



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 96/2022

Vesistökuormitus metsätaloudessa – Uusia kuormitusmittareita Kansallisen metsästrategian seurantaan

Asiantuntijaselvitys

Sakari Sarkkola, Mika Nieminen ja Sirpa Piirainen

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 96/2022

Vesistökuormitus metsätaloudessa – Uusia kuormitusmittareita Kansallisen metsästrategian seurantaan

Asiantuntijaselvitys

Sakari Sarkkola, Mika Nieminen ja Sirpa Piirainen

Luonnonvarakeskus, Helsinki 2022

Viittausohje:

Sarkkola, S., Nieminen, M. & Piirainen, S. 2022. Vesistökuormitus metsätaloudessa – Uusia kuormitusmittareita Kansallisen metsästrategian seurantaan : Asiantuntijaselvitys. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 96/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 41 s.

Sakari Sarkkola ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-5541-517X>



ISBN 978-952-380-553-8 (Painettu)

ISBN 978-952-380-554-5 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-554-5>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Sakari Sarkkola, Mika Nieminen ja Sirpa Piirainen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2022

Julkaisu vuosi: 2022

Kannen kuva: Sakari Sarkkola

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Sakari Sarkkola¹, Mika Nieminen¹ ja Sirpa Piirainen²

¹ Luonnonvarakeskus (Luke), Latokartanonkaari 9 00790 Helsinki

² Luonnonvarakeskus (Luke), Yliopistokatu 6 B, 80100 Joensuu

Pinta-alaan suhteutettuna metsätalous on kaikkein laaja-alaisin maankäyttömuoto ja sen osuus Suomen maapinta-alasta on 86 %. Hetkellistä ja suhteellisen lyhytaikaista, mutta silti määrällisesti huomattavaakin kuormitusta aiheutuu kunnostusojituksista, hakkuista ja lannoituksista. Yksittäisten toimenpiteiden välittömien vaikutusten ohella metsätalous voi aiheuttaa myös pysyvää kuormituslisäystä. Merkittävintä pitkäaikaiskuormitusta syntyy metsäojituksista eli siitä, että suo on kuivattu metsänkasvatusta varten (vanhat ojitukset). Uusi tieto on korostanut aiempaa enemmän metsätalouden merkitystä sekä paikallisesti että Itämereen kohdistuvan kuormituksen näkökulmasta. Vaikka Itämereen kohdistuva kuormitus ei ole yleisesti kasvanut, ihmisen aiheuttaman kuormituksen osuus kokonaiskuormituksesta arvioidaan nykyään huomattavasti suuremmaksi kuin aiemmin. Monet metsissä tehtävät toimenpiteet edellyttävät kuormituksen vähentämistä ja toisaalta myös metsätalouden aiheuttaman kuormituksen kattavaa seuranta. Seuranta on välttämätöntä, jotta mahdollisia muutoksia pystytään havaitsemaan ja niihin reagoimaan riittävän aikaisessa vaiheessa. Vesistöjen suojelun kannalta tärkeä merkitys on mm. Kansallisessa metsästrategiassa esitettävillä tavoitteilla. Nykyisessä strategiassa on vesistökuormitukseen liittyvä mittari, mutta se koskee vain metsätalouden aiheuttamaa kiintoainekuormitusta. Pelkkä kiintoainekuorma on nykytiedon perusteella liian suppea indikaattori, joka sivuuttaa suuren osan vesistöjen tilaan vaikuttavista tekijöistä.

Tässä asiantuntijaraportissa 1) tehdään katsaus nykyisestä metsätalouden vesistökuormituksen tietopohjasta, 2) kuvataan metsätalouden kuormituksen tämänhetkiset seurantakeinot sekä pohditaan uusia täydentäviä menetelmiä, 3) esitetään ehdotus uusista vesistökuormituksen mittareista Kansalliseen metsästrategiaan, sekä 4) synteesi kuormitusmittareihin ja kuormitusten hallintaan tulevaisuudessa liittyvistä keskeisistä tiedollisista puutealueista ja niitä koskevista jatkoselvitys- ja kehittämistarpeista.

Metsätalouden vesistövaikutusten huomiointi edellyttäisi ainakin kolmea mittaria tai tunnusta, jotka kuvaavat vesistöjen liettymistä, rehevöitymistä ja tummumista. Mittareiden seurannan rungon voisi muodostaa metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkon karttuva seurantatieto. Metsätalouden aktiivitoimenpiteiden aiheuttaman kuormituksen ohella seurannassa ja laskelmissa tulisi ottaa huomioon ojituksen aiheuttama pitkäaikaiskuormitus ja siinä tapahtuvat muutokset suhteessa luonnontilaiseen taustahuhtoumaan. Kuormituksen muutosten seurannassa kertyvien aikasarjojen tuottama trenditieto olisi avainasemassa arvioitaessa metsätalouden vaikutuksia kuormitustrendeihin mm. ilmastonmuutoksen vaikutukset huomioiden. Metsätalouden seurantaverkon tuottaman tiedon täydentämiseen ja muutosten havainnointiin olisi myös tarpeellista kehittää uusia menetelmiä. Arvioiden tarkentumisesta huolimatta käsitykset metsätalouden vesistökuormituksesta ja sen kehityksestä vaihtelevat yhä huomattavasti ja kuormituslaskentaa olisi siksi edelleen kehitettävä. Myös vesiensuojelun parantamiseksi tarvitaan uusia menetelmiä. Näitä silmällä pitäen raportissa esitetään keskeisiä tulevaisuuden tutkimus- ja kehittämistarpeita.

Asiasanat: metsänkäsitely, turvemaametsät, kunnostusojitus, uudistushakkuu, lannoitus, metsätalouden seurantaverkko, ojituslisä, typpikuormitus, fosforikuormitus, orgaaninen hiili, tummuminen, rehevöityminen

Sisällys

1. Taustaa	5
2. Selvityksen tavoitteet.....	8
3. Mistä ja miten metsätalouden vesistökuormitus syntyy – katsaus tutkimustietoon	9
3.1. Hakuut	9
3.2. Kunnostusojitukset.....	12
3.3. Metsien lannoituksen vesistövaikutukset.....	15
3.4. Vanhojen ojitusten aiheuttama kuormitus.....	16
4. Mikä on metsätalouden kokonaiskuormitus ja mihin laskenta perustuu?	19
4.1. Kuormituslaskentamenetelmät.....	19
4.2. Ominaiskuormituslaskenta.....	19
4.3. Erotusmenetelmä.....	20
4.4. Kuormituksen laskenta tilastollisten mallien avulla.....	21
5. Metsätalouden vesistökuormituksen seuranta	23
5.1. Metsätalouden seurantaverkko.....	23
5.2. Muut kuormitusseurannat.....	25
6. Vesistökuormitus Kansallisessa metsästrategiassa.....	27
7. Johtopäätökset ja kehitysehdotukset	30
Viitteet.....	33

1. Taustaa

Metsien käytöstä aiheutuu lähes aina ravinne- ja kiintoainekuormitusta vesistöihin. Luonteeltaan metsätalouden, kuten myös maatalouden, haja-asutuksen ja turvetuotannon aiheuttama kuormitus on ns. hajakuormitusta, jossa tarkkaa päästölähdettä ei ole mahdollista paikallistaa. Typpi- ja fosfori kuormitus aiheuttavat vesistöjen rehevöitymistä ja kiintoainekuormitus liettymistä ja samentumista. Maa-alueilta – erityisesti soilta ja turvemailta – huuhtoutuu myös orgaanista ainetta sekä liukoisessa että partikkelimaisessa muodossa. Niitä mitataan joko orgaanisena kokonaishiilenä (*total organic carbon*, TOC) tai liuenneena orgaanisena hiilenä (*dissolved organic carbon*, DOC), mikäli partikkelimainen orgaaninen hiili (*particle organic carbon*, POC) on suodatettu vesinäytteestä pois. Orgaaninen aine vaikuttaa monin tavoin veden kemiaan, säädellen mm. veden väriä, vesistöjen lämpötilaa, valaistusolosuhteita, perustuotantoa, ravintoketjuja, happamuutta, ravinteisuutta sekä metallien ja haitallisten aineiden kulkeutumista ja myrkyllisyyttä sekä hiilen kiertoa. Vesistöissä havaittu tummumiskehitys liittyy pitkälle orgaanisen aineen pitoisuuksien nousuun viimeisten noin 30 vuoden aikana (Sarkkola ym. 2009). Myös raudalla on tärkeä merkitys veden tummumiskehitykseen ja metsävaluma-alueilta tulevan raudan ja TOC:n pitoisuuksien on havaittu korreloivan voimakkaasti keskenään ja myös raudan pitoisuuksissa on havaittu nousevia trendejä (Kritzberg & Ekström 2012, Sarkkola ym. 2013, Kritzberg ym. 2020).

Liunneen orgaanisen aineen huuhtoutumisen syynä on mm. hapettomuudesta johtuva orgaanisen aineen epätäydellinen hajoaminen, ja siksi liennutta orgaanista ainetta huuhtoutuu vesistöihin eniten veden vaivaamilta maa-alueilta, erityisesti soilta. Myös kasvillisuuden ja maan hajottajayhteisön koostumus vaikuttavat hajotuksen tehokkuuteen. Soiden runsaus Suomessa (> 30 % maa-alasta) merkitseekin sitä, että vesistöissä on jo luonnontilassa runsaasti liennutta orgaanista ainetta, mikä antaa vesistöillemme tyypillisen kellertävän-ruskehtavan veden värin. Häiriöttömässä tilanteessa luonnontilaisilla valuma-alueilla ylivoimaisesti suurin osa orgaanisesta hiilestä (> 90 %) on liuenneessa muodossa (Mattsson ym. 2005). Partikkelimaista orgaanista ainetta päätyy vesistöihin esimerkiksi metsäojituksen vaikutuksesta virtaavan veden syövyttäessä turveainesta ojien pohjista ja ojaluiskista. Vesistöissä tavattava liennut orgaaninen aine on pääosin peräisin vesistöjen valuma-alueelta, pieni osa on peräisin vesistön omasta perustuotannosta (Palviainen ym. 2016).

Pinta-alaan suhteutettuna metsätalous on kaikkein laaja-alaisin maankäyttömuoto ja sen osuus Suomen maapinta-alasta on 86 % (Ylitalo 2012). Suuri maankäytön pinta-ala ei kuitenkaan automaattisesti merkitse suurta kuormitusta, vaan kuormituksen määrään vaikuttavat tehtyjen toimenpiteiden voimakkuus ja pinta-ala suhteessa valuma-alueen pinta-alaan sekä se, minkälaiselle kasvupaikalle toimenpiteet kohdistuvat. Hetkellistä ja suhteellisen lyhytaikaista, mutta silti määrällisesti huomattavaakin kuormitusta aiheutuu kunnostusojituksista, hakkuista ja lannoituksista (Finér ym. 2010). Näistä hakkuiden, erityisesti uudistushakkuiden osuus kuormituksesta on suuri. Vuotuinen uudistushakkuupinta-ala on ollut 120 000–150 000 ha, josta noin 20 000 ha on turvemaiden hakkuita. Vaikka turvemaiden pinta-alaosuus on alle viidennes toteutuneista uudistushakkuupinta-aloista, niiden vaikutus on kuitenkin huomattava, sillä turve- maalta tuleva kuormitus on moninkertaista kivennäismaiden hakkuualoilta tulevaan kuormitukseen verrattuna (Finér ym. 2010). Harvennushakkuita toteutetaan vuosittain paljon suuremmalla pinta-alalla kuin uudistushakkuista, ja aiemmin oletettiin, etteivät ne aiheuta merkittävää ravinnekuormitusta. Julkaistua tutkimustietoa harvennushakkuiden kuormitusvaikutuksesta ei kuitenkaan ole. Vielä julkaisemattomien Luken kokeiden tulosten perusteella näyttäisi siltä, että typpi-, fosfori- ja DOC-kuormitus olisi turvemaiden harvennuksilla noin 40 % vastaavasta uudistushakkuun kuormituksesta. Tärkeä kuormitusta aiheuttava toimenpide ovat myös olleet

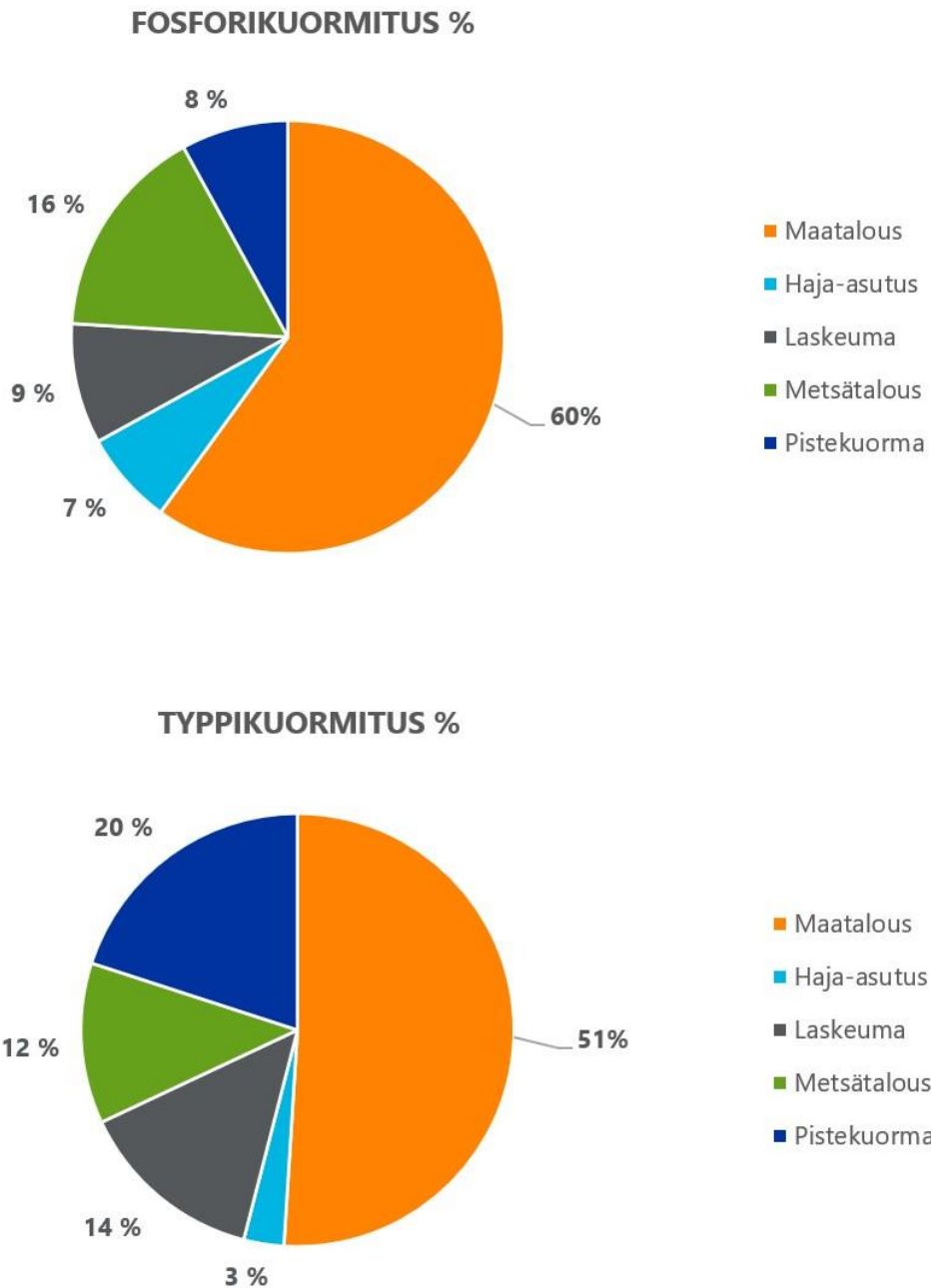
turvemaametsien kunnostusojitukset, joita on tehty vuosittain 30 000–50 000 ha. Kunnostusojitukset aiheuttavat etenkin kiintoainekuormitusta ja niiden osuus koko metsätalouden kiintoainekuormituksesta on ollut yli 90 %. Viime vuosina kunnostusojituspinta-alat ovat vähentyneet ja tulevaisuudessa niiden odotetaan vähentyvän entisestään, mikä tulee vähentämään myös kiintoainekuormitusta.

