



BIOGO – BIOHIILELLÄ PUHDASTA KAASUA JA KASVUVOIMAA

Niina Laurila (toim.)



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

Niina Laurila (toim.)

BIOGO – BIOHIILELLÄ PUHDASTA KAASUA JA KASVUVOIMAA



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Euroopan unioni
Euroopan aluekehitysrahasto

XAMK KEHITTÄÄ 209

**KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU
MIKKELI 2022**

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Manu Eloaho

Taitto ja paino: Grano Oy

ISBN: 978-952-344-505-5 (nid.)

ISBN: 978-952-344-506-2 (PDF)

ISSN: 2489-2467 (nid.)

ISSN: 2489-3102 (verkko)

julkaisut@xamk.fi

LUKIJALLE

BioGo – Biohiilellä puhdasta kaasua ja kasvuvoimaa -hanke toteutettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusalalla. BioGo-hanketta rahoitti Etelä-Savon ELY-keskus Euroopan aluekehitysrahastosta, Metsäsairila Oy ja Suur-Savon Energiasäätiö sr. Hankkeen toteutusaika oli 1.1.2020–31.12.2022. Hankkeen kumppaneita olivat Benetech Finland Oy, Mayt Oy ja KT-FinnoServ tmi. Hankkeen projektipäällikkönä toimi ins. (AMK) Niina Laurila, tutkimusinsinöörinä ins. (AMK) Henri Kettunen ja projektitutkijana luonnontieteiden kandidaatti Lasse Virkkunen (ajalla 1.6.–30.8.2022). BioGo-hankkeen vastuullisena johtajana toimi tutkimusjohtaja FT Lasse Pulkkinen, hankkeen yhteyshenkilönä tutkimusryhmäpäällikkö TkT Hanne Soininen ja hankeasiantuntijana Hanna-Maija Penttinen.

Hankkeen etenemistä ohjasi ja valvoi ohjausryhmä, johon kuuluivat Markku Hatakka Suur-Savon Energiasäätiö sr:stä, toimitusjohtaja Ville Kakkonen Metsäsairila Oy:stä, toimitusjohtaja Tuomo Leppänen Mayt Oy:stä, toimitusjohtaja Hannu Salmi Benetech Finland Oy:stä, professori emeritus MTT/Luke Kari Tiilikkala KT-FinnoServ tmi:stä ja tutkimusryhmäpäällikkö TkT Hanne Soininen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulusta. Hankkeen ohjausryhmässä rahoittajan edustajana toimi Etelä-Savon ELY-keskuksen rahoitusasiantuntija Jarkko Rautio.

Hankkeen työryhmään ovat kuuluneet toimitusjohtaja Ville Kakkonen Metsäsairila Oy:stä, MML Kati Kontinen Metsäkonsultoinnista, toimitusjohtaja Tuomo Leppänen Mayt Oy:stä, toimitusjohtaja Hannu Salmi Benetech Finland Oy:stä, professori emeritus MTT/Luke Kari Tiilikkala KT-FinnoServ tmi:stä ja ympäristöturvallisuuden tutkimusryhmäpäällikkö TkT Hanne Soininen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulusta.

Tekijät kiittävät hankkeen rahoittajia kehittämistyön mahdollistamisesta sekä muita hankkeeseen osallistuneita aktiivisesta osallistumisesta hanketyöhön.

Mikkelissä 13.12.2022

Niina Laurila, projektipäällikkö

TEKIJÄT

AKI HEINONEN, ympäristötekniikan DI, projektipäällikkö
Metsäsairila Oy

HENRI KETTUNEN, insinööri (AMK), tutkimusinsinööri
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

KATI KONTINEN, MML, metsänhoitaja
Metsäkonsultointi

NIINA LAURILA, insinööri (AMK), TKI-asiantuntija
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

HARRI RYYNÄNEN, TkT, hallituksen puheenjohtaja
XY Invest Oy

HANNU SALMI, DI, toimitusjohtaja
Benetech Finland Oy

HANNE SOININEN, TkT, tutkimusryhmäpäällikkö
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusala

INKERI VESALA, insinööri (AMK), terveystarkastaja
Mikkelin kaupunki

LAURI VIRKKUNEN, Luonnontieteiden kandidaatti
Jyväskylän yliopisto

*“Kaikki tapahtuu niin kuin tapahtuu;
eikä ole mitään syytä kiirehtiä
tapahtumista.”*

– Puuparta

*Lainaus teoksesta: Tolkien, J. R. R. 1954.
Taru sormusten herrasta: Kaksi tornia.*

SISÄLTÖ

LUKIJALLE	3
TEKIJÄT	4
PUHDASTA KAASUA JA ELINVOIMAA METSITYKSEEN	8
Niina Laurila & Hanne Soininen	
KASVUPALLOT APUNA RAVINNEKÖYHIEN MAASTOJEN METSITTÄMISESSÄ JA NIIDEN VALMISTUSMENETELMÄT	10
Henri Kettunen & Inkeri Vesala	
KASVUPALLOJEN LAADUNVALVONTA – HANKKEESSA KÄYTETYT TESTAUSMENETELMÄT JA ANALYYSITULOKSET	25
Henri Kettunen	
KASVUPALLOJEN LEVITYS DROONEILLA	42
Henri Kettunen & Niina Laurila	
KASVUPALLOJEN PILOTOINNIT ERILAISISSA MAASTOISSA POHJOISISSA OLOSUHTEISSA	51
Henri Kettunen & Kati Kontinen & Niina Laurila	
DMS-TEKNOLOGIAN HYÖDYNTÄMINEN BIOKAASUN SILOKSAANIEN TUTKIMISESSA	85
Henri Kettunen & Lauri Virkkunen & Hannu Salmi	
DEMONSTRAATIOKOKOITA BIOKAASUN HAITTA-AINEIDEN SUODATUKSESTA BIOHIILELLÄ HYÖDYNTÄEN DMS-TEKNOLOGIAA SUODATUSKYVYN TODENTAMISESSA	96
Henri Kettunen & Niina Laurila & Aki Heinonen	
BIOHIILTEN EKOTOKSISUUSTESTIT KINEETTISELLÄ VALOBAKTEERITESTILLÄ	113
Henri Kettunen	
KASVUPALLOJEN KAUPALLINEN POTENTIAALI	133
Niina Laurila & Harri Ryytänen	

PUHDASTA KAASUA JA ELINVOIMAA METSITYKSEEN

Niina Laurila & Hanne Soininen

BioGo – Biohiilellä puhdasta kaasua ja kasvuvoimaa -hankkeessa kehitettiin biohiilipohjaisia tuoteaihoita (kasvupalloja) parantamaan maaperän hiilensidontaa ja maaperän vedenpidätyskykyä sekä tehostamaan metsänkasvatusta uusin menetelmin. Demonstraatiokokeilla tuotettiin tietoa erilaisten ainesyhdistelmien käytöstä kasvupalloissa ja niiden soveltuvuudesta eri kasvupaikkojen metsittämiseen. Toimenpiteillä tehostettiin myös kaatopaikka- ja biokaasujen käsittelyä.

HANKKEEN TOIMENPITEET

Hankkeen toimenpiteet jakaantuivat neljään osatehtävään (kuva 1), joista ensimmäinen koski biohiilipohjaisten kasvupallojen laboratorio- ja pilot-kokeita. Hankkeen toisessa toimenpiteessä keskityttiin tutkimaan biohiilen käyttöä kaatopaikka- ja biokaasujen epäpuhtauksien käsittelyssä. Uusien tuotantovaihtoehtojen teknis-taloudellinen tarkastelu ja ympäristövaikutusten arviointi oli kolmannen toimenpiteen tehtävänä. Viimeisenä raportoitiin ja viestittiin hankkeen tuloksista.



Kuva 1. BioGo-hanke toteutettiin neljällä toimenpiteellä (kuvat M. Eloaho, N. Laurila)

Hankkeessa toteutetuilla laboratorioskokeilla selvitettiin biohiilipohjaisten kasvupallojen materiaalivaihtoehtoja. Käytännön kokemusta haettiin pilotoimalla kehitetyn tuotteen itävyyttä erilaisissa kasvupaikoissa. Biokaasun epäpuhtauksien käsittelyssä biohiilellä keskityttiin siloksaanien poistoon. Toimenpidettä varten hankittiin DMS-laite, jolla siloksaanipitoisuuksia mitattiin. Biohiilen suodatustehokkuuden selvittämisen lisäksi hankittua laitetta opetettiin tunnistamaan tutkittuja aineita. Kasvupallokoikeista saatujen tulosten perusteella tuoteaihiolle tehdyn teknis-taloudellisen tarkastelun lisäksi arvioitiin markkinapotentiaali ja hiilijalanjälki. Tuotteen ympäristöturvallisuutta selvitettiin luminometriaan perustuvalla ekotoksisuustestillä.

TULOKSENA BIOHIILIPOHJAISET TUOTEAIHIOT

Kasvupallopilotoinnit tuottivat tietoa seosmateriaalien käyttäytymisestä erilaisilla kasvualustoilla sekä siementen itävyydestä kasvupalloissa pohjolan olosuhteissa. Tietoa tuotettiin myös kasvupallojen levityksestä droonin avulla. Kaasun haitta-ainekäsittelykokeissa saatiin tietoa biohiilen toimivuudesta suodatinmateriaalina sekä DMS-laitteen käytettävyydestä siloksaanien analysoinnissa. Ekotoksisuuskokeilla selvitettiin miten eri raaka-aine ja valmistuslämpötila voi vaikuttaa biohiilen laatuun. Uuden tiedon, kokemuksen ja osaamisen lisäksi tuotettiin tietoa kasvupallojen kustannuksista ja hiilijalanjäljestä. Tässä julkaisussa kerrotaan BioGo-hankkeen toimenpiteiden toteutuksesta ja tuloksista.

KASVUPALLOT APUNA RAVINNEKÖYHIEN MAASTOJEN METSITTÄMISESSÄ JA NIIDEN VALMISTUSMENETELMÄT

Henri Kettunen & Inkeri Vesala

Biohiilellä puhdasta kaasua ja kasvuvoimaa -hankkeen tavoitteena oli kehittää biohiilipohjaisia tuoteaihioidia eli kasvupalloja parantamaan maaperän hiilisisidontaa ja vedenpidätyskykyä sekä tehostamaan metsäpuiden kasvatusta. Tuoteaihioidien eli kasvupallojen valmistamiseen testattiin erilaisia menetelmiä: käsin valmistusta, rakeistusta eli pelletointia koneavusteisesti sekä muottivalmistusta. Hankkeessa valmistetuissa kasvupalloissa käytettiin metsämännyn (*Pinus sylvestris*) siemeniä. Valmistuskokeilujen tavoitteena oli löytää pienen mittakaavan valmistuksen kannalta paras tapa tehdä kasvupalloja, jotka kestäisivät ehjinä niiden maastoon levitykseen asti mutta mahdollistaisivat männyn itämisen mahdollisimman helposti hajotessaan. Artikkelissa esitellään, mitä kasvupalloilla tarkoitetaan ja miksi niitä kannattaa tutkia metsityksen edistämiseksi. Lisäksi esitellään hankkeessa kokeillut menetelmät niiden valmistamiseksi sekä kunkin menetelmän todetut hyödyt ja haittapuolet.

KASVUPALLOT – MITÄ NE OVAT JA MIHIN NIITÄ TARVITAAN?

Siementen kuorutus väriaineilla ja hyönteiskarkotteilla on ollut kasvi- ja metsätieteilijöiden tutkimuskohteena aiemminkin. Menettelyllä on saatu esimerkiksi havupuiden osalta hyvin vaihtelevia tuloksia itävyyden kannalta, sillä usein päällystettyjen siementen itävyys tai pidempiaikainen selviäminen ei ole ollut sen parempi kuin paljailla siemenillä (Himanen 2012). Nykyään viljakasvien siemenien päällystystä tehdään mm. kasvitautien ja tuholaisien torjumiseksi sekä niiden käsittelyn helpottamiseksi mekaanisissa laitteissa saattamalla ne yhtenäisemmän muotoisiksi. Päällystysten tavoitteena on siis kaiken kaikkiaan siementen tuottavuuden maksimointi.

Päällystäen valmistettävien lopputuotteiden nimeäminen on toistaiseksi melko epävirallista. Yleisesti nimeämistä määrittää siemenen ympärille kertyneen materiaalin määrä suurenvassa järjestyksessä (kuva 1): *Pinnoituksessa* siemen päällystetään hyvin ohuella kerroksella: peittäus taudinaiheuttajien torjumiseksi tai pelkkä värjäys. *Kuorruksessa* siemen päällystetään selvästi sitä massaltaan suuremmalla materiaalimäärällä, mutta siemenen muoto on yhä

tunnistettavissa. *Pelletteinnissa* siemenen muotoa ei enää tunnisteta kerrostavan materiaalin alta eli siitä muodostuu pallomainen. (Pedrini ym. 2020; Incotec 2022.) BioGo-hankkeessa kasvupallo vakiintui yleisesti käytettäväksi nimitykseksi, kun puhutaan edellisen listauksen mukaisesti pelletoiduista lopputuotteista, jotka sisältävät siemeniä käärittynä maa-aineisiin sekä potentiaalisesti niiden kasvua edistäviin komponentteihin. Yhtä hyvin näistä lopputuotteista olisi voitu puhua esimerkiksi siemenpalloina tai siemenpelletteinä.



Kuva 1. Siementen eri päällystystavat (kuva mukaillen Pedrini ym. 2016)

Kasvupallojen historian uskotaan perustuvan muinaisen Egyptin aikakaudelle, jolloin tuon aikaisten ihmisten arvellaan käyttäneen maa-aineksiin käärittynä siemeniä vuotuisten Niilin tulvien tuhoamilla viljelysmailla turvatakseen tulevan viljasadon (Seed-balls.com s.a.). Lähtökohtana modernimmille kasvupalloille pidetään aiheen pioneerinä toimineen Masanobu Fukuokan nendo dango -filosofiaa, jossa kasvien itämismahdollisuuksia parannetaan luonnollisen viljelyn keinoin ilman istutusta. Fukuokan ajatuksena oli, että maaperään ei kannata kaivaa kuoppia siementen kylvämiseksi, jolloin häiritään herkän ekosysteemin toimintaa ja toisaalta altistetaan herkäät siemenet saalistajille ja luonnonvoimille. Sen sijaan siemen voidaan ”kylvää” valmiiksi savipalloihin, jotka ripotellaan maahan. Tällöin savipalloihin upotetut viljakasvien siemenet ryhtyvät tarpeeksi runsaiden sateiden jälkeen itämään luonnollisesti ja pysyvät siihen asti suojassa (On Seedballs s.a.).

Semillistas (2020) lisää Fukuokan opetuksiin huomion siementen lepotilasta, jossa ne saattavat viipyä jopa vuosia ennen itämisen alkua. Savipallon kaltaisilla siemenpalloilla voi olla itämistä estäviä vaikutuksia. Liian tiivis savikerros estää siementen ja ilman välisen kaasujen vaihdon eli soluhengityksen, joka on useille siemenille oleellista lepotilan loppumiseksi ja itävyyden alkamiseksi. Lepotilassa olevalle siemenelle tämän ei nähdä olevan ongelma, sillä kuukausien tai vuosien päästä levityksestä pallo hajoaa ja siemenen lepotila lakkaa, jolloin se kykenee hengittämään ja alkaa itää. Sen sijaan aktiivisemmat siemenet kärsivät, sillä vaikka ne kykenisivät itämään pallon läpi, niiden itämisen on todettu etenevän hitaammin. Näin käy etenkin, jos paikallisen ilmaston takia maanperän pintakosteus kuivuu nopeasti sateen jälkeen, sillä kosteus on elintärkeää siementen itämisen kannalta. Niinpä savi kasvupallossa ei yksin riitä suojaamaan kasvien siemeniä kaikissa ilmastoissa. Pallojen rakenteessa täytyy huomioida siementen hengittäminen sekä pallon kyky pidättää kosteutta, jotta niiden sisältämät siemenet pääsevät itämään mahdollisimman hyvin. Kasvupalloreseptiin voidaan

lisätä biohiiltä, joka nähdään optimaalisena raaka-aineena kasvupallojen valmistukseen. Suuren huokospinta-alansa ansiosta biohiili edistää mykorritsojen kasvua, sillä ilma kulkee helposti sen rakenteessa (Semillistas 2020).

Siementen päällystyksen ja etenkin pelletoinnin tutkimista riivaa aiheen salassa pidetty ja patentoitu luonne. Aiheesta löytyvät tutkimukset ovat yleensä alan toimijoiden teettämiä eivätkä kerro yksityiskohtaisesti pellettien valmistusmenetelmistä tai niissä käytetyistä ainesosista (Himanan 2012). Tämä osaltaan vaikeuttaa aiheeseen tutustumista eikä julkisesti saatavilla olevan tiedon perusteella ole helppoa arvioida, mitkä asiat toimivat ja mitkä eivät. Pedrinin ym. (2020) mukaan ensimmäiset siementen päällystämiseen patentoidut laitteet valmistettiin 1800-luvun lopulla, jonka jälkeen vastaaville laitteille on luotu yli 20 patenttia. Näistä suurin osa perustuu rakeistuslautasten, roottori–staattorityyppisten sekoittimien tai leijupetien kaltaisten menetelmien käyttöön. Pienemmän budjetin projektit suorittavat siementen päällystyksen yleensä joko betonimyllyillä tai sekoittamalla päällystysaineita siementen kanssa samassa pussissa tai valmistamalla lopputuotteet käsin. Tosin tällöin lopputuotteen laatu voi vaihdella suuresti ja skaalattavuus suuremmalle valmistusmäärälle olla huono

KÄSIN VALMISTUS SOPII RAAKA-AINESUHTEIDEN KOKEILUUN JA TESTIERIEN VALMISTUKSEEN

Käsin valmistus on kasvupallojen valmistusmenetelmistä kaikkein yksinkertaisin; siinä valitut reseptin mukaiset raaka-aineet sekoitetaan keskenään ja seoksen muovailtavuutta kohennetaan sopivalla neste- ja sidosaineen, kuten veden ja saven, määrällä. Raaka-aineiden raakoolla ei ole merkittävässä määrin väliä, kunhan jollain raaka-aineella saadaan muodostettua seosmassalle tarvittava sitko, jotta se pysyy hyvin muodossa. Raaka-aineet voivat myös olla kosteita, eli ne eivät yleensä kaipaa esikäsittelyitä kuten kuivaamista tai hienontamista jauheeksi, vaan käytettäväksi kelpaa suoraan maasta kaivettu aines.

Käsin voidaan helposti tehdä lähes minkä tahansa muotoisia ja kokoisia kasvupalloja. Menetelmä soveltuu hyvin pienten koe-erien kokeiluun ja kun halutaan pitää valmistuskustannukset mahdollisimman pieninä. Se on kuitenkin täysin käsityötä, eikä sillä saada kovin helposti tai tasaisesti tehtyä erilaisia kerroksia kasvupalloon, jos sellainen nähdään oleelliseksi ominaisuudeksi. Kasvien siemenet voidaan menetelmässä helposti sekoittaa osaksi raaka-ainemassaa, jolloin siementen määrää tai sijaintia kussakin valmistettavassa pallossa ei voida luotettavasti tietää. Siemenet on mahdollista lisätä, siemenen koosta ja vaatimuksista riippuen, joko keskelle palloa, tai sen pinnalle kesken kasvupallon muotoilun, jolloin siementen tarkka määrä per kasvupallo on helposti määritettävissä. Tällainen on kuitenkin hieman enemmän aikaa vievää. Käsin valmistuksessa suurimpina riskeinä ovat liiallinen kosteus sekä kasvupallojen painelu liian tiiviiksi, jolloin niiden sisältämät siemenet eivät kykene hengittämään kunnolla, joka voi johtaa huonoon itävyyteen.

Suurin osa BioGo-hankkeen kasvupallojen reseptikokeiluista eri raaka-ainesuhteilla tehtiin käsin valmistaen sen helppouden vuoksi (kuva 2). Hankkeessa käsin valmistettujen kasvupallojen valmistusraaka-aineita olivat erilaiset maasta kaivetut savi- ja -multamaa-ainekset, kaupallinen jauhettu savi, komposti, bentoniitti, erikokoiset hiekka- ja sorarakeet, sepeli, leca-sora, vermikuliitti ja erilaisista lähdemateriaaleista valmistetut biohiilet jauhattuna. Kasvupalloihin lisättiin männyn siemien lisäksi yksivuotisen italianraiheinän siemeniä, sillä ne itävät nopeasti ja juurruttavat pallon maastoon. Lisäksi reseptiikkaan kuului havukasveille hyödyllinen ektomykorritsaseos. Litra seosmassaa riittää noin 40 kasvupalloon valmistukseen, kun ne muotoillaan halkaisijaltaan noin 35 mm kokoisiksi.



Kuva 2. Erä käsin muotoiltuja kasvupalloja (kuva H. Kettunen 2021)

Apuvälineitä käsin valmistukseen on kuitenkin olemassa. Esimerkiksi hankkeessa käytettiin suurempien kertaerien valmistuksessa apuna maalinsekoitusvispilää liitettynä akkuporakoneeseen, jolla saatiin nopeasti sekoitettua viisi litraa kasvupalloomassaa ämpärissä (kuva 3). Sekoitusvispilää käyttäessä tulee kuitenkin huomioida, että se voi olla herkimmille siemenille vahingollinen, joten sekoitus kannattaa suorittaa ennen siementen lisäämistä muun massan sekaan tai ainakin alentaa vispilän pyörimisnopeutta. Samoin herkästi pölyävien ainesosien osalta tulee huomioida asianmukainen henkilökohtainen suojavarustus ja tehdä sekoitus hyvin ilmastoidussa tilassa tai ulkona.



Kuva 3. Kasvupallomassan sekoitus sekoitusvispilällä (kuva H. Kettunen 2021)

RAKEISTUS MAHDOLLISTAA KASVUPALLOILLE KERROKSITTAIN VALMISTETTAVAN RAKENTEEN

Hankkeen edetessä haluttiin valmistaa kasvupalloja siten, että niissä olisi erillinen ydin- ja kuorikerros. Tiedonhaun perusteella rakeistus nähtiin tähän sopivaksi valmistusmenetelmäksi. Hieman alkukantaisempi ja käsin toteutettava, mutta rakeistusta läheisesti muistuttava menetelmä kasvupallojen valmistamiseksi, on Fukuokan (1997) opastama menettely, jossa jauhattua saviainesta ja siemeniä sekoitetaan käsin keskenään laajalla tasaisella alustalla

ja välillä suihkutellaan vettä niiden joukkoon. Tällöin aineksista alkaa muodostua siemeniä sisältäviä savipalloja. Tällainen menettely on kuitenkin epäergonomista ja käy nopeasti raskaaksi, jos ainesten sekoittelu täytyy suorittaa lihasvoimin. Menettelyssä ei myöskään ole minkäänlaisia takeita siitä, että syntyvissä palloissa on kussakin siemeniä ja syntyvät pallot ovat ulkomuodoltaan ja kooltaan hyvin epätasaisia.

Rakeistuksella jauheen raekokoa pyritään kasvattamaan ja tasakokoistamaan. Kerrostavassa rakeistuksessa (pelletointi) rakeet muodostetaan kuorutusaineen, rakeistusliuoksen ja mekaanisen vierityksen avulla käyttäen rakeistuslautasta tai -rumpua. Liikkeessä olevat kostutetut partikkelit törmäävät ja tarttuvat toisiinsa ja kerrostuvat jauheesta muodostuneiden ydinpartikkelien ympärille. Mitä isommiksi rakeet kasvavat, sitä paremmin ne erottuvat pintakerrokseen ja halutun kokoiset, valmiit rakeet voidaan poistaa. (Granulointi s.a.)

Rakeistuksessa käytetään hyödyksi erilaisia partikkelien välisiä vetovoimia ja sidosmekanismeja. Kun käytetään vettä rakeistusliuoksena kerrostavassa rakeistuksessa, rakeiden muodostumisen sidosmekanismi perustuu partikkelien välisiin nestesiltoihin. Nesteen määrä, rakeistettavan materiaalin raekoko sekä kostuttavuus vaikuttavat syntyvän rakeen kestävyuteen. Rakeistuslautasen tai rummun halkaisijan kasvattaminen, rakeistusaika ja rakeiden koko vaikuttaa myös syntyvien rakeiden lujuteen. (Orava ym. 2004.)

Kerrostavalla menetelmällä rakeistamalla kasvupalloihin voidaan valmistaa suojaava kuorikerros sekä pehmeämpi sisäosa (kuva 4), ja tehostaa valmistusprosessia. Vertailutietoa kasvupallojen käytöstä ja valmistuksesta rakeistamalla on vähän saatavilla. Esimerkkinä Hohenheimin yliopistossa on tehty tutkimus ravinnepitoisilla ainesosilla päällystettyjen siementen soveltumisesta Länsi-Afrikan kuivilla alueilla hirssin viljelyn satoisuuden varmistamiseksi ja parantamiseksi paikallisilla resursseilla (Nwankwo 2018).



Kuva 4. Halkaistuja kasvupalloja, joissa on nähtävissä ydin, sisäkerros ja kuorikerros (kuva H. Kettunen 2022)

Hankkeessa kasvupallojen rakeistamiseen käytettiin pienen betonimyllyn puolikasta rakeistuslautasen tavoin. Kuivia ainesosia lisättiin myllyyn lusikalla ripottelemalla ja valmistuksessa tarvittava vesi lisättiin paineruiskupullolla suihkauksin. Kasvupalloissa käytettävien ainesosien rakeistettavuutta testattiin ensin yksi kerrallaan betonimyllyssä. Samalla selvitettiin ainesosille tarvittavien esikäsitteilyjen eli mahdollisen kuivatuksen ja seulonnan tai jauhamisen tarvetta. Sisäkerroksen ainesosina kasvupalloissa käytettiin kuivattua kompostia, metsämullaa, biohiiltä, luonnonturvetta ja hiekkaa sekä sidosaineina ja kuorikerroksessa kokeiltiin savea, kipsijauhetta tai karboksimeetyyliseluloosaa (CMC). Käytettävien ainesosien tuli soveltua sekä rakeistamiseen, että männyn kasvualustaksi.

Kosteimmat ainesosat vaativat rakeistuksen onnistumiseksi kuivatuksen vähintään huoneilmassa. Kompostia kuivattiin prosessin nopeuttamiseksi myös kuivatusuunissa enintään 60 °C lämpötilassa. Kompostin lisäksi metsämullaa, hiekkaa, savijauhe ja turve vaativat seulomista materiaalista riippuen <1–<4 mm raekokoon. Kompostia kokeiltiin myös jauhaa, jotta siitä saatiin tasalaatuisempaa. Yhdyskuntabiojätteestä peräisin oleva maanparannuskomposti sisälsi hyvin heterogeenisiä partikkeleita, jotka seulomalla erottuivat. Materiaali rakeistuu ja rakeista tulee sitä kestävämpiä, mitä pienikokoisempi rakeistettavan materiaalin raekoko on.

Varsinaisia kasvupalloja rakeistettiin valmiiksi punnituista ja sekoitetuista esikäsitteilyjen ainesosien yhdistelmistä. Ensimmäisiä muodostuvia rakeita syntyi lukumäärällisesti paljon, ja ne olivat hyvin eri kokoisia. Kasvupallojen määrän ja koon hallitsemiseksi rakeistusta ei voinut jatkaa suoraan. Ratkaisuna päädyttiin rakeistamaan parhaiten rakeistuvasta ainesosasta, kuivatusta ja jauhetusta kompostista mahdollisimman samankokoisia, halkaisijaltaan <10 mm ytimiä, jotka kuivattiin huoneenlämmössä ennen seuraavaan vaiheeseen etene- mistä. Valittiin haluttu lukumäärä ytimiä, ja kasvupallot rakeistettiin niiden ympärille. Kompostista valmistettu ydin toimisi samalla lannoitteena. Vaihtoehtona kokeiltiin myös leca-soran käyttöä ytiminä, mutta ne eivät olleet tarpeeksi pyöreitä. Toisaalta se oli ylimääräinen ainesosa, josta ei nähty olevan hyötyä männyn itämisen kannalta.

Rakeiden kasvaessa niin, etteivät ne enää mahtuneet pyörimään rummussa jaettiin kesken- eräiset kasvupallot kahteen erään. Kerrostamista jatkettiin erä kerrallaan, kunnes pallot olivat noin 20–25 mm kokoisia (kuva 5). Kasvupalloon oli tavoitteena lisätä keskimäärin viisi männyn siementä. Siemenet lisättiin rakeistuksen aikana kasvupallojen uloimpaan kolmannekseen ennen kuorikerrosta, jolloin ne jäivät kiinni kasvupalloihin lähelle niiden pintaa. Siemenet ovat elävää materiaalia, joihin vaikuttaa esimerkiksi lämpötilan ja kosteuden vaihtelu sekä mekaaninen rasitus. Rakeistuksessa on otettava huomioon siementen säilyttäminen itämiskykyisinä. (Helenius 2012; Himanen 2012; Nygren 2011.)



Kuva 5. Turvetta sisältäviä kasvupalloja ennen kuorikerroksen rakeistamista (kuva I. Vesala 2022)

Kuorikerros valmistettiin samoin valmiiksi sekoitetuista reseptin mukaisista ainesosista jatkamalla rakeistusta edelleen. Kuorikerroksista tehtiin noin 1–3 mm paksuisia, ja kasvupallojen lopullinen koko oli 25–30 mm. Kuorikerroksena testattiin saven ja biohiilen seoksia erilaisilla suhteilla, kipsijauheen ja biohiilen seosta sekä CMC:tä. Käytössä olleella betonimyllyn puolikkaalla kasvupalloja saatiin tavoitekokoon asti valmistettua kerrallaan noin 20–30 kappaletta.

Osa lisättävästä materiaalista jäi muodostuvien kasvupallojen sijasta rummun pintaan, tai kostuessaan irtonaiseksi materiaaliksi rumpuun (kuva 6). Osa materiaalista saattoi myös alkaa muodostamaan uusia rakeita, erityisesti jos se sisälsi suurempia partikkeleita. Tätä materiaalia kutsutaan hukkamateriaaliksi ja sen määrä valmistuksessa pyrittiin minimoimaan. Syntynyt hukkamateriaali poistettiin välillä rummusta. Jos kasvupalloja valmistetaan suurempia määriä, tämä materiaali olisi tarpeen saada uudelleen käyttöön esimerkiksi kuivaamalla. Pienimmillään hukkamateriaalia syntyi noin 10 % käytetystä raaka-ainemassasta.



Kuva 6. Kasvupallojen rakeistuksessa kokonaisella betonirummulla syntyi enemmän hukkamateriaalia (kuva I. Vesala 2022)

Rakeistamalla valmistamisessa haastavinta oli saada resepteistä sellaisia, että kasvupalloista tulee helposti rakeistuvia ja käsittelyä kestäviä mutta riittävän helposti luonnossa hajoavia sekä sopivia männyn itämisen kasvualustaksi. Paras itävyys ja kasvu saatiin aikaiseksi helposti hajoavilla kasvupalloilla, jotka sisälsivät riittävästi siemeniä, kasvupallojen rakennetta ja vedenpidätyskykyä parantavaa turvetta, ja sidosaineena savea ainoastaan kuorikerroksessa biohiilen kanssa massasuhteessa 1:1. Muut testatut sidosaineet tekivät kasvupalloista helposti liian kovia.

Rakeistusmenetelmä soveltui pienten koe-erien valmistukseen. Rakeistusmateriaalin ja -liuoksen lisääminen tapahtui käsityönä ja sisälsi tästä johtuvaa vaihtelua. Koneellisella raaka-aineiden syötöllä ja valmistusprosessin automatisoinnilla olisi mahdollista paitsi tehostaa prosessia myös optimoida sitä tarkemmin. Rakeistusta voitaisiin tehostaa myös käyttämällä suurempaa rumpua tai tekemällä prosessista jatkuvatoiminen. Tällöin rakeistusta jatkettaisiin lisäämällä uutta materiaalia ja poistamalla tavoitekokoiset valmiit kasvupallo tasaisin väliajoin, kunnes haluttu määrä kasvupalloja on valmistettu. Tällöin tosin tarvittaisiin toinen rakeistuslautanen, jossa tapahtuisi erikseen kuorikerroksen valmistus. Hohenheimin yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa rakeistaminen tehtiin yksinkertaisella tynnyristä rakennetulla rakeistusrummulla jatkuvatoimisesti, jolloin saatiin valmistettua noin 40 kasvupalloa minuutissa, kun ainesosat on valmisteltu etukäteen (Jesser ym. s.a.).

KASVUPALLOJEN MUOTTIVALMISTUS

Kasvupallojen kaltaisten pelletoitujen siementen muottivalmistus ei ole ajatuksena uusi; jo 1960-luvulla Yhdysvalloissa testattiin laitetta, jolla maa-ainesten ja siementen seoksesta saatiin puristamalla pallomainen. Laitteessa käytettiin hammaspyöriä, joilla muodostettiin neljästä neljännespallomuotista niiden yhtymäkohdassa väliin jäävästä aineksesta tiivis pallo. Laitteella valmistettujen pallojen koko vaihteli $\frac{1}{4}$ "– $\frac{3}{8}$ ", joista kukin sisälsi 5–10 siementä niiden koosta riippuen. Laite oli kuitenkin herkkä suuremmille partikkeleille ja kosteudelle, jotka rikkoivat laitteen herkästi, eivätkä sillä valmistetut pallot olleet enää tasalaatuisia eivätkä ne pysyneet kunnolla koossa. Lisäksi laitteella valmistetuista palloista havaittiin, että keskimäärin 38 % niiden sisältämistä siemenistä hajosi puristuksen takia. (Hull ym. 1963.) Kyseisellä laitteella yksinään ei myöskään olisi pystynyt valmistamaan useamman säännöllisen kerroksen sisältäviä kasvupalloja.

Lähtökohtana muottivalmistuskokeissa oli saada valmistettua kerroksellinen kasvupallo, jonka ydin koostuu ravinteikkaista maa-aineksista sekä siemenistä ja kuori kovemmasta materiaalista, jotta kasvupallo säilyisi kuljetuksista ehjänä, mutta sulaisi helposti luontoon levitettynä. Kuoreksi soveltuvan seoksen kehitys oli siis tärkein tekijä tehtävässä onnistumisessa. Muottivalmistusta testattiin samanaikaisesti rakeistuskokeiden kanssa. Valmistuskokeiluja varten hankittiin kaksi leivontaan tarkoitettua silikonista puolipallomuottia, joilla valmistettiin halkaisijaltaan 30 mm puolipalloja.

Kokeiluissa käytettiin kuoren ainesosina kipsiä, savea sekä biohiiltä jauheina (kuva 7). Sekä kuori- että ydinseos siemenineen valmistettiin etukäteen sekoittamalla valitut raaka-aineet astiassa. Kostutettua kuoriseosta levitettiin posliinisen survimen avulla mahdollisimman tasaisesti puolipallomuotin sisäpinnoille ja ydinseos lisättiin puolipallon täytteeksi. Ajatuksena oli saada kumpikin muotti tällä tavoin täytettyä ja tämän jälkeen asettaa ne päällekkäin, jolloin kuivumisen jälkeen olisi saatu valmistettua kokonaisia palloja. Tämä ei kuitenkaan käytännössä onnistunut. Kääntämisen jälkeen ainekset eivät pysyneet muotissa kunnolla kiinni ainesosien kosteudesta riippumatta. Ongelmana oli myös kuoriseoksen taipumus tarttua herkästi survimen pinnalle.



Kuva 7. Kipsi- ja biohiili-saviseos-kuorisia muotilla valmistettuja puolipalloja, osassa myös ydinseos täytteenä (kuva H. Kettunen 2022)

Seuraavaksi kokeiltiin valmistaa muoteilla ensin pelkät kuoret, jotka kuivattiin ja irrotettiin muoteista. Vasta tämän jälkeen niihin lisättiin ydinseos ja ne yritettiin liittää sidosaineella kokonaisuksi yksi kerrallaan. Sidosaaineina kokeiltiin sekä kuoriseosta että CMC-liuosta. Tällä tavoin onnistuttiin saamaan valmiiksi muutamia kokonaisia muottipalloja (kuva 8). Työ oli kuitenkin niin hidasta suhteessa valmistusmäärään ja lopputulos epätasalaatuista, ettei tätä valmistusmenetelmää nähty tällä tavoin toteutettuna hyödylliseksi jatkaa pidemmälle. Yhteen liimauksen yhteydessä aiemmin kuivunut kuori kostui ulkoreunojen ympäriltä ja oli hyvin herkästi mureneva ennen uudelleen kuivumista. Lisäksi CMC-liuos aiheutti kuivuessaan kutistumaa kuoren kostuneeseen pintaan, joka vääntyi ulospäin aiheuttaen epätasaisuutta kuoreen. Tällainen pinnan epätasaisuus tulisi olemaan etenkin pallojen koneellista levitystä ajatellen ongelmallista.



Kuva 8. Vasemmalla kuoriseoksella ja oikealla CMC-liuoksella yhteen liitetyt muottipallot (kuva H. Kettunen 2022)

Testatuista kuoriaineksista kuitenkin jauhetun biohiilen ja saven yhdistelmä massasuhteessa 1:1 vaikutti lupaavalta. Kuori vaikutti riittävän kestävältä kuljetuksien kannalta, mutta se myös huuhtoutui kastellessa hyvin helposti pois paljastaen kasvupallon ytimen. Toisaalta kuoren paksuuden hallinta oli vaikeaa ja liian ohueksi jääneet alueet jäivät irrottaessa muottiin kiinni rikkoen puolipallon. Kipsin sen sijaan nähtiin soveltuvan huonosti kasvupallojen muotilla valmistukseen. Kipsin käsittelyaika ennen kovettumista oli lyhyt (<15 min) ottaen huomioon, että työ suoritettiin käsin, ja se teki palloista lopulta aivan liian kovia. Vaikka seoksessa olisi ollut biohiiltä mukana, se ei myöskään hajonnut kastellessa helposti vaan ainoastaan imi veden tehokkaasti. Tällöin pallon sisällä olevilla siemenillä tuskin riittäisi voimaa työntää sirkkajuurta läpi kipsikuoren.

KASVUPALLOJEN VALMISTUSTEKNIIKAN KEHITYS VAATII ASiantuntemusta MONelta AIHEALUEelta

Kasvupallojen valmistus voi tuntua yksinkertaiselta aiheesta tietämättömälle. Todellisuudessa valmistustekniikan valintaa määrittää etenkin kasvupallon sisältämien kasvin siementen vaatimukset, joiden tulisi aina olla prioriteetti, ettei siemen tai sen itävyys kärsi kasvupallon valmistuksesta johtuen. Kasvupallon raaka-aineiden valinta vaatii yhteistyötä kasvi- ja

siemenasiantuntijoiden, maastoasiantuntijoiden sekä valmistuslaitteiston suunnittelijoiden kesken. Valmistuslaitteisto ja -menetelmät eivät saa vaurioittaa siemeniä ja lopputuotteen tulee olla luonnossa helposti sateella hajoava, jotta se sallii siemenen hengittämisen ja kasvin juurtumisen maaperään. Kasvupallo ei siis saisi olla liian tiivis ja siinä tulisi olla maaperän vedenpidätyskykyä parantava vaikutus sekä ravinnesisällön puolesta lannoittava vaikutus kasvavalle taimelle.

Etenkin kerrostettujen kasvupallojen valmistuksen todettiin onnistuvan pienessä mittakaavassa parhaiten käyttäen betonimyllyn puolikasta rakeistuslautasena. Käytetty rakeistustekniikka oli edelleen osittain käsityötä. Kasvupalloja valmistavalta henkilöltä vaadittiin myös kokemusta sopivasta raaka-aineiden ja vesimäärän lisäysehdistä. Menetelmällä kuitenkin saatiin valmistettua suhteellisen tasalaatuisia kasvupalloja, jotka eivät olleet liian tiiviitä männyn siementen itämisen kannalta. Tärkeiksi rakeistuksessa huomioitaviksi seikoiksi todettiin raaka-aineiden hieno raekoko ja alhainen kosteus.

Suuremmissa kokoluokassa muottivalmistus voisi olla parempi vaihtoehto. Käytännössä valmistus voisi toimia esimerkiksi mankelin kaltaisella laitteella, käyttäen puolipallosapluunoita mankelitelojen molemmin puolin. Mankelin väliin syötettäisiin raaka-aineseoksia, jolloin seoksista puristuu kokonaisia palloja. Vastaavasti useamman kerroksen sisältäviä kasvupalloja saataisiin luotua peräkkäisillä mankeleilla, joissa on hieman eri kokoiset muotit, ja syöttämällä eri aineksia kunkin väliin edellisen vaiheen pallojen kanssa. Toinen vaihtoehto voisi olla prässä, jolle syötetään kerroksittain valmistettuja ja kostutettuja seoksia valmiiksi levyiksi mankeloituina, jotka puristetaan päällekkäin haluttuun muotoon sopivalla muotilla. Kasvupallojen muottivalmistuksessa tulisi joka tapauksessa huomioida, ettei prosessissa käytettävä puristusvoima saisi aiheuttaa mekaanisia vaurioita muotin sisään raaka-aineiden kanssa lisättäville kasvien siemenille. Samoin, mikäli kasvupallojen valmistuksessa on käytetty kosteita aineksia, muotoiltujen pallojen kuivattaminen ennen pakkaamista ei saisi tapahtua sellaisissa lämpötiloissa, joita siemenet eivät kestä.

LÄHTEET

Fukuoka, M. 1997. Seed Balls by Masanobu Fukuoka. Youtube. Videoleike. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=A4-bwW8PW10> [viitattu 1.11.2022]

Granulointi. s.a. Oulun yliopisto. Fluidi- ja partikkeliteknikka. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://doczz.net/doc/7065544/granulointi> [viitattu 15.3.2022]

Helenius, P. 2012. Männyn siemenet törmäystestissä. Metla. Taimiuutiset 2/2012, 18–20. Saatavissa: https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/534230/Taimiuutiset_2-2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Himanen, K. 2012. Siementen pelletointi, ennakkoluulottomia kokeita ja epäonnea. Metla. Taimiuutiset 2/2012, 8–11. Saatavissa: https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/534230/Taimiuutiset_2-2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hull, A.C. Jr., Holmgren, R.C., Berry, W.H., & Wagner, J.A. 1963. Pellet Seeding on Western Rangelands. University of Illinois, Yhdysvallat. Miscellaneous Publication No. 922. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbxvbnNlZWVWxsc3xneDo3NDQyNjEyZWVhZmI4Zl9Tc0> [viitattu 1.11.2022]

Incotec 2022. What is seed coating. Www-julkaisu. Saatavissa: <https://www.incotec.com/en-gb/seed-technologies/seed-coating> [viitattu 3.11.2022]

Jesser, A., Romuli, S. & Muller, J. s.a. Seedball machine. University of Hohenheim. Youtube. Videoleike. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=MwIq9wK0vK8> [viitattu 14.8.2022]

Nygren, M. 2011. Metsänkylvöopas. Vantaa. Metsäntutkimuslaitos erillisjulkaisut 911. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2328-6> [viitattu 15.3.2022]

Nwankwo, C. 2018. Viability of the seedball technology to improve pearl millet seedlings establishment under Sahelian conditions - a review of pre-requisites and environmental conditions. University of Hohenheim, Germany. Www-dokumentti. Saatavissa: http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2019/1597/pdf/Dissertation_final_Nwankwo.pdf [viitattu 12.1.2022]

On Seedballs. s.a. What. Www-dokumentti. Saatavilla: <https://sites.google.com/site/on-seedballs/Home/What> [viitattu 1.11.2022]

Orava, H., Matilainen, A., Halinen, A., Tontti, T. & Nordman, T. 2004. Kompostista ja tuhkasta rakeistamalla lannoitevalmistetta. Mikkelin ammattikorkeakoulu A: Tutkimuksia

Pedrini, S., Merritt, D.J., Stevens, J. & Dixon, K. 2016. Seed Coating: Science or Marketing Spin? *Trends in Plant Science* Volume 22, Issue 2, 106 – 116. Verkkolehti. Saatavilla: [https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385\(16\)30172-8?code=cell-site](https://www.cell.com/trends/plant-science/fulltext/S1360-1385(16)30172-8?code=cell-site) [viitattu 8.11.2022]

Pedrini, S., Merritt, D.J. & Dixon, K. 2020. Chapter 8: Smart Seed for Automated Forest Restoration. Teoksessa Elliott, S., Gale, G. & Robertson, M. (toim.) *Automated Forest Restoration: Could Robots Revive Rain Forests?* Thaimaa: Forest Restoration Research Unit, Chiang Mai University. 113 – 128. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.forru.org/sites/default/files/public/publications/resources/forru-0000099-0034-en.pdf> [viitattu 3.11.2022]

Seed-balls.com. s.a. What are Seed Balls? – History. Www-dokumentti. Saatavilla: <https://seed-balls.com/what-are-seed-balls> [viitattu 1.11.2022]

Semillistas 2020. Qué es la peletización. Blogi. Päivitetty 23.10.2020. Saatavilla: <https://semillistas.es/que-es-la-peletizacion/> [viitattu 7.11.2022]

KASVUPALLOJEN LAADUN- VALVONTA – HANKKEESSA KÄYTETYT TESTAUSMENETELMÄT JA ANALYYSITULOKSET

Henri Kettunen

Minkä tahansa teollisesti valmistettavan tuotteen laatuominaisuuksia on tärkeää varmistaa erilaisilla mittauksilla, jotta varmistuttaisiin tuotteen toimivan luvutulla tavalla ja jotta tuote täyttäisi sille asetetut vaatimukset. Hankkeessa valmistettiin useista eri raaka-aineyhdistelmistä kymmeniä erilaisia kasvupalloeriä, joilla oli tavoitteena saada palloihin lisätyt männynsiemenet itämään ja kasvamaan metsityksen kannalta haastavilla kasvualustoilla. Kasvupalloille ei ole olemassa vakiintuneita testaus- ja laadunvalvontamenetelmiä tai -kriteereitä, eikä niitä toistaiseksi valmista kaupallisesti kuin muutama yritys maailmalla, ja niiden sisältämät kasvit vaihtelevat paikallisesti. Joitain oleellisia laboratoriotestejä kasvupalloille oli hankkeessa kuitenkin kannattavaa teettää ennen kuin niitä käytettiin suurempia määriä pilot-testeissä kenttäolosuhteissa, jotta saatiin esituntumaa kasvupallojen potentiaalisesta kyvystä edistää niiden sisältämien siementen itämistä ja kasvua. Artikkelissa esitellään hankkeen pilot-kokeisiin valmistettujen kasvupallojen arviointimenetelmiä ja niistä saatuja mittaustuloksia. Menetelmät eivät ole standardoituja vaan toimivat pikemminkin suuntaa antavina ohjenuorina mahdollisille tuleville kasvupallojen valmistajille.

