

Pro gradu -tutkielma

**Puulajin, puun tuoreuden ja sijoitusyvyyden
vaikutus biofilmin muodostumiseen
vesiympäristössä**

Tomi Kirjokivi



Jyväskylän yliopisto

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede

5.6.2020

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
Bio- ja ympäristötieteiden laitos
Ympäristötiede

Tomi Kirjokivi: Puulajin, puun tuoreuden ja sijoitusyvyvyyden vaikutus
biofilmin muodostumiseen vesiympäristössä
Pro gradu -tutkielma: 33 s., 2 liitettä (6 s.)
Työn ohjaajat: FT. Heikki Hämäläinen, Dos. Elisa Vallius
Tarkastajat: FT. Pauliina Salmi, Dos. Elisa Vallius
Toukokuu 2020

Hakusanat: Biofilmi, fluorometri, havupuu, lehtipuu, vesiympäristö

Metsäbiomassan lisääntyvä käyttö voi lisätä ravinteiden ja humusaineiden aiheuttamaa vesistökuormitusta. Puuaineksen lisäämistä vesimuodostumiin on ehdotettu luonnonmukaisena, mahdollisesti kustannustehokkaana ja pitkälti huoltovapaana biologisena valumavesien puhdistusmenetelmänä. Vesimuodostumiin lisätyn puun pinnalle kasvaa biofilmiä, joka sitoo ravinteita. Pro gradun tavoitteena oli selvittää, vaikuttavatko biofilmin muodostumiseen puuaineksen pinnalle vesiympäristössä puulaji (koivu, kuusi ja mänty), puun tuoreus (tuore ja vuosi sitten kaadettu) ja sijoitusyvyys (lähellä pintaa, 50 cm syvyydellä vedenpinnasta). Kokeellinen tutkimus suoritettiin ojitetun Pyydyssuon laskeutusaltaalla Joutsassa touko–syyskuussa 2019. Puun pinnoilla kasvavan biofilmin a-klorofyllin biomassaa mitattiin kuukauden välein Benthos-fluorometrillä. Viimeisellä mittauskerralla puista otettiin raaputusnäytteet koko biofilmin tuhkattoman biomassan määrittämiseksi. Suurin biofilmin (a-klorofylli ja tuhkaton) biomassaa muodostui kuuseen ja pienin koivuun. Tutkimuksessa käytettyjen puulajien tuoreudella, ei ollut merkittäviä vaikutuksia biofilmin muodostumiseen. Biofilmin (a-klorofylli ja tuhkaton) biomassaa oli lähellä pintaa suurempi kuin 50 cm syvyydellä vedenpinnasta. Biologisen vesiensuojelumenetelmän täytöntöönpanon kannalta puroihin, ojiin ja laskeutusaltaisiin sijoitetun puun kaarnan rakenne tulisi olla karkea (tutkimuksessa kuusi ja mänty) ja sijoitusyvyys lähellä pintaa, mutta puiden tuoreusasteella ei ole vaikutusta biofilmin muodostumiseen.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Mathematics and Science

Department of Biological and Environmental Science
Environmental Science

Tomi Kirjokivi: Effect of wood species, wood freshness and placement depth in biofilm formation in the aquatic environment
MSc thesis: 33 p., 3 appendices (6 p.)
Supervisors: PhD Heikki Hämäläinen, Doc. Elisa Vallius
Inspectors: PhD. Pauliina Salmi, Doc. Elisa Vallius
May 2020

Keywords: Biofilm, coniferous, deciduous, fluorometer, water bodies

Increased use of forest biomass can increase the loading of nutrients and humic substances to waterbodies. Adding wood to water bodies might serve as a natural, cost-effective and largely maintenance-free biological treatment method for the purification of forestry water runoff. Biofilm grows on the wood added into water bodies and presumably binds nutrients. The aim of the Master's thesis is to determine whether formation of nutrient binding biofilm on wood surface in aquatic environment depends on the tree species (birch, spruce and pine), freshness of the tree (fresh and a year ago cut tree) and the placement depth (below surface, 50 cm below surface). An experimental study was conducted in the sedimentation pond at the Pyydyssuo Joutsa, between May and September 2019. The biomass of the algae growing on the surfaces was measured monthly, using a BenthosTorch fluorometer. Scratching samples were also taken on the last measurement day to determine the ash free dry mass (AFDM) of the entire biofilm. During the experiment, most biofilm (chl-a and AFDM) was formed on spruce and least on birch. The freshness of wood material used, did not have significant effects on biofilm formation. The biofilm (chl-a and AFDM) was below the surface greater than 50 cm. For the implementation of the biological water treatment method, bark structure of wood should be coarser (spruce and pine) and the tree placement depth below the surface where it is brighter. Tree freshness does not affect biofilm formation.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| 1 JOHDANTO..... | 1 |
| 1.1 Metsätalouden vesistökuormitus | 1 |
| 1.2 Puuaines virtavesissä | 2 |
| 1.3 Vedenalaiseen puuhun muodostuva päällyskasvusto..... | 2 |
| 1.4 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset | 5 |
| 2 AINEISTO JA MENETELMÄT | 6 |
| 2.1 Koeasetelma..... | 6 |
| 2.2 Kenttämittaukset..... | 7 |
| 2.3 Biofilminäytteiden biomassa | 8 |
| 2.4 Tilastollinen aineiston käsittely | 9 |
| 2.4.1 Puuttuvien havaintojen käsittely | 9 |
| 2.4.2 Kenttämittaukset..... | 10 |
| 2.4.2 Biofilminäytteet..... | 12 |
| 3 TULOKSET | 14 |
| 3.1 Biofilmin a-klorofyllin biomassa | 14 |
| 3.2 Biofilmin tuhkaton biomassa | 18 |
| 4 TULOSTEN TARKASTELU | 22 |
| 4.1 Puulajin vaikutus biofilmin määrään | 22 |
| 4.2 Puun tuoreusaste | 23 |
| 4.4 Tulosten luotettavuus ja sovellettavuus | 26 |
| 5 JOHTOPÄÄTÖKSET | 27 |
| KIITOKSET | 28 |
| KIRJALLISUUS | 29 |
| LIITE 1. KENTTÄMITTAUKSIEN TILASTOLLISET ANALYYSIT | 34 |
| LIITE 2. BIOFILMINÄYTTEIDEN TILASTOLLISET ANALYYSIT | 42 |

1 JOHDANTO

1.1 Metsätalouden vesistökuormitus

Suomen metsätalousmaan laajuus kattaa 78 % maanpinta-alasta (Finér ym. 2020). Metsätalouden aiheuttaman ja laajoilla alueilla syntyvän hajakuormituksen vaikutus näkyy erityisesti latvavesissä kuten pienissä puroissa, lammissa ja järvissä, joihin kohdistuu muutoin vähän kuormitusta (Joensuu ym. 2012). Merkittävää on myös kuormituksen pitkäaikaisuus, joka voi jatkua vuosikymmeniä metsätaloustoimenpiteiden jälkeen (Nieminen ym. 2017).

Metsien päätehakkuut, energiapuun korjuu, lannoitus, kulotus, maanmuokkaus ja ojitus kasvattavat vesistöihin päätyvien ravinteiden (fosfori, typpi) ja kiintoaineksen määrää (Alatalo 2000, Finér ym. 2010). Kuormituksen myötä leväkukintojen ja vesikasvien määrä lisääntyy, happipitoisuus pienenee, vesi happamoituu sekä samentuu ja tummuu (Fagerlund 2018). Uusien laskelmien mukaan Suomessa metsätalouden osuus ihmistoiminnan aiheuttamista ravinne kuormituksista on suurempi kuin aikaisemmin on arvioitu. Vuonna 2020 julkaistun MetsäVesi-hankkeen tulosten mukaan kuormitukset nousevat fosforin osalta 8 %:sta 14 %:iin ja typen osalta 6 %:sta 14 %:iin aikaisemmista arvioista (Finér ym. 2020).

Vesiensuojelun keskeisimpänä tavoitteena on vähentää rehevöitymistä, levähaittoja ja happikatoja aiheuttavaa ravinne- ja kiintoainekuormitusta (Ympäristöministeriö 2007). Metsätalouden vesiensuojelumenetelmät ovat perustuneet joko ojituksien yhteydessä oleviin altaisiin, joissa veden mukana tuleva kiintoaines laskeutuisi altaiden pohjalle tai veden suodatukseen turpeen tai kasvillisuuden läpi (Joensuu ym. 2008). Lilja-Rothsten ja Saariston (2015) mukaan metsäbiomassan lisääntyvä käyttö voi entisestään lisätä vesistökuormitusta, minkä vuoksi metsätalouden

vesiensuojeluun ja vesistökuunnostuksiin tarvitaan entistä tehokkaampia menetelmiä.

1.2 Puuaines virtavesissä

Luontaisesti puuainesta kertyy pitkän ajan kuluessa virtavesiin rantapuiden kuoleamisen ja kaatumisen myötä. Maailmanlaajuisesti puun määrä uoman pinta-alaa kohden vaihtelee suuresti 5–722 00 m³ ha⁻¹ välillä (Wohl ym. 2017). Uomassa olevilla puilla on merkittävä vaikutus virtaveden ekologiseen toimintaan ja uoman muotoutumiseen (Wohl ym. 2017). Puiden kappaleet vaikuttavat kiintoaineen kulkeutumiseen ja kasautumiseen sekä tarjoavat suojaa ja ravintoa vedessä eläville eliöille (Bailie ja Davies 2002, Ryan ym. 2014). Puroihin lisätty puuaines voi pienentää virran mukana kulkevan orgaanisen aineen määrää 2,4–71,2 kertaisesti, kun taas puuaineksen poistaminen voi pienentää fosfaatin ja ammoniumtyypen pidättymistä (Webster ym. 2000, Flores ym. 2011).

Puuaineksen lisäämistä vesimuodostumiin on ehdotettu luonnonmukaisena, mahdollisesti kustannustehokkaana ja pitkälti huoltovapaana biologisena valumavesien puhdistusmenetelmänä (Syke 2018). Kokeiluasteella olevassa menetelmässä metsäojiin, puroihin ja laskeutusaltaisiin upotetaan puunrungoista ja hakkuutähteistä tehtyjä ranka- ja risunippuja, joiden pinnoille kasvaa sienirihmastoja, bakteereja ja leviä. Epäpuhtauksia suodattuu puuaineksen pinnalle muodostuvan päällyskasvuston eli biofilmin ja sitä hyödyntävän eliöstön avulla. Lisätyn puuaineksen toivotaan hidastavan virtausta, vähentävän eroosiota, pidättävän ravinteita sekä humusta ja tehostavan pohjaeläin- ja kalatuotantoa (Syke 2018).

1.3 Vedenalaiseen puuhun muodostuva päällyskasvusto

Biofilmi on limainen ja liukas kasvualustan pinnalle muodostunut mikrobiyhteisö, joka koostuu pohjaleivistä (viherlevät, sinilevät piilevät, kultalevät, yhtymälevät,

keltalevät ja punalevät), bakteereista, sienistä ja alkueläimistä (Ben-Ari 1999, Eloranta ym. 2007, Wu 2016). Kasvualustaan kiinnittymisen jälkeen mikrobit tuottavat ympärilleen limaista polysakkaridia, joka suojaa ja vahvistaa biofilmin rakennetta (Ben-Ari 1999).

Biofilmillä on tärkeä rooli muun muassa ravinteiden, kuten typen ja fosforin pidättämisessä ja päällyskasvustoa hyödyntävän eliöstön ravinnon lähteenä (Wu 2016). Biofilmi reagoi myös nopeasti ympäristöolojen muutoksiin, minkä vuoksi se soveltuu vesi- ja sedimenttinäytteitä paremmin kuvaamaan ravinteiden kuten fosforin vesistökuormitusta (Gaiser 2009).

Orgaaninen hiili ja ravinteet, kuten typpi ja fosfori, ovat perusedellytyksiä biofilmin kasvulle ja ne vaikuttavat biofilmin yhteisökoostumukseen ja monimuotoisuuteen (Besemer 2015). Ravinteiden lisäksi biofilmiyhteisön koostumukseen ja monimuotoisuuteen vaikuttavat kasvualusta sekä muut ympäristötekijät, kuten valon määrä, lämpötila ja virtausolosuhteet (Besemer 2015).

Kasvualustan pinnan karheus vaikuttaa bakteerien kiinnittymiseen ja sen myötä biofilmin kehittymiseen (Ammar ym. 2015). Pinnaltaan karkeampiin alustoihin on havaittu muodostuvan enemmän biofilmiä kuin sileämpiin (Melo ja Bott 1997, Hunt ja Parry 1998, Zhang ym. 2019). Karkeammissa alustoissa on enemmän kasvulle pinta-alaa ja suojaa mekaanista kulumista vastaan (Sekar ym. 2004, Huang ym. 2018).

Puuainees tarjoaa biofilmille pitkäaikaisen hiiltä ja ravinteita sisältävän kasvualustan (Melillo 1983, Golladay ja Sinsabaugh 1991). Puun kuivapainosta on selluloosaa 40–45 %, hemiselluloosaa 25–35 %, ligniiniä 20–30 % ja uuteaineita (terpeenejä, rasvaaineita ja fenoleja) 2–5 %. Selluloosan, hemiselluloosan ja uuteaineiden osuudet ovat havupuilla pienempiä ja ligniinipitoisuudet suurempia kuin lehtipuilla (Pettersen 1984, Alakangas ym. 2016). Selluloosa antaa puun soluseinille lujuutta ja ligniini antaa mekaanista lujuutta sitomalla puun kuidut toisiinsa (Alakangas ym. 2016).

Uuteaineiden tärkeimpinä tehtävinä on puun suojaaminen haitallisilta mikrobeilta sekä ravinnon varastointi (Pettersen 1984, Ta ja Arnason 2012). Puuta suojaavia uuteaineita kuten terpeenejä ja stilbenejä on erityisesti havupuiden kuoreissa, pihkassa, sisäöksissä ja sydänpuussa (Hakola ym. 2006, Ganewatta ym. 2015, Latva-Mäenpää 2017, Routa ym. 2017).

Wagnerin ym. (2015) mukaan valon määrän lisääntyessä biofilmin kokonaisbiomassa sekä a-klorofyllin ja bakteerisolujen määrä lisääntyy. Kasvillisuuden lisääntyminen ja veden sameutumisen sekä humusaineen myötä veden ruskettuminen vähentävät valon määrää (Wagner ym. 2015). Levät tarvitsevat valoa yhteyttämiseensä, mutta pohjalevien yhteyttämiseen ei valon määrä, laatu ja jaksoisuus ole erityisen keskeinen ympäristötekijä, kunhan perustuotantoa varten on riittävästi valoa (Eloranta ym. 2007). Varjoisissa olosuhteissa on havaittu runsaammin punaleviä ja hyvin kirkkaassa valossa taas viherleviä ja syanobakteereja (Eloranta ym. 2007, Wagner ym. 2015). Piilevien esiintymisessä eri valaisuolosuhteissa ei ole havaittu selkeitä eroja (Eloranta ym. 2007).

Biofilmin on havaittu kehittyvän nopeammin lämpötilan ollessa korkea (Rao 2009, Villanueva ym. 2019). Villanuevan ym. (2010) kokeessa biofilmin kasvu oli nopeampi korkeammassa lämpötilassa (14,71–16,0 °C) kuin viileässä (11,10–13,19 °C), mutta kokeen lopussa kokonaisbiomassoissa ei ollut eroja. Korkeammassa lämpötilassa biofilmikerroksen havaittiin olevan myös paksumpi kuin viileässä (Rao 2009, Villanueva ym. 2019). Paksumpi biofilmikerros saattaa kuitenkin irtautua kasvualustasta helpommin kuin ohuempi ja tiiviimpi (Horn ym. 2003, Xavier ym. 2005).

Veden virtauksen mukana biofilmille kulkeutuu ravinteita (Lau ja Liu 1993). Lisäksi veden virtaus lisää veden happipitoisuutta, jolloin ravinteita vapautuu sedimentissä tapahtuvien hajotusreaktioiden myötä (Eloranta ym. 2007). Virtausnopeuden kasvaessa biofilmiin kohdistuva leikkausjännitys kasvaa, jolloin

biofilmin kehitys hidastuu (Lau ja Liu 1993). Suurissa virtausnopeuksissa veden mukana kulkeutuva kiintoainne voi aiheuttaa biofilmin irtautumisen kasvualustasta (Eloranta ym. 2007). Suuri virtausnopeus voi laskea myös veden lämpötilaa, jolloin mikrobitoiminta saattaa hidastua (Collier 2013, Brasell ym. 2014).

