



YMPÄRISTÖN-
SUOJELU

Pekka Sillanpää, Ämer Bilaletdin, Heikki Kaipainen, Tom Frisk
ja Tapani Sallantaus

Metsätalouden aiheuttaman kuormituksen laskentamenetelmä



Pekka Sillanpää, Ämer Bilaletdin, Heikki Kaipainen, Tom Frisk
ja Tapani Sallantaus

Metsätalouden aiheuttaman
kuormituksen
laskentamenetelmä

TAMPERE2006

Julkaisu on saatavana myös Internetissä
www.ymparisto.fi/julkaisut

ISBN 952-11-2173-4
ISBN 952-11-2174-2 (PDF)
ISSN 1238-7312

Taitto: Anu Peltonen
Valokuvat: Greenpeace, StoraEnso, Kirsti Krogerus

Tampereen yliopistopaino Oy
Tampere 2006

Sisällys

1 Johdanto	5
2 Yleistä	6
2.1 Metsäisten valuma-alueiden luonnonhuuhtouma	6
2.2 Metsätaloudelliset toimenpiteet	9
2.2.1 Vesitalouden parantamiseen tähtäävät toimenpiteet	9
2.2.2 Hakkuu ja puunkorjuu	10
2.2.3 Maanmuokkaus	10
2.2.4 Lannoitus	11
2.3 Metsätalouden vaikutukset valumiin ja huuhtoumiin	11
3 Aineisto ja menetelmät	15
3.1 Yleistä	15
3.2 Aineisto	16
3.2.1 Uudisojitus	16
3.2.2 Kunnostusojitus	17
3.2.3 Avohakkuu ja maanmuokkaus	18
3.3 Kuormituksen laskentamenetelmät eri tutkimusalueilla	20
3.4 Suhteellisen kuormituslisän laskeminen	20
4 Tulokset	22
4.1 Uudisojitus	22
4.2 Kunnostusojitus	24
4.3 Metsänuudistus	25
5 Tulosten tarkastelu	28
6 Huuhtoumiin vaikuttavia tekijöitä ja niiden huomioiminen mallintamisessa	31
6.1 Toimenpiteen laatu ja intensiteetti	31
6.2 Toimenpiteiden laajuus ja sijainti valuma-alueella	32
6.3 Ajalliset tekijät	33
6.4 Aluetekijät	34
6.5 Tutkimuksen toteutus	34
Kirjallisuus	37



Johdanto



Tämän työn tarkoituksena on esitellä helppokäyttöinen ja yleispätevä laskentamenetelmä, jonka avulla voidaan määrittää tärkeimpien metsätaloudellisten toimenpiteiden aiheuttama vesistökuormitus. Lähtökohdaksi työssä on otettu toimenpiteen jälkeisen kuormituksen vertaaminen toimenpidettä edeltäneeseen tilanteeseen eli alueen luontaiseen huuhtoumaan. Tuloksena saadaan toimenpiteen jälkeinen typpi-, fosfori- ja kiintoainekuormituksen suhteellinen muutos ajan funktiona.

Euroopan unionin vesipolitiikan puitedirektiivi (VPD) astui voimaan 22.12.2000. Direktiivin tarkoituksena on yhtenäistää vesiensuojelua Euroopassa. Tavoitteeksi on asetettu vesien suojeleminen, parantaminen ja ennallistaminen niin, ettei pintavesien ja pohjavesien tila heikkene ja että niiden tila on vuoteen 2015 mennessä vähintään hyvä.

Suomessa maa- ja metsätalousministeriö sekä ympäristöministeriö hyväksyivät vuonna 1994 yhteisesti metsätalouden ympäristöohjelman, jonka päämääränä on mm. ohjata maamme metsätaloutta kohti metsien biologiselle monimuotoisuudelle ja metsäluonnon hoidolle asetettuja tavoitteita. Valtioneuvoston periaatepäätöksessä vuodelta 1998 tavoitteeksi onkin asetettu sisävesiin ja Itämereen kulkeutuvien fosfori- ja typpipäästöjen alentaminen vähintään 50% vuoden 1993 arvioidusta tasosta.

Päätöksenteon tueksi tarvitaan luotettavaa tietoa siitä, millaiset vaikutukset erilaisilla metsätaloustoimenpiteillä on valuma-alueen vesiin. Kehitteillä on useita GIS-pohjaisia ja ekologisia mallintamismenetelmiä, joilla voidaan päästä hyvään aluekohtaiseen tarkkuuteen (esim. Laurén ym. 2003). Ne eivät kuitenkaan vielä sovi yleisluontoiseen metsätalouden ravinne- ja kiintoainekuormien kvantifioimiseen, koska useita eri parametreja hyödyntävinä niiden tueksi ei useinkaan ole käytettävissä riittävää määrää pohjatietoa. Siksi on tarpeen kehittää monimutkaisempien mallien rinnalle myös yksinkertaisempia, olemassa oleviin aineistoihin nojaavia menetelmiä, joilla voidaan laskea metsätalouden aiheuttamaa vesistökuormitusta laajemmilla valuma-alueilla tai arvioida etukäteen kuormituksen suuruutta toimenpidealueilla, joilta on käytettävissä niukasti tutkimustietoa.

Laajempien vesistöalueiden ravinnekuormitusta metsätalouden ja laskeuman seurauksena on tyyppien osalta mallintanut esim. Lepistö (1999). Suomen ympäristökeskuksessa on kehitetty vesistökuormituksen arviointi- ja hallintajärjestelmä VEPS, jonka avulla voidaan toimenpidekohtaisesti arvioida vuosittainen potentiaalinen typpi- ja fosforikuormitus. Järjestelmässä kuormituksen laskentamenetelmät perustuvat kukin yhteen tutkimusaineistoon eivätkä ota huomioon toimenpidealuekohtaista luonnonhuuhtoumaa. VEPS ei sisällä kiintoainekuormituksen laskentamenetelmää.

2

Yleistä

2.1 Metsäisten valuma-alueiden luonnonhuuhtouma

Pohjoisella havumetsävyöhykkeellä luonnontilaisilta metsäisiltä valuma-alueilta huuhtoutuu yleensä hyvin vähän ravinteita ja epäorgaanista kiintoainetta (Rekolainen 1989, Ahtiainen ja Huttunen 1995, Kortelainen ym. 2003). Kivennäismaan rapautumisprosessissa ja eloperäisen aineksen hajoamisessa syntyy jatkuvasti vesiliukoisia ravinnesuoloja, mutta suurin osa näistä ravinteista sitoutuu yleensä nopeasti maaekosysteemien biomassaan. Osa kulkeutuu kuitenkin virtauksien mukana pohja- ja pintavesiin, joiden luontainen perustuotanto riippuu juuri näistä maankamaralta huuhtoutuvista ravinteista (Kenttämies ja Saukkonen 1996).

Suomesta tai koko Euroopasta on vaikea löytää tutkimustarpeisiin sopivia metsäisiä valuma-alueita, joilla ei olisi lainkaan ihmistoiminnasta aiheutuvaa häiriötä. Voimaperäisen metsätalouden ulkopuolelle jäävillä kohteillakin ilmaitse kulkeutuva laskeuma vaikuttaa valuma-alueiden luonnontilaan. Suomessa mahdollisimman luonnontilaisia valuma-alueita on tutkittu kansallis- ja luonnonpuistoissa, soidensuojelualueilla sekä vanhojen metsien suojeluohjelmaan kuuluvilla kohteilla. Purovesien taustapitoisuuksia ja -huuhtoumia kartoittaneessa tutkimuksessa aineisto kattoi 42 eri puolilla maata sijaitsevaa mahdollisimman luonnontilasta valuma-aluetta. Tuloksien perusteella luonnonhuuhtouma vaihtelee aluekohtaisesti. Yleisesti ottaen pitoisuudet ja huuhtoumat pienenevät etenkin kivennäismailla siirryttäessä kohti pohjoista (Kortelainen ym. 2003). Tämä johtuu siitä, että rapautuminen on lämpötilasta riippuvaista ja siten Etelä-Suomen maaperä on keskimäärin ravinteikkaampaa ja typpilaskeuma suurempi. Myös valuma-alueen soisuus vaikuttaa alueelta tuleviin huuhtoumiin. Turvemaavaltaisuus lisää valuma-alueelta tulevan hiilen, kokonaistypen, ammoniumtypen, orgaanisen typen ja kokonaisfosforin huuhtoumaa. Sen sijaan turvemaat vähentävät valuma-alueelta tulevia nitraattihuuhtoumia (Kortelainen ym. 2003). Soiden osuuden merkitys alueelta tuleviin huuhtoumiin näkyy kuitenkin voimakkaimmin aineistoissa, joissa soita on enintään neljäsosa valuma-alueen pinta-alasta (Mattsson ym. 2003). Myös puulajisuhteilla on merkitystä hiilen ja kokonaistypen huuhtoumiin siten, että kuusivaltaisista metsistä niitä huuhtoutuu enemmän kuin mäntyvaltaisista.

Typpi

Suomessa kallioperän ja kivennäismaalajien rapautuessa vapautuu niin vähän typpeä, ettei sillä ole merkitystä valumavesien typen lähteenä. Pääosa maaperän ja veden liukoisista typpiyhdisteistä onkin peräisin ilmakehän kaasuista. Valuma-alueelle typpiyhdisteet päätyvät alun perin typen sidonnassa, sateen tai kuivalaskeuman mukana tai ihmisen vaikutuksesta lannoitteissa ja jätevesissä. Sitoutunutta typpeä vapautuu maan typpipitoisen orgaanisen aineksen hajoamistuotteina. Valumavesissä typpi voi esiintyä ionimuodossa ammoniumina (NH_4^+), nitriitinä (NO_2^-), tai nitraattina (NO_3^-), jolloin ne ovat kasvien käytettävissä. Suurin osa purovesien typestä kulkeutuu kuitenkin orgaanisiin yhdisteisiin sitoutuneena (Lahermo ym. 1996).

