



UNIVERSITY OF
EASTERN FINLAND

*Luonnontieteiden ja metsätieteiden
tiedekunta
Faculty of Science and Forestry*

JATKUVAPEITTEINEN KASVATUS METSÄTALouden VESIENSUOJELUN
TYÖKALUNA REHEVILLÄ TURVEMAILLA

Joni-Matti Kusmin

METSÄTIETEEN PRO GRADU,
ERIKOISTUMISALA METSIEN HOITO JA METSÄEKOSYSTEEMIT

Kusmin, Joni-Matti. 2018. Jatkovapeitteinen kasvatusta metsätalouden vesiensuojelun työkaluna rehevillä turvemaidella. Itä-Suomen yliopisto, luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, metsätieteiden osasto. Metsätieteen pro gradu, erikoistumisala metsien hoito ja metsäekosysteemit. 56 s.

TIIVISTELMÄ

Suomalaisen metsätalouden tulevien vuosikymmenten hakkuumahdollisuuksista merkittävä osa on ojitettujen soiden eli turvekankaiden hakkuita. Tähän mennessä metsätalouden valtamenetelmänä käytettyyn jaksolliseen kasvatukseen liittyvät avohakkuut ja maanmuokkaus aiheuttavat kuitenkin turvemaiden metsätaloudessa riskin vesistöjen tilan heikkenemiseen. Jatkovapeitteistä kasvatusta, eli avohakkuiden ja maanmuokkauksen sijaan harvennushakkuihin ja luontaiseen uudistumiseen perustuvaa metsätaloutta on pidetty esillä mahdollisesti vesistöystävällisempänä menetelmänä turvemaidella. Tässä työssä tutkin vesistö päästöjen eroja jaksollisen ja jatkovapeitteisen kasvatuksen välillä mustikkaturvekangas II -tyypin metsässä 17 kuukautta kestäneellä ajanjaksolla hakkuiden jälkeen. Kolmelta koealalta, kontrolli-, harvennus- ja avohakkuualalta otettiin vesinäytteitä ja niiltä tulevaa valuntaa mallinnettiin tietokoneavusteisesti. Harvennus- ja avohakkuualan käsittelyjen aiheuttama kuormitus laskettiin vähentämällä siitä luonnollinen taustakuormitus eli käsittelemättä jätetyltä kontrollialalta tullut kuormitus. Avohakkuun ja siihen liittyneen maanmuokkauksen vesistö päästöt osoittautuivat erittäin suuriksi harvennushakkuuseen verrattuna, ja päästöt ylittivät aiempien tutkimusten perusteella tehdyt arviot. Avohakkuualan käsittelyn aiheuttama liuenneen eloperäisen hiilen (DOC) kuormitus oli noin 6,6-kertainen, typpi kuormitus 5,2-kertainen, fosforikuormitus 8,4-kertainen ja fosfaattikuormitus 16,5-kertainen taustakuormitukseen nähden. Harvennushakkuu lisäsi DOC-, typpi- ja fosfaattipäästöjä noin kolmasosalla taustakuormituksen määrästä, mutta ei lisännyt fosforin kokonaispäästöjä. Tulosten perusteella jatkovapeitteistä kasvatusta voidaan suositella rehevien mustikkaturvekankaiden puunkorjuun menetelmäksi, mikäli vesiensuojelu tahdotaan tehokkaasti huomioida metsätaloudessa.

Avainsanat: jatkovapeitteinen kasvatusta, mustikkaturvekangas, avohakkuu, ojitusta, ojitusmätästys, maanmuokkaus, humus, ravinne päästöt, DOC, typpi, fosfori, fosfaatti, metsätalouden vesiensuojelu

Kusmin, Joni-Matti. 2018. Continuous cover forestry as a tool for forestry water protection in nutrient rich, forestry-drained peatlands. University of Eastern Finland, Faculty of Science and Forestry, School of Forest Sciences. Master's thesis in Forest Science, specialization Forest Management and Ecosystems. 56 p.

ABSTRACT

A great percentage of the future harvest possibilities of the Finnish forestry sector lie within the forestry-drained peatlands. To this day, the main harvest method has been clear-cutting, combined with ditch clearance. This method, however, poses a threat to the condition of the water systems catching the runoff water from the harvested peatlands. Continuous cover forestry (CCF) has been suggested as a possible tool for mitigating the exports of harmful substances to the water systems. In this work, I studied the differences in exports of dissolved organic carbon (DOC), nitrogen and phosphorus, between a clear-cutting combined with ditch clearance and a selective cutting comparative to the practice of CCF, in a nutrient rich, forestry-drained peatland in southern Finland. Water samples were taken from three sites, i.e. a control, a selective cutting and a clear-cutting site, and the sites' runoffs were modelled via computer simulation for a period of 17 months after the cuttings. The exports caused by the different forestry methods were counted by reducing the exports from the control site from the total exports. The results showed the clear-cutting combined with ditch clearance to cause significantly greater exports than the selective cutting, releasing approximately 660 % more DOC, 520 % more nitrogen, 840 % more phosphorus and 1650 % more phosphate compared to the natural load from the control site. The selective cutting caused a rise of approximately 30 % in the exports of DOC, nitrogen and phosphate, and did not increase the export of total phosphorus. The results suggest CCF to be used as the forestry method in nutrient rich drained peatlands if water protection is to be taken seriously.

Keywords: continuous cover forestry, CCF, forestry-drained peatlands, clear-cutting, DOC, nitrogen, phosphorus, phosphate, forestry water protection

Alkusanat

Jo jonkin aikaa ennen tämän työn aloittamista, sopivaa graduaihetta pohtiessani, mielessäni käväisi, että voisi olla mielenkiintoista tutkia hakkuiden voimakkuuden vaikutusta niiden vesistö päästöihin. Olikin hieno sattuma, kun aloittaessani harjoittelun Ilmatieteen laitoksen hankkeessa Annalea kertoi hankkeen vesiin liittyvän datan olevan käsittelyn tarpeessa. Koeasetelma oli loistava ja päätös sen ja poronjäkälien kaasudynamiikan välillä oli lopulta helppo, vaikka jäkälistä kovasti pidänkin.

Toinen hieno sattuma oli, että samaan aikaan ojitettujen turvemaiden vesistö päästöt olivat nousseet varsin suureksi julkisen keskustelun aiheeksi. Tahdoin ehdottomasti opinnäytetyölle aiheen, jolla koin olevan merkitystä, koska itseni tuntien motivaatio pitkään tietokonetyöskentelyyn olisi muuten ollut hankala pitää kovin korkealla. Ja vaikka aikataulu venyi paljonkin suunnittelusta, ei aihe muuttunut missään vaiheessa kuivaksi pakkopullaksi, vaan sen pariin oli yllättävän helppo palata pitkien kirjoitustaukojen jälkeen. Nyt, yli kahden vuoden jälkeen aloittamisesta, gradu alkaa olla vihdoin kasassa, ja tunnelma on tätä kirjoittaessa korkealla.

Tahdon kiittää Annalea Lohilaa, ohjaajaani Ilmatieteen laitoksen puolelta, mahdollisuudesta tehdä opinnäyte hyvin mieluisasta aiheesta, tarvitsemani datan haalimisesta kasaan sekä asiantuntevista kommentteista. Pääohjaajalle Eeva-Stiina Tuittilalle kuuluu kiitos hymyilevästä ja kannustavasta ohjauksesta ja asiantuntemuksesta. Positiivisuutesi loi uskoa työn valmistumiseen ajallaan! Suuret kiitokset myös Luken Ari Laurénille, jonka ammattitaidon ja ohjauksen ansiosta työ lopulta eteni pikavauhtia loppuun. Kiitän myös Timo Penttilää, Mika Korkiakoskea ja Paavo Ojasta. Tämä on ollut kasvattava ja antoisa kokemus!

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO	6
1.1 Työn tausta.....	6
1.2 Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen kasvatuksen erot	7
1.3 Jatkuvapeitteinen kasvatus rehevillä turvekankailla	12
1.4 Turvemaiden metsätalouden ympäristö- ja sosiaaliset vaikutukset	13
1.5 Metsätalous ja vesistöt	16
1.6 Työn tavoitteet.....	20
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	21
2.1 Tutkimusalue.....	21
2.2 Kalibrointikausi-vertailualueen menetelmä	22
2.3 Tutkimusasetelma.....	23
2.4 Valunnan ja turpeen vedenpinnan syvyyden mittaukset	27
2.5 Valunnan mallintaminen SuSi-suosimulaattorilla	28
2.6 Vesinäytteet ja jatkuvatoiminen liuennuksen hiilen mittaus.....	30
2.7 Päästöjen laskenta	31
3. TULOKSET.....	33
3.1 Valunta	33
3.2 Vesistö päästöt ennen käsittelyä	34
3.2 Vesistö päästöt käsittelyjen jälkeen.....	35
4. TULOSTEN TARKASTELU	44
5. JOHTOPÄÄTÖKSET	49
Kirjallisuus.....	51

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Suomessa ojitettiin soita metsätalouden tarpeisiin 1920-luvulta lähtien aina 1990-luvulle saakka. Ojitusten tahti kiihtyi vuosisadan puolivälin jälkeen, ja oli kiihkeimmillään 1960-luvun lopulla. Nykyään ojitettuja soita on noin 4,7 miljoonaa hehtaaria (Ylitalo 2012). Tämä tarkoittaa, että yli puolet Suomen alkuperäisestä suopinta-alasta on otettu metsätalouden käyttöön. Ojitukset ovatkin vaikuttaneet voimakkaasti Suomen metsien puuntuotoskykyyn. Ojitettujen suometsien osuuden on ennakoitu kasvavan noin viidesosaan kaikista Suomen metsien hakkuumahdollisuuksista seuraavina kahtena vuosikymmenenä (Kaila & Ihalainen 2014).

Maassamme on maailmankin mittakaavassa paljon ojitetuilla turvemaidella kasvavia metsiä, ja ne ovat tärkeä kansallinen luonnonvara. Niiden hyödyntämiseen liittyy kuitenkin erityispiirteitä, jotka on otettava huomioon. Näitä ovat käytännön metsänhoitoon vaikuttavien seikkojen lisäksi metsätalouden toimenpiteiden muusta metsätalousmaasta poikkeavat vaikutukset luonnon monimuotoisuuteen, ilmastonmuutokseen sekä ympäristön laatuun. Tässä työssä tarkoitukseni on tarkastella kahden erilaisen nykyisin käytettävän metsätalousmallin, metsän jatkuvapeitteisen kasvatuksen ja jaksollisen kasvatuksen, eroja niiden vaikutuksissa valumaveden laatuun mustikkaturvekangas II -tyypin metsikössä.

Ilmatieteen laitoksen hankkeessa 'Runsasravinteisten suometsien ekosysteemipalveluiden parantaminen pohjaveden pintaa säätelemällä' (VESIKHK) tutkitaan runsasravinteisten turvemaiden metsien ja metsätalouden ympäristövaikutuksia. Yhteistyötahoja hankkeessa ovat Helsingin yliopisto sekä Luonnonvarakeskus. Tutkimusalueella, ojitetulla Tammelan Lettosuolla on toteutettu erilaisia hakkuutoimenpiteitä: jaksollisen kasvatuksen mallin mukainen avohakkuu, jossa poistettiin kaikki puusto ja tehtiin tyypilliset maanmuokkaustoimet, sekä jatkuvapeitteisen kasvatuksen lähtökohdaksi soveltuva osittaihakkuu, jossa poistettiin vain valtapuusto ja maaperä jätettiin muokkaamatta. Hakkuualojen lisäksi alueella on toimenpiteiden ulkopuolelle jätetty kontrollialue. Näiltä kolmelta alalta on usean vuoden ajan mitattu kasvihuonekaasujen sidontaa ja päästöjä, sää- ja vesioloja sekä otettu valumavesinäytteitä. Tutkimusasetelma tarjoaa hyvän lähtökohdan eri hakkuutapojen ympäristövaikutusten vertailuun.

1.2 Jaksollisen ja jatkuvapeitteisen kasvatuksen erot

Suomessa yleisin metsänkasvatuksen malli on 1950-luvulta lähtien ollut niin sanottu jaksollinen kasvatus. Kasvatusmallissa metsää pyritään kasvattamaan mahdollisimman tasaikäisinä, kunnes se kiertojakson lopuksi päätehakataan eli tehdään avo- tai siemenpuuhakkuu. Päätehakkuun yhteydessä maata usein muokataan voimakkaasti esimerkiksi mätästämällä uudistamisen helpottamiseksi ja tarvittaessa ojittamalla vesitalouden parantamiseksi. Avohakkuun jälkeen uusi taimisukupolvi joko istutetaan muokkausjälkeen kuten mättäisiin, kylvetään siemenistä, tai pyritään saamaan aikaan luontaisella uudistamisella jättämällä hakkuualalle myöhemmin poistettavia siemenpuita. Uudistamisen jälkeen jaksollisessa kasvatuksessa seuraa taimikonhoidon kausi, jossa taimikonperkauksissa poistetaan kilpailevaa heinikkoa, pensaita ja epätoivottuja taimia kasvatustaimien ympäriltä, sekä tehdään tarpeen mukaan taimien täydennysistutuksia. Nuoressa metsässä tehdään ensiharvennus latvusten typistymisen ja itseharvenemisen välttämiseksi. Ensiharvennuksen jälkeen seuraa useimmiten 1–2 harvennusta ennen kuin on taas päätehakkuun aika. Harvennuksia edeltää tyypillisesti alikasvoksen raivaus näkyvyyden parantamiseksi. Usein tasaikäisyyttä pyritään mallissa edistämään ennen päätehakkuuta alaharvennuksella, jossa valtapuustoa pienemmät puut poistetaan, etteivät ne kilpailisi suurempien puiden kanssa. Koko kierron pituus on yleensä noin 60–100 vuotta.

Jaksollisen kasvatuksen on pitkään väitetty jäljittelevän hyvin metsän luontaista sukkessiota eli uudistumiskiertoa, jossa metsä tuhoutuisi käytännössä kokonaan myrskyn tai metsäpalon seurauksena noin sadan vuoden välein tai jopa useammin. Näin tiheä palohistoria onkin ollut Suomessa monin paikoin tavallinen viime vuosisatoina, mutta käytännössä valtaosa paloista on saanut alkunsa ihmistoiminnan seurauksena, etenkin kaskikulttuurin aikana. Tällaista sukkessiomallia ei enää nykyään pidetä totuudenmukaisena, sillä luonnontilaisissa metsissä kaiken puuston tuhoavat häiriöt ovat harvinaisia (Rouvinen ym. 2002). Metsäpalojen väli voi esimerkiksi luonnontilaista muistuttavissa itäsuomalaisissa kuusimetsissä olla useita satoja vuosia, ja useimmat palot eivät tuhoa koko puustoa laajoilta alueilta (Hokkanen & Ieshko 1995). Suomessa luottamus jaksollisen kasvatuksen paremmuuteen muihin menetelmiin verrattuna oli mallin ekologisen perustan puutteista huolimatta pitkään niin suuri, että sen vaihtoehdot sallittiin käytännössä vasta vuoden 2014 metsälaissa (Finlex 1085/2013).

Koko jaksollisen kasvatuksen mallille on tyypillistä voimaperäinen ja paljon työtä vaativa metsän luontaisiin ekologisiin prosesseihin puuttuminen. Tässä mielessä jatkuvapeitteistä kasvatusta voi varsin osuvasti pitää jaksollisen kasvatuksen vastakohtana, sillä siinä kaikkia ylimääräisiä kustannuksia ja siten myös suurta työmäärää pyritään välttämään. Jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa on usein tavoitteena, että metsässä on jatkuvasti sopiva määrä eri-ikäisrakenteista puustoa niin, että metsän tuottavuus säilyy optimaalisena ja että uudistamisessa hyödynnetään luontaisesti syntyvää alikasvosta (Pukkala ym. 2011). Tällöin puhutaan jatkuvapeitteisen kasvatuksen yhdestä muodosta, eri-ikäismetsätaloudesta. Luontaisesti taimettuvalle eri-ikäisrakenteiselle metsälle on useimmiten tyypillistä sekapuustoisuus, kun lehtipuuston määrää ei pyritä jaksollisen kasvatuksen tapaan aktiivisesti vähentämään.

Pukkalan ym. (2011) mukaan eri-ikäismetsätaloudessa kannattavimpia hakkuita ovat sopivin väliajoin toistettavat yläharvennukset. Yläharvennuksissa poimitaan suurimmat ja arvokkaimmat puut, joiden arvokasvu on hidastunut alle tuottovaatimuksen. Näin parhaaseen arvokasvuunsa kiihtyville nuoremmille puille jää tilaa kehittyä seuraaviksi valtapuiksi, ja tilaa vapautuu myös taimettumiseen. Sopiva yläharvennusten väli on kasvupaikan viljavuudesta ja sijainnista riippuen noin 15 vuodesta 50 vuoteen (Pukkala ym. 2011). Eri-ikäismetsätalouden yläharvennusten lisäksi jatkuvapeitteisen kasvatuksen hakkuita voivat olla myös esimerkiksi hyvin pienialaisten aukkojen tai kaistaleiden hakkaaminen. Tässä työssä jatkuvapeitteisellä kasvatuksella tarkoitetaan eri-ikäismetsätaloutta.

Taloudellisesta näkökulmasta jaksollisessa ja jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa on huomattavia eroja niin metsänhoidon kulujen kuin puunmyyntitulojenkin suhteen. Jatkuvapeitteinen kasvatus yläharvennuksin toteutettuna tuottaa tasaisin väliajoin tasaisia määriä tuloja metsänhoitokulujen puuttuessa usein kokonaan. Jaksollinen kasvatus sen sijaan tuottaa kiertoajan alkuvaiheessa erilaisia menoja, tulojen realisoituessa viimeisen harvennuksen ja päätehakkuun yhteydessä. Jaksollisen kasvatuksen menojen sijoittuminen kierron alkuun ja tulojen kierron loppuun vähentää sen kannattavuutta jatkuvaan kasvatukseen verrattuna sitä enemmän mitä suurempi korkotuottovaatimus metsällä on (Pukkala ym. 2011). Pukkalan ym. (2011) mukaan jatkuvan kasvatuksen kannattavuutta suhteessa jaksolliseen kasvatukseen lisäävät myös puun alhainen hinta, huono kasvupaikka ja metsänhoidon kasvaneet kustannukset.

Tutkimukset ja erilaiset mallinnukset antavat vaihtelevan kuvan eri kasvatusmallien puuntuotoskyvystä ja taloudellisesta kannattavuudesta. Lähteen ym. (2001) mukaan jatkuvapeitteinen kasvatus voi rehevällä kasvupaikalla tuottaa enemmän puuta kuin jaksollinen kasvatus. Toisaalta esimerkiksi Pukkalan ym. (2009) tekemien mallinnusten mukaan jaksollinen kasvatus tuottaa rehevällä kasvupaikalla hieman enemmän puuta, mutta on silti taloudellisesti vähemmän kannattavaa kuin jatkuvapeitteinen kasvatus suurempien metsänhoitokulujen ja kiertoajan loppuun keskittyvien tulojen vuoksi. Puunkorjuun kulut ovat jatkuvapeitteisen kasvatuksen hakkuissa lähtökohtaisesti avohakkuuta korkeammat, koska korjuu täytyy suorittaa maaperä- ja puustovaurioita varoen ja puuta kertyy yhdeltä työmaalta vähemmän kuin avohakkuussa. Toisaalta myös jaksollisessa kasvatuksessa tehdään harvennushakkuita, ja mallien keskimääräiset hakkuukertymät eivät siksi eroa toisistaan yhtä paljon kuin yksittäisessä yläharvennuksessa ja avohakkuussa. Yläharvennuksessa korjattavan puuston suurempi keskimääräinen koko myös tasoittaa osaltaan korjuukustannuksia. Turvemaiden kohdalla mahdollinen kunnostusojituksen tarve hakkuun yhteydessä tulee huomioida kannattavuuslaskelmissa. Kunnostusojitus aiheuttaa huomattavia lisäkuluja vähentäen avohakkuun taloudellista kannattavuutta verrattuna siihen, että alueelle jätettäisiin riittävä määrä vettä sitovaa ja haihduttavaa puustoa.

Erilaisten kasvatusmallien tuottavuutta vertailtaessa olisi syytä ottaa lisäksi huomioon laskelmien teoreettinen luonne suhteessa todellisuuteen. Metsäkeskuksen alueellisten metsäohjelmien seurantatilastojen mukaan suuri osa jaksollisen kasvatuksen vaatimista hoitotoista jää tekemättä, minkä vuoksi jaksollinen kasvatus ei johda puuntuotannolliseen tai taloudelliseen teoreettiseen optimiinsa (Metsäkeskus 2017). Hoitotoita jää rästiin siitä huolimatta, että yhteiskunta tarjoaa niiden teettämiseen taloudellista tukea (Kestävän metsätalouden määräaikainen rahoituslaki 2015/593). Mikäli metsänomistajarakenteen muutos vähentää entisestään metsänhoidollisesti aktiivisten metsänomistajien osuutta, voi ilmiö voimistua tulevaisuudessa. Passiiviselle etämetsänomistajalle vähemmän työtä ja kuluja vaativa jatkuvapeitteinen kasvatustavoite voi näyttäytyä jaksollista kasvatusta houkuttelevampana.

Jatkuvapeitteisen kasvatuksen metsille usein ominaisilla sekapuustoaisuudella ja eri-ikäisrakenteisuudella voidaan vaikuttaa tiettyihin metsätalouteen liittyviin riskeihin. Useimmat metsäpuiden taudit ja tuholaiset ovat lajikohtaisia, mikä pienentää sekametsien tuhoriskiä. Jactel ym. (2017) toteavat sekametsien olevan monokulttuureja vastustuskykyisempiä niin pienten nisäkkäiden, maaperän kautta leviävien sienitautien kuin erikoistuneiden kasvinsyöjähyönteistenkin

aiheuttamia tuhoja vastaan. Tällä hetkellä kuusi on viljelypuuna suosittu kuusitukin ja -kuidun korkean hinnan ja mäntytaimikoiden hirvituhojen vuoksi, mutta tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen arvioidaan kaventavan kuusen elinmahdollisuuksia Etelä-Suomessa. Kuusi on herkkä tuulituhoille, jotka voivat lämpenevässä ilmastossa lisätä arvaamattomasti myös hyönteistuhoja. Etenkin kirjanpainajaa pidetään ilmastonmuutoksen myötä merkittävänä uhkana kuusen kasvatukselle. Valkosen (2017) mukaan erirakenteisina kasvatettavissa metsissä kirjanpainajatuhojen riski on pienempi kuin tasaikäisinä kasvatettavissa metsissä, joissa tehdään avohakkuita. Lehtipuusekoituksen ja yläharvennuksiin perustuvan jatkuvapeitteisen kasvatuksen on havaittu suojaavan metsää tuulituhoilta alaharvennettuihin jaksollisen kasvatuksen metsiin verrattuna (Pukkala ym. 2016). Jactelin ym. (2017) mukaan lehtipuusekoitus tekee havupuuvaltaisista metsistä kestävämpiä niin tuulituhoja kuin metsäpalojakin vastaan. Metsäluonnon monimuotoisuus itsessäänkin voidaan ajatella riskien hallinnan kannalta tavoiteltavaksi piirteeksi, sillä monimuotoisuuden väheneminen voi vähentää metsien vastustuskykyä sään ääri-ilmiöitä, tuholaisia, taudinaiheuttajia, vieraslajeja ja muita häiriöitä vastaan (Eckhardt ym. 2017).