1.4 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämä Jyväskylän yliopiston bio- ja ympäristötieteiden laitoksella tehty tutkimus liittyi Suomen ympäristökeskuksen koordinoimaan PuuMaVesi-hankkeeseen, jossa tutkittiin puuta hyödyntävän biologisen vesiensuojelumenetelmän tehoa metsäojituskohteilla. Tutkimuksen tulokset ovat apuna menetelmän ja sen toteuttamisen toimintamallin kehittämisessä lisäten tietoa eri puulajien, puiden tuoreuden ja sijoitussyvyyden eroista biofilmin muodostumisessa puun pinnalle. Tulokset lisäävät myös yleisemmin tietoa eri puiden välisiin eroihin biofilmin (epiksylon) muodostumisessa vesiympäristössä. Kokeellisessa tutkimuksessa tarkoituksena oli selvittää, vaikuttavatko ravinteita sitovan biofilmin muodostumiseen puun pinnalle vesiympäristössä puulaji (koivu, kuusi, mänty), puun tuoreus (tuore ja vuosi sitten kaadettu) ja sijoitussyvyys (pinnan alla ja 50 cm).

Tutkimuskysymykset jakautuivat kolmeen osaan:

- 1) onko tutkittavien puulajien: koivu, kuusi ja mänty välillä eroa biofilmin muodostumisessa puun pinnalle?
- 2) Vaikuttaako kaadetun puun tuoreus (tuore ja vuosi sitten kaadettu) biofilmin muodostumiseen puun pinnalle?
- 3) Vaikuttaako puun sijoitussyvyys (noin 10 cm syvyydellä vedenpinnasta ja noin 50 cm syvyydellä vedenpinnasta) biofilmin muodostumiseen puun pinnalle?

Tutkimushypoteesit (H1) olivat seuraavat:

- 1) Biofilmiä on runsaammin kuusessa ja männyssä, joissa kaarnan rakenne on karkeampi. Karkeampi rakenne suojaa biofilmiä mekaaniselta kulumiselta paremmin kuin sileä rakenne ja karkeammassa rakenteessa on kasvulle enemmän pinta-alaa.
- 2) Biofilmin kasvu on hitaampaa tuoreessa puussa, jossa puuta suojaavien uuteaineiden, kuten terpeenien määrä on suurempi.
- 3) Biofilmiä on runsaammin lähempänä pintaa, jossa on valoisampaa. Levät tarvitsevat valoa yhteyttämiseensä ja syvemmällä veden lämpötila voi olla alhaisempi, jolloin biofilmin muodostuminen on hitaampaa.

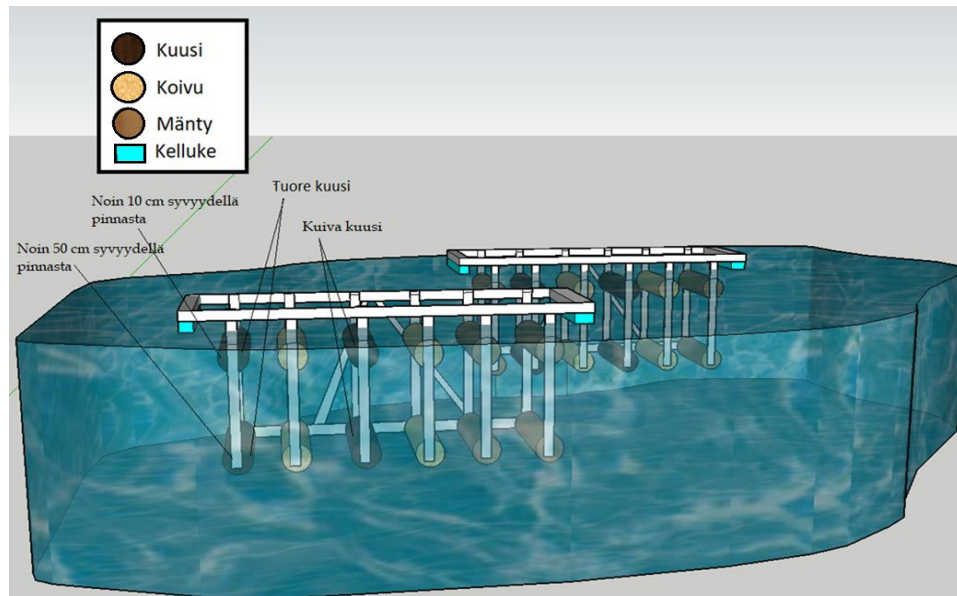
2 AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Koeasetelma

Kokeellinen tutkimus suoritettiin ojitetun Pyydyssuon laskeutusaltaalla Joutsassa (61°55'48.3"N 25°55'55.6"E) touko-syyskuussa 2019. Tutkimusta varten rakennettiin kehikkoja ($n = 5$), joihin kuhunkin aseteltiin eri käsittelyjen (puulaji, tuoreus, sijoitusvyvyys) tasoja ($n = 3 \times 2 \times 2$) edustavat puun rungon kappaleet (pituus 30 cm, läpimitta n. 10 cm), kehikot asetettiin satunnaisesti altaaseen (Kuva 1).

Kehikoissa jokaisessa oli satunnaisessa järjestyksessä tutkittavia puulajeja (koivu, kuusi ja mänty), tuoreena ja vuoden kuivuneena. Puiden sijoitusvyvyys vakioitiin niin, että kehikon ylin puurivi oli noin 10 cm syvyydellä vedenpinnasta, jolloin vältyttiin biofilmin mahdolliselta kuivumiselta. Syvempi puurivi oli noin 50 cm syvyydellä vedenpinnasta, jolloin saatiin arvioitua valon määrän vaikutusta biofilmin muodostumiseen. Yhdessä kehikossa oli yhteensä 12 puun rungon

kappaletta. Kehikoiden pätyyn asetettiin kellukkeet, joiden avulla koepuiden syvyys pysyi vakiona, vaikka altaan vedenpinta vaihteli. Kehikot numeroitiin ja puut koodattiin esim. 1kkoy: kehikko numero 1, tuoreus kuiva, puulaji koivu ja ylempi puurivi.



Kuva 1. Malli koeasetelman kehikoista. Kehikoissa ylempi puurivi oli noin 10 cm syvyydellä vedenpinnasta ja syvempi puurivi oli noin 50 cm syvyydellä vedenpinnasta. Kehikoissa oli tutkittavia puulajeja tuoreina ja kuivina ylemmissä ja syvemmissä puuriveissä.

2.2 Kenttämittaukset

Kenttämittauksissa mitattiin noin kuukauden välein biofilmin a-klorofyllin biomassoja. Ensimmäiset kenttämittaukset tehtiin 27.6.2019, jolloin koekehikot olivat olleet altaassa yhden kuukauden. Seuraavat kerrat olivat 25.7-, 27.8- ja 24.9.2019. Kenttämittaukset tehtiin BenthosTorch-fluorometrillä (BBE Moldaenke), jonka mittaus perustuu leväpigmenttien (viherlevien, piilevien sekä sinilevien) fluoresenssin määrittämiseen tietyllä aallonpituudella (BBE-Moldaenke 2019). Muuntokertoimien avulla fluoresenssilukema muutetaan a-klorofyllin biomassaksi

$\mu\text{g cm}^{-2}$. Benthos-Torchin mittauspinta-ala oli 1 cm^2 , mittausalue $0\text{--}15 \mu\text{g cm}^{-2}$ sekä resoluutio $0,1 \mu\text{g cm}^{-2}$ (BBE-Moldaenke 2019).

Kenttätyöskentelyn helpottamiseksi kehikkojen ylin kerros nostettiin vedestä mittauksen ajaksi. Yhdestä puun rungon kappaleesta tehtiin mittaus kolmena rinnakkaisena mittauksena (yksi päältä ja kaksi sivuilta) kullakin mittauskerralla. Mittauspisteet merkittiin kenttämuistiinpanoihin, jotta voitiin välttää seuraavalla kerralla mittaus samasta pisteestä. Tuloksia yhdellä kenttäkäynnillä tuli yhteensä 180 (60 puuta ja 3 mittausta/puu), ja kaikilta neljältä mittauskerralta yhteensä 708. Heinäkuulta puuttuivat kahden kehikon ylimmän rivin mittaukset ($N = 12$), johtuen ylempien rivien jäämisestä vedenpinnan yläpuolelle ja biofilmin kuivumisesta.

2.3 Biofilminäytteiden biomassa

Syyskuussa viimeisellä kenttämittauskerralla puun rungon kappaleista raaputettiin biofilmin tuhkattoman biomassan määrittämistä varten biofilminäytteet. Biofilminäytteet raaputettiin harjalla (harjan leveys $2,8 \text{ cm}$) muoviputkiloihin, jokaisesta tutkittavasta puun rungon kappaleesta ($n = 60$), kolmesta kohtaa (yksi päältä ja kaksi sivuilta) 30 cm matkalta. Kustakin biofilminäytteestä määritettiin kuivapaino ja hehkutusjäännös, joiden avulla laskettiin biofilminäytteiden tuhkattomat biomassat.

Biofilminäytteiden kuivapainojen määrittämistä varten punnittiin lämpökaapissa (Memmert, $2 \text{ h } 105 \text{ }^\circ\text{C}$) kuivatut, sekä 30 min eksikaattorissa jäädytetyt $\text{Ø}47 \text{ mm}$ lasikuitusuodattimet (Whatman® GF/F). Biofilminäytteet suodatettiin ja kuivattiin lämpökaapissa $2 \text{ h } 105 \text{ }^\circ\text{C}$. Kuivattuja suodattimia jäädytettiin eksikaattorissa 30 min , minkä jälkeen ne punnittiin uudelleen. Biofilminäytettä sisältävien kuivatettujen suodatinpapereiden ja alkuperäisten suodatinpapereiden punnitusten erotuksista saatiin biofilminäytteiden kuivapainot.

Orgaanisen aineksen määrän laskemiseksi määritettiin kuivatuista biofilmiä sisältävistä suodatinpapereista hehkutusjäännös. Hehkutusjäännöksen määritystä varten puhtaita upokkaita hehkutettiin tyhjänä muhveliuunissa (Nabertherm) 1 h 550 °C ja jäädytettiin 30 min eksikaattorissa. Upokkaat punnittiin ja niihin asetettiin suodattimella oleva kuivattu näyte. Upokkaita suodatinpapereineen hehkutettiin 2 h 550 °C ja jäädytettiin 30 min eksikaattorissa, minkä jälkeen ne punnittiin uudelleen. Biofilminäytteiden tuhkan määrä saatiin vähentämällä hehkutuksen jälkeisistä punnituksista upokkaiden ja suodattimien alkuperäiset painot. Orgaanisen aineksen määrä saatiin vähentämällä kuivapainoista tuhkan määrä. Biofilminäytteiden tuhkatonta biomassat ($\mu\text{g cm}^{-2}$) saatiin jakamalla orgaanisen aineksen määrä biofilminäytteen pinta-alalla.

2.4 Tilastollinen aineiston käsittely

Kenttämittauksien selitettävä muuttuja oli biofilmin a-klorofyllin kokonaisbiomassa ($\mu\text{g cm}^{-2}$), joka koostui viherlevien, piilevien ja sinilevien massoista. Tilastollisessa käsittelyssä käytettiin kolmen rinnakkaismittauksen keskiarvoa. Biofilminäytteiden selitettävä muuttuja oli biofilmin tuhkaton biomassat ($\mu\text{g cm}^{-2}$).

Selittäviä muuttujia oli tutkittavat puulajit eli koivu, kuusi ja mänty, puiden tuoreus eli tuore (tuore) ja vuosi sitten kaadettu (kuiva) sekä puun sijoitusvyvyys eli noin 10 cm syvyydellä vedenpinnasta (matala) verrattuna noin 50 cm syvyydellä vedenpinnasta (syvä). Selittävänä muuttujana oli myös biofilmin kehityksen aika (1 = 1 kk, 2 = 2 kk, 3 = 3 kk, 4 = 4 kk). Aineiston tilastollinen käsittely tehtiin IBM SPSS Statistics 24-ohjelmalla (IBM Corp 2019).

2.4.1 Puuttuvien havaintojen käsittely

Kenttämittauksien puuttuvia mittaustuloksia paikattiin hot deck -moni-imputoinnilla. Moni-imputoinnissa puuttuva havainto korvataan havaitulla

mittaustuloksella (ns. luovuttaja), jotka valitaan lineaarisen regressiomallin avulla (KvantiMOTV 2016). Moni-imputointi tuottaa aineistoja, joissa havaitut mittaustulokset ovat samanlaisia, mutta puuttuvien havaintojen imputoinnit poikkeavat aineistojen välillä. Aineistojen määrää riippuu imputointien määrästä. Usealla imputoinnilla otetaan huomioon puuttuvaan havaintoon liittyvä epävarmuus (Karvanen 2015).

Tilastolliset analyysit toistetaan jokaiselle tuotetulle aineistolle, jonka jälkeen tuloksien yhdistämisessä otetaan huomioon puuttuvaan tietoon ja imputointiprosessiin liittyvät epävarmuudet (Karvanen 2015).

Moni-imputoinnin imputointien määräksi valittiin 50 ja prediktoreiksi aineiston selittävät muuttujat (puulaji, tuoreus ja sijoitusvyvyys) sekä eri koekehikot ($n = 5$). Imputoinnit tehtiin viherlevien, piilevien ja sinilevien massoille, joiden yhteissummasta laskettiin a-klorofyllin biomassat puuttuville havainnoille.

2.4.2 Kenttämittaukset

Selittävien tekijöiden vaikutusta biofilmin a-klorofyllin biomassaan tutkittiin hierarkkisella lineaarisella regressioanalyysillä (Liite 1). Kenttämittauksissa yksittäisillä havainnoilla (eri puulajit, puiden tuoreudet ja sijoitusvyvydet) on ryhmittävä tekijä, biofilmin kehityksen aika ($n = 4$), jonka vaikutus otettiin huomioon kaikissa malleissa. Analyysit rakennettiin vaiheittain, jossa malliin lisättiin jokaisessa vaiheessa uusia prediktoreja (selittävät tekijät). Prediktorien lisäyksellä saatiin tarkasteltua selittävien tekijöiden estimaateissa ja variansseissa tapahtuvia muutoksia. Mallien rakentaminen aloitettiin niin sanotulla nollamallilla, jossa mukana oli vain vakio ja virhetermit. Nollamallin jälkeen lisättiin prediktoreja kiinteinä vaikutuksina. Kiinteillä prediktoreilla on omat vakionsa ja regressiosuoransa, mutta regressiokertoimen kulmakerroin on kiinteä (KvantiMOTV 2013).

Biofilmin kehityksen aikaa tarkasteltiin myös satunnaisvaikutuksena, jossa otettiin huomioon se, että biofilmin kehityksen ajan ja vastemuuttujan välinen yhteys voi olla erilainen eri luokissa. Prediktorin ollessa satunnainen regressiokertoimen annetaan vaihdella satunnaisesti (KvantiMOTV 2013). Biofilmin kehityksen ajan muuttamisella satunnaiseksi ei ollut vaikutusta muiden selittävien tekijöiden tuloksiin, minkä vuoksi malleissa käytettiin biofilmin kehityksen aikaa kiinteänä vaikutuksena. Kaikissa malleissa tilastollisen merkitsevyyden taso oli 0,05. Mallien hyvyyden arvioinnissa käytettiin ei-sisäkkäisiin malleihin Akaiken informaatiokriteeriä ja sisäkkäisiin malleihin log-uskottavuusfunktioita, joissa pienemmän arvon saava malli soveltuu paremmin vasteen estimointiin kuin suuremman arvon saanut malli (KvantiMOTV 2013).

