



YMPÄRISTÖSEURANTOJEN TULOKSIA

Väliraportin liite

Henna-Riikka Haikonen & Riina Tuominen

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta -hanke

Joulukuu 2021



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Euroopan maaseudun
kehittämisen maatalousrahasto:
Eurooppa investoi maaseutualueisiin

SISÄLLYS

1 Johdanto.....	3
2 Seurantakohteiden esittely ja tutkimusmenetelmät.....	3
2.1 Tuhkatieseurantakohteet.....	3
2.2 Tuhkalannoitusseurantakohteet	5
2.3 Tuhkatiekolonnikoe	8
3 Seurantojen tulokset.....	11
3.1 Tuhkatiet	11
3.1.1 Vanhempi tuhkatie.....	11
3.1.2 Uudempi tuhkatie	15
3.2 Tuhkalannoitus.....	20
3.2.1 Tuhkalannoituskohde	20
3.2.2 Tuhkalannoitetut koealat	25
3.3 Tuhkatiekolonnit.....	30
4 JOHTOPÄÄTÖKSET	37
4.1 Tuhkatiet	37
4.2 Metsänlannoituskohteet	38
4.3 Tuhkatiekolonnit.....	40
5 YHTEENVETO	41
LÄHTEET	43

1 Johdanto

Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta -hanke on Tapio Oy:n, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun ja Suomen metsäkeskuksen yhteishanke. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun toimesta hankkeessa toteutettiin tuhkan ympäristönvaikutusten seurantaa. Seurantakohteina oli kaksi tuhkatietä ja kaksi tuhkalannoitusala. Näiden lisäksi toteutettiin tuhkatiekolonnikoe, jossa kolonnit tehtiin jäljittelemään rakennettuja tuhkatieitä.

Tässä raportissa käsitellään hankkeessa vuosina 2020–2021 saatuja kohteiden seurantatuloksia. Seurantaa jatketaan vuonna 2022.

2 Seurantakohteiden esittely ja tutkimusmenetelmät

2.1 Tuhkatie seuranta kohteet

Tuhkatiet perustettiin vuosina 2017–2018 ja vuonna 2020. Ennen teiden rakentamista käytetyn tuhkan laatu selvitettiin. Teihin käytetty lentotuhka ei täyttänyt kaikkien raja-arvojen osalta MARA-asetuksen vaatimuksia ja rakennukseen oli haettu ja saatu ympäristöluvat.

Tiet rakennettiin tuhkatietä menetelmällä ja ennen vuoden 2017 tietyömaan aloitusta kohteessa oli tehty pintavesiseurantaa. Nämä aiemmat määritystulokset annettiin hankkeen käyttöön. Näytteet toimivat ns. nollanäytteinä kuvastaen ojaveden luonnontilaa.

Tiekohteet kuvattiin paremman kokonaiskuvan saamiseksi hyödyntäen droonia. Kuvassa 1 on 2017–2018 perustettu tuhkatie kuvattuna ilmasta. Tien vasemmalla puolella näkyy suurempi lampi, josta laskee tien ali oja oikealla puolella olevaan pienempään lampeen.



Kuva 1. Vanhempi tieseurantakohde ilmasta kuvattuna (kuva Juha Vihavainen).

Kohteesta valittiin taustatietoihin ja aiempiin tutkimuksiin perustuen tietyt näytepisteet vesi- ja maanäytteiden ottoon. Vedentarkkailuun valittiin vanhemmasta tieseurantakohteesta kahden lammen välinen laskuoja, joka alittaa tuhkatatj tien. Tiekohteessa käytetyn tuhkan liukoisuustesteissä oli osoittautunut ympäristö- ja terveysvaikutusten kannalta olennaisimmiksi aineksiksi kromi, sinkki, sulfaatti ja kloridi, jonka vuoksi tien ympäristölupapäätöksessä oli velvoitettu niiden pitoisuuksien seuranta. Pintavesinäytteitä otettiin kolme kertaa vuodessa (kevällä, kesällä ja syksyllä) ja näytteet analysoi ulkopuolinen laboratorio. Vesinäytteistä määritettiin pH, sähkönjohtavuus sekä fosfori-, kloridi-, sulfaatti-, barium-, kromi-, sinkki-, antimoni-, arseeni-, elohopea-, kadmium-, kupari-, lyijy-, molybdeeni-, nikkeli- ja vanadiinipitoisuus. Lisäksi seurattavilla kohteilla mitattiin pintavesien pH ja sähkönjohtavuus kenttämittarilla 2–4 viikon välein.

Maanäytepisteitä valittiin kaksi, joista toinen sijaitsi teiden risteysalueen ja toinen tien viereen rakennetun tarkastuskaivon vaikutuspiirissä. Maanäytteet otettiin kerran vuodessa. Näytteistä määritettiin pH, sähkönjohtavuus sekä fluoridi-, kloridi-, sulfaatti-, barium-, kromi-, sinkki-, antimoni-, arseeni-, elohopea-, kadmium-, kupari-, lyijy-, molybdeeni-, nikkeli- ja vanadiinipitoisuus.

Kuvassa 2 on uudempi vuonna 2020 perustettu tuhkatie kuvattuna ilmasta. Tien ali kulkee oja, joka laskee kauempana oikealla puolella olevaan lampeen.



Kuva 2. Uudempi tieseurantakohde ilmasta kuvattuna (kuva Juha Vihavainen).

Uudemmassa tiekohteesta määritettiin samoja parametreja kuin vanhemmasta. Myös tältä kohteelta valittiin vedentarkkailuun tien alittava laskuoja. Maanäytepisteitä valittiin kohteelta kaksi, joista toinen sijaitsi tien vaikutusalueella melko lähellä laskuojaa ja toinen näytepiste toimi vertailuna sijaiten sellaisen tieosuuden vaikutuspiirissä, johon ei ollut käytetty tuhkaa. Maanäytteet otettiin kerran vuodessa. Näytteistä määritettiin pH, sähkönjohtavuus sekä fluoridi-, kloridi-, sulfaatti-, barium-, kromi-, sinkki-, antimoni-, arseeni-, elohopea-, kadmium-, kupari-, lyijy-, molybdeeni-, nikkeli- ja vanadiinipitoisuus.

2.2 Tuhkalannoitusseurantakohteet

Seurattavista tuhkalannoitusaloista toinen oli koealoja sisältävä kohde, joka oli perustettu vuonna 2017 Xamkin Bioli-hankkeessa. Hankkeen aikana elokuussa 2020 tuhkalannoitettiin seurattava

yksityisomistuksessa oleva metsäkohde. Lannoituksissa käytettiin kohteisiin sopivaa kaupallista tuhkalannoitetta. Kuvassa 3 näkyy metsälannoituskohde ilmasta kuvattuna.



Kuva 3. Metsälannoituskohde ilmasta kuvattuna (kuva Juha Vihavainen).

Metsäkohteen tuhkalannoitus (varputurvekangas, Vtkg) toteutettiin lentolevityksellä elokuun lopulla 2020. Lannoitteena käytettiin alueelle sopivaa Ecolan Horus tuhkalannoitetta 3 000 kg/ha. Alueelta kerättiin neulas-, marja- ja varpunäytteitä sekä vesi- ja maaperänäytteitä ennen ja jälkeen tuhkalannoituksen. Vesinäytteitä analysoitiin sulan kauden aikana ensimmäisenä vuonna ennen lannoitusta kesällä sekä lannoituksen jälkeen syksyllä. Seuraavana vuonna analysoitiin kolme vesinäytettä (kevällä, kesällä ja syksyllä). Vesinäytteistä määritettiin pH, sähkönjohtavuus sekä fosfori-, kloridi-, sulfaatti-, barium-, kromi-, sinkki-, antimoni-, arseeni-, elohopea-, kadmium-, kupari-, lyijy-, molybdeeni-, nikkeli- ja vanadiinipitoisuus. Kenttämittauksilla mitattiin metsäojien pH ja sähkönjohtavuus 2–4 viikon välein. Muista näytteistä analysoitiin tilanne ennen ja jälkeen lannoituksen, jotta tuhkalannoituksen vaikutusta ravinne- sekä raskasmetallipitoisuuksiin voitiin verrata lähtötilanteeseen. Kaikki näytteet lähetettiin ulkopuoliseen laboratorioon.

Koealoja sisältävälle alueelle oli luotu vuonna 2017 noin 50 m² koealoja kahteen eri kasvupaikatyypin, puolukkaturvekankaalle (Ptkg) ja tuoreelle kankaalle (MT). Kuvassa 4 on nähtävissä tuhkalanhoituskoealoja sisältävä kohde ilmasta kuvattuna. Tällä tuhkalanhoituskohteella vertailtiin tuhkalannoitetun ja lannoittamattoman alueen eroja, sillä molemmilla kasvupaikoilla oli erotettu vertailuala ja tuhkalannoitettu ala. Vertailua tehtiin neulas- ja maanäytteiden avulla. Tämän lisäksi tarkkailtiin pintaveden pH- ja sähkönjohtavuustasoa kenttämittauksin. Ensimmäiset neulas- ja maanäytteet oli otettu Xamkin Bioli-hankkeessa 11 päivää lannoituksen jälkeen vuonna 2017 ja seuraavat vuoden päästä. Vastuullista liiketoimintaa tuhkasta -hankkeessa otettiin aloilta maa- ja neulasnäytteet vuonna 2021 (neulasnäytteet 01/2021, maanäytteet 11/2021).



Kuva 4. Koealoja sisältävä seurantakohde ilmasta kuvattuna (kuva Juha Vihavainen).

Molemmat tarkkailtavat lannoituskohteet kuvattiin ilmasta droonia hyödyntäen. Kuvauksissa käytettiin myös multispektrikameraa, joka mahdollistaa esimerkiksi kasvillisuusindeksin tarkastelun. Molemmissa kohteissa tehtiin myös kasvillisuuden visuaalista havainnointia.

2.3 Tuhkatiekolonnikoe

Ympäristöseurannan tiekohteiden tarkkailun lisäksi toteutettiin tuhkatiekolonnikoe. Kokeen tarkoituksena oli tutkia suotovesien laatua ja tuhkatierakenteen käyttäytymistä.

Kokeessa rakennettiin 2 l mittalaseihin viisi erilaista pienoismallia aidoista tierakenteista, joissa tuhkan määrä ja koostumus vaihtelivat. Jokaisesta kolonnista rakennettiin rinnakkaisversio, jolla pyrittiin lisäämään testin luotettavuutta. Kolonneissa oli poistoletku, josta tierakenteen läpi kulkenut suotovesi voitiin kerätä talteen ja analysoida. Kokeessa käytettiin vanhennettua lentotuhkaa, jonka pitoisuudet ylittivät MARA-asetuksen raja-arvot osittain tutkittujen parametrien osalta. Maapohjaan käytettiin hiekkaa ja lannoittamatonta luonnonturvetta. Murskeena käytettiin hiekoitusmursketta, jonka raekoko oli 3–6 mm. Kolonnien pohjalle tehtiin pestystä murskeesta kerros ja murskekerroksen päälle laitettiin myös suodatinkangas, jolla pyrittiin estämään poistoletkujen tukkeutuminen maa-aineksella.

Testit aloitettiin tammikuussa 2021 kolonneiden rakentamisella. Ensin kolonneihin rakennettiin pelkät maapohjat, jotka olivat jokaisessa kolonnissa samanlaiset (kuva 5). Tämän jälkeen maapohjat kostutettiin ja kolonneista läpi tulleesta suotovedestä analysointiin pH, sähkönjohtavuus, lämpötila sekä sulfaatti- ja kloridipitoisuudet, jotta saatiin selvitettyä lähtötasoarvot. Suotovedestä analysoitiin myös raskasmetalleista kadmium, kupari, sinkki ja lyijy.



Kuva 5. Tuhkatiekolonnit, joihin on tehty maapohja (kuva Henna-Riikka Haikonen).

Alkutilanteen suotoveden keräyksen jälkeen kolonneihin lisättiin tuhkat ja murskeet. Murskeiden ja tuhkien määrät suhteutettiin vastaamaan todellisia tuhkaterakenteita. Ensimmäisiin testikolonneihin ei lisätty maapohjan rakentamisen jälkeen mitään ja toisiin lisättiin maapohjan lisäksi 3 cm murskekerros, joten ne toimivat ikään kuin ”nollamalleina”.

Kolmannet testikolonnit rakennettiin tuhkamurskeseos-periaatteella, jossa tuhkan ja murskeen seossuhde oli 25 painoprosenttia ja seoksen kerrospaksuus putkessa 3 cm. Kaksi viimeistä tiemallia rakennettiin puolestaan tuhkapatjateiksi. Tuhkaa tiivistettiin tiukaksi patjakerrokseksi toisiin rinnakkaiskolonneihin 3 cm ja toisiin 5 cm ja näiden päälle lisättiin 1 cm murskekerros. Kolonnien rakenteet on esitetty tarkemmin taulukossa 1.

Taulukko 1. Kolonnikokeessa tehtyjen tuhkatiemallien rakenne.

Kolonnitunnus	Rakenne
1A	Maapohja
1B	Maapohja
2A	Maapohja ja pesty murske 3 cm
2B	Maapohja ja pesty murske 3 cm
3A	Maapohja ja tuhkamurskekerros (25 p-%) 3 cm
3B	Maapohja ja tuhkamurskekerros (25 p-%) 3 cm
4A	Maapohja, tuhkatatja 3 cm ja murske 1 cm
4B	Maapohja, tuhkatatja 3 cm ja murske 1 cm
5A	Maapohja, tuhkatatja 5 cm ja murske 1 cm
5B	Maapohja, tuhkatatja 5 cm ja murske 1 cm

Kolonnien rakentamisen jälkeen lisättiin niihin vettä kerrallaan 50–300 ml. Pienemmillä vesimäärillä tehtiin useita lisäyksiä eri päivinä, kunnes suotovettä saatiin kerättyä analyysihin tarvittava määrä. Suuremmat lisäykset tehtiin kerralla. Vedenlisäysten yhteydessä tarkasteltiin kolonnien veden suotautumismääriä. Vaihtelevalla vesimäärällä pyrittiin simuloimaan luonnonsateita ja sulamisvesiä. Suotovettä pyrittiin keräämään vähintään 250 ml, jotta näyte riittäisi kaikkiin määrittelyihin. Vetenä käytettiin ionivaihdettua vettä, jonka pH mitattiin ennen lisäystä. Kokeen loppupuolella kolonneihin käytettiin veden tilalla lunta 15–20 cm, jotta saatiin simuloitua myös sulamista-pahtuma.

Suotovesistä mitattiin heti näyteveden keräyksen jälkeen lämpötila, pH ja sähkönjohtavuus. Kloridi-, sulfaatti- ja raskasmetallimäärityksiä varten näytteet pakastettiin, jotta määrittelyksiä voitiin tehdä kerralla useammasta näytteestä. Vesistä määritettiin fotometrillä sulfaatti- ja kloridipitoisuus sekä voltammetrillä kadmium-, kupari-, lyijy- ja sinkkipitoisuudet.

Raskasmetallianalyysiä varten suotovesinäytteitä jouduttiin happohajoittamaan ja laimentamaan, sillä erityisesti tuhkaa sisältäneiden kolonnien suotovedet olivat sameita ja sisälsivät kiintoainetta. Myös kloridi- ja sulfaattipitoisuuden määrittystä varten suotovesinäytteitä oli laimennettava. Kolonnikoe purettiin toukokuussa 2021.