KASVUPALLOJA VASTAAVIEN TUOTTEIDEN TESTAUSMENETELMIÄ EI OLE TÄLLÄ HETKELLÄ STANDARDOITU

Pedrini ym. (2018) ovat kehittäneet eräänlaisen protokollan kehitysohjeiden eli valmiin lomakepohjan kasvupallojen kaltaisten pelletteitujen siementuotteiden valmistuskokeisiin. Kyseinen protokolla on kehitetty tapaukseen, jossa siemenet päällystetään siten, että yksi pelletti ei sisällä enempää kuin yhden siemenen. Protokollaan sisältyy pellettien valmistuksen jälkeinen laadunvalvontaosio, jossa tutkitaan valmistetusta pellettierästä niiden sisältämien siementen lukumäärä. Tähän testiin valitaan erästä viisi rinnakkaista sarjaa, joista kukin sisältää vähintään kymmenen pellettiä. Testillä varmistetaan, että erä ei sisällä ”tyhjiä” pellettejä, jotka muodostuvat vain pelkistä raaka-aineista ilman siemeniä niiden sisällä. Siemeniä sisältävien pellettien osuus erästä tulisi olla optimitapauksessa 100 %. Jos siemeniä sisältäviä pellettejä löydetään alle 90 %, erä suositellaan hylättäväksi. Vaihtoehtoisesti

suositellaan pesemään valmistetut pelletit ja suorittamaan siementen päällystys uudelleen. Lisäksi pelleteille tehdään lujuustestit, joihin käytetään vähintään kymmenen pellettiä per valmistuserä. Tulokseksi merkitään puristusvoima (N), jolla pelletti murenee tai siinä esiintyy näkyviä murtumia. Testillä varmistetaan, että tuotteet kestävät käsittelety esimerkiksi mekaanisissa levityslaitteissa. Näiden testien todetaan kertovan vain lopputuotteiden fysikaalisista ja mekaanisista ominaisuuksista. Niiden lisäksi suositellaan varmistettavaksi myös pelletoitujen siementen itävyys, mutta tiettyä testausmenetelmää ei mainita. Myös tuotteiden kosteus todetaan tärkeäksi parametriksi, sillä se voi vaikuttaa siementen laatuun ja fysiologiseen toimintaan, ja se suositellaan määritettäväksi vesiaktiivisuusmittauksilla.

Hankkeessa valmistettujen kasvupallojen kaltaisia uudelleenmetsitystä edistäviä hiilipohjaisia siemenpallotuotteita enemmän valmistava Seedballs Kenya (2016) valvoo tuotteidensa valmistusta tutkimalla niiden sisältämien siementen lukumäärän. Jokaista 12,5 kilon tuotantomäärää kohden palloja otetaan pieni astiallinen testiä varten. Pallojen lukumäärä lasketaan, ja ne liuotetaan vedessä rikki. Tämän jälkeen seoksesta siivilöidään vesi pois ja lasketaan siivilään jääneiden siementen lukumäärä. Vastaava menettely ei kuitenkaan olisi mahdollista, jos siemenet olisivat hyvin pieniä ja pallot sisältäisivät niitä suurempia raaka-ainejakeita, jotka eivät erottuisi siemenistä siivilöimällä. Yrityksen muista mahdollisista laadunvalvontamenetelmistä ei myöskään ole tietoa saatavilla. Toinen kaupallisesti uudelleenmetsitykseen siemenpalloja valmistava yritys Infused Seedballs Ltd. (s.a.) kertoo vain, että heidän tuotteensa edistävät kasvua ja että niillä on selviytymiskykyä parantava vaikutus perinteisiin menetelmiin verrattuna. Yritys ei ole julkaissut tarkempia tietoja vertailussa käytetyistä testausmenetelmistä tai tuotteidensa teknisistä spesifikaatioista.

Kasvupallojen kaltaisia tuotteita ja niiden testausmenetelmiä on siis alettu maailmalla kehittämään, mutta tarkempi standardointi käytettävistä menetelmistä on vielä puutteellista. Tästä kertoo myös heikosti saatavilla oleva tieto jo olemassa olevilta kasvupallojen valmistajilta.

KASVUPALLOJEN KESTÄVYYTTÄ TESTATTIIN HANKKEESSA MONELLA TAVALLA

Kasvupallojen tehtävä on toimittaa kasvien siemeniä ravinteikkaassa suojakuoressa luontoon. Kuitenkin luonnossa siementen tulisi pystyä itämään palloista. Pallojen täytyy siis kestää ehjänä kuljetus niiden levityskohteelle. Ne saattavat olla pakattuina suuriin säkkeihin, eivätkä ne saa tällöinkään hajota ennen levitystapahtumaa oman painonsa alla. On siis oleellista tutkia valmistettujen kasvupallojen lujuusominaisuuksia niiden kuivuttua.

Kasvupallojen lujuustestit suoritettiin Xamkin ympäristölaboratoriossa Shimadzu EZ Test -materiaalitesterialla eli penetrometrillä (kuva 1). Laitteessa käytettiin leveää tasapohjaista mäntää, joka mittauslanteessa painautui hitaasti kohti testialustalla olevaa kasvupalloa.



Kuvat 1a ja b. Kasvupallon lujuusmittauksissa käytetty penetrometri sekä sillä murrettu kasvupallo (kuvat H. Kettunen 2020)

Mäntä asetettiin noin millin etäisyydelle kasvupallon pinnasta, ja anturi nollattiin. Käynnistyksen jälkeen laite sammutettiin manuaalisesti, kun pallossa havaittiin puristuksesta johtuva murtuma (kuva 1). Juuri ennen murtumista laitteen piirtämästä venymäkuvaajasta nähtiin pallon kestävä maksimivoima, jota kutsutaan murtolujuudeksi.

Lujuusmittaukset tehtiin eräkohtaisesti yhteensä kymmenestä kasvupallosta, jotka valikoitiin sattumanvaraisesti, ja tuloksissa (taulukko 1) esitetään mittausten keskiarvo sekä minimi- ja maksimiarvot. Testatuista palloista mitattiin myös niiden halkaisija ja massa. Lisäksi jokaisesta erästä tehtiin kostutetut lujuustestit kastelemalla kasvupallot pipetoimalla niihin vettä ja antamalla veden imeytyä palloihin 30 minuutin ajan ennen lujuusmittauksia. Testin tarkoituksena oli saada tietoa kasvupallojen rakenteen käyttäytymisestä niiden kastuttua luonnossa. Kostutusmäärät vakioitiin suhteessa pallon massaan, ja ne kuvasivat maaperästä kapillaarisesti johtuvaa kevyttä kostumista (10 %) sekä läpikostumista (27 %) rankkasateen jälkeen. Kostutettujen lujuustestien tulokset on sisällytetty taulukkoon 1. Veden aikaansaaman rakennetta heikentävän vaikutuksen vastaisesti rakeistamalla valmistetuissa Hankipallot- ja Turve_III-erissä suurempi kosteus johti myös hieman suurempaan kestävyYTEEN. Tämä johtunee pallojen hieman vaihtelevasta koosta näytteiden kesken.

Taulukko 1. Pilot-erien lujuusmittausten tulokset

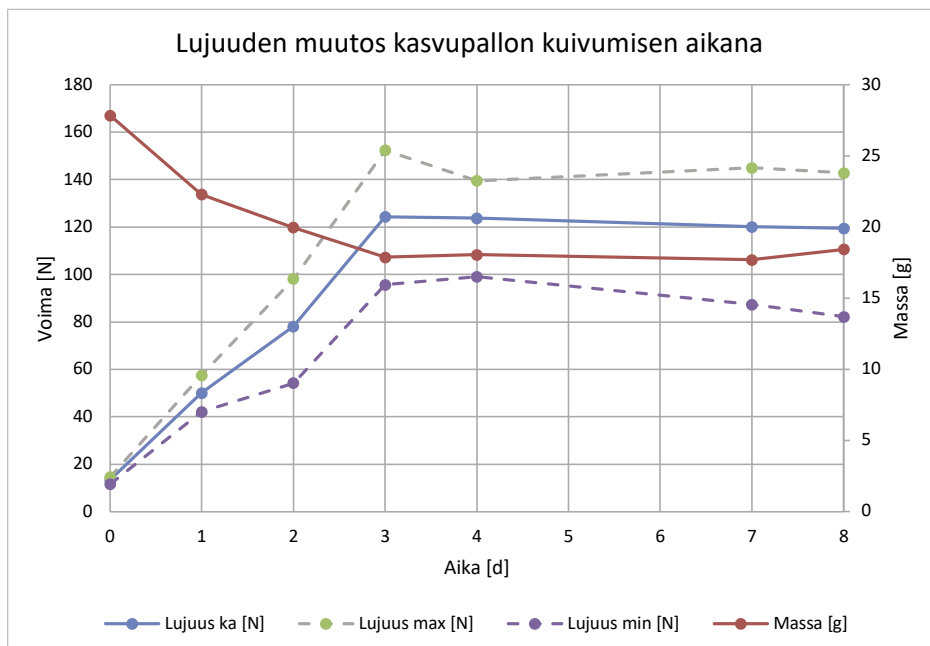
Suure	NPK-pallot	Hanki-pallot	Turve_I	Turve_II	Turve_III
Massa, ka [g]	16,6	11,1	6,6	7,3	9,3
Halkaisija, ka [mm]	35	31	27	30	31
Lujuus, ka [N]	98	14	15	10	9,2
Lujuus, min [N]	74	8,7	12	7,6	7,4
Lujuus, max [N]	147	18	17	14	12
Lujuus, H ₂ O 10 m-%, ka [N]	28	8,7	8,3	8,9	8,1
Lujuus, H ₂ O 27 m-%, ka [N]	12	9,7	6,9	7,9	8,6

Kasvupallojen käyttäytymistä levitystapahtumassa mallinnettiin pudotuskokeilla. Nwan-kwo (2018) on aiemmin määrittänyt, että kasvupallojen tulisi kestää pudotus kahden metrin korkeudelta. Hankkeessa pudotuskorkeutena kuitenkin käytettiin viiden metrin korkeutta, jonka ajateltiin olevan realistinen pudotuskorkeus mahdollisessa drooniavusteisessa levityksessä. Koetta varten leveän astian pohja täytettiin noin 3 cm:n sorakerroksella. Astia aseteltiin laboratoriossa paikkaan, josta pystyttiin pudottamaan pallot soralle viiden metrin korkeudelta yksi kerrallaan. Testissä havainnoitiin visuaalisesti, hajosiko pallo vai säilyikö ehjänä. Jos pallo hajosi, tarkasteltiin, kuinka sen sirpaleet levisivät lähiympäristöön (kuva 3). Pallojen hajoaminen levityksessä voi olla kasvista riippuen hyvä asia, sillä pallon hajoaminen voi helpottaa männynsiementen itämistä. Toisaalta jos pallo hajoaa, sen sirpaleiden ei pitäisi levitä kovin etäälle toisistaan, jolloin niiden sisältämät kasvua parantavat ainekset eivät ole hyödyksi pelloista itäville kasveille.



Kuva 3. Pudotuskokeessa kasvupallo saattoi hajota useaan fragmenttiin (kuva H. Kettunen 2022)

Muutamista käsin valmistetuista eristä tehtiin hankkeen alkuvaiheessa lujuusseuranta niiden kuivumisen ajan, jotta nähtiin, milloin voidaan olettaa pallojen olevan valmiita pakattavaksi valmistuksen jälkeen. Kasvupalloja kuivattiin puutarjottimilla laboratorioissa huoneilmassa. Kuvassa 4 on esitetty yhden erän kasvupallojen päivittäinen lujuusseuranta kahdeksan päivän ajalta ja kasvupallojen massan muutos tänä aikana (ei mittauksia viikonloppuna, päivät 5 ja 6). Seuranta varten suoritettiin valmistuspäivästä alkaen joka päivä kymmenelle kuivuvalle kasvupalloille lujuusmittaukset. Tulosten perusteella käsin valmistetut kasvupallo olivat saavuttaneet melko stabiilin tilan kolmen vuorokauden kuivumisen jälkeen.



Kuva 4. Käsin valmistetun kasvupalloerän lujuusseuranta kuivumisen ajalta

Lujuusmittausten lisäksi hankkeessa arvioitiin kasvupallojen hajoamisherkkyyttä sateella suorittamalla kastelukokeita. Kolmea rinnakkaista kasvupalloäytettä kasteltiin aina 5 ml kerrallaan 100 ml:aan asti ja havainnoitiin pallon hajoamisen edistymistä valokuvaamalla ne 25 ml:n välein (kuva 5) sekä kirjallisin muistiinpanoin. Kastelu suoritettiin automaattipipetillä käsivarassa pipetin kärkeä pallon yläpuolella liikutellen, jotta kastelu olisi tasaista pitkin pallon pintaa. Kastelukokeet olivat useiden erien osalta selvästi linjassa lujuustesteistä saatuihin tuloksiin, eli murtolujuudeltaan heikommät pallot hajosivat myös kastellessa helpommin. Menetelmä kaipaisi kuitenkin vielä tarkempaa standardointia. Kastelu kannattaisi suorittaa jollain kiinteällä laitteella, jossa olisi suihkupää ja joka pystyisi jakamaan vesimäärän tarkasti koko pallon pinta-alalle tasaisella paineella ja vakioidulta etäisyydeltä.



Kuva 5. Kasvupalloerän kastelukoesarja 0–100 ml (kuvat H. Kettunen 2022)

ETENKIN RAKEISTAEN VALMISTETUISSA PALLOISSA SIEMENTEN LUKUMÄÄRÄ VOI VAIHDELLA

Hankkeen alkuvaiheessa siemenet aseteltiin kasvupalloihin käsin, jotta varmistuttaisiin siitä, että niitä varmasti myös palloissa olisi. Hankkeen edetessä haluttiin kuitenkin miettiä pallojen valmistamista teollisesta näkökulmasta. Tällöin tarkan siemenmäärän asettelu käsin kuhunkin kasvupalloon tuskin tulisi kyseeseen, vaan siementen lisäys olisi helpompaa toteuttaa lisäämällä ne muiden raaka-aineiden joukossa kasvupalloihin. Tästä seurasi uusi epävarmuustekijä, sillä varmaa tietoa yksittäisen pallon sisältämistä siemenistä ei enää ollut. Tämän seurauksena siemenet sekoitettiin kasvupallomassan joukkoon valmistusvaiheessa, ja pallojen kuivuttua niistä valittiin kymmenen näytettä. Ne rikottiin, niistä kaivettiin niiden sisältämät siemenet esiin ja määritettiin keskimääräinen siementen lukumäärä palloissa.

Koska hankkeen jokainen kasvupalloerä testattiin lujuuden osalta, oli luonnollista suorittaa siementen laskenta jo valmiiksi rikotuista palloista. Siementen laskentaan käytettiin siis aina eräkohtaisesti kymmentä lujuustestissä murrettua palloa, jotka jauhettiin varovasti huumareessa. Jauhettua kasvupalloainesta seulottiin siivilillä, johon männynsiemenet jäivät muun suurempijakeisen aineksen kanssa, josta siemenet etsittiin ja siirrettiin syrjään lopullista laskentaa varten. Esimerkkejä eräkohtaisista löydöistä on lueteltu taulukossa 2. Kaikkiin pilot-kasvupalloeriin lisättiin laskennallisesti punniten viisi männynsiementä palloa kohden. Tämä tavoite usein toteutuikin sekä käsin valmistetuissa erissä että rakeistetuissa palloissa. Turpeen käyttö rakeistuksessa raaka-aineena kuitenkin vaikeutti männyn tarttumista osaksi turvetta sisältävää palloa. Tämä voi myös näkyä turvepalloista saatavissa itävyystuloksissa.

Taulukko 2. Kasvupalloista kaivetut männynsiemenet ja siementen itävyys, jos testattu

Erä	Männyt kpl/pallo, ka	Siementen itävyys valmistuksen jälkeen
NPK-pallot	5,0	0 % (9 kk valmistuksesta)
Hankipallot	5,6	95 %
Turve_I	1,5	ei testattu
Turve_II	2,3	ei testattu
Turve_III	2,3	ei testattu

Lisäksi joistain kasvupalloeristä kaivettuja siemeniä idätettiin tiiviisti suljetussa ja kostuteussuussissa, jolloin nähtiin, olivatko ne selviytyneet valmistuksesta. Tämäkin oli oleellinen tieto etenkin rakeistusprosessia käyttöön otettaessa, sillä jos valmistusprosessi vaurioittaisi siemeniä estäen niiden itämisen, ei kasvupalloista saataisi haluttua hyötyä luontoon levitettyinä. Siementen idätyskokeessa siemenet aseteltiin talouspaperiarkin päälle salpapussiin.

Paperi kasteltiin kevyesti, pussi suljettiin ja jätettiin huoneenlämpöön valoisaan paikkaan. Siementen itävyys pussissa tarkistettiin viikoittain. Männynsiementen lopullinen itävyys laskettiin 21 vuorokauden kuluttua kokeen aloituksesta (kuva 6).



Kuva 6. Männynsiementen idätyskoe minigrip-pussissa, kuvassa hankipalloista kaivettuja siemeniä (kuva H. Kettunen 2022)

Hankkeessa käytettiin jalostettuja männynsiemeniä, joiden itävyydeksi tuottaja Tapio Oy oli analysoinut 98 %. Hankittujen siementen itävyys varmistettiin hankkeessa muutamaan kertaan edellä mainitulla idätyskokeella, jossa tulokseksi saatiin eri kerroilla 95–100 %. Taulukon 2 mukaisesti NPK-pallojen sisältämien siementen itävyys testattiin vasta 9 kuukautta valmistuksen jälkeen, jolloin havaittiin, että siemenet eivät enää idä. Tämä on voinut johtua liiasta kosteudesta valmistusprosessissa tai liian väkevän ravinneliuoksen käytöstä. Hankipallojen männynsiementen valmistuksenjälkeinen itävyys oli pysynyt ennallaan. Turvepallojen siementen valmistuksenjälkeistä itävyyttä ei varmistettu, koska valmistusmenetelmä oli muuten sama kuin hankipalloissa.

KASVUPALLOJEN FYSIKAALIS-KEMIAALLISET OMINAISUUDET KERTOVAT PALLOJEN SOVELTUVUUDESTA KASVUALUSTAKSI

Kasvupalloista analysoitiin Xamkin ympäristölaboratoriossa pH, sähkönjohtokyky, kosteus-pitoisuus, orgaanisen aineen pitoisuus sekä tuhkapitoisuus. Analyysit suoritettiin standardien SFS-EN 13037, SFS-EN 13038 ja SFS-EN 13039 mukaisesti. Pilot-kokeissa käytettyjen kasvupalloerien edellä mainittujen analyysien tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Pilot-kasvupallojen fysikaalis-kemiallisten määritysten tulokset

Erä	pH	Sähkönjohtokyky [mS/m]	Kosteus [%]	Orgaanisen aineksen pitoisuus [%]	Tuhka-pitoisuus [%]
NPK-pallot	7,3	571,3	2,3	29	71
Hankipallot	7,7	240,3	3,7	45	55
Turve_I	6,5	228,9	5,8	47	53
Turve_II	5,8	160,5	6,0	57	43
Turve_III	6,5	210,7	6,1	53	47

Nygren (2003) on tutkinut pH:n vaikutusta männynsiementen itävyyteen ja itämisko-
peuteen. Männyn on havaittu itävän nopeimmin kasvualustan pH:n ollessa 4. Samoin
varsinainen itämisprosentti on tällä pH-arvolla korkeimmillaan, mutta kovin suurta vaih-
telua itävyydellä ei ole kuitenkaan havaittu pH-alueella 3,5–7,5. Hankkeen kasvupallojen
pH-arvoon on vaikuttanut etenkin suurena määränä resepteissä käytetty biohiili, joka oli
selvästi emäksistä (pH > 8). Kuitenkin jokaisessa pilot-erässä pH asettuu Nygrenin (2003)
tutkimukseen verrattuna männyn itämisen kannalta hyväksyttävälle tasolle. Lisäksi pH-ar-
voja vertaillaan tulee muistaa, että lopullinen kasvualusta muodostuu kasvupallon lisäksi
levityismaastosta, eli myös maastolla on oma vaikutuksensa kasvin kokemaan pH:hon.
Myös sadevesi voi hetkellisesti muuttaa pH:ta sadetapahtuman jälkeen. Sähkönjohtokyvystä
ilmenee etenkin kasvupallojen liuenneiden ravinteiden määrä, joka oli NPK-palloissa sel-
keästi korkeampi kuin muissa erissä, joissa käytettiin vain kompostia lannoitteena. Turvetta
sisältäneet kasvupallot olivat viikon kuivauksen jälkeen olleet hieman muita eriä kosteampia,
vaikka ulkoapäin niistä ei tätä olisi huomannut. Turpeen lisäyksen myötä myös orgaanisen
aineksen määrää saatiin palloissa kasvatettua.

Edellä mainittujen analyysien lisäksi kasvupalloista määritettiin niiden ravinnesisältö las-
kurin avulla. Tämä tehtiin analysoimalla ensin kasvupalloissa käytettyjen raaka-aineiden
sisältämät ravinnepitoisuudet ja raskasmetallit. Analysoinnista vastasi Eurofins Viljavuus-
palvelut Oy. NPK-lannoitteesta ei analysoitu raskasmetalleja, koska se on kaupalliseksi

lannoitevalmisteeksi hyväksytty tuote. Sen sisältämät ravinnepitoisuudet selvitetiin tuotteen pakkausselosteesta. Näiden tietojen avulla luotiin taulukkolaskentaohjelmalla laskuri. Syötämällä siihen kunkin kasvupalloerän tiedot pystyttiin laskemaan eri raaka-aineista peräisin olevat ravinnemäärät, ja lopulta valmistuserän tietojen perusteella saatiin laskettua kasvupalloseoksen tai yhden pallon ravinnesisältö. Pilot-kokeissa käytettyjen kasvupalloerien laskennalliset ravinnepitoisuudet on esitetty taulukossa 4. Laskettuja ravinnemääriä verrattiin NPK-pallojen osalta Metsänhoidon suositusten (MHS) mukaisiin männyn neulasanalyyysien optimaalisiin pääravinteiden kokonaisravinnepitoisuuksiin. Rakeistettujen erien osalta verrattiin liukoisia ravinnemääriä havupuille soveltuvan kaupallisen kasvualustatuotteen sisältämiin liukoisten pääravinteiden pitoisuuksiin. Tavoitteisiin yltäneet pitoisuudet on värjätty taulukkoon vihreällä ja tavoitteesta vajaaksi jääneet punaisella. NPK-pallot tavoittivat halutut pitoisuudet, koska ne oli tämän pohjalta suunniteltu. Rakeistetuissa erissä kuitenkin liukoisen fosforin osuus jäi tavoitetta selvästi alemmas, sillä pallojen raaka-aineista vain komposti sisälsi liukoista fosforia, ja sen pitoisuus kompostissa oli hyvin pieni. Liukoisen typen ja kaliumin osalta rakeistetut erät kuitenkin saavuttivat tavoitteet.

Taulukko 4. Kasvupallomassojen ravinnesisältö raaka-aineanalyyysien perusteella laskettuna (analyysit Viljavuuspalvelu Oy 2021)

Ravinne	NPK-pallot	Tavoite: MHS	Hanki-pallot	Turve_I	Turve_II	Turve_III	Tavoite: kasvualusta
Pääravinteet [g/kg, kuiva-aine]							
N, kok	15,2	15	6,6	8,6	7,5	8,2	-
N, liuk	4,9	-	0,7	0,7	0,5	0,7	0,50
P, kok	3,1	1,7	2,0	2,0	1,3	2,0	-
P, liuk	3,1	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,25
K, kok	12,2	5	5,0	5,1	3,8	3,8	-
K, liuk	9,9	-	1,8	1,9	1,4	1,9	1,00
Hivenaineet, kok [mg/kg, kuiva-aine]							
B	42	10	11	16	15	8	-
Cu	21	-	23	23	18	22	-
Fe	4777	-	9737	12449	8533	6987	-
Mg	1925	-	2126	2870	2102	1385	-
Mn	112	-	111	148	94	85	-
Na	65	-	1242	1279	870	1235	-
S	1349	-	1284	1570	1284	1000	-
Zn	50	-	81	77	58	70	-

Mahdollisten kasvua estävien haitta-aineiden osalta kasvupalloista arvioitiin niiden raskasmetallisaltö samalla laskurilla raaka-aineiden analyysien perusteella (taulukko 5). Raskasmetallipitoisuudet kasvupalloissa eivät ylittäneet maa- ja metsätalousministeriön asetuksessa lannoitevalmisteille määritettyjen haitallisten aineiden enimmäispitoisuuksia (MMM asetus 2011/24, taulukko 5).

Taulukko 5. Kasvupallojen raskasmetallipitoisuudet (Viljavuuspalvelu Oy 2021) sekä haitallisten metallien enimmäispitoisuudet lannoitteissa (MMM asetus 2011/24)

Raskasmetalli, kok. [mg/kg, ka]	NPK-pallot	Hankipallot	Turve_I	Turve_II	Turve_III	Haitalliset aineet lannoitteissa, enimmäispitoisuus [mg/kg, ka]
As	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25
Cd	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	1,5
Cr	18	21	17	14	17	300
Cu	21	23	23	18	22	600
Hg	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1
Ni	11	11	10	8,5	7,9	100
Pb	2,8	3,7	4,1	2,7	3,2	100
Zn	50	81	77	58	70	1500

KASVATUSKOKEILLA SELVITETTIIN MÄNNYNSIEMENTEN KYKYÄ ITÄÄ KASVUPALLOISTA

Tärkeimmäksi kasvupallojen testausmenetelmäksi nähtiin lopulta niiden itävyyden selvittäminen. Kasvupallon tehtävänä on tuoda levityskohteelleen uutta kasvua. Tämä vaatii, että palloon ympätyt siemenet kykenevät itämään pallosta. Itämistä potentiaalisesti rajoittavia tekijöitä ovat mm. raaka-aineseoksen liika tiiveys tai väärä happamuustaso. Myös liian suuri suolapitoisuus kasvualustassa voi kasvun edetessä olla haitaksi estäen kasvin ravinteidenoton (Rikala 2012). Hankkeessa käytetyn männynsiemenen kannalta etenkin käsin valmistettujen pallojen liiallinen tiiveys osoittautui ongelmaksi, sillä itävällä männynsiemenellä ei ole voimaa työntyä tiiviin materiaalmäärän läpi. Nygrenin (2003) mukaan männynsiemen voidaan kevyesti peittää kylvää 2–3 mm:n syvyydelle, mutta siementen itävyys heikkenee selvästi, mitä syvemmälle kylvö tehdään. Hankkeessa testattiin kasvupallojen itävyyttä kasvatuskokeilla laboratorioissa vakioituissa olosuhteissa.



Kuva 7. Kasvupalloja esikasteltuna ja valmiina kasvatuskaappiin (kuva H. Kettunen 2021)

Kasvatuskokeissa simuloitiin haastavan maaston metsitystä käyttämällä kasvualustana karkeaa soraa. Soraa punnittiin noin 350 g muovisille kasvatusruukuille, joiden rei'itetty pohja peitettiin harsolla. Kasvatusruukut aseteltiin foliovuolalle, kokeesta riippuen viisi tai kuusi ruukkua / vuoka (kuva 7). Jotta kasvatuskokeen alkutilanne vastaisi maastolevitystä, kasvupallot valmisteltiin pudottamalla ne viidestä metristä, millä simuloitiin niiden levitystä droonilla. Yksi pallo tai sen hajonneet kappaleet aseteltiin kasvatusruukulle ja kasteltiin erästä riippuen 50–75 ml:n vesimäärällä. Foliot ja näytteet päällystettiin kirkkaalla muovikelmulla alkukosteuden ylläpitämiseksi, kunnes erästä havaittiin itämisiä eli noin viikon ajan. Yksi kasvatuserä sisälsi kokeesta riippuen 10–12 näytettä. Kasvatuskokeissa käytettiin ympäristölaboratorion olosuhdekaappeja, joilla säädettiin olosuhteet erilaisiksi päivällä ja yöllä. Vakioituilla olosuhteilla pyrittiin simuloimaan kasvukauden olosuhteita. Olosuhteet:

- T = 22 °C / RH = 80 % / valot päällä (klo 8–22)
- T = 16 °C / RH = 60 % / ei valoja (klo 22–8)

Kokeissa vallinneita olosuhteita myös monitoroitiin erillisillä lämpötila- ja kosteusloggereilla, jotta havaittiin mahdolliset poikkeamat halutuista olosuhteista. Kaikissa kokeissa kosteudenhallinta ei ollut käytössä, koska se ei ollut toisessa olosuhdekaapissa säädettävissä. Näytteiden itävyys tarkistettiin joka toinen päivä, ja samalla arvioitiin tarvittava kastelumäärä (0–40 ml / näyte) sopivan kosteuden ylläpitämiseksi näytteissä. Kokeet kestivät 21–42 vuorokautta.

Kasvatuskokeita teetettiin keväällä 2021 käsin valmistetuilla sekä kevättalvella 2022 raikistetuilla palloerillä. Näiden pohjalta pilot-kokeisiin päätyneiden erien itämistulokset on esitetty taulukossa 6. Käsin valmistettuja palloja ei kasvatuskokeissa testattu NPK-lisäyksellä, mutta taulukossa oleva resepti oli muuten lähes sama. Turve_I-erä kuului kasvatuskokeisiin osana hankkeessa tehtyä opinnäytetyötä. Muille turvepalloille ei ehditty enää tehdä kasvatuskokeita, sillä ne kehitettiin I-erän pohjalta loppukevästä 2022 juuri ennen aiottua levitysjankoahtaa.

Taulukko 6. Pilot-eriä edeltäneiden kasvupalloerien kasvatuskokeiden tulokset

Erä	Palloja kpl	Itäneet männyt kpl	Itäneet italianraiheinät kpl
Käsin valmistetut	10	5	21
Hankipallot	12	27	23
Turve_I	12	16	21

Eräissä kokeissa osa itäneistä männyistä (kuva 8) kuihtui kokeen aikana johtuen mm. kasvualustan kuivumisesta olosuhdekaapin tuuletuksen voimasta, mutta se on jätetty huomioida tuloksissa, eli tulokset ovat kumulatiiviset. Itävyytulosten tarkastelussa tulee myös huomioida palloihin käytettyjen siementen määrä. Hankkeessa männynsiemeniä käytettiin 5 kpl / pallo ja italianraiheinän siemeniä 3 kpl / pallo. Jos havaitaan, että käytetyllä siemenmäärällä saadaan jokaisesta pallosta useita itämishavaintoja, voidaan jatkokehitysmielessä reseptissä käytettyjen siementen määrää mahdollisesti vähentää. Näin syntyy kustannussäästöjä. Tällöin palloista itävillä kasveilla on myös vähemmän kilpailijoita keskenään.



Kuva 8. Kasvatuskokeissa kasvupalloista itäneitä männyjä ja italianraiheiä kasvatusruukuilla (kuva H. Kettunen 2022)

Lisäksi kasvatuskokeiden päätteeksi kunkin näytteen itäneet kasvit kaivettiin ruukuista varovasti esiin juurten tarkastelua varten. Ongelmallista niiden vertailussa kuitenkin oli käytettyjen ruukkujen koko, sillä ne olivat vain noin 8 cm syvät. Italianraiheinän tehtävä

osana palloa oli helpottaa pallon rikkoutumista luonnossa ja juurruttaa se nopeasti levityspaikalle. Niiden juuret kasvoivat ruukun pohjaan, jotkut jopa pohjakankaan läpi (kuva 9). Tällöin juuria oli pakko katkoa, joten niiden pituuksien vertailu oli hankalaa. Ne pyrittiin valokuvaamaan toisistaan eroteltuina.



Kuva 9. Italianraiheinät kasvattivat koko ruukun vallanneet juuret kasvatuskokeissa (kuva H. Kettunen 2021)

Eroja männyn juurten (kuva 10) välillä ei selvästi nähty kuukauden kestäneissä kasvatuskokeissa. Erot juurten pituuksissa voivat myös olla riippuvaisia kunkin kasvin itämisajankohdasta; jotkut niistä alkoivat itää alle viikossa, jotkut vasta kuukauden päästä. Tästä johtuen laboratoriossa tapahtuvat kasvatuskokeet eivät pysty kertomaan koko totuutta kasvupallojen kasvua parantavista ominaisuuksista, vaan kasvua olisi hyvä testata myös kenttäolosuhteissa, jolloin juurilla on tilaa kasvaa vapaammin.



Kuva 10. Männyt ehtivät kasvatuskokeissa kasvaa noin 10 cm:n mittaisiksi (kuva H. Kettunen 2022)

EHDOTUKSIA KASVUPALLOJEN LAATUKRITEEREIKSI JATKOSSA

Artikkelissa mainitut testimenetelmät sisältänevät tärkeimmät kriteerit, joita kasvupalloja valmistavien toimijoiden tulisi teettää lopputuotteilleen. Testien standardointi olisi kuitenkin tärkeää, jotta vastaavien tuotteiden vertailu toisiinsa olisi mielekästä. Esimerkiksi hankkeessa kokeiltu kastelutesti kertoo paljon kasvupallon käyttäytymisestä luonnossa, mutta menetelmää tulisi kehittää toimimaan samoin erikokoisilla lopputuotteilla. Menetelmän visuaalinen tulos on lähinnä suuntaa antava, eikä sen avulla pysty numeerisesti vertaamaan eri tuotteita keskenään.

Kasvupallojen kaupallisessa valmistuksessa tulee ottaa huomioon, että valmistettu tuote täyttää Suomessa lain vaatimukset (MMM asetus 2011/24). Lainsäädännön lisäksi kasvupallotuotteista olisi hyvä ilmoittaa muitakin ominaisuuksia, jotta erilaisten tuotteiden vertailu olisi kuluttajille mielekästä. Kasvupallojen tuotetietojen tulisi sisältää lainsäädännön ja hankkeessa kerätyn kokemuksen perusteella ainakin seuraavat spesifikaatiot:

- pallojen sisältämät raaka-aineet
- pallojen keskimääräinen halkaisija (mm) ja massa (g)
- pallojen keskimääräinen murtolujuus (N)
- pallojen sisältämien siementen lukumäärä (jos useiden kasvien siemeniä, kukin erikseen) ja siementen itävyys-%
- pallojen kosteus-%, pH, johtokyky, orgaanisen aineksen määrä ja ravinnesisältö
- palloihin lisätyt mikrovalmisteet (esim. mykorrhitsat) ja karkotteet
- MMM asetuksen (2011/24) liitteen IV mukaan tieto valmisteen haitallisista aineista (raskasmetalleista), jotka eivät saa ylittää asetettuja pitoisuuksia
- Lisäksi MMM asetuksen (2011/24) liitteen IV mukaisesti tulee tutkia, etteivät tuotteet sisällä taudinaiheuttajia, muita mikro-organismeja tai epäpuhtauksia yli asetettujen enimmäismäärien.

Lisäksi tarvittaisiin eräiden kriteerien osalta hyväksyttävät raja-arvot, jotka voivat riippua sekä käytetyistä kasveista että pallon koosta. Etenkin kasvupallomassan pH tulisi optimoida kasvikohtaisesti. Kasvupallojen halkaisija voi olla tärkeä kriteeri tietyille levityslaitteille, jotka voivat tukkeutua, jos pallojen koossa on liikaa vaihtelua erän sisällä. Kasvupallojen koon optimointi eri kasveille on oleellista ja riippuu kasvupallon osana käytetyistä raaka-aineista sekä niiden hajoamistavasta luonnossa. Jos kasvupallo olisi sisällöltään pelkkää hienoa hiekkaa, se leviäisi erittäin herkästi, kun taas savipitoinen aines pysyisi tiiviimmin muodossa. Heikompi kasvuosille siemenille voi olla tärkeää, että kasvupallo niiden ympärillä on tarpeeksi pieni, jotta ne pystyvät itämään massan läpi; toisaalta pienessä kasvupallossa ei ole paljoa tilaa ravinteille tai muille nuoren taimen kasvua edistäville aineille. Joidenkin kasvien kohdalla voi siis olla välttämätöntä tehdä kompromisseja kasvupallon koon ja sisällön osalta. Oletettavasti pienempikokoiset kasvupallot joka tapauksessa itävät nopeammin, sillä niitä ympäröivä aines hajoaa nopeammin pois siemenen edestä riippuen käytetyistä raaka-aineista. Joidenkin kasvien kohdalla voi myös tapahtua jälki-itämistä, jolloin siemen alkaa itää vasta vuosien kuluttua levityksestä.

Oleellista kasvupallojen toiminnan kannalta on tietysti, että niiden sisältämät kasvit pystyvät itämään, eli itävyyden varmistaminen on testeistä tärkein. Tähänkin olisi tulevaisuudessa hyvä saada standardoitu menetelmä: tuleeko kasvupallo rikkoo ja kaivaa siemenet erilliseen itävyydestiin vai idätetäänkö kasvupallo itse tietyissä olosuhteissa ja tietyllä vesimäärällä kastellen?

Esimerkiksi hankkeessa testattiin 20 mm:n kokoisia kasvupalloja, jotka on Afrikassa suunniteltu aavikoituneen Sahelin olosuhteisiin. Nämä kasvupallot koostuvat lähinnä hiekasta ja savesta ja sisältävät helmihirssin siemeniä. Resepti on Nwankwon (2018). Tosin hankkeessa käytettiin männynsiemeniä, ja olosuhteet olivat olosuhdekaapissa erilaiset kuin Sahelissa. Kyseiset pallot olivat aivan liian kovia, jotta mänty olisi niistä pystynyt itämään, eivätkä pallot kastellessa hajonneet juuri lainkaan. Nwankwon (2018) kokeissa sen sijaan kyseisellä reseptillä saavutettiin helmihirssillä 95 %:n itävyys. Joko kyseiset pallot olisivat vaatineet pitkää rankkasadejaksoa hajotakseen tarpeeksi tai helmihirssin siemenet ovat kyvykkäämpiä itämään kovemman materiaalin läpi kuin männynsiemenet.

Lisäksi kasvupallojen valmistuksenjälkeistä itävyyttä olisi mielenkiintoista tutkia vielä tarkemmin aikasarjalla. Tämä vaatisi suuren erän valmistettuja kasvupalloja, joista esimerkiksi kuukauden välein kaivettaisiin siemenet esiin ja niitä idätettäisiin vakioitu aika vakio-olosuhteissa. Näin saataisiin selville paitsi prosessin vaikutus siementen itävyyteen myös kasvupallojen parasta ennen -käyttöikä, kun löydettäisiin aika, joka on kulunut valmistuksesta siihen hetkeen, jolloin kaivetut siemenet eivät enää idä.

LÄHTEET

Daum, S. & Niggli, C. 2010. Seedballs – Kunst der Ummantelung von Saatgut. Journal for Terroir Wine and Biodiversity, 2010, ISSN 1663-0521. Www-artikkeli. Saatavissa: <https://www.ithaka-journal.net/seedballs-kunst-der-ummantelung-von-saatgut> [viitattu 18.11.2022]

Infused Seedballs Ltd. s.a. General 2 – Infused SeedBall. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.infusedseedball.com/infused-seedball> [viitattu 21.11.2022]

Maa- ja metsätalousministeriön asetus lannoitevalmisteista 13.9.2011/24.

Nwankwo, C. 2018. Seedball technology development for subsistence-oriented pearl millet production systems in Sahelian West Africa. University of Hohenheim. Institute of Soil Science and Land Evaluation. Väitöskirja. Saatavissa: http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2019/1597/pdf/Dissertation_final_Nwankwo.pdf [viitattu 21.11.2022]

Nygren, M. 2003. Metsäpuiden siemenopas. Metsäntutkimuslaitos. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 882. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/521516> [viitattu 21.11.2022]

Pedrini, S., Bhalsing, K., Cross, A. T. & Dixon, K. W. 2018. Protocol Development Tool (PDT) for seed encrusting and pelleting. *Seed Science and Technology*, 46, 2, 393–405. PDF-julkaisu. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/326537711_Protocol_Development_Tool_PDT_for_seed_encrusting_and_pelleting [viitattu 18.11.2022]

Rikala, R. 2012. Metsäpuiden paakkutaimien kasvatuserä. Metsäntutkimuslaitos. Metsäntutkimuslaitoksen erillisjulkaisut. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:IS-BN:978-951-40-2359-0> [viitattu 24.11.2022]

Seedballs Kenya 2016. Seedballs. Www-sivusto. Saatavissa: <https://www.seedballskenya.com/seedballs> [viitattu 18.11.2022]

KASVUPALLOJEN LEVITYS DROONEILLA

Henri Kettunen & Niina Laurila

Kasvupallon orgaaniset aineisosat pidättävät vettä ja tarjoavat itäville kasveille ravinteita ja apua kasvuun. Näillä tekijöillä kasvupallot voivat kilpailla pottitaimien istuttamisen tai metsäpuiden siementen suorakylvön kanssa. Perinteinen metsänistutus vaatii usein raskaalla kalustolla tehtävää maanmuokkausta, kuten äestystä ja laikuttamista, jotta maastoon syntyy hyviä istutuskohtia (Metsänhoidon suositukset 2022). Vasta tämän jälkeen päästään alueelle joko istuttamaan pottitaimia tai kylvämään siemeniä. Edellä mainitut keinot vaativat erillisiä työvaiheita puiden istuttamiseen, puhumattakaan pottitaimien kasvatukseen vaadittavista tiloista ja niistä aiheutuvista kustannuksista. Vähäkasvisten alueiden metsittäminen voisi tulevaisuudessa tapahtua nopeammin ja kustannustehokkaammin siten, että alueille levitetään miehittämättömien ilma-alusten eli droonien avulla kasvupalloja, jotka sisältävät ikään kuin oman pienen kasvualustansa. Kasvupallojen levitystapaa voidaankin pitää pallojen käyttämisen tärkeänä etuna. Drooneilla tavoitettaisiin myös hankalat maastot.

KASVUPALLOJA VOIDAAN LEVITTÄÄ MONIN ERI TAVOIN

Kasvupallojen levitystavat voidaan periaatteessa jaotella kahteen pääkategoriaan: käsin tehtävään sekä koneavusteiseen levitykseen. Käsinlevitys tapahtuu ilman ulkoisia apuvälineitä, esimerkiksi pudottamalla kasvupallot haluttuihin paikkoihin tai heittämällä niitä vaikka kourallisen kerralla laajemmalle alueelle. Koneellisesti levitys voidaan suorittaa esimerkiksi drooneilla tai traktorin tai mönkijän perään kytketyllä levitinkiekolla. Palloja voidaan levittää vaihtoehtoisesti myös ritsan tai helikopterin avulla, jolla voidaan levittää palloja suuriakin määriä isolle pinta-alalle, joskin niiden levittäytymistä ei täysin voida hallita. Helikopterista tehtävä levitys voi olla kustannuksiltaan hyvin kallista (kalusto, pilotti). Drooniteknologian kehittymisen myötä lähitulevaisuudessa voi levitys drooneilla olla kustannustehokkaampi vaihtoehto pitkällä aikavälillä.

LAINSÄÄDÄNTÖ VOI RAJOITTA DROONIEN KÄYTTÖÄ TIETYILLÄ ALUEILLA

Drooniteknologian hyödyntämisessä on huomioitava lainsäädäntö. Droneinfon (2022b) mukaan Suomessa voi tällä hetkellä lennättää ilman erillistä toimilupaa alle 25 kilogrammaa painavaa lennokkia korkeintaan 120 metrin korkeudella maanpinnasta siten, että

näköyhteys lennokkiin säilyy jatkuvasti. Jos jompikumpi edellä mainituista ylittyy tai lennokkiin ei ole näköyhteyttä tai lentäminen tapahtuu lähellä ihmisiä, tarvitaan lentämiseen Traficomien myöntämä toimilupa. Suomessa on tärkeää ottaa huomioon myös kotirauhan kunnioittaminen ja salakatselusäännösten noudattaminen, jos lennetään lähellä ihmisten koteja. Droneinfon (2022a) mukaan rikoslaisissa salakatselulla on hyvin tiukat rajat. Vaikka droonin lennätystä peräisin olevia kuvia tai videoita ei tallennettaisi, on rikos tapahtunut, jos kuvaamisen kohteelta ei ole pyydetty lupaa etukäteen. Samoin maanpuolustukseen liittyvien kohteiden kuvaaminen ja niiden lähistöllä lentäminen on kiellettyä ilman erillistä lupaa. Lisäksi kaikkien lennättäjien, joiden droonit painavat yli 250 grammaa tai sisältävät kameran, täytyy rekisteröityä dronetoimijarekisteriin ja suorittaa kirjallinen koe (Droneinfo 2022c). Tällaiset seikat tulee huomioda tulevaisuudessa etukäteen ja olla yhteydessä asianomaisiin tahoihin, mikäli droonivusteista kasvupallojen levitystä harkitaan suoritettavaksi maastossa, jonka lähellä on ihmisten asuinsijoja tai Puolustusvoimien alueita.