Malleissa vaste $Chl - a$ on biofilmin a-klorofyllin biomassa ($\mu\text{g cm}^{-2}$), β_0 on vakio ja $\beta_1 - \beta_3$ ovat regressiokertoimia, U_{i1} on satunnaisvaikutus jokaiselle puunkappaleelle ($i = 60$) ja ε_{ij} on jäännöstermi. Jäännöstermi kuvaa jäljelle jäävää vaihtelua, jota käytetyllä mallilla ei pystytty selittämään (KvantiMOTV 2013). Seuraavat mallit soveltuivat parhaiten vastaamaan tutkimuskysymyksiin:

Onko tutkittavien puulajien (Kaava 1) välillä eroja biofilmin a-klorofyllin biomassan muodostumisessa puun pinnalle.

$$Chl - a_{ij} = \beta_0 + \beta_1 a_{ij} + \beta_2 puulaji_{ij} + U_{i1} + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Mallin prediktorit ovat *aika* ja *puulajit*.

Onko kaadetun puun tuoreusasteiden (Kaava 2) välillä eroja ja onko puulajin ja tuoreuden (Kaava 3) välillä yhdysvaikutusta biofilmin a-klorofyllin biomassan muodostumisessa puun pinnalle.

$$Chl - a_{ij} = \beta_0 + \beta_1 a_{ij} + \beta_2 tuoreus_{ij} + U_{i1} + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Mallin prediktorit ovat *aika* ja *tuoreus*.

$$\begin{aligned}
 Chl - a_{ij} = & \beta_0 + \beta_1 a_{ika_{ij}} + \beta_2 puulaji_{ij} + \beta_3 tuoreus_{ij} \\
 & + puulaji_{ij} * tuoreus_{ij} + U_{i1} + \varepsilon_{ij}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Mallin prediktorit ovat *aika*, *puulajit*, *tuoreus* ja yhdysvaikutus *puulajit*tuoreus*.

Lopuksi tarkasteltiin, onko puun sijoitusvyvyksien (Kaava 4) välillä eroja ja puulajin sekä sijoitusvyvyden (Kaava 5) välillä yhdysvaikutusta biofilmin a-klorofyllin biomassan muodostumisessa puun pinnalle.

$$Chl - a_{ij} = \beta_0 + \beta_1 a_{ika_{ij}} + \beta_2 syvyys_{ij} + U_{i1} + \varepsilon_{ij}
 \tag{4}$$

Mallin prediktorit ovat *aika* ja *syvyys*.

$$\begin{aligned}
 Chl - a_{ij} = & \beta_0 + \beta_1 a_{ika_{ij}} + \beta_2 puulaji_{ij} + \beta_3 syvyys_{ij} \\
 & + \beta_4 puulaji_{ij} * syvyys_{ij} + U_{i1} + \varepsilon_{ij}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Mallin prediktorit ovat *aika*, *puulajit*, *syvyys* ja yhdysvaikutus *puulajit*syvyys*.

2.4.2 Biofilminäytteet

Selittävien tekijöiden vaikutusta biofilmin tuhkattomaan biomassaan tutkittiin lineaarisella regressioanalyysillä (Liite 2). Vaikutuksia tarkasteltiin vaiheittain, jossa malliin lisättiin jokaisessa vaiheessa uusia prediktoreja. Prediktorien lisäyksellä saatiin tarkasteltua selittävien tekijöiden estimaateissa tapahtuvia muutoksia ja onko selittävillä tekijöillä yhteyttä vastemuuttujaan biofilmin tuhkattomaan biomassaan. Kaikissa malleissa tilastollisen merkitsevyyden taso oli 0,05.

Malleissa vaste *biomassa* on biofilmin tuhkaton biomassa ($\mu\text{g cm}^{-2}$), β_0 vakio ja $\beta_1 - \beta_3$ ovat regressiokertoimia ja ε_i on jäännöstermi. Seuraavat mallit soveltuivat parhaiten vastaamaan tutkimuskysymyksiin:

Onko tutkittavien puulajien (Kaava 6) välillä eroja biofilmin tuhkatoman biomassan muodostumisessa puun pinnalle.

$$biomassa = \beta_0 + \beta_1 puulaji_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

Mallin prediktorina on *puulajit*.

Onko kaadetun puun tuoreusasteiden (Kaava 7) välillä eroja ja onko puulajin ja tuoreuden (Kaava 8) välillä yhdysvaikutusta biofilmin tuhkatoman biomassan muodostumisessa puun pinnalle.

$$biomassa = \beta_0 + \beta_1 tuoreus_i + \varepsilon_i \quad (7)$$

Mallin prediktorina on *tuoreus*.

$$biomassa = \beta_0 + \beta_1 puulaji_i + \beta_2 tuoreus_i + \beta_3 puulajit * tuoreus + \varepsilon_i \quad (8)$$

Mallin prediktorit ovat *puulajit*, *tuoreus* ja yhdysvaikutus *puulajit*tuoreus*.

Lopuksi tarkasteltiin, onko puun sijoitusyvyyksien (Kaava 9) välillä eroja sekä onko puulajin sekä sijoitusyvyyden (Kaava 10) välillä yhdysvaikutusta biofilmin tuhkatoman biomassan muodostumisessa puun pinnalle.

$$biomassa = \beta_0 + \beta_1 syvyys_i + \varepsilon_i \quad (9)$$

Mallin prediktorina on *syvyys*.

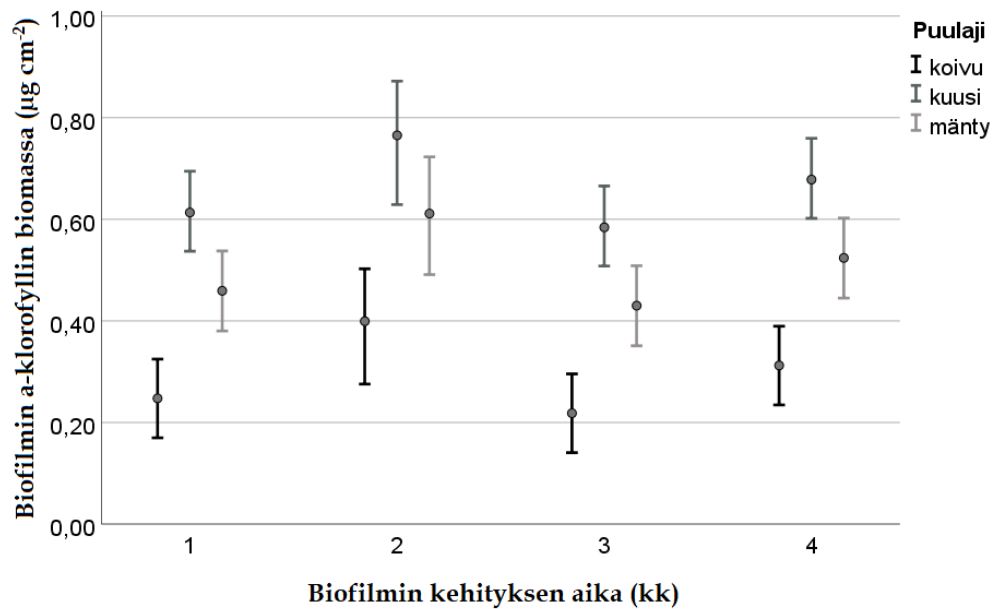
$$biomassa = \beta_0 + \beta_1 puulaji_i + \beta_2 syvyys_i + \beta_3 puulajit * syvyys + \varepsilon_i \quad (10)$$

Mallin prediktorit ovat *puulajit*, *syvyys* ja yhdysvaikutus *puulajit*syvyys*.

3 TULOKSET

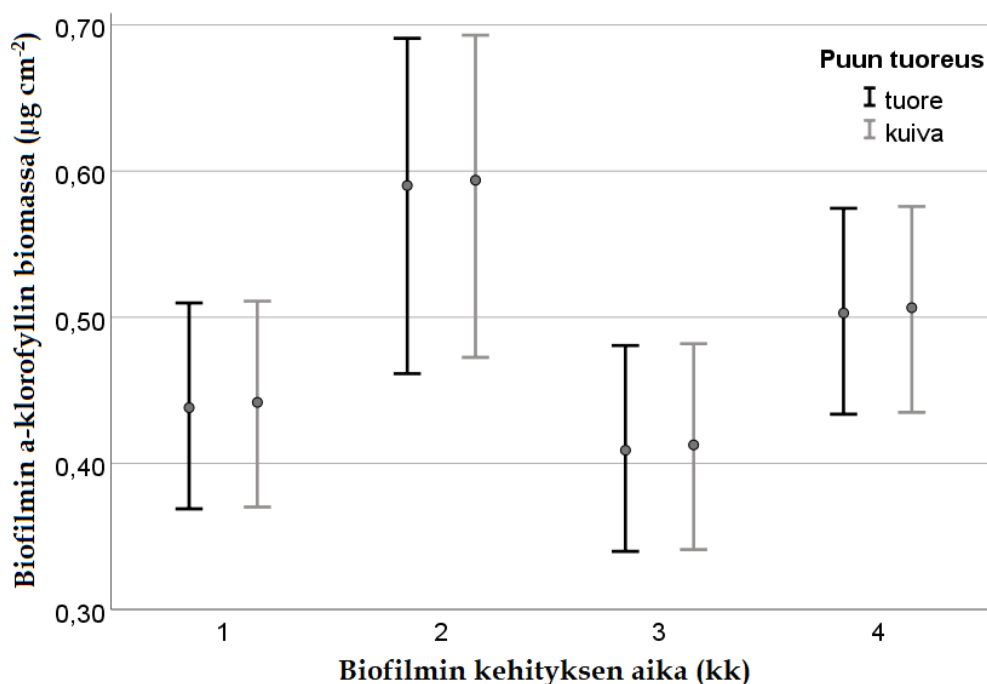
3.1 Biofilmin a-klorofyllin biomassa

Suurin ero puulajien välillä oli kuusella ja koivulla (Kuva 2). Kuusen biofilmin a-klorofyllin biomassa (leväbiomassa) oli 2,2 kertainen ($P < 0,001$) koivuun ja 1,3 kertainen ($P = 0,047$) mäntyyn verrattuna. Männyn leväbiomassa oli 1,7 kertainen ($P < 0,001$) koivuun verrattuna. Puulajien väliset erot eivät muuttuneet eri mittausajankohtina.



Kuva 2. Biofilmin a-klorofyllin biomassan (keskiarvo \pm keskihajonta) kehitys 4 kuukauden aikana eri puulajien (koivu, kuusi ja mänty) pinnalla.

Puun tuoreusaste ei vaikuttanut biofilmin leväbiomassan muodostumiseen ($P = 0,960$, kuva 3).

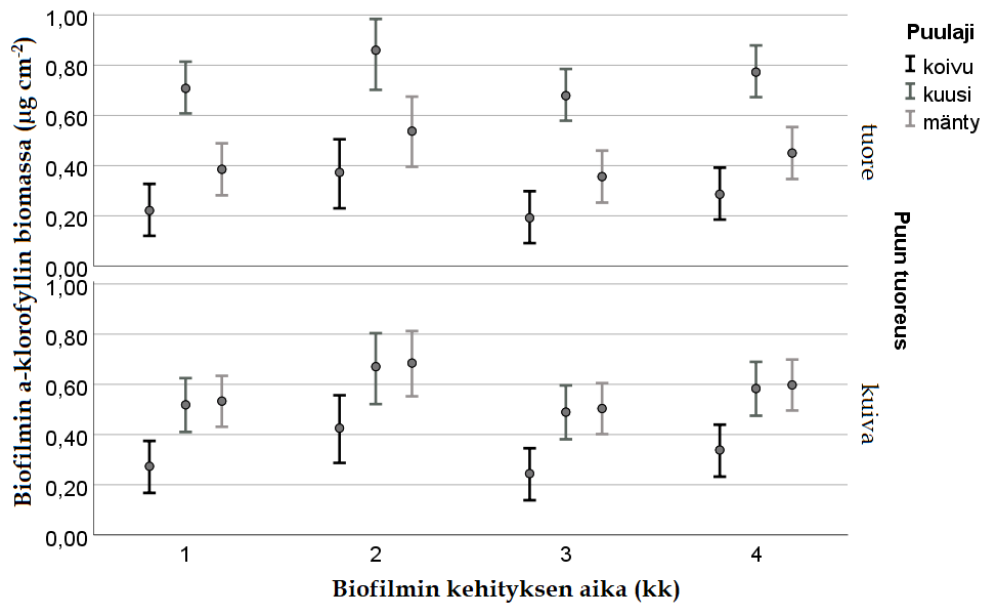


Kuva 3. Biofilmin a-klorofyllin biomassan (keskiarvo \pm keskihajonta) kehitys 4 kuukauden aikana tuoreen (tuore) ja vuosi sitten kaadetun (kuiva) puun pinnalla.

Puulajilla ja tuoreusasteilla oli kuitenkin merkitsevä yhdysvaikutus (Kuva 4). Suurin ero biofilmin leväbiomassan muodostumisessa tuoreiden puiden välillä oli kuusella ja koivulla mutta myös kuusen ero mäntyyn oli merkitsevä ($P = 0,026$). Tuoreen kuusen leväbiomassa oli 2,8-kertainen ($P < 0,001$) koivuun ja 1,7-kertainen ($P = 0,003$) mäntyyn verrattuna. Tuoreen männyn ja koivun leväbiomassassa ei ollut merkitsevää eroa ($P = 0,125$). Puulajien väliset erot eivät muuttuneet tuoreissa puissa eri mittausajankohtina.

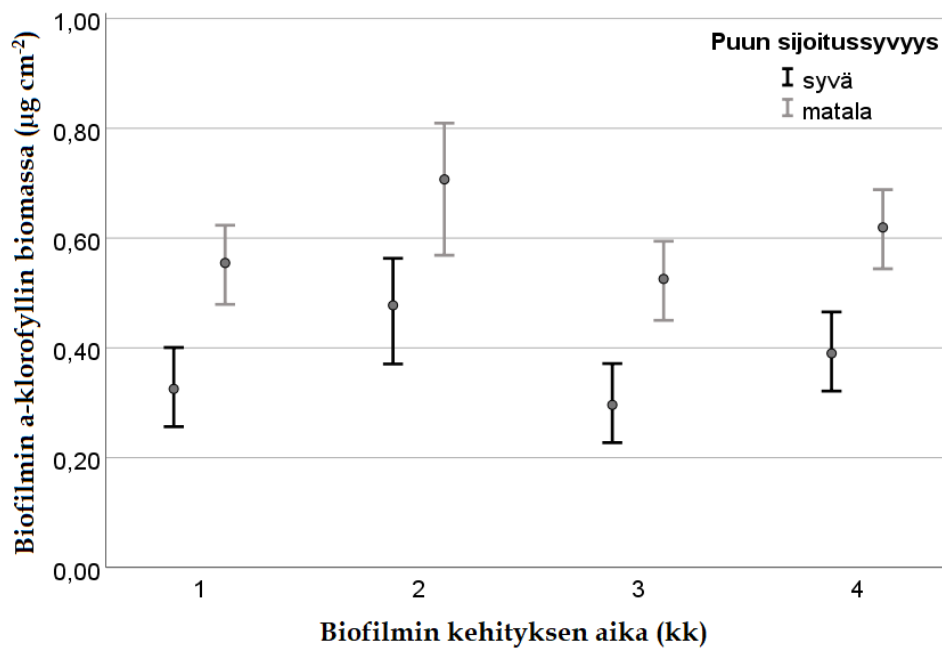
Kuivalla kuusella ($P = 0,022$) ja männyllä ($P = 0,015$) leväbiomassat oli 1,8-kertaisia kuivaan koivuun verrattuna, mutta kuusen ja männyn välillä ei ollut eroja ($P = 0,894$) eri mittausajankohtina.

Puun tuoreusaste ei vaikuttanut kuusen ($P = 0,206$), männyn ($P = 0,113$) ja koivun ($P = 0,362$) leväbiomassoihin.



Kuva 4. Biofilmin a-klorofyllin biomassan (keskiarvo \pm keskihajonta) kehitys 4 kuukauden aikana puulajeilla koivu, kuusi ja mänty puiden tuoreusasteen mukaan.

Matalalle noin 10 cm syvyydelle sijoitettujen puiden biofilmin leväbiomassat olivat 1,6 kertaisia ($P = 0,001$) syvälle noin 50 cm syvyydelle sijoitettuihin puihin verrattuna (Kuva 5). Mittausajankohta ei vaikuttanut sijoitusyvyksien välisiin eroihin.