Yksittäisten metsätaloustoimenpiteiden välittömien vaikutusten ohella metsätalous voi aiheuttaa myös pysyvää kuormituslisäystä. Merkittävintä pitkäaikaiskuormitusta syntyy metsäojituksesta eli siitä, että suo on kuivattu metsänkasvatusta varten (vanhat ojitukset). Viime vuosina on julkaistu tutkimuksia, jotka osoittavat, että metsäojitettujen soiden ravinnekuormitus on huomattavasti suurempaa kuin on aiemmin arvioitu (Nieminen ym. 2017a, 2018c, Marttila ym. 2018, Nieminen ym. 2020, Finér ym. 2021, Aaltonen ym. 2021). Aiemmin metsäojituksen vesistövaikutusten ajateltiin olevan lyhytaikaisia ja kuormituksen palautuvan luonnontilaisten soiden tasolle 10–30 vuodessa (Finér ym. 2010). Nieminen ym. (2017a, 2018c) havaitsivat kuitenkin, että ravinnekuormitus ojitetuilla soilla voi jäädä pysyvästi suuremmaksi kuin luonnontilaisilla soilla. Näiden tutkimusten perusteella esitettiin arvioita, joissa metsäojitus kattaa jopa 90 % metsätalouden aiheuttamasta typen kokonaiskuormituksesta (Finér ym. 2020). Metsäojituksen pysyväisluonteisen kuormituksen huomioon ottaminen on muuttanut merkittävästi metsätalouden ja erityisesti metsäojituksen roolia vesistöjen kokonaiskuormituksessa (Nieminen ym. 2020a, Finér ym. 2021). Metsäojitettujen soiden typpi- ja fosforikuormitus oli aiemmissa arvioissa vain 1–3 % kaikesta ihmisperäisestä kuormituksesta (Finér ym. 2010). Uuden tiedon perusteella kuormitus voi fosforin osalta olla viidennes ja typen osalta lähes 15 %. Viimeaikaisten tutkimusten tulokset viittaavat myös siihen, että erityisesti hiili- ja typpikuormat ojitetuilta soilta voivat tulevaisuudessa edelleen kasvaa (Nieminen ym. 2017a, 2018c, 2022, Asmala ym. 2019, Räike ym. 2020). Myös kasvatettavilla puulajeilla on vaikutusta huuhtouman suuruuteen. Kuumikoiden määrän ja hiilen huuhtouman on havaittu korreloivan vahvasti keskenään (Mattsson ym. 2003, Škerlep 2021)

Metsätalouden kuormitusvaikutuksista saatu uusi tieto on korostanut aiempaa enemmän metsätalouden merkitystä sekä paikallisesti että Itämereen kohdistuvan kuormituksen näkökulmasta. Vaikka esimerkiksi Itämereen kohdistuva kuormitus ei ole yleisesti kasvanut, ihmisen aiheuttaman kuormituksen osuus arvioidaan nykyisin suuremmaksi kuin aiemmin. Se osa kuormituksesta, mikä nyt tunnistetaan ensiojituksen pitkäaikaiskuormitukseksi, sisällytettiin aiemmin luonnon taustahuuhtoumaan. Tämä kasvattaa osaltaan metsätalouden toimijoiden vastuuta vesistöjen kunnosta, sillä monilla vesistöalueilla metsätaloudesta on uuden tiedon perusteella tullut suurin ihmisen aiheuttama kuormituslähde (Nieminen ym. 2020). Samalla tiedon lisääntyminen on paljastanut uusia tietoaaukkoja ja haasteita kuormituksen syntymekanismien tunnistamisessa ja kuormituksen torjunnassa. Erityisesti metsäojitusten aiheuttaman pitkäaikaiskuormituksen torjuminen on käytännössä mahdotonta perinteisillä vesiensuojelumenetelmillä. Metsäojitettujen soiden ennallistamistoimillakaan ei voida saavuttaa nopeita kuormitusvähennyksiä. Näistä syistä metsätalouden ja erityisesti metsäojituksen aiheuttaman kuormituksen tunteminen ja sen hallinta on vesiensuojelullisesti entistä tärkeämpää.

Hajakuormituksen tarkempaa tuntemusta tarvitaan myös mm. vesipuite- ja meristrategiadirektiivien (2000/60/EY ja 2008/56/EY) toteuttamiseen sekä Euroopan ympäristökeskukselle (EEA) ja Itämeren suojelukomissiolle (HELCOM) tapahtuvaan raportointiin. Valtioneuvosto hyväksyi 16.12.2021 seitsemän alueellista vesienhoitosuunnitelmaa ja uuden merenhoitosuunnitelman vuosille 2022–2027. Niiden tavoitteena on vesien vähintään hyvä tila ja tilan heikkenemisen estäminen. Monet metsissä tehtävät toimenpiteet edellyttävät kuormituksen vähentämistä ja toisaalta myös metsätalouden aiheuttaman kuormituksen kattavaa seurantaa, jotta mahdollisiin muutoksiin pystytään reagoimaan riittävän aikaisessa vaiheessa. Vesistöjen suojelun

kannalta tärkeä merkitys on mm. Kansallisessa metsästrategiassa esitettävillä tavoitteilla ja nykyisessä strategiassa on vesistökuormitusta koskeva mittari. Se koskee kuitenkin vain metsätalouden aiheuttamaa kiintoainekuormitusta. Pelkkä kiintoainekuorma on nykytiedon perusteella liian suppea indikaattori, joka sivuuttaa suuren osan vesistöjen tilaan vaikuttavista tekijöistä metsätalousalueilla.



Kuva 1. Vesistöihin tulevien ihmisperäisten fosfori- ja typpikuormitusten osuudet Suomessa. Lähteet: SYKE, Finér ym. (2021), Nieminen ym. (2020).

2. Selvityksen tavoitteet

Tämän asiantuntijaselvityksen tavoitteena on tehdä:

- Katsaus nykyisestä metsätalouden vesistökuormituksen tietopohjasta: Mistä toimenpiteistä ja kuinka paljon kuormitusta syntyy, miten vesiensuojelutoimenpiteillä voidaan vähentää kuormitusta tulevaisuudessa ja miten niiden odotetaan vaikuttavan kuormituksen kehitykseen, tämänhetkinen käsitys ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsätalouden kuormitukseen kangas- ja turvemailta, metsätalouden jälkikäytön toimenpiteiden kuormitusvaikutukset (ensisijaisesti ennallistaminen).
- Kuvaus metsätalouden kuormituksen tämänhetkisistä seurantakeinoista sekä pohdinta uusista täydentävistä menetelmistä.
- Ehdotus uusista vesistökuormituksen mittareista Kansalliseen metsästrategiaan: Mitkä mittarit parantaisivat mahdollisuuksia kuvata ja seurata metsätalouden kestävyttä veden laadun osalta nykyistä paremmin kustannustehokkuus huomioiden, ja miten niitä kannattaisi jatkossa kehittää sekä minkälaisia kriteerejä ja tavoitteita mittareille kannattaa ja on ylipäänsä mahdollista asettaa.
- Synteesi mittareihin ja kuormitusten hallintaan tulevaisuudessa liittyvistä keskeisistä tiedollisista puutealueista ja niitä koskevista jatkoselvitys- ja kehittämistarpeista.

3. Mistä ja miten metsätalouden vesistökuormitus syntyy – katsaus tutkimustietoon

Metsätaloudesta aiheutuu kuormitusta vesistöön metsänkäsittelytoimenpiteiden muuttaessa ravinteiden ja kiintoaineen pidätys- ja vapautumisprosesseja joko tilapäisesti tai pitkäaikaisesti. Näitä ovat puuston ja pintakasvillisuuden ravinteiden ottokyvyn väheneminen, ravinteiden mineralisoitumisen lisääntyminen, maaperän ravinteiden pidätyskyvyn väheneminen ja maaperän eroosio. Keskeiset metsätalouden kuormitusta ainakin väliaikaisesti aiheuttavat toimenpiteet ovat uudistushakkuut, kunnostusojitukset ja lannoitukset. Vanhoista ojituksista aiheutuu merkittävää pitkäaikaista kuormitusta.

3.1. Hakkuut

Hakkuiden - erityisesti uudistushakkuiden - jälkeen kuormitusta syntyy puuston ja pintakasvillisuuden ravinteiden oton ja haihdunnan vähentyessä, ravinnekierron muuttuessa, hakkuutähteiden ja hakattujen puiden juuriston hajotessa, maanmuokkauksen lisäämän eroosion ja turvemaileda myös vedenpinnan nousun aiheuttamien kemiallisten reaktioiden seurauksena. Hakkuun aiheuttamat huuhtoumat ovat suurimmillaan kolmena ensimmäisenä vuonna toimenpiteen jälkeen, sen jälkeen hakkuuaukolle palautuva pintakasvillisuus sitoo tehokkaasti vapautuvia ravinteita (Palviainen ym. 2005, Palviainen ym. 2014). Kangasmaiden uudistushakkuissa kokonaistypen ominaiskuormituksen on laskettu olevan noin $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$ vuodessa ja kokonaisfosforin n. 25 g ha^{-1} vuodessa perustuen yhdeksään valuma-aluepariin (Finér ym. 2010). Joiltakin tutkimusalueilta on kuitenkin raportoitu huomattavasti suurempia kuormituksia; yli puolen kilogramman vuotuisia fosforikuormituksia esimerkiksi Nurmeksen (Valtimon) Murtopuron (Ahtiainen & Huttunen 1999) ja Ylöjärven (Kurun) Vanneskorven hakkuualueilta (Haapanen ym. 2006). Kangasmaiden harvennushakkuiden aiheuttamaa kuormitusta ei tunneta, mutta hehtaarikohtaisen kuormituksen voidaan perustellusti olettaa olevan pieni, koska keskeisiin kuormitusta aiheuttaviin tekijöihin vaikutetaan harvennushakkuissa huomattavasti pienemmällä voimakkuudella kuin uudistushakkuissa.

Ehkä merkittävin puute kangasmaiden metsänuudistamisen vesistövaikutuksiin liittyen on, että alavilla kangasmailla yleistyneen ojitusmätästyksen vesistövaikutuksia ei tunneta. Erityisesti hienojakoisten kangasmaiden ojitusmätästäminen voi metsäojituksesta saatujen tutkimustulosten perusteella aiheuttaa hyvin suurta kiintoainekuormitusta.

Turvemaileda uudistushakkuiden aiheuttama hehtaarikohtainen kuormitus on suurempaa kuin kangasmailta. Ominaiskuormitukseen perustuvien laskelmien mukaan turvemaiden uudistushakkuissa huuhtoutuu kokonaistyppeä keskimäärin $2,5 \text{ kg ha}^{-1}$ vuodessa ja kokonaisfosforia n. 64 g ha^{-1} vuodessa (Finér ym. 2010). Fosforia huuhtoutuu erityisesti rämeiden uudistusaloilta, joilla sitä lähtee liikkeelle sekä turpeesta että hakkuutähteistä (Kaila ym. 2014). Ravinteikkaammilla kasvupaikoilla fosfori on sitoutunut tiukemmin maan alumiini- ja rautayhdisteisiin ja fosforihuuhtoumat ovat siksi yleensä pienempiä. Kuitenkin myös ravinteikkailta kasvupaikoilta voi huuhtoutua fosforia turpeen korkeasta fosforinpidätyskyvystä huolimatta. Näin on esimerkiksi silloin, kun hakkuu lisää fosforipitoisen eroosioaineksen huuhtoutumista.

Turvemaiden metsätalouskäyttö saattaa tulevaisuudessa lisätä entisestään orgaanisen hiilen huuhtoumia ja kiihdyttää vesistöjen tummumista, sillä suuria pinta-aloja ojitusalueiden suometsiä on saavuttamassa uudistuskypsyden. Suometsien päätehakkuihin vesistövaikutuksia hiilen huuhtoumiin on tutkittu hyvin vähän, mutta jo niidenkin tulosten perusteella huuhtoumat

voivat olla merkittäviä kasvupaikasta riippuen. Niemisen ym. (2015) mukaan hakkuun aiheuttama DOC-kuormitus kuusivaltaisilla rehevillä soilla Etelä-Suomessa oli 400–500 kg ha⁻¹ kolmen ensimmäisen vuoden aikana hakkuun jälkeen (3–4 -kertainen hakkaamattomaan verrattuna). Viljavuudeltaan karuilla soilla vastaava kuormituslisäys oli 150–250 kg ha⁻¹ (Nieminen ym. 2015). Kuormitus ei tässä ajassa vielä alkanut vähentyä, mutta pidemmältä ajalta ei ole käytettävissä tutkimustietoa turvemaiden hakkuiden vaikutuksista.



Kuva 2. Uudistushakkuu lisää alueelta tulevaa typpi- ja fosforikuormitusta 4–10 vuotta toimenpiteen jälkeen. Turvemailta kuormitukset pinta-alayksikköä kohden ovat kahdesta viiteen kertaa suurempia kuin kivennäismailta ja lisäksi niiltä huuhtoutuu myös orgaanista hiiltä (DOC). Turvemailta kuormituksen synnyttää vedenpinnan tason voimakas nousu puuston ja pintakavillisuuden haihdunnan vähenemisen seurauksena. (Kuva: Sakari Sarkkola).

Metsänuudistamisen vaikutus kiintoainekuormitukseen on hyvin tapauskohtaista kuormituksen ollessa suurinta yleensä silloin, kun hakkuun jälkeen toteutettu kunnostusojitus tai ojitusmätästys aiheuttaa merkittävää ojaeroosiota. Hakkuun jälkeen tehty ojitus lisää myös ammoniumtyypen huuhtoumaa. Merkittävin ravinne- ja hiilihuuhtoumia lisäävä prosessi ojitetuilla soilla on kuitenkin hakkuun aiheuttama suon vedenpinnan nousu ja aiemmin hapekkaiden turvekerrosten muuttuminen hapettomiksi, jota tapahtuu myös muiden vettymistä aiheuttavien toimenpiteiden, kuten ennallistamisen jälkeen (ks. Kaila ym. 2016, Koskinen ym. 2017). Kailan ym. (2014) mukaan fosforin huuhtoutuminen ei lisääntynyt karulta alumiini- ja rautaköyhältä suolta silloin, kun vedenpinta hakkuun jälkeen pysyi syvemmällä kuin n. 30 cm maanpinnasta, mutta huuhtouma oli huomattavaa (>300–400 g ha⁻¹ vuodessa) vedenpinnan noustua n. 20 cm:n syvyydelle. Liuenneen orgaanisen tyypin ja orgaanisen hiilen huomattava huuhtoutuminen rehevimmiltä soilla hakkuun jälkeen selittyi myös vedenpinnan nousun aiheuttamalla

hapettomuudella, minkä seurauksena ennen hakkuuta voimakas orgaanisen aineen hajotus jää vaillinaiseksi. Tämä kiihdyttäneee erilaisten typpi- ja hiilipitoisten hajoamisen välituotteiden vapautumista valumavesiin. Hapettomissa oloissa tapahtuvissa kemiallisissa nk. pelkistysreaktioissa maaperän pH nousee, orgaanisten molekyylien adsorptio rauta- ja alumiiniyhdisteisiin vähenee ja orgaanisen aineen pitoisuudet valumavedessä kasvavat.

Viimeisimmät tutkimustulokset poiminta- ja kaistalehakkuiden jälkeisistä ravinne- ja orgaanisen hiilen huuhtoumista ojitetuilla soilla näyttävät huomattavasti pienempiä kuormituksia kuin uudistushakkuiden (avohakkuu) jälkeen ainakin lyhytaikaisesti (Sarkkola ym. 2022, Nieminen ym. julkaisematon, Palviainen ym. 2022). Tulokset ovat kuitenkin vasta ensimmäisiä perustuen muutamaan kenttäkokeeseen ja lisää tietoa tarvittaisiin varsinkin osittaishakkuiden pitkäaikaisista vaikutuksista. Vaikka tulokset antavat viitteitä osittaishakkuun selvästä paremmuudesta avohakkuuseen verrattuna vesistökuormituksen näkökulmasta, ne toisaalta antavat perusteet olettaa, että toisin kuin kivennäismailla turvemaidella myös tavanomaisista harvennushakkuista aiheutuu jonkin verran kuormitusta. Vielä julkaisemattomien tulosten perusteella hakkuun aiheuttamat typpi- ja fosforihuuhtoumat ojitetuilla turvemaidella näyttäisivät riippuvan enemminkin valuma-alueelta poistetun puuston kokonaisuudesta kuin hakkuutavasta.

Kaliumin huuhtoutumisella ei ole juuri merkittäviä vesistövaikutuksia, mutta ns. kaliumpuutos-alueilla, kuten määristä avosoista tai sekatyypin soista ojitetuilla kasvupaikoilla, kaliumia on puutten käytössä niukasti. Hakkuut voivat pahentaa tätä puutetta, kun kaliumia poistuu sekä korjatun puubiomassan että huuhtoumien kasvun myötä (Laiho 1997, Saarinen ja Silver 2011). Runsasravinteisilta kasvupaikoilta kaliumia huuhtoutuu kolmen hakkuun jälkeisen vuoden aikana noin 30 kg ha⁻¹ ja karuilla kasvupaikoilta noin 10 kg ha⁻¹ (Sarkkola ym. 2016). Karuilla kasvupaikoilla tämä kaliumhuuhtouma voi kuitenkin olla jopa kolmannes kaliumin kokonaisvarannosta turpeessa. Kaliumpoistuman vähentämiseksi karuilla kasvupaikoilla ja paksuturpeisilla rehevillä kasvupaikoilla olisi syytä välttää kokopuukorjuuta.

Hakkuutähteiden korjaamisella tai vaihtoehtoisesti jättämisellä kasvupaikalle näyttäisi olevan vähäinen vaikutus huuhtoumiin verrattuna hapettomuuden aikaansaamaan ravinteiden ja orgaanisen hiilen vapautumiseen. Koska hakkuualueen vettyminen on merkittävä huuhtoumiin vaikuttava tekijä, ainakin teoriassa huuhtoumia voitaisiin torjua tekemällä kunnostusojitus mahdollisimman voimakkaana ja mahdollisimman pian hakkuun jälkeen. Käytännössä vedenpinnan nousua lähelle maan pintaa voi kuitenkin olla vaikea estää uudistamistilanteessa, jossa turve on jo pitkälle maatunutta ja sen vedenjohtamiskyky on siksi heikko. Hyvin intensiivinen ojitus myös kiihdyttäisi eroosiota ja kiintoaineen kulkeutumista vesistöihin, mitä on usein pidetty metsätalouden pahimpana vesistöhaittana. Varmimmin metsänuudistamisen vesistöhaittoja voidaankin torjua johdattamalla vedet alapuolisiin vesistöihin nk. pintavalutuskentän tai vesiensuojelukosteikon kautta. Myös virtaamansäätöpadoilla voidaan torjua tehokkaasti kiintoaineen ja sen mukana kulkeutuvien ravinteiden ja metallien huuhtoutumista, mutta laskeutusaltaita ei tulisi käyttää yksinomaisten vesiensuojelumenetelmänä niiden usein heikon pidätystehon vuoksi (Haahti ym. 2018). Metsänuudistamisen aiheuttama liuenneen orgaanisen hiilen tai liuenneen orgaanisen typen huuhtoutuminen ei ole juuri lainkaan torjuttavissa nykyisin vesiensuojelumenetelmin, koska esim. pintavalutuskentät ja vesiensuojelukosteikat tyypillisinä suoekosysteeminä pikemmin tuottavat vesistöihin liuenneutta orgaanista ainetta kuin pidättävät sitä.

Hakkuiden on todettu vaikuttavan varsinaiseen pohjavesimuodostuman vedenlaatuun vain vähän. Ns. MEPO-hankkeessa pohjavesialueilta tehtyjen mittausten perusteella hakkuut olivat kuitenkin nostaneet pohjaveden nitraattipitoisuuksia siten, että pohjavedestä riippuvaisten lähde-ekosysteemien tila saattoi vaarantua (Britschgi ym. 2022). Lisäksi hakkuiden seurauksena

pohjaveden lämpötila voi kohota ja liukoisia ravinteita sekä hiiltä vapautua normaalia enemmän. Ylijäämä liukoisista ravinteista huuhtoutuu pintavesiin tai suotautuu sadeveden mukana pohjaveteen.

