

Mika Nieminen¹, Samuli Launiainen², Paavo Ojanen³, Sakari Sarkkola¹ ja Ari Laurén⁴

Metsätalouden vesistökuormitus: nykykäsitys ja tulevaisuuden menetelmäkehitys

Nieminen M., Launiainen S., Ojanen P., Sarkkola S., Laurén A. (2020). Metsätalouden vesistökuormitus: nykykäsitys ja tulevaisuuden menetelmäkehitys. Metsätieteen aikakauskirja 2020-10336. Katsaus. 9 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10336>

Tiivistelmä

Metsätaloutta on pidetty valtakunnallisesti melko vähäisenä vesistökuormittajana. Tämä perustui käsitykseen, että metsäojituksen ja muiden metsätalouden toimenpiteiden vaikutukset vesistökuormitukseen ovat suhteellisen lyhytaikaisia; 10–30 vuoden kuluessa kuormitusten ajateltiin vähitellen palautuvan ennen toimenpiteitä vallinneelle tasolle. Käsitykset ovat viime vuosina muuttuneet merkittävästi, kun havaittiin, että ojituksen vaikutukset valumaveden typpi- ja fosforipitoisuuksiin olivat selvästi nähtävissä vielä useiden vuosikymmenten kuluttua. Useissa tutkimuksissa myös havaittiin, että erityisesti typpi- ja hiilikuormat ojitetuilta soilta ovat kasvussa. Tämän jälkeen on esitetty uusia arvioita metsäojituksen ja metsätalouden vesistökuormituksesta, mutta arvioissa on huomattavaa vaihtelua. Tämä katsaus tarkastelee eri laskentamenetelmiä metsätalouden vesistökuormituksen arvioimiseksi ja pyrkii löytämään selityksiä siihen, miksi kuormitusarvioit vaihtelevat eri tutkimusten välillä. Samalla pyrkimyksenä on tehdä ehdotuksia tutkimuksen suuntaamiseksi kehitettäessä kuormituslaskentaa ja vesiensuojelullisesti kestävää suometsätaloutta.

Asiasanat huuhtoutuminen; metsät; ojitus; suot; vesiensuojelu; vesistövaikutukset

Yhteystiedot ¹Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat, Helsinki; ²Luonnonvarakeskus (Luke), Biotalous ja ympäristö, Helsinki; ³Helsingin yliopisto, Metsätieteiden osasto, Helsinki; ⁴Itä-Suomen yliopisto, Metsätieteiden osasto, Joensuu

Sähköposti mika.nieminen@luke.fi

Hyväksytty 14.5.2020

1 Johdanto

Viime vuosina on julkaistu tutkimuksia, jotka osoittavat, että metsäojitettujen soiden ravinnekuormitus on huomattavasti suurempaa kuin on aiemmin arvioitu (Nieminen ym. 2017, 2018; Marttila ym. 2018). Aiemmin metsäojituksen vesistövaikutusten ajateltiin olevan lyhytaikaisia ja kuormituksen palautuvan takaisin luonnontilaisten soiden tasolle 10–30 vuodessa (Finér ym. 2010). Nieminen ym. (2017, 2018) havaitsivat kuitenkin, että ravinnekuormitus ojitetuilla soilla voi jäädä pysyvästi suuremmaksi kuin luonnontilaisilla soilla. Heidän tutkimustensa perusteella esitettiin arvioita, joissa metsäojitus kattoi jopa 90 % metsätalouden aiheuttamasta typen kokonaiskuormituksesta (Finér ym. 2020). Nieminen ym. (2020) laskivat myös, että metsäojituksen pysyväisluonteisen kuormituksen huomioon ottaminen muuttaa merkittävästi metsätalouden ja erityisesti metsäojituksen roolia vesistöjen kokonaiskuormituksessa Suomessa. Metsäojitettujen soiden typpi- ja fosforikuormitus oli aiemmissa arvioissa vain 1–3 % kaikesta ihmisperäisestä kuormituksesta (Finér ym. 2010). Uuden tiedon valossa kuormitus voi fosforin osalta olla viidennes ja typenkin osalta lähes 15 %. Viimeaikaisten tutkimusten tulokset viittaavat myös siihen, että erityisesti hiili- ja typpikuormat ojitetuilta soilta voivat tulevaisuudessa edelleen kasvaa (Nieminen ym. 2017, 2018; Asmala ym. 2019; Räike ym. 2020).