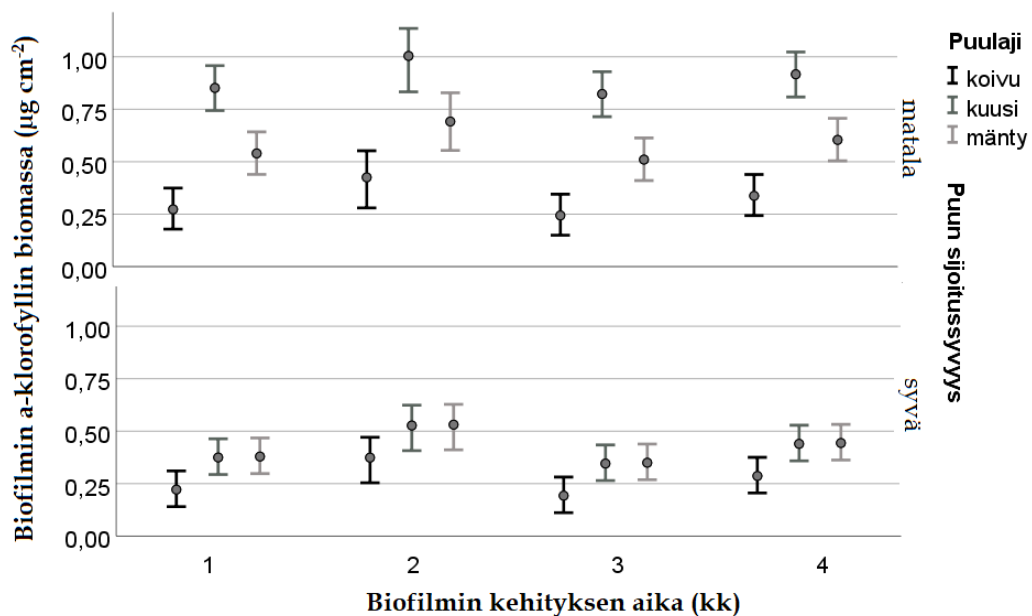


Kuva 5. Biofilmin a-klorofyllin biomassan (keskiarvo \pm keskihajonta) kehitys 4 kuukauden aikana noin 10 cm (matala) ja noin 50 cm (syvä) syvyydelle vedenpinnasta sijoitetun puun pinnalla.

Puulajin ja sijoitusyvyyden välillä oli merkitsevä yhdysvaikutus (Kuva 6), kun matalassa kuusen biofilmin leväbiomassa oli koivua ja mäntyä suurempi, mutta syvässä ero koivuun ($P = 0,001$) ja mäntyyn ($P = 0,012$) oli selvästi pienempi. Matalassa kuusen biofilmin leväbiomassa oli 2,8-kertainen ($P < 0,001$) koivuun ja 1,5-kertainen ($P = 0,001$) mäntyyn verrattuna, mutta syvässä kuusen ja männyn välillä ei ollut eroja ($P = 0,963$) ja ero koivuun ($P = 0,080$) oli selvästi pienempi.

Männyn leväbiomassa oli matalassa 1,8-kertainen ($P = 0,003$) koivuun verrattuna, mutta syvässä ei ollut merkitsevää eroa ($P = 0,072$).

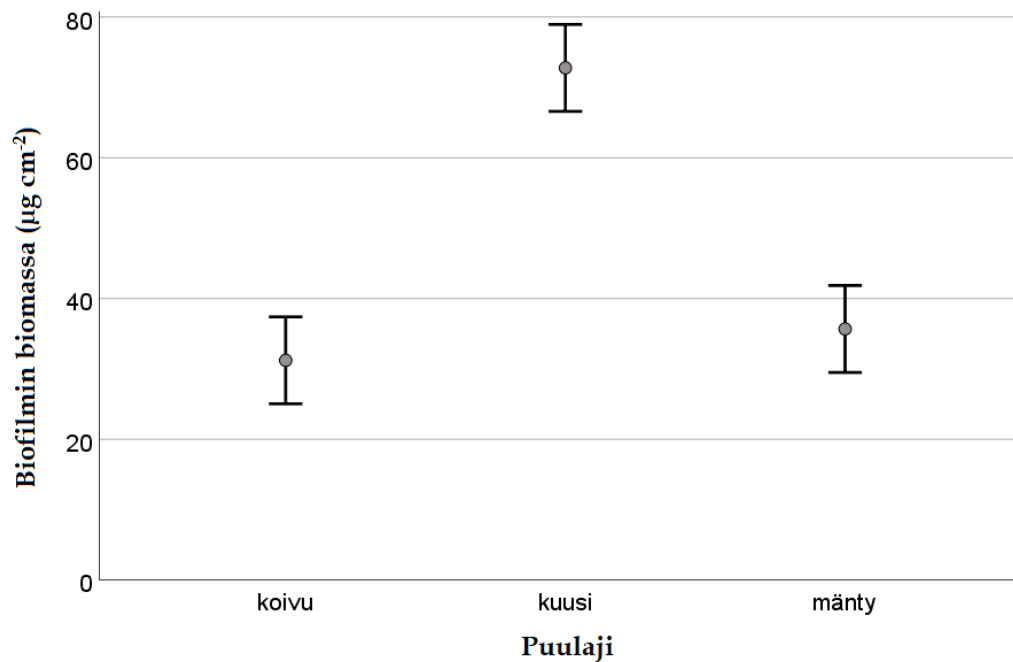
Sijoitusyvyydellä oli merkittävin vaikutus kuusen leväbiomassoihin, kun matalassa leväbiomassa oli 2,1-kertainen ($P < 0,001$) syvään verrattuna. Sijoitusyvyydellä ei ollut vaikutusta männyn ($P = 0,082$) ja koivun ($P = 0,377$) leväbiomassoihin.



Kuva 6. Biofilmin a-klorofyllin biomassan (keskiarvo \pm keskihajonta) kehitys 4 kuukauden aikana puulajeilla koivu, kuusi ja mänty puiden sijoitusyvyyksien mukaan.

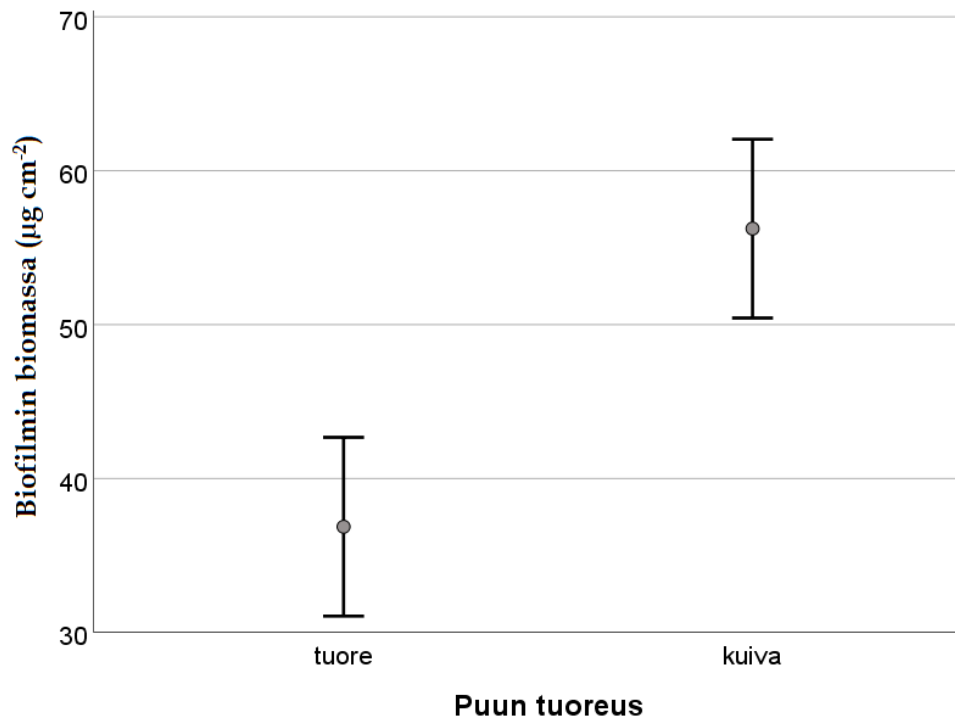
3.2 Biofilmin tuhkaton biomassa

Suurin ero puulajien välillä oli kuusella ja koivulla (Kuva 7). Kuusen biofilmin orgaanisen aineen (tuhkaton) biomassa oli 2,3 kertainen ($P < 0,001$) koivuun ja 2 kertainen ($P < 0,001$) mäntyyn verrattuna. Männyn ja koivun välillä ei ollut eroja ($P = 0,612$).



Kuva 7. Biofilmin tuhkattomat biomassat (keskiarvo \pm keskihajonta) eri puulajien (koivu, kuusi ja mänty) pinnalla.

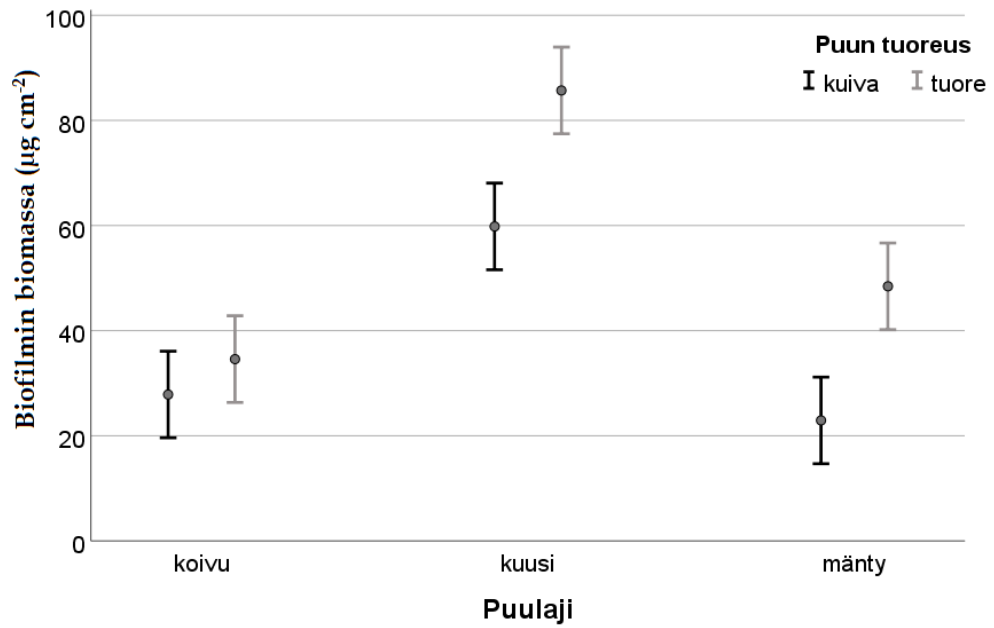
Vuosi sitten kaadettujen puiden biofilmin tuhkaton biomassa oli 1,5-kertainen ($P = 0,022$) tuoreeseen puuhun verrattuna (Kuva 8).



Kuva 8. Biofilmin tuhkaton biomassat (keskiarvo \pm keskihajonta) tuoreen (tuore) ja vuosi sitten kaadetun (kuiva) puun pinnalla.

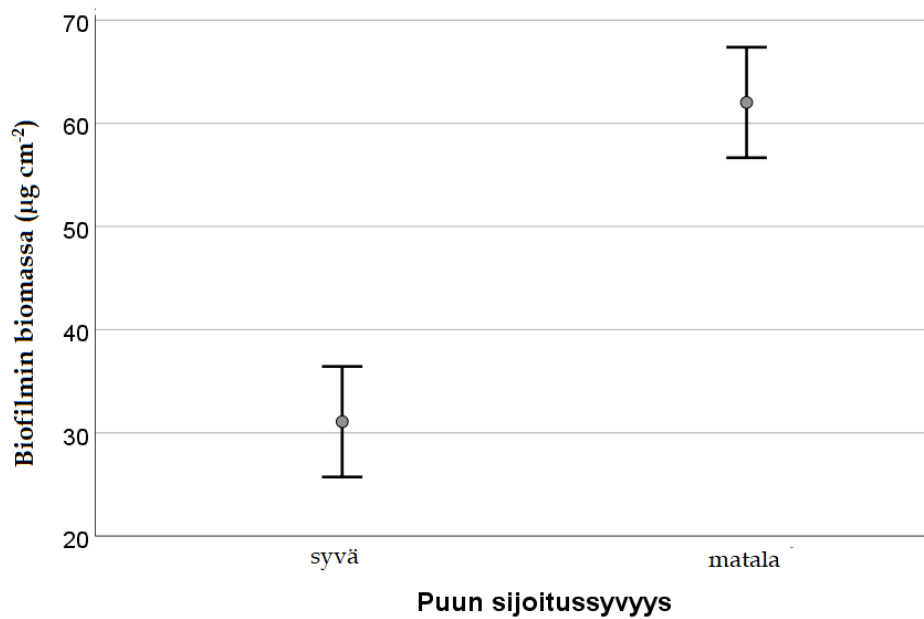
Tuoreen kuusen biofilmin tuhkaton biomassa oli 2,6-kertainen ($P = 0,003$) mäntyyn ja 2,1-kertainen ($P = 0,008$) koivuun verrattuna. Kuivan kuusen biomassa oli 2,5-kertainen ($P < 0,001$) koivuun ja 1,8-kertainen ($P = 0,002$) mäntyyn verrattuna. Männyllä ja koivulla ei ollut eroja tuoreessa ($P = 0,674$) ja kuivassa ($P = 0,240$) puussa (Kuva 9).

Merkittävin vaikutus tuoreusasteilla oli männyn biomassoihin, kun kuivan männyn biomassa oli 2,1-kertainen ($P = 0,024$) tuoreeseen verrattuna. Tuoreusasteilla ei ollut vaikutusta kuusen ($P = 0,058$) ja koivun ($P = 0,574$) biomassoihin.



Kuva 9. Biofilmin tuhkattomat biomassat (keskiarvo ± keskihajonta) puulajeilla koivu, kuusi ja mänty puiden tuoreusasteen mukaan.

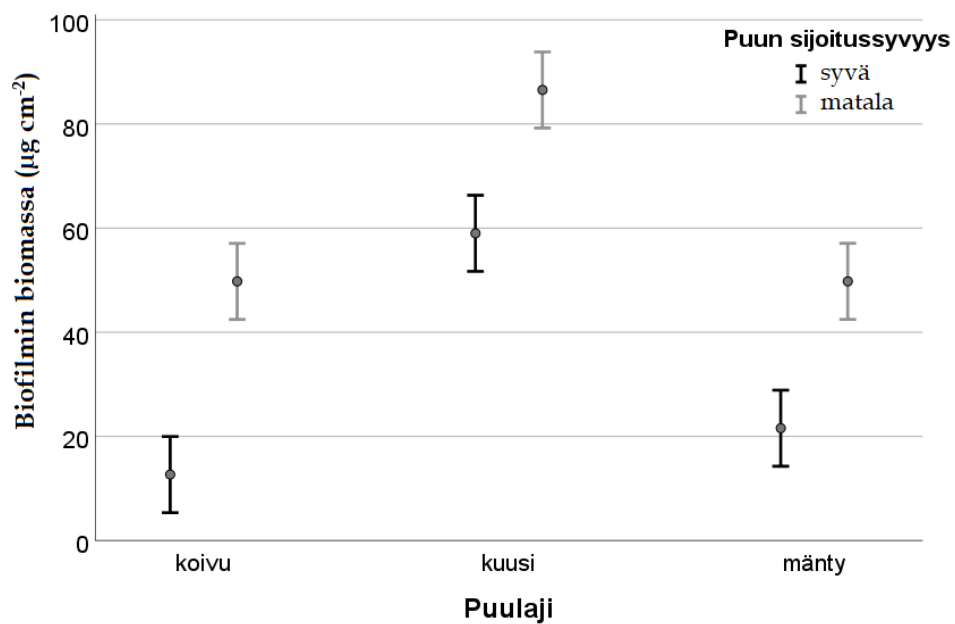
Matalalle noin 10 cm syvyydelle sijoitettujen puiden (Kuva 10) biofilmin tuhkattomat biomassat olivat 2 kertaisia ($P < 0,001$) syvälle noin 50 cm syvyydelle sijoitettuihin puihin verrattuna.