Kun metsätaloudessa halutaan ottaa puuntuotannon kannattavuuden ja riskien lisäksi huomioon muita arvoja, joita voivat olla esimerkiksi hiilensidonta, virkistyskäyttö, maisema, metsälajien elinympäristön säilyttäminen tai ei-puuaineiset tuotteet kuten marjat ja sienet, kasvaa jatkuvapeitteisen kasvatuksen käyttökelpoisuus entisestään. Esimerkiksi Assmuth ym. (2018) toteavat hiilensidontahyötyjen arvottamisen lisäävän jatkuvapeitteisen kasvatuksen kannattavuutta suhteessa jaksolliseen kasvatukseen. Hiukan yleistäen voidaan sanoa jatkuvapeitteisen kasvatuksen metsien kehittyvän monilajisiksi eri-ikäisrakenteisiksi sekametsiksi, ja jaksollisen kasvatuksen tähtäävän tasaikäisrakenteisiin metsiin, joissa lehtisekapuuston määrää saatetaan pyrkiä karsimaan. Boreaalisten metsien sukkessio tuottaa luonnontilassa kasvupaikasta, ilmasto-oloista ja häiriöistä riippuen rakenteeltaan ja puulajisuhteiltaan monen tyyppisiä metsiä (Shorohova ym. 2009), ja Suomen oloissa luontaisesti kehittyneet tasaikäiset, yhden puulajin metsät ovat äärimmäisen harvinaisia (Ilvessalo 1937). Jatkuvapeitteisen kasvatuksen metsät voivat siten olla monimuotoisiin metsiin sopeutuneelle metsälajistolle paremmin sopivaa elinympäristöä kuin tasaikäiset viljelymetsät, joista puuttuu suojaavaa monikerroksisuutta ja peitteisyyttä sekä ravinnonsaannin kannalta tärkeää lehtipuustoa.

Jaksollisessa kasvatuksessa viimeistään avohakkuu vie elinmahdollisuudet monilta peitteisyyttä vaativilta metsälajeilta ja pirstoo niiden esiintymisalueita osiin. Hannerz & Hånell (1997) havaitsivat rehevällä turvekankaalla suoritettavan suojuspuuhakkuun, jossa metsään jätetään isoja puita suojaamaan alikasvosta epäsuotuisilta sääoloilta, säilyttävän hyvin myöhäisen sukkessiovaiheen kasvilajistoa avohakkuuseen verrattuna. Esimerkiksi sekä taloudellisesti että ekologisesti erittäin tärkeä kasvi, mustikka, häviää avohakkuun seurauksena lähes kokonaan. Mustikan peittävyys Suomessa onkin voimaperäisen, avohakkuihin perustuvan metsätalouden kaudella vähentynyt alle puoleen alkuperäisestä (Salemaa 2000), mikä on voinut vaikuttaa esimerkiksi tärkeiden riistalintujen, metsäkanalintujen, populaatioiden pienenemiseen.

Voimakkuudeltaan sopiva harvennushakkuu voi sen sijaan lisätä mustikan satoa valon määrän lisääntyessä (Turtiainen 2015). Turvemailla avohakkuiden välttäminen saattaa poistaa tarpeen kunnostusojitukselle (Sarkkola ym. 2010, 2012), mikä voi sopivien kosteusolojen myötä parantaa hyönteisravinnon saatavuutta metson ja muiden kanalintujen poikueille (Miettinen 2010), sen lisäksi, että lintupoikueita pedoilta suojaava peitteisyys säilyy. Sienirihmastot, jotka elävät symbioosissa puiden kanssa, saattavat kärsiä avohakkuista ja maanmuokkauksesta. Valtaosa kaupallisesti merkittävistä sienilajeista on tällaisia metsäpuiden symbiontteja. Marjat, sienet ja riistaeläimet ovat tärkeitä niin luonnon monimuotoisuudelle kuin virkistyskäytölle, joiden parempaa huomioimista metsiä koskevassa päätöksenteossa toivoo suuri osa kansalaisista (Valkeapää ym. 2009).

Metsälajien uhanalaistumiskehitys ei ole seurausta vain sopivien elinympäristöjen häviämisestä, vaan myös elinympäristöjen pirstaloitumisesta eli kytkeytyneisyyden vähenemisestä (Hanski 2015). Jatkuvapeitteisen kasvatuksen metsät voivat soveltua hakkuuaukkoja ja taimikoita paremmin paitsi elinympäristöksi, myös lajien kulkuväylyksi sopivien elinympäristöjen välillä, sillä niistä puuttuvat kokonaan laajat avoimet alueet, joita moni metsäympäristöön sopeutunut laji välttelee. Vaikka useat lajit voivatkin hyötyä avohakkuiden välttämisestä metsätaloudessa, ei jatkuvapeitteinen kasvatus ole yleisratkaisu kaiken monimuotoisuuden turvaamiseen, eikä etenään kaikkein uhanalaisimpien, usein kuolleesta puusta tai myöhäisen sukkessiovaiheen pienilmastosta riippuvaisten, metsälajien suojeluun. Lahopuulajiston elinoloja voidaan säilyttää ja parantaa vain huolehtimalla, että metsään jätetään riittävä määrä vaihtelevan kokoista puustoa, myös riittävästi suuria puita. Vanhoja, sulkeutuneita metsiä vaativien lajien säilyttämiseksi tarvitaan riittävän laajoja, myöhäisten sukkessiovaiheiden metsäalueita.

1.3 Jatkuvapeitteinen kasvatus rehevillä turvekankailla

Pääpiirteittäin reheviä turvekankaita voidaan pitää jatkuvapeitteiseen kasvatukseen hyvin soveltuvina. Turvekankaat ovat usein kehittyneet ojituksen jälkeen monikerroksisiksi sekametsiksi, joiden puusto on valmiiksi eri-ikäisrakenteista. Ruohoisesta sararämeestä kehittyneessä mtkg-II -metsässä valta- tai ylispuuna on ennen ensimmäistä hakkuuta mänty, koska männyt ovat kasvaneet rämeen mätäspinoilla jo luonnontilaisella suolla. Mäntyjen hakkuun jälkeen valtapuuksi nousee kuusi, jota kasvaa metsässä eri-ikäisenä monessa kerroksessa. Myös hieskoivua on yleensä merkittävä määrä, ja metsikköä kannattaakin pyrkiä kasvattamaan ensimmäisestä hakkuusta eteenpäin kuusivaltaisena sekametsänä. Useissa tutkimuksissa on havaittu lehtipuusekoituksen parantavan havupuuviltaisten metsien tilavuuskasvua (Frivold 1982, Agestam 1985, Pukkala ym. 2013) ja havupuusekametsien olevan yhden lajin havupuumetsiä nopeampikasvuisia (Agestam 1985, Linden & Agestam 2003). Myös monimuotoisuuden, maiseman tai riistan huomioimiseksi voi olla syytä säästää ensimmäisessä hakkuussa osa männyistä sekä harvinaisemmat puulajit. Mänty on erityisen tärkeä laji esimerkiksi metsolle (Miettinen 2010), jonka ruokailupuuna löytyi tämänkin tutkimuksen kontrollialalta. Mäntypuuston jatkumoon pyrkiminen voi olla järkevää myös kuusenkasvatuksen epävarmojen tulevaisuudennäkymien vuoksi etenkin Etelä-Suomessa.

Jatkuvapeitteiseen kasvatukseen mustikkaturvekankailla liittyy riskejä tuulituhojen suhteen, mikäli harvennushakkuu on hyvin voimakas. Kuusi on suuren latvustonsa ja pinnallisen juuristonsa vuoksi herkkä tuulituhoilta, eikä turvemaa ole kasvualustana yhtä hyvin juuristoa tukeva kuin kivennäismaa. Tuulituhoriskin vuoksi harvennuksen voimakkuuteen tulee kiinnittää erityistä huomiota ja ajourien sijoittelussa kannattaa välttää pitkien, suorien aukeiden syntymistä metsään. Pukkalan ym. (2016) mukaan lehtipuusekoitus ja metsän monikerroksisuus suojaavat kuusia tuulituhoilta. Mustikkaturvekankaiden hakkuissa voikin olla kannattavaa säästää hieskoivuja sekä mäntyjä varsinkin paikoille, joihin muuten jäisi vain harvassa kasvavia, tuulelta suojattomia kuusia.

Eri-ikäisrakenteisen kasvatuksen onnistumiseksi metsikössä täytyy tapahtua riittävästi luontaista taimettumista. Päiväsen (1990) mukaan luontaisen uudistamisen edellytykset säilyvät

hyvin ruoho- ja mustikkaturvekankailla, vaikka ne voivatkin näitä tyyppisiä karummilla turvekankailla ajan mittaan heikentyä. Taimettuminen on turvemaiden voimakkainta ojituksen jälkeisinä vuosikymmeninä, kun olosuhteiltaan taimille otollista rahkasammalpintaa on jäljellä runsaasti, mutta vähenee kenttäkerroksen lajiston muutoksen edetessä kohti kivennäismaiden metsälajistoa. Tarvittaessa pienimuotoisella maanmuokkauksella voidaan pyrkiä edistämään luontaista taimettumista. Moilasen ym. (2011) tutkimuksessa avo- ja suojuspuuasentoon hakeutuneiden mustikkaturvekankaiden havaittiin uudistuvan luontaisesti niin hyvin, että muokkaus- ja viljelytoimet olivat tutkituilla kohteilla tarpeettomia. Kuusentaimien selviytymisen kannalta eri-ikäisrakenteinen kasvatusta on todennäköisesti hyvä menetelmä, sillä siinä jätettävä vanhempi puusto suojaa taimia lämpötilan ja sään vaihteluilta, samaan tapaan kuin suojuspuuhakkuussa. Rehevillä turvekankailla avohakkuualalle istutettujen taimien kuolleisuus voi olla suurta hallan, kilpailevan kasvillisuuden, tulvimisen ja hyönteistuhojen seurauksena (Hannerz & Hånell 1997).

Turvemaiden metsätaloudessa onkin hyvä kiinnittää aina huomiota mahdollisiin ravinnepuutoksiin. Etenkin kaliumin puutostila voi rajoittaa mustikkaturvekankaiden puuston kasvua, minkä vuoksi lannoitus saattaa olla tarpeen (Moilanen ym. 2011). Juuri puolukka- ja mustikkaturvekankaiden II-tyypit ovat ravinnepuutoksille ja puuston kasvutappioille erityisen alttiita, koska ne ovat syntyneet avoimista suotyypeistä. Lannoitteena voi olla syytä suosia puutuhkaa, sillä se lisää fosforin huuhtoutumista vain vähän verrattuna kaupallisiin PK-lannoitteisiin (Silferberg 1998).

1.4 Turvemaiden metsätalouden ympäristö- ja sosiaaliset vaikutukset

Suomalaisia metsiä on käsitelty avohakkuin jo vuosikymmenten ajan. Jaksollisen kasvatuksen ja sen vaihtoehtojen ympäristövaikutuksista ei kuitenkaan ole tutkittuun tietoon perustuvaa, kattavaa kokonaiskuvaa Suomen oloista. Nyt Suomessa ollaan tietyllä tapaa uuden tilanteen edessä. Suuri osa 1960-luvun ojitusten huippuvuosina kuivatetuista turvemaiden metsistä on tullut tai on tulossa lähiaikoina hakkuukypsään ikään. Turvemaiden metsätalouden toimenpiteiden ympäristövaikutukset eroavat olennaisesti kivennäismaista, ja tämä on otettava huomioon, jotta turvemaiden hakkuut voivat olla kestäväällä pohjalla. Osansa kestävyys haaste-

seen tuovat biotalouskeskustelun myötä kasvaneet paineet ja julkilausutut tavoitteet hakkuiden voimakkaaseen lisäämiseen lähitulevaisuudessa. Vahva poliittinen tahto hakkuumäärien kasvattamiseen ja riittämätön tutkimustieto ja tiedon huomioiminen turvemaiden metsätalouden ympäristövaikutuksista ovat riskialtis yhdistelmä.

Turvemaiden metsätalouden ympäristövaikutuksista globaalilla tasolla merkittävin on sen vaikutus kasvihuonekaasutaseeseen. Tähän mennessä ojitettujen soiden on arveltu toimineen hiilinieluna puuston lisääntyneen kasvun kiihdyttämän hiilidioksidin sidonnan vuoksi. Kuivataminen on kuitenkin käynnistänyt turpeeseen sitoutuneen hiilen vuon takaisin ilmakehään, mikä muuttaa ainakin rehevät turvemaat lopulta hiilen nettolähteiksi (Ojanen ym. 2012). Muutoksen aikatauluun ja intensiteettiin voidaan kuitenkin yrittää vaikuttaa metsänhoidon keinoin. Mahdollinen ratkaisu ojitettujen turvemaiden ilmastopäästöihin voisi olla pyrkiä sekä ylläpitämään tehokasta puuston hiilinielua että minimoimaan turpeen hajotuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt pitämällä pohjaveden pinta sopivalla korkeudella. Tarvitaan lisätutkimusta eri ravinteisuusasteisilta turvemailta, voidaanko avohakkuita lievemmillä harvennushakkuilla saavuttaa tällainen ilmaston kannalta optimaalinen tilanne, ja millainen vaihtoehto se on esimerkiksi ennallistamistoimille. Metsätalouden ilmastoystävällisyyteen vaikuttaa aina erittäin paljon myös tuotetun puun käyttökohde. Pitkään hiiltä varastoivat tuotteet tai esimerkiksi maatalousmaahan säilöttävä biohiili ovat ilmaston kannalta paras ratkaisu (Ojanen ym. 2012).

Ojitusten aiheuttama laajamittainen elinympäristöjen muutos on heikentänyt suurinta osaa soiden luontotyypeistä ja vaikuttanut suuresti suolajiston elinmahdollisuuksiin erityisesti eteläisessä Suomessa. Ojitusten lisäksi puustoisten suotyyppien laatua ovat heikentäneet muut metsätaloustoimenpiteet. Vuoden 2018 luontotyyppien uhanalaisuusarvioinnissa (Kaakinen ym. 2018) kaikista suotyyypeistä katsottiin koko maan tasolla uhanalaisiksi (VU, EN, CR) 54 ja silmälläpidettäväksi (NT) 20 prosenttia. Etelä-Suomessa suotyypeistä arvioitiin uhanalaisiksi peräti 83 ja silmälläpidettäväksi 2 prosenttia. Uhanalaistumiskehitys ei ole toistaiseksi taittumassa, sillä 76 prosenttia arvioiduista suotyyypeistä katsottiin kehityssuunnaltaan edelleen heikkeneviksi koko maan tasolla, ja Etelä-Suomessa heikkenevien suotyyppien osuus oli 83 prosenttia (Kaakinen ym. 2018).

Luonnontilaisten soiden harvinaistumisen arvellaan olleen merkittävä syy muun muassa riekon häviämiseen maan eteläosista. Suot, suometsät ja vaihettumisvyöhykkeet ovat tärkeää

elinympäristöä myös monille metsälajeille, kuten kanalinnuille, jotka käyttävät niitä etenkin poikueiden ruokailuympäristöinä runsaan hyönteismäärän vuoksi. Ojat saattavat paitsi vaikuttaa ravinnon saatavuuteen, myös muodostaa liikkumisesteitä ja nostaa lintujen poikaskuolleisuutta poikasten kastuessa ojissa ja paleltuessa kylminä alkukesän öinä.

Paljon ojituksia tehtiin aikanaan julkisen rahoituksen tuella ja paremman tiedon puutteessa soille, joilta ei ole koskaan odotettavissa juurikaan taloudellista tuottoa. Tällaiset, usein karut, kohteet suositellaankin nykyisin jätettävän viimeistään ensimmäisen päätehakkuun jälkeen ennallistumaan, eli kehittymään kohti luonnontilaa. Suurelle osalle kohteista ei ole syntynyt taloudellisesti arvokasta puustoa lainkaan. Tarvittaessa ennallistamiseen voidaan pyrkiä myös aktiivisesti erilaisten toimenpiteiden avulla, mutta vesistöjen suojelemiseksi on valumavesien hallintaan silloin kiinnitettävä erityisen tarkasti huomiota. Metsätalouden ulkopuolelle arvioidaan jäävän tulevaisuudessa noin miljoona hehtaaria suometsää (MMM 2011) eli yli viidennes ojitusalasta.

Turvemaiden metsätalouden aiheuttamat vesistöhaitat ovat riskitekijä ympäristön lisäksi sosiaalisen kestävyysnäkökulmasta. Turvetuotanto on aiheuttanut voimakasta paikallista vastustusta lähinnä sen järville aiheuttaman kuormituksen takia. Metsätalous on jo tällä hetkellä turvetuotantoa suurempi vesistökuormituksen aiheuttaja, ja mikäli turvemaiden metsätaloudesta on odotettavissa selkeästi havaittavissa olevia muutoksia vesistöjen vedenlaatuun tai rehevyyteen, voi se aiheuttaa yhteiskunnallisia konflikteja. Uusi tutkimustieto on osoittanut, että turvemaiden vesistö päästöt ovat huomattavasti suuremmat kuin tähän asti on arvioitu. Vastoin entisiä oletuksia, vanhojen ojitusten aiheuttama ravinnekuormitus ei vähene tasaisesti ajan myötä, vaan päinvastoin kääntyy muutaman vuosikymmenen kuluttua kasvuun (Niemi-
nen ym. 2017).

Ojitusalueiden valmiiksi suuret vesistö päästöt korostavat vesiensuojelun merkitystä tulevien metsätalouden toimenpiteiden yhteydessä. Huomionarvoista on, että avohakkuut ovat kansalaisten keskuudessa valmiiksi varsin epäsuosittuja. Valkeapään ym. (2009) mukaan 69 % suomalaisista ei hyväksy avohakkuita. Turvemaiden avohakkuiden mahdolliset epätoivotut seuraukset voivat vaikuttaa metsätalouden maineeseen ja hyväksyttävyyteen kansalaisten keskuudessa.

1.5 Metsätalous ja vesistöt

Suomen vesistöt ovat varsinkin soiden suuren lukumäärän vuoksi luontaisesti hyvin humuspitoisia, eli veteen on liuennut paljon eloperäistä ainetta, josta noin puolet on hiiltä (Palviainen & Finér 2013). Korkea humuspitoisuus tekee veden sävyltään ruskeaksi. Lisääntyneen humuskuormituksen lisäksi metsätalouden toimenpiteet aiheuttavat huomattavaa kiintoainekuormitusta sekä vähäisemmässä määrin liuenneiden ravinteiden kuormitusta, joista tärkeimpiä ovat fosforin ja typen yhdisteiden päästöt. Metsätalouden toimenpiteiden merkitys kuormituksen aiheuttajana on suuri erityisesti latvavesistöissä, joissa muun kuormituksen merkitys on pieni (Ahtiainen & Huttunen 1999, Finér ym. 2010).

Kiintoaine on määritelty veden mukana kulkeutuvaksi kiinteäksi aineeksi, jonka raekoko on suurempi kuin $0,45\ \mu\text{m}$ (Kukkonen 2012). Turvemailta valuva kiintoaine kuormittaa vesistöjä, koska siitä suurin osa on eloperäistä ainetta (Joensuu 2002). Kiintoaine voi myös sisältää merkittävän määrän ravinteita pintoihinsa pidäytyneenä tai rakenteellisena osana (Palviainen & Finér 2013). Kiintoaineen sisältämät eloperäiset aineet ja ravinteet kiihdyttävät vesistöjen biomassan kasvua kuluttaen vedestä happea ja hajoavat pienemmiksi humusaineiksi samenttaen veden väriä.

Kiintoainekuormitusta metsäojista vesistöihin voidaan vähentää yksinkertaisin vesitaloudellisin järjestelyin, joilla veden virtausta hidastetaan ja liikkeelle lähtenyt kiintoainetta pidätetään. Nämä menetelmät pitävät sisällään ojien kaivukatkot, putki- ja pohjapadot, lietekuopat, laskeutusaltaat ja pintavalutuskentät (Palviainen & Finér 2013). Näistä varsinkin pintavalutuskentät on havaittu tehokkaiksi kiintoaineen pidättäjiksi (Finér ym. 2010). Pintavalutuskenttien käyttö ei kuitenkaan ole ongelmatonta, sillä niiden on toimiakseen oltava riittävän suuria (Palviainen & Finér 2013), mihin ei monilla kohteilla ole mahdollisuuksia. Pintavalutuskentät saattavat myös vapauttaa eloperäistä hiiltä (Nieminen ym. 2005) eikä niiden fosforinpidätyskyky säily välttämättä hyvänä, kun orgaanista ainetta huuhtoutuu niille paljon (Palviainen & Finér 2013).

Siitä, miten hyvin vesiensuojelu metsätaloustoimenpiteiden yhteydessä yleisesti toteutuu, ei ole varmuutta. Esimerkiksi Finér ym. (2010) huomauttavat valtakunnallista metsätalouden

kiintoainekuormitusta koskevissa laskelmissaan, että mikäli vesiensuojelun parhaista mahdollisista käytännöistä ei aina huolehdita metsätaloustoimenpiteiden yhteydessä, niiden aiheuttamaa kiintoainekuormitusta aliarvioidaan. Onkin todennäköistä, että vesiensuojelu ei todellisuudessa aina onnistu parhaalla mahdollisella tavalla.

Kiintoainekuormitus on tärkein metsätalouden vesistökuormituksen osite, ja valtaosa siitä aiheutuu turvemaiden kunnostusojituksista. Tosin uudistushakkuiden ja maanmuokkauksen vaikutusta kiintoainekuormaan ei ole juuri tutkittu (Finér ym. 2010). Turvemaiden kunnostusojitusten aiheuttaman kiintoainekuormituksen suuruus voi olla Finerin ym. (2010) laskelmien mukaan peräti 93 % suhteessa taustakuormaan eli kuormitukseen, joka ei johdu suoraan ihmistoiminnasta. Kiintoainekuormitus on suurimmillaan kahden ensimmäisen vuoden ajan ojituksen jälkeen (Ahtiainen & Huttunen 1999, Joensuu ym. 2006), mutta voi säilyä korkealla tasolla useiden vuosien ajan (Palviainen & Finér 2013).

Kiintoainekuormituksen lisäksi metsätaloudessa on syytä kiinnittää huomiota humuksen sekä ravinteiden päästöjen hallintaan. Humus- ja ravinnekuormitukseen on hankalampi vaikuttaa vesitaloutta muokkaamalla kuin veden mukana kulkeutuvan kiintoaineen määrään. Sisävesistöjen vesiensuojelun kannalta tärkein ravinne on fosfori, koska se on usein sisävesien ekosysteemien minimiravinne, eli sen saatavuus säätelee ensisijaisesti biomassan tuotantoa ja siten rehevöitymistä. Itämeressä minimiravinne on puolestaan typpi. Finérin ym. (2010) mukaan turvemaiden kunnostusojitukset ovat myös fosforikuormituksen suhteen merkittävin metsätalouden toimenpide, osuudeltaan yli puolet koko kuormasta. Ravinne- ja humuspäästöjen kiihdyttämä vesistöjen rehevöityminen ja umpeenkasvu on ehkä helpoiten havaittavissa olevia maankäytön vesistövaikutuksia, jolla on merkittäviä vaikutuksia niin vesistöjen ekologiaan kuin virkistyskäyttömahdollisuuksiinkin.

Kunnostusojitusten aikaansaama voimakas lisäys kiintoaine- ja fosforikuormituksessa voi huomattavasti vähentää ojitustarpeen aiheuttavien hakkuiden mielekkyyttä vesiensuojelun näkökulmasta. Varsinkin kun otetaan huomioon, että maa- ja metsätalousministeriön työryhmä arvioi kunnostusojituksia tarvittavan jopa kolmasosalle Suomen ojitusalueista (MMM 2011), ovat niiden potentiaaliset vesistöhaitat suuria. Kunnostusojituksen tarve on todennäköisempää avohakattavilla alueilla kuin harvennushakattavilla, koska pohjaveden pinta nousee avo-

hakkuun seurauksena enemmän. Jättämällä hakkuualueelle riittävästi puustoa kunnostusojituksen tarve voidaan mahdollisesti välttää, koska puut ylläpitävät kuivatukseen riittävää haihdutusta (Sarkkola ym. 2010, 2012). Kuivatukseen riittäväksi puuston tilavuudeksi Suomessa on arvioitu metsikön maantieteellisestä sijainnista riippuen noin 120–150 m³ (Sarkkola ym. 2010, 2012) siten, että tarvittava puuston tilavuus on suurempi pohjoisessa kuin etelässä.