3 Seurantojen tulokset

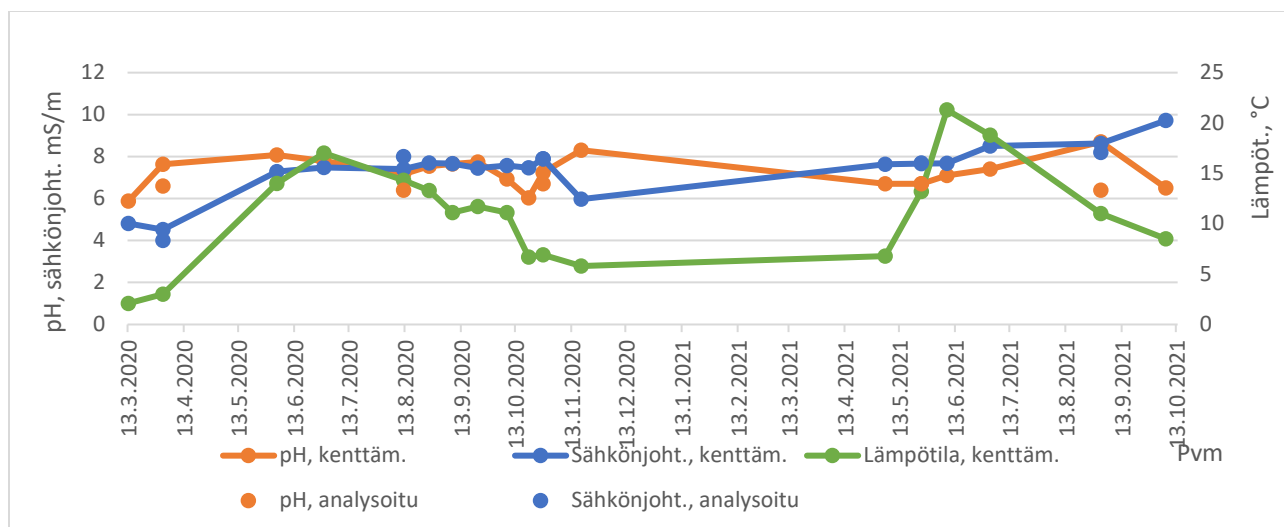
3.1 Tuhkatiet

3.1.1 Vanhempi tuhkatie

Vanhemman tiekohteen vesinäytteiden tuloksia

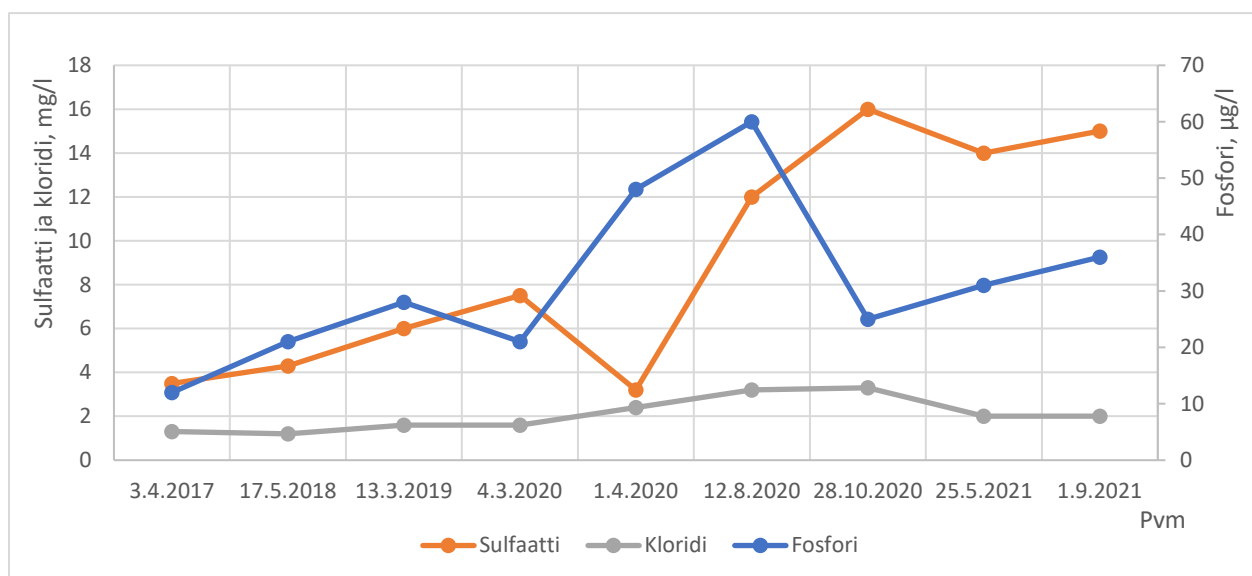
Vuoden 2017 näytteet oli otettu ennen tuhkatien rakentamisen aloitusta, ja ne kuvaavat kohteen ojaveden luonnontilaa ja toimivat ns. nollanäytteinä. Ensimmäisessä määrittäyksessä tarkkailupisteen pH-luku oli 5,9. Tämän jälkeen pH on vakiintunut analysoinneissa arvoon 6,2–6,7. Myös sähkönjohtavuuden osalta ensimmäisen määrittäyksen arvo oli alhaisin, 2,9 mS/m, jonka jälkeen vuosien 2018–2020 aikana arvo on noussut, ollen tarkkailun lopussa laboratoriomäärittäyksessä 8,0 mS/m. Tarkastelupisteessä pH ja sähkönjohtavuus ovat laboratorioanalyysien osalta pääosin pysyneet luonnonvesistä yleisesti mitatuissa arvoissa. Luonnonvesissä pH on yleensä 6,5–6,8 ja sähkönjohtavuus 5–10 mS/m (Oravainen 1999).

Kuvassa 6 on nähtävissä tarkkaillun tiekohteen vesinäytepisteen laboratoriomäärittäysten ja kenttämittausten tulokset veden lämpötilan, pH:n ja sähkönjohtavuuden osalta. Kuvasta nähdään, että veden lämpötila on oletetusti ollut matalampi keväällä ja syksyllä ja noussut kesäisin. Kenttämittauksissa veden pH-arvo vaihteli välillä 5,9–8,7 ja sähkönjohtavuus 4,5–9,7 mS/m. Suurimmat pH- ja sähkönjohtavuusarvot mitattiin silloin, kun ojassa oli normaalia vähemmän vettä. Kenttämittausten ja laboratoriomäärittäysten arvot ovat olleet hyvin lähellä toisiaan.



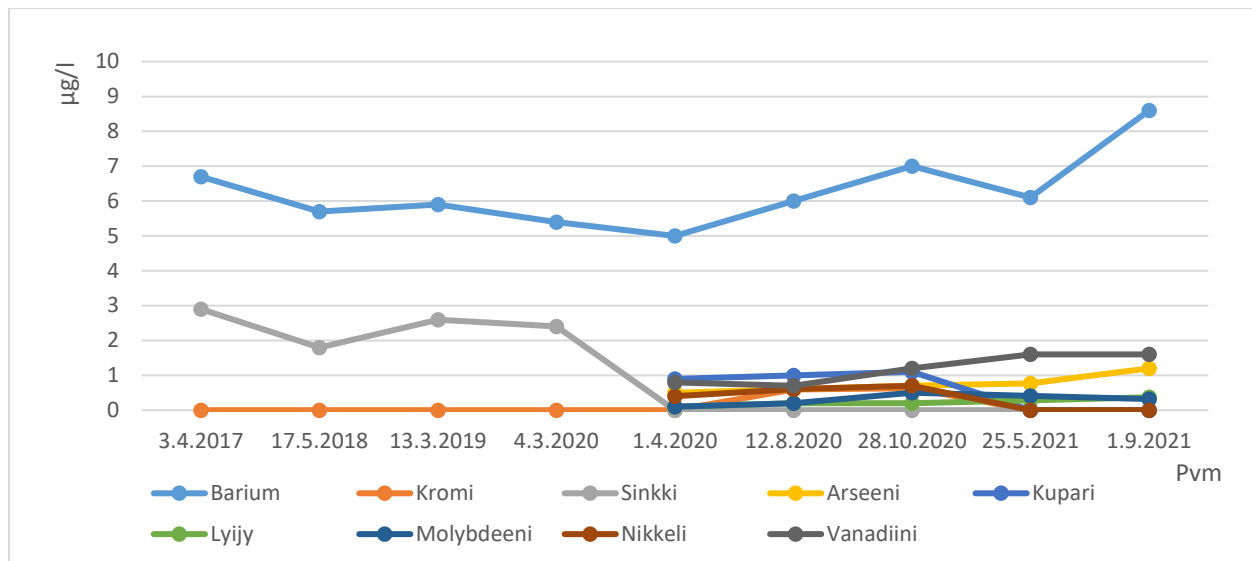
Kuva 6. Vanhemman tiekohteen ojaveden laboratorioanalyysien ja kenttämittausten tulokset.

Kuvaan 7 on koottu tarkkaillun tuhkatien laskuojan näytepisteen fosfori-, sulfaatti- ja kloridipitoisuudet. Fosforin pitoisuus lähtötilanteessa oli 12 µg/l ja pitoisuus on tarkkailun aikana noussut. Elokuussa 2020 fosforin pitoisuudeksi määritettiin 60 µg/l ja viimeisessä määityksessä fosforipitoisuus oli laskenut arvoon 36 µg/l. Sulfaattipitoisuus oli ennen tien rakentamista 3,5 mg/l ja viimeisessä mittauksessa 15,0 mg/l. Kloridipitoisuus oli lähtötilanteessa 1,3 mg/l, nousi tarkkailun aikana pitoisuuteen 3,3 mg/l ja laski viimeisissä analysoinneissa pitoisuuteen 2,0 mg/l.



Kuva 7. Tuhkatien laskuojan vesinäytteistä määritetyt fosforin (µg/l), sulfaatin (mg/l) ja kloridin (mg/l) pitoisuudet.

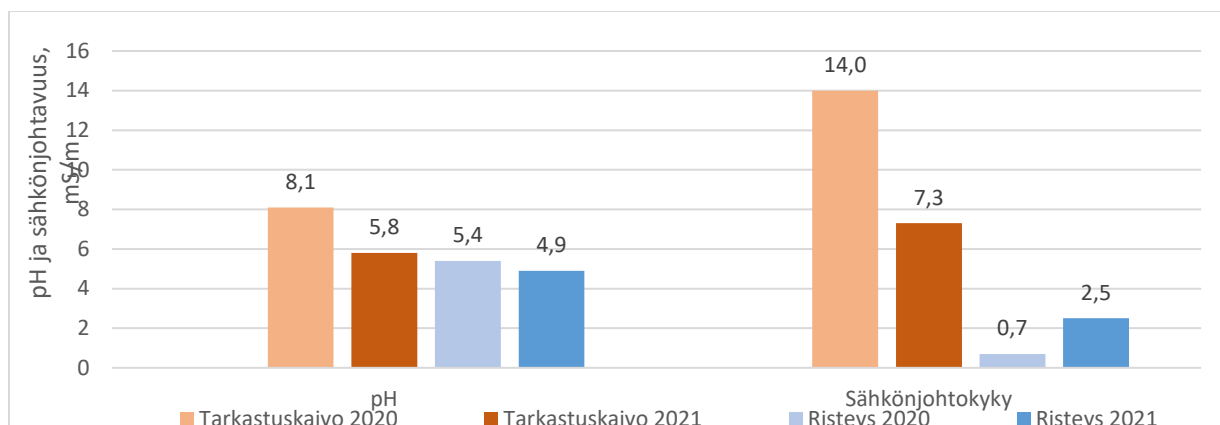
Laskuojan vesinäytteistä määritettiin hankkeen aikana myös metallipitoisuuksia. Näytteiden barium-, kromi-, sinkki-, antimoni-, arseeni-, elohopea-, kadmium-, kupari-, lyijy-, molybdeeni-, nikkeli- ja vanadiinipitoisuuden määrittystulokset on esitetty kuvassa 8. Metalleista bariumia, kromia ja sinkkiä oli määritetty lähtötilanteesta alkaen. Muita metallimäärittämiä lisättiin hankkeen toimesta. Bariumpitoisuus oli lähtötilanteessa 6,7 µg/l ja tarkkailun aikana pitoisuudet vaihtelivat 5,0–8,6 µg/l. Sinkin pitoisuus vedessä ennen tienrakentamista oli 2,9 µg/l. Hankkeen aikana analysoidut sinkkipitoisuudet ilmoitettiin tarkkuudella <5 µg/l, joten pieniä muutoksia viimeisten vuosien määrittämisistä on mahdoton havaita. Muiden määritettyjen metallipitoisuuksien osalta pitoisuudet pysyivät melko tasaisina. Niistä suurin havaittu pitoisuuden nousu oli vanadiinilla, pitoisuudesta 0,8 µg/l pitoisuuteen 1,6 µg/l. Antimoni-, elohopea-, kadmium-, kromi- ja seleenipitoisuudet jäivät kaikissa analysoinneissa alle määrittämissä.



Kuva 8. Vanhemman tuhkatien laskuojan vesinäytteistä määritetyt metallipitoisuudet.

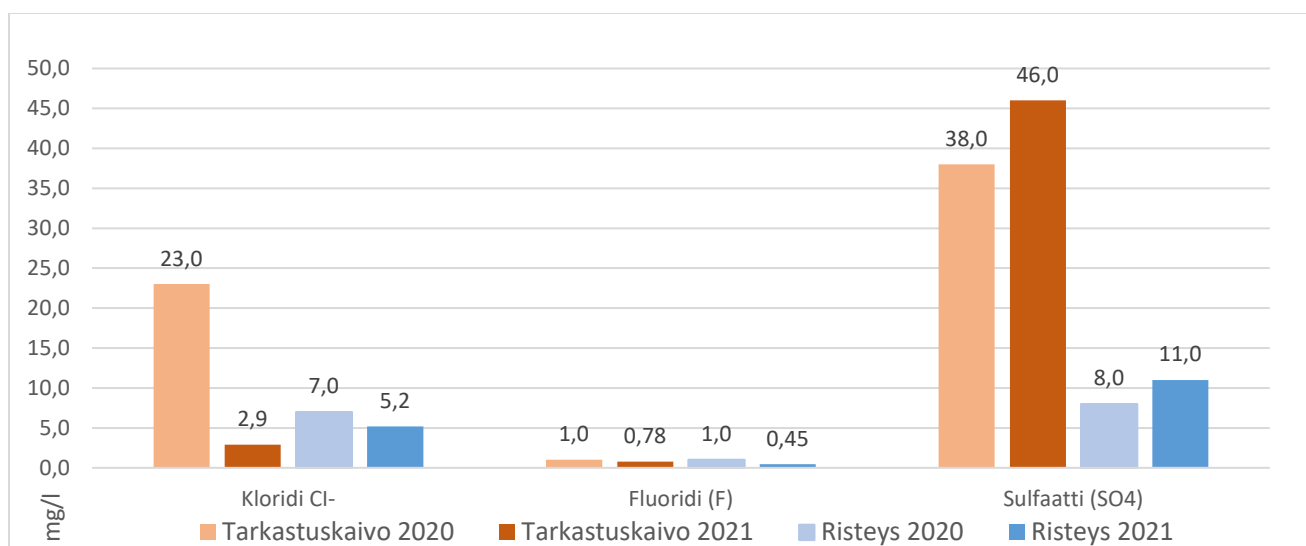
Vanhemman tiekohteen maanäytteiden tuloksia

Maanäytteistä määritettiin samoja parametreja kuin vesinäytteistä. Kuvassa 9 on esitetty pH- ja sähkönjohtavuusarvot maanäytteiden osalta. Tarkkailun aikana pH laski kummallakin näytteenottopisteellä. Tarkastuskaivon läheltä otetun näytteen pH-luku laski arvosta 8,1 arvoon 5,8, ja risteysalueen vierestä otetun näytteen pH-luku laski arvosta 5,4 arvoon 4,9. Tarkastuskaivon läheltä otetun näytteen sähkönjohtokyky laski 14 mS/m arvoon 7,3 mS/m, mutta risteysalueelta otetun näytteessä taas nousi 0,7 mS/m arvoon 2,5 mS/m.



Kuva 9. Vanhemman tiekohteen maanäytteiden pH ja sähkönjohtokyky.