3.2. Kunnostusojitukset

Kunnostusojitus vaikuttaa vesistökuormitukseen sekä pitoisuuksien että valunnan muutosten kautta. Teoriassa valunnan pitäisi lisääntyä välittömästi kunnostusojituksen jälkeen, kun ojien vedenpinta laskee, valuntakynnys alenee ja painovoiman vaikutus lisää veden virtausta saralta ojiin, kunnes saavutetaan uusi tasapaino ojien ja saran vedenpinnan välillä (Koivusalo ym. 2008). Sekä empiiristen tulosten, että mallinnuksella saatujen estimaattien perusteella kunnostusojituksen vaikutus alueen valumiin on kuitenkin verraten vähäinen (esim. Joensuu ym. 1999; Åström ym. 2002, Nieminen ym. 2018a). Pitkällä aikavälillä valunta kuitenkin vähenee, koska kunnostusojituksen vaikutuksesta lisääntynyt puuston kasvu ja kasvava lehtipinta-ala lisäävät haihduntaa. Kunnostusojitus ei kuitenkaan välttämättä lisää puiden kasvua runsaspuustoisilla ojitusalueilla (Sarkkola ym. 2010, 2012, 2013), koska puuston haihdunta on useimmiten riittävä ylläpitämään hyvää kuivatusta juuristokerroksessa ojaverkon huonosta kunnosta huolimatta. Näissä tapauksissa kunnostusojituksesta ei ole välttämättä hyötyä puuston kasvatuksen näkökulmasta.

Huolimatta siitä, että ojien perkauksella voi olla vähäisiä vaikutuksia vuotuisiin valuntamääriin, se voi kuitenkin aiheuttaa merkittäviä muutoksia ojitusalueen valuntadynamiikassa. Esimerkiksi huippuvirtaamat voivat aluksi lisääntyä ja siten lisätä eroosiota (Tuukkanen ym. 2016). Ensiker-
taisen ojituksen jälkeen on raportoitu alivalumien lisääntymistä (Ahti 1987, Sirin ym. 1991, Johnson 1998, Prévost ym. 1999), mutta kunnostusojitusten vaikutuksesta niihin tiedetään vähän.

Kunnostusojitus lisää selvästi kiintoainehuuhtoumia ja on arvioitu, että kunnostusojituksen aiheuttama kiintoainekuormitus on yli 90 % koko metsätalouden kiintoainekuormituksesta (Finér ym. 2010). Kiintoainekuormat kertaalleen ojitetuilta soilta ennen kunnostusojitusta ovat olleet keskimäärin alle 10–20 kg ha⁻¹ vuodessa (Joensuu ym. 1999), kun taas Joensuu ym. (2002) raportoivat kiintoainekuorman lisääntyneen keskimäärin 268 kg ha⁻¹ ensimmäisenä toimenpiteen jälkeisenä vuotena (40 valuma-alueetta). Vastaavasti Niemisen ym. (2010) mukaan toimenpiteen jälkeinen kiintoainekuorma on noin 18 kertaa lähtötasoa suurempi ensimmäisen vuoden aikana (9 valuma-alueetta). Ensimmäisen kunnostusojituksen jälkeisen vuoden jälkeen kiintoainekuorma on edelleen korkea varsinkin valuntahuippujen, kuten kesän rankkasateiden ja kevätvalunnan aikana (Marttila ja Kløve 2010a, Haahti ym. 2016, Tuukkanen ym. 2016). Kunnostusojituksen vaikutuksessa kiintoainehuuhtoumaan on kuitenkin huomattavaa vaihtelua riippuen erityisesti maaperän ominaisuuksista ojaluisuudesta ja ojan pohjalla. Eroosio voi olla erityisen voimakasta alueilla, joilla turvekerros on niin ohut, että ojat ulottuvat kivennäismaahan. Tämä onkin tärkein kiintoainehuuhtoumiin vaikuttava tekijä. Erityisesti hienolajitteisilla kivennäismailla on suuri eroosioriski kunnostusojituksen jälkeen, mikäli ojat puhkaisevat turvekerroksen. Myös ojiin kertyneiden orgaanisten sedimenttien eroosioherkkyyden (Marttila ja Kløve 2008), ojaluis-
kien eroosion (Stenberg ym. 2015) sekä valuma-alueen pinta-alan (Tuukkanen ym. 2012) on osoitettu vaikuttavan kiintoainehuuhtoumaan. Pitkälle maatuneet turvemaat ovat selvästi herkempiä eroosiolle kuin heikosti maatuneet (Tuukkanen ym. 2014). Kun turvekerros ohenee ojituksen jälkeen, suurempi osa kunnostusojituksissa perattavista ojista voi läpäistä turvekerroksen ja ulottua eroosioherkkiin kivennäismaihin kuin ensiker-
taisessa ojituksessa. Ellei vastaavasti käytetä matalampaa ojasyvyyttä, kiintoainehuuhtouma voi olla paljon suurempi kuin

alkuperäisessä ojituksessa. Suurinta kuormitus on, mikäli pohjamaa on lajitteeltaan keskikarkeaa tai hienojakoista kivennäismaata (Joensuu ym. 2002).



Kuva 3. Kunnostusojitus lisää erityisesti kiintoainekuormitusta. Riski kuormitukselle kasvaa ojan ulottuessa turpeen alaiseen kivennäismaahan ja erityisesti, jos pohjamaa koostuu hienojakoisista kivennäismaalajitteista, kuten savesta ja hiesusta. (Kuva: Sakari Sarkkola).

Myös kiintoaineen laadussa on vaihtelua, joka vaikuttaa sekä kiintoaineen aiheuttamiin vesistövaikutuksiin että vaikutusalueen laajuuteen. Kiintoainekuorma koostuu tavallisesti sekä orgaanisesta että epäorgaanisesta aineksestä. Empiiristä tutkimustietoa on kuitenkin vähän. Yleisesti on oletettu, että mikäli ojan pohjat ulottuvat pelkästään turpeeseen, kiintoainehuuhtouma olisi pääasiassa orgaanista, kun taas kivennäismaapohjaisista ojista huuhtoutuisi pääasiassa mineraaliaineista. On kuitenkin havaintoja, että kivennäismaapohjaisista ojistakin tulevasta kiintoainekuormasta huomattava osa (50–60 %) voi olla orgaanista (Marttila & Kløve 2010a, Tuukkanen ym. 2016). Orgaanisen aineen osuutta kiintoainekuormituksesta lisää mm. orgaanisen aineksen helppo kulkeutuvuus. Karkeammat ja painavammat kivennäismaahiukkaset tarvitsevat huomattavasti enemmän energiaa kulkeutumiseen veden mukana ja ne laskeutuvat useammin lähelle lähtöalueita.

Orgaanisen kiintoaineen ohella kunnostusojitukset vaikuttavat myös veteen liuenneen hiilen (DOC) huuhtoumiin. Vaikka ensikertaisella ojituksella voi olla hyvin vaihtelevia vaikutuksia hiilen huuhtoumaan (Ahtiainen 1990, Lundin & Bergquist 1990, Rantakari ym. 2010), useimmat kunnostusojituksia koskevat tutkimukset osoittavat valumaveden DOC-pitoisuuksien laskeneen ojan perkauksen jälkeen. Kahden ensimmäisen vuoden aikana DOC-pitoisuuksien lasku vaihteli 15–30 % välillä (Nieminen ym. 2020, Hansen ym. 2013). Suurin kunnostusojituksen jälkeinen

DOC-pitoisuuksien lasku esiintyy kohteilla, joissa ojan pohja on hieno- tai karkealajitteista kivennäismaata ja vaikutus voi kestää jopa 20 vuotta toimenpiteen jälkeen (Joensuu 2013). DOC-huhtoman lasku kuormiksi muutettuna vaihteli noin 40–80 kg ha⁻¹ vuodessa ensimmäisten vuosien aikana kunnostusojituksen jälkeen (Joensuu ym. 2001, Nieminen ym. 2010, Saari & Högmänder 2013).

Liunneen orgaanisen hiilen kuorman (DOC) vähenemisen syytä kunnostusojituksen jälkeen ei tunneta tarkkaan, mutta tälle on esitetty useita hypoteeseja. Näitä ovat mm. veden virtaamisen siirtyminen turvekerroksesta turpeen alaiseen mineraalimaahan, jossa on vähemmän hiljattain kuollutta hiilipitoista orgaanista ainesta ja jossa orgaaniset molekyylit voivat pidäytyä mineraaliainekseen (Åström ym. 2001a, b). Mahdollisena syynä on myös esitetty turpeessa alenevan vedenpinnan myötä tapahtuvia kemiallisia reaktioita (hapetusreaktiot), jotka vähentävät metallien, etenkin raudan ja alumiinin liukoisuutta ja kohottavat maaveden happamuutta lisäten orgaanisten molekyylien adsorptiota alumiini- ja rautayhdisteisiin (Nieminen ym. 2018a, b). Prosessit olisivat siis päinvastaisia kuin uudistushakkuiden tai ennallistamisen jälkeen vedenpinnan noustessa, jolloin orgaanisen aineen pidäytyminen heikkenee. Vaikka kunnostusojitus jonkin verran vähentää ojitusalueiden DOC-kuormaa, ne ovat silti korkeammat ojitetuilla kuin luonnontilaisilla soilla. Ojitetuilla soilla valumaveden DOC-pitoisuudet ovat tyypillisesti 25–30 % korkeammat kuin luonnontilaisilla soilla (Nieminen ym. 2021b).

Typen ja fosforin kuormituksen osalta kunnostusojituksen vaikutuksista on vaihtelevia tuloksia. Kokonaistypen kuormitukseen kunnostusojituksella on todettu olevan vain vähäisiä vaikutuksia (Joensuu ym. 2002, 2006, Nieminen ym. 2010). Liunneen epäorgaanisen typen, erityisesti ammoniumin kuormien on todettu kasvavan kunnostusojituksen jälkeen (Joensuu ym. 2002, Hyninen ym. 2011), mutta liunneen orgaanisen typen (DON) kuorma vastaavasti vähenee (Joensuu ym. 2002). Liunneen kokonaisfosforin kuormituksen on raportoitu hieman kasvavan (Nieminen ym. 2010), vähenevän (Joensuu ym. 2006) tai pysyvän ennallaan (Åström ym. 2002). Tulosten eroihin vaikuttavat useat tekijät (Nieminen ym. 2018a), mutta kunnostusojituksen vaikutusta liunneen typen ja fosforin kuormitukseen voidaan pitää vähäisenä, varsinkin muihin turvemailla tehtäviin toimenpiteisiin, kuten uudistushakkuisiin tai lannoituksiin (keinolannoitteet) verrattuna. Suurin osa kunnostusojituksen aiheuttamasta typen ja fosforin kuormasta onkin partikkelimaisessa muodossa tapahtuvaa kiintoainekseen sitoutuneen typen ja fosforin kuormitusta. Aineiden pitoisuus kiintoaineksessa vaihtelee mm. orgaanisen aineksen osuuden mukaan, mutta keskimäärin fosforia on arvioitu olevan kiintoaineessa n. 0,1 % ja typpeä 0,67 % (Nieminen ym. 2018a). Partikkelimaisen fosforin ja typen kuormituksen merkitys korostuu erityisesti isojen virtaamien aikaan (Marttila & Kløve 2010b, Marttila ym. 2010).

Ojien kaivua ja perkausta on tehty ja tehdään edelleen paljon myös kangasmaiden metsissä. Valtakunnallisesti yli 20 % ojitetusta metsämaasta on kangasmaata (VMI12). Lisäksi suurin osa metsä- ja suopuroista on aikojen saatossa perattu (syvennetty ja oikaistu), jolloin veden kulku on näissä nopeutunut, eroosio lisääntynyt ja aineksen laskeutuminen puroihin on vähentynyt. Etelä-Suomessa luonnontilaisten purojen määrä on vähentynyt n. 80 % ja pohjoisimmassa Suomessa n. 40 % (Yrjänä ym. 2011). Ei ole olemassa tutkimustietoa siitä, miten paljon kivennäismaiden ojat tai suopurojen perkaaminen ovat vaikuttaneet huuhtoumiin, mutta ensimmäiset tulokset esimerkiksi veden viipymää kasvattavan puuaineksen lisäämisen vaikutuksista kuormitukseen ovat lupaavia (Keskinen 2020). Vaikutukset perustuvat sekä veden virtauksen hidastumiseen ja sitä kautta eroosion vähenemiseen, että huuhtoutuvan aineksen saostumiseen ja ravinteiden biologiseen pidäytymiseen. Tutkimustietoa ojiin ja puroihin lisätyn puuaineksen vaikutuksista tarvittaisiin kuitenkin huomattavasti lisää. Erityisesti tarvittaisiin tietoa siitä, poistuuko puun pinnan päällyskasvustoon pidäytyneitä ravinteita pysyvästi vesisekosysteemistä vai vapautuvatko pidäytyneet ravinteet myöhemmin takaisin veteen.

3.3. Metsien lannoituksen vesistövaikutukset

Luonnonvarakeskuksen sarjassa ilmestyy synteesiraportti metsänlannoituksen taloudellisista ja ympäristövaikutuksista vuoden 2023 alkupuolella. Raportin mukaan lannoituksen merkittävimmät vesistövaikutukset syntyvät typen huuhtoutumisesta kangasmaiden lannoituksessa ja fosforin huuhtoutumisesta ojitettujen soiden lannoitusaloilta. Fosforin huuhtoutuminen ei ole ongelma kangasmailla edes silloin, kun lannoitteet sisältävät fosforia. Tämä johtuu siitä, että kangasmaiden podsolimaannoksen rauta- ja alumiiniyhdisteet pidättävät fosforia erittäin hyvin (Väänänen ym. 2008). Typen huuhtoutuminen taas ei ole ongelma ojitettujen soiden lannoituksessa. Ravinteisilla ja keskiravinteisillakin turvekankailla typpeä on luonnostaan riittävästi metsän kasvatukseen, eikä lannoitusta siksi tarvita. Karuilla turvekankailla typpilannoitusta ei taas tehdä siksi, että se ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Kangasmaiden lannoituksessa typpeä voi huuhtoutua verraten paljon ensimmäisinä vuosina lannoituksen jälkeen. Tutkimuksia kangasmaiden lannoituksen vesistövaikutuksista on kuitenkin tehty hyvin vähän. Ainoassa Suomessa tehdyssä tutkimuksessa typpeä huuhtoutui 12 kg ha⁻¹ ensimmäisenä vuotena ja 3 kg ha⁻¹ toisena vuotena lannoituksen jälkeen (Saura ym. 1995). Ongelma on se, että kangasmailla käytettävät lannoitteet sisältävät nitraattia, joka on erittäin helposti huuhtoutuvaa.

Kangasmaiden osalta ei ole tehty varsinaista lannoitteiden kehitystyötä, jolla huuhtoumia olisi pyritty vähentämään. Ojitetuilla soilla sen sijaan huuhtoutumistutkimuksia on tehty verraten paljon ja myös vesistönäkökuilmasta turvallisten lannoitteiden tuotekehittelyyn on panostettu selvästi enemmän kuin kangasmailla.

Jo pitkään on tiedetty, että lannoitus turvemaiden lisää fosforihuuhtoumia siksi, että etenkin viljavuodeltaan karujen kohosoiden turpeessa on hyvin vähän fosforia pidättäviä alumiini- ja rautayhdisteitä. Toinen ongelma on, että turve on yleensä hyvin hapanta. Tämä aiheuttaa sen, että hyvin hidasliukoisista lannoitteistakin fosforia vapautuu selvästi nopeammin kuin puusto ja muu kasvillisuus sitä pystyy hyödyntämään (Nieminen & Jarva 2000).

Kuormitusongelman ratkaisemiseksi Kemira Oy:n ja silloisen Metsäntutkimuslaitoksen yhteistyönä alettiin 2000-luvulla kehittää rautaa sisältäviä suometsälannoitteita. Ajatuksena oli, että raudan lisääminen lannoitteisiin parantaisi fosforin pidättymistä turpeeseen ja että fosfori ei vapautuisi lannoitteista muutoin kuin puuston ja muun kasvillisuuden fosforinoton kautta. Kemira Oy kehitti ensin jäteliitteitä prosessoimalla rautafosfaattilannoitteen, jota testattiin sekä laboratorio-oloissa että maastokokein (Nieminen ym. 2011). Lannoitteesta ei huuhtoutunut fosforia ja sen puuston kasvua lisäävä vaikutus oli vertailukelpoinen perinteisiin apatiittilannoitteisiin verrattuna. Lupaavimmaksi kehityskohteeksi osoittautui rautafosfaatin ja apatiitin seosta sisältävä lannoite erityisesti siksi, että se lisäsi merkittävästi fosforia vapauttavien sienijuurten syntyä lannoiterakeiden pinnoille. Siitä ei kuitenkaan tullut kaupallista tuotetta, mutta markkinoilla oli jonkin aikaa RautaPK-lannoite, jossa apatiitin sekaan oli mekaanisesti lisätty rautaa. RautaPK:n valmistus lopetettiin 2010-luvulla, mutta vuodesta 2021 alkaen valmistetta on ollut jälleen markkinoilla Rautainen PK-lannoitteen nimellä.

Nykyisin turvemaita lannoitetaan kuitenkin lähinnä puun tuhalla. Tuhka on vesistövaikutusten näkökuilmasta turvallinen lannoite siksi, että se sisältää paljon alumiinia ja rautaa, joihin fosforia sitoutuu sen vapautuessa tuhkan sisältämistä kalsiumfosfaateista (Nieminen ym. 2007). Piiraisen ym. (2013) mukaan tuhasta ei huuhtoutunut fosforia kymmenen vuoden aikana lannoituksen jälkeen.

