



Mika Nieminen<sup>1</sup>, Timo Pukkala<sup>2</sup>, Leena Stenberg<sup>1</sup>, Sakari Sarkkola<sup>1</sup>,  
Aleksi Vihonen<sup>3</sup> ja Annukka Valkeapää<sup>4</sup>

## Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vaikutus metsäisten valuma-alueiden vesistökuormitukseen Suomessa

Nieminen M., Pukkala T., Stenberg L., Sarkkola S., Vihonen A., Valkeapää A. (2023). Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vaikutus metsäisten valuma-alueiden vesistökuormitukseen Suomessa. Metsätieteen aikakauskirja 2023-22001. Tutkimusartikkeli. 18 s. <https://doi.org/10.14214/ma.22001>

### Tiivistelmä

Tutkimuksessa selvitettiin prosessimallinnukseen ja kokeellisiin tutkimuksiin perustuen jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vaikutusta metsäisiltä valuma-alueilta tapahtuvaan typpi- ja fosforikuormitukseen. Laskennan perustana oli, että metsätalouden vaikutus vesistökuormitukseen koostuu soiden ensiojituksen pitkäaikaiskuormituksesta eli ojituslisästä ja kivennäismaiden ja ojitetujen soiden hakkuiden ja lannoitusten sekä soiden kunnostusojitusten aiheuttamasta lyhytaikaisesta kuormituksesta. Laskennan lähtöaineistona käytettiin Metsään.fi-tietokannan metsävaratietoja. Tulosten perusteella siirtyminen tasaikäismetsätaloudesta jatkuvaan kasvatukseen vähentäisi metsätalouden vesistökuormitusta selvästi sekä noudatettaessa metsänhoidon suositusten mukaisia hakkuuohjeita että silloin, kun hakkuumäärät ovat nykyisellä tasolla. Eri maakunnista kuormitus vähenisi eniten Kanta-Hämeessä ja vähiten Lapissa. Kuormitus ojitetuilta soilta on huomattavasti suurempaa kuin kivennäismailta, mutta siirtyminen jatkuvaan kasvatukseen vähentäisi hehtaarikohtaista kuormitusta kuitenkin suunnilleen saman verran kivennäismailla ja soilla seuraavan viiden vuosikymmenen aikana. Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden kuormituseroja ojitetuilla soilla pienentää se, että nuorissa tasaikäismetsätalouden metsissä vedenpinta on korkealla, mikä pienentää ojituslisää. Jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäismetsätalouden vesistövaikutusten arvioinnin kehittämiseksi tarvitaan edelleen kokeellisia tutkimuksia erityisesti erilaisista hakkuu- ja maanmuokkausmenetelmistä sekä ojitetujen soiden huuhtoumiin vaikuttavista prosesseista.

**Asiasanat** metsät; ojitus; ravinnekuormitus; suot; vesistöt

**Yhteystiedot** <sup>1</sup>Luonnonvarakeskus, Luonnonvarat, Helsinki; <sup>2</sup>Itä-Suomen yliopisto, Metsätieteiden osasto, Joensuu; <sup>3</sup>Metsäpalvelu Arvometsä Oy, Helsinki; <sup>4</sup>Metsän jatkuvan kasvatuksen yhdistys Silva ry, Riihimäki

**Sähköposti** [mika.nieminen@luke.fi](mailto:mika.nieminen@luke.fi)

**Hyväksytty** 19.9.2023

## 1 Johdanto

Metsätaloutta pidettiin aiemmin verraten vähäisenä vesistökuormittajana (Finér ym. 2010). Syynä tähän oli se, että metsätaloudella ei ajateltu olevan pitkäaikaisia vaikutuksia vesistöjen ravinnekuormitukseen. Esimerkiksi ensiojituksen vesistökuormituksen ajateltiin 10–20 vuodessa palautuvan samalle tasolle kuin luonnontilaisilla soilla (Heikurainen ym. 1978; Heikurainen ja Joensuu 1981). Käsitteet muuttuivat 2010-luvun lopulla, kun Nieminen ym. (2017, 2018c) osoittivat, että kuormitukset ojitetuilta soilta olivat vielä useiden vuosikymmenien kuluttua ojituksesta selvästi kohonneita luonnontilaisiin soihin nähden. Heidän tutkimuksensa mukaan riskinä jopa on, että kuormitukset edelleen suurenevat, kun ojituksesta kuluu useampia vuosikymmeniä. Tätä luonnontilaisten soiden kuormitusta suurempaa kuormitusta, jota syntyy silloinkin, kun ojitusalueilla ei ole vuosikymmeneen tehty mitään metsätaloustoimenpiteitä, on alettu kutsua ojituslisäksi (Nieminen ym. 2020).

Ojituslisän syntymekanismeja ei vielä täysin tunneta, mutta on ilmeistä, että siihen vaikuttaa ainakin turpeen hajoaminen (Nieminen ym. 2020, 2022). Mitä nopeammin turve hajoaa ja mitä enemmän ravinteita hajotuksen myötä vapautuu, sitä suurempaa ravinnekuormitusta soilta syntyy. Näin on etenkin silloin, kun ravinteita vapautuu syvistä turvekerroksista, koska silloin puusto ja muu pintakasvillisuus eivät kykene hyödyntämään niitä. Turpeen hajoaminen taas on yhteydessä ojitetun suon kuivatustilaan; mitä syvemmällä suon vedenpinta on, sitä nopeammin turve hajoaa (Ojanen ja Minkkinen 2019). Suon vedenpinnan tasoon taas vaikuttavat monet tekijät, kuten ilmasto, ojasuvyvyys ja haihduttavan puuston määrä (Sarkkola ym. 2010). Yleensä suon vedenpinta on selvästi syvemmällä varttuneissa puustoissa kuin taimikoissa ja nuorissa metsissä (Sarkkola ym. 2010). Koska suon vedenpinta vaihtelee ojitetuilla soilla puuston, ilmaston ja kuivatusteknisten tekijöiden suhteen, on ilmeistä, että myös turpeen hajotus ja ojituksen vaikutus vesistökuormitukseen (ojituslisä) vaihtelevat vastaavasti.

Nykykäsitys on, että luonnonmetsiä suurempaa kuormitusta syntyy metsätaloustaloudessa olevilta valuma-alueilta pääasiassa ensiojituksen pitkäaikaiskuormituksen eli ojituslisän seurauksena, mutta myös muut metsätaloustoimenpiteet (hakkuut, maanpinnan käsittely, lannoitus, kunnostusojitus) synnyttävät vesistökuormitusta. Metsätaloustoimenpiteiden aiheuttama kuormitus on perinteisesti arvioitu nk. ominaiskuormituslukujen perusteella (Finér ym. 2010). Ne on määritetty yhden tai useamman kokeellisen tutkimuksen perusteella ja ilmoittavat, kuinka paljon tietty metsätaloustoimenpide aiheuttaa vesistökuormitusta käsiteltyä pinta-alaa ja vuotta kohden. Esimerkiksi kangasmaiden typpilannoitus aiheuttaa ensimmäisenä vuotena lannoituksesta 12 kilogramman ja toisena vuotena 3 kilogramman typpikuormituksen lannoitushehtaaria kohden ja tämän jälkeen lannoituksen ei enää ajatella aiheuttavan typpikuormitusta (Finér ym. 2010).

Pyrittäessä vähentämään metsätalouden vesistökuormitusta ongelmana on, että monet vesien suojelemissa menetelmät ovat verraten heikkotehoisia, eikä niillä kyetä vähentämään muuta kuormitusta kuin ojituksen ja maanmuokkauksen aiheuttamaa eroosiota ja kiintoainekuormitusta (Joensuu 2002; Nieminen ym. 2018b). Edelleen ongelmana on, että kaikkein tehokkaimpia vesien suojelemissa menetelmiä, kuten pintavalutuskenttiä ja vesien suojelemissa menetelmistä käytetään verraten harvoin eli vain kaltevilla alueilla (Nieminen ym. 2015). Vesien suojelemissa menetelmien heikon tehon ja tehokkaimpien menetelmien käyttökelpoisuuteen liittyvien ongelmien vuoksi yhä useammin on esitetty, että vesien suojelemissa pitäisi perustua pikemminkin metsämaalta syntyvän kuormituksen vähentämiseen kuin ojiin ja puroihin karanteiden ravinteiden ja eroosioaineksen kiinniottoon. On esitetty, että jatkuva kasvatusta voisi olla menetelmä, jolla erityisesti ojitetuilla soilla syntyviä päästöjä voitaisiin vähentää (Nieminen ym. 2018a).

Jatkuvan kasvatusta oletetaan vähentävän vesistökuormitusta siksi, että voimakkaita avohakkuuta ja maanmuokkausta ei tehdä eikä ojitetuilla soilla juurikaan kunnostusojiteta. Kuormitusta

voidaan vähentää myös pitämällä suon vedenpinta keskimäärin korkeammalla kuin se olisi jaksollisessa kasvatuksessa. Tämä vähentää erityisesti syvien turvekerrosten hajotuksesta syntyvää ravinne- ja hiilikuormaa.

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, miten jatkuva kasvatusta vaikuttaa metsistä ja soilta syntyvään ravinnekuormitukseen verrattuna siihen, että metsiä käsitellään tasaikäismetsätalouden periaatteiden mukaan. Laskelmat tehtiin seuraavan 50 vuoden ajanjaksolle, joka jaettiin viiteen 10-vuotisjaksoon.

## 2 Aineisto ja menetelmät

### 2.1 Ensiojituksen pitkäaikaiskuormitus eli ojituslisä

Tutkimuksessa tuotettiin laskuri, jolla on mahdollista laskea metsätalouden aiheuttama vesistökuormitus lähtien yksittäisistä metsikkökuvioista ja edeten erilaisiin alueellisiin kuormitusarvioihin. Pääperiaate laskennassa on, että metsätalouden kuormitus koostuu ojituksen pitkäaikaiskuormituksesta eli ojituslisästä ja kangas- ja turvemaiden hakkuiden ja lannoitusten sekä ojitettujen turvemaiden kunnostusojituksen aiheuttamasta kuormituksesta. Ojituslisän määrä vaihtelee turpeen hajotuksen mukaan, ja turpeen hajotus taas riippuu ojitusalueen kuivatustilasta eli suon vedenpinnan syvyydestä (Ojanen ja Minkkinen 2019).