LEVITYSTAVAN VALINTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Kasvupallojen levitystapa voi vaikuttaa suuresti niiden sisältämien kasvien itämisen onnistumiseen. Merkitystä on sekä levitystavalla että -ajankohdalla. Levitystekniikka voi olla myös riippuvainen käytetyn kasvin siemenen vaatimuksista. Joidenkin kasvien siemenet eivät jaksaa itää, mikäli ne uppoavat liian syvälle maahan. Tällöin tulisi huomioida, että levitys ei saa tapahtua liian suurella voimalla kohti maanpintaa. Myös maaston maalajilla ja kosteudella on merkitystä. Levitystapaa valittaessa tulee kiinnittää huomiota kohdealueen pinta-alaan ja maaston laatuun, levitettävien kasvupallojen laatuun ja haluttuun määrään sekä logistisiin kustannuksiin. Droonien hyödyntämistä levityksessä puoltavat vaikeakulkuiset ja jyrkät maastot, talvella suoritettava pallojen levitys sekä myös kasvupallojen kokoluokka ja paino.

KOPTERIAVUSTEISEN KASVUPALLOLEVITYKSEN PILOTOINTI SUORITETTIIN KEVITSAN KAIVOSALUEEN SIVUKIVIKASALLA

BioGo-hankkeessa pilotoitiin elokuussa 2022 kasvupallojen droonivusteinen levitys yhteistyössä Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) sekä Luonnonvarakeskuksen (Luke) kanssa. Xamk tarjosi kokeeseen levityslaitteen, GTK puolestaan droonin ja Luke testialueen Biopetto2-hankkeen tutkimuskohteessa.

Kopterilevityskoetta varten hankittiin levityslaite UGS-2G (kuva 1) kanadalaiselta CFR-Innovations-yritykseltä. Laitteeseen kuuluu noin 8-litrainen hiilikuidusta ja muovista valmistettu säiliö, joka kiinnitetään akseliripusteisesti droonin pohjaan. Säiliön yläosassa sijaitsee levittimen sähkömoottori, joka säiliön läpi kulkevan alumiinisen akselin avulla pyörittää pohjassa sijaitsevaa kaksisuista levitinsuulaketta. Näitä levitinsuulakkeita sekä laitteen suppilo-osia tuli laitteen mukana erikokoisina. Sekä suulake että suppilo-osa vali-

taan levitettävän tuotteen koon mukaan. Suppilo-osan tarkoituksena on rajoittaa sisällön kulkeutumista levittimelle. Laitteeseen kuuluu myös levitinsuulakkeen pyörimistä säättävä PWM-säädin eli kaukosäätöinen ohjainlaite sekä akku.



Kuva 1. Kokeessa käytettiin UGS-2G-levityslaitetta (kuva N. Laurila 2022)

Pilotointi tehtiin GTK:n Walkera P1100 Pro -kopterilla, johon GTK suunnitteli ja valmisti levittimen kiinnitykseen tarvittavan sovitinkappaleen 3D-tulostimella erikoisvahvennetusta PLA-muovista. Droneinfossa kiinteän hyötykuorman sijaintipisteeksi on suositeltu kopterin massakeskipistettä. Tämä kuitenkin ei toteutunut levittimen kohdalla, vaan levitin sijoittui hieman sivuun keskipisteestä. Koelennoilla ei havaittu suosituksesta poikkeavan kiinnitys-sijainnin aiheuttavan mitään ongelmaa lentämiselle. (Geologian tutkimuskeskus 2022.)

Koska levitin asettui kopteriin asennettuna selvästi matalammalle kuin mihin sen jalat ylsivät, täytyi sen laskeutumisalustana käyttää pullokoreja (kuva 2). Pullokorien paikallaan pysymisen parantamiseksi niiden tukena käytettiin pieniä hiekkasäkkejä. Lisäksi pullo-

korien alla käytettiin raskaita laskeutumismattoja, joilla pyrittiin minimoimaan ilmaan nousevan pölyn määrää nousu- ja laskeutumistilanteissa. Kopterin laskeutumisen kannalta pullokorien mahdollisimman kapea sijoittelu havaittiin helpottavaksi tekijäksi. Kopterin lentäjältä vaadittiin silti taitoa ja tarkkaavaisuutta etenkin laskeutumisen aikana, koska kopterin pohjalle ei pystytty levitintä käytettäessä samanaikaisesti sijoittamaan kameraa, vaan laskeutuminen täytyi tehdä ulkoapäin tarkkaillen. Lisäksi tilanteessa oli hyvä olla avustaja, jolloin laskeutumista voitiin tarkkailla kahdesta eri suunnasta. Tilanteessa tuli muistaa 10 metrin turvaetäisyys droniin, eikä sen alle saanut missään tapauksessa mennä. Käytetyn kopterin akut kestivät puoliksi täytetyllä levityssäiliöllä noin 25–30 minuutin lentoajan ennen kuin niitä piti ladata uudestaan. (Geologian tutkimuskeskus 2022.)



Kuva 2. Levitinlaite dronin pohjaan kiinnitettynä (kuva H. Kettunen 2022)

Kasvupallojen levitystä testattiin Luonnonvarakeskuksen Biopeitto2-hankkeen koalueella Kevitsan kaivoksen sivukivikasalla elokuussa 2022. Biopeitto2-hanke kehittää ja testaa kohteessa tehokkaita peitto- ja maisemointiratkaisuja kaivannaisjärteille. Koalue koostui neljästä koelasta pinta-alaltaan 200 m² (kuva 3). Niihin levitettiin dronilla noin 1 000 palloa. Lisäksi levityslaitteen testauksessa käytettiin noin 200 m²:n aluetta.



Kuva 3. Sivukivikoealue Kevitsan kaivoksella (kuva T. Kurtakko 2022)

Ennen varsinaista pilotointia laitteiston toimintaa selvitettiin koelannoilla. Useimmat kokeet koskivat levittimen toimivuuden testausta. Tämän lisäksi selvitettiin pilotointiin sopiva levityskorkeus. Näitä kokeita varten osa palloista värjättiin (kuva 4).



Kuva 4. Levityskorkeuden vaikutusta pinta-alaan selvitettiin värjättyjen kasvupallojen avulla (kuva T. Kurtakko 2022)

Pilotoinnissa käytettiin noin 27 millimetrin kokoisia kasvupalloja. Koealueen luonteen takia kohteeseen valmistettiin räätälöidyt kasvupallot, joissa käytettiin puna-ailakin ja lampaannatan siemeniä. Pallot saatiin onnistuneesti levitettyä koealuille (kuva 5).



Kuva 5. Kasvupallojen levitys ensimmäisellä koealueella (kuva T. Kurtakko 2022)

LEVITINLAITTEeseen LÖYDETTIIN USEITA KEHITYSEHDOTUKSIA

UGS-2G-levittimessä sähkömoottorin tehoa säädettiin manuaalisesti, joten laitteiston testaaminen aloitettiin sopivan tehoalueen etsinnällä. Säädön vaikutus näkyi vasta koe-lennolla, joten oikean tehoarvon löytäminen vaati useita lento-ohjauksia ja laskeutumisia. Laitteiston mukana tulleella ohjauslaitteen kaukosäätimellä hallittiin vain levityslaitteen sähkömoottorin virtaa on–off-toiminnolla.

Suurin vääntö moottorille tarvittiin siinä tilanteessa, kun levitin kytkettiin päälle, sillä levittimen sisällä olleet kasvupallot hankautuivat sekä toisiaan että säiliön sisäpintoja vasten aiheuttaen kitkaa. Ohjauslaitteen tehon ollessa suuri levitin pyöri hyvin nopeasti ja lähetti kasvupallot suurella voimalla pitkän matkan päähän. Tällöin levitystilanne ei tuntunut olevan hyvin hallinnassa, ja säiliö tyhjäntyi liiankin nopeasti yhdelle alueelle. Optimaalisinta olisi, jos levitin saataisiin käynnistettyä suurella sähkömoottorin väännöllä ja tehoa voitaisiin alentaa pyörimisen alkaessa eli kun kasvupallojen aiheuttama kitkavoima voitetaan. Näin pyöriminen vähenisi tilanteeseen sopivammalle tasolle. Kokeilussa kyseinen ongelma ratkaistiin siten, että levittimen pyörimistä ohjattiin käynnistuspulssin avulla antamalla sille vuorotellen on- ja off-käskyjä kaukosäätimellä. Tällöin levitin saatiin pyörimään hetkellisesti

mutta siten, ettei se kiihtynyt täyteen vauhtiin. Kasvupallot saatiin sopivalla tehoasetuksella levitettyä viiden metrin korkeudelta halkaisijaltaan noin viiden metrin kokoiselle alueelle.

Kokeessa käytetyt kasvupallot olivat rakeistamalla valmistettuja ja halkaisijaltaan keskimäärin 27 mm. Tämä oli melko lähellä maksimikokoa, joka käytetystä levityssuulakkeesta mahtui kulkemaan. Kasvupallojen kuori oli biohiili-saviseoksesta valmistettu ja melko karhea pinnaltaan. Karheapintaiset kasvupallot edistivät levittimen jumiutumista, kun sen pyörimistä yritettiin käynnistää. Ongelmaan haettiin ratkaisua keinuttamalla droonia edestakaisin, mikä toisinaan auttoi asiaan ja kasvupallot saatiin liikkeelle. Tällainen ei kuitenkaan ollut normaalia lentämistä ja aiheutti ylimääräistä kuormitusta levityslaitteen kiinnityskohdille (Geologian tutkimuskeskus 2022). Kasvupallot myös toisinaan jauhaantuivat tomuksi hankautuessaan sekä levittimen sisäseinämiin että toisiaan vasten, jolloin levittimen suusta tuli ulos pelkkää pölyä. Droonin toiminnan kannalta hiilipöly saattaa olla riskitekijä, mikäli pölyä pääsee kulkeutumaan droonin moottoriin tai sähkölaitteisiin. Kasvupallojen jauhaantumisongelma olisi todennäköisesti ollut vältettävissä, mikäli kokeessa käytetyt pallot olisivat olleet halkaisijaltaan pienempiä sekä niiden kuoripinta olisi ollut sileämpi ja liukkaampi. Myös levityslaitteen syöttömekanismin muokkaaminen voisi edistää sen sopivuutta tämän kokeen materiaaleille.

Pallojen syöttämisessä levittimeen havaittiin myös haasteita. Pallot syötettiin levittimeen kannessa olevista kahdesta 57 mm:n kokoisesta syöttöaukosta. Säiliön pohjalle on matkaa noin 300 mm. Pudotessaan pohjalle osa ensimmäisistä palloista kärsi rakenteen rikkoutumisesta eli sirpaloitumisesta. Säiliön pohjalla sirpaleet aiheuttivat tukkeuman, jolloin ehjät pallot eivät päässeet kulkeutumaan levitinosaan. Säiliössä voisi olla esimerkiksi spiraalimainen ”liukumäki”, jolla kasvupallot saataisiin lisättyä säiliöön niitä hajottamatta. Toisaalta myös isomman pallomäärän syöttö kerralla voisi vähentää sirpaloitumista. Tämä kuitenkin vaatisi isomman syöttöaukon.

Moni lentämiseen ja levittämiseen liittyvä ongelma voidaan todennäköisesti välttää käyttämällä rakenteeltaan levitykseen sopivampaa droonia, jossa säiliö on sijoitettu droonin runkorakenteeseen kuten esimerkiksi DJI Agras T40 -droonissa on tehty. Ruiskulevitteisessä droonissa pitäisi kuitenkin ruisku korvata esimerkiksi ase- lipaan kaltaisella mekanismilla, jolla pallot voidaan levittää. Muuttamalla säiliön paikkaa vältytään myös droonin jalkojen pidennykseltä. Tietoa kasvupallon levityksestä on saatavilla esimerkiksi sivulla dronecoria.org. Sieltä löytyy tietoa ja ohjeita muun muassa levitykseen sopivan droonin valmistamisesta itse.

YHTEENVETO LEVITYSKOKEILUSTA JA DROONILEVITYSTEKNOLOGIAN TULEVAISUUS

Hankkeessa kokeiltu kopteriaivusteinen levitys onnistui noin 27 millimetrin kokoisilla kasvupalloilla sopivan levittimen tehonsäädön löytyttyä. Hankkeen kotisivuilla on julkaistu koontivideo suoritetuista kopteriaivusteisista levityksistä (www.xamk.fi/biogo). Kasvupallot levitettiin Luken perustamille testialustoille Kevitsan kaivosalueen sivukivikasalla. Luke tarkkailee tulevana vuosina kasvupallojen sisältämien kasvien itämistä kohteella. Suurin osa kasvupalloista vaikutti selviävän ehjänä viiden metrin korkeudelta tapahtuneesta levityksestä, mutta etenkin suoraan kiviin osuessaan ne hajosivat. Niiden hajoaminen maanpinnalle voi kuitenkin olla hyväkin asia. Tällöin kasvupallojen sisältämien siemenien, etenkin pienimpien, on helpompi itää. Levitinlaitteen toimintaa voisi kuitenkin parannella monelta osin. Tärkeää olisi etenkin saada levittimen pyörimisnopeutta säädeltyä kaukosäätimellä. Kokeilussa laitteessa pyörimisteho täytyi säätää ennen lentoa lähtemistä, ja kaukosäätimellä saatiin vain kytkettyä pyöriminen päälle ja pois. Vastaavia levitinlaitteita on myös kehitelty muualla päin maailmaa, ja niihin on integroitu GPS-paikannuksella toimivia järjestelmiä. Ne pystyvät syöttämään kasvupallot hyvin tarkasti haluttuihin kohteisiin kopterin edetessä.

Elliottin (2020) mukaan Iso-Britannialaisella BioCarbon Engineering -nimisellä yrityksellä (nyk. Dendra Systems) on kehityksessä erittäin kehittynyt dronitekniologia uudelleenmetsittämistä varten. Yrityksen ajatuksena on lennättää ensin yhtä droonia, joka tiedustelee sensoreilla uudistettavan maaston ja suunnittelee keräämänsä tiedon perusteella istutuskartan sekä mitä lajikkeita, minnekin tulisi istuttaa. Seuraavaksi toinen drooni suorittaa ensimmäisen antamien tietojen perusteella levityksen parin metrin korkeudelta ampumalla maastoon paineilmatoisella laitteella biohajoavasta muovista valmistettuja kasvupalloja, jotka sisältävät esi-idätettyjä siemeniä ravinteikkaassa geelissä. Yrityksen tavoitteena on, että yksi drooni pystyisi levittämään päivässä 72 000 kasvupalloa ja yksi lennättäjä pystyisi hallitsemaan kuutta droonia yhtä aikaa. Yrityksellä on myös suunnitelmissa suorittaa tulevaisuudessa drooneilla siementen kerääminen suoraan puista ja lopulta matkia eläinperäistä siementen levitystoimintaa droonien avulla.

Dronitekniologia on vielä nuorta, ja moni tulevaisuuden haaste tässä levitystekniikassa liittyy droonien ja niiden apulaitteiden kehittämiseen. Tähän liittyen etenkin akkuteknologia on tärkeä kehityskohde, sillä droonit eivät pysty lentämään nykyisillä akuilla kovin pitkiä matkoja kerralla etenkin kuormitettuina. Samoin drooneista itsestään tulisi tehdä vankkarakenteisempia, jotta niitä voisi käyttää myös sateen ja kovemman tuulen aikana. Myös niiden kantokyvyn lisääminen olisi hyödyllistä ja sallisi suurempien määrien levityksen kertalennolla. Kehitettävää olisi myös levityslaitteiden sovelluspuolella. Muun muassa GPS-dataan, kameroihin tai sensoreihin, kuvankäsittelyyn, tietokantoihin, levityskuvioihin ja näistä kerättyyn dataan perustuvaan reaaliaikaiseen päätöksentekoon liittyviä sovelluksia on drooneille jo olemassa. Niissä kaikissa on vielä parannettavaa, ja niiden integrointi toimimaan keskenään autonomista metsänuudistamista varten vaatii vielä paljon työtä. (Elliott 2020; Tiansawat & Elliott 2020.)

LÄHTEET

Droneinfo 2022a. Kunnioita yksityisyyttä. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://droneinfo.fi/fi/nain-lennatat-turvallisesti/kunnioita-yksityisyytta> [viitattu 31.10.2022]

Droneinfo 2022b. Mitä sääntöjä on ilmassa? – ilmailun säädökset. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://droneinfo.fi/fi/koulutusmateriaali/mita-saantoja-ilmassa-ilmailun-saadokset?-toggle=Uudet%20m%C3%A4%C3%A4r%C3%A4ykset%20lyhyesti> [viitattu 31.10.2022]

Droneinfo 2022c. Rekisteröityminen ja teoriakoe. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://droneinfo.fi/fi/rekisteroityminen-ja-teoriakoe> [viitattu 31.10.2022]

Elliott, S. 2020. Chapter 1: Forest Restoration: Concepts and the Potential for its Automation. Teoksessa Elliott, S., Gale, G. & Robertson, M. (toim.) Automated Forest Restoration: Could Robots Revive Rain Forests? Thaimaa: Forest Restoration Research Unit, Chiang Mai University. 3 – 27. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.forru.org/sites/default/files/public/publications/resources/forru-0000099-0034-en.pdf> [viitattu 28.10.2022]

Geologian tutkimuskeskus. 2022. GTK:n huomiot siemenpallojen levityksestä – lentäjän näkökulma. Muistio. Julkaistu 14.9.2022.

Metsänhoidon suositukset. 2022. Maanmuokkaus. Www-julkaisu. Saatavissa: <https://metsanhoidonsuosituks.fi/fi/toimenpiteet/maanmuokkaus/toteutus> [viitattu 14.11.2022]

Tiansawat, P. & Elliott, S. 2020. Chapter 2: Unmanned Aerial Vehicles for Automated Forest Restoration. Teoksessa Elliott, S., Gale, G. & Robertson, M. (toim.) Automated Forest Restoration: Could Robots Revive Rain Forests? Thaimaa: Forest Restoration Research Unit, Chiang Mai University. 29 – 43. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.forru.org/sites/default/files/public/publications/resources/forru-0000099-0034-en.pdf> [viitattu 28.10.2022]

KASVUPALLOJEN PILOTOINNIT ERILAISISSA MAASTOISSA POHJOISISSA OLOSUHTEISSA

Henri Kettunen & Kati Kontinen & Niina Laurila

BioGo-hankkeessa tutkittiin mahdollisuutta edistää vaikeasti metsitettävien kohteiden kasvua ravinnepitoisten männyn siemeniä sisältävien kasvupallojen avulla. Hankkeessa valmistettuja kasvupalloja testattiin esikokeilla idättäen laboratorioissa olosuhdekaapissa. Näistä parhaiten itäneet erät valittiin kokeiltaviksi eri maastokohteissa. Artikkelissa esitellään vuosina 2021 ja 2022 toteutetut kasvupallojen kenttäkokeet sekä havainnot kasvupalloissa käytettyjen männynsiementen itävyydestä ja kasvusta näiden kasvukausien aikana. Pilotoinnin tarkoituksena oli tuottaa dataa kasvupallojen toimivuudesta Suomen ilmasto-olosuhteissa erilaisilla metsänkasvatuskohteilla. Vuonna 2020 Suomen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöjen määrä (CO₂-ekv.) vastasi 47,8:aa miljoonaa hiilidioksiditonnia. Samana vuonna metsien puusto ja maaperä sitoivat hiiltä yhteensä 27,8 milj. tonnia CO₂-ekv. (nettonielu). Tämä vastasi vuositasolla yli puolta Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Metsäalan kasvatus on yksi tehokkaimmista keinoista sitoa ilmastoa lämmittävää hiilidioksidia.

KENTTÄKOKEISSA KÄYTETYT KASVUPALLOERÄT

BioGo-hankkeessa valmistettiin useita erilaisia kasvupalloja niiden kentällä testausta varten. Vuoden 2021 kasvukaudella pilotoidut *NPK-pallot* valmistettiin käsin, eli niissä oli kaikki reseptin mukaiset ainekset sekä siemenet käsin sekoitetussa massassa. Vuoden 2022 kasvukaudella pilotoidut *hankipallot* ja *turvepallot* valmistettiin rakeistamalla, jolloin niihin saatiin valmistettua kerroksellinen rakenne eli ravinteikkaan ja pehmeämmän sisämangan päälle kovempi ohut kuorikerros. Hankipallot suunniteltiin levitettäväksi kohteisiin ennen lumien sulamista. Näin nähtäisiin kuinka kasvupallot käyttäytyvät kevähangilla. Turvepallot oli kokeissa kolme eri erää. Niillä testattiin, kuinka turpeen erilainen sijoittelu osaksi pallon rakennetta vaikuttaa pallon käyttäytymiseen luonnossa. Hankipalloissa ei käytetty turvetta

NPK-palloissa perusmassana käytettiin raaka-aineina metsämaamultaa, kompostia, biohiiltä, hiekkaa ja jauhettua savea. Raaka-aineita ei esikäsitlety karkeimpien kappaleiden seulontaa lukuun ottamatta, ja ne sekoitettiin keskenään siinä kosteudessa, jossa ne oli kylmiössä säilötty. NPK-lisäainemien erä sai siitä, että massan muokkauksessa tarvittavaan veteen oli liuotettu NPK-kivennäislanooiterakeita. Rakeiden määrä oli laskettu reseptiin sen mukaan, että kasvupallomassan typpi-, fosfori- ja kaliumpitoisuudet saavuttaisivat Metsän-

hoidon suosituksissa (2021) mainitut männynneulasnäytteiden optimaaliset ravinnetasot sen jälkeen, kun perusmassan ainesosien sisältämät ravinnepitoisuudet oli määritetty. Lisäksi massaan lisättiin ektomykorrittsaseosta valmistajan suosituksen mukaisesti. NPK-palloista muotoiltiin käsin ulkohalkaisijaltaan noin 35 mm:n kokoisia.

Hankipalloissa käytettiin raaka-aineina metsämaamultaa, kompostia, biohiiltä, hiekkaa ja savea. Aineet, jotka eivät olleet valmiiksi kuivia jauheita, kuivattiin noin 60 °C:n lämpötilassa ja tämän jälkeen seulottiin aineesta riippuen raekokoon 1–2 mm, jolloin niiden rakeistuvuus parantui huomattavasti. Pallot olivat ulkohalkaisijaltaan noin 30 mm, ja ne koostuivat kolmesta eri kerroksesta: ydinpallosta, sisäkerroksesta ja ohuesta kuorikerroksesta. Ydinpallo (n. 8 mm) valmistettiin kompostista. Sisäkerros koostui mullan, kompostin, hiekan ja biohiilen seoksesta, johon lisättiin ektomykorrittsaa. Ohut kuorikerros koostui biohiilen ja saven seoksesta. Palloissa käytettiin männyn ja italianraiheinän siemeniä, jotka sijoitettiin pallon sisäkerroksen uloimpaan kolmannekseen rakeistuksen aikana. Siemeniä punnittiin tavoitemäärä suhteessa valmistettavien pallojen määrään, ja ne lisättiin rakeistuvien pallojen joukkoon kesken prosessiin. Tästä johtuen niiden määrä saattaa vaihdella palloissa.

Turvepalloja valmistettiin kolme eri erää, joissa suurin ero oli turpeen sijoitus pallossa: 1) turve mukana pallon sisäkerroksessa; 2) turve omana kerroksenaan sisäkerroksen ja kuorikerroksen välissä; 3) turve osana pallon kuorikerrosta biohiilen kanssa, jossa ei käytetty savea toisin kuin kaikissa muissa hankkeen kasvupalloerissä. Turvepalloissa käytettiin Kekkilän luonnonturvetta, joka kuivattiin ja seulottiin < 4 mm:n raekokoon. Muutoin niissä käytettiin samoja raaka-aineita, ja ne valmistettiin samoilla menetelmillä kuin edellä mainitut hankipallot.

PILOT-KOHDEMAASTOT JA KOEJÄRJESTELYT KOKOEN ALKAESSA ALKUKESÄLLÄ 2021

Kasvupallojen kenttäkokeet suoritettiin kolmessa eri maastokohteessa: 1) käytöstä poistetulla soranotto paikalla, 2) kivennäismaalla kallion päällä, 3) turvekankaalla, jossa oli huomattava ravinteiden epätasapaino. Näistä soranottokohde sijaitsee Mäntyharjun kunnan alueella paikallisen maansiirtoyrityksen maaperällä. Kivennäismaakohde ja turvekangaskohde sijaitsevat Ristiinan Pettilässä noin 250 metrin etäisyydellä toisistaan. Mänty kasvaa laadukkaaksi tukkipuiksi kuivahkoilla ja sitä karummilla kankailla sekä rämeillä ja karuissa korvissa. Mäntyä uudistetaan viljellen joko kylvämällä tai istuttamalla tai luontaisesti joko siemenpuiden tai reunametsän siemennystä hyödyntämällä. Näillä kasvupaikoilla suositellaan metsikön pääpuulajiksi mäntyä. Mänty sopii pääpuulajiksi myös tuoreille kankailla sekä kasvatettavaksi yhdessä kuusen ja koivun kanssa sekametsikköinä (Metsänhoidon suositukset 2022). Pilot-kohteiden valinnassa pyrittiin hakemaan mahdollisimman monipuolisia ja erilaisia männyn kasvatukseen soveltuvia alueita. Kyseiset kohteet olivat kasvupaikkoina

äärevimmistä päistä. Näin ollen saatiin käsitystä kasvupallojen soveltuvuudesta mahdollisimman haastavissa olosuhteissa.

Kohteille perustettiin alkukesästä 2021 neljä eri koealaa, kukin kooltaan noin 1 m x 2 m. Kullekin näistä sijoitettiin 50 maalattua merkintäkeppiä merkkamaan näytteitä. Lisäksi syksyllä 2021 perustettiin joka kohteelle viides samankokoinen koeala. Niihin levitettiin keväällä 2022 hankipallot. Kesällä 2021 perustetut koealat jaoteltiin seuraavasti:

- kasvupallot
- kasvupallot, lannoitettu ala
- siemenet
- siemenet, lannoitettu ala

Koaloilta raivattiin niiden perustamisen yhteydessä pintakasvillisuus, risut ja varvikot, siten, että maan pinta paljastui. Alat merkittiin kepeillä noin 20 cm:n välein, ja kasvupallot tiputettiin vyötärön korkeudelta merkkikeppien viereen 1 kpl / keppi. Vastaavasti siemenaloille istutettiin männyn siemenet käsin 1 kpl / keppi kevyesti maahan painaen. Näin luoduilla koealajärjestelyillä pystyttiin vertailemaan kasvupallojen itämistä paljaiden siementen itävyyteen samassa maastossa. Lisäksi nähtiin, onko erikseen toteutettavalla maaston lannoituksella merkitystä itämiseen ja kasvuun. Kasvupallot kasteltiin hanavedellä (100 ml / pallo) levityksen yhteydessä muilla kohteilla paitsi turvekankaalla, missä kohteen maasto oli jo valmiiksi kostea.

Vuoden 2021 pilot-kokeissa selvitettiin kasvupallojen itävyyden lisäksi myös lannoittamisen vaikutus kasvuun. Kohteilta otettiin maanäytteet perustamisen yhteydessä sekä molempien kasvukausien päätteeksi. Näytteet otettiin 5–15 cm:n syvyydeltä. Maanäytteitä otettiin alkukesän 2021 lisäksi syksyllä 2021 ja 2022. Kivennäismaalta näyte otettiin sekä kivennäisettä humuskerroksesta (vuosi 2021). Tosiassa kivennäismaalla näytteenotto oli kuitenkin vaikeaa, koska koealoilla maakerrosta oli vain noin 5 cm kallion päällä. Siksi etenkin syksyjen 2021 ja 2022 näytteisiin on voinut päästä pintamateriaalia, kuten juurakkoa. Näytteistä, jotka analysoi Hortilab Oy Ab, määritettiin pH, johtokyky, tärkeimmät ravinne- ja hivenainepitoisuudet, orgaanisen aineksen pitoisuus, C/N-suhde sekä kationinvaihtokyky. Hortilab Oy Ab:n mukaan mittausepävarmuus analyysistä riippuen vaihtelee ± 15 %:n ja ± 40 %:n välillä tai 0,2–4 mg / l. Taulukkoon 3 on koottu analyysitulokset kohteiden alkutilanteesta. Kaikissa kohteissa puutetta oli muun muassa fosforista, kaliumista ja boorista. Tulosten perusteella koealojen lannoitus tehtiin seitsemän viikkoa pilotoinnin aloituksesta. Lannoitteena käytettiin Kekkilä Professional -tuotteita Metsä-Superex (NPK-lannoite, 22–5–16) ja Syys-Superex (PK-lannoite, 0–20–24) sekä YaraVita STOPIT-kalsiumlannoitetta (Ca 160 g / l). Kohteittaisen lannoitustarpeen arvioi metsäasiantuntija Kati Kontinen, ja lannoitemäärissä noudatettiin lannoitevalmistajan suosituksia.

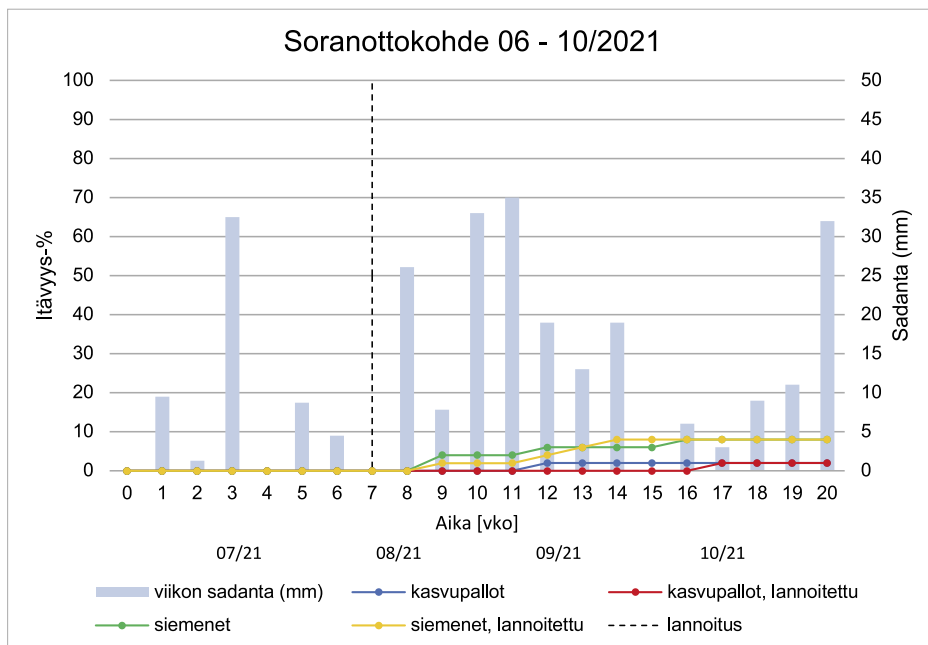
Taulukko 3. Koealuiden maa-analyysitulokset kesältä 2021 (lähde Hortilab Oy Ab 2021)

Analyysi	Turve	Kivennäismaa, humuskerros	Kivennäismaa, kivennäiskerros	Sora
Johtoluku [10 x mS/cm]	0,8	1,3	0,3	< 0,3
pH	4,2	4,9	5,0	6,1
Ca [mg/l]	413	424	66	67
P [mg/l]	6,9	4,2	< 2	< 2
K [mg/l]	36	130	34	20
Mg [mg/l]	110	83	13	11
S [mg/l]	8,2	15	14	7,3
B [mg/l]	0,2	0,3	0,2	< 0,2
Cu [mg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Mn [mg/l]	11	310	84	< 6,0
Zn [mg/l]	1,2	3,6	< 1,0	< 1,0
NO ₃ -N [mg/l]	< 2	< 2	< 2	< 2
N [g/kg]	21,7	3,15	1,00	0,04
C/N-suhde	22,2	21,4	32,7	84,4
Org. aines %	83,1	11,6	5,6	0,5
KVK [cmol/l]	14	7	1	1

HAVAINNOT NPK-PALLOJEN PILOTOINNISTA VUONNA 2021

SORANOTTOKOHDE

Soranottokohteessa mäntyjen itäminen oli jo pelkillä siemenillä heikkoa (kuva 1). Ensimmäiset itämiset kohteessa havaittiin siemenaloilla vasta 9. koeviikolla eli elokuussa. Lannoittamattomilla siemenillä itävyys oli 4 prosenttia ja vastaavasti lannoitetuilla siemenillä 2 prosenttia. Seurannan loputtua molemmilla kasvupalloaloilla oli havaittu vain yhdet itäneet männyt (itävyys 2 %) ja vastaavasti siemenaloilla kolmet (itävyys 8 %). Sade kiihdytti siementen itämistä. Sateesta huolimatta NPK-pallot säilyttivät muotonsa hyvin, mikä männyn itämisen kannalta oli huono asia, sillä männyn sirkkajuuri ei tuntunut jaksavan työntyä kasvupallomassan läpi ilman pallon hajoamista.



Kuva 1. Itävyys vs. sadanta soranottokohteessa 2021

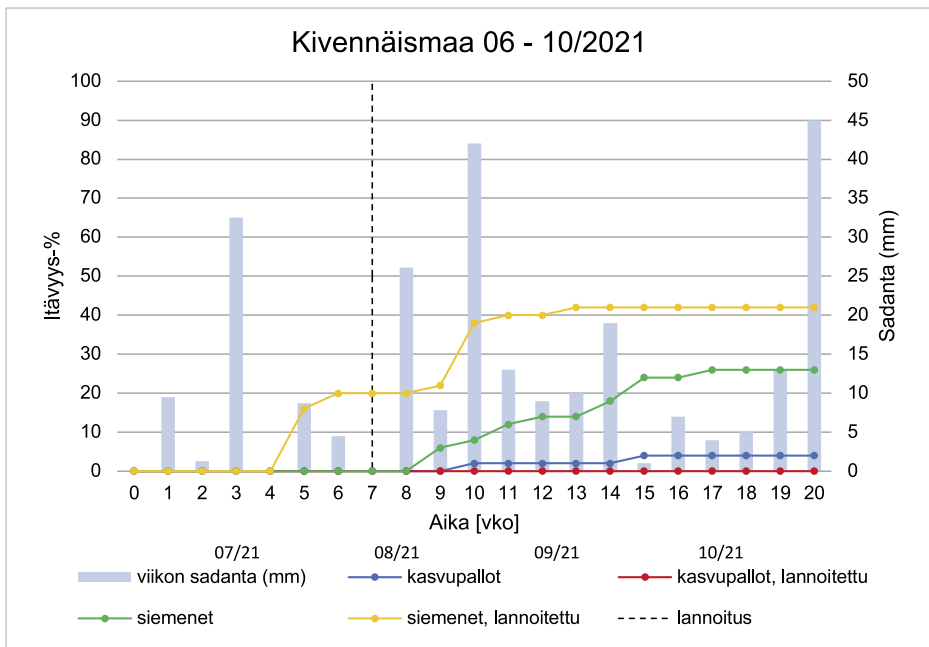
NPK-palloista itämään lähteneet männyt sijaitsivat selvästi pallojen ulkopuolella eivätkä todennäköisesti hyötäneet esimerkiksi pallojen vedenpidätyskyvystä (kuva 2). Osa itäneistä männyistä menehtyi jo seurannan aikana, eli olosuhteet soranottokohteessa olivat haasteelliset.



Kuva 2. Soranottokohteella NPK-pallosta lähtöisin oleva mänty ympyröitynä (kuva H. Kettunen 2021)

KIVENNÄISMAAKOHDE

Itäminen kivennäismaakohteessa alkoi heinäkuun puolivälissä koeviikolla 5 lannoitetulla siemenalalla itävyyden ollessa 16 %. Itämisen on todennäköisesti laukaissut suurehko sademäärä (noin 33 mm) viikolla 3 (kuva 3). Lannoittamattomalla siemenalalla siementen itäminen (itävyys 6 %) alkoi koeviikolla 9. Itäminen näyttäisi kiihtyneen, kun sade on ollut rankkaa, yli 20 mm / vrk. Lannoitetulla siemenalalla saavutettiin kasvukaudella 42 %:n itävyys ja lannoittamattomalla 26 %:n itävyys. Kasvupalloaloilla itäminen oli hidasta. Lannoittamattomissa kasvupalloissa itäminen alkoi 10. koeviikolla yhdellä taimella, mikä tarkoitti 2 %:n itävyyttä. Kauden lopussa itävyys tällä koealalla oli noussut 4 %, eli taimia oli kaksi kappaletta. Lannoitetulla koealalla ei kasvupalloissa havaittu itämistä. Kuitenkin italianraiheinät kykenivät itämään joistain kivennäismaakohteen NPK-palloista (kuva 4).



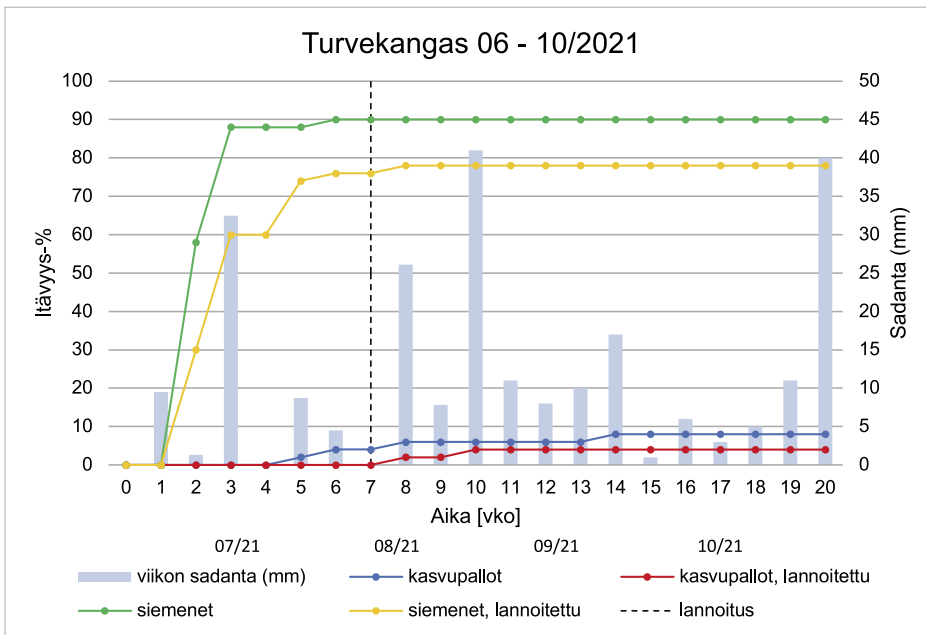
Kuva 3. Kivennäismaassa vertailualoilla siemenet itivät hyvin kasvupalloihin verrattuna.



Kuva 4. Italianraiheinälle NPK-pallosta itäminen oli mäntyä helpompaa (kuva H. Kettunen 2021).

TURVEKANGAS

Itäminen oli nopeinta turvekankaalla, jossa ensimmäiset havainnot itämisestä tehtiin siemenaloilta kokeen 2. viikolla kesäkuun lopulla (kuva 5), jolloin lannoittamattomalla siemenalalla siemenistä oli itänyt jo 58 %. Myös lannoitetulla alueella itäminen käynnistyi vahvasti: 30 %. Siemenaloilla saavutettiin 90 %:n itävyys lannoittamattomalla alalla jo 6. koeviikolla ja lannoitetulla alalla 78 %:n itävyys 8. koeviikolla. Nopeaa itämistä alkukesästä edisti kohteen kostea maaperä, jota kasvukautena ylläpitivät rankat sateet. Esimerkiksi koeviikolla 10 kohteessa satoi yhteensä 42 mm. Maaperän kosteus ei edistänyt kasvupallojen mäntyjen (kuva 6) itävyyttä samalla tavoin kuin siemenillä, joskin kummankin alan 8 %:n itävyydellä saavutettiin paras itävyystulos, kun verrattiin kaikkien pilotoitujen NPK-pallojen itävyyttä.



Kuva 5. Siemenet itivät onnistuneesti turvekohteessa kasvukaudella 2021



Kuva 6. Mäntyjen (ympyröity) oli helpompi itää kostealla turvekankaalla (kuva H. Kettunen 2021)

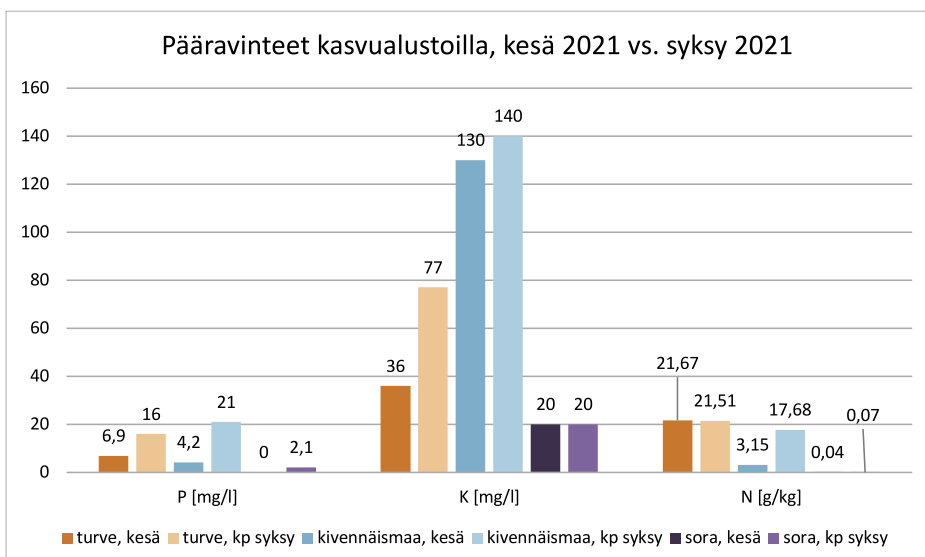
POSITIIVISIA MUUTOKSIA MAAPERÄN RAVINNE- TILANTEESSA KASVUPALLOJEN JA ERILLISEN LANNOITUKSEN MYÖTÄ

Pelkästään NPK-palloista peräisin oleva lannoitus nähdään taulukossa 4. Merkittävästi suurentuneet ravinnepitoisuudet kasvukauden aikana on merkitty taulukkoon vihreällä ja pienentyneet pitoisuudet punaisella. Stabiileina pysyneitä ravinnemääriä ei ole värjätty. Ravinnemäärät maastossa olivat nousseet kasvukauden aikana turvekankaalla ja kivennäismaalla selkeästi NPK-pallojen ansiosta. Toki luonnon omat prosessit ovat voineet myös vaikuttaa maaperän ravinteisiin.

Taulukko 4. NPK-pallojen vaikutus koelajien maaperän ravinteisiin kasvukauden jälkeen (Hortilab Oy Ab 2021)

Analyysi	Turve K21	Turve S21	Kivennäis- maa K21	Kivennäis- maa S21	Sora K21	Sora S21
Johtoluku [10 x mS/cm]	0,8	1,0	1,3	1,5	< 0,3	< 0,3
pH	4,2	4,2	4,9	4,6	6,1	5,9
Ca [mg/l]	413	446	424	515	67	58
P [mg/l]	6,9	16	4,2	21	< 2	2,1
K [mg/l]	36	77	130	140	20	20
Mg [mg/l]	110	150	83	120	11	10
S [mg/l]	8,2	11	15	13	7,3	8,3
B [mg/l]	0,2	0,2	0,3	0,4	< 0,2	< 0,2
Cu [mg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Mn [mg/l]	11	17	310	470	< 6,0	< 6,0
Zn [mg/l]	1,2	1,5	3,6	7,1	< 1,0	< 1,0
NO ₃ -N [mg/l]	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
N [g/kg]	21,7	21,5	3,15	17,7	0,04	0,03
C/N-suhde	22,2	22,4	21,4	29,2	84,4	41,7
Org. aines %	83,1	83,1	11,6	88,9	0,5	0,5
KVK [cmol/l]	14	17	7	12	1	1

Soralla muutos on ollut hyvin vähäistä kumpaankin suuntaan, eli tilanne on pysynyt pintasorassa pääosin melko stabiilina. Tämä voi johtua siitä, että kasvupalloista peräisin olevat liukoiset aineet valuivat helposti karkean soran läpi alempiin maakerroksiin. Muilla kohteilla kasvupalloilla nähtiin olevan etenkin fosforin ja kaliumin (kuva 7) sekä kalsiumin, magnesiumin ja mangaanin osalta selvää positiivista vaikutusta.



