

Leena Finér, Ahti Lepistö, Kristian Karlsson, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantaus, Liisa Ukonmaanaho

Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020

Valtioneuvoston
selvitys- ja tutkimus-
toiminnan julkaisusarja

2020:6

ISSN 2342-6799

ISBN PDF 978-952-287-826-7

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2020:6

Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020

MetsäVesi-hankkeen loppuraportti

Valtioneuvoston kanslia Helsinki 2020

Valtioneuvoston kanslia

ISBN PDF: 978-952-287-826-7
Tekijän organisaatio Luonnonvarakeskus: Leena Finér, Kristian Karlsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Liisa Ukonmaanaho; Suomen ympäristökeskus: Ahti Lepistö, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Tapani Sallantaus, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson; Tapio Oy: Laura Härkönen, Samuli Joensuu.

Helsinki 2020

Kuvailulehti

Julkaisija	Valtioneuvoston kanslia		31.1.2020
Tekijät	Leena Finér, Ahti Lepistö, Kristian Karlsson, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantaus, Liisa Ukonmaanaho		
Julkaisun nimi	Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020 – MetsäVesi-hankkeen loppuraportti.		
Julkaisusarjan nimi ja numero	Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2020:6		
ISBN PDF	978-952-287-826-7	ISSN PDF	2342-6799
URN-osoite	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-826-7		
Sivumäärä	77	Kieli	Suomi
Asiasanat	luonnonhuuhtouma, metsäojitus, orgaaninen hiili, ravinnekuormitus, tutkimus, tutkimustoiminta		
Tiivistelmä	<p>Metsätalouden osuus metsistä ja soilta tulevasta typen kokonaiskuormituksesta on uuden arvion mukaan 16 % (7 300 tonnia/v), fosforikuormituksesta 25 % (440 tonnia/v) ja orgaanisen hiilen kuormituksesta 78 000 tonnia/v. Uusissa typpi- ja fosforikuormitusarvioissa näkyy selvästi metsäojitusten vaikutus. Metsätalouden osuus kaikesta ihmistoiminnan aiheuttamasta typpikuormituksesta nousee 6 %:sta 12 %:iin ja fosforikuormituksesta vastaavasti 8 %:sta 14 %:iin. Vuosittaiseksi metsistä ja soilta tulevaksi typen kokonaiskuormitukseksi arvioidaan 44 600 tonnia, fosforin kokonaiskuormitukseksi 1 760 tonnia ja orgaanisen hiilen kokonaiskuormitukseksi 1,8 miljoonaa tonnia.</p> <p>Luonnonhuuhtouma on suurinta Etelä-Suomessa. Metsätalouden aiheuttama ravinnekuormitus on puolestaan suurinta Pohjanmaalla ja Kainuussa, missä on paljon ojitettuja soita. Aiemmin metsäojituksen on oletettu aiheuttavan ravinnekuormitusta 10 vuoden ajan. Uusien tulosten mukaan kuormitus jatkuu pidempään. Hankkeen tulosten mukaan metsistä tuleva fosforikuormitus on vähentynyt viime vuosiin asti.</p> <p>Valumaveden typen- ja orgaanisen hiilen pitoisuuksissa havaittiin nousevia trendejä vuosina 1978–2018. Samanaikaisesti ilman lämpötilassa, hydrologiassa ja happamassa laskeuma on tapahtunut muutoksia, jotka voivat selittää kuormitusta.</p> <p>Tutkijoiden mukaan typen ja orgaanisen hiilen kuormituksen hallintaan tulisi kehittää uusia menetelmiä erityisesti turvemaille. MetsäVesi-hankkeen tulokset tulisi sisällyttää vesienhoidossa käytettävään VEMALA-mallijärjestelmään, ja ne tulisi jatkossa huomioida myös virallisissa raportoinneissa.</p> <p>MetsäVesi-hanke toteutettiin vuoden 2019 aikana yhteistyössä Luonnonvarakeskuksen (Luke), Suomen ympäristökeskuksen (SYKE), Tapio Oy:n ja Oulun yliopiston tutkijoiden kanssa. Työssä hyödynnettiin laajoja valtakunnallisia veden laadun ja virtaaman seuranta-aineistoja.</p>		
Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa. (tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.			
Kustantaja	Valtioneuvoston kanslia		
Julkaisun myynti/jakaja	Sähköinen versio: julkaisut.valtioneuvosto.fi Julkaisumyynti: vnjulkaisumyynti.fi		

Presentationsblad

Utgivare	Statsrådets kansli	31.1.2020	
Författare	Leena Finér, Ahti Lepistö, Kristian Karlsson, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantaus, Liisa Ukonmaanaho		
Publikationens titel	Näringsbelastning från skogar or myrar 2020 – MetsäVesi-projektets slutrapport.		
Publikationsseriens namn och nummer	Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2020:6		
ISBN PDF	978-952-287-826-7	ISSN PDF	2342-6799
URN-adress	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-826-7		
Sidantal	77	Språk	Finsk
Nyckelord	naturligt leakage, näringsbelastning, organiskt kväve, skogsdikning, tutkimus, tutkimustoiminta		
Referat	<p>Skogsbrukets andel av den totala kvävebelastningen från skogar och myrar är enligt de nya beräkningarna 16 procent (7 300 ton/år), av fosforbelastningen 25 procent (440 ton/år) och för belastningen av organiskt kol 4 procent (78 000 ton/år). I de nya beräkningarna av belastningen från skogsbruket syns skogsdikningarnas inverkan tydligt. Skogbrukets andel av hela kvävebelastningen på vattendragen stiger från 6 procent till 12 procent och för fosforbelastningen från 8 procent till 14 %. Den totala årliga kvävebelastningen från skogar och myrar uppskattas till 44 600 ton, den totala fosforbelastningen till 1 760 ton och den totala belastningen av organiskt kol till 1,8 miljoner ton.</p> <p>Det naturliga läckaget är störst i Södra Finland. Den näringsbelastning som skogsbruket orsakar är störst i Österbotten och Kajanaland där det finns mycket dikad myrmark. I Bottenvikens avrinningsområde är kol- och kvävebelastningen stor på grund av det stora antalet dikningsområden. Tidigare har man antagit att skogsdikningen orsakar näringsbelastning i 10 års tid. Enligt de nya resultaten fortsätter belastningen en längre tid. Enligt projektets resultat har fosforbelastningen från skogar minskat fram till de senaste åren.</p> <p>Resultaten visar dock ökade kväve- och kolhalter i avrinningsvatten under åren 1978 – 2018. Samtidigt har lufttemperaturen stigit, hydrologin förändrats och det sura nedfallet minskat. Dessa förändringar i miljöfaktorer kan förklara den ökade belastningen.</p> <p>Enligt forskarna ska man utveckla nya metoder för att hantera den kväve- och kolbelastning som beror på förändringar i miljöfaktorer, särskilt för torvmarker. Resultaten från projektet MetsäVesi ska tas in i det hydrologiska modellsystemet VEMALA. I fortsättningen ska de också beaktas i officiella rapporter. Projektet MetsäVesi genomfördes under året 2019 som samarbete mellan forskare vid Naturresursinstitutet, Tapio Oy och Uleåborgs universitet.</p>		
	Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan. (tietokaytoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt		
Förläggare	Statsrådets kansli		
Beställningar/distribution	Elektronisk version: julkaisut.valtioneuvosto.fi Beställningar: vnjulkaisumyynti.fi		

Description sheet

Published by	Prime Minister's Office	31.1.2020	
Authors	Leena Finér, Ahti Lepistö, Kristian Karlsson, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantausta, Liisa Ukonmaanaho		
Title of publication	Nutrient and organic carbon export from forests to watercourses 2020 – Final report of MetsäVesi-project.		
Series and publication number	Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2019:6		
ISBN PDF	978-952-287-826-7	ISSN PDF	2342-6799
Website address URN	http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-826-7		
Pages	77	Language	Finnish
Keywords	background leaching, dissolved organic carbon forest drainage, nutrient leaching, research, research activities		
Abstract	<p>According to the new estimates, the share of forestry's contribution to the total nitrogen load from forests and mires is 16% (7,300 tonnes p.a.), that of phosphorus 25% (440 tonnes p.a.) and that of organic carbon 4% (78,000 tonnes p.a.). Forest drainage areas significantly affect the new nitrogen and phosphorus load estimates. The percentage of forestry's contribution to the total human activity-induced nitrogen load on watercourses has increased from 6% to 12%, and that of phosphorus from 8% to 14%. The new annual estimate for the total nitrogen load from forests is 44,000 tonnes, that of phosphorus 1,760 tonnes, and that of total organic carbon 1.8 million tonnes.</p> <p>The background load is highest in Southern Finland. The load caused by forestry practices is highest in Ostrobothnia and Kainuu, where there are many drained peatland areas. It has previously been estimated that the effect of drainage on nutrient loads ends in 10 years. According to the new results, this effect lasts longer. According to the results, the phosphorus load from forests has decreased in recent years.</p> <p>Nitrogen and organic carbon concentrations increased between 1978 and 2018. At the same time, the mean annual air temperature also increased, hydrological conditions changed, and acid deposition decreased, which may explain the increase in loads.</p> <p>The scientists emphasise that, new methods should be developed to control nitrogen and organic carbon loads, especially for peatland areas. The results of the MetsäVesi project should be included in the VEMALA modelling and taken into account in official reporting. The MetsäVesi project was carried out during 2019 by the scientists of the Natural Resources Institute Finland (Luke), the Finnish Environment Institute (SYKE), Tapio Oy and Oulu University.</p>		
	This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.		
Publisher	Prime Minister's Office		
Publication sales/ Distributed by	Online version: julkaisut.valtionneuvosto.fi Publication sales: vnjulkaisumyynti.fi		

Sisältö

1	Johdanto	10
2	Raportin tavoitteet.....	14
3	Luonnonhuuhtouman ja metsätalouden vesistökuormituksen laskennassa aiemmin käytetyt menetelmät ja kuormitusarvot.....	15
3.1	Luonnonhuuhtouma	15
3.2	Metsätalouden aiheuttama kuormitus arvioituna eri menetelmillä.....	17
4	Metsävesi-hankeessa käytetyt aineistot ja laskentamenetelmät	20
4.1	Pienten valuma-alueiden aineistot ja kuormituksen laskenta.....	20
4.2	Trenditarkasteluihin käytetty aineisto ja tilastolliset analyysit.....	24
4.3	Oulujoen valuma-alueen aineisto	24
4.4	Alueellinen tarkastelu Perämeren vesistöalueella.....	25
4.5	Isojen vesistöalueiden aineisto.....	25
5	Metsäalueilta tulevan valumaveden ravinteiden ja orgaanisen hiilen pitoisuudet sekä niihin vaikuttavat tekijät.....	26
5.1	Valumaveden typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuusyhtälöt	26
5.2	Pitoisuuksia selittävät tekijät.....	31
5.3	Ojitukselta kuluneen ajan suhde ravinteiden huuhtoutumiseen	34
6	Uudet arviot luonnonhuuhtoumasta ja metsätalouden aiheuttamasta kuormituksesta	36
6.1	Valtakunnalliset arviot	36
6.2	Kuormituksen alueellinen vaihtelu.....	38

7	Metsäalueilta tulevan kuormituksen muutos ja siihen vaikuttavat tekijät	42
7.1	Tausta	42
7.2	Pitkät aikasarjat ja trenditarkastelut pienillä valuma-alueilla	42
7.3	Ojitusten vaikutus typen huuhtoutumiseen Oulujoen vesistöalueella.....	53
7.4	Orgaanisen hiilen ja typen ainevirtaamat rannikkovesiin Perämeren valuma-alueelta	55
7.5	Johtopäätöksiä kuormituksen muutoksesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä.....	57
8	VEMALA-malli ja sillä tehdyt uudet kuormituslaskelmat	59
8.1	VEMALA-mallin yleiskuvaus.....	59
8.2	Luonnonhuuhtouman ja metsätalouden kuormituksen laskenta VEMALA-mallilla käyttäen MetsäVesi-yhtälöitä	62
8.3	MetsäVesi -typpi- ja fosforyhtälöiden käyttöönoton edellyttämät muutokset VEMALA-mallissa.....	64
8.4	MetsäVesi-kuormitusarvioiden ja VEMALA-mallin MetsäVesi-yhtälöiden avulla tuottamien kuormitusarvioiden vertailu	65
8.5	VEMALA-mallinnustulosten epävarmuudesta	67
8.6	Näkemyksiä VEMALA-mallin kehitystyöstä	68
9	MetsäVesi-hankkeen keskeiset tulokset ja viestit	69
9.1	Keskeiset tulokset	69
9.2	Viestit käytäntöön.....	70
9.3	Jatkotutkimustarpeita	71
10	Viitteet	72

LUKIJALLE

MetsäVesi-hanke käynnistyi laajan metsätalouden vesistökuormitusta koskevan keskustelun saattamana vuoden 2019 alussa – aiheena erityisesti vanhojen ojitusaluiden kuormitusvaikutukset. Hankkeen tavoitteena oli tuottaa päätöksentekijöille ja päätöksenteossa käytettäviin työkaluihin uutta tietoa siitä mitä epävarmuuksia metsätalouden vesistökuormituksen arviointimenetelmiin liittyy, arvioida vanhoilta, kertaalleen ojitetuilta alueilta tulevan vesistökuormituksen suuruus sekä laskea uudet valtakunnalliset arviot metsätalouden vesistökuormituksesta.

MetsäVesi-hanke toteutettiin vuoden 2019 aikana Luonnonvarakeskuksen (Luke) ja Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) konsortiohankkeena, ja siinä oli mukana Tapiio Oy:n ja Oulun yliopiston tutkijoita. Hankkeella oli ohjausryhmä, jossa toimivat puheenjohtajana Marja Hilska-Aaltonen maa- ja metsätalousministeriöstä, sekä jäsenenä Ville Keskisarja ja Sini Wallenius maa- ja metsätalousministeriöstä ja Antton Keto ja Maarit Loiskekoski ympäristöministeriöstä. Ohjausryhmä kokoontui viisi kertaa.

Haluamme kiittää ohjausryhmää tuesta ja hanketta edistävästä kommentista. Haluamme myös kiittää erityisesti Seppo Hellsteniä Suomen ympäristökeskuksesta ja Hannu Marttilaa Oulun yliopistosta heidän myötävaikutuksestaan hankkeen toteutukseen. Hankkeen loppuseminaari järjestettiin 29.11.2019 ja kiitämme sen perusteella saamistamme arvokkaista kommentista.

Leena Finér, Luonnonvarakeskus

Ahti Lepisto, Suomen ympäristökeskus

Tammikuu 2020

1 Johdanto

Leena Finér, Ahti Lepistö, Samuli Joensuu ja Sirkka Tattari

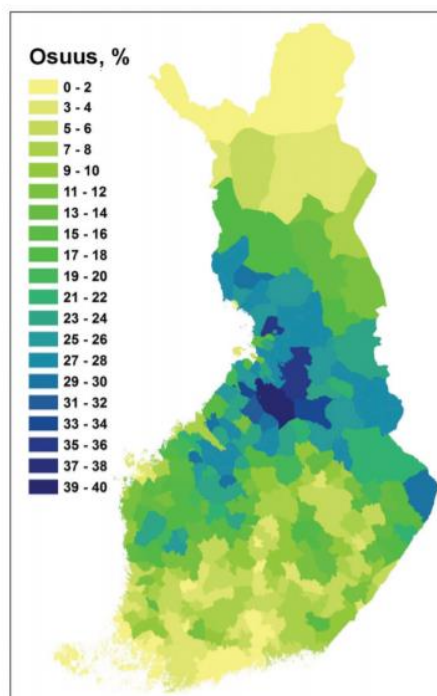
Valtioneuvoston laatimat strategiat, Kansallinen energia- ja ilmastostrategia vuoteen 2030, Suomen biotalousstrategia ja Kansallinen metsästrategia 2025, tavoittelevat puuntuotannon ja käytön kestäväää lisäämistä. Tämä edellyttää mm. luotettavaa tietoa sekä luonnontilaisista metsistä että metsätalouden käytössä olevilta alueilta vesistöön päätyvästä kuormituksesta. Lisäksi tarvitaan tietoa siitä, miten kuormitusta ja siitä aiheutuvia haitallisia seurauksia voidaan vähentää. Metsätalouden kuormitustieto on välttämätöntä vesien ja merenhoidon suunnittelussa sekä raportoitaessa vesistökuormituksesta EU:n ja Itämeren suojelukomission velvoitteiden mukaisesti. Myös ilmastopolitiikka aiheuttaa metsien käytölle aiempaa konkreettisempia vaatimuksia.

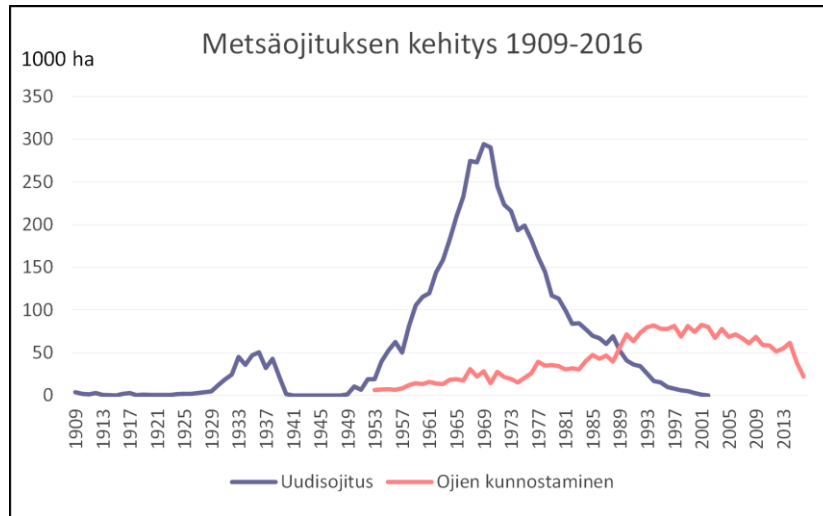
Suomen kokonaispinta-alasta 78 % on metsätalouden maata ja siitä 78 % on puuntuotannon käytettävissä (taulukko 1). Metsistä kulkeutuu vesistöihin ravinteita ja orgaanista hiiltä sekä luonnonhuuhtoumana että metsätaloustoimenpiteiden seurauksena. Suomen maapinta-alasta soiden osuus on keskimäärin 29 % eli 8,7 Mha (11. valtakunnan metsien inventointi, Luke). Soista metsäoijitettuja on 53 % eli 4,6 Mha, mikä vastaa 18 % tämänhetkisestä metsätalouden maasta. Tämän lisäksi ojitettuja kankaita on 1,3 Mha, joista osa on ollut aiemmin soita. Metsäoijitettujen soiden osuus on joillakin alueilla yli 30 % maapinta-alasta (kuva 1). Metsäoijitus käynnistyi Suomessa

1900-luvun alussa, mutta vauhtiin se pääsi vasta sotien jälkeen 1960-luvulla ja noin 3/4 nykyisestä metsäoijitetusta suopinta-alasta on ojitettu 1960- ja 1970-luvuilla (kuva 2). Uudisoijitus päättyi vuoteen 2000 mennessä ja tällä hetkellä pääpaino on kunnostusojituksissa. Kunnostusojitusten pinta-alat eivät ole saavuttaneet läheskään sitä tasoa mitä uudisoijitus vilkkaimpina vuosina ja suoritemäärät ovat laskeneet 2000-luvulla. Soiden oijitus on pienentänyt suopinta-alaa, koska kuivuminen on hävittänyt suokasvillisuuden ja monilta alun perin ohutturpeisilta kasvupaikoilta myös turvekerroksen, jolloin soita on siirtynyt kangasmaiden luokkaan.

Taulukko 1. Suomen pinta-alan jakautuminen eri luokkiin valtakunnan metsien 12. inventoinnin tulosten perusteella.

Pinta-ala	Mha	% pinta-alasta
Suomen kokonaispinta-ala	33,845	
Sisämaan vesistöt	3,453	10,2
Maapinta-ala	30,391	89,8
Maatalousmaa	2,583	7,6
Rakennettu maa	1,125	3,3
Liikennealueet ym.	0,461	1,4
Metsätalousmaa	26,222	77,5
		% metsätalouden pinta-alasta
Metsämaa	20,322	77,5
Kitumaa	2,491	9,5
Joutomaa	3,197	12,3
Metsätiet, varastot ym.	0,212	0,8
Puuntuotannon käytettävissä	20,523	78,3


Kuva 1. Ojitettujen soiden osuus maapinta-alasta (Laiho ym. 2016).



Kuva 2. Metsien uudisojituksen ja ojien kunnostamisen kehitys vuosina 1909–2016. Vuosien 1909–1950 tilastot sisältävät valtionmetsien ja yksityismetsien ojitukset, mutta metsäyhtiöiden ojitusmäärät puuttuvat. Lähteet: Metsähallituksen vuosikirjat 1909–1950, Tapion vuosikirjat 1929–1950, Metsätilastolliset vuosikirjat 1950–2016 ja Suomen metsäkeskuksen aineistot 2010–2016.

Metsätaloudessa tällä hetkellä yleisesti käytössä olevista toimenpiteistä ojien kunnostus, metsänuudistaminen ja siihen liittyvä maanmuokkaus sekä lannoitus aiheuttavat vesistökuormitusta (esim. Finér ym. 2010). Uudisojituksen vaikutuksen on arvioitu päättyvän 10 vuoden kuluessa ojituksesta (esim. Ahtiainen ja Huttunen 1999, Lepistö ym. 2006), joten sitä ei ole otettu mukaan vesistökuormituslaskelmiin eikä siihen liittyen ole kehitetty vesiensuojelumenetelmiä. Viimeaikaiset tutkimukset ovat kuitenkin kyseenalaistaneet tämän näkemyksen: on julkaistu tuloksia, joiden mukaan ravinnekuormitus jatkuu vuosikymmeniä ojituksen jälkeen ja jopa lisääntyy ojitusiän myötä (Nieminen ym. 2017, 2018).

Metsätalouden aiheuttaman kuormituksen lisäksi muuttuvat ympäristöolosuhteet voivat lisätä metsistä tulevaa kuormitusta. Orgaanisen aineksen huuhtoutumisprosessit ovat globaalisti voimistuneet laajoilla alueilla aiheuttaen vesistöjen tummumista etenkin pohjoisella pallonpuoliskolla (esim. de Wit ym. 2016). Ilmastonmuutos ja happaman laskeuman vähentyminen nähdään tärkeimpinä muutoksen aiheuttajina, mutta paikallisesti maankäytön muutokset voivat osaltaan selittää orgaanisen aineksen huuhtoutumien nousua. Happaman laskeuman vähentymisen on todettu lisäävän maaperän huokosveteen liukenevan orgaanisen hiilen määrää (esim. Monteith ym. 2007), kun taas ilmastonmuutos, kuten kuivien kausien voimistuminen, muutokset sadannassa ja valunnan kulkureiteissä, maaperän lämpötilan nousu ja voimistunut mineralisaatio turpeessa, kasvava hiilidioksidipitoisuus ja biomassan kasvu vaikuttavat monin tavoin vesistöihin huuhtoutuvaan orgaaniseen hiileen (Clark ym. 2010, viitteineen).

Kasvava orgaanisen hiilen ja ravinteiden huuhtoutuminen voivat johtaa varsinkin latvavesien tummumiseen, rehevöitymiseen ja liettymiseen. Nämä ilmiöt ovat havaittavissa myös isoissa vesistöissä. Esimerkiksi Simojoesta rannikkovesiin tuleva orgaanisen hiilen kuormitus on ollut jatkuvassa kasvussa (Lepistö ym. 2014). Lisäksi Helsingin raakavesilähteen, Päijänteen, orgaanisen hiilen pitoisuus on noussut aiheuttaen lisääntyviä vedenkäsittelykustannuksia (Forsius ym. 2017). Vesistöjen orgaanisen hiilen pitoisuuden on havaittu nousevan laajemminkin erityisesti Pohjanmaan vesistöalueilla (Räike ym. 2012, Asmala ym. 2019), ja vastaavasti typpipitoisuudet ovat nousseet koko Perämeren valuma-alueella (Rankinen ym. 2016). Lisääntynyt orgaanisen hiilen kuormitus ei ole pelkästään vesiensuojelullinen ongelma, sillä osa sisä- ja rannikkovesiin päätyvästä orgaanisesta hiilestä muuttuu mikrobiologisen toiminnan seurauksena ilmastomuutosta kiihdyttäväksi metaaniksi ja hiilidioksidiksi ja tällä ter-
restristä alkuperää olevalla hiilellä voi olla huomattava merkitys vesistöjen metaani- ja hiilipäästöille (Miettinen ym. 2015).

Orgaanisen hiilen pitoisuuksia on tutkittu paljon enemmän kuin ainevirtoja (Räike ym. 2012), ja suurin osa havaituista trendeistä koskeekin muutoksia pitoisuuksissa. Monissa Pohjanmaan jokivesistöissä orgaanista ainesta kuvaavat kemiallisen hapenkulutuksen (CODMn) arvot ovat 1960–1970-luvuilla kohonneet metsäojitusten seurauksena erityisesti kevättulvien aikaan, verrattuna ajanjaksoon 1913–1931 (Alasaarela ja Heinonen 1984). Räike ym. (2012) selvittivät liukoisen orgaanisen hiilen (DOC)-kuormituksen muutoksia 29 vesistöalueella Suomessa jaksolla 1975–2010 ja havaitsivat kasvavia CODMn-trendejä kolmella pohjoisella alueella (Kiiminginjoki, Iijoki, Simojoki). Uusimmassa Suomen jokien ainevirtaamien muutoksia selvittäneessä tutkimuksessa havaittiin tilastollisesti merkitsevä yhteys ojitusalueiden ja typpipitoisuuksien ja kuormituksen välillä (Räike ym. 2019). Typpikuormituksessa oli nouseva trendi neljällä Pohjanmaan vesistöalueella (Perhonjoki, Siikajoki, Oulujoki ja Kiiminginjoki).

Metsätalouden aiheuttama ravinnekuormitus on arvioitu vain pieneksi osaksi vesistöjen kokonaiskuormitusta (esim. Suomen tilastollinen vuosikirja 2018). Uusimman, vanhoja ojitusalueita koskevan tutkimustiedon myötä on tullut ilmi, että aiemmat arviot ja laskentatavat metsätalouden vesistökuormituksesta eivät välttämättä anna riittävän luotettavaa kuvaa metsätalouden vesistövaikutuksista ja siten metsien käytön lisäämisen kokonaiskestävyydestä (Nieminen ym. 2017, 2018, Finér ym. 2018). On tärkeää selvittää, mikä metsätalouden vesistökuormituksen taso ottaa huomioon myös vanhoilta metsäojitusalueilta tulevan kuormituksen. Samalla on syytä tarkastella metsätalouden vesistökuormituksen arviointiin liittyviä epävarmuuksia ja kuormituksen tasoon vaikuttavia tekijöitä, ilmastotekijät mukaan lukien. Näihin kysymyksiin on paneuduttu valtioneuvoston rahoittamassa vuonna 2019 toteutetussa *Metsistä ja soilta tuleva vesistökuormitus 2020* -hankkeessa (MetsäVesi).

2 Raportin tavoitteet

Leena Finér, Ahti Lepistö ja Sirkka Tattari

Tässä MetsäVesi-hankkeen loppuraportissa esitellään hankkeen tulokset. Hankkeen päätavoitteena oli tuottaa päätöksentekijöille ja päätöksenteossa käytettäviin työkaluihin uutta tietoa siitä mitä epävarmuuksia metsätalouden vesistökuormituksen arviointimenetelmiin liittyy, arvioida vanhoilta, kertaalleen ojitetuilta alueilta tulevan vesistökuormituksen suuruus, sekä laskea uudet valtakunnalliset arviot metsätalouden vesistökuormituksesta.

