



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

METSÄTALOUDEN TOIMENPITEIDEN KUORMITUSLASKURI

Jyri Pääkkönen

Opinnäytetyö
Joulukuu 2018
Metsätalouden koulutus



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Metsätalousinsinööri

PÄÄKKÖNEN JYRI:
Metsätalouden toimenpiteiden kuormituslaskuri

Opinnäytetyö 47 sivua
Joulukuu 2018

Metsäisillä valuma-alueilla tehtävät metsätalouden toimenpiteet lisäävät kiintoaineen ja ravinteiden huuhtoutumista vesistöihin. Kuormitusta aiheuttavia metsätalouden toimenpiteitä ovat ojitukset, metsän peitteellisuuden poistavat uudistushakkuut sekä uudistushakkuiden yhteydessä tehtävät maanmuokkaukset. Tämän hetkisen tietämyksen mukaan haitallisimpina päästöinä voidaan pitää vesistöihin päätyvää fosforia, typpeä ja kiintoainetta. Ravinteilla on vesistöjä rehevöittävä vaikutus, kun taas kiintoaine aiheuttaa vesistöjen samentumista ja pohjan liettymistä. Työn tilaajana toimi Suomen metsäkeskuksen Metsäbiotaloutta kestävästi Pirkanmaalla -hanke. Työn tavoitteena oli tutkia, onko mahdollista kehittää paikkatietoanalyysiin perustuva metsätalouden vesistökuormituslaskuri, jonka avulla voidaan laskea ja esittää eri metsätalouden toimenpiteiden aiheuttamat vuotuiset fosforin, typen ja kiintoaineen kuormitukset valuma-alueittain.

Kuormituslaskurin laskenta perustuu eri metsätalouden toimenpiteille kenttäkokeilla määritettyihin ominaiskuormituslukuihin sekä Suomen metsäkeskuksen ja Geologian tutkimuslaitoksen tietokannoista saataviin sijainti- ja ominaisuustietoihin. Näiden tietojen avulla metsänkäsittelykuvioille voitiin määrittää laskennassa tarvittavat käsittelypinta-alat ja maalajitieto sekä laskea vuosittaiset kuormitustiedot kymmenen vuoden ajanjaksolle. Aiemmistä taulukkolaskentapohjaisista kuormituslaskureista poiketen tavoitteena oli kehittää aivan uudenlainen paikkatietoaineistoja ja todellisia metsänkäsittelykuvioita hyödyntävä laskentamalli, jonka tulokset esitetään selainpohjaisessa, havainnollisessa ja helppokäyttöisessä käyttöliittymässä. Tämän tutkimuksen ja kehitystyön tuloksena syntyi ensimmäinen kehitysversio metsätalouden toimenpiteiden kuormituslaskurista, jolla voidaan tarkastella Pirkanmaan alueen metsätalouden toimenpiteiden typen, fosforin ja kiintoaineen kuormituksia valuma-alueittain kymmenen vuoden aikajänteellä.

Kuormituslaskurin toteuttaminen valtakunnan tasoisena useita eri ympäristö- ja metsäalan organisaatioita palvelevana työkaluna todettiin mahdolliseksi. Metsätalouden toimenpiteiden kuormituslaskentaan liittyy kuitenkin hyvin paljon epävarmuustekijöitä. Jokainen metsänkäsittelykuvio on todellisuudessa ominaisuuksiltaan yksilöllinen, mutta hyvin suurten tietomäärien takia paikkatietoanalyysissä ja laskennassa joudutaan tekemään yleistyksiä. Epätarkkuutta aiheuttavat myös laskennassa käytettävät metsätalouden toimenpiteiden ominaiskuormitusluvut, jotka perustuvat rajalliseen määrään kenttäkokeita. Kiintoaineen ja ravinteiden pidättymistä matkalla vesistöön ei myöskään huomioida. Kuormituslaskurin jatkokehityksessä tausta-aineistojen kattavuutta, tulevaisuuden simulointia ja käyttöliittymää tulee parantaa.

Asiasanat: metsätalouden vesistökuormitus, paikkatietoanalyysi, kuormituslaskuri

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Forestry Engineer

JYRI PÄÄKKÖNEN:
Load Calculator for Forestry Measures

Bachelor's thesis 47 pages
December 2018

Forestry in forest catchment areas increase the leaching of solids and nutrients into the bodies of water. The forestry measures causing loads include drainage and reforestation. According to current knowledge, the most harmful emissions are phosphorus, nitrogen and solid matter. Nutrients causes eutrophication while the solid cause clouding and silting. This work was commissioned by the Finnish Forest Centre. The aim of the thesis was to investigate whether it is possible to develop spatial data based load calculator for forestry measures to calculate and present annual phosphorus, nitrogen and solid loads by catchment areas caused by different forestry measures.

The calculation of the load counter is based on the specific load figures determined by field experiments on forestry operations and the characteristics data obtained from the databases of the Finnish Forest Centre and the Geological Survey of Finland. Unlike previous spreadsheet-based load counters the goal was to develop a completely new kind of spatial analysis-based calculation model whose results are presented in a browser-based illustrative and easy-to-use interface. As a result of this research and development the first version of the load calculator for forestry measures was established. It can calculate Pirkanmaa region's nitrogen, phosphorus and solid loads by catchment area over a ten-year time horizon.

It was found possible to implement and scale load calculator to cover the whole Finland. However, load calculation of forestry measures involves a great deal of uncertainty factors. Each forest processing area has unique properties but due to very large amounts of data generalization needs to be done in spatial data analysis and calculation. Incorrectness is also caused by the specific load figures for forestry measures used in the calculation because those are based on a limited number of field experiments. In the further development of the load counter background coverage future simulation and user interface needs to be improved.

Key words: forestry water load, spatial data analysis, load counter

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	METSÄISTEN VALUMA-ALUEIDEN KUORMITUSLÄHTEET	7
2.1	Metsätalouden kuormitus.....	7
2.1.1	Metsänuudistaminen	8
2.1.2	Kunnostusojitus.....	10
2.1.3	Metsälannoitukset	12
2.2	Taustakuorma.....	13
2.3	Laskeuma	14
2.4	Eroosio	15
3	VESISTÖKUORMITUKSEEN LIITTYVIÄ TIETOLÄHTEITÄ.....	18
3.1	Valuma-alue.....	18
3.2	Metsänkäyttöilmoitus.....	19
3.3	Hakkuuehdotukset	20
3.4	Ojitusilmoitus.....	20
3.5	Ominaiskuormitusluvut	20
3.6	Maaperätieto	22
3.7	Paikkatietoanalyysi	23
3.8	Relaatiotietokannat	24
4	NYKYISET KUORMITUKSEN LASKENTAMALLIT	25
4.1	Ominaiskuormitusmenetelmä	25
4.2	Prosessimalli	25
5	TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO	27
5.1	Tutkimusmenetelmä.....	27
5.2	Aineisto	27
5.2.1	FME datan integraatiotyökalu.....	28
5.2.2	Power BI	30
5.2.3	ArcGIS Online	31
6	TULOKSET	32
6.1	Kehitystyö.....	32
6.2	Kuormituslaskurin toimintaperiaate	33
6.3	Rakenne	34
6.4	Kuormituslaskurin käyttökohteet.....	38
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	40
	LÄHTEET.....	45

1 JOHDANTO

Biotalouden investointien lisääntyessä Suomeen syntyy yhä enemmän puuta käyttäviä biojalostamoja. Uudet tuotantolaitokset tarvitsevat runsaasti raaka-ainetta, joten puun kysyntä ja menekki tulevat kasvamaan. Metsien käytön kannalta tämä tarkoittaa metsien hakkuiden lisääntymistä ja yhä tehokkaampaa metsien hyödyntämistä. Tämän vuoksi metsätalouden toimenpiteiden huolelliseen suunnitteluun ja vesiensuojelutoimenpiteisiin pitää kiinnittää entistä enemmän huomiota. Metsän uudistamisen yhteydessä tehtävät maanmuokkaukset, kunnostusojitukset ja kasvatusmetsien lannoitukset lisäävät metsäisten valuma-alueiden vesistökuormitusta. Metsätalouden toimenpiteiden lisäksi vesistöjä kuormittavat luonnontilaisilta metsä- ja suoalueilta vesistöihin päätyvä luonnonhuuhoutuma, sekä ilmaitse kulkeutuva laskeuma. Metsäisten valuma-alueiden merkittävimmät vesistöjä kuormittavat päästöt ovat fosfori, typpi ja kiintoaine.

Metsätalouden vesistökuormituksen laskentaan on kehitetty jo aiemminkin erilaisia taulukkolaskentapohjaisia laskentatyökaluja, kuten KALLE-laskentaohjelma (Finér ym. 2010, 20) ja KUHA-laskentatyökalu (Hiltunen ym. 2014, 12). Tämän työn kuormituslaskenta perustuu samoihin kenttäkokeilla määritettyihin ominaiskuormituslukuihin, mutta poiketen aiemmista taulukkolaskentapohjaisista laskentatyökaluista käyttäjän ei tarvitse manuaalisesti täydentää laskennassa käytettäviä arvoja, vaan ainoastaan valita alue jolta kuormitustietoja halutaan tarkastella.

Vesienhoidon suunnittelijoilla ja muilla alan toimijoilla on tarve käytännölliselle työkalulle vesistöjen kunnostusten suunnitteluun, jotta voitaisiin tunnistaa potentiaaliset kuormituslähteet nyt ja tulevaisuudessa ja kohdentaa tehostettuja vesiensuojelutoimenpiteitä vesiensuojelun kannalta kriittisimmille alueille.

Tutkimuksen tavoitteena oli kehittää alan toimijoita hyvin palveleva, paikkatietoa tehokkaasti hyödyntävä metsäisten valuma-alueiden vesiensuojelua tehostava työkalu. Kuormituslaskurin keskeisenä tavoitteena on pystyä esittämään fosforin, typen ja kiintoaineen kuormitukset valuma-alueittain havainnollisella ja helppokäyttöisellä tavalla.

Työ pyrkii vastaamaan kysymyksiin: Millä ja miten tällainen työkalu voidaan toteuttaa, mitä aineistoja vaaditaan ja mitä pitää jatkossa kehittää. Kuormituslaskurin toimintaperiaatteen ja tämän kaltaisen vesienhoidon suunnittelun työkalun tarpeellisuuden selventämiseksi, työssä tuodaan myös esille vesiensuojeluun oleellisesti liittyviä peruskäsitteitä sekä vesistökuormitukseen vaikuttavia tekijöitä. Kuormituslaskurin kuormitustuloksia ei analysoida tämän työn yhteydessä, koska käytetyt laskentakaavat ovat samat, kuin aiemmissa taulukkolaskentapohjaisissa kuormituslaskentamalleissa.

2 METSÄISTEN VALUMA-ALUEIDEN KUORMITUSLÄHTEET

2.1 Metsätalouden kuormitus

Metsillä ja soilla on tärkeä rooli veden ja ilman puhdistajina, hiilinieluinä sekä veden pidättäjinä, mutta ne toimivat myös ravinteiden ja kiintoaineen lähteinä. Metsäisillä valuma-alueilla tehtävät metsätalouden toimenpiteet lisäävät kiintoaineen ja ravinteiden huuhtoutumista vesistöihin. Vesistökuormitusta aiheuttavia metsätalouden toimenpiteitä ovat ojitukset, metsän peitteellisyyden poistavat uudistushakkuut sekä uudistushakkuiden yhteydessä tehtävät maanmuokkaukset. Metsätalouden toimenpiteiden kuormitus on sitä suurempaa mitä voimallisemmin metsää ja maaperää käsitellään. Muita kuormitusriskiä lisääviä tekijöitä ovat kasvupaikan korkea viljavuustaso, vesitalouden suuret muutokset sekä vesistöjen läheisyys. (Joensuu ym. 2012, 11, 14, 23.) Metsistä vapautuu ravinteita ja kiintoainetta myös luontaisesti luonnonhuuhtoumana. Metsätalouden kuormituksen ja luonnonhuuhtouman lisäksi ilmasta tuleva laskeuma on merkittävä ravinteiden ja epäpuh- tauksien lähde. Ihmisen toiminnalla on suuri merkitys siihen, kuinka paljon päästöjä syn- tyy, sekä siihen kuinka paljon päästöistä lopulta päätyy maaperään, pohjaveteen, vesis- töihin ja ilmakehään. (Tattari ym. 2015, 29, 31.)

Metsätalouden kuormitus on tyypiltään hajakuormitusta, joka syntyy laajoilla alueilla. Metsätilastollisen vuosikirjan (2014) mukaan Suomen maapinta-alasta 30,4 milj. (ha) noin 86 prosenttia 26,2 milj. (ha) on metsätalousmaata josta 20,3 milj. (ha) on puuntuo- tantoon käytettävissä olevaa metsämaata. (Luke, Metsätilastollinen vuosikirja 2014.) Metsätalouden keskimääräiseksi osuudeksi Suomen vesistöjen kokonaisfosforikuormi- tuksesta on arvioitu noin 6 % ja kokonaistyyppikuormituksesta noin 5 %. Suhteellisen pie- nestä prosentuaalisesta kuormitusosuudesta huolimatta metsätalouden harjoittamisen laaja-alaisuus sekä kuormituksen pitkäkestoisuus lisäävät metsätalouden merkitystä kuor- mittajana. (Joensuu ym. 2012, 11.)

Eri kuormituslähteiden kuormituksen määriä ja suhteita havainnollistetaan taulukossa 1. Kuormitustaulukon luvut ovat eri kuormituslähteiden keskimääräisiä kuormitusarvoja, joissa ei huomioida esimerkiksi maalajeja tai eri metsätalouden toimenpiteiden kuormi- tuksia erikseen. Laskeuman merkitys fosforin ja etenkin typen kuormituksen osalta on

suuri verrattuna metsätalouden ja taustakuorman osuuteen. Metsätalouden kuormituksesta kiintoaineen suhteellinen osuus on hyvin merkittävä muihin kuormituslähteisiin verrattuna.

TAULUKKO 1. Luonnonhuuhtouman, laskeuman ja metsätalouden toimenpiteiden keskimääräiset kuormitukset kg/ha/vuosi.

Metsätalousmetsien taustakuorma (luonnonhuuhtouma) kg/ha/a		
0,05	kg/ha/a	fosforia
1,3	kg/ha/a	typpeä
5,1	kg/ha/a	kiintoainetta
Laskeuma kg/ha/a		
0,1	kg/ha/a	fosforia
3	kg/ha/a	typpeä
0	kg/ha/a	kiintoainetta
Metsätalouden keskimääräinen kuormitus kg/ha/a		
0,05	kg/ha/a	fosforia
0,6	kg/ha/a	typpeä
97	kg/ha/a	kiintoainetta

(Tattari ym. 2015, 34.)

2.1.1 Metsänuudistaminen

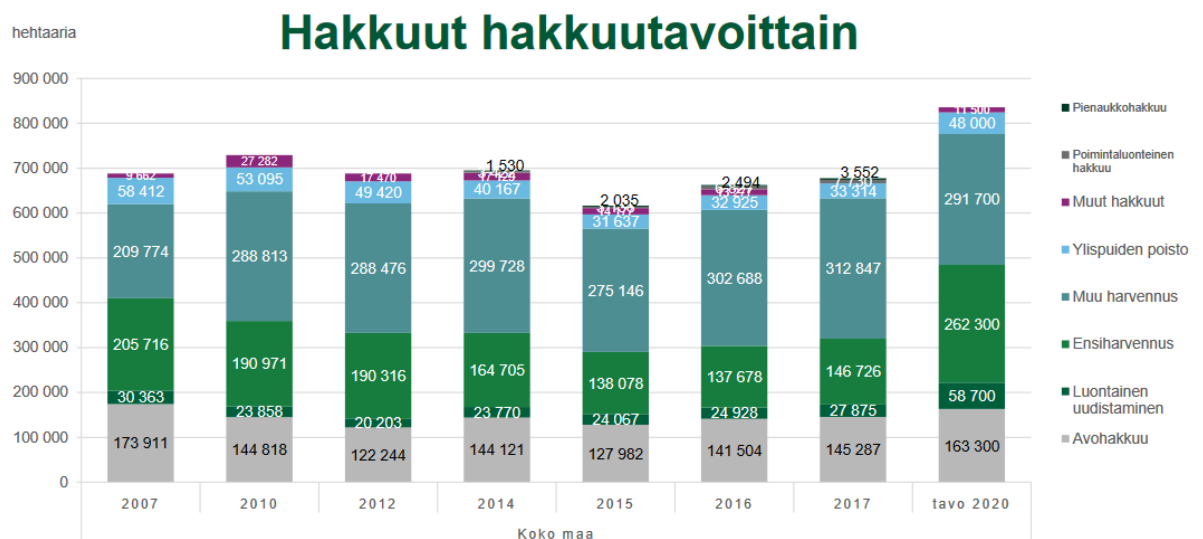
Metsänpeitteellisuuden poistavat uudistushakkuut sekä maanmuokkaus lisäävät typen, fosforin ja kiintoaineen huuhtoutumista vesistöihin. Metsänuudistamisen jälkeinen kuormitus syntyy metsätaloustoimenpiteiden aiheuttaman valunnan ja eroosion lisääntymisestä sekä kasvillisuuden ravinteiden oton ja haihdunnan vähentymisen seurauksena. (Rautio ym. 2015, 226.) Kiintoainehuuhtouma ja kiintoaineeseen sitoutuneiden ravinteiden huuhtoutuminen aiheutuu pääosin uudistusten yhteydessä tehtävistä maanpintaa paljastavista maanmuokkauksista sekä vesistöjen läheisyyteen syntyneistä ajourapainauksista. Ravinteita ja maaperää sitovan kasvillisuuden puuttuessa, maatuista hakkuutähteistä ja maaperästä vapautuu ravinteita, jotka voivat lopulta kulkeutua veden mukana vesistöihin. (Joensuu ym. 2013, 38-39.) Merkittävä osa ravinteista voi kulkeutua maalta vesistöihin kiintoaineen mukana joko rakenteellisena osana kiintoainetta tai kiintoaineen pintaan pidättyneenä (Palviainen ym. 2013, 11).