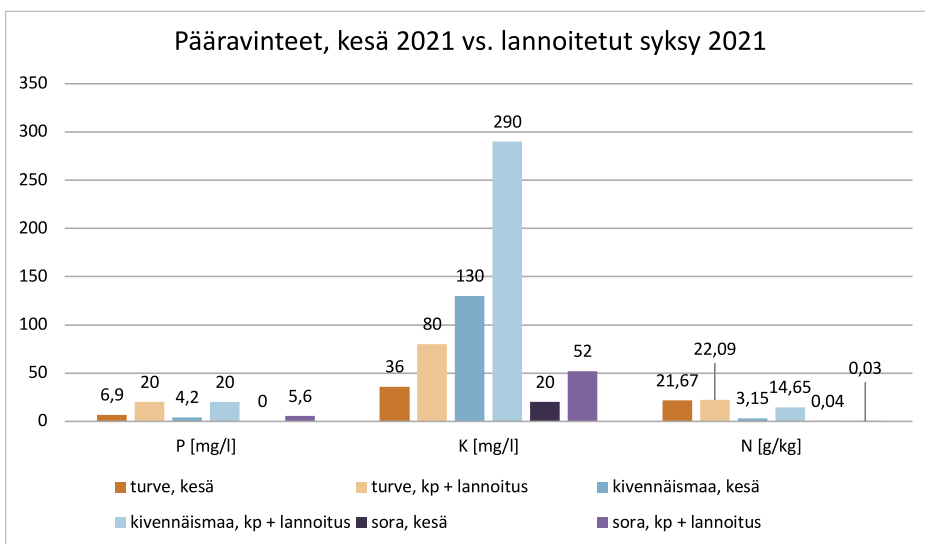
Kuva 7. NPK-palloista peräisin oleva lannoitevaikutus näkyi fosforin ja kaliumin osalta joka alalla

Erikseen toteutetun lannoituksen vaikutus NPK-pallojen lisäksi kohteiden maaperään kasvukauden aikana on esitetty taulukossa 5. Turvekankaalla lannoituksessa ei nähty olleen suurta eroa verrattuna pelkkien NPK-pallojen tuomaan lannoitevaikutukseen. Kuitenkin kivennäismaalla kaliumin pitoisuus kasvoi reilusti lannoituksen ansiosta muiden ravinteiden pysyessä melko vakiona. Myös johtoluku kasvoi selvästi kasvukauden loppuksi, eli maahan oli päätyntä liukoisia aineita. Sorakohteella fosforin ja kaliumin osalta erillisellä lannoituksella nähtiin olevan maaperän ravinnepitoisuutta parantava vaikutus verrattuna pelkkiin NPK-palloihin. Soran ravinnepitoisuudet jäivät lannoituksesta huolimatta hyvin alhaisiksi verrattuna muihin kohteisiin.

Taulukko 5. Erot lannoittamattomien ja lannoitettujen (L) NPK-pallokoealojen ravinnemäärissä syksyllä 2021 (Hortilab Oy Ab 2021)

Analyysi	Turve	Turve, L	Kivennäis-Maa	Kivennäis-maa, L	Sora	Sora, L
Johtoluku [10 x mS/cm]	1,0	1,2	1,5	2,1	< 0,3	< 0,3
pH	4,2	4,1	4,6	5,0	5,9	6,2
Ca [mg/l]	446	344	515	504	58	< 50
P [mg/l]	16	20	21	20	2,1	5,6
K [mg/l]	77	80	140	290	20	52
Mg [mg/l]	150	120	120	150	10	< 10
S [mg/l]	11	14	13	14	8,3	3,8
B [mg/l]	0,2	0,2	0,4	0,6	< 0,2	< 0,2
Cu [mg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Mn [mg/l]	17	8,6	470	230	< 6,0	< 6,0
Zn [mg/l]	1,5	< 1,0	7,1	9,4	< 1,0	< 1,0
NO ₃ -N [mg/l]	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
N [g/kg]	21,7	22,1	3,15	14,6	0,04	0,03
C/N-suhde	22,4	23,2	29,2	23,6	41,7	123
Org. aines %	83,1	88,2	88,9	59,6	0,5	0,6
KVK [cmol/l]	17	17	12	10	1	0

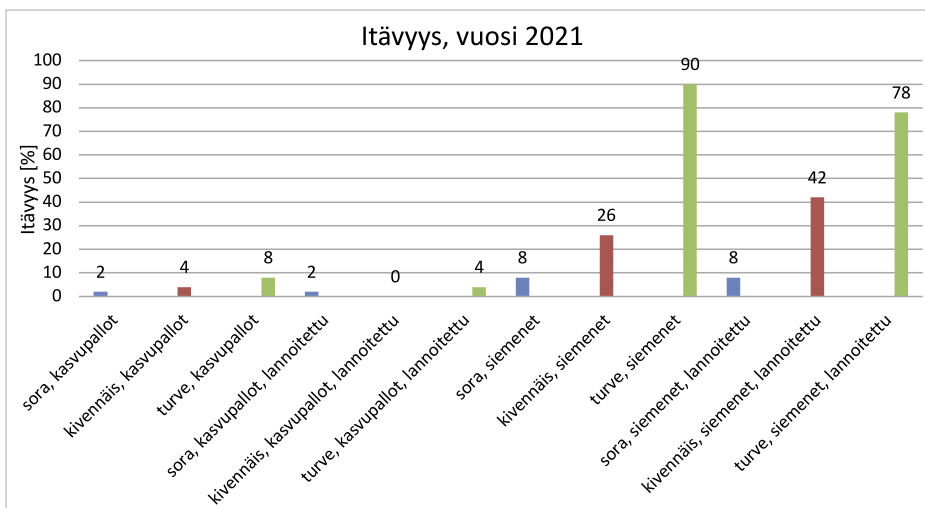
Sorakohteella fosforin ja kaliumin (kuva 8) osalta erillisellä lannoituksella nähtiin olevan maaperän ravinnepitoisuutta parantava vaikutus verrattuna pelkkiin NPK-palloihin. Soran ravinnepitoisuudet jäivät lannoituksesta huolimatta hyvin alhaisiksi verrattuna muihin kohteisiin.



Kuva 8. Erikseen toteutettu koealojen lannoitus näkyi etenkin kaliumin pitoisuuksissa

NPK-PALLOJEN PILOTOINTI OSOITTI KASVUPALLOJEN KAIPAAVAN LISÄÄ KEHITYSTYÖTÄ

Seurantakautena 2021 NPK-pallojen itävyys oli heikkoa itämisen jäädessä 2–8 %:iin (kuva 9). Paras tulos 8 % saavutettiin lannoittamattomalla kasvupalloalalla turvekohteessa. Kivennäiskohteessa lannoitetulla kasvupalloalalla ei saatu itämään yhtään mäntyä. Tarkasteltaessa siementen itävyyttä huomataan, että muista koealoista poiketen kivennäiskohteessa lannoitetut siemenet itivät paremmin kuin lannoittamattomat. Muissa kohteissa tilanne oli päinvastainen. Sorakohteessa itäminen oli heikointa kaikilla koealoilla. NPK-pallot säilyttivät muotonsa, joskin esimerkiksi kivennäiskohteessa ne olivat hauraita toisin kuin sorakohteessa. Pallot olivat mitä ilmeisimmin liian tiiviitä, jotta männyn itäminen olisi käynnistynyt.



Kuva 9. Itävyys kasvukaudella 2021

NPK-pallojen liian tiiviistä rakenteesta otettiin opiksi ja alettiin kehittää kasvupalloihin kerroksellisempaa rakennetta, jossa pallon ydin olisi pehmeää ainesta ja kuori tarpeeksi kova, jotta pallot kestäisivät käsittelyä. Tämä ei onnistunut käsin valmistaen, joten talven 2021–2022 aikana kasvupallojen valmistuksessa otettiin käyttöön rakeistuslaitteisto. Rakeistamalla valmistettiin useita uusia kasvupalloeriä ja etsittiin sopivia raaka-ainesuhteita etenkin kuorikerroksen optimoimiseksi. Tärkeimpinä esikriteereinä valmistetuissa testierissä oli kuljetusten kannalta riittävä lujuus, mutta niiden tuli myös hajota kastellessa, jotta männyn sirkkataimi pystyisi itämään materiaalin läpi. Sopivaksi koetut erät valittiin kasvatuskokeisiin. Kasvatuskokeet suoritettiin vakio-olosuhteissa laboratorioissa sora-alustalla. Näiden perusteella päädyttiin valmistamaan alkukevästä 2022 *hankipallot*, joilla testattiin kasvupallojen käyttäytymistä keväthangille levitettynä. Kevään edetessä edellisvuoden koelohjelmalle päätettiin kehittää vielä turvepohjaiset kasvupallo, joita valmistettiin kolmella eri kerrostustavalla, sillä nähtiin järkevämmäksi pilotoida samalla kertaa useampaa kuin vain yhtä reseptiä.

PILOT-KOKEET VUONNA 2022 – KASVUPALLOJEN KÄYTTÄYTYMISESTÄ LUMISENA VUODENAIKANA EI OLLUT AIEMPAA TIETOA

Hankipallot levitettiin kohteille huhtikuun alussa 2022, kun kohteilla oli vielä 0,5–0,7 metriä lunta (kuva 10). Kohteiden seuranta aloitettiin parin väliviikon jälkeen levityksestä, sillä kohteilla olisi ollut turha käydä ennen kuin lumet alkavat sulaa. Huhtikuun lopusta alkaen havaintokäynnit tehtiin pääsääntöisesti viikoittain.



Kuva 10. Hankipallojen levitys kivennäismaakohteelle (kuva H. Kettunen 2022)

Etenkin avoimella ja siten auringonsäteiden helposti saavuttamalla kivennäismaakohteella, jossa hankilevitysala oli keltaisella hirvinauhalla ympäröity, ilmeni heti ensimmäisillä käynneillä mielenkiintoisia havaintoja kasvupallojen vaikutuksesta, kun ne levitetään keväthangille. Tummat pallot lämpenivät auringonsäteiden vaikutuksesta ja sulattivat niitä ympäröivän lumen tehokkaasti kevään edetessä (kuva 11). Kasvupallot myös olivat pinnaltaan selvästi kosteita.



Kuva 11. Hankipalloala kolme viikkoa levityksen jälkeen (kuva H. Kettunen 2022)

Palloista irtosi selvästi hangille tummaa ainesta eli pääosin biohiiltä, joka lienee suurin syy palloja ympäröivän lämpövuon aikaansaamiseen (kuva 12). Myös muiden kohteiden hankilevitysaloilla oli selvää sulamista tapahtunut muuta ympäristöä enemmän, mutta niissä myös näytteiden merkintäkepit ovat voineet edistää sulamista (kuva 13).



Kuva 12. Hankipalloista irtosi biohiiltä hangille edistämään lumen sulamista (kuva H. Kettunen 2022)



Kuva 13. Turvekankaalla ja sorakohteella kasvupallot sulattivat lunta selvästi muuta ympäristöä enemmän (kuva H. Kettunen 2022).

Hankipallojen lisäksi koealoilla toteutettiin turvepallojen testaus joka kohteella samoilla aloilla, joilla edellisenä vuonna testattiin käsivalmisteisia NPK-lannoitettuja kasvupalloja. Aloille jätettiin edellisvuotiset kasvupallot ja niistä itäneet männyt, sillä ne erottuivat selkeästi uusista kasvupalloista. Kohteittain kaikille kasvupalloaloille lisättiin 10 uutta merkkikeppiä, jolloin joka kohteelle saatiin lisättyä yhteensä 120 uutta kasvupalloa eli 40 kappaletta kustakin kolmesta turvepallonerästä. Viime vuonna lannoitettuja testialoja ei lannoitettu enää uudelleen.

KOKEMUKSIA JA HAVAINTOJA ERILAISTEN RAKEISTAMALLA VALMISTETTUIJEN KASVUPALLOJEN PILOTOINNEISTA ERI MAASTOKOHTEISSA

Kenttäkokeissa ehdittiin seurata kasvupallojen mäntyjen itävyyttä yhden kasvukauden ajan huhtikuusta lokakuun loppuun viimeisen havaintokäynnin ollessa 27.10.2022. Seuranta suoritettiin kohteilla viikoittain, jolloin kohteen havainnot kirjattiin jokaisesta kohteesta tehtyyn pöytäkirjapohjaan. Lisäksi jokainen koeala tärkeimpine havaintoineen valokuvattiin. Turvepallojen levitys toteutettiin seurantaviikolla 7. Seurantakäyntejä ei tehty viikoilla 1, 11, 13–16 ja 20. Viikon 17 sadanta kuvaa viiden viikon sadantaa ja viikkojen 12 ja 21 sadanta kahden viikon sadantaa. Aiempana vuonna suoritettuja lannoituksia ei uusittu toisen kasvukauden aikana eikä hankialoja lannoitettu myöskään erikseen.

TURVEKANGAS

Turvekankaalla hankien sulaessa huhtikuun aikana hankipallot jäivät sulamisvesistä syntyneen pienen lammikon alle, joka myös jäätynä pinnastaan parin viikon ajaksi. Kun jää sulii ja vesi imeytyi maastoon, veden alta paljastuneet hankipallot olivat yhtä lukuun ottamatta täysin hajonneet, ja maastossa oli näkyvissä vain biohiilestä peräisin olevaa mustaa ainesta (kuva 14).



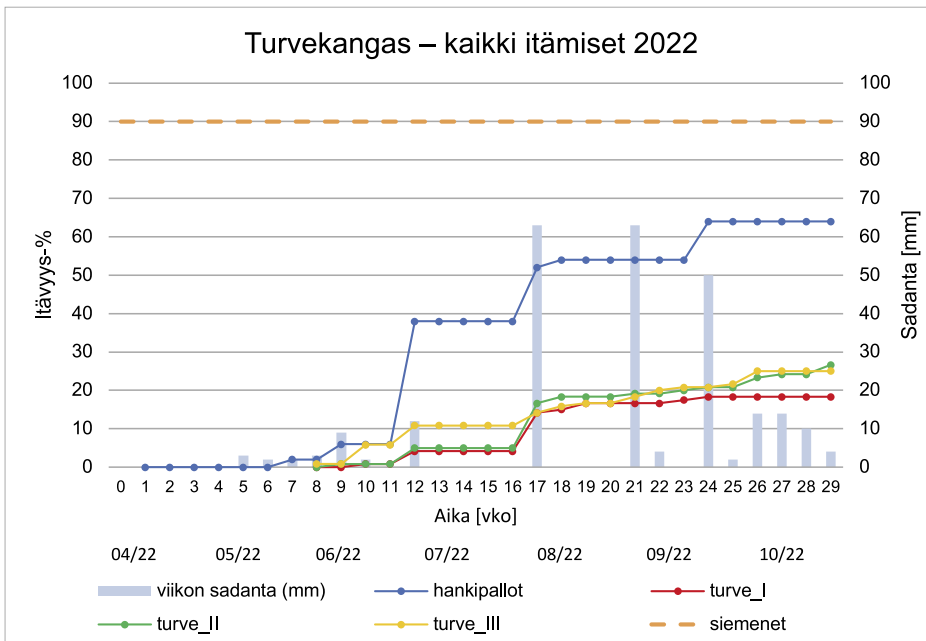
Kuva 14. Hajonneita hankipalloja turvekohteella jään sulettua (kuva H. Kettunen 2022)

Kevään tulvaimiöstä selvinneestä hankikasvupallosta iti mänty (kuva 15). Vaikka alue raivattiin puhtaaksi edellisenä syksynä, alkoi siinä kasvaa alueelle tyypillistä rakkasamalta sekä saraa.



Kuva 15. Ainoasta ehjänä pysyneestä hankipallosta kasvoi mänty (ympyröity) ensimmäisten joukossa, kuva syyskuulta 2022 (kuva H. Kettunen 2022)

Kuvassa 16 on esitetty kunkin kohteen viikoittaisten seurantojen itämishavainnot eri kasvupalloista havaittujen mäntyjen osalta sekä viikoittainen sadanta alkaen hankilevityksen toteutuksesta. Aiempana vuonna suoritettuja lannoituksia ei uusittu toisen kasvukauden aikana eikä hankialoja lannoitettu myöskään erikseen. Erilaisten kasvupallojen sisältämien männynsiementen yhden kasvukauden itävyyksiä vertailtiin edellisenä vuonna kohteille levitettyjen männynsiementen maksimi-itävyyksiin yhden kasvukauden aikana. Nämä on merkattu kuviin vihreällä katkoviivalla.



Kuva 16. Turvekankaan itämishavainnot viikoittain 2022

Ristiinan kohteilla sadanta oli niukkaa kesäkuuhun asti. Itävyyshavaintojen perusteella pelkästään sulamisvesissä peitoksissa oleminen ei riittänyt turvekankaan hankipallojen männyille niiden itämisen alkamiseksi. Mänty on valokasvi, eli se vaatii auringonvaloa kasvaakseen. Nygren (2003) onkin todennut, että männyn siemenet itävät valossa paremmin kuin pimeässä. Toisaalta kevähankien sulaessa huhtikuussa ei terminen kasvukausi ollut vielä alkanut. Kasvualusta sai kuitenkin hajonneista kasvupalloista (kuva 14) lisäravinteita sekä vedenpidätyskykyä parantavaa biohiiltä edistämään siementen itämismahdollisuuksia. Suurin itävyyspiikki kohteella nähtiin kesäkuun loppupuolella, jolloin hankipalloista lähes 40 % oli itänyt.

Turvepalloterien I–III osalta ei nähty itävyydessä yhtä suurta kasvupiikkiä kuin hankipalloilla. Nopeimmin mäntyjä lähti itämään III-erästä eli turve-biohiilikuorisesta erästä (kuva 17). Tämä oli odotettavissa, sillä testatuista eristä III-erän kuori hajosi helpoiten sateen aiheuttaman eroosion vaikutuksesta. Eri turvepallojen itäminen eteni seuranta-aikana muutoin melko samaa tahtia, eikä niissä lopulta nähty yhden kasvukauden aikana kovin suurta eroa.



Kuva 17. Männyt (ympyröity) kasvoivat turvepallojen viereltä (kuva H. Kettunen 2022)

Turvekankaalla paljaat siemenet kykenivät itämään helposti, sillä kohteen maasto oli pehmeän turpeista ja säilytti pintakosteutensa hyvin luonnostaan. Kasvupallot sen sijaan vaativat runsaampaa sadantaa, jotta ne hajosivat tarpeeksi paljastaakseen männyn siemenet niiden sisältä, vaikka ne pysyivät maastossa melko kosteina kasvukauden ajan. Tämä voi selittää, etteivät kasvupallot ehtineet yhden kasvukauden aikana itää yhtä hyvin kuin siemenet. Kohde oli myös osittain puiden peitossa, joten sadepisarot eivät osuneet maastoon samalla intensiteetillä kuin muilla kohteilla. Palloissa kuitenkin havaittiin italianraiheinän itämistä (kuva 18).



KUVA 18. Osa italianraiheinistä kasvatti selkeät juuret turvepallojen pintaan (kuva H. Kettunen 2022)

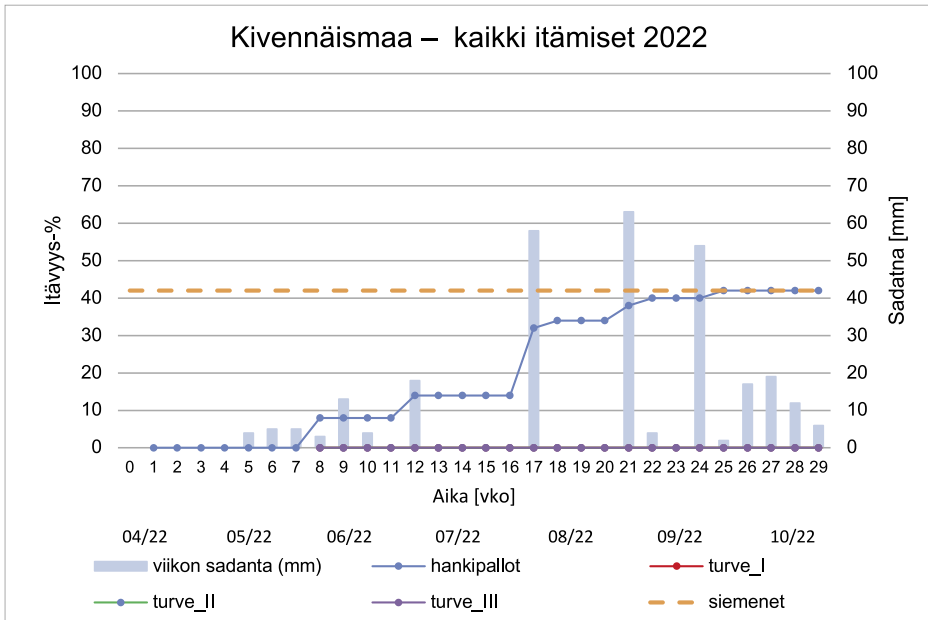
KIVENNÄISMAA

Kivennäismaakohteella hankilevitys osoittautui kannattavaksi vaihtoehdoksi. Kohde oli olosuhteiltaan haasteellinen: sen maasto oli pääosin juurakkoa ja sammalta, ja kalliopinta sijaitsi noin viisi senttimetriä niiden alla. Lisäksi kohde oli hyvin aukealla paikalla, jolloin aurinko ja tuuli kuivattivat pintamaan nopeasti sateiden jälkeen. Hangelle levitetyillä kasvupalloilla saatiin siis kohteella merkittävä etu, sillä ne sitoivat lumien sulamisvedet itseensä. Vaikka pallot eivät täysin hajonneet, niiden pinnalta irtosi männynsiemeniä pallojen vierelle itämään (kuva 19).



Kuva 19. Männyn sirkkataimia (ympyröity) hankipallojen vierellä (kuva H. Kettunen 2022)

Kivennäismaakohteella hankipallojen itäminen alkoi samoihin aikoihin kuin turvekan-
kaalla, vaikka kivennäismaan pallot eivät uponneet sulamisvesiin (kuva 20). Hankipallojen
sisältämien mäntyjen itäminen eteni kohteella melko tasaista tahtia läpi kasvukauden, ja
viimeisimmät itämiset havaittiin syyskuun puolivälin tienoilla. Lopulta kivennäismaakohteen
hankipalloilla päästiin yhden kasvukauden aikana samaan itävyyteen kuin pelkillä
männynsiemenillä edellisellä vuonna. Tulee kuitenkin huomioida, että kasvupallot sisältävät
potentiaalisesti kasvua edistäviä komponentteja eli mykorritsaa, kompostin ravinteita ja
biohiiltä parantamaan maaperän vedenpidätyskykyä. On siis todennäköistä, että kas-
vupalloista itäneet männyt tulevat kasvamaan paremmalla menestyksellä kuin kohteelle
istutetut siemenet.



Kuva 20. Kivennäismaan itämishavainnot viikoittain 2022

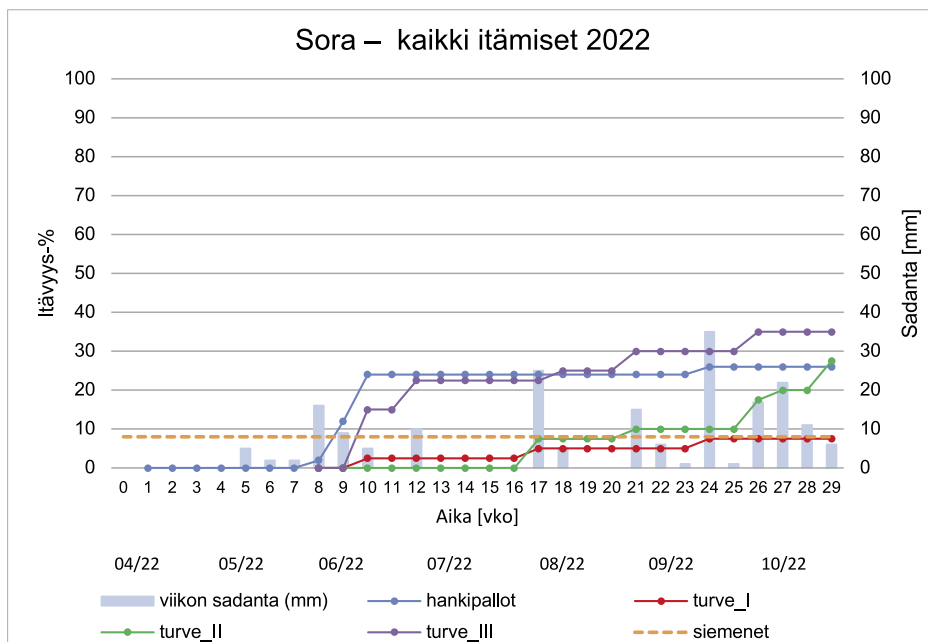
Turvepalloista ei havaittu kivennäismaakohteella yhtään itävää mäntyä yhden kasvukauden aikana. Tämä johtuu luultavasti kohteen haastavista olosuhteista kesähelteillä ja kohteen taipumuksesta kuivua nopeasti. Muutamista turvepalloista havaittiin kuitenkin itävän italianraiheiniä (kuva 21). Kohteen koaloilla kasvoi kesän edetessä runsaasti luonnon levittämää rikkaheinää, joka on voinut myös osaltaan imeä sekä sateen että maaston kosteuden itseensä vähentäen sateen eroosiovaikutusta kasvupalloihin.



Kuva 21. Osittain hajonnut ja maahan uponnut turvepallo kivennäismaakohteella ja siitä itänyt italianraiheiniä (kuva H. Kettunen 2022)

SORANOTTOKOHDE

Sorakohteella hankipallojen itäminen eteni kesäkuussa kahden viikon aikana lähes heti täyteen huippuunsa seurantajakson aikana (kuva 22). Käytetyn reseptin mukaisilla kasvupalloilla talviaikaan suoritettu levitys oli ilmeisen hyvä vaihtoehto soramaastossa, koska myöhemmin kesällä hankipalloalalla itämisiä ei enää juuri nähty. Alkukesän aikainen itäminen olisi männylle hyväksi, jotta siitä ehtii kesän aikana kasvaa tarpeeksi suuri sirkkataimi ja se karaistuisi talvea varten.



Kuva 22. Sorakohteen itämishavainnot viikoittain 2022

Turvepallojen sisältämien mäntyjen itäminen soralla alkoi suhteellisen nopeasti III-erän turvepaloilla, joiden kuori oli helposti hajoavaa turve-biohiiliseosta (kuva 23). Lopulta tämä erä todettiin parhaiten itäneeksi yhden kasvukauden aikana, ja ne ohittivat selvästi istutettujen siementen itävyyden.



Kuva 23. Sorakohteella mäntyä kasvoivat kasvupallojen viereltä kuten muillakin kohteilla (kuva H. Kettunen 2022)

Kuitenkin viimeisimmät itämiset tapahtuivat niin myöhään, etteivät pieniksi jääneet sirkkaimet kovin todennäköisesti selviä tulevan talven yli (kuva 24). Myös II-erän turvepallot, joissa oli erillinen turvekerros kuoren alla, kokivat heräämisen loppukesästä hajottuaan sateissa tarpeeksi. I-erän turvepallot saattoivat olla sisäkerrokseltaan liian kovia sorakohteella käytettäviksi, sillä niiden itäminen jäi kasvukauden aikana alle 10 %:n. Toisaalta istutetut siemenetkään eivät tämän paremmin itäneet yhdessä kasvukaudessa.



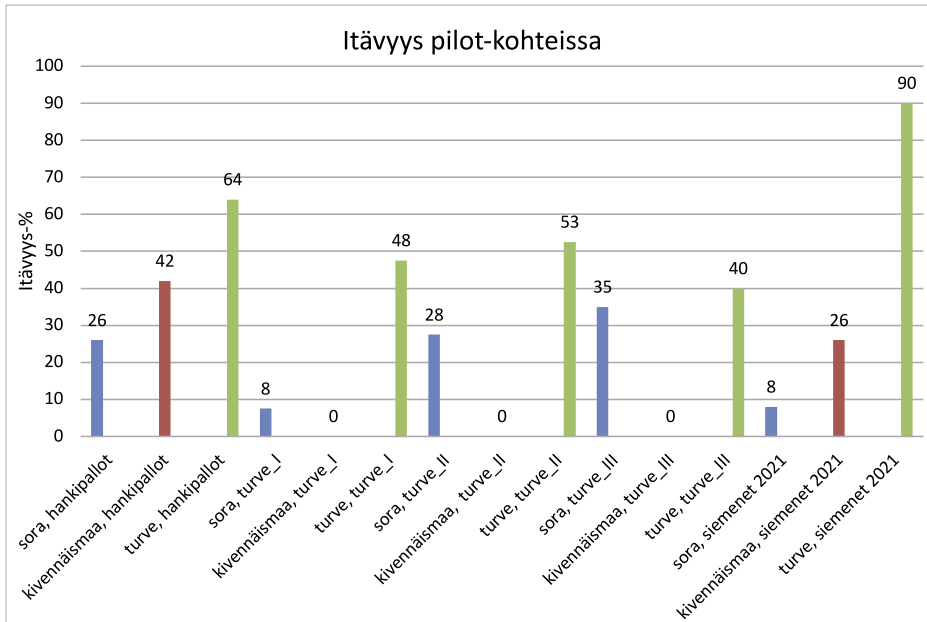
Kuva 24. Sorakohteella havaittiin mäntyjen itämisiä turvepalloista vielä loppusyksystä (kuva H. Kettunen 2022)

Etenkin soranottokohteelta saadut tulokset (kuva 22) osoittavat kasvupallojen olevan potentiaalisesti hyödyllisiä metsittämissä vastaavan kaltaisilla kohteilla, joiden maaperässä ei ole juuri lainkaan orgaanista ainesta. Paljaat männynsiemenet kaipaavat ympärilleen ainesta, joka pidättää sadannasta saatavan kosteuden pidemmäksi aikaa niiden ympärille. Tähän ei pelkkä sora kovin hyvin kykene. Soralla siemenet ovat myös helposti saalistajien ja siemensyöjien armoilla. Kohteen koealoilla havaittiinkin useaan kertaan eläinten kaivelukuoppia ja tassunjälkiä sekä hyönteisten tai nilviäisten tekemiä reikiä niin kasvupalloissa kuin soralla (kuva 25). Lisäksi turvekankaalla havaittiin etanoita kasvupallojen päältä (kuva 25).



Kuva 25. Eläimet ja nilviäiset olivat kiinnostuneita sekä kohteesta että palleista (kuvat H. Kettunen 2021/2022)

Aiempaan NPK-pallojen pilotointiin verrattuna rakeistamalla valmistetuilla palloilla saatiin selvästi lupaavampia tuloksia männyn kasvatuksen osalta (kuva 26 vs. kuva 9). Etenkin aiempuna vuonna haasteellisiksi koetulla sorakohteella saatiin rakeistetuilla kasvupalloilla mäntyjä itämään vähintään yhtä hyvin kuin pelkillä siemenillä.



Kuva 26. Rakeistettujen kasvupallojen pilot-kokeiden lopulliset itävyydet

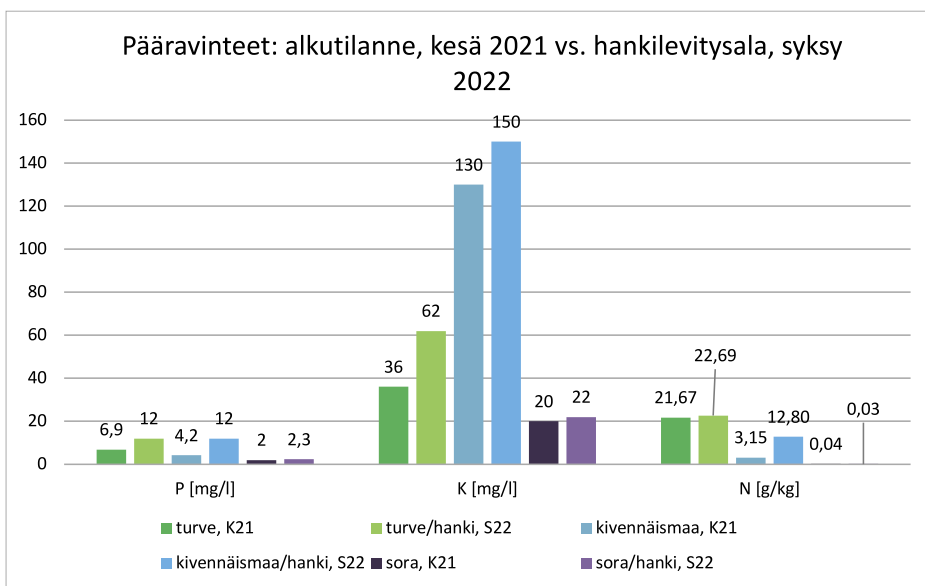
RAKEISTETUILLA KASVUPALLOILLA NÄHTIIN POSITIIVISIA VAIKUTUKSIA MYÖS ERI MAASTOKOHTEIDEN RAVINNEMÄÄRIIN

Hankialojen syksyllä 2022 otetuista maaperänäytteistä saadut analyysitulokset verrattuna koalojen perustamisen yhteydessä otettuihin maanäytteisiin alkukesästä 2021 on esitetty taulukossa 6. Hankikoalaa ei erikseen lannoitettu missään vaiheessa kokeita, eli muutokset maaperässä johtuvat luonnollisista tekijöistä sekä hankipalloista. Merkittävästi suurentuneet ravinnepitoisuudet on merkitty taulukkoon vihreällä ja pienentyneet pitoisuudet punaisella. Stabiileina pysyneitä ravinnemääriä ei ole värjätty.

Taulukko 6. Hankipallojen koealojen maanäytteiden tulokset syksyllä 2022 verrattuna alojen perustamistilanteeseen kesällä 2021 (Hortilab Oy Ab 2021 ja 2022)

Analyysi	Turve K21	Turve S22	Kivennäis- maa K21	Kivennäis- maa S22	Sora K21	Sora S22
Johtoluku [10 x mS/cm]	0,8	1,2	1,3	1,1	< 0,3	< 0,3
pH	4,2	4,3	4,9	4,3	6,1	5,9
Ca [mg/l]	413	656	424	471	67	82
P [mg/l]	6,9	12	4,2	12	2	2,3
K [mg/l]	36	62	130	150	20	22
Mg [mg/l]	110	180	83	130	11	12
S [mg/l]	8,2	10	15	17	7,3	4,5
B [mg/l]	0,2	0,3	0,3	0,3	< 0,2	< 0,2
Cu [mg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Mn [mg/l]	11	9,7	310	120	< 6,0	< 6,0
Zn [mg/l]	1,2	< 1,0	3,6	8,1	< 1,0	< 1,0
NO ₃ -N [mg/l]	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
N [g/kg]	21,7	22,7	3,15	12,8	0,04	0,03
C/N-suhde	22,2	21,6	21,4	23,7	84,4	100
Org. aines [%]	83,1	84,3	11,6	52,3	0,5	0,5
KVK [cmol/l]	14	20	7	16	1	1

Tulosten (kuva 27) perusteella hankipalloilla on ollut pääosin positiivinen vaikutus koealan ravinnetilanteeseen. Soralla ravinteet ovat luultavasti huuhtoutuneet maaperästä, joten pitoisuudet eivät ole juuri muuttuneet alkutilanteeseen verrattuna. Tämä on merkki siitä, että soran kaltaisella kasvualustalla tarvittaisiin myös orgaanista ainesta sitomaan ravinteet kasvien käytettäväksi. Kasvupallot tämän tehtävän toteuttavatkin, mutta niiden tuoma orgaaninen aines ja ravinteet eivät näy analyysituloksissa, koska maanäytteet otettiin koskemattomasta maaperästä koealoilta.

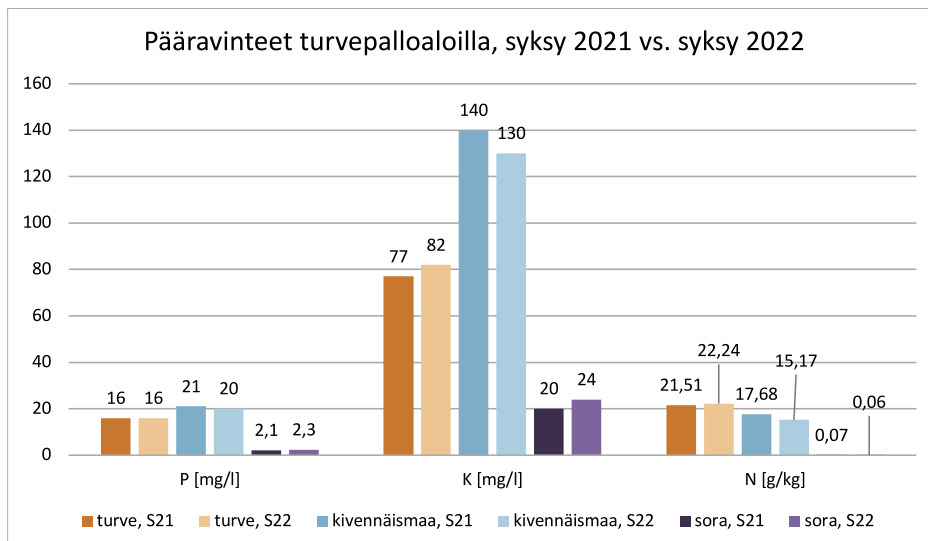


Kuva 27. Hankipallojen vaikutus ravinteisiin koelaloilla

Taulukossa 7 on esitetty lannoittamattomien kasvupalloalojen maaperänäytteen mukaiset tulokset kohteittain syksyiltä 2021 ja syksyiltä 2022. Taulukosta nähdään, kuinka turvepallo ovat kasvukauden aikana vaikuttaneet maaperän ravinnepitoisuuksiin. Jokaisella kohteella maaperässä nähdään pääosin suurempia hivenainemääriä turvepallojen levityksen jälkeen, vaikka pääravinteissa muutos ei ole suurta ollutkaan (kuva 28). Osa maaperään liuenneista ravinteista voi olla myös peräisin koelalla edellisenä vuonna testatuista NPK-palloista, sillä niitä ei poistettu aloilta ennen turvepallojen levitystä, mutta muita lannoitteita koelalle ei lisätty turvepallojen levityksen yhteydessä tai sen jälkeen. Etenkin kalsiumpitoisuudet kohenivat jokaisella kohteella.

Taulukko 7. Turvepallojen koalojen maanäytteiden tulokset syksyllä 2022 verrattuna alojen tilanteeseen syksyllä 2021 (Hortilab Oy Ab 2021 ja 2022)

Analyysi	Turve S21	Turve S22	Kivennäis- maa S21	Kivennäis- maa S22	Sora S21	Sora S22
Johtoluku [10 x mS/cm]	1,0	1,1	1,5	1,8	< 0,3	< 0,3
pH	4,2	4,1	4,6	4,4	5,9	5,8
Ca [mg/l]	446	553	515	693	58	84
P [mg/l]	16	16	21	20	2,1	2,3
K [mg/l]	77	82	140	130	20	24
Mg [mg/l]	150	170	120	140	10	12
S [mg/l]	11	9,5	13	13	8,3	4,6
B [mg/l]	0,2	0,2	0,4	0,6	< 0,2	< 0,2
Cu [mg/l]	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0
Mn [mg/l]	17	26	470	790	< 6,0	< 6,0
Zn [mg/l]	1,5	< 1,0	7,1	12	< 1,0	< 1,0
NO ₃ -N [mg/l]	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
N [g/kg]	21,5	22,2	17,7	15,2	0,07	0,06
C/N-suhde	22,4	22,7	29,2	22,6	41,7	52,9
Org. aines %	83,1	87	88,9	59	0,5	0,6
KVK [cmol/l]	17	24	12	18	1	1



Kuva 28. Turvepallojen aiheuttamat muutokset pääravinteissa koaloilla

Kasvupallojen lannoittava vaikutus kävi konkreettisesti selkeimmin ilmi sorakohteella. Kohteen ympäristössä kasvoi vähäisessä määrin luonnostaan rikkaheinäkasvillisuutta. Kasvupalloet selvästi lisäsivät luonnon kasvillisuuden määrää testialalla suhteessa alaan, jolle levitettiin pelkkiä männynsiemeniä (kuva 29).



Kuva 28. Kasvupalloet (oik.) kiihdyttivät luonnon muun kasvillisuuden viherrystä pelkkiin männynsiementen istutukseen (vas.) verrattuna soranottoalueella (kuvat H. Kettunen 2022)

JOHTOPÄÄTÖKSET ERILAISTEN KASVUPALLOJEN SOVELTUVUUDESTA ERI MAASTOJEN METSITTÄMISEEN JA SUOSITELTAVAT JATKOTOIMENPITEET

Hankkeessa pilotoiduilla biohiilipohjaisilla kasvupalloilla voi sanoa tehtyjen havaintojen perusteella olevan potentiaalia metsittää tehokkaammin vaikeasti metsitettäviä kohde- maastoja. Metsänkasvatuksen kannalta hankkeen haasteena oli suhteellisen lyhyt aika, jona pilotointeja päästiin toteuttamaan. Testikasvina käytetty mänty on hidaskasvuinen. Sen todettiin olevan kasvupallon valmistuksen kannalta haasteellinen valinta, sillä se ei pystynyt itämään kovin syvältä kasvupallosta vaan vaati pallon hajoamista riittävästi, jotta sen sirkkajuuri kykeni läpäisemään pallon. Männynsiemenet voivat toisaalta pysyä pitkään itämiskykyisinä uinuen maastossa useita vuosia, kunnes ne alkavat itää. Voi siis olla, että vuoden kuluttua hankkeen päättymisestä koealoilla olisi nähtävillä uusia itäneitä mäntyjä. Kasvupallojen lannoitevaikutuksen arviointi mäntyjen kasvuun vaatisi kuitenkin useamman vuoden seurantaa, eikä esimerkiksi neulasanalyysien teettäminen kasvupalloista itäneille mänyille ole mahdollista moneen vuoteen.

Rakeistamalla valmistetut kasvupalloerät sallivat männynsiementen itämisen huomattavasti paremmin kuin aiempina vuonna testatut käsin valmistetut NPK-pallot. Kasvupallot vaativat yhä kehitystyötä, ja niiden reseptiikan optimointi levitettävän kohteen mukaan voisi olla tulevaisuudessa tarkemman tutkimuksen kohteena. Kasvupalloissa olisi mielekästä käyttää paikallisia, luonnollisia raaka-aineita, mutta erilaisten hydrogeelien käytön tarkempi tutkiminen osana reseptiä voisi olla siementen itävyyden maksimoimiseksi myös suositeltavaa. Suomen ilmasto-olosuhteissa näyttäisi olevan hyödyksi levittää puiden siemeniä sisältävät kasvupallot talviseen aikaan, kun maasto on vielä lumen peitossa. Biohiilipohjaiset, tummat kasvupallot edistävät lumen sulamista ympäriltään kevään aikana, ja toisaalta ne sitovat sulamisvettä itseensä hajoten keväällä helpommin. Tällöin ne suovat siemenille hyvän mahdollisuuden itää jo kasvukauden alkaessa, ja kasvit ehtivät varttua kasvukauden aikana tarpeeksi selvittääkseen ensimmäisen talven yli.

Kasvupalloilla olisi mielekästä olla itäneille taimille myös lannoittava vaikutus, mutta liian suuret lannoitepitoisuudet voivat heikentää mäntyjen kasvua. Liiallisella lannoitteen käytöllä kasvualustan suolapitoisuus nousee, mikä johtaa kasvin vedensaannin vaikeutumiseen ja kasvun hidastumiseen (Rikala 2012). Hankkeen kasvukauden 2021 pilotoinnin kohteena olleiden kasvupallojen käyttämä NPK-liuos myös vaikutti tekevän palloista kovempia kuin niistä, joissa lannoitetta ei käytetty, mikä myös heikensi itävyyttä osaltaan. Ravinteiden lisäys kasvupalloon hienojakeisella kompostiaineksella vaikutti lupaavammalta kuin väkevän NPK-liuoksen käyttö. Joka tapauksessa kasvupallojen sisältämä biohiili ainakin teoriassa pidättää palloon lisätyt ravinteet ja vapauttaa niitä ajan saatossa hitaasti kasvin saataville sen sijaan, että ne huuhtoutuvat ensimmäisten sateiden jälkeen syvälle maaperään.

Käyttämällä turvetta kasvupallojen raaka-aineena saavutettiin palloissa rakenne, joka edisti männyn taimettumista. Vuoden 2021 koepalloissa ei turvetta käytetty. Vuoden 2021 kasvukauden aikana pallojen rakenteessa ei tapahtunut juurikaan muutosta kuten ei myöskään itämistä. Tämä viitanee liian tiiviiseen rakenteeseen, joka on mahdollisesti estänyt myös pallon tasaista kastumista, jolloin siemen ei ole saanut tarvitsemaansa kosteutta tai happea.

Maaperän kosteudella on suuri merkitys siemenien itämiselle. Levittämällä pallot hangelle saadaan kevään kaikki edut käytettyä hyväksi, jolloin siemenet saavat riittävää kosteutta ja lämpöä vaativissakin kohteissa, jos vain on ollut luminen talvi. Tämä noudattelee männyn luontaista tapaa uudistua. Männynsiemenet karisevat kevättalvella hangille. Osa kasvupalloista voi hyvistekin olosuhteista huolimatta jäädä itämättä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteivätkö siemenet palloissa voisi itää toisena tai kolmantena vuotena. Silloin puhutaan ns. jälki-itämisestä, jota ilmenee esimerkiksi kuivan kesän jälkeen (Helenius 2013). Sorakohteessa itämistä hidasti todennäköisesti maaperän lisäksi suorakaiteen muotoinen koeala itse, joka oli muodostettu noin 30 cm korkeammalle ympäröivästä sora-alueesta (kuva 28). Korotuksen vuoksi maa-alue kuivui sateen jälkeen todennäköisesti nopeammin kuin sitä ympäröivä alue.



Kuva 29. Sorakohteelle perustettu koeala oli reilusti ympäröivää maata korkeammalla sorapedillä, ja sadevesi huuhtoutui helposti sen läpi (kuva H. Kettunen 2021)

Kasvupalloilla on myös mahdollista suojata siemeniä pelkkää maahan upottamista paremmin. Kokonaan oma aiheensa olisikin kehittää kasvupalloreseptiikkaa lisäämällä niihin karkoteainetta, jota tietyillä levityskohteilla selvästi tarvitaan (kuva 25) niin suurempien eläinten kuin hyönteistenkin karkottamiseksi. Karkoteaineena voisi mahdollisesti hyödyntää kasvupalloissa käytettävän biohiilen pyrolyysissä syntyviä sivutisleitä, jolloin edistettäisiin myös kiertotalouden toteutumista. Pyrolyysitisleiden karkotevaikutuksista on lupaavia tuloksia esimerkiksi Hagnerin ym. (2020) tutkimuksessa, jossa tisleiden 10-prosenttisella laimennuksella saavutettiin kaupallista karkotetta vastaavia tuloksia. Toistaiseksi pyrolyysitisleiden kaupallistaminen on kuitenkin ollut haasteellista.

