	2
Kadmium, Cd	5,4	0,01	2
Kromi, Cr	95	24	2
Lyijy, Pb	4,9	2,2	2
Kalsium, Ca	49 400	5 280	3
Kalium, K	2 500	1 230	3
Magnesium, Mg	26 200	2 800	3
Mangaani, Mn	732	193	3
Rikki, S	20 150	237	3
Boori, B	8,5	1,7	3
Natrium, Na	343	362	3
Rauta, Fe	73 850	17 180	3
Liukoinen fosfori, P_liuk	ND	ND	3,4
Kokonaisfosfori, P_tot	ND	ND	3,4
Kokonaistyyppi, N_tot	ND	ND	3,4
Ammoniumtyppi, NH ₄ -N	ND	ND	3,4
Nitraatti- ja nitriittityppi, NO ₂ +NO ₃ -N	ND	ND	3,4
Kiintoaine	ND	ND	4
Sameus	ND	ND	4
Liuennut orgaaninen hiili, DOC	ND	ND	4
Nitriittityppi, NO ₂ -N	ND	ND	4

⁽¹⁾ Olettaen että komponenttien tilavuuspainot ovat moreenille 1,5, kompostille 0,5 ja biohiillelle 0,3

⁽²⁾ Valtioneuvoston asetuksessa 214/2007 mainittu raskasmetalli

⁽³⁾ Kasviravinne

⁽⁴⁾ Veden laadun indikaattori

LIITE 2. Markkinalähtöisten hintojen määrittely talouslaskelmassa

Markkinaehtoisessa hinnoittelussa kustannukset määriteltiin tiedustelemalla niitä arvioitavan konseptin toimijoilta, etsimällä julkisista hintaluetteloista tai kysymällä muilta palvelun kaupallisilta tuottajilta. Lähdetietoja käytettiin pohjana hintatiedon asiantuntija-arvioon, jossa huomioitiin vallitsevat arvioitavan konseptin olosuhteet. Lentotuhkan hinta oli 0 € m⁻³ (Neve Oy 2.9.2022). Kompostin hinta oli 8 € m⁻³ (orivesi.fi, metsapirtinmulta.fi, porvoonsorajamulta.fi, Levin vesihuolto Oy). Hinta lietekompostimullalle oli 7.50 € m⁻³ (Boliden Kevitsa, soraonline.fi, kkl-jurvanen.fi, jarmotoikka.fi, multalansora.fi). Turpeen hinta oli 12 € m⁻³ (kauppa.vapo.fi, Laakso 2015, Suomäki 2022, StatFin 2022b).

Kustannuslaskelmassa pyrolyysin sivutuotteiden (terva, nesteet) arvo kompensoi biohiilen tuotantoon liittyviä kustannuksia. Tervan arvo oli 3.00 € l⁻¹ (0.41 € kWh⁻¹) ja tisenesteiden 0.30 € l⁻¹ (0.06 € kWh⁻¹). Nämä arvot perustuivat materiaalien energiasisältöön (4.8–7.8 kWh l⁻¹, Elliot 1986, Ringer et al. 2006), energian markkinahintoihin (0.02–0.09 € kWh⁻¹, StatFin 2022b) sekä tervan kaupalliseen vähittäishintaan (8–15 € l⁻¹, karkkainen.com, puijonterva.fi, suomenluonnonmaalit.fi).

Dieselin hinta oli 1.46 € l⁻¹ ja kevyen raakaöljyn hinta oli 0.94 € l⁻¹ (StatFin 2022b, marraskuu 2020–lokakuu 2021). Sähkön hinta oli 8.77 snt kWh⁻¹ (StatFin 2022b, lokakuu 2020–syyskuu 2021). Veden hinta oli 5.12 € m⁻³, mikä oli inflaatiokorjattu arvo vuodelle 2021 perustuen vertailuhintaan kerrostaloasunnoille vuonna 2020 Suomessa (VEETI 2022, 5.01 € m⁻³ ilman korjausta). Nestekaasun hinta retortin sytyttämiseen oletettiin olevan 2.50 € kg⁻¹.

Työntekijän kustannukset, mukaan lukien palkka ja kaikki työsuhteeseen liittyvät kulut, olivat 27.32 € h⁻¹ (Suomen virallinen tilasto 2016, StatFin 2022, www.vero.fi). Työntekijän kustannus on inflaatiokorjattu vuodelle 2021 perustuen alun perin prosessi- ja kuljetustyöntekijöiden vuoden 2020 keskipalkkaan.