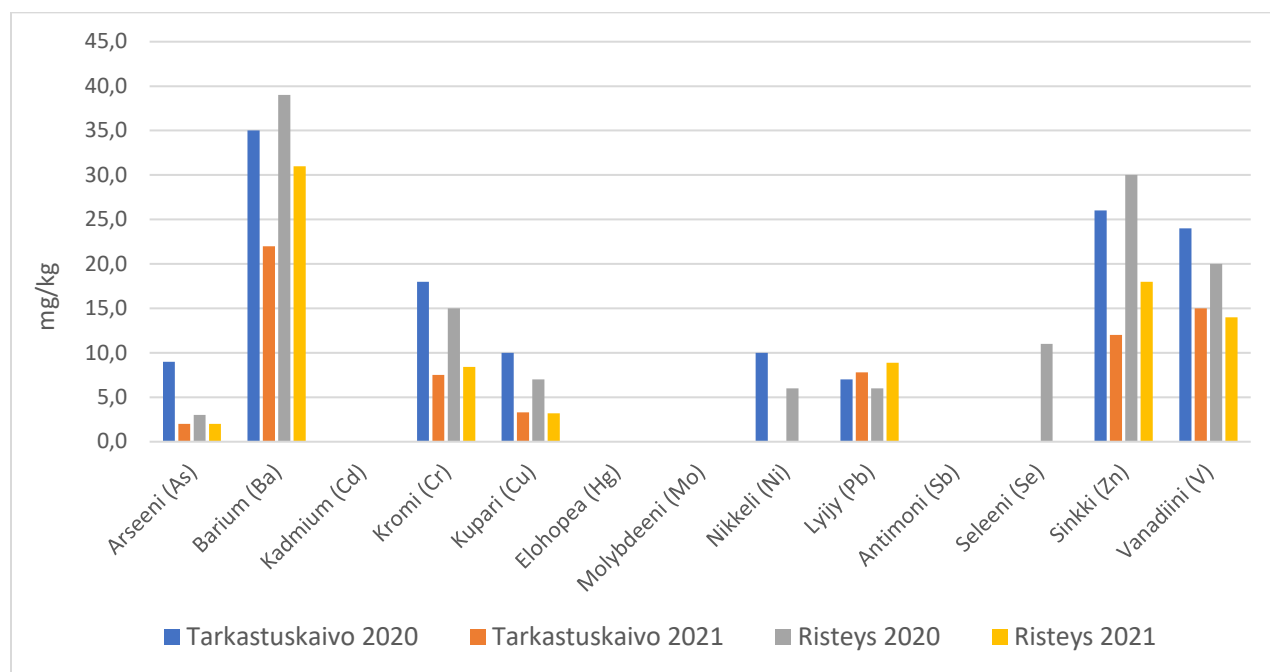
Kuvassa 10 on näytteistä analysoidut kloridi-, fluoridi ja sulfaattipitoisuudet. Sekä tarkastuskaivon läheisyydestä että risteysalueelta otettujen maanäytteiden kloridi- ja fluoridipitoisuudet laskivat. Tarkastuskaivon läheisyydestä otetun näytteen kloridipitoisuus oli vuonna 2020 otetussa näytteessä 23,0 mg/l ja vuonna 2021 arvo oli 2,9 mg/l. Risteysalueelta otetun näytteessä kloridipitoisuus oli 7,0 mg/l vuonna 2020 ja vuonna 2021 arvo oli 5,2 mg/l. Fluoridipitoisuus tarkastuskaivon alueelta otetussa näytteessä oli 1,0 mg/l vuonna 2020 ja 0,78 mg/l vuonna 2021. Risteysalueelta otetun näytteen arvo oli myös 1,0 mg/l vuonna 2020 ja 0,45 mg/l vuonna 2021. Sulfaattipitoisuus nousi kummallakin tarkkailupisteellä. Tarkastuskaivon läheisyydestä otetun näytteen sulfaattipitoisuus oli 38 mg/l vuonna 2020 ja 46 mg/l vuonna 2021. Risteysalueelta otetun näytteen tulos oli jo lähtötilanteessa pienempi, 8,0 mg/l vuonna 2020. Vuonna 2021 tulos oli 11 mg/l.



Kuva 10. Vanhemman tiekohteen maanäytteiden kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuudet.

Kuvaan 11 on koottu maaperänäytteistä analysoidut metallipitoisuudet. Pääasiassa kaikkien metallien pitoisuudet laskivat vuoden aikana sekä tarkastuskaivon läheltä otetusta maanäytteestä että risteysalueelta otetusta maanäytteestä.

Ainoastaan lyijypitoisuuksissa tapahtui pientä nousua. Lyijypitoisuus lähtötilanteessa vuonna 2020 oli tarkastuskaivon alueella 7,0 mg/kg ja risteysalueella 6,0 mg/kg. Vuonna 2021 tarkastuskaivon alueelta otetun näytteen lyijypitoisuus oli 7,8 mg/kg ja risteysalueelta otetun näytteen 8,9 mg/kg.



Kuva 11. Vanhemman tiekohteen maanäytteiden metallipitoisuudet.

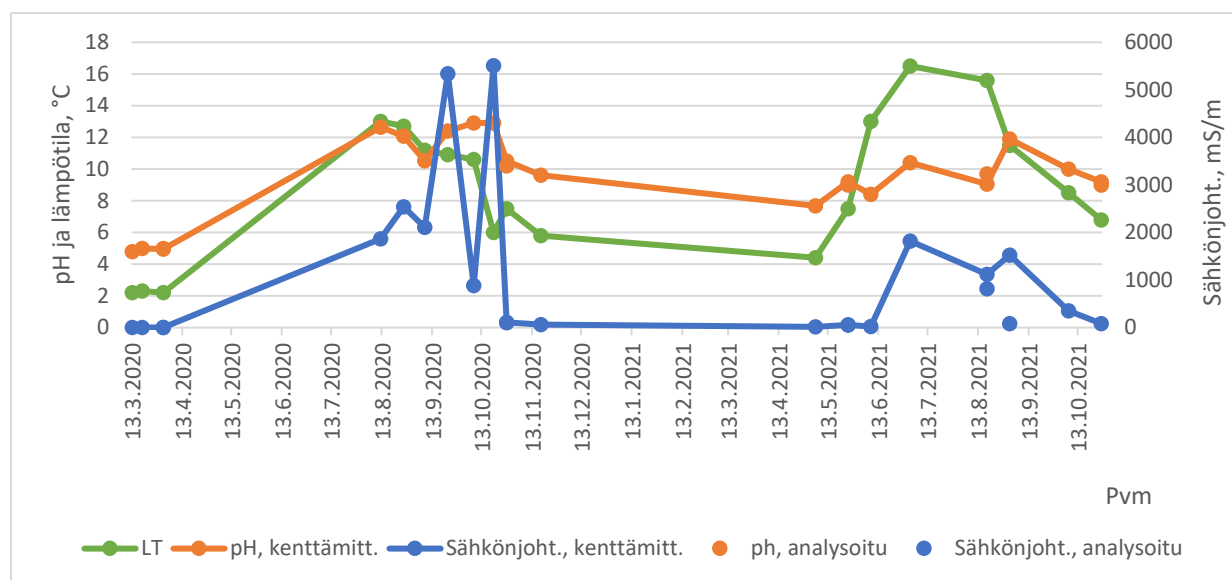
3.1.2 Uudempi tuhkatie

Uudemman tiekohteen vesinäytteiden tuloksia

Laskuojasta kenttämittarilla ja ulkopuoliseen laboratorioon lähetettyjen vesinäytteiden tulokset veden lämpötilan, pH:n ja sähkönjohtavuuden osalta on nähtävissä kuvassa 12. Lähtötilanteessa maaliskuusta 2020 otettujen näytteiden perusteella pH arvo oli 4,8–5 välillä. Kesällä ja syksyllä 2020 otetuissa näytteissä pH on noussut. Korkeimmillaan pH-arvo on ollut 13 kenttämittauksessa elokuussa 2020. Toukokuussa 2021 arvo oli laskenut ollen 7,6. Tämän jälkeen arvo on

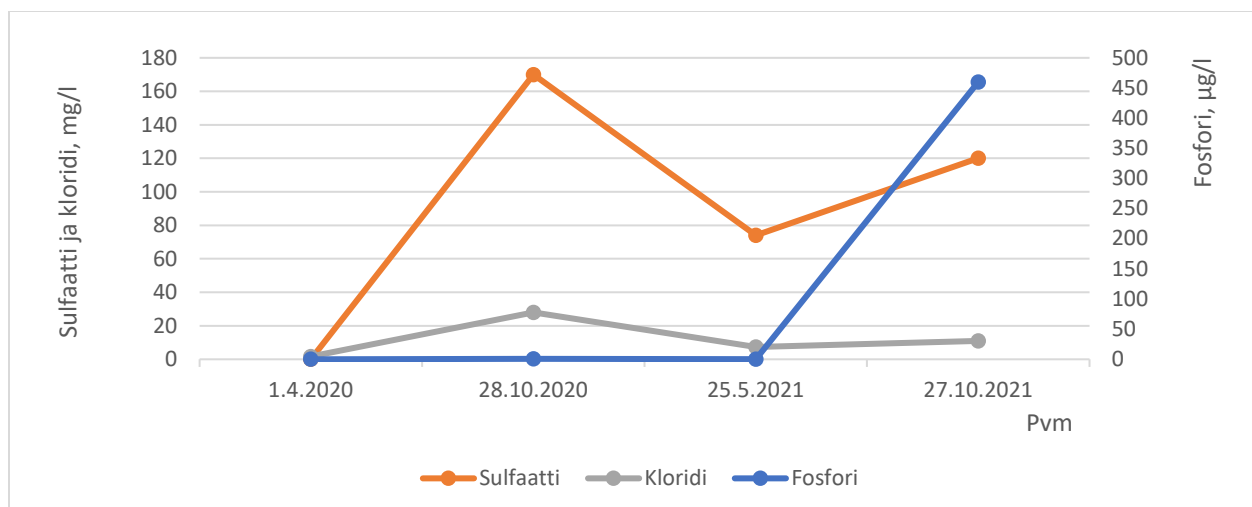
noussut kesää kohden, ollen 10,4 heinäkuussa 2021. Viimeisessä analysoinnissa lokakuussa 2021 pH-luku oli 9.

Myös sähkönjohtavuudessa oli havaittavissa samankaltaisia muutoksia kuin pH-arvoissa. Maalis-huhtikuussa 2020 arvot olivat 2–3 mS/m välillä. Elo-lokakuussa 2020 lukemat kuitenkin nousivat, ollen korkeimmillaan 5 510 mS/m kenttämittauksessa. Arvot kuitenkin laskivat ja lokakuussa 2020 sähkönjohtavuus oli 110 mS/m. Toukokuussa 2021 arvo oli lähtötasojen jälkeen matalin, 17 mS/m. Heinäkuussa 2021 lukema oli noussut 1 820 mS/m, mutta laski jälleen lokakuussa 2021 ollen 83 mS/m.



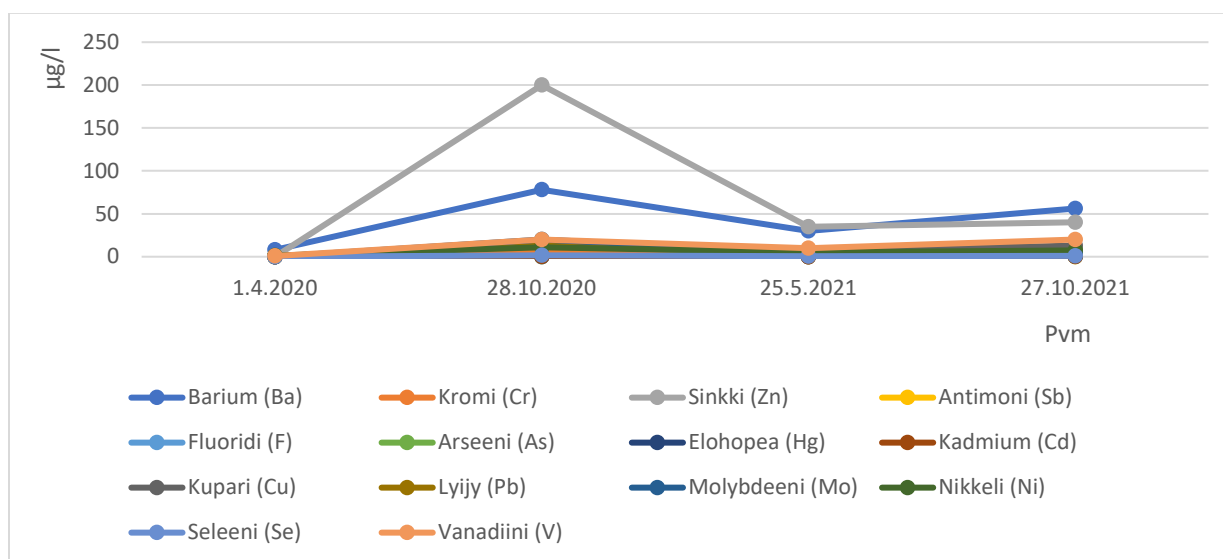
Kuva 12. Uudemman tiekohteen ojaveden laboratorioanalyysien ja kenttämittausten tulokset.

Kuvaan 13 on koottu uudemman tuhkatien laskuojan vesinäytteiden laboratoriotulokset fosfori-, kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien osalta. Fosforin pitoisuus lähtötilanteessa oli 12 µg/l ja pitoisuus nousi tarkkailun aikana ollen viimeisessä määrittäyksessä 460 µg/l lokakuussa 2021. Sulfaattipitoisuus oli ensimmäisessä määrittäyksessä alle määrittäysrajan, < 1 mg/l. Lokakuussa 2020 pitoisuus oli 170 mg/l ja viimeisessä mittauksessa 120 mg/l. Kloridipitoisuus oli lähtötilanteessa 1,7 mg/l, nousi tarkkailun aikana pitoisuuteen 28 mg/l ja laski viimeisissä analysoinneissa pitoisuuteen 11 mg/l.



Kuva 13. Tuhkatien laskuojan vesinäytteistä määritetyt fosforin (µg/l), sulfaatin (mg/l) ja kloridin (mg/l) pitoisuudet.

Myös uudemman tiekohteen laskuojan vesinäytteistä määritettiin metallipitoisuuksia. Näytteiden barium-, kromi-, sinkki-, antimoni-, arseeni-, elohopea-, kadmium-, kupari-, lyijy-, molybdeeni-, nikkeli- ja vanadiinipitoisuuden määrittystulokset on esitetty kuvassa 14. Kuvasta nähdään, että sinkin ja bariumin pitoisuudet ovat olleet korkeimmat lokakuussa 2020. Bariumpitoisuus oli lähtötilanteessa 8 µg/l, nousi arvoon 78 µg/l ja oli tarkkailun lopussa 56 µg/l. Sinkin pitoisuus vedessä ensimmäisissä määrittelyissä oli alle määrittelysrajan < 5 µg/l. Lokakuussa 2020 sinkin pitoisuus nousi arvoon 200 µg/l ja oli viimeisessä määrittelyssä 40 µg/l.