Vaikka pilot-kohteiden aktiivinen seuranta päättyi hankkeen myötä vuoden 2022 lopulla, jätettiin kohteet ennalleen mukana olleiden yritysten suorittamaa jatkoseurantaa varten. Kohteilla tullaan vierailemaan vuosittain ja keräämään epävirallisempia havaintoja niillä kasvavista kasveista. Näin hankkeessa mukana olleet yritykset saavat pilotoinnin ja kehitettävien kasvupallojen vaikutuksista männyn itämiselle ja kasvulle lisätietoa jatkossakin. Kasvupallot eivät siis valitettavasti kykene eliminoimaan sitä faktaa, että metsänkasvatus vaatii jatkossakin kärsivällisyyttä.

LÄHTEET

Hagner, M., Tiilikkala, K., Lindqvist, I., Niemelä, K., Wikberg, H., Källi, A. & Rasa, K. 2020. Performance of Liquids from Slow Pyrolysis and Hydrothermal Carbonization in Plant Protection. *Waste and Biomass Valorization* (2020) 11:1005–1016. PDF-artikkeli. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00545-1> [viitattu 15.11.2022]

Helenius, P. 2013. Pullosta vai puusta? Männyn siemensyntyinen taimettuminen kivennäismaan uudistusaloilla. *Metla. Taimiuutiset* 3/2013. ISSN 2242-9395 (verkkójulkaisu). Saatavissa: https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/534235/Taimiuutiset_3-2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 21.11.2022]

Hortilab Oy Ab 2021. Maanäytteiden analyysitulokset. Saapunut 01.07.2021.

Hortilab Oy Ab 2021. Maanäytteiden analyysitulokset. Saapunut 02.11.2021.

Hortilab Oy Ab 2022. Maanäytteiden analyysitulokset. Saapunut 14.10.2022.

Metsänhoidon suositukset. 2021. Lannoitus. Www-artikkeli. Saatavissa: <https://metsanhoidonsuosituks.fi/fi/toimenpiteet/lannoitus/toteutus> [viitattu 10.11.2022]

Nygren, M. 2003. Metsäpuiden siemenopas. Metsäntutkimuslaitos. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 882. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/521516> [viitattu 21.11.2022]

Rikala, R. 2012. Metsäpuiden paakkutaimien kasvatusopas. Metsäntutkimuslaitos. Metsäntutkimuslaitoksen erillisjulkaisu. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2359-0> [viitattu 11.11.2022]

DMS-TEKNOLOGIAN HYÖDYNTÄMINEN BIOKAASUN SILOKSAANIEN TUTKIMISESSA

Henri Kettunen & Lauri Virkkunen & Hannu Salmi

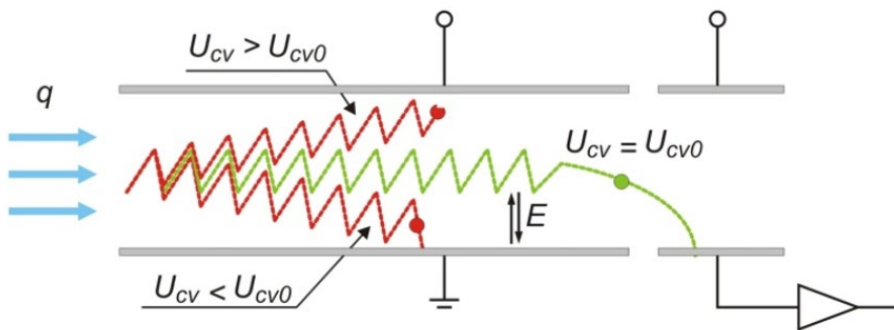
BioGo-hankkeessa oli tavoitteena tutkia bio- ja kaatopaikkakaasujen erilaisten haitta-aineiden suodatusta biohiilen avulla. Tarkemmin haitta-aineiksi valikoitiin biokaasuissa viime aikoina mielenkiintoiseksi tutkimuskohteeksi todetut siloksaaniyhdisteet. Ne voivat tarpeeksi suurina pitoisuuksina aiheuttaa ongelmia biokaasun käytössä rikkomalla laitteistoja biokaasun tuotantolaitoksilla tai ainakin lisäämällä niiden huoltotarvetta. Siloksaanienv havainnointi kaasusta vaatii kuitenkin siihen kykeneviä mittausteknisiä ratkaisuja. Myös VOC-näytteenotolla saadaan hyvin pienet haitta-aineiden pitoisuudet kaasusta selvitettyä, mutta se on suhteellisen kallista ja aikaa vievää, eikä esimerkiksi biokaasua tuottava laitos voi pelkällä näytteenotolla seurata hetkellisiä pitoisuusvaihteluita jatkuvatoimisesti. Hankkeessa biohiilen suodatustehokkuuden tutkimisen lisäksi testattiin DMS-teknologiaan perustuvan kaasuanalysointilaitteen käyttöä kaasun sisältämien siloksaanienv havaittavuuden osalta.

SILOKSAANEJA TUTKITTIIIN DMS-TEKNOLOGIALLA TOIMIVALLA IONVISION-KAASUANALYSAATTORILLA

DMS-teknologia (liikkuvuuserospektrometria, differential ion mobility spectrometry, myös FAIMS, field asymmetric ion mobility spectrometry) perustuu toimintaperiaatteeltaan läheisesti IMS-teknologiaan (ioniliikkuvuuspektrometria, ion mobility spectrometry). Siinä kaasuvirran komponentit ensin ionisoidaan ja tämän jälkeen johdetaan drift-putkeen, jossa ne erottuvat sähkökentässä liikkuvuusominaisuuksiensa mukaan, eli toiset liikkuvat drift-putken jälkeiselle detektorille nopeammin (aikaisemmin) ja toiset hitaammin (myöhemmin). DMS-teknologiassa IMS:n toimintaperiaatetta sovelletaan siten, että sähkökenttä muodostetaan putken sijasta kahden tasoelektrodin väliin ja siitä tehdään amplitudiltaan epäsymmetrisesti oskilloiva kanttimuotoisella aaltopulssituksella. (Salmi 2021; Olfactomics 2020.)

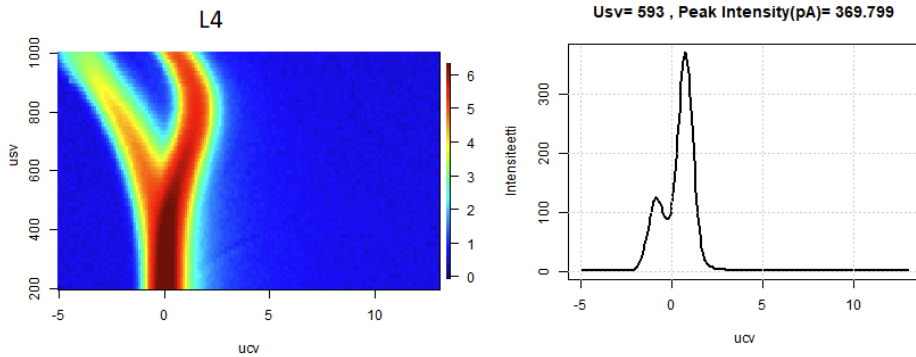
Ionien liikkuvuus elektrodien välissä on oskilloivan sähkökentän voimakkuudesta ja suunnasta riippuen välillä pieni ja välillä suuri, jolloin ionien nettoliikesuunta vaihtelee elektrodien välissä edetessään. Tietyillä sähkökentän arvoilla ionien nettoliike ajaa ne kosketuksiin jomman kumman elektrodin kanssa, jolloin ne neutraloituvat ja poistuvat näytevirrasta eli suodattuvat, eivätkä ne tällöin vaikuta mittaustulokseen. Kun toiseen elektrodiin syötetään

sopiva offset-jännite oskilloivan sähkökentän lisäksi, voidaan ionien nettoliike nollata. Tällöin ne läpäisevät DMS-erottimen ja jatkavat matkaansa detektorille, jolloin niiden muodostama virta voidaan mitata. DMS:n toimintaperiaate on kuvattu yksinkertaistaen kummassakin edellä mainitussa tapauksessa kuvassa 1. Epäsymmetrisen sähkökentän aiheuttavaa jännitettä kutsutaan separaatiojännitteeksi (U_{sv}), ja sen arvo vaihtelee yleensä välillä 0–1000 V. Ionien kulkuun vaikuttavaa offset-jännitettä kutsutaan kompensatiojännitteeksi (U_{cv}), ja sen arvo vaihtelee yleensä välillä –13–13 V. Detektorilla ionit kerätään käyttäen pientä staattista jännitettä (V_{bias}), jonka arvo on tyypillisesti –3,8–3,8 V. Suurempi määrä detektorille päätyneitä ioneja aiheuttaa suuremman intensiteetin eli varauksen, joka ilmaistaan pikoampeereina (pA). Mittaustilanteessa DMS-laitteelle ohjelmoidaan halutulla resoluutiolla askellus eli skanni, joka käy läpi erilaiset separaatio- ja kompensatiojännitteiden arvot samalla kun näytekaasu kulkee laitteen läpi. Tästä muodostuu niin sanottu dispersiokuva. (Olfactomics 2020.)



Kuva 1. Periaatekuva DMS-erottimen toiminnasta (kuva mukailten Olfactomics 2020)

Ohjelmoidun skannin tulos esitetään kolmiulotteisena dispersiokuvassa, jossa x-akselina käytetään kompensatiojännitettä ja y-akselina separaatiojännitettä. Koska kullakin separaatio- ja kompensatiojännitteiden yhdistelmällä muodostuu tietty detektorilla havaittava jännite, muodostuu z-akselille intensiteetti, joka esitetään dispersiokuvassa värillisenä. Dispersiokuvasta voidaan esittää myös kaksiulotteisia leikkauksia tietyiltä separaatiojännitteiden arvoilta, jolloin tietyillä kompensatiojännitteiden arvoilla esiintyvien piikkien avulla voidaan määrittää esiintyvien yhdisteiden pitoisuuksia. Kuvassa 2 on esitetty esimerkkinä L4-siloksaanin dispersio- ja leikkauskuvat.



Kuva 2. Dispersiokuva ja U_{sv} -alueelta 593 V otettu leikkauskuva L4-siloksaanista skannattuna DMS-laitteella

Olfactomics Oy:n suunnittelema ja valmistama Ionvision-kaasuanalysointilaitteisto perustuu DMS-erotusteknologian käyttöön. Laitteessa on sisään tulevan näytteen liittäminen lisäksi kiertoilmaliitäntä, joka mahdollistaa laitteen jo läpäisseen näytekaasun käytön laimennusilmana uudelle näytteelle. Ennen kuin kierrätettävä kaasu voi toimia laimennusilmana, se suodatetaan puhtaaksi kemiallisista yhdisteistä kiertoilmasuodattimessa. Samalla kaasusta poistuu myös kosteutta. Laimennussuhdetta voidaan muuttaa pumppujen tehoa säätämällä. Analysointilaitteissa on erilliset lämmittimet niin sisään tulevalle näytteelle kuin kiertoilmalle. Laitetta ohjataan joko etupaneelin kosketusnäytöstä tai sen voi liittää Ethernet-yhteydellä tietokoneeseen tai langattomaan reitittimeen, jolloin laitteen ohjaus toimii laitteen IP-osoitteen kautta internetiselaimessa. Mittausdata tallentuu json-tiedostomuodossa, ja sen käsittely ja analysointi suoritetaan esimerkiksi Matlab- tai R-ohjelmistoilla.

SILOKSAANIYHDISTEET JA NIIDEN ONGELMALLISUUS BIOKAASUISSA

Siloksaanit ovat polymeerisiä yhdisteitä, jotka muodostuvat vuorottelevasta pii-happiketjusta. Tämä ketju voi olla joko suora (L-siloksaanit) tai syklinen (D-siloksaanit) (Condorchem Envitech 2022). Lisäksi on olemassa muita ominaisuuksiltaan läheisiä ja rakenteeltaan haaroittuneita piiyhdisteitä, kuten tetrametyylisilaani (TMS) ja trimetyylisilanololi (SiOH), joita tässä hankkeessa myös tarkasteltiin.

Siloksaanit ovat ihmistoiminnasta peräisin olevia yhdisteitä. Niitä hyödynnetään erilaisissa hygieni- ja hoitotuotteissa sekä pesuaineissa esimerkiksi tuotteiden viskositeetin säätämiseen. Käytön jälkeen suurin osa näistä yhdisteistä haihtuu ilmakehään hajoten hiilidioksidiksi, silikaksi (SiO_2) ja vedeksi, mutta osa niistä päätyy kaatopaikoille ja osa kertyy vedenkäsittelylaitoksien lietteeseen. (Condorchem Envitech 2022.)

Ongelmallisiksi siloksaanit muodostuvat biokaasuissa energiantuotannon kannalta, sillä niiden palamistuotteet aiheuttavat kaasumootoreihin ja -turbiineihin vaurioita. Poltossa siloksaaneista muodostuu silikayhdisteitä, jotka tarttuvat ja muodostavat lasimaisen kerroksen moottorin sisäosien, kuten sylinterikannen, sytytystulppien ja venttiilien pinnoille heikentäen moottorin tehoa ja aiheuttaen ennen aikaista kulumista sekä ylimääräistä huollon tarvetta. Pahimmillaan koko laitteisto voi rikkoutua liiallisen kulumisen seurauksena. Mitä suuremmalla kierrosnopeudella laitteistoa käytetään, sitä herkempi se on siloksaaniyhdisteistä muodostuvista jäämistä aiheutuville tasapainohäiriöille sen liikkuvissa osissa. Lasittumat on mahdollista poistaa vain manuaalisesti hankaamalla, mikä vaatii moottorin sylinterikannen purkamista. (Condorchem Envitech 2022; Arnold 2009.)

Hyväksyttävä siloksaanipitoisuus käytettävässä biokaasussa voi vaihdella erilaisissa energiantuottolaitteissa valmistajien antamien ohjeistusten mukaisesti. Moottorien päästöihin siloksaanit eivät suoraan vaikuta, mutta niiden aiheuttaman kulumisen johdosta myös moottoriöljyn kulutus saattaa lisääntyä, ja sitä saattaa herkemmin päätyä sylintereihin palamaan, mikä voi lisätä SO_x- ja CO-päästöjä. (Condorchem Envitech 2022; Arnold 2009.)

Biokaasujen siloksaaneja ei ole pidetty merkittävänä ympäristöriskinä, vaan niiden puhdistusta on pidetty tarpeellisena pikemminkin vain taloudellisesta näkökulmasta. Tietyillä siloksaaneilla voi kuitenkin olla suoria tai epäsuoria toksisia vaikutuksia biologisiin prosesseihin. Siloksaaneja ei ole aikaisemmin pidetty ihmisen terveydelle vaarallisina, minkä osoittaa myös niiden käyttömäärä kulutustuotteissa. Kuitenkin D4, D5 ja D6 on muutama vuosi sitten todettu SVHC-aineiksi eli erittäin suurta huolta aiheuttaviksi yhdisteiksi, sillä ne ovat hitaasti hajoavia ja biokertyviä. Niiden pitkän aikavälin vaikutuksia on vaikea ennustaa, ja niille altistumista on vaikea estää niiden levitessä ympäristöön. Tämän johdosta niille on asetettu rajoitusehdotuksia ja niiden korvaamista etenkin kosmetiikassa on suositeltu muilla vähemmän riskialttiilla yhdisteillä. (Arnold 2009; Leinonen 2021.)

RAAKAKAASU PUHDISTETAAN YLEENSÄ AKTIIVIIHILISUODATUKSELLE

Biokaasusta siloksaaneja voidaan poistaa suodattamalla, kondensoimalla tai käyttämällä näiden yhdistelmää. Raakakaasua voidaan myös pestä eli absorboida haitta-aineet tiettyyn kemikaaliin tai suodattaa membraaniteknologialla, jolloin kaasu johdetaan usean läpäisevän kalvon läpi, jotka pidättävät kaasusta haitta-aineet. (Integrated Flow Solutions 2021.)

Aktiivihilisuodatus soveltuu erityisesti hyvin alhaisia siloksaanipitoisuuksia vaativille käyttökohteille, kuten mikroturbiineille ja polttokennoille. Raakakaasun kosteus ja lämpötila vaikuttavat kuitenkin suuresti hiilen suodatustehokkuuteen ja saturoitumiseen vedellä, joten tätä tekniikkaa hyödyntäessä täytyy kaasu kuivata ennen suodatusvaihetta. Aktiivihilisuodatus ei kuitenkaan ole selektiivinen siloksaanien suhteen, vaan se kerää myös muita

yhdisteitä itseensä, mikä vaikuttaa suodattimen käyttöikänsä. Tietty raakakaasun sisältämät ja biokaasun käyttökohteille muutoin harmittomat VOC-yhdisteet, kuten asetaatit, alkoholit ja ketonit, voivat aiheuttaa siloksaaniyhdisteiden irtoamista suodatusmateriaalista takaisin puhdistettuun kaasuun. Saturoitunut suodatinmateriaali täytyy ajoittain vaihtaa uuteen tai regeneroida, jolloin kaasuntuotantolaitoksen täytyy arvioida, onko taloudellisesti kannattavampaa sijoittaa regenerointilaitteistoon. Tällöin aktiivihiihluodattimia on hyvä olla kaksi rinnakkain, jolloin toiseen voidaan ohjata puhdistettava raakakaasu ja toiselle suoritetaan samalla regeneroituminen. Siinä aktiivihiihi kuivataan ja kuumennetaan yli 500 °C:een, jolloin haihtuvat yhdisteet poistuvat siitä. Tämän jälkeen hiihi voidaan aktivoida uudelleen vesihöyryllä. (Arnold 2009; Integrated Flow Solutions 2021; Feeco International 2022.)

Nyamukamban ym. (2020) laatiman selvityksen mukaan aktiivihiihen kyvystä suodattaa siloksaaneja biokaasusta on tehty useita tutkimuksia, joiden tulokset ovat olleet positiivisia. Syklisten siloksaanien poiston on todettu olevan aktiivihiihellä tehokkaampaa kuin lineaaristen siloksaanien. Tämä johtuu aiemmin hiihen huokosiin kiinnittyneiden kevyempien lineaaristen siloksaanien vapautumisesta hiihen huokosista ja niiden muutoksista hiihen pinnalla ajan myötä. Aktiivihiihen on todettu pystyvän sitomaan siloksaaneja 5 000–15 000 mg / kg hiihtä.

DMS-LAITTEELLE LUOTIIN PUHTAISTA SILOKSAANEISTA TUNNISTUSKIRJASTO

Hankitulle DMS-laitteelle luotiin osana BioGo-hanketta tunnistuskirjasto siloksaaneilla L2, L3, L4, D3, D4, ja D5 sekä tetrametyylisilaanilla (TMS) ja trimetyylisilanolilla (SiOH). Kirjastoa käytetään tietokoneella RStudio-ohjelman kautta omana skriptinä, jossa annettua mittausaineistoa verrataan tunnettuihin aineisiin kirjastomittauksissa. Kirjasto toimii vain yksittäisen siloksaanin läsnä ollessa, eli se ei sovellu seoskaasuille.

Puhtaiden siloksaanien syöttämiseksi DMS-laitteelle rakennettiin laboratorioon koejärjestely, jossa nestemäisiä siloksaaneja haihdutettiin osaksi puhdasta tuloilmaa. Samalla koejärjestely toimi alustavana biohiihluodattimen testikoejärjestelynä. Koejärjestelyssä huoneilma kulki ensin u-putkeen lisätyn silikageelin läpi, joka pidatti ilmasta kosteutta. Tämän jälkeen ilma kulkeutui aktiivihiihluodatinpatruunan läpi. Sen tehtävä oli pidättää mahdolliset signaalia haittaavat vierasaineet ja hiukkaset ilmasta. Seuraavaksi puhdas ja kuivattu ilma ajettiin nestemäistä siloksaania sisältävän kaasunpesupullon läpi. Siloksaani, joka oli asetettu kaasunpesupullossa päästä leikattuun pipettiin, diffundoitui pullon läpi kulkevan kaasuvirtauksen sekaan. Tästä kaasuvirtaus johdettiin DMS-laitteelle 0,45 µm:n PTFE:stä valmistetun membraanisuodattimen läpi, jonka tarkoituksena oli estää partikkelien pääsy laitteelle. Vaihtoehtoisesti kaasuvirtaus voitiin koejärjestelyssä ennen laitteelle ajoa ohjata kulkemaan tutkittavan hiihen läpi. Hiihi oli asetettu omaan kaasunpesupullon. Hiihluodatinlinjassa käytettiin 5 µm:n PTFE-esisuodatinta pidättämään mahdollisesti

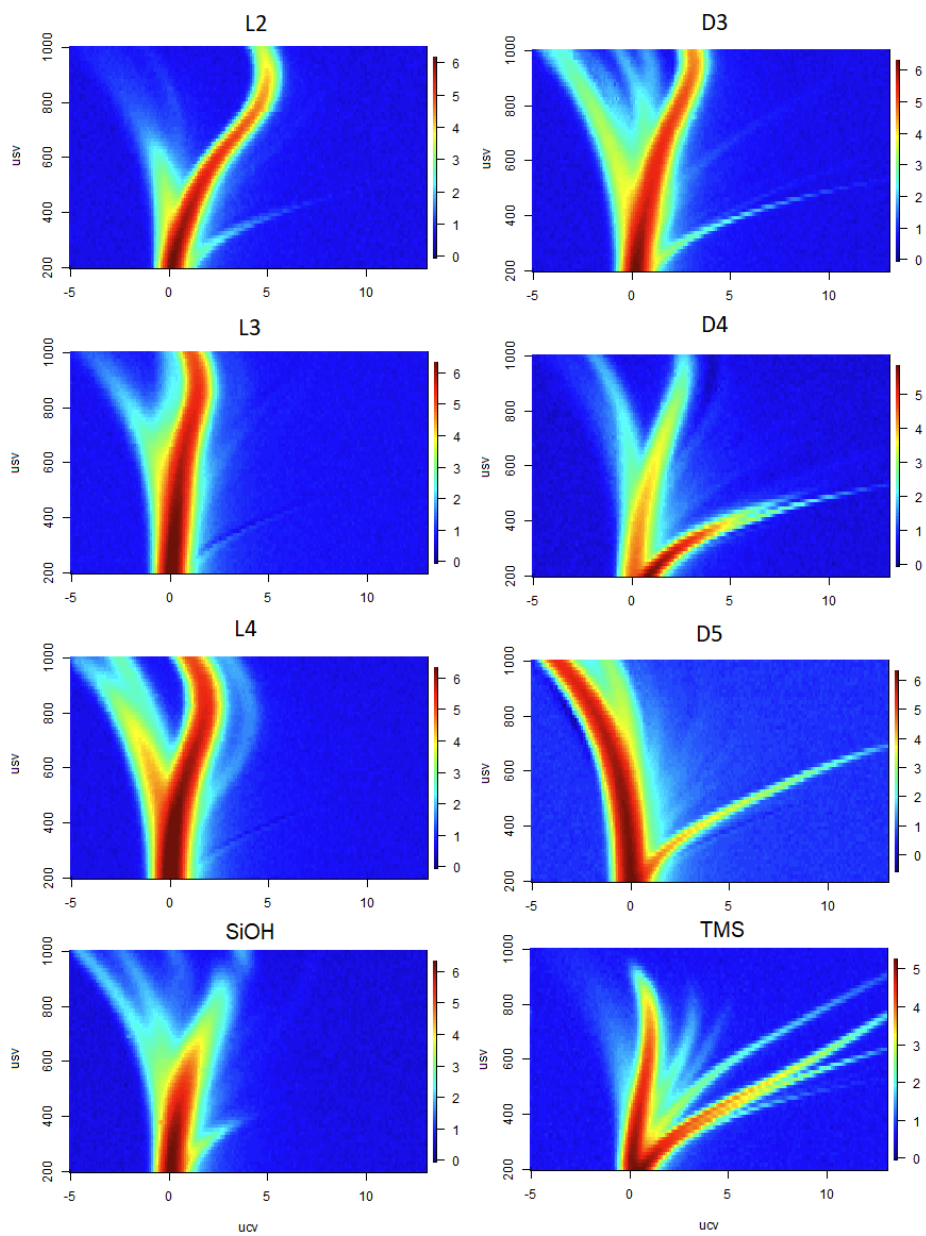
hiilestä irtoavaa pölyä. Koejärjestelyssä oli myös valittavissa kolmas reitti eli nollanäytereitti, jossa puhdistettu ilma kulki suoraan laitteelle. Koejärjestely on esitetty kuvassa 3. U-putkea ja kaasunpesupulloja lukuun ottamatta kaikki koejärjestelyn liittimet ja osat on valmistettu PTFE:stä, jotta niistä ei irtoaisi kaasuun ylimääräisiä yhdisteitä ja jotta siloksaanit eivät tarttuisi niiden pinnoille.



Kuva 3. Laboratorion koejärjestely, jossa selvitetään biohiilen suodatuskykyä sekä siloksaanien syöttöä osaksi kaasuvirtaa (kuva H. Kettunen 2022)

Ennen siloksaanien syöttöä koejärjestelyn ja laitteen sisäinen puhtaus varmistettiin muuttamalla nollanäytemittauksella. Tutkittavaa siloksaania lisättiin 500 μ l kaasunpesupulloon haihtumaan. Laitteella suoritettiin kolme peräkkäistä mittausta siloksaanipipetin ollessa kaasunpesupullossa, ja tämän jälkeen se poistettiin sieltä. Tämän jälkeen mittauksia jatkettiin vielä yhteensä 30 kappaleeseen.

Kustakin siloksaanista tehtiin myös 1/100-laimennokset metanoliin, aineeseen, johon siloksaanit liukenevat ja joka ei haitannut siloksaanien muodostamia tunnistussignaaleja DMS-laitteella. Laimennoksista tehtiin 20 mittauksen sarja. Näistä 30 ja 20 mittausarjasta muodostettiin kullekin siloksaanille yhteensä 50 pisteen kirjasto, jossa siloksaanin antama intensiteetti vaihtelee suuresta lähes olemattomaan signaaliin. Kuvassa 4 on esitetty, kuinka puhtaat L- ja D-siloksaanit sekä SiOH ja TMS näkyvät DMS-laitteen muodostamassa positiivisten ionien dispersiokuvassa suurilla intensiteeteillä.



Kuva 4. L2, L3, L4, D3, D4 ja D5-siloksaanit sekä SiOH ja TMS dispersiokuvina esitettynä

Seuraavassa vaiheessa testattiin analysaattorin kykyä tunnistaa yksittäiset siloksaanit kaasuvirrasta tunnistekirjaston avulla. Tätä varten jokaisesta siloksaanista tehtiin oma 20 mittauksen sarja, joiden dataa verrattiin luotua tunnistekirjastoa vasten. Tunnistuksessa hyödynnettiin sLDA-luokittelua, jonka käytön mahdollisti Olfactomics Oy:n tätä varten RStudio-ohjelmaan kirjoittama skripti. Tunnistusten onnistuminen yhdistekohtaisesti on esitetty taulukossa 1. Ainoastaan SiOH ja D5 saavuttivat 20 testipisteen perusteella täydellisen tunnistuksen. Erityisen heikosti tunnistuskirjasto toimi L4-siloksaanin osalta, jolla vain 15 % tunnistuksista onnistui. Tunnistuskokeen perusteella siloksaanikirjasto ei toimi kovin luotettavasti, eli se vaatisi lisäpisteitä eri olosuhteissa kustakin siloksaanista. Tässä kokeessa kukin siloksaani syötettiin huoneenlämmössä ilman lämpötilan tarkempaa hallintaa, ja sisälämpötila laboratorioissa on hellekesän aikana voinut vaihdella useita asteita. Tällä voi olla vaikutusta siihen, kuinka yhdisteet DMS-laitteella ja sen myötä luodussa kirjastossa ilmenevät. Laitteen herkkyyden vuoksi jatkossa vastaavat kirjastot tulisi luoda hyvin tarkkaan säädetyissä lämpötila- ja kosteusolosuhteissa.

Taulukko 1. Kirjaston tunnistuksen arviointia 20 testipisteen avulla

Testipisteet (20 kpl / näyte)	Kirjastolla tehty onnistunut tunnistus
SiOH	100 %
TMS	60 %
D3	40 %
D4	45 %
D5	100 %
L2	40 %
L3	80 %
L4	15 %
Nollanäyte	80 %
Keskiarvo	62 %

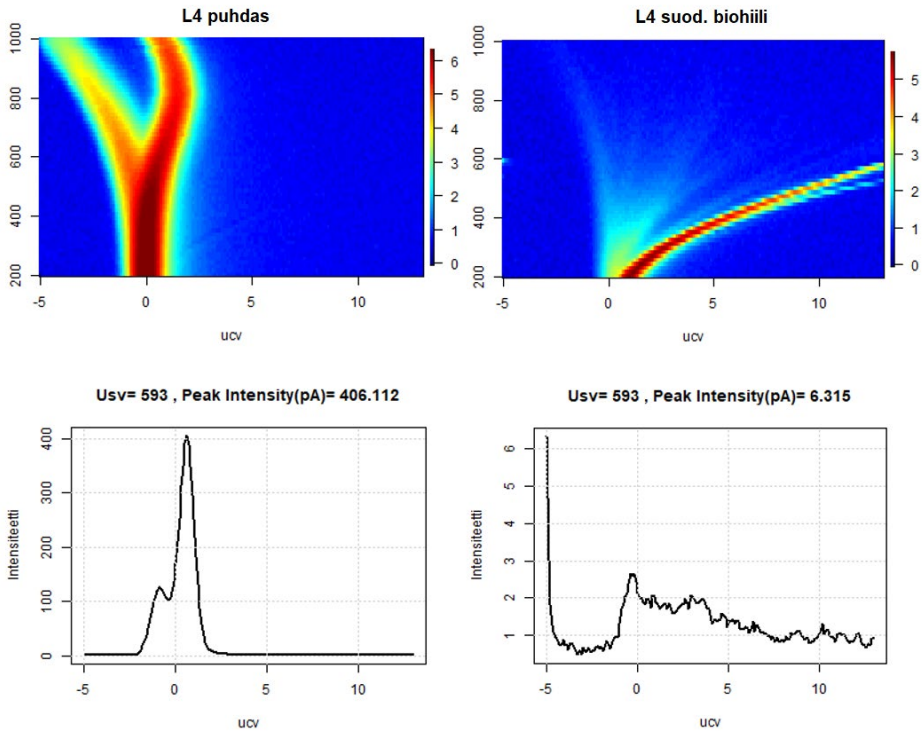
ALUSTAVAT MITTAUKSET OSOITTIVAT BIOHIILELLÄ OLEVAN KYKYÄ SUODATTAA SILOKSAANEJA KAASUSTA

Kokeissa käytetty biohiili oli Mayt Oy:n panostoimisella retortilla hiillettyä Vapon PE-FC-sertifioitua puupellettiä. Raaka-aineina Vapon (2022) pelleteissä käytetään sahanpuurua, kutterilastua sekä muita puunjalostuksen sivutuotteita, energiapuuta ja rankapuuta. Halkaisijaltaan pelletit olivat Vapon puupelletin laatukriteerien (2019) mukaisesti noin 8 mm, ja pituus oli 3,15–40 mm. Kaasupesupulloon asetettiin 48 g biohiiltä, jonka läpi siloksaanikaasunäyte johdettiin. Biohiili vaihdettiin uuteen jokaisen yksittäisen yhdisteen koemittauksen jälkeen. Siloksaanipanos kokeissa oli 500 µl / tutkittava aine lukuun ottamatta kiinteää siloksaania D3, jota kokeessa käytettiin 500 µg. Vapaasti diffundoituva siloksaani ohjattiin koejärjestelyssä biohiilisuodattimen läpi ja siitä DMS-laitteelle. Suodatusmittauksia tehtiin 30 minuutin aikana peräkkäinen sarja, ja tämän jälkeen tehtiin yksi mittaus joka viides minuutti, kunnes aikaa oli yhteensä kulunut noin 70 minuuttia. Taulukossa 2 on esitetty eri siloksaaneista mitatut suurimpien havaittujen piikkien intensiteettien keskiarvot suodatuksen jälkeen ja verrattu niitä ennen mittaussarjaa mitattuihin nollanäytteisiin eli tausta-arvoihin. Intensiteetit ovat DMS-mittausdatan separaatiojännitealueelta 593 V.

Taulukko 2. Siloksaanien suodattimet biohiilellä

Siloksaani	Taustan intensiteetti, ka [pA]	Suodatuksen intensiteetti, ka [pA]	Suodatus-Tausta-erotus [pA]
SiOH	1,975	3,248	1,272
TMS	5,546	4,065	-1,481
D3	5,379	4,205	-1,174
D4	2,002	3,326	1,324
D5	6,818	4,958	-1,860
L2	7,288	2,311	-4,978
L3	3,761	5,339	1,578
L4	7,029	4,299	-2,730

Suodatustuloksia pidetään onnistuneina. Tutkittavalla biohiilellä havaittiin selvästi olevan kykyä suodattaa siloksaaneja sen läpi virtaavasta kaasusta, sillä puhtaisten siloksaanien intensiteetti-peakit olivat käytetyllä separaatiojännitteellä yleensä sadoissa pikoampeereissa. Esimerkikkuvat puhtaasta L4-siloksaanista ja suurin mitattu signaali biohiilen läpi ajatusta L4-siloksaanista on esitetty kuvassa 5 käyttäen leikkauskuvissa Usv-alueelta 593 V (biohiilisuodatuskuvassa oikeaan laitaan taivuttava haara on vesipiikki, joka muodostuu käytännössä kaikkiin nollamittauksiinkin).



Kuva 5. L4 suodattamatta (vas.) ja L4 biohiilellä suodatettuna (oik.)

Pelkästään intensiteettien perusteella ei kuitenkaan voida sanoa mitään kaasussa ilmenevistä pitoisuuksista, eli tulosten perusteella ei voida sanoa, pidättäkö biohiili yhdisteen täydellisesti. Yhdisteiden pitoisuuden määrittäminen DMS:n datasta vaatii vielä kehitystyötä sekä laiteinvestointeja, jotta yhdiste voidaan syöttää laitteelle hyvin tarkasti kontrolloiduissa olosuhteissa ja tämän myötä suorittaa kalibrointi yksittäisille yhdisteille niiden antaman signaalien perusteella.

LÄHTEET

Arnold, M. 2009. Reduction and monitoring of biogas trace compounds. Pdf-dokumentti. Espoo: VTT Tiedotteita – Research Notes 2496, 12–19. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2009/T2496.pdf> [viitattu 21.10.2022]

Condorchem Envitech 2022. Siloxanes in biogas: Origin, effect and treatment. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://condorchem.com/en/blog/siloxanes-biogas-treatment/> [viitattu 21.10.2022]

Feeco International 2022. A Look At Activated Carbon Thermal Regeneration. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://feeco.com/a-look-at-activated-carbon-thermal-regeneration/> [viitattu 25.10.2022]

Integrated Flow Solutions 2021. The Rising Need of Siloxane Removal Systems for Biogas Cleaning. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://ifsolutions.com/the-rising-need-of-siloxane-removal-systems-for-biogas-cleaning/> Päivitetty 25.6.2021. [viitattu 24.10.2022]

Leinonen, R. 2019. Ajankohtaista syklisten metyyliisiloksaanien rajoittamisesta kosmetiikassa. Kosmetiikkafoorumi 27.9.2019. Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. PDF-dokumentti. [viitattu 16.11.2022].

Nyamukamba, P., Mukumba, P., Chikukwa, E. & Makaka, G. 2020. Biogas Upgrading Approaches with Special Focus on Siloxane Removal—A Review. *Energies* 2020, 13(22), 6088. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/22/6088> [viitattu 26.10.2022]

Salmi, T. 2021. Homekasvuston mittaaminen ioniliikkuvuuspektrometrillä. Oulun yliopisto, tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Diplomityö, 58 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:oulu-202106198605> [viitattu 25.10.2022]

Vapo 2019. Vapon puupelletti – ominaisuudet ja laatukriteerit. Pdf-dokumentti. <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/vapo.fi/wp-content/uploads/2021/08/09122311/Puupelletin-ominaisuudet-ja-laatukriteerit-A1-1.pdf> [viitattu 25.10.2022]

Vapo 2022. Pelletti – Vapo. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vapo.fi/pelletti/> [viitattu 25.10.2022]

DEMONSTRAATIOKOKKEITA BIOKAASUN HAITTA-AINEIDEN SUODATUKSESTA BIOHIILELLÄ HYÖDYNTÄEN DMS-TEKNOLOGIAA SUODATUSKYVYN TODENTAMISESSA

Henri Kettunen & Niina Laurila & Aki Heinonen

Biokaasun tuotantolaitokset hyödyntävät aktiivihiiltä raakan biokaasun sisältämien haitta-aineiden adsorboimiseksi ja kaasun puhdistamiseksi. Vaihtoehtona aktiivihiilen käytölle voisi olla biohiilen hyödyntäminen osana biokaasujen puhdistusta. Biohiilen valmistus on ympäristöystävällistä ja usein halvempaa valmistuskustannuksiltaan verrattuna aktiivihiileen. Hankkeessa toteutettiin demonstraatiokokeita niin laboratoriomittakaavassa kuin kaasuntuotantopaikalla suodattamalla raakakaasua biohiilen läpi. Demonstraatiokokeilla vertailtiin biohiilen ja aktiivihiilen suodatuskykyä raakakaasun sisältämien siloksaaniyhdisteiden osalta.

VALTAOSA AIEMMISTA BIOHIILEN SUODATUSKYKYYN LIITTYVISTÄ TUTKIMUKSISTA KOSKEE BIOKAASUN RIKKIVETYÄ

Papurello ym. (2018) tutkivat puupohjaisen biohiilen toimivuutta haitta-aineiden poistamisessa pilottilaitteiston tuottamasta biokaasusta. Rikkivedyn (H_2S) pitoisuus oli biokaasussa 24 ppm ja D3-siloksaanin pitoisuus 3,9 ppm. Kun biokaasua suodatettiin biohiilen läpi, kesti noin 30 tuntia, kunnes kiinteäoksidipolttokennon raja-arvot (H_2S :lle 1 ppm ja D3:lle 150 ppb) ylittyivät. Testatun biohiilen todettiin toimivan lähes yhtä tehokkaasti kuin kaupallisen aktiivihiilen, mutta sen kykyä suodattaa haitta-aineita voisi vielä optimoida oikeilla raaka-ainevalinnoilla.

Kanjanarong ym. (2017) tutkivat synteettisesti valmistetusta sulfittipitoisesta jätevedestä muodostuvan biokaasun sisältämän rikkivedyn suodatusta biohiilellä. Biohiili oli valmistettu puulastun (80 %) ja mädätemassan (20 %) seoksesta 600 °C:ssa pyrolysoituna, ja sen kosteus vaihteli tutkimuksissa 80–85 %. H_2S -pitoisuus vaihteli tuotetussa biokaasussa 105–1020 ppm, ja 1,7 litraa biohiiltä pidatti siitä 98 %. Biohiilen adsorptiokapasiteetiksi

H₂S:lle mitattiin 273 mg / g. Tutkimuksessa todettiin, että biohiilen partikkelikoko 0,3–0,4 mm johti pidempään H₂S:n läpimenoaikaan verrattuna partikkelikokoon 1,25 mm, sillä suurempi pinta-ala johtaa myös suurempaan rikkivetyä sitovien adsorptiopaikkojen määrään. Tekijät myös ehdottivat käytetyn biohiilen jatkoehdyntämistä ravinteiden lisääjänä maaperillä, jotka kärsivät rikin puutteesta.

Choudhury & Lansing (2021) käyttivät biokaasun suurten H₂S-pitoisuuksien suodatuskokeissa sekä raudalla (Fe) kyllästettyä että kyllästämätöntä biohiiltä. Raaka-aineina biohiilessä käytettiin vaahteran sahanpurua sekä maissijätettä. Materiaalit hiillettiin 500 °C:ssa ja Fe-kyllästys toteutettiin upottamalla valmistetut biohiilet FeCl₃-liuokseen kahdeksi vuorokaudeksi. Suodatustehokkuus testattiin H₂S-pitoisuudella 1 000 ppm. Molemmilla raaka-aineilla Fe-kyllästyksen todettiin moninkertaistavan hiilen H₂S-adsorptiokyvyn 2,5–3,9-kertaiseksi. Tutkimuksessa mainitaan biohiilen hinnaksi 0,35–1,2 € / kg ja vastaavasti aktiivihiihen hinnaksi 1,1–1,7 € / kg. Biohiilen käyttö suodatusmateriaalina voi siis olla myös taloudellisesti kannattavaa suhteessa aktiivihiihen, joka valmistetaan korkeammissa lämpötiloissa. Myös muiden metallien kyllästystä hiileen tulisi kokeilla sen suodatuskyvyn ja kapasiteetin parantamiseksi.

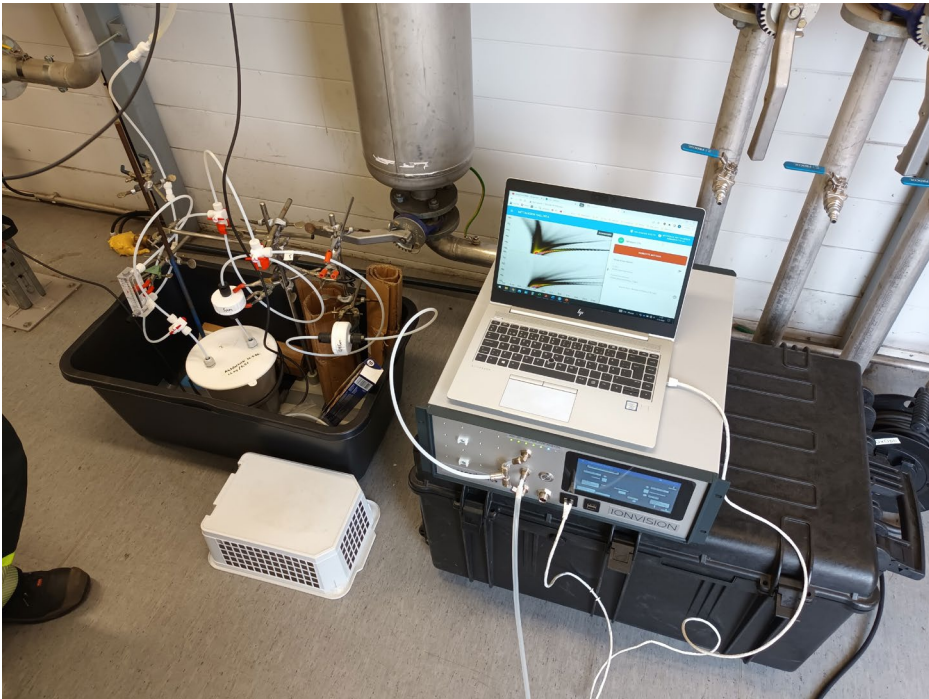
PELLETTIMUOTOISEN BIOHIILEN SUODATUSKYKYÄ VERRATTIIN SUHTEESSA KAUPALLISEEN AKTIIVIHIILEEN

BioGo-hankkeessa demonstroitiin eri mittauskeinoin biohiilen kykyä suodattaa raasta biokaasusta haitallisia aineita. Kokeita tehtiin kahdessa eri mittakaavassa: itse valmistetulla synteettisellä biokaasulla laboratoriossa sekä oikealla kaatopaikkakaasulla pilotointikohteessa Metsäsairilan lajittelu- ja kierrätyskeskuksen mikroturbiinilaitoksella. Mittauksissa hyödynnettiin biokaasuanalysaattoria (Geotech GA5000) metaanin ja rikkivedyn pitoisuuksien mittaamiseksi ja DMS-analysaattoria (Olfactomics Ionvision) kaasun sisältämien siloksaaniyhdisteiden tunnistamiseksi. Todelliset siloksaanipitoisuudet kaasusta saatiin määritettyä ottamalla kaasunäytteet kolmea eri adsorbenttia sisältäviin VOC-putkiin erikseen raaka-kaasusta ja eri hiilien läpi suodatettuna. Siloksaanipitoisuudet analysoitiin VOC-näytteistä ulkopuolisella laboratorion standardien ISO 16000-6:2021 ja SFS-EN 16017-1 mukaisesti käyttämällä termodesorptiota, kaasukromatografiaa ja massaselektiivistä detektoria.

Molemmissa kokeissa käytettiin kahta eri hiililaatua. Käytössä oli Metsäsairilan prosessissa käytetty aktiivihiihi (Carbotech DGF 4 KI 2 BIO) sekä Mayt Oy:n biohiili, joka oli valmistettu Vapon puupelleteistä. Aktiivihiihi oli kooltaan selvästi pienempää, tiiviimpää ja kovempaa materiaalia, kun taas biohiili oli suurempikokoista pellettiiä ja hyvin haurasta käsitellä. Kokeessa käytetyn aktiivihiihen BET-pinta-ala on valmistajan mukaan 850 m² / kg ja vastaavasti Maytin valmistaman biohiilen noin 236 m² / kg. Biohiilen BET-pinta-ala määritettiin Xamkin Kuitulaboratoriolla.