Kiintoaineen, typen ja fosforin päästöt ovat saaneet tähän mennessä metsätalouden vesistökuormitusta tutkittaessa enemmän huomiota kuin humuspäästöt, mutta humuksessa veden mukana karkaavan hiilen merkitystä on alettu tutkia viime aikoina yhä enemmän. Tutkimus keskittyy usein liuenneeseen eloperäiseen hiileen (dissolved organic carbon, DOC) ja eloperäisen hiilen kokonaismäärään (total organic carbon, TOC). Humus ja DOC liittyvät toisiinsa siten, että noin puolet humuksesta on liuennutta orgaanista hiiltä. DOC-pitoisuus onkin veden humuspitoisuutta parhaiten kuvaava tunnus (Palviainen & Finér 2013). Hiilen lisäksi humus sisältää paljon happea, muutamia prosentteja vetyä, typpeä ja mahdollisesti myös muita aineita, kuten fosforia, rikkiä, rautaa ja alumiinia (Palviainen & Finér 2013).

Suomalaiset järvet ovat tyypillisesti ruskeavetisiä ja yli puolet niistä luokitellaankin humuspitoisiksi, mikä on maailman mittakaavassa korkeimpia lukuja (Kortelainen 1999). Luonnostaan korkean humuksen taustakuormituksen vuoksi tällaiset vesistöt sietävät huonosti humuksen lisäkuormitusta (Tulonen 2004). Erityisen herkkiä humuspitoisuuden muutoksille ovat pienet ja matalat järvet. Humuksen määrän lisääntyminen voi muuttaa huomattavasti vesistöjen ekologisia ominaisuuksia, koska humus vaikuttaa valon ja hapen määrään, rehevöitymiseen, ravinteiden saatavuuteen, happamuuteen, myrkyllisten aineiden kulkeutumiseen ja eliöyhteisöjen rakenteeseen.

Humuskuormituksen aikaansaama veden tummeneminen vähentää fotosynteesiin saatavilla olevan valon määrää rajoittaen alempien vesikerrosten perustuotantoa ja sen myötä muuttaen kasvi- ja eläinplanktoniyhteisöjen rakennetta ja syvyysjakaumaa (Arvola ym. 1992, Williamson ym. 1999). Veden värin tummeneminen aiheuttaa myös pintaveden lämpenemistä lisäten lämpötilakerrostuneisuutta, jolloin veden kierto vähenee ja alusvedessä voi ilmetä happivajetta (Sutela ym. 2007) ja pintavedessä ravinnevajetta (Salonen ym. 1984). Eloperäisen aineksen hajoaminen mikrobittominnan seurauksena kuluttaa vedestä happea, jolloin etenkin vesistöt, joissa vesi vaihtuu hitaasti, ovat vaarassa kärsiä hapenpuutteesta (Palviainen & Finér 2013).

Veden eloperäisen hiilen pitoisuuden ja kemiallisen hapenkulutuksen välillä onkin voimakas korrelaatio (Kortelainen 1993). Ravinnepitoisuuden kasvaminen voi entisestään voimistaa bakteerien hajotustoimintaa (Palviainen & Finér 2013) ja siten myös hapenkulutusta. Samalla rehevöityminen voi lisääntyä ravinteiden kiihdyttäessä kasvibiomassan kasvua. Koska humus sisältää huomattavasti enemmän orgaanisia happoja kuin neutraaleja ja emäksisiä komponentteja, humuspitoiset vesistöt ovat happamampia ja herkempiä happamoitumiselle kuin kirkkaat vesistöt (Palviainen & Finér 2013).

Paikallisesti merkityksellinen humuskuormituksen ympäristöhaitta voi olla, että se lisää vesistöjen elohopean määrää, koska elohopeasta suurin osa päätyy vesistöihin sitoutuneena humukseen (Bishop ym. 2009). Myös elohopean rikastuminen on humuspitoisten vesistöjen ekosysteemeissä tehokkaampaa kuin kirkkaassa vedessä, minkä vuoksi humuspitoisista järvistä pyydytyssä kalassa voi esiintyä korkeita määriä elohopeaa (Rask ym. 1999). Elohopea on myrkyllistä ihmiselle ja paikoin humuspitoisten järvien petokalojen syöminen voi olla riskitekijä etenkin raskaana oleville, lapsille ja kalaa paljon ravinnokseen käyttäville (Hirvonen 2016).

Veden TOC- ja DOC-pitoisuuksien on havaittu olevan kasvussa pienissä suomalaisissa metsäjärvissä myös ilman varsinaista ihmistoimintaa valuma-alueella (Vuorenmaa ym. 2006). Vesistöjen eloperäisen hiilen pitoisuuksien kasvu on Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa yleisesti havainnoinnissa, jonka syitä ei täysin tunneta (Nieminen ym. 2015). Ainakin ilmastonmuutoksen on ennustettu lisäävän humuskuormitusta entisestään kasvukauden pidentyessä ja sateisuuden lisääntyessä (Sarkkola ym. 2009). Ilmiön myötä ihmistoiminnasta vesistöille aiheutuvan humuskuormituksen minimoinnin merkitys korostuu.

Kunnostusojituksen on havaittu alentavan valumaveden humuspitoisuutta (Joensuu ym. 2002, Nieminen ym. 2010), mutta ojituksen yhteydessä suoritettavat hakkuut voivat nostaa sitä. Lisäksi humuskuormitus voi lisääntyä, vaikka humuspitoisuus laskisikin, mikäli valunta lisääntyy (Palviainen & Finér 2013). Kunnostusojituksen kiintoaineen päästöjä voimakkaasti lisäävä vaikutus ja riittämätön tutkimustieto vaikutuksista valuntaan huonontavat sen käyttökelpoisuutta metsätalouden humuspäästöjä vähentävänä toimenpiteenä. Humuksen pidättämistä varsinaisin vesiensuojelun menetelmin on tutkittu vasta vähän (Palviainen & Finér 2013).

Turvemaiden kunnostusojitukset ovat metsätalouden toimenpiteistä suurimpia fosfori- ja kiintoainekuormituksen aiheuttajia Suomessa (Finér ym. 2010). Turvemaiden avohakkuut voivat kuitenkin olla vesistöriski myös ilman kunnostusojituksia, sillä ne lisäävät valuntaa ja voivat nostaa valumaveden ravinne- ja humuspitoisuuksia. Liuenneen eloperäisen hiilen päästöt avohakatuilta turvemailta voivat olla huomattavia, etenkin runsasravinteisilla kasvupaikoilla (Lundin 1999, Nieminen 2004, Nieminen ym. 2015). Niemisen ym. (2015) mukaan turvemaiden metsätalouden voidaan odottaa aiheuttavan merkittäviä muutoksia etenkin pienten jokien ja järvien veden värissä ja laadussa, mikäli valuma-alueella on paljon avohakattuja ojitusalueita.

Tähän mennessä aiheesta tehty tutkimus vahvistaa huolia turvemaiden metsätalouden vesistöhaitoista. Jo lähtötilanne paljon huonompi kuin on tähän asti arvioitu, ja vanhojen ojitusalueiden ravinnepäästöt ovat kasvaneet ilman hakkuitakin (Nieminen ym. 2017a). Mikäli nykykäytäntöjä avohakkuineen ja kunnostusojituksineen jatketaan ja sovelletaan sellaisenaan laajasti turvemaiden metsien käsittelyyn, voi tilanne entisestään heikentyä. Koska nykyiset vesiensuojelun keinot eivät ole riittäviä liuenneen eloperäisen hiilen päästöjen vähentämiseen, Nieminen ym. (2015) esittävät turvemaille kehitettäväksi joko uusia vesiensuojelun menetelmiä tai käytettäväksi avohakkuuta lievempiä puunkorjuun muotoja. Jatkuvapeitteisen kasvatuksen potentiaalia vesiensuojelun keinona on kuitenkin toistaiseksi tutkittu erittäin vähän (Nieminen ym. 2017). Tähän tarpeeseen tämä tutkimus pyrkii osaltaan vastaamaan.

1.6 Työn tavoitteet

Tässä tutkimuksessa tavoitteenani on verrata keskenään avohakatun ja ojitusmätästetyn sekä osittaishakatun, muokkaamattoman metsikkökuviokoealan vesistö päästöjä lyhellä aikavälillä. Tutkimus toteutetaan mittaustulosten pohjalta tietokonesimulointia apuna käyttäen. Vertailuun perustuen teen johtopäätöksiä siitä, onko jatkuvalla kasvatuksella potentiaalia toimia tehokkaana vesiensuojelun menetelmänä rehevien turvemaiden metsätaloudessa.

Vaikka kaikilla avohakkuukohteilla ojitustarvetta ei synny, avohakkuu lisää sekä valuntaa että ojitustarpeen todennäköisyyttä lievempää hakkuuta enemmän, koska haihduttavaa puustoa ei jää jäljelle. Lisäksi avohakkuun yhteydessä usein suoritettava maanmuokkaus, kuten ojitusmätästys voi monin paikoin vastata hydrologisilta vaikutuksiltaan varsinaista ojitusta (Sillanpää ym.

2006). Kiintoaine ei ole tämän tutkimuksen tarkastelun kohteena, mutta aiempaan tutkimukseen pohjautuen voidaan olettaa, että ojitus lisää kiintoainekuormitusta huomattavasti. Avohakkuualan suurempi valunta puolestaan voi lisätä huuhtoutuvien liuenneiden ravinteiden ja hiilen kokonaismäärää suhteessa osittashakattuun alaan. Tämän vuoksi työn hypoteesina on, että avohakkuu on vesistövaikutuksiltaan osittashakkuuta haitallisempi.

Pääasiallinen tutkimuskysymykseni on:

1) Voidaanko jatkuvapeitteisellä kasvatuksella pienentää suometsätalouden humus- ja ravinnepäästöjä, joiden rajoittaminen on tämänhetkisten vesiensuojelutoimenpiteiden avulla hankalaa?

Yksityiskohtaisemmat kysymykset, joiden avulla pyrin vastaamaan pääasialliseen kysymykseen, ovat:

2) Mitkä ovat hakkuumallien liuenneen eloperäisen hiilen (DOC) päästöjen erot tutkimusalueella?

3) Mitkä ovat hakkuumallien typen päästöjen erot tutkimusalueella?

4) Mitkä ovat hakkuumallien fosforin päästöjen erot tutkimusalueella?

Tutkimuskysymyksiin vastaamisen lisäksi tavoitteenani on tunnistaa keskeisimpiä tutkimustarpeita turvemaiden metsätalouteen liittyen.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Tutkimusalue

Tutkimuksen kohteena oleva Lettosuo sijaitsee Tammelassa Kanta-Hämeen maakunnassa. Tutkimusalue edustaa ravinteisuudeltaan pääasiassa rehevää mustikkaturvekangas II-tyypin metsää, jotka ovat paksuturpeisille, alun perin märille nevapintaisille sekatyypin soille kehittyneitä metsiä. Luonnontilaisena, eli ennen ojituksia Lettosuo on todennäköisesti ollut pääosin suotyyppiluokituksen mukainen ruohoinen sararäme. Ensimmäinen, harva ojitus Lettosuolle on tehty luultavasti jo 1930-luvulla lapiotyönä, mutta puuston vuosilustoista päätellen nykyinen

ojaverkko on kaivettu vuonna 1969. Alueellista vaihtelua esiintyy paikoin sekä karumpaan puolukaturvekangas II -tyyppiin että etenkin rehevämpään ruohoturvekangas II -tyypin kasvupaikkaan. Turvemaiden kasvupaikkaluokituksen II-tyypin metsät ovat kehittyneet sekatyypin soille, joilla puustoa on kasvanut vain mätäspinnoilla ja hydrologinen vaihtelu on ollut suurta. Tämä selittää paikoin suurehkoa alueellista vaihtelua vesioloissa ja puustoisuudessa ojituksen jälkeenkin. Laineen ym. (2012) mukaan Suomen ojitetuista turvemaista mustikkaturvekangas II -tyypin kasvupaikkoja on noin 13 %. Kun ojitettuja turvemaita on Suomen metsistä noin viidesnes, voidaan laskea tutkimusaluetta vastaavia metsiä olevan noin 2–3 % Suomen metsäpinta-alasta.

2.2 Kalibrointikausi-vertailualue menetelmä

Metsätaloustoimenpiteen aiheuttamaa kuormituksen lisäystä käsiteltyä pinta-alayksikköä kohti kutsutaan ominaiskuormitukseksi, ja se määritetään kalibrointikausi-vertailualue menetelmän avulla (Finér ym. 2010). Ominaiskuormituksen laskemiseksi on määritettävä käsittelyalueen taustakuormitus, eli se kuormituksen määrä, joka alueelta tulee riippumatta metsätaloustoimenpiteistä. Ihanteellisesti taustakuorma voitaisiin laskea luonnontilaisten vertailualueiden avulla, koska vanhojen uudisojitusalueiden vesistöpäästöt ovat uusimman tutkimustiedon valossa kasvaneet (Nieminen ym. 2017), mikä tarkoittaa, ettei vuosikymmenten takaisten uudisojitusten vesistökuormitus ole vieläkaan laskenut lähelle luonnontilaa, toisin kuin aiemmin on oletettu. Tämä tutkimus kuitenkin keskittyy tällaisen vanhan ojitusalueen hakkuiden ja maanmuokkauksen vesistövaikutuksiin, minkä vuoksi tarkoitan taustakuormituksella ojitusalueen päästöjä ennen näitä toimenpiteitä. Taustakuorma siis sisältää vanhojen uudisojitusten vaikutukset.

Taustakuorman suuruuden mallintamiseksi metsätaloustoimenpiteiden jälkeen tutkimuksiin sisältyy tavallisesti kalibrointikausi, jossa käsiteltävien alueiden ja käsittelemättä jätettävän vertailualueen vedenlaatua ja valuntaa seurataan ennen metsätaloustoimenpiteitä. Käsiteltävän alueen ja vertailualueen kalibrointikauden kuukausittaisten kuormitusten perusteella muodostetaan regressioyhtälö selittämään käsiteltävän alueen taustakuormitusta vertailualueen päästöjen avulla käsittelyn jälkeen (Finér ym. 2010). Finérin ym. (2010) suosittelevat kalibrointikauden pituudeksi 3–5 vuotta.

Tästä työstä puuttuu varsinainen kalibrointikausi. Kalibrointikautta ei ollut mahdollista toteuttaa, koska vesinäytteitä otettiin ennen hakkuita vain kahdelta niistä kolmesta koealasta, joilta näytteitä otettiin hakkuiden jälkeen. Tulevan avohakkuukoealan valumavesinäytteet puuttuivat. Koska tämä työ keskittyy hakkuiden vesistövaikutuksiin vain lyhyellä aikavälillä, jolloin vuositteiset päästöt ovat suurimmillaan, ei kalibrointikauden puuttumisen mahdollisesti aikaansaama epätarkkuus taustakuorman arvioinnissa pitäisi olla päästöjen suuruusluokkaan merkittävästi vaikuttava tekijä. Koealat myös sijaitsevat keskenään vierekkäin osana samaa hydrologista kokonaisuutta ja pääosin samanlaista kasvillisuustyyppiä edustavaa turvekangasta, ja niillä kasvoi ennen hakkuita samanlaista puustoa, joten niiden taustakuormissa ei luultavasti ole suuria eroja. Koealat siis oletetaan taustakuormaltaan samanlaisiksi. Oletuksen todenperäisyyden arvioimiseksi kontrollikoealan ja harvennuskoealan vesinäytteitä ja kokonaispäästöjä kuitenkin vertaillaan keskenään hakkuita edeltävältä ajalta.

Metsätaloustoimenpiteiden jälkeen vedenlaadun ja valunnan mittausta jatketaan sekä käsitellyillä alueilla että vertailualueella. Finér ym. (2010) suosittavat valunnan jatkuvatoimista mittausta ja vesinäytteiden ottamista 10–20 kertaa vuodessa. Toimenpiteiden ominaiskuormitus lasketaan havaintojen perusteella määritetyn kuormituksen ja taustakuormituksen erotuksena (Alatalo 2000).

2.3 Tutkimusasetelma

Lettosuon koealojen valumaa ja valumaveden laatua tarkastellaan ajanjaksolla 27.04.2016–27.09.2017, eli yhteensä 17 kuukauden ajalta hakkuun jälkeen. Tarkasteltavia vesinäytteitä otettiin myös ennen hakkuita vuoden 2015 aikana kontrolli- ja harvennushakkuukoealan näytteenottopisteiltä. Ennen hakkuita alueen puusto oli yleisilmeeltään peitteistä ja monikerroksista (kuva 1).



Kuva 1. Tutkimusalueen alkutilaa vastaavaa puustoa kontrollialalla.

Metsähallitus suoritti hakkuut maaliskuussa 2016. Avohakkuualalta poistettiin kaikki puusto, ja alue ojituserästäettiin Metsähallituksen vallitsevien käytäntöjen mukaisesti (kuva 2). Vesiensuojelutoimenpiteenä ojiin kaivettiin pieniä laskeutuskouppia. Lisäksi koealan vesitaloutta oli muokattu vuonna 2012 kaivamalla sille uusi ohitusoja erottamaan sen valuma-alue muiden koealojen valuma-alueesta. Avohakkuualan vesinäytteiden ottoa ja valunnan mittaamista varten rakennettiin uusi putkipato mittauspisteeksi. Koealan vedet ohjattiin putkipadolle vuonna 2015 kaivetun kokoojaojan avulla. Tässä työssä avohakkuun ja ojitustoimenpiteiden vesistövaikutuksia ei voida erottaa toisistaan. Hakkuun ja maanmuokkauksen tarkasteleminen yhtenä kokonaisuutena on kuitenkin perusteltua, koska ne esiintyvät metsätaloudessa säännönmukaisesti yhdessä (Sillanpää ym. 2006).



Kuva 2. Avohakattu ja ojitusmätästetty koeala.

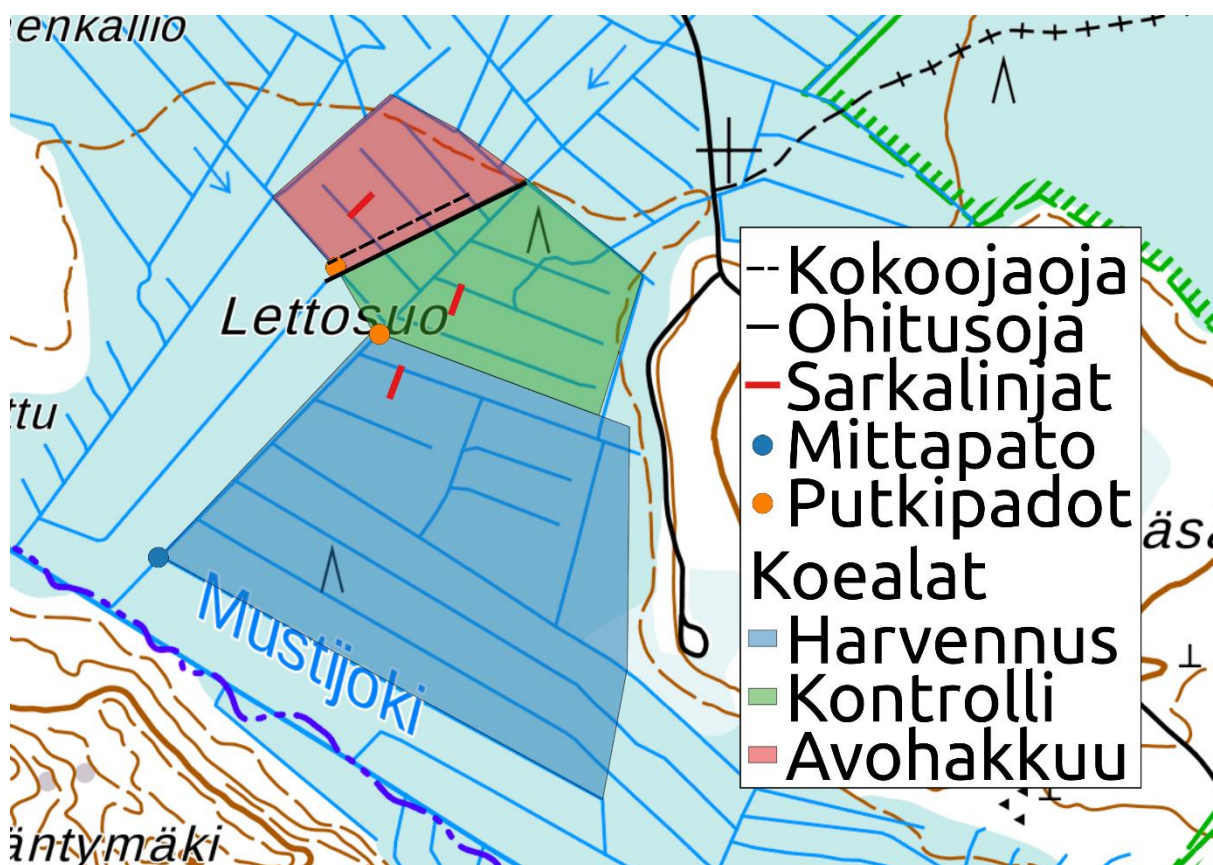
Harvennushakkuualalta poistettiin vain valtapuuston männyt (kuva 3). Puustoa jäi noin 60 m³/ha, eli harvennus oli vesitalouden kannalta suositeltua huomattavasti voimakkaampi. Koealan vesitaloutta ei muokattu, vaan ojat jätettiin entiselleen (kuva 4). Harvennusalan mittauspisteelle oli jo aiemmin rakennettu mittauspato ja -kaivo, jossa valuntaa mitattiin automaattisesti (kuva 5). Lisäksi pisteellä oli veden liuenneen eloperäisen hiilen pitoisuutta automaattisesti mittaava laite.



Kuva 3. Osittaishakattu koeala, jolta on poistettu vain valtapuuston männyt.



Kuva 4. Umpeenkasvanut sarkaoja osittaishakatulla koealalla.



Kuva 5. Koealojen, ojien ja mittauspisteiden sijoittuminen hakkuiden ja maanmuokkaustöiden jälkeen (maastokartta © Maanmittauslaitos CC BY 4.0).

2.4 Valunnan ja turpeen vedenpinnan syvyyden mittaukset

Kontrolli- ja harvennuskoealoilta tulevaa valuntaa mitattiin automaattisesti laskuojaan rakennetulla kaivolla. Kaivon sisällä oli mittapato, jossa anturi mittasi valunnan yhden tunnin välein. Hetkelliset valunnat muutettiin päivittäisiksi kokonaisvalunnoiksi. Tämä tapahtui laskemalla mittaustulosten päivittäiset keskiarvot, ja kertomalla ne vuorokauden pituudella sekunteina (86400 s). Hydrologiassa käytetään yleisesti sadannan ja valunnan kuvaamiseen yksikköä mm, joka tarkoittaa yhtä litraa vettä neliometriä kohti (l/m^2). Päivittäiset valunnat muunnettiin tähän yksikköön jakamalla ne valuma-alueen pinta-alalla neliömetreinä ($132\,000\,m^2$).

Koealoilta mitattiin turpeen vedenpinnan syvyyttä kullekin koealalle perustetuilta sarkalinjoilta. Sarkalinjat oli sijoitettu suoraan kulmaan yhteen koealan sarkaojaan nähden, ja veden pinnan syvyyttä mitattiin neljältä eri etäisyydeltä ojasta. Etäisyydet olivat 4, 8, 12 ja 22 metriä. Mittauspisteissä turpeeseen oli upotettu rei'itetyt mittaputket, joiden sisälle asetetut mittalaitteet tallensivat vedenpinnan syvyyden yhden tunnin välein.