Koska boreaalisisissa metsäekosysteemeissä typpi on yleisimmin metsän kasvua säätelevä ravinne, sen huuhtoutuminen häiriintymättömältä metsämaalta on vähäistä (esim. Mattsson ym. 2003). Luonnontilaisten valuma-alueiden kokonaistyyppihuuhtoumat ovat keskimäärin $130 \text{ kg km}^2 \text{ a}^{-1}$ (Kortelainen ym. 1999). Maaperän koostumus, kasvillisuus, topografia, ilmasto ja muut tekijät aiheuttavat typen huuhtoumaan kuitenkin paljon aluekohtaista vaihtelua, minkä seurauksena vaihteluväli on suuri, normaalisti $30\text{-}290 \text{ kg km}^2 \text{ a}^{-1}$ (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Kokonaistypen pitoisuudet ovat suurimmillaan maan eteläosassa ja vähenevät pohjoista kohti (Mattsson ym. 2003). Etelä-Suomessa sijaitsevan mustikkatyyppin kankaan tyyppihuuhtouma voi olla lähes kymmenkertainen Pohjois-Suomessa sijaitsevaan karuun, mäntyvaltaiseen valuma-alueeseen verrattuna (Alasaarela ym. 1995, Kenttämies ja Saukkonen 1996, Kortelainen 1999). Yleensäkin kuusivaltaisuus lisää kokonaistypen huuhtoumia. Sen on selitetty aiheutuvan kuusen tuottamasta suuresta karikemäärästä, joka lahotessaan tuottaa valumavesiin runsaasti orgaanista hiiltä ja tyyppiä (Johansson 1995). Mäntyyn verrattuna kuusi myös viihtyy ravinteikkaammilla mailla, missä pH on korkeampi ja typensidonta voimakasta. Puulajista riippumatta metsän ikä eli runkojen kuutiolavuus vaikuttaa typen huuhtoumaan: vanhaa metsää kasvavilla valuma-alueilla huuhtoutuvan typen pitoisuudet ovat korkeampia kuin nuoren metsän alueilla, mikä johtunee vanhan puuston kyvystä tuottaa enemmän hajoavaa detritusta (Mattsson ym. 2003).

Kokonaistypen huuhtouma-arvoihin vaikuttaa myös typpilaskeuma, jonka tarkkaa osuutta typen huuhtoumiin on vaikea määrittää. Suomessa vuotuinen typpilaskeuma on n. $300 - 1200 \text{ kg km}^2 \text{ a}^{-1}$ (Järvinen ja Vänni 1990, Nordlund 1998). Laskeuma on suurimmillaan maan eteläosissa ja vähenee merkittävästi siirryttäessä kohti pohjoista (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Luonnontilaisilla valuma-alueilla laskeumaperäinen nitraattityppi sitoutuu yleensä hyvin tehokkaasti. Suomalaisen metsäekosysteemien ainevirtoja kartoittaneissa tutkimuksissa typen pidenttymisen [(systeemiin saapunut – sistemistä poistunut) / systeemiin saapunut] vaihteli välillä 0,67 - 1,00, eikä riippunut typpilaskeuman määrästä (Kortelainen ja Saukkonen 1998, Mattsson ym. 2003). Laskeumatypen huuhtoutumisen riskin on kuitenkin todettu kasvavan rehevillä metsätyypeillä, runsaan laskeuman (yli $1000 \text{ kg km}^2 \text{ a}^{-1}$) alueilla sekä metsätaloustoimien aiheuttaman häiriön seurauksena.

Kokonaistypen huuhtouma sisältää kiintoainekseen sitoutuneen typen, mikä on vain osittain vesien perustuotannon kannalta käyttökelpoisessa muodossa (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Koska suurin osa valumavesien tyyppistä on sitoutunut orgaaniseen ainekseen, sekä typen pitoisuus että huuhtouma korreloi voimakkaasti orgaanisen hiilen (TOC) pitoisuuden kanssa (Mattsson ym. 2003). Luonnontilaisilla alueilla vapaan nitraattityypin pitoisuudet ovat erittäin harvoin merkittäviä. Joillakin eteläsuomalaisilla tutkimuskohteilla, kuten Vihdin Yli-Knuutilassa, missä veden pH on korkea ja orgaanisen hiilen huuhtoutuminen vähäistä, NO_3 -arvojen on havaittu olleen koholla (Kortelainen ym. 2003).

Fosfori

Suomen kallioperässä yleisissä happamissa syväkivissä ja metamorfisissa kivissä on fosforia yleensä 0,03 – 0,12 %. Emäksisissä kivissä kuten gabroissa pitoisuudet voivat olla korkeampia (Lahermo ym. 1996). Silikaattimineraaleihin sitoutunut fosfori on kuitenkin vaikealiukoista, eikä siten ole merkittävä tekijä fosforin ravinnekierrossa. Kallioperän tärkeimpiä fosfaattimineraaleja on apatiitti, josta on peräisin suurin osa luonnonvaraisten eliöiden tarvitsemasta fosforista. Esimerkiksi moreenin hienoaineksen fosfori on enimmäkseen sitoutunut apatiittiin ja siten kasvillisuuden kannalta heppoliukoisemmassa muodossa. Liukoinen fosfori esiintyy valumavesissä fosfaatti- ja vetyfosfaatti-ioneina PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} ja H_2PO_4^- . Lisäksi

fosforia kulkeutuu myös orgaanisina komplekseina ja kolloideina sekä sitoutuneena humus- ja savipartikkeleihin. Pääosa fosforista kulkeutuukin tiukasti saviaineksen sekä alumiini- ja rautahydroksidisaostumien pinnalle kiinnittyneenä (Rekolainen 1993).

Luonnontilaisten valuma-alueiden vuotuiset fosforihuuhtoumat vaihtelevat välillä 3 - 15 kg km²a⁻¹ keskiarvon ollessa n. 5-7 kg km²a⁻¹ (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Luonnontilaisten alueiden fosforihuuhtoumiin vaikuttavat ratkaisevasti maaperän geologiset ominaisuudet. Mikäli maaperässä esiintyy sedimentoituneita fosfaatteja eli fosforiitteja tai magmaattista syntyperää olevia fosfaatteja eli apatiitteja, rapautumisprosessien yhteydessä vapautuu fosforia myös valumavesiin. Kivennäismaa-aineksesta arvioidaan karkeasti noin tuhannesosan olevan fosforia, josta kuitenkin suurin osa on sitoutuneena maaperäpartikkeleihin eikä siten suoraan kasvien käytettävissä. Turpeen fosforipitoisuus vaihtelee välillä 0,2 - 1,0 ‰. Siten kiintoainehuuhtouman kasvu lisää käytännössä aina myös kokonaisfosforin huuhtoumaa (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Kokonaisfosforin konsentraation valumavesissä on havaittu korreloivan positiivisesti myös orgaanisen hiilen (TOC) kanssa, mikä osoittaa että orgaanista fosforia huuhtoutuu humusyhdisteisiin sitoutuneena. (Mattsson ym. 2003). Joissakin tutkimuksissa kokonaisfosforin pitoisuudet ovat sitä korkeampia mitä suurempi osuus valuma-alueen pinta-alasta on ollut turvemaita (Kortelainen ja Saukkonen 1998). Fosforin huuhtoutuminen turvemaita on monimutkainen prosessi, joka liittyy raudan ja alumiinin hapettumis- ja pelkistymisreaktioihin. Soistuneilta alueilta suotautuvissa happamissa, hapettomissa vesissä humusyhdisteet sitovat raudan ja alumiinin liukoiksi kompleksiyhdisteiksi, mikä aiheuttaa liunneen epäorgaanisen fosfaatin normaalia suuremmat pitoisuudet. Luonnontilaistenkin alueiden fosforihuuhtoumissa on kuitenkin suuria eroja, jotka ovat vaikeasti tulkittavia (Åström ym. 2005).

Kiintoaine

Kiintoaineella tarkoitetaan eloperäistä tai mineraaleista koostuvaa ainesta, joka kulkeutuu valumavesissä veteen sekoittuneena tai pohjaa pitkin liukuen. Kiintoaine päätyy jokeen eroosion, ilmalaskeuman ja orgaanisen aineksen hajoamisen seurauksena. Suuret kiintoainepitoisuudet aiheuttavat veden samentumista ja pohjan liettymistä sedimentoituessaan hitaan virtaaman alueelle. Kuormitusta mitattaessa kiintoaineen pitoisuus määritetään tavallisesti veteen sekoittuneista eli suspendoituneista hiukkasista. Kiintoainepitoisuuden määrittämisen tulos riippuu käytetystä suodatintyypistä. Tavallisesti kiintoaineen määrittämisessä käytetään borosilikaatti-lasikuitusuodattimia, joiden massa pinta-alayksikköä kohti on 50 - 100 g m⁻². Hienompirakeinen kiintoaine määritetään polykarbonaattisuodattimella, jonka huokoskoko on 0,4 µm tai kalvosuodattimella, jonka huokoskoko on 0,45 µm.