Metsänuudistamisen jälkeen hakkuutähteiden maatuessa fosfori ja kalium vapautuvat huomattavasti nopeammin kuin typpi. Vapautuvista ravinteista kalium on erityisen herkkä huuhtoutumiselle, mutta siitä ei ole yleensä yhtä suurta haittaa vesistöissä, kuin

minimitekijä fosforista. Kivennäismaa pidättää fosforia tehokkaasti ja typpi sitoutuu heti hakkuun jälkeen hajotustoimintaan, eikä huuhtoudu fosforin ja kaliumin tapaan. Uudistusosalalle muutamassa vuodessa muodostuva kasvillisuus sitoo suuren osan mahdollisesti myöhemmin vapautuvasta typestä. (Joensuu ym. 2012, 17.)

Turvemailla uudistushakkuut lisäävät valumavesien happamuutta sekä humuksen ja kaliumin huuhtoutumista (Joensuu ym. 2013, 39). Sarkkolan (2018) mukaan uudistushakkuut lisäävät typen, fosforin ja orgaanisen hiilen kuormia kolmen vuoden aikana fosforin osalta 1,5 kg/ha, typen osalta 25 kg/ha ja orgaanisen hiilen osalta 200-400 kg/ha Uudistushakkuiden jälkeen pohjaveden pinnan noustessa vettymisen aiheuttamat kemialliset muutokset lisäävät liukoisen typen ja fosforin huuhtoumaa. Maanmuokkaus vuorostaan lisää partikkelimaisten ravinteiden huuhtoumaa. (Sarkkola, S. 2018.)

Avohakkuu on käytetyin metsänuudistamistapa. Vuonna 2017 avohakkuuta tehtiin 145287 hehtaarilla, luontaista uudistamista käytettiin 27875 hehtaarilla ja jatkuvan kasvatuksen menetelmän mukaisia poiminta- ja pienaukkohakkuuta tehtiin 11282 hehtaarilla. Alueellisten metsäohjelmien tavoitteista muodostuva koko maan vuotuinen tavoite kuvaa ohjelmakaudelle 2016-2020 määritettyä vuotuista hakkuumäärä tavoitetta (Kuvio 1).



KUVIO 1, Koko maan vuosittaiset hakkuut hakkuutavoittain, sekä alueellisten metsäohjelmien mukainen valtakunnallinen tavoite (Suomen metsäkeskus. 2018).

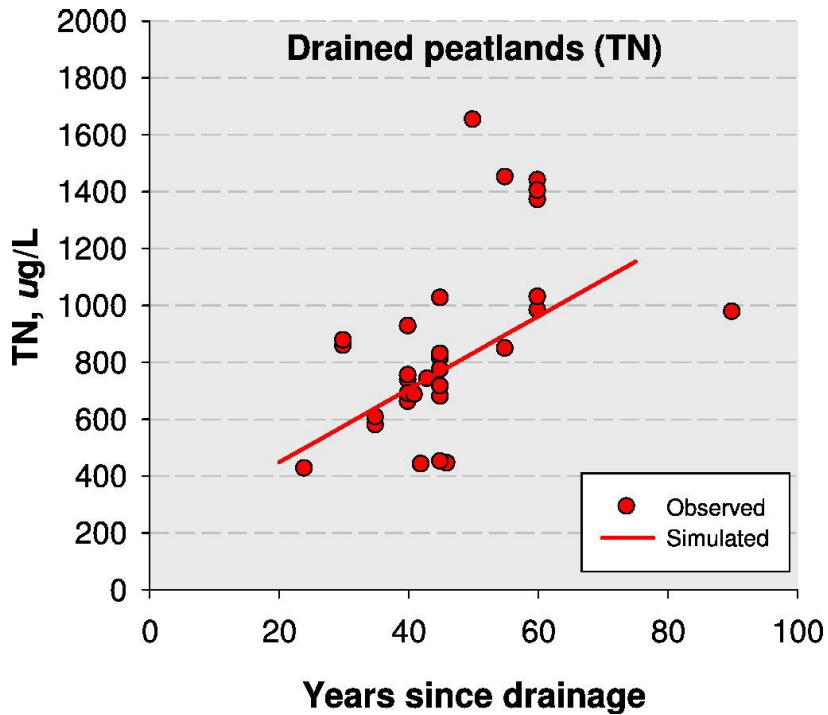
2.1.2 Kunnostusojitus

Kunnostusojituksilla pyritään parantamaan alueen vesitaloutta puuntuotannon kannalta optimaaliseksi. Pohjaveden pinta pyritään laskemaan kasvukauden ajaksi 30-50cm syvyyteen, jonka on todettu takaavan puustolle otolliset kasvu olosuhteet. Vesitalous voidaan pitää kunnossa myös ilman kunnostusojituksia, jos alueelle jätetään riittävästi haihduttavaa puustoa 120-150 m³/ha. (Joensuu ym. 2013, 52-53.)

Kunnostusojitusten aiheuttama kiintoaine huuhtouma on merkittävin metsätalouden toimenpiteiden aiheuttama kuormitustekijä. Kunnostusojitusten seurauksena veden mukana kulkeutuva kiintoaine liettää vesistöjä ja sen sisältämä orgaaninen aines kuluttaa hajotessaan happea. Kiintoaineeseen sitoutuneet sekä liukoisessa muodossa olevat ravinteet typpi ja fosfori rehevöittävät vesistöjä. (Joensuu ym. 2012, 14.) Kriittisimpiä ja haavoittuvimpia kohteita ovat latvavesistöjen pienet purot, lammet ja järvet, joihin ei kohdistu paljon muuta kuormitusta (Finér ym. 2010, 7). Muita vesistöjä kuormittavia tekijöitä ovat metalli ja happamuuskuormitus sekä uusien tutkimusten aiheena ollut humuskuormitus, jolla tarkoitetaan lähinnä liukoisen orgaanisen aineksen huuhtoutumista vesistöihin (Palviainen ym. 2013, 18). Vesistöihin kulkeutuva kiintoaine voi olla usein vesistövaikutuksiltaan merkittävämpi tekijä kuin ravinnekuormitus (Joensuu ym. 2012, 11).

Sarkkolan (2018) tutkimusten mukaan turvemaiilla esiintyvät äärevät vedenpinnan muutokset lisäävät ravinteiden ja kiintoaineen huuhtoutumista. Ääreviä vedenpinnan muutoksia tapahtuu uudistushakkuiden jälkeen pohjavedenpinnan noustessa, sekä kunnostusojitusten yhteydessä pohjavedenpinnan laskiessa. (Sarkkola, S. 2018.)

Turvemaiilla harjoitettavan metsätalouden kuormituksesta nousi esille täysin uusi näkökulma Mika Niemisen ym. (2017) uusien tutkimustulosten myötä. Finér ym. (2010, 15) kuormitusmallin mukaan metsätalouden toimenpiteiden kuormitus on hyvin suurta muutaman ensimmäisen vuoden ajan, jonka jälkeen kuormitus lähtee laskemaan tasaisesti kohti luonnonhuuhtouman tasoa, saavuttaen sen noin kymmenessä vuodessa (taulukko2). Mika Niemisen ym. (2017) uusien tutkimustulosten mukaan valumavesien ravinnepitoisuudet ovat sitä suuremmat, mitä enemmän suon ojittamisesta on kulunut aikaa (kuvio 2). Jos uudet tutkimustulokset pystytään todentamaan, nykyiset metsätalouden kuormitusarvot nousevat turvemaiden osalta moninkertaisiksi ja nykyinen 10-20 vuoden kuormittavuusjakso jatkuu pitkälle tulevaisuuteen.



KUVIO 2. Ojitusalueilta liukenevan typen määrä suhteessa ojituksesta kuluneeseen aikaan (Nieminen ym. 2017, 974).

Suomen soista on ojitettu metsätalouskäyttöön 4,7 miljoonaa hehtaaria, mikä vastaa 54 % soiden kokonaisalasta (Palviainen ym. 2013, 5). Metsäojitusten huippu oli 60-luvun lopulla jonka jälkeen ojitusten määrät ovat laskeneet voimakkaasti. Viimeisimmän valtakunnan metsien inventoinnin mukaan kunnostusojituksia on tehty vuosina 2000-2013 keskimäärin 67430 hehtaarille vuodessa. Alueellisten metsäohjelmien mukaista valtakunnallista kunnostusojitustavoitetta ei tulla nähtävästi saavuttamaan. (Kuvio 3). Osa kunnostusojituksista jätetään tekemättä heikon kannattavuuden vuoksi. (Tattari ym. 2015, 14.)

Kunnostusojitus



KUVIO 3. Koko maan kunnostusojitukset, sekä alueellisten metsäohjelmien mukainen valtakunnallinen tavoite (Suomen metsäkeskus. 2018).

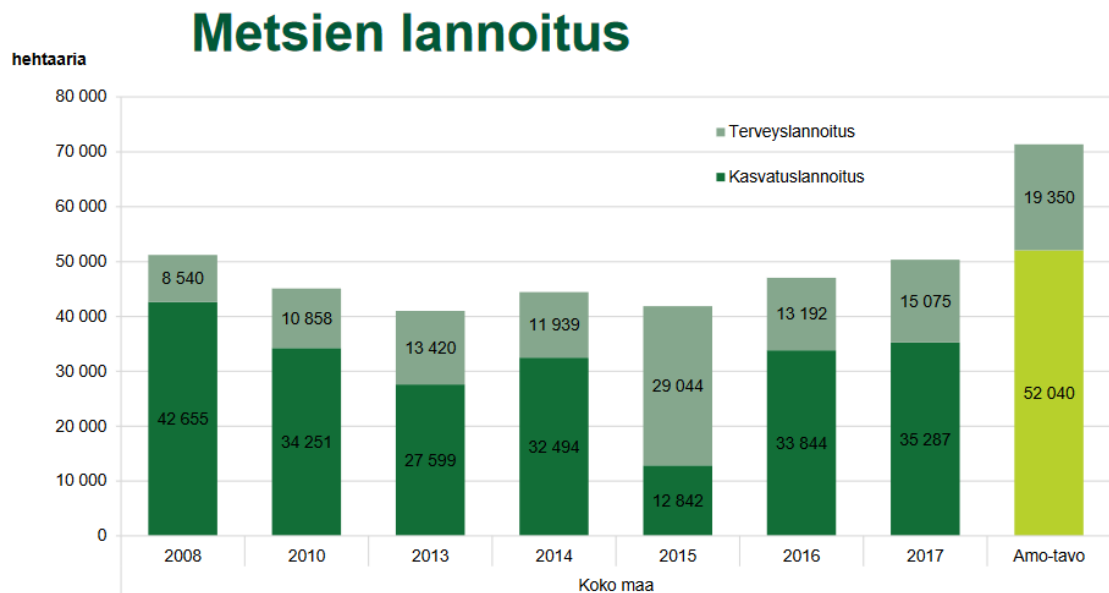
2.1.3 Metsälannoitukset

Metsälannoituksilla pyritään parantamaan metsien kasvua ja korjaamaan ravinne-epätasapainoa. Kasvatuslannoituksella puuston kasvua pyritään parantamaan lisäämällä minimiravinnetta, eli niitä ravinteita jotka rajoittavat kasvua. Terveyslannoituksella pyritään vuorostaan parantamaan metsämaan ravinne-epätasapainoa, joka voi aiheuttaa kasvun taantumaa sekä vakavia kasvuhäiriöitä. Kivennäismaiden ja turvemaiden ravinnetarpeet eroavat selkeästi toisistaan. Kivennäismailla kasvua rajoittaa usein käyttökelpoisen tyyppien niukkuus, kun taas turvemaiden kasvua rajoittavat kivennäisravinteet fosfori ja kalium. Metsikön ravinnetarvetta voidaan arvioida metsätyyppin, puulajin, puutosoireiden sekä puuston kehitysvaiheen mukaan. Tarkka ravinneanalyysi vaatii neulas- ja maa-analyysin suorittamisen. Vesistökuormituksen minimoimiseksi lannoituskohteet ja käytettävät lannoitteet tulee määrittää huolellisesti. Hitaasti liukenevien lannoitteiden käyttö ja oikein mitoitettujen lannoitemäärien takaavat sen, että kasvillisuus pystyy hyödyntämään kaikki ravinteet tehokkaasti, jolloin ravinteita pääsee huuhtoutumaan vesistöihin. (Mälkönen 2003, 182, 188.)

Kivennäismailla metsälannoitusten on todettu aiheuttavat kymmenen vuoden tarkasteluajanjaksolla tyyppien kuormitusta 15 kg/ha/10v. Kivennäismaan alumiini- ja rautayhdisteet sitovat lannoitteiden fosforin kemiallisesti maaperään, joten lannoitteiden fosforin huuhtoutuminen on vähäistä. Turvemaiden fosfori kuormituksen 1,35 kg/ha/10v on todettu

aiheutuvan pääosin epätarkan helikopterilevityksen johdosta metsäojiin päätyvistä lannoitteista. Turvemaille levitettävä puutuhka on todettu sinällään turvalliseksi lannoitteeksi, koska se sisältää kivennäismaan tavoin samoja fosforia sitovia alumiini- ja rautayhdisteitä. (Finér ym. 2010, 15, 19.)

Metsälannoituksien määrät ovat vaihdelleet 1970-luvun voimaperäisten metsänparannustoimenpiteiden kauden lähes 250 000 hehtaarista 1990-luvun muutamaa tuhantaa hehtaariin. Viime vuosina lannoitusalat ovat olleet jälleen kasvussa ollen vuonna 2017 noin 50 000 hehtaaria, mutta alueellisten metsäohjelmien mukaista valtakunnallista lannoitusmäärää tavoitetta ei tulla nähtävästi saavuttamaan (Kuvio 4).



KUVIO 4, Koko maan metsien lannoitukset, sekä alueellisten metsäohjelmien mukainen valtakunnallinen tavoite (Suomen metsäkeskus. 2018).

2.2 Taustakuorma

Luonnontilaisilta metsäisiltä valuma-alueilta tulevaa vesistökuormitusta kutsutaan taustakuormaksi tai toiselta nimeltään luonnonhuuhtoumaksi. Luonnonhuuhtouma on vesistökuormituksen perustaso, johon metsätalouden toimenpiteiden kuormitusta verrataan. Taustakuormituslukujen määrittäminen ilman ihmisvaikutusta on haastavaa, koska täysin luonnontilaisia valuma-alueita ei enää ole. Ihmisen aiheuttamaa kuormitusvaikutusta lisää myös ilmateitse kulkeutuva ilmastolaskeuma. (Launiainen 2014, 9.) Metsäisten valuma-alueiden vuotuinen taustakuorma on kiintoaineen osalta 5,1 kg/ha/vuosi, typen

osalta 1,3 kg/ha/vuosi ja fosforin osalta 0,049 kg/ha/vuosi (Tattari ym. 2015, 34). Kivennäismaan ja turvemaan osuudet vaikuttavat typen ja fosforin taustakuormitukseen. Typen ja fosforin taustakuormitus on hieman korkeampi, kun turvemaan osuus > 30% maa-alasta (Tattari ym. 2015, 36).