DEMONSTRAATIOKOKEEET KAASUNTUOTANTOPAIKALLA

Koejärjestely kaatopaikkakaasun suodatuskokeisiin koottiin etukäteen laboratoriossa isoon muoviseen laatikkoon, jossa se oli helppo kuljettaa mittauskohteelle. Koejärjestely koostui PTFE:stä valmistetuista venttiileistä ja letkuista, joilla varmistettiin, etteivät epäpuhtauksille herkät analyysilaitteet saa virheellisiä lukemia mahdollisesti materiaaleista peräisin olevista kontaminaatioista. Samoin niillä minimoitiin mahdollinen näytekäasun tarttuminen linjan pinnoille. Testattavat hiilisuodattimet koottiin viiden litran vetoisiin kannesta tiiviisiin ämpäreihin. Kansiin tehtiin kaksi läpivientä, joista toinen toimi tulevan kaasun linjana ja toinen poistolinjana. Tuleva kaasu kulki sintteripäistä lasiputkea pitkin ämpärin pohjalle, josta se pakotettiin kulkemaan hiilipatjan läpi, jotta se saavutti poistolinjan. Kumpaakin hiiltä punnittiin omiin ämpäreihinsä 1,5 kg. Etenkin biohiilen herkän pölyävyyden vuoksi linjaan kuului myös 5 μm :n PTFE-membraanifilteri, jolla varmistettiin, etteivät hiilestä peräisin olevat hiukkaset päässeet vaikuttamaan kokeen tuloksiin tai vahingoittamaan käytettyjä laitteita. Linjan alkupäähän asennettiin virtaamamittari, jolla seurattiin näytekäasun virtausta koelinjassa. Näytteenottoyhde sijaitsi tuotantolaitoksen kaasulinjassa kosteudenpoiston jälkeisessä osassa. Valokuva koejärjestelystä kohteelle asennettuna on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Koejärjestely mittauskohteella (kuva H. Kettunen 2022)

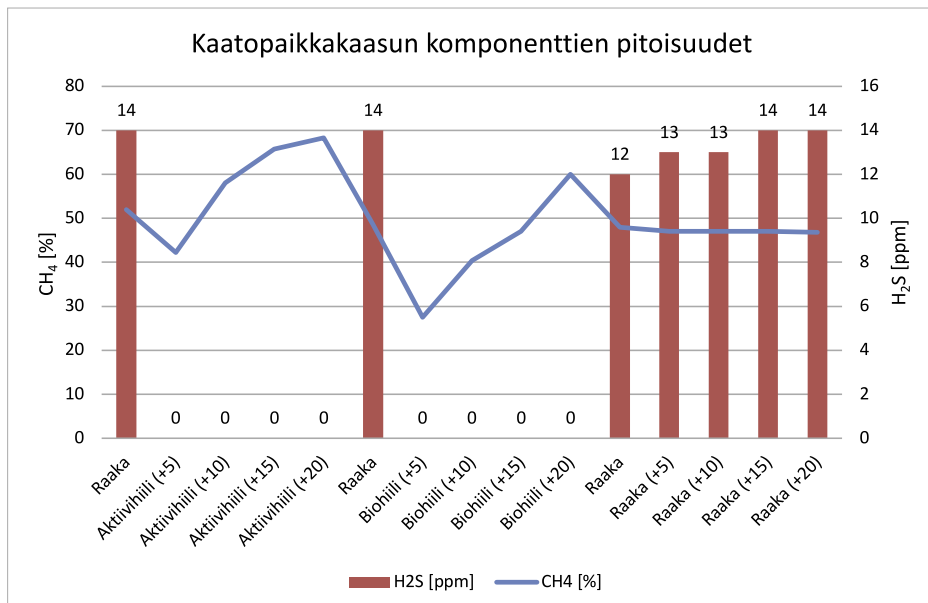
Mittaukset kaatopaikkakaasusta suoritettiin seuraavassa järjestyksessä:

- aktiivihiihi suodatusmateriaalina
- biohiili suodatusmateriaalina
- mittaus suoraan raakakaasusta.

Etenemällä puhtaammasta näytteestä aina likaisempaan näytteeseen pyrittiin näytteenotossa välttämään kontaminaatioita. Teoriassa aktiivihiihen läpi suodatettua kaasua pidettiin puhtaimpana. DMS-analysaattorille suoritettiin aina ennen uutta vaihetta sisäkiertopuhdistus.

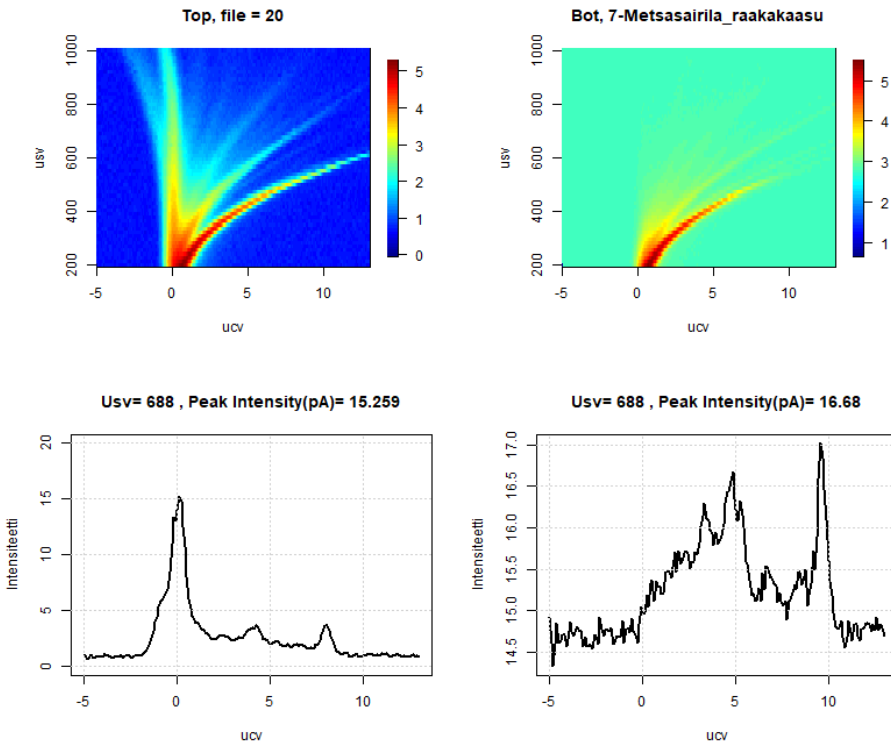
Demonstraatiokokeet aloitettiin mittaamalla biokaasuanalysaattorilla kaatopaikkakaasulinjasta sen hetkiset metaani- ja rikkivetypitoisuudet. Tämän jälkeen DMS-analysaattorilla suoritettiin viisi reilun minuutin mittaista skannia hiilen läpi virtaamalla 1 l / min, minkä jälkeen biokaasuanalysaattorilla mitattiin hiilen läpi kulkevan kaasun pitoisuudet. Näin jatkettiin, kunnes DMS-skannoja oli tehty yhteensä 20 kappaletta. Tällöin hiilen läpi oli kulkenut siis moninkertainen määrä raakakaasua suhteessa hiilen määrään. Tämän jälkeen linjaan liitettiin VOC-putket, joilla suoritettiin erikseen ensin 5 minuutin näytteenotto ja tämän jälkeen 25 minuutin näytteenotto. VOC-putket lähetettiin ulkopuoliseen laboratorioon analysoitavaksi.

Kohteen raakakaasun pitoisuudet (kuva 2) olivat melko tyypillisiä kaatopaikoille. Metaanipitoisuus raakakaasussa vaihteli mittaushetkestä riippuen 28–52 % ja rikkivetypitoisuus 12–14 ppm. Molemmat testatut hiilet suodattivat rikkivedyn täydellisesti raakakaasusta ja päästivät metaanin lävitseen.

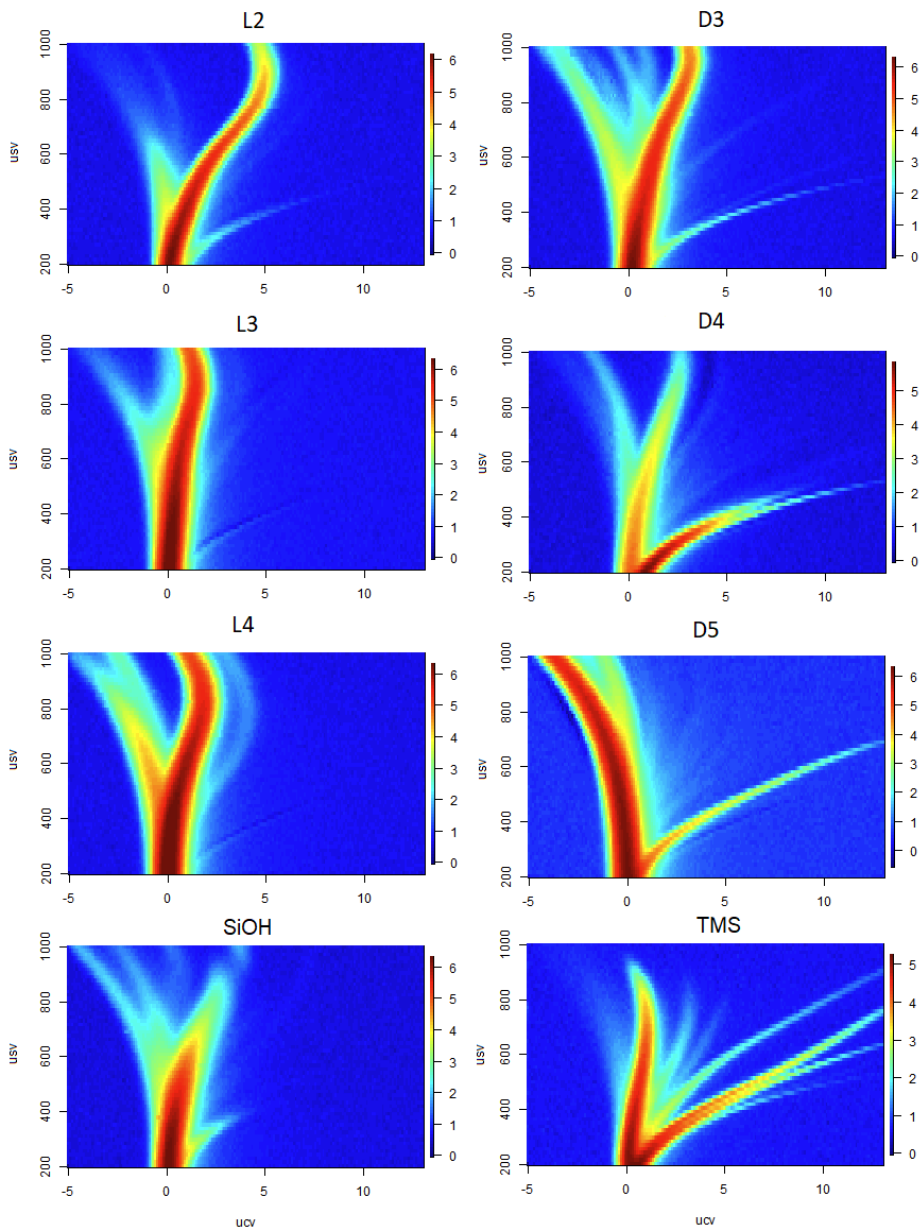


Kuva 2. Kaatopaikkakaasun CH₄- ja H₂S-pitoisuudet demonstraatiokokeen eri vaiheissa

Kuvassa 3 on esitetty DMS-laitteella kaatopaikan raakakaasusta mitatut dispersiokuvat separaatiojännitteellä 688 V. Selkeät intensiteetti- ja piikit tällä separaatiojännitteellä saatiin positiivisten ionien leikkauskuvasta kompensatiojännitteillä 0 V, 4,2 V ja 8 V. Koska kyseessä oli kuitenkin seoskaasu, ei pelkästään DMS-mittausten perusteella pystytty selvittämään, mitä haitta-aineita dispersiokuvissa esiintyvät piikit esittävät. Kun raakakaasun dispersiokuvaa tarkastellaan visuaalisesti ja verrataan yksittäisistä siloksaaneista muodostettuihin dispersiokuviiin (kuva 4), se ei suoraan muistuta niistä mitään. Suuremmilla separaatiojännitteillä ilmenevä haarojen erottuvuus kuitenkin osuu jossain määrin kohdalleen D4- ja D5-siloksaanien kanssa. Kaatopaikalla mitatut intensiteetit olivat kuitenkin selvästi alemmalla tasolla kuin aiemmin yksittäisillä siloksaaneilla laboratoriossa mitatut intensiteetit.

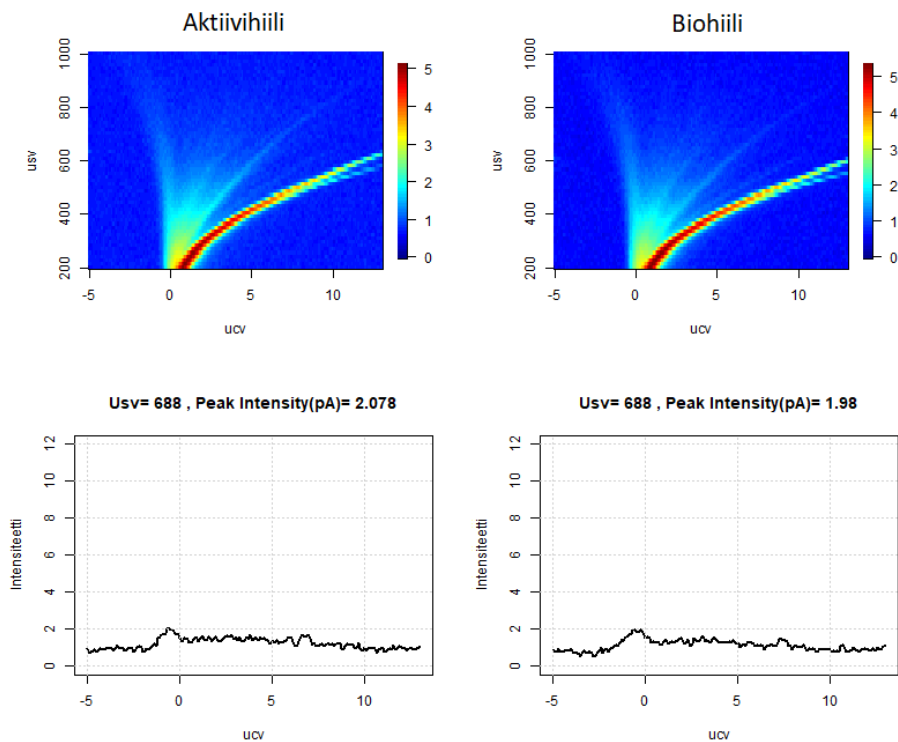


Kuva 3. Dispersiokuvat käsittelemättömästä kaatopaikkakaasusta



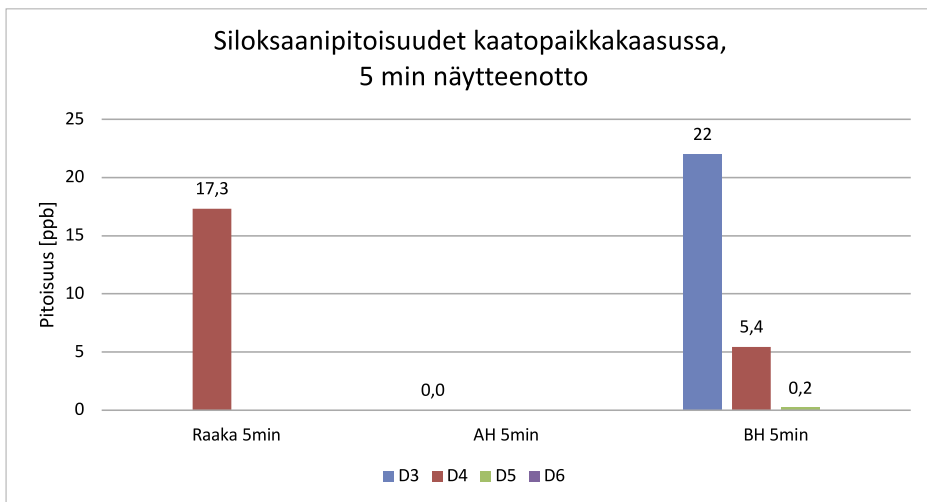
Kuva 4. Hankkeessa tutkitut siloksaaniyhdisteet DMS-laitteen dispersiokuvina

Kuvassa 5 on esitetty positiivisten ionien dispersiokuvat ja leikkauskuvat kummankin testatun hiilen läpi ajetusta kaasusta. Kuten kuvasta ilmenee, molemmat hiilet alensivat signaalia samoilla jännitteillä lähes taustasignaalin tasolle, eli kaasusta tapahtui selvästi suodattumista. Pelkästään näiden kuvien perusteella hiilien suodatuskyvyssä ei juurikaan nähty eroa, vaan molemmat vaikuttivat toimivan tehokkaasti.



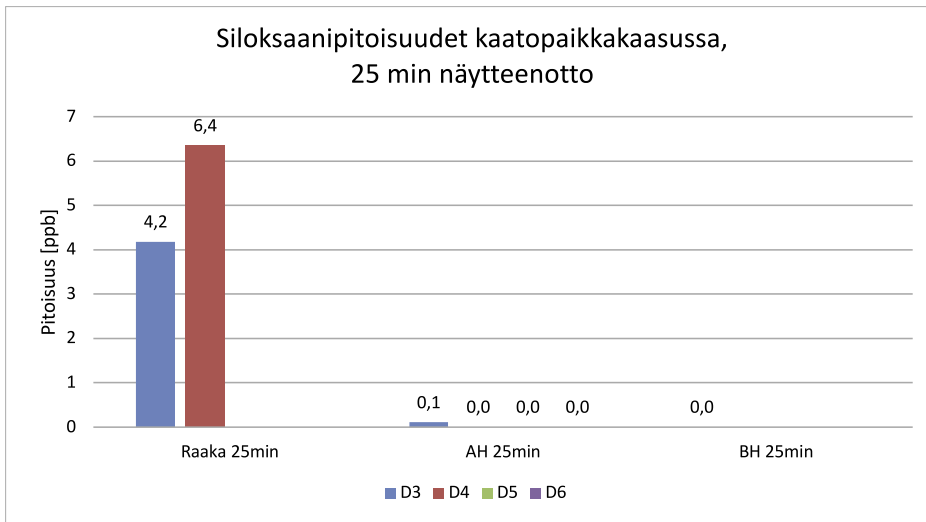
Kuva 5. Dispersiokuvat hiilien läpi suodatetusta kaatopaikkakaasusta

Todelliset siloksaanipitoisuudet kaatopaikkakaasusta nähtiin VOC-näytteenottojen avulla. Kuvassa 6 on esitetty VOC-putkista määritetyt siloksaanipitoisuudet 5 minuutin näytteenottoajalla ja kuvassa 7 siloksaanipitoisuudet 25 minuutin näytteenottoajalla demonstraatiokokeiden eri vaiheissa. Tulokset on muunnettu ppb-yksiköiksi.



Kuva 6. Kaatopaikkakaasun siloksaanipitoisuudet VOC-putkilla mitattuna 5 minuutin näytteenottoajalla

Lyhyellä näytteenottoajalla aktiivihiihi oli suodattanut raakakaasun siloksaanit täydellisesti. Biohiilen osalta VOC-näytteet osoittivat kuitenkin ristiriitaisia tuloksia. Raakakaasussa ei ensinnäkään esiintynyt muita siloksaaneja kuin D4, mutta biohiilen läpi suodatetussa VOC-näytteessä löytyi myös D3- ja D5-siloksaaneja. Lisäksi D4:n pitoisuus oli alentunut. Analyysitulokset on ristiriidassa myös DMS-analyysaattorilla saatuihin skanneihin, joista saatiin alentunut signaali. Tällä laitteella signaalin aleneminen oli selvä merkki suodatuskyvykkyydestä. On mahdollista, että raakakaasun pitoisuudet ovat hieman vaihdelleet mittausten aikana, jolloin juuri kyseisen näytteenoton aikana siloksaanipitoisuudet raakakaasussa olisivat olleet korkeat. Kuitenkin todennäköisintä on, että siloksaaniyhdisteitä sitonutta biohiiltä on kulkeutunut VOC-näyteputkiin, mikä näkyy analyysituloksissa. VOC-näytteenottojen aikana ei linjassa pidetty membraanisuodattimia pidättämään mahdollista hiilipölyä, koska näytteenottopumppu oli erittäin heikkotehoinen.



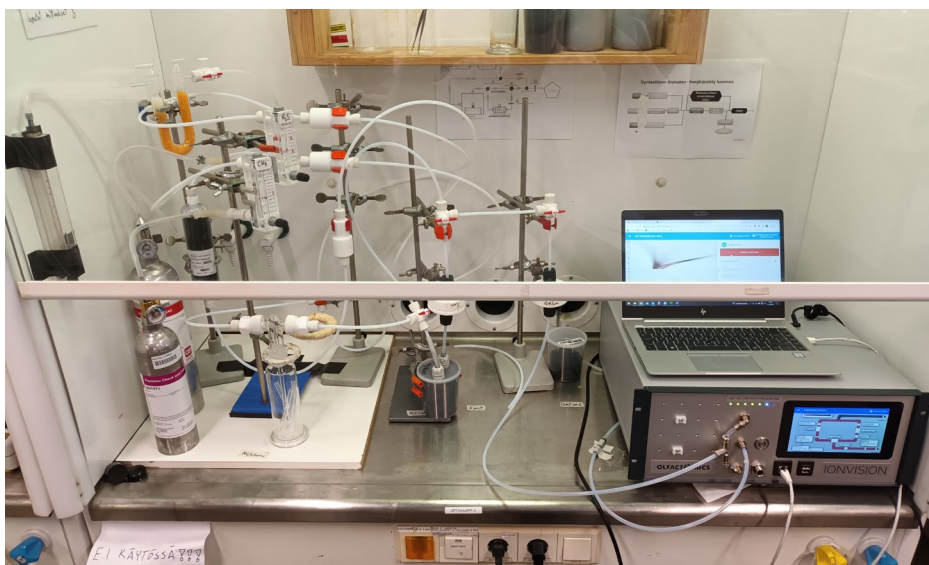
Kuva 7. Kaatopaikkakaasun siloksaanipitoisuudet VOC-putkilla mitattuna 25 minuutin näytteenottoajalla

Pidemmällä näytteenottoajalla raakakaasusta löytyi D4:n lisäksi myös D3-siloksaania, ja raakakaasun siloksaanipitoisuudet olivat hieman alemmat kuin aiemmassa näytteenotossa. Mielenkiintoisesti tässä näytteessä biohiili osoittautui tehokkaaksi siloksaanien suodattajaksi raakakaasusta. Ainoastaan D3-siloksaania havaittiin 25 minuutin näytteenotossa päässeen biohiilen läpi ja sitäkin niin pieni määrä, ettei se riittänyt pitoisuuden määrittämiseen ($< 1 \mu\text{g} / \text{m}^3$). Aktiivihiihi päästi aavistuksen D3-siloksaania läpi tämän näytteenoton perusteella, jolloin siloksaanien reduktioksi saatiin 99,2 %.

DEMONSTRAATIOKOKKEET LABORATORIOMITTA- KAAVASSA SYNTEETTISELLÄ BIOKAASULLA

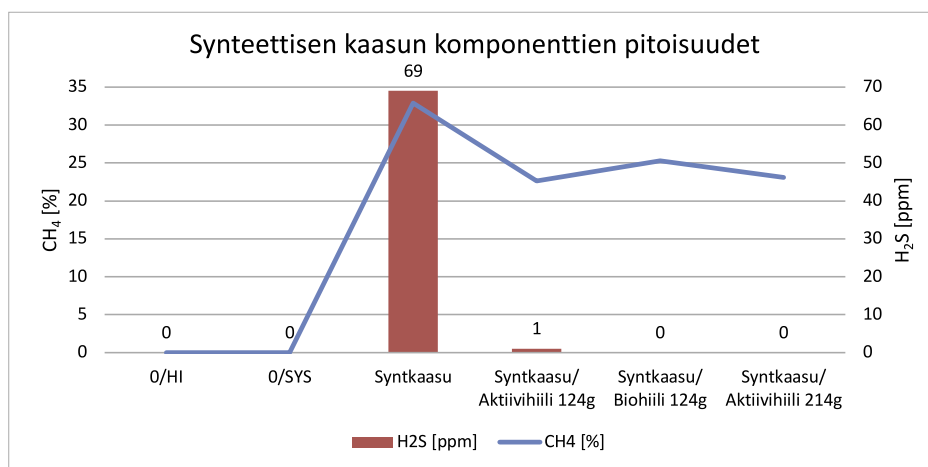
Koejärjestely laboratoriomittakaavan kokeissa (kuva 8) perustui aiemmin käytettyyn systeemiin, jolla luotiin DMS-analysaattorille kirjastoa eri siloksaanien tunnistamiseksi. Systeemissä käytettiin korvausilmana huoneilmaa, josta poistettiin linjaston alussa kosteus u-putkeen asetetulla silikageelipatjalla ja muut epäpuhtaudet aktiivihilisuodattimella. Aiempaan koejärjestelyyn lisättiin uusia venttiilejä, joilla systeemin läpi kulkevan ilman joukkoon saatiin syötettyä pullosta metaania ja rikkivetyä. Käytetty metaani oli pitoisuudeltaan 100 % ja rikkivety 100 ppm. Kaasuja syötettiin linjaan virtaamalla 0,5 l / min. DMS-analysaattori parametroidiin pumppaamaan tuloilmaa imulla 1 l / min, joten teoriassa näin saavutettiin CH₄-pitoisuus 50 % ja H₂S-pitoisuus 50 ppm. Näin kaasupitoisuudet saatiin asetettua reaalistiselle tasolle oikeaa biokaasua ajatellen. Takaisinvirtaamisen riskin minimoimiseksi linjaan lisättiin myös takaiskuventtiilit. Kaasujen lisäksi kokeessa käytettiin puhtaita nestemäisiä siloksaaneja L2, L3, D4 ja D5. Siloksaanit, joita kaasunpesupulloon asetetuissa pipeteissa oli 100 µl / laatu, haihtuivat kaasunpesupullon läpi kulkeutuvaan kaasuvirtaan. Rotametrin avulla voitiin tarvittaessa tarkistaa, että kaasuvirta kulki linjan alkupäästä lähtien.

Synteettisen kaasun kokeissa käytetyt hiilisuodattimet olivat pienempiä kuin kaatopaikkakaasukokeen suodattimet. Suodatusastianä käytettiin 300 ml:n vetoisia tiiviskantisia muovipurkkeja, joiden kansiin tehtiin kaksi läpivienttiä. Toiseen, sisääntuloläpivienttiin, kiinnitettiin lasiputki, jonka sintteripää asetettiin astian pohjalle hiilipatjan alle. Toisessa läpiviennissä oli letku, josta hiilipatjaan ajettu kaasu johdettiin eteenpäin kohti analysaattoria. Myös tässä kokeessa käytettiin hiilisuodattimen jälkeen PTFE-membraanifilteriä hiilipölyn pidättämiseksi.



Kuva 8. Synteettisen biokaasun suodatuskokeita varten rakennettu koejärjestely vetokaapissa (kuva H. Kettunen 2022)

Mittausten aluksi varmistettiin suodatetun korvausilman ja linjan puhtaus sekä mitattiin biokaasuanalysaattorilla metaani- ja rikkivetypitoisuus pullokaasuilla aikaansaadusta niin sanotusta ”raakakaasusta”. Tässä vaiheessa systeemiin ei kuitenkaan vielä lisätty siloksaaneja, sillä niiden pitoisuudesta kaasuvirtaan haihtuneena ei ollut varmuutta. Toimenpiteellä haluttiin suojella analysaattoria mahdolliselta vikaantumiselta liian suurista siloksaani-pitoisuuksista johtuen. Synteettisen ”raakakaasun” CH₄-pitoisuudeksi mitattiin 33 % ja H₂S-pitoisuudeksi 69 ppm (kuva 9). Molempia hiiliä punnittiin erillisiin astioihin aluksi 124 grammaa. Tämä määrä biohiiltä täytti astian, mutta aktiivihiliastia jäi samasta määrästä vajaaksi. Aktiivihielelle 124 gramman todettiin kuitenkin olevan riittämätön määrä rikkivedyn suodatukseseen. Syynä tähän oli aktiivihielen pienempi tilavuus verrattuna biohiilipatjan tilavuuteen, eikä aktiivihilipatjan paksuus ollut tällöin riittävä suodattamaan rikkivetyä kaasuvirrasta täydellisesti. Niinpä aktiivihielen määrää kasvatettiin 214 grammaan. Biohiili suodatti rikkivedyn täydellisesti myös tässä kokeessa.



Kuva 9. Synteettisen biokaasun CH₄- ja H₂S-pitoisuudet demonstraatiokokeen eri vaiheissa

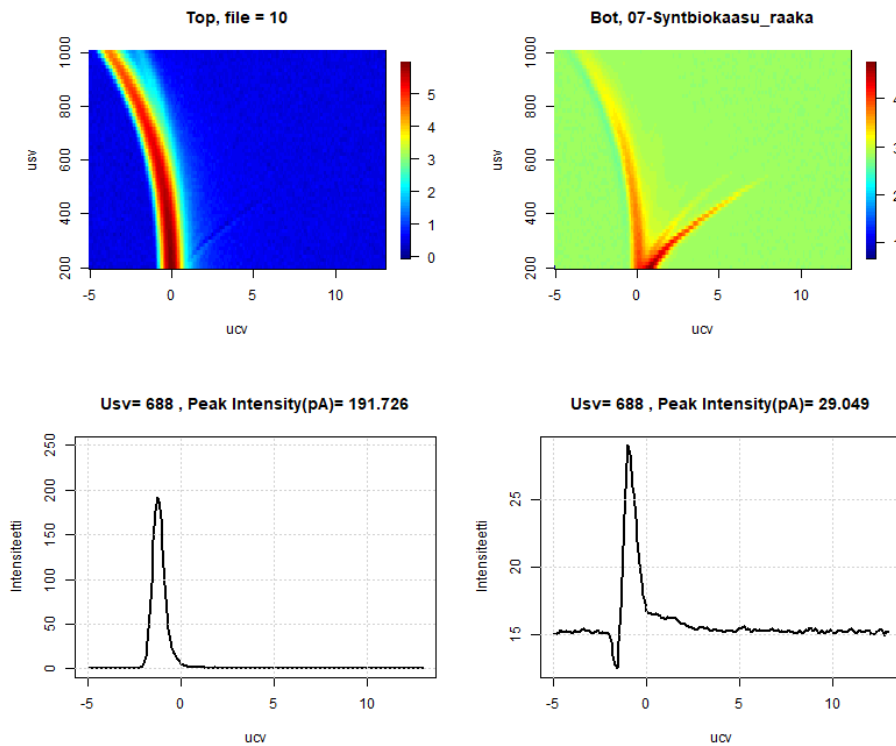
Biokaasuanalysaattorimittausten jälkeen lisättiin siloksaanipipetit kaasunpesupulloon haihtumaan ja suoritettiin mittaukset DMS-analysaattorilla. Mittauksissa edettiin seuraavassa järjestyksessä:

- mittaus synteettisestä biokaasusta aktiivihielen läpi
- mittaus synteettisestä biokaasusta biohiilen läpi
- mittaus synteettisestä biokaasusta raakana.

Pilottikokeissa oletettiin, että aktiivihili toimisi kaasun suodatuksessa tehokkaimmin, joten toiminta aloitettiin sitä käyttäen ja edettiin potentiaalisesti heikkotehoisempiin eli vaiheisiin, jotka aiheuttavat enemmän kontaminaatiota myöhemmin linjassa. Seuraavaan vaiheeseen edettäessä DMS-analysaattorilla suoritettiin aina sisäkiertopuhdistus. Rajallisten pullokaasu-

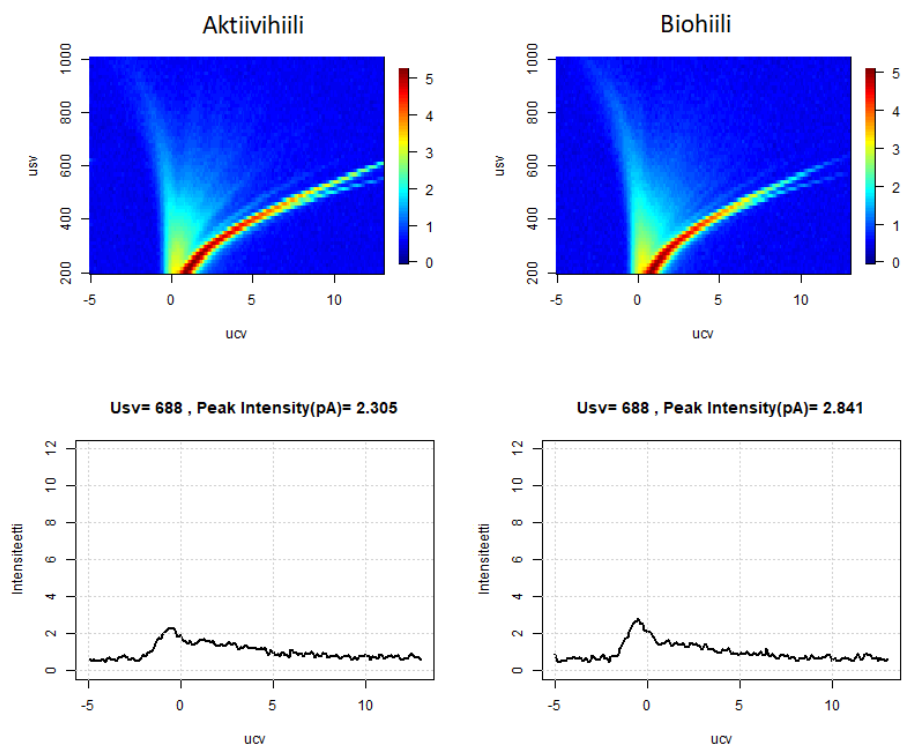
määrien vuoksi DMS-skanneja suoritettiin jokaisessa kokeessa 10 kappaletta peräkkäin, eikä välissä otettu biokaasumittauksia. Tällöin yhden hiilisuodattimen läpi oli kulkenut moninkertainen tilavuus synteettistä raakakaasua suhteessa sen hiilimäärään (300 ml).

Raakan synteettisen biokaasun positiivisten ionien dispersiokuvasta (kuva 10) ilmeni selvästi ainoastaan D5-siloksaanin vastaava haara (leikkauskuvassa piikki kompensatiojännittellä $-1,3$ V). Verrattaessa raakaan kaatopaikkakaasuun oli laboratoriomittakaavan kokeessa tuotetun synteettisen biokaasun DMS-laitteella nähtävä intensiteetti huomattavasti voimakkaampi.



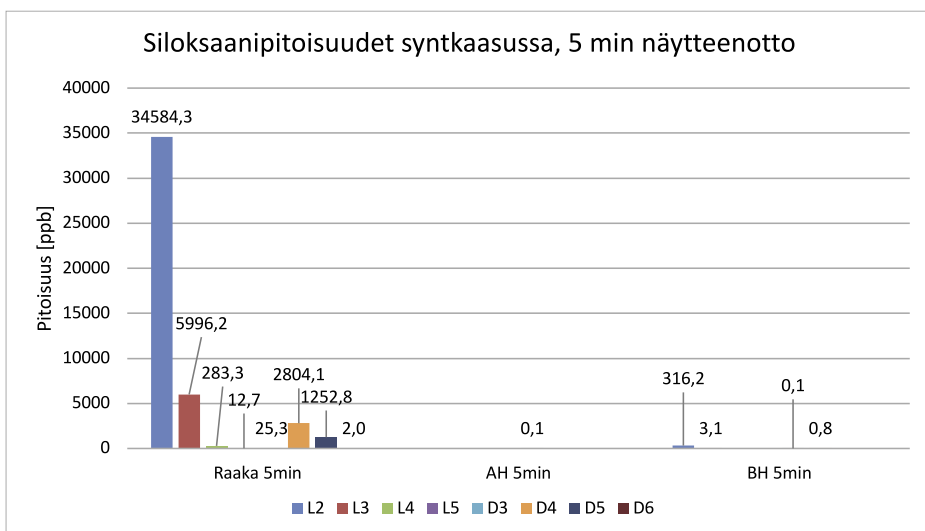
Kuva 10. Dispersiokuvat käsittelemättömästä synteettisestä biokaasusta

Raakakaasun suurista haitta-ainemääristä kertovat intensiteetit pienentyivät selvästi hiilien läpi ajettuna, lähes taustasignaalin tasolle (kuva 11). Toisin sanoen molemmat hiilet suodattivat synteettisen kaasun sisältämät haitta-aineet tehokkaasti. D5-siloksaanin piikkiä vastaava intensiteetti oli aktiivihiihen läpi ajettuna hieman biohiiltä pienempi, eli aktiivihiihi oletettavasti toimi suodatuksessa hieman tehokkaammin.



Kuva 11. Dispersiokuvat hiilien läpi suodatetusta synteettisestä kaasusta

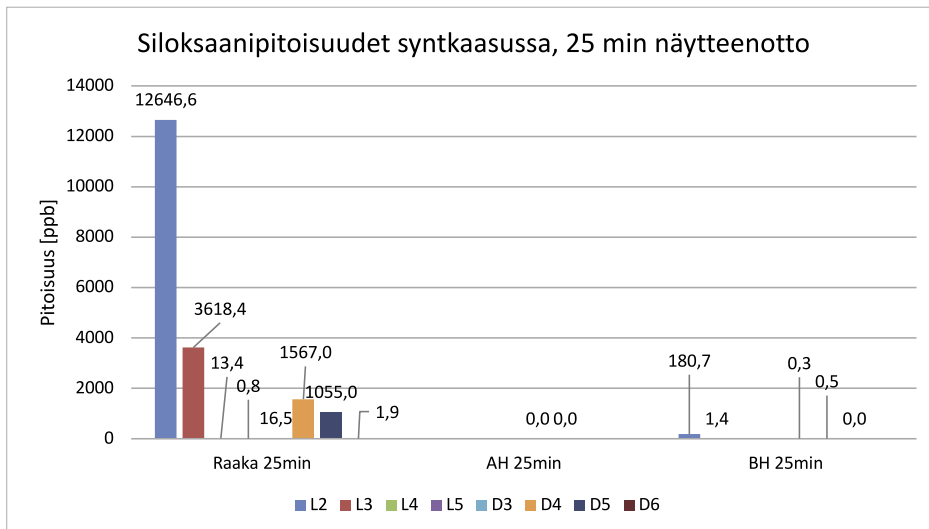
VOC-putkinäytteet otettiin kunkin vaiheen viimeisinä, ensin 5 minuutin ja sen jälkeen 25 minuutin näyte. Hiilien läpi suodattaessa ei näissä näytteenotoissa käytetty PTFE-membraanisuodatinta ennen näyteputkea kuten ei kaatopaikan kokeissakaan. Siloksaanipitoisuudet olivat laboratorionkokeessa moninkertaisesti suuremmat kuin kaatopaikkakaasusta mitatut. Molemmilla näytteenottoajoilla synteettisestä kaasusta löydettiin kaikki systeemiin lisätyt siloksaanit: 5 minuutin näytteessä L2-siloksaania oli noin 35 ppm, L3-siloksaania noin 35 ppm, D4-siloksaania noin 2,8 ppm ja D5-siloksaania 1,3 ppm (kuva 12). Pitoisuuksien suhde keskenään on looginen, sillä L2 on tutkituista aineista herkimmin haihtuva ja D5 vähiten herkkä.



Kuva 12. Synteettisen biokaasun siloksaanipitoisuudet VOC-putkilla mitattuna 5 minuutin näytteenottoajalla

Raakakaasunäytteestä löytyi myös L4-, L5-, D3- ja D6-siloksaaneja jäännöspitoisuuksina. Ne saavat olla peräisin aiemmista kokeista, joissa systeemissä ollut kaasunpesupulloa on käytetty, tosin D6:ta hankkeen aikana ei missään vaiheessa käytetty. Siloksaanien jäännöspitoisuuksien ilmeneminen raakakaasussa kertoo siloksaanien herkästä tarttuvuudesta lasipinnoille. Vaikka kokeessa käytettyjä astioita pestiin laboratorioissa käytön jälkeen, oli haastavaa saada ne täysin puhtaaksi siloksaaneista. Lyhyellä näytteenottoajalla aktiivihiili suodatti siloksaaneista 99,9 % päästään todella pienen määrän D3:a läpi. Biohiili suodatti siloksaaneista noin 99,3 %. Etenkin molekyylikooltaan pieni L2 pääsi biohiilen läpi selkeämmin mutta silti vain noin 0,3 ppm:n pitoisuudessa.

Pidemmällä näytteenottoajalla (kuva 13) kaikki edellä mainitut pitoisuudet karkeasti arvioiden puolittuivat. L2:n pitoisuus oli 13 ppm, L3:n 3,6 ppm, D4:n 1,5 ppm ja D5:n 1,1 ppm. Aktiivihiilen läpi pääsi niin pieni määrä D3:a ja D4:ää, ettei niistä saatu pitoisuutta määritettyä, eli käytännössä aktiivihiili suodatti siloksaanit täydellisesti. Biohiili suodatti pidemmällä näytteenottoajalla siloksaaneista 99,2 % päästään jälleen L2:ta selkeimmin läpi, mutta senkin vain pitoisuudessa 0,2 ppm. Tämäkin tulos on looginen siinä mielessä, että molekyylikooltaan pieni L2 on herkin läpäisemään suodatusmateriaalin.



Kuva 13. Synteettisen biokaasun siloksaanipitoisuudet VOC-putkilla mitattuna 25 minuutin näytteenottoajalla

DMS-TEKNOLOGIA ON LUPAAVA TAPA ILMAISTA KAASUN SISÄLTÄMÄT HAITTA-AINEET, MUTTA SE KAIPAA TARKEMPAA PARAMETROINTIA TAPAUSKOHTAISESTI

DMS-analysointilaitteen käyttö biokaasun sisältämien siloksaanien tunnistamiseen todettiin laboratorikokeessa mahdolliseksi, kun kaasun seassa oli tunnettuja siloksaaneja ppm-mittaluokassa. Samoin niiden redusointi kaasuvirrasta käyttämällä välissä hiilisuodattimia oli hyvin selkeästi nähtävissä dispersiokuvista. Toisaalta mitatuissa raakan synteettisen biokaasun dispersiokuvissa ilmeni selkeästi vain D5-siloksaani, vaikka se sisälsi myös kolme muuta siloksaania. Anttalaisen ym. (2022) mukaan verrattuna muista siloksaaneista muodostuvien ionien protoniaffiniteetteihin D5:stä ionisoidessa muodostuvat komponentit dominoivat mittaustilannetta luultavasti niiden protoniaffiniteetista johtuen, vaikka VOC-näyteputkien perusteella D5:n pitoisuus kaasussa oli pienin kokeessa käytetyistä siloksaaniyhdisteistä.

Myös kaatopaikkakaasusta saatiin selkeästi erilaiset dispersiokuvat raakakaasun ja suodattun kaasun välillä, eli testatut hiilet suodattivat kaatopaikkakaasusta haitta-aineita. Kuitenkin kaatopaikan raakakaasun siloksaanipitoisuudet olivat matalissa ppb-pitoisuuksissa, ja VOC-putkinäytteiden mukaan raakakaasu sisälsi suuren määrän muitakin VOC-yhdisteitä kuin vain siloksaaneja. Tämä ilmeni DMS-laitteella raakakaasun dispersiokuvassa (kuva 3) haarina, jotka eivät visuaalisen tarkastelun perusteella vastaa laitteella aiemmin tutkittuja siloksaaneja (kuva 4). Näyttematriisi oli siis kohteessa monimutkaisempi kuin laitteella aiemmin suoritetuissa laboratoriomittauksissa siloksaanikirjastoa luodessa.

Koska siloksaanien pitoisuudet kaatopaikalla ja laboratoriossa tehdyissä demonstraatiokokeissa erosivat suuresti toisistaan, olisi mittauksen parametrintia pitänyt säätää sopivammaksi pitoisuuksien mukaan: suurempia pitoisuuksia sisältäneessä laboratoriokokeessa olisi pitänyt käyttää joko pienempää näytteen syöttövirtaamaa laitteelle tai suurentaa laimentavan virtaaman osuutta (Anttalainen ym. 2022). Tällä tavoin näytteen muut yhdisteet olisivat voineet tulla paremmin esiin dispersiokuvissa, kun suuret pitoisuudet olisivat laimentuneet. Mittausohjelma oli myös varsin laaja skannattavilta jännitearvoiltaan, koska alun perin siloksaanien sijoittumista dispersiokuvaan ei osattu täysin ennustaa. Mittausohjelmaa voisi jatkossa muokata siten, että mitataan tarkemmin tiettyjä jännitealueita, joissa siloksaanien on havaittu esiintyvän. Mitattujen dispersiokuvien perusteella ei myöskään pystytty ilman olemassa olevaa tunnistuskirjastoa erottamaan, mitä muita yhdisteitä kaatopaikkakaasu sisältää, eli laitteelle tulisi kehittää laaja-alaisemmin eri yhdisteitä sisältävä kirjasto. Vaihtoehtoisesti mittauslinjaan voisi kehittää jonkinlaisen selektiivisen esisuodattimen tai -erottimen, jolla siloksaanit saataisiin yksin tuotua tutkittavasta kaasusta laitteelle mitattavaksi vaikuttamatta niiden pitoisuuteen.

Toimiessaan oikein parametroituna DMS-analysaattori voisi kuitenkin toimia hyvänä ja mahdollisesti edullisena vaihtoehtona monitoroimaan biokaasua tuottavien laitosten haitta-aineiden suodatusjärjestelmien toimintaa. Laite ei käytännössä kaipaa muuta huoltoa kuin sisäkiertosuodattimen ajoittaisen vaihdon. Suodattimen elinikä riippuu lähinnä näytekaasun kosteudesta, ja vaihto onnistuu helposti ja nopeasti laitteen käyttäjältä. Laitteelle on täysin ohjelmoitavissa halutunlaiset mittausparametrit, ja se voitaisiin ohjelmoida osaksi hälytysjärjestelmää ilmoittamaan, jos jonkin komponentin havaitaan ylittävän asetetut raja-arvot.