Tässä raportissa:

- 1) Kuvataan tällä hetkellä käytössä olevat metsätalouden vesistökuormituksen arviointimenetelmät sekä niiden erot ja epävarmuudet.
- 2) Esitellään Luonnonvarakeskuksesta (Luke), Suomen ympäristökeskuksesta (SYKE), Oulun yliopistosta ja Tapio Oy:stä hankkeessa kootut laajat pienten metsävaltaisten valuma-alueiden veden laadun ja valunnan seuranta-aineistot, jotka sisältävät myös valuma-alueiden taustatiedot.
- 3) Tarkastellaan sitä, miten pieniltä valuma-alueilta tulevan veden typen (N), fosforin (P) sekä orgaanisen hiilen (TOC) pitoisuudet ja -kuormitus riippuvat valuma-alueiden maantieteellisestä sijainnista, soiden ja ojitettujen soiden osuudesta ja ojituksesta kuluneesta ajasta.
- 4) Julkaistaan uudet arviot typen, fosforin ja orgaanisen hiilen luonnonhuuhtoumasta ja metsätalouden aiheuttamasta kuormituksesta.
- 5) Analysoidaan, miten ympäristön muuttuminen näkyy metsistä valuvan veden laadussa.
- 6) Tarkastellaan metsäojituksen suhdetta typen ja orgaanisen hiilen huuhtoutumiseen suurilla valuma-alueilla, vesistöaluemittakaavassa.
- 7) Tarkastellaan VEMALA-mallilla laskettuja kuormitusarvioita, jotka on tuotettu käyttäen MetsäVesi-hankkeen pitoisuusyhtälöitä.

Tämän lisäksi raportissa tehdään johtopäätöksiä ja esitetään jatkotoimenpiteitä ja -tutkimustarpeita.

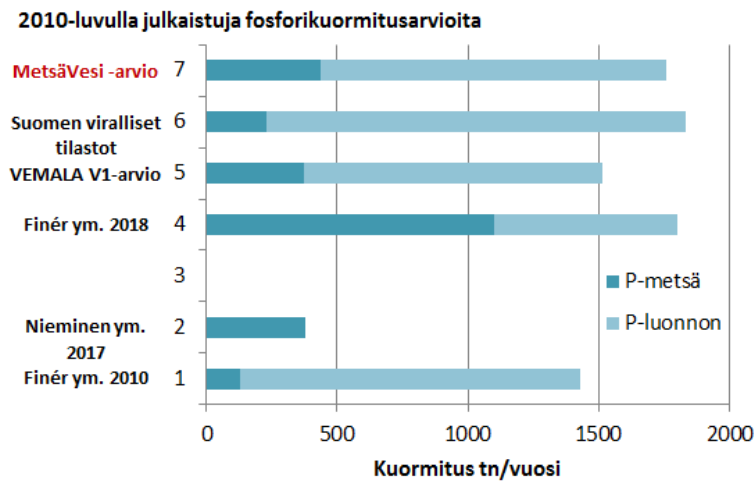
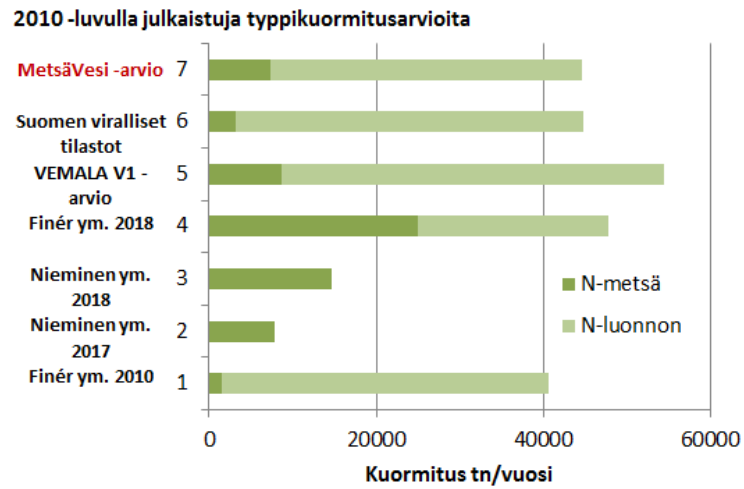
3 Luonnonhuuhtouman ja metsätalouden vesistökuormituksen laskennassa aiemmin käytetyt menetelmät ja kuormitusarvot

Leena Finér, Ahti Lepistö, Kristian Karlsson, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantaus ja Liisa Ukonmaanaho

3.1 Luonnonhuuhtouma

Metsistä tuleva huuhtouma voidaan jakaa metsätalouden aiheuttamaan kuormitukseen sekä luonnonhuuhtoumaan. Niihin molempiin sisältyy laskeuman aiheuttama kuormitus. Tässä raportissa vertailu aiempiin julkaistuihin huuhtouman arvioihin rajataan 2010-luvulle, koska näiden uusimpien arvioiden katsottiin edustavan tämän hetken tilannetta. Vanhemmat arviot, joita on julkaistu vuodesta 1998 lähtien, ovat mukana Vesitalous-lehdessä 5/2019 julkaistussa MetsäVesi-hankkeen katsauksessa (Finér ym. 2019).

Metsätalouden maalta tuleva typen luonnonhuuhtouma vaihtelee julkaistuissa tutkimuksissa 22 800-39 000 tn/v ja fosforin luonnonhuuhtouma vastaavasti 700-1 300 tn/v (kuva 3). Organaiselle hiilelle ei ole esitetty luonnonhuuhtouma-arvioita. Uusimmat, Finérin ym. (2018) julkaisemat arviot ovat noin puolta pienempiä verrattuna muihin arvioihin. Erot aiempiin tutkimuksiin johtuvat pienemmästä pinta-alayksikkö-kohtaisesta huuhtouma-arviosta, lyhyestä kahden vuoden seurantajaksosta, arvioiden lähteenä olevien tutkimusalueiden keskimääräistä pohjoisemmasta sijainnista ja pienemmästä laskentapinta-alasta. Huttusen ym. esittämä VEMALA V1 -mallilla laskettu typen luonnonhuuhtouman arvio on puolestaan muissa tutkimuksissa esitettyjä arvioita suurempi, mutta Suomen virallisten tilastojen arvoja pienempi. Suomen virallisissa tilastoissa julkaistut typen ja fosforin luonnonhuuhtouman arviot vaihtelevat suuresti ja ovat arvioista suurimpia. Koska tilastoissa ei kuvata arviointimenetelmiä, eikä viitata tiedon lähteisiin, syitä poikkeamiin ja vuosien väliseen vaihteluun ei voida tarkastella.



Kuva 3. 2010-luvulla julkaistuja typen ja fosforin luonnonhuuhtouman, metsätaloudesta aiheutuvan kuormituksen ja metsistä tulevan kokonaiskuormituksen arvioita perustuen ominaiskuormituslukuihin (viitteet 1–3), luonnontilassa ja metsätalouksikäytössä olevien valuma-alueiden seurantaan (viite 4), mallinnustuloksiin (viite 5) ja tilastoihin (viite 6). Viitteet: 1) Finér ym. (2010), 2) Nieminen ym. (2017) (keskiarvo), 3) Nieminen ym. (2018, vain typpikuormitus), 4) Finér ym. (2018), 5) Huttunen ym. julkaisematon VEMALA V1 -arvio, 6) Suomen viralliset tilastot (2018), 7) Uusi MetsäVesi -arvio. Katso myös Finér ym. (2019).

3.2 Metsätalouden aiheuttama kuormitus arvioituna eri menetelmillä

Ominaiskuormituslukuihin perustuvat arviot

Metsätalouden aiheuttamaa kuormitusta voidaan arvioida ominaiskuormituslukuihin perustuvalla menetelmällä. Siinä eri metsätaloustoimenpiteiden toteutus-pinta-alat kerrotaan toimenpiteiden pinta-alayksikkökohtaisilla vuotuisilla ominaiskuormitusluvuilla, jotka määräytyvät vaikutuksen keston mukaan. Ominaiskuormituslukuja on tuotettu seuraamalla toisiaan lähellä olevia latvavaluma-aluepareja ennen ja jälkeen toimenpiteen. Toisella valuma-aluepareista on toteutettu metsätaloustoimenpide, jonka aiheuttama vuotuinen kuormituslisä on laskettu olettamalla, että ilman toimenpidettä käsittelemättömältä vertailualueelta ja toimenpidealueelta tulevien vuotuisten kuormitusten suhde olisi säilynyt samana. Valtakunnallisissa kuormituslaskelmissa on käytetty ominaiskuormituslukuja, joita on tuotettu uudistamishakkuille, uudisojitukselle, kunnostusojitukselle ja lannoituksille sekä niiden aiheuttamalle typpi- ja fosforikuormitukselle. Toimenpiteiden toteutus-pinta-alat on saatu Suomen virallisista tilastoista.

Näin laskettu valtakunnallinen metsätalouden aiheuttama typpi- ja fosforikuormitus vaihtelee eri tutkimuksissa 1 600-14 600 tn/v ja fosforikuormitus 130-800 tn/v (kuva 3, viitteet 1-3) ja molemmat ovat pienempiä kuin luonnonhuhutouma. Finérin ym. (2010) arviot ovat selvästi pienemmät kuin kaikkien muiden. Finérin ym. (2010) tekemiin laskelmiin ei sisälly arvioita vanhojen ojitusten vaikutuksesta kuormitukseen, vaan oletuksena oli, että metsätaloustoimenpiteen kuormitusvaikutus lakkaa n. 10 vuoden kuluessa.

Nieminen ym. (2017, 2018) arvioivat myös vanhoilta ojitusalueilta tulevan kuormituksen ja lisäsivät sen Finérin ym. (2010) esittämiin arvioihin. Aineistona Nieminen ym. (2017, 2018) käyttivät 1) useita eri-ikäisiä, eri ajanjaksoina seurannassa olleita, vain kertaalleen ojitettuja alueita, sekä 2) luonnontilaisia, eri ajanjaksoina seurattuja valuma-alueita, ja laskivat näiden erotuksena ojituksesta aiheutuvan kuormituslisän. Tämä lähestymistapa poikkeaa ominaiskuormituslukujen tuottamisessa käytetystä menetelmästä, sillä vertailu ei perustu samojen alueiden seurantaan ennen ja jälkeen toimenpiteen. Tuloksiin vaikuttaa seurantajaksojen eriaikaisuus, sekä alueiden keskimääräisten maantieteellisten ja kasvupaikkaominaisuuksien vertailukelpoisuus, joiden vaikutuksia ei ole tarkasteltu. Kaikkein vanhimpia, yli 60 vuotta vanhoja ojitusalueita aineistossa oli vähän.

Metsätalouden seurantaan perustuvat arviot

Metsätalouden aiheuttamaa kuormitusta arvioidaan myös seuraamalla metsätalouksikäytössä olevilta alueilta tulevaa kuormitusta, josta vähennetään vastaavalla pinta-alalta tuleva luonnonhuhouma. Menetelmä edellyttää, että seurannassa on sijainniltaan, puusto- ja kasvupaikkajakaumaltaan sekä toimenpideintensiteetiltään edustava joukko metsätalouksikäytössä olevia alueita ja niiden kanssa samanaikaisesti seurattavia luonnontilaisia valuma-alueita. Tätä menetelmää käytetään vuonna 2014 käynnistyneessä metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkossa, jossa on mukana 11 luonnontilaista ja 20 metsätalouksikäytössä olevaa valuma-aluetta eri puolilla Suomea (Mattsson ym. 2014, Finér ym. 2018).

Metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkon kahden ensimmäisen vuoden (2015–2016) toiminnan perusteella laskettiin arvio valtakunnallisesta typpi- ja fosforikuormituksesta (Finér ym. 2018, kuva 3, viite 4). Arviot olivat selvästi suurempia kuin ominaiskuormituslukujen perusteella tuotetut arviot. Suuriin arvioihin voi olla monia syitä. Seurantaverkon tulokset perustuvat lyhyeen seurantajaksoon ja vuosien välisen vaihtelun tiedetään olevan hydrometeorologisten olosuhteiden takia suurta. Sekä vuosi 2015 että 2016 olivat sateisia ja keskimääräistä lämpimämpiä. Vuoden 2015 keskilämpötila 4,2 °C on noin 1,9 °C pitkän ajan keskiarvoa eli jaksoa 1981–2010 lämpimämpi (<https://ilmatieteelaitos.fi/vuosi-2015> ladattu 4.11.2019). Seurantaverkon perusteella tehtäviin laskelmiin vaikuttavat myös valuma-aluekijät, kuten alueiden maantieteellinen sijainti ja kasvupaikkaominaisuudet, joita laskelmissa ei huomioitu. Toisaalta ominaiskuormituslukuihin perustuviin menetelmiin sisältyy myös paljon epävarmuutta. Ominaiskuormituslukujen taustalla olevia tutkimuksia on vähän, eivätkä ne edusta kaikkia maantieteellisiä ja kasvupaikkaolosuhteita ja seurantajaksoit ovat lyhyitä. Aineistoissa ilmenevä suuri hajonta voi estää vaikutusten havaitsemisen, kun aineistot ovat pieniä. On myös huomattava, että ominaiskuormituslukuja ei ole tuotettu kaikille metsätaloustoimenpiteille, kuten esim. harvennuksille ja hakkuutähteiden korjuulle. Monet näistä tekijöistä voivat aiheuttaa toimenpiteiden vaikutuksen suuruuden ja keston aliarvioinnin ja saattavat siten johtaa myös valtakunnallisen metsätalouden aiheuttaman kuormituksen aliarviointiin.

Mallinnukseen perustuvat arviot

Metsätaloudesta tulevaa kuormitusta lasketaan myös valtakunnallisella VEMALA-ravinnekuormitusmallilla, jolla lasketaan metsätalouden ohella myös muusta maankäytöstä johtuva kuormitus, luonnonhuhouma ja vesistöihin pidättyvä kuormitus (Huttunen ym. 2016). VEMALA V1 -mallilla vuoden 2019 alussa lasketut metsätalouden typpi- ja fosforikuormitusarviot ovat selvästi suurempia kuin Finérin ym. (2010) ominaiskuormituslukujen perusteella lasketut arviot (kuva 3, viite 5), mutta selvästi pienempiä kuin metsätalouden vesistökuormituksen seurantaverkon tulosten perusteella

tehdyt arviot (Finér ym. 2018). Ne ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa kuin Niemisen ym. (2017, 2018) esittämät arviot, joissa ominaiskuormituslukujen perusteella tehtyihin arvioihin on lisätty vanhojen ojitusten aiheuttama kuormitus. VEMALA V1 -mallilaskelmaan on lisätty puolet Niemisen ym. (2017) esittämistä arvioista vanhoilta ojitusalueilta tulevasta kuormituksesta (ks. luku 8.1).

4 Metsävesi-hankkeessa käytetyt aineistot ja laskentamenetelmät

Leena Finér, Ahti Lepistö, Kristian Karlsson, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantaus ja Liisa Ukonmaanaho

4.1 Pienten valuma-alueiden aineistot ja kuormituksen laskenta

Koko aineisto

Työtä varten koottiin kaikki tiedossa ollut luonnontilaisten ja metsätalouskäytössä olevien metsävaluma-alueiden valumaveden kokonaistypen, kokonaisfosforin ja orgaanisen kokonaishiilen pitoisuuksien sekä valunnan seuranta-aineisto. Luonnontilaisiksi luokiteltiin alueet, jotka sijaittivat luonnonsuojelualueilla ja joilla ei ollut tehty metsätaloustoimenpiteitä. Aineistot koottiin Suomen ympäristökeskuksesta, Luonnonvarakeskuksesta, Tapio Oy:stä ja Oulun yliopistosta. Suurin osa aineistosta on tallennettu ympäristötiedon hallintajärjestelmä Herttaan sisältyviin tietokantoihin ja kaikki analyysit on tehty standardimenetelmin. Aineisto sisälsi yhteensä 259 valuma-aluetta (kuva 4a). Tutkimusjulkaisuista ja paikkatietoaineistoista koottiin lisäksi valuma-alueita koskevat taustatiedot: sijainti, pinta-ala, peltojen, soiden ja ojitettujen soiden osuudet pinta-alasta sekä ojitusvuosi. Nämä taustatiedot olivat saatavissa lähes kaikilta seurannassa olevilta alueilta. Ne ovat myös tietoja, jotka ovat ojitusikää lukuun ottamatta saatavilla kaikille Suomen kolmannen jakovaiheen valuma-alueille, ja niitä voi siten käyttää tulosten yleistämisessä seuranta-aineiston ulkopuolelle.

Pitoisuusyhtälöiden laadinta ja kuormituksen laskenta

Typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuusyhtälöt laadittiin noin sadalle valuma-alueelle, joilta oli olemassa sekä veden laatu- että valunta-aineistoa 1960-luvulta vuoteen 2018. Mukaan otettavilta valuma-alueilta edellytettiin, että aineistoa oli vähintään kolmen vuoden ajanjaksolta ja että veden laatuäytteenotokertoja oli vuodessa vähintään kahdeksan. Valumaveden kokonaistypen, kokonaisfosforin ja orgaanisen kokonaishiilen pitoisuusyhtälöiden laadintaan käytettiin näiden alueiden tietoja, mutta puuttuvien taustatietojen vuoksi valuma-alueiden lopullinen lukumäärä oli 88 (kuva 4b). Kaikille alueille laskettiin vuotuiset valunnan määrällä painotetut keskiarvot valumaveden typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuuksille. Valitut valuma-alueet olivat kooltaan vaihtelevia (5-5 322 ha), mutta hyvin metsävaltaisia, ja niiden järvi- ja pelto-prosentit olivat marginaalisia (taulukko 2). Joidenkin havaintojen todettiin korrelaatio- ja jäännöshajontakuvien perusteella olevan selvästi muusta aineistosta poikkeavia ja ne poistettiin yhtälöitä laadittaessa.

Valuma-alueille laskettiin valuma-alueiden purkupisteiden koordinaattien perusteella keskimääräinen lämpösusma (jakso 1961–1990) Ojansuun ja Henttosen (1983) julkaisemalla menetelmällä. Lisäksi haettiin vuotuiset lämpö- ja sadantatiedot Ilmatieteen laitoksen aineistoista. Nämä tiedot luettiin 10 x 10 km (vanhempi data) tai 1 x 1 km (uudempi data) hilasta siten, että purkupisteen lähin havainto liitettiin valuma-alueen tiedoksi. Vesimäärät (virtaama/valunta) ennustettiin niille alueille, joista valuntaa ei ollut mitattu erikseen laaditulla mallilla käyttäen selittäjinä lämpösusmaa, vuosisadantaa ja järvisyyttä. Aineisto poimittiin SYKEN julkisista havaintoaineistoista (Hydrologiset havainnot: Vesistöjen virtaama 2018).

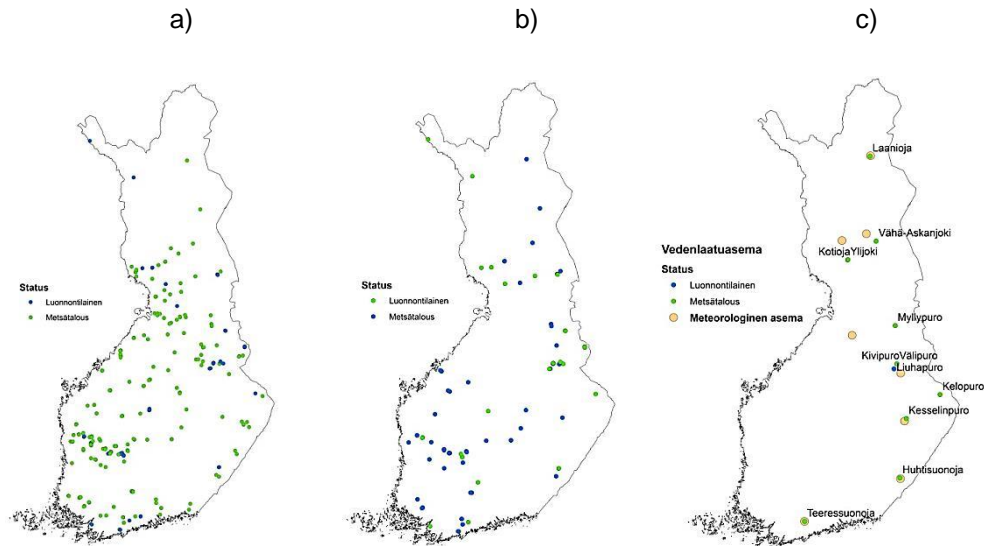
Valumaveden typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuutta selittävät yhtälöt laadittiin sekamallitekniikalla, joka mahdollistaa erilaisten valuma-alueiden yhdistämisen samaan tarkasteluun ja malliin. Ajallinen kehitys kunkin erillisen alueen pitoisuuksissa voitiin kuvata mallin satunnaisvaikutuksissa, kun taas kaikkien alueiden yhteinen (valitseva) kehityskulku kuvattiin kiinteiden vaikutusten muuttujilla. Mallin kiinteässä osassa käytettiin ajan lisäksi selittävinä muuttujina alueiden maantieteellistä sijaintia (lämpösusma) sekä suoprosenttia (suo-%) ja ojitusprosenttia (ojitus-%), jotka molemmat oli laskettu valuma-alueen pinta-alasta. Sekamalleissa voitiin ottaa huomioon aineistossa esiintyvää hierarkkista rakennetta (havaintojen välinen korrelaatio) ja näytteenoton ajallista eroavaisuutta. Selittävät muuttujat valittiin siten, että ne toimivat käytetyn aineiston pienen mittakaavan lisäksi pitoisuuksien ennustamiseen isommilla valuma-alueilla ja joiden tiedettiin aikaisempien tutkimusten perusteella selittävän pitoisuuksia (esim. Kortelainen ym. 1997, Mattsson ym. 2003). Yleisesti mallien selittäjiksi valittiin paikkaan sidottua tietoa, joka on helposti saatavissa kaikille valuma-alueille.

MetsäVesi-hankkeessa tuotettujen pitoisuusyhtälöiden (ks. luku 5.1) ja pitkän aikajakson valunnan sekä valuma-alueen pinta-alan avulla laskettiin kaikilta kolmannen jakovaiheen valuma-alueiden metsätalouden maalta tuleva typen, fosforin ja orgaanisen hiilen kokonaiskuormitus (yhtälö 1). Pitoisuusyhtälöissä metsätalouden osuutta kuormituksesta kuvattiin ojitusprosentilla. Luonnonhuuhtouma laskettiin yhtälöillä laittamalla ojitus-% nolaksi ja metsätalouden aiheuttama kuormitus laskettiin kokonaiskuormitus ja luonnonhuuhtouman erotuksena.

$$\text{Kokonaiskuormitus} = \text{pitoisuus} \times \text{valunta} \times \text{pinta-ala} \quad (1)$$

Valtakunnallinen kuormitus saatiin laskemalla yhteen kaikkien kolmannen jakovaiheen valuma-alueiden kuormitukset. Kolmannen jakovaiheen valuma-alueista merialueiden saaristo kuitenkin puuttui, joten laskennassa käytetty metsätalousmaan pinta-ala (25,9 Mha) oli vähän Suomen metsätalousmaan kokonaispinta-alaa pienempi. Lisäksi metsätalouden vaikutus arvioitiin vain metsätalouden piirissä olevalle pinta-alalle (22,2 Mha), jolloin etenkin Pohjois-Suomen laajat suojelualueet tuottavat laskennassa vain luonnonhuuhtouman verran vesistökuormitusta. Pinta-alat saatiin laskentaan valtakunnan metsien 11. Inventoinnin aineistosta.

Lämpösumma arvioitiin valuma-alueiden keskipisteille vastaavalla tavalla kuin mallien laadinta-aineistossa purkupisteille. Suoprosentti laskettiin valtakunnan metsien inventoinnin monilähdeaineiston (MVMI) avulla suhteessa metsätalouden pinta-alaan. Ojitusprosentti saatiin yhdistämällä MVMI:n soiden esiintyminen ja Maanmittauslaitoksen (MML) maastotietokannan ojatiedot sekä soiden ja soistumien esiintyminen. Suon ja ojitettujen soiden pinta-alat kalibroitiin Suomen metsäkeskuksen aluejaolla, jotta ne täsmäivät metsätalouden kanssa. Ojitetuista kankaista noin puolet sisällytettiin ojitusalaan, jolloin ojitusala kattoi ennusteiden yleistämisessä yhteensä 5,2 Mha.



Kuva 4. Veden laadun seurannassa olleiden metsävaltaisten valuma-alueiden sijainti: a) kaikki alueet, b) kokonaistypen (N), kokonaisfosforin (P) ja orgaanisen kokonaishiilen (TOC) pitoisuusyhtälöiden laadintaan käytetyt valuma-alueet sekä c) trenditarkasteluihin käytetyt alueet ja lähimmät ilmatieteen laitoksen sääasemat.

Taulukko 2. Pitoisuusyhtälöiden laadinnassa käytettyjen valuma-alueaineistojen perustiedot. Suo-%, ojitus-%, pelto-% ja järvi-% on laskettu soiden, ojitusalueiden, peltojen ja järvien prosenttiosuuksina valuma-alueen koko pinta-alasta.

	Keskiarvo	Mediaani	Minimi	Maksimi
Taustatiedot valuma-alueista (88)				
Pinta-ala, ha	519	94	5	5322
Lämpösumma, d.d.°C	1041	1089	554	1340
Suo-%	38	39	0	95
Ojitus-%	22	13	0	81
Pelto-%	0	0	0	7
Järvi-%	0	0	0	6
Sadanta, mm	560	563	428	625
Valunta, mm	322	309	193	485
Pitoisuudet vuosihavainnot (n=669-889), metsätalousalueet				
N, mg L ⁻¹	0,60	0,57	0,08	2,02
P, mg L ⁻¹	0,029	0,025	0,003	0,193
TOC, mg L ⁻¹	23,0	21,4	2,4	61,8
Pitoisuudet vuosihavainnot (n=222-241), luonnontilaiset alueet				
N, mg L ⁻¹	0,36	0,33	0,11	0,95
P, mg L ⁻¹	0,011	0,009	0,003	0,043
TOC, mg L ⁻¹	17,1	13,4	4,1	45,9

4.2 Trenditarkasteluihin käytetty aineisto ja tilastolliset analyysit

Trenditarkastelua varten aineistosta (kuva 4a) valittiin ensin valuma-alueet, joista oli tarpeeksi sekä pitkän ajanjakson vedenlaatu- että valunta-aineistoa (määriytyksiä vähintään viiden vuoden ajalta) kuvailevaa tarkastelua varten. Tällaisia alueita oli yhteensä 133 ja niiden yhdistetyn aineiston kuvaavana tilastomenetelmänä käytettiin ns. box-whisker -kuvaajia, joista nähdään muutokset pitkällä ajanjaksolla, sekä tärkeimmät tilastolliset tunnusluvut ja muuttujien vaihtelu yksittäisinä vuosina (luku 7.2).

Pitkissä aikasarjoissa havaittujen muutosten tilastollista merkitsevyyttä ja muutoksen suuruutta tutkittiin vuositasolla Mann-Kendall -testillä ja kuukausitasolla Seasonal-Kendall -testillä (Hirsch ym. 1982, 1991) (luku 7.2). Nämä testit soveltuvat hyvin veden laatuaineistojen lineaaristen trendien tutkimiseen, sillä ne eivät ole herkkiä yksittäisten poikkeavien arvojen suhteen. Mann-Kendall -trendianalyysijä varten valittiin 12 intensiivisen valumaveden laadun ja valunnan seurannan kohteena ollutta, hyvin tunnettua ja edustavaa valuma-alueita (ns. TOP12 alueet, kuva 4c). Näillä alueilla valumaveden tyyppien, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuuksia on mitattu 15-20 kertaa vuodessa ja valuntaa on seurattu mittapadoilla. Tarkasteluun valittiin sekä luonnontilaisia että metsätalouden piirissä olevia alueita, joilla soiden ja metsäojitusten pinta-alat olivat tiedossa. Trenditarkastelun ajanjaksoksi valittiin 1978–2018 aineiston kattavuuden perusteella (luku 7.2).