Maa-alueille kohdistuvan kuiva- ja märkälasseuman katsotaan olevan osa metsäisten valuma-alueiden taustakuormaa, koska kasvillisuuden ja maaperän oletetaan sitovan laskeuman mukanaan tuomia ravinteita (Tattari ym. 2015, 16).

2.3 Laskeuma

Puiden ja pintakasvillisuuden lehvästöt muodostavat suuren tarttumapinta-alan, jolla metsät sitovat ilmakehän hiukkasia ja puhdistavat ilmaa. Metsiin ilmasta tuleva laskeuma koostuu kaasusta ja hiukkasista. Kuivalasseumassa hiukkaset laskeutuvat kasvillisuuden pinnalle ja kaasut imeytyvät lehtien ilmarakojen kautta kasvien sisälle. Märkälasseumassa hiukkaset ja kaasut reagoivat ilmakehässä olevan kosteuden kanssa muodostaen sateen mukana laskeutuvaa märkälasseumaa. Hiukkaset sisältävät kaikkia niitä aineita joita ilmakehään on päässyt muun muassa teollisuudesta, liikenteestä, ja maaperästä. Hiukkasten koostumus vaikuttaa siihen imeytyvätkö hiukkasten sisältämät alkuaineet lehden sisään vai valuvatko ne sateen mukana maahan. Metsät ottavat tehokkaasti käyttöönsä typen josta on puutetta, mutta rikki, raskasmetallit ja muut sillä hetkellä kasville tarpeettomat alkuaineet valuvat sadeveden mukana maahan, jossa ne sitoutuvat maaperän eri komponentteihin. Maaperän toiminta on hyvin monimutkainen järjestelmä, joka koostuu pintakerroksessa olevasta orgaanisesta aineksesta ja syvemmillä olevasta epäorgaanisesta kivennäismaa-aineksesta. Eri maa-ainesten lisäksi maaperän systeemiin kuuluu kasvien juuristot, niiden kanssa symbioosissa elävät sienijuuret, sekä lukuisat orgaanista ainesta hajottavat hajottajaeliöt. Hajotustoiminnan ja ravinteiden kierrättämisen lisäksi maaperällä on suuri merkitys maaveden puhdistajana. Maaperä suodattaa maavedestä ravinteita ja saasteita veden edetessä kohti pohjavettä. (Rautio, P ym. 2015. 220, 221.)

Maaperän puhdistusmekanismi perustuu erilaisiin sähkövarauksiin. Kivennäismaan rapautuessa ja orgaanisen aineksen hajotessa maahiukkasiin muodostuu negatiivisesti varautuneita kohtia, niin sanottuja vaihtopaikkoja. Vuorostaan suuri osa laskeuman mukana

saapuvista saasteiksi luokiteltavista alkuainesta esiintyvät maavedessä positiivisesti varautuneina kationeina. Pohjaveden kannalta saasteiksi luokiteltavat positiivisen varauksen omaavat kationit kuten ammonium, alumiini, lyijy, kupari ja nikkeli pidättyvät magneetin tavoin maahiukkasten negatiivisiin vaihtopaikkoihin. Metsäekosysteemin puhdistuspalvelu toimii ja pystyy uusiutumaan niin kauan kuin kriittistä kuormitusta ei ylitetä. Tämä raja tarkoittaa pistettä jonka jälkeen metsät ja maaperä eivät pysty enää sitomaan ja käyttämään ravinteita ja epäpuhtauksia, vaan ne pääsevät suodattumattomina pohjaveeseen ja vesistöihin. Liiallinen kuormitus aiheuttaa myös epäsuhtaa ravinteiden suhteessa, joka voi johtaa kasvuhäiriöihin. Kasvuhäiriöt taas vuorostaan pienentävät ravinteiden ottoa, joka pahentaa tilannetta. (Rautio, P ym. 2015. 222, 223.)

2.4 Eroosio

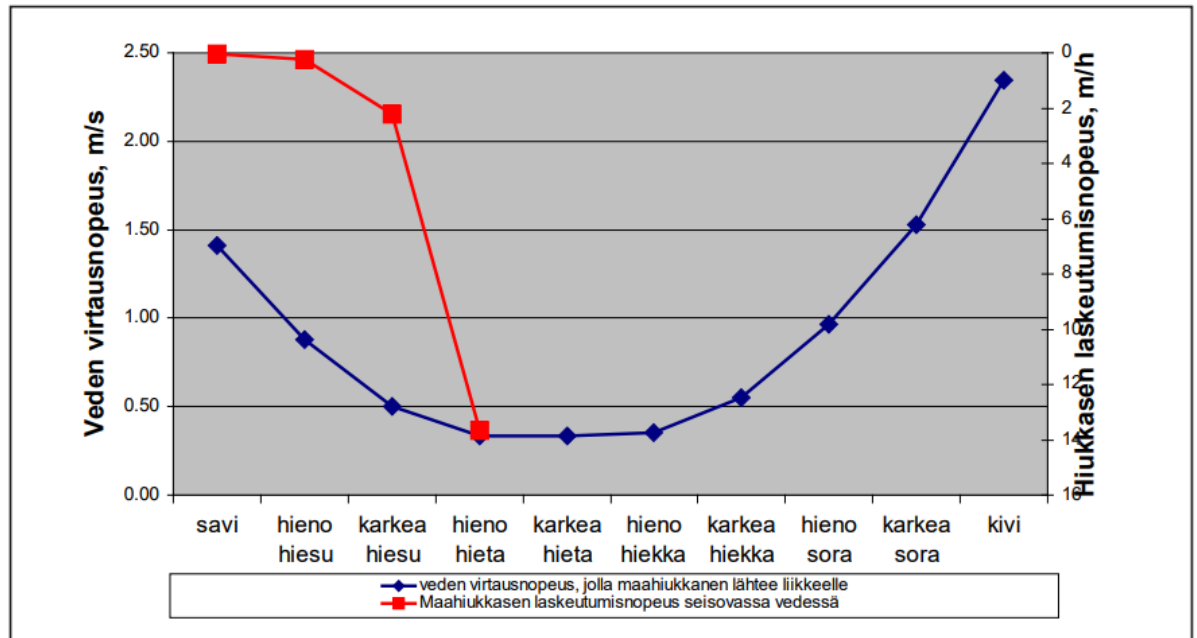
Eroosiolla tarkoitetaan tässä yhteydessä veden aiheuttamaa maanpinnan kulumista sekä maa-aineksen huuhtoutumista ja kulkeutumista. Veden aiheuttama eroosio voidaan jakaa kahteen eri luokkaan uomaeroosioon sekä pintaeroosioon. Uomaeroosiota tapahtuu ojien uomissa virtaavan veden voimasta ja pintaeroosiota tapahtuu sateen iskeytyessä paljastetulle maanpinnalle. (Joensuu ym. 2012, 15.) Eroosiolla on suuri merkitys metsätalouden toimenpiteiden vesistökuormituksen synnyssä.

Paljas rikkoontunut maanpinta, ojitusalueiden ojat, ojaliuskat ja kaivuumassat ovat erityisen alttiita virtaavan veden sekä sateen aiheuttamalle eroosiolle. Eroosioherkkyyteen vaikuttaa oleellisesti veden määrä, alueen topografia sekä maalaji. Jokaiselle maalajille on määritetty eroosioherkkyyttä kuvaava rajanopeusarvo. Rajanopeudella tarkoitetaan suurinta veden virtausnopeutta, jolloin maalajite ei vielä lähde liikkeelle. (Joensuu ym. 2012, 15.)

Tarkasteltaessa kuviota 5 voidaan nähdä, että hiesut ovat hyvin haastavia maalajeja, koska niillä on suhteellisen matala rajanopeus ja liikkeelle lähdettyään ne laskeutuvat hyvin hitaasti. Hiedoilla ja hiekalla on myös matala rajanopeus, mutta niiden laskeutumisnopeus on huomattavasti suurempi. (Joensuu ym. 2012, 16.)

Turvemaiden osalta eroosioherkkyyks kasvaa mitä maatumempaa turve on. Pitkälle maatumeen turpeen huuhtoutuminen lisää erityisesti partikkelimaisen typen ja fosforin huuh-

toumia. Riski huuhtoumille on erityisen korkea aiempaa ojitushistoriaa omaavilla kun-
nostusojitusalueilla, joilla turve on jo ehtinyt maata aiempien ojitusten seurauksena.
(Nieminen ym. 2017, 974.)



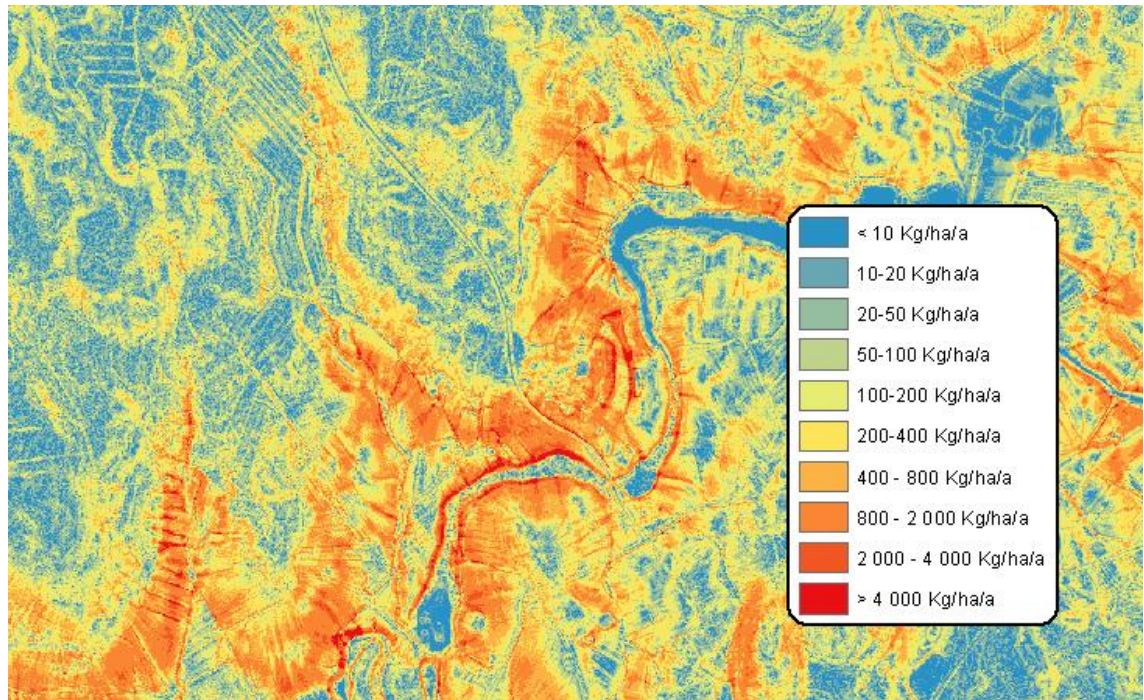
KUVIO 5. Eri maalajien rajanopeudet (sininen kuvaaja) sekä maa-ainesten laskeutumis-
nopeudet (punainen kuvaaja). (Joensuu ym. 2012, 16.)

RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) on hyvin dokumentoitu ja vahvistettu
eroosiomalli, minkä vuoksi sitä käytetään laajasti eri puolilla maailmaa maaperän ja ve-
sien suojelun suunnittelussa. RUSLE- mallin ensimmäinen versio USLE on alun perin
kehitetty USA:ssa maatalouden tarpeisiin jo 1950-luvulla. RUSLE2015 on Euroopan ko-
mission yhteistutkimuskeskuksessa (JRC) luotu paikkatietopohjainen malli, jossa käytetään
Euroopassa kerättyä mittausaineistoa. (Panagos ym. 2015, 438.)

Metsätalouden käyttöön sovelletun RUSLE2015-eroosiomallin vuosittaisen eroosion
määrän (kg/ha/a) laskentakaava $A = R \times K \times LS \times C \times P$ koostuu viidestä eri tekijästä:
sadetekijä R, maaperätekijä K, pinnanmuototekijä LS, maanpeitetekijä C, ihmisen toimet
eroosion estämiseksi P (Lilja, H. ym. 2017, 10-14).

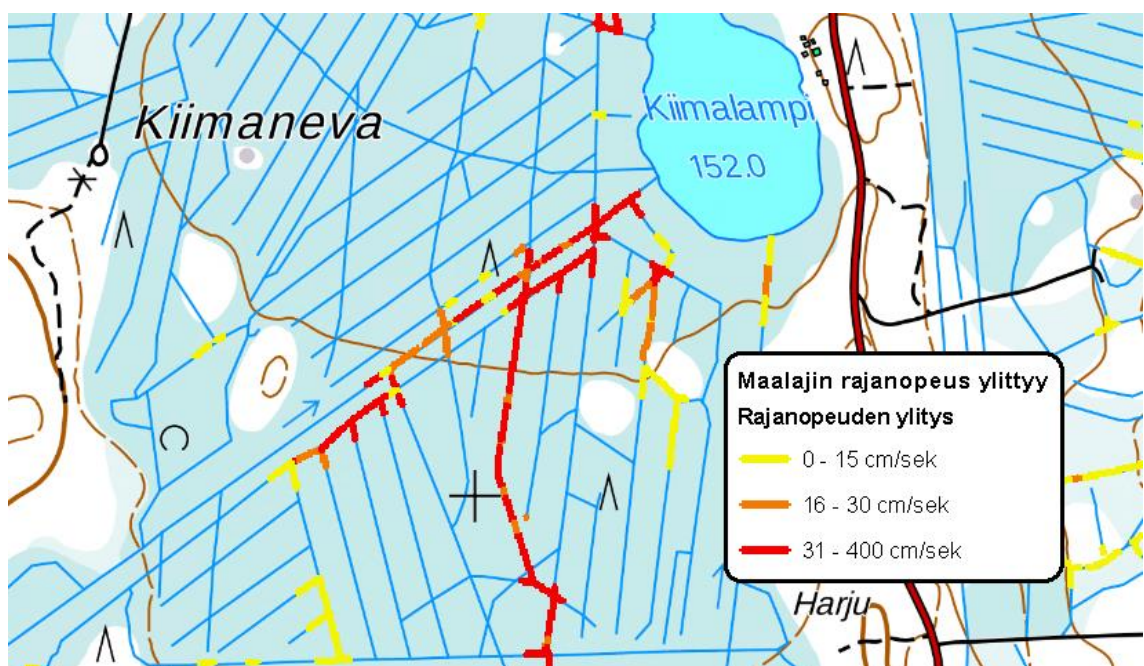
RUSLE2015 eroosiomallia käsitellään tässä työssä hieman laajemmin, koska sitä on mah-
dollista hyödyntää tulevaisuuden kehitystyössä kiintoaineen huuhtoutumisen ja eroosio-
herkkyyden määrittämisessä.

Kuvio 6 esittää RUSLE2015 eroosiomallilla luotua karttaa, joka kuvaa maanmuokkauksen aiheuttaman eroosion suuruutta ensimmäisenä vuonna maanmuokkauksen suorittamisesta (kg/ha/a).



KUVIO 6. Eroosiomalli RUSLE2015 ArcMap paikkatieto-ohjelmistossa tarkasteltuna.

Kuvio 7 esittää uomaverkoston eroosioherkkyyttä. Omaeroosio analyysi perustuu pintavesien virtausmalliin, valuma-alueen pinta-alaan sekä uoman kaltevuuteen. Omaeroosiota tapahtuu, jos laskennallinen virtausnopeus ylittää maalajin rajanopeuden.



KUVIO 7. Ojauomien eroosioherkkyys ArcMap paikkatieto-ohjelmistossa.

3 VESISTÖKUORMITUKSEEN LIITTYVIÄ TIETOLÄHTEITÄ

3.1 Valuma-alue

Valuma -alue on hydrologian sekä vesienhoidon suunnittelun keskeisimpiä käsitteitä ja tarkasteluyksiköitä. Valuma-alueella tarkoitetaan vedenjakajan rajaamaa aluetta, jolta vedet kerääntyvät tarkasteltavaan pisteeseen ja valuvat kohti vesistöä. (Finér, L. 2015, 119.)

Valuma-alueen vesien purkupiste on määritelty tavallisesti järven luusuaan, jokien yhtymäkohtaan, valtakunnan rajalle tai meren rantaan. Valuma-alueella vesi valuu pintavaluntana sekä virtausverkostoissa kohti alavampia kohtia. Pienet latvavesien virtausverkot yhdistyvät edetessään toisiinsa muodostaen suurempia vesimääriä kuljettavia uomia, kunnes vedet purkautuvat kyseisen valuma-alueen purkupisteestä. Vesien kulkeutumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat alueen topografia, maalajit, kasvillisuus sekä metsässä tehtävät toimenpiteet (Hiltunen ym. 2014, 6).