Kuva 10. Biofilmin tuhkattomat biomassat (keskiarvo \pm keskihajonta) noin 10 cm (matala) ja noin 50 cm (syvä) syvyydelle vedenpinnasta sijoitetun puun pinnalla.

Kuusen biofilmin tuhkaton biomassa oli matalassa 1,7 kertainen koivuun ($P = 0,001$) ja mäntyyn ($P = 0,001$) verrattuna sekä syvässä 4,7 kertainen ($P < 0,001$) koivuun ja 2,7 kertainen ($P = 0,001$) mäntyyn verrattuna. Männyn ja koivun biomassoissa ei ollut eroja matalassa ($P = 0,999$) ja syvässä ($P = 0,393$).

Matalassa biomassa koivulla oli 3,9 kertainen ($P < 0,001$), männyllä 2,3 kertainen ($P = 0,011$) ja kuusella 1,5 kertainen ($P = 0,042$) syvään verrattuna (Kuva 11).



Kuva 11. Biofilmin tuhkattomat biomassat (keskiarvo \pm keskihajonta) puulajeilla koivu, kuusi ja mänty puiden sijoitusyvyksien mukaan.

4 TULOSEN TARKASTELU

4.1 Puulajin vaikutus biofilmin määrään

Kuusen pinnalle muodostuneen biofilmin a-klorofyllin (leväbiomassa) ja orgaanisen aineen (tuhkaton) biomassa oli suurempi kuin koivulla ja männyllä. Männyn leväbiomassa oli suurempi kuin koivun, mutta tuhkattomissa biomassoissa ei ollut eroja.

Leväbiomassojen tulokset tukevat tutkimushypoteesia (H1), jonka mukaan karkeampiin alustoihin muodostuisi paremmin biofilmiä. Kaarnan rakenne kuusella ja männyllä on karkeampi kuin koivulla. Aiemmissä tutkimuksissa on havaittu bakteerien, levien ja sienien kiinnittyvän nopeammin karkeampiin alustoihin, joissa on kasvulle enemmän pinta-alaa (Sinsabaugh ym. 1991, Hunt ja Parry 1998, Sekar ym. 2004, Zhang ym. 2019).

Hunt ja Parry (1998) tutkivat bakteerien ja levien kiinnittymistä jokeen asetettuihin karkeaan ja sileään piikarbidi hiomapapereihin. Kokeessa havaittiin bakteerien kiinnittyvän nopeammin karkeaan kuin sileään alustaan, mutta bakteerikerroksen muodostumisen jälkeen levien kiinnittymisessä ei havaittu eroja. Karkeamman alustan arviotiin suojaavan bakteereja enemmän virtauksen aiheuttamilta leikkausvoimilta ja tarjoavan kasvulle enemmän pinta-alaa (Hunt ja Parry 1998). Sekarin ym. (2004) laboratorioskokeessa kuitenkin havaittiin levien kiinnittyvän nopeammin karkeaan kuin sileään alustaan (metallilevy). Levyjen pinnoittamisen bakteerikerroksella myös havaittiin lisäävän leväbiomassaa (Sekar ym. 2004). Zhang ym. (2019) laboratorioskokeessa tutkittiin eri kasvualustojen (männyn puru, riisinkuori ja sokeriruokojäte) eroja leväkantojen viljelyssä. Tulosten perusteella suurin leväbiomassa muodostui karkeimpaan alustaan, joka oli männyn puru (Zhang ym. 2019).

Biofilmin tuhkatomissa biomassoissa kuusen biomassa oli kuitenkin yli kaksinkertainen mäntyyn verrattuna sekä männyn ja koivun välillä ei ollut eroa. Tulokset poikkeavat Tankin ja Websterin (1998) kokeen tuloksista, jossa tammen ja poppelin (molemmilla karkea kaarnan kuvio) välillä ei ollut eroja biofilmin muodostumisessa. Männyn pieni biofilmin tuhkaton biomassa voi mahdollisesti johtua männyn uuteaineista, jotka suojaavat mäntyä mikrobeilta (Latva-Mäenpää 2017). Trois ym. (2010) kokeessa tutkittiin kaatopaikan suotuvesien käsittelyä männyn kaarnalla. Männyn kaarnan havaittiin vapauttavan suuria määriä fenoliyhdisteitä ja hydroksyloituja bentseenirenkaita, jotka hidastivat mikrobitoimintaa ja biofilmin kehitystä (Trois ym. 2010).

4.2 Puun tuoreusaste

Kuivissa vuosi sitten kaadetuissa puissa biofilmin tuhkaton biomassa oli suurempi kuin tuoreissa puissa, mutta leväbiomassoihin tuoreusasteella ei ollut vaikutusta. Kuusen leväbiomassa ja tuhkaton biomassa olivat tuoreessa ja kuivassa suurempia kuin koivulla. Tuoreen kuusen leväbiomassa ja tuhkaton biomassa olivat suurempia kuin männyllä, kun taas kuivassa kuusen tuhkaton biomassa oli suurempi, mutta leväbiomassoissa ei ollut eroja. Leväbiomassoissa puulajin ja tuoreusasteiden välillä oli myös merkitsevä yhdysvaikutus, kun kuusella leväbiomassa kuivassa puussa oli pienempi ja männyllä suurempi kuin tuoreessa puussa. Kuivan männyn leväbiomassa oli vain suurempi kuin koivun, mutta muuten eroja biofilmin (a-klorofylli ja tuhkaton) biomassoissa ei ollut.

Tulokset eivät täysin tue tutkimushypoteesia (H1), jonka mukaan biofilmin kasvu on hitaampaa tuoreessa puussa, jossa puuta suojaavien uuteaineiden määrä on suurempi. Puun uuteaineiden määrä alkaa laskemaan heti puunkaadon jälkeen. Lapin ym. (2014) tekemässä kokeessa tutkittiin koivun, kuusen ja männyn kaarnan uuteaineiden määriä puiden kaadon jälkeen. Uuteaineiden määrät laskivat jo

kokeen ensimmäisen viikon aikana merkittävästi ja kokeen lopussa (6 kk) uuteaineiden määrä oli jo puolittunut (Lappi ym. 2014).

Merkittävin vaikutus tuoreusasteella oli vain männyn tuhkatomaan biomassaa, joka oli suurempi kuivassa kuin tuoreessa. Tuoreusaste ei kuitenkaan vaikuttanut koivun ja kuusen biofilmin (a-klorofylli ja tuhkaton) biomassoihin tai männyn leväbiomassaan. Männyn tuoreusasteiden erot voivat mahdollisesti johtua haihtuvista mono- ja seskviterpeenit, joista suurin osa haihtuu vuoden sisällä puun kaadon jälkeen (Granström 2007, Kačák ym. 2012). Erot kuusen ja männyn tuhkatomissa biomassoissa voi johtua pinosylviineistä (stilbeeni) ja heikosti haihtuvista hartsihapoista (diterpeeni), joita männyn kaarnassa on havaittu olevan enemmän kuin kuusen kaarnassa (Rigol ym. 2003, Hovelstad ym. 2004, Latva-Mäenpää 2017, Routa ym. 2017).

Lindbergin ym. (2004) tekemässä laboratorioskokeessa tutkittiin männystä uutettujen stilbeenien vaikutusta bakteerien kasvuun. Tulosten perusteella stilbeeneistä pinosylviini esti bakteerien kasvua parhaiten. Hartsihappojen on myös havaittu hidastavan mikrobitoimintaa ja biofilmin kehitystä (Wang ym. 2012, Ganewatta ym. 2015).

4.3 Puun sijoitusvyvyys

Puun pinnalle muodostuneen biofilmin (a-klorofylli ja tuhkaton) biomassat olivat suurempia matalalla noin 10 cm syvyydellä kuin syvällä noin 50 cm syvyydellä vedenpinnasta. Merkittävin vaikutus sijoitusvyvydellä oli biofilmin tuhkatomiin biomassoihin, jotka tutkituilla puulajeilla olivat suurempia matalassa kuin syvällä. Koivun tuhkaton biomassa oli matalassa lähes nelinkertainen ja männyn yli kaksinkertainen syvään verrattuna. Leväbiomassoissa sijoitusvyvyys vaikutti vain kuuseen, jonka leväbiomassa oli matalassa yli kaksinkertainen syvään verrattuna.

Leväbiomassoissa puulajin ja sijoitusvyvyden välillä oli myös yhdysvaikutus, kun kuusen leväbiomassa oli matalassa suurempi kuin männyn ja koivun, mutta

syvässä kuusen ja männyn välillä ei ollut eroja ja ero koivuun oli paljon pienempi. Kuusen tuhkaton biomassassa oli molemmissa sijoitusyvyyksissä suurempi kuin koivun ja männyn. Männyn leväbiomassat olivat vain suurempia matalassa kuin koivun, mutta muuten eroja biofilmin (a-klorofylli ja tuhkaton) biomassoissa ei ollut.

Tulokset tukevat tutkimushypoteesia (H1), jonka mukaan biofilmiä esiintyisi runsaammin lähempänä pintaa, jossa on valoisampaa. Wagnerin ym. (2015) tekemässä laboratoriokokeessa havaittiin biofilmin kokonaisbiomassan, a-klorofyllin ja bakteerisolujen määrän lisääntyvän valon lisääntyessä. Rierin ja Stevensonin (2002) tekemässä kenttäkokeessa bakteerien ja levien biomassat olivat suurempia valoisammassa kuin hämärässä. Kokeessa puolet jokeen asetetuista saviruukuista oli luonnonvalossa ja puolet varjostettiin (Rier ja Stevenson 2002). Vadeboncoeurin ja Lodgen (2000) tekemässä laboratoriokokeessa tutkittiin puun pinnalle muodostuvaa biofilmiä kolmessa eri valaistuksessa (250, 70 ja 10 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Kokeen tulosten perusteella puun pinnalle muodostuneen biofilmin a-klorofyllin biomassa oli suurempi valoisassa kuin pimeässä (Vadeboncoeur ja Lodge 2000).

Couchin ym. (1992) tekemässä kenttäkokeessa pajunippuja asetettiin neljään eri kanavaan, joista kaksi pimennettiin mustilla muovikansilla. Kokeen tulosten perusteella valon määrällä ei ollut merkittävää vaikutusta pajun pinnalle muodostuneen biofilmin tuhkatomaan biomassaan, mutta biofilmin a-klorofyllin biomassa oli suurempi valoisammassa kuin pimeässä (Couch ym. 1992). Sanches ym. (2011) tekemässä kenttäkokeessa tutkittiin vaikuttaako valon määrä päällyslievien ravinteiden (typpi, fosfori) sitoutumiseen ja leväbiomassaan. Tummavetiseen järveen sijoitettiin lasisia näytepulloja 10 cm syvyyteen (valon määrä heikkeni noin 3 %) ja 2 m syvyyteen (valon määrä heikkeni noin 80 %). Osaan näytepulloista tehtiin ravinneliuokset ja osa toimi kontrollina. Levien kasvualustana toimi pullojen päälle asetetut verkot. Tulosten mukaan ravinteiden

sitoutuminen lisääntyi sekä leväbiomassa oli suurempi valoisassa 10 cm syvyydellä kuin pimeässä 2 m syvyydellä (Sanches ym. 2011).

4.4 Tulosten luotettavuus ja sovellettavuus

Syyskuussa tehtyjen kenttämittauksien ja biofilmin raaputusnäytteiden tulokset eivät korreloineet keskenään ($R^2 = 0,217$). Kenttämittauksissa Benthosensorilla saatiin biofilmin a-klorofyllin biomassoja, jotka koostuivat viherlevien, piilevien ja sinilevien massoista. Biofilmin tuhkaton biomassa sisältää kenttämittauksissa mitattujen levien lisäksi muita pohjaleviä ja biofilmin orgaanisia aineita (Wu 2016). Benthosensorin mittaukset eivät välttämättä ole yksittäisten leväryhmien osalta laboratoriomittauksien kanssa vertailukelpoisia. Biofilmikerroksen ollessa runsas Benthosensorin on havaittu antavan pienempiä arvoja sinileville, mutta kokonaisleväbiomassan tulokset ovat olleet laboratoriotulosten kanssa vertailukelpoisia. Harrisin ja Grahamin (2014) mukaan Benthosensor soveltuisi parhaiten kokonaisleväbiomassan ajallisten muutosten seurantaan (Harris ja Graham 2015).

Kenttämittauksien yhteydessä puihin muodostuneen biofilmin kuivumista pyrittiin välttämään pitämällä mitattava kehikko altaassa mittauksen aikana. Altaan pohjan sekoittuminen altaassa liikkumisen vuoksi ja kehikoiden siirtely on voinut kuitenkin häiritä biofilmin kehitystä. Kenttämittauksien yhteydessä olisi myös voinut mitata puiden eri sijoitusyvyyksiltä valon voimakkuudet ja lämpötilat, joiden tuloksia olisi voinut käyttää tulosten tarkastelun apuna. Heinäkuun mittauksista puuttui kahden kehikon ylimmän rivin havainnot.

Havaintojen puuttuminen tai poistaminen olisi pienentänyt havaintoyksiköiden määrää, jolloin tulosten tarkkuus olisi kärsinyt. Puuttuvia havaintoja paikattiin moni-imputoinnilla, joka on tilastotieteessä tieteellisesti pätevä ja luvallinen tapa käsitellä puuttuvia havaintoja (Karvanen 2015).

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Aiemmissa tutkimuksissa on tutkittu lähinnä eri kasvualustojen, kuten kivien, muovien, metallien, heinäkasvien, sekä puiden ja puun lehtien välisiä eroja biofilmin kehittymisessä. Tämän pro-gradun tulokset lisäävät havaintoja koskemaan myös eri puulajien ja puiden tuoreusasteiden välisiin eroihin biofilmin muodostumisessa. Tulokset ovat apuna biologisen vesiensuojelumenetelmän ja sen toteuttamisen toimintamallin kehittämässä, lisäten tietoa puulajien, puiden tuoreuden ja sijoitusyvyyden eroista biofilmin muodostumisessa puun pinnalle.

Tulokset osoittavat, että puulajeihin, joiden kaarnan rakenne oli karkeampi (tutkimuksessa kuusi ja mänty), muodostuu enemmän biofilmiä kuin sileärakenteiseen (koivu) puuhun. Puiden tuoreusasteella tai sijoitusyvyydellä ei ollut merkittäviä vaikutuksia puulajien välisiin eroihin. Lisäksi havaittiin, että puun tuoreudella ei ollut merkittävää vaikutusta biofilmin muodostumisessa. Vaikka puiden sijoitusyvyyksien välillä oli vain 40 cm ero, niin tulokset vahvistavat tietoa, jonka mukaan valon määrä lisää biofilmin biomassaa.

Valumavesien monivuotisen puhdistusmenetelmän täytäntöönpanon kannalta puroihin, ojiin ja laskeutusaltaisiin sijoitetun puun kaarnan rakenteen tulisi olla karkea kuten kuusella ja männyllä. Puun tuoreusasteella ei ole ilmeistä merkitystä, kun merkittävin osa uuteaineista poistuu jo ensimmäisen viikon aikana puun kaadon jälkeen. Puiden sijoitusyvyyks tulisi kuitenkin olla lähellä pintaa, jossa valon määrä on suurempi.

KIITOKSET

Kiitokset ohjaajilleni Heikki Hämäläiselle ja Elisa Valliukselle hyvästä ohjauksesta ja tuesta työn aikana. Kiitokset myös Milla Saariselle isosta avusta maastotöissä ja laboratoriotöissä. Lisäksi haluan kiittää Esko Keskistä avusta koeasetelman järjestelyssä ja seurannassa. Lopuksi halun kiittää perhettäni ja läheisiäni tuesta ja kannustuksesta työn aikana.