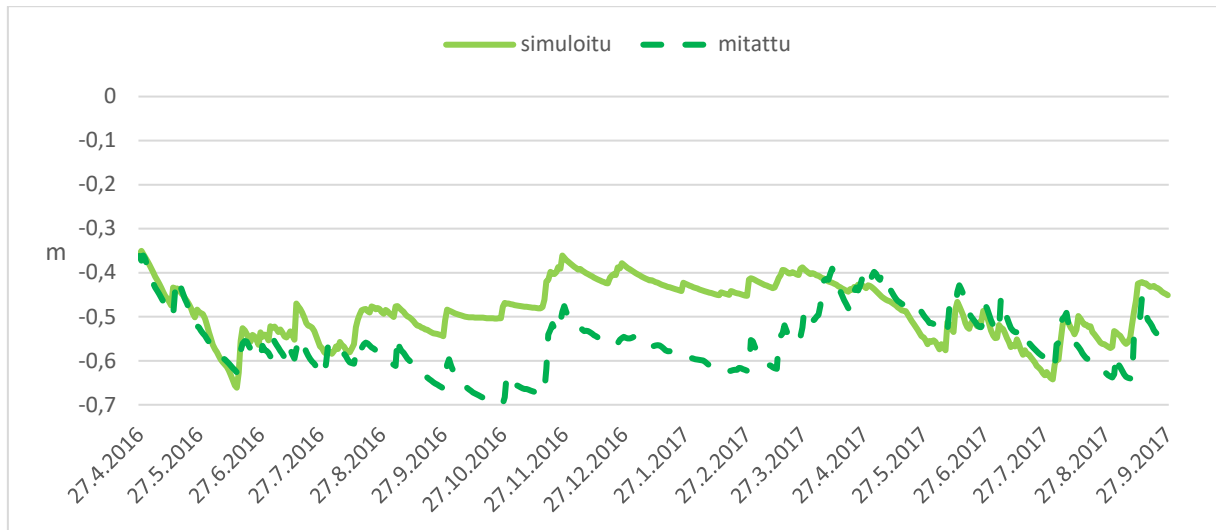
2.5 Valunnan mallintaminen SuSi-suosimulaattorilla

SuSi-suosimulaattori on suometsätalouden suunnittelun ja tutkimuksen tueksi kehitetty mallinnusohjelma. Sen avulla mallinnettiin koealojen vesitaloutta tukemaan arvioita koealojen valunnoista. Simuloinnissa huomioituja valuntaan vaikuttavia tekijöitä olivat puuston määrä ja laatu, ojien syvyys ja ojatiheys, turpeen vedenjohtavuus eri syvyyksillä sekä sääolosuhteet. Koealojen puustoa mallinnettiin simulointia varten Motti-ohjelmalla.

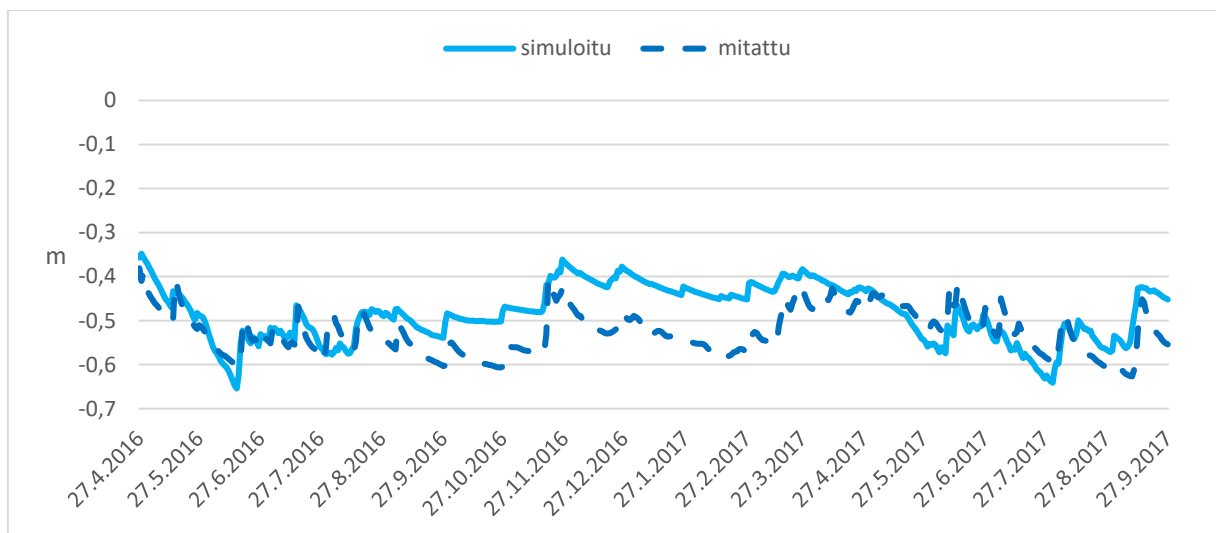
Koeasetelmaa epäiltiin valuma-alueen pinta-alan osalta virheelliseksi liian suuren mitatun valunnan perusteella. Tämän vuoksi simuloinnin tulosten hyvyyden arviointiin käytettiin mitatun valunnan sijasta mitattuja turpeen vedenpinnan syvyyksiä. Automaattisten mittalaitteiden tallentamassa datassa oli kuitenkin tyhjiä jaksoja, jotka täytyi paikata. Aukot paikattiin muodostamalla lineaariset regressioyhtälöt paikattavan mittauspisteen datan ja sitä parhaiten pisimpänä yhtenäisenä ajanjaksona selittävän mittauspisteen datan välillä, jolloin molemmista mittauspisteistä oli saatavilla yhtäaikaista dataa. Jos muuten yhtenäisessä datan aikasarjassa oli hyvin lyhyt aukko, esimerkiksi joitakin tunteja tai muutama päivä, tällainen aukko paikattiin kopioimalla siihen lähimmät mitatut arvot.

Suosimulaattori tuotti turpeen vedenpinnan syvyyksistä aikasarjan eri etäisyyksille ojasta. Simulaatiossa ojien välinen 45 metriä leveä sarka jaettiin kahteenkymmeneen 2,25 metriä leveään lohkoon, joille kaikille simulaattori laski vedenpinnan syvyyden, ensimmäisen ja viimeisen lohkon eli ojien vedenpinnan ollessa sama kuin ojasyvyys. Yhden simuloinnin tuloksena oli neljä simulaatiota eri ojasyvyyksillä. Käytetyt ojasyvyydet olivat 0,3 m, 0,5 m, 0,65 m ja 0,9 m. Lohkojen vedenpinnoista laskettiin päivittäinen keskiarvo.

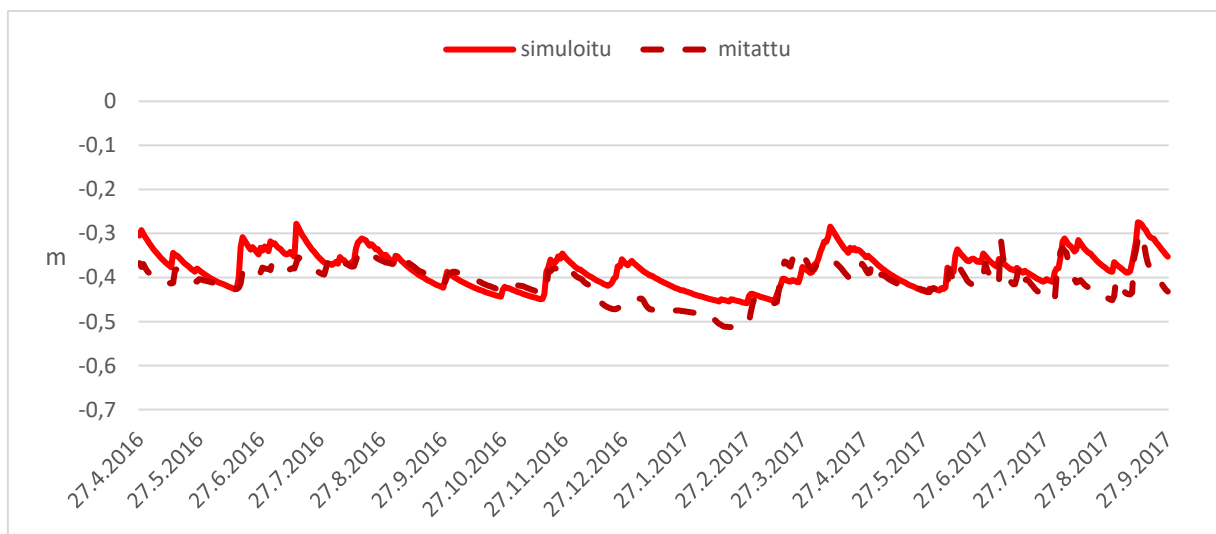
Simulointi tehtiin jokaiselle koealalle. Päivittäisiä vedenpinnan syvyyden keskiarvoja verrattiin koealoilta mitattujen vedenpinnan syvyyksien keskiarvoihin. Simuloidut ja mitatut vedenpinnan syvyydet olivat kaikilla koealoilla lähimpänä toisiaan ojasyvyyden ollessa simulaatiossa 0,5 m (kuvat 6–8). Näiden simulaatioiden tuottamia valuntoja päätettiin siksi käyttää päästöjen laskennassa.



Kuva 6. Vedenpinnan keskimääräinen syvyys kontrollikoealalla simulaatiossa ja mitattuna.



Kuva 7. Vedenpinnan keskimääräinen syvyys harvennuskoealalla simulaatiossa ja mitattuna.



Kuva 8. Vedenpinnan keskimääräinen syvyys avohakkuukoealalla simulaatiossa ja mitattuna.

2.6 Vesinäytteet ja jatkuvatoiminen liuenneen hiilen mittaus

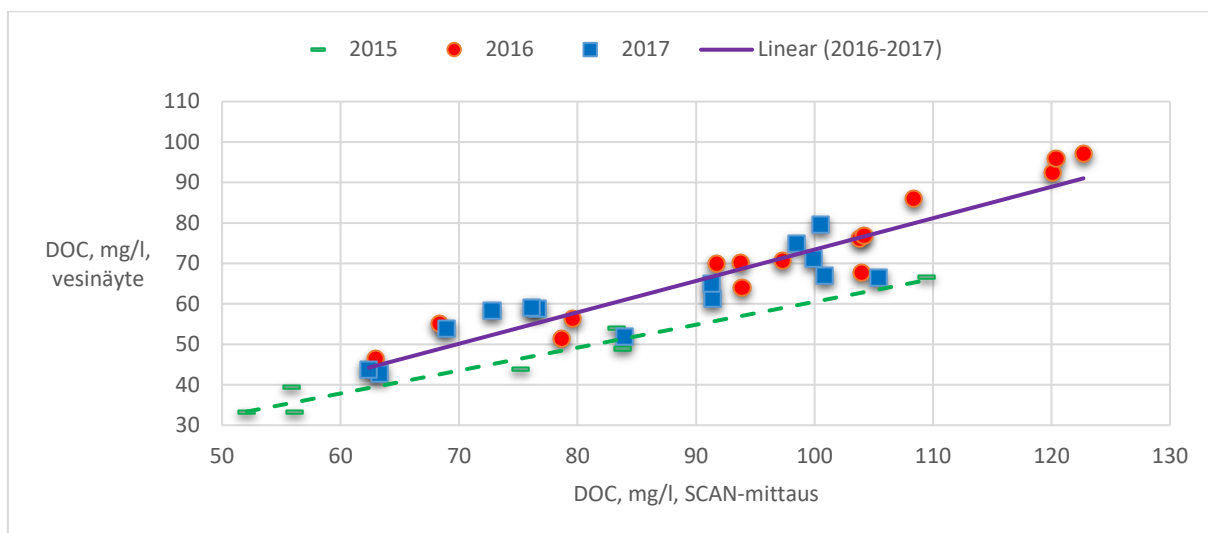
Vesinäytteitä otettiin koealoilta putkipadoilta ja mittapadolta (kuva 5) noin kaksi kertaa kuu- kaudessa keväästä syksyyn vuosina 2015, 2016 ja 2017. Talviaikaan näytteitä otettiin harvem- min. Luonnonvarakeskus analysoi näytteistä eri päästöositteiden pitoisuudet vakiomenetel- millä.

Jatkuvatoiminen liuenneen eloperäisen hiilen (DOC) mittaus tapahtui jatkuvatoimisella, ve- teen upotetulla spektrometrilla (S::CAN Carbolyser, Messtechnik GmbH, Germany) SCAN-an- turilla, joka mittasi yhden tunnin välein veden tummuuden laservalon avulla. Laitteen optisen polun pituus oli 5 mm, ja siinä oli paineilmalla tapahtuva puhdistus, joka tehtiin heti jokaisen mittauksen jälkeen, ettei veden sekoittuminen vaikuttaisi seuraavaan mittaukseen. Laitteen linssit putsattiin noin 2–4 viikon välein.

SCAN-anturin tuottamassa datassa oli järjestelmällinen tasoero suhteessa vesinäytteistä mi- tattuun DOC-pitoisuuteen. Tämän vuoksi dataa täytyi kalibroida vastaamaan laboratoriossa mitattujen vesinäytteiden tasoa. Näytetulosten ja automaattimittausten tulosten välille muo- dostettiin lineaarinen regressioyhtälö, jolla SCAN-anturin data korjattiin. Korjauksessa käytet- tiin automaattimittausten keskiarvoa näytteenottopäivinä kellonaikojen 12:00 ja 17:00 välillä, jolloin näytteet oli todennäköisesti otettu.

SCAN-anturin tuottaman datan korjaamiseksi hakkuun jälkeisten vuosien 2016–2017 datalle muodostettiin erillinen regressioyhtälö, koska vuoden 2015 pisteet erottuivat omaksi parvek- seen (kuva 9). Tämä saattoi johtua vuoden 2015 pienestä havaintojen määrästä, joka oli seu- rausta siitä, että SCAN-mittaus aloitettiin vasta kyseisen vuoden elokuussa. Muodostettu reg- ressioyhtälö oli:

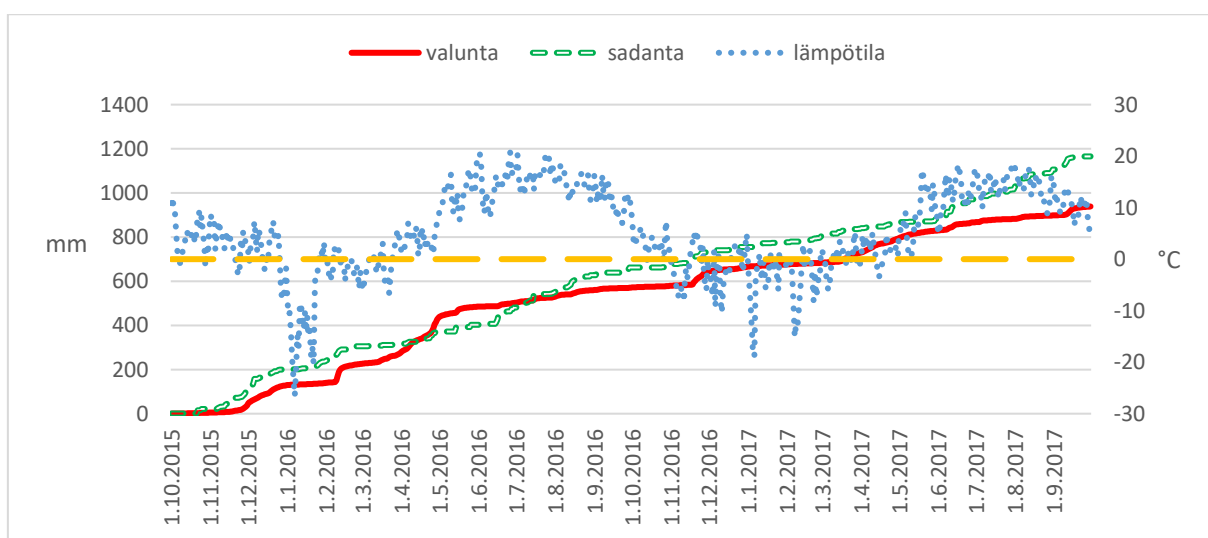
$$y = 0,776x - 4,163$$



Kuva 9. DOC-pitoisuuden hajonta vesinäytteiden ja SCAN-mittausten tuloksissa, ja niiden välinen lineaarinen regressio vuosina 2015 ja 2016-2017.

2.7 Päästöjen laskenta

Mittapadon automaattimittausten perusteella laskettu harvennus- ja kontrollikoealojen kokonaisvalunta oli liian suuri sadantaan nähden (kuva 10), mikä viittasi ongelmiin koeasetelmassa. Koealoille oli joko virrannut ylimääräistä vettä koeasetelman ulkopuolelta tai mittapadon datan perusteella lasketut hetkelliset valunnat eivät pitäneet paikkaansa. Tästä johtuen koealojen valuntojen arvioinnissa päätettiin nojata simuloinnin tuloksiin. Mitatun valunnan käyttäminen päästöjen laskennassa olisi johtanut huomattavaan päästöjen yliarvioon.



Kuva 10. Tutkimusalueen kumulatiivinen sadanta ja mittapadolla mitattu kumulatiivinen valunta.

Suosimulaattori tulosti päivittäiset valunnat koealoille yksikössä mm/d ($\text{l/m}^2/\text{d}$). Valunnat muutettiin yksikköön l/d kertomalla ne koealojen pinta-aloilla neliömetreinä. Päästöjen laske-
miseksi päivittäisten valuntojen lisäksi tarvittiin päivittäiset pitoisuudet laskettaville päästön
ositteille.

Päivittäiset liuenneen eloperäisen hiilen, kokonaistypen ja kokonaisfosforin sekä ravinteiden
ositteiden pitoisuudet laskettiin interpoloimalla arvot näytteenottopäivien pitoisuuksien vä-
lille. Interpolointi tehtiin taulukkolaskennan avulla muodostamalla lineaariset funktiot näyt-
teenottopäivien pitoisuuksien välille ja laskemalla funktion arvo kunkin puuttuvan päivän koh-
dalla.

Interpoloimalla laskettuihin pitoisuuksiin liittyi epävarmuutta varsinkin talvikauden 27.10. –
28.3. osalta, jolta vesinäytteet puuttuivat kokonaan. Regressiolla korjattua SCAN-dataa käytet-
tiin interpoloinnin tulosten arviointiin vertaamalla sitä mittapadolta otettujen vesinäytteiden
perusteella interpoloituihin päivittäisiin DOC-pitoisuuksiin, ja vertaamalla pitoisuuksien perus-
teella laskettuja kokonaiskuormituslukuja keskenään.

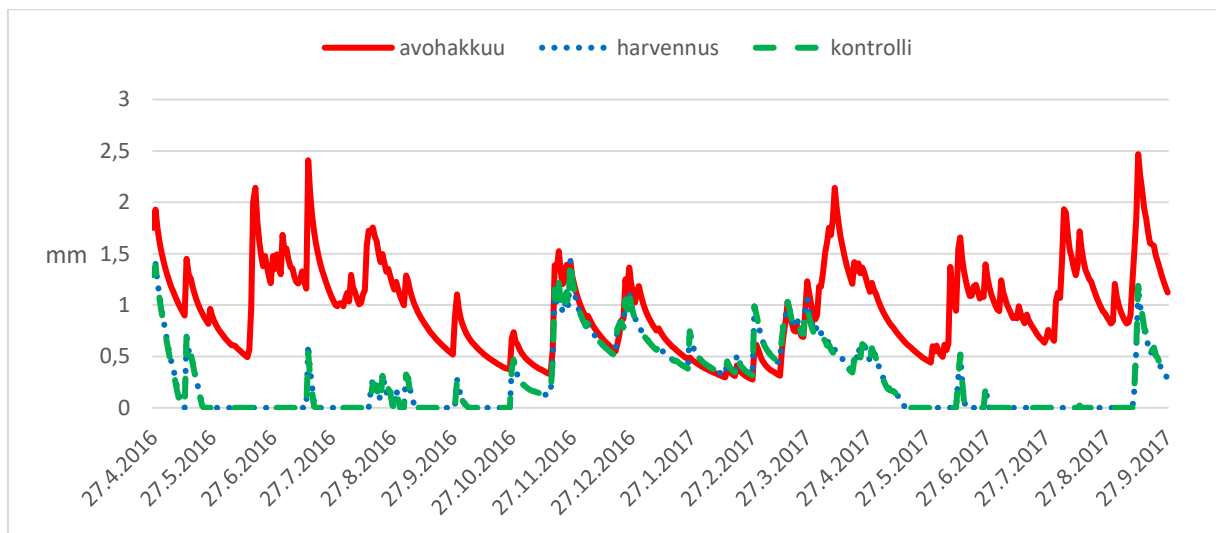
Päivittäiset päästöt kultakin koealalta laskettiin kertomalla päivittäiset pitoisuudet (mg/l) päi-
vittäisillä valunnoilla (l/d). Koska harvennushakkuukoealan näytteenottopisteelle, mittapa-
dolle, valuivat myös kontrollikoealan vedet, laskettiin harvennuskoealan päästöt kertomalla
mitatut pitoisuudet harvennus- ja kontrollikoealojen valuntojen summilla, ja vähentämällä tu-
lostä lopuksi kontrollikoealalle lasketut päästöt. Päästöjen massat muutettiin muodosta mg
muotoon kg jakamalla ne luvulla 1 000 000.

Käsittelyjen, eli avohakkuun ja maanmuokkauksen sekä harvennushakkuun aiheuttamat pääs-
töt, eli käsittelyjen ominaiskuormitukset, laskettiin vähentämällä käsiteltyjen koealojen pääs-
töistä kontrollikoealan päästöt, eli taustakuormitus.

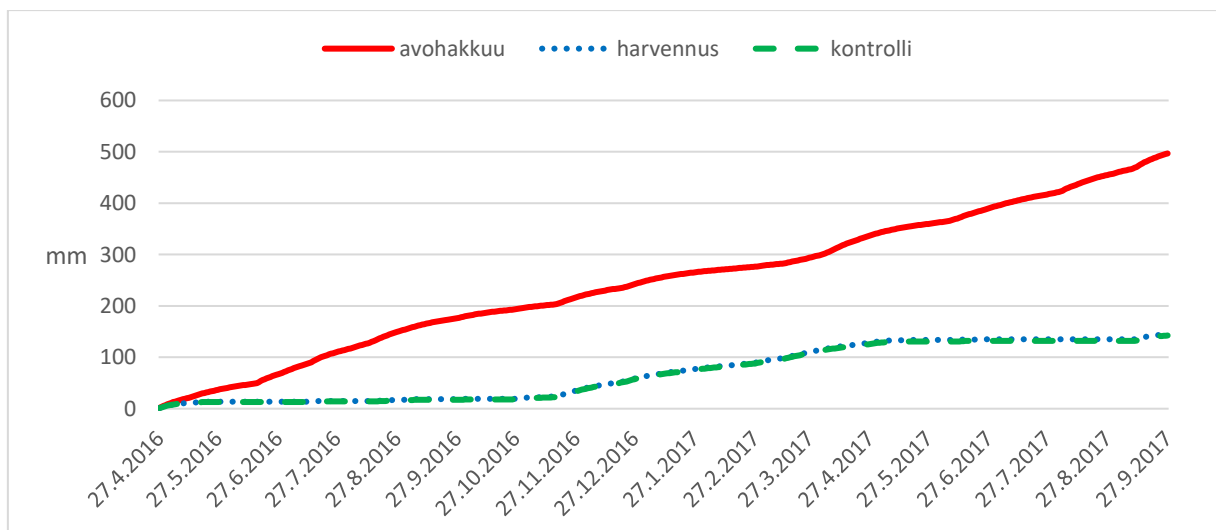
3. TULOKSET

3.1 Valunta

Simuloinnin perusteella hakkuiden jälkeisellä tarkastelujaksolla avohakkuualan valunta osoit-
tautui odotetusti muita koealoja huomattavasti suuremmaksi. Harvennus- ja kontrollikoealo-
jen valunnat taas olivat simuloinnin tuloksissa käytännössä samat (kuvat 11 ja 12).