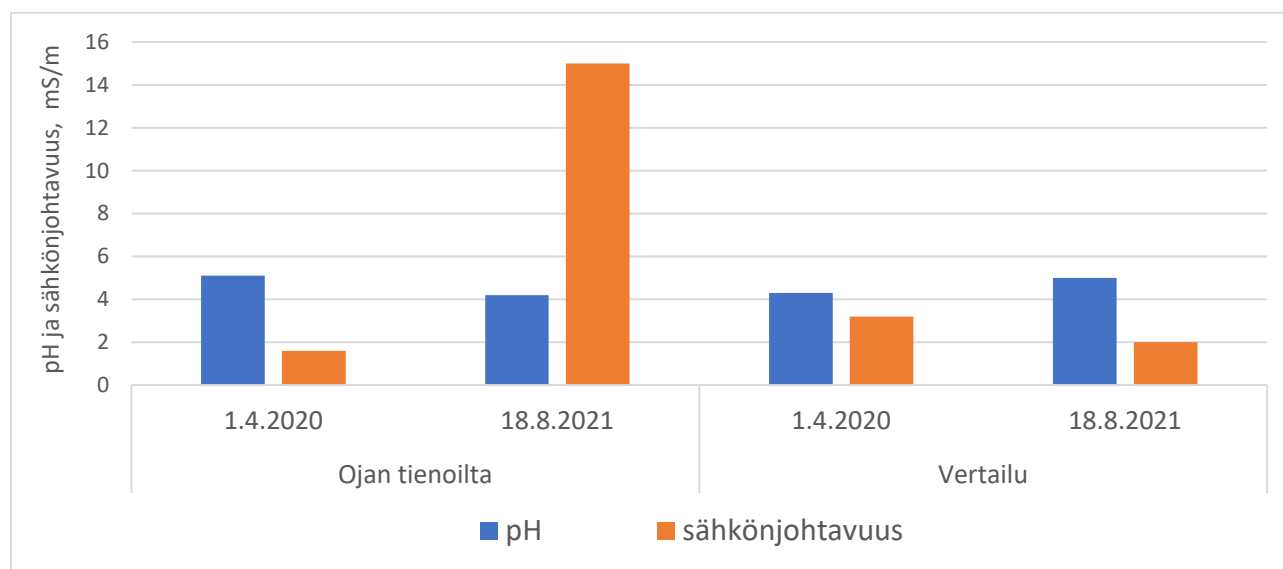


Kuva 14. Uudemman tuhkatie laskuojan vesinäytteistä määritetyt metallipitoisuudet.

Uudemman tiekohteen maanäytteiden tuloksia

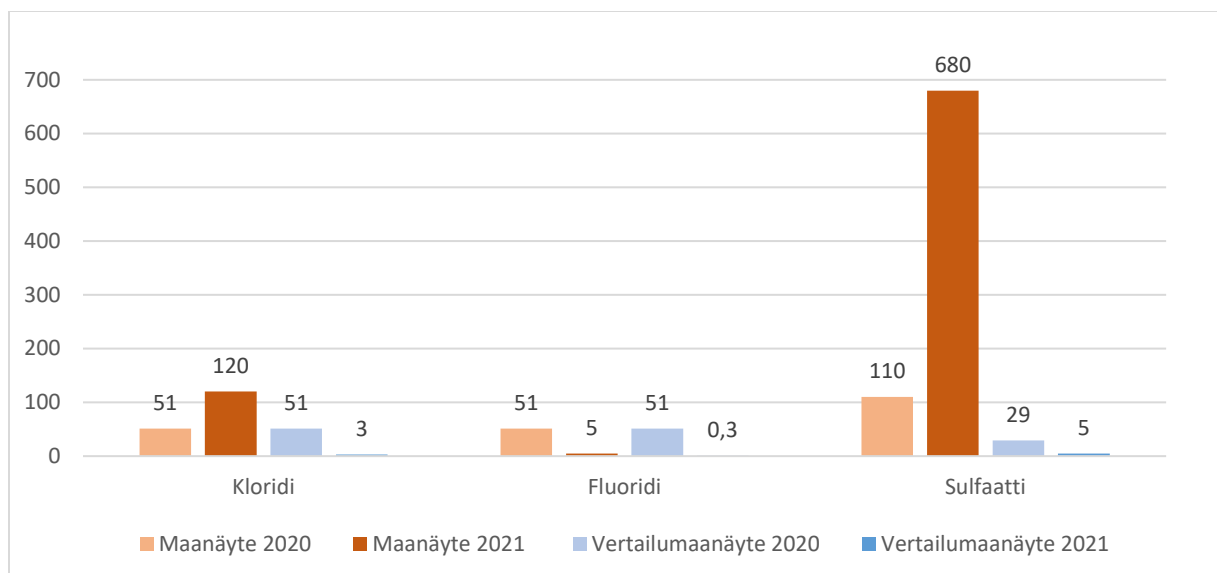
Maanäytteitä otettiin vuosina 2020 ja 2021 myös uudemmalla tieseurantakohteelta. Hankkeen aikana helmikuussa 2020 perustetusta uudemmasta tiekohteesta saatiin otettua näyte heti routan sulamisen jälkeen tien rakentamisvuonna, joten näytteen voidaan olettaa kuvaavan lähtöta-soa. Varmuudeksi otettiin myös vertailunäyte tieosuudelta, johon ei ollut käytetty tuhkaa.

Kuvassa 15 on esitetty tiekohteen maanäytteen pH-luku ja sähkönjohtavuus kummaltakin näytteenotto paikalta. pH oli lähtötilanteessa 5,1 vuonna 2020 ja 4,3 vuonna 2021. Vertailukohteen maanäytteen pH-luku oli 4,2 vuonna 2020 ja 5,0 vuonna 2021. Sähkönjohtavuus tiekohteen maanäytteessä oli 16 mS/m vuonna 2020 ja 15 mS/m vuonna 2021. Vertailukohteen maanäytteen sähkönjohtavuus oli 32 mS/m vuonna 2020 ja 2 mS/m vuonna 2021.



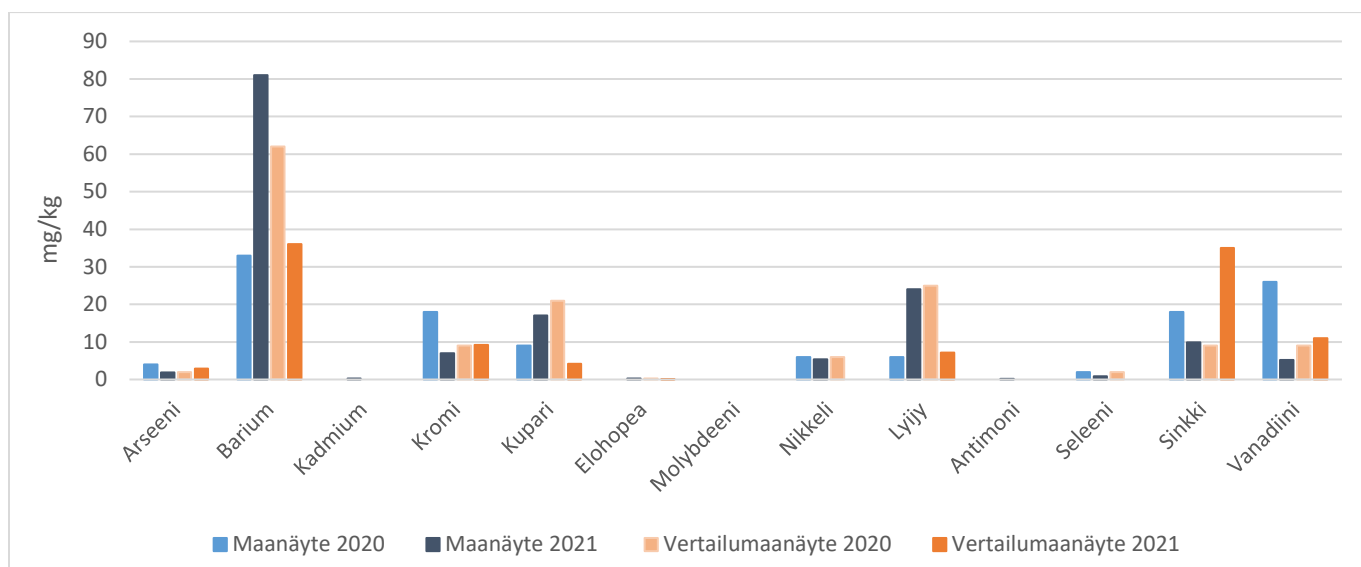
Kuva 15. Uudemman tiekohteen maanäytteistä määritetyt pH- ja sähkönjohtavuusarvot.

Kuvassa 16 on nähtävissä uudemmän tiekohteen maanäytteiden kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuudet vuosina 2020 ja 2021. Määrittystulosten perusteella tiekohteen kloridipitoisuus on noussut arvosta 51 mg/kg arvoon 120 mg/kg. Vastaavasti vertailukohteessa pitoisuus laski arvosta 51 mg/kg arvoon 2,7 mg/kg. Fluoridipitoisuus laski tiekohteessa pitoisuudesta 51 mg/kg pitoisuuteen 4,5 mg/kg ja myös vertailukohteessa oli havaittavissa pitoisuuden lasku. Sulfaattipitoisuus nousi tiekohteessa arvosta 110 mg/kg arvoon 680 mg/kg. Vertailukohteessa sulfaattipitoisuus oli jo lähtökohtaisesti pienempi (29 mg/kg) ja pieneni yhä vuonna 2021 (5 mg/kg).



Kuva 16. Uudemman tiekohteen maanäytteiden kloridi-, fluoridi- ja sulfaattipitoisuuksien muutos vuodesta 2020 vuoteen 2021.

Metallipitoisuuksien osalta määritystulokset ovat nähtävissä kuvassa 17. Tiekohteessa ovat arseenin, kromin, nikkelin, seleenin, sinkin ja vanadiinin pitoisuudet laskeneet lähtötilanteesta. Bariumin, kuparin ja lyijyn pitoisuudet ovat vastaavasti nousseet lähtötilanteen arvoista. Kadmiumin, elohopean, molybdeenin ja antimonin määritystulokset ovat pysyneet molempina vuosina lähellä määritysrajaa. Vertailukohteessa vastaavasti sinkin ja vanadiinin pitoisuudet ovat nousseet, muiden raskasmetallien osalta pitoisuus on laskenut tai pysynyt lähes samana.



Kuva 17. Uudemman tiekohteen maanäytteiden raskasmetallipitoisuuksien muutos vuodesta 2020 vuoteen 2021.

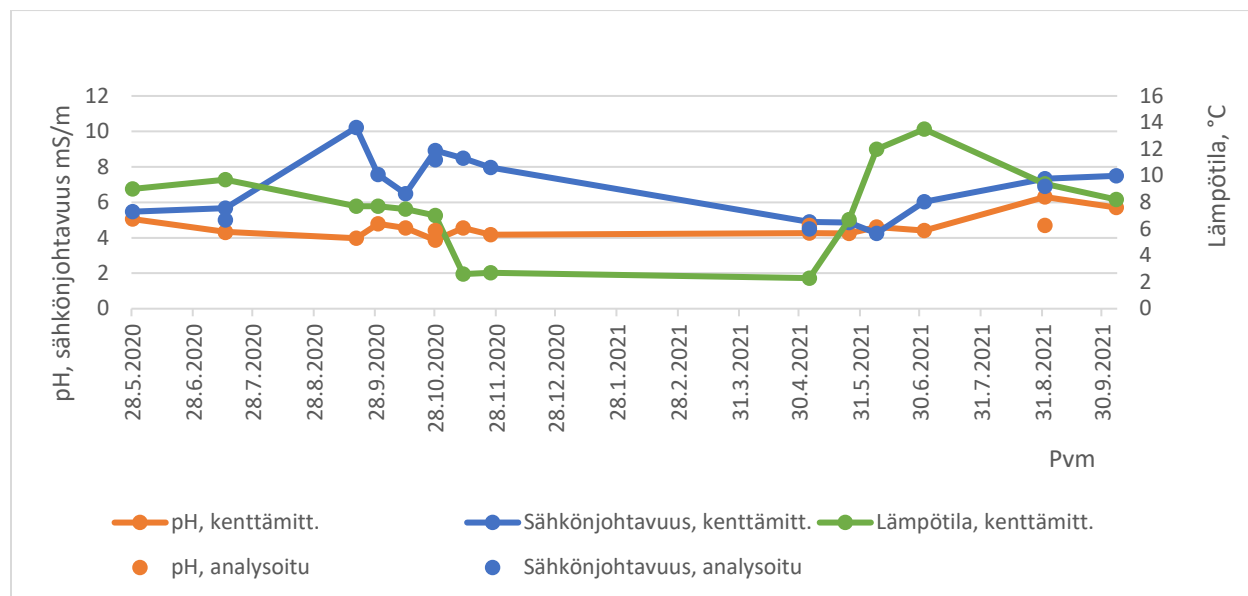
3.2 Tuhkalannoitus

3.2.1 Tuhkalannoituskohde

Metsäalueella toteutettiin tuhkalannoitus lentolevityksellä elokuun lopulla 2020. Lannoitteena käytettiin alueelle sopivaa Ecolan Horus tuhkalannoitetta 3 000 kg/ha.

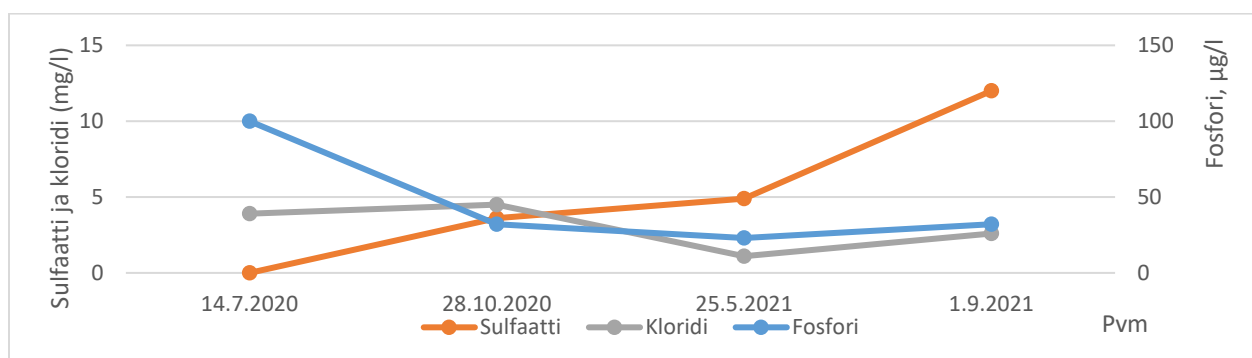
Tuhkalannoitusalueen ojaveden tulokset

Metsäalueella tehtiin kenttämittauksia ja otettiin vesinäytteitä metsäojasta. Kuvaan 18 on koottu vesinäytteiden kenttämittaukset sekä ulkopuolisen laboratorion tulokset ojaveden lämpötilan, pH:n ja sähkönjohtavuuden osalta. Vesinäytteiden perusteella sähkönjohtavuus pysyi koko seurannan ajan luonnonvesien viitearvon 5–10 mS/m sisällä. Myös pH taso pysyi melko stabiilina. Vuonna 2020 otetuissa näytteissä pH-arvot olivat 4,3 ja 4,4 ja vuoden 2021 näytteissä tulos oli kummallakin kerralla 4,7. Matala pH taso on turvemaille tyypillistä. Kenttämittauksissa saatiin laboratoriotuloksia vastaavia lukuja.



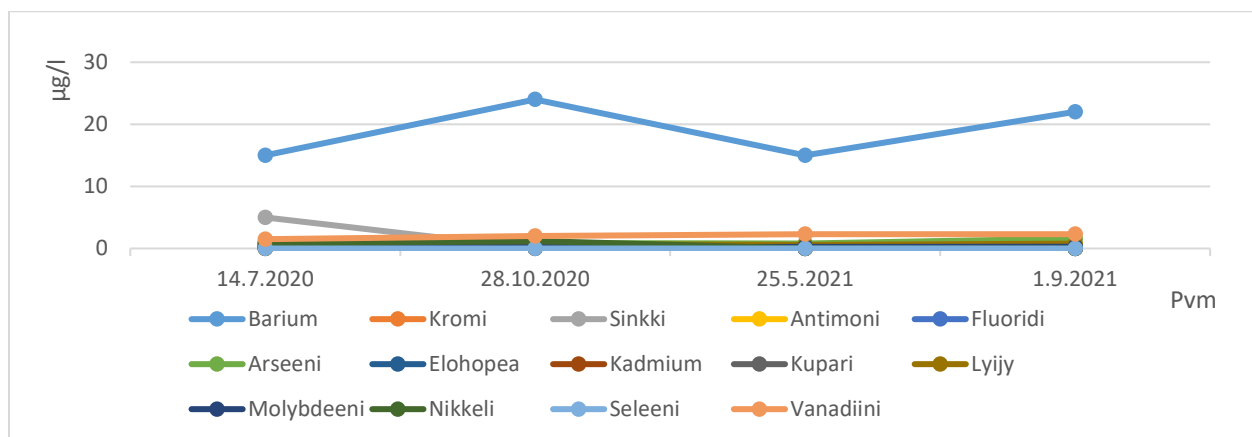
Kuva 18. Tuhkalannoituskohteen ojaveden laboratorioanalyysien ja kenttämittausten tulokset.