Ojituslisän laskenta aloitettiin ennustamalla suon vedenpinnan syvyys ojitettuja soita edustavilla metsikkökuvioilla kasvukauden lopulla (elokuu). Tämä tehtiin käyttäen Sarkkolan ym. (2010) kokeellista mallia:

$$VS = 47,92 + 159,83 \left[ 1 - 0,3 \left( \frac{V}{90} \right) \right] - 30,684 \left[ 1 - 0,3 \left( \frac{V}{90} \right) \right] \ln(S + 0,001) + 8,095 \ln(O + 1) - 0,73LAT - 0,185S \quad (1)$$

jossa  $VS$  = vedenpinnan syvyys kasvukauden lopulla elokuussa (cm),  $V$  = puuston tilavuus metsikkökuvioilla ( $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ),  $S$  = keskimääräinen kuukausisadanta kesä-elokuussa (mm),  $O$  = ojien keskimääräinen syvyys (cm) ja  $LAT$  = metsikkökuvion leveysaste (astetta). Ojien keskimääräistä syvyyttä ojitetuilla metsikkökuvioilla ei tunneta ja siksi keskimääräisenä syvyytenä käytettiin 0,6 m, joka on inventointiaineistojen perusteella tyypillinen ojasyvyys yli 10 vuotta sitten kunnostetuissa ojissa (Hökkä ym. 2020).

Elokuun sademäärä laskettiin kaavalla, joka perustuu Ilmatieteen laitoksen julkaisemiin sademääriin eri havaintoasemille.

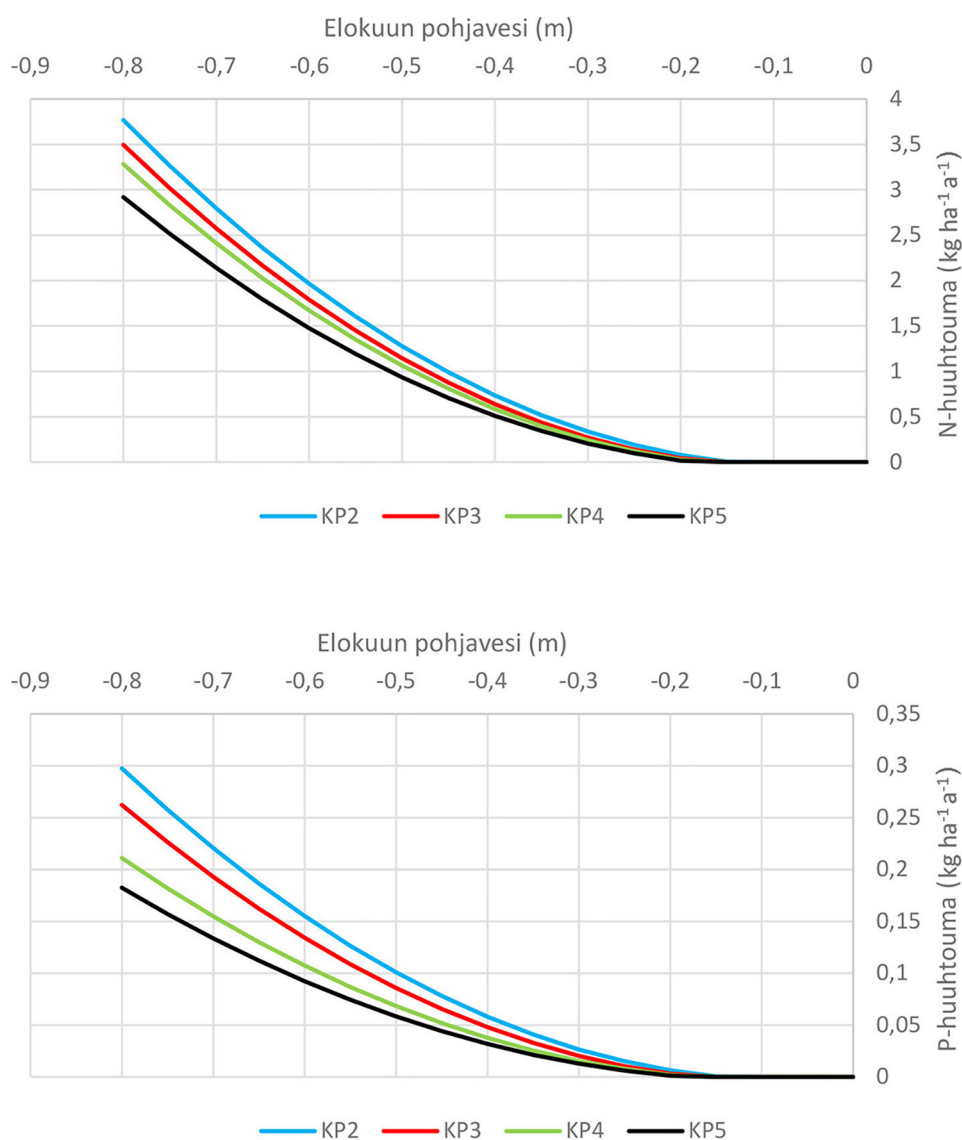
$$S = 38,792 + 0,0246 TS \quad (2)$$

jossa  $S$  on elokuun sademäärä (mm) ja  $TS$  on kasvukauden lämpösumma (vuorokausiastetta).

Ojituslisän laskennan toisessa vaiheessa käytettiin SUSI-mallilla (Laurén ym. 2021) etukäteen laskettua riippuvuutta, joka kuvaa ojituksen aiheuttaman ravinnekuormituksen yhteyden vedenpinnan syvyyteen eri kasvupaikkatyypeillä. SUSI-mallia on käytetty viime vuosina paljon ratkottaessa erilaisia soiden metsätalouskäyttöön liittyviä taloudellisia ja ympäristönsuojelullisia kysymyksiä. SUSI kuvaa ojitetun suometsän sarkaa kaksikulotteisena poikkileikkauksena ojaan ojaan ja laskee päivän aika-askelin pohjaveden pinnan korkeutta, valuntaa, orgaanisen aineen hajotusta ja nettoperustuotantoa, sekä vuoden aika-askelin vapautuvien ravinteiden (typpi, fosfori,

kalium) määrää, ravinteiden ottoa ja puuston ravinnekilpailua pintakasvillisuuden kanssa, puuston kasvua ja kariketuotosta sekä metsikön ja maan hiilitasetta.

Ravinnekuormituksen laskenta perustuu SUSI-mallissa siihen, että puuston juuristokerroksen alapuolelta hajotuksen kautta vapautuvat ravinteet eivät päädy kasvillisuuden käyttöön, vaan huuhtoutuvat ojitusalueelta. SUSI-mallilla lasketut tiettyä vedenpinnan korkeutta vastaavat turpeen hajotuksen aiheuttamat typpi- ja fosforikuormitukset eli typen ja fosforin ojituslisät eri kasvupaikkatyypeillä on esitetty Kuvassa 1. Viljavilla kasvupaikkatyypeillä tiettyä vedenpintaa vastaa suurempi kuormitus kuin karummilla tyypeillä siksi, että hajotus vapauttaa enemmän ravinteita ravinteikkaammasta turpeesta. Kun ojitetun suon vedenpinta on luonnontilaisia soita vastaavalla korkealla tasolla ( $< -0,2$  m), ojituslisää ei synny. Kun vedenpinta laskee hyvin syvälle ( $> -0,6$  m), ojituslisää syntyy SUSI-mallin perusteella typen osalta vuosittain  $1,5\text{--}3,5$  kg ha<sup>-1</sup> ja fosforin osalta  $0,1\text{--}0,3$  kg ha<sup>-1</sup>.



**Kuva 1.** SUSI-mallilla lasketut myöhäiskesän (elokuu) suon vedenpinnan tasoa vastaavat turpeen hajotuksen aiheuttamat keskimääräiset typpi- ja fosforikuormitukset eli typen (N) ja fosforin (P) ojituslisät eri kasvupaikkatyypeillä (KP2 lehto- ja ruohoturvekankaat, KP3 mustikkaturvekankaat, KP4 puolukaturvekankaat, KP5 varputurvekankaat ja sitä karummat kasvupaikat).

## 2.2 Nykyisten metsätaloustoimien kuormitus

Kunnostusojituksen sekä turvemaiden ja kangasmaiden lannoituksen aiheuttama kuormitus laskettiin samoilla ominaiskuormitusluvuilla ja perustuen samoihin oletuksiin kuin aiemmissa tutkimuksissa (Finér ym. 2010). Kunnostusojituksen ei näissä tutkimuksissa ole oletettu aiheuttavan typpikuormitusta, mutta sen oletetaan lisäävän kiintoaineen mukana kulkeutuvan fosforin kuormitusta yhteensä noin  $0,97 \text{ kg ha}^{-1}$  kymmenen vuoden aikana (Taulukko 1). Kunnostusojitus voi kyllä lisätä liuenneen epäorgaanisen typen kuormitusta, mutta se vähentää liuenneen orgaanisen typen kuormitusta niin paljon, että liuenneen typen kuormitusmuutosta ei oleteta tapahtuvan. Lisäksi Finér ym. (2010) olettavat, että kunnostusojituksen aiheuttama kiintoainekuormitus on pääasiassa mineraaliainesta eli kunnostusojitus ei lisää merkittävästi myöskään kiintoaineen mukana kulkeutuvan partikkelimaisen orgaanisen typen kuormitusta.

Kangasmaiden lannoituksen ei oleteta aiheuttavan fosforikuormitusta, mutta se lisää typpikuormitusta kahden vuoden aikana yhteensä  $15 \text{ kg ha}^{-1}$ . Turvemaita ei lannoiteta typpellä eikä ilman typpeä tehtyjen lannoitusten ole osoitettu lisäävän typpikuormitusta (Piirainen ym. 2013), joten typen ominaiskuormitus turvemaiden lannoitukselle on  $0 \text{ kg ha}^{-1}$ . Fosforikuormitusta turvemaiden lannoituksessa syntyy lähinnä siksi, että osa lannoitteista leviää ojiin aiheuttaen kuormitusta vuosittain  $0,27 \text{ kg ha}^{-1}$  viiden vuoden ajan.