Vaikka tuhkasta tai rautaa sisältävistä lannoitteista ei ole maastokokeissa huuhtoutunut juurikaan fosforia, on todennäköistä, että käytännön levityksissä fosforia jonkin verran huuhtoutuu. Tähän on syynä se, että lannoitukset tehdään edelleen pääosin helikopterilevityksenä, eikä lannoitteiden joutumista ojiin voida silloin täysin välttää. Kansallisissa vesistökuormitusarvioissa oletetaan, että 3 % lannoitteen fosforista huuhtoutuu siksi, että lannoitteita leviää myös ojiin (Finér ym. 2010). Tuhkalannoituksen vaikutuksista maaperään ja sen pieneliöstöön, jotka vaikuttavat olennaisesti ravinteiden mineralisaatioon, tunnetaan toistaiseksi hyvin heikosti. Uutta tietoa tähän odotetaan lähivuosina mm. Lukessa käynnistyneestä Hiilestä Kiinni -tutkimusohjelman SuoHitu-projektista.

3.4. Vanhojen ojitusten aiheuttama kuormitus

Ojituksen aiheuttamaa pysyvää, luonnontilaisten soiden kuormitusta suurempaa vesistökuormitusta on alettu kutsua ojituslisäksi (Nieminen ym. 2020). Sillä tarkoitetaan vesistökuormitusta, jota syntyy silloinkin, kun ojitetuilla soilla ei ole vuosikausiin tehty mitään kuormitusta synnyttäviä metsätaloustoimenpiteitä. Asiaa on selvitetty vedenlaatuajaksarjojen mallinnuksilla, joiden aineistot on kerätty metsäisiltä valuma-alueilta eri puolilta Suomea; pisimmät ajaksarjat ovat olleet yli 30 vuotta (Nieminen ym. 2017a, Finér ym. 2021). Ojituslisän on arvioitu olevan kunnostusojituksen, lannoituksen ja hakkuiden aiheuttamaa kuormitusta moninkertaisesti suurempaa, mutta kuormitusarviot ovat toistaiseksi perustuneet varsin karkeisiin laskelmiin (Nieminen ym. 2017a, 2018c, 2020a, Finér ym. 2021).

Ojituslisän tunnistaminen on muuttanut merkittävästi tietämystä metsätalouden kuormituksesta suhteessa muihin kuormituslähteisiin. Metsätalouden osuus kaikesta metsistä ja soilta tulevasta typen kokonaiskuormituksesta on em. arvion mukaan 16 %, fosforin huuhtoumasta 25 % ja orgaanisen hiilen huuhtoumasta 4 %. Niemisen ym. (2020a) arvion mukaan taas metsätalous pelkästään turvemaidella kattaisi n. 16 % Suomen ihmisperäisestä fosforikuormasta ja 12 % vastaavasta typpikuormasta. Ojitusalueilta tulevat kuormat voivat myös kasvaa ojituksesta kuluvan ajan myötä (Nieminen ym. 2017a, 2018c).

Ojituslisän suuruudessa on merkittävää maantieteellistä vaihtelua ja hehtaariohtaisen ojituslisän on todettu kasvavan siirryttäessä pohjoisesta etelään eli lämpösumman kasvaessa. Alueellisesti metsätalouden kuormitus painottuu kuitenkin Pohjois-Suomeen, erityisesti Pohjois-Pohjanmaalle Perämeren valuma-alueelle, missä metsäojitettua suota on sekä pinta-alaltaan että maapinta-alaan suhteutettuna eniten (Finér ym. 2021).

Ojituslisän syntymekanismia tunnetaan huonosti. Yhtenä mahdollisena syynä on esitetty, että ensiojitus muuttaa valuntaoloja ja ravinnekiertoa siinä määrin, ettei kuormitus ojituksen jälkeen enää palaa luonnontilaisten soiden kuormituksen tasolle (Nieminen ym. 2020a, 2021ab). Esimerkiksi luonnontilaiset minerotrofiset suot ovat pidättäneet kivennäisravinteita yläpuolisilta alueilta valuvista vesistä ja kerryttäneet niitä orgaanisen aineksen (turpeen) kertymän mukana (Sallantaus ym. 2022). Kun alue ojitetaan, suon elävä pintakerros menettää yhteyden valuma-alueeseensa ja vedet valuvat ojia pitkin vesistöihin ilman, että vesien mukana tulevat ravinteet voisivat pidäytyä suokasvillisuuteen ja turpeeseen (Sallantaus 1988). Sallantauksen ym. (2022) kuudelta suoalueelta keräämän aineiston mukaan luonnontilainen minerotrofinen suo metsätalouden piirissä olevalla valuma-alueella voi pidättää ravinteita niin merkittävästi, ettei veden laatu juurikaan eroa kokonaan luonnontilaisen valuma-alueen veden laadusta.

Samalla alueella tehtyjen metsätaloustoimenpiteiden kuormitusvaikutukset saattavat myös kumuloidua niin, että kuormitus päätty toisiaan seuraavien metsätaloustoimenpiteiden jälkeen aina hieman aiempaa korkeammalle tasolle. Ojituksesta kuluvan ajan myötä puusto ja samalla

sen haihdunta kasvavat, jolloin suon vedenpinta laskee, syviinkin turvekerrokseen virtaa happea ja turpeen hajotus ja ravinteiden vapautuminen kasvavat (Sarkkola ym. 2010, Ojanen & Minkinen 2019, Nieminen ym. 2022). On myös mahdollista, että ilmaston lämpeneminen kiihdyttää orgaanisen aineen hajotusta ja siten myös ravinteiden vapautumista. Turpeen hävikki ojitetuilla soilla on sitä nopeampaa, mitä lämpimämpi on ilmasto (Hiraishi ym. 2014).

Viime aikoina on myös keskusteltu puuston ja muun kasvibiomassan kasvun merkityksestä orgaanisen hiilen kuormituksen lähteenä boreaalisen vyöhykkeen metsäisillä valuma-alueilla (Finstad ym. 2016, Kritzberg ym. 2020, Škerlep ym. 2021, Nieminen ym. 2021a). Tämä ns. *greening effect* eli vihertymisteoria -teoria perustuu siihen, että metsäalueet ovat yleisesti vihertyneet eli metsäbiomassan määrä on kasvanut nopeasti ja metsät ovat kuusettuneet. Metsäkasvillisuus tuottaa helposti huuhtoutuvia hiiliyhdisteitä ja niiden tuotanto on suorassa suhteessa kasvillisuuden määrään. Nieminen ym. (2021a) havaitsivat vesistöjen hiilipitoisuuksien kasvun korreloivan valuma-alueen puuston määrän kanssa - ei niinkään ojitusten määrän kanssa. Ruotsissa tehdyn väitöskirjan mukaan (Škerlep 2021) vesistöjen hiilipitoisuuksien kasvua ja vesistöjen tummumista ei voi selittää ottamatta huomioon metsäbiomassan kasvua eli vihertymisteoriaa.

Viimeisimpien havaintojen mukaan myös typen ja fosforin pitoisuuksien kasvulla ojitusaluiden valumavesissä voi olla yhteys puustobiomassan määrän kasvuun ojitetuilla turvemailla (Nieminen ym. 2022). Jatkotutkimuksia kuitenkin tarvitaan, ennen kuin vesistöjen tummumisen ja ojitustilän syntymekanismit ymmärretään niin hyvin, että niitä vastaan voidaan kehittää vesien-suojelumenetelmiä. Tämänhetkisen tietämyksen mukaan pysyväisluonteinen ojitustilä muodostaa merkittävän osan metsätalouden kuormituksesta ja metsätaloudesta on siitä johtuen tullut monilla vesistöalueilla suurin ihmisperäinen kuormituslähde. Toisaalta tämä tarkoittaa sitä, että muiden metsätalouden kuormituslähteiden (avohakkuiden, lannoitusten, kunnostus- ojitusten) merkitys vesistökuormittajana on vähäisempi kuin aiemmin arvioitiin. Koska ojitustilän poistamiseen valumavedestä ei ole olemassa tehokkaita vesiensuojelumenetelmiä, aiheutuu tästä vesiensuojelutoimille haasteita. Sekä vesiensuojelumenetelmien että kuormituksen synnyn ehkäisykeinojen kehittämiseen tulisivat kiinnittää tulevaisuudessa nykyistä enemmän huomiota.



Kuva 4. Luonnontilaista minerotrofista mäntyvaltaista varsinaista sararämettä (VSR) ja vastaava kasvupaikka n. 60 vuotta ojituksen jälkeen (oikea), jolloin kasvupaikka on muuttunut vähätuot- toisesta suosta runsaspuustoiseksi turvekankaaksi (Ptkg II). Samalla turpeen maatuneisuus on kasvanut. Lisääntyneellä puuston määrällä ja turpeen maatumisella on havaittu olevan yhteyttä ojitusalueilta tulevaan kasvaneeseen kuormitukseen. (Kuvat: Sakari Sarkkola)

Borealisella vyöhykkeellä – etenkin Suomessa – soiden metsätaloustaloudella on merkittäviä vaikutuksia vesistöjen hiilikuormiin ja siten vesistöjen tummumiseen. Erityisen hankalaksi on- gelman tekee se, että liuenneen orgaanisen aineen huuhtoutumisen torjumiseen ei ole

olemassa tehokasta menetelmää. Parhaana vesiensuojelumenetelmänä sekä turvetuotannossa että metsätaloudessa esitetään nk. pintavalutuskenttiä tai vesiensuojelukosteikkoja, joilla tarkoitetaan turvetuotantoalueen tai talousmetsän ja vesistön väliin perustettua ravinteita pidättävää kosteikkoa. Nämä kosteikot kyllä pidättävät kohtuullisen tehokkaasti metsäalueilta ja turvekentiltä huuhtoutuvaa partikkelimaista ainesta sekä fosforia ja typpeä, mutta ovat tehotomia torjumaan liuenneen orgaanisen aineen huuhtoutumista. Ojitetulle turvemaalle perustetut kosteikot voivat toimia jopa kuormituslähteinä ainakin ensimmäisten perustamista seuraavien vuosien aikana ja ylipäätään kosteikot eivät juurikaan pidätä vesistöjä tummentavaa orgaanista ainetta tai toista tummumisen aiheuttajaa eli rautaa (Postila ym. 2014, Nieminen ym. 2020c). Vain kemiallisella puhdistuksella liennut orgaaninen aine saadaan kokonaan vesistöistä pois, mutta sen käyttöä rajoittavat korkeat kustannukset. Myös kemiallista puhdistusta halvempien ratkaisujen kuten biohiilisuodattimien käyttöä on tutkittu ojavesien puhdistuksessa, mutta liuenneen orgaanisen hiilen poistaminen vaatii vielä lisätutkimuksia (Saarela ym. 2020). Mikäli liuenneen orgaanisen aineen ja raudan huuhtoutuminen edelleen jatkuu aiempaa suurempana, meidän on syytä varautua siihen, että tulevaisuudessa Suomen vesistöjen orgaanisen aineen ja raudan pitoisuudet voivat olla entistä korkeammat ja vesistöt voivat olla jopa vielä nykyistä tummempia. Hiilen hävikki voi tulevaisuudessa lisääntyä ilmaston muutoksen myötä myös luonnontilaisilta soilta, mikä voi edelleen johtaa myös liukoisen orgaanisen hiilen huuhtouman lisääntymiseen (Loisel ym. 2021).

Avain ojituslisän torjuntaan saattaisi löytyä siitä, että kuivatustehokkuutta vähennetään ja/tai vedenpintaa tietoisesti nostetaan suometsässä. Ensimmäisten alustavien prosessipohjaisella SUSI-simulaattorilla Luonnonvarakeskuksessa tehtyjen mallinnusten perusteella orgaanisen hiilen vapautuminen turpeesta vähenee, kun kasvukauden keskivedenpintaa nostetaan lähelle 30 cm:n syvyyttä, mikä olisi vielä riittävä syvyys puuston suotuisan kasvun kannalta (Sarkkola ym. 2012). Tarvitaan kuitenkin vielä lisää ymmärrystä kuormituksen syntyyn vaikuttavista mekanismeista ja prosesseista sekä empiiristä mallitulosten verifiointia ennen kuin voidaan antaa ohjeita kuivatussyvyyden säätelystä vesiensuojelumenetelmänä.

4. Mikä on metsätalouden kokonaiskuormitus ja mihin laskenta perustuu?

4.1. Kuormituslaskentamenetelmät

Metsätalouden vesistökuormitusta on perinteisesti arvioitu kolmella eri tavalla: i) nk. ominaiskuormituslukujen avulla, ii) erotusmenetelmällä eli vähentämällä metsätaloustaloudessa olevien valuma-alueiden vesistökuormituksesta luonnontilaisten valuma-alueiden vesistökuormitus, ja iii) tilastollisilla ennustemalleilla. Nämä menetelmät on kuvattu yksityiskohtaisesti julkaisussa Nieminen ym. (2020b) ja tässä katsauksessa tukeudutaan pääosin heidän julkaisuunsa.

4.2. Ominaiskuormituslaskenta

Ominaiskuormituslukuihin perustuva laskenta on ollut pitkään käytännössä ainoa menetelmä arvioitaessa metsätalouden aiheuttamaa vesistökuormitusta (Kenttämies 2006, Finér ym. 2010).

Tämä tarkoittaa, että on kokeellisesti määritetty, paljonko eri metsätaloustoimenpiteet käsitte-lypinta-alaa kohden kasvattavat vesistökuormitusta käsittelemättömästä taustakuormitustasosta. Ominaiskuormitus ilmoitetaan kilogrammoina tai grammoina toimenpidehehtaaria kohden vuodessa eli esim. kilogrammaa typpeä per uudistushakkuuhehtaari per vuosi. Kertomalla eri toimenpiteiden toteutus- ja vaikutusalueita ominaiskuormitusluvuilla ja ottamalla huomioon kuormituksen kesto vuosina, saadaan tietyn metsätalouden toimenpiteen vesistökuormitus tiettyinä ajanjaksona. Laskemalla yhteen eri toimenpiteiden vesistökuormitusarviot saadaan arvio koko metsätalouden vesistökuormituksesta laskenta-alueella. Finér ym. (2010) arvioivat merkittävimpien metsätaloustoimenpiteiden (kunnostusojitus, päätehakkuu, lannoitus) ominaiskuormituslukujen perusteella, että metsätalouden vesistökuormitus Suomessa olisi fosforin osalta noin 130 tonnia ja typen osalta noin 1 600 tonnia vuodessa.

Ominaiskuormitusmenetelmän merkittävänä etuna on, että sillä pystytään tunnistamaan eri metsätaloustoimenpiteiden osuus metsätalouden kokonaiskuormituksesta ja voidaan ennustaa kuormituksen muuttuminen metsätalouden käytäntöjen muuttuessa. Ominaiskuormituslukuihin perustuva arvio metsätalouden kokonaiskuormituksesta on kuitenkin osoittautunut muita arvioita selvästi alhaisemmaksi. Todennäköisenä syynä tähän on se, että ojitussuhteet puutuu ominaiskuormituslukuihin perustuvista arvioista. Ominaiskuormitusluvuilla voi syntyä muita laskentamenetelmiä alhaisempi kuormitusarvio myös siksi, että joillekin metsätaloustoimenpiteille, kuten harvennushakkuille ei ole olemassa ominaiskuormituslukua.

Finérin ym. (2010) arvioita selvästi suurempia arvioita ominaiskuormituslukuihin perustuen esittivät Lepistö ym. (2006) ja Kenttämies (2006). Heidän arvionsa olivat suurempia siksi, että aiemmillä vuosikymmenillä tehdyt ensiojitukset yhä vaikuttivat kuormitukseen toisin kuin myöhemmin tehdyssä Finérin ym. (2010) arviossa.

Ominaiskuormituslukuihin perustuvassa laskennassa merkittäväksi ongelmaksi muodostuu myös metsätaloustoimenpiteiden aiheuttaman kuormituksen keston määrittäminen. Ominaiskuormitusluvut perustuvat tyypillisesti parittaisten valuma-alueiden koejärjestelyyn, jossa kahden ominaisuusiltaan mahdollisimman samankaltaisen valuma-alueen kuormitusta seurataan ennen toisen alueen käsittelyä ja sen jälkeen. Käsittelyn vaikutus lasketaan käsitellyn alueen kuormituksen ja vertailualueen kuormituksesta arvioidun 'laskennallisen taustakuorman' välisenä erotuksena. Koeasetelman sisäinen epävarmuus johtaa siihen, että kymmenen tai

kahdenkymmenen vuoden seurannan jälkeen havaitusta kuormituksesta ei voida useinkaan osoittaa, mikä osa valuma-alueelta tulleista ravinteista on peräisin käsittelystä ja mikä osa on taustakuormitusta (Laurén ym. 2009). Menetelmä ei siis ole erityisen tehokas arvioimaan metsätaloustoimien pitkäaikaisvaikutuksia.

4.3. Erotusmenetelmä

Metsätalouden vesistökuormitusta on tarkasteltu myös vertaamalla metsätalouskäytössä olevia valuma-alueita luonnontilaisiin alueisiin. Metsätalouskäytössä olevien valuma-alueiden vuotuinen typpikuormitus on eri tutkimuksissa vaihdellut 1,9–2,3 kg ha⁻¹ välillä (Kortelainen & Saukkonen 1998, Vuorenmaa ym. 2002, Finér ym. 2018, Aaltonen ym. 2021) ja fosforikuormitus 0,08–0,10 kg ha⁻¹ välillä (Löfgren & Olsson 1990, Kortelainen & Saukkonen 1998, Vuorenmaa ym. 2002, Finér ym. 2018, Aaltonen ym. 2021). Luonnontilaisilla valuma-alueilla vuotuinen typpikuormitus on taas ollut 1,3–1,43 kg ha⁻¹ ja vuotuinen fosforikuormitus noin 0,05 kg ha⁻¹ (Mattsson ym. 2003, Kortelainen ym. 2006, Aaltonen ym. 2021). Ottamalla huomioon metsämaan ala (22,2 milj. ha) ja vähentämällä edellä esitetyistä metsätalouskäytössä olevien alueiden kuormituksista luonnontilaisten alueiden kuormitukset vuotuisiksi metsätalouden typpikuormitukseksi Suomessa saadaan 11 000–18 000 tonnia ja fosforikuormitukseksi 700–1 100 tonnia. Vastaavalla tavalla, mutta jonkin verran alhaisempaa metsämaan alaa (20 milj. ha) käyttäen, Kenttämies ym. (2006) laskivat, että metsätalouden vuotuinen typpikuormitus olisi noin 10 000 tonnia ja fosforikuormitus 800 tonnia.