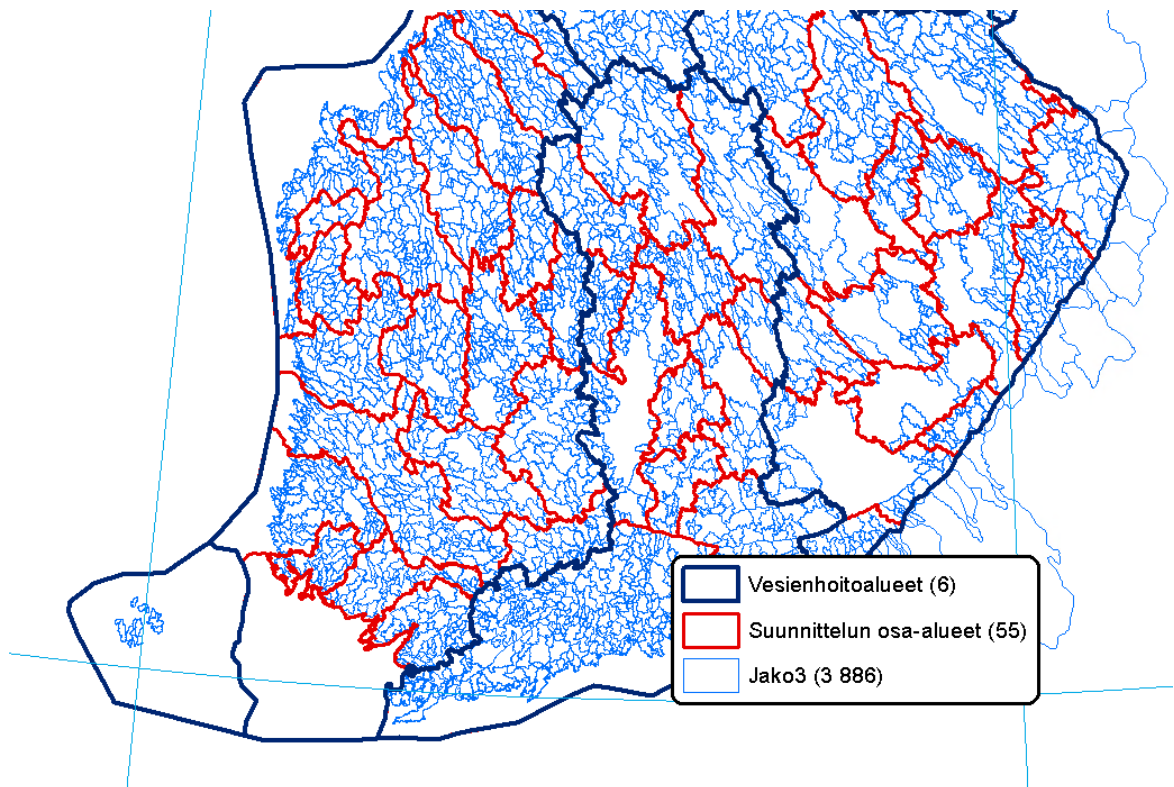
Valuma-alue on vesienhoidon suunnittelun yksikkö ja sen alueella tehdyt toimet vaikuttavat suoraan sen puroon, lammen, järven, joen tai meren tilaan johon valuma-alueen vedet laskevat. (Hiltunen ym. 2014, 15.)

Suomi on jaettu usealla eri tavalla ja tarkkuudella määritettyihin valuma-alueisiin. Ylin jako on päävesistöaluejako, joka koostuu 73 päävesistöalueesta. Päävesistöalueet on jaettu vuorostaan pienempiin osavaluma-alueisiin. Eri valuma-alue jakoja on määritetty eri aikakausina aina sen hetkisten teknisten ratkaisujen ja tietämyksen mukaan. Maanköhoaminen etenkin rannikoilla myös muuttaa jo aiemmin määritettyjä valuma-alue jakoja. (Suomen ympäristökeskus. 2017.)

Muita valuma-alueiden jakovaiheita ovat toisen ja kolmannen jakovaiheen valuma-aluejaot, joista vuonna 2018 on yleisesti käytössä kolmannen jakovaiheen valuma-aluejako. Suomen ympäristökeskus on kehittänyt uutta neljännen jakovaiheen valuma-aluejakoa, joka on edeltäviä valuma-aluejakoja huomattavasti tarkempi. Uuden valuma-aluejaon vuonna 2014 julkaistussa luonnoksessa on määritetty yli 22 000 valuma-aluetta. Uuden

valuma-aluejaon tausta-aineistona on käytetty MML:n 10 metrin pikselikokoon perustuvaa korkeusmallia ja se on toteutettu kokonaan digitaalisilla tuotantomenetelmillä. (Suomen ympäristökeskus. 2017.)

Valuma-alue on sekä rajaava tekijä että tarkasteltava yksikkö. Metsätalouden toimenpiteiden kuormitusta tarkastellaan valuma-alueittain tai usean eri valuma-alueen yhdistelmänä. Useat valuma-alueet yhdessä muodostavat vesienhoidon suunnittelualueita sekä laajempia vesienhoitoalueita (Kuvio 8). Metsätalouden toimenpiteiden kuormituksia tarkasteltaessa kuormitusten määrät esitetään yleensä valuma-alue kohtaisesti.



KUVIO 8. Kolmannen jakovaiheen valuma-aluejako, vesienhoidon suunnittelun osa-alueet, vesienhoitoalueet.

3.2 Metsänkäyttöilmoitus

Metsänkäyttöilmoitus on lakisääteinen metsälakiin perustuva ilmoitus, joka on toimitettava Suomen metsäkeskukseen viimeistään kymmenen päivää ja aikaisintaan kolme vuotta ennen käsittelyalueella aiotusta kasvatushakkuusta, uudistushakkuusta, metsätuhon johdosta tehtävästä hakkuusta ja muusta hakkuusta sekä erityisen tärkeiden elinympäristöjen käsittelystä. (Metsälaki 20.12.2013/1085.) Metsänkäyttöilmoitus voidaan toimittaa Suomen metsäkeskukseen postitse, sähköpostin liitteenä tai metsaan.fi-palvelun

avulla. Metsänkätöilmoitukset tarjoavat tiedot tehdyistä ja tehtäväksi ilmoitetuista hakkuista. (Suomen metsäkeskus. 2018.)

3.3 Hakkuuehdotukset

Metsävaratietoon pohjautuvat hakkuuehdotukset tarjoavat vuorostaan tiedot tulevaisuuden hakkuumahdollisuuksista. Hakkuuehdotukset on määritetty metsikön puustotietoihin ja kasvumalleihin perustuvalla laskennallisella mallilla, joka laskee hakkuuehdotukset aina seuraavalle viisivuotiskaudelle. Malli ehdottaa uudistushakkuuta, kun puusto saavuttaa laskennallisesti kehitysluokan 04 eli kyseessä on uudistuskypsä metsikkö. Simuloidut hakkuuehdotukset ovat metsänkätöilmoituksia epävarmempi tietolähde. Hakkuuehdotukset edustavat tulevaisuuden hakkuupotentiaalia, joiden realisoitumista on vaikea ennustaa. Hakkuuehdotukset ovat nähtävillä metsaan.fi-palvelussa. (Suomen metsäkeskus. 2018.)

3.4 Ojitusilmoitus

Ojitusilmoitus vaaditaan muusta kuin vähäisestä ojituksesta. Vähäiseksi ojitukseksi luokitellaan pienehkön metsäkappaleen ojitus sekä pinta-alaltaan vähäinen ojitus. Ojitusilmoitus tehdään kirjallisena ilmoituksena valtion valvontaviranomaiselle eli ELY-keskukselle vähintään 60 vuorokautta ennen ojitukseen ryhtymistä. Ojitusilmoituksesta tulee ilmetä hankkeen vastaava, hankkeen yleistiedot, vaikutusalue sekä selvitys mahdollisista ympäristövaikutuksista ja tehtävistä vesiensuojelutoimista. (Joensuu ym. 2012, 112, 113.)

3.5 Ominaiskuormitusluvut

Ominaiskuormitusluvut kuvaavat tietyn kuormituslähteen kuten metsän uudistamisen, kunnostusojituksen tai lannoituksen aiheuttamaa ravinne- tai kiintoainekuormituksen lisäystä luonnon vuotuiseen taustakuormaan. (Launiainen ym. 2014, 6.)

Ominaiskuormitusluvut perustuvat parittaisilla samankaltaisilla latvavaluma-alueilla tehtyihin kenttäkokeisiin. Kenttäkokeissa parittaisten valuma-alueiden valuntaa ja kuormitusta seurataan 3-5 vuoden kalibrointikauden ajan, jonka jälkeen toisella alueista toteutetaan metsätalouden toimenpiteitä. Metsätalouden toimenpiteen aiheuttama kuormitus saadaan selville kalibrointikausi-vertailualue menetelmällä vertaamalla käsitellyn alueen

kuormitusta käsittelemättömän alueen kuormitukseen. Lopulliset toimenpidekohtaiset ominaiskuormitusluvut on laskettu usean eri tutkimusalueen ja tutkimusten tuloksista. Laskennan luotettavuuden kannalta joidenkin valuma-alueiden tuloksia ei ole huomioitu, koska ne ovat olleet huomattavan poikkeavia muihin tuloksiin nähden. Ominaiskuormituslukujen yksikkö on kg/ha/vuosi. (Finér ym. 2010, 14.)

Ominaiskuormitusluvut perustuvat kenttäkokeista saatuun tutkimustietoon. Ominaiskuormitusluvut on tuotettu olettaen, että vesiensuojelusta on huolehdittu tämänhetkisten parhaiden käytäntöjen mukaisesti vesistöjen suojakaistoilla, laskeutusaltaiilla, liete-kuopilla, pohjapadoilla ja kaivuukatkoilla. (Finér, L ym. 2010, 15.) Kuten Taulukko 2 osoittaa, metsätalouden toimenpiteet lisäävät kuormitusta vesiensuojelutoimenpiteistä huolimatta. Metsätalouden toimenpiteiden aiheuttama kuormitus on huomattavan suurta ensimmäisten toimenpidettä seuraavien vuosien ajan, jonka jälkeen kuormitus lähtee laskeumaan melko tasaisesti kohti luonnonhuuhtouman tasoa. Turvemaiden uudistamisesta ja etenkin kunnostusojituksista aiheutuva kuormitus on huomattavasti suurempaa kuin kivennäismailla. (Finér, L ym. 2010, 18.)

Kunnostusojitusten kuormittavuus on huomioitu myös kansallisessa metsästrategiassa 2025, missä yhdeksi tavoitteeksi on asetettu pienentää kunnostusojituksissa syntyvää kiintoainekuormitusta (Maa- ja metsätalousministeriö. 2015, 40).

TAULUKKO 2. Eri metsätalouden toimenpiteiden ominaiskuormitusluvut 10 vuoden tarkasteluajanjaksolta.

Vuosia toimenpiteestä	Uudistaminen Kivennäismaa N TYYPPI kg/ha/a	Uudistaminen Turvemaa N TYYPPI kg/ha/a	Uudistaminen Kivennäismaa P FOSFORI kg/ha/a	Uudistaminen Turvemaa P FOSFORI kg/ha/a	Kunnostusojitus Turvemaa N TYYPPI kg/ha/a	Kunnostusojitus Turvemaa P FOSFORI kg/ha/a	Kunnostusojitus KIINTOAINE kg/ha/a
1	0,950	4,300	0,056	0,100	0	0,420	420
2	0,820	4,300	0,044	0,100	0	0,140	140
3	0,820	4,300	0,037	0,100	0	0,112	112
4	0,770	3,700	0,038	0,087	0	0,084	84
5	0,620	3,085	0,024	0,074	0	0,070	70
6	0,350	2,469	0,011	0,061	0	0,056	56
7	0,330	1,854	0,013	0,048	0	0,042	42
8	0,200	1,238	0,013	0,035	0	0,028	28
9	0,160	0,623	0,009	0,023	0	0,014	14
10	0,007	0,007	0,006	0,010	0	0,007	7
keskiarvo kg/ha/a	0,50	2,59	0,03	0,06	0,00	0,10	97,30
Kuormitus kg/ha/10a	5,03	25,87	0,25	0,64	0,00	0,97	973,00

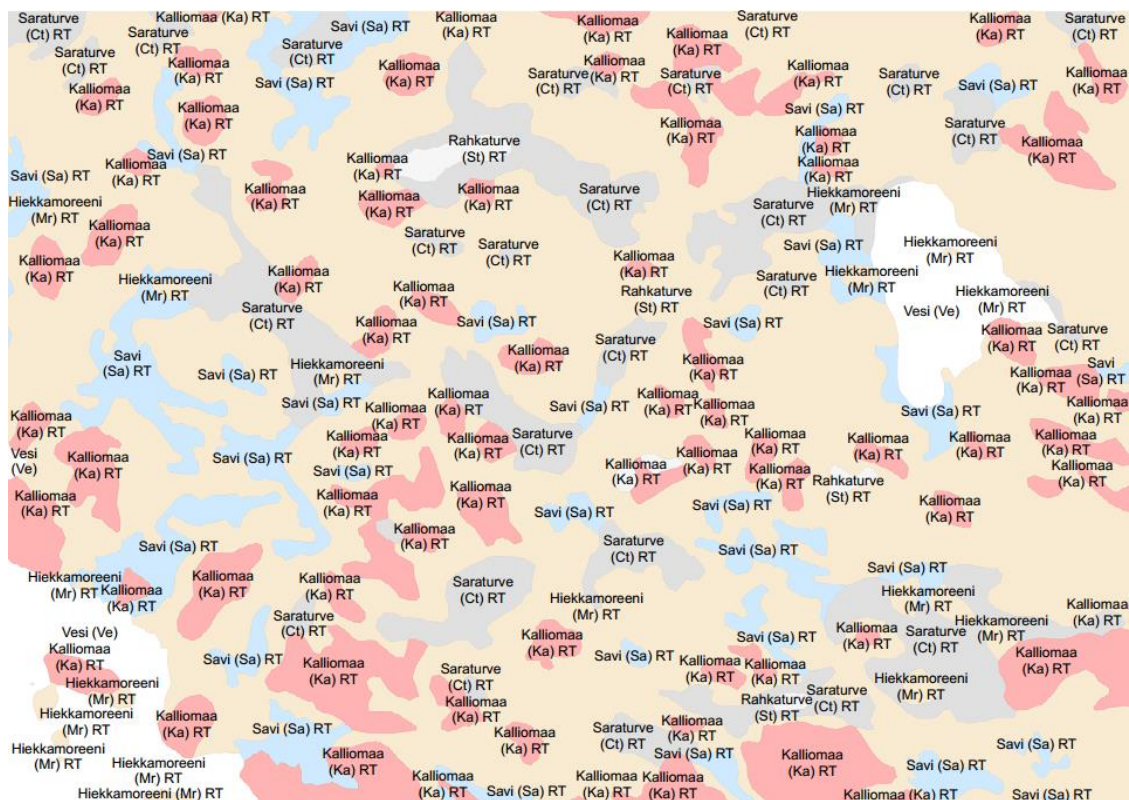
(Finér, L ym. 2010, 15.)

Ominaiskuormituslukuihin perustuvan ominaiskuormitusmenetelmän avulla vuotuinen vesistökuormitus saadaan laskettua kuormittavan toimenpiteen pinta-alan ja ominaiskuormitusluvun tulona. Kokeellisiin tutkimuksiin perustuvia ominaiskuormituslukuja hyödyntävän ominaiskuormitusmenetelmän etuna on sen helppokäyttöisyys ja prosessimalleja vähäisempi lähtötietojen tarve. (Lauhiainen ym. 2014, 6.)

3.6 Maaperätieto

Geologian tutkimuskeskuksen maaperäkartta 1:200 000 (Kuvio 9) kattaa koko suomen maaperätiedon yhtenäisesti ja saumattomasti. Maaperäkartta perustuu vuosien 2003–2009 aikana kartoitettuun aineistoon. Aineiston muodostamiseen on käytetty yleistettyä 1:20 000, 1:50 000, 1:100 000 maaperäkarttaa ja 1:200 000 mittakaavaista uustuotantoa, joka perustuu aiempien aineistojen tulkintaan ja maastokartoitukseen. (Geologian tutkimuskeskus. 2018.)

Maaperätieto on tärkeä tausta-aineisto metsätalouden toimenpiteiden kuormituksia laskettaessa, koska kuormituksen syntymekanismit ja suuruus vaihtelevat suuresti riippuen siitä, toimitaanko turvemaalla vai kivennäismaalla (Taulukko 2).



KUVIO 9. Geologian tutkimuskeskuksen maaperäkartta 1:200 000 ArcMap:ssa.