Kangas- ja turvemaiden hakkuiden osalta ei käytetty suoraan aiempia ominaiskuormituslukuja, vaan ne päivitettiin uusilla tuloksilla (turvemaiden hakkuut) ja tuloksilla, joita aiemmissa arvioissa (Finér ym. 2010) ei ollut käytetty (kangasmaiden hakkuut). Kangasmaiden hakkuiden osalta käytettiin aiempien tutkimusalueiden lisäksi Murtopuron, Vanneskorven ja Rudbäckenin huuhtoutumistuloksia kolmelta vuodelta avohakkuun jälkeen, minkä jälkeen hakkuiden ominaiskuormitus laskettiin vastaavalla tavalla kuin aiemmin (Finér ym. 2010). Murtopuruolla avohakkuun aiheuttama typen vuosikuorma oli kolmen vuoden aikana keskimäärin  $2,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$  ja fosforikuorma  $0,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$  (Mattsson ym. 2006b). Rudbäckenillä kuormat olivat vastaavasti  $4,7$  (typpi) ja  $0,14$  (fosfori)  $\text{kg ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$  (Mattsson ym. 2006a) ja Vanneskorvessa  $0,8$  (typpi) ja  $0,5$  (fosfori)  $\text{kg ha}^{-1} \text{ v}^{-1}$  (Haapanen ym. 2006).

Ominaiskuormituslukujen päivittäminen näillä tuloksilla merkitsi sitä, että kangasmaiden hakkuun ominaiskuormitusluvut tyypelle ovat tässä työssä noin kaksi kertaa suurempia kuin Finér ym. (2010) käyttämät luvut, ja fosforin ominaiskuormitusluvut hakkuille noin viisi kertaa suurempia

**Taulukko 1.** Lannoituksen ja kunnostusojituksen aiheuttamat typpi- ja fosforikuormat ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) eli lannoituksen ja kunnostusojituksen ominaiskuormat (Finér ym. 2010).

Vuosia toimenpiteestä	Kunnostusojitus		Kangasmaiden lannoitus		Turvemaiden lannoitus	
	Typpi	Fosfori	Typpi	Fosfori	Typpi	Fosfori
1	0	0,420	12	0	0	0,27
2	0	0,140	3	0	0	0,27
3	0	0,112	0	0	0	0,27
4	0	0,084	0	0	0	0,27
5	0	0,070	0	0	0	0,27
6	0	0,056	0	0	0	0
7	0	0,042	0	0	0	0
8	0	0,028	0	0	0	0
9	0	0,014	0	0	0	0
10	0	0,007	0	0	0	0

**Taulukko 2.** Kangasmaiden avohakkuiden aiheuttama typpi- ja fosforikuormitus ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) eli avohakkuiden ominaiskuormitus tässä tutkimuksessa sekä aiemmassa arvioissa (Finér ym. 2010).

Vuosia hakuusta	Typpi		Fosfori	
	Tämä tutkimus	Finér ym. (2010)	Tämä tutkimus	Finér ym. (2010)
1	1,43	0,95	0,20	0,056
2	1,42	0,82	0,21	0,044
3	1,61	0,82	0,20	0,037
4	1,41	0,77	0,18	0,038
5	1,21	0,62	0,15	0,024
6	1,01	0,35	0,13	0,011
7	0,81	0,33	0,10	0,013
8	0,60	0,20	0,08	0,013
9	0,40	0,16	0,05	0,009
10	0,20	0,007	0,03	0,006

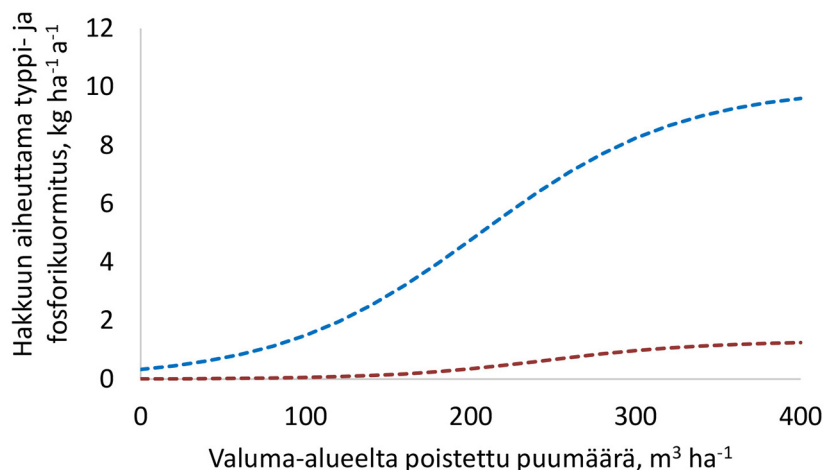
(Taulukko 2). Kuten aiemmissa arvioissa, uudistushakkuista kevyempien hakkuiden (harvennus-hakkuut, jatkuvan kasvatuksen hakkuut) ei tässä tutkimuksessa oleteta lisäävän kuormitusta kangasmailta. Maanmuokkauksen aiheuttamaa kuormitusta ei ole käytettävissä olevien aineistojen perusteella mahdollista arvioida erikseen eli sen oletetaan sisältyvän avohakkuiden aiheuttamaan kuormitukseen.

Ojitettujen turvemaiden hakkuiden vesistökuormitus laskettiin ottamalla huomioon kaikki olemassa olevat tutkimukset, joista oli tiedossa poistetun puuston määrä ja joiden perusteella oli mahdollista tehdä arvio hakkuun vaikutuksesta keskimääräiseen vuotuisen typpi- ja/tai fosforikuormitukseen 3–4 vuoden aikana hakkuun jälkeen (Taulukko 3). Aineisto käsittää sekä avohakkuita

**Taulukko 3.** Turvemaiden hakkuiden typpi- ja fosforikuormituksen eli turvemaiden hakkuiden ominaiskuormituksen laskennan pohjana oleva aineisto. SOH = stem-only harvesting (runkopuuhakkuu), CCF = continuous cover forestry (jatkuva kasvatus), CC = clear-cutting (avohakkuu). Kuorma tarkoittaa keskimääräistä vuotuista hakkuun aiheuttamaa lisäkuormaa 3–4 vuoden seurantajakson aikana.

	Valuma-alueelta poistettu runkopuu $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	Hakkuun typpikuorma $\text{N kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	Hakkuun fosforikuorma $\text{P g ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$	Lähde
SOH1	222	6	225	Kaila ym. (2015)
SOH2	177	8	215	Kaila ym. (2015)
Lettosuo CCF	200	3	270	Nieminen ym. (käsikirj.)
Lettosuo CC	270	8	1100	Nieminen ym. (käsikirj.)
Tuusula	103	0,5	300	Nieminen ym. (käsikirj.)
Vilppula	88	1,6	38	Nieminen ym. (käsikirj.)
Häädet. 1	49	1,5	60	Nieminen ym. (käsikirj.)
Häädet. 2	69	1,5	189	Nieminen ym. (käsikirj.)
Häädet. 3.	69	0,6	8	Nieminen ym. (käsikirj.)
Vilppula CC1	156	-	135	Kaila ym. (2014)
Vilppula CC4	187	-	32	Kaila ym. (2014)
Vilppula CC6	110	-	89	Kaila ym. (2014)
Vilppula CC7	113	-	191	Kaila ym. (2014)
Burrishoole	400	-	1288	Rodgers ym. (2010)
Ruotsinkylä	100	1,15	30	Nieminen (2004)
Vesijako	181	1,67	22	Nieminen (2004)

- = ei tutkittu



**Kuva 2.** Malleilla (3) ja (4) lasketun hakkuun aiheuttaman vuosittaisen typpi- (sininen katkoviiva) ja fosforikuorman (punainen katkoviiva) riippuvuus valuma-alueelta poistetun puuston määrästä.

että kaistale- ja poimintahakkuita (Nieminen ym., käsikirjoitus), mutta ei hakkuita, joissa poistettiin runkopuun lisäksi hakkuutähteitä ja/tai kantoja. Hakkuun vaikutus typpi- ja fosforikuormitukseen laskettiin joko kuten on esitetty aineiston lähteenä olevissa julkaisuissa (Nieminen 2004; Rodgers ym. 2010; Kaila ym. 2014), hakatun alueen ja vertailualueen kuormien erotuksena (Kaila ym. 2015) tai hakatulta alueelta ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen tulevien kuormien erotuksena (Nieminen ym., käsikirjoitus).

Aineiston perusteella laskettiin hakkuun aiheuttaman vuosittaisen typpi- (N-kuorma, kg ha<sup>-1</sup>) ja fosforikuormituksen (P-kuorma, kg ha<sup>-1</sup>) riippuvuus valuma-alueelta poistetun puuston määrästä (HK, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) (Kuva 2). Parhaiten riippuvuutta kuvasivat seuraavat mallit:

$$\text{N-kuorma} = 10 / \left\{ 1 + \exp \left[ -(-3,3375 + 0,0164HK) \right] \right\} \quad (3)$$

$$\text{P-kuorma} = 1,3 / \left\{ 1 + \exp \left[ -(-5,1772 + 0,0209HK) \right] \right\} \quad (4)$$

Malleilla (3) ja (4) laskettiin hakkuun aiheuttama typpi- ja fosforikuormitus sekä harvennus- ja avohakkuissa että jatkuvan kasvatuksen hakkuissa. Kuormituksen siis oletettiin olevan kiinteämmin suhteessa valuma-alueelta poistetun puuston määrään kuin hakkuutapaan. Hakkuun kuormitusvaikutusten kesto ojitetuilla turvemaidella tunnetaan huonosti; tämän työn laskennassa oletettiin, että mallien (3) ja (4) mukaan laskettua kuormitusta syntyy viljavuudeltaan karuimmilla ojitusalueilla (kasvupaikkaluokat 4–5) neljän vuoden ja rehevimmillä (kasvupaikkaluokat 1–3) kuuden vuoden ajan hakkuun jälkeen. Tutkimusten mukaan neljä vuotta voi olla todennäköinen kesto karuilla kasvupaikoilla (Kaila ym. 2014), mutta viljavuudeltaan rehevillä kasvupaikoilla kuormituksen kesto avohakkuun jälkeen ei ole tiedossa. Kuten kangasmaiden metsänuudistamisen kohdalla maanmuokkauksen vaikutuksia ei nykytiedon avulla voida erottaa hakkuiden vaikutuksista eli niiden aiheuttaman kuormituksen oletettiin sisältyvän hakkuiden aiheuttamaan kuormitukseen.