4.3 Oulujoen valuma-alueen aineisto

Oulujoen vesistöalueen tarkasteluun käytettiin 322 metsä- tai suovaltaista valuma-alueita, joilla yläpuolisen alueen peltoprosentti oli alle 3 %. Valuma-alueiden pinta-ala oli keskimäärin 120 km² ja vaihteluväli 1,8-1 370 km² (luku 7.3). Soiden ojitustilannetta kuvaava paikkatietoaineisto perustui Maanmittauslaitoksen maastotietokanta 2008:n ja CORINE 2006 -tietokannan maanpeiteaineistoihin. Aineistossa on kolme luokkaa: ojitetut alueet, ojittamattomat alueet ja turvetuotantoalueet. Aineiston metadata on kuvattu verkkosivuilla: <http://kkgeoportal.env.fi:8080/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid={4C46F896-5D12-43AD-9919-55A8A4FD1714}>. Oulujoen osavaluma-alueilta mitatut keskimääräiset tyyppipitoisuudet jaksolta 2000–2019 ovat ympäristöhallinnon VESLA-tietokannasta. Valuma-alueiden ojituspinta-alojen ja valumaveden tyyppipitoisuuksien välille sovitettiin regressioyhtälö.

4.4 Alueellinen tarkastelu Perämeren vesistöalueella

Alueelliseen tarkasteluun (luku 7.4) otettiin mukaan Perämeren valuma-alueelta 10 vesistöaluetta, välillä Perhonjoki – Tornionjoki. Tarkastelu rajattiin Pohjois-Pohjanmaalla metsä- ja suovaltaisille vesistöalueille, joiden peltoprosentti on keskimäärin 5 % (vaihteluväli 0,6-11,9 %). Toinen tarkastelu tehtiin pelkästään turvemaille, jolloin kivennäismaiden pellot ja metsä-alueet rajattiin pois. Soiden ojitustilannetta kuvaava paikkatietoaineisto saatiin Maanmittauslaitoksen maastotietokannasta (ks. luku 4.3). Typen ja orgaanisen hiilen vesistöaluekohtaiset kuormitusluvut perustuvat julkaisuihin Huttunen ym. (2015) ja Räike ym. (2012). Vesistöaluekohtaisten ojitusprosenttien ja typen ja orgaanisen hiilen kuormitusten välille sovitettiin regressioyhtälöt.

4.5 Isojen vesistöalueiden aineisto

Jokien 30 isolta vesistöalueelta meriin kuljettaman typpi- ja fosforikuormituksen aineistoja käytettiin MetsäVesi-pitoisuusyhtälöiden luotettavuuden testaamiseen (Jokien ainevirtaamat 1990–2016). Suomen ympäristökeskus. Aineisto ladattiin 22.3.2019 verkkosivuilta: <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B0F39CBE3-F0B3-493B-B3CA-F35204BF7590%7D/130625>.

5 Metsäalueilta tulevan valumaveden ravinteiden ja orgaanisen hiilen pitoisuudet sekä niihin vaikuttavat tekijät

Kristian Karlsson, Leena Finér, Ahti Lepistö, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantaus ja Liisa Ukonmaanaho

5.1 Valumaveden typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuusyhtälöt

Aineiston perusteella sovittiin seuraavat valumaveden vuotuista keskipitoisuutta kuvaavat yhtälöt (2-4) (taulukko 3):

Typipitoisuusyhtälö:

$$\text{Typpi, mg L}^{-1} = a_1 * \text{Lämpösumma} + a_2 * \text{Lämpösumma}^2 + a_3 * \text{Ojitus-\%} + a_4 * \text{Suo-\%} + a_5 * \text{Ojitus-\%}^{1.5} \quad (2)$$

Fosforipitoisuusyhtälö:

$$\text{Fosfori, mg L}^{-1} = b_0 + b_1 * \text{Lämpösumma} + [b_2 * \text{Suo-\%} + b_3 * \text{Ojitus-\%} + b_4 * (\text{Suo-\%} * \text{Ojitus-\%})] + b_5 * (\text{Ojitus-\%} * \text{Vuosi}) \quad (3)$$

Orgaanisen hiilen pitoisuusyhtälö:

$$\text{Orgaaninen hiili, mg L}^{-1} = [c_0 + c_{01} * \text{Ojitus-\%} + c_{02} * \text{Vuosi}] * (1 - \exp(-0.007 * \text{Lämpösumma}))^{**c2} + c_3 * \text{Suo-\%} + 3 \quad (4)$$

Yhtälöissä lämpösumma tarkoittaa alueen keskimääräistä vuotuista lämpösummaa jaksolla 1961–1990. Lämpösumma kuvaa yhtälöissä alueen maantieteellistä sijaintia. Suo-% tarkoittaa suopinta-alan prosenttiosuutta koko valuma-alueen pinta-alasta. Ojitus-% tarkoittaa ojitetun alueen prosenttiosuutta koko valuma-alueen pinta-alasta. Vuosi tarkoittaa havaintovuotta. Yhtälöiden parametrit (a, b ja c) on esitetty taulukossa 3. Näiden yhtälöiden laadintaan typen pitoisuusaineistoa oli saatavissa vuosilta 1962–

2018, fosforin pitoisuusaineistoa vuosilta 1980–2018 ja orgaanisen hiilen pitoisuusaineistoa vuosilta 1971–2018. Fosforipitoisuusaineistoa oli saatavilla myös vuosilta 1964–1979, mutta analyysimenetelmät eivät olleet vertailukelpoisia uudempien analyysimenetelmien kanssa ja siksi vanhempi aineisto rajattiin pois.

Typhen ja fosforin pitoisuusyhtälöt ratkaistiin lineaarisina sekamalleina, joissa satunnaistekijänä eli ryhmittelymuuttujana oli vuosi. Fosforipitoisuusyhtälössä (yhtälö 3) muuttujista suo-% ja ojitus-% määriteltiin myös niiden yhdysvaikutus, joka esitetään kaavassa näiden muuttujien tulona parametrilla b_4 . Typpipitoisuusyhtälössä (yhtälö 2) suo-% ja ojitus-% -muuttujien vaikutukset ovat toisistaan riippumattomat (ei yhdysvaikutusta). Orgaanisen hiilen pitoisuusyhtälössä (yhtälö 4) parametrit ratkaistiin epälineaarisen sekamallin muodossa, edelleen käyttäen vuosilukua satunnaistekijänä. Yhtälön osamallin [parametrit $C_{00}-C_{01}-C_{02}$] mukaan tulee määritellyksi erikseen yhdysvaikutukset lämpösumman ja ojitus-%-muuttujan sekä lämpösumman ja vuosi-muuttujan välille. Ojitus-%-muuttuja on kuitenkin riippumaton vuosi-muuttujasta.

Taulukko 3. Typen (N), fosforin (P) ja orgaanisen hiilen (TOC) pitoisuusyhtälöiden parametrit.

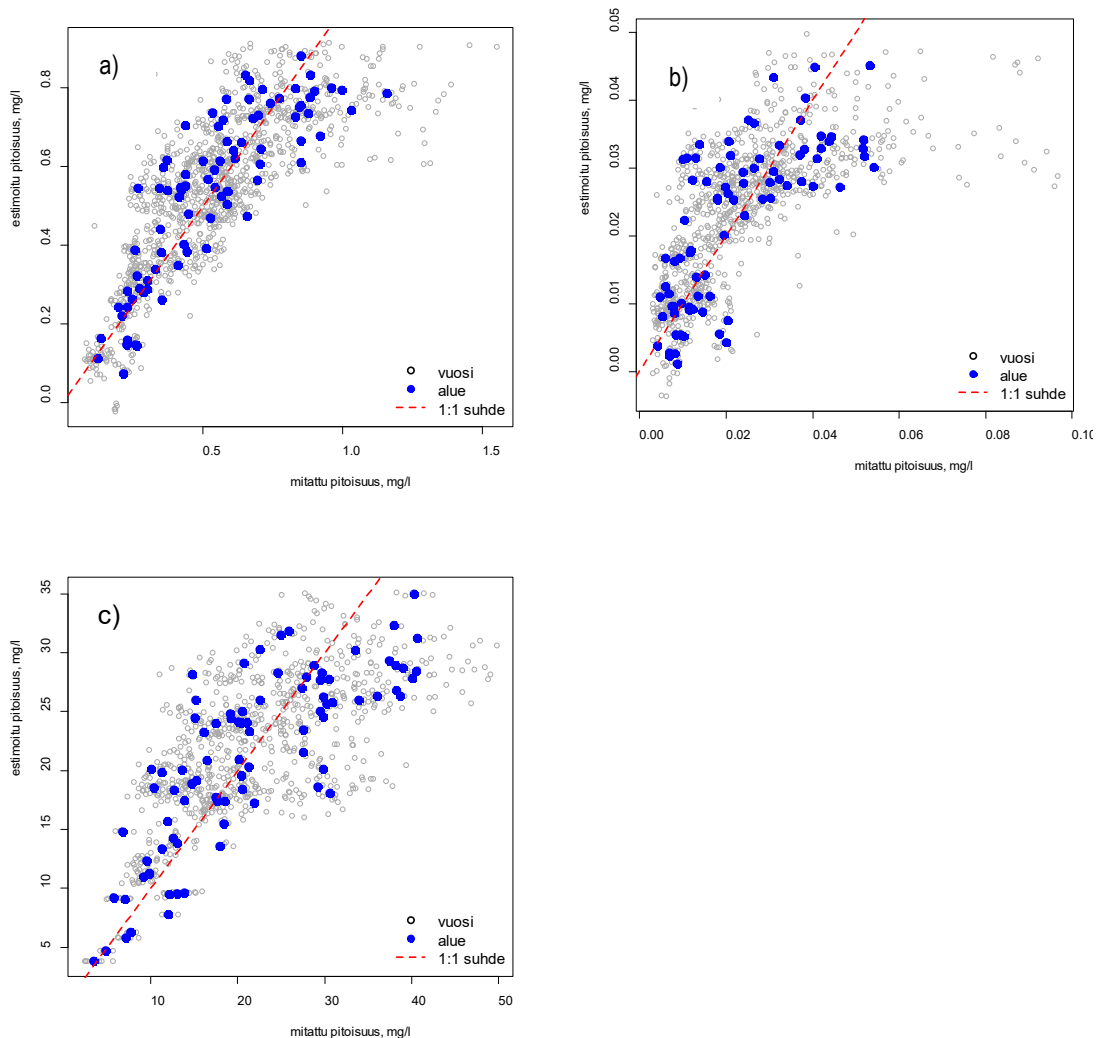
Selittävä muuttuja	Parametri	t-arvo	p-arvo
N, mg L⁻¹, n=1184, valuma-alueita=85 kpl, R²=0,72 (valuma-alueille)			
Lämpösumma	-0,00027	-5,47045	0
Lämpösumma ²	6,17 x 10 ⁻⁷	16,84139	0
Ojitus-%	0,007927	3,438128	0,0006
Suo-%	0,001966	6,633237	0
Ojitus-% ^{1,5}	-0,00058	-2,03186	0,0424
P, mg L⁻¹, n=996, valuma-alueita=84 kpl, R²=0,65 (valuma-alueille)			
Vakio (a ₁)	-0,01397	-5,14426	0
Lämpösumma	3,54 x 10 ⁻⁵	13,581	0
Suo-%	-0,00014	-4,33121	0
Ojitus-%	0,008482	3,711232	0,0002
Suo-% * Ojitus-%	4,39 x 10 ⁻⁶	2,449562	0,0145
Ojitus-% * Vuosi	-4,2 x 10 ⁻⁶	-3,62112	0,0003
TOC, mg L⁻¹, n=887, valuma-alueita=84 kpl, R²=0,63 (valuma-alueille)			
Vakio1 (c ₀₀)	-410,975	-6,18984	0
Ojitus-%	0,077585	2,854837	0,0044
Vuosi	0,216286	6,528742	0
Vakio2 (c ₂)	561,3654	10,56759	0
Suo-%	0,131896	9,547769	0

Yhtälöiden parametrit olivat tilastollisesti merkitseviä ja ne pyrittiin saamaan myös mahdollisimman harhattomiksi. Yhtälöiden hyvyyden arvioinnissa käytettiin kriteereinä yhtälöiden selitysastetta, jäännöshajonnan jakaumia selittävien ja selitettävän muuttujan suhteen, havaintojen lukumäärää sekä yhtälöiden käyttökelpoisuutta. Kuvassa 5 on esitetty yhtälöillä laskettujen pitoisuuksien suhde havaittuihin pitoisuuksiin. Yksittäisten havaintojen kohdalla poikkeamat ovat suuria, mutta valuma-aluekohtaisesti yhtälöillä lasketut arvot asettuvat samalle tasolle havaintojen kanssa.

Pitoisuusmallien rinnalle ei laadittu erikseen kuormitusta kuvaavia yhtälöitä. Lisätarkasteluja varten valuma-alueilta tulevat kuormitukset laskettiin käyttäen mitattuja valun-
toja.

Ennusteiden yleistämisessä alueellisesti ja valtakunnan tasolle käytettiin virtaamia ennustavaa mallia, joka kuvaa pitkän ajan keskimääräisiä virtaamia. Virtaamamallin mukaan koko maan keskimääräinen valunta oli 324 mm.

Pitoisuusmalleja käytettäessä lämpösumman tulisi olla jaksoa 1961–1990 vastaava. Toiselle ajanjaksolle laskettu (korkeampi) lämpösumma ei sellaisenaan kuvaa ympäristön muuttumisen vaikutuksia oikein. Lämpösumman voi laskea tiettyyn paikkaan yhtälöllä 5, ja lämpösumman avulla voidaan laskea arvio valunnalle. Tämä arvio (yhtälö 6) täsmää hyvin perinteisissä vesitaseissa esitettyjen alueittaisten valuntojen kanssa (vrt. Hyvärinen ym. 1995).



Kuva 5. Pitoisuusyhtälöillä laskettujen a) typen, b) fosforin ja c) orgaanisen hiilen pitoisuuksien suhde havaittuihin pitoisuuksiin. Havaintojen lukumäärä on esitetty taulukossa 3. Vuosihavainnot kattavat kaikki havainnot ja aluehavainnot ovat valuma-aluekohtaisia keskiarvoja.

Likimääräinen arvo lämpösummalle yhtenäiskoordinaatiston (EUREF, TM35FIN) pohjoiskoordinaatin (pk; km) ja korkeuden (k; m) funktiona:

$$\text{Lämpösumma (d.d.}^\circ\text{C)} = 5269 - 0,5859 * pk - 0,6158 * k \quad R^2 = 0,99, n = 212 \quad (5)$$

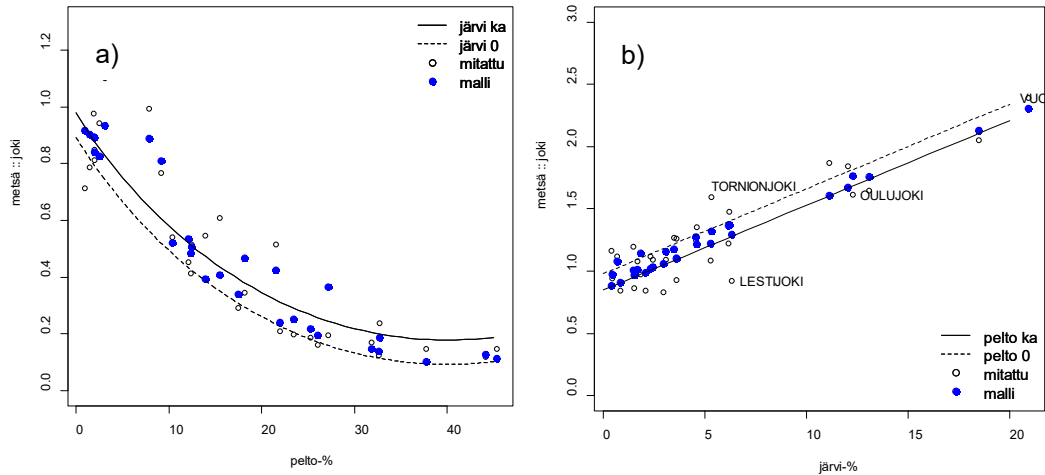
Likimääräinen arvo valunnalle lämpösumman funktiona:

$$\text{Valunta (mm)} = 458,3 - 0,0001023 * \text{Lämpösumma}^2 \quad R^2 = 0,74, n = 212 \quad (6)$$

Valuma-alueille laskettujen kuormitusarvioiden avulla testattiin pitoisuusyhtälöiden tuottamien ennusteiden luotettavuutta. Testaukseen käytettiin riippumattomia suurten jokien alajuoksulle arvioituja ainevirtaamia (Jokien ainevirtaamat vuosina 1990–2016, Räike ym. 2019). Vertailua varten laadittiin apuyhtälöt, jotka kuvaavat metsäalueilta tulevan kuormituksen suhdetta alajuoksulla arvioituun kuormitukseen alueiden pelto- ja järvi prosenttien funktiona.

Veden virratessa metsäalueilta jokien alajuoksulle, typpi kuormitus kasvaa peltojen vaikutuksesta ja pienenee järvien vaikutuksesta. Oraanisen hiilen kuormitus pienenee voimakkaasti järvien vaikutuksesta. Nämä muutokset voidaan huomioida mallien avulla. Typpipitoisuusyhtälön voitiin katsoa toimivan harhattomasti, koska sen avulla lasketun typen ainevirtaaman suhde jokiaineiston vastaavaan jäi alle yhden lähes kaikilla valuma-alueilla. Ainoastaan Oulunjoen valuma-alueelle saatiin MetsäVesi-yhtälön perusteella selvä yliarvio laskettuun kuormitukseen. Apumallin tuottamat suhdeluvut typpi kuormitukselle osuvat ykkösen kohdalle tai hiukan sen alapuolelle kun peltoprosentti ja järvi prosentti lähestyvät nollaa (kuva 6a). Vastaavasti ennustettu orgaanisen hiilen kuormituksen suhde lähestyy arvoa yksi kun järvi prosentti lähestyy nollaa kuvassa 6b. Vertailut osoittavat, etteivät pitoisuusmallit tuota yliarvioita laskettuihin kuormitusarvioihin. Jos apuyhtälö osoittaisi y-akselilla selvästi ykköstä pienempää suhdetta, olisi pitoisuusmallien avulla lasketuissa ennusteissa aliarvioita, joiden suuruutta on vaikea päätellä. Jatkossa vertailujen tarkkuutta voidaan parantaa sisällyttämällä apuyhtälöihin tarkempia tietoja alueiden piste- ym. kuormituksesta.

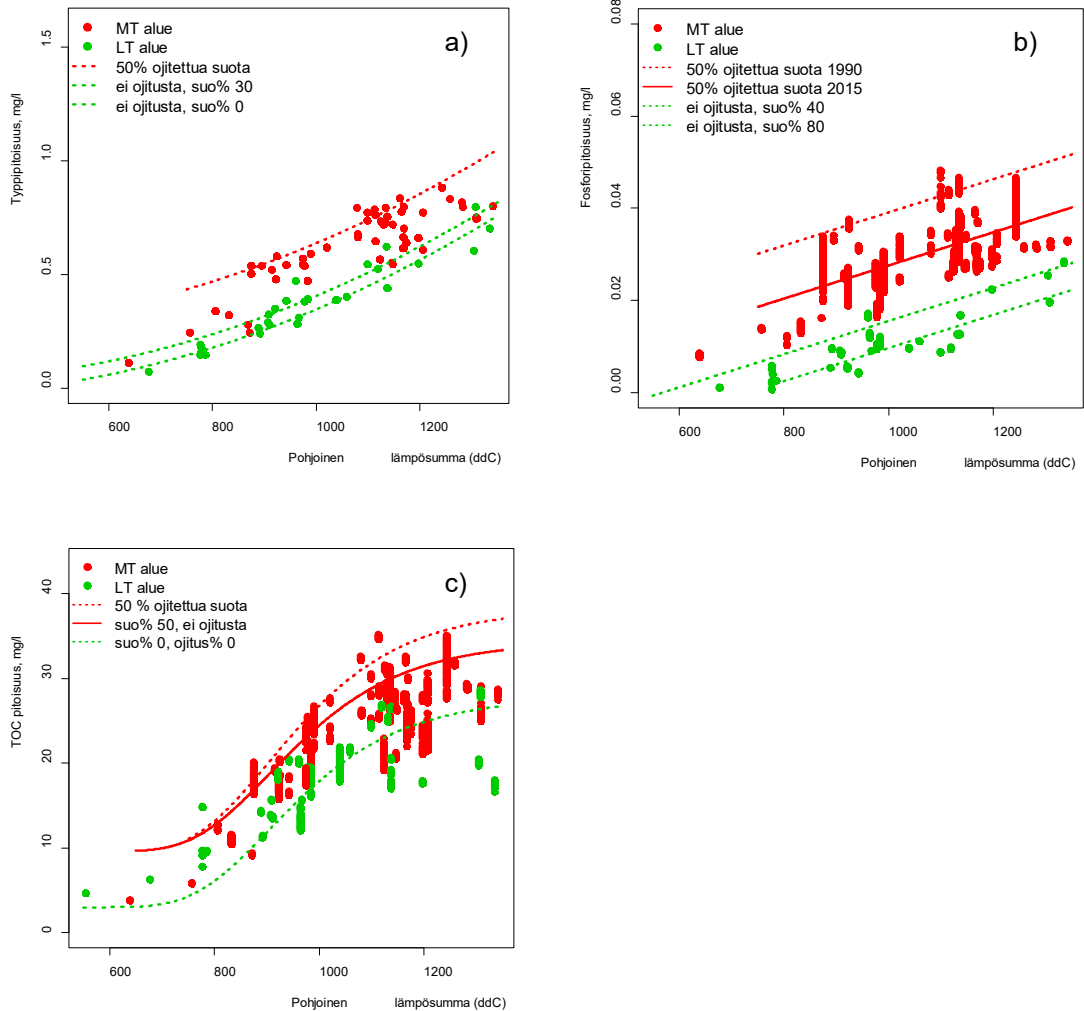
Pitoisuusyhtälöitä laadittaessa kokeiltiin myös muita selittäviä muuttujia, kuten vuotuista lämpösummaa, vuotuista sadantaa ja valuntaa, mutta nämä eivät yleensä olleet tilastollisesti merkitseviä. Tehtyjen kokeilujen perusteella näyttää siltä, että jatkossa pitoisuusyhtälöiden ennusteita voi täsmentää aluekohtaisesti käyttäen kasvupaikkaa kuvaavia muuttujia, mutta yksittäiset muuttujat (kuten korpi, soistuma, karut kangasmaat) eivät paranna ennusteita kovin paljon. Useamman kasvupaikkamuuttujan yhdistelmällä voitiin kasvattaa yhtälöiden selitysasteita muutamasta prosentista (typpi) reiluun kymmeneen prosenttiin (fosfori, orgaaninen hiili).



Kuva 6. a) MetsäVesi-yhtälöillä laskettujen (metsä) ja jokiaineistossa (joki) havaittujen a) typpivirtaamien suhde eri peltoprosentin omaavilla valuma-alueilla ja b) orgaanisen hiilen virtaamien suhde eri järvi-prosentin omaavilla valuma-alueilla. Käyrät on sovitettu kuvaamaan tilannetta, jossa a) pelto- tai b) järvi-prosentti on nolla tai se on keskimääräinen.

5.2 Pitoisuuksia selittävät tekijät

Pitoisuuksia selittivät yhtälöissä lämpösomma, suo-% ja ojitus-% (kuva 7). Fosforipitoisuutta selittivät edellisten lisäksi ojitusprosentin ja havaintovuoden, sekä ojitus- ja suo-prosentin välinen yhdysvaikutus ja orgaanisen hiilen pitoisuuksia havaintovuosi. Lämpösomma oli yhtälöissä suurin pitoisuuksia selittävä tekijä. Sekä typen, fosforin että orgaanisen hiilen pitoisuudet kasvoivat lämpösomman kasvaessa pohjoisesta etelään. Ojitusprosentin suureneminen lisäsi pitoisuuksia. Suo-prosentin kasvu lisäsi orgaanisen hiilen ja typen pitoisuuksia, mutta laski fosforin pitoisuuksia. Suo-prosentin vaikutus typen ja fosforin pitoisuuksiin oli pienempi kuin ojitusprosentin, mutta orgaanisen hiilen pitoisuuksiin vastaavasti suurempi.



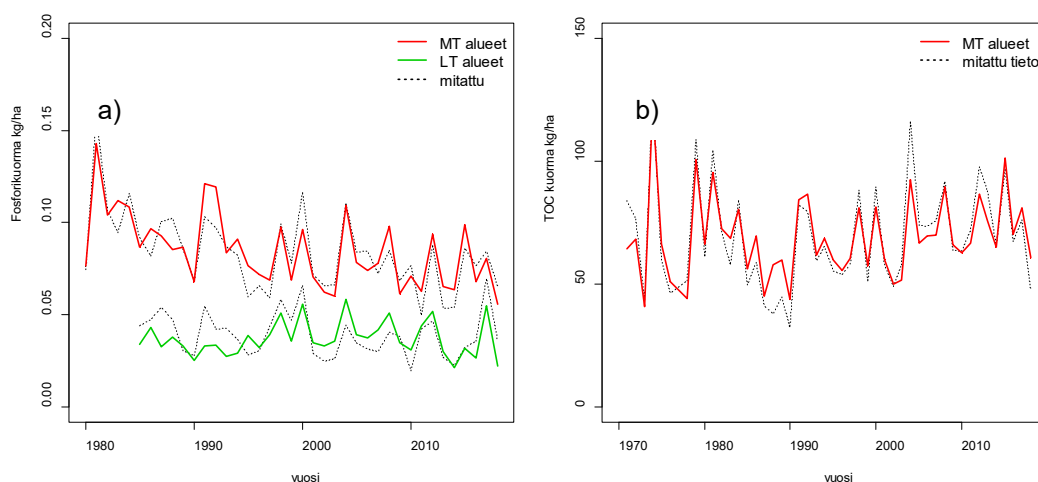
Kuva 7. Valumaveden MetsäVesi-yhtälöillä ennustettu a) typen pitoisuuden, b) fosforin pitoisuuden ja c) orgaanisen hiilen pitoisuuden vaihtelu suhteessa lämpösommaan luonnontilaisilla ja metsätalousalueilla. LT= luonnontilainen ja MT= metsätalous.

Edellisten lisäksi tarkasteltiin fosforin ja orgaanisen hiilen kuormituksissa tapahtuneita muutoksia ajan suhteen (kuva 8). Fosforikuormituksessa havaittiin laskeva trendi. Sen sijaan orgaanisen hiilen kuormituksessa trendi oli nouseva (kuva 8). Fosforipitoisuuksien pieneneminen ajan myötä näkyy myös kuvasta 7b, jossa pitoisuuksia on estimoitu erikseen vuosille 1990 ja 2015. Ennusteiden perusteella fosforipitoisuudet olivat laskusuunnassa ja yhtälöissä sitä selitti ojitus-% -muuttuja. Ojitusalueita lannoitettiin fosforilla merkittävässä määrin 1990-luvulle asti (Metsätalastollinen vuosikirja 2014). Todennäköistä on, että fosforipitoisuuksien lasku johtuu ojitusalueiden lannoitusten vähenemisestä. Lisäksi ojitusalueille kasvanut puusto on voinut vaikuttaa fosforin

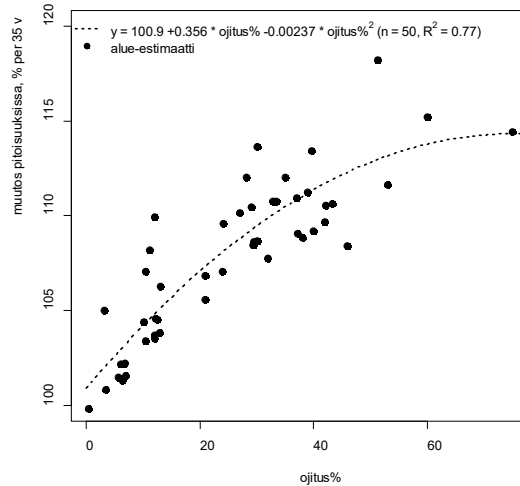
huuhtoutumiseen koska fosforia on sitoutunut puuston biomassaan. Koko maalle arvi-
oituna fosforin kokonaiskuormituksen lasku oli noin 20 % ajanjaksolla 1980–2015 ja
orgaanisen hiilen kuormituksen nousu vastaavasti noin 20 %. Tätä pienempiä ajallisia
muutoksia on vaikeaa saada esiin mallinnuksessa.