Kuvaan 19 on koottu tarkkaillun lannoituskohteesta analysoidut vesinäytepisteen fosfori-, sulfaatti- ja kloridipitoisuudet. Fosforin pitoisuus oli ennen lannoitusta 100 µg/l ja viimeisessä määrittäyksessä pitoisuus oli 32 µg/l. Sulfaattipitoisuus oli lähtötilanteessa alle määrittäysrajan (< 1 mg/l) ja viimeisessä analysoinnissa 12 mg/l. Kloridipitoisuus oli ennen lannoitusta 3,9 mg/l ja laski viimeisissä analysoinneissa pitoisuuteen 2,6 mg/l.



Kuva 19. Tuhkalannoituskohteen ojan vesinäytteistä määritetyt fosforin (µg/l), sulfaatin (mg/l) ja kloridin (mg/l) pitoisuudet.

Kuvaan 20 on koottu vesinäytteistä määritetyt raskasmetallipitoisuudet. Suuria muutoksia lähtötilanteeseen ei lannoituksen myötä tullut. Bariumpitoisuus oli lähtötilannetta korkeampi lokakuussa 2020, mutta laski samaan arvoon toukokuussa 2021. Syyskuussa 2021 pitoisuus oli jälleen hieman korkeampi. Sinkkipitoisuudelle saatiin lähtötilanteessa määritettyä pitoisuus 5 µg/l, muissa määrittäyksissä arvo jäi alle määrittäysrajan (< 5 µg/l). Vanadiinipitoisuus oli lähtötilanteessa 1,5 µg/l ja viimeisessä näytteessä 2,3 µg/l. Arseeni-, molybdeeni-, kromi-, elohopea-, nikkeli-, kadmium-, seleeni-, antimoni-, kupari-, fluoridi- ja lyijypitoisuudet eivät juuri muuttuneet vuoden aikana.



Kuva 20. Tuhkalannoituskohteen metsäojan vesinäytteistä määritetyt raskasmetallipitoisuudet.

Tuhkalannoituskohteen maanäytteiden tulokset

Taulukossa 2 on nähtävissä tulokset metsäkohteen maaperänäytteiden osalta ennen lannoitusta ja lannoituksen jälkeen. Kohteen kasvupaikka oli varputurvekangas (Vatkg I) ja puuston kehitysluokka vaihteli kuvioittain taimikkovaiheisesta metsästä (kuvio 15) nuoreen kasvatusmetsään (kuvio 28). Kyseisen alueen pääpuulaji oli mänty, ja kohde oli aikoinaan ojitettu. (Teittinen 2021.)

Taulukko 2. Tuhkalannoitetun metsäkohteen analyysitulokset ennen lannoitusta (2020) ja lannoituksen jälkeen (2021).

Ravinneanalyysit		25.6.2020	11.8.2021	25.6.2020	11.8.2021
Analyytti	Yksikkö	Kuvio 15	Kuvio 15	Kuvio 28	Kuvio 28
pH		4,3	3,9	4,7	3,9
Typpi (N)	g/kg	17,8	15,9	14,3	13,8
Fosfori (P)	g/kg	0,5	0,6	0,4	0,6
Kalium (K)	g/kg	0,2	4,5	0,2	0,4
Kalsium (Ca)	g/kg	1,8	2,7	1,5	1,7
Magnesium (Mg)	g/kg	0,3	3,9	0,3	0,4
Boori (B)	g/kg	0,4	2,7	0,2	2,8
Kupari (Cu)	mg/kg	<0,4	0,4	<0,4	<0,4
Sinkki (Zn)	mg/kg	3,6	3,6	3,1	4,4
Mangaani (Mn)	mg/kg	74,0	33	49,0	26
Arseeni (As)	mg/kg	<5,7	<6,1	<5,7	<5,9
Kadmium (Cd)	mg/kg	0,24	0,29	0,24	0,18
Kromi (Cr)	mg/kg	<3,4	<3,6	<3,4	<3,6
Tuhka	%	3,97	3,96	2,38	3,07

Maaperäanalyysi ennen lannoitusta osoittaa, että kuviolla 15 typpi-, fosfori-, kalium-, magnesium- ja booripitoisuudet olivat huononlaisia ja kalsiumpitoisuus oli huono. Myös kokonaistyyppi oli huononlainen. Kuviolla 28 fosfori-, kalium-, magnesium- ja booripitoisuudet olivat myös huononlaisia ja kokonaistyyppi- sekä kalsiumpitoisuudet huonoja. Kuvioiden pH tasot 4,3 ja 4,7 olivat tyydyttävällä tasolla.

Mikäli kohteen typpipitoisuus on alle 1,5 %, pidetään sitä alhaisena. Tulosten perusteella voi todeta, että kuvion 15 typpipitoisuus oli ennen tuhkalannoitusta yli 1,5 % (1,78 %) kun taas kuvion 28 typpipitoisuus oli alhainen (1,43 %).

Maanäytteet uusittiin noin vuoden päästä lannoituksesta. Erityisesti taimikkovaiheisen kuvion 15 kalium ($0,2 > 4,5$ tyydyttävä), kalsium ($1,8 > 2,7$ huono), magnesium ($0,3 > 3,9$ tyydyttävä), ja booritasoissa ($0,4 > 2,7$ tyydyttävä) oli havaittavissa nousua. Fosforipitoisuudessa ei juurikaan ollut tapahtunut muutosta ($0,5 \text{ g/kg} > 0,6 \text{ g/kg}$). Kokonaistyyppi-prosentti ($1,78 \% > 1,59 \%$) laski. Myös pH ($4,3 > 3,9$) oli laskenut.

Kuvion 28 osalta lannoituksen vaikutus ravinteisiin oli hyvin vähäistä. Ainoastaan boorin määrässä oli tapahtunut selkeämpi muutos ($0,2 > 2,8$ tyydyttävä). Myöskin tällä kohteella pH ($4,7 > 3,9$) ja kokonaistypen ($14,8 > 13,8$) määrä olivat laskeneet. Typpi-prosentti oli 1,38 %. pH-arvot laskivat vuoden aikana kummallakin kuviolla huonolle tasolle. Kuvion 15 typpi-prosentti ylitti kuitenkin alhaisen typpipitoisuuden (1,5 %) rajan vielä niukasti (1,59 %).

Näytteiden kupari-, mangaani- ja sinkkipitoisuudet olivat analyysin perusteella vähintään tyydyttävällä tasolla sekä vuoden 2020 että 2021 tuloksissa. Muutokset olivat vähäisiä. Isoin muutos oli mangaanipitoisuudessa, joka oli vuoden aikana laskenut kummallakin kuviolla. Maanäytteistä määritettyjen raskasmetallien (arseeni, kadmium ja kromi) pitoisuuksissa ei tapahtunut merkittävää muutosta.

Tuhkalannoituskohteen varpujen ja marjojen ravinne- ja raskasmetallipitoisuudet

Marja- ja varpunäytteitä kerättiin lannoitetulta alueelta mahdollisimman edustavasti. Taulukkoon 3 on koottu lannoituskohteelta kerättyjen marjojen laboratoriotulokset. Laboratoriotulosten perusteella mustikan marjan booripitoisuus nousi eniten ($5,5 \text{ g/kg} > 8,7 \text{ g/kg}$). Kalsiumpitoisuus säilyi ennallaan ja kaliumpitoisuus nousi ($6,2 \text{ g/kg} > 7,0 \text{ g/kg}$). Myös juolukan marjan tulokset olivat vastaavanlaiset. Booripitoisuus juolukanmarjoissa nousi $6,9 \text{ g/kg} > 11 \text{ g/kg}$, kalium $5,4 \text{ g/kg} > 7,2 \text{ g/kg}$ ja kalsiumpitoisuus säilyi ennallaan. Magnesium-, natrium- ja fosforipitoisuuksissa ei tapahtunut juurikaan muutoksia. Marjojen raskasmetallipitoisuudet olivat pääosin ennallaan. Ainoastaan alumiinitasossa oli nousua. Mustikan marjan alumiinipitoisuus nousi $60 \text{ mg/kg} > 100 \text{ mg/kg}$ ja juolukan marjan $20 \text{ mg/kg} > 67 \text{ mg/kg}$.

Taulukko 3. Lannoituskohteen marjojen vertailutulokset ennen ja jälkeen lannoitusta.

Analyysi	Yksikkö	6.8.2020	11.8.2021	6.8.2020	11.8.2021
		Mustikka/ marja	Mustikka/ marja	Juolukka/ marja	Juolukka/ marja
Fosfori (P)	g/kg ka	0,97	0,9	1,0	1,1
Kalium (K)	g/kg ka	6,20	7	5,4	7,2
Kalsium (Ca)	g/kg ka	1,30	1,3	1,1	1,1
Magnesium (Mg)	g/kg ka	0,61	0,6	0,57	0,61
Natrium (Na)	g/kg ka	0,28	<0,23	<0,22	<0,23
Alumiini (Al)	mg/kg ka	86	100	20	67
Boori (B)	mg/kg ka	5,5	8,7	6,9	11
K/(Ca+Mg) ekv. Suhde		1,4	1,7	1,4	1,9
Arseeni (As)	mg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Kromi (Cr)	mg/kg	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Titaani (Ti)	mg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Taulukossa 4 nähtävät varpujen laboratoriotulokset olivat melko samanlaiset kuin marjojen. Ravinteiden osalta ainoastaan booritasoissa oli selkeämpää muutosta. Mustikan varvulla taso nousi 13 mg/kg > 29 mg/kg ja juolukalla 13 mg/kg > 49 mg/kg. Varpujen osalta raskasmetallitasot pysyivät samoina kuin lähtötilanteessa tai laskivat. Määritettyjä raskasmetalleja ei näiden tutkimusten perusteella suuressa määrin kertynyt marjoihin tai varpuihin.

Taulukko 4. Lannoituskohteen varpujen vertailutulokset ennen ja jälkeen lannoitusta.

		6.8.2020	11.8.2021	6.8.2020	11.8.2021
Analyysi	Yksikkö	Mustikka/ varpu	Mustikka/ varpu	Juolukka/ varpu	Juolukka/ varpu
Fosfori (P)	g/kg ka	0,8	0,81	0,86	0,98
Kalium (K)	g/kg ka	3,9	4,1	3,2	4,8
Kalsium (Ca)	g/kg ka	8,5	8,4	5,0	5,4
Magnesium (Mg)	g/kg ka	1,6	1,6	1,8	1,9
Natrium (Na)	g/kg ka	<0,21	<0,21	<0,21	<0,21
Alumiini (Al)	mg/kg ka	200	150	41	31
Boori (B)	mg/kg ka	13	29	13	49
K/(Ca+Mg) ekv. Suhde		0,18	0,19	0,21	0,3
Arseeni (As)	mg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Kromi (Cr)	mg/kg	0,7	<0,1	0,6	0,2
Titaani (Ti)	mg/kg	1	0,7	0,7	<0,5

Alueen varvuista ja sammalista otettiin kuvia multispektrikameralla, mutta kuvista ei saatu oleellisia havaintoja. Marjasadossa ja varpujen määrässä ei silmämääräisesti ollut merkittäviä eroja vuositasona. Myöskään lisääntyvää heinä- tai ruoholajien määrää ei ollut havaittavissa. Normaali vuosittain vaihtelu vaikuttaa myös marjasadon ja kasvuston määrään.

3.2.2 Tuhkalannoitetut koealat

Koealojen neulasnäytteiden tulokset

Koealoilla ei neulasnäytteissä tapahtunut vuosien 2017–2021 aikana merkittäviä muutoksia lannoittamattomien tai tuhkalannoitettujen kohteiden välillä. Vuonna 2017 lähtötilanteessa puolukkaturvekankaalla lannoittamattoman nollavertailualan ravinnepitoisuudet olivat fosforipitoisuutta lukuun ottamatta tyydyttävällä tasolla. Vuonna 2021 tulos oli yhä sama, kaikkien ravinteiden ollessa tyydyttävällä tasolla ja fosforin ollessa yhä huonolla tasolla. Tuhkalannoitettulla alalla oli lähtötilanteessa nollavertailualaa vastaava tilanne vuonna 2017. Fosforipitoisuus oli huono ja muut ravin-

teet olivat tyydyttävällä tasolla. Vuonna 2021 otetuissa näytteissä fosforipitoisuus oli noussut huonosta huononlaiseksi. Sinkkipitoisuus oli laskenut tyydyttävästä huonoksi ja muut ravinteet olivat yhä tyydyttävällä tasolla. Määritetyt parametrit ovat nähtävissä tarkemmin taulukossa 5.

Taulukko 5. Puolukkaturvekankaan koealojen neulasnäytteiden analyysitulokset ennen lannoitusta (2017) ja lannoituksen jälkeen (2021).

Neulasnäytteet		20.11.2017		1.11.2018		19.1.2021	
Puolukkaturvekangas, Ptkg	Yksikkö	nolla	tuhka	nolla	tuhka	nolla	tuhka
Kokonaistyyppi	g/kg ka	15,3	15,5	16,5	15,7	16,5	16,9
Fosfori	g/kg ka	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4
Kalium	g/kg ka	5,2	4,7	5,4	5,5	4,8	4,8
Kalsium	g/kg ka	2,9	3,0	2,9	3,1	3,2	3,2
Magnesium	g/kg ka	1,2	1	1,1	1,2	1,1	1,2
Kupari	g/kg ka	<5,2	<5,2	<5,2	<5,2	6,6	6,6
Mangaani	g/kg ka	300	390	360	390	340	180
Sinkki	g/kg ka	52	47	43	50	46	39
Boori	g/kg ka	12	9,9	29	17	14	23

Tuoreen kankaan lannoittamattomalla nollavertailualalla vuonna 2017 typpipitoisuus oli huono, fosforipitoisuus välttävä ja kuparipitoisuus korkea. Muiden analysoitujen ravinteiden pitoisuudet olivat tyydyttävällä tasolla. Tuhkakoealan lähtötilanteessa vuonna 2017 typpi- ja magnesiumpitoisuus olivat huonoja ja fosforipitoisuus huononlainen. Muut ravinteet olivat tyydyttävällä tasolla, paitsi kuparipitoisuus, joka oli myös tällä koealalla korkea.

Vuonna 2021 nollavertailualan näytteissä ei ollut suuria muutoksia vuoteen 2017 tuoreella kankaalla. Typpipitoisuus oli noussut huonosta huononlaiseksi. Fosforipitoisuus oli sen sijaan laskenut välttävästä huononlaiseksi. Muut ravinteet olivat yhä tyydyttävällä tasolla, ja kuparipitoisuus oli korkealla tasolla.

Tuhkakoealalla fosforipitoisuus oli laskenut huononlaisesta huonoksi. Kokonaistyyppi oli noussut huonosta huononlaiseksi ja muut ravinteet olivat yhä tyydyttävällä tasolla. Kuparipitoisuus oli myös tuhkakoealalla korkealla tasolla. Saadut tulokset ovat nähtävissä tarkemmin taulukossa 6.

Taulukko 6. Tuoreen kankaan koealojen neulasnäytteiden analyysitulokset ennen lannoitusta (2017) ja lannoituksen jälkeen (2021).