Maaperäkartassa maalajit on yleistetty pääryhmiin, joiden luokittelu perustuu valtakunnalliseen rakennustekniseen luokitukseen. Kartassa on kuvattu avokallioalueet, ohutpeitteiset kalliomaat, tuntureiden rakat, kivikot, pintaosan turvekerrostumat, karkearakeiset lajittuneet (karkea hieta, hiekka ja sora), hienorakeiset lajittuneet (hiesu ja hieno hieta), savet, liejuiset hienorakeiset maalajit ja liejut. (Geologian tutkimuskeskus. 2018.)

3.7 Paikkatietoanalyysi

Paikkatieto on tietoa, johon on sidottu sijaintitieto. Paikkatietoaineisto koostuu koordinaatistoon sidotusta sijaintitiedosta sekä kohteen ominaisuustiedoista jotka kuvaavat kohdetta tai antavat sille muita määreitä (Fazal 2008. 7,8). Paikkatiedon sijaintitiedot x ja y ilmoittavat kohteen kaksiulotteisen sijainnin, z määrittää kolmiulotteisen sijainnin ja mahdollinen aikamääre antaa kohteelle neljännen ulottuvuuden. (Ervasti 1998, 31.)

Paikkatieto-ohjelmistoilla voidaan havainnollistaa paikkaan sidottua tietoa. Paikkatieto voidaan esittää visuaalisesti paikkatietojärjestelmässä rasteri tai vektori muotoisena tietona. Vektorimuotoinen tieto voidaan esittää pistemäisenä, viivamaisena tai aluemaisena kohteena. Rasterimuotoinen tieto on säännöllisistä ja tasasuuruista ruuduista (pikseleistä) muodostuvaa kuvamuotoista paikkatietoaineistoa. (Fazal. 2008, 108-110.)

Paikkatietoanalyysi on yleisesti käytetty termi, kun puhutaan paikkatiedon ja paikkatietojärjestelmien (GIS) käytöstä. Paikkatietoanalyysissä voidaan hyödyntää paikkatieto-ohjelmiston tarjoamia useita eri tekniikoita ja malleja, joilla paikkatietoa voidaan analysoida, muokata tai tuottaa aivan uutta paikkatietoaineistoa. (Ervasti 1998, 31.) Paikkatietoanalyysi voi perustua esimerkiksi paikkatiedossa olevien karttakohteiden sijaintitietojen keskinäisiin suhteisiin, leikkauksiin, rajauksiin tai päällekkäisyyksiin. Paikkatietoanalyysiä voidaan tehdä myös ominaisuustietojen perusteella esimerkiksi hakulausekkeiden, relaatioiden sekä tietoa havainnollistavien teemoitusten avulla. (Safe Software Inc. 2018.)

3.8 Relaatietietokannat

Relaatietietokannassa data tallennetaan taulukoihin ja fyysisiin tiedostoihin. Relaatietietokannan taulukoissa jokaisella rivillä on uniikki rivitunniste (avain) ja sarakkeissa kyseisen sarakkeen tietotyypin mukainen tieto. Relaatikannoissa yksi tieto tallennetaan vain kertaalleen yhteen paikkaan ja tieto on aina hyödynnettävissä uniikin avaimen avulla. Relaatiot eri taulukoiden ja taulukoiden tietojen kesken muodostetaan näiden uniikkien avainten avulla. Tietokantaan tallennetaan tieto eri taulukoiden relaatioista ja koko kokonaisuuden hallinnasta vastaa tietokannan hallintajärjestelmä. Tietokantojen tiedoista voidaan muodostaa laajoja tietokokonaisuuksia eri käyttötarkoituksiin. Tietokannat mahdollistavat hyvin järjestelmällisen ja tehokkaan tavan säilyttää suuria määriä dataa. (McGregor ym. 2012, 2.)

4 NYKYISET KUORMITUKSEN LASKENTAMALLIT

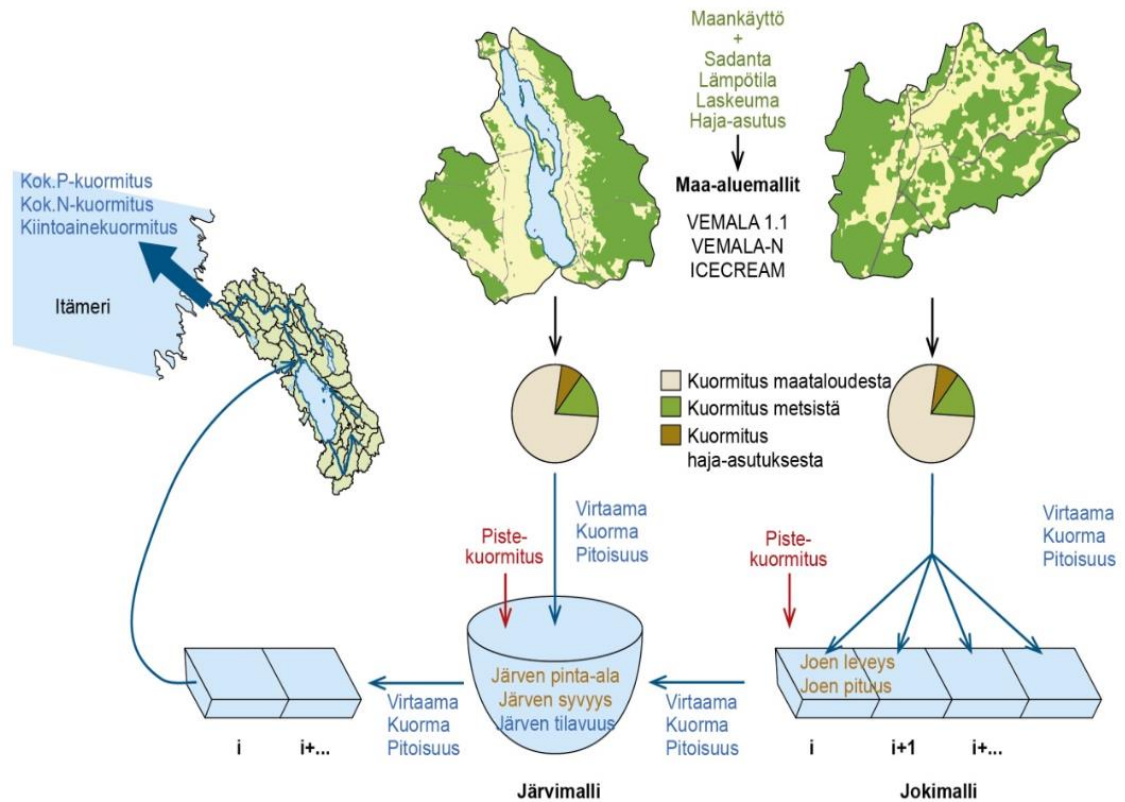
4.1 Ominaiskuormitusmenetelmä

Metsätalouden vesistökuormituksen laskemiseksi on kehitetty useita erityyppisiä laskentamenetelmiä, jotka voivat perustua esimerkiksi metsätalouden toimenpiteille määritettyihin ominaiskuormituslukuihin tai vaihtoehtoisesti ravinteiden simuloituihin prosesseihin. KALLE-laskentamenetelmä on metsätalousmaalta tulevan luonnon taustakuorman ja eri metsätaloustoimenpiteiden aiheuttaman kuormituksen laskemiseksi kehitetty typpi-, fosfori- ja kiintoainekuormituksen laskentamenetelmä, joka on kehitetty valtakunnallisia, vesistöalueryhmittäisiä ja vesienhoitoalueittaisia laskelmia varten. KALLE-laskentamenetelmä pohjautuu Suomen ympäristökeskuksessa käytössä olleeseen Kaarle Kenttämiehen johdolla kehitettyyn taulukkolaskentapohjaiseen laskentamenetelmään, joka perustuu ominaiskuormituslukujen käyttöön. (Finér, L ym. 2010, 9.)

KALLE-laskentatyökalun rinnalle kehitettiin vuonna 2014 KUSTAA-laskentatyökalu, joka huomioi metsätalouden lisäksi myös valuma-alueen muun maankäytön kuten maatalouden, turvetuotannon ja yhdyskuntien aiheuttaman kuormituksen. Lähtötiedoiksi käyttäjän tarvitsee syöttää valuma-alueen pinta-ala, vesistöjen pinta-alat, vuosittaiset metsä- ja maataloustoimenpiteiden pinta-alat sekä pistekuormituslähteiden yksikkömäärät. KALLE ja KUSTAA ovat Excel pohjaisia ja ne on toteutettu Visual Basic for Applications (VBA) -kielellä. Ohjelman käyttö tapahtuu graafisen käyttöliittymän ja Excel –työkirjan välilehtien avulla. (Launiainen ym. 2014, 6, 7.)

4.2 Prosessimalli

VEMALA-malli on koko Suomen kattava kaikki maankäyttömuodot huomioiva ravinnekuormitusmalli, joka simuloi ravinteiden prosesseja, huuhtoutumista ja kulkeutumista maalla, joissa ja järvissä. Malli simuloi ravinteiden kokonaiskuormaa vesistöissä, ravinteiden pidättymistä ja Suomen vesistöistä lopulta Itämereen päätyvää vesistökuormitusta (Kuvio 10). VEMALA koostuu pääosin kahdesta osamallista: hydrologiaa simuloivasta WSFS-mallista ja ravinneprosesseja simuloivasta VEMALA-mallista. Laskennassa käytetään erittäin suurta määrää eri organisaatioiden tietokannoista saatavia muuttujia. (Huttunen ym. 2016, 83.)



KUVIO 10. Vemala-mallin rakenne (Suomen ympäristökeskus 2017).

NutSpathy on toinen borealisille metsäalueille kehitetty typen ja fosforin kuormitusta esittävä paikkatietoon perustuva prosessimalli, jonka toimintaa on todennettu ja kalibroitu yhdeksällä eri 33ha - 2100ha kokoisella metsäalueella. Kuormitus määritetään hydrologisen SpatHy-mallin ja ravinteiden simuloitujen prosessien avulla. Ravinteiden ottoa, vapautumista ja varastoitumista seurataan 16mx16m hilaruuduittain. Laskennassa otetaan huomioon säämuuttujat, puusto, maalaji, uomaverkosto, korkeusmalli sekä etäisyys vesielementtiin. (Guan ym. 2018.)

5 TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO

5.1 Tutkimusmenetelmä

Tutkimusmenetelmänä käytettiin toimintatutkimusta, joka sopi parhaiten tämän kaltaisen tutkimus- ja kehitystyön menetelmäksi. Aineistonhankintamenetelmänä toimi pääosin kehitystyön yhteydessä tapahtunut osallistuva havainnointi, eli tiedon keruuseen ja ongelmien ratkaisuun osallistuivat aktiivisesti myös Metsäkeskuksen sekä muiden ympäristöalan organisaatioiden asiantuntijat. Tietoa ja ratkaisuja ongelmiin pyrittiin keräämään keskustelujen, haastattelujen ja pienimuotoisten työpajojen avulla. Toimintatutkimus on käytännönläheinen, osallistava menetelmä, jonka avulla pyritään ratkaisemaan joku ongelma tai tuottamaan uusi ratkaisu, kuten metsätalouden toimenpiteiden kuormituslaskuri.

Paikkaan sidottuja tietoja analysoitiin paikkatietoanalyysiin soveltuvalla paikkatieto-ohjelmistolla ja eri organisaatioiden tietokannoista peräisin olevia aineistoja yhdistettiin ja täydennettiin paikkatietoanalyysin keinoin. Kuormituslaskenta suoritettiin paikkatietoanalyysillä tuotettujen tietojen pohjalta laskentaan soveltuvalla FME-datan integraatio ohjelmistolla. Valmiit tulokset koostettiin ja julkaistiin pilvipalveluun ArcGIS Online- ja PowerBI-ohjelmistojen avulla.

5.2 Aineisto

Metsätalouden toimenpiteiden kuormituslaskuri lukee laskennassa tarvittavat tiedot metsäkeskuksen Oraclen tietokannan hallintajärjestelmällä toteutetusta relaatiotietokannasta. Kuormituslaskurin tausta-aineistot on koottu Suomen metsäkeskuksen ja Geologian tutkimuslaitoksen tietokannoista. Aktiivisista tietokannoista on luotu kantakopiot aktiivisten tietokantojen turvaamiseksi ja luotettavan toiminnan takaamiseksi.

Kuormituslaskurin käyttämä maaperätieto perustuu Geologian tutkimuskeskuksen ja Suomen metsäkeskuksen maaperätietoihin. Maaperätieto piti yhdistää kahdesta eri lähteestä, koska Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedoissa oleva maastossa kerätty maaperätieto ei ole täysin kattava. Maastossa kerätty Suomen metsäkeskuksen aineisto toimi

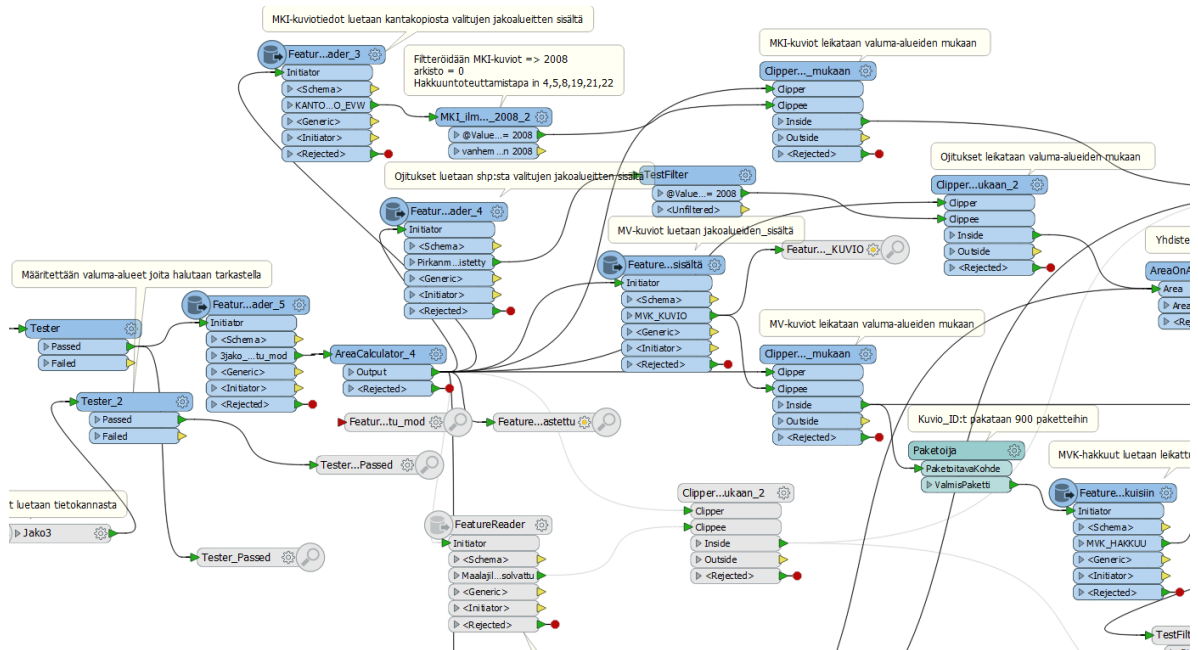
ensisijaisena tietolähteenä ja puuttuvilta osin maaperätieto täydennettiin Geologian tutkimuskeskuksen 1:200 000 maaperätiedolla. Maaperäkartan geometriaa ja ominaisuustietoja ei voitu hyödyntää suoraan eri maalajien pääryhmäluokittelun mukaan, koska kuormituslaskennassa käytettävät ominaiskuormitusluvut huomioivat ainoastaan kivennäismaa ja turvemaa luokittelun. Ominaisuustietoihin lisättiin kuormituslaskentaa varten uusi sarake kuvaamaan, onko kyseessä turvemaa vai kivennäismaa.

Metsänkäyttöilmoitusten paikkatietopalveluun digitoidut geometriat ja ominaisuustiedot sisältävät uudistamishakkuiden kuormituslaskennassa tarvittavat tiedot kuten hakkuun toteuttamistavan, metsänkäsittelyn pinta-alan ja ilmoituksen saapumispäivämäärän. Hakkuun toteuttamistavoista laskennassa käytettiin ainoastaan metsän uudistamishakkuita, koska kasvatushakkuiden on todettu aiheuttavan ainoastaan vähäistä ravinne- ja kiintoainekuormituksen kasvua. (Joensuu ym. 2013, 39.) Saapumispäivämäärän pohjalta oletettiin, että kyseisen metsänkäyttöilmoituksen mukainen metsänkäsittelytoimenpide on toteutettu tai tullaan toteuttamaan ilmoitusvuonna. Loput puuttuvat tiedot kuten maalaji ja metsänkäsittelykuvioiden sijoittuminen valuma-alueille selvitettiin paikkatieto-ohjelmassa päällekkäisyysanalyysien avulla hyödyntämällä metsänkäyttöilmoitusten metsänkäsittelykuvioiden geometrioita.