Metsätaloustalouden ulkopuolella olevilla alueilla puroumien eroosio on tavallisesti vähäistä ja kiintoaineen pitoisuudet valumavesissä alhaisia. Mattssonin ym. (2003) tutkimuksessa keskimääräinen pitoisuus oli 0,7 mg l⁻¹ ja vaihteluväli 0,1 - 2,6 mg l⁻¹. Vuotuinen kiintoainehuuhtouma häiriintymättömältä metsämaalta on siten tyypillisesti 1 - 5 kg ha⁻¹. Kiintoaineen huuhtoutuminen vaihtelee kuitenkin ajallisesti niin, että se kasvaa sateisina vuosina suurten valuntojen aikana (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Myös erot maaperän koostumuksessa sekä kasvillisuudessa vaikuttavat huomattavasti alueelta tulevaan kiintoainehuuhtoumaan. Koska suurin osa orgaanisesta hiilestä kulkeutuu liukoisessa muodossa, luonnontilaisissa valumavesissä ei kiintoaineen mukana huuhtoudu merkittävästi myöskään tyyppä tai fosforia (Mattsson ym. 2003).

2.2 Metsätaloudelliset toimenpiteet

Nykyaikaiseen metsätalouteen kuuluu monia erilaisia laadultaan, intensiteetiltään ja ympäristövaikutuksiltaan vaihtelevia toimenpiteitä, joista ravinne- ja kiintoainekuormituksen kannalta tärkeimmät voidaan jakaa neljään ryhmään:

2.2.1 Vesitalouden parantamiseen tähtäävät toimenpiteet

Soistuneilla mailla tai alueilla, missä pohjaveden pinta on korkea, alueen vesitaloutta ja puuston kasvuolosuhteita pyritään parantamaan ojittamalla. Soiden ja veden vaivaamien kangasmetsien metsäojitukset ovatkin laajamittaisin maamme vesistöjen ja valuma-alueiden tilaan vaikuttanut metsätaloudellinen toimenpide-muoto. Metsäojitukset jakautuvat epätasaisesti eri puolille maata noudattaen pitkälti samaa painotusta kuin soiden esiintyminen. Ojitettujen soiden kokonaispinta-ala Suomessa on 48 300 km². Pääsääntöisesti on ojitettu puustoisia soita: suopinta-alasta noin 60 % on ollut rämeitä, 25 % korpia ja 15 % avosoita. Nykyisin kangasmaiksi luokiteltuja ojitettuja alueita on yhteensä 12 700 km². Uudisojituksia on tehty vähäisessä määrin jo 1900-luvun alusta lähtien. Huippuunsa ojitusten määrä kohosi 1960- ja 70-luvuilla, jolloin vuotuiset ojitukset kattoivat lähes 3 000 km² laajuisen alan (Peltola 2003). Nykyisin uudisojituksista ollaan käytännössä luovuttu ja FFCS -metsäsertifiointi kieltää luonnontilaisten soiden ojituksen. Sen sijaan jo ojitettujen alueiden puuntuotantokyvyn ylläpitämiseksi niillä tehdään kunnostusojituksia 20 - 40 vuoden välein. Kunnostusojituksessa vanhat, umpeenkasvaneet tai liettyneet ojat perataan ja tarpeen mukaan suoritetaan myös täydennysojitusta. Vuodesta 1990 eteenpäin vuotuinen kunnostusojitettu pinta-ala on ollut 640 - 830 km² (Peltola 2003).



Kuva 1. Ojitus



Kuva 2. Uudistushakkuu

2.2.2 Hakkuu ja puunkorjuu

Talousmetsän kasvatuskierto päättyy uudistushakkuuseen, jossa yleensä poistetaan alueen puusto mahdollisia yksittäisiä jättöpuita lukuun ottamatta kokonaisuudessaan. Kierron pituus vaihtelee puun käyttötarkoituksen ja puulajin mukaan. Mänty- ja kuusitukkipuun uudistusikä eteläosissa maata on yleensä 80 - 100 vuotta, pohjoisessa hitaammasta kasvusta johtuen n. 1,5-kertainen. Lehtipuiden kiertoaika on lyhyempi, tavallisesti vain 50 - 80 vuotta. Kuitupuuksi kasvatettavilla metsillä päätehakkuiden välinen aika on kaikkein lyhin, ääriesimerkkinä jalostettu haapa, jota voidaan suotuisissa oloissa uudistaa 20 - 25 v. välein. 1990-luvun alusta lähtien uudistushakkuiden vuosittainen kokonaispinta-ala on ollut 1500 – 2200 km² (Peltola 2003). Uudistushakkuiden lisäksi talousmetsissä tehdään lyhemmin väliajoin kasvatushakkuita, joissa jäljelle jäävälle puustolle muodostetaan lisää elintilaa. Ennen päätehakkuuta metsää harvennetaan 1 – 4 kertaa eli 15 – 40 vuoden välein. Kasvatushakkuiden pinta-ala on vakiintunut 3300 – 4000 km²:iin vuodessa (Peltola 2003). Aiemmin käytäntönä oli poistaa metsästä hakkuiden yhteydessä pelkät rungot, nykyisin harjoitetaan myös hakkuutähteiden ja kantojen keräämistä. Varsinkin hakkuutähteiden poistamisella on suuri merkitys metsän ravinnekierron kannalta, sillä ne sisältävät 60-80 % puustoon sitoutuneista ravinneista (Kubin 1983).

2.2.3 Maanmuokkaus

Maanmuokkauksen tarkoituksena on luoda päätehakkuun jälkeen suotuisat olosuhteet taimikon kasvuille. Maanpintaa voidaan käsitellä useilla eri menetelmillä. Keskeistä muokkauksessa on yleensä metsämaan pintakerroksen eli kunnan rikkomisen, jolloin alla oleva kivennäismaa paljastuu. Yhtenä päämääränä voi ojituksen tapaan olla myös maaperän vesitalouden parantaminen. Nykyisin käyte-

tyimpiä muokkaustapoja ovat äestys (47%), mätästys (25%) ja laikutus (23%), joista mätästys voidaan suorittaa ojitus- eli naveromätästykseenä, kääntömätästykseenä tai laikkumätästykseenä. Pohjois-Suomen paksukunttaisilla alueilla voidaan käyttää myös säätöaurausta. Muutoin aiemmin suosittua aurausta harjoitetaan enää vähän (Peltola 2003). Aurauksen vaikutus on voimakkain suhteellisia pinta-aloja tarkasteltaessa. Aurasalueilla on rikottua maanpintaa 50 - 65 % uudistusalueesta kun laikutuksen, mätästykseen ja äestysten vastaava osuus on 20 - 40 % (Karjalainen ym. 1995). Eri maanmuokkausmenetelmistä syvimmälle maaperään ulottuu säätöaurausta ja ojitusmätästys (25 - 50 cm). Käytännössä niiden vaikutus on vesitalouden kannalta sama kuin ojituksella. Laikutus ja äestys rikkovat maanpintaa enintään 10 cm syvyydeltä (Joensuu ym. 2004). Vuosittain avohakattavat ja muokattavat pinta-alat vastaavat taas melko tarkoin toisiaan, eli melkein kaikki avohakkuut myös mätästetään, äestetään tai laikutetaan (Peltola 2003). Vuosina 1990 - 2003 muokatun metsämaan vuotuinen kokonaispinta-ala on ollut 1100 - 1300 km².

2.2.4 Lannoitus

Metsämaita ja metsänkasvatustarkoituksessa ojitettuja soita voidaan lannoittaa kasvun parantamiseksi. Lannoituskäsittelyt jakautuvat kasvatustarkoituksiin ja terveyslannoituksiin. Kasvatustarkoituksia tehdään tavallisesti hyväkuntoisissa keski-ikäisissä kasvatusmetsissä, joiden vesitalous on kunnossa. Tavallisesti lisätään pääravinteita, lähinnä typpeä, joka on minimiravinne kangasmailla. Rehevissä kuusimetsissä voi olla pulaa myös fosforista. Turvemailla lannoitteet sisältävät puolestaan kaliumia ja fosforia.

Terveyslannoitusten tarkoituksena on parantaa maaperän ravinnetasapainoa sekä ehkäistä hivenaineiden puutoksesta johtuvia kasvuhäiriöitä. Terveyslannoitteena voidaan levittää paitsi pääravinteita myös hivenravinteita, tavallisimmin booria ja magnesiumia.

Valtion ja metsäyhtiöiden maita alettiin lannoittaa jo 1950-luvulla. Yksityismetsissä lannoitukset yleistyivät vasta 70-luvulla, mutta nousivat valtion tukemina nopeasti kattamaan pääosan vuotuisesta lannoituspinta-alasta. Vuoteen 2003 mennessä yhteenlaskettu lannoituspinta-ala on n. 33 200 km² eli n. 10 % maamme maapinta-alasta. 1970-luvun alkupuolella Suomen metsiä lannoitettiin vuosittain yli 2 000 km². 1990-luvulle tultaessa lannoitusten pinta-ala väheni jyrkästi ja oli alimmillaan vain n. 40 km² a⁻¹. Viimeisen kymmenen vuoden ajan lannoitusmäärät ovat jälleen olleet nousussa. Vuonna 2003 kasvatustarkoituksena ja terveyslannoitusten kokonaispinta-ala oli n. 230 km² (Peltola 2003).