Erotusmenetelmää käytettäessä ongelmana on, että metsätalouskäytössä olevien ja luonnontilaisten alueiden tulisi vastata toisiaan esimerkiksi kasvupaikkojen osalta. On kuitenkin todennäköistä, että metsätalouskäytössä olevat alueet ovat yleensä ravinteikkaampia kuin luonnontilaisiksi jätetyt alueet, ja ravinteikkailla alueilla ravinnekuormat voivat luontaisestikin olla suuremmat kuin viljavuudeltaan karummilla alueilla. Toisaalta täysin luonnontilaisia alueita ei enää ole, eli vertailussa luonnontilaisina pidettyjen alueiden kuormitus voi olla todellista luonnontilaa korkeampaa siksi, että niilläkin on aiempaa metsätalouden vaikutusta. Erotusmenetelmää käytettäessä tämä tekijä vähentää metsätalouden havaittua merkitystä todelliseen kuormitukseen verrattuna. Erotusmenetelmän selvänä heikkoutena on myös, ettei merkittävimmistä kuormittavista toimenpiteistä tai kuormituksen syistä saada käsitystä. Erotusmenetelmän etuna ominaiskuormitusmenetelmään verrattuna on, että laskettuun kuormaan sisältyvät lähtökohteisesti kaikki metsätalouden toimenpiteet, mukaan lukien harvennushakkuut ja aikaisempien uudisojitusten aiheuttama nk. ojituslisä (Nieminen ym. 2020b).

Taulukko 1. Eri laskentamenetelmiin perustuvat metsätalouden valtakunnalliset typpi- ja fosforikuormitusarviot. lasketuista valtakunnallisista metsätalouden typpi- ja fosforikuormitusarvioista. Niemisen ym. (2018a, 2020a) tulokset ovat pelkästään ojitusalueille, muut luvut koko metsäalalle (22,2 milj. ha).

Menetelmä	Viite	N, Mg a ⁻¹	P, Mg a ⁻¹
Ominaiskuormitus	Finér ym. (2010)	1 600	130
	Kenttämies (2006)*	4 500–7 100	550–800
	Lepistö ym. (2006)	11 000	
Erotusmenetelmä	Nieminen ym. (2020b)	11 000–18 000	700–1 100
Tilastolliset ennustemallit	Nieminen ym. (2018)	13 000	
	Finér ym. (2020)	7 300	440
	Nieminen ym. (2020a)	8 500	585
	Finér ym. (2021)	8 600	620

*) Korkeampi arvio on vuodelle 1977, alempi arvio vuodelle 1993.

4.4. Kuormituksen laskenta tilastollisten mallien avulla

Kolmas menetelmä kuormituksen arviointiin on ollut tilastollinen mallinnus (regressio), jossa tuotetuilla malleilla lasketaan valumaveden ravinnepitoisuuksien tai -kuormitusten riippuvuus valuma-alueen ominaisuuksia ja ilmastoja kuvaavista tekijöistä. Tilastolliseen kuormitusmallinnukseen perustuvia laskelmia koko metsätalouden kokonaiskuormituksesta ovat tehneet Finér ym. (2020, 2021) ja metsäojitettujen soiden kuormituksesta Nieminen ym. (2020a). Kummassakin tutkimuksessa selittävinä tekijöinä olivat ojitusalueen osuus valuma-alueen pinta-alasta ja sijaintia kuvaavana tunnuksena lämpösumma sekä Finérin ym. (2020, 2021) malleissa lisäksi soiden osuus valuma-alueen pinta-alasta. Fosforin ja orgaanisen hiilen osalta edellä mainitut mallit sisälsivät myös aikatekijän, eli mittausajankohta vaikutti fosfori- ja hiilipitoisuuksiin valumavedessä. Esitetyt mallit johtivat eriäviin arvioihin vuotuisesta vesistökuormituksesta. Niemisen ym. (2020) kuormitusarviot (typpi: 8 500 tonnia vuodessa, fosfori: 590 tonnia vuodessa) pelkille ojitusalueille (5,9 milj. ha) olivat suurempia kuin Finérin ym. (2020) arviot (typpi: 7 300 tonnia, fosfori: 440 tonnia) koko metsäalalle (22,2 milj. ha). Finérin ym. (2021) tutkimuksesta tehty täydennetty mallinnus ja sen pohjalta tehdyt uudet laskelmat tuottivat kuitenkin edellisistä (Finér ym. 2020) suurempia arvioita koko metsätalouden kuormituksesta (typpi: 8200 tonnia vuodessa, fosfori: 620 tonnia vuodessa).

Nieminen ym. (2018) arvioivat metsäojitettujen soiden typpikuormituksen karkeasti Etelä- ja Pohjois-Suomelle mallilla, jossa selittävänä tekijänä sijainnin (lämpösumman) ja ojitusprosentin (ojitusalueiden osuus valuma-alueen pinta-alasta) lisäksi oli ojituksesta kulunut aika. Heidän arvionsa metsäojituksen typpikuormituksesta (ojituslisästä) oli noin 13 000 tonnia vuodessa. Suurempi kuormitus Niemisen ym. (2020a) esittämään arvioon verrattuna johtunee siitä, että em. tutkimuksessa käytettiin myös 100 % ojitusaluetta sisältäviä nk. keinotekoisia suo-ojien rajaamia valuma-alueita. Näillä keinotekoisilla valuma-alueilla ojitus on usein huomattavasti voimaperäisempää kuin luontaisilla topografisesti rajatuilla valuma-alueilla ja siksi ravinnehuuhtoumat voivat olla suurempia.

Käytetyissä tilastollisissa laskentamalleissa sijainti (lämpösumma), suoala, ojitusala ja ojituksesta kulunut aika ovat ainoita kuormitusta selittäviä tekijöitä, eli mallit ovat vielä hyvin karkeita luotettavien alueellisten arvioiden tuottamiseen. Jatkossa tulisikin pyrkiä ennustemalleihin, jotka ottavat huomioon erilaiset ja eri osissa maata hyvinkin paljon vaihtelevat aluetekijät (maalajit, ojaverkoston kokonaismäärä, kasvupaikkatyypit, puuston määrä ja rakenne ym.) paremmin kuin tähän mennessä kehitetyt mallit.

5. Metsätalouden vesistökuormituksen seuranta

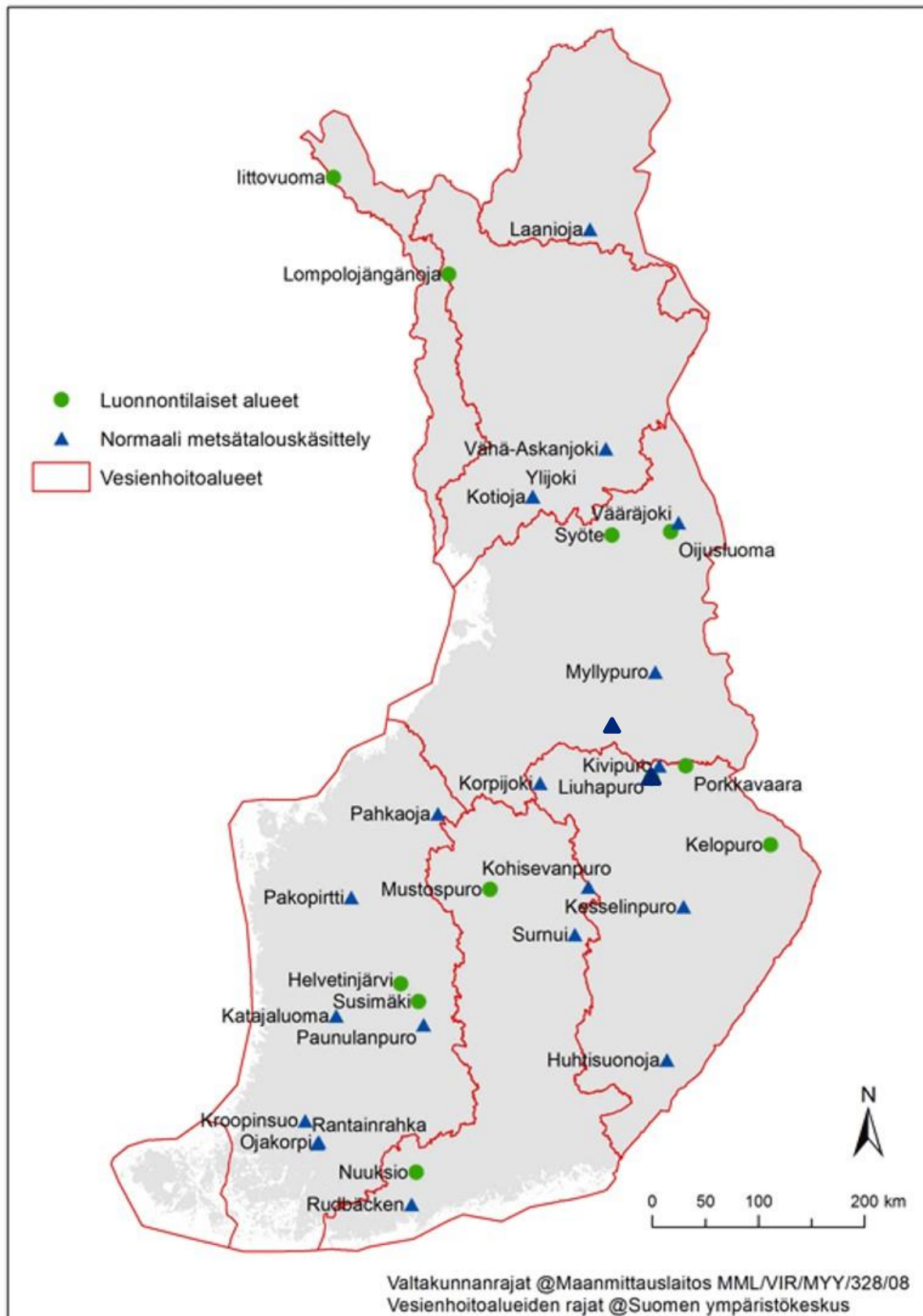
5.1. Metsätalouden seurantaverkko

Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaan ja tulosten raportointiin velvoittavat useat sekä kansainväliset että kansalliset säädökset, sopimukset ja ohjelmat. Maa- ja metsätalousministeriön rahoittama ja Luonnonvarakeskuksen koordinoima Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkko perustettiin 2014 perusteellisen selvitystyön jälkeen. Seuranta toteutetaan yhteistyössä Luonnonvarakeskuksen, Suomen ympäristökeskuksen, Metsähallituksen, ELY-keskusten ja Tapio Oy:n kanssa. Näytteenotto ja laboratorioanalyysit on pitkälti ulkoistettu yksityisille toimijoille. Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkon muodostavat luonnon taustakuormituksen ja tavanomaisen metsätaloustoiminnan aiheuttaman kuormituksen seurantaan perustetut latvaluma-alueet, joihin kuuluu 10 luonnontilaista ja 21 metsätaloustalossa olevaa valuma-alueita eri puolilla Suomea. Alueita valittaessa huomioitiin toiminta alueella, valtakunnallinen ja maaperällinen edustavuus, valuma-alueen koko ja metsänkäsittelyhistoria. Seurantaverkkoon valittiin alueita, joilla oli jo aiemmin tehty virtaama- ja/tai vedenlaaduseuranta. Valintaperusteet esitetään tarkemmin julkaisussa Finér ym. (2012).

Seurantaverkko palvelee sekä metsä- ja ympäristöhallinnon että käytännön tarpeita vesien suojeleluksen kehittämiseksi. Verkon avulla voidaan tuottaa valtakunnalliset sekä vesienhoitoalue- ja jokivaluma-aluekohtaiset arviot metsätalouden aiheuttamasta kuormituksesta ja aineiston karkuessa seurata esim. muuttuvista ilmasto-oloista tai metsätalouden intensiteetin muutoksista aiheutuvia trendejä. Tämä on tärkeää tunnistettaessa ja ennakoitaessa vesien laadussa tapahtuvia muutoksia sekä ennustettaessa tulevaa kehitystä mallintamisella. Seurantaverkko ei tuota tietoa yksittäisten metsätaloustoimenpiteiden kuten kunnostusojitusten tai hakkuiden aiheuttamasta kuormituksesta eikä eri vesien suojelelutoimenpiteiden tehosta. Näitä tarkastellaan erillisissä tutkimushankkeissa.

Seurantaverkko on keskeinen työkalu Kansallisen metsästrategian ja EU:n vesipolitiikan puitteiden toteutumisen seurantaan ja toimenpideohjelmien vaikutusten arviointiin. Luonnontilaiset metsätaloustalouden ulkopuolella olevat alueet luovat vertailupohjan ihmistoiminnan aiheuttamalle kuormitukselle.

Resurssien aiheuttamien rajoitusten vuoksi alueiden lukumäärä on suhteellisen pieni, minkä johdosta valtakunnallisiin kuormitusarvioihin jää epävarmuutta (Aaltonen ym. 2021). Seurantaverkon alueet kattavat koko Suomen ja maaperän ominais- ja erityispiirteet otettiin huomioon alueita valittaessa, mutta esimerkiksi rannikon sulfaattimaat, runsasfosforiset maat ja kalkkipitävät alueet tulivat huonosti edustetuiksi. Seurantaverkkoon ei myöskään löydetty sopivaa luonnontilaista valuma-alueita Etelä-Suomen savimailta. Valuma-alueita oli seurattu 2–55 vuotta ennen niiden liittämistä seurantaverkkoon.



Kuva 5. Metsätalouden seurantaverkon alueet. Kartasta poiketen Liuhapuron valuma-alue on siirtynyt luonnontilaisesta käsiteltyjen alueiden kategoriaan vuonna 2020.

Seurantaverkon vedenlaadun seuranta perustuu manuaaliseen vesinäytteenottoon, jossa noudatetaan SFS-standardeja (SFS-käsikirja 2010) ja ympäristöhallinnon ohjeita (Mäkelä ym. 1992, Kettunen ym. 2008, Näykki ym. 2013). Vesinäytteitä pyritään ottamaan patojen välittömästä läheisyydestä 25 kertaa vuodessa. Luonnonolosuhteiden mm. purojen jäätyminen tai kuivumisen takia näytteenottokertojen määrä jää jonkin verran tätä pienemmäksi. Näytteenotto tapahtuu virtaamapainotteisesti vuodenaikojen mukaan. Näytteistä mitataan lämpötila maastossa ja laboratoriossa määritetään pH, sameus, kiintoaine, kokonaisfosfori, fosfaattifosfori (suodatettu), kokonaistyppeä, nitraatti- ja nitriittityppi, ammoniumtyppi, orgaaninen kokonahiili (TOC) ja kemiallinen hapenkulutus (CODMn). Analyysit tehdään suodattamattomista näytteistä lukuun ottamatta fosfaattifosforin määrittämiä. Näytteenottajat ja analyysilaboratoriot ovat sertifioituja ja analyysit akkreditoituja (Näykki ym. 2013). Virtaama- ja vedenlaatuaineistojen avulla lasketaan valuma-alueelta tuleva päivittäinen ja vuotuinen kuormitus eri aineille. Näytteiden otto, analyysit ja kuormalaskenta on kuvattu tarkemmin julkaisussa Finér ym. (2017). Valuma-alueiden puustotiedot saadaan Valtakunnan metsien monilähdeinventointitiedoista (MVMI) ja tiedot hakkuista, lannoituksista ja ojituksista kerätään Suomen metsäkeskuksesta ja alueellisista ELY-keskuksista kerran vuodessa.

Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkon päivittäiset ja vuosittaiset kuormitustiedot ja valunnat ovat avoimesti saatavilla Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkon datapalvelusta (<https://metsainfo.luke.fi/fi/vesistokuormitukset>). Tulokset lasketaan ja päivitetään datapalveluun vähintään kerran vuodessa. Mittausaineistot ovat vapaasti saatavilla myös Ympäristötiedon hallintajärjestelmästä Hertasta: https://www.syke.fi/fi-FI/Avoin_tieto/Ymparistotietojarjestelmat

5.2. Muut kuormituseurannat

Metsätalouden seurantaverkon lisäksi maa- ja metsätalouden kuormittamien vesien tilaa seurataan MMM:n rahoittamassa ns. MaaMet-seurantaohjelmassa. MaaMet-seuranta tuottaa valtakunnallisesti kattavaa tietoa hajakuormituksen vaikutuksista pinta- ja pohjavesien tilaan. Seurantaverkko on osa EU:n vesipolitiikan puitteiden direktiivin vaatiman vesienhoitoasetuksen toimeenpanoa. Lainsäädännön mukaan hajakuormituksen vaikutuksia tulee seurata kohteissa, joissa kuormitus muodostaa merkittävän riskin vesien tavoitetilan eli hyvän ekologisen tilan heikkenemiselle. Seurannat painottuvat maatalousvaltaisille valuma-alueille ja pelkän metsätalouden vaikutuksia ei ole mahdollista saada empiirisesti esiin mittauksista. Seurannan tuottamaa tietoa käytetään useisiin tarpeisiin, etenkin maa- ja metsätalouden vesien suojeleminen, hajakuormitettujen alueiden vesistöjen tilan arviointiin ja alueiden vesienhoidon suunnitteluun. Seurantatieto palvelee myös mm. nitraattidirektiivin velvoittamaa tiedonkeruuta. Seurannan tuottamaa tietoa käytetään lukuisissa vesien suojelemissa ja -hoitoa edistävissä tutkimus- ja kehityshankkeissa. Suomen ympäristökeskus vastaa seurannan koordinaatiosta yhteistyössä ELY-keskusten ja Luonnonvarakeskuksen kanssa. https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Tutkimus_ja_kehittamishankkeet/Hankkeet/Maa_ja_metsatalouden_kuormituksen_ja_sen_vesistovaikutusten_seuranta

Seurantaohjelmassa on neljä osaohjelmaa:

1. sisävesien ekologisen tilan seuranta. Seurantaan kuuluu biologisten tekijöiden, ravinteiden ja muu vedenlaadun seuranta. Seuranta varten on perustettu seurantaverkko, johon on valittu koko maan alueelta 63 joki- ja 51 järvivesimuodostumaa.
2. Maatalouden kuormituksen seuranta jatkuvatoimisiin asemiin perustuen. Mittausasemia on kolme kappalaetta Lounais-Suomessa
3. Haitallisten aineiden, torjunta-aineiden ja raskasmetallien seuranta
4. Pohjavesien seuranta. Seurantaverkko on koottu pohjavesialueista, joilla harjoitetaan ravinnekuormitusta aiheuttavaa viljelyä ja/tai karjataloutta, sekä pohjavesialueista, joilla harjoitetaan tai on aikaisemmin harjoitettu turkistarhausta. Tämän lisäksi mukana on pohjavesialueita, joilla maataloustoiminnassa käytetyt kasvinuojeluvälineet ovat mahdollisesti aiheuttaneet pohjaveden huonon tilan. Maa- ja metsätalouden kuormituksen pohjavesiseurannan kohteena on ollut yhteensä yli 200 pohjavesialuetta. Vuosittain seurattavia pohjavesialueita on noin 50–70 kappaletta.