Tiedot ojituksista on tallennettu Metsäkeskuksen tietokantoihin, jos ojitushankkeeseen on saatu rahallista tukea kuten KEMERA-tukea. Toinen ojitusten tietolähde on ELY-keskuksen tietokannat, joihin ELY-keskukselle saapuvat ojitusilmoitukset tallennetaan.

5.2.1 FME datan integraatiotyökalu

Kuormituslaskuri perustuu Safe Softwaren kehittämään FME Desktop-ohjelmistoon, joka on kehitetty paikkatietoaineistojen muuntamiseen, muokkaamiseen, yhdistämiseen ja jakamiseen. FME Desktop pystyy lukemaan, muokkaamaan ja kirjoittamaan useissa eri tiedostoformaateissa olevia aineistoja (kuvio 11). FME on niin sanottu ETL-ohjelmisto (Extract, Transform ja Load), joka tarkoittaa tiedon irrottamista lähteestä, joustavaa tietomallin muuntamista ja tallennusta tiettyyn kohteeseen. (Spatialworld Oy. 2018.)



KUVIO 12. FME-datan integraatiotyökalun näkymä kuormituslaskurin osasta.

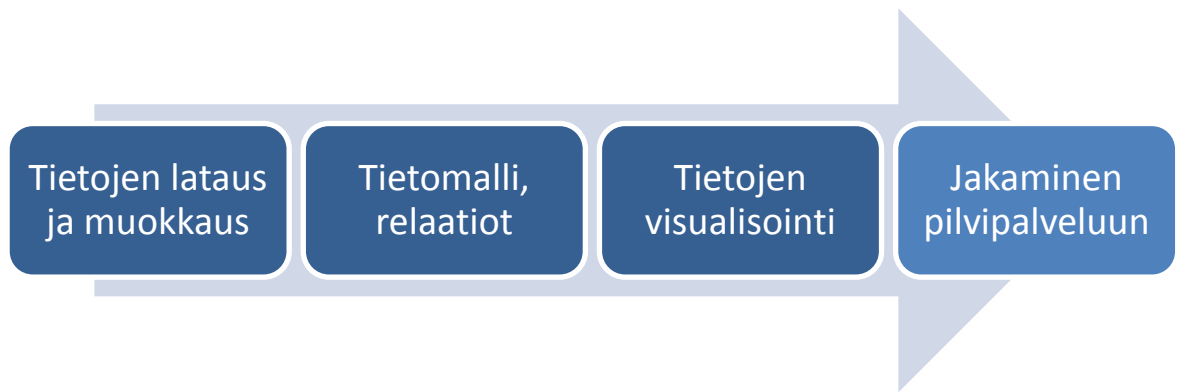
FME:n toiminnalliset moduulit voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan:

- Readerit, lukevat datan määritetystä lähteestä.
- Transformerit, muokkaavat tietoa niihin määritettyjen toiminta-asetusten mukaisesti.
- Writerit, kirjoittavat datan haluttuun tiedostomuotoon.

Esitelyjen moduulien lisäksi FME:stä löytyy inspector-valvontatyökalu, jonka voi liittää mihin tahansa kohtaan rakennettua mallia, jolloin se tulostaa kyseisen kohdan läpi kulkevan datan näkyviin. Inspector-valvontatyökalu on erityisen käytännöllinen mallien kehitysvaiheessa, kun halutaan varmistaa toimivatko transformerit tai niihin tehdyt asetukset suunnitellulla tavalla.

5.2.2 Power BI

Power BI on Microsoftin kehittämä analysointi ja raportointi palvelu, joka koostuu Power BI Desktop työpöytäohjelmistosta sekä Power BI Service pilvipalvelusta. Power BI palvelun avulla taulukkomuotoista tietoa voidaan muokata, yhdistää, visualisoida sekä jakaa pilvipalvelun avulla. Tiedon kulku palvelussa on kuvattu kuviossa 13. Dataa voidaan tuoda palveluun useista eri tietolähteistä kuten paikallisista tietokannoista, pilvipalvelimilta tai avoimen tiedon lähteistä. Power BI:n käyttöliittymään voidaan tuoda myös ArcGIS Online palveluun julkaistuja karttoja. (Microsoft Oy. 2018.)



KUVIO 13, Power BI palvelun käytön eri vaiheet.

5.2.3 ArcGIS Online

ArcGIS Online on ArcGIS-tuoteperheen pilvi- ja selainpohjainen työkalu, joka tarjoaa kehitys- ja julkaisualustan paikkatietopohjaisille aineistoille. ArcGIS Online-palvelussa käyttäjä voi hyödyntää Esri:n sekä muiden GIS-käyttäjien julkaisemia kartta-aineistoja. Palveluun voi myös tuoda omia karttoja ja yhdistellä niitä olemassa oleviin aineistoihin. Palvelu tarjoaa valmiit sovellusmallit sekä ArcGIS-ohjelmointirajapinnan omien karttojen, analyysien ja sovellusten tekemiseen. Valmiit kartat ja sovellukset voidaan jakaa pilvipalvelun kautta valituille henkilöille, organisaatiolle tai vapaasti kaikkien saataville. (Esri 2018.) ArcGIS Online-palvelu on valittu Suomen metsäkeskuksen karttapohjaisten tietotuotteiden julkaisualustaksi, joten sen hyödyntäminen myös tässä työssä oli luonnollinen valinta.

6 TULOKSET

6.1 Kehitystyö

Kuormituslaskurin suunnittelu alkoi tilanteesta missä hankesuunnitelmassa oli kuvattu tarve metsätalouden toimenpiteiden vesistökuormitusta laskevalle työkalulle sekä kuvaus siitä mitä kuormituslaskurin haluttaisiin tekevän. Varsinaisesta toteutustavasta tai käytettävistä ohjelmista ei ollut tarkempaa suunnitelmaa. Alkuvaiheen suunnittelu käynnistyi eri toteutustapojen ja käytettävien tekniikoiden kartoituksella. Metsäkeskuksen kaikki paikkatietopalvelut ja tietotuotteet ovat ArcGIS-pohjaisia, joten ArcGIS-tuoteperheen ohjelmat olivat luonnollinen valinta myös tämän työkalun toteutukseen.

Ensimmäinen kuormituslaskurin versio oli toteutettu täysin ArcMap:n avulla. Metsänkäsittelykuviot leikattiin valuma-alueiden sisälle ja niille lisättiin maaperätieto. Tämän jälkeen ominaisuustaulukot siirrettiin Exceliin missä taulukon tietoja täydennettiin laskeamalla eri metsänkäsittelykuvioille kymmenen vuoden kuormitusluvut typen, fosforin ja kiintoaineen osalta. Laskenta olisi voitu suorittaa myös ArcMap:ssa, mutta Excel valikoitui tässä vaiheessa työkaluksi, koska se mahdollisti pivot taulukoiden käytön, joka helpotti suuren ominaisuustaulukon käsittelyä sekä laskutoimitusten tekoa. Kuormituslaskennan jälkeen täydennetyt ominaisuustaulukot tuotiin takaisin ArcMap:iin ja ne yhdistettiin metsänkäsittelykuvioihin. Lopputuloksena saatiin kartta missä metsänkäsittelykuvioiden päälle mentäessä nähtiin kyseisien metsänkäsittelykuvion kuormitusluvut. Karttaan pystyi myös rakentamaan teemoitusta kuormituksen mukaan. Ensimmäinen kehitysversio oli kuitenkin liian työläs ja vaikeasti ylläpidettävä. Metsänkäsittelykuviota kohtainen esitystapa oli myös liian tarkka voimassa olleen metsätietolain näkökulmasta.

Parempi työkalu kuormituslaskurin toteutukseen löytyi kehitystyön yhteydessä tapahtuneen osallistuvan havainnoinnin sekä aktiivisen verkostoitumisen kautta. Metsäkeskuksen tietotiimissä oli muutamilla henkilöillä käytössä datan integraatiotyökalu (FME), joka vaikutti ominaisuuksiltaan sopivalta työkalulta myös kuormituslaskurin kehitystyökaluksi. Kuormituslaskurin tulosten esitystyökaluksi valikoitui taustatutkimuksen ja ominaisuuksien vertailun myötä Power BI ja ArcGIS Online.

Google ja erityisesti paikkatietopohjaisia palveluja kehittävien ihmisten käyttämät keskustelupalstat toimivat kuormituslaskurin kehitystyössä tärkeänä tieto- ja idealähteenä. Paikkatietopalvelujen kehitys on tällä hetkellä niin nopeaa, että alan kirjallisuus ja tutkimukset eivät pysty tarjoamaan ajan tasaista tietoa.

Kuormituslaskurin kehitystyö oli pakostakin hyvin dynaaminen prosessi, koska valmista suunnitelmaa tämän kaltaisen työkalun toteuttamiseksi ei ollut. Kehitystyö jalostui jatkuvasti tietämyksen kasvaessa sekä uusien oivalluksien ja löytyneiden teknisten ratkaisujen myötä.

Yhteistyön ja toimivan verkoston merkitys korostuu tämän tyyppisen kehitystyön yhteydessä. Toimiva yhteistyö helpottaa tiedon, parhaiden työkalujen, työtapojen ja teknisten ratkaisujen löytämistä. Skype sekä muut vastaavat kommunikaatiovälineet mahdollistavat yhteydenpidon sijainnista riippumatta. Useat kuormituslaskurin kehitystyön ongelmakohdat ratkesivat tällaisten vuorovaikutteisten työpajojen ja keskustelujen seurauksena. Yhden ihmisen näkemys rikastuu huomattavasti, kun se saa seurakseen muiden ihmisten tarjoamia näkökulmia ja kritiikkiä.

Tämän työn puitteissa kuormituslaskurin kehitystyö tuotti toimivan kuormituslaskurin kehitysversion, jonka kehitystyö jatkuu kohti valtakunnan tasoista metsätalouden kuormituslaskuria.

6.2 Kuormituslaskurin toimintaperiaate

Metsätalouden toimenpiteiden kuormituksen laskenta perustuu eri tietokannoista kerättyjen taustatietojen yhdistämiseen, muokkaamiseen, analysointiin, laskentaoperaatioihin ja lopulta tulosten esittämiseen. Metsätalouden kuormituslaskuri on yhdenlainen metsä- ja ympäristöalan big dataa hyödyntävä työkalu ja tietotuote, joka luo eri tietolähteiden tietovirroista uutta jalostettua tietoa.

Kuormituslaskennassa käytettäviä taustatietoja ovat kenttäkokeilla määritetyt metsätalouden toimenpiteiden kuormitusta kuvaavat ominaiskuormitusluvut, hakkuista tehtävät metsänkäyttöilmoitukset, metsävaratiedon pohjalta luodut hakkuuehdotukset, kunnostusojitusten toteutusilmoitukset sekä Geologian tutkimuskeskuksen ja Suomen metsäkes-

kuksen maaperäkartat. Kuormituslaskuri hyödyntää eri tietokannoista saatavien paikka-tietoaineistojen sijainti- sekä ominaisuustietoja. Sijaintitiedot ovat pääasiassa vektori-muotoisia aluemaisia kohteita jotka sisältävät käytettävän koordinaattijärjestelmän mu-kaiset sijaintitiedot. Ominaisuustiedot ovat vuorostaan taulukkomuotoisia tietotauluja jotka sisältävät kohteiden ominaisuustietoja kuten kohteiden pinta-alat ja toimenpiteiden toteutusvuodet.

Tietokannoista saatavien tietojen pohjalta eri metsänkäsittelykuvioiden ominaisuustiedot täydennetään tarvittavilta osin pinta-ala-, ominaiskuormitus-, maaperä- ja valuma-alue-tiedoilla. FME-datan integraatiotyökalu täydentää metsänkäsittelyaloille laskennassa tar-vittavat tiedot päällekkäisanalyysien sekä muiden yhdistämis- ja leikkaustoimintojen avulla joissa vektorimuotoiset aluemaiset kohteet asetetaan päällekkäin, jolloin tasojen yhteneväisten alueiden ominaisuustiedot yhdistetään tai leikataan ohjelmaan asetettujen määritysten mukaisesti. Kuormituslaskennassa käytettävät metsänkäsittelyalueiden pinta-alat pohjautuvat todellisiin jo toteutettuihin ja tulevaisuudessa toteutettaviin paik-katiedon avulla määritettyihin metsänkäsittelykuvioihin. Simuloitujen hakkuuehdotusten käyttö tietolähteenä mahdollistaa tulevaisuuden metsänkäsittelykuvioiden tunnistamisen, jolloin vesiensuojelutoimet voidaan toteuttaa oikea-aikaisesti sekä kustannustehokkaasti metsätalouden toimenpiteiden yhteydessä.

Laskennassa tarvittavien tietojen täydentämisen jälkeen metsänkäsittelykuvioille voidaan laskea ominaisuuskuormituslukuihin perustuvat vuosikohtaiset kuormitusluvut kg/käsit-telykuvio/vuosi kymmenen vuoden ajanjaksolle. Ominaiskuormitukseen perustuvan las-kennan jälkeen laskentatyökalu kirjoittaa tulokset sekä geometrian haluttuun formaattiin. Kuormituslaskurin käyttö ja tulosten esitys on toteutettu täysin uudella tavalla Power BI:n ja ArcGIS Online:n avulla toteutetussa selainpohjaisessa käyttöliittymässä. Selainpohjai-nen käyttöliittymä mahdollistaa palvelun käytön alustavapaasti myös mobiililaitteilla.

6.3 Rakenne

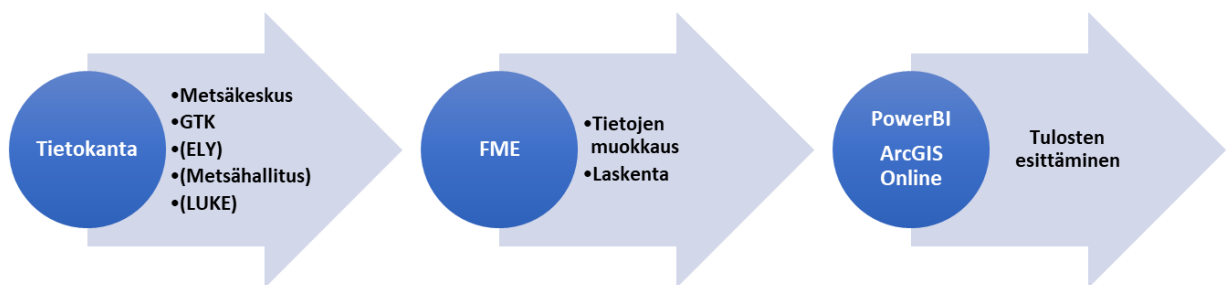
Kuormituslaskurin rakenne koostuu kolmesta pääelementistä (kuvio 14):

- Tietokannoista, mistä tausta-aineistot luetaan, suluissa olevat metsä- ja ympäristöalan organisaatiot ovat tulevaisuuden kehitystyön yhteistyökumppaneita.

- FME-datan integraatiotyökalusta, joka muokkaa tietoja sekä suorittaa kuormituslasken-nan.

-PowerBI ja ArcGIS Online tarjoavat alustan tulosten esittämiseen sekä julkaisuun.

Kuormituslaskurin rakenne on modulaarinen ja se on suunniteltu siten, että kerran rakennettua laskentamallia voidaan helposti muokata ja jatkokehittää, kun käytössä olevat tausta-aineistot muuttuvat ja täydentyvät. Tausta-aineistojen muuttuessa uudet tulokset saadaan päivitettyä yhdellä ajolla. FME-datan integraatiotyökalulla tulokset voidaan myös kirjoittaa useaan eri formaattiin, jolloin tuloksia voidaan hyödyntää moniin eri käyttötarkoituksiin, kuten metsätalouden kuormituksen tilastoihin.



KUVIO 14. Kuormituslaskurin rakenne.

Kuormituslaskenta alkaa kuormitusaineistojen tietokantojen lukemisella. Ensimmäinen määritettävä asia on maakunta, jota halutaan tarkastella. Kuormituslaskurin pilotti keskittyy tarkastelemaan Pirkanmaata, joten Pirkanmaan alue valitaan tietokannasta luettavasta Suomen maakunnat sisältävästä EsriShape-tiedostosta FME:n tester-moduulin avulla. FME:n FeatureReader-moduulin intersect-toiminnolla yhdistetään Pirkanmaan maakunta ja EsriShape-tiedosto, jossa on yhdistettynä valuma-alueet, vesiensuunnittelun osa-alueet sekä vesienhoitoalueet. Näiden toimenpiteiden jälkeen aineisto sisältää kaikki ne alueelliset kohteet, joiden sisältä seuraavissa vaiheissa metsänkäsittelykuvioita tullaan tarkastelemaan.