2.3 Metsätalouden vaikutukset valumiin ja huuhtoumiin

Vuoden 2003 tilaston mukaan koko Suomen maapinta-alasta n. 87 % on metsätalousta, 9 % maatalousta ja 4 % rakennettua maata (taulukko 1). Koko maassa metsätalouden osuudeksi ihmisen toiminnasta peräisin olevasta typpikuormasta on arvioitu 5 % ja fosforikuormasta 6 %. Maatalouden ja puutarhatuotannon vastaavat osuudet ovat 59 % ja 52 % (Ympäristöministeriö 1998). Luonnonhuuhtoumat mukaan lukien viljelyksiltä ja metsämailta tulevat ravinnekuormat ovat koko maata tarkasteltaessa samaa suuruusluokkaa (Kortelainen ja Saukkonen 1998). Vaikka pinta-alaan suhteutettujen metsätalouden kuormitusluvut maatalouteen verrattuna ovat pienet, aiheuttaa toimenpiteiden ekstsensivisyys merkittäviä muutoksia kohteena olevien valuma-alueiden vesistöissä.

Taulukko 1. Metsätalouden ja maatalouden sekä puutarhatuotannon osuus maapinta-alasta sekä niistä aiheutunut ravinnekuorma vesistöihin (Ympäristöministeriö 1998).

	Osuus maapinta-alasta (%)	Fosforin vuosikuorma (t)	Typen vuosikuorma (t)
Metsätalous	87,2	340	3300
Maatalous ja puutarhatuotanto	8,9	3300	33000

Metsätaloudelliset toimenpiteet häiritsevät valuma-alueiden luonnontilaa, mikä voidaan havaita monenlaisina muutoksina alueen hydrologiassa, ainevirroissa, eliöyhteisön koostumuksessa ja fysikaalisissa ominaisuuksissa. Alueilla, missä metsätalous on ainoa pääasiallinen maankäyttömuoto, vesistöjen on havaittu kärsivän rehevöitymisestä, samentumisesta ja liettymisestä (Vuori ym. 1995). Lähinnä ojituksen seurauksena on havaittu myös muutoksia pH-arvoissa ja metallipitoisuuksien lisääntymistä (esim. Åström ym. 2001). Metsätaloustoimenpiteet aiheuttavat usein kuormitusta niillä alueilla, joilla muiden kuormituslähteiden osuus on vähäinen. Niinpä vesistöjen latvaosissa, pienten järvien ja lampien valuma-alueilla sekä vähäjärvisissä jokivesistöissä metsätalouden vaikutukset valumaveden laatuun ja määrään voivat olla hyvinkin huomattavat (Alatalo 2000). Yksittäisten suurten järvien kuten Koitereen ja Lestijärven valuma-alueilla metsätalouden osuus kokonaisfosforikuormituksesta on jopa 40-50 % (Marttunen 1998). Pohjois-Suomessa metsätalouden osuus kuormituksesta nousee korkeaksi laajemminkin tarkasteltuna. Oulujoen vesistöalueella metsätalouden on laskettu aiheuttavan 20 % kokonaisfosforikuormasta, mikä vastaa 30-33 % antropogeenisestä kuormituksesta (Schroderus-Härkönen ja Markkanen 1999, Markkanen ym. 2001).

Yksittäisten toimenpiteiden sijoittumisesta ja ajoittumisesta tietyille valuma-alueelle seuraa selvästi havaittavia muutoksia alueen hydrologiassa, valumavesien laadussa ja ainekuormissa. Nykyaikaisen metsätalouden piirissä olevien valuma-alueiden keskimääräisetkin ainehuuhtoumat ovat korkeampia kuin luonnontilaisilla vertailualueilla. Mikäli tarkastelu ulotetaan pitkälle aikavälille, metsätaloukselta huuhtoutuvan kokonaisfosforin määrä on noin kaksinkertainen häiriöttömiin valuma-alueisiin verrattuna. Kokonaistypen huuhtouma on 1,4 -kertainen ja ammoniumtypen kuusinkertainen (Kortelainen ym. 2003). Arvot on mitattu vesistöjen latva-alueilla sijaitsevilta pieniltä valuma-alueilta. Laajempien alueiden vertailevaa tutkimusta vaikeuttaa sedimentoituminen ja orgaanisen aineen hajoaminen valumavesien kulkeutuessa eteenpäin.

Avohakkuulla on usein selvät vaikutukset alueen hydrologiaan. Kun puusto ei enää pidätä sadantaa eikä haihduta tehokkaasti maavettä, pohjaveden pinta voi nousta muutamalla desimetrillä ja pintavalunta kasvaa voimakkaasti varsinkin huonosti läpäisevillä mailla. Vesitalouden muutos on huomattavin vanhoissa kuusimetsissä, joiden avohakkuu voi johtaa vuosivalunnan kaksinkertaistumiseen. Normaalisti vuotuisen kokonaisvalunnan lisäys on hehtaarilla 5 - 10 mm poistettua kymmentä kuutiometriä kohti. Suometsissä valunta kasvaa enemmän kuin kankailla. Valunnan kasvun lisäksi hakkuu myös aikaistaa ja terävöittää kevät- ja kesäylivalumia, koska sulamis- ja sadevedet pidättyvät aiempaa heikommin. Hydrologisten muutosten kesto jää yleensä lyhytaikaiseksi, mikäli puuston uudistuminen pääsee hakkuun jälkeen käynnistymään normaalisti (Kenttämies ja Saukkonen 1996).

Metsänuudistamisen vaikutukset ravinne- ja kiintoainehuuhtoumiin jakautuvat itse hakkuun ja maanmuokkaustoimien aiheuttamiin muutoksiin. Kasvatuskierron päättävän uudistushakkuun jäljiltä metsään jää runsaasti jätetuuta, kantoja, juuria ja kuollutta pintakasvillisuutta, joiden lahotessa ravinteet alkavat nopeasti vapautua. Hajoamisprosessin johdosta typpeä liukenee ammonium- ja nitraatti-ionien muodossa alueen valumavesiin. Fosforihuuhtoumien kannalta mer-

kittävimpiä ovat hakkuun jälkeisen pohjaveden pinnannousun vaikutukset. Veden kyllästävässä kerroksessa mikrobitoiminta johtaa hapettomiin olosuhteisiin, missä raudan ja fosfaatin välinen kemiallinen sidos katkeaa ja fosfaatti vapautuu veteen (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Ojitetuilla turvemaidella hakkuun yhteydessä tapahtuvaa fosforin huuhtoutumista lisää turpeen alhainen rauta- ja alumiinipitoisuus (Nieminen 2003). Kiintoainekuormituksen määrä riippuu paljolti maalajin eroosioherkkyydestä sekä siitä, kuinka paljon korjuutoiminnan yhteydessä rikotetaan maanpintaa.

Hakutun alan muokkaaminen johtaa niin ikään kuormituksen kasvuun, mutta eri syistä kuin puuston poistaminen. Kun metsämaata peittävä kasvillisuus laajoilta aloilta poistuu ja karikekerros sekä maannostuneen kivennäismaan pinta rikotetaan, sadevesi pääsee nopeammin suotautumaan pohjavesiin. Toisaalta kaltevuuden suuntaisissa muokkausjäljissä veden pintavirtaus nopeutuu ja kivennäisaineksen huuhtoutumisriski kasvaa. Myös hakkuutähteistä ja kuolleesta pintakäsvillisyydestä vapautuvat kasviraivanteet pääsevät pintavalunnan mukana kulkeutumaan vesistöihin entistä esteettömämmin. Mikäli muokkauksen yhteydessä muodostuu orgaanista ainesta sisältäviä palteita, niistä vapautuu kasviraivanteita kaikkein nopeimmin (Kenttämies ja Saukkonen 1996).

Metsäojituksen vaikutukset valuma-alueen hydrologiaan näkyvät alentuneena pohjaveden pintana ja muuttuneena hydraulisina ominaisuuksina (Seuna 1990). Pohjaveden laskusta seuraa suon pintaosien kuivuminen ja siten vähentynyt haihdunta. Vaikka suoturpeen vedenvarastoisempotentiaali samalla kasvaa, ojasto nopeuttaa veden läpivirtaamaa ja suon kyky varastoida ja haihduttaa vettä ja siten tasata valumia heikkenee. Ojitusalueita tavallisesti ympäröivät piiriojat johtavat lisäksi kivennäismailta tulevan pintavalunnan ja pohjavesiperäisen veden suoraan alapuolisiin vesistöihin. Näin ollen ojitukset johtavat lähes poikkeuksetta vuosivalunnan kasvuun seuraavan 15 – 20 vuoden ajan. Tavallisesti kasvavat niin yli- kuin alivalumat. Toisinaan voi kevytliivaluma kuitenkin pienentyä, jos ojitukset ovat keskittyneet valuma-alueen alajuoksulle tai sijaitsevat hajallaan virtausmatkan kannalta. Valunnan kasvu on aluksi suurempi ja vähenee ajan kuluessa. Ensimmäisen 10 vuoden aikana kasvu on keskimäärin 0,3 - 0,6 % alueen ojitusprosenttia kohden. Märillä soilla ja ojitusprosentin ollessa pieni valunta kasvaa yleensä enemmän, kuivilla soilla ja laajalti ojitetuilla soilla vähemmän (Seuna 1990). Puuston kehittyessä ja ojien vedenjohtokyvyn heiketessä umpeenkasvun ja liettymisen vuoksi valunta palaa vähitellen alkuperäiselle tasolle ja lopulta alittaa sen lisääntyneen evapotranspiraation johdosta (Kenttämies ja Saukkonen 1996).