Typen pitoisuusyhtälöissä vuosi-muuttuja ei ollut tilastollisesti merkitsevä, mutta ajan
vaikutus tuli merkitseväksi, kun havainnoissa käytettiin vain metsätalouden piirissä
olevia valuma-alueita ja satunnaistekijäksi vaihdettiin alueet. Tässä suppeamman ai-
neiston yhtälössä vuosimuuttuja oli tilastollisesti merkitsevä yhdessä ojitus-% -muuttu-
jan kanssa. Myös tällä yhtälöllä voisi laskea kuormitusarvot valtakunnan tasolle,
mutta typen pitoisuusyhtälö (2) on kuitenkin alueellisesti tarkempi ja sillä lasketut ty-
pen kuormituksen ennusteet edustavat vesistökuormituksen nykytasoa. Suppeamman
aineiston yhtälön parametreilla voidaan havainnollistaa ojitus% -muuttujan vaikutuk-
sen muuttumista ajan myötä (kuva 9). Tällä tavoin typen pitoisuuksissa näkyy nousua
viimeisten 35 vuoden aikana, joka on sitä suurempi, mitä suurempi on ojitusprosentti.
Jos pitoisuuksien muutosta tarkastellaan valuma-alueilla, joilla ojitettua alaa on 20 %,
mikä vastaa keskimääräistä ojitusprosenttia Suomessa, pitoisuuksien nousu on suh-
teellisen pieni, n. 7 % viimeisten 35 vuoden aikana. Typpipitoisuuden nousu voi johtua
siitä, että ojitusprosentti on aineiston valuma-alueilla voinut kasvaa ajan myötä. Myös
ympäristötekijöiden muutoksen vaikutus on voinut olla suurempi ojitetuilla soilla kuin
muilla alueilla.

Yksinkertaistettu malli typpipitoisuuden ajalliselle muutokselle on esitetty % -muotoi-
sena kuvassa 9, joten sitä voi soveltaa mille tahansa pitoisuusestimaatille ja siten
myös käyttää yhdessä yhtälön 2 kanssa.



Kuva 8. Valumaveden a) fosfori- ja b) hiilikuormituksen muutos ajan suhteen. LT = luonnontilainen, MT= metsätalous. Käyrät ovat pitoisuusyhtälöillä (3 ja 4) ja mitatun valunnan avulla laskettuja vuosikuormituksia ja pisteiviivat kuvaavat valuma-aluekohtaisten pitoisuushavaintojen ja mitatun valunnan avulla laskettuja keskiarvoja.

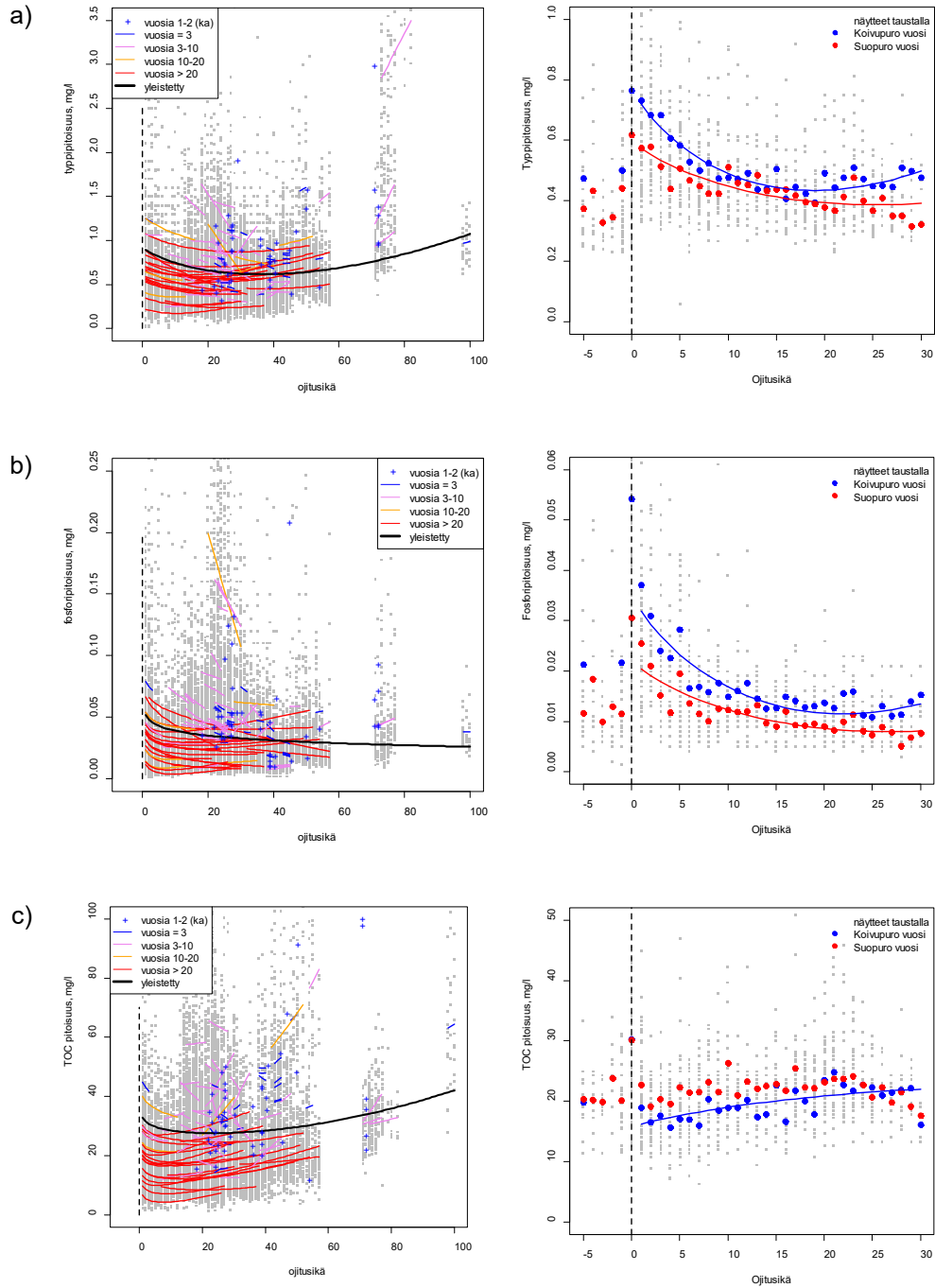


Kuva 9. Typpipitoisuuksien prosentuaalinen muutos viimeisten 35 vuoden aikana ojitusprosentin suhteen suppeamman aineiston yhtälön satunnaistekijöiden (valuma-alue) mukaan.

5.3 Ojituksesta kuluneen ajan suhde ravinteiden huuhtoutumiseen

Typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuuksia tarkasteltiin suhteessa valuma-alueen soiden ojituksesta kuluneeseen aikaan (kuva 10). Aineistossa oli vain kaksi aluetta, Koivupuro ja Suopuro, joilla seuranta oli aloitettu jo ennen uudisojitusta. Kaikkien kolmen aineen pitoisuudet valumavesissä olivat korkeimpia heti uudisojituksen jälkeisinä vuosina ja laskivat sen jälkeen. Fosforipitoisuuden lasku oli selvempi kuin typpipitoisuuden lasku, mikä saattaa johtua suometsien fosforilannoituksen loppumisesta ja siirtymisestä hidasliukoiseihin lannoitteisiin. Suometsiä lannoitettiin runsaasti 1960-luvun lopusta 1980-luvun loppuun saakka. Fosforilannoituksen vaikutuksen neulasten ravinnepitoisuuksiin tiedetään kestävän n. 30 vuotta (Silfverberg ja Moilanen 2008).

Vanhoja yli 60 vuotta sitten ojitetuja alueita aineistossa oli hyvin vähän (ks. kuva 10). Koska vanhojen alueiden seuranta oli ollut myös lyhytaikaista, aineisto ei antanut mahdollisuutta tehdä johtopäätöksiä siitä, miten pitoisuudet muuttuvat vanhoilla ojitusalueilla. Joukossa oli yksittäisiä vanhoja ojitusalueita, joissa oli viitteitä typpipitoisuuksien ja orgaanisen hiilen pitoisuuksien kasvusta.



Kuva 10. Valumaveden a) typen, b) fosforin ja c) orgaanisen hiilen pitoisuus suhteessa uudisojituksesta kuluneeseen aikaan kaikilla valuma-alueilla, joiden ojitusikä oli tiedossa, sekä Koivupuron ja Suopuron valuma-alueella, joita on seurattu ennen ojitusta ja 30 vuotta ojituksen jälkeen. Koivupurolla on tehty havaintojaksolla ojituksen lisäksi myös hakkuita.

6 Uudet arviot luonnonhuuhtoumasta ja metsätalouden aiheuttamasta kuormituksesta

Leena Finér, Ahti Lepistö, Kristian Karlsson, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantaus ja Liisa Ukonmaanaho

6.1 Valtakunnalliset arviot

Hankkeessa laskettiin uudet valtakunnalliset arviot typen, fosforin ja orgaanisen hiilen luonnonhuuhtoumalle ja metsätalouden aiheuttamalle kuormitukselle luvussa 5.1 kuvatuilla yhtälöillä ja pitkän ajan keskimääräisen valunnan perusteella. Koska pitoisuusyhtälöitä käytettäessä tulokseksi tulee metsätalouden maalta tuleva kokonaiskuormitus, laskettiin luonnonhuuhtouma asettamalla yhtälöissä ojitus-% nollassi. Metsätalouden osuus saatiin siten metsistä tulevan kokonaiskuormituksen ja luonnonhuuhtouman erotuksena.

Tulosten mukaan typen yhteenlaskettu luonnonhuuhtouma ja metsätalouden aiheuttama kuormitus on 44 600 tn/v, fosforin 1 760 tn/v ja orgaanisen hiilen 1 840 000 tn/v (taulukko 4). Metsätalouden osuus metsistä ja soilta tulevasta typen kuormituksesta on 16 %, fosforin kuormituksesta 25 % ja orgaanisen hiilen kuormituksesta 4 %.

Taulukko 4. Uudet MetsäVesi-hankkeen tuottamat valtakunnalliset arviot luonnonhuuhtoumasta ja metsätalouden aiheuttamasta vesistökuormituksesta.

	Metsätalous	Luonnon-huuhtouma	Yhteensä metsistä
Typpi			
tn/v	7 300	37 300	44 600
kg/ha/v	0,4	1,4	1,9
Fosfori			
tn/v	440	1 320	1 760
kg/ha/v	0,024	0,051	0,075
Orgaaninen hiili			
tn/v	78 000	1 770 000	1 840 000
kg/ha/v	7,8	68,2	76,0

Typpiytälössä ojitus-% -muuttujan parametrin herkkyys tuo jonkin verran epävarmuutta tuloksiin. Simulointien perusteella typen kuormituksen vaihteluväliksi tuli 6 500–8 200 tn/v. Fosforyhtälössä ojitus-% -muuttuja oli vakaampi, mutta pitoisuuksien ajalliseen kehitykseen liittyi jonkin verran epävarmuutta. Fosforin vuotuiseksi kuormitukseksi arvioitiin 440 tn, mutta loivemmin ajan suhteen laskevat fosforin pitoisuusennusteet tuottivat suuremman metsätalouden kuormitusarvion (520 tn/v).

Metsistä tulevan typen ja fosforin kokonaiskuormituksen taso asettuu MetsäVesi-hankkeessa tehtyjen arvioiden mukaan samalle tasolle kuin 2010-luvulla tehdyissä muissa arvioissa (katso kuva 3, Finér ym. 2010, 2018, Huttunen ym. 2019, Suomen tilastollinen vuosikirja). Myös metsätalouden aiheuttama typen ja fosforin kuormitus asettuu samalle vaihteluvälille kuin uusimmat metsätalouden kuormitusarviot (Niemi ym. 2017, Huttunen ym. 2019, kuva 3), mutta kuormitusarvio on typen osalta selvästi pienempi kuin Finérin ym. (2018) ja Niemisen ym. (2018) esittämät arviot ja fosforin osalta pienempi kuin Finérin ym. (2018) esittämät arviot.

MetsäVesi-hankkeen kuormitusarviot ovat noin kaksi kertaa suurempia kuin hallinnossa ja raportoinneissa aiemmin käytetyt vuosiarviot eli 3 250 tonnia tyyppiä ja 230 tonnia fosforia (Tilastollinen vuosikirja 2018). Metsätalouden osuus kokonaiskuormituksesta on aiemmin arvioitua suurempi ja luonnonhuuhtouman osuus vastaavasti pienempi.

MetsäVesi-hankkeessa tuotettiin ensimmäistä kertaa arvio orgaanisen hiilen luonnonhuuhtoumasta ja metsätalouden aiheuttamasta kuormituksesta. Aiemmin Kortelainen ja Saukkonen (1998) arvioivat 22 pienen valuma-alueen aineistoon perustuen, että

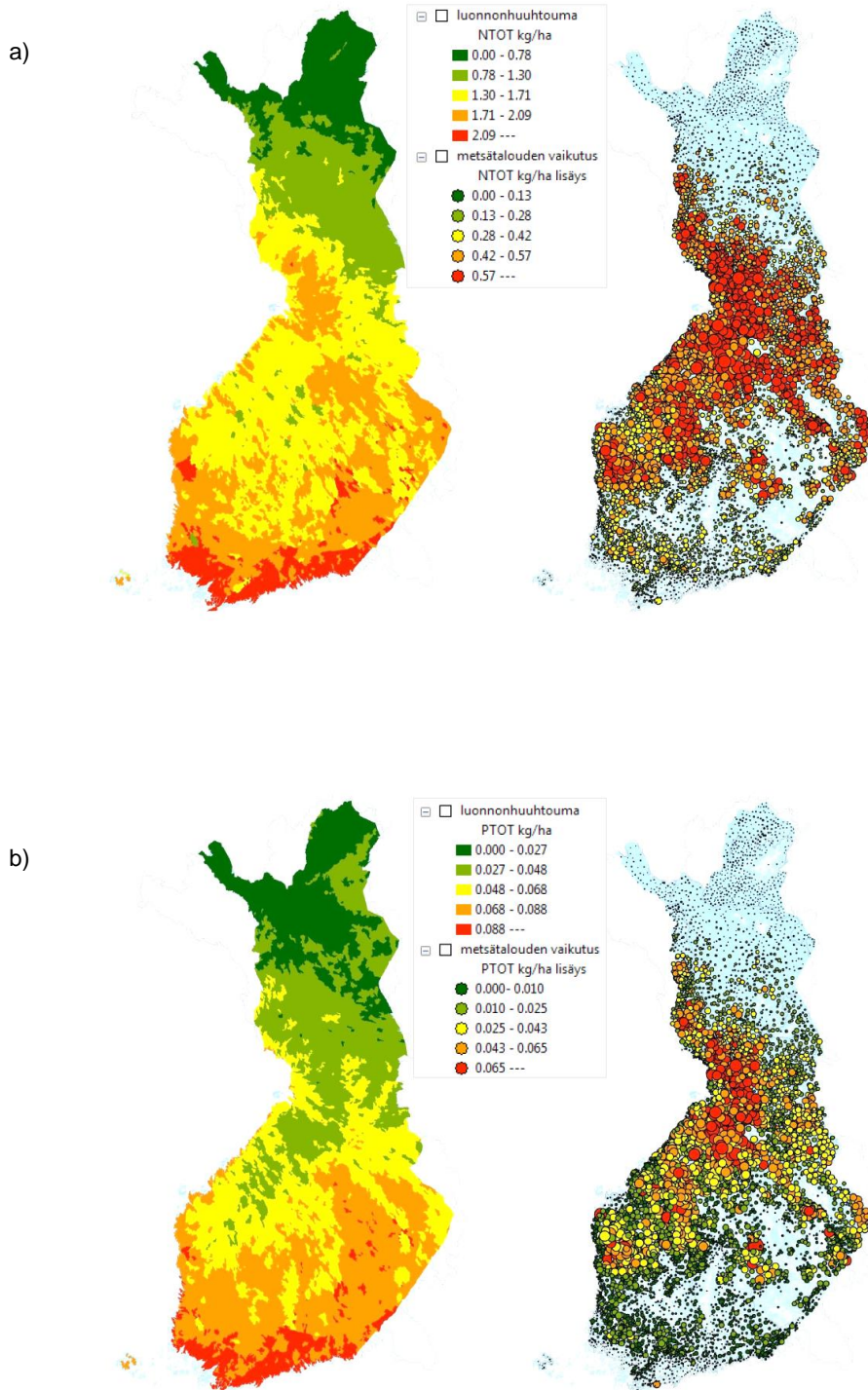
metsistä tulevan orgaanisen hiilen kokonaiskuormitus on Suomessa 1,8 Mtn/v. Sallantaus (1985, 1988) puolestaan arvioi sen suuruudeksi n. 1,5 Mtn/v. Nämä arviot ovat samaa suuruusluokkaa kuin tässä hankkeessa tehdyt orgaanisen hiilen kokonaiskuormitusarviot.

Suomen virallisissa tilastoissa on esitetty arviot ihmisperäisestä haja- ja pistekuormituksesta (Suomen virallinen tilasto 2018). Kun MetsäVesi-hankkeen tulokset otetaan huomioon, koko ihmisperäisen kuormituksen vuotuinen suuruus kasvaa typen osalta 59 300 tonnista 63 400 tonniin ja fosforin osalta 3 040 tonnista 3 240 tonniin. Metsätalouden osuus ihmisperäisestä vuotuisesta typpikuormituksesta kasvaa noin 6 %:sta (3 250 tn) 12 %:iin (7 300 tn). Vastaavasti metsätalouden osuus fosforikuormituksesta kasvaa 8 %:sta (230 tn) 14 %:iin (440 tn). Suuruudeltaan metsätalouden aiheuttama kuormituksen arvioidaan olevan noin neljäsosa maatalouden aiheuttamasta kuormituksesta. Orgaanisen hiilen kuormituksesta ei ole julkaistu arvioita Suomen virallisissa tilastoissa.

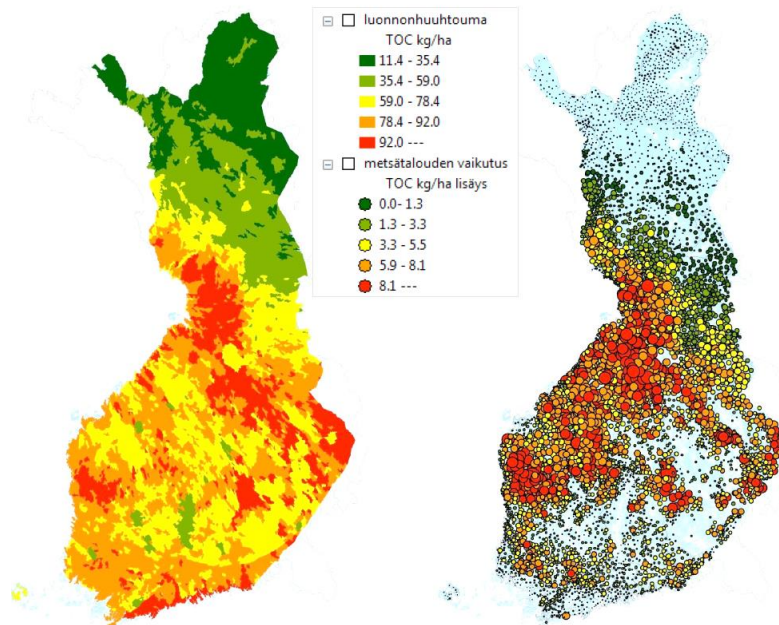
On huomattava, että hankkeessa arvioitiin metsätalouden aiheuttama kuormitus ja luonnonhuuhtouma pitkän ajan keskiarvona. Vuosien välillä on huomattavasti vaihtelua valunnan määrässä, mikä voi aiheuttaa suuret erot myös metsätalouden aiheuttaman kuormituksen ja luonnonhuuhtouman määrään. Tämän vuoksi luvut tulisi laskea vuosittain ottaen huomioon valunnan vaihtelu. Yhtälöt on laadittu pitkällä ajanjaksolla kerätyn aineiston perusteella. Pitoisuuksien ja niitä selittävien tekijöiden välinen suhde voi muuttua ajan myötä mm. metsätaloudessa ja ympäristötekijöissä tapahtuvien muutosten vuoksi. Siten myös MetsäVesi-hankkeessa tuotettuja yhtälöitä tulisi päivittää, sitä mukaa kun uutta seuranta-aineistoa kertyy.

6.2 Kuormituksen alueellinen vaihtelu

Kuormituksen ja luonnonhuuhtouman vaihtelua tarkasteltiin alueellisella tasolla (kuvat 11 ja 12). Typen ja fosforin luonnonhuuhtouma on suurinta Etelä-Suomessa, kun taas metsätalouden aiheuttama kuormitus on suurinta Perämereen laskevilla valuma-alueilla, joilla on paljon ojitettuja alueita (kuva 11). Orgaanisen hiilen luonnonhuuhtouman maantieteellinen jakautuminen poikkeaa typen ja fosforin vastaavasta (kuva 12). Orgaanisen hiilen luonnonhuuhtouma on suurinta Etelä-Suomessa ja Oulun ympäristöstä Ilomantsiin ulottuvalla vyöhykkeellä. Metsätalouden aiheuttama typen, fosforin ja orgaanisen hiilen kuormitus on myös suurinta Pohjanmaalla, jossa on paljon ojitettuja soita.



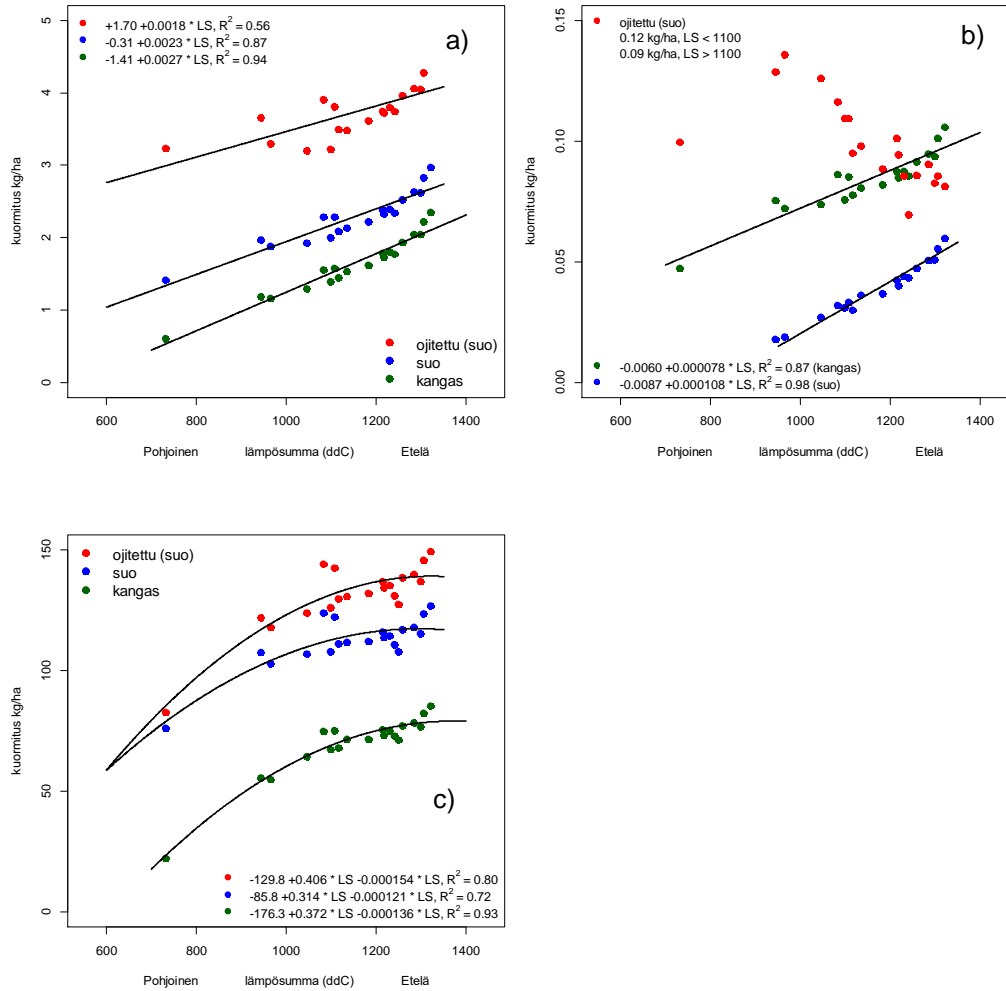
Kuva 11. Metsätalouden maalta tuleva typen (a) ja fosforin (b) luonnonhuuhtouma ja metsätalouden aiheuttama kuormitus laskettuna kolmannen jakovaiheen valuma-alueille. Metsätalouden vaikutus -osakuvassa symbolien koko on suhteutettu alueen ojitusprosenttiin. Huomaa myös, että kuormitus on skaalattu eri tavoin luonnonhuuhtoumalle ja metsätalouden aiheuttamalle kuormitukselle.



Kuva 12. Metsätalouden maalta tuleva orgaanisen hiilen luonnonhuuhtouma ja metsätalouden aiheuttama kuormitus laskettuna kolmannen jakovaiheen valuma-alueille. Metsätalouden vaikutus -osakuvassa symbolien koko on suhteutettu alueen ojitusprosenttiin. Huomaa myös, että kuormitus on skaalattu eri tavoin luonnonhuuhtoumalle ja metsätalouden aiheuttamalle kuormitukselle.

MetsäVesi-hankeessa tarkasteltiin lisäksi laskennallisesti kuormituksen eroja luonnontilaisten soiden, luonnontilaisten kangasmetsien ja ojitettujen soiden välillä. Luonnontilaisilta soilta tuleva huuhtouma laskettiin pitoisuusyhtälöillä asettamalla ojitus-% nollassi. Luonnontilaisista kangasmetsistä tuleva huuhtouma laskettiin asettamalla pitoisuusyhtälöissä sekä ojitus-% että suo-% nollassi.

Pinta-alayksikköä kohti tarkasteltuna typen ja orgaanisen hiilen kuormitus on selvästi suurinta ojitetuilta soilta ja pienintä kangasmetsistä (kuva 13a ja c). Typpikuormituksen ero luonnontilaisten ja ojitettujen soiden välillä on suhteellisesti suurempi kuin vastaava ero orgaanisen hiilen kuormituksessa. Fosforikuormituksen erot luonnontilaisten soiden ja kangasmetsien sekä ojitettujen soiden välillä poikkeavat suuresti vastaavista eroista typen ja orgaanisen hiilen kuormituksessa (kuva 13b). Pinta-alayksikköä kohti laskettu fosforikuormitus on pienintä luonnontilaisilta soilta. Pohjois- ja Keski-Suomessa ojitetuilta soilta tuleva fosforikuormitus on suurempaa kuin luonnontilaisilta soilta, mutta ero häviää Etelä-Suomessa. Tähän voi vaikuttaa se, että pitoisuusyhtälöiden perustana olevassa aineistossa ojitusprosentti oli Etelä-Suomessa pienempi kuin pohjoisemmassa Suomessa. Jatkossa kun saadaan lisää aineistoa, tulokset tarkentuvat ja voivat muuttua.



Kuva 13. Luonnontilaisista kangasmetsistä, luonnontilaisilta soilta ja ojitetuilta soilta tuleva pinta-alaokohtainen a) typen, b) fosforin ja c) orgaanisen hiilen kuormitus suhteessa keskimääräiseen lämpösummaan. Kuormitus on laskettu maakunnittain (n = 20). Kuvissa kuormituksen lämpösommariippuvuutta kuvaavat yhtälöt, joissa LS= lämpösomma.