Seuraavaksi ojitukset, metsänkäsittelyilmoitukset sekä hakkuuehdotukset leikataan jakoalueittain sisälle FME:n FeatureReader-moduulin intersect-toimenpiteellä. Tässä vaiheessa eri metsänkäsittelyiden tietovirrat haarautuvat omiksi tietovirroiksi.

Jokaiselle eri metsätalouden toimenpiteelle on määritetty omat rinnakkain kulkevat tietovirtansa. Kunnostusojituksille on oma tietovirtansa jonka lisäksi jo tehdyt ja tulevaisuuden metsänuudistamishakkuut kulkevat omina tietovirtoinaan. Erillisiä tietovirtoja tarvitaan erilaisten lähtöaineistojen sekä erilaisten tietojen täydennystarpeiden vuoksi. Selkeä rakenne myös helpottaa työkalun ylläpitoa sekä jatkokehitystä.

Metsänkäyttöilmoituksista suodatetaan FME:n TestFilter-moduulin avulla metsänkäyttöilmoitukset ≥ 2008 , koska vanhempia metsänkäyttöilmoituksia ei käytetä laskennassa. Vastaavasti suodatetaan kaikki tarkasteltavat uudistushakkuuta vastaavat hakkuuntoteuttamistavat. Kunnostusojitusten osalta suodatetaan vastaavasti kaikki ojitukset joiden toteuttamisvuosi ≥ 2008 .

Tulevaisuuden hakkuuehdotuksille joudutaan tekemään enemmän valmistelevia toimenpiteitä kuin ojituksille tai metsänkäyttöilmoituksille, koska metsävarakuviot ja hakkuuehdotukset luetaan kahdesta eri tietokannasta sekä eri ominaisuusluokista. Ennen hakkuuehdotusten yhdistämistä hakkuuehdotuksista suodatetaan 2018-2023 suunnitellut hakkuut sekä uudistushakkuuta vastaavat hakkuun toteuttamistavat.

Suodatuksen jälkeen metsänkäyttöilmoitukset, kunnostusojitukset ja hakkuuehdotukset leikataan valuma-alueiden mukaan FME:n Clipper-moduulilla, koska metsänkäsittelykuviot voivat sijaita eri valuma-alueiden raja-alueilla. Tällä tavoin jokaisen metsänkäsittelykuvion kuormitus lasketaan oikean valuma-alueen kuormitukseksi. Kuormituslaskurin tämän hetkinen toteutus käyttää aineistona kolmannen jakovaiheen rajausta, jonka mukaan Suomi on jaettu 5637 valuma-alueeseen, joiden tyypillinen koko on runsaat 50 km² (Finér, L. 2015, 119).

Seuraavassa vaiheessa metsänkäsittely-, ojitus-, ja hakkuuehdotuskuviot täydennetään kuormituslaskennassa tarvittavalla, kivennäismaa, turvemaahan maaperätiedolla. Maaperätiedon täydennys tapahtuu FME:n AreaOnAreaOverlayer-moduulilla. Maaperätiedon täydennyksen jälkeen pelkät maaperäkohteet täytyy suodattaa pois, koska metsänkäsittelykuviot kattavat vain pienen osan koko maanpeitteen kattavasta maaperäkartasta. Suodatus tapahtuu FME:n Tester-moduulilla siten, että ainoastaan metsänkäsittelykuvio tunnisteen omaavat kohteet pääsevät suodatuksen läpi.

Metsänkäsittely-, ojitus-, ja hakkuuehdotuskuvioiden pinta-alat täytyy määrittää, koska ne ovat muuttuneet valuma-alue ja maaperätietojen määrittämisen yhteydessä. Pinta-alat saadaan laskettua FME:n AreaCalculator-moduulilla. Pinta-ala formaatti lasketaan neliömetreinä, joten arvo pitää muuntaa FME:n AttributeManager-moduulilla hehtaareiksi. Samassa yhteydessä kaikkien tietovirtojen toimenpidekuvioiden käsittelyvuodet muutetaan samaan yhtenäiseen formaattiin.

Kuormituslaskentaa varten tarvitaan nykyhetken määrittäminen. Nykyhetki voidaan määrittää FME:n DateTimeStamper-moduulilla. Nykyhetken ja käsittelyvuoden perusteella metsänkäsittelykuvioiden pystytään määrittämään, kuinka monta vuotta toimenpiteestä on tai kuinka monta vuotta tulevaan toimenpiteeseen on aikaa. Tämä nykyhetken ja käsittelyvuoteen perustuva erotuslasku suoritetaan FME:n AttributeManager-moduulilla.

Metsänkäsittely-, ojitus-, ja hakkuuehdotuskuvioiden erilliset tietovirratt jaetaan tässä vaiheessa kivennäismaa ja turvamaa virroiksi FME:n TestFilter-moduulissa. Eri metsänkäsittelykuvioiden kivennäismaa ja turvamaa tietovirratt ohjataan FME:n DatabaseJoiner-moduuleihin, joissa eri metsänkäsittelykuvioiden ominaisuustietotauluun lisätään kuormituslaskennassa tarvittavat ominaisuuskuormitusluvut.

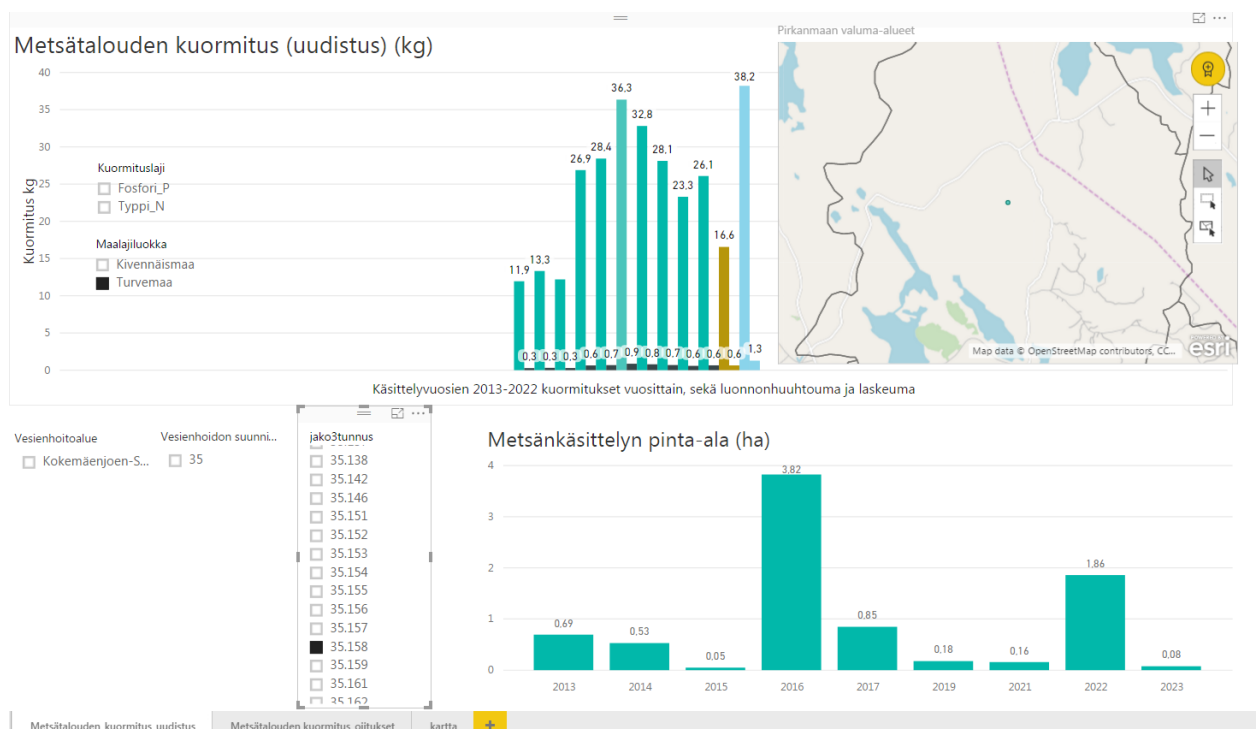
Kaikkien laskennassa tarvittavien tietojen määrittämisen ja täydennyksen jälkeen metsänkäsittelykuvioiden voidaan suorittaa varsinaisen kuormituslaskenta FME:n AttributeManager-moduulilla. Itse laskenta on moninaisten valmistelevien vaiheiden jälkeen hyvin yksinkertainen kertolasku, missä metsätalouden toimenpiteen pinta-ala kerrotaan kyseisen vuoden toimenpidekohtaisella ominaisuuskuormitusluvulla. Jokaiselle metsätalouden toimenpidekuviolle määritetään kuormitus kymmenen vuoden kuormitusjakson ajalta.

Ennen kuormitustulosten ulos kirjoittamista ominaisuustiedoista poistetaan kaikki turhat arvot, joita on kertynyt tietovirtojen kulkiessa eri moduulien läpi. Turhat tiedot poistetaan FME:n AttributeRemover-moduulilla.

Metsätalouden toimenpiteiden kuormitustulokset kirjoitetaan lopuksi ulos sekä excel-että geodatabase-muotoon. Geodatabase-formaatti sisältää geometriat sekä ominaisuustietotaulun. Geodatabase formaattia voidaan hyödyntää, kun metsänkäsittelykuvioita ha-

lutaan esittää esimerkiksi paikkatieto-ohjelmassa, kuten ArcGISOnline:ssa. Excel formaattia hyödynnetään PowerBI- ohjelmistossa, jolla kuormituslaskurin nykyinen käyttöliittymä on toteutettu.

Käyttäjä voi valita Power BI:n käyttöliittymässä valuma-alueen tai valuma-alueita joilta uudistamisen aiheuttamaa typen ja fosforin kuormitusta halutaan tarkastella. Käyttäjä voi myös valita tietyn vesienhoitoalueen, vesienhoidon suunnittelualueen, sekä sen halutaanko kuormituksia tarkastella kivennäismaan, turvemaan vai molempien osalta. Vastaavasti käyttäjä voi tarkastella kunnostusojitusten kiintoainekuormitusta käyttöliittymän kunnostusojitus näkymässä (kuvio 15).



KUVIO 15. Kuormituslaskurin Power BI:llä toteutettu selainpohjainen käyttöliittymä.

Power BI:n käyttöliittymään on yhdistetty ArcGIS Online:lla tehty ja julkaistu vuorovai-
kutteinen kartta, joka näyttää tarkasteltavan alueen, kun valuma-alue valitaan valikosta.
Kartan ominaisuustietojen ja Power BI:n aineiston välille on määritetty relaatio valuma-
alue tunnuksien mukaisesti.

6.4 Kuormituslaskurin käyttökohteet

Kuormituslaskurin pääasiallisena kohderyhmänä ovat vesien- ja luonnonhoidon suunnit-
telijat, metsäalan toimijat, ympäristö viranomaiset sekä metsänomistajat (Kuvio 16).



KUVIO 16. Metsätalouden kuormituslaskurin käyttökohteet.

Kuormituslaskurin avulla kunnostusojituskohteet sekä tarvittavat vesiensuojeluratkaisut voidaan analysoida tarkemmin, jolloin ojitukset voidaan kohdentaa taloudellisesti kannattaville sekä vesiensuojelun kannalta toimiville alueille. Vuorostaan kannattamattomat ja vesiensuojelun kannalta kriittiset alueet voidaan jättää ojittamatta.

Helppokäyttöinen ja havainnollinen työkalu voi myös aktivoida metsänomistajia tutustumaan oman alueensa vesienhoidon tilaan ja sitä kautta aktivoida heitä toimimaan vesienhoidollisen tilan parantamiseksi.

Paikallisen ja alueellisen tarkastelun lisäksi kuormituslaskurilla voidaan laskea metsätalouden kuormitus koko valtakunnan tasolta esimerkiksi vedenlaadun ja ravinnekuormituksen mallinnus- ja arviointijärjestelmä VEMALA:n käyttöön.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Metsätalouden toimenpiteiden kuormituslaskuri herätti suurta kiinnostusta, kun sen kehitystyötä esiteltiin ELY-keskukselle, Suomen ympäristökeskukselle, sekä muille vesienhoidon suunnittelun parissa työskenteleville tahoille. Viesti oli selkeästi se, että tämän kaltaista havainnollista paikkatietopohjaista työkalua tarvitaan vesienhoidon suunnittelun sekä arvioinnin tukena. Kuormituslaskuri helpottaa jatkossa monin tavoin lakisäateistä vesienhoidon suunnittelua, metsätalouden luonnonhoitovarojen kohdentamista, ELY -keskuksen vesienhoitovarojen kohdentamista ja vesiensuojelurakenteiden sijoittelua. Vesienhoidon suunnittelijat saavat avukseen työkalun jolla voidaan selkeästi nähdä vesienhoidon tarpeet ja painopistealueet nyt ja tulevaisuudessa.

Vesiensuojelun kannalta kriittisten alueiden tehokas ja varhainen tunnistaminen parantavat oleellisesti vesiensuojelutoimien kohdentamista ja ajoitusta. Parhaalla mahdollisella tavalla oikeaan aikaan toteutetut vesiensuojelutoimet vähentävät huomattavasti vesistöihin päätyviä kiintoaine ja ravinnepäästöjä. Oleellista on, että kriittisten alueiden metsänkäsittelytapaan ja tarvittaviin vesiensuojeluratkaisuihin voidaan kiinnittää huomiota jo ennen metsätalouden toimenpiteitä, jolloin niiden toteutus voidaan yhdistää saumattomasti ja kustannustehokkaasti suoritettavien metsätalouden toimenpiteiden yhteyteen.

Tieteellisin menetelmin tuotetut ominaiskuormitusluvut helpottavat huomattavasti tämän tutkimuksen kaltaisen kuormituslaskurin toteuttamista, mutta ominaiskuormitusmenetelmään liittyy myös paljon epävarmuustekijöitä ja puutteita. Ominaiskuormitusluvut perustuvat kenttäkokeisiin joiden ajallinen ja paikallinen edustavuus on rajallinen, joten eri valuma-alueiden olosuhteiden ja toteutettujen toimenpiteiden yksilöllisiä piirteitä ei ole voitu huomioida. Ominaiskuormitusluvut yleistävät, joten ominaiskuormitusmenetelmän käyttö ei välttämättä sovellu parhaalla mahdollisella tavalla hyvin pienimuotoisten alueiden kuormituksen määrittämiseen. Ominaiskuormitusmenetelmä ei huomioi ravinteiden ja kiintoaineen pidättymistä valuma-alueelle, eikä kuormituslähteen etäisyyttä vesistöstä huomioida. Ominaiskuormitusmenetelmällä määritettyjä tuloksia ei voida pitää tarkkoina kuormitusarvoina vaan tarkasteltavan valuma-alueen potentiaalisina kuormitusarvioina. (Launiainen ym. 2014, 29.) Suurimmat epävarmuustekijät liittyvät turvemaiden ominaiskuormituslukuihin, koska turvemaiden osalta tilastoja ja tutkimustuloksia ei ole juurikaan saatavilla (Finér, L ym. 2010, 26).

Tässä tutkimuksessa tausta-aineistona käytettävien tietokantojen tiedot voivat sisältää puutteita ja osa tiedoista saattaa olla vanhentunutta ja jopa virheellistä. Kaikkea tietoa ei olla myöskään vielä ehditty saattaa sähköiseen muotoon. Tämän työn yhteydessä esille nousi suuria puutteita etenkin kunnostusojitusten osalta, sillä suuri osa ojituksista on edelleen digitoimatta Metsäkeskuksen paikkatietojärjestelmiin. Puuttuvat ojahankkeet löytyvät ainoastaan paperisessa muodossa ojitusten hankehakemusten yhteydessä olevista ojitusten toteutusilmoituksista. Kuormituslaskurin kehitysversiossa ojitusten osalta käytössä oli vain Metsäkeskuksen tietokantojen Pirkanmaan alueen ojitukset.