Metsäojituksen pysyväluonteisen ja aiempia arvioita huomattavasti suuremman kuormituksen tultua ilmi on selvää, että metsätalouden vesistökuormitusarviot on päivitettävä vastaamaan muutunutta käsitystä. On hyvin todennäköistä, että ottamalla huomioon metsäojituksen pysyväisluonteinen kuormitus metsätaloudesta tulee monilla vesistöalueilla suurin ihmisperäinen kuormituslähde (Nieminen ym. 2020). Metsätalouden kuormituksen tunteminen ja erityisesti sen hallinta on täten 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. Myös Kansalliseen metsästrategiaan 2025 on asetettu tavoitteita, jotka edellyttävät metsätalouden kuormituksen hallintaa.

Metsäojitusten ja koko 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. Tämän katsauksen tarkoituksena on valaista, miksi eri tavoin lasketuissa vesistökuormitusarvioissa on yhä huomattavaa vaihtelua. Samoin tarkoituksena on tehdä ehdotuksia tutkimuksen suuntaamiseksi kehitettäessä kuormituslaskentaa ja metsätalouden vesiensuojelua. Katsauksessa pyrimme käyttämään lähteinä vertaisarvioituja tutkimusjulkaisuja metsätalouden ja metsäojituksen vesistökuormituksesta. Kaikkia viimeisimpiä arvioita ei kuitenkaan ole vertaisarvioitu, joten osaksi jouduimme tukeutumaan vertaisarvioimattomiin lähteisiin (esim. Finér ym. 2020).

2 Ominaiskuormituslaskenta

Ominaiskuormituslukuihin perustuva laskenta on ollut pitkään pääasiallinen menetelmä arvioitaessa metsätalouden aiheuttamaa vesistökuormitusta (Kenttämies 2006; Finér ym. 2010). Menetelmän ehdottomana etuna on, että sillä pystytään tunnistamaan eri metsätaloustoimenpiteiden osuus metsätalouden kokonaiskuormituksesta ja voidaan ennustaa kuormituksen muuttuminen metsätalouden käytäntöjen muuttuessa.

Ominaiskuormitukseen perustuva laskenta tarkoittaa, että on kokeellisesti määritetty, paljonko eri metsätaloustoimenpiteet käsittelypinta-alaa kohden kasvattavat vesistökuormitusta käsittelemät-

tömästä taustakuormitustasosta. Ominaiskuormitus ilmoitetaan kilogrammoina tai grammoina toimenpidehehtaaria kohden vuodessa eli esim. kilogrammaa tyyppiä per uudistushakkuuhehtaari per vuosi. Kertomalla eri toimenpiteiden toteutuspinna-alat ominaiskuormitusluvuilla ja ottamalla huomioon kuormituksen kesto vuosina, saadaan tietyn metsätalouden toimenpiteen vesistökuormitus tiettyä ajanjaksona. Laskemalla yhteen eri toimenpiteiden vesistökuormitusarvot 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.

Ominaiskuormituslukuihin perustuva arvio on osoittautunut muita arvioita selvästi alhaisemmaksi. Niemisen ym. (2017, 2018) mukaan todennäköisenä syynä tähän on se, että soiden ojitus on muuttanut niiden olosuhteita ja biogeokemiallisia prosesseja siten, että ojitetut suot ovat pysyvästi suurempia kuormituslähteitä kuin luonnontilaiset. Tämä Niemisen ym. (2020) **ojituslisäksi** nimeämä kuormitus puuttuu Finérin ym. (2010) ominaiskuormituslukuihin perustuvista arvioista.