KIRJALLISUUS

- Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J & Korhonen J. 2016. *Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia*. VTT Technology 258: 54–57.
- Alatalo M. 2000. Metsätaloustoimenpiteistä aiheutunut ravinne- ja kiintoainekuormitus. *Suomen ympäristö* 381: 9–10.
- Ammar Y., Swailes D., Bridgens B & Chen J. 2015. Influence of surface roughness on the initial formation of biofilm. *Surface and Coatings Technology* 284: 410–416.
- Baillie B & Davies T. 2002. Influence of large woody debris on channel morphology in native forest and pine plantation streams in the Nelson region, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 36: 763–774.
- BBE-moldaenke 2019. The BenthosTorch A unique instrument for quick and easy phytobenthos measurements. <https://www.bbe-moldaenke.de/en/products/chlorophyll/details/benthostorch.html> (luettu: 10.2.2020)
- Ben-Ari E. 1999. Not just slime. *BioScience* 49: 689–695.
- Besemer K. 2015. Biodiversity, community structure and function of biofilms in stream ecosystems. *Research in Microbiology* 166: 774–781.
- Brasell K., Heath M., Ryan K & Wood S. 2014. Successional change in microbial communities of benthic phormidium-dominated biofilms. *Microbial Ecology* 69: 254–266.
- Collier K. 2013. Wood decay rates and macroinvertebrate community structure along contrasting human pressure gradients (Waikato, New Zealand). *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 48: 97–111.
- Couch C & Meyer J. 1992. Development and composition of the epixylic biofilm in a blackwater river. *Freshwater Biology* 27: 43–51.
- Eloranta P., Karjalainen S & Vuori K. 2007. *Piilevâyhteisöt jokivesien ekologisen tilan luokittelussa ja seurannassa – menetelmäohjeet*. Pohjois-Pohjanmaan ympäristökeskus. Ympäristöopas, Painotupa ky, pp. 7–11
- Fagerlund M 2018. Miten metsätalouden vaikutus näkyy vesistöissä? <http://www.kymijoenvesijaymparisto.fi/wp-content/uploads/2018/08/Vesist%C3%B6kuormitus-ja-sen-vaikutukset.pdf> (luettu 5.10.2019)
- Finér L., Lepistö A., Karlsson K., Räike A., Tattari S., Huttunen M., Härkönen L., Joensuu S., Kortelainen P., Mattsson T., Piirainen S., Sarkkola S., Sallantausta T & Ukonmaanaho L. 2020. *Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020*. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2020: 6.

- Finér L., Mattsson T., Joensuu S., Koivusalo H., Laurén A., Makkonen T., Nieminen M., Tattari S., Ahti E., Kortelainen P., Koskiahho., Leinonen A., Nevalainen R., Piirainen S., Saarelainen J., Sarkkola S & Vuollekoski M. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. *Suomen ympäristö* 10/2010: 7–10.
- Flores L., Larranaga A., Díez J & Eloegi A. 2011. Experimental wood addition in streams: effects on organic matter storage and breakdown. *Freshwater Biology* 56: 2156–2167.
- Ganewatta M., Miller K., Singleton S., Mehrpouya-Bahrami P., Chen Y., Yan Y & Tang C. 2015. Antibacterial and Biofilm-Disrupting Coatings from Resin Acid-Derived Materials. *Biomacromolecules* 16: 3336–3344.
- Gaiser E. 2009. Periphyton as an indicator of restoration in the Florida Everglades. *Ecological Indicators* 9: 37–45.
- Golladay S & Sinsabaugh R. 1991. Biofilm development on leaf and wood surfaces in a boreal river. *Freshwater Biology* 25: 437–450.
- Granström K. 2007. Wood processing as a source of terpene emissions compared to natural sources. *WIT Transaction on Ecology and the Environment* 101: 263–272.
- Hakola H., Tarvainen V., Bäck J., Ranta H., Bonn B., Rinne J & Kulmala M. 2006. Seasonal variation of mono- and sesquiterpene emission rates of Scots pine. *Biogeosciences* 3: 93–101.
- Harris T & Graham J. 2015. Preliminary evaluation of an in vivo fluorometer to quantify algal periphyton biomass and community composition. *Lake and Reservoir Management* 31: 127–133.
- Horn H., Reiff H & Morgenroth E. 2003. Simulation of growth and detachment in biofilm systems under defined hydrodynamic conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, 81: 607–617.
- Hovelstad H., Leirset I., Oyaas K & Fiksdahl A. 2006. Screening Analyses of Pinosylvins Stilbenes, Resin Acids and Lignans in Norwegian Conifers. *Molecules* 11: 103–114.
- Huang Y., Zheng Y., Li J., Liao Q., Fu Q., Xia A & Sun Y. 2018. Enhancing microalgae biofilm formation and growth by fabricating microgrooves onto the substrate surface. *Bioresour. Technology* 261: 36–43.
- Hunt A & Parry J. 1998. The effect of substratum roughness and river flow rate on the development of a freshwater biofilm community. *Biofouling* 12: 287–303.
- IBM Corp. 2019. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 26.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- Joensuu S., Hynninen P., Heikkinen K., Tenhola T., Saari P., Kauppila M., Leinonen A., Ripatti H., Jämsén J., Nilsson S & Vuollekoski M. 2012. *Metsätalouden*

vesiensuojelu – Metsätalouden vesiensuojelu -kouluttajan aineisto. Kopijyvä, Jyväskylä, pp. 11–15

Joensuu S., Makkonen T., Vuollekoski M., Nieminen M., Leinonen A & Sarkkola S.

2008. Metsätalouden vesiensuojelu. *Vesitalous* 6/2008: 19–25

Kačík F., Veřková V., Šmíra P., Nasswetrová A., Kačíková D & Reinprecht L. 2012. Release of terpenes from fir wood during its long-term use and in thermal treatment. *Molecules* 17: 9990–9999.

Karvanen J. 2015. Puuttuva tieto ja vilppi. *Tieteessä Tapahtuu* 33: 46–48.

KvantiMOTV 2013. Hierarkkinen lineaarinen regressioanalyysi. <https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/hierarkkinen-lineaarinen-regressio/analyysi.html> (luettu 20.3.2020)

KvantiMOTV 2016. Puuttuvien havaintojen moni-imputointi. <https://www.fsd.tuni.fi/menetelmaopetus/puuttuvat/puuttuvat.ht> (luettu 12.2.2020)

Latva-Mäenpää H. 2017. “Bioactive and protective polyphenolics from roots and stumps of conifer trees (Norway spruce and Scots pine)”. Väitöskirja -tutkielma, Helsingin yliopisto <http://hdl.handle.net/10138/186254>

Lappi H., Nurmi J & Läspä O. 2014. *Decrease in extractives of tree bark during storage*. Forest refine info sheet, saatavissa http://biofuelregion.se/wp-content/uploads/2017/01/3_11_IS_2014-08-11_Decrease_in_Extractives_Lappi_Nurmi_Laspa.pdf

Lau, Y. L., & Liu, D. (1993). Effect of flow rate on biofilm accumulation in open channels. *Water Research* 27: 355–360.

Lindberg L., Willför S & Holmbom B. 2004. Antibacterial effects of knotwood extractives on paper mill bacteria. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 31: 137–147.

Lilja-Rothsten S & Saaristo L. 2015. Metsäbiomassojen ympäristöriskit- Selvitys. Tapio Oy, pp. 4

Melillo J., Naiman R., Aber J & Eshleman K. 1983. The influence of substrate quality and stream size on wood decomposition dynamics. *Oecologia* 58: 281–285.

Melo L & Bott T. 1997. Biofouling in water systems. *Experimental Thermal and Fluid Science* 14: 375–381.

Nieminen M., Sallantausta T., Ukonmaanaho L., Nieminen T. M & Sarkkola S. 2017. Nitrogen and phosphorus concentrations in discharge from drained peatland forests are increasing. *Science of The Total Environment* 609: 974–981.

Pettersen R. 1984. The chemical composition of wood. Teoksessa: Rowell R (Toim.) *The Chemistry of Solid Wood*. Vol. 207, American Chemical Society, pp. 57–126.

- Rao T. 2009. Comparative effect of temperature on biofilm formation in natural and modified marine environment. *Aquatic Ecology* 44: 463–478.
- Rier S & Stevenson J. 2002. Effects of light dissolved organic carbon, and inorganic nutrients on the relationship between algae and heterotrophic bacteria in stream periphyton. *Hydrobiologia* 489: 179–184.
- Rigol A., Latorre A., Lacorte S & Barceló D. 2003. Direct determination of resin and fatty acids in process waters of paper industries by liquid chromatography/mass spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry* 38: 417–426.
- Routa J., Brännström H., Anttila P., Mäkinen M., Jänis J & Asikainen A. 2017. *Wood extractives of Finnish pine, spruce and birch – availability and optimal sources of compounds*. Luonnonvarakeskus, Helsinki
- Ryan S., Bishop E & Daniels J. 2014. Influence of large wood on channel morphology and sediment storage in headwater mountain streams, Fraser Experimental Forest, Colorado. *Geomorphology* 217: 73–88.
- Sanches L., Guariento A., Bozelli R & Esteves F. 2011. Effects of nutrients and light on periphytic biomass and nutrient stoichiometry in tropical black-water aquatic ecosystem. *Hydrobiologia* 669: 35–44.
- Sekar R., Venugopalan V. Satpathy K., Nair K & Rao, V. N. R. 2004. Laboratory studies on adhesion of microalgae to hard substrates. *Hydrobiologia* 512: 109–116.
- Sinsabaugh R., Golladay S & Linkins A. 1991. Comparison of epilithic and epixylic biofilm development in boreal river. *Freshwater biology* 25: 179–187.
- Syke 2018. Puuaines puhdistamaan metsätalouden valumavesiä. [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Puuaines_puhdistamaan_metsatalouden_valu\(47904\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Puuaines_puhdistamaan_metsatalouden_valu(47904)) (luettu 15.09.2019)
- Ta C & Arnason J. 2015. Mini Review of Phytochemicals and Plant Taxa with Activity as Microbial Biofilm and Quorum Sensing Inhibitors. *Molecules* 21: 29.
- Tank J & Webster J. 1998. Interaction of substrate and nutrient availability on wood biofilm processes in streams. *Ecology* 79:2168–2179.
- Trois, C., Coulon, F., de Combret, C. P., Martins, J. M. F., & Oxarango, L. (2010). Effect of pine bark and compost on the biological denitrification process of non-hazardous landfill leachate: Focus on the microbiology. *Journal of Hazardous Materials* 181: 1163–1169.
- Vadeboncoeur Y & Lodge D. 2000. Periphyton production on wood and sediment: substratum-specific response to laboratory and whole-lake nutrient manipulations. *Journal of the North American Benthological Society* 19: 68–81.

- Villanueva V., Font J., Schwartz T & Romani A. 2010. Biofilm formation at warming temperature: acceleration of microbial colonization and microbial interactive effects. *Biofouling* 27: 59–71.
- Wagner K., Besemer K., Burns N., Battin T & Bengtsson M. 2015. Light availability affects stream biofilm bacterial community composition and function, but not diversity. *Environmental Microbiology* 17: 5036–5047.
- Wang J., Chen Y., Yao., Wilbon P., Zhang W., Ren L & Tang C. 2012. Robust antimicrobial compounds and polymers derived from natural resin acids. *Chem. Commun.* 48: 916–918.
- Webster J., Tank J., Wallace J., Meyer J., Eggert S., Ehrman T., Ward B., Bennett B., Wagner P & McTammany M. 2000. Effects of litter exclusion and wood removal on phosphorus and nitrogen retention in a forest stream. *SIL Proceedings 1922–2010* 27: 1337–1340.
- Wohl E., Lininger K., Fox M., Baillie B & Erskine W. 2017. Instream large wood loads across bioclimatic regions. *Forest Ecology and Management* 404: 370–380.
- Wu Y. 2016. *Periphyton*. Elsevier
- Xavier J., Picioreanu C & van Loosdrecht M. 2005. A general description of detachment for multidimensional modelling of biofilms. *Biotechnology and Bioengineering* 91: 651–669.
- Ympäristöministeriö. 2007. Vesiensuojelun suuntaviivat vuoteen 2015: Valtioneuvoston periaatepäätös. *Suomen ympäristö* 10/2007: 7–13.
- Zhang Q., Yu Z., Jin S., Zhu L., Liu C., Zheng H., Zhou T., Yuhuan L & Ruan R. 2019. Lignocellulosic residue as bio-carrier for algal biofilm growth: Effects of carrier physicochemical properties and toxicity on algal biomass production and composition. *Bioresource Technology* 293: 122091.

LIITE 1. KENTTÄMITTAUKSIEN TILASTOLLISET ANALYYSIT

Hierarkkisen lineaaristen regressioanalyysien tulokset. Taulukoissa B on estimaatti keskimääräiselle biofilmin a-klorofyllin biomassalle ($\mu\text{g cm}^{-2}$), SE on estimaattien virhetermien keskihajonta, P-arvo on tilastollisen merkitsevyyden arvo, AIC on Akaiken informaatiokriteeri ja -2LL on log-uskottavuusfunktio. CI on todellisten arvojen 95,0 % luottamusväli. Satunnaisissa osissa on jäännöstermin σ^2_e ja satunnaisvaikutuksien σ^2_{ul} varianssit.

| Kaava 1 | B | SE | P-arvo | CI | | AIC | -2LL |
|-----------------|-------|------|--------|---------|---------|--------|--------|
| | | | | alaraja | yläraja | | |
| vakio | 0,52 | 0,07 | 0,00 | 0,40 | 0,65 | 211,54 | 207,54 |
| 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,28 | -0,18 | 0,05 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,17 | -0,04 | 0,21 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,11 | -0,21 | 0,02 | | |
| 4 kk | 0,00 | | | | | | |
| koivu | -0,21 | 0,08 | 0,01 | -0,36 | -0,06 | | |
| kuusi | 0,15 | 0,08 | 0,05 | 0,00 | 0,31 | | |
| mänty | 0,00 | | | | | | |
| vakio | 0,68 | 0,07 | 0,000 | 0,55 | 0,81 | | |
| 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | |
| 4 kk | 0 | | | | | | |
| mänty | -0,15 | 0,08 | 0,047 | -0,31 | 0,00 | | |
| koivu | -0,37 | 0,08 | 0,000 | -0,52 | -0,21 | | |
| kuusi | 0 | | | | | | |
| vakio | 0,31 | 0,06 | 0,000 | 0,18 | 0,44 | | |
| 1 kk | -0,06 | 0,07 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,07 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,07 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | |
| 4 kk | 0 | | | | | | |
| kuusi | 0,37 | 0,06 | 0,006 | 0,21 | 0,52 | | |
| mänty | 0,21 | 0,06 | 0,000 | 0,06 | 0,36 | | |
| koivu | 0 | | | | | | |
| Satunnainen osa | B | | | | | | |
| σ^2_e | 0,11 | | | | | | |
| σ^2_{ul} | 0,03 | | | | | | |

| Kaava 2 | SE | P-arvo | CI | | AIC | -2LL | |
|-----------------|-------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|
| | | | alaraja | yläraja | | | |
| vakio | 0,51 | 0,06 | 0,00 | 0,38 | 0,63 | 227,96 | 223,96 |
| 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,28 | -0,18 | 0,05 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,17 | -0,04 | 0,21 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,11 | -0,21 | 0,02 | | |
| 4 kk | 0,00 | | | | | | |
| tuore | 0,00 | 0,07 | 0,96 | -0,15 | 0,14 | | |
| kuiva | 0,00 | | | | | | |
| Satunnainen osa | B | | | | | | |
| σ^2_e | 0,11 | | | | | | |
| σ^2_{ul} | 0,05 | | | | | | |
| Kaava 4 | B | SE | CI | | P-arvo | AIC | -2LL |
| | | | alaraja | yläraja | | | |
| vakio | 0,62 | 0,06 | 0,50 | 0,74 | 0,00 | 217,09 | 213,09 |
| 1 kk | -0,06 | 0,06 | -0,18 | 0,05 | 0,28 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,06 | -0,04 | 0,21 | 0,17 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,06 | -0,21 | 0,02 | 0,11 | | |
| 4 kk | 0,00 | | | | | | |
| syvä | -0,23 | 0,07 | -0,36 | -0,10 | 0,00 | | |
| matala | 0,00 | | | | | | |
| Satunnainen osa | B | | | | | | |
| σ^2_e | 0,11 | | | | | | |
| σ^2_{ul} | 0,04 | | | | | | |