Metsäojitus laskee pohjaveden pintaa yleensä muutamalla kymmenellä senttimetrillä. Muutos suon vesitaloudessa vaikuttaa oleellisesti myös maaperän kemiallisiin ja mikrobiologisiin ominaisuuksiin, kun hapettomat turpeen pintakerrokset muuttuvat hapellisiksi. Näin ojitus ei vaikuta yksinomaan alueen valuntasuhteisiin ja valunnan määrään vaan myös valumavesien laatuun (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Ojastojen kaivu saattaa osittain maatauneen suoturpeen ja paljastuneen kivennäismaan alttiiksi syövyttävälle vesieroosiolle. Seurauksena on kiintoainepitoisuuden kasvu ojitusalueen alapuolisissa vesissä. Kiintoainepitoisuuden huiput ajoittuvat yleensä kaivuajankohtaan sekä kevättulvien yhteyteen (Ahti ym. 1995). Ojaoerosioon vaikuttaa eniten valunnan määrä, ojaston kaltevuus, veden virtausnopeus sekä maalaji (Joensuu 2002). Orgaanisista maalajeista kiintoainetta liettyy eniten pitkälle maatauneeseen turpeeseen, liejuun sekä muutaan kaivetuista ojista kun taas nuori, heikosti maataunut turve kestää vesieroosiota paremmin. Kivennäismaista hieno hiekka, hieta ja hiesu liettyvät herkästi; karkeimmat lajitteet ja savi huuhtoutuvat niukemmin. Ojitusalueilla, missä ojat on kaivettu pelkästään turpeeseen, kiintoainepitoisuuden huippu ajoittuu useimmiten ojien kaivuajankohtaan ja pitoisuus pienentyy nopeasti lähelle alkuperäistä

tasoa. Sen sijaan ohutturpeisilla alueilla, missä ojat ulottuvat runsaasti hienojakoista ainesta sisältävään kivennäismaahan, valumavesien kiintoainepitoisuus pysyy kauemmin korkealla (Ahti ym. 1995).

Uudisojituksen ja kunnostusojituksen vaikutukset alueen hydrologiaan ja ainekuormiin ovat samansuuntaiset. Kunnostusojituksessa valumien kasvu jää jo aiemmin tapahtuneiden muutosten johdosta ainakin teoriassa pienemmäksi kuin uudisojituksessa. Kunnostusojituksen on todettu ohutturpeisilla soilla lisäävän valuntaa kesäalivalumaa lukuunottamatta 20 – 30% (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Valunnan lisäyksen suhteesta aiemmin toteutetun uudisojituksen vaikutuksiin ei ole saatavana luotettavaa tietoa. Suonpinnan painumisesta uudisojituksen jälkeen kuitenkin seuraa, että oja kunnostettaessa ne usein ulotetaan kivennäismaahan asti. Lisäksi heikommin kuivuneita osuuksia usein täydennysojitetään. Kunnostusojituksen vaikutukset ravinne- ja kiintoainekuormitukseen riippuvatkin suuresti toimenpiteiden laadusta. Mannisen (1998) mukaan kunnostusojituksen aiheuttamat vedenlaadun muutokset vastaavat pääosin uudisojitusta. Joensuun (2002) aineisto, joka sisälsi 23 eri puolilla Suomea sijaitsevaa ojitusaluetta, sen sijaan osoitti, että kokonaistypen ja liuenneen kokonaisfosforin huuhtoumat pysyivät toimenpidettä edeltäneellä tasolla tai jopa laskivat vähän. Kiintoaineen ja ammoniumtypen kuormitus kolmen kunnostusojitusta seuranneen vuoden aikana puolestaan kasvoi merkittävästi. Ammoniumtypen vapautuminen suoturpeesta selittyy happipitoisuuden lisääntymisellä, koska tällöin turpeen kyky adsorboida NH_4^+ -ioneja heikkenee (Joensuu 2002). Kunnostusojituksessa huuhtoutuneen kiintoaineen pitoisuuden on havaittu korreloivan positiivisesti ojituspinta-alan, ojamäärän, perkausojien määrän sekä valtaojien kaltevuuden kanssa. Valtaojat keräävät ja kuljettavat suuria vesimääriä, joten ne ovat myös ojitusalueelta tulevan kiintoainekuorman osalta merkittävässä asemassa (Sallantaus 1987). Ojitusalueiden kiintoainekuormitusta voidaan merkittävästi vähentää ojien sijoituksen huolellisella suunnittelulla, kaivutöitä jaksottamalla sekä käyttämällä pohjapatoja, lietekuoppia, perkaus- ja kaivukatkoja, laskeutusaltaita, suojakaistoja sekä pintavalutuskenttiä (Joensuu ym. 2004).

Aineisto ja menetelmät

3.1 Yleistä

Laskentamenetelmän tarkoituksena on tarkastella keskeisimpien metsätalouteen liittyvien toimenpiteiden vaikutusta valuma-alueen typpi-, fosfori- ja kiintoainekuormiin. Kunnostusojitus sekä avohakkuun ja sen jälkeisen maanmuokkaus ovat nykymetsätalouden keskeisimpiä kuormitusta lisääviä toimenpiteitä. Uudisojitusta ei nykyisin laaja-alaisesti harjoiteta, mutta monin paikoin ojitusmätästys vastaa hydrologisilta vaikutuksiltaan ojitusta. Lannoitusta suoritetaan nykyisin melko vähän ja sen vaikutukset riippuvat voimakkaasti kohdealueen maalajista sekä li-sätyistä ravinteista. Nykykäytännön mukaisista lannoituksista on vähän tutkimusperäistä tietoa, mistä syystä lannoituksen aiheuttamaa vesistökuormitusta ei tarkastella.

Kokoamalla yhteen aineistoa erityyppisiltä alueilta pyritään rakentamaan yleispätevä malli, josta ilmenee kuormituksen kehitys toimenpiteen jälkeisinä vuosina. Mallin rakentamista varten on etsitty sopivia valmiita aineistoja alan julkaisuista sekä käytetty tarkoitukseen soveltuvia tietoja käynnissä olevista projekteista. Osassa alueista on hyödynnetty ympäristöhallinnon valuma- ja vedenlaatu-tietoja, joiden avulla on laskettu kuormitus. Käytettyjen tietojen edellytyksenä on ollut, että aineistosta käy mahdollisimman tarkasti ilmi tehtyjen toimenpiteiden laatu, ajankohta, suhteellinen osuus valuma-alueesta, kuormitusarvot kalibrointijaksolta ennen toimenpidettä sekä tarkastelujaksolta toimenpiteen jälkeen. Vuosikohtaisten hydrologisten korjausten laskemiseksi on hyödynnetty myös vertailualueiden valumatietoja, mikäli ne ovat olleet saatavissa. Sopivan vertailualueen puuttuessa on käytetty generoituja valumia.

Useissa tapauksissa metsätaloudelliset päämäärät ovat sanelleet toimenpiteet niin että alueella on seurantajakson kuluessa tehty peräkkäin erilaisia toimenpiteitä. Näin ollen ojituksen, hakkuun, maanmuokkauksen ja lannoituksen aiheuttamia vaikutuksia toimenpidealueen valumiin ja ravinne- sekä kiintoainekuormiin on hankalaa tarkastella erikseen ilman jonkinlaista alustavaa estimaattia toimenpidekohtaisista vaikutuksista. Toisaalta osa toimenpiteistä esiintyy käytännön metsätaloudessa säännönmukaisesti yhdessä. Esimerkiksi hakkuun ja maanmuokkauksen tarkasteleminen yhtenä kuormitukseen vaikuttavana kokonaisuutena on siksi perusteltua. Mallia tarkasteltaessa on silti huomioitava, että mukaan otetuissa aineistoissa on toimenpiteiden yhteisvaikutuksia koskien jouduttu tekemään paikoin yksinkertaistavia oletuksia. Eri toimenpiteiden vaikutusta huuhtouman kasvuun on arvioitu aiemmin tehtyjen tutkimusten perusteella. Esimerkiksi ojituksen ja hakkuun esiintyessä samalla valuma-alueella ojituksen merkitystä valumien kasvuun on painotettu. Monilla tutkimusalueilla on tarkastelun kohteena olevan toimenpiteen lisäksi tehty suppeilla aloilla muitakin toimenpiteitä. Tällaisissa tapauksissa valuma-alueen kokonaispinta-alaan nähden vähäisten toimenpiteiden vaikutus on jouduttu jättämään vaille huomiota. Kaikki tiedossa olevat toimenpiteet on mainittu kohdealueiden kuvauksissa.

Mallinnuksessa on keskitytty avohakkuun ja sitä seuraavan maanmuokkauksen vaikutusten sekä metsäojituksen tarkasteluun. Eri alueilla käytännöt vaihtelevat alueen geologian, hydrologian ja topografian mukaan, mikä vaikeuttaa

aineistojen sovittamista yhteen. Metsäojituksen intensiteetti on joissakin tutkimuksissa ilmoitettu ainoastaan ojaston pituutena metsähehtaaria kohti. Näissä tapauksissa ojitetun pinta-alan suhteellinen osuus valuma-alueesta on aluekuvausten ja karttatarkastelun avulla arvioitu. Osassa aineistoa on käytetty suojavyyhykettä, jonka leveys saattaa vaihdella. Suojavyyhykkeen vaikutuksesta ravinnehuuhtoumiin ei esimerkiksi Nurmes-projektin osalta saatu selvää näyttöä (Kenttämies ja Saukkonen 1996).