Finérin ym. (2010) arvioita selvästi suurempia arvioita ominaiskuormituslukuihin perustuen esittivät Lepistö ym. (2006) ja Kenttämies (2006). Lepistö ym. (2006) arvioivat metsätalouden tyyppikuormituksen suuruudeksi 11 000 tonnia vuodessa. Kenttämies (2006) arvioi tyyppikuormituksen olevan 4 500 – 7 100 tonnia riippuen siitä, oliko arvioinnin kohteena vuosi 1977 (korkeampi arvio) vai 1993 (alempi arvio). Heidänkään tutkimuksissaan metsäojituksen ei ajateltu aiheuttavan pysyvää ojituslisää, mutta edellisellä vuosikymmenellä tehtyjen uudisojitusten ajateltiin yhä vaikuttavan ravinnekuormitukseen. Kenttämiehen (2006) arvioissa vesistökuormituksen lasku 1970-luvulta 1990-luvulle selittyy pääosin juuri sillä, että 1960–1970-luvuilla uudisojituksia tehtiin huomattavasti enemmän kuin 1980–1990-luvuilla.

Ominaiskuormitusluvuilla voi syntyä muita laskentamenetelmiä alhaisempi kuormitusarvio myös siksi, että joillekin metsätaloustoimenpiteille, kuten harvennushakkuille ei ole olemassa ominaiskuormituslukua. Ominaiskuormitusluvuilla tehtyjä laskelmia tarkasteltaessa on myös otettava huomioon, että joidenkin toimenpiteiden (esim. kangasmaiden tyypilannoitus) ominaiskuormitusluvut perustuvat hyvin pieneen kokeelliseen aineistoon (Finér ym. 2010).

Ominaiskuormituslukuihin perustuvassa laskennassa merkittäväksi ongelmaksi muodostuu myös metsätaloustoimenpiteiden aiheuttaman kuormituksen keston määrittäminen. Ominaiskuormitusluvut perustuvat tyyppillisesti parittaisten valuma-alueiden koejärjestelyyn, jossa kahden ominaisuudeltaan 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. Koska valuma-alueet eivät ole koskaan täysin samanlaisia ja kenttämittausmenetelmissäkin on virhelähteitä, käsittelyvaikutusarvioon jää aina epävarmuutta, joka kumuloituu tutkimuksen keston kasvaessa. Kuten Laurén ym. (2009) osoittivat, koasetelman 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. Arvioitaessa metsätalouden kuormitusta ominaiskuormituslukuihin perustuen toimenpiteiden aiheuttama kuormitus onkin perustellusti asetettu nolllaksi sen jälkeen, kun koejärjestelyn perusteella toimenpiteen vaikutusta ei enää ole voitu havaita (Finér ym. 2010). Kuormituksen asettaminen nolllaksi on siis seuraus siitä, että on tultu parittaisten valuma-alueiden koejärjestelyn erottelukyvyn äärirajoille: kun epävarmuus kasvaa suhteessa käsittelyvaikutukseen, vaikutuksen suuruutta tai edes vaikutuksen suuntaa ei voida enää arvioida. Siksi ominaiskuormituslaskennan rinnalla on hyvä olla muita lähestymistapoja.

3 Erotusmenetelmä

Metsätalouden vesistökuormitusta on tarkasteltu myös vertaamalla metsätaloukskäytössä olevia valuma-alueita luonnontilaisiin alueisiin. Metsätaloukskäytössä olevien valuma-alueiden typpikuormitus on eri tutkimuksissa vaihdellut noin 1,9 ja 2,1 kg ha⁻¹ a⁻¹ välillä (Kortelainen ja Saukkonen 1998; Vuorenmaa ym. 2002; Finér ym. 2018) ja fosforikuormitus noin 0,08 ja 0,10 kg ha⁻¹ a⁻¹ välillä (Löfgren ja Olsson 1990; Kortelainen ja Saukkonen 1998; Vuorenmaa ym. 2002; Finér ym. 2018). Luonnontilaisilla valuma-alueilla typpikuormitus on taas vaihdellut välillä 1,3–1,4 kg ha⁻¹ a⁻¹ ja fosforikuormitus on ollut noin 0,05 kg ha⁻¹ a⁻¹ (Mattsson ym. 2003; Kortelainen ym. 2006). Ottamalla huomioon metsämaan ala (22,2 milj. ha) ja vähentämällä edellä esitetyistä metsätaloukskäytössä olevien alueiden kuormituksista luonnontilaisten alueiden kuormitukset vuotuisesti 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.