### 2.3 Skenaarioiden simulointi

Simuloinnin lähtötietoina käytettiin Metsään.fi-tietokannan metsävaratietoja, jotka tuotiin Monsu-metsäsuunnitteluohjelmistoon (Pukkala 2011). Simulointi kattoi kaikki ne metsikkökuviot, joista on tietoa Metsään.fi-järjestelmässä (noin 10 miljoonaa metsikkökuviota, noin 15 Mha). Simuloinnin alussa metsikkötietojen perusteella muodostettiin joukko kuvauspuita ennustamalla jokaisen erikseen arvioidun puusto-ositteen läpimittajakauma. Puuston kehityksen ja hakkuiden simulointi perustui kuvauspuihin.

Puuston kehitystä metsikkökuvioilla simuloitiin Pukkalan ym. (2021) malleilla, jotka on laadittu valtakunnallisten metsäinventointien (VMI) pysvien koalojen mittaustiedoista. Mallien laadinta-aineistona on käytetty VMI10- ja VMI11-mittauksia. Pukkalan ym. (2021) tutkimuksessa kuvataan mallit puun läpimitan kasvulle, todennäköisyydelle, että puu pysyy elossa seuraavat 5 vuotta, ja kynnyskasvulle. Kynnyskasvu kuvaa metsikön luontaista uudistumista ja tarkoittaa niiden puiden lukumäärää, jotka ylittävät 1,3 metrin pituuden seuraavan 5-vuotiskauden aikana. Mallien ennustajina ei ole käytetty metsikön ikää, valtapituutta tai pituusboniteettia, minkä vuoksi ne soveltuvat myös sellaiseen metsätalouteen, jossa tehdään yläharvennuksia ja poimintahakkuita.

Tasaikäismetsätalouden simulointi perustui hyvän metsänhoidon suosituksiin (Äijälä ym. 2014). Suosituksissa on ohjeet pohjapinta-alalle, jossa metsikkö harvennetaan, harvennushakkuun jälkeiselle pohjapinta-alalle ja keskiläpimitalle, jossa metsikkö uudistetaan. Suositukset eivät anna täsmällisiä ohjeita vaan ainoastaan vaihteluvälejä. Tämän tutkimuksen simuloinneissa ohjeena käytettiin suosituksen vaihteluvälin puoliväliä. Harvennushakkuut simuloitiin alaharvennuksena, jossa puolet poistuvasta pohjapinta-alasta otettiin tasaisesti kaikista läpimittaluokista (eri läpimittaluokkia harvennettiin yhtä voimakkaasti) ja toinen puoli poistamalla puita pienimmistä läpimittaluokista alkaen, kunnes pohjapinta-ala oli pienentynyt jäävän pohjapinta-alan ohjearvoon. Vain ainespuumittaisia puita eli kuitupuu- ja tukkirunkoja poistettiin hakkuissa.

Uudistamismenetelmä oli useimmissa tapauksissa avohakkuu, maanpinnan käsittely ja istutus. Kuivahkolla kankaalla käytettiin männyn (*Pinus sylvestris* L.) kylvöä. Kuivilla kankailla uudistamismenetelmä oli siemenpuuhakkuu, jos mänty oli uudistettavan puuston pääpuulaji. Jos metsikkö oli kaksijaksoinen ja alempi jakso oli kasvatuskelpoinen (riittävästi kasvupaikalle sopivien puulajien alikasvosta), hakkuutapa oli ylispuiden poisto. Istutettujen puiden oletettiin kasvavan 10 % kasvumallien ennustetta paremmin (mallin antama läpimitan kasvuennuste kerrottiin luvulla 1,1) ja kylvettyjen puiden 5 % ennustetta paremmin. Näitä ”jalostuslisä” sovellettiin vain niihin puihin, jotka istutettiin tai kylvettiin 50 vuoden simulointijakson aikana.

Jatkuvapeitteisessä metsätaloudessa nuoren metsän harvennukset simuloitiin tasaikäismetsätalouden ohjeiden mukaan. Varttuneissa metsiköissä simuloitiin yläharvennuksia käyttäen optimointeihin perustuvia harvennussmalleja, jotka ilmoittavat leimausrajan (pohjapinta-ala, jossa metsikkö harvennetaan) ja jäävän puuston pohjapinta-alan. Päätehakkuita ei simuloitu. Ylispuiden poisto simuloitiin samoissa tilanteissa ja samalla tavalla kuin tasaikäismetsätaloudessa. Peitteisen metsätalouden harvennussmalleissa pohjapinta-alat riippuvat korkokannasta siten, että rajat ovat sitä alempana, mitä suurempaa korkokantaa käytetään. Tässä tutkimuksessa ohjeita sovellettiin 3 % korolla. Tuulituhojen riskin vähentämiseksi jäävälle puustolle asetettiin kuitenkin kasvupaikkaluokittaiset minimipohjapinta-alat. Ne olivat Suomen eteläpuoliskossa seuraavat kasvupaikkatyyppittäin: lehto ja lehtomainen  $16 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , tuore  $14 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , kuivahko  $12 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , kuiva  $10 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ . Suomen pohjoispuoliskossa minimipohjapinta-alat olivat: lehto ja lehtomainen  $14 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , tuore  $12 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , kuivahko  $10 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , kuiva  $8 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ .

Kivennäismailla simuloitiin kasvatuslannoituksia tasaikäisissä kuusivaltaisissa (*Picea abies* (L.) H. Karst.) tuoreen kankaan metsiköissä ja tasaikäisissä mäntyvaltaisissa kuivahkon kankaan metsiköissä. Lannoituksia simuloitiin, jos puuston keskiläpimitta oli 22–33 cm ja pohjapinta-ala



15–40 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>. Lannoitus tuli kysymykseen, jos edellisestä lannoituksesta oli kulunut vähintään 10 vuotta. Käytännössä lannoituksia simuloitui kerran kiertoajan kuluessa. Käytettävä typpimäärä oli 150 kg ha<sup>-1</sup>. Lannoituksen vaikutus puuston kasvuun laskettiin samalla tavalla kuin Heinosen ym. (2018) tutkimuksessa. Lannoituksen kasvuvasteen laskenta perustui Kukkolan ja Saramäen (1983) tutkimukseen.

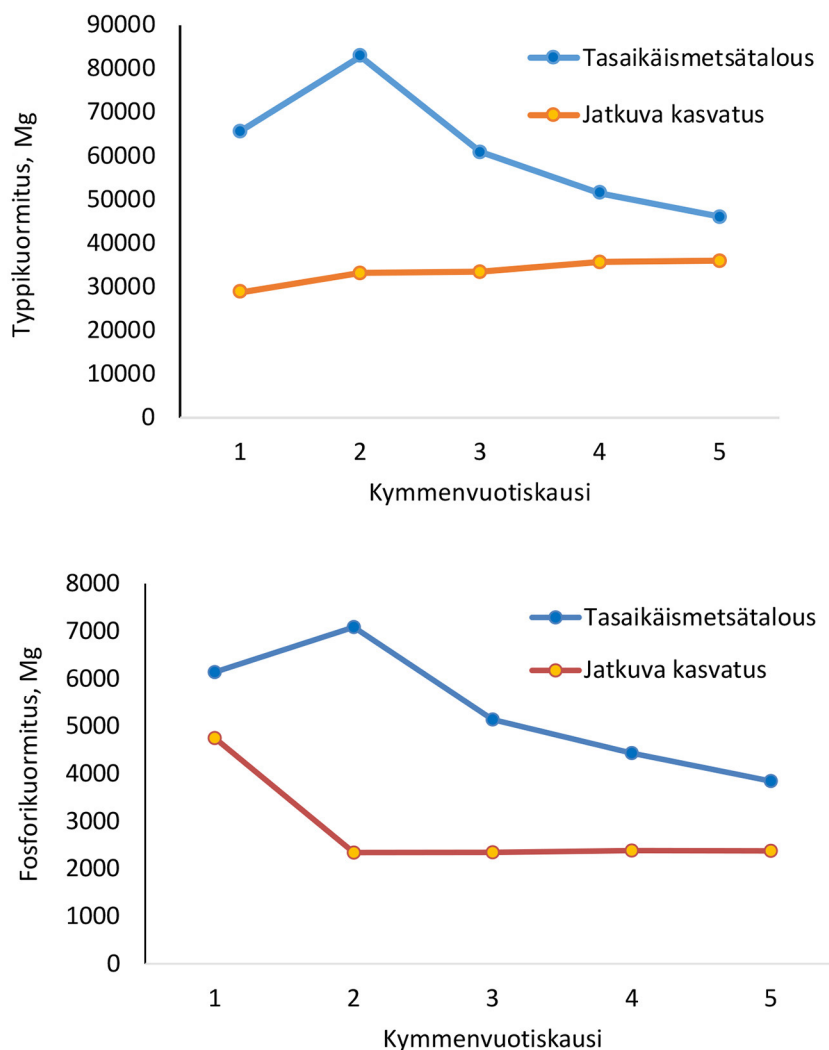
Suometsissä simuloitiin kunnostusojituksia, jos puuston keskiläpimitta oli 5–30 cm, pohjapinta-ala 2–25 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> ja edellisestä kunnostusojituksesta tai avohakkuusta oli kulunut vähintään 30 vuotta. Kunnostusojitusta ei simuloitu, jos puuston tilavuus oli 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> tai enemmän, koska tällöin puuston haihdunta ylläpitää riittävää kuivatusta silloinkin, kun ojasto on huonossa kunnossa (Sarkkola ym. 2010). Kunnostusojituksen vaikutus kasvuun laskettiin Heinosen ym. (2018) kuvaamalla menetelmällä, joka perustuu mm. Hökän ja Kojolan (2001, 2003) tutkimuksiin.

Suometsiin simuloitiin peruslannoitus, jos puuston keskiläpimitta oli 5–30 cm, pohjapinta-ala 10–40 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> ja edellisestä peruslannoituksesta oli kulunut vähintään 50 vuotta. Varpuisilla ojitusaluiden kasvupaikoilla ei kuitenkaan simuloitu peruslannoituksia. Peruslannoituksen ei oletettu parantavan puuston kasvua mallin ennusteeseen verrattuna vaan oletuksena oli, että peruslannoituksia tehdään kasvun ylläpitämiseksi mallin ennustamalla tasolla. Peruslannoituksia simuloitiin sekä tasaikäismetsätaloudessa että jatkuvassa kasvatuksessa.