Neulasnäytteet		20.11.2017		1.11.2018		19.1.2021	
Tuore kangas, MT	Yksikkö	nolla	tuhka	nolla	tuhka	nolla	tuhka
Kokonaistyyppi	g/kg ka	11,8	11,9	13,8	16,5	13,1	13,6
Fosfori	g/kg ka	1,6	1,4	1,5	1,4	1,5	1,3
Kalium	g/kg ka	6,4	6,4	6,9	7,6	6,0	5,8
Kalsium	g/kg ka	5,7	7,2	5,5	6,3	6,5	8,0
Magnesium	g/kg ka	1	0,98	1,1	1,2	1,2	1,3
Kupari	g/kg ka	<5,1	<5,2	<5,1	<5,1	<5,1	<5,2
Mangaani	g/kg ka	610	700	620	910	480	350
Sinkki	g/kg ka	46	41	43	41	37	31
Boori	g/kg ka			8,9	13	8,3	8,1

Koealojen maanäytteiden tuloksia

Koealoilta otettiin viimeisimmät maanäytteet 1.11.2021. Vertailu aiemmin otettujen (20.11.2017 ja 1.11.2018) maanäytteiden välillä on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Puolukkaturvekankaan koealojen maanäytteiden analyysitulokset ennen lannoitusta (2017 ja 2018) sekä lannoituksen jälkeen (2021).

Maanäytteet		20.11.2017		1.11.2018		1.11.2021	
Puolukkaturvekangas Ptkg	Yksikkö	nolla	tuhka	nolla	tuhka	nolla	tuhka
Pintamaan maalaji		Ct	Ct	LCt	LCt	LCt	LCt
Johtoluku	10xmS/cm	1,1	0,8	0,9	1	1,5	1,2
pH		4,9	4,6	4,8	4,5	4,5	4,6
Kokonaistyyppi	%	2,29	2,4	1,91	2,17	2,77	2,57
Kupari	[mg/l]	1,9	2,0	1,9	2,4	2,2	1,7
Mangaani	[mg/l]	5,9	8,5	15	32	56	35
Sinkki	[mg/l]	1,4	1,2	1,9	1,2	2,6	2,1

Puolukkaturvekankaalla ei vuosina 2017–2021 tapahtunut merkittäviä muutoksia lannoittamattoman tai tuhkalannoitetun alueiden näytteiden tuloksissa. Maan johtoluku oli nollakoealalla vuonna 2017 1,1. Vuonna 2018 luku oli 0,9 ja vuonna 2021 1,5. Tuhkakoealalla vastaavat arvot olivat 0,8,

1 ja 1,2. Tuhkalla lannoitetun koealan pH-arvo oli tarkasteluvuosien ajan tasainen 4,5–4,6. Nollakoealan pH oli lähtötilanteessa hieman korkeampi, 4,9, josta se laski ollen viimeisessä määrittämisessä 4,5.

Kummankin koealan kokonaistyyppipitoisuus laski hieman vuodesta 2017 vuoteen 2018. Nollakoealalla lähtötilanteessa pitoisuus oli 2,29 mg/l ja vuonna 2018 1,91 mg/l. Tuhkakoealalla lasku oli suunnilleen yhtä suuri, lähtötilanteessa arvon ollessa 2,4 mg/l ja vuonna 2018 2,17 mg/l. Tyyppipitoisuus oli vuonna 2021 kummallakin koealalla edellisiä määrittäksiä korkeampi.

Vertailtavista hivenravinteista kuparipitoisuus nousi hieman nollakoealalla vuosien aikana, arvosta 1,9 mg/l arvoon 2,2 mg/l. Tuhkakoealalla pitoisuus nousi ensin (2,0 mg/l -> 2,4 mg/l), mutta laski vuoteen 2021 pitoisuuteen 1,7 mg/l. Mangaanipitoisuus nousi nollakoealalla vuosien aikana. Lähtötaso oli 5,9 mg/l, vuonna 2018 arvo oli 15 mg/l ja vuonna 2021 56 mg/l. Tuhkakoealalla mangaanipitoisuus nousi myös (8,5 mg/l -> 35 mg/l), mutta ei niin merkittävästi kuin nollakoealalla. Myös sinkkipitoisuus koealoilla nousi. Nollakoealalla lähtötasosta 1,4 mg/l arvoon 2,6 mg/l ja tuhkakoealalla 1,2 mg/l -> 2,1 mg/l.

Koealojen kalsiumpitoisuus oli lähtötilanteessa vuonna 2017 molemmilla aloilla välttävä. Kalsiumpitoisuusarvio kohosi tyydyttäväksi molemmilla aloilla vuonna 2021. Fosforipitoisuus oli tuhkalannoitetulla alalla huononlainen vuonna 2017, huono vuonna 2018 ja tyydyttävä vuonna 2021. Käsittelemättömällä vertailualalla fosforipitoisuus arvioitiin huonoksi vuosina 2017 ja 2018 ja tyydyttäväksi vuonna 2021. Magnesiumpitoisuus oli molemmilla aloilla hyvä vuonna 2017, mutta laski tyydyttäväksi vuosina 2018 ja 2021. Kaliumpitoisuus säilyi tuhkalannoitetulla koealalla ennallaan, olleen yhä huononlainen. Lannoittamattomalla koealalla pitoisuus nousi huononlaisesta tyydyttäväksi. Booripitoisuus nousi molemmilla koealoilla huononlaisesta tyydyttävään.

Tuoreella kankaalla muutokset olivat hyvin samankaltaisia kuin puolukkaturvekankaalla ja ovat nähtävissä taulukossa 8. Muutokset olivat pieniä ja kuten puolukkaturvekankaalla niin myös tuoreella kankaalla, suurimmat muutokset tapahtuivat mangaani- ja sinkkipitoisuuksissa.

Taulukko 8. Tuoreen kankaan koealojen maanäytteiden analyysitulokset ennen lannoitusta (2017 ja 2018) sekä lannoituksen jälkeen (2021)

Maanäytteet		20.11.2017		1.11.2018		1.11.2021	
Tuore kangas MT	Yksikkö	nolla	tuhka	nolla	tuhka	nolla	tuhka
Pintamaan maalaji		HtMr	HtMr	HtMr	HtMr	HkMr	HkMr
pH		4,9	4,7	4,9	5,1	5,2	4,6
Kalsium	mg/l	170	140	170	260	180	110
Fosfori	mg/l	<1,5	<1,5	1,6	<1,5	<1,5	<1,5
Kalium	mg/l	44	48	53	44	41	43
Magnesium	mg/l	38	38	37	38	34	34
Kupari	mg/l	1	1,6	2,1	1,2	1,2	1,0
Mangaani	mg/l	18	11	10	7,6	8,5	9,2
Sinkki	mg/l	1,2	1,6	2,2	<1	1,6	<1

Maanäytteiden pH on säilynyt melko tasaisena. Vuonna 2017 nollakoealan pH arvo oli 4,9 ja tuhalla lannoitetun alan 4,7. Vuonna 2018 nollakoealan arvo oli sama kuin edellisenä vuonna, 4,9, ja tuhkakoealan arvo 4,9. Vuonna 2021 nollakoealan kivennäismaan pH arvo oli 5,2 ja tuhkakoealan 4,6.

Kalsiumpitoisuus nollakoealalla oli vuosina 2017 ja 2018 arvioitu huonoksi, tuloksen ollessa 170 mg/l. Vuonna 2021 kivennäismaan kalsiumpitoisuus oli hieman noussut (180 mg/l) ja tulos oli välttävä. Tuhkakoealan lähtötaso oli huono, 140 mg/l. Vuonna 2018 arvo oli 260 mg/l ja vuonna 2021 kivennäismaan pitoisuus oli laskenut 110 mg/l, ollen yhä huononlainen. Fosforipitoisuus ei juurikaan muuttunut vuosien aikana. Nollakoealan lähtötaso oli huono, pitoisuuden ollessa <1,5 mg/l. Vuonna 2018 arvo oli 1,6 mg/l ja vuonna 2021 jälleen <1,5 mg/l. Tuhkakoealan pitoisuus oli kaikissa analyyseissä huono <1,5 mg/l.

Kaliumpitoisuus oli kummallakin koealalla huononlainen, ollen nollakoealalla vuonna 2017 44 mg/l ja tuhkakoealalla 48 mg/l. Vuonna 2018 nollakoealalla pitoisuus oli noussut 53 mg/l kun taas tuhkakoealan pitoisuus oli laskenut 44 mg/l. Viimeisissä analyyseissä nollakoealan arvo oli 41 mg/l ja tuhkakoealan 43 mg/l. Magnesiumpitoisuus nollakoealalla oli lähtötilanteessa huono, 38 mg/l. Vuonna 2018 arvo oli 37 mg/l ja vuonna 2021 34 mg/l. Tuhkakoealalla arvo oli myös huono, pitoisuuden ollessa 38 mg/l vuosina 2017 ja 2018 ja vuonna 2021 34 mg/l.

Kuparipitoisuus nollakoealalla oli huono vuonna 2017. Vuoden aikana pitoisuus nousi 1 mg/l > 2,1 mg/l. Vuonna 2021 kivennäismaan pitoisuus oli 1,2 mg/l. Tuhkakoealan pitoisuus laski vuosien aikana. Lähtötaso 1,6 mg/l oli tyydyttävä. Seuraavana vuonna tulos oli 1,2 mg/l ja vuonna 2021 pitoisuus oli 1,0 mg/l. Mangaanipitoisuudessa tapahtui selkeämpiä muutoksia. Vuonna 2017 nollakoealalla pitoisuus oli välttävä, 18 mg/l. Vuonna 2018 arvo oli 10 mg/l ja vuonna 2021 kivennäismaan pitoisuus oli 8,5 mg/l. Vastaava ilmiö oli havaittavissa myös tuhkakoealan pitoisuuden kehityksessä. Vuonna 2017 arvo oli huononlainen 11 mg/l, vuonna 2018 7,6 mg/l ja vuonna 2021 9,2 mg/l.

Sinkkipitoisuuden lähtötaso nollakoealalla oli huononlainen, 1,2 mg/l. Vuonna 2018 pitoisuus oli 2,2 mg/l ja vuonna 2021 1,6 mg/l. Tuhkakoealan lähtötaso oli välttävä, 1,6 mg/l ja vuonna 2018 sekä 2021 pitoisuus oli < 1,0 mg/l.

3.3 Tuhkatiekolonnit

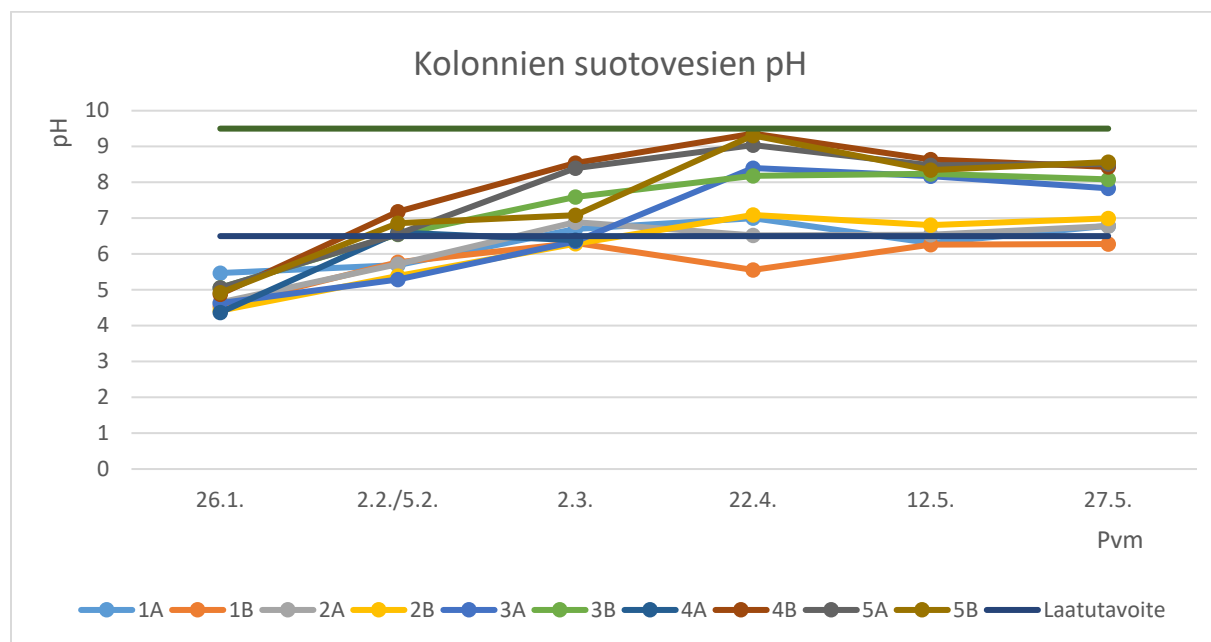
Tässä kokeessa saatuja määrittystuloksia on pääsääntöisesti verrattu talousvedelle asetettuihin laatuvaatimuksiin, sillä luonnossa suotovesi voi vaikuttaa pohjavesiin, mikäli tien vaikutuspiirissä on pohjavesialue. Huomioitavaa on, että mikäli tuhkatien suotovettä pääsee pohjaveteen, määrittystulokset eivät enää vastaa pelkän suotoveden tuloksia.

Kaikissa tuhkaa sisältävien kolonnien suotovesissä havaittiin sulfaatti- ja kloridipitoisuuden sekä sähkönjohtavuuden ja pH:n nousu ja tasoittuminen. Tuhkatiestöjä tutkittaessa on havaittu vastaisia tuloksia hetkittäisestä pitoisuuksien noususta, jota ajan myötä seuraa lasku normaalimmalle tasolle. (Ryhti 2016, Joensuu 2017.)

Vain yhteen kolonneista, 4A, muodostui tuhkasta vettä läpäisemätön pinta. Kolonni koostui maapohjasta, 3 cm tuhkatatjasta ja 1 cm murskekerroksesta.

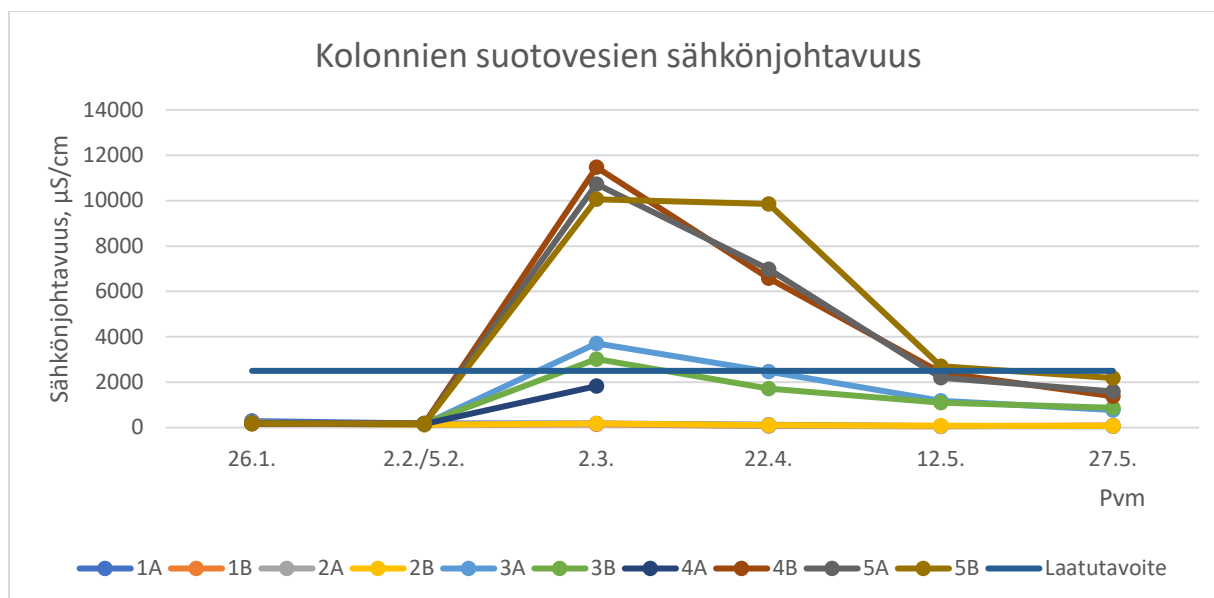
Kolonnit, joiden rakenteissa käytettiin tuhkaa, nostattivat pH-arvoja enemmän verrattuna kolonneihin, joissa oli pelkkä maapohja tai maapohja ja murskekerros. Kaikissa kolonneissa tapahtui kokeen aikana pH:n nousua, mutta tuhkaa sisältäneissä kolonneissa nousua tapahtui keskimäärin yhden pH-yksikön verran enemmän. Kokeen edetessä pH-arvot alkoivat kuitenkin tasoittumaan melko pian huippulukeman jälkeen (kuva 21). Tuhkan emäksisyydestä johtuen tämä hetkellinen pH:n nousu oli odotettavissa. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden

laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talousveden laatutavoitteeksi on pH:lle annettu 6,5–9,5.