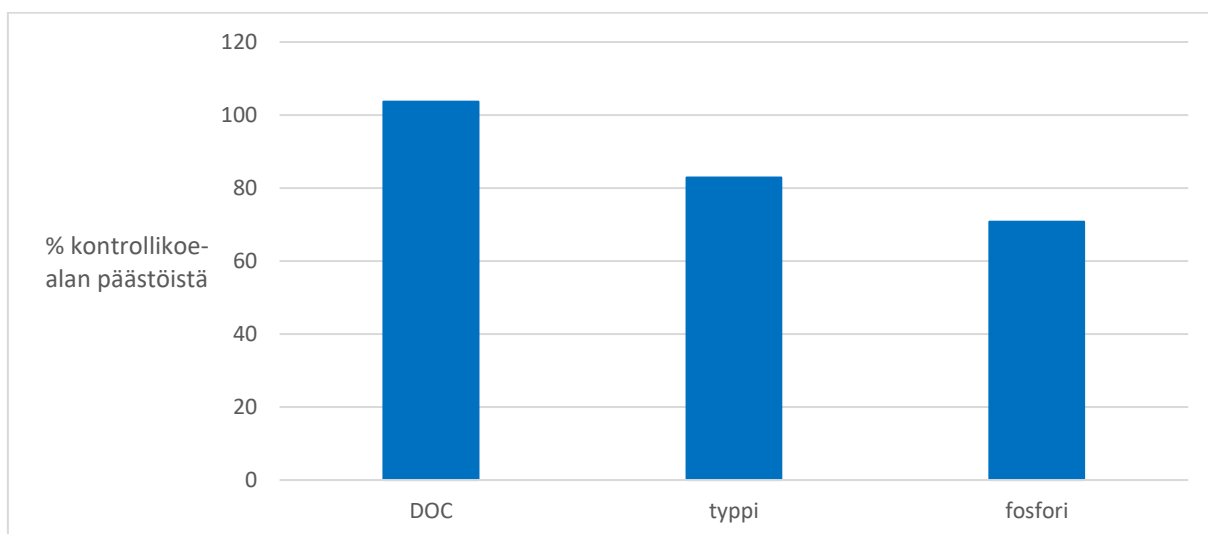
Kuva 11. Valunta koealoittain.



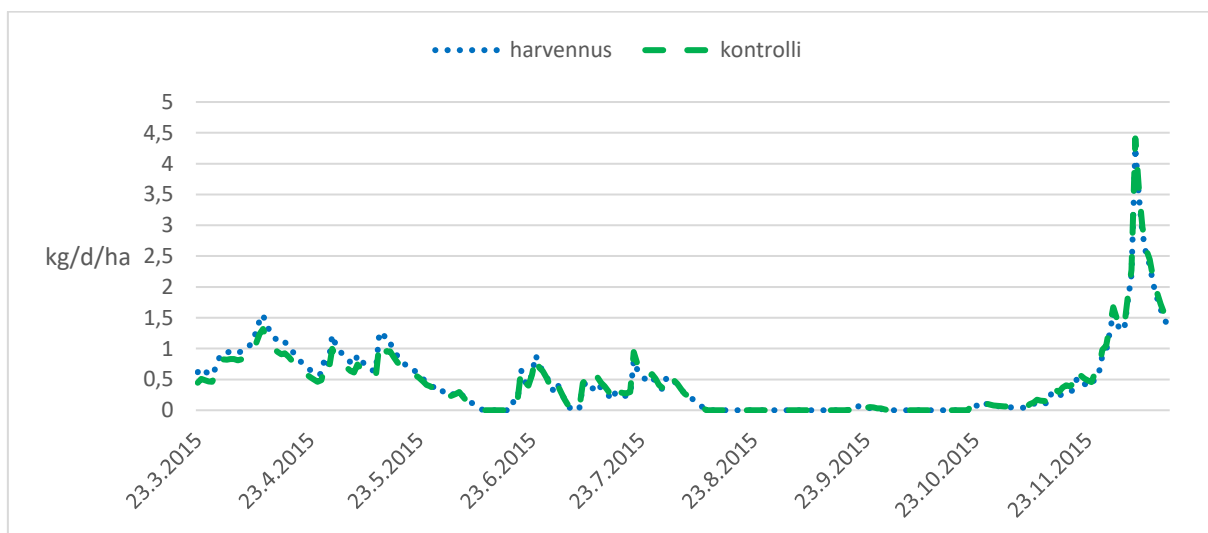
Kuva 12. Kumulatiivinen valunta koealoittain.

3.2 Vesistöpäästöt ennen käsittelyä

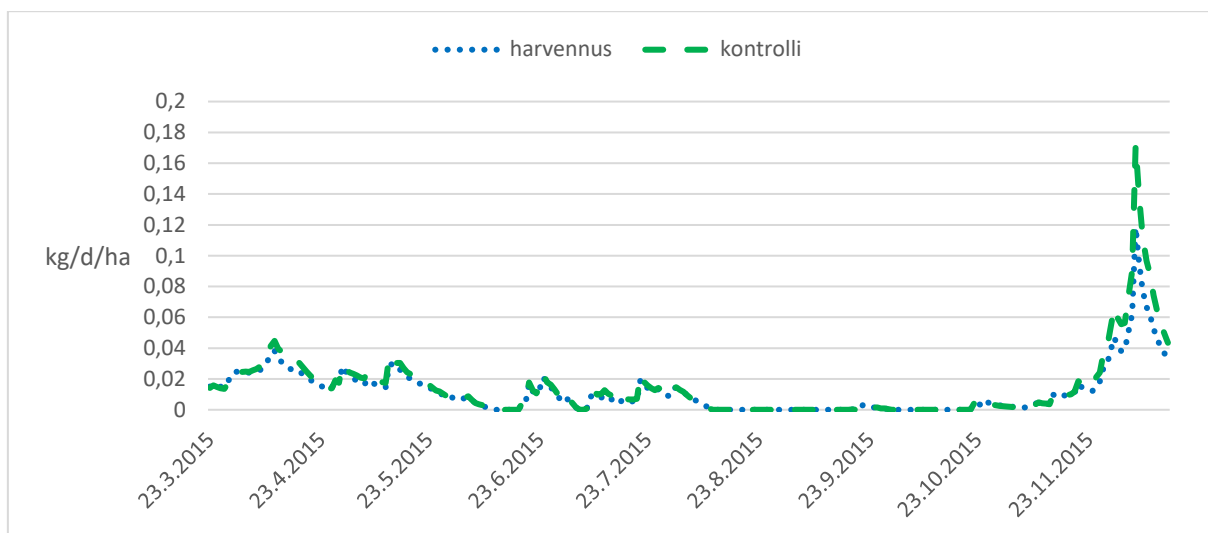
Ennen hakkuita harvennuskoealan päästöt poikkesivat kontrollikoealan päästöistä lähinnä ravinteiden osalta. Harvennusalan DOC-päästöt olivat 104 %, typpipäästöt 83 % ja fosforipäästöt 71 % suhteessa kontrollialan päästöihin (kuva 13). Pääosan hakkuita edeltävästä mittausjaksosta koealojen päästöt olivat erittäin yhtenevät, mutta niissä oli eroja varsinkin fosforin suhteen kesällä (kuvat 14–16).



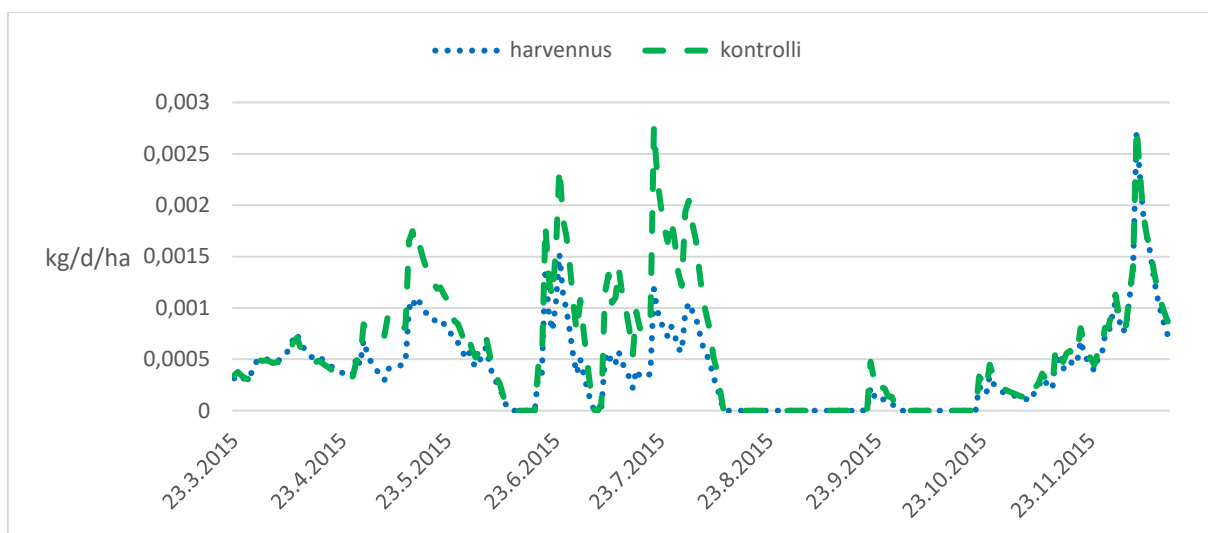
Kuva 13. Harvennuskoealan vesistöpäästöt hehtaaria kohti suhteessa kontrollikoealan päästöihin ennen hakkuita aikavälillä 23.3.–15.12.2015.



Kuva 14. Koealojen päivittäiset DOC-päästöt hehtaaria kohti 23.3.2015–15.12.2015.



Kuva 15. Koealojen päivittäiset typpipäästöt hehtaaria kohti 23.3.2015–15.12.2015.

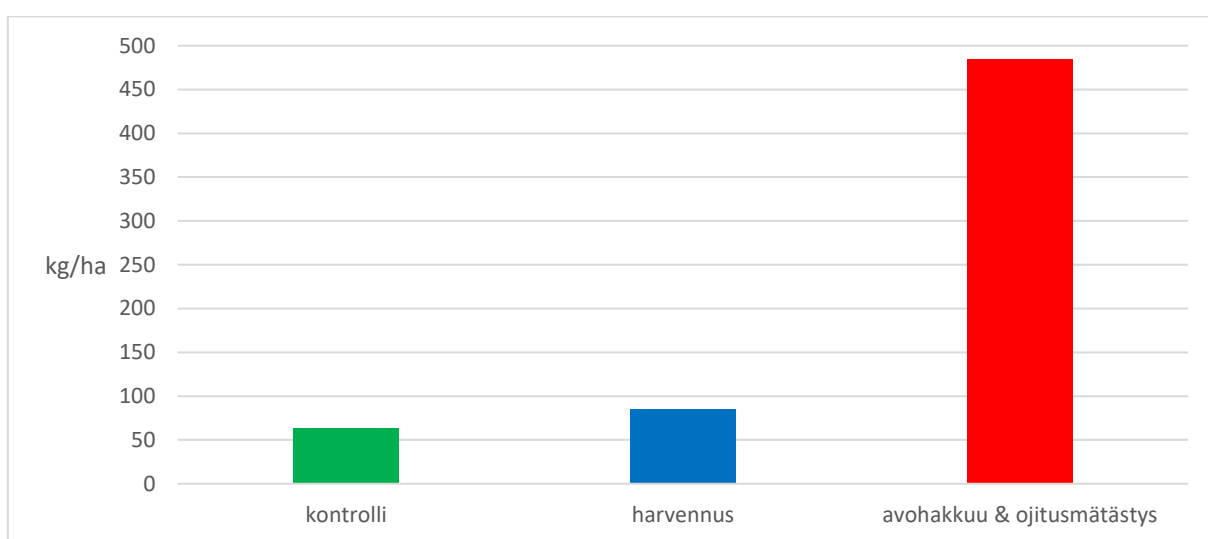


Kuva 16. Koealojen päivittäiset fosforipäästöt hehtaaria kohti 23.3.2015–15.12.2015.

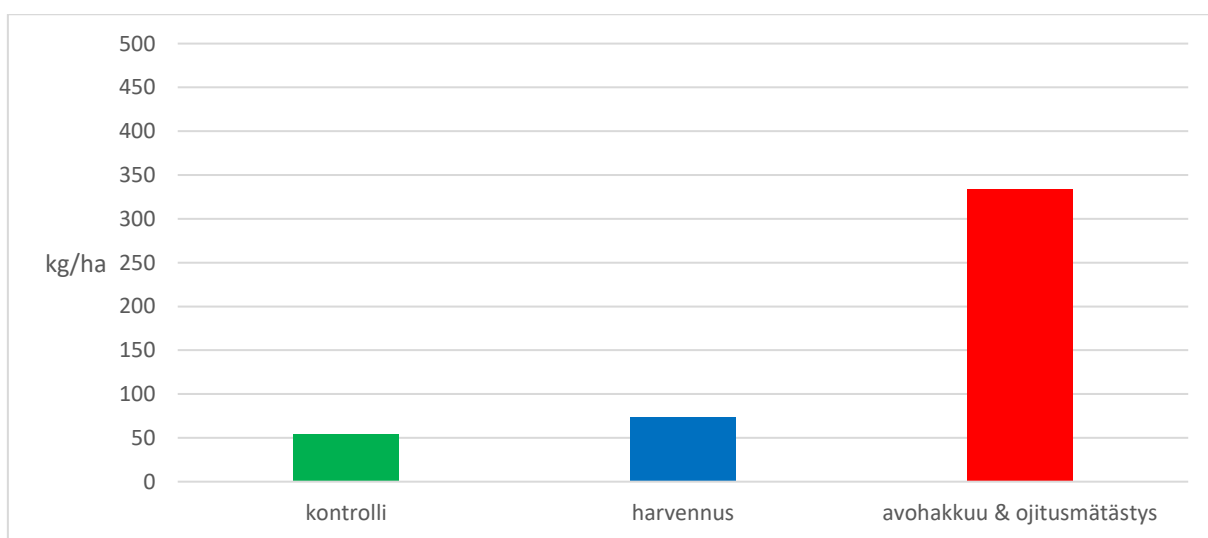
3.2 Vesistöpäästöt käsittelyjen jälkeen

Käsittelyjen jälkeisellä tarkastelujaksolla liuenneen eloperäisen hiilen kokonaiskuormitus oli selvästi suurin avohakkuukoealalla. Harvennus- ja kontrollikoealat olivat kokonaiskuorman osalta lähellä toisiaan, harvennuskoealan kuormituksen ollessa hiukan suurempi. Koko 17 kuukauden tarkastelujaksolla kuormitus kontrollialalta oli 64 kg/ha, harvennusalalta 85 kg/ha ja avohakkuualalta 484 kg/ha (kuva 17). Tarkasteltaessa yhden vuoden vesistöpäästöjä ensimmäisestä vesinäytteestä alkaen vastaavat kuormitusluvut olivat 55, 74 ja 334 kg/ha (kuva 18).

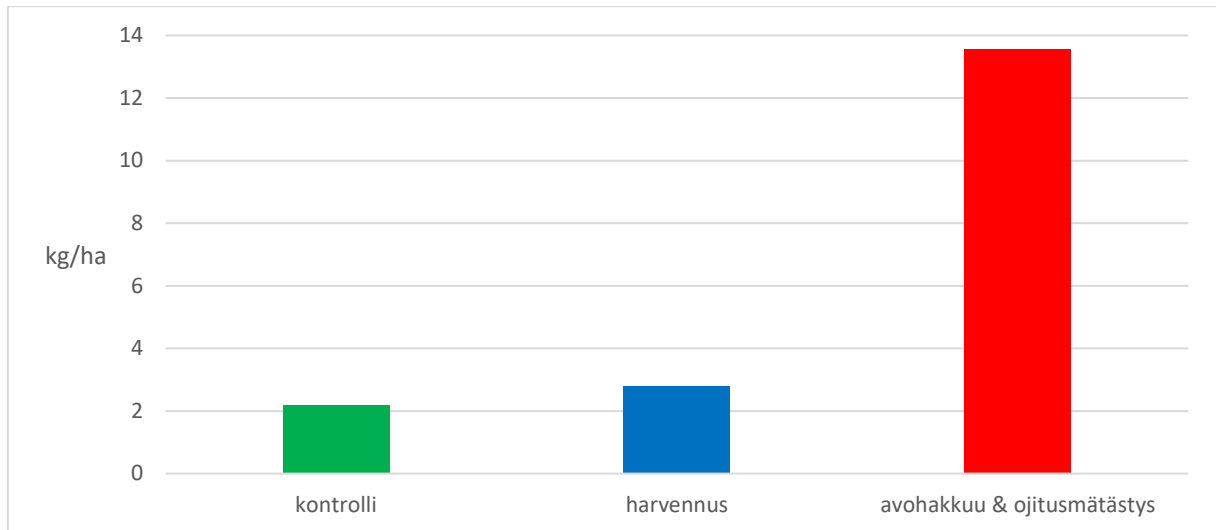
Myös sekä typen että fosforin kokonaiskuormitus oli selvästi suurin avohakkuualalla. Harvennus- ja kontrollikoealat olivat typen osalta lähellä toisiaan, harvennusalan kuormituksen ollessa suurempi. Fosforin osalta harvennusalan kuormitus oli aavistuksen pienempi. Typpikuormitus kontrollialalta oli koko tarkastelujaksolla 2,19 kg/ha, harvennusalta 2,79 kg/ha ja avohakkuualalta 13,56 kg/ha (kuva 19). Vuoden tarkastelujaksolla vastaavat kuormitusluvut olivat typen osalta 1,95, 2,47 ja 9,49 kg/ha (kuva 20). Koko tarkastelujaksolla fosforikuormitukset olivat 0,11, 0,10 ja 1,05 kg/ha, joista fosfaatin osuudet olivat 0,03, 0,04 ja 0,55 kg/ha (kuva 21). Vuoden tarkastelujaksolla fosforikuormitukset olivat 0,10, 0,09 ja 0,76 kg/ha, joista fosfaatin osuudet 0,03, 0,04 ja 0,45 kg/ha (kuva 22).



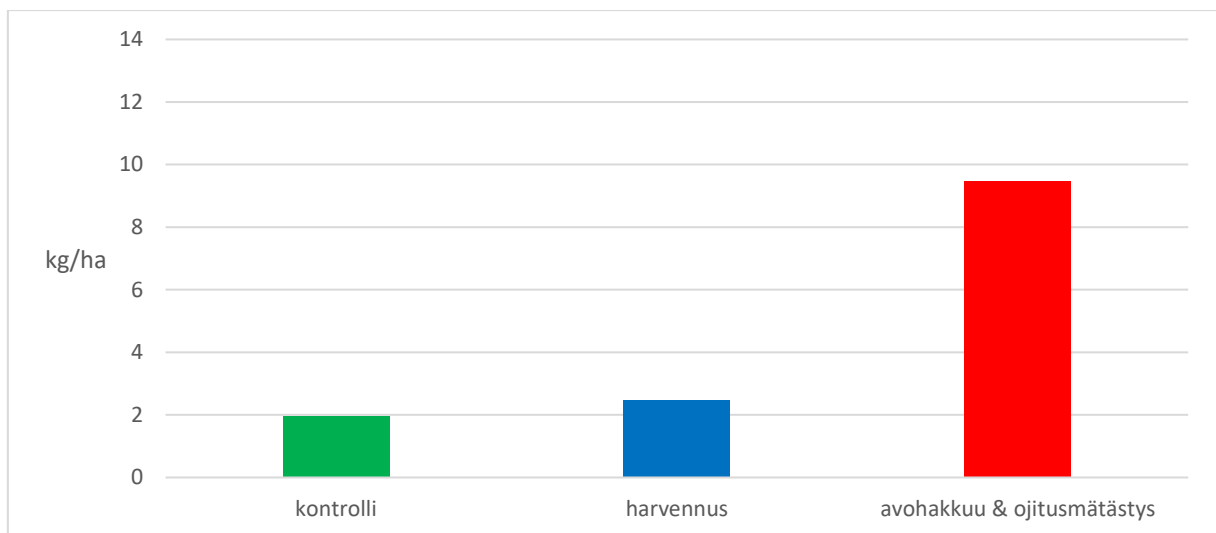
Kuva 17. DOC:n kokonaiskuormitus koealoittain aikavälillä 27.4.2016–27.9.2017.



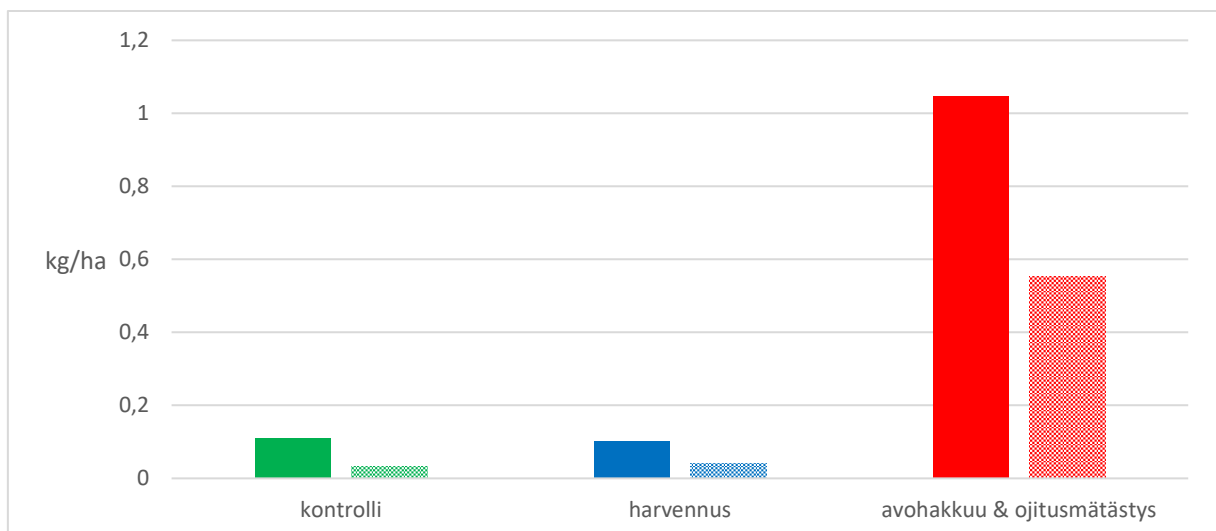
Kuva 18. DOC:n kokonaiskuormitus koealoittain aikavälillä 27.4.2016–26.4.2017.



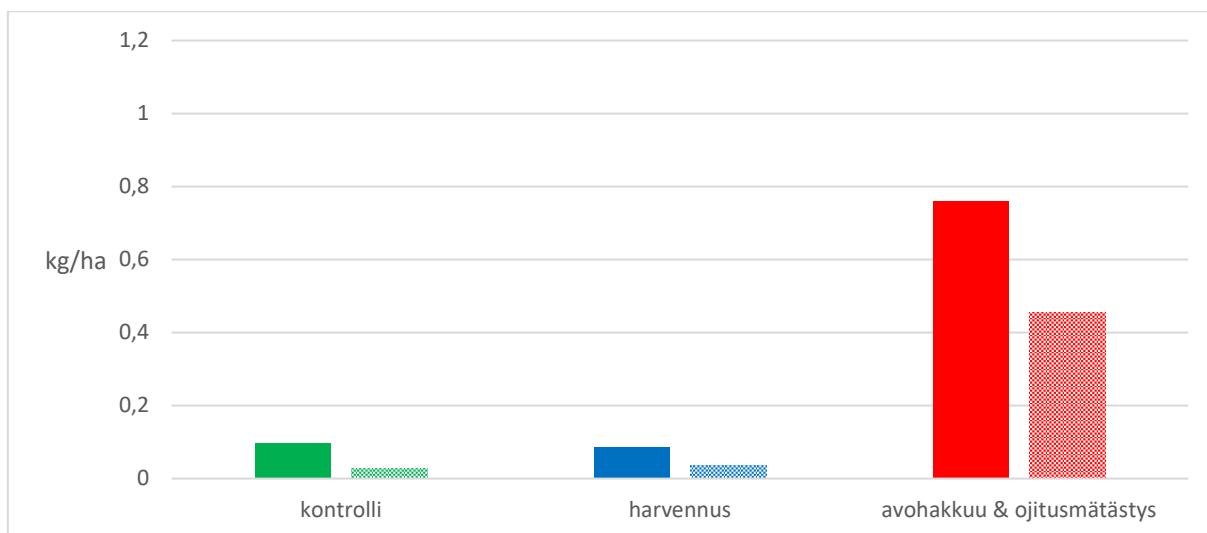
Kuva 19. Typen kokonaiskuormitus koealoittain aikavälillä 27.4.2016–27.9.2017.