### 3 Tulokset

Metsävaratietokannan tietojen avulla laskettiin typen- ja fosforin vesistökuormitus noin 15 milj. hehtaarin pinta-alalle (Kuva 3). Laskelman mukaan typpikuormitus tasaikäisessä metsänkasvatuksessa on kyseisellä pinta-alalla seuraavalla kymmenvuotiskaudella noin 6500 tonnia vuodessa ja nousee noin 8000 tonniin, minkä jälkeen kuormitus alkaa pienentyä. Jatkuvassa kasvatuksessa kuormitus on seuraavan kahdenkymmenen vuoden aikana alle puolet tasaikäisen metsänkasvatuksen typpikuormituksesta, mutta ero kasvatustietojen välillä pienenee myöhemmin tasaikäisen metsänkasvatuksen typpikuormien pienentyessä ja jatkuvan kasvatuksen kuormien hieman kasvaessa.

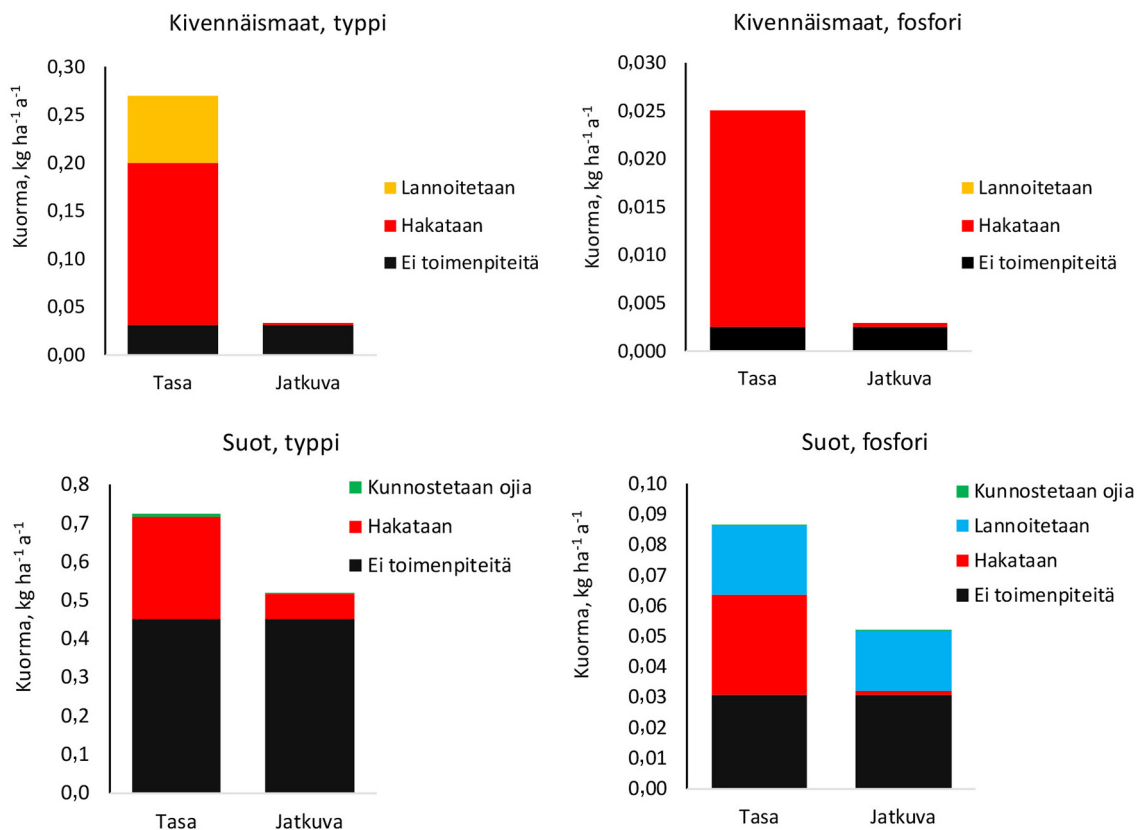
Fosforikuormitus on tarkastellulla pinta-alalla tasaikäisessä metsänkasvatuksessa noin 600 tonnia vuodessa seuraavalla kymmenvuotiskaudella ja kasvaa myöhemmin noin 700 tonniin, minkä jälkeen vuosikuormitus pienenee 400–500 tonniin. Fosforikuormituksessa eri kasvatustietojen välillä ei ole huomattavaa eroa vielä seuraavalla kymmenvuotiskaudella, mutta kahdenkymmenen vuoden kuluessa ero kasvaa niin, että jatkuvan kasvatuksen kuormitus on vain noin kolmannes tasaikäisen metsänkasvatuksen kuormituksesta. Myöhemmin ero kasvatustietojen välillä pienenee, mutta jatkuvassa kasvatuksessa vuosikuormitus on edelleen 140–270 tonnia alhaisempaa kuin tasaikäisessä kasvatuksessa.



**Kuva 3.** Metsään.fi-tietokannan metsävaratiedoista laskettu typpi- ja fosforikuormitus kymmenvuotiskausittain seuraavan 50 vuoden aikana. Laskenta-alue kattaa noin 15 Mha.

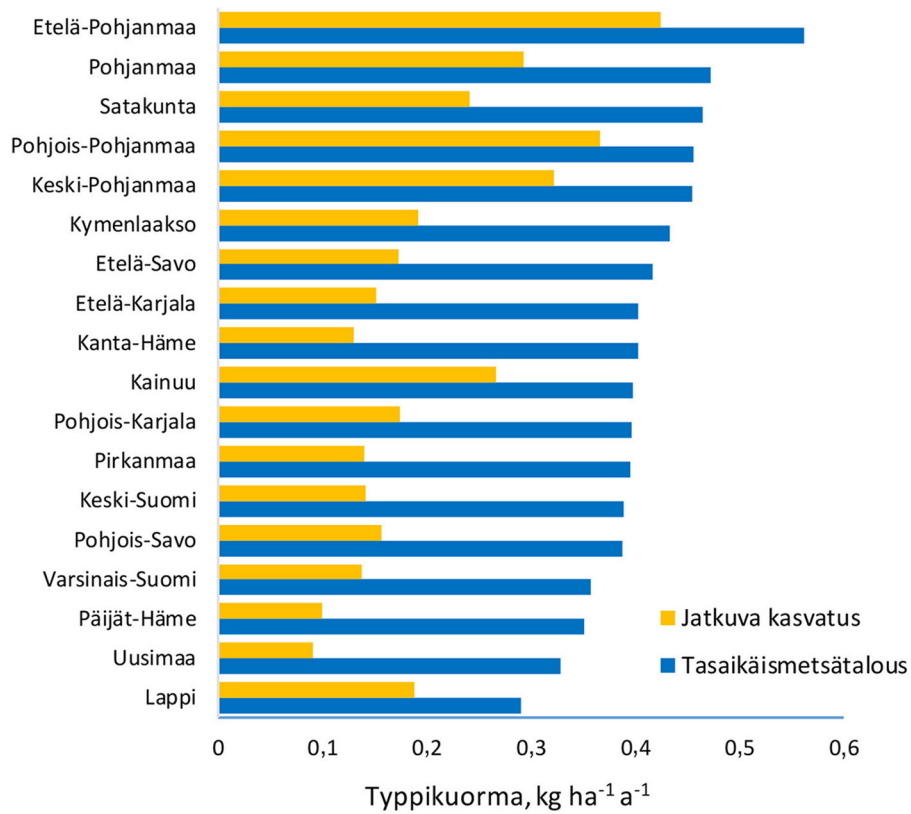
Tyypilliselle metsäalueelle (Lieksa, suota 17% metsämaan alasta) laskettu arvio eri kuormituslähteiden osuuksista osoittaa, että ojituslisä ja ojitetujen soiden hakkuut ovat suurin hehtaarikohtainen kuormituslähde (Kuva 4). Kivennäismaiden kasvatuslannoitus aiheuttaa lisäksi typpikuormitusta ja soiden peruslannoitus fosforikuormitusta. Kunnostusojituksen vaikutus vesistökuormitukseen on vähäinen muihin kuormituslähteisiin verrattuna.

Kivennäismaiden ravinnekuormitus ”ei toimenpiteitä” -skenaariossa on ennen simulointijakson alkua tehtyjen avohakkuiden aiheuttamaa kuormitusta, joka on yhtä suuri tasaikäismetsätalouden ja jatkuvan kasvatuksen skenaarioissa. Soiden ”ei toimenpiteitä” -skenaarion kuormitus on pääasiassa ojituslisää, mutta pieni osa siitä selittyy ennen vuotta 2022 tehtyjen avohakkuiden aiheuttamalla kuormituksella. Kuvassa 4 ovat mukana myös kunnostusojituksen ja kangasmaiden lannoituksen epäsuorat vaikutukset. Eli vaikka kunnostusojituksen ei oleteta suoraan lisäävän typpikuormaa (Taulukko 1) se lisää sitä hieman siksi, että puuston kasvu ja haihdunta lisääntyvät, mikä suurentaa ojituslisää.