Kuormituslaskurin jatkokehityksessä tausta-aineistojen kattavuutta sekä laatua tulisi parantaa. Tietotuotteiden näkökulmasta tietoa ei koskaan voi olla liikaa, eikä tieto voi olla liian yksityiskohtaista. Tiedon määrää voidaan aina karsia, mutta tarvittavan tiedon puuttuessa tietoa ei voida kehittää tyhjästä. Sähköisten aineistojen täydentyessä tietotuotteiden kehitystyö tulee helpottumaan huomattavasti ja lopputuotteiden laatu ja luotettavuus paranevat. Metsäkeskuksella ei ole kaikkea kuormituslaskurin tarvitsemaa tietoa saatavilla omilla tietokannoissa, vaan tietoa tarvitsee hakea myös muiden toimijoiden tietokannoista. Laskentatyökalun moduulimainen rakenne mahdollistaa uusien ja tarkempien tausta-aineistojen joustavan lisäämisen, joten muiden ympäristö- ja metsäalan organisaatioiden tietokantojen ja jo olemassa olevien laskentamallien tulosten hyödyntäminen voisi olla ratkaisu tähän.

Suomen metsäkeskuksen paikkatietopalvelussa on kattavat tiedot yksityisten metsänomistajien metsävaratiedoista, mutta vastaava tieto puuttuu valtion ja yhteisöjen maiden osalta. Laserkeilausaineisto pitää kaiken tämän tiedon sisällään, joten metsävaratiedot tulisi määrittää myös näiltä osin. Tällä tavoin metsätalouden kuormitus sataisiin määritettyä kaiken metsämaan osalta omistajuudesta riippumatta.

Ongelmia aiheuttaa myös paikkatietoaineistojen virheet geometriassa ja ominaisuustiedoissa. Aineistoja on sähköistetty ja koottu pitkällä aikajänteellä useista eri lähteistä, joten virheellistäkin dataa on saattanut päätyä tietokantoihin. Aineistojen luotettavuuteen tulee aina suhtautua hieman kriittisesti. Kuormituslaskurin metsänkäsittelypinta-alojen määrittämisen yhteydessä tehdään paljon päällekkäisyys- ja leikkausanalyysyjä, joissa vektorimuotoisten alueiden piirtämisessä tapahtuneet geometriavirheet voivat aiheuttaa virheellisiä tuloksia. Kehitystyön aikana geometriavirheiden korjaukseen löytyi joitakin

keinoja kuten GeometryFilter, joka päästää läpi ainoastaan polygon-kohteet, sekä GeometryValidator, joka yrittää korjata geometria virheitä. Kyseisiä työkaluja on syytä käyttää tulevaisuuden jatkokehitystyössä.

Kiintoaineen määrän laskemiseen ja eroosioherkkyyden määrittämiseen on kehitetty RUSLE2015 mallinnus, joka saattaisi olla tarkempi työkalu kiintoaineen määrittämisessä kuin tässä mallinnuksessa käytetyt ominaiskuormitusluvut. RUSLE2015-mallin kiintoainekuormituksen esitystapa on rasteripohjainen. Jokainen kuvapiste esittää 2m x 2m aluetta (4m²) ja jokaiselle kuvapistelle on määritetty arvo (kg/ha/a). Jotta mallia voitaisiin hyödyntää Metsätalouden kuormituslaskurissa, RUSLE2015-rasterin jokaisen kuvapisteen kuormituksen mittayksikkö pitäisi muuntaa laskennan kannalta parempaan muotoon. Tämä saataisiin tehtyä kertomalla hehtaarikohtainen arvo 0,0004 muunnoskerroimella. Muunnoksen jälkeen kiintoainekuormitus saataisiin laskettua summaamalla aluemaisen metsänkäsittelykuvion rajaaman kuvapistejoukon arvot yhteen. Vastaavalla tavalla ravinekuormituksen laskennassa voitaisiin hyödyntää Luonnonvarakeskuksen NutSpathy-ravinteiden kuormitusmallia, jonka kuormituksen esitystapa on samaan tapaan rasterimuotoinen.

Ojitustiedon kattavuuden parantamiseksi Suomen metsäkeskuksen on täydennettävä kaikki puuttuvat ojitushankkeet paikkatietopalveluun ja määritettävä yhtenäinen formaatti ojitusten ominaisuus- ja sijaintitiedoille. Ojitusten ominaisuus- ja sijaintitiedoissa tulisi olla selkeästi määritettynä ojituksen valmistumisvuosi sekä vaikutusalue. ELY-keskukseen saapuneiden ojitusilmoitusten pohjalta tallennetut ominaisuus- ja sijaintitiedot pitäisi saada siirtymään samalla tavalla automaattisesti Suomen metsäkeskuksen tietokantaan kuin uhanalaistiedon siirto jo toimii. Tulevaisuuden ojitukset tullaan digitoimaan systemaattisesti KEMERA-tuki prosessin yhteydessä ja puuttuvia ojituksia tullaan lisäämään tietokantaan.

Ojitusilmoituksen ilmoitusvelvollisuuden määritelmä muusta kuin vähäisestä ojituksesta on hyvin subjektiivinen, joten selvyiden ja seurannan kannalta olisi suositeltavaa, että ojitusilmoituksen ilmoitusvelvollisuus rajattaisiin selkeämmin. Ojitusilmoitus voitaisiin vaatia esimerkiksi kaikista tietyn pinta-alan ylittävistä vettä johtavista ojituksista, jolloin ELY-keskus pystyisi kattavammin arvioimaan ojitusten ympäristövaikutukset. Tämä helpottaisi huomattavasti myös ojitustietojen ylläpitämistä ja tilastointia.

Metsälannoitusten tarkkoja sijaintitietoja ja toimenpideoja ei ollut saatavilla Suomen metsäkeskuksen, eikä muidenkaan toimijoiden tietokannoissa, joten metsälannoitusten vesistökuormitusta ei voitu määrittää metsätalouden toimenpiteiden kuormituslaskennassa. Metsälannoitukset voitaisiin ottaa tulevaisuudessa mukaan laskentaan tilastoitujen metsälannoitusten pinta-alojen mukaisesti. Tällä tavoin lannoitusten kuormitusvaikutus saataisiin näkymään metsätalouden kokonaiskuormituksessa. Tämän tavan puutteena olisi kuitenkin lannoitusten sijaintitietojen puuttuminen. Kaikki tehtävät lannoitukset tulisi merkitä jatkossa paikkatietoon ja tulevaisuuden potentiaalisten lannoituskohteiden tunnistamiseen tulisi kehittää menetelmä.

Neljännän jakovaiheen valuma-aluejaon hyödyntäminen kuormituslaskurin tausta-aineistona on teknisessä mielessä mahdollista heti, kun uusi aineisto julkaistaan virallisesti saataville. Tarkemmalla valuma-alue rajauksella kuormituslähteet sekä vesiensuojelurakenteet voidaan kohdentaa entistä tarkemmin.

Jo toteutetut metsätalouden toimenpiteet ja tulevaisuuden suunnitellut toimenpiteet tulisi erottaa erillisiksi esityksiksi. Tehdyt toimenpiteet ovat todellisia toteutettuja toimenpiteitä, kun taas tulevaisuuden toimenpiteet ovat simuloituja ehdotuksia ja oletuksia. Tulevaisuuden ennustamiseen liittyy paljon epävarmuustekijöitä jotka pitää tuoda selkeästi esille, kun tulevaisuuden kuormituksia esitetään. Kuormituslaskurin kehitystyön yhteydessä hakkuuehdotusten käyttäytymisestä ilmeni selkeä kaava, joka vaikuttaa kuormituslaskurin tulevaisuuden mallintamiseen. Hakkuuehdotukset jotka eivät ole toteutuneet ehdotusvuonna, siirtyvät aina tarkastelukauden lopussa seuraavalle vuodelle, jolloin toteutumattomien hakkuuehdotusten määrä kasvaa aina vuosittain. Vuosittain siirtyvät ja kertyvät hakkuumahdollisuudet aiheuttavat suuren piikin tulevaisuuden metsänkäsittelyn pinta-aloissa, joka vaikuttaa suoraan myös kuormituslaskurin tulevaisuuden kuormitusennusteisiin.

Tulevaisuuden kuormituslaskuri voisi toimia osana metsään.fi palvelua siten, että, kun metsänomistaja tai toimija tekee metsänkäyttöilmoituksen ohjelma osaa automaattisesti ilmoittaa tulevan toimenpiteen aiheuttavan kuormituksen. Jos metsänkäsittelykuvio sijaitsee korkean kuormitusriskin alueella ohjelma ilmoittaa, että täydentäville vesiensuojelutoimille on tarvetta ja suunnitellusta metsätalouden toimenpiteestä menee suoraan ilmoitus vesienhoidon asiantuntijalle. Kuormitusmallinnuksen tulosten pohjalta voitaisiin

luoda oma teemoitettu karttatasonsa, josta nähtäisiin havainnollisesti vesiensuojelun kannalta kriittiset alueet. Seuraavassa kehitysvaiheessa kuormituksen sekä kriittisten alueiden tunnistamisen jälkeen paikkatietoon tulisi luoda selkeät vesiensuojelun sekä luonnon monimuotoisuuden huomioivat toimenpide-ehdotukset. Toimenpide-ehdotukset voisivat sisältää esimerkiksi valmiiksi määritetyt vesistöjen suojakaistat, otollisimmat säästöpuuryhmien ja riistatiheikköjen sijainnit, sekä kyseiselle alueelle parhaiten sopivat metsänkäsittelymenetelmät. Mitä enemmän pystytään tunnistamaan ja määrittämään soveltuvia muuttujia, sitä tarkempia toimenpide-ehdotuksia voidaan luoda. Toimenpide-ehdotusten laatua voidaan arvioida maastotarkistusten avulla ja muuttujia sekä mallinnusta voidaan kehittää tiedon määrän kasvaessa.

Valtakunnan tason metsätalouden kuormituslaskurin tausta-aineistot ovat huomattavasti suuremmat kuin Pirkanmaan alueen tarvitsemat, joten suurten tietomäärien hallintaa ja käsittelyn tehokkuutta on syytä parantaa optimoimalla etenkin FME:n työvaiheita.

Käyttöliittymää on tarpeellista kehittää enemmän karttakäyttöliittymän omaiseksi, josta käyttäjä voi suoraan valita tarkasteltavan kohteen ja nähdä metsätalouden kuormitusluvut. Esitysteknisten ja muiden teknisten haasteiden ratkaisemiseksi olisi tärkeää järjestää työpajoja samankaltaisten paikkatietopohjaisten työkalujen kehittäjien kesken, jotta parhaat mahdolliset työkalut ja tekniset toteutukset löytyisivät.

Kuormituslaskurin lopullista vaikuttavuutta voidaan arvioida vasta, kun valmis metsätalouden toimenpiteiden kuormituslaskuri julkaistaan. Työkalun käytön aktiivisuutta voidaan arvioida kuormituslaskurin palvelimella vierailevien käyttäjien määrästä sekä saadusta palautteesta. Pidemmän aikavälin vaikuttavuutta voidaan päätellä siitä, otetaanko vesiensuojelu paremmin huomioon metsätalouden toimenpiteiden yhteydessä, lisääntyvätkö vesiensuojelurakenteiden toteutukset ja vaihtoehtoisten metsänkäsittelymenetelmien käyttö ja lopulta paraneeko metsäisten valuma-alueiden vesistöjen tila tulevaisuudessa.

LÄHTEET

Ervasti, E. T. 1998. Organisaation paikkatietojen yhteiskäyttö. Pro gradu–tutkielma. Helsingin yliopiston maantieteen laitos.

Esri Finland. 2018. ArcGIS Online. Luettu 24.04.2018.

<http://www.esri.fi/tuotteet/arcgis/arcgisonline>

Fazal, S. 2008. GIS basics. New Age International.

Finér, L. 2015. Valuma-alueen huomioonottavan suunnittelun hyödyt.

Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., ... & Koskiaho, J. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta.

Geologian tutkimuskeskus. 2018. Hakku aineistopalvelu. Luettu 03.02.2018

<https://hakku.gtk.fi/fi/locations/search>

Guan, M., Laurén, A., Launiainen, S., & Salmivaara, A. 2018, April. Modelling water and nutrient dynamics in boreal forested catchments: evaluation and application of a distributed model. In EGU General Assembly Conference Abstracts Vol. 20, p. 16025.

Hiltunen, T., Jämsén, J., Joensuu, S., Heikkinen, K., & Vuollekoski, M. 2014. Opas metsätalouden vesiensuojelun suunnitteluun valuma-alueella.

Huttunen, I., Huttunen, M., Piirainen, V., Korppoo, M., Lepistö, A., Räike, A., ... & Vehviläinen, B. 2016. A national-scale nutrient loading model for Finnish watersheds—VEMALA. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(1), 83-109.

Joensuu, S., Hynninen, P., Heikkinen, K., Tenhola, T., Saari, P., Kauppila, M., ... & Vuollekoski, M. 2012. Metsätalouden vesiensuojelu -kouluttajan aineisto.

Joensuu, S., Kauppila, M., Lindén, M. & Tenhola, T. 2013. Hyvän metsänhoidon suositukset – Vesiensuojelu. Työopas. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja.

Launiainen, S., Sarkkola, S., Laurén, A., Puustinen, M., Tattari, S., Mattsson, T., ... & Finér, L. 2014. KUSTAA-työkalu valuma-alueen vesistökuormituksen laskentaan.

Lilja, H., Puustinen, M., Turtola, E., & Hyväluoma, J. 2017. Suomen peltojen kartta-pohjainen eroosioluokitus: Valtakunnallisen kattavuuden saavuttaminen ja WMS-palvelu.

LUKE. 2014. Metsätilastollinen vuosikirja. Luettu 11.04.2018.

<http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/vsk/2014/>

Maa ja metsätalousministeriö. 2015. Kansallinen metsästrategia 2025. Luettu 12.08.2018.

<https://mmm.fi/kms>

McGregor, C.; Kumar, S.; Romero, A., Austin, D.; Fogel, S.; Ashdown, L.; Williams, D.; Cyran, M.; Hansell, D.; Krishnaswamy, V.; Laquerre, P.; Maddali, V.; Minhas, M.;

Polk, J.; Townsend, M.; & Yang, W. 2012. Oracle Database 2 Day DBA, 10g Release 2.

Metsäläki 20.12.2013/1085. Luettu 02.02.2018.

Microsoft Oy. 2018. Power BI Desktop. Luettu 23.02.2018.
<https://powerbi.microsoft.com/en-us/desktop/>

Mälkönen, E. 2003. Metsämaa ja sen hoito. Metsäntutkimuslaitos ja Metsälehti Kustannus.

Nieminen, M., Sallantausta, T., Ukonmaanaho, L., Nieminen, T. M., & Sarkkola, S. (2017). Nitrogen and phosphorus concentrations in discharge from drained peatland forests are increasing. *Science of the Total Environment*, 609, 974-981.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717319149?via%3Dihub#f0025>

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., ... & Alewell, C. 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental science & policy*, 54, 438-447.

Palviainen, M., & Finér, L. 2013. Kunnostusojituksen vaikutus vesistöjen humuskuormitukseen. Jyväskylä: Korpiljyvä.

Rautio, P., Nieminen, T. M., & Lindroos, A. J. 2015. Metsät saasteiden puhdistajina. Metsä: monikäyttö ja ekosysteemipalvelut/Toimittaja Kauko Salo.

Räty, J. 2018., Suomen metsäkeskus, asiakkuusasiantuntija. Haastattelu 11.04.2018.

Safe Software Inc. 2018. fme-desktop. Luettu 17.04.2018
<https://www.safe.com/fme/fme-desktop/>

Safe Software Inc. 2018. Reference-Guide. Luettu 18.04.2018
<http://cdn.safe.com/resources/fme/FME-Transformer-Reference-Guide.pdf>

Sarkkola, S. 2018. Suometsien ilmastoviisas metsänhoito. Sompa-hankkeen luento. Kuunneltu 1.3.2018
<https://www.luke.fi/sompa/>

Spatialworld Oy. 2018. Fme. Luettu 22.2.2018
<http://www.spatialworld.fi/fi/fme/>

Suomen ympäristökeskus 2017. Valuma-alue jako. Luettu 12.3.2018.
http://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Vesi/Tietoaineistot_ja_jarjestelmat/Valumaaluejarjestelma/Uusi_valumaaluejako

Suomen ympäristökeskus 2017. Vedenlaadun ja ravinnekuormituksen mallinnus- ja arviointijärjestelmä VEMALA. Luettu 03.04.2018.
http://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittaminen/Vesi/Mallit_ja_tyokalut/Vesienhoidon_mallit/Vedenlaadun_ja_ravinnekuormituksen_mallinnus_ja_arviointijarjestelma_VEMALA

Suomen metsäkeskus 2018. Alueelliset metsäohjelmat. Luettu 13.11.2018
<https://www.metsakeskus.fi/alueelliset-metsaohjelmat>

Tattari, S., Puustinen, M., Koskiaho, J., Röman, E., & Riihimäki, J. (2015). Vesistöjen ravinnekuormituksen lähteet ja vähentämismahdollisuudet.