Metsätaloudelliset toimenpiteet käynnistävät luonnossa monimutkaisia prosesseja, joista kaikkia ei toistaiseksi ymmärretä riittävän yksityiskohtaisesti. Osaltaan kuormitukseen vaikuttavat myös satunnaisesti vaihtelevat muuttujat, joita ei voida tarkasti ennakoita. Seurauksena minkä tahansa toimenpiteen vesistökuormituksen ennustamiseen liittyy epävarmuutta. Jotta tietoja toisistaan poikkeavista aluekohtaisista kuormitusvaikutuksista voitaisiin yhdistää, laskentamenetelmän rakentamisessa joudutaan tekemään yksinkertaistavia ja keskimääräisiin vaikutuksiin perustuvia oletuksia. Tässä työssä laskentamenetelmän lähtökohtaiset oletukset ovat:

1. eri alueilla kuormitus lisääntyy luonnonhuuhtoumaan suhteutettuna yhtä paljon
2. kuormituksen kasvu on suoraan verrannollinen käsitellyn alueen suhteelliseen osuuteen valuma-alueesta
3. ravinne- ja kiintoainekuormituksen maksimi saavutetaan yhden vuoden kuluessa toimenpiteestä, minkä jälkeen häiriön korjaantuminen alkaa välittömästi
4. kuormituksen aleneminen on luonteeltaan eksponentiaalista
5. toimenpiteen kuormitusvaikutus tulkitaan päättyneeksi, kun vuosittainen kuormituslisä laskee alle kymmenesosaan alkuperäisestä luonnonhuuhtoumasta.

3.2 Aineisto

3.2.1 Uudisojitus

Uudisojituksen vesistökuormituksen mallintamiseen käytettiin kolmea tutkimusaluetta (taulukko 2).

Murtopuro, Koivupuro ja Suopuro ovat Nurmes-tutkimuksen kohdealueita (Ahtiainen ja Huttunen 1995). Murtopuro sijaitsee Valtimon kunnassa, Koivupuro (63°52'N, 28°40'E), ja Suopuro (63°52'N, 28°39'E) Sotkamossa. Nurmes-tutkimuksessa purojen virtaamien ja ravinne- sekä kiintoainepitoisuuksien luonnontilaista vaihtelua seurattiin ensin neljä vuotta vuosina 1979 - 82. Kalibrointijakson jälkeen metsähallitus ojitti alueet. Tutkimustuloksia ovat esittäneet mm. Holopainen ja Huttunen (1995), Ahtiainen ja Huttunen (1995, 1999), Kenttämies ja Saukkonen (1996) ja Alatalo (2000).

Taulukko 2. Uudisojituksen vesistökuormituksen mallintamisessa käytetyt tutkimusalueet.

Havaintopaikka	Kunta (ha)	Vesistöalue	Pinta-ala	Toimenpide- pinta-ala (%)	Kalibrointi- jakso	Kuormitus- jakso
Murtopuro	Valtimo	04.465	494	40	1979-82	1986-97
Koivupuro	Sotkamo	04.467	118	27	1979-82	1983-94
Suopuro	Sotkamo	04.467	113	13	1979-82	1983-97

Murtopuro

Murtopuron valuma-alue sijaitsee Valtimon kunnassa (63°45'N, 28°29'E). Alue on 494 ha laajuinen ja maalajiltaan puoliksi hiekkaista ja hienoainesmoreenia, puoliksi turvemaata. Alun perin puuston määrä Murtopuron alueella oli 122 m³ ha⁻¹ ja metsäalasta 89 % oli havumetsää. Metsän peittävyys oli 74 %. Talvella 1982-83, ennen ojitusta, Murtopuron kohteella suoritettiin avohakkuu, joka käsitti 58 % koko valuma-alueen pinta-alasta. Turvemailla osuus oli 70 %. Avohakkuun jälkeen vuonna 1986 hakatut kivennäismaat aurattiin (16 %) ja turvemaat ojitettiin (40 %). Seuraavana vuonna alue istutettiin männylle.

Koivupuro

Koivupuron valuma-alue sijaitsee Sotkamossa (63°52'N, 28°40'E). Alueen pinta-ala on 118 ha. Maalajeista 43 % on hiekkaista ja hienoainesmoreenia, 57 % turvetta. Alkuperäinen puuston kuutiomäärä hehtaarilla oli 71 m³ ha⁻¹. Metsän peittävyys oli 44 %. Pinta-alasta 97 % oli havumetsää. Koivupuron valuma-alueesta ojitettiin v. 1983 27 %. Ojat kaivettiin siten, että niistä oli suora yhteys luonnonuomiin. Samana vuonna tehtiin lisäksi pienialainen avohakkuu (5 %). Kesällä 1986 suoritettiin 4 ha alueella mätästys ja lisäojitus (3 %). Seuraavana vuonna alueelle istutettiin männyn taimet ja vuonna 1989 alueesta 5 % lannoitettiin.

Suopuro

Suopuron valuma-alue sijaitsee Sotkamossa (63°52'N, 28°39'E) ja rajoittuu osittain Koivupuron valuma-alueeseen. Alueen pinta-ala on 113 ha. Suopuron maaperä on turvevaltaista: eriasteisesti maaton turvetta on 70 % alueesta. Loput 30 % on hiekkaista ja hienoainesmoreenia. Puuston alkuperäinen kuutiotilavuus oli 26 m³ ha⁻¹ ja peittävyys 45 %. Suopuron alueen metsistä 99 % oli havumetsää. Suopuron valuma-alueesta 13 % ojitettiin 29.6. - 6.7.1983. Ojien kokonaispituus oli 5,4 km. Ojitus toteutettiin suojavyöhykkeellisenä siten, että ojien ja luonnollisten purkautumisreittien väliin jätettiin 10 metrin levyinen koskematon alue.

3.2.2 Kunnostusojitus

Kunnostusojituksen vesistökuormituksen mallintamiseen käytettiin kolmea tutkimusalueita: Parkonsuonojaa ja Ruununsuonojaa (Manninen 1999) sekä Lodisia (Åström ym. 2001, 2002) (taulukko 3).

Taulukko 3. Kunnostusojituksen vesistökuormituksen mallintamisessa käytetyt tutkimusalueet.

Havaintopaikka	Kunta	Vesistöalue	Pinta-ala (ha)	Toimenpide-pinta-ala (%)	Kalibrointi-jakso	Kuormitus-jakso
Parkonsuonoja	Kangasniemi	14.384	50	53	1988-95	1996-97
Ruununsuonoja	Kangasniemi	14.384	100	38	1988-92	1993-97
Lodis	Kruunupy	48.009	410	n. 55	1993-94	1995-96

Parkonsuonoja

Parkonsuonojan valuma-alue sijaitsee Kangasniemen kunnassa (62°13'N, 26°35'E). Valuma-alueesta noin puolet muodostuu Parkonsuosta, joka uudisojitettiin vuosina 1964 - 65. Vuoden 1995 heinäkuussa suoritettiin kunnostusojitus, jossa perattiin vanhoja oja 9860 m sekä kaivettiin 790 m täydennysoja. Uudelta toimenpidealu-

eelta tulevat vedet kerättiin kokoomaajaan, joka erotettiin laskuojasta 1,6 ha laajuisella pintavalutus kentällä. Parkonsuon valuma-alueen laita-osissa on ennen kunnostusojitusta tehty jatkuvia pienialaisia uudistushakkuita: 1990 - 1994 alueella on vuosittain hakattu 2 - 9 ha metsää. Lisäksi Parkonsuon eteläpuolelle on vuonna 1987 vähän ennen kalibrointikautta tehty uudisojitusta n. 20 ha alalla. Parkonsuo on melko ohutturpeinen ja tehty kunnostusojitus ulottui laajalti kivennäismaahan asti. Parkonsuon valuma-alueen pääpuulaji on mänty. Metsät ovat enimmäkseen ojituksen aikaansaamia rämemuuttumia (53 %) sekä tuoreita (28 %) ja kuivahkoja (12 %) kankaita. Yleisimmät maalajit ovat turve ja moreeni.

Ruununsuonoja

Ruununsuonoja sijaitsee Kangasniemellä (62°13'N, 26°35'E) samalla Rökö-Viitalammen valuma-alueella kuin Parkonsuonojakin. Valuma-alueen ydinosa Ruununsuo on ojitettu ensimmäisen kerran vuosina 1964 - 65. Alue kunnostusojitettiin heinäkuussa 1995. Toimenpide käsitti 12 000 m uutta ojaa, joka oli pääasiassa vanhojen sarkojen täydennysojitusta sekä 2800 m ojanperkausta. Ruununsuo on paksutturpeinen ja siten tehty kunnostusojitus tapahtui pääosin kivennäismaahan koskematta. Lisätoimenpiteinä Ruununsuon alueella on tehty lannoituksia vuonna 1972. Tuolloin levitettiin typpeä, fosforia ja kaliumia 23 ha laajuiselle alueelle ja vain PK-lannoitusta 11 ha laajuiselle alueelle. Lisäksi vuonna 1992 valuma-alueen pohjoisosassa tehtiin 5 ha alalla uudistushakkuita. Ruununsuonojan valuma-alue muodostuu pääosin kuivista tai kuivahkoista rämemuuttumista (38 %), tuoreista kankaista (38 %) sekä vähemmässä määrin kuivahkoista kankaista ja ojittamattomista rämeistä. Alueen pääpuulaji on mänty. Maaperä on turvetta tai moreenia.