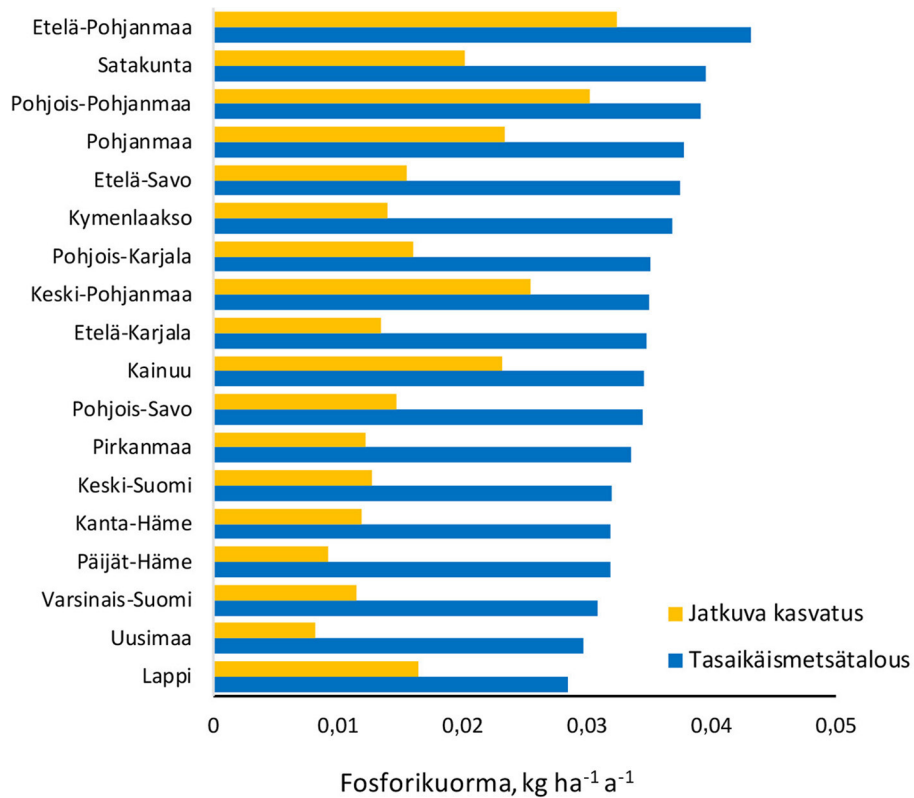


**Kuva 4.** Lieksan metsikkökuvioille simuloitut skenaariot typpi- ja fosforikuormista seuraavan 50 vuoden aikana. Ensimmäisessä skenaariossa ei tehty lainkaan hakkuita, lannoitusta tai kunnostusojitusta, toisessa simuloitiin hakkuiden ja niihin liittyvien toimenpiteiden vaikutuksia, kolmannessa hakkuiden lisäksi lannoituksia ja neljännessä kaikkien edellisten lisäksi kunnostusojituksia. Mukana ovat myös toimenpiteiden epäsuorat vaikutukset (esimerkiksi kunnostusojitus lisää kasvua, mikä taas kasvattaa ojituslisää). Huomaa y-akselin eri vaihteluväli kivennäismaille ja soille.

Maakunnittainen tarkastelu osoitti, että siirtyminen jatkuvaan kasvatukseen kaikissa metsissä vähentäisi kuormitusta enemmän kivennäismaavaltaisilla alueilla kuin hyvin suovaltaisissa maakunnissa (Kuvat 5 ja 6). Lisäksi jatkuva kasvatus näyttäisi vähentävän kuormitusta enemmän Etelä- kuin Pohjois-Suomessa.



**Kuva 5.** Keskimääräinen typen vuosikuormitus maakunnittain seuraavan 50 vuoden aikana. Maakunnat järjestetty tasaikäismetsätalouden aiheuttaman kuormituksen mukaan.



**Kuva 6.** Keskimääräinen fosforin vuosikuormitus maakunnittain seuraavan 50 vuoden aikana. Maakunnat järjestetty tasaikäismetsätalouden aiheuttaman kuormituksen mukaan.

## 4 Tarkastelu ja johtopäätökset

Tutkimuksemme on ensimmäinen, jossa eri kasvatusmenetelmien vesistövaikutuksia on arvioitu suuraluetasolla. Ottaen huomioon, että laskentapinta-ala tässä tutkimuksessa on alhaisempi (15 *versus* 22 Mha) kuin nk. virallisissa arvioissa (Finér ym. 2020), tämän tutkimuksen arvio vesistökuormituksesta tasaikäisessä metsänkasvatuksessa on seuraavalla kymmenvuotiskaudella tyyppien osalta noin 40 % virallista arviota (7300 tonnia) suurempi ja fosforin osalta viralliseen arvioon (440 tonnia) nähden noin kaksinkertainen. Ero ei aiheudu siitä, että tutkimuksemme yliarvioisi nykyistä metsätalouden vesistökuormitusta, vaan viralliset arviot ovat todennäköisesti liian alhaisia, koska niistä puuttuivat nk. vanhat ojitusaluet, joilla kuormitus on selvästi suurempaa kuin muilla metsävaluma-alueilla (Nieminen ym. 2022). Nk. Metsävesiryhmän (Finér ym. 2020) laskelmiin perustuvissa virallisissa metsätalouden vesistökuormitusarvioissa ongelmana on lisäksi, että niiden perusteella ojituksen aiheuttama vesistökuormitus olisi suurempaa pohjoisessa kuin etelässä. Todennäköisemmin ojituksen aiheuttama kuormitus on suurempaa etelässä, jossa ojitus ilmastoerojen vuoksi lisää turpeen hajotusta ja ravinteiden mineralisoitumista enemmän kuin pohjoisessa (Laurén ym. 2021).

Vesistökuormitus tasaikäisessä metsänkasvatuksessa alkaa tulostemme perusteella selvästi laskea 20–30 vuoden kuluessa. Tähän on syynä se, että ojitetut suot on siinä vaiheessa suurelta osin uudistettu eli niiden päätehakkuut eivät enää vaikuta vesistökuormitukseen, ja lisäksi ojituslisä on SUSI-mallin perusteella alhaista nuorissa puustoissa, joissa suon vedenpinta on verraten korkealla (Kuva 1). Yksi tekijä suuremmalle kuormitukselle simuloinnin alussa on myös se, että hakkuita tehdään aluksi enemmän kuin myöhemmin. Metsissä on aina puustoja, joissa hakkuu on myöhässä metsänhoidon suosituksiin nähden ja joissa ohjeiden noudattaminen simuloinneissa johtaa siihen, että alkuun hakkuita tehdään enemmän. Kuormitukset nousevat tasaikäisessä kasvatuksessa samalle tasolle kuin seuraavien kahden vuosikymmenen aikana jälleen siinä vaiheessa, kun ojitusaluiden metsät varttuvat (ojituslisä kuormittaa) ja niitä ja kivennäismaiden metsiä aletaan päätehakatua voimakkaasti (hakkuu kuormittaa).

Jatkuva kasvatusta on laskelmiemme mukaan vesiensuojelun näkökulmasta parempi kasvatusmenetelmä kuin tasaikäinen kasvatusta. Ero on erityisen suuri jatkuvan kasvatuksen hyväksi seuraavien kahden vuosikymmenen aikana, minkä jälkeen ero tasaikäisen kasvatuksen ja jatkuvan kasvatuksen välillä kaventuu. Jatkuva kasvatusta on vesistöjen kannalta tasaikäistä kasvatusta parempi kasvatusmenetelmä erityisesti siinä vaiheessa, kun tasaikäisessä kasvatuksessa ojitusaluiden puustot lähestyvät uudistamisvaihetta ja kun niitä sekä kivennäismaiden metsiä päätehakatuaan runsaasti. Jatkuva kasvatusta ei ojitusaluidella kuitenkaan aina tuota alhaisempaa kuormitusta kuin tasaikäinen kasvatusta, vaan alhaisinta kuormitus on nuorissa tasaikäisissä metsiköissä, joissa suon vedenpinta on verraten korkealla ja joissa päätehakkuu ei enää vaikuta kuormitukseen. Pitkällä aikajaksolla jatkuva kasvatusta on ojitusaluidella kuitenkin aina tasaikäistä kasvatusta parempi vaihtoehto vesiensuojelullisesti.

Kangasmailla jatkuva kasvatusta ei laskelmissamme aiheuta vesistökuormitusta, koska kangasmailla päätehakkuuta kevyempien hakkuiden ei oleteta aiheuttavan vesistökuormitusta (Finér ym. 2010). Tosin tätä ei ole vahvistettu yhdessäkään kokeellisessa tutkimuksessa eli tältä osin tarvitaan lisätutkimuksia. Laskelmissa myös oletettiin, että jatkuvaa kasvatusta suosivat metsänomistajat eivät lannoita kangasmetsiään eli lannoituksenkin aiheuttama vesistökuormitus puuttuu jatkuvasta kasvatuksesta kangasmailla. Toisaalta tällä ei ole suurta vaikutusta tasaikäisen metsänkasvatuksen ja jatkuvan kasvatuksen kuormituseroihin suuraluetasolla, koska suurin osa metsätalouden aiheuttamasta vesistökuormituksesta aiheutuu suometsien ojituksista (ojituslisästä) ja hakkuiden sekä kangasmaiden päätehakkuista (Kuva 4).

Kangasmaiden hakkuiden osalta emme suoraan käyttäneet aiempia ominaiskuormituslukuja (Finér ym. 2010), vaan täydensimme aineistoa alueilla, joita ei aiemmin ollut käytetty. Aiemmista

laskelmista esimerkiksi Murtopuron valuma-alueen tulokset jätettiin pois sillä perusteella, että valuma-alueella tehtiin hakkuun lisäksi ojitusta. Ojitukset tehtiin kuitenkin vasta neljän vuoden kuluttua hakkuista, joten kolmen ensimmäisen vuoden osalta Murtopuron tulokset olivat yhtä käytökelpoisia kuin muidenkin aiemmissa laskelmissa käytettyjen alueiden tulokset. Uusien alueiden ottaminen mukaan laskelmiin merkitsi sitä, että kangasmaiden päätehakkuun ominaiskuormitusluvut kasvoivat selvästi erityisesti fosforin osalta (Taulukko 2).

Ojitusalueiden kuivatustilan (suon vedenpinnan) vaikutuksesta huuhtoumiin ei ole kokeellista tutkimustietoa ja siksi vedenpinnan vaikutus huuhtoumiin (ojituslisään) arvioitiin simuloimalla SUSI-mallin avulla (Laurén ym. 2021). Laskelmissamme oletettiin, että ojituslisä on sitä suurempaa, mitä syvemmillä suon vesipinta on ja mitä voimakkaammin turve hajoaa ja ravinteita vapautuu. Vaikka suoraa kokeellista aineistoa vedenpinnan ja turpeen hajotuksen vaikutuksista huuhtoumiin ei ole, kokeellisesti on kuitenkin osoitettu, että ojitusalueilla typen ja fosforin pitoisuudet valumavesissä ovat korkeimmillaan vanhoilla, puustoltaan varttuneilla ojitusalueilla (Nieminen ym. 2017, 2018c, 2022), joilla suon vedenpinta on syvällä (Sarkkola ym. 2010) ja joilla siksi turve hajoaa voimakkaasti (Ojanen ja Minkkinen 2019). Merkittävin puute laskelmissamme on ehkä se, että ojituslisän arvioidaan olevan seurausta pelkästään turpeen hajotuksesta ja sen kautta vapautuvien ravinteiden huuhtoutumisesta. Hyvin todennäköisesti osa ojitusalueiden luonnontilaisia soita suuremmasta huuhtoumasta (ojituslisästä) aiheutuu ojaeroosiosta, jonka vaikutusta tässä työssä ei pystytty ottamaan huomioon. Ojitettujen soiden kuivatustilan (suon vedenpinnan), turpeen maatuneisuuden ja ravinteisuuden sekä ojaeroosion vaikutuksista vesistökuormitukseen tarvitaan lisää kokeellista tutkimustietoa.