Edellä esitetyistä poikkeavia arvioita on saatu nk. Metsätalouden seurantaverkossa (Finér ym. 2018), jossa luonnontilaisten valuma-alueiden (n=11) kuormitus oli selvästi edellä esitettyjä arvioita alhaisempi todennäköisesti johtuen alueiden pohjoisemmasta sijainnista (typpi: 1 kg ha⁻¹ a⁻¹, fosfori: 0,03 kg ha⁻¹ a⁻¹). Metsätalouden vesistökuormitusta on myös arvioitu vertaamalla, ei ravinnekuormitusta (kuormitus = pitoisuus × valunta), vaan ravinteiden **pitoisuuseroja** valumavedessä metsätaloukskäytössä olevien ja luonnontilaisten alueiden välillä (Nieminen ym. 2017; Marttila ym. 2018). Näiden tutkimusten tulokset viittaavat siihen, että yksittäisissä tutkimuksissa voidaan saada edellä esitettyjä suurempia eroja metsätaloukskäytössä olevien ja luonnontilaisten valuma-alueiden välillä. Erot näyttäisivät olevan suuria etenkin silloin, kun metsätaloukskäytössä olevien alueiden aineisto koostuu suurelta osin ojitetuista soista ja etenkin, kun aineistoon sisältyy fosforilannoitettuja soita (esim. Joensuu ym. 2001).

Erotusmenetelmää käytettäessä tutkimusalueiden tulisikin vastata keskimääräisiä metsätalouksalueita esimerkiksi kasvupaikkojen, soiden ojituksen ja muiden metsätaloustoimien osalta. Näin ei eri aineistoissa useinkaan ole, ja erotusmenetelmä voi yleensä jonkin verran yliarvioida metsätalouden merkitystä vesistökuormittajana. On todennäköistä, että metsätaloukskäytössä 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 heikkoutena on edelleen, että vähäininkin ero eri tutkimusten välillä metsätaloukskäytössä olevien ja luonnontilaisten alueiden kuormituserossa vaikuttaa tuloksiin huomattavasti, kun tulokset skaalataan koko metsäalalle. Erotusmenetelmän etuna ominaiskuormitusmenetelmään verrattuna taas on, että laskettuun kuormaan sisältyvät lähtökohtaisesti kaikki metsätalouden toimenpiteet, mukaan lukien harvennushakkuut.

4 Tilastolliset ennustemallit

Kolmas menetelmä kuormituksen arviointiin on ollut kehittää tilastollisia malleja, joilla lasketaan valumaveden ravinnepitoisuuksien tai -kuormitusten riippuvuus alue- ja ilmastotekijöistä. Näillä malleilla ennustetaan kuormitukset eri osiin maata. Näin meneteltiin nk. MetsäVesiryhmän työssä (Finér ym. 2020) sekä Niemisen ym. (2020) metsäojitettujen soiden kuormitusta käsittelevässä tutkimuksessa. Kummassakin työssä selittävinä tekijöinä olivat ojitusalueen osuus valuma-alueen pinta-alasta ja sijaintia kuvaavana tunnuksena lämpösumma sekä MetsäVesiryhmän malleissa lisäksi soiden osuus valuma-alueen pinta-alasta. Fosforin ja orgaanisen hiilen osalta MetsäVesiryhmän mallit sisälsivät myös aikatekijän, eli mittausajankohta vaikutti fosfori- ja hiilipitoisuuksiin valumavedessä. Em. tutkimuksissa esitetyt mallit johtavat huomattavan eriäviin arvioihin vuotuisesta vesistökuormituksesta. Niemisen ym. (2020) kuormitusarviot (typpi: 8 500 t a⁻¹, fosfori: 590 t a⁻¹) pelkille ojitusalueille (5,9 milj. ha) olivat suurempia kuin MetsäVesiryhmän arviot (typpi: 7 300 tonnia, fosfori: 440 tonnia) koko metsäalalle (22,2 milj. ha) (Finér ym. 2020).