7 Metsäalueilta tulevan kuormituksen muutos ja siihen vaikuttavat tekijät

Ahti Lepistö, Antti Räike ja Tapani Sallantaus

7.1 Tausta

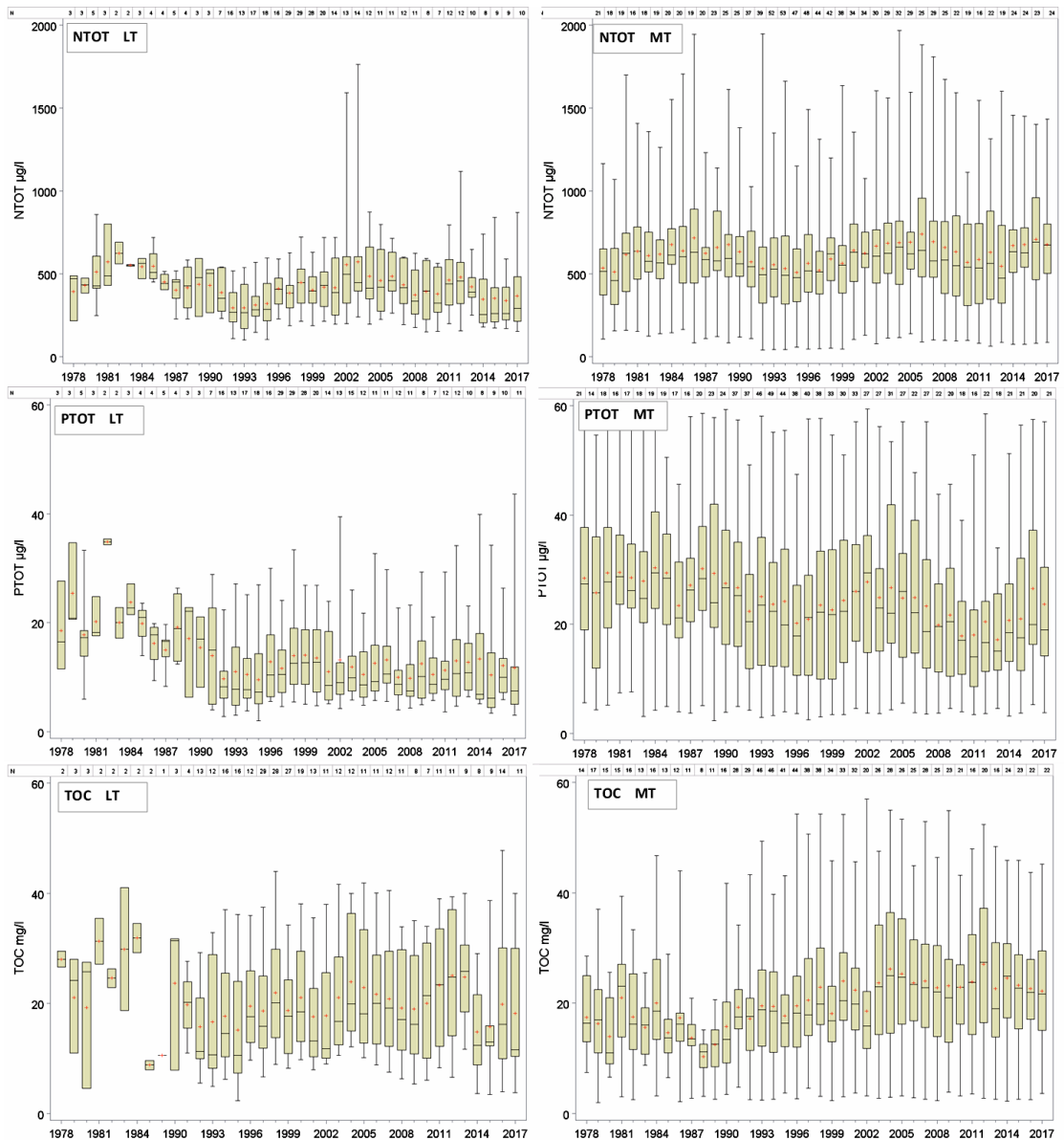
Luvussa tarkastellaan typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuuksien ja ainevirtaamien muutoksia pitkällä jaksolla (>40 vuotta) trendianalyyysien avulla (ns. TOP12-alueet) sekä muutoksia ympäristötekijöissä vastaavalla jaksolla. Mahdollisina selittävinä muuttujina tarkasteltiin lämpötilaa, sadantaa ja valuntaa sekä sulfaattia valumavedessä. Lisäksi tutkittiin ojitusten vaikutusta typen kuormitukseen Oulujoen vesistöalueen osavaluma-alueilla. Oulujoki ja 10 muuta Perämeren valuma-alueen jokivesistöä valittiin selvityksen kohteeksi, jotta saadaan lisätietoa siitä, miksi monien jokien typen ja orgaanisen hiilen virtaamat ovat siellä kasvaneet viimeisten vuosikymmenten aikana.

7.2 Pitkät aikasarjat ja trenditarkastelut pienillä valuma-alueilla

Muutokset pitkällä aikajaksolla (box-whisker)

Muutosten pitkän ajanjakson (1978–2017) tarkastelu aloitettiin yhdistämällä koko veden laatuaineisto ja jakamalla se metsätalouden piirissä oleviin valuma-alueisiin (MT) ja luonnontilaisiin valuma-alueisiin (LT). Aineistolle laskettiin tärkeimmät tilastolliset tunnusluvut ja muuttujien vaihtelua yksittäisinä vuosina tarkasteltiin box-whisker-kuvaajien avulla. Niiden perusteella havaittiin, että typpipitoisuuksissa esiintyi sekä

vuosien sisäistä että vuosien välistä voimakasta vaihtelua, mikä ilmeni samansuuntaisena sekä luonnontilaisilla että metsätalouden piirissä olevilla alueilla (kuva 14).



Kuva 14. Kokonaistypen (NTOT), kokonaisfosforin (PTOT) ja orgaanisen hiilen (TOC) pitoisuuksien box-whisker -aikasarjat ajanjaksolla 1978–2017. LT = luonnontilainen valuma-alue, MT = metsätalouden vaikutuspiirissä oleva valuma-alue. Kuvassa + on aritmeettinen keskiarvo, viiva laatikon sisällä on mediaani.

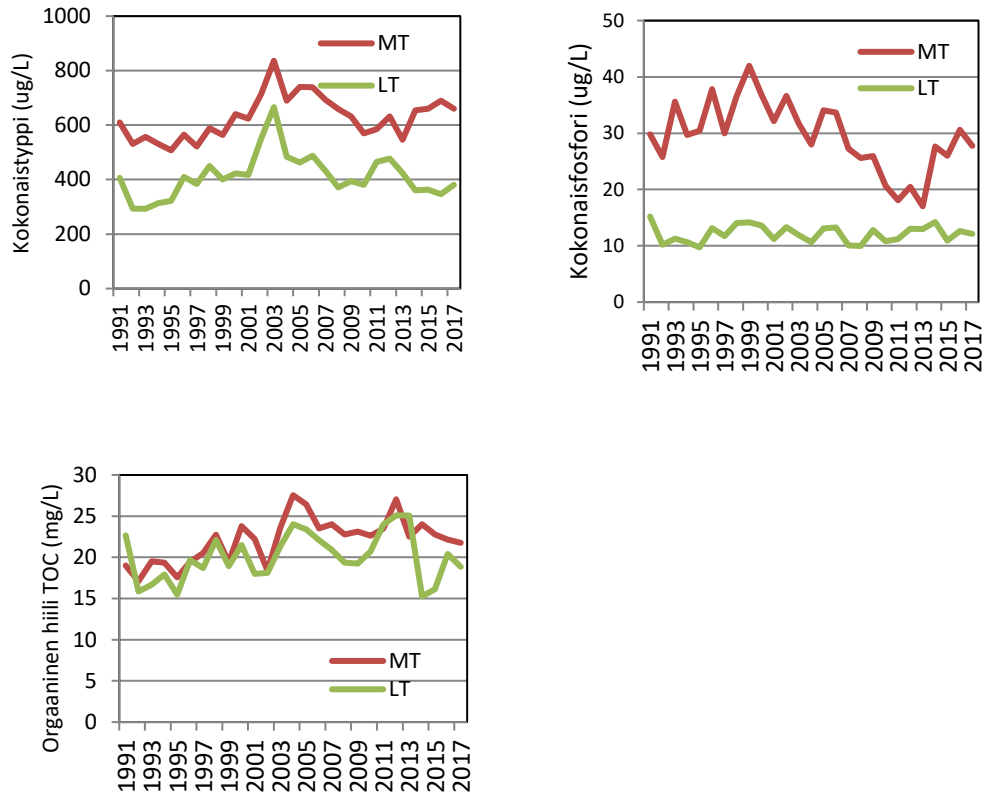
Vuodesta 1991 lähtien luonnontilaisia valuma-alueita oli seurannassa paljon enemmän ($n = 7-29$) kuin 1970–1980 luvuilla ($n = 2-5$). Myös metsätalousvaluma-alueita oli vuodesta 1991 lähtien seurannan piirissä enemmän ($n = 18-58$), joten jakso 1991–2017 soveltui parhaiten tyyppien, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuuksien vertailuun (kuva 15). Ravinnepitoisuuksien vertailussa havaittiin selkeä tasoero: metsätalousalueilla kokonaistypen pitoisuuksien keskiarvo ($627 \mu\text{g/L}$) oli 1,5-kertainen luonnontilaisiin

alueisiin (413 µg/L) verrattuna (kuva 15). Kokonaisfosforilla ero oli vieläkin suurempi: metsätalousalueilla fosforipitoisuuksien keskiarvo oli 30 µg/L, mikä oli melkein kolminkertainen verrattuna luonnontilaisten alueiden keskiarvoon (12 µg/L). Orgaanisen hiilen pitoisuuksissa ero oli vain 10 %: metsätalousalueilla 22,1 mg/L verrattuna luonnontilaisiin alueisiin (20 mg/L).

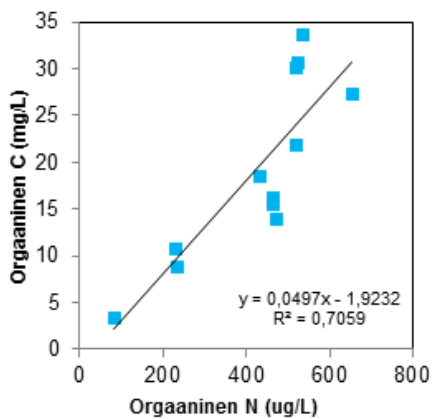
Orgaanisen hiilen ja kokonaistypen pitkän ajan muutokset metsätalousalueilla ja luonnontilaisilla alueilla seurasivat toisiaan, ilmentäen orgaanisen hiilen merkitystä typen kierrossa (kuva 15). Orgaanisen hiilen pitoisuuksissa havaittiin valuma-aluekohtaisesti eniten nousevia trendejä (ks. seuraava luku), mutta niitä havaittiin sekä luonnontilaisilla että metsätalousalueilla. Kokonaisfosforipitoisuuksien pitkän ajan muutokset sen sijaan poikkeavat selkeämmin toisistaan: luonnontilaisilla alueilla pitoisuudet ovat pysyneet koko ajanjakson ajan samalla tasolla, kun sen sijaan metsätalousalueilla fosforipitoisuudet ovat vähitellen laskeneet lukuun ottamatta muutaman viimeisen vuoden nousua.

Valumaveden typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuuksien ja hydrometeorologisten muuttujien trendit (Mann-Kendall)

Yhtenäisen, pitkän aikajakson seurannan piirissä oleville 12 valuma-alueelle (TOP12) tehtiin orgaanisen hiilen ja ravinnepitoisuuksien trendianalyysit (1978–2018 eli yhteensä 41 vuotta). Selkeimmin nousussa olivat orgaanisen hiilen pitoisuudet (10/12 valuma-alueella; taulukko 5). Kuudella nousevan orgaanisen hiilen pitoisuuden valuma-alueella myös kokonaistypen pitoisuudet kasvoivat, mikä johtui kaikilla valuma-alueilla orgaanisen typen osuuden noususta. Kyseisillä valuma-alueilla kokonaistyyppi koostuu valtaosin orgaanisesta tyypestä, minkä vuoksi orgaanisen typen ja orgaanisen hiilen pitoisuudet korreloivat vahvasti keskenään ($R^2=0,71$) (kuva 16). Molemmat kuvaavat humusyhdisteiden huuhtoutumista (Mattsson ym. 2015). Tämä viittaa siihen, että huuhtoutumista ajavat tekijät ovat yhteisiä.



Kuva 15. Kokonaistyypen, kokonaisfosforin ja orgaanisen hiilen vuosipitoisuuksien keskiarvot jaksolla 1991–2017 niiltä valuma-alueilta, joilta on pitkiä aikasarjoja. LT = luonnontilainen valuma-alue (n = 7-29), MT = metsätalouden vaikutuspiirissä oleva valuma-alue (n = 18-58).



Kuva 16. Orgaanisen hiilen ja typen vuotuisten keskipitoisuuksien riippuvuus TOP12-valuma-alueilla ajanjaksolla 1978–2018.

Kokonaisfosforin pitoisuuksissa havaittiin joko laskevia trendejä (lähinnä MT-alueilla), tai muutoksia ei havaittu ollenkaan (5/12 valuma-alueella). Kokonaisfosforin pitoisuudet olivat nousussa vain yhdellä valuma-alueella (Kotioja). Todennäköisesti 1980–1990-luvuilla mitatut korkeat pitoisuudet (kuvat 14 ja 15) ovat laskeneet viiveellä, koska metsälannoitukset vähenivät tutkimusjaksolla voimakkaasti (vrt. Tattari ym. 2017), erityisesti 1970-luvun alusta 1990-luvun alkuun (Metsätilastollinen vuosikirja 2014).

Lämpötila nousi tilastollisesti merkitsevästi kaikilla 12 valuma-alueella (taulukko 7). Lämpötila voi vaikuttaa pitoisuuksien nousuun, koska yhdistettynä sopiviin kosteusoloihin lämpötilan kohoaminen lisää maaperän orgaanista ainesta hajottavien mikro-bien aktiivisuutta ja maahan varastoituneen typen ja hiilen vapautumista (esim. Tuomi ym. 2008, Karhu ym. 2010). Tällöin maaperässä on enemmän huuhtoutumiselle altista orgaanista ainesta.

Taulukko 5. Tilastollisesti merkitsevät ($p < 0.05$) nousevat (punainen) ja laskevat (sininen) trendit ja muutos prosentteina (muutos-%) sekä keskipitoisuuden muutos 41 vuoden ajanjaksolla (1978–2018) 12 valuma-alueella. Väriin voimakkuus kuvaa trendin voimakkuutta. Suo- ja ojitusprosentit on laskettu valuma-alueiden pinta-alasta.

Seuranta-asema	Status	Suo%	Ojitus%	totN		totP		TOC		Muutos-%						
				p	Muutos%	keski-pitoisuus (µg/l)	Muutos (µg/v)	p	Muutos%		keski-pitoisuus (µg/l)	Muutos (µg/v)	p	Muutos%	keski-pitoisuus (mg/l)	Muutos (mg/v)
Teeressuonoja	MT	13	0	0,000	58,2	1070	15,6	0,425	17,5	-0,03	0,001	52,1	15,6	0,21		
Huhtisuonoja	MT	47	48	0,000	36,8	732	6,6	0,000	-82,0	33,3	-0,68	0,000	52,4	21,9	0,29	
Kesselinpuro	MT	50	30	0,164		763	1,7	0,000	-34,3	42,8	-0,38	0,014	25,0	27,3	0,19	0-20
Liuhapuro	LT	48	0	0,000	22,4	538	2,9	0,518	22,7	-0,03	0,001	19,9	30,2	0,18	20-40	
Kelopuro ¹	LT	50	0	0,373		263	0,3	0,00	7,5	0,00	0,003	25,6	10,8	0,09	40-60	
Kivipuro	MT	32	56	0,006	12,0	543	1,7	0,041	-16,1	23,1	-0,10	0,002	17,3	30,8	0,16	>60
Väilpuro ²	LT	56	9	0,012	14,8	565	2,5	0,725	20,3	0,00	0,010	11,9	33,7	0,14	0 - -20	
Myllypuro	MT	27	18	0,209		465	1,2	0,000	-40,5	22,0	-0,22	0,002	29,4	18,5	0,11	-20 - -40
Kotioja	MT	54	27	0,000	21,3	575	3,4	0,030	14,9	27,8	0,12	0,002	22,4	16,3	0,09	-40 - -60
Ylijoki	MT	59	29	0,909		612	0,0	0,129	31,3	0,06	0,001	21,4	14,0	0,09	<-60	
Vähä-Askanjoki	MT	10	10	0,004	-18,5	264	-1,3	0,001	-26,3	15,9	-0,11	0,635	8,9	-0,01		
Laanioja	MT	5,7	2	0,001	-34,5	115	-1,0	0,967	4,8	0,00	0,762	3,5	-0,02			

¹ 1988-2018

² 1978-2011

Orgaanisen hiilen vuotuisia keskipitoisuuksia tarkasteltiin eri muuttujien (sadanta, valunta, lämpötila, rikkilaskeuma) funktiona Teeressuonojan valuma-alueella Etelä-Suomessa. Ainoastaan sadannan ja orgaanisen hiilen pitoisuuksien välillä havaittiin tilastollisesti merkitsevä korrelaatio ($R^2=0,37$). Sateisina vuosina orgaanista hiiltä huuhtoutuu tyypillisesti enemmän: orgaanisen hiilen pitoisuudet sateisimpina vuosina ovat kaksinkertaisia verrattuna kuivimpiin vuosiin.

Happamoitava rikkilaskeuma on vähentynyt Suomessa 1980-luvun lopulta lähtien (Vuorenmaa 2004, Ruoho-Airola ym. 2014). Sulfaattipitoisuuden vähenemä näkyy yleensä emäskationien pitoisuuden laskuna, alkaliniteetin nousuna ja orgaanisen hiilen kasvuna. Orgaanisten happojen anionit korvaavat osittain sulfaattianionit, mikä on

selkeimmillään havaittavissa karuilla happamilla mailla (Monteith ym. 2007). Metsä-Vesi-hankkeen yhteydessä ei ollut mahdollisuutta tarkastella rikkilaskeuman vaikutuksia perusteellisesti, koska laskeuman aikasarjoja 1980-luvulta ollut käytettävissä. Laskeuman sijaan tarkasteluun otettiin valumaveden sulfaattipitoisuudet vuodesta 1990 eteenpäin. Niissä havaittiin voimakkaita laskevia trendejä kymmenellä 12 valuma-alueesta (taulukko 6). Mittausjakso vaihteli 20-28 vuoden välillä, ja oli siis lyhyempi kuin typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuuksille (taulukko 5). Vähentynyt laskeuma näyttää vaikuttavan viiveellä sulfaatin vapautumiseen metsämaaperästä. Samanaikaisesti sekä orgaanisen hiilen että typen pitoisuudet kasvoivat monilla samoilla valuma-alueilla. Kokonaistyyppi taas korreloi voimakkaasti orgaanisen typen kanssa (vrt. kuva 16).

Kun tarkastellaan jaksoa vuodesta 1990 eteenpäin aikaisemman korkean rikkilaskeuman alueella (Huhtisuonojan valuma-alue) Kaakkois-Suomessa (kuva 17), nähdään valumavedessä sulfaattipitoisuuden pienenemistä ja vastaavasti orgaanisen hiilen pitoisuuksien nousua, mikä viittaa vähenevän laskeuman vaikutuksiin.

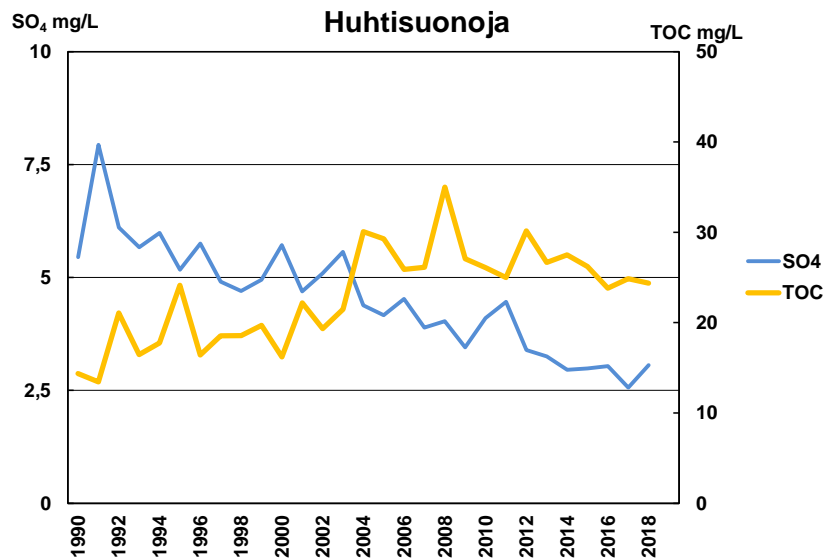
Happaman laskeuman merkitystä vähentää sen pienentyminen nykyiselle matalalle tasolle jo ennen 2000-lukua, mutta silti se näyttää vaikuttavan edelleen viiveellä orgaanisen hiilen huuhtoutumiseen. Orgaanisen hiilen pitoisuuksien nousu taas jatkuu edelleen laajamittaisesti suureksi osaksi ilmastotekijöiden vaikutuksesta.

Taulukko 6. Tilastollisesti merkitsevät ($p < 0.05$) laskevat (sininen) valumaveden sulfaattipitoisuuksien trendit ja muutokset prosentteina sekä keskipitoisuuden muutos 12 valuma-alueella. Mittausjakso alkaa vuonna 1990 ja vaihtelee 20–28 vuoden välillä. Värin voimakkuus kuvaa trendin voimakkuutta.

Seuranta-asema	Status	Suo%	Ojitus%	SO ₄ valumavedessä			Muutos-%	
				p	Muutos%	keski-pitoisuus (mg/l) Muutos (mg/v)		
Teeressuonoja ³	MT	13	0	0,100		10,4	-0,056	
Huhtisuonoja ³	MT	47	48	0,000	-76,6	4,6	-0,121	0-20
Kesselinpuro ³	MT	50	30	0,010	-24,8	8,3	-0,071	20-40
Liuhapuro ³	LT	48	0	0,001	-56,9	1,7	-0,033	40-60
Kelopuro ³	LT	50	0	0,001	-37,7	0,7	-0,009	>60
Kivipuro ⁴	MT	32	56	0,020	-51,8	3,2	-0,057	-0 - -20
Välipuro ⁴	LT	56	9	0,000	-111,5	1,3	-0,050	-20 - -40
Myllypuro ⁵	MT	27	18	0,001	-72,5	1,6	-0,040	-40 - -60
Kotioja ⁶	MT	54	27	0,030	-42,7	2,5	-0,037	<-60
Ylijoki ⁶	MT	59	29	0,020	-47,5	1,6	-0,026	
Vähä-Askanjoki ³	MT	10	10	0,000	-55,4	1,3	-0,025	
Laanioja ³	MT	5,7	2	0,2	-2,6	2,7	-0,002	

³ 1990-2018 ⁵ 1990-2015

⁴ 1990-2014 ⁶ 1990-2010



Kuva 17. Organisen hiilen ja sulfaatin keskipitoisuudet Huhtisuonojan valumavedessä 1990–2018.

Typpilaskeuma Suomen metsiin on vähentynyt: nitraatti- ja ammoniumtyyppien laskeumat vähenivät merkittävästi 1980-luvulta 1990-luvun puoliväliin asti, minkä jälkeen selvää muutosta ei ole havaittu (esim. Ruoho-Airola ym. 2011). Laskeuman tyyppi pidättyy erittäin tehokkaasti puustoon ja maaperän orgaaniseen ainekseen, eikä sitä nykytilanteessa juurikaan päädy valumavesiin, mutta se saattaa epäsuorasti vaikuttaa orgaanisen hiilen pitoisuuksiin. Pienen laskeuman alueella Smolander (2018) ei havainnut mitään suhdetta laskeumatyyppien määrän ja metsistä huuhtoutuvan tyypin välillä. Tästä poiketen, järviin ja merialueille suoraan satava typpilaskeuma vaikuttaa vesistöjen tyypipitoisuuksiin.

Aineisto 12 valuma-alueelta antoi viitteitä siitä, että sekä suot sinänsä että soiden ojitukset voimistavat tyypin ja orgaanisen hiilen huuhtoutumista vesistöihin. Riippuvuuksia tutkittiin tarkemmin MetsäVesi-hankkeen laajemmassa kohdealueiden joukossa (ks. luku 5).

Havaitut trendit eri vuodenaikoina

Vuodenaikaisvaihtelua tarkasteltaessa havaittiin, että valunnan nousu painottui talvi-kauteen ja kevääseen (taulukko 8). Kevättulvien aikaistuminen on havaittu lukuisissa ilmastomuutosta koskevissa tutkimuksissa (esim. Veijalainen ym. 2010). Valunnan kasvu ajoittui valtaosin samalle aikajaksolle kuin orgaanisen hiilen ja tyypin pitoisuuksien kasvu (alkutalvi ja kevät), mutta myös loppusyksyyn (taulukko 8), joten leutoina

talvina ainevirtaamat voivat kasvaa sekä kasvavien vesimäärien että pitoisuuksien takia. Sateisina syksyinä ja leutoina talvina on jo havaittu ainevirtaamien kasvua Suomen joissa (esim. Mattsson ym. 2015).

Valunnassa havaittiin vuositason nousua vain kolmella valuma-alueella (taulukko 7), joten tärkein muutos tapahtui nimenomaan vuoden sisällä. Sadannassa sen sijaan havaittiin vain vähän vuodenaikaismuutoksia (taulukko 8), eikä myöskään merkittäviä muutoksia vuosisadannoissa pitkällä ajanjaksolla (taulukko 7).

Taulukko 7. Tilastollisesti merkitsevät ($p < 0.05$) nousevat (punainen) ja laskevat (sininen) hydrometeorologisten muuttujien trendit ajanjaksolla 1978–2018 12 tutkimusvaluma-alueella. Värin voimakkuus kuvaa trendin voimakkuutta.