Peittomateriaalien ympäristövaikutukset otettiin huomioon niiden CO₂-ekvivalenttipäästöjen mukaisesti. Nämä päästövaikutukset arvioitiin LCA-laskennassa. Kun skenaario aiheutti CO₂-ekvivalenttipäästöjä, se huomioitiin lisäkustannuksena. Jos skenaario satoi hiiltä, se otettiin huomioon kulujen kompensaatina. Vakioskenaariossa CO₂-ekvivalenttipäästön kustannus oli 52.56 € t⁻¹, mikä oli vuoden 2021 keskimääräinen päästöoikeushuutokaupan hintataso Suomessa (Energiavirasto 2022).

LIITE 3. Koneiden ja kuljetuskaluston kustannustekijät peittomateriaalien talouslaskelmassa. *Kustannus on huomioitu prosessikustannuksissa (15 % murskaus- ja pyrolyysiprosesseissa), eikä konekohtaisena. **Ei koske pyrolyysia, jossa kustannukset arvioitiin pyöräkuormaajan ajanmenekin perusteella tuotantosykliä kohden (1 h 20 min).

	Shredder	Pyrolyzer	Wheel loader	Excavator	76t truck	Dumb truck 48t semi	
<i>Specifications</i>							
Purchase price, €	1250000	180000	270000	273000	355000	175 000	130000
Acquisition cost, €	5000	500					
Disposal cost, €	5000	600					
Annual depreciation	115000 €	27500 €	20 %	20 %	20 %	20 %	20
Salvage value, €	100000	15000	79 633	57252	57822	34876	41309
Lifetime, h or km	24725	12600	12000	14000	657842	657842	302732
Lifetime, years	10	6	6	7	7	7	8
Operating time, h year ⁻¹	4075	2720	2000	2000	4320	4320	2160
Utilization rate	0.58	0.75	0.65	0.65			
Productive time, h	2344	2040	1300	1300			
Productivity, m ³ pwh ⁻¹	45.00	0.42	200 **	100			
Fuel consumption, l h ⁻¹	68	some wood/	10	12			
Fuel consumption, l/100 km		gas			66	50	45
Fuel price, €/l	0.94		0.94	0.94	1.46	1.46	1.46
<i>Fixed cost, €/pwh or owh</i>		<i>(€/pwh)</i>			<i>(€/owh)</i>		
Depreciation, €	49.05	13.48	24.41	23.71	9.27	4.35	5.13
Interests, €	14.40	2.39	6.39	5.93	2.07	1.09	1.28
Insurance, administration & other, €	*	*	*	*	3.99	3.54	2.70
Risk & profit margin, €	*	*	*	*	3.66	3.03	2.59
<i>Variable cost, €/ pwh or km</i>		<i>(€/pwh)</i>			<i>(€/km)</i>		
Fuel cost, €	63.45	0.52	9.40	11.28	0.96	0.73	0.66
Repair/service, €	50.00	4.00	1.54	4.62	0.30	0.30	0.16
Wheels & tyres, €			2.51		0.10	0.05	0.03
lubricant cost, €			1.41	1.69	0.04	0.04	0.02
Employee costs, € / pwh	38.11	48.57	42.03	42.03	42.03	42.03	42.03
<i>Total cost, €/h</i>	215.01	68.96	87.68	89.25	61.03	54.03	53.73
<i>Additional cost, €/km</i>					1.41	1.12	0.87

LIITE 4. Talouslaskelmassa käytetyt materiaalien tiheydet ja kuljetuskapasiteetit kuorman kuormatilan kokoon ja kuljetuskaluston kokonaismassarajoitukseen pohjautuen sekä materiaalien kuljetusetäisyydet. Suluissa on ilmaistu materiaalin kuljetuskosteus painoprosentteina. *Purku-puun tilavuuskapasiteetti on esitetty puun 20 % kosteudessa ja kuorman 60 % huokoisuudessa (kuiva-ainetiheys 411 kg m^{-3}).

Material	Density, kg m^{-3}	Cargo capacity, m^3	Distance, km	Reference for density
Waste wood	197	157	0	Hakkila (1979)*
Biochar (5%)	252	157	200	Gray et al. (2014), Dias júnior et al. (2016), Wang et al. (2020)
Compost	800	63	100	Pesola (2022 professional estimate), Malińska et al. (2013)
Compost-biochar (62.5%)	762	66	100	Moisture of biochar: Gray et al. (2014)
Ash	800	63	130	Tiainen (2014)
Till	1692	30	15	Ronkainen (2012)
Peat	250	157	25	Kesäniemi (2009)



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi