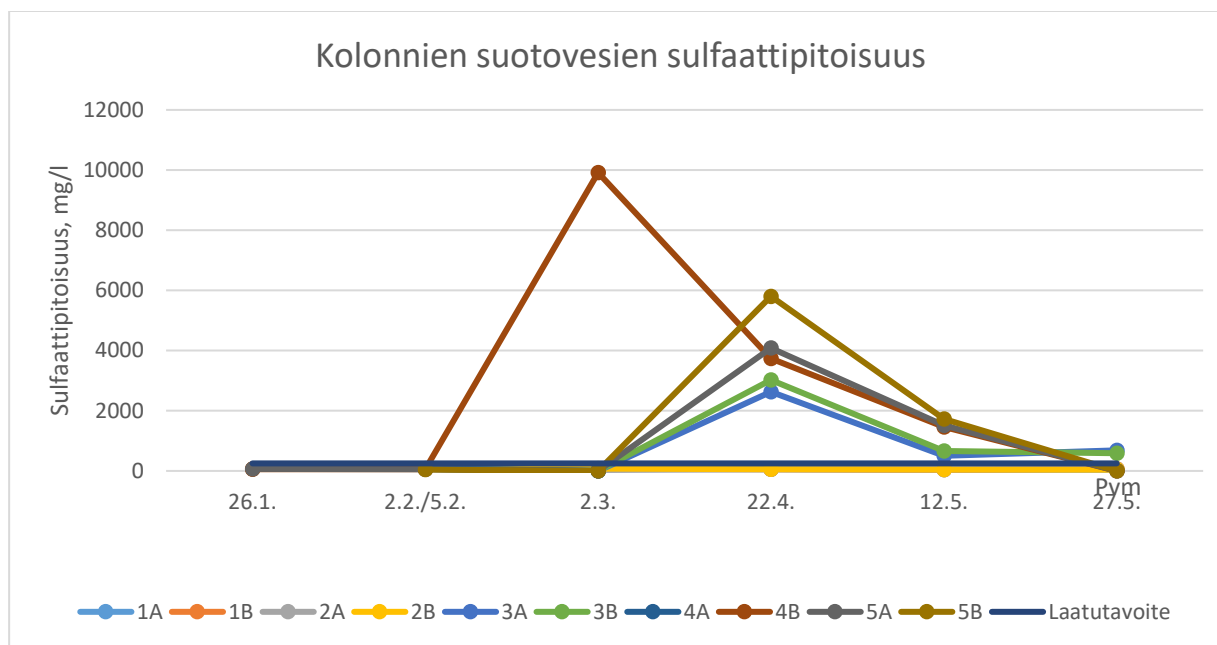
Kuva 21. Tiekolonnikokeen suotovesien pH:n mittaustulokset.

Sähkönjohtavuuden mittauksissa havaittiin, että pelkkää maapohjaa ja mursketta sisältävien kolonnien sähkönjohtavuus laski kokeen aikana (kuva 22). Tähän voi vaikuttaa se, että säännöllisen vedenlisäyksen myötä suolojen määrä kolonneissa väheni. Tuhkamurskeseosta sisältäneiden kolonnien sähkönjohtavuus nousi korkeimmillaan 3 000–3 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, josta tilanne kuitenkin tasoittui. Eniten sähkönjohtavuus nousi tuhkatatjakolonneissa, jossa korkein arvo oli 4B-kolonnissa 11 470 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Hetkellisen nousun jälkeen myös sähkönjohtavuus tasoittui. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talousveden laatutavoitteeksi on sähkönjohtavuudelle annettu alle 2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Arvojen tasoituttua kokeen lopussa suotoveden määrittystulokset täyttivät laatutavoitteen.



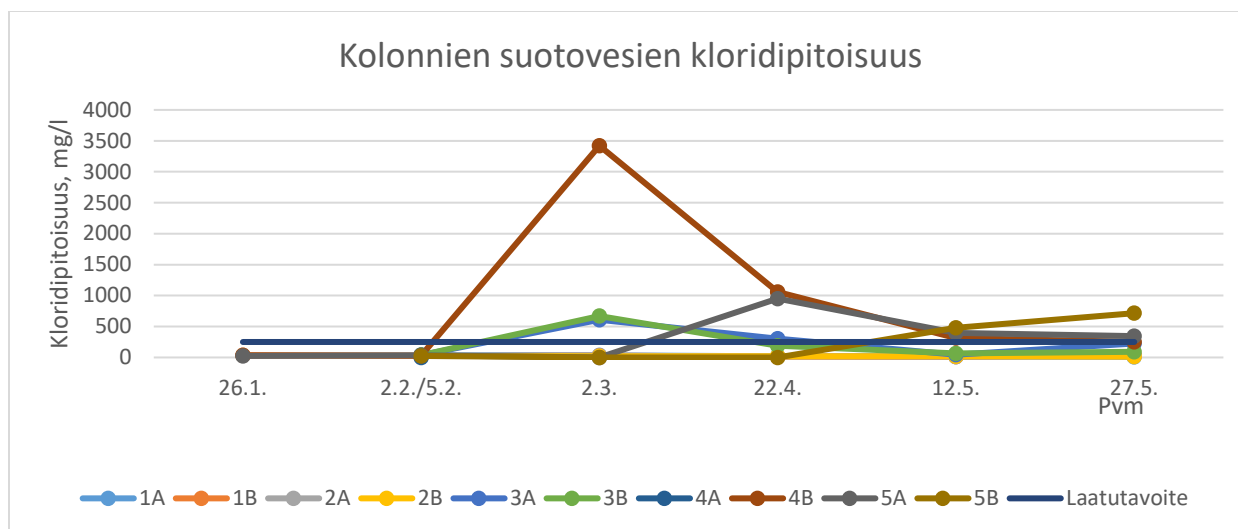
Kuva 22. Kolonnien suotovedestä mitattu sähkönjohtavuus.

Kolonnien suotoveden sulfaatti- ja kloridipitoisuudet mitattiin fotometrillä. Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talousveden laatuvaatitukseksi on sulfaattipitoisuudelle annettu alle 250 mg/l. Sulfaattitasot alkutilanteissa olivat kaikilla kolonneilla alle laatuvaatituksen. Tuhkaa sisältävien kolonneiden pitoisuudet nousivat kokeen aikana hetkellisesti ja korkein pitoisuus mitattiin 4B-kolonnista, 9 914 mg/l. Vesiläistyksen jälkeen pitoisuudet laskivat. Tuhkaa sisältävien kolonneiden osalta arvot jäivät kuitenkin lähtötasoa korkeammalle, kun taas pelkkää maapohjaa ja murskettä sisältävien kolonneiden osalta arvot laskivat jopa lähtötason alapuolelle. Kuvassa 23 on nähtävissä kolonnien sulfaattipitoisuuden määrittelytulokset. Tuhkaa sisältävien kolonnien määrittelytulokset ylittivät talousveden laatuvaatituksen kokeen päättyessä, mutta pitoisuudet olivat laskeneet voimakkaasti ensimmäisistä määrittelytuloksista.



Kuva 23. Kolonnien suotovedestä mitatut sulfaattipitoisuudet.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talousveden laatutavoitteeksi on kloridipitoisuudelle annettu alle 250 mg/l. Tuhkaa sisältävistä kolonneista mitatut pitoisuudet olivat maata ja mursketta sisältäviä kolonneita suurempia. Suurin pitoisuus, lähes 3 500 mg/l, mitattiin 4B-kolonnin suotovedestä. Maapohja- ja murskekerroskolonnien (1A, 1B, 2A ja 2B) kloridipitoisuudet olivat kaikissa määrittelyissä alle 100 mg/l, joten ne täyttivät talousvesiasetuksen laatutavoitteen. Tuhkaa sisältävien kolonnien (3A, 3B, 4B, 5A ja 5B) pitoisuudet nousivat kokeen aikana yli talousvesiasetuksen laatutavoitteen. Kokeen lopussa 3A-kolonnin määrittystulos (225 mg/l) täytti laatutavoitteen ja 4B-kolonnin pitoisuus (251 mg/l) ylitti sen vain hieman. Muut tuhkaa sisältävät kolonnit ylittivät talousvesiasetuksen laatutavoitteen. Kuvassa 24 on nähtävissä kolonnien suotovesistä mitatut kloridipitoisuudet. On huomioitava kuitenkin se, että sekä sulfaatti- että kloridinäytteitä jouduttiin laimentamaan runsaasti, jotta pitoisuudet voitiin mitata fotometrillä. Laimennuksen vaikutusta kokeen tuloksiin on vaikea arvioida.



Kuva 24. Kolonnien suotovedestä mitatut kloridipitoisuudet.

Suotovesien raskasmetallipitoisuuksia analysoitiin voltammetrin avulla. Kadmiumin osalta suurimmassa osassa näytteistä pitoisuudet olivat alle määrittäysrajan ja määrittystuloksia saatiin vain satunnaisista näytteistä. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksesta ja valvontatutkimuksista (1352/2015) talousveden kemialliseksi laatuvaatimukseksi on kadmiumipitoisuudelle annettu 5,0 µg/l. Jo ensimmäisissä maapohjista läpi suodatetuissa lähtöta-sovesinäytteissä kadmiumipitoisuudet (53,4 µg/l ja 28,1 µg/l) ylittivät laatuvaatimuksen enimmäisarvon (taulukko 9). Happohajoittamisen vaikutusta tuloksiin ei ole arvioitu.

Taulukko 9. Kolonnien suotovesistä määritetyt kadmiumipitoisuudet µg/l.

Kolonnitus/ näytepvm	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
26.1.		53							28	
2.2./5.2.			115	192						
2.3.			5					38		
22.4.										
12.5.										
27.5.	155									

Sosiaali- ja terveysministeriön talousvesiasetuksen (1352/2015) asettama enimmäisarvo talousveden kuparipitoisuudelle on 2,0 mg/l (2 000 µg/l). Näytteiden kuparipitoisuudet olivat alkutilanteessa alle enimmäisarvon, mutta 1,5 kuukautta kokeen aloittamisen jälkeen tuhkaa sisältäneiden kolonneiden arvot nousivat yli enimmäisarvon. Korkein määritetty pitoisuus oli kolonnissa 5A (5 cm tuhkatäyte), jossa pitoisuus oli 29 622 µg/l eli 29,6 mg/l. Kokeen aikana kaikki kolonnit lukuun ottamatta 1B-kolonnin ylittivät talousvesiasetuksen enimmäisarvon. Kokeen lopussa pelkkää maapohjaa tai maapohjaa ja mursketta sisältävien kolonnien (1A, 1B, 2A ja 2B) suotovedet täyttivät talousvesiasetuksen vaatimuksen. Tuhkaa sisältäneiden kolonneiden viimeisimmät mittausarvot olivat yli talousvesiasetuksen enimmäisarvon, mutta kuitenkin korkeimmista lukemista selkeästi pienentyneitä (taulukko 10).

Taulukko 10. Kolonnien suotovesistä määritetyt kuparipitoisuudet (µg/l).

Kolonnitus/ näytelmä	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
26.1.								479	742	
2.2./5.2.	633	900	2 670	3 711			1 889	1 393	968	
2.3.	2 921	925	2 670	1 039	7 840	8 037		16 080	29 622	23 089
22.4.	902		1 446	249	10 133	19 824		13 645	5 358	7 579
12.5.									14 828	23 905
27.5.					2 426	3 299		5 107	5 899	4 936

Lyijypitoisuudelle on Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) asetettu enimmäisarvoksi 10 µg/l. Lähtötaso pelkkien maa-pohjakolonnien osalta oli yli enimmäisarvon. Taulukosta 11 on nähtävissä, että veden lisäysten myötä sekä tuhkatomissa että tuhkaa sisältävissä kolonneissa lyijypitoisuus nousi. Kuitenkin ko-keen loppua kohden arvot lähtivät jälleen laskemaan. Laskusta huolimatta viimeisimmät määri-tykset antoivat arvoja, jotka olivat selkeästi yli talousvesiasetuksen enimmäisarvon.

Taulukko 11. Kolonnien suotovesistä määritetyt lyijypitoisuudet (µg/l).

Kolonne- tunnus/ näytepvm	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
26.1.		1 055						1 436	222	
2.2./5.2.	272	378					696	3 560	2 267	
2.3.	535	648	1 418	412	477	401		794	1 040	1 403
22.4.	542	1 277		333	323	199		567		
12.5.	1 026	516		337	309	855		222		191
27.5.	124		1 057		180	361		936	872	1 174

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (1352/2015) ei veden sinkkipitoisuudelle ole annettu laatusuositusta. Aiemmin vuoden 1994 asetuksessa laatusuositus oli 3,0 mg/l eli 3 000 µg/l. Sinkin osalta tämä arvo ylittyi pääsääntöisesti kaikissa kolonneissa (taulukko 12). Noin kuukauden jälkeen testin aloittamisesta lähes kaikkien kolonnien suotovesissä havaittiin kokeen suurimmat sinkkipitoisuudet. Huomionarvoista oli, että pelkkää maapohjaa tai maapohjaa ja mursketta sisältävät kolonnien 1A, 2A ja 2B sinkkipitoisuudet nousivat myös. Kokeen aikana suurin sinkkipitoisuus saavutettiin kolonnilla 1A (19 836 µg/l), jossa ei ollut lainkaan tuhkaa. Tuhkaa sisältäneiden kolonnien (4B, 5A ja 5B) pitoisuudet olivat viimeisessä mittauksissa kuitenkin selkeästi suurempia kuin pelkkää maapohjaa ja maapohjaa ja mursketta sisältäneillä kolonneilla. Kolonneista 3A ja 3B, jotka sisälsivät 3 cm:n tuhkamurskekerroksen, määritetyt pitoisuudet olivat viimeisessä analyysissä pienempiä kuin pelkän murskekerroksen sisältäneiden kolonnien 2A ja 2B.

Taulukko 12. Kolonnien suotovesistä määritetyt sinkkipitoisuudet (µg/l).

Kolonnitus/ näytepvm	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B	5A	5B
26.1.								3 364	4 523	
2.2./5.2.	5 774	2 070			592	7 243	12 437	9 029	14 149	3 602
2.3.	19 836	1 461	16 610	6 704	4 153	5 001		7 325	18 251	12 847
22.4.	7 478	730	9 093	4 513	836	1 134		4 146	3 444	1 488
12.5.	1 485	361	1 164	564	564	674		1 644	2 294	1 019
27.5.	2 360	342	3 831	2 460	490	1 933		5 919	18 691	8 594

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

4.1 Tuhkatiet

Tuhkateillä otettiin vesinäytteitä ja tehtiin kenttämittauksia vuosina 2020–2021 koko sulan kauden ajan. Tulosten tulkinnassa ja vertailussa tuleekin huomioida näytteenottoajankohdan vaikutus tuloksiin. Kesäkaudella otetuissa näytteissä pitoisuudet ovat pääsääntöisesti suurempia kuin aikaisin keväällä ja myöhään syksyllä otetuissa näytteissä. Uudemmassa tiekohteessa keski-kesällä otetuista näytteistä analysoidut tulokset jätettiin tässä tulosraportissa huomioimatta niiden mahdollisen epäluotettavuuden vuoksi. Lisäksi on huomioitava se, että vuonna 2020 hankkeessa otetut näytteet analysoitiin eri laboratoriossa kuin aiemmin vuosina 2017–2019 tien rakennuttajan toimesta otetut näytteet. Vuonna 2021 hankkeen näytteiden analysoijaksi vaihdettiin sama laboratorio, joka oli analysoinut näytteitä ennen hanketta mahdollisen laboratoriosta johtuvan eroavuuden vuoksi.