YHTEENVETO TEHDYISTÄ KOKEISTA – BIOHIILI SUODATTI BIOKAASUN SILOKSAANIYHDISTEET LÄHES YHTÄ HYVIN KUIN AKTIIVIHIIILI

Mikroturbiinilaitoksella suoritetuilla demonstraatiokokeilla pystyttiin osoittamaan biohiilen toimivuus kaatopaikkakaasun suodatuksessa hiilen suodattaessa tehokkaasti rikkivedyn ja alhaiset siloksaanipitoisuudet. Biohiili suodatti 25 minuutin VOC-näytteenoton perusteella raakakaasun siloksaanit käytännössä täydellisesti ja jopa paremmin kuin aktiivihiihi, joka sekin suodatti siloksaaneista 99,2 %. VOC-analyytitulosten tuoman epävarmuuden vuoksi pitoisuudet tulisi kuitenkin vielä varmistaa uusintänäytteillä. Kokeessa ei myöskään saatu mitattua ns. läpilyöntipitoisuutta ja sen myötä hiilien siloksaanien pidätyskapasiteettia. Tulosten vertailu olisi mielekkäämpää, jos käytettävät hiilet olisivat fyysisesti samaa kokoluokkaa ja biohiilen pölyävyys hallittavampaa.

Laboratoriomittakaavan synteettisellä biokaasukokeella saatiin tuotettua pääkomponentteiltaan melko lähelle oikeaa biokaasua muistuttavaa kaasua, ja sen sisältämien haitta-aineiden suodatusta eri hiilillä pystyttiin demonstroimaan onnistuneesti. Synteettisessä raakakaasussa

vallinneet siloksaanipitoisuudet olivat huomattavasti korkeammat kuin Metsäsairilan demonstraatiokokeessa. Ne voisivat kuitenkin olla mahdollisia jollain muulla kaatopaikalla, jätevedenkäsittelylaitoksella tai biokaasureaktorin raakakaasussa. Aktiivihiili toimi kokeissa odotetulla tehokkuudella suodattaen käytännössä kaikki siloksaanit kaasusta. Biohiili toimi myös tehokkaasti mutta päästi vielä selkeästi etenkin L2-siloksaania läpi, mikä voi olla rajoittava tekijä sen käytölle nykyisessä muodossaan tietyissä sovellutuksissa, joissa tarvitaan erittäin suurta tehokkuutta siloksaani poistoon. Biohiili oli kuitenkin pyrolyysia lukuun ottamatta muutoin käsittelemätöntä puupellettiä, kun taas aktiivihiili oli jollain sen tuottajan prosessilla aktivoitua kalliimpaa suodatusmateriaalia. Biohiilellä oli siis tämänkin kokeen perusteella selvästi potentiaalia toimia halvempaa suodatusmateriaalina.

Biohiilen käyttömäärää suodatustehokkuuden parantamiseksi voisi vielä optimoida suodatettavan kaasun pitoisuuksista riippuen, jolloin etenkin pienimolekyylinen L2-siloksaani olisi todennäköisesti voitu poistaa tehokkaammin synteettisestä raakakaasusta, jossa pitoisuudet olivat suuria. BET-pinta-alan lisäksi myös biohiilen huokostilavuudella on merkitystä sen kykyyn pidättää siloksaaneja (Papurello ym. 2019). Biohiilen aktivointi esimerkiksi vesihöyryllä voisi tehostaa sen kykyä pidättää siloksaaneja.

Biohiilisuodattimen voisi myös kokeilla rakentaa siten, että se muodostuisi eri biohiilistä sarjassa. Suodattimen alkupäässä olisi suurempihuokoisia hiiliä ja loppupäässä pienempihuokoisia aktivoituja hiiliä. Tällöin L2 ei todennäköisesti tukkisi suodattimen alkupään hiiliä aikanaan niistä vapautuen, vaan se voitaisiin pidättää suodattimen viimeiseen materiaaliin tehokkaasti. Aihe kuitenkin kaipaa lisää tutkimusta biohiilen optimoimisesta biokaasun suodatuskäyttöä varten.

LÄHTEET

Anttalainen, O., Kontunen, A. & Mäkelä, M. 2022. Palaveri hankkeen tuloksista 22.11.2022. Olfactomics Oy.

Choudhury, A. & Lansing, S. 2021. Adsorption of hydrogen sulfide in biogas using a novel iron-impregnated biochar scrubbing system. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 9, Issue 1, February 2021, 104837. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343720311866> [viitattu 26.10.2022]

Kanjanarong, J., Giri, B. S., Jaisi, D. P., Oliveira, F. R., Boonsawang, P., Chaiprapat, S., Singh, R. S., Balakrishna, A. & Khanal, S. K. 2017. Removal of hydrogen sulfide generated during anaerobic treatment of sulfate-laden wastewater using biochar: Evaluation of efficiency and mechanisms. *Bioresource Technology* Volume 234, June 2017, Pages 115-121. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417302791> [viitattu 26.10.2022]

Papurello, D., Boschetti, A., Silvestri, S., Khomenko, I. & Biasioli, F. 2018. Real-time monitoring of removal of trace compounds with PTR-MS: Biochar experimental investigation. *Renewable Energy* Volume 125, September 2018, Pages 344-355. Www-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811830274X> [viitattu 26.10.2022]

Papurello, D., Gandiglio, M., Kafashan, J. & Lanzini, A. 2019. Biogas Purification: A Comparison of Adsorption Performance in D4 Siloxane Removal Between Commercial Activated Carbons and Waste Wood-Derived Char Using Isotherm Equations. *Processes* 2019, 7, 774. *PDF-artikkeli*. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/774/htm> [viitattu 18.11.2022]

BIOHIILTEN EKOTOKSISUUS- TESTIT KINEETTISELLÄ VALO- BAKTEERITESTILLÄ

Henri Kettunen

Biohiilen laadulla on suuri merkitys sen käytettävyyteen. Tällä hetkellä Suomen lainsäädännön mukaan lannoitevalmistelaisissa (539/2006) biohiili luetaan kasvipohjaiseksi kasvualustahiileksi. Tällaisia tuotteita valvoo Suomessa Ruokavirasto, joka vaatii ilmoittamaan biohiilituotteiden haitta-aineiden osalta niiden sisältämät raskasmetallipitoisuudet. Lisäksi biohiilille voi hakea vapaaehtoista korkean laadun osoittavaa sertifikaattia. Esimerkiksi EBC-järjestön sertifikaattijärjestelmässä (The European Biochar Certificate) biohiilet luokitellaan ja niille asetetaan lainsäädäntöä tiukempia raja-arvoja käyttökohteensa mukaan. Tiettyjen haitta-aineanalyysien lisäksi biohiilituotteiden vaikutusta ympäristöturvallisuuden voidaan arvioida erilaisilla toksisuustesteillä. BioGo-hankkeessa selvitettiin biohiilien ympäristöturvallisuutta ns. flash-menetelmällä kineettisen valobakteeritestin avulla ympäristölaboratoriossa Mikkelissä.

EKOTOKSISUUTTA SELVITETTIIN KAHDEN VALMISTAJAN BIOHIILISTÄ JA KAHDESTA ERILAISESTA BIOHIILTEN SOVELLUSKOHTEESTA

Biohiilen ekotoksisuutta selvitettiin neljästä eri biohiilestä. Näistä biohiilet HH, BH ja CLT saatiin Mayt Oy:lta. Neljäs tutkittava biohiili (CF) hankittiin Carbofex Oy:ltä. Mayt Oy valmisti BH- ja CLT-biohiilen pääosin mäntypohjaisesta A-luokan purkupuusta noin 450–500 °C:n lämpötilassa käyttäen panostoimista retorttia. Mayt Oy:ltä saatiin myös eri prosessilla valmistettua HH-biohiiltä, joka todettiin heti valmistuksen jälkeen epäkurantiksi voimakkaasta savunhajusta johtuen. Carbofex Oy valmistaa biohiiltä PEFC-sertifioidusta kuusesta noin 600 °C:n lämpötilassa jatkuvatoimisella pyrolyysiprosessilla. Mayt Oy:lta saatujen biohiilien palakoko oli suuri, joten nämä biohiilet jauhettiin itse laboratoriomyllyllä leikkaavalla terällä 2 mm:n seulan läpi. Jauhamisen yhteydessä osa materiaalista mureni pölyksi. Carbofex Oy:n biohiili oli raekooltaan hieman suurempaa valmiiksi jauhettua biohiiltä, josta osa oli niin ikään pölymäistä hiiltä.

Biohiilinäytteistä määritettiin ympäristölaboratoriossa niiden pH ja sähkönjohtokyky lannoitestandarden SFS-EN 13037 ja SFS-EN 13038 mukaisesti. Lisäksi näytteitä lähetettiin Savonlinnan Kuitulaboratorioon BET-analyysiin, jotka suoritettiin Micromeritics' Gemini

VII -laitteistolla. Näytteistä määritetyt ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. HH-hiilestä saatu negatiivinen BET-arvo voi johtua siitä, että näyte on vapauttanut kaasua analyysin aikana, toisin sanoen sen hiiltoprosessi on ollut epätäydellinen (ResearchGate 2015). CLT-hiilestä ei näitä määrittäviä tehty, koska näytettä oli vain ekotoksisuustestejä varten riittävä määrä.

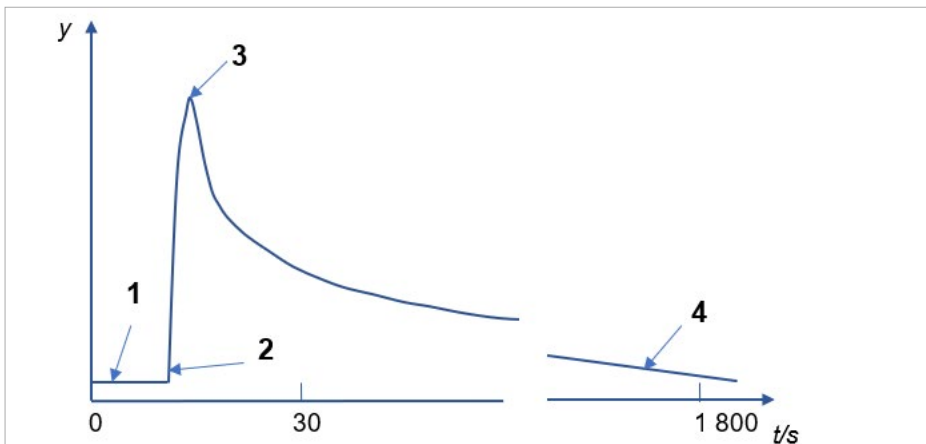
Taulukko 1. Biohiilinäytteiden ominaisuudet

Näyte	pH	Sähkönjohtokyky [mS/m]	BET pinta-ala [m ² /g]
BH	8,9	18,3	240,1
HH	6,8	15,0	0*
CF	8,8	31,2	250,2

* BET-analyysitulokset testissä -35,8 m²/g ei ole realistinen, joten tulos merkattu nollassi.

EKOTOKSISUUTTA TUTKITTII KINEETTISELLÄ VALOBAKTEERITESTILLÄ

Ekotoksisuustestit suoritettiin standardin SFS-ISO 21338 mukaisesti käyttäen kineettistä valobakteeritestistä. Menetelmässä luodaan kiinteästä näytteestä vesisuspensio ja siitä edelleen laimennossarja NaCl-liuokseen. Näytteisiin lisätään *Aliivibrio fischeri* -valobakteeria ja samalla mitataan liuoksen valontuottoa. Toksinen näyte aiheuttaa valobakteerin valontuoton heikkene- mistä (kuva 1), kun taas ei-toksisessa näytteessä valontuotto pysyy huippuarvon jälkeen melko vakiona. Mitattu valontuotto riippuu myös näytteen väristä ja sameudesta, jotka menetelmä ottaa huomioon vertaamalla kutakin laimennosta kontrollinäytteeseen. Valontuoton mittaus toistetaan 30 minuutin päästä, jolloin saadaan laskettua valontuoton inhibitio kullekin näy- tepitoisuudelle. Näytteiden pitoisuudet ja inhibitioarvot asetetaan logaritmiselle asteikoille, jolloin niistä muodostuu suora, josta saadaan määritettyä EC20- ja EC50-arvot. Menetelmä varmennetaan käyttämällä referenssiainetta, jonka aiheuttama inhibitioarvo tunnetaan.

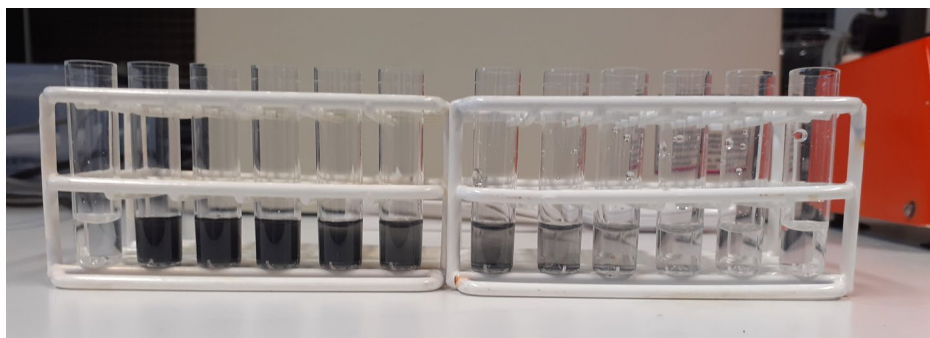


Kuva 1. Kineettisellä valobakteeritestillä saatava myrkyllisen aineen kuvaaja: 1. valontuotto ennen injektiota, 2. bakteerin injektointi, 3. maksimivalontuotto, 4. valontuotto 30 minuutin jälkeen (kuva mukailen SFS-ISO 21338)

Biohiilten ekotoksisuus määritettiin kolmella rinnakkaisnäytteellä, joista oli valmistettu 50 gramman vesisuspensio ultrapuhtaalla vedellä massasuhteessa 1:10. Näytteiden tuli olla pH-arvoiltaan $7,0 \pm 0,2$, joten ne säädettiin tarvittaessa haluttuun arvoon HCl:lla (0,1 M) tai NaOH:lla (0,01 M). Tarkan pH:n lisäksi näytteiden suolapitoisuuden tuli olla 2 %, joten näytteisiin lisättiin 1,0 grammaa NaCl:aa.

Testeissä käytettiin Aboatox Oy:ltä hankittuja valobakteerikittejä, joista tutkimuksessa tarvittavat *A. fischeri* -bakteeriliuokset valmistettiin päivittäin. Bakteeriliuoksen pH:ta ei tarvinnut säätää. Bakteeriliuoksen lisäksi testeissä tarvittiin myös referenssiainetta sekä kontrollia. Referenssiaineena testissä käytettiin 3,5-dikloorifenolia, josta valmistettiin 2-prosenttiseen suolaliuokseen kantaliuos pitoisuudeltaan 6,8 mg/l. Testissä 3,5-dikloorifenolin pitoisuus näytekyvetissä bakteerilisyksen jälkeen oli 3,4 mg/l. Tällä pitoisuudella referenssiliuoksen tulisi aiheuttaa 72 %:n inhibitio 30 minuutin mittauksessa (Aboatox 2021). Referenssiliuoksen pH:ta ei tarvinnut säätää. Kontrolliliuos oli puhtaaseen veteen tehty 2-prosenttinen NaCl-liuos, jonka pH:ta säädettiin $7,0 \pm 0,2$ käyttäen joko HCl:a (0,1 M) tai NaOH:a (0,01 M). Kontrolliliuoksen korjauskertoimen tulisi 30 minuutin kontaktiajan jälkeen olla 0,6–1,8.

Näytesuspensioista valmistettiin aina kaksi rinnakkaista yhteensä 10 näytteen laimennos-sarjaa (kuva 2) kirkkaisiin muovikyvetteihin, jotka aseteltiin inkubaattoriin ja säilytettiin siellä +15 °C:n lämpötilassa kokeen ajan. Näytteiden laimentamisessa käytettiin kontrolliliuosta, jolloin näytteiden suolapitoisuus ja pH pysyivät vakiona. Lisäksi inkubaattorissa oli rinnakkaiset pelkkää kontrolliliuosta sisältävät kyvetit (0-näytteet) sekä rinnakkaiset referenssiainetta sisältävät kyvetit. Kaikkia näytekyvettejä inkuboitiin +15 °C:ssa vähintään 15 minuuttia ennen mittausten suorittamista.



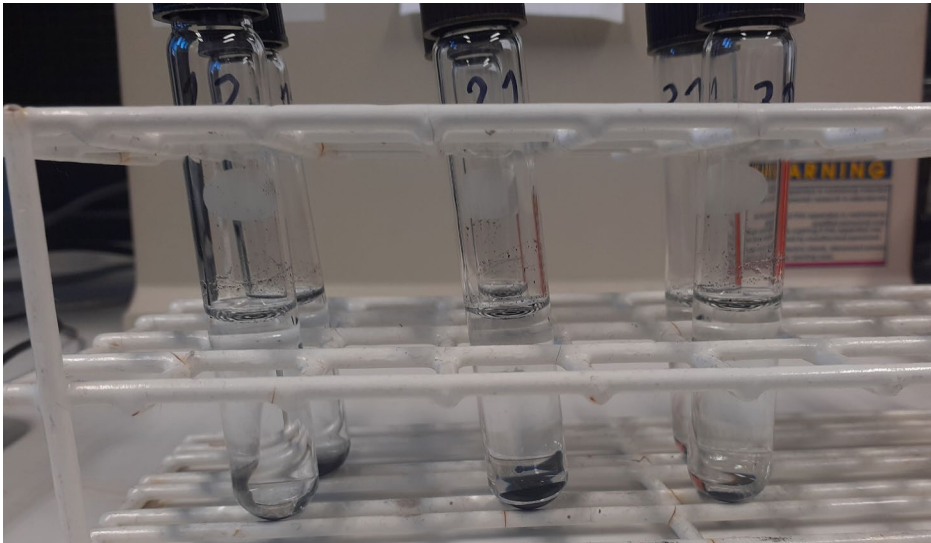
Kuva 2. Yhden biohiilisuspension laimennossarja kyveteissä bakteerin injektoinnin jälkeen, vasemmassa reunassa kontrolli ja oikeassa reunassa referenssiyhdiste (kuva H. Kettunen 2021)

Ekotoksisuusmittaus, joka jakaantuu kahteen vaiheeseen, suoritettiin Berthold Sirius 2 -luminometrillä. Laitteelle ohjelmoitiin kaksi erillistä protokollaa 24 näytteen mittaamiselle (2 kontrollia + 20 näytettä + 2 referenssiä). Ensimmäisen mittausvaiheen protokollassa laite annosteli näytteeseen tilavuussuhteessa 1:1 bakteerisuspensiota, minkä jälkeen mitattiin näytteen valontuottoa viiden sekunnin ajan. Tämän jälkeen näyte aseteltiin takaisin inkubaattoriin ja edettiin seuraavaan näytteeseen. Rinnakkaiset näytteet mitattiin aina peräkkäin. Toisen vaiheen protokollassa ainoastaan mitattiin samassa järjestyksessä näytteiden luminesenssi uudestaan viiden sekunnin ajan, kun 30 minuuttia bakteerisuspensioliuoksen lisäyksestä oli kulunut. Molempien vaiheiden alussa näytettä sekoitettiin kaksi sekuntia vortexin avulla ennen luminometriin asettamista. Laite pestiin aina ennen mittauksia ajamalla letkun läpi vuorotellen puhdasta vettä ja ilmaa.

NÄYTTEEN SENTRIFUGOINNILLA SELVITETTIIN VESI-LIUKOISTA TOKSISUUTTA TUMMIEN NÄYTTEIDEN OSALTA

Normaalisti käytetyn standardin mukaan näytesuspensioita ei tarvitse käsitellä ennen mittauksia, mutta toisen Mayt Oy:n biohiilinäytteen suurimpien pitoisuuksien laimennoksista saatiin suhteellisen suuria inhibitiolukemia verrattuna saman näytteen enemmän laimennettuihin pitoisuuksiin sekä muihin näytteisiin. Tämän takia päätettiin menetelmän kehittämisessä mukana olleen Juha Lappalaisen (Aboatox Oy) (2021) kehotuksesta tehdä vielä uudet näytesuspensiot kaikista näytteistä, jotka sentrifugoitiin ja joista kerättiin supernatantit vesiliukoisen toksisuuden analysoimiseksi.

Uusinta-ajaja varten näytesuspensiot (3 kpl) valmisteltiin samalla tavalla kuin aiemminkin. Valmistuksen jälkeen niitä laskeutettiin hetki pöydällä, minkä jälkeen jokaisesta suspensiosta pipetoitiin varovasti näytettä 5,0 ml sentrifugiputkiin siten, että mahdollisimman vähän kiintoainesta siirtyisi näytteen mukana. Rinnakkaiset näytteet BH-hiilen osalta valmisteltiin jo tässä vaiheessa, eli jokaisesta kolmesta näytesuspensiosta pipetoitiin näytettä kahteen sentrifugiputkeen. BH-näytteet tutkittiin vain kolmen suurimman pitoisuuden osalta, sillä tällöin oli tarve käyttää vain yksi toksisuuskitti. Muista hiilinäytteistä tehtiin kaksi rinnakkaista sentrifugiputkea, joista tehtiin kymmenen laimennoksen sarja normaalisti sentrifugoinnin jälkeen. Sentrifugajaja suoritettiin kahdesti. Ensimmäinen sentrifugointi näytteitä 2000 rpm:lla viiden minuutin ajan, minkä jälkeen valtaosa kiintoaineesta oli putken pohjalla. Putkia pyöräytettiin, jotta putken seinämille jäänyt kiintoainetta saataisiin nesteeseen mukaan. Tämän jälkeen näytteitä sentrifugointiin vielä 3000 rpm:lla viiden minuutin ajan. Sentrifugajajojen jälkeiset kirkkaat supernatantit on esitetty kuvassa 3. Sentrifugoinnin jälkeen näytteistä valmisteltiin luminometrille laimennossarjat. Luminometrimittaukset suoritettiin kuten aiemmin on kuvattu käyttäen 30 minuutin inkubointiaikaa.



Kuva 3. Biohiilinäytteiden 10,0 m-% vesisuspensiot sentrifugiajon jälkeen (kuva H. Kettunen 2021)

LUMINOMETRIN TULOKSET VAATIVAT DATAN KÄSITTELYÄ

Luminometrillä saatu data käsiteltiin Excel-pohjalla, jossa kustakin näytteestä määritettiin alkumittauksen valontuoton maksimiarvo ja 30 minuutin jälkeen viiden sekunnin pituisen mittauksen valontuoton keskiarvo (käytännössä arvo pysyi hyvin vakiona tämän ajan). Näillä tiedoilla saatiin laskettua kontrollinäytteiden kf-arvo eli korjauskerroin 2-prosenttisen NaCl-liuoksen aiheuttamasta inhibitiosta sekä sen avulla kunkin näytteen aiheuttama inhibitio. Varsinaisen inhibition lisäksi arvioitiin bakteerin syötön aikana muodostuneita kuvaajia (kuten kuvassa 1), joissa on esitetty valontuotto ajan funktiona.

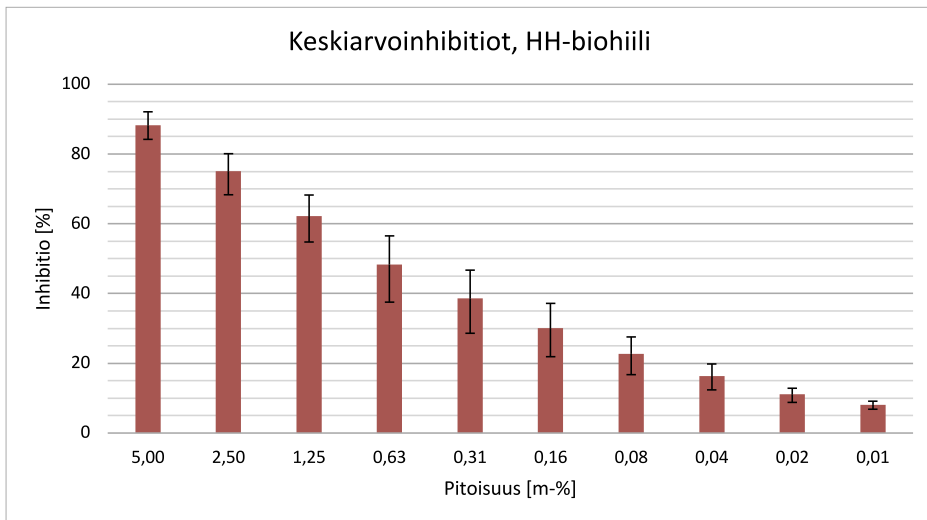
EC50-arvojen laskemisen kannalta validisuusrajoina pidettiin standardin SFS-ISO 21338 mukaisesti rinnakkaisten laimennosten maksimissaan 3 %:n eroavuutta tuloksen keskiarvosta. Lisäksi näyte on standardin mukaan liian värikäs, jos sen valontuoton maksimi eroaa yli 90 % kontrollinäytteestä. Tämän takia kaikkien kontaktinäytteiden tapauksessa kolme ensimmäistä laimennosta (5 %, 2,5 % ja 1,25 %) oli liian tummia, jotta niiden inhibitioarvoja voisi käyttää tulosten laskennassa. Yleisemmin testin voi sanoa olleen hyväksytty, kun kf-arvo on 30 minuutin inkuboinnin jälkeen välillä 0,6–1,8 ja referenssiyhdisteen inhibitio on oikealla tasolla (3,5-dikloorifenoli pitoisuudessa 3,4 mg / l aiheuttaa inhibition 72 %).

Valmista Excel-pohjaa täytyi muokata käsin riippuen siitä, minkälaisia tuloksia mittauksista saatiin. EC-arvojen laskemiseksi laskentataulukosta poistettiin negatiivista inhibitiota eli induktiota aiheuttaneet sekä muutoin epävalidit laimennokset. Kuitenkin tuloksia tarkasteltiin myös kokonaisuutena miettien, mistä epävalidit arvot voivat johtua.

Valobakteeritestillä yksin ei varsinaisesti voida aineen toksisuutta määrittää, vaan tulisi aina tehdä useampia testejä aineen myrkyllisyyden varmentamiseksi. COHIBA-projektissa (Nakari ym. 2012) on esitetty suosituksiksi Itämereen johdettavien jätevesien aiheuttamalle akuutille toksisuudelle valobakteeritestin osalta raja-arvoa 30 %:n inhibitio 80 %:n pitoisuudessa 30 minuutin aikana. Virallisemman vertailuarvon puuttuessa 30 %:n inhibitiota käytetään hiilinäytteiden osalta toksisuutta osoittavana vertailuarvona saatuihin tuloksiin.

SAVULTA TUOKSUNEESA BIOHIILESSÄ HAVAITTIIN SELKEÄÄ TOKSISUUTTA

Vahvasti savulta tuoksuneen HH-biohiilen ekotoksisuustestien keskiarvoinhibitiot kolmen mittauksen keskiarvona on esitetty kuvassa 4. Tutkitulla biohiilellä saatiin selkeitä positiivisia inhibitioarvoja, jotka noudattivat selvää logiikkaa laimennossarjan edetessä, eli näytteessä oli selvästi havaittavissa toksisuutta. Rinnakkaisten näytteiden välinen heitto oli myös pientä paitsi yhdessä näytteessä, jossa epävalidien pitoisuuksien poistamisen jälkeen lopputuloksen laskemista varten jäi vain kolme eri laimennosta. Tosin tässäkin tapauksessa heitot olivat vain välillä 3–5 %. Epävalidit tulokset voivat johtua hiilipartikkelien tarttumisesta katkaistun pipetinkärjen ulkopinnalle, josta hiiltä on kulkeutunut pieniä epätasaisia määriä laimennossarjassa seuraaviin kyvetteihin.



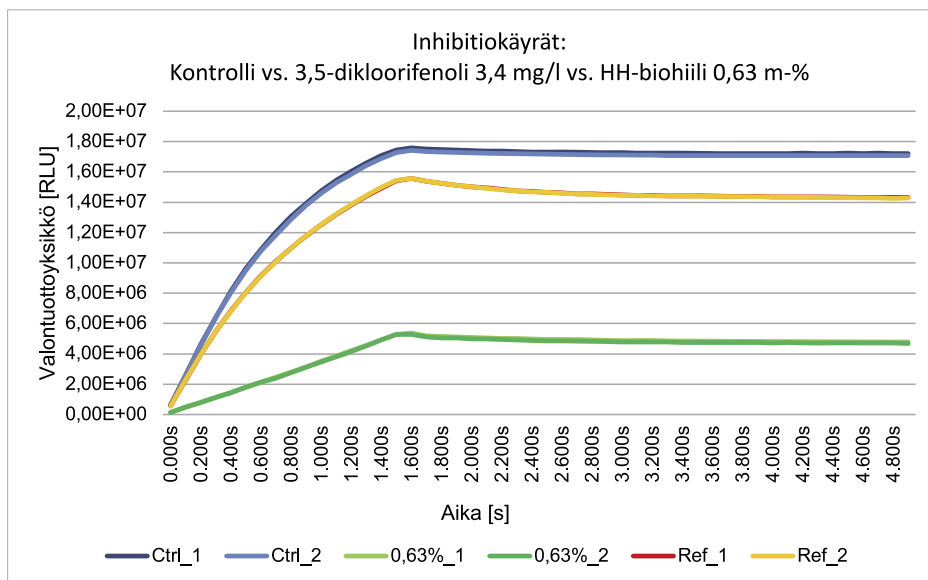
Kuva 4. Savulta tuoksuneen biohiilen aiheuttamat inhibitiot eri pitoisuuksissa. Palkit osoittavat mittaustulosten keskiarvoa ja virherajat kaikkien mittauskertojen minimi- ja maksimiarvot

Kf-arvo vaihteli testeissä välillä 0,68–0,75, ja referenssiyhdisteen inhibitio vaihteli välillä 65–75 %. Referenssin poikkeamiin ei löytynyt muistiinpanojen pohjalta selvää yksittäistä syytä. Syitä voivat olla bakteerin solumäärän poikkeama toksisuuskitin pulloissa tai inhimilinen virhe. HH-hiilen suurimmalla pitoisuudella (5,0 m-%) inhibition keskiarvoksi saatiin 88 %, ja pienimmällä pitoisuudella (0,01 m-%) inhibitio oli keskimäärin 8 %. Huonon hiilen EC-arvot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Savuhiilen toksisuusarvot.

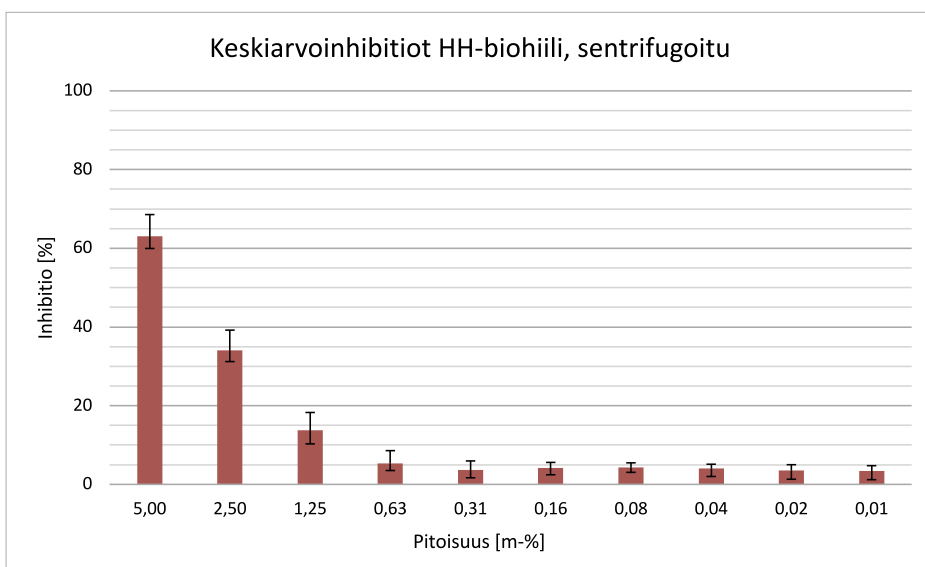
HH-hiili	Toksisuus [m-%]	Toksisuus [g/l]
EC50	0,91	9,6
EC20	0,07	0,8

Yhden HH-näytteen valontuotto heti bakteerin injektoinnin jälkeen 0,63 m%-pitoisuudella verrattuna kontrolliin ja referenssiin on esitetty kuvassa 5. Rinnakkaisnäytteiden käyrien osuminen päällekkäin kertoo testin onnistuneen laadukkaasti rinnakkaisten näytteiden kesken. Kuvasta nähdään kontrollien pysyvän melko vakiona maksimin saavuttamisen jälkeen, mutta referenssit lähtevät selvään laskuun. Myös hiilinäytteillä, jotka selvästi tummempina aineina eivät saavuta läheskään kirkkaiden kontrollien tai referenssien kaltaista maksimiluminesenssia, nähdään laskeva trendi.



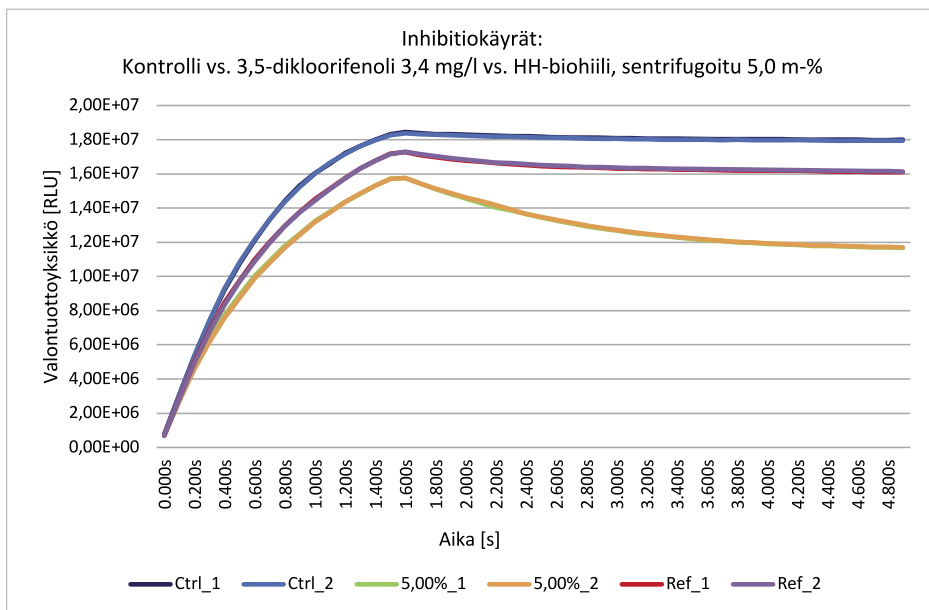
Kuva 5. Valontuotto HH-näytteessä huononi ensimmäisen vaiheen mittauksessa

Lisäksi kolmen ensimmäisen biohiilinäytteen laimennoksen ollessa liian tummia validin tuloksen kannalta niistä tutkittiin vesiliukoinen toksisuus. Näin oli mahdollista saada selville myös suuremman biohiiliannostuksen vaikutus vesiliukoisesti. HH-biohiilen vesiliuoksen eri pitoisuuksien aiheuttamat inhibitiot valobakteerille on esitetty kuvassa 6. Kuvassa erityisen mielenkiintoisia olivat siis inhibitiot pitoisuuksilla 5,0–1,25 %. Ekotoksisuuden kannalta valobakteeritestissä yli 30 % ylittäviä inhibitioita voidaan pitää merkinä toksisuudesta (Nakari ym. 2012). Tutkitun näytteen vesiliuos pitoisuudella 2,5 m-% vaikutti siis aiheuttavan tämän raja-arvon ylittävän inhibition valobakteerille, kun kontaktinäytteen tapauksessa (kuva 4) tähän riitti jo näytteen pitoisuus 0,16 m-%.



Kuva 6. Huonon hiilen sentrifugoidun näytteen aiheuttamat inhibitiot. Palkit osoittavat mittaustulosten keskiarvoa ja virherajat kaikkien mittauskertojen minimi- ja maksimiarvot

Kuvassa 7 on esitetty sentrifugoidun näytteen suurimman pitoisuuden alkumittauksen valontuottokäyrät suhteessa kontrolli- ja referenssinäytteisiin. Näytteen ollessa nyt kirkas sen valontuoton maksimiarvo oli kontaktinäytteitä selvästi suurempi. Näytteen toksinen vaikutus valobakteerille ilmenee kuvasta hyvin näytteen käyrien laskiessa erittäin voimakkaasti viiden sekunnin aikana.



Kuva 7. Valontuotto sentrifugoidussa HH-näytteessä oli pitoisuudessa 5,0 m-% selvästi toksinen jo viiden sekunnin alkumittauksessa

Näytteen toksisuutta selvitettiin vielä tarkempien analyysien avulla, jotta selviäisi, mikä hiilessä oleva yhdiste voisi toksista vaikutusta aiheuttaa. HH-biohiilestä analysoitiin ALS Finlandin (2022) toimesta jälkikäteen raskasmetallit sekä PAH-yhdisteet, jotka ovat biohiilissä potentiaalisesti esiintyviä haitta-aineita. Analyysien tulokset on esitetty taulukoissa 3 ja 4.

Taulukko 3. Raskasmetallipitoisuudet HH-biohiilessä (ALS Finland Oy 2022) ja EBC:n (2022) asettamat raja-arvot

Raskasmetalli	HH-biohiili [mg/kg, ka]	Raja-arvo: EBC-Agro [mg/kg, ka]
Pb	< 1,0	120
Cd	< 0,40	1,5
Cu	1,7	100
Ni	< 1,0	50
Hg	< 0,20	1
Zn	20,8	400
Cr	< 0,50	90
As	< 0,50	13

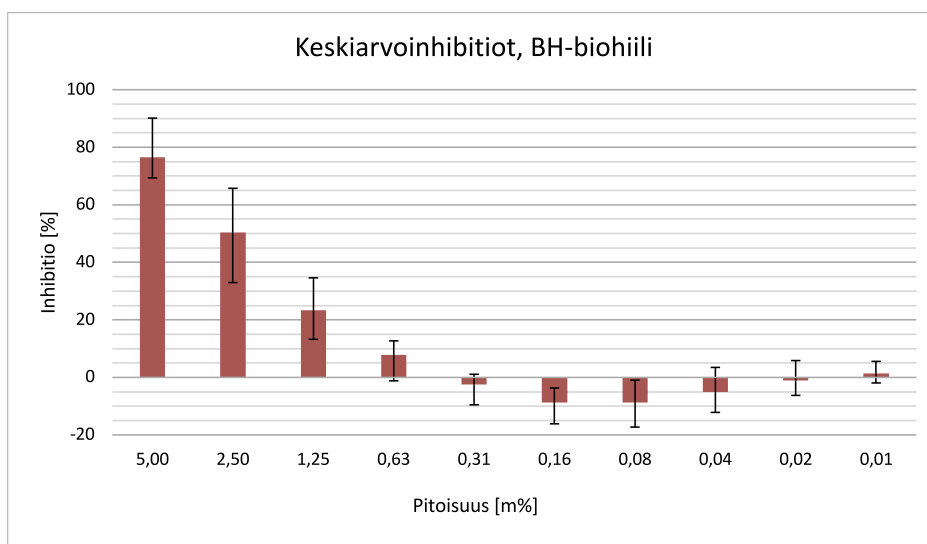
Analyysitulosten perusteella HH-biohiilen sisältämät raskasmetallipitoisuudet (taulukko 3) eivät ylitä EBC:n asettamia raja-arvoja EBC-Agro-luokan biohiilille. Raskasmetallit ovat biohiilissä raaka-aineista riippuvaisia, joten pyrolyysissa käytetty lähtöaine eli puuaines tuskin on ollut syy näytteen toksiseen vaikutukseen. Sen sijaan HH-biohiilen PAH-yhdisteiden kokonaispitoisuus (taulukko 4) ylittää EBC:n asettaman raja-arvon 16 EPA PAH-summan osalta. Etenkin naftaleenin pitoisuus hiilessä on ollut korkea. Tämä voi ainakin osittain selittää näytteen toksisen vaikutuksen valobakteerille. Lisäksi hiilessä voi olla muita haitta-aineita, joita tässä hankkeessa ei tutkittu.

Taulukko 4. PAH-pitoisuudet HH-biohiilessä (ALS Finland Oy 2022) ja EBC:n (2022) asettamat raja-arvot

PAH-yhdisteet	HH-biohiili [mg/kg, ka]	Raja-arvo: EBC-Agro [mg/kg, ka]
naftaleeni	12	-
asenaftyleeni	< 0,21	-
asenafteeni	< 0,21	-
fluoreeni	< 1,3	-
fenantreeni	1,8	-
antraseeni	0,41	-
fluoranteeni	0,16	-
pyreeni	0,24	-
bentso(a)antraseeni	0,051	-
kryseeni	0,069	-
bentso(b)fluoranteeni	< 0,021	-
bentso(k)fluoranteeni	< 0,021	-
bentso(a)pyreeni	< 0,042	-
indeno(123cd)pyreeni	< 0,021	-
dibentso(a,h)antraseeni	< 0,021	-
bentso(ghi)peryleeni	< 0,021	-
Σ16 EPA PAH	15	6,0 + 2,2
Σ8 EFSA PAH	0,267	1,0

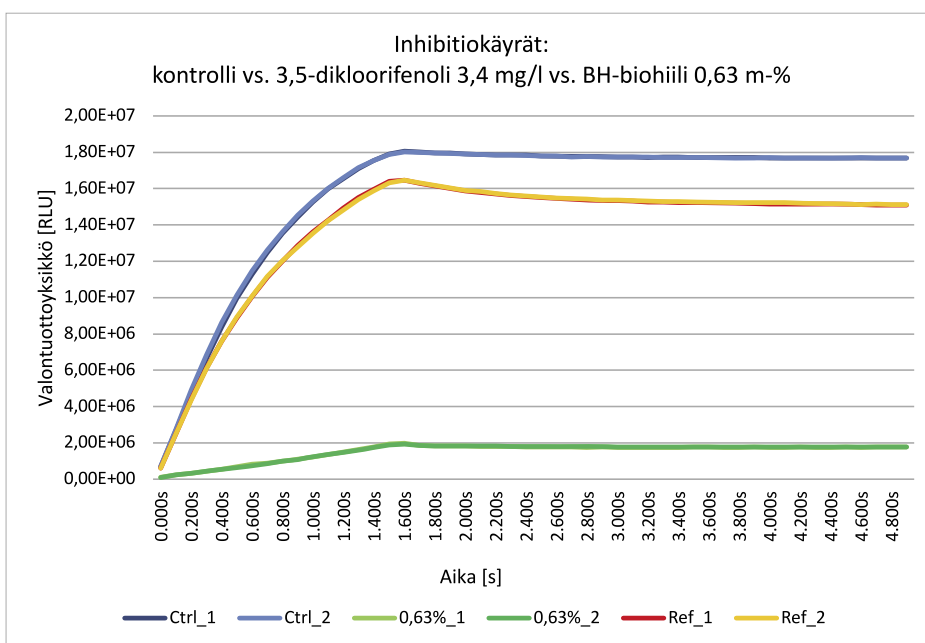
MAANPARANNUSAINEIKSI TARKOITETUILLA BIOHIILILLÄ EI NÄHTY TOKSISIA VAIKUTUKSIA

BH-biohiilen rinnakkaisista näytteistä kolme vahvinta laimennosta aiheuttivat keskimäärin yli 20 %:n inhibitioita, jopa 90 %:n inhibitioon asti (kuva 8). Näitä tuloksia ei kuitenkaan voinut käyttää EC-arvojen laskennassa, koska ne ovat käytetyn standardin mukaan liian tummia suhteessa kontrolliin. Laimeammat pitoisuudet olivat osittain jopa negatiivisia inhibitioprosentin ollessa -1,0...-8,7. Lisäksi rinnakkaisten näytteiden välillä oli lähes kaikissa laimennoksissa liikaa heittoa, jotta EC-arvojen laskeminen olisi onnistunut. kf-arvo vaihteli huomioituissa näytteissä välillä 0,65–0,67. Referenssiyhdisteen inhibitio vaihteli huomioituissa näytteissä välillä 72,6–72,9 %.



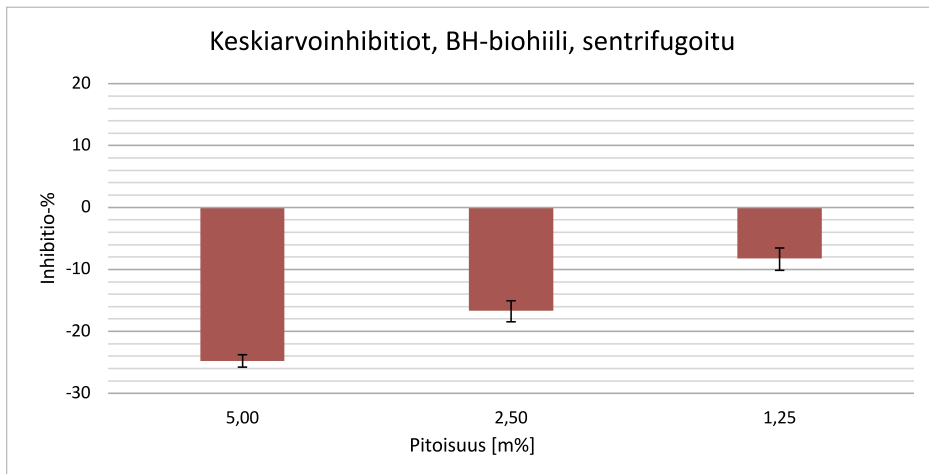
Kuva 8. Mayt Oy:n BH-biohiilen aiheuttamat inhibitiot eri pitoisuuksilla. Palkit osoittavat mittaustulosten keskiarvoa ja virherajat kaikkien mittauskertojen minimi- ja maksimiarvot

Kuvassa 9 on esitetty yhden BH-näytteen valontuotto heti bakteerin injektoinnin jälkeen suurimmalla validilla pitoisuudella eli 0,63 m-%. Näytteen ollessa edelleen melko tumma sen maksimivalontuotto ei saavuta kovin korkeaa arvoa, tosin valontuotto ei maksimista juurikaan muutu alkumittauksen aikana, eli se pysyy lähes vakiotasolla. Tämän takia kuvaajasta itsestään on vaikea tulkita näytteen mahdollista toksisuutta.