Uranta-asema	Valunta			Ilman lämpötila				Sadanta				Muutos-%	
	p	Keski- Muutos valunta %	Keski- Muutos valunta (mm/v)	p	Muutos (°C/10 v)	Keski- lämpötila (°C)	Muutos (°C/v)	p	Muutos sadanta %	Keski- Muutos sadanta (mm/v)	Muutos (mm/v)		
eressuonoja	0,092	275	-0,10	0,003	0,35	4,8	0,05	0,617	639	0,06			
ihtisuonoja	0,355	231	-0,03	0,000	0,55	4,0	0,05	0,406	629	0,07			
sselinpuro	0,060	260	0,09	0,000	0,49	2,1	0,04	0,104	612	0,14	0–20		
ihapuro	0,008	1,9	380	0,17	0,000	0,55	2,3	0,05	0,026	1,7	584	0,25	20–40
lopuro	0,078	310	0,11	0,000	0,55	2,3	0,05	0,026	1,7	584	0,25	40–60	
ripuro	0,426	424	-0,17	0,000	0,55	2,3	0,05	0,026	1,7	584	0,25	>60	
lipuro	0,004	1,1	346	0,09	0,000	0,55	2,3	0,05	0,026	1,7	584	0,25	-20 – -40
yllypuro	0,064	309	0,06	0,000	0,51	1,8	0,05	0,804	594	0,03	0,03	0,03	-20 – -40
tioja	0,008	1,9	381	0,17	0,000	0,61	0,7	0,06	0,058	583	0,21	0,21	-40 – -60
joki	0,069	424	0,12	0,000	0,61	0,7	0,06	0,058	583	0,21	0,21		
hä-Askanjoki	0,164	418	0,12	0,000	0,57	0,3	0,06	0,017	1,7	516	0,22	0,22	
anioja	0,000	1,9	424	-0,17	0,001	0,44	-0,7	0,04	0,778	589	-0,03	-0,03	

Taulukko 8. Tilastollisesti merkitsevät ($p < 0.05$) nousevat (punainen) ja laskevat (sininen) typen, fosforin ja orgaanisen hiilen pitoisuuksien sekä hydrometeorologisten muuttujien kuukausitrendit 12 valuma-alueella ajanjaksolla 1978–2018, säämuuttujien trendit on laskettu 8 ilmastoasemalle. Mitä tummempi väri, sitä useammalla valuma-alueella havaittiin trendi. Taulukossa n = tarkasteluun käytettyjen valuma-alueiden lukumäärä kyseisenä kuukautena.

	totN				n	totP				n	TOC				n
	Nouseva	Ei trendiä	Laskeva			Nouseva	Ei trendiä	Laskeva			Nouseva	Ei trendiä	Laskeva		
Tammikuu	1	6			7		7			7	2	4		6	
Helmikuu	2	5			7	2	4			6	2	1		3	
Maaliskuu	4	3	1		8	2	5	1		8	5	3		8	
Huhtikuu	3	8	1		12	1	6	5		12	7	4		11	
Toukokuu	2	8	2		12		4	8		12	8	4		12	
Kesäkuu	1	8	1		10		8	2		10		10		10	
Heinäkuu	3	5			8		7	1		8	1	5		6	
Elokuu	2	9			11	2	9			11	1	9		10	
Syyskuu	3	8	1		12	3	7	2		12	2	10		12	
Lokakuu	3	8	1		12	1	8	3		12		12		12	
Marraskuu	8	3	1		12		9	3		12	9	2		11	
Joulukuu	3	6			9	1	7			9	2	5		7	
	Valunta					Ilman lämpötila					Sadanta				
	Nouseva	Ei trendiä	Laskeva	n	Nouseva	Ei trendiä	Laskeva	n	Nouseva	Ei trendiä	Laskeva	n			
Tammikuu	9	2	1	12		8		8		8		8			
Helmikuu	6	5	1	12		8		8		8		8			
Maaliskuu	5	6	1	12		8		8		8	7	1			
Huhtikuu	4	7	1	12	4	4		8		8		8			
Toukokuu		8	4	12		8		8		8		8			
Kesäkuu		11	1	12		8		8		8		8			
Heinäkuu		12		12	4	4		8		8		8			
Elokuu		12		12	8			8		8		8			
Syyskuu		11	1	12	8			8		8	1	7			
Lokakuu		10	2	12		8		8		8		8			
Marraskuu		12		12	6	2		8		8		8			
Joulukuu	6	5	1	12	8	2		8		8	1	7			

Lämpötilan nousu painottui kesä-syyskauteen, jolloin orgaanisen aineksen hajoaminen maaperässä voimistuu ja mahdollistaa osaltaan lisääntyvän orgaanisen hiilen ja typen huuhtoutumisen. Korkeammat lämpötilat kasvukausina johtavat hajoamisprosessien kiihtymiseen (vrt. Tuomi ym. 2008, Karhu ym. 2010), jolloin syysateiden myötä vesistöihin huuhtoutuu enemmän orgaanista ainesta. Tässä aineistossa valunnalle löytyi eniten kasvavia trendejä joulukuusta helmikuuhun, yli puolella valuma-alueista. Marraskuussa puolestaan havaittiin eniten kasvavia orgaanisen hiilen ja typen trendejä (8–9/12).

Syystulvien yhteydessä Simojoen vesistöalueelta Etelä-Lapissa on havaittu huuhtoutuvan paljon orgaanista ainesta. Tämä selittyy suurempien vesimäärien lisäksi sillä, että syystulvatilanteissa orgaanisen hiilen pitoisuudet olivat hajoamisprosessien takia paljon suurempia kuin vastaavilla tulvilla keväällä (Lepistö ym. 2008).

Ainevirtaamien ja hydrometeorologian muutokset 41 vuoden jaksolla

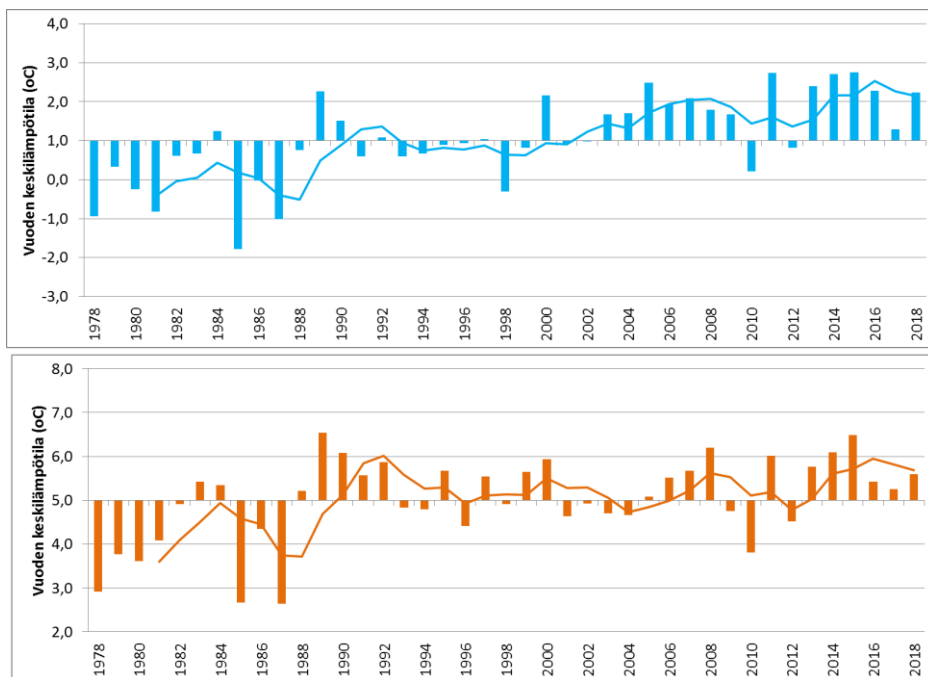
Selvityksestä käy ilmi, että lämpötila nousi voimakkaasti tarkastellulla 41 vuoden jaksolla. Kuvassa 18 nähdään esimerkkinä kaksi lämpötilan aikasarjaa, ylempänä Ranualla, Kotiojan ja Ylijoen alueiden lähellä oleva asema, ja alempana Vihdin Maasojan asema. Muutoksen voimakkuus oli Ranualla 0,61 °C /10 vuotta, eli lähes 2,5 °C 41 vuodessa. Etelä-Suomessa muutos oli vähäisempää: 0,35 °C 10 vuodessa.

Kuormitusaikasarjoista nähdään sateisen 1980-luvun alun aiheuttamat korkeat ainevirtaamat, jotka laskivat 1980-luvun kuluessa (kuva 19). Vastaavasti vuosisadanta ja -valunta laskivat, ja samalle vuosikymmenelle ajoittuu myös voimakas happamoittavan laskeuman kasvu (1980–1987), mikä voi myös osaltaan selittää orgaanisen hiilen kuormituksen laskua. Sen jälkeen kuormitus on ollut nousussa ja koko jaksolla on havaittavissa merkittävää vaihtelua yksittäisten vuosien välillä. Jakson kylmimmät vuodet (1985 ja 1987) mitattiin 1980-luvulla, minkä jälkeen vastaavia ei ole havaittu, vaan lämpötilat ovat kääntyneet nousuun. Vaihteluväli kylmimpien ja lämpimpien vuosien keskilämpötilojen välillä on noin 4 °C (kuva 19).

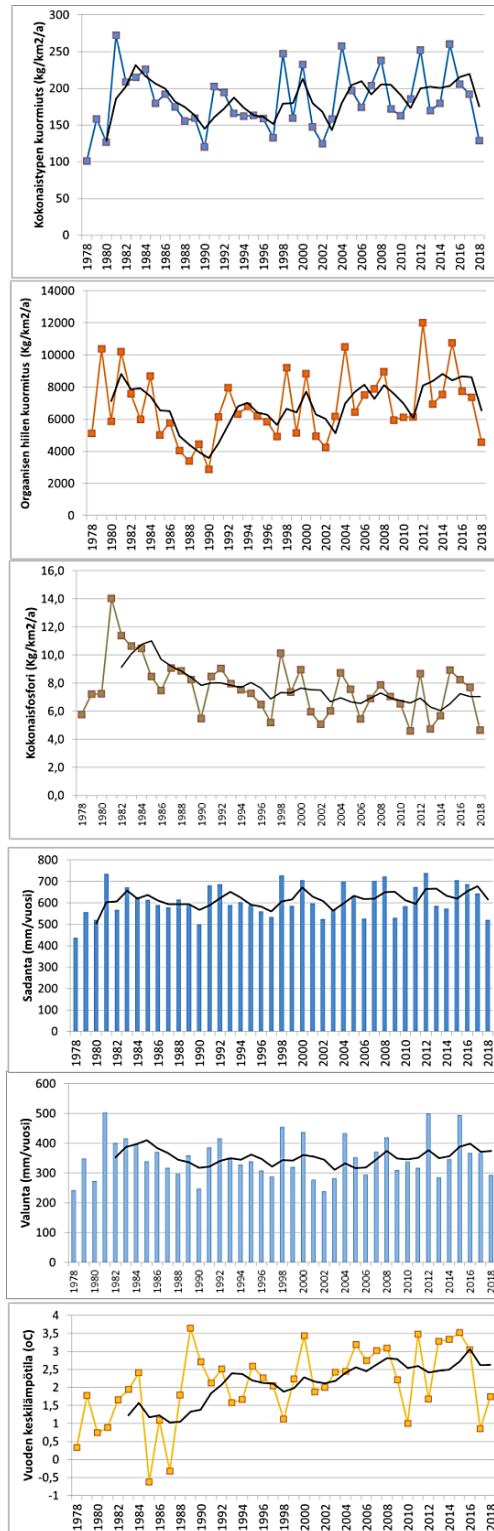
Hydrologia aiheuttaa vuosien välisen vaihtelun orgaanisen hiilen ja typen kuormituksen aikasarjoissa, mutta huuhtoutumisen nousua ajavat todennäköisesti lämpötila ja voimistuneet hajoamisprosessit. Ne tuottavat enemmän huuhtoutumiselle altista orgaanista ainesta, jota erityisesti tulvavedet huuhtovat metsistä ja soilta (de Wit ym. 2016). Ravinteiden ja orgaanisen hiilen huuhtoutumisen kannalta vuodenaikaismuutokset, esim. leudot, sateiset talvet (vrt. taulukko 8) ovat sadannan ja valunnan vuosikeskiarvoissa tapahtuvia muutoksia olennaisempia.

Kun jaetaan 41 vuoden aikasarja kahteen osaan alku- ja loppujaksoksi, niin huomataan että keskimääräinen vuosisadanta oli jälkimmäisellä jaksolla 6,5 % suurempi (630 mm) kuin ensimmäisellä jaksolla (591 mm). Vastaavasti vuosivalunta oli 3,2 % suurempi (356 mm) kuin ensimmäisellä jaksolla (345 mm), joten kuormituksen nousu ei ole selitettävissä vuosivalunnan muutoksilla.

Kuormituksissa erot olivat paljon suurempia. Orgaanisen hiilen kuormitus nousi tasolta 6 180 kg/km²/v (ensimmäisten 20 vuoden keskiarvo 1978–1997) tasolle 7 380 kg/km²/v. Havaittu 20 prosentin keskimääräinen nousu oli merkittävä. Kokonaistypen kuormituksen nousu vastaavilla jaksoilla oli noin puolet siitä eli 11 % (174 ja 193 kg/km²/v). Vastaavasti fosforin kokonaiskuormitus väheni vastaavalla jaksolla noin 16 % (8,3 ja 7,0 kg/km²/v).



Kuva 18. Vuoden keskilämpötila jaksolla 1978–2018 Ilmatieteen laitoksen Rovaniemen asemalla (Kotiojan ja Ylijoen valuma-alueet, yläkuva) sekä Vihdin asemalla (Teeressuonojan valuma-alue, alakuva).

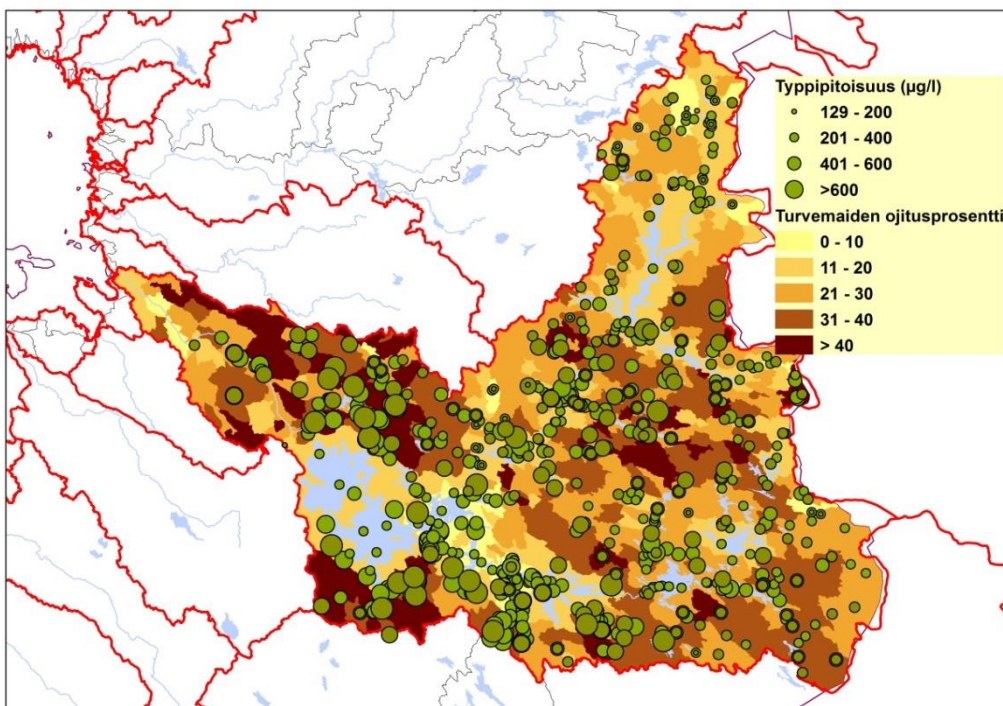


Kuva 19. Tyyden, orgaanisen hiilen ja fosforin kuormitus sekä hydrometeorologiset muuttujat 41 vuoden ajanjaksolla (1978–2018). Kuvissa ovat sekä vuosikeskiarvot että viiden vuoden liukuvat keskiarvot. Sadanta

ja lämpötila ovat keskiarvoja Ilmatieteen laitoksen seitsemältä havaintoasemalta (ks. kuva 3) ja kuormitukset ja valunta 12 alueen keskiarvoja.

7.3 Ojitusten vaikutus typen huuhtoutumiseen Oulujoen vesistöalueella

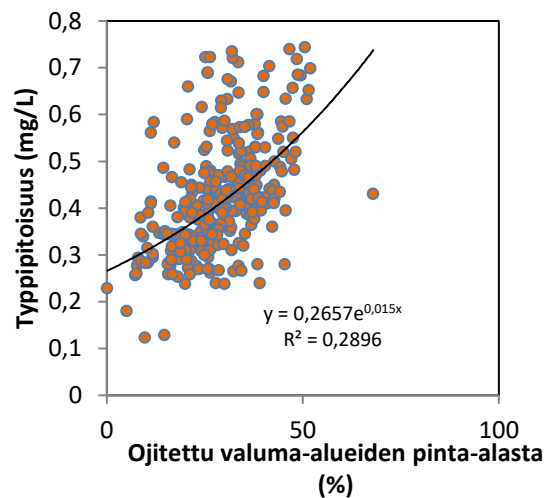
Oulujoen typpivirtaamissa on havaittu tilastollisesti merkitsevä kasvava trendi ajanjaksolla 1995–2016 (Räike ym. 2019), joten alue otettiin erityistarkasteluun jossa pyrittiin arvioimaan, johtuuko nouseva trendi mahdollisesti soiden ojituksista. Oulujoen vesistöalueella intensiivisimmät ojitukset painottuvat pohjoisemman Hyrynsalmen reitin alaosiin, eteläisemmän Sotkamon reitin varrelle sekä Oulujärven ympäristöön (kuva 20). Korkeammat typpipitoisuudet painottuvat enimmäkseen niille osavaluma-alueille, joilla turvemaiden ojitusprosentti on suurin (>65 %), mutta Oulujärven pohjoispuolella on myös korkeampia pitoisuuksia vähemmän ojitetuilla alueilla (kuva 20). Tarkasteltavia valuma-alueita valittaessa peltoja sisältävät alueet rajattiin pois (peltoprosentti sai olla enimmillään 3 %).



Kuva 20. Typpipitoisuuksien keskiarvot Oulujoen vesistöalueella jaksolla 2000–2019. Isompi symbolin koko kuvaa korkeampaa pitoisuutta. Taustakarttana on alueellinen ojitusprosentti soiden ojitustilannetta kuvaavasta paikkatietoaineistosta, joka perustuu Maanmittauslaitoksen maastotietokannan vuoden 2008 ja CO-RINE 2006 -tietokannan maanpeiteaineistoihin.

Ojitukset vaikuttivat typen huuhtoutumiseen alueellisesti ja ojitusprosentti selitti 29 % typpipitoisuuksien vaihtelusta. Jos ojitusprosentti nousi 10 %:sta yli 50 %:iin, niin keskimääräinen typpipitoisuus nousi kaksinkertaiseksi. Valuma-alueiden koko pinta-alasta ojitusprosentti vaihteli välillä 0-68 % (kuva 21).

Pitoisuuksien vaihtelu on luonnollista, koska mukana on hyvin heterogeeninen joukko alueita, joilla on tehty uudisojituksen lisäksi lukuisia muitakin toimenpiteitä (lannoitukset, hakkuut, muokkaukset, kunnostusojitukset), ja siksi yksittäisen toimenpiteen vaikutusta on mahdoton erottaa. Uudisojitukset ovat muuttaneet soita turvekankaiksi, joilla alkuperäinen suolajisto on pitkälle korvautunut kangasmetsäkasvillisuudella, puuston tuotos on kasvanut ja huuhtoumat ovat merkittävästi pienentyneet verrattuna heti uudisojituksen jälkeiseen lähtötilanteeseen. Ojitusalueiden metsien biomassan kasvun haittapuolena voi olla se, että voimistuneet turpeen hajoamisprosessit ja hydrologian muutokset lisäävät typen huuhtoutumista vesistöihin.



Kuva 21. Kokonaistypen pitoisuus valuma-alueen ojitusprosentin funktiona. Ojitusprosentti laskettiin Oulujoen vesistöalueen osavaluma-alueiden koko pinta-alasta.

7.4 Orgaanisen hiilen ja typen ainevirtaamat rannikkovesiin Perämeren valuma-alueelta

Pienten valuma-alueiden ja Oulujoen osavaluma-alueiden lisäksi ojitettujen soiden suhdetta typen ja orgaanisen hiilen kuormitukseen tarkasteltiin Perämeren valuma-alueen mittakaavassa. Tarkasteluun otettiin mukaan Perämeren valuma-alueelta 10 vesistöaluetta, välillä Perhonjoki – Tornionjoki. Tarkastelu painottui Pohjois-Pohjanmaan metsä- ja suovaltaisille vesistöalueille. Joukosta rajattiin pois eteläisemmät maatalousvaltaiset vesistöalueet Lapuanjoesta etelään sekä Kalajoki, joilla peltoprosentti oli yli 12 % (kuva 22a). Toinen tarkastelu (kuva 22b) tehtiin samojen vesistöalueiden turvemaille, jolloin kivennäismaiden pellot ja metsäalueet rajattiin pois.

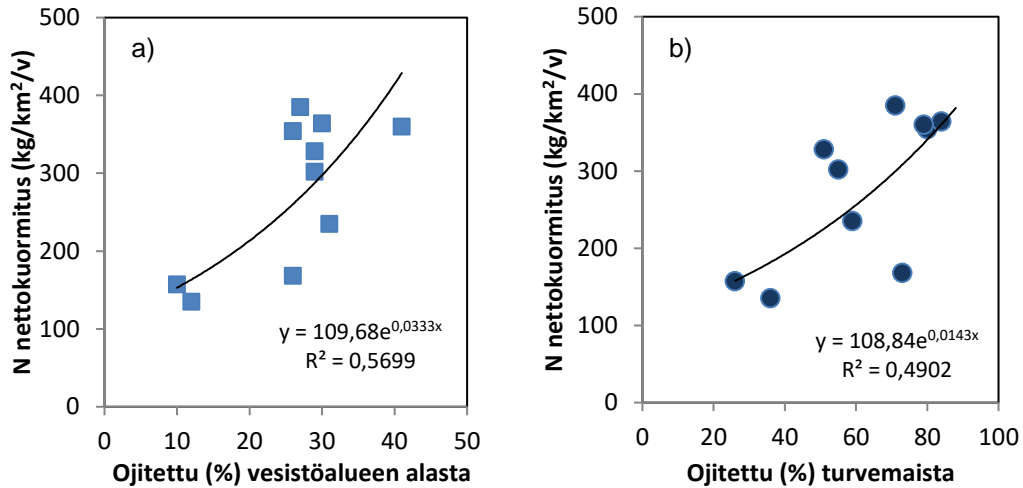
Typen ja hiilen nettokuormitus laskettiin mitatuista ainevirtaamista (Räike ym. 2012, Huttunen ym. 2016), joten se vastaa vesistöalueelta tulevaa kokonaiskuormitusta. Kuvissa 22 ja 23 on siis kuormitusarvioissa mukana jonkin verran myös muun maankäytön vaikutusta, lähinnä maatalouden ja metsätalouden kuormitusta kivennäismailla. Oikeanpuoleisissa kuvissa samoja kuormitusarvioita verrataan turvemaille tehtyjen ojitusten osuuksiin.

Vesistöalueen ojitusprosentti selitti 57 % typpikuormituksen vaihtelusta ja selitysaste pieneni 49 %:iin kun tarkasteltiin typpikuormitusta pelkästään turvemaille. Vastaavasti orgaanisen hiilen kuormitus korreloi merkittävästi ojitusten kanssa, vastaavat selitysasteet olivat 68 % ja 53 % (kuva 23).

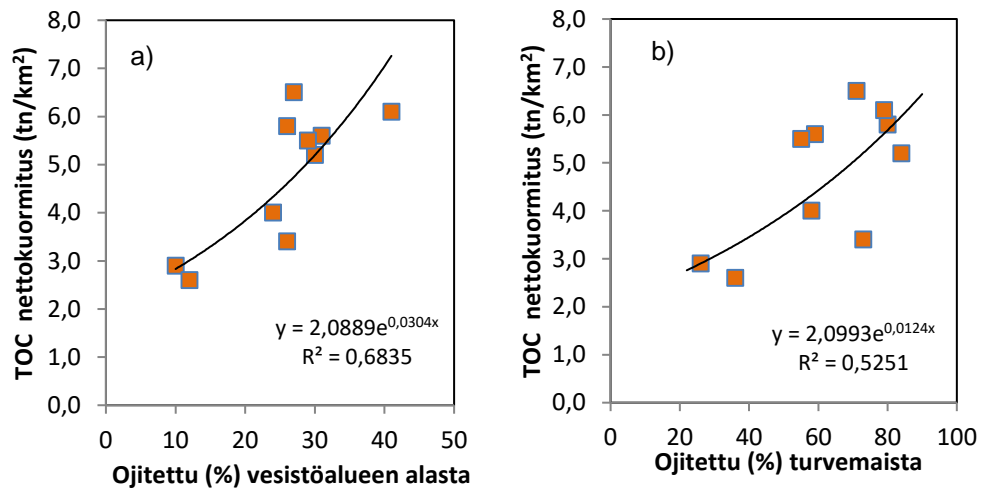
Kahdella pohjoisimmalla alueella, Kemijoki ja Tornionjoki, ojituksen osuudet alueiden pinta-alasta olivat 10 alueesta pienimpiä, eli 10-12 % (26-36 % turvemaista) ja lämpösummat olivat myös pienempiä. Vastaavasti sekä typen että hiilen kuormitukset näiltä alueilta olivat selvästi pienemmällä tasolla.

Oulujoen vesistöalueella (järviprosentti 12 %) typen pidättyminen on näistä alueista suurin, 34 % bruttokuormituksesta (Huttunen ym. 2016). Tämä johtuu alueen isojen järviäiden, erityisesti Oulujärven vaikutuksesta tyyppiä pidättyy järvisedimentaation kautta sekä denitrifikaation kautta järvistä ilmakehään. Oulujoen vesistöalue poikkeaa regressiomalleilla simuloiduista käyristä ja mereen päätyvä typpikuormitus on selvästi pienempi kuin ojitusten osuuden perusteella voisi ennustaa. Typen pidättyminen Suomen vesistöalueilla korreloi positiivisesti järviprosentin kanssa ja on arvioitu suurimmaksi (36-61 %) niillä vesistöalueilla, joissa on isoja järviä (Lepistö ym. 2006).

Ojituksen vaikutus rannikkovesiin päätyvään typen ja orgaanisen hiilen kuormitukseen havaitaan siis selvästi isossa mittakaavassa Perämeren valuma-alueella. Typpivirtaamalla on havaittu nouseva trendi neljällä Pohjanmaan vesistöalueella (Perhonjoki, Siikajoki, Oulujoki ja Kiiminginjoki) (Räike ym. 2019), jotka kaikki ovat mukana myös tässä alueellisessa tarkastelussa.



Kuva 22. Kokonaistypen nettokuormitus 10 vesistöalueelta rannikkovesiin Perämeren alueella, suhteessa a) ojitusprosenttiin vesistöalueen pinta-alasta b) ojitusprosenttiin vesistöalueen turvemaista. Aineistot: Huttunen ym. (2016); GIS -Soiden ojitustilanne -aineisto Maanmittauslaitoksen maastotietokannan 2008 ja CO-RINE 2006 maanpeiteaineistojen avulla.



Kuva 23. Orgaanisen hiilen nettokuormitus 10 vesistöalueelta rannikkovesiin Perämeren alueella, suhteessa a) ojitusprosenttiin vesistöalueen pinta-alasta b) ojitusprosenttiin vesistöalueen turvemaista. Aineistot: Räike ym. (2012; GIS-data kuten kuvassa 22).