Tieseurantakohteiden vesinäytteiden perusteella tuhkalisäys nostaa osittain vesinäytteiden pitoisuuksia. Tuhkan emäksiset yhdisteet sitovat raskasmetalleja vaikealiukoiseen muotoon, jonka vuoksi metallien huuhtoutuminen on yleensä vähäistä. Jos maaperän pH alkaa laskea, raskasmetalleja voi liueta veteen. Myös aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että pH-, sähkönjohtavuus- ja metallitasot nousevat hetkellisesti tuhkan käytön seurauksena. Tilanne tasoittuu kuitenkin.

kin normaalille tasolle hyvin pian, eikä pidemmällä aikavälillä tuhkatiekohteilla ole havaittu merkittäviä pinta- tai pohjaveden laadun muutoksia. Tien huolellisella suunnittelulla ja rakentamisella voidaan vähentää haitta-aineiden huuhtoutumista. Esimerkiksi vanhemman tieseurantakohteen osalta tien ali kulkevan laskuojan molemmin puolin jätettiin noin 30 metriä leveä alue, johon ei käytetty tuhkaa.

Tiekohteista otetuissa maanäytteissä havaittujen muutosten syytä on vaikea arvioida. Näytteiden välillä aikaa kului vain vuosi, joka on lyhyt aika seurannassa. Määrittystuloksiin vaikuttavat myös näytteenoton edustavuuden onnistuminen sekä analysoivan laboratorion vaihtuminen vuosien välillä. Seuranta tulisi jatkaa, jotta tuhkan mahdollisia vaikutuksia voidaan todentaa.

4.2 Metsänlannoituskohteet

Tuhkalannoituskohteella, ojitetuilla turvemaalla, on kivennäismaita yleisempää kärsiä kasvua rajoittavasta ravinne-epätasapainosta. Ojituksen myötä puuston kasvua on saatu parannettua, mutta ajan myötä kasvu heikkenee kivennäisaineiden puutostilojen takia. Turvemailla puusto kärsii eniten kaliumin, fosforin ja boorin puutteesta. (Yara 2012, Äijälä 2019.) Laboratorionäytteiden perusteella tällä metsäkohteella oli näitä puutostiloja.

Metsälannoituskohteilta otettujen maaperä- ja kasvinäytteiden välillä ei tapahtunut merkittävän suuria muutoksia vuoden aikana. Taimikkovaiheisen metsäalueen (kuvio 15) maaperä reagoi vahvemmin lannoitukseen kuin nuori kasvatusmetsä (kuvio 28). Suurimmat muutokset tapahtuivat boori- ja kaliumtasoissa sekä maaperä- että kasvinäytteiden osalta, vaikka seuranta-aikamme oli lyhyt. Huotar (2012) tutkimusten mukaan kaliumin ja boorin puutostilat korjaantuvatkin usein jo seuraavana vuonna, joka tukee tuloksiamme. Fosfori liukenee tuhkasta hitaammin kuin esimerkiksi kalium ja boori, jonka vuoksi vaikutus ei vielä näy tuloksissa. Fosforipitoisuus korjaantuu keskimäärin 3–4 vuoden kuluttua tuhkalannoituksesta (Huotari 2012).

pH ja kokonaistyyppipitoisuus laskivat kummallakin kuviolla lannoituksen myötä. Liukoisen typen määrä maassa voi laskea tuhkalannoituksen myötä, joka selittäisi miksi tyyppipitoisuus oli vuoden aikana laskenut. Tuhkalannoitus lisää maaperän hajotustoimintaa, joka pitkällä aikavälillä edistää maan orgaanisen aineksen hajoamista. Tämän myötä myös typpeä vapautuu enemmän kasvien käyttöön, jolloin maaperässä olevan liukoisen typen määrä voikin laskea lannoituksen seurauksena. (Huotari 2012.)

Mikäli kohteen typpipitoisuus on alhainen, alle 1,5 %, on typpilannoitus tarpeellinen kasvun kannalta (Yara 2012). Tulosten perusteella kuvion 15 typpipitoisuus oli ennen tuhkalannoitusta yli viitearvon 1,5 % kun taas kuvion 28 typpipitoisuus oli alhainen. Onkin huomioitava, että typpipitoisuus turvemailla voi vaihdella paljonkin saman alueen sisällä (Äijälä 2019). Jatkoa ajatellen tällä kohteella voisi kiinnittää huomiota typpipitoisuuteen ja tarkkailla nouseeko pitoisuus ja aiheuttiko tuhkalannoitus hetkellisen laskun.

Vesinäytteiden perusteella lannoitus ei vaikuttanut ojaveden pH-arvoon, sähkönjohtavuuteen, fosfori-, sulfaatti- tai kloridipitoisuuksiin haitallisesti. Myöskään metallipitoisuuksiin ei lannoituksella ollut merkittävää vaikutusta.

Myös metsänlannoituskohteiden tutkimuksissa on havaittu, että raskasmetallipitoisuudet kohoavat hetkellisesti lannoituksen takia. Lannoitettavan tuhkan laatu ja sen käyttömäärä vaikuttavat raskasmetallitasojen muutoksiin maaperässä. Kuten jo tiekohteiden seurannan tulokinnassa todettiin, maaperän happamuus vaikuttaa osaltaan raskasmetallien liukenemiseen. pH:n lasku lisää riskiä, että raskasmetalleja voi liueta maaveteen pidemmän päälle. Myös äkillinen maan tasapainotilan muuttuminen lannoituksen takia voi aiheuttaa maaperän omien raskasmetallivarastojen vapautumisen. Tuhka on kuitenkin hyvin emäksistä, jonka ansiosta haitalliset raskasmetallit, kuten kadmium ja lyijy, ovat erittäin hidasliukoissa muodossa. (Huotari 2012, Kauppila ym. 2021.) Tuhkalannoitteiden ympäristövaikutuksista pidemmällä aikavälillä ei kuitenkaan ole tutkimustietoa. Tämän vuoksi tuhkalannoitteelle on asetettu raskasmetallien raja-arvot. Niiden avulla estetään haitallisten raskasmetallien liiallinen kertyminen maaperään.

Varpujen ja marjojen raskasmetallitasot eivät nousseet lannoituksen myötä, vaan pääasiassa lasivat. Vastaaviin havaintoihin ovat päätyneet myös Tuovinen ym. (2019) ja Huotari (2012) kirjallisuusselvityksissään. Tuovinen ym. (2019) mukaan tuhkalannoitus ei vaikuta marjojen raskasmetallipitoisuuksiin ensimmäisinä vuosina, kun taas Huotarin (2012) mukaan pitoisuudet voivat tilapäisesti nousta, jonka vuoksi marjojen poimintaa lannoitusta seuraavana vuonna kannattaa välttää.

On havaittu, että tuhkalannoitus voi vähentää varpukasvien määrää niin kangas- kuin suomet-sissä. Sen sijaan heinä- ja ruoholajien määrä voi lisääntyä. Muutos on usein voimakkaampi typ-
pirikkaalla turvemailla kuin kangasmailla tai niukkatyypisillä soilla. Myös sammalpeitteen vähe-
neminen aluksi on mahdollista. Kasvupaikan lajiston muutoksista huolimatta monipuolisuus voi

lisääntyä. (Huotari 2012.) Lannoitus ei vaikuttanut seurattavan kohteemme marjasatoon tai varpujen määrään. Tulosten luotettavuuden kannalta olisi näytteidenottoa ja tarkkailua jatkettava vielä tulevaisuudessa. Tuloksiin vaikuttaa myös lannoitteen laatu ja levityksen tasaisuus.

Myöskään tuhkalannoitetuilla koealoilla ei neulas- tai maanäytteissä tapahtunut vuosien 2017–2021 aikana merkittäviä muutoksia. Tätä selittää osaltaan seuranta-ajan lyhyys. Myös näytteidenoton luotettavuus, kuten näytteenottajien vaihtuminen ja vallitsevat olosuhteet voivat vaikuttaa tuloksiin. Suurin muutos tapahtui mangaanipitoisuudessa, joka nousi puolukkaturvekan koealoilla sekä nolla- että tuhkakoealalla. Tämän vuoksi ei pysty tekemään tulkintaa, että juuri tuhkalannoitus olisi nostanut mangaanipitoisuutta.

Ajanjakso, jolla alueita tarkastelimme, oli hyvin lyhyt. Luultavasti vaikutukset tulevat näkymään paremmin vasta tulevaisuudessa, sillä tuhka lisää puustonkasvua hitaammin ja vaikutus on jopa 40 vuotta (Äijälä 2019).

4.3 Tuhkatiekolonnit

Tutkimuksessa oli paljon epävarmuustekijöitä, kuten kolonnien rakentamisen onnistuminen, kolonnien säilytysolosuhteet ja määritysten luotettavuus, joiden vuoksi selkeitä johtopäätöksiä kolonneiden tuloksista on haastava tehdä. Huomioitavaa on, että laboratorio-olosuhteissa toteutettu kolonnikoe ei vastaa todellista tierakenteen seurantaa. Koe kuvaa lähinnä pahinta mahdollista vaihtoehtoa, jolloin sadevesi ei valu tien pinnalta pois, kuten luonnossa, vaan kaikki vesi voi imeytyä tierakenteeseen. Samoin on tilanne myös lumen suhteen, kaikki lumi sulii kolonneihin eikä päässyt haihtumaan osittain ilmaan. Kokeella saatiin kuitenkin tietoa siitä, että tuhkarakenne vaikuttaa suotautuvan veden määrään ja voi myös muodostaa vettä läpäisemättömän pinnan.

Tarkastelu talousveden laatuvaatimuksiin voi antaa virheellisen kuvan, sillä itse suotovettä ei talousvetenä käytetä. Mikäli suotovettä pääsee pohjaveden joukkoon, se laimenee. Yhteenvedon voi kuitenkin todeta, että kokeen perusteella tuhka tierakenteessa nostattaa hetkellisesti suotoveden pH-arvoja ja sähkönjohtavuutta enemmän kuin perinteinen mursketie. Pitoisuudet lähtivät kuitenkin näinkin lyhyen kokeen (4kk) aikana laskuun, joten oletettavaa on, että pi-

demmällä ajanjaksolla arvot palautuvat lähelle lähtötasoa. Tuhkaa sisältävien kolonneiden sulfaatti- ja kloridipitoisuudet jäivät huomattavasti maata ja mursketta sisältäviä kolonneita korkeammalle kokeen päättyessä.

Suotovesien raskasmetallipitoisuuksia tarkasteltaessa niin maa-, murske- kuin tuhkakolonnitkin ylittivät talousvedelle annetut enimmäisarvot jossain vaiheessa koetta. Huomionarvoista oli se, että hetkellisen pitoisuuksien kohoamisen myötä arvot kuitenkin lähtivät laskuun. Verrattuna ai-doilla tiekohteilla toteutettuihin seurantoihin, tuloksille oli yhtäläistä arvojen äkillinen nousu ja sitä seurannut lasku.

Aineiden huuhtoutuminen tuhkarakenteesta ei vaikuta tämän kokeen perusteella olevan yksiselitteistä, sillä tulokset vaihtelivat analyysikertojen ja myös rinnakkaiskolonnien välillä. Tuhkan tasalaatuisuus ja rakenteen vedenläpäisevyys vaikuttanee veden mukana tuhkasta liukenevien aineiden määriin ja kokeessa kolonnien vedenläpäisevyydessä todettiin myös olevan eroa. Laboratorio-olosuhteissa toteutetussa kokeessa pystyttiin pitämään eri tierakenteiden olosuhteet samankaltaisina ja mittamaan tarkasti tiekolonniin lisätty vesimäärä. Tuloksiin tulee kuitenkin suhtautua vain suuntaa antavina kokeeseen liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi.

5 YHTEENVETO

Tuhkateiden rakentaminen aiheuttaa yleensä hetkellistä vesinäytteiden pitoisuuksien nousua pH:n, sähkönjohtavuuden ja raskasmetallitasojen osalta. Tilanne tasoittuu yleensä kuitenkin pian, eikä tuhkan käytöllä tien rakennusmateriaalina ole havaittu olevan pitkäaikaisia haitallisia vaikutuksia ympäristölle. Ennen työmaan aloitusta tärkeintä on varmistaa tuhkan laatu, jotta se täyttää sille asetut kriteerit. Sen lisäksi työmaan huolellinen suunnittelu ja toteutus ovat avainasemassa ympäristölle turvallisen tien rakentamisessa.

Kummallakaan metsänlannoituskohteella ei havaittu merkittäviä muutoksia ravinteiden määrissä. Tätä selittää seuranta-aikamme lyhyys, sillä tuhkalannoitus on pitkäaikainen investointi, jonka tulokset konkretisoituvat vasta jopa 40 vuoden päästä. Huomionarvoista oli, että ensimmäisellä lannoituskohteella havaittiin kalium- ja booritasojen nousua jo näin lyhyellä aikavälillä sekä maaperä- että kasvinäytteiden osalta. Tärkeä havainto oli myös se, että marjojen ja varpujen raskasmetallipitoisuuksissa ei tapahtunut haitallisia muutoksia tuhkalannoituksen myötä.

Vaikka tuhkatiekolonnikokeessa oli paljon epävarmuustekijöitä eikä sitä voi vertailla luonnonolosuhteisiin, antoi se kuitenkin suuntaa antavia tuloksia. Esimerkiksi pitoisuuksien nousu ja sitä seurannut lasku vesinäytteissä oli yhtäläisyys aitoihin tiekohteisiin.

Tässä seurannassa tehdyt havainnot ovat melko yhteneviä aiemmissa tutkimuksissa saatujen tulosten kanssa. Seurantakohteiden tarkkailu pidemmällä aikavälillä lisää tutkimusten luotettavuutta ja antaa tietoa tuhkan pitkäaikaisista vaikutuksista.

LÄHTEET

Huotari, N. 2012. Tuhkan käyttö metsänlannoitteena. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/504366/tuhkan-kaytto-metsalannoitteena%5b1%5d.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 18.10.2021]

Joensuu, S. 2017. Tuhkan käyttö tienrakennuksen materiaalina – ympäristövaikutusten seuranta. WWW-dokumentti. Saatavissa <https://tapio.fi/projektit/tuhkan-kaytto-tienrakennuksen-materiaalina-ymparistovaikutusten-seuranta/> [päivitetty 27.2.2017, viitattu 11.10.2021].

Kauppila, M., Kontinen, K. & Tenhola, T. 2021. Tuhkan hyötykäyttö metsätaloudessa. Tapio Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2021/03/Tuhkan-hyotykaytto-metsataloudessa-esite.pdf> ISBN 978-952-5632-98-9

Oravainen, R. 1999. Vesistötulosten tulkinta -opasvihkonen. Saatavissa: <https://kvvy.fi/wp-content/uploads/2015/10/opasvihkonen.pdf> [viitattu 15.10.2021].

Ryhti, K. 2016. Aineiden huuhtoutuminen metsätiekokeiden rakenteissa käytettävästä tuhkasta. Pro gradu –tutkielma. Helsingin yliopisto. Metsätieteiden laitos. Metsien ekologia ja käyttö.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. 1352/2015.

Teittinen, A. 2021. Metsäasiantuntija. MHY Etelä-Savo. Henkilökohtainen tiedonanto, puhelinkeskustelu. 21.10.2021.

Tuovinen, N., Heikkilä, R. & Lindholm, T. 2019. Tuhkalannoituksen vaikutus marjoihin ja sieniin. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Tuhkalannoituksen-vaikutus-marjoihin-ja-sieniin-SYKE.pdf> [viitattu 18.10.2021]

Yara. 2012. Metsänlannoitusopas. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://tuotametsasta.fi/wp-content/uploads/2017/11/YARA_Metsalannoitusopas.pdf [viitattu 20.10.2021]

Äijälä, O., Koistinen, A., Sved, J., Vanhatalo, K. & Väisänen, P. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset. Tapion julkaisuja. ISBN 978-952-5632-75-0. Julkaistu verkossa 31.5.2019. Saatavissa: https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon-suositukset_Tapio_2019.pdf