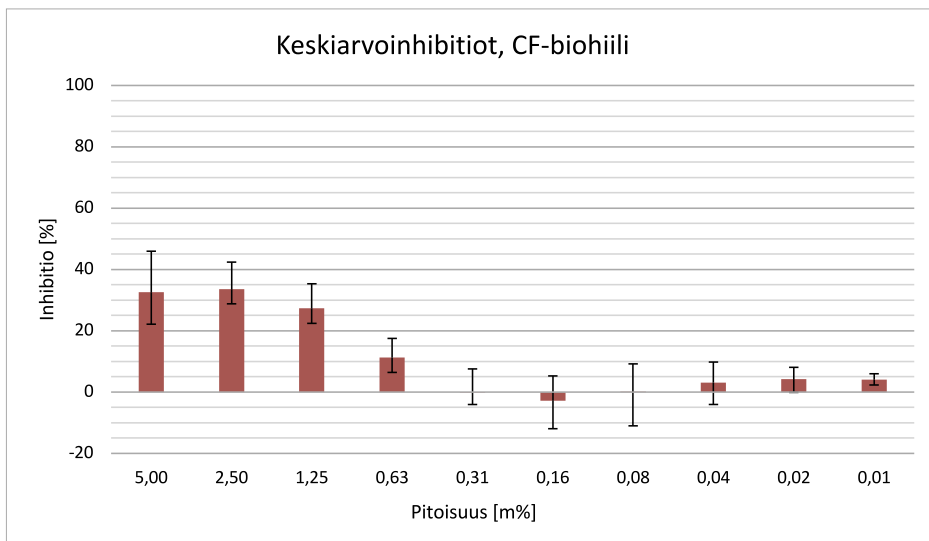
Kuva 9. Näytteen BH valontuotto ekotoksisuusmittauksen ensimmäisessä vaiheessa

Tummasta väristä huolimatta Maytin biohiilen kontaktnäytteen aiheuttamat inhibitiot olivat yllättävän korkeat ensimmäisissä laimennoksissa, joten asiaa tutkittiin tarkemmin sentrifugoimalla myös BH-näytteet. Tällä kertaa yhdestä BH-näytteestä tehtiin vain kolmesta suurimmasta laimennoksesta rinnakkaiset testattavat näytteet, koska se oli kiinnostavin pitoisuusalue. Tällöin saatiin määritettyä mahdollisten vesiliukoisten aineiden aiheuttama toksisuusvaikutus näytteen vesiliuksesta yhdellä testikitillä. Kuvassa 10 esitetyistä sentrifugoidun BH-näytteen keskiarvoinhibitiosta nähdään inhibitioiden kääntyneen tutkituilla pitoisuuksilla negatiiviselle puolelle, vaikka ne kontaktnäytteessä (kuva 8) olivat positiivisia. Alkumittauksessa sentrifugoitujen näytteiden ja kontrollien käyrät kulkivat käytännössä päällekkäin, minkä takia niitä ei erikseen esitetä. Näiden tulosten perusteella BH-biohiilen vesiliuos siis vain paransi valobakteerin valontuottoa, eikä se ollut toksista.



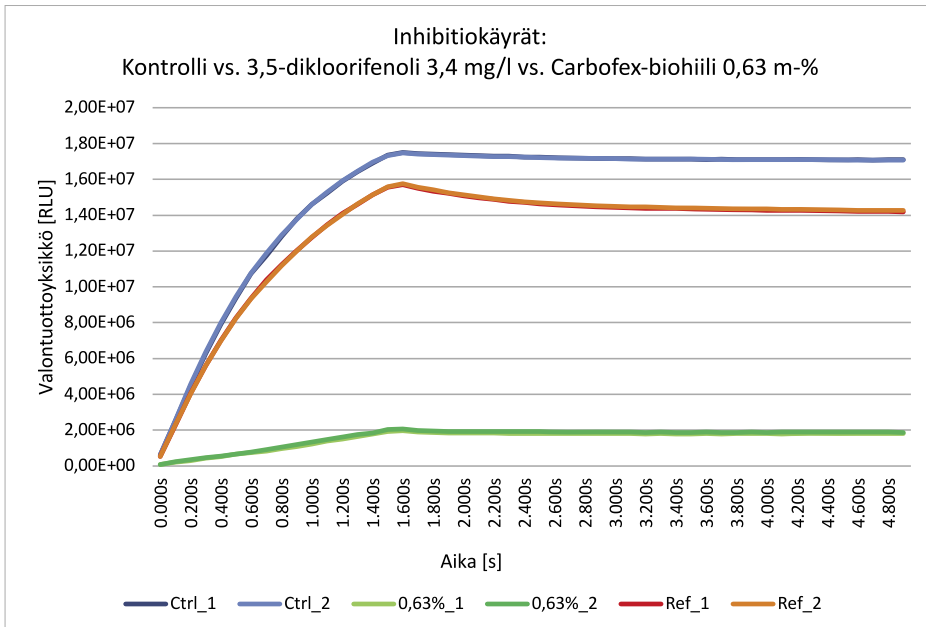
Kuva 10. Sentrifugoidun Mayt-biohiilen aiheuttamat inhibitiot eri pitoisuuksilla. Palkit osoittavat mittaustulosten keskiarvoa ja virherajat kaikkien mittauskertojen minimi- ja maksimiarvot

Carbofex Oy:n CF-biohiilinäytteiden ekotoksisuustestien keskiarvoinhibitiot kolmen mittauksen keskiarvona on esitetty kuvassa 11. Myös CF-näytteissä ilmeni joillain laimennoksilla liian paljon heittoa rinnakkaisten kesken, minkä vuoksi ne eivät olleet valideja. Lisäksi kahdella näytteellä aiheutui negatiivista inhibitiota alemmilla laimennoksilla, eivätkä inhibitiot kolmannellakaan näytteellä olleet muutamaa prosenttia suurempia samoilla laimennoksilla. Vain yhdellä näytteellä saatiin vähintään kolme validia mittauspistettä, jotta sille oli mahdollista laskea EC50-arvo, joka oli kuitenkin niin suuri, ettei se ollut realistinen (> 100 %). kf-arvo vaihteli huomioiduissa näytteissä välillä 0,58–0,66. Referenssiyhdisteen inhibiitio vaihteli huomioiduissa näytteissä välillä 69–76 %.



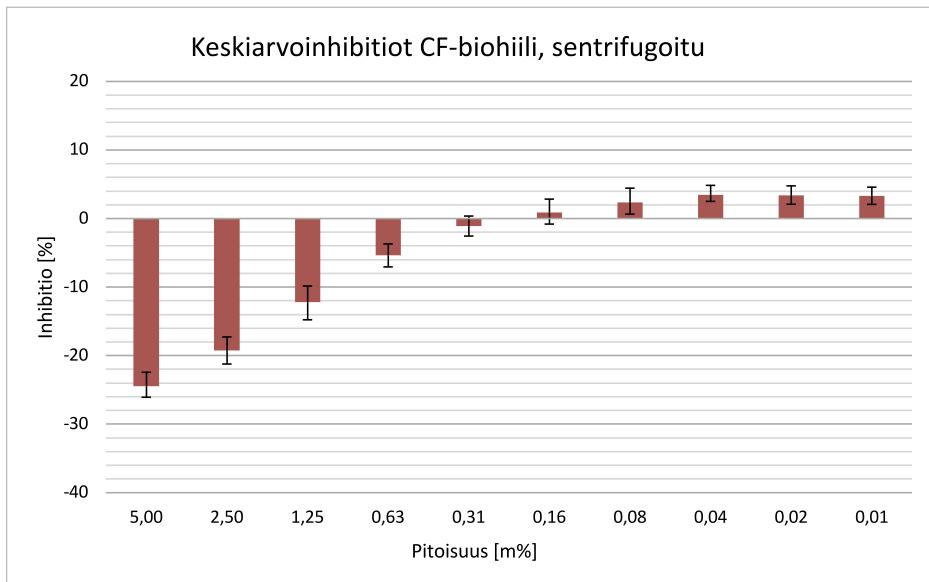
Kuva 11. CF-biohiilen aiheuttamat inhibitiot eri pitoisuuksilla. Palkit osoittavat mittaustulosten keskiarvoa ja virherajat kaikkien mittauskertojen minimi- ja maksimiarvot

Kuvassa 12 on esitetty yhden CF-näytteen valontuotto heti bakteerin injektoinnin jälkeen suurimmalla validilla pitoisuudella eli 0,63 m-%. Kontrollien valontuotto aavistuksen laskee heti maksimiarvon jälkeen kuitenkin tasaantuen viiden sekunnin aikana. Referensinäytteillä nähdään selkeämmin laskeva trendi mittausaikana. BH-näytteiden valontuotto pysyy käytännössä vakiona mittausajan, vaikka se ei kovin korkeaksi tummasta väristä johtuen nousekaan.



Kuva 12. Esimerkkikäyrät CF-biohiilen alkumittauksesta

CF-hiilestä tehtiin myös vesiliukaisen toksisuuden arvioimiseksi sentrifugoidut laimennosjarjat, joiden tulokset on esitetty kuvassa 13. Tulokset vastasivat kolmen suurimman laimennospitoisuuden osalta BH-biohiilen tuloksia eli olivat selvästi negatiiviset. Missään pitoisuudessa inhibitiot eivät nousseet yli 4 %. CF-biohiilessä ei siis havaittu toksisuutta.



Kuva 13. CF-biohiilen sentrifugoidun näytteen aiheuttamat inhibitiot eri pitoisuuksilla. Palkit osoittavat mittaustulosten keskiarvoa ja virherajat kaikkien mittauskertojen minimi- ja maksimi-arvot

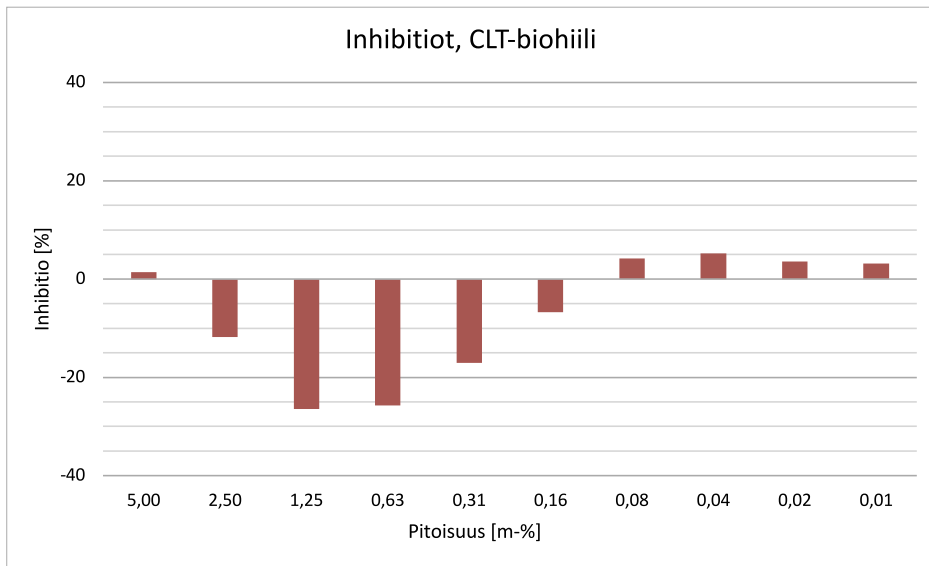
CLT-POHJAISEN BIOHIILEN TOKSISUUTTA EI OLLUT AIKAISEMMIN TUTKITTU

CLT (Cross Laminated Timber) eli monikerroslevy koostuu Puuinfon (2020) mukaan useasta lautakerroksesta, jotka ovat ristiin liimattu toisiinsa. Tällä tavoin puusta saadaan erittäin luja ja hyvin paloa kestävä mutta kevyt rakennuslevy. CLT:n muodostavat laudat liimataan toisiinsa esimerkiksi vakuumiliimaamalla tyhjiössä tai puristamalla levyt prässeillä. Liimausprosesseja sekä liima-aineita on erilaisia, mutta esimerkiksi CLT-elementtien valmistaja Hoisko (CLT Finland Oy 2021) kertoo CLT-elementtiensä liiman vaahtoutuvan prosessissa ja imeytyvän puun soluväleihin pintaa syvemmälle. Hoiskon tuotteissa kerrotaan käytettävän Loctite Purbond -polyuretaanihiimaa, joka on tutkitusti turvallista, allergiavaapaata ja tuoksutonta. Sen kerrotaan myös olevan vapaata VOC-yhdisteistä.



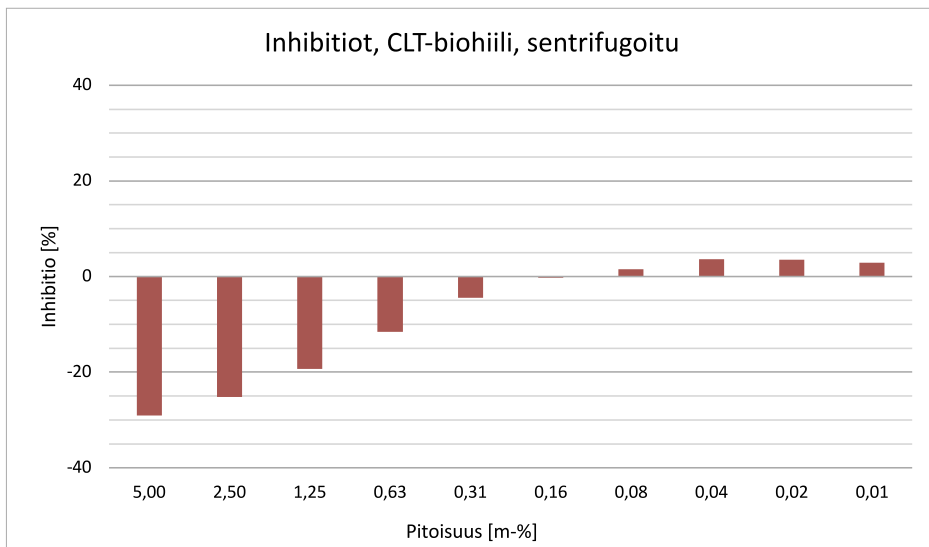
Kuva 14. CLT-biohiili liitoskohdan halkaisun jälkeen (kuva H. Kettunen 2021)

Hankkeessa tutkittiin CLT:stä valmistetun biohiilen mahdollista ekotoksisuutta. Näyte (kuva 14) oli peräisin CLT-pohjaisesta purkupuusta, mutta tarkempaa tietoa sen valmistustavoista tai valmistuksessa käytetyn liiman laadusta ei ollut. Näytehiilestä kuitenkin erottui yhä selvästi ristiliitoskohta, josta raaputettiin mahdollisimman tarkasti näytteeksi liimapinnat, joiden osuudeksi tuli noin 25 m-% näytteestä. Loput näytteestä oli samaa materiaalia mutta ei-liimapintaa, jotta näytettä saatiin riittävä määrä ekotoksisuustestiä varten. CLT-biohiilen kontaktinäytteen aiheuttamat inhibitiot on esitetty kuvassa 15. Näytteen kolme suurinta pitoisuutta olivat liian tummia validin tuloksen kannalta, mutta silti sen aiheuttamat inhibitiot olivat erittäin alhaisia ja jopa negatiivisia. CLT-hiili ei siis ollut testin perusteella toksista.



Kuva 15. CLT-biohiilen ekotoksisuustestin tulokset

Lisäksi CLT-biohiilen pienestä näytemäärästä johtuen tutkittiin sen vesiliuoksen toksisuus yhdellä testillä eli edelleen sentrifugoimalla kontaktinäyte. CLT-biohiilen sentrifugoidun vesiliuoksen aiheuttamat inhibiitot valobakteerille on esitetty kuvassa 16. Tämänkään testin perusteella näytteessä ei havaittu toksisuutta, vaan suuremmissakin vesiliuoksen pitoisuuksissa valontuottoa tehostava vaikutus lisääntyi.

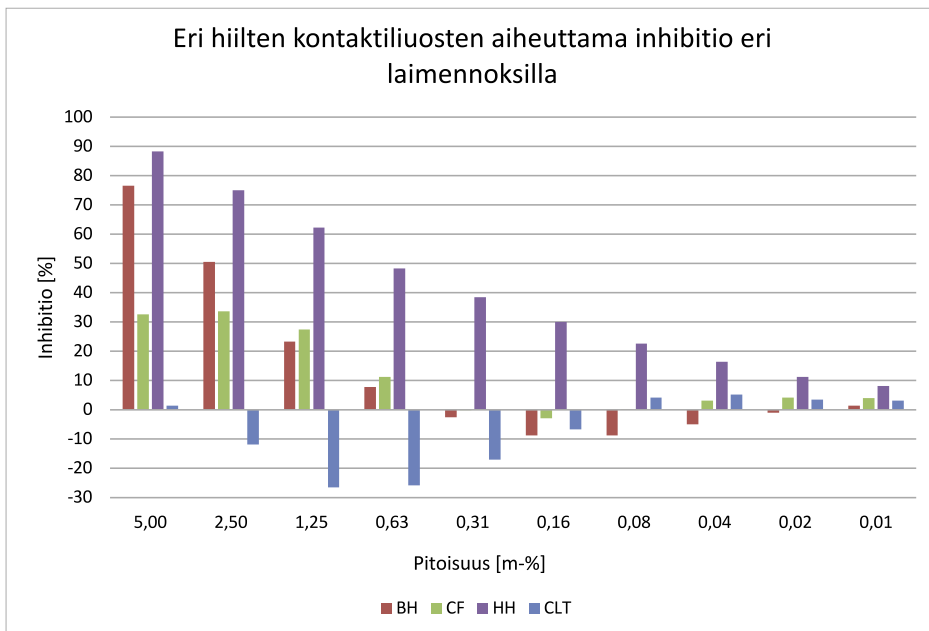


Kuva 16. Sentrifugoidun CLT-biohiilen ekotoksisuustestin tulokset

TULOSTEN VERTAILU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

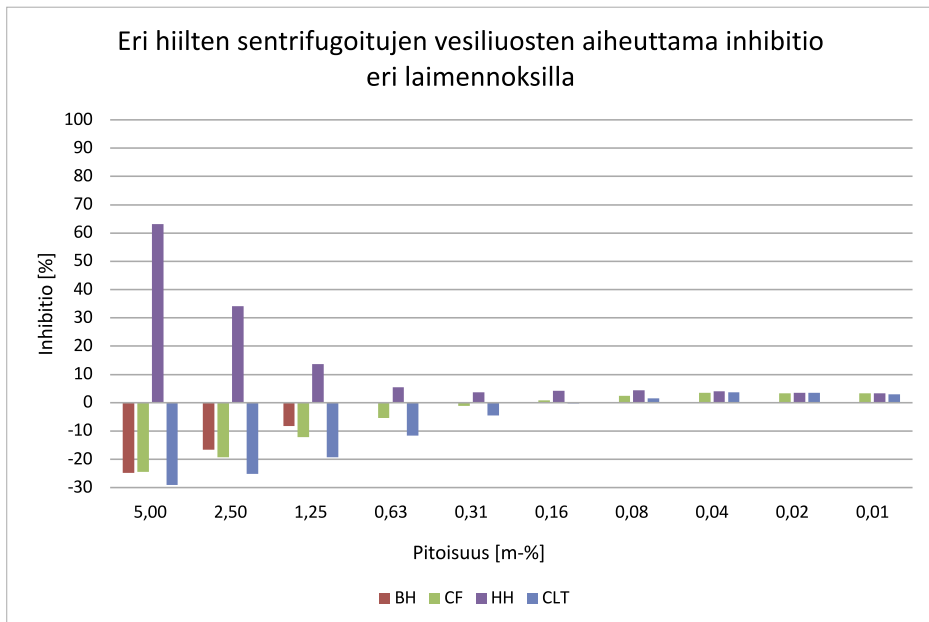
Ainoastaan savulta tuoksunut huono hiili todettiin selvästi ekotoksiseksi näytteeksi. Sen rinnakkaisten näytteiden valontuotokäyrät olivat hyvin lähellä toisiaan, eli tuloksissa oli eri päivinä hajontaa suhteellisen vähän. Huonosta hiilestä analysoitujen haitta-aineiden perusteella 16 EPA PAH-yhdisteen summa ylitti EBC:n asettaman raja-arvon EBC-Agro-luokitellulle biohiilelle. Tulos viittaa jollain tavalla epäonnistuneeseen pyrolyysiprosessiin, jossa valmistettuun hiileen on syntynyt korkeita PAH-yhdisteiden pitoisuuksia.

Sekä Mayt Oy:n että Carbofexin biohiilissä tulokset kävivät laimeammassa pitoisuuksissa negatiivisen inhibition puolella (kuva 17). Tällöin näytteet ovat edistäneet valontuottoa, eli niillä voisi sanoa olevan hormeettinen vaikutus *A. fischeri* -bakteerille. Carbofexin biohiili ei muutenkaan tuottanut merkittäviä inhibitoarvoja, kun tuloksista jätetään liian tummat näytteet huomioimatta.



Kuva 17. Eri hiilten kontaktinäytteiden aiheuttama inhibitio eri pitoisuuksilla

Näytteiden sentrifugoinnin myötä (kuva 18) myös korkeampien hiilinäytepitoisuuksien aiheuttama inhibitio-%, joka johtui näytteiden tummasta väristä, kääntyi negatiiviseksi. Tämä puolsi kyseisten näytteiden myrkyttömyyttä. Vesiliuosten vertailu myös selvästi osoittaa huonolaatuisen biohiilen vaikutuksen valontuottoon, sillä inhibitioissa on selkeä käyttäytymisero HH-hiilen ja muiden hiilien välillä. HH-näytteen vesiliuoksen tulokset osoittivat sen yhä olevan toksista, joskin pienemmässä määrin kuin kontaktinäytteen tapauksessa.



Kuva 18. Eri hiilten sentrifugoitujen vesiliuosten aiheuttama inhibiatio eri pitoisuuksilla

CLT-pohjaisen biohiilen toksisuustulokset osoittivat, että CLT-puusta on mahdollista tuottaa hyvälaatuisia ja ympäristöturvallista biohiiltä. Tutkimus kannattaisi kuitenkin varmistaa toistamalla testi täysin hiilletystä liimapinnasta erotellulla näytteellä, mikä ei tässä hankkeessa ollut mahdollista pienestä näytemäärästä johtuen. Tosin olisi hyvin epärealistista, että biohiilierä koostuisi nimenomaan vain liimapinnasta peräisin olevasta hiilestä. Silti aihe olisi hyvä tutkia läpikotaisin, sillä erilaiset liimat voivat muodostaa useita reaktiotuotteita pyrolyysiprosessissa. Vaikka ne alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan turvallisia olisivatkin, ne voivat mahdollisesti juuttua hiilen pinnoille.

Hankkeessa tehtyjen testien tulokset ovat kuitenkin vain yhden menetelmän tuloksia, ja biohiilellä tiedetään olevan indusoivia ominaisuuksia *A. fischeri* -bakteerille aiemmin tehdyissä biohiilten ekotoksisuustutkimuksissa (Gondek ym. 2016). Tarkemmin toksisuus tulisi määrittää vielä jollain muulla tai mielellään useammalla testillä, jotta näytteiden toksisuudesta tai epätoksisuudesta voitaisiin varmistua. Joka tapauksessa tulokset osoittavat, että biohiilen laadulla on merkitystä. Huonolaatuista, epäoptimaalisessa pyrolyysiprosessissa tuotettua biohiiltä ei tule käyttää esimerkiksi maanparannustuotteena tai vedensuodatusmateriaalina, koska sillä voi olla haitallisia vaikutuksia sen kanssa kontaktiin joutuville eliöille.

LÄHTEET

Aboatox Oy 2021. 1243-500 BioTox Kit, Instructions for use. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.aboatox.com/wp-content/uploads/2013/09/1243-500-BioTox-kit-Instructions-for-use-solid-diluent.pdf>. [viitattu 29.11.2021]

ALS Finland Oy. 2022. Analyysitulokset HH-biohiilestä. Pöytäkirja. PDF-dokumentti. Saapunut 9.12.2022.

CLT Finland Oy. 2021. Liima tekee CLT:stä vahvan, kauniin ja tiiviin rakenteen. Www-artikkeli. Saatavissa: <https://hoisko.fi/2021/01/18/liima-tekee-cltsta-vahvan-kauniin-ja-tiiviin-rakenteen/> [viitattu 29.11.2022]

European Biochar Foundation (EBC). 2022. European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. PDF-dokumentti. Päivitetty 10.1.2022. Saatavissa: https://www.european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_1.pdf [viitattu 9.12.2022]

Gondek, K., Mierzwa-Hersztek, M., Smreczak, B., Baran, A., Kopeć, M., Mróz, T., Janowski, P., Bajda, T. & Tomczyk, A. 2016. Content of PAHs, activities of γ -radionuclides and ecotoxicological assessment in biochars. PDF-artikkeli. Saatavissa: <https://sciendo.com/article/10.1515/pjct-2016-0067> [viitattu 29.11.2022]

Lappalainen, Juha. 2021. Henkilökohtainen tiedoksianto. Sähköpostikeskustelu 29.11.2021. Aboatox Oy.

Nakari, T., Schultz, E., Munne, P., Sainio, P. & Perkola, N. 2012. Haitallisten aineiden pitoisuudet puhdistetuissa jätevesissä ja jätevesien ekotoksisuus. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 7/2012. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/39726/SYKEra_7_2012.pdf [viitattu 29.11.2022]

Puuinfo. 2020. Monikerroslevy (CLT). Www-artikkeli. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/puu-tieto/insinööri tuotteet/monikerroslevy-clt/> [viitattu 29.11.2022]

ResearchGate 2015. What is meant by a negative value of BET specific surface area? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.researchgate.net/post/What-is-meant-by-a-negative-value-of-BET-specific-surface-area.> [viitattu 29.11.2022]

SFS-ISO 21338. 2010. Veden laatu. Kineettinen määrittäminen sedimentin, muiden kiinteiden aineiden ja värikköjen näytteiden estovaikutuksesta *Vibrio fischeri* valontuotantoon (kineettinen valobakteeritestit).

KASVUPALLOJEN KAUPALLINEN POTENTIAALI

Niina Laurila & Harri Ryyänen

Teknis-taloudellinen tarkastelu perustuu hankkeen aiemman toimenpiteen ”Demonstraatiokokeet biohiilipohjaisilla kasvupalloilla laboratorio- ja pilot-mittakaavassa” tuloksiin ja mittausarvoihin. Lisäksi on hyödynnetty julkisista lähteistä saatavia hinta-arvioita ja taustaolettamia muun muassa raaka-aineiden hintojen sekä toiminnan kulurakenteen osalta. Tarkastelussa on lähdetty liikkeelle ns. alhaalta ylöspäin eli tarkastelemalla ensin kulurakennetta ja laskemalla sen jälkeen tarvittava liikevaihto, jolla break-even-tulostavoite syntyy. Eri skenaarioissa on siis haettu sitä liikevaihtotasoa, jossa yritykselle syntyy nollatulot. Kun eri vaihtoehtojen antamaa kustannustasoa verrataan vakiintuneeseen istutuskustannukseen, saadaan ymmärrys siitä, onko kasvatuspalloilla kaupallista potentiaalia. Tämä artikkeli pohjautuu XY Invest Oy:n BioGo-hankkeelle tekemään kustannuslaskelmaan.

LIIKETOIMINNAN SKENAARIOT

Tarkasteluun on valittu rajallinen määrä erilaisia mielenkiintoisia skenaarioita, joiden mukaisesti asetettiin taustaoletuksia. Näin ollen saatiin erilaisia liiketoimintalaskelmia. Skenaarioiden valinnassa pyrittiin tarkastelemaan tilanteita, jotka olisivat rationaalisesti pääteltynä realistisia perustettavan yrityksen näkökulmasta. Käytännössä tämä siis tarkoittaa sitä, että niin henkilömäärän osalta kuin tuotannon kapasiteetin ja investointien osalta on pyritty pitämään toiminnan taso kohtuullisen pienenä. Skenaarioiden valinnassa kiinnitettiin huomiota myös niihin muuttujiin, joilla näyttäisi olevan eniten merkitystä liiketoiminnan kannattavuuden näkökulmasta.

Henkilömäärän osalta skenaarioissa keskityttiin tarkastelemaan tilanteita, joissa yrityksessä työskentelee kaksi tai kolme henkilöä. Vertailun vuoksi yhteen skenaarioon laskettiin myös 1 henkilön tapaus. Tuotantoaika per kasvupallo -muuttujan osalta käytettiin kolmea arvoa; 0,85, 0,5 ja 0,1 minuuttia per tuotettu kasvupallo. Näistä ensimmäinen arvo (0,85) on hankkeen aiemmissa vaiheissa laboratoriokokeissa saavutettu tuotantoaika 200 kasvupallon tuottamisessa. Käytetty siemenmäärä kasvupalloissa on kolme lukuun ottamatta kahdeksatta skenaariota, jossa kasvupalloissa käytettiin viisi männynsiementä. Lopullisiksi skenaarioiksi muodostui 8 kokonaisuutta, jotka ovat:

1. kaksi työntekijää, tuotantoaika 0,85 min / kasvupallo
2. kaksi työntekijää, tuotantoaika 0,5 min / kasvupallo
3. kaksi työntekijää, tuotantoaika 0,1 min / kasvupallo

4. kolme työntekijää, tuotantoaika 0,85 min / kasvupallo
5. kolme työntekijää, tuotantoaika 0,5 min / kasvupallo
6. kolme työntekijää, tuotantoaika 0,1 min / kasvupallo
7. yksi työntekijä, tuotantoaika 0,5 min / kasvupallo
8. kaksi työntekijää, tuotantoaika 0,5 min / kasvupallo,
5 männynsiementä per pallo

SKENAARIOIDEN TULOKSET JA VERTAILU

Skenaarioiden tulosten vertailussa keskityttiin kolmeen pääosa-alueeseen, jotka ovat *tuotteen hinta, tuotanto ja liikevaihtotavoite*. Tuotteen hinnan tarkastelu auttaa ymmärtämään, miten eri skenaarioilla tuotettujen kasvupallojen hinta suhteutuu markkinoilla oleviin muihin vaihtoehtoihin (mm. taimien istuttaminen). Tuotteen hinnassa tarkastellaan sitä, kuinka monta euroa maksaa tuottaa yksi kilogramma kasvupalloja. Lisäksi kylvöhehtaari-kustannukselle laskettiin kaksi arvoa, joista toisessa kasvupalloja käytettiin 400 kappaletta per hehtaari ja toisessa 2 000. Huomattavaa on, että laskelmassa on vain valmiin tuotteen hinta, eikä se ota kantaa esimerkiksi levityksen kustannuksiin tai kohteen mahdolliseen maanmuokkaukseen. Tuotannon osalta eri skenaarioissa selvitettiin, miten nopeaa on tuottaa 2 000 kappaletta kasvupalloja sekä kuinka monta kiloa kasvupalloja skenaariossa tuotetaan kuukauden aikana.

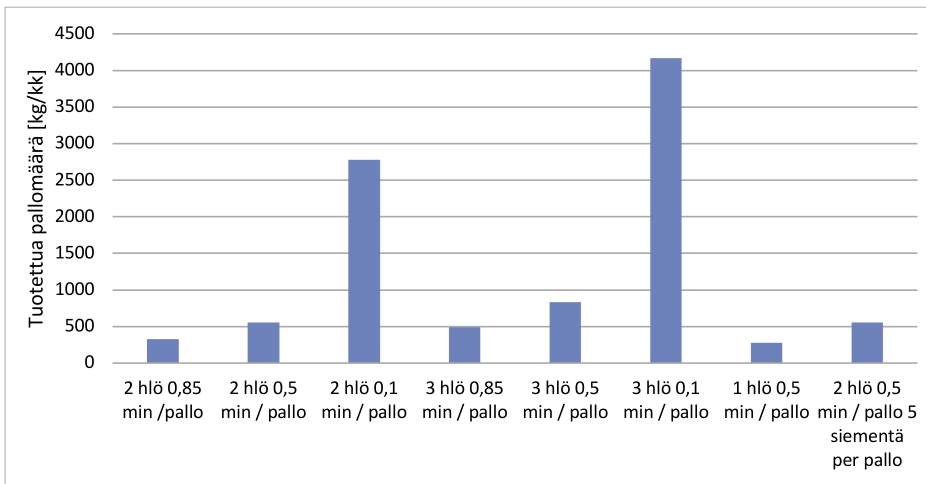
Liiketoiminnan näkökulmasta skenaarioille voitiin laskea liikevaihtotavoite, jolla toiminnassa päästään break-even- eli nollatulostasoon. Laskelma sisältää myynnin näkökulmasta sekä kuukausi- että vuositavoitteen. Vertailemalla kylvöhehtaarin hintaa markkinahintaan voidaan arvioida, kuinka realistista on saavuttaa vaadittu liikevaihtotavoite milläkin skenaariolla. Seuraavaan taulukkoon on koostettu eri skenaarioiden simulaatiolaskelmassa tuottamat lopputulokset.

Taulukko 1. Skenaarioiden tuloskooste

SKENAARIO	TUOTTEEN HINTA			TUOTANTO		LIIKEVAIHTO-TAVOITE	
	€/kg	€/ha. (400 palloa / ha.)	€/ha. (2000 palloa / ha)	h / 2000 kpl	kg / kk.	kk	Vuosi
2 hlö, 0,85 min / pallo	33	255	1 276	28,33	327	10843	130 117
2 hlö, 0,5 min / pallo	20	156	778	16,7	556	11240	134 876
2 hlö, 0,1 min / pallo	5	38	189	3,33	2 780	13630	163 554
3 hlö, 0,85 min / pallo	29	220	1 102	28,33	491	14049	168 592
3 hlö, 0,5 min / pallo	17	133	665	16,67	834	14418	173 020
3 hlö, 0,1 min / pallo	4	34	168	3,33	4 171	18229	218 747
1 hlö, 0,5 min / pallo	28	216	1 084	16,7	278	7829	93 954
2 hlö, 0,5 min / pallo, 5 siementä per pallo	21	159	795	16,7	556	11482	137 789

Tulosten perusteella voidaan havaita, että merkittävimiksi tekijöiksi muodostuu tuotantoaika eli tuotantonopeus sekä se, kuinka monta kasvupalloa tarvitaan yhden hehtaarin kylvämiseen. Henkilömäärän lisääminen parantaa kylvetyn metsähehtaarin laskennallista hintaa, mutta samaan aikaan nollatulokseen tarvittavan liikevaihdon määrä kasvaa.

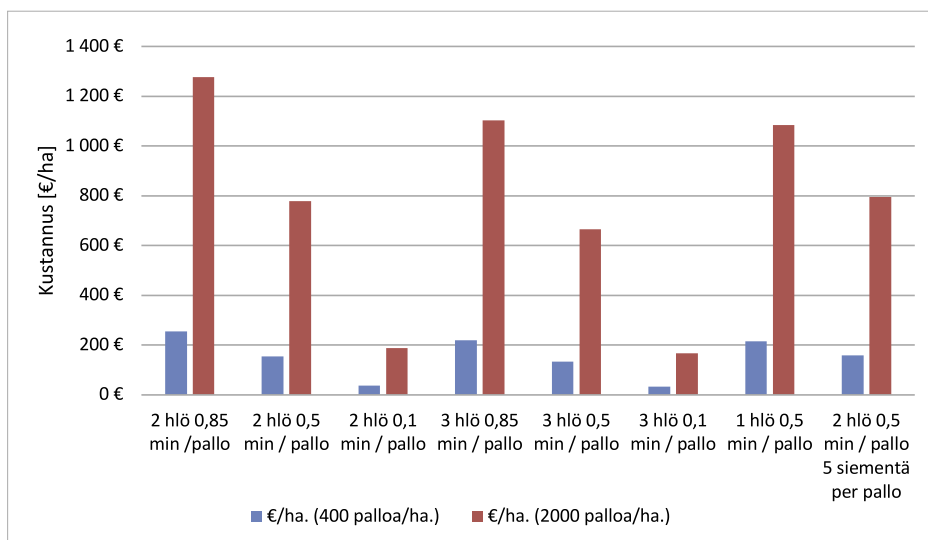
Tuotannon nopeuden vaikutusta eri skenaarioissa voidaan tarkastella seuraavan kaavion avulla (kuva 1). Siinä huomataan, että ne skenaariot, joissa tuotantoaika on 0,1 minuuttia per tuotettu kasvupallo ovat merkittävästi tuottavampia suhteessa muihin skenaarioihin.



Kuva 1. Tuotettua kasvupallokiloa kuukaudessa eri skenaarioissa

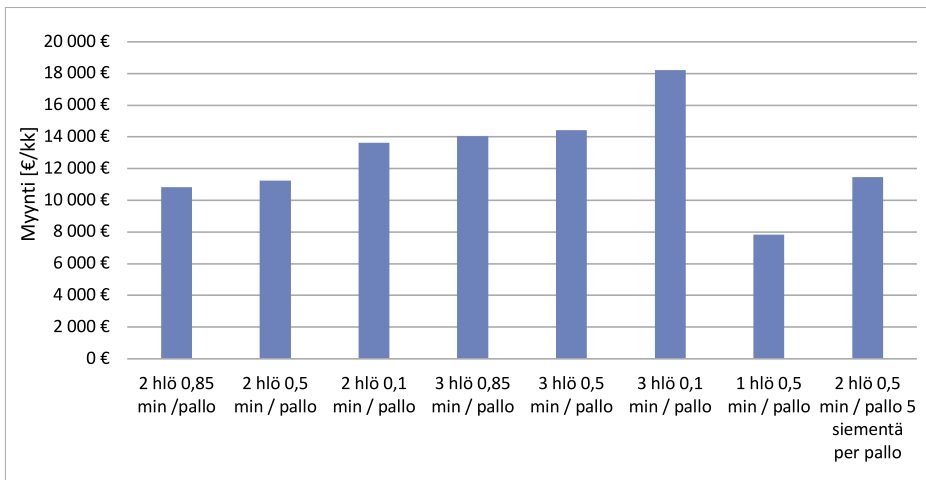
Kylvöhehtaarin hintaa tarkasteltiin kahden eri tarvemäärän suhteen: kylvötarve 400 kasvupalloa hehtaarille sekä 2 000 kasvupalloa hehtaarille. Kuvassa 2 on esitetty tulos tästä skenaariosta. Kasvupallojen tarpeen ollessa suuri per kylvöhehtaari järkevimiksi skenaarioiksi muodostuvat ainoastaan ne, joissa tuotannon nopeus on 0,1 minuuttia per tuotettu kasvupallo. Muiden skenaarioiden osalta hehtaarikohtainen hinta nousee yli 800 euron, mikä on merkittävän kallista suhteessa vaihtoehtoisin menetelmiin. Esimerkiksi jos määnyn valmiita taimia vaaditaan istutettavan hehtaarille 2 200 kappaletta ja taimien hinta on 0,17 euroa kappale, niin taimien hehtaarihinnaksi tulee 374 euroa. Näin ollen kaupallisesti mielekkäiksi skenaarioiksi jäävät kaikki ne, joissa oletetaan tuotantonopeudeksi 0,1 minuuttia per tuotettu kasvupallo.

Siinä tapauksessa, että kylvötarve on lähempänä 400:aa kasvupalloa per hehtaari, ovat kaikki skenaariot kaupallisesti mahdollisia. Huomattavaa on, että laskelma on tehty nollatulosta-voitteen mukaan. Lisäämällä voitotavoitetta myös myyntihinta kasvaa.



Kuva 2. Kasvupallojen laskennallinen hehtaarikohtainen hinta nollatulosolettamalla

Tarkastelemalla vaadittua kuukausittaista myyntiä kulurakenteen kattamiseksi eri skenaarioissa voidaan todeta, että kuukausittaisen liikevaihdon tarve on 8 000 euron ja 18 000 euron välillä. Kun yrityksessä työskentelee skenaariorista riippuen 1–3 henkilöä, on tämä kuukausittainen myyntimäärä mahdollista toteuttaa – olettaen, että tuotteen hinta ja sen ominaisuudet ovat houkuttelevia kohdemarkkinoilla. Käytännössä merkittävää kuitenkin on se, saako yritys solmittua esimerkiksi jälleenmyyntisopimuksia tai isompia sopimuksia jonkin päämiehen kanssa, sillä pienehköillä resursseilla myyminen ilman turvattua kuukausittaista myyntiä on haastavaa. Kyseessä on kuitenkin suhteellisen uusi tuote vanhaan tarpeeseen, jolla on jo merkittävä kilpailukenttä. Kuukausittainen myynnin tarve eri skenaarioissa on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Myyntitavoitteet eri skenaarioissa 0 % liikevoittotason saavuttamiseen

Kaksi viimeistä skenaariota, joista toisessa oli vain yksi työntekijä ja toisessa männynsiementen tarve per kasvupallo oli viisi (muissa kolme kappaletta per kasvupallo), osoittavat että näillä tekijöillä ei ole erityisen merkittävää vaikutusta edellä kuvattuihin havaintoihin. Kuitenkin esimerkiksi käyttämällä viittä siementä per kasvupallo voi itävyysprosentti nousta, jolloin pienellä lisäpanostuksella parannetaan tuotteen laatua. Yksinyrittäjän tapauksessa taas saadaan kulut minimoitua, jolloin nollatuloksen liikevaihtotavoitekin alenee.

KAUPALLINEN POTENTIAALI VAKIINTUNEESSA KILPAILUYMPÄRISTÖSSÄ

Metsän ammattimainen kasvattaminen omaa erittäin pitkät perinteet ja ajan saatossa muoutuneet toimintamallit. Koska markkinan voidaan todeta olevan vanha, on sille tuleminen aina uudella toimijalla haastavaa. On kyettävä kilpailemaan toimintansa vakiinnuttaneiden toimijoiden joukossa, joko halvemmilla kustannuksilla tai kyettävä tarjoamaan jotain uutta. Yleensä tällaisilla markkinoilla pyritään vielä differoitumaan eli erikoistumaan johonkin tarkkaan kohderyhmään ja sen tarpeeseen.

Biohiilipohjaisten kasvupallojen kilpailuetu rakentuu pitkälti juuri erikoistumisen varaan. Kasvupallo tarjoaa puunsiemenelle valmiin kasvualustan kasvua vauhdittavine ainesosineen. Näin ollen kasvupallojen edut tulevat esille erityisesti tilanteissa, joissa perinteisin menetelmin istuttaminen tai kylväminen on joko hankalaa tai kallista, esimerkiksi huonoista kulkuyhteyksistä tai maastonmuodoista johtuen. Tällaisissa tilanteissa kasvupallojen levittäminen lentokuljetuksin voi tarjota mahdollisuuden, joka on erityisen kiinnostava potentiaalisen asiakkaan silmin. Kasvupallot ovat erityisesti suunnattu kohteisiin, joissa puunkasvattaminen on ollut haastavaa maapohjan vuoksi. Kasvupallot ovat myös räätälöitä-

vissä kohteen mukaan. Palloilla voidaan esimerkiksi viheriöittää kaivosalueen maisemoitavia, käytöstä jo poistuneita alueita.

Vertailtaessa kasvupallojen osalta tehtyä laskelmaa markkinoiden muiden vaihtoehtojen kustannuksiin voidaan todeta, että tietyin edellytyksin (mm. riittävä tuotantonopeus) kasvupallojen avulla on mahdollista kilpailla myös esimerkiksi taimien istuttamisen kustannusten kanssa. Huomattavaa on toki, että taimi on jo pidemmällä kasvussa kuin maastoon levitettävä kasvupallo. Siksi etujen löytäminen muista tekijöistä kuin hinta on suositeltavaa. Tällaisia tekijöitä voi olla muun muassa hankalien kohteiden istuttaminen. Myös muut puu- ja kasvilajit voivat myös tarjota mielenkiintoisia mahdollisuuksia. Markkinoiden tarve männyn kasvattamiselle on merkittävä, mutta joku harvinaisempi lajike voi tarjota markkinoilla toistaiseksi hyödyntämättömän mahdollisuuden.

Liiketoiminnan edellytyksiä tarkasteltaessa ja liiketoimintaa aloitettaessa eteen tulee aina paljon yllättäviä asioita ja tapahtumia, joihin ei voi täysin varautua. Näin ollen toiminnan liiketaloudellisia edellytyksiä voidaan tarkastella tiettyyn pisteeseen asti, mutta lopulta onnistumiseen vaikuttavia muuttujia on niin paljon, ettei niitä kaikkia voi ottaa huomioon. Varsinaisen tuotannon alkaessa on voitava tuottaa kasvupalloja merkittävästi enemmän ja nopeammin. Oikeiden tuotantolaitteiden, kuten rakeistuskoneen löytäminen on ensiarvoisen tärkeää ennen liiketoiminnan aloittamista.

Tarkastelun tuloksien pohjalta voidaan todeta, että biohiilipohjaisten kasvupallojen valmistaminen ja sen pohjalta rakennettava liiketoiminta omaa edellytykset kannattavan liiketoiminnan rakentamiseen. Huomattavaa on, että toiminnan näkökulmasta kriittisiä kohtia kannattavalle liiketoiminnalle on olemassa. Tässä tarkastelussa tällaiseksi havaittiin etenkin kyky tuottaa kasvupalloja riittävällä nopeudella. Lisäksi kasvupallojen tarve hehtaaria kohden on merkittävä muuttuja kannattavuuden näkökulmasta.

LÄHTEET

XY Invest Oy 2022. Teknitaloudellinen tarkastelu, BioGo-Biohiilellä puhdasta kaasua ja kasvuvoimaa. Raportti. 1–20 s.