7.5 Johtopäätöksiä kuormituksen muutoksesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä

- Metsätalousalueilla kokonaistypen pitoisuuksien keskiarvo oli 1,5-kertainen ja orgaanisen hiilen pitoisuuksien keskiarvo 1,1-kertainen verrattuna luonnontilaisiin kohteisiin. Kokonaisfosforin pitoisuuksissa oli suurempi tasoero kuin kokonaistypen pitoisuuksissa: metsätalousalueilla keskipitoisuus oli lähes kolminkertainen verrattuna luonnontilaisten alueiden keskiarvoon
- Trendianalyysissä havaittiin, että selkeimmin nousussa olivat orgaanisen hiilen pitoisuudet (10/12 valuma-alueita). Kuudella näistä valuma-alueista kokonaistypen pitoisuudet kasvoivat samanaikaisesti. Metsävaltaisilla valuma-alueilla tyyppi on pääosin orgaanisessa muodossa, joten orgaanisen typen ja orgaanisen hiilen pitoisuudet korreloivat vahvasti keskenään. Molemmat kuvaavat humusyhdisteiden huuhtoutumista.
- Kokonaisfosforin pitoisuuksissa ei ollut muutoksia tai trendi oli laskeva (5/12 kohdetta). Laskevat trendit havaittiin metsätaloukskäytössä olevilla alueilla ja johduivat todennäköisesti siitä, että lannoitukset vähentyivät tutkimusjakson aikana merkittävästi.
- Keskilämpötila on noussut voimakkaasti: kaikilla TOP12-valuma-alueilla (12/12) havaittiin tilastollisesti merkitsevä kasvava trendi 41 vuoden ajanjaksolla. Muutos vaihteli välillä 1,4-2,4 °C. Lämpötilan nousun takia hajoamisprosessit maaperässä ovat todennäköisesti kiihtyneet, selittäen orgaanisen aineksen (TOC ja N) pitoisuuksien kasvua ja huuhtoutumista.
- Vuoden sisällä valunnan nousu painottui talvikauteen ja kevääseen. Valunnan kasvu ajoittui valtaosin samalle jaksolle kuin orgaanisen hiilen ja typen pitoisuuksien kasvu (loppusyksy, alkutalvi ja kevät), joten leutoina talvina ainevirtaamat kasvavat sekä kasvavien vesimäärien että pitoisuuksien takia. Lämpötilan nousu painottui kesäkauteen.
- Kun jaetaan 41 vuoden orgaanisen hiilen ja typen kuormitusaikasarjat kahteen osaan - alku- ja loppujaksoksi - niin huomataan, että orgaanisen hiilen kuormitus on noussut merkittävästi: tasolta 6 180 kg/km²/v tasolle 7 380 kg/km²/v, eli 20 %. Kokonaistypen kuormitus nousi vastaavilla jaksoilla jonkin verran vähemmän, 11 % (174 ja 193 kg/km²/v).
- Ojitusten vaikutusta typen ja orgaanisen hiilen kuormitukseen tutkittiin a) pienillä tutkimusvaluma-alueilla (TOP12), b) vesistöalueen osavaluma-alueilla (Oulujoki) ja c) Perämeren valuma-alueen 10 päävesistöalueella. Oulujoen osavaluma-alueilla tutkittiin tässä yhteydessä vain tyyppiä. Vaihtelu pienillä valuma-alueilla oli huomattavan suurta, mutta antoi viitteitä voimakkaammin kasvavista tyyppitrendeistä enemmän ojitetuilla alueilla.

- Oulujoen vesistöalueella isoimmat ojitukset painottuvat pohjoisemman Hyrynsalmen reitin alaosiin, eteläisemmän Sotkamon reitin varrelle sekä Oulujärven ympäristöön. Myös korkeammat typpipitoisuudet painottuvat vastaaville alueille, enimmäkseen niille, joilla turvemaiden ojitusprosentti on suurin (>65 %). Oulujoen osavaluma-alueiden koko pinta-alasta laskettu ojitusprosentti selitti 29 % typpipitoisuuksien vaihtelusta.
- Perämeren valuma-alueen mittakaavassa vesistöalueiden ojitusprosentti selitti huomattavan osan (49-68 %) orgaanisen hiilen ja typen kuormituksen alueellisesta vaihtelusta. Myös turvepeltojen kuormituksella on merkitystä, mutta sitä ei näillä aineistoilla pystytty rajaamaan pois.
- Hajoamisprosessit maaperässä ovat saattaneet voimistua selittäen orgaanisen aineksen pitoisuuksien kasvua. Toisaalta lisääntynyt puuston kasvu ja haihdunta ovat voineet vaikuttaa toiseen suuntaan. Valuma-alueet ovat altistuneet muuttuvan ilmaston eli kohonneiden lämpötilojen ja äärevöityneiden hydrologisten olosuhteiden vaikutuksille. Monien tutkimustulosten mukaan typen ja orgaanisen hiilen virtaamat ovat kasvussa muuttuvan ilmaston myötä, etenkin Perämeren alueella. On siis perusteltua puhua orgaanisen humuskuormituksen "hot spot" -alueesta. Tämä korostaa mahdollisimman kestävien menetelmien tarvetta turvemaiden metsänhoidossa.

8 VEMALA-malli ja sillä tehdyt uudet kuormituslaskelmat

Sirkka Tattari ja Markus Huttunen

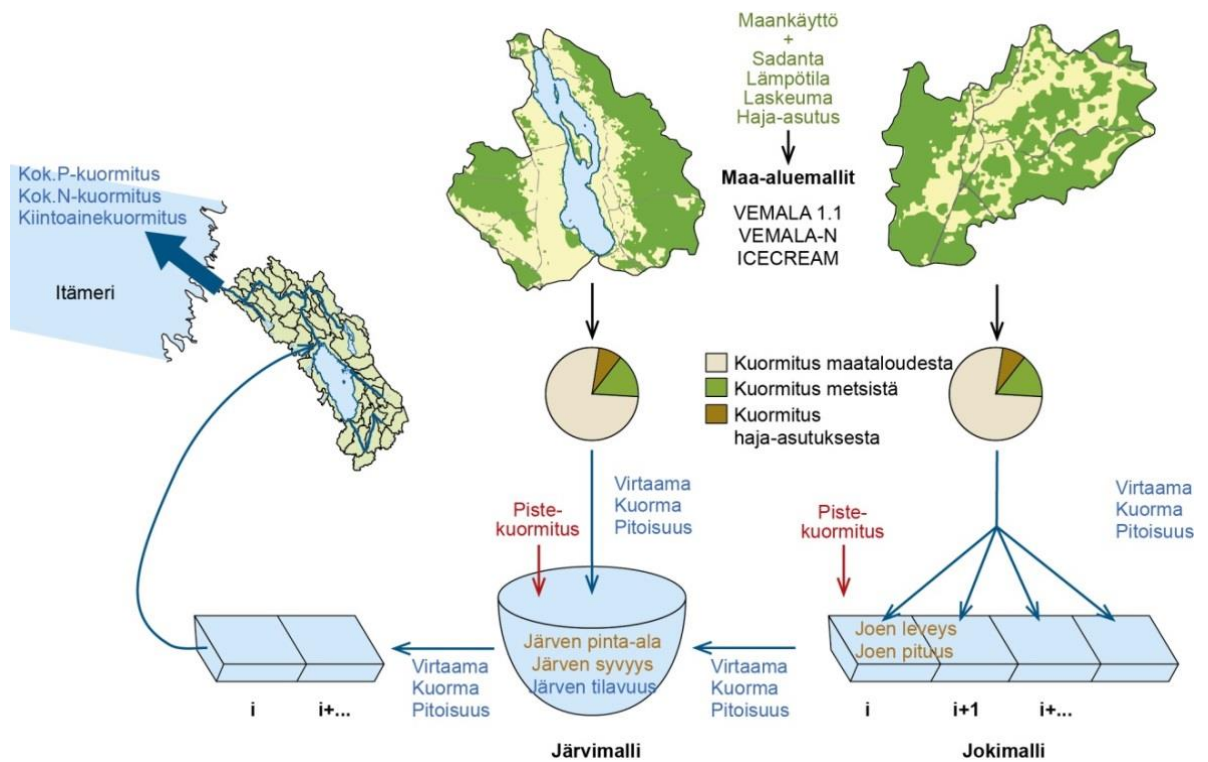
8.1 VEMALA-mallin yleiskuvaus

VEMALA-malli on operatiivinen, koko Suomen kattava ravinnekuormitusmalli vesistöille (kuva 24). Se simuloi ravinteiden prosesseja, huuhtoutumista ja kulkeutumista maalla, joissa ja järvissä. Malli simuloi ravinteiden kokonaiskuormitusta vesistöihin, ravinteiden pidättymistä järviin ja niiden kulkeutumista vesistöissä. Malli kuvaa vesistöön tulevaa kuormitusta pienen uoman tai järven valuma-alueesta alkaen. Malliin sisältyy luonnonhuuhtouman, haja-asutuksen, pistekuormituksen, peltoviljelyn, metsätalouden ja laskeuman aiheuttama kuormituksen laskenta. Malli laskee kuormituksen kulkeutumisen ja pidättymisen vesistössä siten, että ravinteiden ainevirtaamat saadaan koottua suuremmille vesimuodostumille, vesistön osille, kokonaisille vesistöille ja lopulta Suomen vesistöistä Itämereen lähteväksi kuormitukseksi. VEMALA-mallin kuormitus- ja kulkeutumislaskenta sovitetaan ja tarkistetaan käyttäen mitattuja pituisuuksia noin 40 000 havaintopaikalta. VEMALA-malli koostuu pääosin kahdesta osamallista: hydrologiaa simuloivasta WSFS-mallista (Vehviläinen 1994) ja ravinneprosesseja simuloivasta VEMALA-mallista (Huttunen ym. 2016).

VEMALA V1 -malliversiolla laskettuja mallituloksia käytettiin vertailupohjana uusille tuloksille, joissa metsäisten alueiden kuormitus lasketaan uusilla MetsäVesi-hankkeessa kehitetyillä yhtälöillä (ks. luku 5.1). VEMALA V1:ssä metsätalouden kuormituksen laskenta perustuu kolmeen em. toimenpiteeseen ja nettomääräiseen toteutettujen toimenpiteiden vuosittaiseen pinta-alaan, mikä tuottaa kuormituslisäyksen edellisten vuosien kuormitukseen 10 vuoden ajan. Tämän lisäksi VEMALA V1:ssä on metsätalouden aiheuttaman ravinnekuormituksen laskennassa oletettu myös alustava arvio vanhojen ojitettujen soiden aiheuttamasta lisäkuormituksesta (kuvattu jäljempänä). Metsätalouden aiheuttaman kuormituksen laskennassa VEMALA V1:ssä on voimassa seuraavat oletukset.

- Vuonna 2012 uudistamishakkuualueet tarkentuivat ja ne lasketaan metsikkökuvioittain.
- Lannoitus ja kunnostusojitus lasketaan perustuen Suomen metsäkeskuksen aluetason tilastoaineistoon.
- Lannoituksen aiheuttama kuormitus lasketaan erikseen kivennäis- ja turvemaille.

- Kunnostusojituksen kuormitus jaetaan tasaisesti koko ojitetulle alueelle.
- Metsänuudistamisen, kunnostusojituksen ja metsälannoituksen aiheuttama kuormitus lasketaan Launiainen ym. (2014) mukaan.



Kuva 24. VEMALA-mallin kaaviokuva (Huttunen ym. 2016).

Vuosittaiset tiedot metsikkökuviokohtaisista uudistamishakkuista saatiin Suomen metsäkeskuksesta. Aineisto saatiin kertaluontoisesti ja tällä hetkellä aineistoa ei päivitetä. Kunnostusojitusalat ja lannoitusalat saadaan vuosittain Luonnonvarakeskuksen koostamista metsätilastoista (https://stat.luke.fi/mets%C3%A4varat-maakunnittain_fi-1). Metsien pinta-ala kivennäis- ja turvemailla saadaan CORINE aineistosta. Maalaji (mineraali- ja orgaaninen) arvioidaan Geologian tutkimuskeskuksen (1: 20 000 tai 1:50 000) maaperäkartasta. Ojitettujen ja ojittamattomien soiden pinta-alat perustuvat SYKEN paikkatietoaineistoon soiden ojitusilanteesta.

VEMALAN V1 -malliversiossa metsätalouden aiheuttamaa kuormitusta korjattiin Niemisen ym. (2018) uusien tulosten perusteella. VEMALA V1:ssä oletetaan, että vanhojen ojitettujen soiden aiheuttama fosforipitoisuuden kasvu on 15,5 µg/L ja typpipitoisuuden kasvu 395,5 µg/L (suullinen tieto Mika Nieminen).

Luonnonhuuhtouman kuvaus VEMALA-mallissa

Luonnonhuuhtouman suuruutta on Suomessa seurattu 21 pienellä luonnontilaisella valuma-alueella (Mattsson ym. 2003, Kortelainen ym. 2006). Mattssonin ym. (2003) vuosien 1997–1999 mittausten perusteella keskimääräisen typen ja fosforin huuhtoumat ovat keskimäärin 1,3 ja 0,05 kg/ha/v (vaihteluvälit 0,29-2,3 ja 0,02-0,15 kg/ha/v). Orgaanisen kokonaishiilen (TOC) huuhtouma oli keskimäärin 62 kg/ha/v (vaihteluväli 30-100 kg/ha/v). Näitä tuloksia on hyödynnetty luonnonhuuhtouman laskennassa.

VEMALA-mallissa fosforin luonnonhuuhtouman laskenta perustuu oletukseen, että kokonaistypen ja kokonaisfosforin huuhtoutuminen riippuu valuma-alueella olevasta turvemaiden osuudesta (Tattari ja Linjama 2004). Turvemaiden/kivennäismaiden osuutta valuma-alueesta käytetään laskennassa indeksinä, johon integroituu monien muidenkin tekijöiden, mm. ilmaston ja hydrologian osuutta alueellisesta vaihtelusta.

VEMALA V1:ssä fosforin luonnonhuuhtouman arvoja on jouduttu korjaamaan joillakin yksittäisillä alueilla tilanteissa, joissa luonnonhuuhtouman osuus kokonaiskuormituksesta on merkittävä. Käyttämällä yllä mainitulla menetelmällä saatuja arvoja on joissakin tilanteissa saatu vesistön mallinnetuksi ravinnepitoisuudeksi selvästi havainnoista poikkeava arvo ja tällöin luonnonhuuhtouman arvoa on korjattu vastaamaan paremmin mitattua pitoisuutta.

Typen luonnonhuuhtouman laskenta poikkeaa VEMALA-mallissa edellä esitetystä fosforin laskentamenetelmästä. Laskennassa ei erotella erikseen luonnonhuuhtoumaa ja metsätaloudesta aiheutuvaa ravinnekuormitusta. Mallissa nitraattitypen ja orgaanisen typen prosessit kuvataan erikseen. Pinta- ja pohjavesivalunnalle on ominaista erilaiset orgaaniset typpipitoisuudet. Orgaanista typpeä simuloidaan käyttämällä pitoisuus/virtaama suhdetta. Nitraattitypen prosessit simuloidaan käyttämällä puoliprosessipohjaista mallia, jossa lähestymistapa on samankaltainen kuin INCA-mallissa (Wade ym. 2002, Rankinen ym. 2004).

Luonnonhuuhtouman osuus lasketaan mallissa metsämaalta tulevasta kokonaistyyppi-kuormituksesta käyttämällä Launiais ym. (2014) ominaiskuormituslukuja metsäuidistamiselle, kunnostusojitukselle ja lannoitukselle.

8.2 Luonnonhuhuhtouman ja metsätalouden kuormituksen laskenta VEMALA-mallilla käyttäen MetsäVesi-yhtälöitä

Typpi

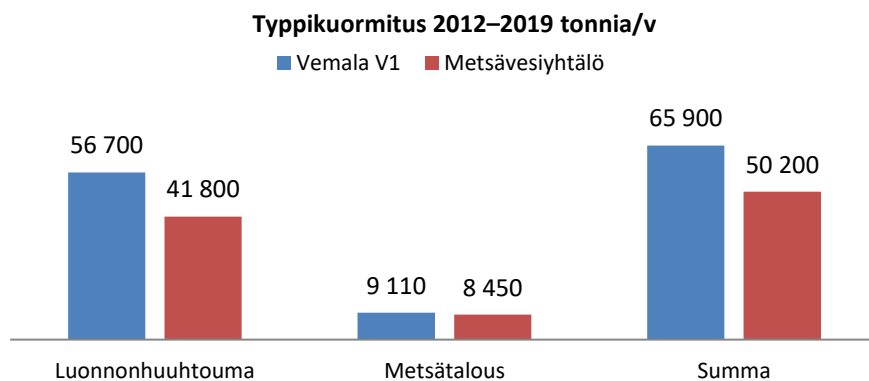
MetsäVesi-hankkeessa kehitettiin uusi valumaveden vuotuista keskipitoisuutta kuvaava yhtälö tyypipitoisuudelle (yhtälö 2, ks. luku 5.1). Selittävinä muuttujina ovat jakson 1961–1990 lämpösumma, ojitus-% ja suo-%. VEMALA:ssa yhtälöä käytetään siten, että yhtälöllä laskettua pitkän jakson keskimääräistä pitoisuutta käytetään valunnan vakiopitoisuutena. Laskennassa ei huomioida vuoden sisäistä pitoisuuden vaihtelua, joka aiheutuu mm. valunnan muutoksista. Yhtälöä käytetään VEMALA:n sisäisen osa-aluejaon tarkkuudella, missä Suomi on jaettu noin 180 000 osavaluma-alueeseen.

Luonnonhuhuhtouma lasketaan uudella MetsäVesi-yhtälöllä siten, että yhtälössä ojitus-% asetetaan nollassa. Selittäviksi muuttujiksi jäävät siis lämpösumma ja suo-%. Aiemmassa luonnonhuhuhtouman yhtälöissä oli käytännössä samat tekijät, mutta lämpösumman sijaan maa jaettiin vain etelä- ja pohjoisosaan. Nykyisessä laskennassa yhtälön muodostamiseen käytetty aineisto on aiempaan verrattuna laajempi.

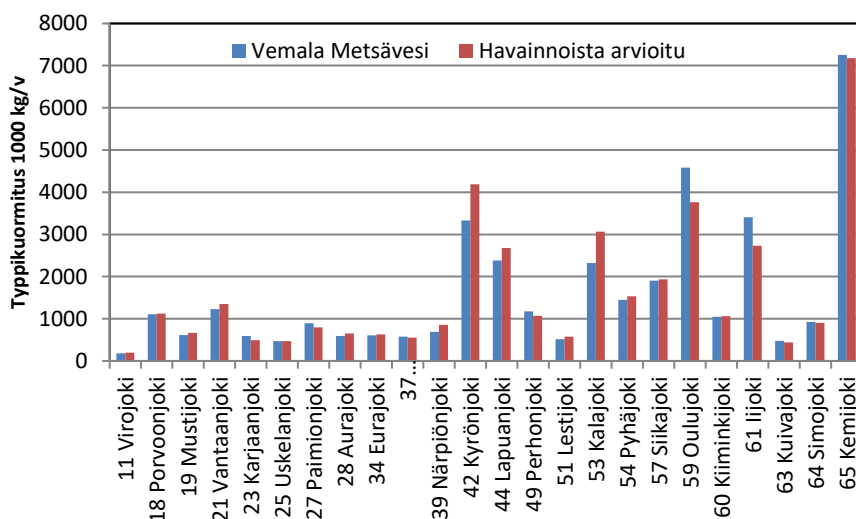
Kuvassa 25 on esitetty tyypikuormitukset laskettuna sekä uudella yhtälöllä että VEMALA V1 -versiolla. VEMALA-laskennassa pinta-ala, jolta tyypikuormitus lasketaan, on noin 28 Mha. Se sisältää kaikki maapinta-alat lukuun ottamatta peltoja. Verrattaessa laskettuja kuormitusarvoja muilla menetelmillä tehtyihin arvioihin, tämä ero pinta-aloissa on syytä ottaa huomioon.

Sekä luonnonhuhuhtouma että metsätalouden tyypikuormitus on MetsäVesi-yhtälöllä laskettuna pienempi kuin VEMALA V1 -arvio. Valtakunnan tasolla ero luonnonhuhuhtouman osalta on vuositasolla noin 15 000 tonnia ja metsätalouden osalta 660 tonnia.

Kuvassa 26 on esitetty MetsäVesi-tyypiyhtälöllä lasketut ja havainnoista arvioidut kokonaistyypikuormitukset Itämereen laskevilla vesistöalueilla. Laskenta sisältää kaikki kuormituslähteet, ei pelkästään metsätaloutta ja luonnonhuhuhtoumaa. Suurimmat poikkeamat (yli 20 %) havaitaan Perämereen laskevissa joissa, Kyrönjoella, Kalajoella, Oulujoella ja Iijoen. Myös Suomenlahteen laskevalla Karjaanjoella poikkeama on yli 20 %. Kyrönjoella ja Kalajoella havaintoihin perustuva arvio on suurempi kuin yhtälöllä laskettu arvio, muilla taas pienempi. Pienimmät poikkeamat (alle 2 %) havaitaan Porvoonjoella, Uskelanjoella, Siikajoella ja Kemijoella (kuva 26).



Kuva 25. Metsätalouden typpikuormitus (luonnonhuuhtouma, metsätalous ja niiden summa) laskettuna VEMALA V1 -versiolla ja VEMALA-mallilla, jossa on käytetty MetsäVesi-yhtälöä.



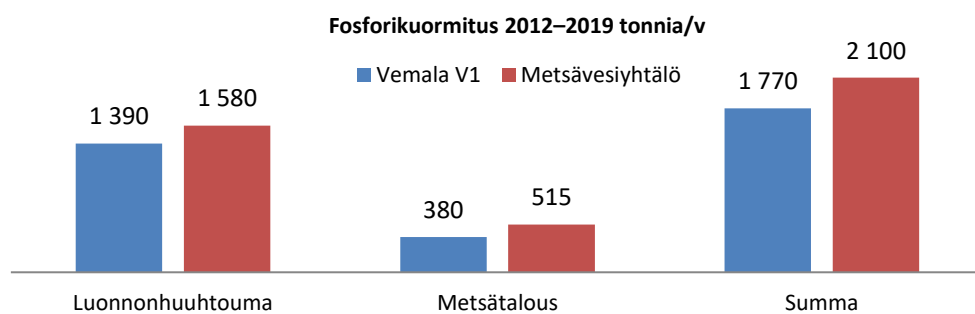
Kuva 26. Kokonaistyppikuormitus mereen laskevilla valuma-alueilla laskettuna VEMALA:lla, jossa on käytetty kokonaistypen pitoisuuden MetsäVesi-yhtälöä ja havainnoista laskettuun arvioon perustuen.

Fosfori

MetsäVesi-hankkeessa kehitettiin uusi valumaveden vuotuista keskipitoisuutta kuvaava yhtälö myös fosforipitoisuudelle (yhtälö 3, ks. luku 5.1). Selittävinä muuttujina ovat jakson 1961–1990 lämpösusma, ojitus-% ja suo-% sekä kalenterivuosi.

Kuvassa 27 on esitetty fosforikuormitukset laskettuna sekä uudella yhtälöllä että VEMALA V1 -versiolla. Samoin kuin typpituloksissa, pinta-ala, jolle kuormitus laskeetaan, on noin 28 miljoonaa hehtaaria.

Päinvastoin kuin typpituloksissa, sekä luonnonhuuhtouma että metsätalouden fosforikuormitus on MetsäVesi-yhtälöllä laskettuna suurempi kuin VEMALA V1 -arvio. Valtakunnan tasolla ero vuotuisessa luonnonhuuhtoumassa on noin 190 tonnia ja metsätalouden kuormituksessa noin 130 tonnia. Kokonaiskuormituksessa ero on noin 330 tonnia.



Kuva 27. VEMALA V1 -versiolla ja siihen integroidulla fosforipitoisuuden MetsäVesi-yhtälöllä lasketut fosforin luonnonhuuhtouma, metsätalouden kuormitus ja näiden summa.

8.3 MetsäVesi -typpi- ja fosforiyhtälöiden käyttöönoton edellyttämät muutokset VEMALA-mallissa

MetsäVesi-yhtälöllä lasketun kuormituksen käyttöönotto VEMALA-mallissa edellyttää mallin kulkeutumis- ja pidättymislaskennan sovittamista käyttäen uutta, MetsäVesi-yhtälöllä laskettua typpi- ja fosforikuormitusta. Tämän jälkeen on tehtävä laskentatulosten vertailua vesistöhavaintoihin erityisesti niissä havaintopisteissä, joissa luonnonhuuhtouman ja metsätalouden osuus kuormituksesta on merkittävä. Vasta vertailun perusteella voidaan arvioida, onko tarpeen korjata muiden kuormituslähteiden arvioita. Korjaus edellyttää joka tapauksessa myös muiden kuormituslähteiden, erityisesti maatalouden osuuden tarkempaa tarkastelua, ennen kuin voidaan sanoa, mihin kuormittajaan uuden laskennan yli-/alijäämä ositetaan.

Niiden havaintopisteiden määrä, missä metsätalouden ja luonnonhuuhtouman osuus on merkittävä, on suuri. Kun saadaan laskentaan käyttöön kaikki havaintopisteet, missä metsätalouden ja luonnonhuuhtouman osuus on esimerkiksi suurempi kuin 70-

75 % kokonaiskuormituksesta, voidaan muiden kuormittajien osuutta arvioida paremmin. Aineistossa on yli 30 000 jokihavaintopistettä, joissa on enemmän kuin 10 vedenlauluhavaintoa vuodessa. Alustavan arvion mukaan ainakin yli 400 havaintopisteessä metsätalouden ja luonnonhuuhtouman osuus on merkittävä.

8.4 MetsäVesi-kuormitusarvioiden ja VEMALA-mallin MetsäVesi-yhtälöiden avulla tuottamien kuormitusarvioiden vertailu

Tutkimuksessa tuotettujen pitoisuusyhtälöiden (ks. luku 5.1) ja pitkän jakson keskimääräisen valunnan, sekä alueen pinta-alan avulla laskettiin kaikilta kolmannen jakovaiheen valuma-alueilta tuleva typen ja fosforin kokonaiskuormitus (taulukko 4 ja 9). Pitoisuusyhtälöissä metsätalouden osuutta kuormituksesta kuvattiin ojitus-% -muuttujalla. Luonnonhuuhtouma laskettiin yhtälöillä laittamalla ojitus-% nollassa ja metsätalouden aiheuttama kuormitus laskettiin kokonaiskuormituksen ja luonnonhuuhtouman erotuksena. Koko Suomen kuormitus saatiin laskemalla yhteen kakkien kolmannen jakovaiheen valuma-alueiden kuormitukset.

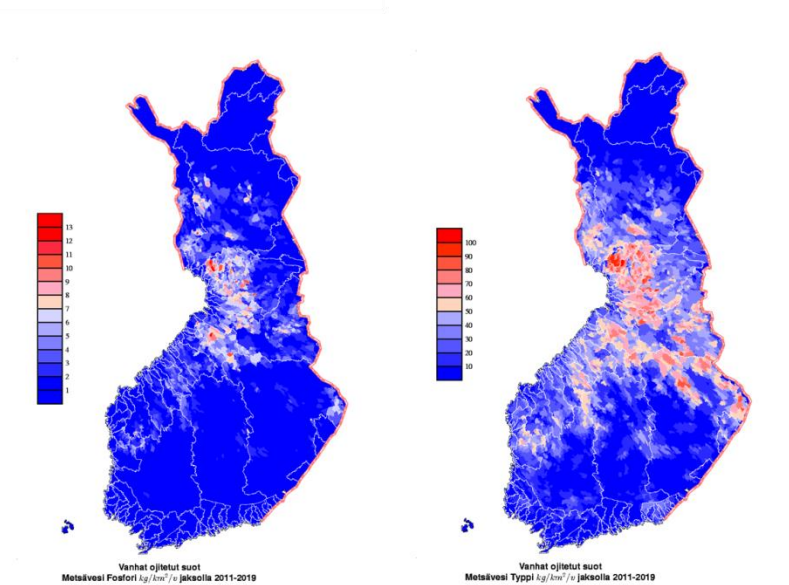
MetsäVesi-yhtälöitä sovellettiin VEMALA-mallissa yllä luvussa 8.2 esitetyn mukaisesti. Taulukossa 9 on esitetty näiden kahden menetelmän tulokset kokonais- ja ominaiskuormissa. Tulosten eroja voidaan käytännössä vertailla vain ominaiskuormitusluku-
jen osalta (kg/ha/v), koska VEMALA:ssa käytetty kokonaispinta-ala on suurempi kuin MetsäVesi-laskennassa käytetty. VEMALA kattaa kaiken maa-alueen, myös rannikon ja saaret. VEMALA laskee päivittäisen kuormituksen, kun taas MetsäVesi-yhtälöillä laskenta tehdään vuositasolla.

Valunta vaihtelee huomattavasti vuosittain eli jos vertaa yhden vuoden valunnalla laskettua kuormitusta pidemmän jakson keskiarvoon, ero voi olla huomattava. VEMALA:ssa tulokset perustuvat vuosien 2012–2019 keskiarvoon, kun taas MetsäVesi-tulokset (luku 5.1) on laskettu pidemmän ajanjakson tilannetta kuvaaviksi. Menetelmien erot huomioon ottaen ominaiskuormissa on verrattain vähän eroja.