Pelkästään metsätalousvaltaisten pohjavesialueiden vedenlaadun systemaattista seuranta ei ole Suomessa tehty. Tältä osin nk. MEPO-työryhmä esitti, että metsätalouden pohjavesiseurantoja tulisi lisätä ja kehittää mahdollisimman nopeasti (Britschgi ym. 2022). Yhtäältä tämä tarkoittaa lisäresurssien ohjaamista luotettavaan pitkäaikaisseurantatiedon keräämiseen. Toisaalta olisi syytä pohtia muitakin uusia täydentäviä menetelmiä, kuten kansallisseurantaan pohjavesien menetelmien kehittämistä myös vesien laadun seurantaan. Olisi tärkeää tutkia, miten aistinvaraisiin maallikkohavaintoihin pohjautuvaa vesien laadun ja sen muutosten seurantaan liittyvää subjektiivisuutta voitaisiin vähentää. Esimerkiksi vesistöjen tummumiskehityksestä ja äkillisistä veden laadun heikkenemisistä olisi todennäköisesti helposti saatavissa ihmisten havainnointiin perustuvaa tieteellisestikin käyttökelpoista tietoa, mikäli menetelmiä kehitettäisiin (esimerkiksi luokitus veden värille ym.).

Kaiken kaikkiaan metsätalouden vesistövaikutusten seuranta on erittäin tärkeää paitsi kuormitusmäärien laskennan, ilmaston muutoksen vaikutusten arvioinnin ja vesienhoidon suunnittelun kannalta, myös tulevien näköpiirissä olevien tarpeiden, kuten vireillä olevan EU:n ennallistamisasetuksen toimeenpanon kannalta. Seurannat mahdollistavat mm. sisävesien ennallistamistavoitteiden toteutumisen arviointiin liittyvien velvoitteiden täyttämisen.

6. Vesistökuormitus Kansallisessa metsästrategiassa

Tällä hetkellä voimassa olevassa metsästrategiassa (Kansallinen metsästrategia 2025) on useita metsäluonnon monimuotoisuutta sekä ekologista ja sosiaalista kestävyyttä kuvaavia mittareita, joiden perusteella seurataan metsästrategian toteutumista. Metsätalouden vaikutuksia pintavesien laatuun kuvataan yhdellä tunnuksella, jonka avulla seurataan metsätalouden aiheuttaman kiintoainekuormituksen määrää sekä asetetaan tavoite sen pienentymiselle (pienentymisen tasosta 57 000 tn/vuosi). Kiintoainekuormitus vedenlaadun mittarina on aiemmin ollut perusteltua, koska sitä on pidetty tärkeimpänä kuormituksen aiheuttajana metsätalousvaltaisilla valuma-alueilla. Kiintoainekuormitukseen voidaan myös vaikuttaa suhteellisen helposti vesien-suojelutoimenpitein ja kuormitukselle voidaan asettaa määrällisiä vähennystavoitteita täsmällisemmin kuin muille aineille. Kiintoainekuormituksen vähentämisessä onkin onnistuttu tavoitteiden mukaisesti ja kiintoainekuorma on laskussa - ei vähiten siksi, että kunnostusojitusten toteutusmäärät ovat vähentyneet ja vähenevät jatkossa edelleen. Ottaen huomioon uudet tiedot erityisesti ensiojituksen pitkäaikaiskuormituksesta ja toisaalta muuttuvan ilmaston, puustobiomassan ja turpeen hajotuksen vaikutuksesta kuormitukseen, kiintoainekuormituksen suhteellinen merkitys tulee edelleen vähenemään. Sen sijaan rehevöitymistä aiheuttavien ravinnekuormien, tärkeimpinä typpi ja fosfori sekä veden tummumiseen vaikuttavien aineiden merkitys suhteessa kiintoaineeseen on kasvanut ja tulee edelleen kasvamaan. Kaikkiin näihin aineisiin metsätaloustoimilla on sekä välitöntä lyhytaikaista (esim. hakkuut, kunnostusojitukset) että epäsuorempaa pitkäaikaista (ojituslisä) vaikutusta. Näiden aineiden kuormituksen syntyprosessit metsämaissa ovat myös usein voimakkaasti sidoksissa toisiinsa. Kiintoaineen suhteellisen merkityksen vähetessä rehevöitymiseen ja veden väriin vaikuttavien aineiden huomioon ottaminen olisi välttämätöntä, jotta strategia olisi ylipäänsä uskottava vedenlaadun parantamisen ja vesienhoidon tehostamisen kannalta.

Mikäli uusia kuormitustekijöitä otetaan mukaan uusiksi indikaattoreiksi, on kuitenkin tiedostettava, että niitä ei voida käsitellä samalla tavoin kuin kiintoainekuormituksen indikaattoria. Määrällisten vähennystavoitteiden asettaminen on käytännössä mahdotonta tiedon puutteen takia. Erityisesti tämä koskee ojituslisän torjumista ja vesistöjen tummumiskehitykseen vaikuttamista. Ojituslisän torjumiseksi ei toistaiseksi ole olemassa vesien suojelekeinoja. Kun metsätalouden vaikutusta vesistöjen tummumiseen ei voida erottaa muista tummumista kiihdyttävistä tekijöistä (ilmaston muutos, happaman laskeuman väheneminen), määrällisten tavoitteiden asettaminen metsätaloudelle vesistöjen tummumiskiirteen torjumiseksi ei myöskään ole mahdollista.

Puhuttaessa vesistökuormituksesta ja vesien suojelusta, huomio on perinteisesti kohdistunut metsätalouden aiheuttamaan määrälliseen kuormitukseen, jota on verrattu esimerkiksi luonnon taustahuuhtoumaan ja sillä perusteella on arvioitu kuormituksen suuruutta ja haitallisuutta. Tämä on verraten mielekästä esimerkiksi kiintoaineen kohdalla. Mitä suurempi kiintoainekuorma sitä enemmän tapahtuu esimerkiksi vesistöjen täyttymistä ja liettymistä. Sen sijaan esimerkiksi vesistöjen tummumisen ja veden värin kohdalla metsävaluma-alueelta valuvien vesien hiilipitoisuuksien merkitys voi korostua hiilikuormitusta enemmän. Esimerkiksi kirkasvetisissä vesistöissä pienikin lisäys orgaanisen hiilen määrässä (pitoisuus vedessä) voi tuottaa merkittävän vaikutuksen veden väriin, vaikka kuorma suhteessa luonnon taustakuormaan ei kasvaisikaan merkittävästi. Myös huuhtoutuvan orgaanisen hiilen laatu vaikuttaa veden väriin siitä riippuen, minkälainen on sen sisältämien humushappojen jakauma. Elävää kasvibiomassaa sisältävästä humukerroksesta liikkeelle lähtevä orgaaninen aines on vaaleampaa kuin esimerkiksi maatuneesta turpeesta lähtevä orgaaninen aines ja jälkimmäisen vaikutukset vesistön laatuun voivat näkyä jo suhteellisen pieninä määrinä vesistön koosta ja tilasta riippuen. Pitoisuuksien

tarkastelu ja niiden alentamiseen tähtäävät toimenpiteet ovat entistä tärkeämpiä muuttuvassa ilmastossa, ja niihin tulisi kuormien ohella kiinnittää huomiota ja tehdä niihin liittyvää seurantaa.

Millä tavoilla fosforin, typen ja orgaanisen hiilen kuormitukseen tavoitteenasettelun voisi tehdä ja miten siihen voitaisiin vastata strategian voimassaolon aikana? Suomen solmimien sopimusten, vesienhoidon tavoiteohjelmien ja suunnitelmien lähtökohta on vesistöjen tilan parantaminen eli vesistökuormituksen pitäisi vähentyä jatkossa. Metsätaloudessa voidaan vaikuttaa vain siihen osaan kuormituksesta, jonka voidaan kiistattomasti osoittaa aiheutuvan metsätalouden toimenpiteistä. Toisaalta on tiedossa, että metsätalouden kuormitusmekanismeissa ja -lähteissä on eroja: kuormitusta syntyy aktiivisista metsissä tehtävistä toimenpiteistä (hakkuut, kunnostusojitukset, lannoitukset), mutta myös vanhoilta ojituksilta ojituslisän muodossa. Aktiivisista metsätaloustoimista aiheutuvaan kuormitukseen voidaan vaikuttaa vesiensuojelutoimin, mutta ojituslisän vaikutusten torjuntaan ei nykytiedon perusteella kyetä. Kuitenkin ojituslisä muodostaa merkittävän metsätalouden kuormituksesta. Jotta kuormituksen vähentämisessä edistyttäisiin, on selvää, että ojituslisän torjumiseen tähtäävää tutkimusta ja kehitystoimintaa tulisi edistää. Mahdollisina ojituslisän torjumiseen tähtäävinä toimenpiteinä voisivat tulla kysymykseen esimerkiksi kunnostusojitusten tarkempi suuntaaminen vain kaikkein tarkoituksenmukaisempiin kohteisiin, ojituksen intensiteetin vähentäminen esimerkiksi matalammalla ojasyvyydellä ja korvaamalla kunnostusojituksia tuhkalannoituksella. Tuhkalannoituksen pitkäaikaisvaikutuksista maaperän eliöstön rakenteeseen ja hajotustoimintaan on niukasti tietoa ja optimaalinen annosmäärä, jolla olosuhteita kuten maan pH:ta ei muuteta liikaa, voi olla eri kuin teknistaloudellinen levityksen kannattavuuteen perustuva annosmäärä. Muhoksen Leppiniemen 50 vuotta vanha tuhkalannoituskoesarja on esimerkki, jolla suurilla puuntuhamäärillä (8 ja 16 tn ha⁻¹) turpeen hajotus on saatu kiihtymään, sen sisältämät typpivarastot on vapautettu puuston käyttöön, ja kasvupaikka on muuttunut lähes avosuosta hyvätuottoiseksi (puustoa 360–470 m³ ha⁻¹) turvekankaaksi (Moilanen ym. 2002). Toisaalta ei ole tietoa siitä, miten kyseinen tuhkalannoitus on vaikuttanut ympäristöön, esimerkiksi kasvihuonekaasu- ja vesistö päästöihin.

Ratkaisun avaimet ovat vaikuttaminen erityisesti turpeen hajoamisen ja ravinteiden vapautumisen hillitsemiseen kaikissa toimenpiteissä. Sitä voidaan edistää välttämällä ojien syventämistä tai aktiivisesti nostamalla vedenpintaa eli kasvattamalla puuta vesitaloudeltaan nykyistä märemmissä olosuhteissa, mutta kuitenkin niin, että märkyys ei vielä haittaa liikaa puun kasvua (esim. jatkuvapeitteinen kasvatus, kunnostusojituksista pidättäytyminen, ojien padottaminen). Välttämällä ojituksia voisi turpeen hajotuksen lisäksi vähentää myös toinen mahdollinen ojituslisän lähde eli ojaeroosio. Sitä, kuinka paljon näillä toimilla voitaisiin vähentää ojituslisän muodossa syntyvää kuormitusta, ei kuitenkaan tiedetä. Tästä syystä määrällisten kuormituksen vähennystavoitteiden asettaminen on nykytilanteessa hyvin vaikeaa.

Olisi myös tiedostettava, että puustomäärän kasvun lisääminen, joka on tavoiteltavaa taloudellisesta ja mm. puuston hiilivaraston lisäämisen näkökulmasta voi johtaa vesistöjen tummumiseen (ks. Nieminen ym. 2021). Soiden ennallistamisen lisääminen vähentää pitkällä tähtäimellä vesistökuormitusta ja lopulta poistaa ojituslisän. Tutkittua tietoa ennallistamisen pitkäaikaisvaikutuksista on vielä niukasti. On kuitenkin ilmeistä, että pitkällä aikajaksolla ennallistaminen on hyvin hyödyllistä vesistöille. Näin on erityisesti silloin, kun ennallistetun suon avulla voidaan vähentää sen yläpuoliselta metsätalousalueella syntyvää kuormitusta.

Ilmastonmuutos voi johtaa kuormituksen lisääntymiseen mm. sadannan kasvun myötä ja vahvistusta tähän on saatu jo monista tutkimuksista. Vaikutuksissa voi kuitenkin olla suuriakin alueellisia eroja ja eniten valunnan lisääntymisellä olisi ennusteiden mukaan vaikutusta Pohjois-Suomessa (Lepistö ym. 2020). Turpeen hajoaminen voi kiihtyä ojitetuilla soilla keskilämpötilan noustessa (Minkkinen ja Ojanen 2020), mikä todennäköisesti lisää paitsi kasvihuonekaasu-

päästöjä myös vesistökuormitusta. Ojituslisän torjumiseen ja ilmaston muutokseen varautumiseen liittyvän tutkimustiedon ollessa vielä hyvin puutteellista lähtökohdaksi metsätalouden kuormituksen torjunnassa tulisi asettaa, että kuormitukset tai pitoisuudet eivät kasvaisi metsätalousalueilla nopeammin kuin luonnontilaisilla valuma-alueilla. Kunnianhimoisempi tavoite pyrittäessä vesipuitedirektiivin mukaiseen vesien hyvään tilaan voisi olla, että pitoisuudet ja kuormat metsätalousalueilla lähentyvät luonnontilaisten valuma-alueiden kuormia. Tällöin erityisesti kuormitus- ja pitoisuusseurannan merkitys korostuu.

Mittareiden seuranta olisi tarkoituksenmukaisinta kiinnittää metsätalouden seurantaverkon seurantaan ja mahdollisiin muihin pitkäaikaisiin vesistöseurantoihin Pitkäaikainen seuranta on nykytiedon perusteella ainoa mahdollisuus todentaa se, saavutetaanko metsätaloudessa päästövähennyksiä vai kasvavatko päästöt väijäämättä esimerkiksi siksi, että ilmaston muutos kasvattaa huuhtoumia enemmän ojitetuilta kuin luonnontilaisilta soilta. Päästövähennyksiä voidaan arvioida myös mallintamalla, mutta silloinkin tarvitaan empiiristä seurantaa mallitulosten validoimiseksi ja mallien kehittämiseksi.

Ongelmana seuranta-aineistoissa määrällisten päästövähennysten asettamisen näkökulmasta on kuitenkin se, että useimmat seuranta-aineistot ovat vielä toistaiseksi niin lyhytkestoisia (ml. Metsätalouden seurantaverkko), ettei niillä voida todentaa ajallisia muutoksia ravinne- ja hiilipitoisuuksissa tai -kuormituksissa. Hyvää pitkäaikaista vedenlaatuaineistoa on olemassa vain hyvin harvoilta metsävaluma-alueilta. Samoin ongelmana on, että vesien laatu todennäköisesti reagoi hitaasti metsätalouden käytäntöjen muuttumiseen, esimerkiksi vesiensuojelun tehostamiseen. Siksi, mikäli vesiensuojelun tehostamisen tai metsätalouden käytäntöjen muuttumisen (esim. jatkuvapeitteinen kasvatusta ojitetuilla soilla) vesistövaikutuksia halutaan arvioida määrällisesti, joudutaan siltä osin tukeutumaan mallintamiseen. Tarkkoja määrällisiä tavoitteita vesiensuojelulle ei ehkä siksi kannata antaa, vesien laadun paraneminen on sellaisenaan jo haastava tavoite tilanteessa, jossa ilmaston muutos todennäköisesti tulee heikentämään tilannetta.

Jotta metsätalouden vesistövaikutukset tulisivat riittävän kattavasti huomioiduksi, kuormitusta koskevia mittareita olisi syytä olla ainakin kolme, jotka kuvaavat vesistöjen liettymistä, rehevöitymistä ja tummumista. Näitä ilmentävät parhaiten edellä mainitut kiintoaine, kokonaistyyppi, kokonaisfosfori ja orgaaninen kokonaishiili (tai liukoinen orgaaninen hiili). Mittareiden seurannan rungon muodostaisi metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkon karttuva seurantatieto. Metsätalouden aktiivitoimenpiteiden aiheuttaman kuormituksen ohella seurannassa ja laskelmissa tulisi ottaa huomioon ojituksen aiheuttama lisäkuormitus ja siinä tapahtuvat muutokset suhteessa luonnontilaiseen taustahuuhtoumaan, jotka on laskennallisesti mahdollista irrottaa valuma-alueelta tulevista kokonaiskuormista, kun valuma-alueella tehdyt toimenpiteet tiedetään. Kuormituksen muutosten seurannassa kertyvien aikasarjojen tuottama trenditieto olisi avainasemassa arvioitaessa metsätalouden vaikutuksia kuormitustrendeihin mm. ilmastonmuutoksen vaikutukset huomioiden. Seurantaverkon tuottaman tiedon täydentämiseen ja muutosten havainnointiin olisi tarpeellista kehittää uusia menetelmiä.