Tutkimuksemme mukaan vesiensuojelun näkökulmasta metsiä tulisi kasvattaa ennemmin jatkuvalla kasvatuksella kuin tasaikäiseen kasvatukseen perustuen. Ehkä yllättävä tulos oli, että jatkuvaan kasvatukseen siirtyminen ei vähentänyt kuormitusta merkittävästi enempää ojitetuilla soilla kivennäismaihin verrattuna (Kuva 4). Maakunnittaisessa tarkastelussa jatkuva kasvatusta vähensi kuormitusta jopa enemmän kivennäismaavaltaisissa (Uusimaa, Päijät-Häme) kuin suovaltaisissa (Pohjanmaan maakunnat) maakunnissa. Yhtenä syynä tähän on se, että kivennäismaiden avohakkuut ovat verraten suuri vesistökuormittaja ja niitä tehdään vuosittain melko paljon muihin metsätalouden toimenpiteisiin verrattuna. Vakava tiedon puute on, että alavien kivennäismaiden päätehakkuissa yleistyneen ojitusmätästykseen vesistövaikutuksia ei ole tutkittu. Todennäköisesti erityisesti hienojakoisilla kivennäismailla tehtyjen ojitusmätästysten vesistövaikutukset ovat niin huomattavat, että niillä avohakkuiden, ojituksen ja mätästykseen välttämällä eli jatkuvan kasvatuksen suosimisella saavutettaisiin merkittäviä hyötyjä vesiensuojelullisesti. On myös otettava huomioon, että alavien kivennäismaiden ojittamiselta (ojitusmätästämislä) ei käytännössä edellytetä vastaavaa vesiensuojelun tasoa kuin soiden ojittamiselta.

Osaksi tasaikäisestä metsätaloudesta jatkuvaan kasvatukseen siirtymisen vähäisiä eroja kivennäismaiden ja ojitettujen soiden välillä selittää ojituslisä, joka on jopa pienempää nuorissa tasaikäisissä turvemaametsissä kuin jatkuvan kasvatuksen turvemaametsissä. Kuormitus tasaikäisistä turvemaametsistä pienenee selvästi sen jälkeen, kun metsät on päätehakattu, hakkuun aiheuttama huuhtouma on päättynyt ja metsät ovat nuoria eli puustohaihduksen vaikutus vesipintaan ja sen kautta ojituslisään on vähäinen (Kuva 1). Vähäisiin eroihin vaikuttaa myös tarkastelujakson (50 v.) pituus, koska ojituslisä kasvaisi jälleen siinä vaiheessa, kun soiden puustot varttuvat ja suon vesipinta metsikköhaihdunnan lisääntyessä laskee syviin turvekerroksiin. Tarkastelussamme soiden puustojen ikäluokkajakauma ei ollut tasainen, vaan vanhoja, päätehakkuuta lähestyviä ojitusaluemetsiä on simuloimalla alussa enemmän kuin nuoria metsiä. Siten suometsät eivät tasaikäisessä kasvatuksessa olleet varttuneita kertaakaan (hiljattain avohakatut suometsät) tai olivat varttuneita vain yhden kerran. Mikäli tarkastelujakso olisi kattanut pidemmän aikajakson eli useampia tasaikäismetsätalouden varttuneen puuston ja kohonneen ojituslisän aikajaksoja, siirtyminen

jatkuvaan kasvatukseen olisi ojitusalueilla vähentänyt vesistökuormitusta enemmän kuin tässä työssä tehdyissä laskelmissa.

Tuloksia tulkittaessa on myös otettava huomioon, että hakkuut perustuvat metsänhoidon ohjeisiin, eivät metsäteollisuuden ja muun yhteiskunnan puun tarpeeseen. Tästä syystä tasaikäisessä metsänkasvatuksessa erityisesti toisella ja kolmannella kymmenvuotiskaudella hakkuita simuloidaan tehtäväksi selvästi enemmän kuin nykyisin, ja ne kohdistuvat voimakkaasti ojitetuihin suometsiin. Tämä aiheuttaa sen, että erityisesti toisella kymmenvuotiskaudella kuormitus tasaikäisessä kasvatuksessa kasvaa suuremmaksi kuin se olisi tämänhetkisin hakkuumäärillä.

Parhaiten nykyisiä hakkuumääriä vastaa tasaikäisessä kasvatuksessa ensimmäinen kymmenvuotiskausi. Jatkuvassa kasvatuksessa hakkuumäärät ovat tämänhetkisin tasolla kymmenvuotiskausilla 2–5. Näinä kausina keskimääräinen metsätalouden aiheuttama typpikuormitus tutkitulla 15 Mha:n metsäalalla on tasaikäisessä kasvatuksessa noin 430 g ha<sup>-1</sup> vuodessa ja jatkuvassa kasvatuksessa 217–236 g ha<sup>-1</sup> vuodessa. Vuotuinen fosforikuormitus on vastaavasti tasaikäisessä kasvatuksessa 40 g ha<sup>-1</sup> ja jatkuvassa kasvatuksessa 15 g ha<sup>-1</sup>. Näiden kausien vertaaminen antaa koko 50 vuoden tarkastelujaksoa ”realistisemmän” kuvan tasaikäismetsätalouden ja jatkuvan kasvatuksen kuormituseroista paitsi siksi, että hakkuumäärät ovat nykyisiä vastaavalla tasolla myös siksi, että ennen jatkuvaan kasvatukseen siirtymistä toteutetut hakkuut eivät kymmenvuotiskausilla 2–5 enää vaikuta jatkuvan kasvatuksen kuormitusarvioon.

Tulkittaessa ojituslisän ja eri metsätalouden toimenpiteiden vaikutusta vesistökuormitukseen (kuva 4) on myös otettava huomioon, että vaikutukset riippuvat joissakin tapauksissa toisistaan. Esimerkiksi turvemaiden hakkuut vaikuttavat kuormitukseen paitsi suoraan lisäämällä vesistökuormitusta, myös epäsuorasti pienentämällä ojituslisää. Kangasmaiden lannoitus vaikuttaa vesistöihin paitsi suoraan lannoitteista vesistöihin huuhtoutuvien ravinteiden kautta, myös aikaistamalla avohakkuuta, ts. kangasmaiden lannoitus suurentaa myös avohakkuiden aiheuttamaa vesistökuormitusta. Samoin kunnostusojitus voi aiheuttaa typpikuormitusta epäsuorasti siksi, että se lisää puuston kasvua ja haihduttaa, mikä suurentaa ojituslisää.

Tutkimuksen johtopäätös on, että vesiensuojelun näkökulmasta sekä kivennäismailla että ojitetuilla soilla kannattaisi siirtyä tasaikäisestä metsätaloudesta jatkuvaan kasvatukseen. Soiden ennallistamista, vesiensuojelukosteikoiden perustamista ja hakkuiden rajoittamista lukuun ottamatta tämä on todennäköisesti tehokkain keino vähentää metsätalouden vesistökuormitusta. Koska ojitetujen soiden ennallistaminen aluksi lisää vesistökuormitusta (Koskinen ym. 2011, 2017), jatkuvaa kasvatusta kannattaisi suosia siksikin, että sillä voitaisiin kompensoida ennallistamisen alkuvaiheessa synnyttämää kuormitusta. Näin vesien laatu ei ainakaan suuraluetasolla heikkenisi missään vaiheessa siinäkin tapauksessa, että soiden ennallistaminen yleistyisi merkittävästi.

Toisaalta tuloksia tulkittaessa on otettava huomioon, että jatkuva kasvatusta on aina tasaikäistä kasvatusta parempi vaihtoehto vesiensuojelun näkökulmasta vain kivennäismailla. Ojitetuilla soilla se toisinaan lisää kuormitusta tasaikäiseen kasvatukseen verrattuna. Näin on erityisesti silloin, kun ojitetujen soiden puustot ovat tasaikäisessä kasvatuksessa hyvin nuoria, jolloin ojituslisää syntyy vähän. Pitkällä aikajaksolla jatkuva kasvatusta on kuitenkin myös ojitetuilla soilla tasaikäistä kasvatusta parempi vaihtoehto, vaikka jatkuvan kasvatuksen metsistä huuhtoutuisikin enemmän ravinteita kuin nuorista tasaikäisistä metsistä.

Jotta jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäisen metsänkasvatuksen vesistövaikutuksia kyettäisiin arvioimaan nykyistä paremmin, erityisesti alavien kangasmaiden osalta tarvittaisiin lisätietoa ojitusmätästykseseen perustuvan metsän uudistamisen vesistövaikutuksista. Kangasmaiden osalta tarvittaisiin tietoa myös muiden kuin avohakkuuseen perustuvien hakkuiden (harvennushakkuu, pienaukkohakkuu, yläharvennus) vesistövaikutuksista, koska niiden vaikutuksia ei ole tähän mennessä selvitetty yhdessäkään tutkimuksessa. Ojitetuilla soilla tulisi samanaikaisesti mitata suon kuivatustilaa (vedenpinnan tasoa), turpeen hajotusta ja ravinnehuuhtoumia, jotta hajotuksen

ja kuivatustilan vaikutuksista ravinnekuormitukseen saataisiin kokeellista tutkimustietoa mallinuksen tueksi. Viimeaikaisten tutkimusten perusteella ojituksilla ja metsätaloudella voi olla myös merkittävä rooli viime vuosikymmeninä havaitussa orgaanisen aineen ja raudan kasvaneessa vesistökuormituksessa, mikä on muun muassa kiihdyttänyt vesistöjen tummumista (Nieminen ym. 2021). Tämän aihealueen tutkimusta tulisi myös vahvistaa merkittävästi.