Taulukko 9. Metsätaloudesta ja luonnonhuuhtoumasta aiheutuva ravinnekuormitus laskettuna MetsäVesi-yhtälöillä (ks. luku 5.1) ja VEMALA-mallilla samoja yhtälöitä soveltaen.

	Metsä- talous	Luonnon- huuhtouma	Yhteensä metsistä	Metsä- talous	Luonnon- huuhtouma	Yhteensä metsistä
	MetsäVesi-yhtälö			VEMALA-MetsäVesi -yhtälö		
Typpi						
tn/v	7 300	37 300	44 600	8 400	41 800	50 200
kg/ha/v	0,4	1,4	1,9	0,3	1,4	1,8
Fosfori						
tn/v	440	1 320	1 760	520	1 580	2 100
kg/ha/v	0,024	0,051	0,075	0,018	0,056	0,074

Kuvassa 28 on esitetty ojitettujen soiden aiheuttama lisäkuormitus sekä fosforille että typelle. Typen osalta lisäkuormitus on maksimissaan luokkaa 100 kg/km²/v ja se kohdistuu Perämeri – Kainuu akselille. Fosforikuormituksen lisäys kohdistuu myös Perämeren valuma-alueelle ja on maksimissaan 13 kg/km²/v.



Kuva 28. Ojitettujen soiden aiheuttama fosforin (vasen) ja typen (oikea) lisäkuormitus (kg/km²/v) laskettuna VEMALA-mallilla.

8.5 VEMALA-mallinnustulosten epävarmuudesta

Mallitulosten luotettavuus riippuu monesta tekijästä. Näistä tärkeimmät ovat lähtötietojen hyvyys ja hyvä saatavuus, malliin sisältyvien prosessikuvausten oikeellisuus, mallin kalibrointiin ja testaukseen tarvittavan tiedon saatavuus sekä myös mallintajan osaaminen. Lisäksi on tärkeää, että käytettävän mallin luotettavuus on osoitettu asianmukaisesti hyvien mallinnuskäytäntöjen mukaisesti (Tattari ja Puustinen 2017). VEMALA-mallia on kehitetty systemaattisesti jo yli 30 vuoden ajan ja mallikuvauksia on julkaistu tieteellisissä sarjoissa (Huttunen ym. 2016, Korppoo ym. 2017 ja Kämäri ym. 2019). Mallin tuloksia hyödynnetään myös laajasti vesienhoitotyössä. Mallin prosessikuvauksia päivitetään säännöllisesti aina kun uutta tietoa on saatavilla.

VEMALA-mallin parametrit määritellään automaattisella kalibroinnilla, joka minimoi mittauksen ja mallitulosten välisten pitoisuuksien eron. Mitä enemmän mittauksia, sitä paremmin malli saadaan vastaamaan sekä vesistöalueen hydrologiaa että alueella tapahtuvia veden laadun muutoksia. Lisäksi parametrien oikeellisuus varmistetaan vielä antamalla kertoimille raja-arvoja, jotka perustuvat mittauksiin ja kirjallisuusarvioihin. VEMALA-mallilaskennat tehdään keskitetysti niin, että käyttäjät pääsevät käyttöliittymän kautta valmiisiin laskentatuloksiin. Tulokset sisältävät mm. tämänhetkisen kuormituksen jaettuna eri vesimuodostumiin ja kuormituslähteisiin.

Malliin sisältyvät tärkeimmät virhelähteet metsätalouden ja luonnonhuuhtouman osalta:

- Mallin kalibrointi suoritetaan käyttäen hyväksi kaikkia saatavilla olevia veden laatuhavaintoja. Usein havaintopisteen yläpuolinen valuma-alue sisältää useita eri maan käyttömuotoja. Tästä johtuen yksittäisen maankäytön, mm. metsätalouden ja luonnonhuuhtouman osalta tuloksiin sisältyy väistämättä epävarmuuksia, koska yhden maankäyttömuodon alueita on vähän.
- Muu metsätalous (mm. vanhat ojitetut suot): pitoisuudelle ei mallissa oleteta vuodenaikaista vaihtelua, ainoastaan MetsäVesi-yhtälöllä saatu vuoden keskimääräinen pitoisuustaso.
- MetsäVesi-yhtälöiden aineisto perustuu valuma-alueisiin, joissa voi olla myös pienessä määrin muuta maankäyttöä, esim. maatalousmaata (<3 %).
- Yleisesti oletetaan, että jokisuussa laskettu ravinne- ja kiintoainekuormitus on arvioitu luotettavasti. Mikäli joku kuormituslähde, esim. mallinnettu metsätalouden osuus muuttuu, niin vastaavasti myös joku toinen kuormituslähde muuttuu. Tämän tarkastelun pohjalta ei voi sanoa, mikä sektori kasvaa tai vähenee, kun metsätalouden ja luonnonhuuhtouman osuudet muuttuvat.

- Ravinteiden pidättyminen järviin (retentio) on vaikeaa arvioida tuhansissa pienissä järvissä, joista ei ole saatavilla mitään havaintoja. Retention laskenta voi myös olla yksi virhelähde.
- Näkemyksiä VEMALA-mallin kehitystyöstä
- VEMALA-malliin kehitetään parhaillaan prosessipohjaista orgaanisen hiilen huuhtoutumismallia käynnissä olevassa hankkeessa (VEMALA-TOC). Tavoitteena on kehittää mallikuvaus, joka selittäisi eri maankäyttömuodoilta tulevan hiilen huuhtoutumisen vesistöihin.
- MetsäVesi-yhtälöstä saatava keskimääräinen pitoisuustaso voidaan laskea erikseen eri vuodelle, ottaen huomioon erilaiset valuntatilanteet ja lumen sulanta.
- Uudistamishakkuiden pinta-alat metsikkökuvioitasolla tulisi päivittää VEMALA-malliin vuosittain.
- FRESHABIT Life IP -hankkeessa on kehitetty tarkempaa metsämallia yhdistämällä NutSpathy-mallin tulokset operatiiviseen VEMALA-malliin. (<https://metsakeskus.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=982a3b2b4c3845c7a573941dcdbf7fbd>). NutSpathylla lasketaan metsäisten latvaluma-alueiden typpi- ja fosforikuormitusta vesistöön. Laskenta tapahtuu karttahiilassa, jonka yksittäisen ruudun koko on 16 m x 16 m. MetsäVesi-hankkeen tulokset pitäisi ottaa huomioon myös tässä kehityshankkeessa.
- MetsäVesi-yhtälöt tulisi ottaa operatiiviseen käyttöön VEMALA-mallissa.

9 MetsäVesi-hankkeen keskeiset tulokset ja viestit

Leena Finér, Ahti Lepistö, Kristian Karlsson, Antti Räike, Sirkka Tattari, Markus Huttunen, Laura Härkönen, Samuli Joensuu, Pirkko Kortelainen, Tuija Mattsson, Sirpa Piirainen, Sakari Sarkkola, Tapani Sallantaus ja Liisa Ukonmaanaho

9.1 Keskeiset tulokset

MetsäVesi-hankkeen tulokset voidaan tiivistää seuraavasti:

- MetsäVesi-hankkeessa koottiin tietokantaan Luken, SYKEen, Tapio Oy:n ja Oulun yliopiston laaja metsäisten valuma-alueiden yli 40-vuoden veden laadun ja valunnan aineisto. Tietokanta laitetaan avoimesti saataville sekä Luken että SYKE:n sivuille.
- MetsäVesi-hanke tuotti uudet, aiempaa laajempaan aineistoon perustuvat arviot luonnonhuuhtoumasta ja metsätalouden typen, fosforin ja orgaanisen hiilen kuormituksesta. Metsätalouden aiheuttamaa kuormitusta selitti parhaiten valuma-alueen metsäojitusprosentti.
- Uudet metsistä tulevan typen ja fosforin kokonaiskuormituksen arviot ovat samansuuruisia aiemmin 2010-luvulla eri menetelmillä ja eri lähtökohdista tehtyjen arvioiden kanssa, jos yhteen lasketaan metsätalouden kuormitus ja luonnonhuuhtouma. Vuosittaiseksi metsistä ja soilta tulevaksi typen kokonaiskuormitukseksi arvioidaan 44 600 tonnia ja fosforin 1 760 tonnia. Orgaanisen hiilen vuotuiseksi kuormitukseksi arvioitiin 1,8 miljoonaa tonnia.
- Metsätalouden kuormituksen osuus metsistä ja soilta tulevasta typen kokonaiskuormituksesta on uuden arvion mukaan 16 % (7 300 tonnia/v), fosforin huuhtoumasta 25 % (440 tonnia/v) ja orgaanisen hiilen huuhtoumasta 4 % (78 000 tonnia/v). Uudet metsätalouden typen ja fosforin kuormitusarviot ovat noin kaksi kertaa suurempia kuin hallinnossa ja raportoinneissa aiemmin käytetyt arviot: tyyppiä 3 250 tonnia/v ja fosforia 230 tonnia/v (Tilastollinen vuosikirja 2018). Metsätalouden osuus ihmistoiminnan aiheuttamasta typpikuormituksesta nousee 6 %:sta 12 %:iin ja fosforikuormituksesta vastaavasti 8 %:sta 14 %:iin.
- Luonnonhuuhtouma on suurinta Etelä-Suomessa ja metsätalouden aiheuttama ravinnekuormitus Pohjanmaalla ja Kainuussa, missä on paljon ojitettuja suotensia. Perämeren alueella orgaanisen hiilen ja typen kuormitus on suurempaa runsaasti ojitetuilla valuma-alueilla. Tämä asettaa alueellisia haasteita metsätalouden harjoittamiselle ja vesiensuojelulle.

- Metsäojituksen vaikutukset kuormitukseen jatkuvat pidempään kuin aiemmin on arvioitu, mutta tulokset eivät anna näyttöä ojitusiän suorasta vaikutuksesta typen, fosforin ja orgaanisen hiilen kuormitukseen. Yli 60-vuotta vanhoilta ojitusalueilta ei ole riittävästi pitkäkestoista seuranta-aineistoa asian selvittämiseen. Fosforikuormitus on kuitenkin pienentynyt viime vuosiin asti, mikä johtunee suometsien fosforilannoituksen vähenemisestä ja siirtymisestä hidasliukoisiin lannoitteisiin ja tuhkalannoitukseen.
- Metsistä ja soilta tulevan valumaveden typen ja orgaanisen hiilen pitoisuuksissa havaittiin nousevia trendejä 12 valuma-alueen aineistossa jaksolla 1978–2018. Samanaikaisesti ilman lämpötila on noussut, hydrologia on muuttunut ja hapan laskeuma on pienentynyt, mitkä voivat olla selittämässä lisääntyneitä kuormitusta.

9.2 Viestit käytäntöön

MetsäVesi-hankkeen tulokset tukevat tarvetta seurata ravinne- ja orgaanisen hiilen kuormituksen kehitystä ja parantaa metsätalouden käytäntöjä ja vesiensuojelua muutuvassa ympäristössä. Hankkeen tutkijat yhdessä hankkeen ohjausryhmän jäsenten kanssa esittävät seuraavat viestit käytäntöön.

Hankkeen tulokset tulee viedä operatiiviseen VEMALA-malliin, jotta ne saadaan käyttöön vesienhoidon suunnittelussa.

- 1) Hankkeen tulokset tulee viedä operatiiviseen VEMALA-malliin, jotta ne saadaan käyttöön vesienhoidon suunnittelussa.
- 2) MetsäVesi-hankkeen tuloksia tulisi käyttää virallisessa raportoinnissa.
- 3) Typen ja orgaanisen hiilen kuormituksen hallintaan on kehitettävä uusia ratkaisuja.
- 4) Metsätalouden aiheuttama kuormitus on suurinta Perämereen laskevilla ojitetuilla valuma-alueilla. Nämä suuren kuormituksen alueet tulisi tunnistaa tarkemmin ja metsätaloustoimenpiteet sekä muu kuormittava ihmistoiminta tulisi suunnitella ja toteuttaa valuma-alueitasolla huomioiden vesiensuojelu.
- 5) Ojien kunnostamisen kohdekohtaista suunnittelua tulee kehittää eroosiohaittojen vähentämiseksi. Paikkatietoaineistojen täysimääräistä hyödyntämistä tulee kouluttaa ojituksen suunnittelijoille. Kiintoaine-kuormituksen vähentäminen on edelleen tärkein suunnittelussa huomioitava asia. Kiintoaine-kuormituksen hallinnassa on käytettävä kohdekohtaisesti parhaita mahdollisia ratkaisuja.
- 6) Vesiensuojelumenetelmiä, jotka soveltuvat liukoistenkin ravinteiden kiinniottoon tulee kehittää ja niitä tulee hyödyntää erityisesti Perämereen laskevien valuma-alueiden vanhoilla ojitusalueilla, joiden ojia vielä kunnostetaan. Toteutus on mah-

dollista esim. luonnonhoitohankkeina. Vesien hallittu viivyttäminen valuma-alueella ja johtaminen metsätalouden ulkopuolelle jääville alueille tai suojelualueille voi olla menettelytapa, jolla liukoisia ravinteita voidaan sitoa valuma-alueelle. Suunnittelu edellyttää paikkatietoaineistojen hyödyntämistä.

- 7) Ilmastonmuutoksen aiheuttaman kuormituksen lisäyksen hallintaan on varauduttava erityisesti turvemaiden metsänhoidossa. Tämä korostuu ojitetuilla Perämereen laskevilla valuma-alueilla.
- 8) Kuormitusarvioita tulee päivittää vuosittain ottaen huomioon uudet seurantatulokset ja hydrometeorologinen vaihtelu.
- 9) Vesienhoidossa tulisi paremmin arvioida humuskuormituksen vaikutukset vesien tilaan.

9.3 Jatkotutkimustarpeita

MetsäVesi-hankkeen tutkijat yhdessä hankkeen ohjausryhmän kanssa tunnistivat useita jatkotutkimustarpeita:

- 1) Metsätalouden vesiensuojelumenetelmien teho tulisi tuntea paremmin.
- 2) Metsätalouden ohella myös muista kuormitusmuodoista tarvitaan ajantasaiset kuormitusarviot.
- 3) Metsätalouden vesiensuojelumenetelmiä tulee kehittää erityisesti turvemaidella. Tämä kattaa suunnittelussa käytettävien työkalujen ja erilaisten vesiensuojeluratkaisujen kehittämisen.
- 4) On tarpeen käynnistää monitieteinen humuskuormituksen tutkimushanke, jossa pyritään ymmärtämään humuskuormituksen syntymekanismeja, sen merkitystä alueellisesti ja paikallisesti sekä kehittämään sopeutumis- ja hallintamenetelmiä muuttuvassa ilmastossa.
- 5) VEMALA -mallin kehitystyötä on jatkettava mm. orgaanisen hiilen kuormituksen ja ilmastonmuutoksen mallinnuksen osalta.
- 6) Kuormituksen tarkastelu tulisi laajentaa kattamaan myös muita haitallisia aineita kuten kiintoaine ja raskasmetallit.
- 7) Hiilen ja ravinteiden pidättymisestä vesistöihin tarvitaan lisää tutkimustietoa. Ilmiö tunnetaan edelleen hyvin huonosti, vaikka sillä on suuri merkitys mm. arvioitaessa kuinka paljon kuormitusta päätyy rannikkovesiin asti.
- 8) Kaikille metsätaloustoimenpiteille tulisi tuottaa ominaiskuormitusluvut niin, että ne kattavat koko toimenpiteen vaikutusajan.
- 9) Erityisesti tarvitaan pitkäaikaista seurantatietoa yli 60-vuotta vanhojen ojitusalueiden kuormituksesta. Tämä tieto on tarpeen kehitettäessä vesiensuojelumenetelmiä ja metsänkäsittelyvaihtoehtoja.
- 10) MetsäVesi-hankkeen tulokset tulisi julkaista kansainvälisissä vertaisarvioituissa julkaisusarjoissa.

10 Viitteet

Ahtiainen, M & Huttunen, P (1999). Long-term effects of forestry managements on water quality and loading in brooks. *Boreal Environment Research* 4:101–114.

Alasaarela, E & Heinonen, P (1984). Alkalinity and chemical oxygen demand in some Finnish rivers during the periods 1911–1931 and 1962–1972. *Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja* 57:3–13.

Asmala, E, Carstensen, J & Räike, A (2019). Multiple anthropogenic drivers behind upward trends in organic carbon concentrations in boreal rivers. *Environmental Research Letters* 14 124018.

Clark, JM, Bottrell, SH, Evans, CD, Monteith, DT, Bartlett, R, Rose, R, Newton, RJ & Chapman, PJ (2010). The importance of the relationship between scale and process in understanding long-term DOC dynamics. *Science of the Total Environment* 408:2768–2775.

deWit, H, Valinia, A, Weyhenmeyer, GA, Futter, MN, Kortelainen, P, Austnes, K, Hessen, DO, Räike, A, Laudon, H & Vuorenmaa, J (2016). Current browning of surface waters will be further promoted by wetter climate. *Environmental Science and Technology Letters* 3:430–435.

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). Vesistökuormituksen laskenta metsäisiltä valuma-alueilta. *Suomen ympäristö* 10/2010. 33 s.

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, Huttunen, M, Härkönen, L, Joensuu, L, Kortelainen, P, Lepistö, A, Mattsson, T, Piirainen, S, Sarkkola, S, Sallantausta, S, Tattari, S & Ukonmaanaho, L (2019). Metsätalouden vesistökuormituksen arviointimenetelmiä on kehitettävä. *Vesitalous* 5/2019:29–32.

Forsius, M, Räike, A, Huttunen, I, Poutanen, H, Mattsson, T, Kankaanpää, S, Kortelainen, P. & Vuorilehto V-P (2017). Observed and predicted future changes of total organic carbon in the lake Päijänne catchment (southern Finland): Implications for water treatment of the Helsinki metropolitan area. *Boreal Environment Research* 22:317–336.

- Hirsch, RM, Slack, JR & Smith, RA (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research* 18:107–121.
- Hirsch, RM, Alexander, RB & Smith, RA (1991). Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality. *Water Resources Research* 27:803–813.
- Huttunen, I, Huttunen, M, Piirainen, V, Korppoo, M, Lepistö, A, Räike, A, Tattari, S & Vehviläinen, B (2016). A national-scale nutrient loading model for Finnish watersheds – VEMALA. *Environmental Modeling and Assessment* 21(1):83–109.
<http://link.springer.com/article/10.1007/s10666-015-9470-6>
- Hydrologiset havainnot: Vesistöjen virtaama 2018. Suomen ympäristökeskus. Aineisto haettu 9.11.2018. <http://www3.ymparisto.fi/i3/paasivu/fin/virtaama/virtaama.htm>
- Hyvärinen, V, Solantie, R, Aitamurto, S & Drebs, A (1995). Suomen vesitase alueittain 1961–90. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja, Sarja A:220. 68 s. ISBN 951-53-0256-0
- Jokien ainevirtaamat 1990–2016. Suomen ympäristökeskus. Aineisto haettu 22.3.2019.
<https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B0F39CBE3-F0B3-493B-B3CA-F35204BF7590%7D/130625>
- Karhu, K, Fritze, H, Hämäläinen, K, Vanhala, P, Jungner, H, Oinonen, M, Sonninen, E, Tuomi, M, Spetz, P, Kitunen, V & Liski, J (2010). Temperature sensitivity of soil carbon fractions in boreal forest soil. *Ecology* 91(2):370–376.
<http://dx.doi.org/10.1890/09-0478.1>
- Korppoo, M, Huttunen, M, Huttunen, I, Piirainen, V & Vehviläinen, B (2017). Simulation of bioavailable phosphorus and nitrogen loading in an agricultural river basin in Finland using VEMALA v.3. *Journal of Hydrology* 549:363–373.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.050>
- Kortelainen, P & Saukkonen, S (1998). Leaching of nutrients, organic carbon and iron from Finnish forestry land. *Water, Air, and Soil Pollution* 105:239–250.
- Kortelainen, P, Saukkonen, S & Mattsson, T (1997). Leaching of nitrogen from forested catchments in Finland. *Global Biogeochemical Cycles* 11(4):627–638.
- Kortelainen, P, Mattsson, T, Finér, L, Ahtiainen, M, Saukkonen, S. & Sallantausta, T (2006). Controls of the export of C, N, P and Fe from undisturbed boreal catchments, Finland. *Aquatic Sciences* 68(4):453–468.

Kämäri, M, Huttunen, I, Valkama, P, Huttunen, M, Korppoo, M, Tattari, S & Lotsari, E (2019). Modelling inter- and intra-annual variation of riverine nitrogen/nitrate losses from snowmelt-affected basins under agricultural and mixed land use captured with high-frequency monitoring. *CATENA* 176: 227–244. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.019>

Laiho, R, Tuominen, S, Kojola, S, Penttilä, T, Saarinen, M & Ihalainen, A (2016). Heikkotuottoiset ojitetut suometsät – missä ja paljonko niitä on? *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2016:73–93.

Launiainen, S, Sarkkola, S, Laurén, A, Puustinen, M, Tattari, S, Mattsson, T, Piirainen, S, Heironen, J, Alakukku L & Finér, L (2014). KUSTAA –työkalu valuma-alueen vesistökuormituksen laskentaan. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 33/2014. Suomen ympäristökeskus (SYKE), Helsinki. 55 s.

Lepistö, A, Granlund, K, Kortelainen, P & Räike, A (2006). Nitrogen in river basin: Sources, retention in the surface waters and peatlands, and fluxes to estuaries in Finland. *Science of the Total Environment* 365:238–259.

Lepistö A, Kortelainen, P & Mattsson, T (2008). Increased organic C and N leaching in a northern boreal river basin in Finland. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB3029.

Lepistö, A, Futter, M & Kortelainen, P (2014). Almost 50 years of monitoring shows that climate, not forestry, controls long-term organic carbon fluxes in a large boreal watershed. *Global Change Biology* 20:1225–1237. doi:10.1111/gcb.12491.

Metsähallituksen vuosikirjat 1909–1950.

Metsätilastolliset vuosikirjat 1950–2016. Uusimmat ladattu v. 2019 osoitteesta: <https://juku.kuri.luke.fi/handle/10024/539266>

Monteith, DT, Stoddard, JL, Evans, CD, de Wit, HA, Forsius, M, Høgasen, T, Wilander, A, Skjelkvåle, BL, Jeffries, DS, Vuorenmaa, J, Keller, B, Kopacek, J & Vesely, J (2007). Dissolved organic carbon 759 trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature* 450:537–540.

Mattsson, T, Finér, L, Kortelainen, P & Sallantausta, T (2003). Brook water quality and background leaching from unmanaged forested catchments in Finland. *Water, Air and Soil Pollution* 147:275–297.

Mattsson, T, Finér, L, Joensuu, S, Tattari, S, Penttinen, J, Ilvesniemi, H, Hiltunen, T, Makkonen, T, Seppälä, M & Hilska-Aaltonen, M (2014). Metsätalouden vesistöille aiheuttamaa kuormitusta seurataan. *Vesitalous* 5/2014:29–32.

- Mattsson, T, Kortelainen, P, Räike, A, Lepistö, A & Thomas, DN (2015). Spatial and temporal variability of organic C and N concentrations and export from 30 boreal rivers induced by land use and climate. *Science of the Total Environment* 508:45–154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.091>
- Nieminen, M, Sallantausta, T, Ukonmaanaho, L, Nieminen, TM & 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* 229:286.
- Ojansuu, R & Henttonen, H (1983). Kuukauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän johtaminen Ilmatieteen laitoksen mittauksista. Summary: Estimation of the local values of monthly mean temperature, effective temperature sum and precipitation sum from the measurements made by the Finnish Meteorological Office. *Silva Fennica* 17.2:143–160.
- Rankinen, K, Kaste, Ø & Butterfield, D (2004). Adaptation of the Integrated Nitrogen Model for Catchments (INCA) to seasonally snow-covered catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(4):695–705.
- Rankinen, K, Keinänen, H, Enrique, J, & Bernal, C (2016). Influence of climate and land use changes on nutrient fluxes from Finnish rivers to the Baltic Sea. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 216:100–115.
- Ruoho-Airola, T, Verta, M & Korhonen, M (2011). Ilmasta tuleva kuormitus ja sen muutokset Valkea-Kotisen alueella. Julkaisussa: Hämeen ympäristö muutoksessa. *Suomen ympäristö* 34/2011. Ss. 21–26.
- Ruoho-Airola, T, Hatakka, T, Kyllönen, K, Makkonen, U & Porvari, P (2014). Temporal trends in the bulk deposition and atmospheric concentration of acidifying compounds and trace elements in the Finnish Integrated Monitoring catchment Valkea-Kotinen during 1988–2011. *Boreal Environment Research* 19 (suppl. A):31–46.
- Räike, A, Kortelainen, P, Mattsson, T & Thomas, DN (2012). 36 year trends in dissolved organic carbon export from Finnish rivers to the Baltic Sea. *Science of the Total Environment* 435–436:188–201.

- Räike, A, Taskinen, A & Knuuttila, S (2019). Nutrient export from Finnish rivers into the Baltic Sea has not decreased despite water protection measures. *Ambio*.
<https://doi.org/10.1007/s13280-019-01217-7>.
- Sallantaus, T (1985). Orgaanisen hiilen huuhtoutuminen. Julkaisussa: Humus-seminaari. Seminaariraportti. Helsinki. Suomen Akatemian julkaisuja 1985, nro 3:7–14.
- Sallantaus, T (1988). Maaekosysteemit vesistöjen humuksen lähteinä. *Luonnon Tutkija* 90:191–197.
- Silfverberg, K & Moilanen, M (2008). Long-term nutrient status of PK fertilized Scots pine stands on drained peatlands in North-Central Finland. *Suo* 59(3):71–88.
- Smolander, A (2018). Typpilannoitus metsämaan viljavuuden parantajana – kestävyysnäkökohtia maan ja ympäristön kannalta. *Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2018* artikkeli id 10080.
<https://doi.org/10.14214/ma.10080>.
- Suomen metsäkeskuksen aineistot 2010–2016.
- Suomen virallinen tilasto, vuosikirjat 1999–2018 ladattu 10.6.2019 osoitteesta:
<http://www.doria.fi/handle/10024/67152>.
- Tapion vuosikirjat 1929–1950.
- Tattari, S & Linjama, J (2004). Vesistöalueen kuormituksen arviointi. *Vesitalous* 45(3):26–30.
- Tattari, S & Puustinen, M (2017) (toim.). Toimivimmat mallityökalut vesistövaikutusten ja ravinteiden kierrätyksen kustannustehokkaaseen hallintaan. Helsinki, Valtioneuvoston kanslia. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja. 87 s.
<https://vnk.fi/julkaisut/julkaisu?pubid=URN:ISBN:978-952-287-464-1>.
- Tattari, S, Koskiahho, J, Kosunen, M, Lepistö, A, Linjama, J & Puustinen, M (2017). Nutrient loads from agricultural and forested areas in Finland from 1981 up to 2010 – can the efficiency of undertaken water protection measures seen? *Environmental Monitoring and Assessment* 189:95. doi:10.1007/s10661-017-5791-z.
- Tuomi, M, Vanhala, P, Karhu, K, Fritze, H & Liski, J (2008). Heterotrophic soil respiration – comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecological Modelling*, Volume 211, Issues 1–2:182–190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.09.003>.

Veijalainen, N, Lotsari, E, Alho, P, Vehviläinen, B & Käyhkö, J (2010). National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland. *Journal of Hydrology* 391:333–350.

Vehviläinen, B (1994). The watershed simulation and forecasting system in the National Board of and the Environment. Publications of the Water and Environment Research Institute. National Board of Waters and the Environment 17:3–16.

Vuorenmaa, J (2004). Long-term changes of acidifying deposition in Finland (1973–2000). *Environmental Pollution* 128:351–362.

Wade, AJ, Durand, P, Beaujouan, V, Wessel, WW, Raat, KJ, Whitehead, PG, Butterfield, D, Rankinen, K & Lepisto, A (2002). A nitrogen model for European catchments: INCA, new model structure and equations. *Hydrological Earth System Science* 6:559–582.

TIETOKAYTTOON.FI