Lodis

Lodisin valuma-alue sijaitsee Kruunupyyn kunnassa (63°39' N, 23°06' E). Alueen kallioperä muodostuu gneissistä ja kiilleliuskeesta, joiden päällä on moreeni- ja hiekkakerros. Yli puolta valuma-alueen pinta-alasta peittää lisäksi ohut, n. 50 cm paksuinen turvekerros. Alueen puusto on 40 - 60 vuoden ikäistä koivu-, mänty- ja kuusimetsää. Ensimmäistä kertaa alueen turvemaita kuivattiin ojittamalla vuonna 1970. Sedimentaation ja lisääntyneen kasvillisuuden johdosta tukkeutuneet ojat perattiin ja osia suosta täydennysojitettiin joulumaaliskuussa 1994 - 95. Yhteensä kunnostuksen yhteydessä kaivettiin 32,7 km ojastoa, joka pääsääntöisesti ulottui turvekerroksen alaiseen kivennäismaahan. Kiintoainekuormituksen vähentämiseksi ojitusalueelle kaivettiin kuusi suurempaa laskeutusallasta, tilavuudeltaan 50 - 1200 m³, sekä yksittäisten ojien varsille 18 pienempää virtausnopeutta hidastavaa lietekuoppaa, jotka olivat 1- 3 m³ kokoisia.

3.2.3 Avohakkuu ja maanmuokkaus

Metsänuudistamisen vesistökuormituksen mallintamiseen käytettiin viittä tutkimusaluetta (taulukko 4). Alueita ovat tutkineet Holopainen ja Huttunen (1995), Lepistö ym. (1995), Ahtiainen ja Huttunen (1995; 1999), Kenttämies ja Saukkonen (1996), Alatalo (2000) ja Haapanen ym. (2001).

Taulukko 4. Metsänuudistamisen vesistökuormituksen mallintamisessa käytetyt tutkimusalueet.

Havaintopaikka	Kunta	Vesistöalue (ha)	Pinta-ala pinta-ala (%)	Toimenpidejakso	Kalibrointi-	Kuormitus jakso
Murtopuro	Valtimo	04.465	494	58	1979-82	1983-85
Kivipuro	Sotkamo	04.467	54	56	1979-82	1983-94
Yli-Knuutila	Vihti	23.099	7	n. 80	1986-91	1991-97
Lehmikorvenoja	Kuru	35.312	7,2	39	1993-96	1997-2000
Vannaskorvenoja	Kuru	35.312	32,8	40	1993-97	1998-2002

Kivipuro

Kivipuron valuma-alue sijaitsee Sotkamossa (63°52'N, 28°39'E) ja rajoittuu osittain toiseen Nurmes-kohteeseen, Koivupuron valuma-alueeseen. Kivipuron alue on laajuudeltaan 126 ha. Sen maalajitteista 68 % on hiekkaista ja hienoaineksista moreenia ja 32 % turvemaita. Puuston tilavuus ennen toimenpiteitä oli 126 m³ ha⁻¹. Metsäpinta-alasta 97 % oli havupuuvältaista. Alkuvuodesta 1983 Kivipuron valuma-alueella hakattiin mineraalimailta 30 ha metsää. Avohakkuun ja puron väliin jätettiin n. 50 - 150 m leveä hakkaamaton suojavyöhyke. Hakkuualue aurattiin kesällä 1986 ja seuraavana vuonna alueelle istutettiin taimikko.

Yli-Knuutila

Yli-Knuutila sijaitsee Vihdissä (60°25'N, 24°23'E) ja on pinta-alaltaan 7 ha. Alueelta on kerätty valuntatietoja jo vuodesta 1958 ja vedenlaatutietoja vuodesta 1969. Yli-Knuutila on kallioinen ja topografialtaan jyrkkä valuma-alue, jonka maaperä koostuu kivennäismaalajeista. Vallitsevana maalajina ovat hiekkainen sekä hienoainekseen moreeni, minkä lisäksi viidennes maista on lajittunutta hiesua. Kasvupaikkatyypiltään Yli-Knuutila on valtaosin lehtomaista kangasta. Metsätyypiltään alue edustaa käenkaali-mustikkatyyppejä. Puuston pääpuulaji on kuusi, jonka lisäksi mäntyä on 14 %. Puuston keski-ikä ennen hakkuuta oli 95 vuotta tilavuus 275 m³ ha⁻¹. Yli-Knuutilan alueella tehtiin elokuussa 1991 kuusen suojuspuuhakkuu, joka kattoi 80 % alueesta. Vuoden 1992 lopulla myrsky kaatoi alueelle jätetyn verhopuuston, joka korjattiin pois.

Lehmikorvenoja

Lehmikorvenoja sijaitsee Kurussa (61°52'N, 23°41'E). Valuma-alueen pinta-ala on 7,2 ha. Valuma-alueesta puolet kasvaa alle 20-vuotiasta männikköä. Toinen puoli on kuusivältaista mineraalimaata. Turvemaita alueella on 14 %. Vuosien 1996 ja -97 vaihteessa 39 % valuma-alueesta avohakattiin. Hakkuu sijoittui kuusta kasvavalle osuudelle. Luonnonuoman ja hakatun alueen välille jätettiin 20 -30 m levyinen suojavyöhyke.

Vannaskorvenoja

Vannaskorvenoja sijaitsee Kurussa (61°51'N, 23°41'E) noin puolen kilometrin etäisyydellä Lehmikorvenojasta. Valuma-alueen laajuus on 32,8 ha. Vannaskorvenojalla puusto on enimmäkseen mäntyvältaista kivennäismaata. Turvemaiden osuus on 14 %. Vannaskorvenojalla tehtiin talvella 1997 - 98 avohakkuu, joka koski 40 % valuma-alueesta. Lisäksi n. 3 ha alalla suoritettiin harvennushakkuu. Avohakattavan alueen reunoille jätettiin suojavyöhyke, jonka merkitys oli kuitenkin kyseen-

alainen, koska se muodostui aiemmin hakatusta ja ojitetusta osasta. Ennen kalibrointijaksoa, vuonna 1992 Vanneskorvenojan valuma-alueella oli toteutettu 4 ha uudistushakkuu.

3.3 Kuormituksen laskentamenetelmät eri tutkimusalueilla

Vanneskorvenojan ja Lehmikorvenojan ainehuuhtoumat on laskettu interpoloidulla vuorokausipitoisuuksilla niille päville, jolloin ei ole otettu näytteitä. Interpoloidut ja mitatut vuorokausipitoisuudet $c_{\text{int}}(t_i)$ on kerrottu vuorokausivalumalla $q(t_i)$ vuorokausihuutoumien selvittämiseksi. Vuosihuutouma L on saatu summaamalla yhteen vuorokausihuutoumat:

$$L = \sum_{i=1}^{365} c_{\text{int}}(t_i)q(t_i) \quad (1)$$

L = vuoden ainehuutouma (M T^{-1})
 $c_{\text{int}}(t_i)$ = interpoloitu tai mitattu pitoisuus näytteenottohetkellä (M L^{-3})
 $q(t_i)$ = näytteenottovuorokauden keskivaluma ($\text{L}^3 \text{T}^{-1} \text{A}^{-1}$)

Muiden kohteiden vuotuinen ainekuorma on laskettu virtaamapainotteisena Rekolaisen ym. (1991) laskentamenetelmällä 2-4:

$$L = \frac{Q_a \bar{L}}{\bar{Q}} \quad (2)$$

Q_a = vuotuinen virtaama ($\text{L}^3 \text{T}^{-1}$)
 \bar{Q} = virtaaman keskiarvo ($\text{L}^3 \text{T}^{-1}$)
 \bar{L} = kuorman keskiarvo (M T^{-1})

$$\bar{L} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c(t_i)Q(t_i) \quad (3)$$

$$\bar{Q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q(t_i) \quad (4)$$

3.4 Suhteellisen kuormituslisän laskeminen

Aineiston lähtötietojen perusteella kullekin toimenpidealueelle määritettiin toimenpidettä edeltänyt keskimääräinen vuosikuorma, johon toimenpiteen jälkeinen kuormitus suhteutettiin. Jokaiselle toimenpiteen jälkeiselle vuodelle (tai useamman vuoden jaksolle) laskettiin nk. suhteellinen kuorma eli yksittäisen vuoden ainekuorma suhteutettuna toimenpidettä edeltäneeseen kalibrointiajan keskimääräiseen ainekuormaan.

Näin saaduille suhteellisille kuormille tehtiin edelleen hydrologinen korjaus siten, että vuosittaisten valumavaihteluiden vaikutus poistettiin jakamalla arvot vuoden vetisyyttä kuvaavalla valuntakertoimella. Valuntakerroin määritettiin samalla periaatteella kuin kuormituksen osalta eli vuoden valuman ja pitkän ajan

valumakeskiarvon suhteella. Koska ojittaminen ja hakkuut vaikuttavat käsiteltävän alueen valumiin, korjaus tehtiin käyttämällä luonnontilaisen vertailualueen valuma-arvoja. Mikäli vertailualueen valuma-arvoja ei ole ollut saatavilla, käytettiin viereisen kolmannen jakovaiheen vesistöalueen estimoituja valumia, jotka saatiin Suomen ympäristökeskuksen kehittämästä ja ylläpitämästä Vesistömallijärjestelmästä (Suomen ympäristökeskus 2005).