Tärkeimpänä syynä eroihin lienee, että Niemisen ym. (2020) tulosten mukaan ojituksen vaikutukset fosfori- ja typpikuormiin (kg ha⁻¹ a⁻¹) kasvavat pohjoisesta etelään, kun taas MetsäVesiryhmän tulosten perusteella ojitus lisää ravinnekuormituksia selvästi enemmän pohjoisessa kuin etelässä. MetsäVesiryhmän aineistossa (Finér ym. 2020) metsätalouskäytössä olevien valuma-alueiden ravinnepitoisuudet erityisesti Etelä-Suomessa olivat myös selvästi alhaisempia kuin Niemisen ym. (2020) aineistossa. Lisäksi Nieminen ym. (2020) tutkimuksessa muiden metsätaloustoimenpiteiden (lannoituksen, hakkuiden, kunnostusojituksen) vaikutukset lisättiin malleilla laskettuun ojituslisää kuvaavaan kuormitukseen, kun taas MetsäVesiryhmä oletti, että aineistoon sovitettujen mallit sisältävät myös muiden metsätaloustoimenpiteiden kuin ojituksen vaikutukset.

Nieminen ym. (2018) arvioivat metsäojitettujen soiden typpikuormituksen karkeasti Etelä- ja Pohjois-Suomelle mallilla, jossa selittävinä 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. (2020) 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 intensiivisempää 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, kasvupaikkatyytit, puuston määrä ja rakenne ym.) paremmin kuin tähän mennessä kehitetyt mallit. On myös selvää, että vain kahdella tai kolmella muuttujalla mallinnettaessa aineistoon aina jää poikkeustapauksia (outliers), joiden käyttäytymistä mallit eivät pysty kuvaamaan (Finér ym. 2020). Päätös näiden alueiden poistamisesta on ongelmallista, koska ratkaisun tekemiseen ei ole objektiivista vastausta. Toisaalta tiedon lisäämisen näkökulmasta voisi olla perusteltua kiinnittää huomiota juuri näihin poikkeustapauksiin.

5 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. Niemisen ym. (2020) tutkimuksen mukaan metsätalous soilla kattaa n. 20 % Suomen ihmisperäisestä fosforikuormasta ja 14 % typpikuormasta, kun aiemmat ominaiskuormituslukuihin perustuvat arviot olivat fosforille 3 % ja typelle alle 1 %. Tarkentunut arvio kertoo siitä, että aiemmin ojituksen pysyväloueista kuormitusta ei osattu ottaa huomioon ominaiskuormitukseen perustuvissa laskelmissa (Finér ym. 2010). Arvioiden tarkentumisesta huolimatta käsitykset metsätalouden vesistökuormituksesta vaihtelevat yhä huomattavasti (Taulukko 1), ja on selvää, että kuormituslaskentaa on edelleen kehitettävä.

Yksi kuormitusarvioiden vaihtelua selittävä tekijä eri arviointimenetelmien lisäksi on se, että kuormitukset muuttuvat ajan suhteen esimerkiksi metsänhoito- ja vesiensuojelumenetelmien muuttuessa sekä kuormitusten muuttuessa ojitussukcession tai ilmaston lämpenemisen vaikutuksesta. Esimerkiksi ominaiskuormitusmenetelmällä eri aikoina tehtyihin arvioihin (Taulukko 1) vaikuttaa huomattavasti se, ajatellaanko uudisojitusten edelleen vaikuttavan kuormitukseen (Kenttämies 2006; Lepistö ym. 2006) vai ei (Finér ym. 2010). Onkin otettava huomioon, että empiirisistä aineistoista lasketut kuormitukset kuvaavat aina kyseiselle aikakaudelle tyypillistä tilannetta. Riskinä erityisesti typen osalta on, että metsätalouden kuormitukset yhä kasvavat nykyarvioihin verrattuna esimerkiksi suometsien hakkuiden lisääntymisen ja turpeen hajotuksen kiihtymisen vuoksi (Nieminen ym. 2017, 2020; Räike ym. 2020; Finér ym. 2020).