Kuormituksen seurannan lisäksi olisi myös tarpeen seurata vesiensuojelumenetelmien määrää, joilla kuormituksen vähenemiseen pyritään. EU:n vesipuitedirektiivin (VPD) toteuttamiseen liittyvissä alueellisissa vesihoitosuunnitelmissa menetelmien määrää, kuten päätehakkuissa jätettävien purojen suojavyöhykkeiden pituuksia (km) on vuositason arvioitu. Toteutuneet menetelmät kuten suojavyöhykkeiden pituus, leveys ja niillä tehdyt metsänkäsittelytoimet eivät kuitenkaan rekisteröidy paikkatietoaineistoihin, jolloin niiden toteutumista on vaikea seurata. Suometsien hoitohankkeisiin kuten ojien kunnostuksiin vaaditaan suunnitelmat vesiensuojelumenetelmistä, joten toteutuneiden vesiensuojeluratkaisujen määrää on turvemetsien osalta helpompaa arvioida. Vesiensuojelusuunnitelman vaatiminen kaikkiin metsänhoitotoimiin sekä kangas- että turvemaidella voisi tehostaa vesiensuojelua ja vähentää kuormitusta.

7. Johtopäätökset ja kehitysehdotukset

Tuoreen tutkimustiedon valossa metsätalouden aiheuttama vesistökuormitus on huomattavasti suurempaa kuin arvioitiin vielä muutamia vuosia sitten (Finér ym. 2010), ja näyttää vahvasti siltä, että 1950–1980-lukujen laajamittaisten suo-ojitusten pitkäaikaisvaikutukset ovat tässä keskeisessä roolissa. Tarkentunut arvio kertoo siitä, että aiemmin ojituksen pysyväluonteista kuormitusta ei osattu ottaa huomioon ominaiskuormitukseen perustuvissa laskelmissa (Finér ym. 2010). Arvioiden tarkentumisesta huolimatta käsitykset metsätalouden vesistökuormituksesta ja sen kehityksestä vaihtelevat yhä huomattavasti, ja on selvää, että kuormituslaskentaa on edelleen kehitettävä.

Tärkeintä olisi kuitenkin pyrkiä lisäämään ymmärrystä vesistökuormitukseen vaikuttavista tekijöistä ja niiden välisistä vuorosuhteista ojitetuilla soilla. Paitsi että ojituksen vesistökuormitus on nykytiedon valossa aiemmin arvioitua selvästi suurempaa ja kattaa metsätalouden kokonaiskuormituksesta merkittävän osan, useat tutkimustulokset viittaavat siihen, että erityisesti hiili- ja typpihuuhtoumat ovat edelleen kasvussa (Nieminen ym. 2017a, 2018c, Asmala ym. 2019, Räike ym. 2020). Vesiensuojelullisesti merkittävä ongelma on, ettei tiedetä, miksi kuormitukset ovat aiemmin arvioitua suuremmat ja edelleen kasvavat.

Metsätalouden kuormituksen keskeisiä vähentämiskeinoja ovat:

- Suunnittelun parantaminen (käsittelytoimenpiteiden ajoitus ja suuntaaminen, vesiensuojelumenetelmien oikea valinta ja mitoitus)
- Kuormituksen synnyn ehkäisy: kunnostusojitusten välttäminen ja keventäminen, vedenpinnan nosto patoamalla tai suosimalla jatkuvapeitteistä kasvatusta
- Ennallistamistoimet: soiden ennallistamisen lisääminen (vähentää kuormitusta pitkällä tähtäimellä, vaikka aluksi kuormitus voikin kasvaa), metsä- ja suopurojen ennallistaminen, vesienpalautus kuivahtaneille luonnontilaisille suoalueille

Nieminen ym. (2020) esittävät, että todennäköisenä syynä on turpeen hajotuksen kiihtyminen, ja siitä seuraava ravinteiden ja hiilen mineralisoitumisen nopeutuminen. Ojitukselta kuluneen ajan myötä suon vedenpinta laskee puuston ja samalla sen haihdunnan kasvaessa (Sarkkola ym. 2010), ja turpeen hajotus on sitä nopeampaa, mitä syvemmällä vedenpinta on (Ojanen ja Minkkinen 2019). Tätä hypoteesia tukee tutkimus, jonka perusteella typen ja fosforin pitoisuudet ojitettujen soiden valumavesissä ovat sitä suuremmat, mitä enemmän soilla on puustoa ja mitä pidemmälle turpeen maatumisen on edennyt (Nieminen ym. 2022). On myös mahdollista, että ilmaston lämpeneminen on kiihdyttänyt turpeen hajotusta erityisesti ojitetuilla soilla, joilla turpeen hajoaminen on sitä nopeampaa, mitä lämpimämpi on ilmasto (Hiraishi ym. 2014). Näiden riippuvuuksien ymmärtäminen edellyttäisi, että turpeen hajotuksen ja hiili- ja ravinnehuuhtoumien välinen riippuvuus tunnettaisiin nykyistä paremmin.

Ymmärryksen lisääminen on avain myös vesiensuojelun kehittämiseen ja ilmastonmuutokseen varautumiseen. Mikäli kasvavien ravinnekuormitusten taustalla on kiihtynyt turpeen hajotus, puuston kasvun ja turpeen hajotuksessa vapautuvien ravinteiden määräämää ravinnetase ja sen hallinta ovat avainasemassa kehitettäessä kuormitusta hillitseviä metsänhoito- ja vesien-suojelumenetelmiä. Nykyisen valuma-alue seurannan (mm. Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkko) rinnalle tarvittaisiin kattavasti instrumentoituja intensiivialueita, joissa voidaan

syventyä suometsien ravinne- ja hiilikiertoon ja joilla voidaan kehittää vaihtoehtoisia metsänhoitomenetelmiä sekä todentaa niiden ympäristövaikutukset.

Jatkossa erityisesti metsäojituksen kuormitusvaikutuksiin tulisi kiinnittää entistä enemmän huomiota, mikäli vesistöjen ja pohjavesien vedenlaatua ja vesistöjen ekologiasta tilaa halutaan parantaa. Kansallisella metsästrategialla on oma merkittävä roolinsa metsien käytön kehityksen suuntaajana ja ”raamittajana”, vaikka strategialla ei voida suoraan vaikuttaakaan yksittäisen metsänomistajan päätöksentekoon eikä puumarkkinoihin. Nykyisessä metsästrategiassa kuormitusvaikutukset keskittyvät pelkästään kiintoaineeseen, joka kattaa vain pienen osan metsätalouden kuormituksesta ja jonka merkitys on selvästi vähentynyt suhteessa metsätalouden aiheuttamaan ravinne- ja hiilikuormaan.

Ottamalla jatkossa mukaan kuormitusmittareiksi kiintoaineen lisäksi metsätalousalueilta huuhtoutuva kokonaisfosfori, kokonaistyyppi ja liukoinen orgaaninen hiili sekä kuormina että pitoisuuksina voidaan kattaa tärkeimmät vesistöjen rehevöitymistä, liettymistä ja tummumista aiheuttavat tekijät. Tiedon puutteen, kuormituksen luonteen ja riittävän hyvien vesiensuojelumetelmien puutteen johdosta tarkkoja määrällisiä tavoitteita kuormituksen vähentämiseksi ei ole tarkoituksenmukaista asettaa. Tavoitteena tai pikemminkin pyrkimyksenä tulisi kuitenkin olla metsätalouden kuormituksen vähentäminen erityisesti siksi, että metsätalousalueiden kuormitus on suurempaa kuin luonnontilaisten metsien ja soiden vesistökuormitus. Toisaalta on tunnistettava kuormituksen hallintaan liittyvä epävarmuus, joka on erilainen eri kuormitustekijöillä. Suurin epävarmuus liittyy orgaaniseen hiileen, jonka kuormituksen vähentämiseen on olemassa tällä hetkellä vähiten menetelmiä. Tärkeää olisi kuitenkin aktiivisesti seurata orgaanisen hiilenkin kuormitusta ajantasaisesti sekä mahdollisia trendimuutoksia, jotta voitaisiin esimerkiksi ennakoida tulevaa kuormituskehitystä. Ehdotetut kuormitusmittarit ja niiden ominaisuudet ja tavoitteet voisivat olla seuraavanlaisia:

Kuormitusvaikutus	Indikaattori	Tunnus	Vähimmäistavoite
Sedimentaatio	Kiintoaine	Vuosikuorma	Kuorma vähenee
Rehevöityminen	Kokonaistyyppi- ja fosfori	Vuosikuorma ja keskipitoisuus	Metsätalouden aktiivitoiminen aiheuttama kuorma vähenee
Tummuminen	Orgaaninen hiili (TOC)	Vuotuinen keskipitoisuus	Ajantasainen kuormitusseuranta ja raportointi

Tutkimustarpeita metsätalouden vesistökuormituksesta

- Ojitettujen soiden osalta tarvittaisiin tietoa erityisesti siitä, minkälaisella kasvatusketjulla vesistövaikutuksia voidaan parhaiten hallita (tutkitaan parhaillaan matalan ojasyvyyden vaikutusta ja tuhkalannoitusta kunnostusojituksen korvaajana sekä erilaisia jatkuvan kasvatuksen toimenpideketjuja)
- Tuhkalannoituksen pitkäaikaisvaikutukset erityyppisillä turvemaidella. Keskipitkän (10 vuoden) tutkimustuloksia huuhtoumista on vain rämemänniköistä.
- Kangasmaiden lannoituksen osalta tarvittaisiin tutkimustuloksia muista kuin helposti huuhtoutuvaa nitraattia sisältävistä lannoitteista. Erityisesti orgaanista tyyppiä sisältävät kierrätyslannoitteet.
- Vedenpinnan noston välittömistä ja pitkäaikaisvaikutuksista kuormitukseen metsänkasvatuksessa ojitetuilla soilla (vedenpinnan nosto ojia patoamalla ja tai jatkuvapeitteistä metsänkasvatusta harjoittamalla)
- Uusia tehokkaampia vesiensuojelumenetelmiä kehitettävä
- Ojitettujen soiden ennallistamisen pitkäaikaiset vesistövaikutukset
- Seurantaverkon kehittäminen: Verkon täydentäminen ja kytkeminen kokeellisiin mittauksiin. Uusien kustannustehokkaiden seurantamenetelmien kehittäminen, kuten kansalaisseurantaan pohjautuva vedenlaadun tarkkailu.
- Uutta pitkäaikaista vedenlaatuodataa mallinnuksen kehittämisen pohjaksi prosessitason ymmärryksen lisäämiseksi

Viitteet

- Aaltonen, H., Tuukkanen, T., Palviainen, M., Laurén, A., Tattari, S., Piirainen, S., Mattsson, T., Ojala, A., Launiainen, S. & Finér, L. 2021. Controls of Organic Carbon and Nutrient Export from Unmanaged and Managed Boreal Forested Catchments. *Water* 13(17). 16 p. doi: <https://doi.org/10.3390/w13172363>
- Ahti, E. 1987. Water balance of drained peatlands on the basis of water table simulation during the snowless period. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 141. 64 p.
- Ahtiainen, M. 1990. The effects of clearcutting and forestry drainage on water quality of forest brooks. *Vesi- ja Ympäristöhallinnon julkaisuja—sarja A* 45. 122 p.
- Ahtiainen, M., & P. Huttunen. 1999. Long-term effects of forestry managements on water quality and loading in brooks. *Boreal Environment Research* 4: 101–114.
- Asmala, E., Carstensen, J. & Räike A. 2019. Multiple anthropogenic drivers behind upward trends in organic carbon concentrations in boreal rivers. *Environmental Research Letters* 14. 10 p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4fa9>.
- Britschgi, R., Piirainen, S., Joensuu, S., Juvonen, J., Ala-aho, P., Karvonen, T., Kauppila, M., Keränen, J., Marttila, H., Nieminen, M., Nieminen, T., Rintala, J., Ronkainen, T., Ronkanen, A-K., Rossi, P., Räsänen, T. & Tuominen, S. 2022. Metsätalouden pohjavesivaikutukset: MEPO-hankkeen loppuraportti 2021. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2022:4. 183 s.
- 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. 77 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-826-7>.
- Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti E., Kortelainen, P., Koskiaho, J., Leinonen, A., Nevalainen, R., Piirainen, S., Saarelainen, J., Sarkkola, S. & Vuollekoski, M. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. *Suomen ympäristö* 10/2010. 33 s. <http://hdl.handle.net/10138/37973>.
- Finér, L., Tuukkanen, T., Mattsson, T., Nieminen, M., Piirainen, S. & Tattari, S. 2018. Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkko tuottaa uutta tietoa hajakuormituksesta. *Vesitalous* 2/2018: 10–12.
- Finér, L., Mattsson, T., Tattari, S., Joensuu, S. & Penttinen, J. 2012. Esitys maa- ja metsätalousministeriölle metsätalouden vesistökuormituksen seurannan järjestämisestä. *Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 226. 25 s. ISBN 978-951-40-2356-9 (PDF). <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp-226.htm>
- Finér, L., Piirainen, S., Launiainen, S., Laurén, A., Mattsson, T., Tattari, S. & Linjama, J. 2017. Metsätalouden vesistökuormituksen seuranta- ja raportointiohjelma. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 21/2017. 13 s. Luonnonvarakeskus. Helsinki. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/538878>
- Finér, L., Lepistö, A., Karlsson, K., Räike, A., Härkönen, L., Huttunen, M., Joensuu, S., Kortelainen, P., Mattsson, T., Piirainen, S., Sallantausta, T., Sarkkola, S., Tattari, S. & Ukonmaanaho, L.

2021. Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters. *Science of Total Environment* 762: 144098. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144098>
- Finstad, A., Andersen, T., Larsen, S., Tominaga, K., Blumentrath, S., de Wit, H.A., Tømmervik, H. & Hessen, D.O. 2016. From greening to browning: Catchment vegetation development and reduced S-deposition promote organic carbon load on decadal time scales in Nordic lakes. *Scientific Reports* 6: 31944. [doi:10.1038/srep31944](https://doi.org/10.1038/srep31944)
- Haahti, K., Marttila, H., Warsta, L., Kokkonen, T., Finér, L. & Koivusalo, H. 2016. Modeling sediment transport after ditch network maintenance of a forested peatland. *Water Resources Research* 52: 9001–9019. [doi:10.1002/2016WR019442](https://doi.org/10.1002/2016WR019442).
- Haapanen, M., Kenttämies, K., Porvari, P. & Sallantausta, T. 2006. Kivennäismaan uudistushakkuun vaikutus kasvinravinteiden ja orgaanisen aineen huuhtoutumiseen; raportti Kurussa ja Janakkalassa sijaitsevien tutkimusalueiden tuloksista. *Suomen Ympäristö* 816: 43–59.
- Hansen, K., Kronnäs, V., Zetterberg, T., Zetterberg, M., Moldan, F., Petterson, P. & Munthe, J. 2013. The effects of ditch cleaning on runoff, water chemistry and botany fauna in forest ecosystems. Rapport. IVL Svenska Miljöinstitutet AB. 108 s.
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., Troxler, T.G. (toim.) 2014. Supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: wetlands. IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html>.
- Hynninen, A., Sarkkola, S., Laurén, A., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2011. Capacity of riparian buffer areas to reduce ammonium export originating from ditch network maintenance areas in peatlands drained for forestry. *Boreal Environment Research* 16: 430–444.
- Joensuu, S., Ahti, E. & Vuollekoski, M. 1999. The effects of peatland forest ditch maintenance on suspended solids in runoff. *Boreal Environment Research* 4: 343–355.
- Joensuu, S., Ahti, E. & Vuollekoski, M. 2001. Long-term effects of maintaining ditch networks on runoff quality. *Suo-Mires and Peat* 52: 17–28.
- Joensuu, S., Ahti, E. & Vuollekoski, M. 2002. Effects of ditch network maintenance on the chemistry of runoff water from peatland forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17: 238–247. [doi: 10.1080/028275802753742909](https://doi.org/10.1080/028275802753742909).
- Joensuu, S., Vuollekoski, M. & Karosto, K. 2006. Long-term water quality impacts of ditch network maintenance. Teoksessa: Kenttämies, K. & Mattsson, T. (toim.). *Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti*. Suomen ympäristö 816: 83–90.
- Johnson, R. 1998. The forest cycle and low river flows: a review of UK and international studies. *Forest Ecology and Management* 109: 1–7. [doi: https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00231-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00231-X)
- Kaila, A., Asam, 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-rained peatlands on water quality—a laboratory approach assessing the release of P, N, Fe, and dissolved organic carbon. *Water, Air and Soil Pollution* 227. 15 p. [doi:10.1007/s11270-016-2994-9](https://doi.org/10.1007/s11270-016-2994-9)

- Kaila, A., Laurén, A., Sarkkola, S., Koivusalo, H., Ukonmaanaho, L., O’Driscoll, C., Xiao, L., Asam, Z. & Nieminen M. 2015. 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., 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. [doi:10.1016/j.foreco.2014.03.025](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.025)
- Kenttämies, K. 2006. Metsätalouden fosfori- ja typpikuormituksen määrittäminen. Teoksessa: Kenttämies K., Kettunen I., Mäkelä A. & Heinonen P. 2008. Vesistötietoa näytteenottajille. Ympäristöopas. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 78 s.
- Koivusalo, H., E. Ahti, A. Laurén, T. Kokkonen, T. Karvonen, R. Nevalainen, M. & L. Finér. 2008. Impacts of ditch cleaning on hydrological processes in a drained peatland forest. *Hydrology and Earth System Science* 12: 1211–1227. [doi:10.5194/hess-12-1211-2008](https://doi.org/10.5194/hess-12-1211-2008).
- Kortelainen, P., Mattsson, T., Finér, L, Ahtiainen, M., Saukkonen, S. & Sallantausta, T. 2006. Controls on the export of C, N, P and Fe from undisturbed boreal catchments, Finland. *Aquatic Sciences* 68: 453–468. <https://doi.org/10.1007/s00027-006-0833-6>.
- Kortelainen, P. & Saukkonen, S. 1998. Leaching of nutrients, organic carbon and iron from Finnish forestry land. Teoksessa: Wieder R.K., Novák M. & Černý J. (toim.). Biogeochemical investigations at watershed, landscape, and regional scales. Springer, Dordrecht. pp. 239–250. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0906-4_23.
- Koskinen, M., Tahvanainen, T., Sarkkola, S., Walle-Menberu, M., Laurén, A., Sallantausta, T., Marttila, H., Ronkanen, A.-K., Parviainen, M., Tolvanen, A., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2017. Restoration of nutrient-rich forestry-drained peatlands poses a risk for high exports of dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus. *Science of the Total Environment* 586: 858–869. [doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.065](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.065)
- Kritzberg, E. & Ekström, S. 2011. Increasing iron concentrations in surface waters—A factor behind brownification? *Biogeosciences Discussions* 8: 12285–12316. [doi: 10.5194/bgd-8-12285-2011](https://doi.org/10.5194/bgd-8-12285-2011).
- Kritzberg, E.S., Hasselquist, E.M., Škerlep, M. et al. 2020. Browning of freshwaters: Consequences to ecosystem services, underlying drivers, and potential mitigation measures. *Ambio* 49: 375–390. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01227-5>
- Laiho, R. 1997. Plant biomass dynamics in drained mires in southern Finland—implication for carbon and nutrient balance. Dissertation, University of Helsinki. The Finnish Forest Research Institute, Research papers 631: 1–53.
- Loisel, J., Loisel, J., Amesbury, M.J., Magnan, G., Anshari, G., Beilman, D. W., Benavides, J.C., Blewett, J., Camill, P., Charman, D.J., Chawchai, S., Hedgpeth, A., Kleinen, T., Korhola, A., Large, D., Mansilla, C.A., Muller, J., van Bellen, S., West, J B., Yu, Z. & 50 muuta. 2021. Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature Climate Change* 11: 70–77+12 p.
- Laurén A., Heinonen J., Koivusalo H., Sarkkola S., Tattari S., Mattsson T., Ahtiainen M., Joensuu S., Kokkonen T. & Finér L. 2009. Implications of uncertainty in pre-treatment dataset on