## Kirjoittajien roolit

Rahoituksen tutkimukseen hakivat Annukka Valkeapää ja Mika Nieminen. Tutkimuskysymysten ja tutkimusasetelman muotoiluun osallistuivat erityisesti Valkeapää, Nieminen, Timo Pukkala ja Leena Stenberg. Aineiston analyysistä vastasivat Pukkala, Nieminen, Stenberg, Sakari Sarkkola ja Aleks Vihonen. Nieminen kirjoitti artikkelin ensimmäisen version, jota kaikki tutkimukseen osallistuneet tutkijat kommentoivat ja tekivät siihen muutoksia. Kaikki tutkijat ovat hyväksyneet julkaisun ja vastaavat yhdessä työn täsmällisyydestä, johdonmukaisuudesta ja laadusta.

## Tutkimusaineisto

Tutkimuksessa ei käytetty alkuperäisaineistoja. Laskelmien pohjana olevat kokeelliset aineistot ovat pyydettyinä saatavissa artikkelin kirjoittajilta.

## Tutkimusrahoitus

Pohjoismainen ympäristörahoitusyhtiö Nefco (BSAP-rahasto) ja Luonnonvarakeskus (Luke) ovat rahoittaneet tutkimusta.

## Lähteet

- Finér L, Mattsson T, Joensuu S, Koivusalo H, Laurén A, Makkonen T, Nieminen M, Tattari S, Ahti E, Kortelainen P, Koskiahjo J, Leinonen A, Nevalainen R, Piirainen S, Saarelainen J, Sarkkola S, Vuollekoski M (2010) Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. Suomen ympäristö 10/2010. <http://hdl.handle.net/10138/37973>.
- Finér L, Lepistö A, Karlsson K, Räike A, Tattari S, Huttunen M, Härkönen L, Joensuu S, Kortelainen P, Mattsson T, Piirainen S, Sarkkola S, Sallantausta T, Ukonmaanaho L (2020) Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2020:6. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-826-7>.
- Haapanen M, Kenttämies K, Porvari P, Sallantausta T (2006) Kivennäismaan uudistushakkuun vaikutus kasvinravinteiden ja orgaanien aineen huuhtoutumiseen; raportti Kurussa ja Janakkalassa sijaitsevien tutkimusalueiden tuloksista. Teoksessa: Kenttämies K, Mattsson T (toim) Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti, s. 43–62.
- Heinonen T, Pukkala T, Asikainen A, Peltola H (2018) Scenario analyses on the effects of fertilization, improved regeneration material, and ditch network maintenance on timber production of Finnish forests. *Eur J Forest Res* 137: 93–107. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1093-9>.
- Heikurainen L, Joensuu S (1981) Metsäojituksen hydrologiset seurausvaikutukset. *Silva Fenn* 15: 285–305. <https://doi.org/10.14214/sf.a15065>.
- Heikurainen L, Kenttämies K, Laine J (1978) Metsäojituksen ympäristövaikutukset. *Suo* 29: 49–58.



- Hökkä H, Kojola S (2001) Kunnostusojituksen kasvureaktioon vaikuttavat tekijät. Julkaisussa: Hiltunen I, Kaunisto S (toim) Suometsien kasvatuksen ja käytön teemapäivät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 832: 30–36. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1812-5>.
- Hökkä H, Kojola S (2003) Suometsien kunnostusojitus – kasvureaktion tutkiminen ja kuvaus. Julkaisussa: Jortikka S, Varmola M, Tapaninen S (toim) Soilla ja kankailla – metsien hoitoa ja kasvatusta Pohjois-Suomessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 903: 13–20. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1897-4>.
- Hökkä H, Stenberg L, Laurén A (2020) Modelling depth of drainage ditches in forested peatlands of Finland. *Balt For* 26: 220–228. <https://doi.org/10.46490/BF453>.
- Joensuu S (2002). Effects of ditch network maintenance and sedimentation ponds on export loads of suspended solids and nutrients from peatland forests. Väitöskirja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 868. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1852-4>.
- Kaila A, Sarkkola S, Laurén A, Ukonmaanaho L, Koivusalo H, Xiao L, O’Driscoll C, Asam Z, Tervahauta A, Nieminen M (2014) Phosphorus export from drained Scots pine mires after clear-felling and bioenergy harvesting. *Forest Ecol Manage* 325: 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.025>.
- Kaila A, Laurén A, Sarkkola S, Koivusalo H, Ukonmaanaho L, Xiao L, Asam 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 Env Res* 20: 693–706.
- Koskinen M, Sallantausta T, Vasander H (2011) Post-restoration development of organic carbon and nutrient leaching from two ecohydrologically different peatland sites. *Ecol Eng* 37: 1008–1016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.06.036>.
- Koskinen M, Tahvanainen T, Sarkkola S, Menberu MW, Laurén A, Sallantausta T, Marttila H, Ronkanen A-K, Parviainen M, Tolvanen A, Koivusalo H, Nieminen M (2017) Restoration of fertile peatlands poses a risk for high exports of dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus. *Sci Total Environ* 586: 858–869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.065>.
- Kukkola M, Saramäki J (1983) Growth response in repeatedly fertilized pine and spruce stands on mineral soils. *Comm Inst For Fenn* 114: 1–55. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0622-4>.
- Laurén A, Palviainen M, Launiainen S, Leppä K, Stenberg L, Urzainki I, Nieminen M, Laiho R, Hökkä H (2021) Drainage and stand growth response in peatland forests – description, testing, and application of mechanistic peatland simulator SUSI. *Forests* 12, article id 293. <https://doi.org/10.3390/f12030293>.
- Mattsson T, Ahtiainen M, Kenttämies K, Haapanen M (2006a) Avohakkuun ja ojituksen pitkäaikaisvaikutukset valuma-alueen ravinne- ja kiintoainehuuhtoumiin. Julkaisussa: Kenttämies K, Mattsson T (toim) Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti. *Suomen ympäristö* 816: 73–81. <http://hdl.handle.net/10138/40492>.
- Mattsson T, Finér L, Kenttämies K, Ahtiainen M, Haapanen M, Lepistö A (2006b) Avohakkuun vaikutus fosforin, typen ja kiintoaineen huuhtoumiin; raportti VALU-tutkimushankkeen ja Siuntion Rudbäckenin alueiden tutkimuksista. Julkaisussa: Kenttämies K, Mattsson T (toim) Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti. *Suomen ympäristö* 816: 63–70. <http://hdl.handle.net/10138/40492>.
- 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 Fenn* 38: 123–132. <https://doi.org/10.14214/sf.422>.
- Nieminen M, Kaila A, Koskinen M, Sarkkola S, Fritze H, Tuittila E-S, Nousiainen H, Koivusalo H, Laurén A, Ilvesniemi H, Vasander H, Sallantausta T (2015). Natural and restored wetland buffers in reducing sediment and nutrient export from forested catchment: Finnish experiences. Teoksessa: Vymazal J (toim) The role of natural and constructed wetlands in nutrient cycling

- and retention on the landscape. Springer, Switzerland, s. 57–72. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08177-9>.
- Nieminen M, Sallantausta T, Ukonmaanaho L, Nieminen T M, Sarkkola S (2017) Nitrogen and phosphorus concentrations in discharge from drained peatland forests are increasing. *Sci Total Environ* 609: 974–981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.210>.
- Nieminen M, Hökkä H, Laiho R, Juutinen A, Ahtikoski A, Pearson M, Kojola S, Sarkkola S, Louniainen S, Valkonen S, Penttilä T, Lohila A, Saarinen M, Haahti K, Mäkipää R, Miettinen J, Ollikainen M (2018a) Could continuous cover forestry be an economically and environmentally feasible management option on drained boreal peatlands? *Forest Ecol Manage* 424: 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.046>.
- Nieminen M, Piirainen S, Sikström U, Löfgren S, Marttila H, Sarkkola S, Laurén A, Finér L (2018b) Ditch network maintenance in peat dominated boreal forests – review and analysis of water quality management options. *Ambio* 47: 535–545. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1047-6>.
- Nieminen M, Sarkkola S, Hellsten S, Marttila H, Piirainen S, Sallantausta T, Lepistö A (2018c) Increasing and decreasing nitrogen and phosphorus trends in runoff from drained peatland forests – is there a legacy effect of drainage or not? *Water Air Soil Pollut* 229, article id 286. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3945-4>.
- Nieminen M, Sarkkola S, Haahti K, Sallantausta S, Koskinen M, Ojanen P (2020) Metsäojitettujen soiden typpi- ja fosforikuormitus. *Suo* 71: 1–13.
- Nieminen M, Sarkkola S, Sallantausta T, Hasselquist E M, Laudon H (2021) Peatland drainage – a missing link behind increasing TOC concentrations in waters from high latitude forest catchments? *Sci Total Environ* 774, article id 145150. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145150>.
- Nieminen M, Hasselquist EM, Mosquera V, Ukonmaanaho L, Sallantausta T, Sarkkola S (2022) Post-drainage stand growth and peat mineralization impair water quality from forested peatlands. *J Environ Qual* 51: 1211–1221. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20412>.
- Ojanen P, Minkkinen K (2019) The dependence of net soil CO<sub>2</sub> emissions on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. *Mires Peat* 24, article id 27. <https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1751>.
- Piirainen S, Domisch T, Moilanen M, Nieminen M (2013) Long-term effects of ash fertilization on runoff water quality from drained peatland forests. *Forest Ecol Manage* 287: 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.014>.
- Pukkala T (2011) Optimising forest management in Finland with carbon subsidies and taxes. *For Policy Econ* 13: 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2011.06.004>.
- Pukkala T, Vauhkonen J, Korhonen KT, Packalen T (2021) Self-learning growth simulator for modeling forest stand dynamics in changing conditions. *Forestry* 94: 333–346. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab008>.
- Rodgers M, O’Connor M, Healy MG, O’Driscoll C, Asam Z-u-Z, Nieminen M, Poole R, Muller M, Xiao L (2010) Phosphorus release from forest harvesting on an upland blanket peat catchment. *Forest Ecol Manage* 260: 2241–2248. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.037>.
- Sarkkola S, Hökkä 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. *Can J For Res* 40: 1485–1496. <https://doi.org/10.1139/X10-084>.
- Äijälä O, Koistinen A, Sved J, Vanhatalo K, Väisänen P (toim) (2014) Hyvän metsänhoidon suositukset – metsänhoito. Metsätaloudenkehittämiskeskus Tapion julkaisuja. ISBN 978-952-6612-32-4.