Ongelmana vesistökuormitusten arvioinnissa on erityisesti se, että olemassa olevat aineistot kuormituksen laskemiseksi ovat laadultaan hyvin vaihtelevia. Joissakin aineistoissa vesinäytteitä on otettu paljon ja näytteenotossa on otettu huomioon erilaiset valuntaolot eri vuodenaikoina ja vuosina. Toisissa aineistoissa näytteenotto on taas saattanut keskittyä esimerkiksi vain sulan maan kauteen, joka kattaa vuosivalunnasta selvästi alle puolet. Myös valunnan mittauksissa on merkittäviä eroja; joissakin tutkimuksissa valuntaa on mitattu jatkuvatoimisesti, kun taas monista aineistoista valunta puuttuu kokonaan. Siten vesistökuormituslaskennan pohjana oleviin vuosittaisiin pitoisuus- ja kuormitusarvioihin liittyy aina epävarmuutta. Aineistojen laadun vaihtelun vuoksi olisi tärkeää, että kuormitusarvioita tehtäisiin hyvin monenlaisilla aineistoilla ja niistä lasketuilla malleilla. Vesinäytteenottoa on tehty Suomessa kaikkiaan 259 metsävaluma-alueella (Finér ym. 2020). Näin suuri aineisto mahdollistaisi laskelmat hyvinkin vaihtelevista osa-aineistoista ja esimerkiksi aineistojen osittamisen niiden laadun suhteen. Näin voitaisiin selvittää, miten paljon vesistökuormitusarviot

Taulukko 1. Esimerkkejä eri menetelmillä lasketuista valtakunnallisista metsätalouden typpi- ja fosforikuormitusarvioista. Niemisen ym. (2018, 2020) tulokset ovat ojitusalueille, muut tulokset koko metsäalalle.

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	ks. teksti	11 000 – 18 000	700 – 1 100
Tilastolliset ennustemallit	Nieminen ym. (2018)	13 000	
	Finér ym. (2020)	7 300	440
	Nieminen ym. (2020)	8 500	585

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

vaihtelevat riippuen käytetyistä aineistoista ja niiden perusteella tuotetuista malleista. Tällainen tarkastelu olisi ensisijaisen tärkeää kokeellisilla malleilla tehtyihin kuormitusarvioihin liittyvän epävarmuuden kartoittamiseksi.

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 kuormituksesta valtaosan, useat tutkimustulokset viittaavat siihen, että erityisesti hiili- ja typpihuuhtoumat ovat edelleen kasvussa (Nieminen ym. 2017, 2018; Asmala ym. 2019; Räike ym. 2020). Vesiensuojelullisesti merkittävä ongelma on, ettei tiedetä, miksi kuormitukset ovat aiemmin arvioitua suuremmat ja edelleen kasvavat. Nieminen ym. (2020) esittävät, että todennäköisenä syynä on turpeen hajotuksen ja siitä johtuvan ravinteiden ja hiilen mineralisoitumisen kiihtyminen. Ojituksesta kuluneen ajan myötä suon vedenpinta todennäköisesti laskee puuston ja samalla sen haihdunnan kasvaessa (Sarkkola ym. 2010), ja turpeen hajotus on sitä nopeampaa, mitä syvemmillä vedenpinta on (Ojanen ja Minkkinen 2019). 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.

Ilman merkittävää ymmärryksen lisääntymistä vesistökuormitukseen vaikuttavista prosesseista edellytykset esimerkiksi vesiensuojelun kehittämiseen ja ilmastonmuutokseen varautumiseen ovat puutteelliset. 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 vesiensuojelumenetelmiä. Monimutkaisten prosessien ja niiden keskinäisten yhteyksien hahmottamiseen ja suunnittelun apuvälineiksi tarvitaan myös prosessipohjaisia mallinnustyökaluja. Nykyisen eksten-siivisen valuma-alue seurannan (mm. Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkko) rinnalle tarvitaan kattavasti instrumentoituja intensiivialueita, joissa voidaan syventyä erityisesti suometsien vaihtoehtoisiin metsänhoitomenetelmiin ja niiden ympäristövaikutuksiin. Prosesseihin liittyvän ymmärryksen kasvaessa on oletettavaa, että käsitykset metsäojituksen ja metsätalouden merkityksestä vesistöjen ravinnekuormituksessa samalla vähitellen yhtenäistyvät.