Kuva 20. Typen kokonaiskuormitus koealoittain aikavälillä 27.4.2016–26.4.2017.



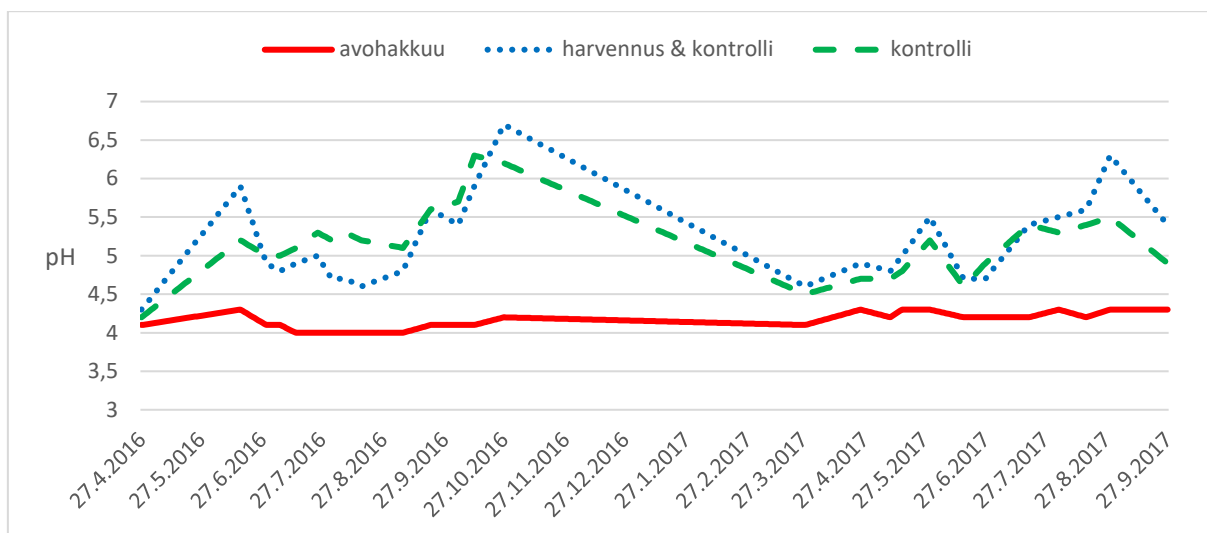
Kuva 21. Fosforin kokonaiskuormitus (tummemmat pylväät) ja fosfaattikuormitus koealoittain aikavälillä 27.4.2016–27.9.2017.



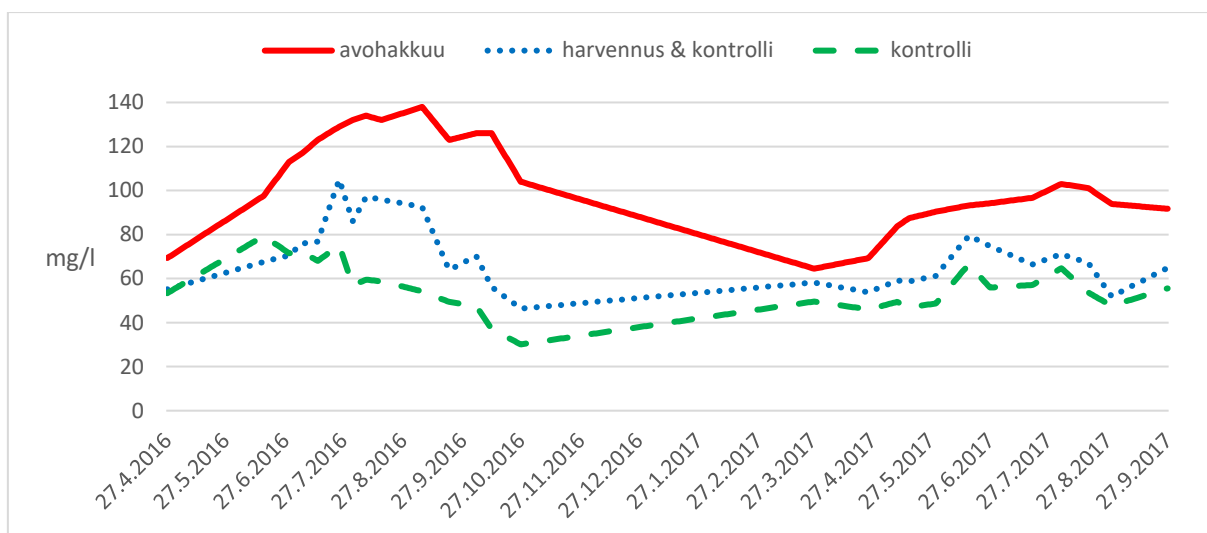
Kuva 22. Fosforin kokonaiskuormitus (tummemmat pylväät) ja fosfaattikuormitus koealoittain aikavälillä 27.4.2016–26.4.2017.

Avohakkuuala erottui muista koealoista selvästi alhaisemman pH-arvon ja korkeamman valumaveden DOC-pitoisuuden osalta (kuvat 23 ja 24). Erot koealojen valumaveden DOC-pitoisuuksissa olivat vuonna 2016 suuremmat kuin vuonna 2017, ja pH-arvon kohdalla erot olivat harvennus- ja kontrollikoealojen ja kontrollikoealan valumavesien välillä hyvin pienet. Avohakkuualan valumavesien happamuus johtunee korkeasta humuspitoisuudesta, jota korkea DOC-pitoisuus indikoi.

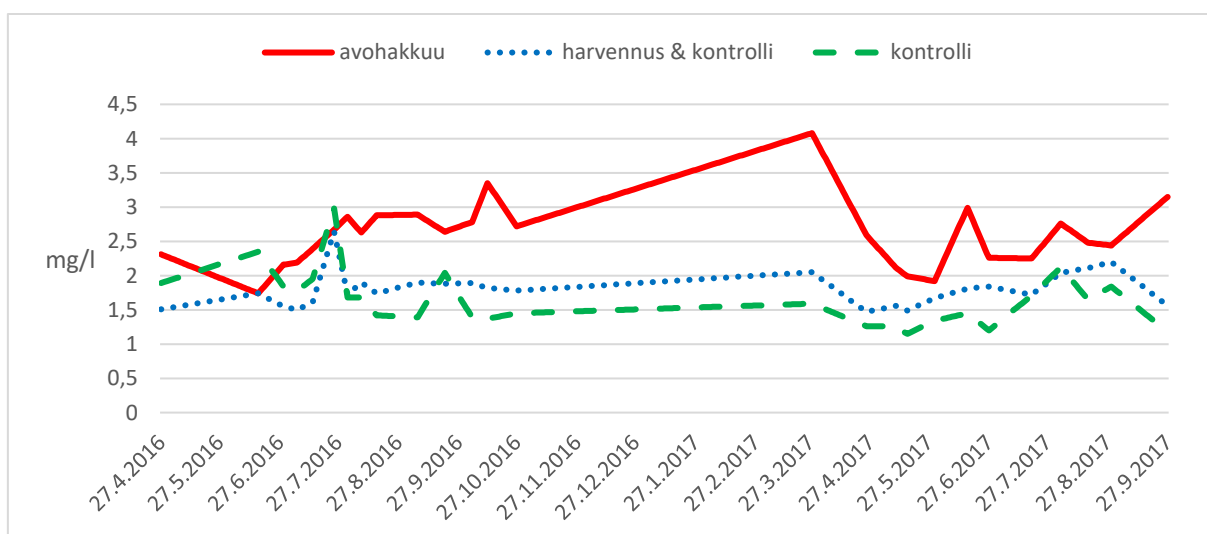
Typen pitoisuus koealojen valumavesissä nousi avohakkuualalla muita koealoja korkeammalle tasolle loppukesällä 2016, ja pysyi korkeampana mittausjakson loppuun asti. Harvennus- ja kontrollialalta valuvan veden typpipitoisuus oli kontrollialan pitoisuutta korkeampi suurimman osan mittausjaksosta (kuva 25). Avohakkuualan valumavesien fosforipitoisuus oli muita koealoja pienempi hakkuun jälkeisen kesän loppupuolelle asti (kuva 26). Harvennusalan mittauspisteen vesinäytteissä fosforipitoisuus oli vuoden 2016 ajan matalammalla tasolla kuin kontrollikoealan vesinäytteissä.



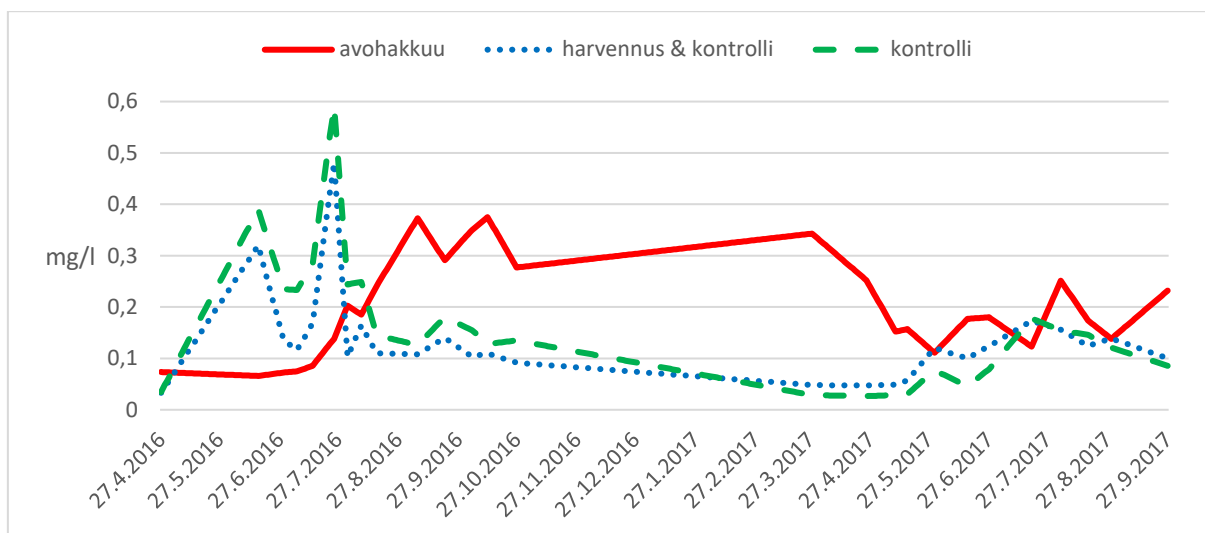
Kuva 23. Koealojen valumavesinäytteiden välille interpoloitu pH-arvo hakkuiden jälkeen.



Kuva 24. DOC-pitoisuus interpoloituna koealojen vesinäytteiden välille hakkuiden jälkeen.



Kuva 25. Typhen pitoisuus interpoloituna koealojen vesinäytteiden välille hakkuiden jälkeen.

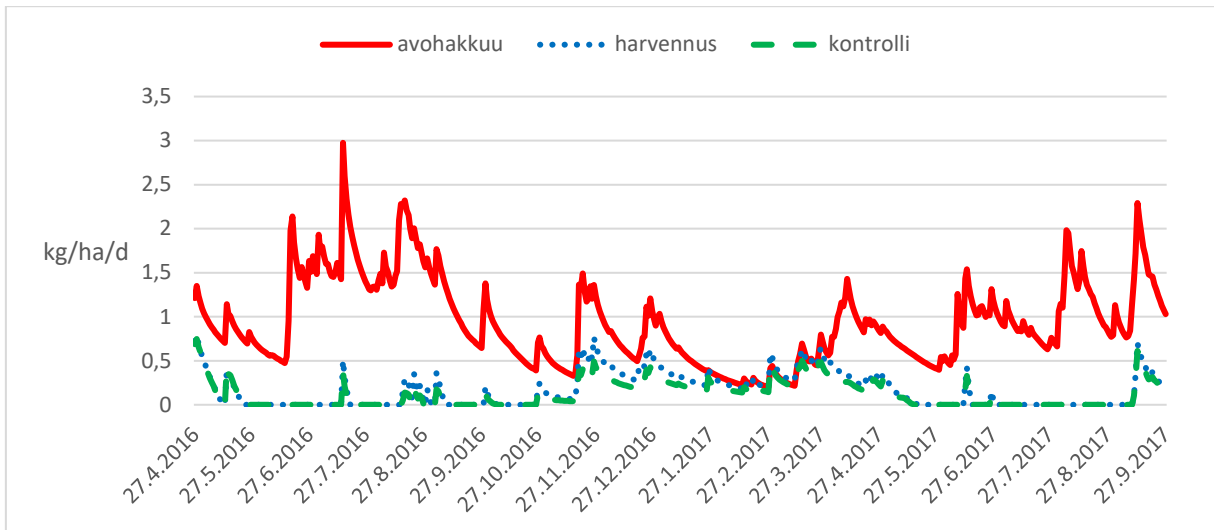


Kuva 26. Fosforin pitoisuus interpoloituina koealojen vesinäytteiden välille hakkuiden jälkeen.

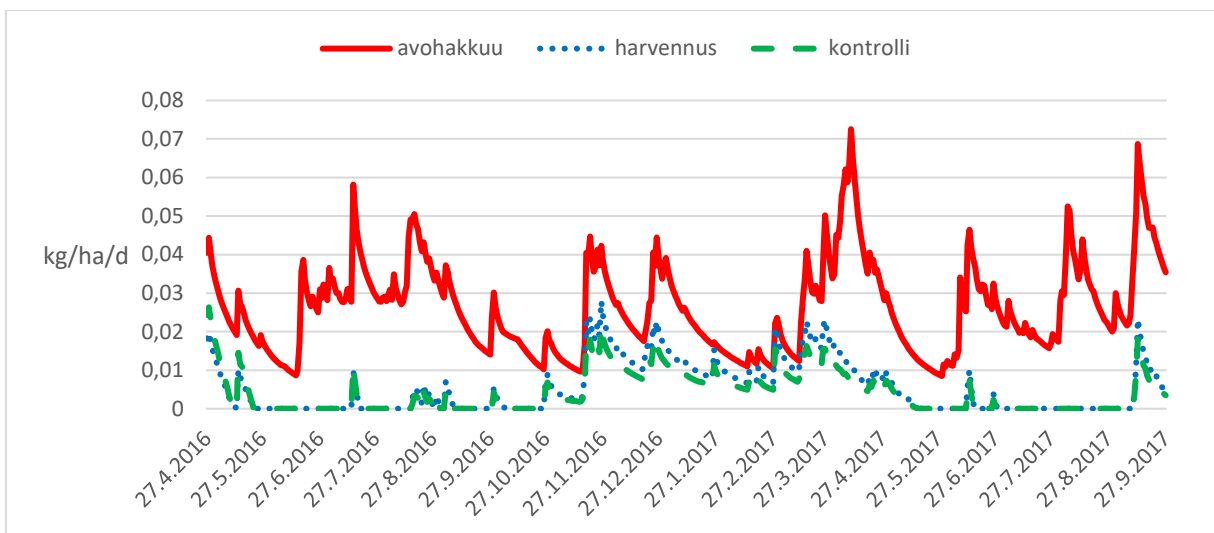
Erot koealojen DOC-päästöissä olivat suurimmat ensimmäisen kesäkauden aikana ja pienimmät talvikaudella. Avohakkuualan päästöt olivat lähes koko mittausjakson ajan muiden koealojen päästöjä korkeammat, kun taas harvennushakkuu ei vaikuttanut lisäävän DOC-päästöjä merkittävästi suhteessa kontrollialan päästöihin (kuva 27).

Avohakkuualalta tuleva typpikuormitus oli koko tarkastelujakson ajan muita koealoja korkeammalla tasolla. Pienimmillään erot avohakkuualan ja muiden koealojen välillä olivat talvikaudella, jolloin harvennusalan typpipäästöt nousivat hiukan kontrollialan päästöjä korkeammiksi (kuva 28).

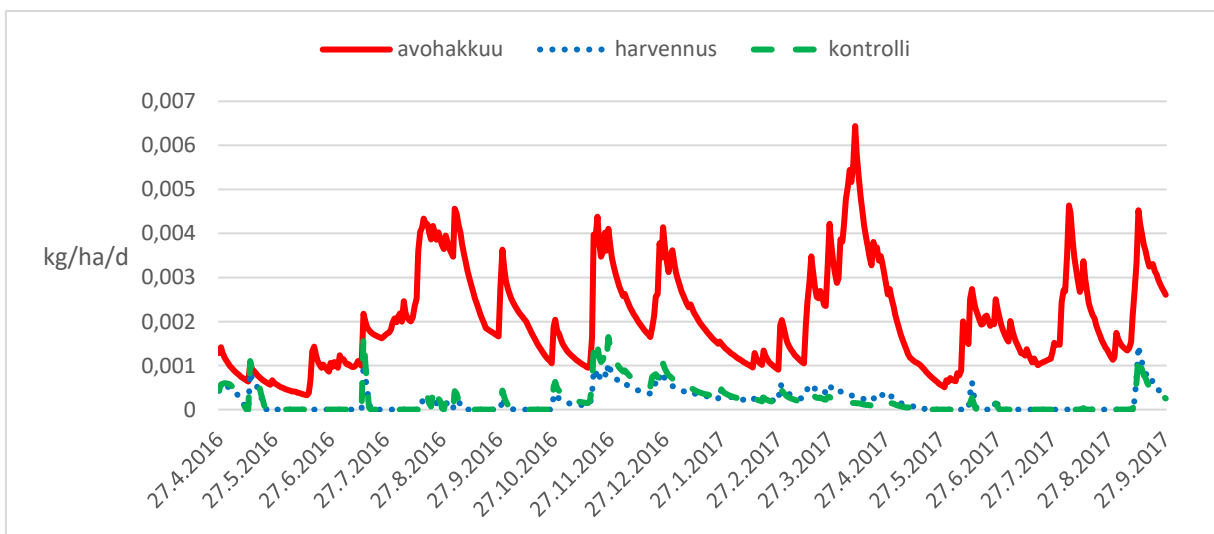
Pienemmästä valumaveden fosforipitoisuudesta huolimatta avohakkuualalta tuleva fosforikuormitus oli myös kesän 2016 ajan muita koealoja korkeampi alan suuremmasta valunnasta johtuen (kuva 12). Harvennusalan kokonaisfosforipäästöt olivat kontrollialan päästöjä pienemmät, mutta ero oli erittäin pieni. Fosforipäästöjen trendi on avohakkuualalla nouseva, vaikkakaan näin lyhyellä tarkastelulla siitä ei voida vetää varmoja johtopäätöksiä (kuva 29).



Kuva 27. DOC:n päivittäinen kuormitus koealoittain.

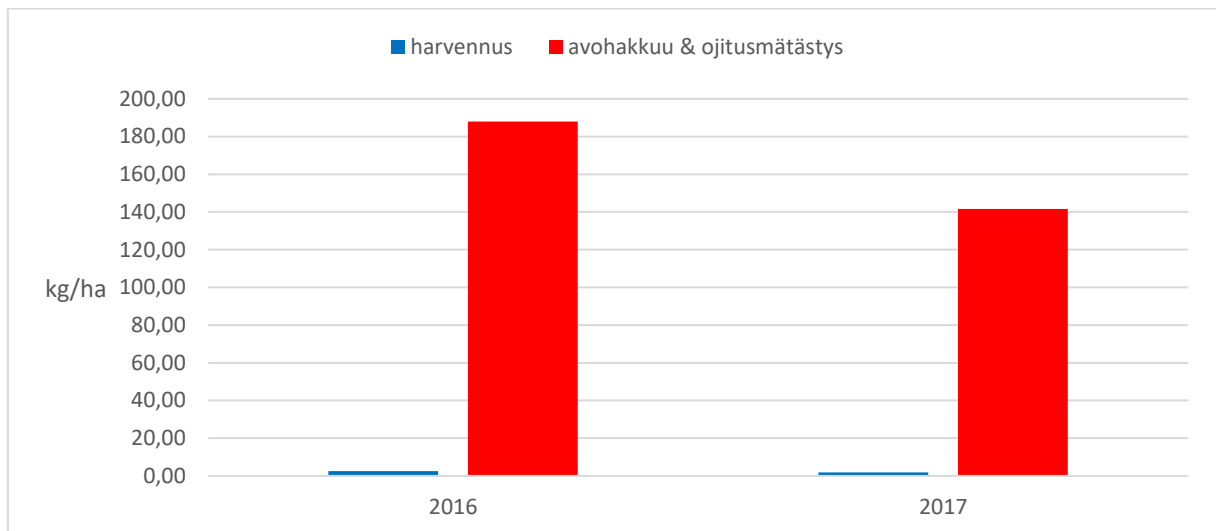


Kuva 28. Typhen päivittäinen kuormitus koealoittain.

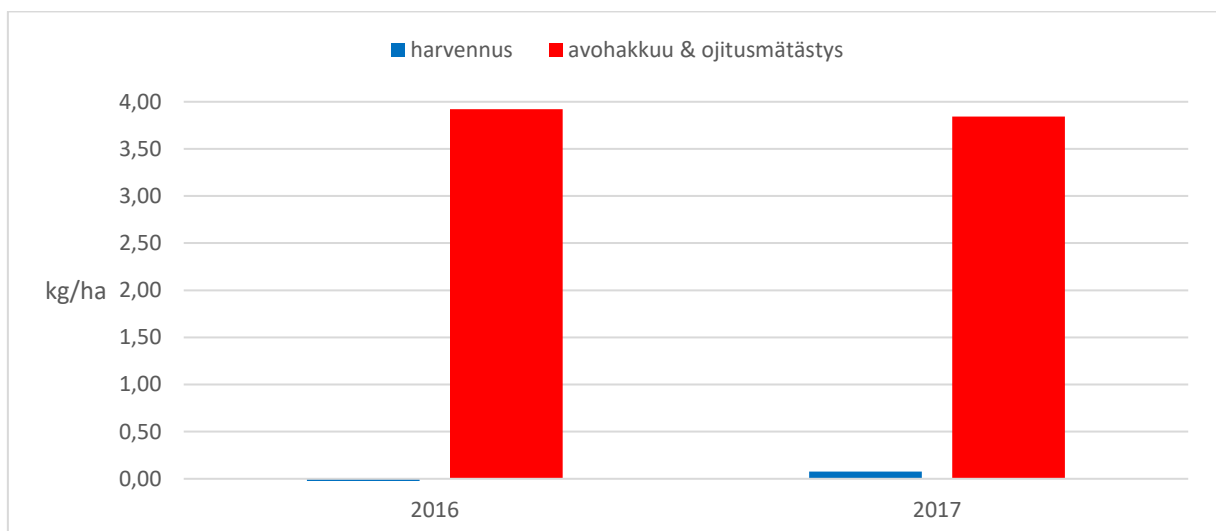


Kuva 29. Fosforin päivittäinen kuormitus koealoittain.