| Kaava 3 | B | SE | P-arvo | CI | | AIC | -2LL | Kaava 3 | B | SE | P-arvo | CI | | AIC | -2LL | Kaava 3 | B | SE | P-arvo | CI | | AIC | -2LL |
|-----------------|-------|------|--------|---------|---------|--------|--------|-----------------|-------|------|--------|---------|---------|--------|--------|-----------------|-------|------|--------|---------|---------|--------|--------|
| | | | | alaraja | yläraja | | | | | | | alaraja | yläraja | | | | | | | alaraja | yläraja | | |
| vakio | 0,60 | 0,08 | 0,000 | 0,43 | 0,76 | 214,13 | 210,13 | vakio | 0,58 | 0,08 | 0,000 | 0,42 | 0,75 | 214,13 | 210,13 | vakio | 0,34 | 0,08 | 0 | 0,17 | 0,50 | 214,13 | 210,13 |
| 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | | 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | | 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | | 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | | 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | | 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | | 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | |
| 4 kk | 0 | | | | | | | 4 kk | 0 | | | | | | | 4 kk | 0 | | | | | | |
| kuivu | -0,26 | 0,11 | 0,015 | -0,47 | -0,05 | | | mänty | 0,01 | 0,11 | 0,894 | -0,20 | 0,22 | | | kuusi | 0,24 | 0,11 | 0,022 | 0,03 | 0,45 | | |
| kuusi | -0,01 | 0,11 | 0,894 | -0,22 | 0,20 | | | kuivu | -0,24 | 0,11 | 0,022 | -0,45 | -0,03 | | | mänty | 0,26 | 0,11 | 0,015 | 0,05 | 0,47 | | |
| mänty | 0 | | | | | | | kuusi | 0 | | | | | | | kuivu | 0 | | | | | | |
| tuore | -0,15 | 0,11 | 0,168 | -0,36 | 0,06 | | | tuore | 0,19 | 0,11 | 0,077 | -0,02 | 0,40 | | | tuore | -0,05 | 0,11 | 0,623 | -0,26 | 0,16 | | |
| kuiva | 0 | | | | | | | kuiva | 0 | | | | | | | kuiva | 0 | | | | | | |
| kuivu * tuore | 0,09 | 0,15 | 0,530 | -0,20 | 0,39 | | | mänty * tuore | -0,34 | 0,15 | 0,026 | -0,63 | -0,04 | | | kuusi * tuore | 0,24 | 0,15 | 0,111 | -0,06 | 0,54 | | |
| kuivu * kuiva | 0 | | | | | | | mänty * kuiva | 0 | | | | | | | kuusi * kuiva | 0 | | | | | | |
| kuusi * tuore | 0,34 | 0,15 | 0,026 | 0,04 | 0,63 | | | kuivu * tuore | -0,24 | 0,15 | 0,111 | -0,54 | 0,06 | | | mänty * tuore | -0,09 | 0,15 | 0,53 | -0,39 | 0,20 | | |
| kuusi * kuiva | 0 | | | | | | | kuivu * kuiva | 0 | | | | | | | mänty * kuiva | 0 | | | | | | |
| mänty * tuore | 0 | | | | | | | kuusi * tuore | 0 | | | | | | | kuivu * tuore | 0 | | | | | | |
| mänty * kuiva | 0 | | | | | | | kuusi * kuiva | 0 | | | | | | | kuivu * kuiva | 0 | | | | | | |
| vakio | 0,45 | 0,08 | 0 | 0,29 | 0,61 | | | vakio | 0,77 | 0,08 | 0 | 0,61 | 0,94 | | | vakio | 0,29 | 0,08 | 0,001 | 0,12 | 0,45 | | |
| 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | | 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | | 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | | 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | | 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | | 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | | 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | |
| 4 kk | 0 | | | | | | | 4 kk | 0 | | | | | | | 4 kk | 0 | | | | | | |
| kuivu | -0,16 | 0,11 | 0,125 | -0,37 | 0,05 | | | kuivu | -0,49 | 0,11 | 0,000 | -0,70 | -0,28 | | | kuusi | 0,49 | 0,11 | 0 | 0,28 | 0,70 | | |
| kuusi | 0,32 | 0,11 | 0,003 | 0,11 | 0,53 | | | mänty | -0,32 | 0,11 | 0,003 | -0,53 | -0,11 | | | mänty | 0,16 | 0,11 | 0,125 | -0,05 | 0,37 | | |
| mänty | 0 | | | | | | | kuusi | 0 | | | | | | | kuivu | 0 | | | | | | |
| kuiva | 0,15 | 0,11 | 0,168 | -0,06 | 0,36 | | | kuiva | -0,19 | 0,11 | 0,077 | -0,40 | 0,02 | | | kuiva | 0,05 | 0,11 | 0,623 | -0,16 | 0,26 | | |
| tuore | 0 | | | | | | | tuore | 0 | | | | | | | tuore | 0 | | | | | | |
| kuivu * kuiva | -0,09 | 0,15 | 0,53 | -0,39 | 0,20 | | | kuivu * kuiva | 0,24 | 0,15 | 0,111 | -0,06 | 0,54 | | | kuusi * kuiva | -0,24 | 0,15 | 0,111 | -0,54 | 0,06 | | |
| kuivu * tuore | 0 | | | | | | | kuivu * tuore | 0 | | | | | | | kuusi * tuore | 0 | | | | | | |
| kuusi * kuiva | -0,34 | 0,15 | 0,026 | -0,63 | -0,04 | | | mänty * kuiva | 0,34 | 0,15 | 0,026 | 0,04 | 0,63 | | | mänty * kuiva | 0,09 | 0,15 | 0,53 | -0,20 | 0,39 | | |
| kuusi * tuore | 0 | | | | | | | mänty * tuore | 0 | | | | | | | mänty * tuore | 0 | | | | | | |
| mänty * kuiva | 0 | | | | | | | kuusi * kuiva | 0 | | | | | | | kuivu * kuiva | 0 | | | | | | |
| mänty * tuore | 0 | | | | | | | kuusi * tuore | 0 | | | | | | | kuivu * tuore | 0 | | | | | | |
| Satunnainen osa | B | | | | | | | Satunnainen osa | B | | | | | | | Satunnainen osa | B | | | | | | |
| σ_e^2 | 0,11 | | | | | | | σ_e^2 | 0,11 | | | | | | | σ_e^2 | 0,11 | | | | | | |
| σ_{ui}^2 | 0,03 | | | | | | | σ_{ui}^2 | 0,03 | | | | | | | σ_{ui}^2 | 0,03 | | | | | | |

| Kaava 3 | B | SE | P-arvo | CI | |
|---------------|-------|------|--------|---------|---------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 0,60 | 0,09 | 0 | 0,46 | 0,73 |
| 1 kk | -0,05 | 0,10 | 0,653 | -0,07 | -0,02 |
| 2 kk | 0,11 | 0,11 | 0,283 | 0,09 | 0,14 |
| 3 kk | -0,13 | 0,10 | 0,196 | -0,15 | -0,11 |
| 4 kk | 0,00 | | | | |
| mänty | 0 | | | | |
| tuore | -0,15 | 0,09 | 0,113 | -0,34 | 0,04 |
| kuiva | 0 | | | | |
| mänty * tuore | 0 | | | | |
| mänty * kuiva | 0 | | | | |

| Kaava 3 | B | SE | P-arvo | CI | |
|---------------|-------|------|--------|-----------|-----------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 0,63 | 0,14 | 0 | 0,405548 | 0,847 |
| 1 kk | -0,14 | 0,14 | 0,318 | -0,171322 | -0,106 |
| 2 kk | 0,03 | 0,14 | 0,838 | -0,002736 | 0,062305 |
| 3 kk | -0,13 | 0,14 | 0,336 | -0,166322 | -0,101345 |
| 4 kk | 0 | | | | |
| kuusi | 0 | | | | |
| tuore | 0,19 | 0,15 | 0,206 | -0,12185 | 0,500531 |
| kuiva | 0 | | | | |
| kuusi * tuore | 0 | | | | |
| kuusi * kuiva | 0 | | | | |

| Kaava 3 | B | SE | P-arvo | CI | |
|---------------|-------|------|--------|---------|---------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 0,30 | 0,05 | 0,00 | 0,22 | 0,38 |
| 1 kk | -0,01 | 0,06 | 0,85 | -0,02 | 0,00 |
| 2 kk | 0,12 | 0,06 | 0,06 | 0,11 | 0,13 |
| 3 kk | -0,02 | 0,06 | 0,75 | -0,03 | 0,00 |
| 4 kk | 0 | | | | |
| kuivu | 0 | | | | |
| tuore | -0,05 | 0,06 | 0,36 | -0,17 | 0,06 |
| kuiva | 0 | | | | |
| kuivu * tuore | 0 | | | | |
| kuivu * kuiva | 0 | | | | |

| Kaava 5 | B | SE | P-arvo | CI | | AIC | -2LL | Kaava 5 | B | SE | P-arvo | CI | | AIC | -2LL | Kaava 5 | B | SE | P-arvo | CI | | AIC | -2LL |
|-----------------------|-------|------|--------|---------|---------|--------|--------|-----------------------|-------|------|--------|---------|---------|--------|--------|-----------------------|-------|------|--------|-------|-------|--------|--------|
| | | | | alaraja | yläraja | | | | | | | alaraja | yläraja | | | | | | | Med | Med | | |
| vakio | 0,60 | 0,07 | 0,00 | 0,46 | 0,75 | 193,04 | 189,04 | vakio | 0,92 | 0,07 | 0,000 | 0,77 | 1,06 | 193,04 | 189,04 | vakio | 0,34 | 0,07 | 0 | 0,20 | 0,48 | 193,04 | 189,04 |
| 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,28 | -0,18 | 0,05 | | | 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | | 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,17 | -0,04 | 0,21 | | | 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | | 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,11 | -0,21 | 0,02 | | | 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | | 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | |
| 4 kk | 0 | | | | | | | 4 kk | 0 | | | | | | | 4 kk | 0 | | | | | | |
| koivu | -0,27 | 0,09 | 0,00 | -0,44 | -0,09 | | | mänty | -0,31 | 0,09 | 0,001 | -0,49 | -0,14 | | | kuusi | 0,58 | 0,09 | 0 | 0,40 | 0,75 | | |
| kuusi | 0,31 | 0,09 | 0,00 | 0,14 | 0,49 | | | koivu | -0,58 | 0,09 | 0,000 | -0,75 | -0,40 | | | mänty | 0,27 | 0,09 | 0,003 | 0,09 | 0,44 | | |
| mänty | 0 | | | | | | | kuusi | 0 | | | | | | | koivu | 0 | | | | | | |
| syvä | -0,16 | 0,09 | 0,07 | -0,34 | 0,01 | | | syvä | -0,48 | 0,09 | 0,000 | -0,65 | -0,30 | | | syvä | -0,05 | 0,09 | 0,561 | -0,23 | 0,12 | | |
| matala | 0 | | | | | | | matala | 0 | | | | | | | matala | 0 | | | | | | |
| koivu * syvä | 0,11 | 0,13 | 0,38 | -0,14 | 0,35 | | | mänty * syvä | 0,32 | 0,13 | 0,012 | 0,07 | 0,56 | | | kuusi * syvä | -0,43 | 0,13 | 0,001 | -0,67 | -0,18 | | |
| koivu * matala | 0 | | | | | | | mänty * matala | 0 | | | | | | | kuusi * matala | 0 | | | | | | |
| kuusi * syvä | -0,32 | 0,13 | 0,01 | -0,56 | -0,07 | | | koivu * syvä | 0,43 | 0,13 | 0,001 | 0,18 | 0,67 | | | mänty * syvä | -0,11 | 0,13 | 0,384 | -0,35 | 0,14 | | |
| kuusi * matala | 0 | | | | | | | koivu * matala | 0 | | | | | | | mänty * matala | 0 | | | | | | |
| mänty * syvä | 0 | | | | | | | kuusi * syvä | 0 | | | | | | | kuusi * syvä | 0 | | | | | | |
| mänty * matala | 0 | | | | | | | kuusi * matala | 0 | | | | | | | kuusi * matala | 0 | | | | | | |
| vakio | 0,44 | 0,07 | 0 | 0,30 | 0,58 | | | vakio | 0,44 | 0,07 | 0,000 | 0,30 | 0,58 | | | vakio | 0,29 | 0,07 | 0 | 0,15 | 0,43 | | |
| 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | | 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | | 1 kk | -0,06 | 0,06 | 0,276 | -0,18 | 0,05 | | |
| 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | | 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | | 2 kk | 0,09 | 0,06 | 0,166 | -0,04 | 0,21 | | |
| 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | | 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | | 3 kk | -0,09 | 0,06 | 0,114 | -0,21 | 0,02 | | |
| 4 kk | 0 | | | | | | | 4 kk | 0 | | | | | | | 4 kk | 0,00 | | | | | | |
| koivu | -0,16 | 0,09 | 0,072 | -0,33 | 0,01 | | | koivu | -0,15 | 0,09 | 0,080 | -0,32 | 0,02 | | | kuusi | 0,15 | 0,09 | 0,08 | -0,02 | 0,32 | | |
| kuusi | 0,00 | 0,09 | 0,963 | -0,18 | 0,17 | | | mänty | 0,00 | 0,09 | 0,963 | -0,17 | 0,18 | | | mänty | 0,16 | 0,09 | 0,072 | -0,01 | 0,33 | | |
| mänty | 0 | | | | | | | kuusi | 0 | | | | | | | koivu | 0 | | | | | | |
| matala | 0,16 | 0,09 | 0,071 | -0,01 | 0,34 | | | matala | 0,48 | 0,09 | 0 | 0,30 | 0,65 | | | matala | 0,05 | 0,09 | 0,561 | -0,12 | 0,23 | | |
| syvä | 0 | | | | | | | syvä | 0 | | | | | | | syvä | 0 | | | | | | |
| koivu * matala | -0,11 | 0,13 | 0,384 | -0,35 | 0,14 | | | koivu * matala | -0,43 | 0,13 | 0,001 | -0,67 | -0,18 | | | kuusi * matala | 0,43 | 0,13 | 0,001 | 0,18 | 0,67 | | |
| koivu * syvä | 0 | | | | | | | koivu * syvä | 0 | | | | | | | kuusi * syvä | 0 | | | | | | |
| kuusi * matala | 0,32 | 0,13 | 0,012 | 0,07 | 0,56 | | | mänty * matala | -0,32 | 0,13 | 0,012 | -0,56 | -0,07 | | | mänty * matala | 0,11 | 0,13 | 0,384 | -0,14 | 0,35 | | |
| kuusi * syvä | 0 | | | | | | | mänty * syvä | 0 | | | | | | | mänty * syvä | 0 | | | | | | |
| mänty * matala | 0 | | | | | | | kuusi * matala | 0 | | | | | | | kuusi * matala | 0 | | | | | | |
| mänty * syvä | 0 | | | | | | | kuusi * syvä | 0 | | | | | | | kuusi * syvä | 0 | | | | | | |
| Satunnainen osa | B | | | | | | | Satunnainen osa | B | | | | | | | Satunnainen osa | B | | | | | | |
| σ_e^2 | 0,11 | | | | | | | σ_e^2 | 0,11 | | | | | | | σ_e^2 | 0,11 | | | | | | |
| σ_{u}^2 | 0,01 | | | | | | | σ_{u}^2 | 0,01 | | | | | | | σ_{u}^2 | 0,01 | | | | | | |

| Kaava 5 | B | SE | P-arvo | CI | |
|----------------|-------|------|--------|---------|---------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 0,60 | 0,09 | 0 | 0,80 | 1,12 |
| 1 kk | -0,05 | 0,10 | 0,653 | -0,17 | -0,11 |
| 2 kk | 0,11 | 0,11 | 0,283 | 0,00 | 0,06 |
| 3 kk | -0,13 | 0,10 | 0,196 | -0,17 | -0,10 |
| 4 kk | 0,00 | | | | |
| mänty | 0 | | | | |
| syvä | -0,16 | 0,09 | 0,082 | -0,70 | -0,25 |
| matala | 0 | | | | |
| mänty * syvä | 0 | | | | |
| mänty * matala | 0 | | | | |

| Kaava 5 | B | SE | P-arvo | CI | |
|----------------|-------|------|--------|---------|---------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 0,96 | 0,11 | 0 | 0,80 | 1,12 |
| 1 kk | -0,14 | 0,14 | 0,32 | -0,17 | -0,11 |
| 2 kk | 0,03 | 0,14 | 0,84 | 0,00 | 0,06 |
| 3 kk | -0,13 | 0,14 | 0,34 | -0,17 | -0,10 |
| 4 kk | 0 | | | | |
| kuusi | 0 | | | | |
| syvä | -0,48 | 0,11 | 0,00 | -0,70 | -0,25 |
| matala | 0 | | | | |
| kuusi * syvä | 0 | | | | |
| kuusi * matala | 0 | | | | |

| Kaava 5 | B | SE | P-arvo | CI | |
|----------------|-------|------|--------|---------|---------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 0,30 | 0,05 | 0,00 | 0,22 | 0,38 |
| 1 kk | -0,01 | 0,06 | 0,85 | -0,02 | 0,00 |
| 2 kk | 0,12 | 0,06 | 0,06 | 0,11 | 0,13 |
| 3 kk | -0,02 | 0,06 | 0,75 | -0,03 | 0,00 |
| 4 kk | 0 | | | | |
| koivu | 0 | | | | |
| syvä | -0,05 | 0,06 | 0,38 | -0,17 | 0,06 |
| matala | 0 | | | | |
| kuusi * syvä | 0 | | | | |
| kuusi * matala | 0 | | | | |