- estimation of treatment effects from paired catchment studies: loads of phosphorus from forest clear-cuts. *Water, Air and Soil Pollution* 196: 251–261. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9773-1>.
- Lepistö, A., Granlund, K., Kortelainen, P. & Räike, A. 2006. Nitrogen in river basins: sources, retention in the surface waters and peatlands, and fluxes to estuaries in Finland. *Science of the Total Environment* 365(1–3): 238–259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.053>.
- Lundin, L. & B. Bergquist. 1990. Effects on water chemistry after drainage of a bog for forestry. *Hydrobiologia* 196: 167–181. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00006108>
- Marttila, H., Karjalainen, S.-M., Kuoppala, M., Nieminen, M.L., Ronkanen, A.-K., Kløve B. & Hellsten, S. 2018. Elevated nutrient concentrations in headwaters affected by drained peatland. *Science of the Total Environment* 643: 1304–1313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.278>.
- Marttila, H. & Kløve, B. 2008. Erosion and delivery of deposited peat sediment. *Water Resources Research* 44: W06406. doi:[10.1029/2007WR006486](https://doi.org/10.1029/2007WR006486).
- Marttila, H. & Kløve, B. 2010a. Dynamics of erosion and suspended sediment transport from drained peatland forestry. *Journal of Hydrology* 388: 414–425. doi:[10.1016/j.jhydrol.2010.05.026](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.026).
- Marttila, H. & Kløve, B. 2010b. Managing runoff, water quality and erosion in peatland forestry by peak runoff control. *Ecological Engineering* 36: 900–911. doi:[10.1016/j.ecoeng.2010.04.002](https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2010.04.002).
- Marttila, H., Vuori, K.-M., Hökkä, H., Jämsen, J. & Kløve, B. 2010. Framework for designing and applying peak runoff control structures for peatland forestry conditions. *Forest Ecology and Management* 260: 1262–1273. doi:[10.1016/j.foreco.2010.06.032](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.032).
- Mattsson, T, Finér, L., Kortelainen, P. & Sallantausta, T. 2003. Brookwater quality and background leaching from unmanaged forested catchments in Finland. *Water, Air, and Soil Pollution* 147: 275–297. <https://doi.org/10.1023/A:1024525328220>.
- Mattsson, T., Kortelainen, P. & Räike, A. 2005. Export of DOM from boreal catchments: impacts of land use cover and climate. *Biogeochemistry* 76: 373–394. doi: [10.1007/s10533-005-6897-x](https://doi.org/10.1007/s10533-005-6897-x)
- Mäkelä, A., Antikainen, S., Mäkinen, I., Kivinen, J. & Leppänen, T. 1992. Vesitutkimusten näytteenottomenetelmät. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja -sarja B nro 10. Vesi- ja ympäristöhallitus, Helsinki. 87 s.
- Nieminen, M. & Ahti, E. 1993. Talvilannoituksen vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen karulta suolta. *Folia Forestalia* 814: 22 s.
- Nieminen, M. & Jarva, M. 2000. Dissolution of phosphorus fertilizers of differing solubility in peat soil: a field experiment on a drained pine bog. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15(2): 267–273. <https://doi.org/10.1080/028275800750015082>.
- 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: 39–49. <https://doi.org/10.14214/sf.161>

- Nieminen, M., Moilanen, M. & Piirainen, S. 2007. Phosphorus allocation in surface soil of two drained peatland forests following wood and peat ash application - why effective adsorption in low sorptive soils? *Silva Fennica* 41(3): 395–407. [doi:10.14214/sf.280](https://doi.org/10.14214/sf.280)
- Nieminen, M., Laurén, A., Hökkä, H., Sarkkola, S., Koivusalo, H., Pennanen, T. 2011. Recycled iron phosphate as a fertilizer raw material for tree stands on drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 261: 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.036>
- Nieminen, M., Koskinen, M., Sarkkola, S., Laurén, A., Kaila, A., Kiikkilä, O., Nieminen, T.M. & Ukonmaanaho, L. 2015. Dissolved organic carbon export from harvested peatland forests with differing site characteristics. *Water, Air and Soil Pollution* 226: 181. [doi 10.1007/s11270-015-2444-0](https://doi.org/10.1007/s11270-015-2444-0)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.210>.
- 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. [doi:10.1016/j.foreco.2017.02.046](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.046)
- Nieminen, M., Palviainen, M., Sarkkola, S., Laurén, A., Marttila, H. & Finér, L. 2018a. A synthesis of the impacts of ditch network maintenance on the quantity and quality of runoff from drained boreal peatland forests. *Ambio* 47: 523–534. [doi: 10.1007/s13280-017-0966-y](https://doi.org/10.1007/s13280-017-0966-y).
- 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. [doi: 10.1007/s13280-018-1047-6](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 Pollution* 229: 10 p. [doi:10.1007/s11270-018-3945-4](https://doi.org/10.1007/s11270-018-3945-4)
- Nieminen, M., Sarkkola, S., Hahti, K., Sallantausta, T., Koskinen, M. & Ojanen, P. 2020a. Metsäojitettujen soiden typpi- ja fosforikuormitus Suomessa. Summary: Forestry on drained peatlands as a source of surface water nitrogen and phosphorus in Finland. *Suo-Mires and Peat* 71: 1–13.
- Nieminen, M., Luniainen, S., Ojanen, P., Sarkkola, S. & Laurén A. 2020b. Metsätalouden vesistökuormitus: nykykäytös ja tulevaisuuden menetelmäkehitys. *Metsätieteen aikakauskirja* 2020–10336. Katsaus. 9 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10336>
- Nieminen, M., Sarkkola, S., Tolvanen, A., Tervahauta, A., Saarimaa, M., & Sallantausta, T. 2020. Water quality management dilemma: Increased nutrient, carbon, and heavy metal exports from forestry-drained peatlands restored for use as wetland buffer areas. *Forest Ecology and Management* 465. 9 s. [doi:10.1016/j.foreco.2020.118089](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118089).
- Nieminen, M., Sarkkola, S., Hasselquist, E.-M. & Sallantausta, T. 2021a. Long-Term Nitrogen and Phosphorus Dynamics in Waters Discharging from Forestry-Drained and Undrained

- Boreal Peatlands. Water air and soil pollution 232. 9 s. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05293-y>
- Nieminen, M., Sarkkola, S., Sallantausta, T., Hasselquist, E. M. & Laudon, H. 2021b. Peatland drainage - a missing link behind increasing TOC concentrations in waters from high latitude forest catchments? *Science of the Total Environment* 774. 7 s. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145150>.
- Nieminen, M., Hasselquist, E.M., Mosquera, V., Ukonmaanaho, L., Sallantausta, T. & Sarkkola, S. 2022. Post-drainage stand growth and peat mineralization impair water quality from forested peatlands. *Journal of Environmental Quality* 51: 1211–1221. doi: [10.1002/-jeq2.20412](https://doi.org/10.1002/-jeq2.20412).
- Näykki, T., Kyröläinen, H., Witick, A., Mäkinen, I., Pehkonen, R., Väisänen, T., Sainio, P. & Luotola, M. 2013. Laatusuosituksset ympäristöhallinnon vedenlaaturekistereihin vietävälle tiedolle: vesistä tehtävien analyttien määritysrajat, mittausepävarmuudet sekä säilytysajat ja -tavat. Ympäristöhallinnon ohjeita 4/2013.
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. 2019. The dependence of net soil CO₂ emissions on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. *Mires and Peat* 24 article 27. 8 p. <https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1751>.
- Palviainen, M., Finér, L., Mannerkoski, H., Piirainen, S. & Starr, M. 2005. Responses of boreal forest ground vegetation species to clear-cutting – Aboveground biomass and nutrient contents during the first 7 years. *Ecological Research* 20: 652–660. doi: [10.1007/s11284-005-0078-1](https://doi.org/10.1007/s11284-005-0078-1).
- Palviainen, M., Finér, L., Laurén, A., Launiainen, S., Piirainen, S., Mattsson, T. & Starr, M. 2014. Nitrogen, phosphorus, carbon, and suspended solids loads from forest clear-cutting and site preparation: long-term paired catchment studies from Eastern Finland. *Ambio* 43: 218–233. doi [10.1007/s13280-013-0439-x](https://doi.org/10.1007/s13280-013-0439-x).
- 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. doi: [10.1007/s13280-016-0789-2](https://doi.org/10.1007/s13280-016-0789-2)
- Palviainen, M., Peltomaa, E., Laurén, A., Kinnunen, N., Ojala, A., Berninger, F., Zhu, X. & Pumpainen, J. 2022. Water quality and the biodegradability of dissolved organic carbon in drained boreal peatland under different forest harvesting intensities. *Science of the Total Environment* 806: 150919. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150919>
- Piirainen, S., Domisch, T., Moilanen, M. & Nieminen, M. 2013. Long-term effects of ash fertilization on runoff water quality from drained peatland forests. *Forest Ecology and Management* 287: 53–66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.09.014>.
- Postila, H., Saukkoriipi, J., Heikkinen, K., Karjalainen, S.-M., Kuoppala, M., Marttila, H. & Kløve, B. 2014. Can treatment wetlands be constructed on drained peatlands for efficient purification of peat extraction runoff? *Geoderma* 228–229: 33–43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.008>

- Prévost, M., Plamondon, A.P. & Belleau, P. 1999. Effects of drainage of a forested peatland on water quality and quantity. *Journal of Hydrology* 214: 130–143. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00281-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00281-9).
- Rantakari, M., Mattsson, T., Kortelainen, P., Piirainen, S., Finér, L. & Ahtiainen, M., 2010. Organic and inorganic carbon concentrations and fluxes from managed and unmanaged boreal first-order catchments. *Science of the Total Environment* 408: 1649–1658. doi:[10.1016/j.scitotenv.2009.12.025](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.12.025).
- Räike, A., Taskinen, A. & Knuuttila, S. 2020. Nutrient export from Finnish rivers into the Baltic Sea has not decreased despite water protection measures. *Ambio* 19: 460–472. doi:[10.1007/s13280-019-01217-7](https://doi.org/10.1007/s13280-019-01217-7).
- Saarela, T., Lafdani, E.K., Laurén, A., Pumpanen, J. & Palviainen, M. 2020. Biochar as adsorbent in purification of clear-cut forest runoff water: adsorption rate and adsorption capacity. *Biochar* 2: 227–237. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00049-z>
- Saari, P. & Högmänder, P. 2013. Metsätalouden ja turvetuotannon vesiensuojelun kehittämissanke - TASO. *Metsätieteen aikakauskirja* 2: artikkeli 6885. doi: <https://doi.org/10.14214/ma.6885>.
- Saarinen, M. & Silver, T. 2011. Pääravinesuhteet ja kaliumin riittävyys karujen rämeiden ojitusalueilla. *Suo–Mires and Peat* 62(1): 13–29.
- Sallantaus, T., Nieminen, M., Sarkkola, S. & Turunen, J. 2022. Ojittamattomien soiden vaikutus veden laatuun–suon nielut. *Vesitalous* 2/2022: 19–23.
- Sallantaus, T. 1988. Water quality of peatlands and man’s influence on it. *Suomen Akatemian julkaisuja* 5/1988: 80–98.
- 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. *Canadian Journal of Forest Research* 40(8): 1485–1496. doi: <https://doi.org/10.1139/X10-084>.
- 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. doi:[10.1016/j.scitotenv.2009.09.008](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.008).
- Sarkkola, S., Nieminen, M., Koivusalo, H., Laurén, A., Kortelainen, P., Mattsson, T., Palviainen, M., Piirainen, S., Starr, M. & Finér, L. 2012. Trends in concentrations and export of nitrogen in boreal forest streams. *Boreal Environment Research* 17: 85–101.
- Sarkkola, S., Nieminen, M., Koivusalo, H., Laurén, A., Kortelainen, P., Mattsson, T., Palviainen, M., Piirainen, S., Starr, M. & Finér, L. 2013. Iron concentrations are increasing in surface waters from forested headwater catchments in eastern Finland. *Science of the Total Environment* 463–464: 683–689. doi: [10.1016/j.scitotenv.2013.06.072](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.072).
- Sarkkola, S., Ukonmaanaho, L., Nieminen, T., Laiho, R., Laurén, A., Finér, L. & Nieminen, M. 2016. Should harvest residues be left on site in peatland forests to decrease the risk of potassium depletion? *Forest Ecology and Management* 374: 136–145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.004>

- Saura, M., Sallantausta, T., Bilaletdin, Ä. & Frisk, T. 1995. Metsälannoitteiden huuhtoutuminen Kalliojärven valuma-alueelta. Teoksessa: Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.). Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 2: 87–104.
- Sirin, A., Vompersky, S. & Nazarov, N. 1991. Influence of forest drainage on runoff: Main concepts and examples from central part of the USSR European Territory. *Ambio* 20: 334–339. [JSTOR: http://www.jstor.org/stable/4313855](http://www.jstor.org/stable/4313855).
- Škerlep, M. 2021. Changing land cover as a driver of surface water browning. Academic Dissertation. Lund University. 65 p.
- Stenberg, L., Finér, L., Nieminen, M., Sarkkola, S. & Koivusalo, H. 2015. Quantification of ditch bank erosion in drained forested catchment. *Boreal Environment Research* 20(1): 1–18.
- Tuukkanen, T., Koivusalo, H., Marttila, H., Leinonen, A., Kløve, B., Laurén, A. & Finér, L. 2012. A GIS-based model for ditch erosion risk assessment in peatland forestry. *Erosion and Sediments Yields in the Changing Environment (Proceedings of a symposium, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS-Chengdu, Kiina, 11–15 Lokakuuta 2012)* IAHS Publ. 356: 221–227.
- Tuukkanen, T., Marttila, H. & Kløve, B. 2014. Effect of soil properties on peat erosion and suspended sediment delivery in peat extraction sites. *Water Resources Research* 50: 3523–3535. [doi:10.1002/2013WR015206](https://doi.org/10.1002/2013WR015206).
- Tuukkanen, T., Stenberg, L., Finér, L., Marttila, H., Piirainen, S., Koivusalo, H. & B. Kløve. 2016. Erosion mechanisms and sediment sources in a peatland forest after ditch cleaning. *Earth Surface Processes and Landforms* 41: 1841–1853. [doi:10.1002/esp.3951](https://doi.org/10.1002/esp.3951).
- Vuorenmaa, J., Rekolainen, S., Lepistö, A., Kenttämies, K. & Kauppila, P. 2002. Losses of nitrogen and phosphorus from agricultural and forest areas in Finland during the 1980s and 1990s. *Environmental Monitoring and Assessment* 76: 213–248. <https://doi.org/10.1023/A:1015584014417>.
- Väänänen, R., Hristov, J., Tanskanen, N., Hartikainen, H., Nieminen, M. & Ilvesniemi, H. 2008. Phosphorus sorption properties in podzolic forest soils and soil solution phosphorus concentration in undisturbed and disturbed soil profiles. *Boreal Environment Research* 13: 553–567.
- Ylitalo, E. (toim.) 2012. Metsätalostollinen vuosikirja 2012. Metsätutkimuslaitos. Vammalan Kirjapaino Oy. 452 s. ISBN 978-951-40-2392-7.
- Yrjänä, T., Huhta, P.-L., Hartikainen, E., Moilanen, E., Tammela, S., Marttila, H., Kløve, B., Suurkuukka, H., Virtanen, R. & Muotka, T. 2011. Liettyneiden metsäpurojen kunnostaminen. *Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2011 numero 2 artikkeli id 6644*. [doi: https://doi.org/10.14214/ma.6644](https://doi.org/10.14214/ma.6644).
- Åström, M., Aaltonen, E.-K. & Koivusaari, J. 2001a. Impact of ditching in a small forested catchment on concentrations of suspended material, organic carbon, hydrogen ions and metals in stream water. *Aquatic Geochemistry* 57: 57–73. [doi: https://doi.org/10.1023/A:1011337225681](https://doi.org/10.1023/A:1011337225681).

Åström, M., Aaltonen, E.-K. & Koivusaari, J. 2001b. Effect of ditching operations on stream-water chemistry in a boreal catchment. *Science of the Total Environment* 279: 117–129. doi: [10.1016/s0048-9697\(01\)00757-4](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(01)00757-4)

Åström, M., Aaltonen, E.-K. & Koivusaari, J. 2002. Impact of forest ditching on nutrient loadings of a small stream - a paired catchment study in Kronoby, W. Finland. *Science of the Total Environment* 297: 127–140. doi: [10.1016/s0048-9697\(02\)00129-8](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(02)00129-8).



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000