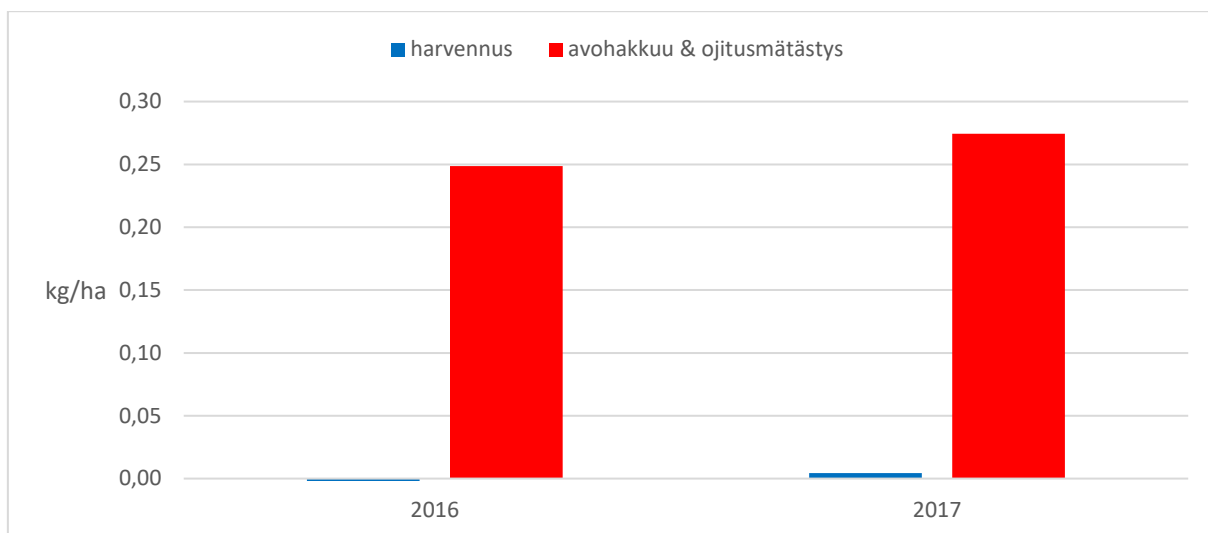
Kun käsittelyjen ominaiskuormituslukuja verrattiin keskenään kahdella tarkastelujaksoon sisältyvällä keskenään vertailukelpoisella ajanjaksolla, eli 27.4.–27.9. vuosina 2016 ja 2017, huomattiin DOC-päästöjen pienentyneen vuonna 2017 edellisvuoteen verrattuna, mutta niiden olleen avohakkuualalla edelleen hyvin korkealla tasolla (kuva 30). Typpipäästöt tippuivat vuoden 2017 tarkastelujaksolla noin 2 % edellisvuoteen verrattuna (kuva 31). Fosforipäästöt nousivat noin 8 % vuoteen 2016 verrattuna (kuva 32).



Kuva 30. Käsittelyjen DOC:n ominaiskuormitukset 27.4.–27.9. vuosina 2016 ja 2017.

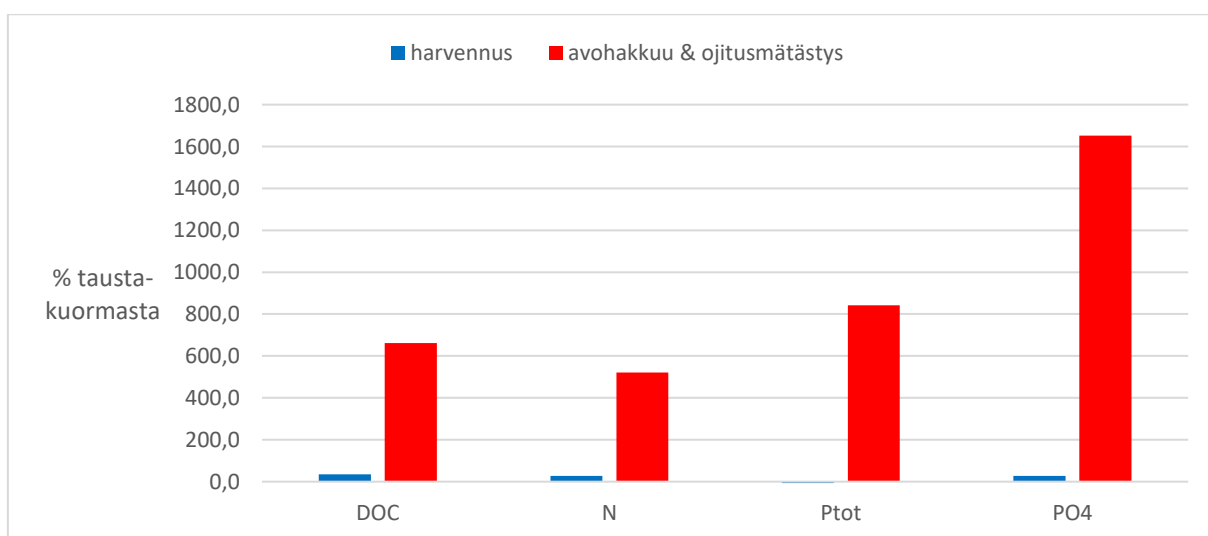


Kuva 31. Käsittelyjen typen ominaiskuormitukset 27.4.–27.9. vuosina 2016 ja 2017.

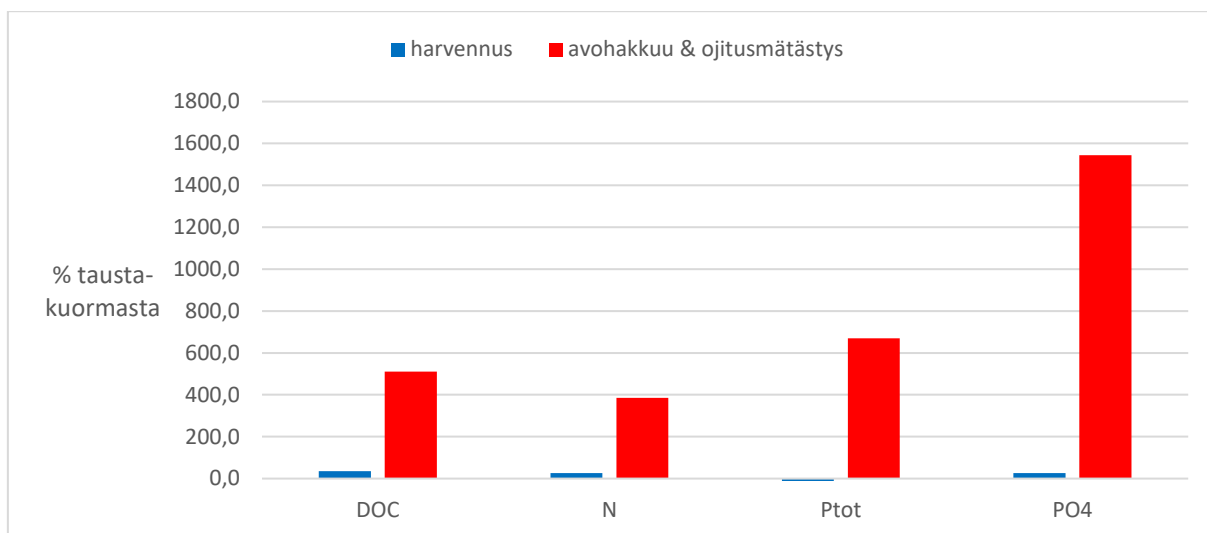


Kuva 32. Käsittelyjen fosforin ominaiskuormitukset 27.4.–27.9. vuosina 2016 ja 2017.

Tarkasteltaessa käsittelyjen ominaiskuormituksia, eli käsittelyistä aiheutuneita päästöjä suhteessa taustakuormitukseen, havaittiin harvennushakkuun vesistövaikutukset hyvin vähäisiksi verrattuna avohakkuuseen ja maanmuokkaukseen. Koko tarkastelujaksolla avohakkuualueen käsittelyn DOC-kuormitus oli noin 6,6-, typpikuormitus 5,2-, fosforikuormitus 8,4- ja fosfaattikuormitus 16,5-kertainen taustakuormitukseen nähden. Harvennushakkuu lisäsi DOC-, typpi- ja fosfaattipäästöjä noin 30 prosenttia, muttei lisännyt fosforin kokonaispäästöjä (kuva 33). Yhden vuoden tarkastelujaksolla avohakkuun ja ojitusmätästyksen ominaiskuormitus DOC:n osalta 5,1-, typen osalta 3,9-, fosforin osalta 6,7- ja fosfaatin osalta 15,4-kertainen suhteessa taustakuormaan. Harvennushakkuun osalta vastaavat luvut olivat 0,4, 0,3, 0 ja 0,3 (kuva 34).



Kuva 33. Käsittelyjen ominaiskuormitukset koko tutkimusjaksolla (27.4.2016–27.9.2017) suhteessa taustakuormitukseen (DOC = liuennut eloperäinen hiili, N = typpi, Ptot = kokonaisfosfori, PO4 = fosfaatti (PO_4^{3-})).



Kuva 34. Käsittelyjen ominaiskuormitukset yhden vuoden aikana (27.4.2016–26.4.2017) suhteessa taustakuormitukseen (DOC = liuennut eloperäinen hiili, N = typpi, Ptot = kokonaisfosfori, PO4 = fosfaatti (PO_4^{3-})).

4. TULOSTEN TARKASTELU

Koealojen käsittelyistä aiheutuvien vesistöpäästöjen, eli käsittelyjen ominaiskuormitusten tarkastelemiseksi niitä verrataan niin sanottuun luonnolliseen taustakuormitukseen eri käsittelemättömältä kontrollikoealalta tuleviin päästöihin. Tässä tutkimuksessa käytettävää taustakuormaa ei kuitenkaan voi pitää sikäli luonnollisena, että kontrollikoeala on ojitettu, ja sieltä tuleva ravinnekuormitus on siksi valmiiksi suurta. Tämä on linjassa uusien tutkimustulosten kanssa, joissa on havaittu vanhojen metsätalouden tarpeisiin ojitettujen soiden ravinnepäästöjen kasvaneen viimeisimpinä vuosikymmeninä (Nieminen ym. 2017a). Niemisen ym. (2017a) tutkimuksessa luonnontilaisten soiden valumaveden typpipitoisuus oli keskimäärin 412 µg/l (mikrogrammaa litrassa) ja fosforikuormitus 14 µg/l. Ojitettujen soiden valumavedessä typpeä oli keskimäärin 847 µg/l ja fosforia 31 µg/l. Tässä tutkimuksessa kontrollialan valumaveden keskimääräiseksi ravinnepitoisuudeksi saatiin 1676 µg typpeä ja 145 µg fosforia litraa kohti. Sekä typen että etenkin fosforin taustakuormitus on siis tutkimusalueella erittäin korkealla tasolla.

Kontrollialan DOC-kuormitus oli alhaisella tasolla luonnolliseen taustakuormitukseen nähden, mikäli vertailukohdaksi otetaan Niemisen ym. (2017b) käyttämä luonnontilaisten soiden taustakuormitus, joka on 120 kg/ha/y (Palviainen ym. 2016). Tässä tutkimuksessa yhden vuoden

tarkastelujaksolla 27.4.2016–26.4.2017 ojitetun mustikkaturvekangas II -tyypin taustakuormaksi saatiin noin 55 kg/ha/y. Ojitus näyttäisi siis mahdollisesti vähentäneen suolta tulevaa humuskuormitusta, mutta ravinnepäästöt ovat kasvaneet paljon. Toisaalta Palviaisen ym. (2016) mukaan luonnontilaisten soiden TOC (total organic carbon) -taustakuormituksen on havaittu olevan 15–140 kg/ha/y metsäisillä valuma-alueilla. Arvion suuresta vaihteluvälistä johtuen ojituksen DOC-päästöjä vähentävä vaikutus jää epäselväksi ilman käyttökelpoista luonnontilaista verrokkikoealaa.

Tämän työn tulokset vahvistavat aiempien tutkimusten tuloksia rehevien turvekankaiden avohakkuiden korkeista DOC-päästöistä. Niiden havaittiin olevan karkeasti samaa suuruusluokkaa kuin Niemisen ym. (2017b) tutkimuksessa, ottaen huomioon koeasetelman erilaisuus. Kun Niemisen ym. (2017b) mukaan minerotrofisten turvekankaiden hakkuut yli kaksinkertaistivat tutkimusalueen DOC-päästöt soiden luonnontilaiseen kuormitukseen nähden, tässä tutkimuksessa avohakkuun päästöt olivat luonnontilaisten soiden taustakuormaan nähden noin 2,8 -kertaiset ensimmäisen vuoden aikana, kun käytettiin samaa 120 kg/ha/y arviota luonnollisesta taustakuormasta. Tässä tutkimuksessa koealojen valuma-alue koostui yksinomaan turvekan-kaasta, mikä selittää korkeampia päästöjä. Avohakkuun vaikutus oli peräti 6,6-kertainen, kun sitä verrattiin kontrollialalla havaittuun, ojitetun turvekankaan taustakuormaan. Käytettävän taustakuorman suuruudella on suuri vaikutus päästöjen kokoluokkaa suhteutettaessa.

Myös typen päästöt avohakkuualalta olivat odotetusti korkeat. Niemisen ym. (2017b) mukaan vertailtaessa avohakkuiden vesistöpäästöjä mineraalimaan kasvupaikoilla ja turvekankailla, erityisesti typen päästöt ovat turvekankailla suurempia, johtuen turpeen huomattavasti mineraalimaata korkeammasta typpipitoisuudesta. Aiemmissä tutkimuksissa tuottavien turvekankaiden avohakkuiden onkin havaittu aiheuttavan suuria typpipäästöjä (Lundin 1999, 2000, Nieminen ym. 2017b).

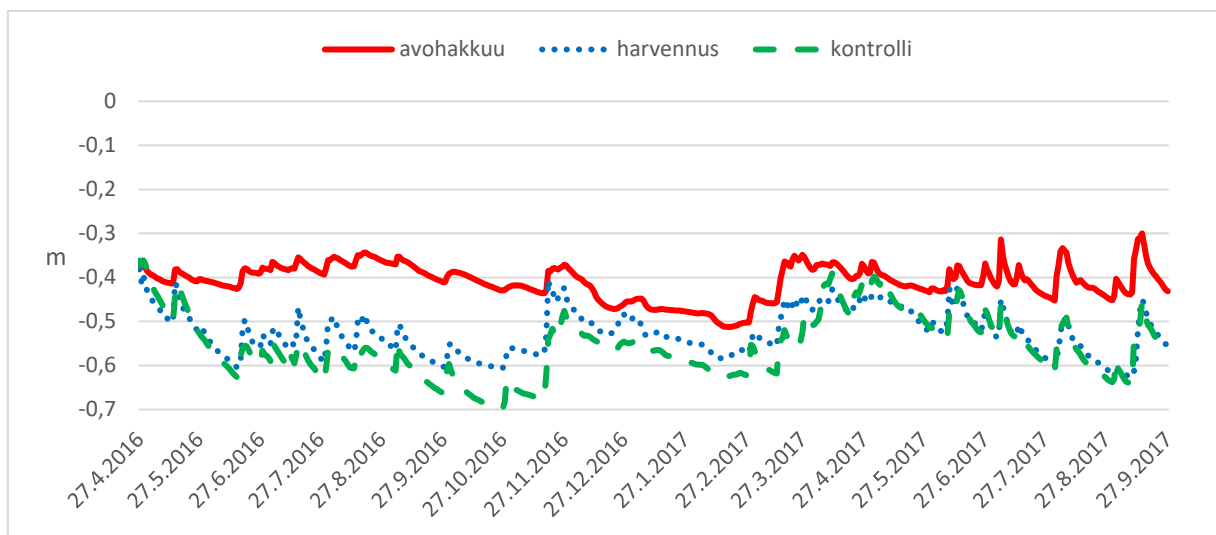
Aiemmassa tutkimuksessa avohakkuun aiheuttaman turpeen vedenpinnan nousun on havaittu lisäävän fosforipäästöjä vähäravinteisilta turvemailta (Kaila ym. 2014, Nieminen 2003), joilla liukoisen fosforin pitoisuus on korkea pintaturpeessa, josta se huuhtoutuu nousevan vedenpinnan myötä (Nieminen ym. 2017b). Niemisen ym. (2017b) mukaan tutkimukset eivät ole tähän mennessä osoittaneet minerotrofisten eli runsasravinteisten turvemaiden hakkuiden li-

säävän fosfaattipäästöjä (Lundin 1999, Nieminen 2004, Kaila ym. 2015), mutta ennallistamiskokeiden tulokset ovat osoittaneet sen olevan mahdollista (Forsmann & Kjaergaard 2014, Kaila ym. 2016). Fosforin huuhtoutumisherkkyttä minerotrofisilla turvemailla voi lisätä erityisesti fosforin korkea pitoisuus turpeessa suhteessa raudan pitoisuuteen ($\text{Fe/P} < 10$) (Zak ym. 2010, Kaila ym. 2016). Tässä tutkimuksessa avohakkuun ja ojitusmätästyksen havaittiin aiheuttavan erittäin korkeat fosfori- ja fosfaattipäästöt minerotrofisella mustikkaturvekangas II -tyypin kasvupaikalla.

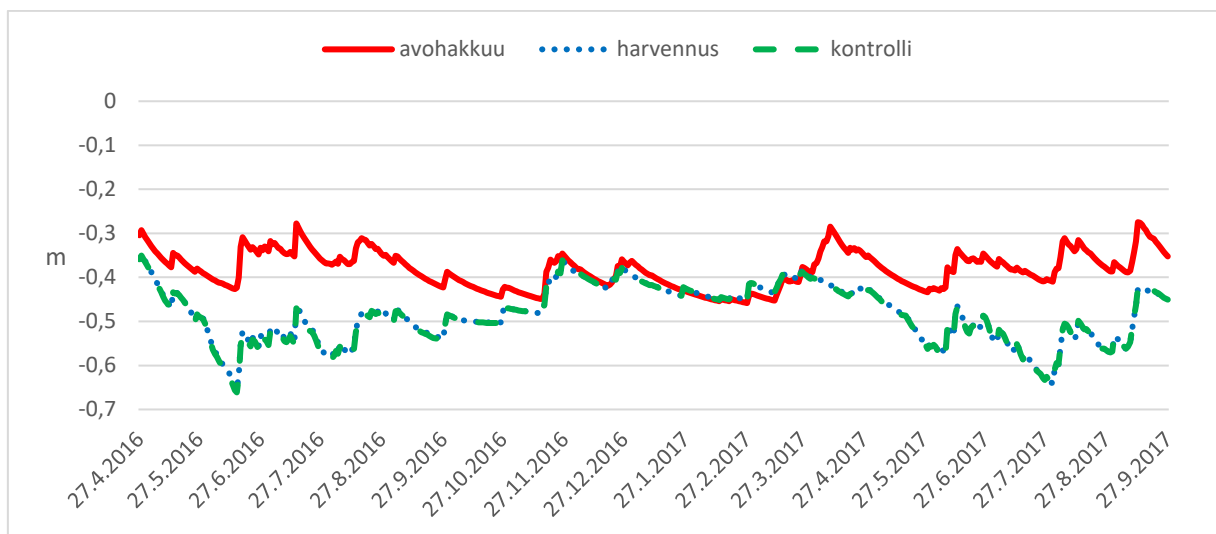
Todenperäisen ja tarkan kokonaiskuvan saamiseksi eri käsittelyjen vesistö päästöistä täytyisi niitä tarkastella pitkällä aikavälillä. Pitkällä aikavälillä vesistöjensuojelun näkökulmasta jatkuvapeitteisen kasvatuksen mahdolliseksi haittapuoleksi jaksolliseen kasvatukseen verrattuna voidaan laskea hakkuiden tiheämpi toistuvuus. Jos useammin toistuvat hakkuut nostaisivat kokonaispäästöt avohakkuun ja maanmuokkauksen tasolle, ei jatkuvapeitteisestä kasvatuksesta olisi vesiensuojelussa todellista hyötyä, paitsi ehkä jakamalla kuormitusta ajan suhteen tasaisemmaksi ja välttämällä siten äkillisiä kuormituspiikkejä. Tämän tutkimuksen perusteella on kuitenkin epätodennäköistä, että tiheästäkin toistuvat harvennushakkuut riittäisivät nostamaan päästöt lähelle avohakkuun ja maanmuokkauksen päästöjen tasoa. Laskennallisesti yhden jaksollisen kasvatuksen kierron (80 vuotta) aikana harvennuksia ehdittäisiin tehdä korkeintaan kuusi, mikäli niitä tehtäisiin 15 vuoden välein. Tämän työn tarkastelujaksolla DOC- ja typipäästöt olivat jaksollisen mallin käsittelyllä noin 19-kertaiset jatkuvapeitteisen mallin käsittelyyn verrattuna, eikä harvennus aiheuttanut fosforipäästöjä. Mallien aiheuttamien päästöjen välisiä eroja pitkällä aikavälillä tarkastelevia tutkimuksia kuitenkin tarvitaan tarkempien tulosten saamiseksi.

Käsittelyjen ravinnepäästöjen osalta yksi tuloksia mahdollisesti vääristävä tekijä on kontrollikoealan harvennuskoealaa suurempi taustakuormitus. Jos vuoden 2015 mittausjaksoa olisi käytetty kalibrointikautena, ja tehty sen perusteella harvennushakkuun päästöjen tason korjaus, olisi harvennushakkuun ominaiskuormitus ollut jonkin verran suurempi. Eri käsittelyjen säilymiseksi vertailukelpoisina olisi korjaus pitänyt kuitenkin tehdä myös avohakkuun päästöille, mikä ei ollut mahdollista. Kalibrointikaudesta olisi lisäksi tullut suositeltua huomattavasti lyhyempi, eikä se olisi kattanut edes kokonaista vuotta.

Koealojen valuntojen simulointi onnistui turpeen vedenpinnan syvyyksiin perustuvan vertailun perusteella kohtuullisen hyvin huolimatta siitä, että käytetty säädata ei ollut peräisin tismalleen samalta alueelta. Simuloidut vedenpinnat olivat kuitenkin kaikilla koealoilla korkeammalla kuin mitatut, mikä voi tarkoittaa, että kaikkien koealojen valunnat ovat jossain määrin yliarvioita. Parhaiten simulointi onnistui vedenpinnan syvyyksien vertailun perusteella avohakkuu- alalla, seuraavaksi parhaiten harvennusalalla, ja suurin yliarvio oli kontrollialan simulaatiossa. Suurin ongelma oli, ettei simuloinnissa syntynyt kontrolli- ja harvennuskoealojen välille juuri-kaan eroa, vaikka sellainen oli mittauksissa havaittavissa (kuvat 35 ja 36). Ero oli pieni, mutta sen perusteella kontrollikoealan valunta oli todellisuudessa yli puolet tutkimusajanjaksosta jonkin verran harvennuskoealaa pienempi.



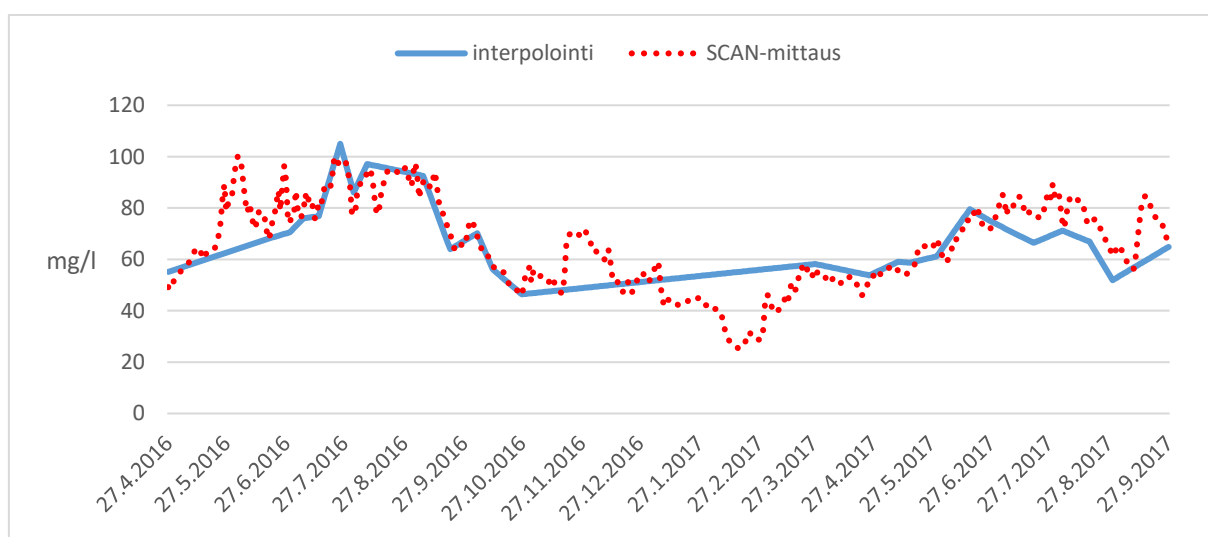
Kuva 35. Turpeen vedenpinnan mitatut keskimääräiset syvyydet koealoilla.