LIITE 2. BIOFILMINÄYTTEIDEN TILASTOLLISET ANALYYSIT

Lineaaristen regressioanalyysien tulokset. Taulukoissa B on estimaatti keskimääräiselle biofilmin biomassalle ($\mu\text{g cm}^{-2}$), SE on estimaattien virhetermien keskihajonta, P-arvo on tilastollisen merkitsevyyden arvo, CI on todellisten arvojen 95,0 % luottamusväli ja R^2 on selitysaste, joka kertoo kuinka suuren osan prediktorit selittävät vasteen vaihtelusta.

| Kaava 6 | B | SE | P-arvo | CI | | R^2 |
|---------|---------|-------|--------|---------|---------|-------|
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 35,68 | 6,18 | 0,000 | 23,31 | 48,04 | 0,324 |
| koivu | -4,46 | 8,74 | 0,612 | -21,95 | 13,03 | |
| kuusi | 37,09 | 8,74 | 0,000 | 19,60 | 54,58 | |
| mänty | 0 | | | | | |
| vakio | 72,76 | 6,18 | 0,00 | 60,40 | 85,13 | |
| koivu | -41,55 | 8,74 | 0,00 | -59,04 | -24,05 | |
| mänty | -37,09 | 8,74 | 0,00 | -54,58 | -19,60 | |
| kuusi | 0 | | | | | |
| vakio | 31,22 | 6,18 | 0,000 | 18,85 | 43,59 | |
| kuusi | 41,55 | 8,74 | 0,000 | 24,05 | 59,04 | |
| mänty | 4,46 | 8,74 | 0,612 | -13,03 | 21,95 | |
| koivu | 0 | | | | | |
| Kaava 7 | B | SE | P-arvo | CI | | R^2 |
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 56,237 | 5,807 | 0 | 44,613 | 67,861 | 0,088 |
| tuore | -19,369 | 8,212 | 0,022 | -35,808 | -2,93 | |
| kuiva | 0 | | | | | |
| Kaava 9 | B | SE | P-arvo | CI | | R^2 |
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 62,024 | 5,357 | 0 | 51,3 | 72,748 | 0,223 |
| syvä | -30,944 | 7,577 | 0 | -46,11 | -15,778 | |
| matala | 0a | | | | | |

| Kaava 8 | B | SE | P-arvo | CI | | R ² |
|---------------|--------|--------|--------|---------|---------|----------------|
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 48,43 | 8,24 | 0,000 | 31,91 | 64,95 | 0,430 |
| koivu | -13,84 | 11,65 | 0,240 | -37,21 | 9,52 | |
| kuusi | 37,27 | 11,65 | 0,002 | 13,91 | 60,64 | |
| mänty | 0 | | | | | |
| tuore | -25,50 | 11,65 | 0,033 | -48,87 | -2,14 | |
| kuiva | 0 | | | | | |
| koivu*tuore | 18,77 | 16,48 | 0,260 | -14,27 | 51,81 | |
| koivu*kuiva | 0 | | | | | |
| kuusi*tuore | -0,37 | 16,48 | 0,982 | -33,41 | 32,68 | |
| kuusi*kuiva | 0 | | | | | |
| mänty*tuore | 0 | | | | | |
| mänty*kuiva | 0 | | | | | |
| vakio | 22,92 | 8,24 | 0,007 | 6,40 | 39,45 | |
| koivu | 4,93 | 11,65 | 0,674 | -18,44 | 28,29 | |
| kuusi | 36,91 | 11,65 | 0,003 | 13,54 | 60,27 | |
| mänty | 0 | | | | | |
| kuiva | 25,50 | 11,65 | 0,033 | 2,14 | 48,87 | |
| tuore | 0 | | | | | |
| koivu * kuiva | -18,77 | 16,48 | 0,260 | -51,81 | 14,27 | |
| koivu * tuore | 0 | | | | | |
| kuusi * kuiva | 0,37 | 16,48 | 0,982 | -32,68 | 33,41 | |
| kuusi * tuore | 0 | | | | | |
| mänty * kuiva | 0 | | | | | |
| mänty * tuore | 0 | | | | | |
| Kaava 8 | B | SE | P-arvo | CI | | |
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 48,43 | 7,292 | 0 | 33,11 | 63,75 | |
| mänty | 0 | | | | | |
| tuore | -25,50 | 10,313 | 0,024 | -47,17 | -3,84 | |
| kuiva | 0 | | | | | |
| mänty * tuore | 0 | | | | | |
| mänty * kuiva | 0 | | | | | |

| Kaava 8 | B | SE | P-arvo | CI | | R ² |
|---------------|--------|-------|--------|---------|---------|----------------|
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 85,70 | 8,24 | 0 | 69,18 | 102,22 | 0,430 |
| koivu | -51,11 | 11,65 | 0,000 | -74,48 | -27,75 | |
| mänty | -37,27 | 11,65 | 0,002 | -60,64 | -13,91 | |
| kuusi | 0 | | | | | |
| tuore | -25,87 | 11,65 | 0,031 | -49,23 | -2,50 | |
| kuiva | 0 | | | | | |
| koivu * tuore | 19,13 | 16,48 | 0,251 | -13,91 | 52,18 | |
| koivu * kuiva | 0 | | | | | |
| mänty * tuore | 0,37 | 16,48 | 0,982 | -32,68 | 33,41 | |
| mänty * kuiva | 0 | | | | | |
| kuusi * tuore | 0 | | | | | |
| kuusi * kuiva | 0 | | | | | |
| vakio | 59,83 | 8,24 | 0 | 43,31 | 76,35 | |
| koivu | -31,98 | 11,65 | 0,008 | -55,34 | -8,61 | |
| mänty | -36,91 | 11,65 | 0,003 | -60,27 | -13,54 | |
| kuusi | 0 | | | | | |
| kuiva | 25,87 | 11,65 | 0,031 | 2,50 | 49,23 | |
| tuore | 0 | | | | | |
| koivu * kuiva | -19,13 | 16,48 | 0,251 | -52,18 | 13,91 | |
| koivu * tuore | 0 | | | | | |
| mänty * kuiva | -0,37 | 16,48 | 0,982 | -33,41 | 32,68 | |
| mänty * tuore | 0 | | | | | |
| kuusi * kuiva | 0 | | | | | |
| kuusi * tuore | 0 | | | | | |
| Kaava 8 | B | SE | P-arvo | CI | | |
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 85,70 | 9,03 | 0 | 66,74 | 104,66 | |
| kuusi | 0 | | | | | |
| tuore | -25,87 | 12,77 | 0,058 | -52,69 | 0,95 | |
| kuiva | 0 | | | | | |
| kuusi * tuore | 0 | | | | | |
| kuusi * kuiva | 0 | | | | | |

| Kaava 8 | B | SE | P-arvo | CI | | R ² |
|---------------|--------|-------|--------|---------|---------|----------------|
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 34,59 | 8,24 | 0 | 18,06 | 51,11 | 0,430 |
| kuusi | 51,11 | 11,65 | 0 | 27,75 | 74,48 | |
| mänty | 13,84 | 11,65 | 0,240 | -9,52 | 37,21 | |
| koivu | 0 | | | | | |
| tuore | -6,74 | 11,65 | 0,566 | -30,10 | 16,63 | |
| kuiva | 0 | | | | | |
| kuusi * tuore | -19,13 | 16,48 | 0,251 | -52,18 | 13,91 | |
| kuusi * kuiva | 0 | | | | | |
| mänty * tuore | -18,77 | 16,48 | 0,260 | -51,81 | 14,27 | |
| mänty * kuiva | 0 | | | | | |
| koivu * tuore | 0 | | | | | |
| koivu * kuiva | 0 | | | | | |
| vakio | 27,85 | 8,24 | 0,001 | 11,33 | 44,37 | |
| kuusi | 31,98 | 11,65 | 0,008 | 8,61 | 55,34 | |
| mänty | -4,93 | 11,65 | 0,674 | -28,29 | 18,44 | |
| koivu | 0 | | | | | |
| kuiva | 6,74 | 11,65 | 0,566 | -16,63 | 30,10 | |
| tuore | 0 | | | | | |
| kuusi * kuiva | 19,13 | 16,48 | 0,251 | -13,91 | 52,18 | |
| kuusi * tuore | 0 | | | | | |
| mänty * kuiva | 18,77 | 16,48 | 0,260 | -14,27 | 51,81 | |
| mänty * tuore | 0 | | | | | |
| koivu * kuiva | 0 | | | | | |
| koivu * tuore | 0 | | | | | |
| Kaava 8 | B | SE | P-arvo | CI | | |
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 34,59 | 8,31 | 0,001 | 17,12 | 52,05 | |
| koivu | 0 | | | | | |
| tuore | -6,74 | 11,75 | 0,574 | -31,43 | 17,96 | |
| kuiva | 0 | | | | | |
| koivu * tuore | 0 | | | | | |
| koivu * kuiva | 0 | | | | | |

| Kaava 10 | B | SE | P-arvo | CI | | R ² |
|----------------|---------|--------|--------|---------|---------|----------------|
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 49,776 | 7,31 | 0,000 | 64,43 | 0,00 | 0,551 |
| koivu | -0,008 | 10,34 | 0,999 | 20,72 | 1,00 | |
| kuusi | 36,754 | 10,34 | 0,001 | 57,48 | 0,00 | |
| männi | 0 | | | | | |
| syvä | -28,200 | 10,34 | 0,009 | -7,48 | 0,01 | |
| matala | 0 | | | | | |
| koivu*syvä | -8,900 | 14,62 | 0,545 | 20,41 | 0,55 | |
| koivu*matala | 0 | | | | | |
| kuusi*syvä | 0,669 | 14,62 | 0,964 | 29,98 | 0,96 | |
| kuusi*matala | 0 | | | | | |
| männi*syvä | 0 | | | | | |
| männi*matala | 0 | | | | | |
| vakio | 21,575 | 7,309 | 0,005 | 6,92 | 36,23 | |
| koivu | -8,908 | 10,336 | 0,393 | -29,63 | 11,82 | |
| kuusi | 37,422 | 10,336 | 0,001 | 16,70 | 58,15 | |
| männi | 0 | | | | | |
| matala | 28,2 | 10,336 | 0,009 | 7,48 | 48,92 | |
| syvä | 0 | | | | | |
| koivu * matala | 8,9 | 14,618 | 0,545 | -20,41 | 38,21 | |
| koivu * syvä | 0 | | | | | |
| kuusi * matala | -0,669 | 14,618 | 0,964 | -29,98 | 28,64 | |
| kuusi * syvä | 0 | | | | | |
| männi * matala | 0 | | | | | |
| männi * syvä | 0 | | | | | |

| Kaava 10 | B | SE | P-arvo | CI | |
|----------------|--------|-------|--------|---------|---------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 49,776 | 7,011 | 0 | 35,05 | 64,51 |
| männi | 0 | | | | |
| syvä | -28,2 | 9,915 | 0,011 | -49,03 | -7,37 |
| matala | 0 | | | | |
| männi * syvä | 0 | | | | |
| männi * matala | 0 | | | | |

| Kaava 10 | B | SE | P-arvo | CI | | R ² |
|----------------|---------|--------|--------|---------|---------|----------------|
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 86,529 | 7,309 | 0 | 71,88 | 101,18 | 0,551 |
| koivu | -36,762 | 10,336 | 0,001 | -57,49 | -16,04 | |
| männi | -36,754 | 10,336 | 0,001 | -57,48 | -16,03 | |
| kuusi | 0 | | | | | |
| syvä | -27,532 | 10,336 | 0,01 | -48,25 | -6,81 | |
| matala | 0 | | | | | |
| koivu * syvä | -9,569 | 14,618 | 0,515 | -38,88 | 19,74 | |
| koivu * matala | 0 | | | | | |
| männi * syvä | -0,669 | 14,618 | 0,964 | -29,98 | 28,64 | |
| männi * matala | 0 | | | | | |
| kuusi * syvä | 0 | | | | | |
| kuusi * matala | 0 | | | | | |
| vakio | 58,998 | 7,309 | 0 | 44,34 | 73,65 | |
| koivu | -46,331 | 10,336 | 0 | -67,05 | -25,61 | |
| männi | -37,422 | 10,336 | 0,001 | -58,15 | -16,70 | |
| kuusi | 0a | | | | | |
| matala | 27,532 | 10,336 | 0,01 | 6,81 | 48,25 | |
| syvä | 0a | | | | | |
| koivu * matala | 9,569 | 14,618 | 0,515 | -19,74 | 38,88 | |
| koivu * syvä | 0 | | | | | |
| männi * matala | 0,669 | 14,618 | 0,964 | -28,64 | 29,98 | |
| männi * syvä | 0 | | | | | |
| kuusi * matala | 0 | | | | | |
| kuusi * syvä | 0 | | | | | |

| Kaava 10 | B | SE | P-arvo | CI | |
|----------------|---------|-------|--------|---------|---------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 86,529 | 8,888 | 0 | 67,86 | 105,20 |
| kuusi | 0 | | | | |
| syvä | -27,532 | 12,57 | 0,042 | -53,94 | -1,12 |
| matala | 0 | | | | |
| kuusi * syvä | 0 | | | | |
| kuusi * matala | 0 | | | | |

| Kaava 10 | B | SE | P-arvo | CI | | R ² |
|----------------|---------|--------|--------|---------|---------|----------------|
| | | | | alaraja | yläraja | |
| vakio | 49,768 | 7,309 | 0 | 35,11 | 64,42 | 0,551 |
| kuusi | 36,762 | 10,336 | 0,001 | 16,04 | 57,49 | |
| männi | 0,008 | 10,336 | 0,999 | -20,72 | 20,73 | |
| koivu | 0 | | | | | |
| syvä | -37,101 | 10,336 | 0,001 | -57,82 | -16,38 | |
| matala | 0 | | | | | |
| kuusi * syvä | 9,569 | 14,618 | 0,515 | -19,74 | 38,88 | |
| kuusi * matala | 0 | | | | | |
| männi * syvä | 8,9 | 14,618 | 0,545 | -20,41 | 38,21 | |
| männi * matala | 0 | | | | | |
| koivu * syvä | 0 | | | | | |
| koivu * matala | 0 | | | | | |
| vakio | 12,667 | 7,309 | 0,089 | -1,99 | 27,32 | |
| kuusi | 46,331 | 10,336 | 0 | 25,61 | 67,05 | |
| männi | 8,908 | 10,336 | 0,393 | -11,82 | 29,63 | |
| koivu | 0 | | | | | |
| matala | 37,101 | 10,336 | 0,001 | 16,38 | 57,82 | |
| syvä | 0 | | | | | |
| kuusi * matala | -9,569 | 14,618 | 0,515 | -38,88 | 19,74 | |
| kuusi * syvä | 0 | | | | | |
| männi * matala | -8,9 | 14,618 | 0,545 | -38,21 | 20,41 | |
| männi * syvä | 0 | | | | | |
| koivu * matala | 0 | | | | | |
| koivu * syvä | 0 | | | | | |

| Kaava 10 | B | SE | P-arvo | CI | |
|----------------|---------|-------|--------|---------|---------|
| | | | | alaraja | yläraja |
| vakio | 49,768 | 5,666 | 0 | 37,87 | 61,67 |
| koivu | 0 | | | | |
| syvä | -37,101 | 8,012 | 0,00 | -53,93 | -20,27 |
| matala | 0 | | | | |
| koivu * syvä | 0 | | | | |
| koivu * matala | 0 | | | | |