Tieteellisen vertaisarvioitun tiedon tulisi olla keskiössä kaikessa vesistökuormituslaskentaan ja vesiensuojeluun liittyvässä kehitystyössä. Aivan liian usein metsätalouden vesistövaikutuksiin ja vesiensuojeluun liittyvät ratkaisut perustuvat vertaisarvioimattomiin raportteihin. Vaikka tieteellisiin tutkimusartikkeleihin jää usein puutteita, tiede kuitenkin korjaa itseään ja johtaa ajan myötä paranevaan ymmärrykseen. Metsäojituksen pysyväisluonteisen kuormituksen havaitsemisesta on vielä niin vähän aikaa, etteivät tieteen rattaat ole ennättäneet kunnolla jauhaa uutta tietoa. Kun tieto jatkossa lisääntyy, tuskan ei pidä antaa lisääntyä, vaan on korostettava sitä, että tieteellisellä tiedolla luodaan tukeva pohja niin vesistökuormituslaskennalle, vesistökuormitusten viralliselle raportoinnille kuin vesienhoidon suunnittelullekin. Katse on myös suunnattava pitkälle tulevaisuuteen ja tarkasteltava menneisyyden ja nykytilan sijaan yhä voimakkaammin vaihtoehtoisten metsänhoitoketjujen ja menetelmien mahdollisuuksia vesistökuormituksen hallinnassa.

Kirjallisuus

- 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 s. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4fa9>.
- 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. (A method for calculating nitrogen, phosphorus and sediment load from forested catchments). 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., 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>.
- Hiraishi T., Krug T., Tanabe K., Srivastava N., Baasansuren J., Fukuda M., Troxler T.G. (toim.) (2014). 2013 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>.
- Kenttämies K. (2006). Metsätalouden fosfori- ja typpikuormituksen määrittäminen. Teoksessa: Kenttämies K., Mattsson T. (toim.). Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 816: 9–28. <http://hdl.handle.net/10138/40492>.
- Kortelainen P., Saukkonen S. (1998). Leaching of nutrients, organic carbon and iron from Finnish forestry land. Julkaisussa: Wieder R.K., Novák M., Černý J. (toim.). Biogeochemical investigations at watershed, landscape, and regional scales. Springer, Dordrecht. s. 239–250. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0906-4_23.
- 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>.
- 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>.
- Löfgren S., Olsson H. (1990). Tillförsel av kväve och fosfor till vattendrag i Sveriges inland. Naturvårdsverket rapport 3692. 100 s.
- 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>.
- 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>.
- Nieminen M., Sallantausta T., Ukonmaanaho L., Nieminen T.M., Sarkkola S. (2017). Nitrogen and phosphorus concentrations in discharge from drained peatland forests are increasing. Science of the Total Environment 609: 974–981. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.210>.
- Nieminen M., Sarkkola S., Hellsten S., Marttila H., Piirainen S., Sallantausta T., Lepistö A. (2018). Increasing and decreasing nitrogen and phosphorus trends in runoff from drained peatland forests—Is there a legacy effect of drainage or not? Water, Air, and Soil Pollution 229 article 286. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3945-4>.
- Nieminen M., Sarkkola S., Haahti K., Sallantausta T., Ojanen P. (2020). Metsäojitetettujen soiden typpi- ja fosforikuormitus. Suo – Mires and Peat. (Hyväksytty käsikirjoitus).

- 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 s. <https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1751>.
- Räike A., Taskinen A., Knuuttila S. (2020). Nutrient export from Finnish rivers into the Baltic Sea has not decreased despite water protection measures. *Ambio* 49: 460–474. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01217-7>.
- 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. <https://doi.org/10.1139/X10-084>.
- 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>.

20 viitettä.