Kuva 36. Turpeen vedenpinnan simuloidut keskimääräiset syvyydet koealoilla.

Aikavälillä, jolla turpeen vedenpinta oli mittausten perusteella kontrollikoealalla harvennuskoealaa syvemmällä ja valunta siten pienempi, myös sekä valumaveden DOC- että typpipitoisuus oli harvennusalaa pienempi. Voidaan siis olettaa, että kontrollialan liuenneen hiilen ja typen päästöt suhteessa harvennusalaan olivat jonkin verran pienemmät kuin tämän tutkimuksen tulosten perusteella, ja näin harvennushakkuusta aiheutunut päästö suhteessa taustakuorma suurempi. Kuitenkin avohakkuualaan verrattuna muiden koealojen väliset erot turpeen vedenpinnan syvyyden suhteen olivat mittaustenkin perusteella varsin pienet.

Näytteenottopäivien välisten ajanjaksojen päästöjen mallintaminen interpoloimalla oli työssä merkittävä epävarmuustekijä, sillä tutkimusjakson talvikaudella vesinäytteet puuttuivat kokonaan usean kuukauden ajalta. Jatkuvatoiminen liuenneen hiilen mittaustapa SCAN-anturilla tarjosi hyvän mahdollisuuden tämän tekijän merkityksen arviointiin. Kun SCAN-mittauksen perusteella laskettua kokonaiskuormitusta verrattiin interpoloimalla laskettuun kuormitukseen, niiden välinen ero oli erittäin pieni. Interpolointi johti vain 0,6 % regressiolla korjattua SCAN-mittausta suurempaan DOC-kokonaiskuormitukseen harvennus- ja kontrollikoealoilta. Talvikaudella 27.10. – 28.3. interpoloinnista seurannut epätarkkuus oli odotetusti suurinta (kuva 37). Vaikka interpolointi ei vaikuttaisi aiheuttaneen DOC-kuormituksen suhteen suurta virhettä tuloksiin, on mahdollista, että ravinteiden osalta tilanne on toinen.



Kuva 37. Valumaveden DOC-pitoisuus mittapadolla interpoloituna vesinäytteiden välille ja regressiolla korjatun SCAN-mittauksen tuloksena.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämä tutkimus vahvistaa käsitystä siitä, että vanhat ojitusalueet ovat merkittäviä vesistöjen kuormituksen lähteitä. Myös tutkimuksen hypoteesi, jonka mukaan avohakkuu ja maanmuokaus aiheuttavat harvennushakkuuta suuremmat vesistöpäästöt lyhyellä aikavälillä, osoittautui paikkansapitäväksi.

Avohakkuu ja ojitusmätästys aiheuttivat erittäin suuret vesistöpäästöt. Ne olivat tutkimusjaksolla DOC:n osalta 660 %, typen 520 %, kokonaisfosforin 840 % ja fosfaatin osalta 1650 % suhteessa taustakuormaan. Tulosten perusteella mustikkaturvekankaiden avohakkuuta ja maanmuokkausta voidaankin pitää vesistöille hyvin haitallisina toimenpiteinä, etenkin kun otetaan huomioon, ettei tässä työssä tarkasteltu kiintoainekuormitusta, jota ojitus ja sitä vastaavat maanmuokkaustoimenpiteet lisäävät.

Avohakkuukoealan korkeat DOC-päästöt tarkoittavat avohakkuun ja maanmuokkauksen lisäävän vesistöjen humuskuormitusta, ja siten samennemista ainakin lyhyellä aikavälillä, ja valumaveden matala pH-arvo näiden toimenpiteiden myös happamoittavan vesistöjä.

Myös avohakkuualan typpipäästöt olivat suuret. Typpipäästöillä on merkitystä varsinkin Itämeren rehevöitymiskehitykselle, koska typpi on meriekosysteemien minimiravinne. Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkon tulosten mukaan metsätalous on typpikuormittajana jo lähes maatalouden luokkaa. Metsätalouden typpipäästöt voivat olla Suomessa vuosittain jopa 25 000 tonnia, kun ne maataloudella ovat 33 000 tonnia (Ilkka 30.9.2018).

Avohakkuu ja ojitusmätästys lisäsivät suhteellisesti eniten fosfori- ja etenkin fosfaattipäästöjä. Fosforin puute on useimmiten sisävesistöjen rehevöitymistä rajoittava tekijä eli se on sisävesiekosysteemien minimiravinne. Fosfaatissa fosfori on yhteyttävälle vesieliölle suoraan käyttökelpoisessa muodossa. Tämä tarkoittaa, että rehevien turvemaiden avohakkuut voivat aiheuttaa nopeita muutoksia sellaisissa sisävesistöissä, joiden valuma-alueilla niitä toteutetaan suhteellisesti paljon.

Harvennushakkuun aiheuttama vesistökuormitus oli avohakkuuseen verrattuna erittäin pientä, kunkin ositteen osalta noin kolmasosa taustakuormasta, paitsi kokonaisfosforin osalta, jonka määrässä havaittiin pieni lasku. Harvennushakkuu oli metsikön vesitalouden kannalta mahdollisesti liian voimakas, koska puustoa jäi harvennusalalle noin 60 m³/ha. Suositeltu määrä puustoa riittävän haihdutuksen takaamiseksi olisi 120–150 m³/ha (Sarkkola ym. 2010, 2012). Liian voimakas harvennus ilman kunnostusojitusta saattaa aiheuttaa puuston säilymiselle ongelmia tulevaisuudessa, mutta tämän työn tulosten perusteella voimakaskaan harvennus ei aiheuttanut merkittäviä vesistöpäästöjä lyhyellä aikavälillä.

Mikäli runsaspuustoisilla, vanhoilla ojitusalueilla ei tehdä hakkuita, pysyy puuston aiheuttama haihdutus korkealla tasolla ja turpeen hajoaminen jatkuu, mikä saattaa edelleen kasvattaa etenkin ravinnepäästöjä. Periaatteessa on siis mahdollista, että varsinkin pitkällä aikavälillä harvennushakkuilla voi olla myös positiivisia vesistövaikutuksia, mikäli ne hidastavat turpeen hajoamista nostamalla turpeen vedenpintaa, mutta eivät liikaa niin, että ne lisäävät päästöjä merkittävästi lyhyellä aikavälillä. Tämä on selkeä tutkimustarve, johon on syytä panostaa lähivuosina.

Tämän työn tulosten perusteella jatkuvapeitteistä kasvatusta voidaan suositella käytettäväksi menetelmäksi rehevien turvekankaiden metsätaloudessa, mikäli vesiensuojelu tahdotaan aidosti huomioida. Turvemaiden avohakkuut ja maanmuokkaus vaikuttavat tulosten valossa aiheuttavan suuria riskejä vesistöjen ekologiselle tilalle. Turvemaiden metsätalouden vesiensuojelun kehittämiseksi vastaavia tutkimuksia pidemmällä seurantajaksolla tulisi toteuttaa kattavasti eri ravinteisuusasteita edustavilla turvemaidella, ja niihin tulisi sisällyttää voimakkuudeltaan erilaisten hakkuiden ja maanmuokkaustoimenpiteiden vertailua. Erityisesti fosforipäästöjen syntymekanismeihin on syytä kiinnittää lisää huomiota, sillä tämän työn perusteella avohakkuun ja ojitusmätästyksen aiheuttamat fosfori- ja etenkin fosfaattipäästöt olivat suhteessa taustakuormaan kaikkein merkittävin päästöosite, toisin kuin aiemmat tutkimukset ovat antaneet rehevien turvekankaiden suhteen ymmärtää. Tarkempien tulosten saamiseksi ravinnepäästöjen suuruusluokasta on tutkittavien alueiden vesinäytteenottoväliä tihennettävä, ja näytteitä tulee ottaa kaikkina vuodenaikoina.

Kirjallisuus

- Agestam, E. 1985. Summary: A growth simulator for mixed stands of pine, spruce and birch in Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Yield Research. Raport 15. 150 s.
- Ahtiainen, M. & Huttunen, P. 1999. Long-term effects of forestry managements on water quality and loading in brooks. *Boreal Environment Research* 4: 101–114.
- Alatalo, M. 2000. Metsätaloustoimenpiteistä aiheutunut ravinne- ja kiintoainekuormitus. *Suomen ympäristö* 381: 1–64.
- Arvola, L., Salonen, K., Kankaala, P., & Lehtovaara, A. 1992. Vertical distribution of bacteria and algae in a steeply stratified humic lake under high grazing pressure from *Daphnia longispina*. *Hydrobiologia* 229: 253–269.
- Assmuth, A., Ramo, J. & Tahvonen, O. 2018. Economics of size-structured forestry with carbon storage. *Canadian Journal of Forest Research* 48 (1): 11–22.
- Bishop, K., Allan, C., Bringmark, L., Garcia, E., Hellsten, S., Högböm, L., Johansson, K., Lomander, A., Meili, M., Munthe, J., Nilsson, M., Porvari, P., Skjällberg, U., Sørensen, R., Zetterberg, T. & Åkerblom, S. 2009. The effects of forestry on Hg bioaccumulation in nemoral/boreal waters and recommendations for good silvicultural practice. *Ambio* 38 (7): 373–380.
- Brockerhoff, E., Barbaro, L., Castagnèyrol, B., Forrester, D., Gardiner, B., González-Olabarria, J., Lyver, P., Meurisse, N., Oxbrough, A., Taki, H., Thompson, I., van der Plas, F. & Jactel, H. 2017. Forest Biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodivers Conserv* 26: 3005–3035.
- Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti, E., Kortelainen, P., Koskiahho, J., Leinonen, A., Nevalainen, R., Piirainen, S., Saarelainen, J., Sarkkola, S. & Vuollekoski, M. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. *Suomen Ympäristö* 10. 33 s.
- Finlex 1085/2013. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20131085>
- Forsmann, D.M., Kjaergaard, C. 2014. Phosphorus release from anaerobic peat soils during convective discharge – effect of soil Fe:P molar ratio and preferential flow. *Geoderma* 223–225: 21–32.
- Frivold, L.H. 1982. Summary: Stand structure and yield of mixed stands of birch (*Betula verrucosa* Ehrh., *B. pubescens* Ehrh.) and spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in South East Norway. *Meldinger fra Norges Landbrukshøgskole* 61 (18): 1–108.
- Hannerz, M. & Hånell, B. 1997. Effects on the flora in Norway spruce forests following clear-cutting and shelterwood cutting. *Forest Ecology and Management* 90: 29–49.
- Hanski, I. 2015. Habitat fragmentation and species richness. *Journal of Biogeography* 42 (5): 989–993.

Hirvonen, P. 2016. Kalojen elohopeapitoisuudet Joensuun, Kiteen, Tohmajärven ja Rääkkylän vesialueilla. Pohjois-Karjalan Ympäristöterveyden julkaisut 1/2016. Pohjois-Karjalan Ympäristöterveys/terveysvalvonta. 72 s.

Hokkanen, T. J. & Ieshko, E. P. 1995. Karelian biosphere reserve studies. North Karelian biosphere reserve, Ilomantsi. 267 s.

Ilkka 30.9.2018. Lukijoilta: Ojituksen vesistövaikutukset ovat edelleen suuret (Mika Nieminen, johtava tutkija, Luonnonvarakeskus). Julkaisun osoite: <https://www.ilkka.fi/mielipide/yleisolta/lukijoilta-ojituksen-vesistovaikutukset-ovat-edelleen-suuret-1.2750702>

Ilvessalo, Y. 1937. Perä-Pohjolan luonnonnormaalien metsiköiden kasvu ja kehitys. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 24: 1–168.

Jactel, H., Bauhus, J., Boberg, J., Bonal, D., Castagneyrol, B., Gardiner, B., Gonzalez-Olabarria, JR., Koricheva, J., Meurisse, N. & Brockerhoff, EG. 2017. Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. *Current Forestry Reports* 3: 223–243.

Joensuu, S., Ahti, E. & Vuollekoski, M. 2002. Effects of ditch maintenance on the chemistry of run-off water from peatland forests. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 238–247.

Joensuu, S., Vuollekoski, M. & Karosto, K. 2006. Kunnostusojitusten pitkäaikaisvaikutuksia. Kenttämies, K. & Mattsson, T. (toim.). *Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö* 816: 83–90.

Kaakinen, E., Kokko, A., Aapala, K., Autio, O., Eurola, S., Hotanen, J.-P., Kondelin, H., Lindholm, T., Nousiainen, H., Rehell, S., Ruuhijärvi, R., Sallantausta, T., Salminen, P., Tahvanainen, T., Tuominen, S., Turunen, J., Vasander, H. & Virtanen, K. 2018. Suot. Julk.: Kontula, T. & Raunio, A. (toim.). *Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja – Osa I: Tulokset ja arvioinnin perusteet. Suomen ympäristökeskus & ympäristöministeriö, Helsinki. Suomen ympäristö* 5/2018. s. 117–170.

Kaila, A., Asam, Z.-u.-Z., Koskinen, M., Uusitalo, R., Smolander, A., Kiikkilä, O., Sarkkola, S., O'Driscoll, C., Kitunen, V., Fritze, H., Nousiainen, H., Tervahauta, A., Xiao, L., Nieminen, M. 2016. Impact of re-wetting of forestry-drained peatlands on water quality – a laboratory approach assessing the release of P, N, Fe and dissolved organic carbon. *Water Air Soil Pollution* 227: 292.

Kaila, A. & Ihalainen, A. 2014. *Metsätilastollinen vuosikirja 2014. Metsäntutkimuslaitos. Tammerprint Oy.* 426 s.

Kaila, A., Laurén, A., Sarkkola, S., Koivusalo, H., Ukonmaanaho, L., Xiao, L., Asam, Z.-u.-Z., O'Driscoll, C., Nieminen, M. 2015. The effect of clear-felling and harvest residue removal on nitrogen and phosphorus export from drained Norway spruce mires in southern Finland. *Boreal Environment Research* 20: 693–706.

Kaila, A., Sarkkola, S., Laurén, A., Ukonmaanaho, L., Koivusalo, H., Xiao, L., O'Driscoll, C., Asam, Z.-u.-Z., Tervahauta, A., Nieminen, M. 2014. Phosphorus export from drained Scots pine mires after clear-felling and bioenergy harvesting. *Forest Ecology and Management* 325: 99–107.

Kestävän metsätalouden määräaikainen rahoituslaki 2015/593. Annettu Helsingissä 23.01.2015. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150034>.

Kortelainen, P. 1993. Content of total organic carbon in Finnish lakes and its relationship to catchment characteristics. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 50 (7): 1477–1483.

Kortelainen, P. 1999. Occurrence of humic waters. Keskitalo, J. & Eloranta, P. (toim.). *Limnology of Humic Waters*: 43–57. Backhuys Publishers, Leiden. 284 s.

Kukkonen, M. 2012. Opas metsätalouden vesistökuormituksen seurantaan. Metlan työraportteja 245.

Laine, J., Vasander, H., Hotanen, J.-P., Nousiainen, H., Saarinen, M. & Penttilä, T. 2012. Suotyypit ja turvekankaat – opas kasvupaikkojen tunnistamiseen. *Metsäkustannus*. 160 s.

Linden, M. & Agestam, E. 2003. Increment and yield in mixed and monoculture stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* based on an experiment in Southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 18: 155–162.

Lundin, L. 1999. Effects on hydrology and surface water chemistry of regeneration cuttings in peatland forests. *International Peat Journal* 9: 118–126.

Lundin, L. 2000. Water environment care at peatland forestry practices. Rochefort, L. & Daigle, J.-Y. (editors). *Sustaining our peatlands. Proceedings of the 11th International Peat Congress, Quebec City, Canada August 6–12, 2000. Vol. II*: 952–961.

Lähde, E., Laiho, O. & Norokorpi, Y. 2001. Structure transformation and volume increment in Norway spruce-dominated forests following contrasting silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management* 151(1–3): 133–138.

Metsäkeskus. 2017. Metsänhoitorästit ovat kasvaneet. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/uutiset/metsanhoitorastit-ovat-kasvaneet>. [Viitattu 18.01.2018].

Miettinen, J. 2010. Metson elinympäristöt ja niiden huomioon ottaminen talousmetsissä. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2010: 309–314.

MMM (Maa- ja metsätalousministeriö) 2011. Ehdotus soiden ja turvemaiden kestävän ja vastuullisen käytön ja suojelun kansalliseksi strategiaksi. 2011. Soiden ja turvemaiden kansallista strategiaa valmistellut työryhmä. Työryhmämuistio, MMM 2011:1. 159 s.

Moilanen, M., Issakainen, J. & Vesala, H. 2011. Metsän uudistaminen mustikkaturvekankaalla – luontaisesti vai viljellen? Metlan työraportteja 192. Saatavilla: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp192.htm>

Nieminen, M. 2003. Effects of clear-cutting and site preparation on water quality from a drained Scots pine mire in southern Finland. *Boreal Environment Research* 8: 53–59.

Nieminen, M. 2004. Export of Dissolved Organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus Following Clear-Cutting of Three Norway Spruce Forests Growing on Drained Peatlands in Southern Finland. *Silva Fennica* 38 (2): 123–132.

Nieminen, M., Ahti, E., Koivusalo, H., Mattsson, T., Sarkkola, S. & Laurén, A. 2010. Export of suspended solids and dissolved elements from peatland areas after ditch network maintenance in south-central Finland. *Silva Fennica* 44 (1): 39–49.

Nieminen, M., Ahti, E., Nousiainen, H., Joensuu, S. & Vuollekoski, M. 2005. Does the use of riparian buffer zones in forest drainage sites to reduce the transport of solids simultaneously increase the export of solutes? *Boreal Environment Research* 10: 191–201.

Nieminen, M., Koskinen M., Sarkkola S., Laurén, A., Kaila A., Kiikkilä, O., Nieminen, T. & Ukonmaanaho, L. 2015. Dissolved Organic Carbon Export from Harvested Peatland Forests with Differing Site Characteristics. *Water Air Soil Pollution* 226, 181.

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

Nieminen, M., Sarkkola, S. & Laurén, A. 2017b. Impacts of forest harvesting on nutrient, sediment and dissolved organic carbon exports from drained peatlands: A literature review, synthesis and suggestions for the future. *Forest Ecology and Management* 392: 13–20.

Ojanen, P., Minkkinen, K. & Penttilä, T. 2012. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201–208.

Palviainen, M. & Finér, L. 2013. Kunnostusojituksen vaikutus vesistöjen humuskuormitukseen. *Kopijyvä*, Jyväskylä. 48 s.

Palviainen, M., Laurén, A., Launiainen, S. & Piirainen, S. 2016. Predicting the export and concentrations of organic carbon, nitrogen and phosphorus in boreal lakes by catchment characteristics and land use: a practical approach. *Ambio* 45: 933–945.

Pukkala, T., Laiho, O. & Lähde, E. 2016. Continuous cover management reduces wind damage. *Forest Ecology and Management* 372: 120–127.

Pukkala, T., Lähde, E. & Laiho, O. 2009. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. *Forest Ecology and Management* 258 (3): 207–216.

Pukkala, T., Lähde, E. & Laiho, O. 2011. Metsän jatkuva kasvatus. Joen Forest Program Consulting, Joensuu. 229 s.

Pukkala, T., Lähde, E. & Laiho, O. 2013. Species interaction in the dynamics of even- and uneven-aged boreal forests. *Journal of Sustainable Forestry* 32: 1–33.

Päivänen, J. 1990. Suometsät ja niiden hoito. Kirjayhtymä, Helsinki. 231 s.

Rouvinen, S., Kuuluvainen, T. & Siitonen, J. 2002. Tree mortality in a *Pinus sylvestris* dominated

boreal forest landscape in Vienansalo wilderness, eastern Fennoscandia. *Silva Fennica* 36 (1): 127–147.

Salemaa, M. 2000. *Vaccinium myrtillus*. Mustikka. Reinikainen, A., Mäkipää, R., Vanha-Majamaa, I. & Hotanen, J.-P. (toim.). Kasvit muuttuvassa metsäluonnossa. Tammi, Helsinki. 384 s. 128–130.

Salonen, K., Arvola, L. & Rask, M. 1984. Autumnal and vernal circulation of small forest lakes in Southern Finland. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung der Limnologie* 22: 103–107.

Sarkkola, S., Hokka, H., Ahti, E., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2012. Depth of water table prior to ditch network maintenance is a key factor for tree growth response. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27 (7): 649–658.

Sarkkola, S., Hokka, H., Koivusalo, H., Nieminen, M., Ahti, E., Päivänen, J. & Laine, J. 2010. Role of tree stand evapotranspiration in maintaining satisfactory drainage conditions in drained peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 40 (8): 1485–1496.

Sarkkola, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Kortelainen, P., Mattsson, T., Palviainen, M., Piirainen, S., Starr, M. & Finér, L. 2009. Trends in hydrometeorological conditions and stream water organic carbon in boreal forested catchments. *Science of the Total Environment* 408: 92–101.

Shorohova, E., Kuuluvainen, T., Kangur, A. & Jöngiste, K. 2009. Natural stand structures, disturbance regimes and successional dynamics in the Eurasian boreal forests: a review with special reference to Russian studies. *Annals of Forest Science* 66. 20 s.

Silferberg, K. 1998. The leaching of nutrients from ash- and PK-fertilised peat. *Suo - Mires and Peat* 49 (4): 115–123.

Sillanpää, P., Bilaletdin, Ä., Kaipainen, H., Frisk, T. & Sallantausta, T. 2006. Metsätalouden aiheuttaman kuormituksen laskentamenetelmä. Suomen ympäristö 817. Tampereen yliopistopaino Oy. 44 s.

Sutela, T., Olin, M., Vehanen, T. & Rask, M. 2007. Hajakuormituksen vaikutukset järvien ja jokien kalastoon ja ekologiseen tilaan. Kala- ja riistaraportteja nro 411. Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos. 35 s.

Tulonen, T. 2004. Role of allochthonous and autochthonous dissolved organic matter (DOM) as a carbon source for bacterioplankton in boreal humic lakes. Faculty of Biosciences, Department of Biological and Environmental Sciences, University of Helsinki, Academic Dissertation in Hydrobiology. 32 s.

Turtiainen, M. 2015. Modelling bilberry and cowberry yields in Finland: different approaches to develop models for forest planning calculations. *Dissertationes Forestales* 185. 56 s.

Valkeapää, A., Paloniemi, R., Vainio, A., Vehkalahti, K., Helkama, K., Karppinen, H., Kuuluvainen, J., Ojala, A., Rantala, T. & Rekola, M. 2009. Suomen metsät ja metsäpolitiikka – kansalaisten näkemyksiä. Tutkimusraportteja 55. Helsingin yliopisto, Metsäekonomian laitos, Helsinki. 40 s.

Valkonen, S. 2017. Metsän jatkuvasta kasvatuksesta. Luonnonvarakeskus. Metsäkustannus Oy. 125 s.

Vuorenmaa, J., Forsius, M. & Mannio, J. 2006. Increasing trends of total organic carbon concentrations in small forest lakes in Finland from 1987 to 2003. *Science of the Total Environment* 365: 47–65.

Williamson, C.E., Morris, D.P., Pace, M. L. & Olson, O.G. 1999. Dissolved organic carbon and nutrients as regulators of lake ecosystems: Resurrection of a more integrated paradigm. *Limnology and Oceanography* 44 (3): 795–803.

Ylitalo, E. 2012. Metsätilastollinen vuosikirja 2012. Metsäntutkimuslaitos. Vammalan Kirjapaino Oy. 452 s.

Zak, D., Wagner, C., Payer, B., Augustin, J., Gelbrecht, J. 2010. Phosphorus mobilization in rewetted fens; the effect of altered peat properties and implications for their restoration. *Ecological Applications* 20: 1336–1349.