Tuloksena päädyttiin laaduttomaan lukuun, kuormituskertoimeen, joka ilmaisee kuormituksessa tapahtuneen kasvun suhteessa toimenpidettä edeltävään luonnonhuuhtoumaan. Jotta päästäisiin keskenään vertailtaviin arvoihin, kuormituskertoimesta vähennettiin luonnonhuuhtouman osuus ja saatu arvo jaettiin toimenpiteen suhteellisella pinta-alalla valuma-alueesta. Siten jokaiselle toimenpidettä seuraavalle vuodelle määritettiin toimenpidekohtainen kuormituslisä:

$$k_L(n) = \left(\frac{L(n)}{mL} \frac{mq_{vert}}{q_{vert}(n)} - 1 \right) \frac{1}{p} \quad (5)$$

missä

$k_L(n)$ = toimenpidekohtainen suhteellinen kuormituslisä n vuotta toimenpiteen jälkeen

$L(n)$ = toimenpidealueen vuosikuorma n vuotta toimenpiteen jälkeen

mL = toimenpidealueen vertailuhuuhtouma (vuosihuutouman keskiarvo kalibrointikaudella)

$q_{vert}(n)$ = vertailualueen valunta n vuotta toimenpiteen jälkeen

mq_{vert} = vertailualueen keskivalunta

p = toimenpiteen suhteellinen osuus valuma-alueen pinta-alasta

Kunkin toimenpiteen osalta laskettiin aluekohtaisista kokonaisfosforin, fosfaattifosforin, kokonaistypen ja kiintoaineen kuormituslisistä keskiarvot niiltä ajanjaksoilta, joilta arvoja oli olemassa. Negatiiviset kuormituslisät eli kalibrointikautta alemmat arvot tulkittiin laskutoimituksessa nollassi. Yhdistetyissä tiedoissa oli huomattavaa hajontaa, joten käyrän muodon havainnollistamiseksi vaihtelua tāsattiin tarvittaessa laskemalla liukuva keskiarvo kolmen perättäisen havaintojakson arvoista. Edellytyksenä oli, ettei menetelmä aiheuta merkittäviä muutoksia kuormituksen keskimääräiseen lähtötason tai keston. Saadulle käyrälle etsittiin paras eksponentiaalinen sovite CurveExpert 1.3 –ohjelmalla. Yhtälö on muotoa

$$y = ae^{bx} \quad (6)$$

missä a ja b ovat ohjelman antamat vakiot. Aineistoon sovitettuna yhtälö saa muodon

$$L(t) = L_0 p k_{L(1)} e^{-\lambda(t-1)} \quad (7)$$

missä

$L(t)$ = kuormitus t vuotta toimenpiteen jälkeen

L_0 = vuosihuutouma ennen toimenpidettä

p = toimenpiteen suhteellinen osuus valuma-alueen pinta-alasta

$k_{L(1)}$ = suhteellinen kuormituslisä vuoden päästä toimenpiteestä

t = aika vuosissa

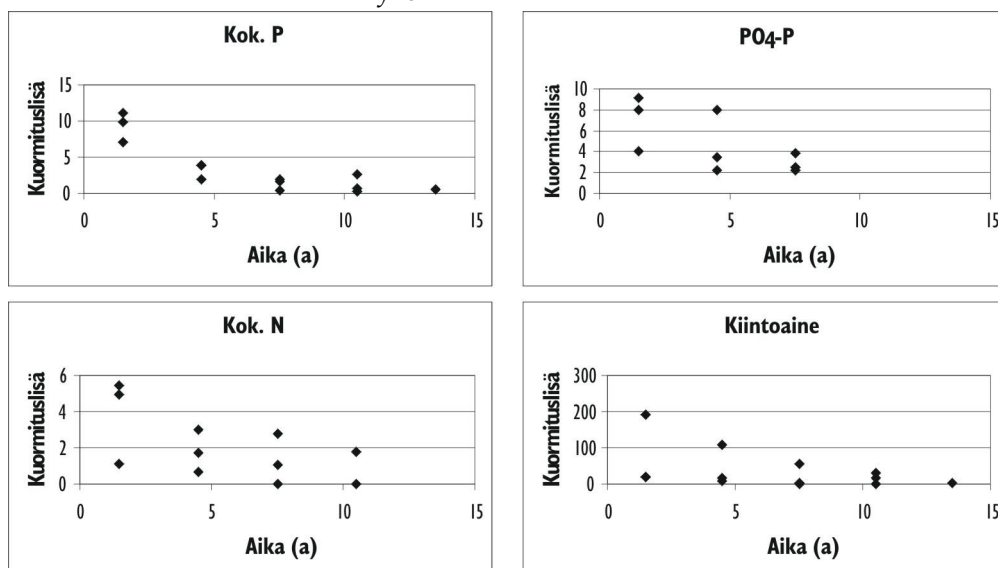
λ = kuormituksen alenemisnopeutta osoittava vakio

4

Tulokset

4.1 Uudisojitus

Metsätaloudellisista toimenpiteistä kaikkein selvimmät vaikutukset valuma-alueen vesistökuormitukseen on ollut uudisojituksella, jota ei laajamittaisesti enää harjoiteta. Mallin aineisto pohjautuu 80-luvun alussa ojitettuihin Nurmes-kohteisiin Murtopuroon, Koivupuroon ja Suopuroon. Murtopuron ja Koivupuron suojavaöhykkeettömällä, 27 - 40 % valuma-alueen pinta-alasta kattaneilla ojitusalueilla tyyppikuorma nousi ensimmäisen kolmen vuoden aikana keskimäärin 2,5-3 -kertaiseksi. Suojavyöhykkeellisellä Suopuron kohteella (ojitettu 13 %) typen huuhtouma ei osoittanut merkittävää kasvua. Kokonaisfosforikuorma kohosi tutkituilla kolmella alueella enemmän, luontaiseen kuormitukseen verrattuna n. 2,5-5 -kertaiseksi. Fosfaattifosforin määrät kasvoivat aluksi samassa suhteessa, Suopurolla kuitenkin vain 1,5 -kertaiseksi. Jatkossa kokonaisfosforin kuormat alenivat nopeammin ja selvemmin kuin fosfaattifosforin. Kiintoaineen huuhtoumien lisääntymisessä oli alueiden välillä hyvin merkittäviä eroja. Murtopurolla vuotuiset kiintoainekuormat kasvoivat ensimmäisen kolmen vuoden aikana yli 70-kertaisiksi, Koivupurolla 6-kertaisiksi ja Suopurolla 3-kertaisiksi. Ainoastaan Koivupurolla huuhtoumat laskivat toimenpidettä seuraavien kymmenen vuoden kuluessa lähelle alkuperäistä tasoa. Murto- ja Suopurolla vuosittaiset kiintoainehuuhtoumat vaihtelivat hydrologisista olosuhteista riippuen voimakkaasti. Yli 10 vuotta toimenpiteen jälkeen kuormat olivat ajoittain vielä yli kymmenkertaiset ojitusta edeltäneeseen aikaan verrattuna. Kaikkien alueiden kuormituslisä toimenpidepinta-alaan suhteutettuna on esitetty kuvassa 3.

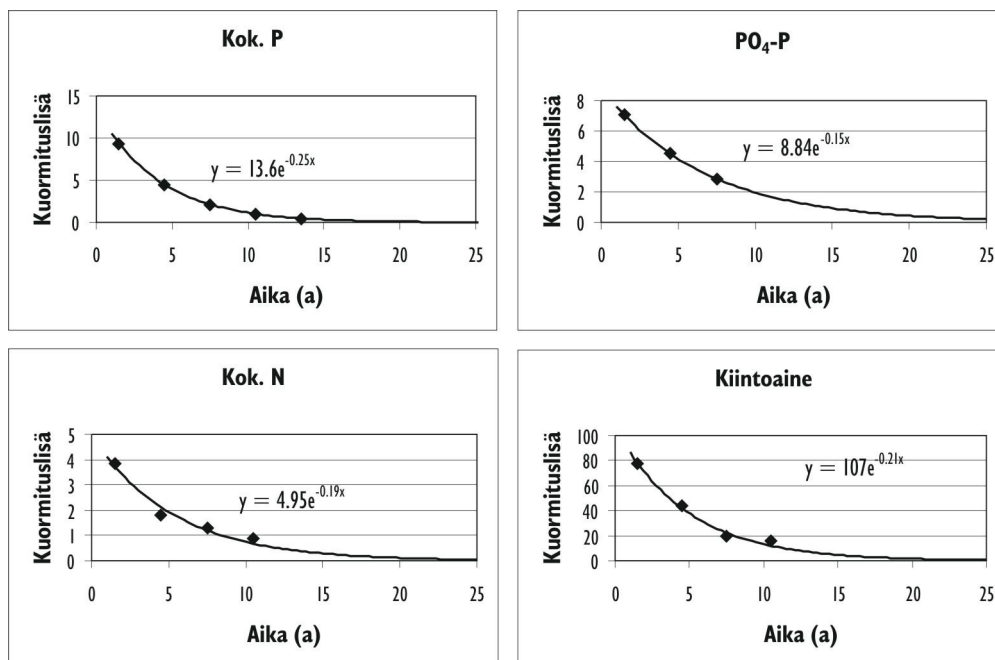


Kuva 3. Uudisojituksen aiheuttama kuormituslisä. Kaikilta tutkimusalueilta kootut arvot osoittavat luonnonhuuhtoumaan suhteutetun laskennallisen kuormituksen toimenpiteiden kattaessa 100 % valuma-alueesta.

Taulukko 5. Metsätaloudellisten toimenpiteiden aiheuttamaa kuormituslisää kuvaavat yhtälöt. (L_t = kuormitus t vuotta toimenpiteen jälkeen, L_0 = kuormitus ennen toimenpidettä, t = toimenpiteestä kulunut aika vuosissa)

	Kok. P	PO ₄ -P	Kok. N	Kiintoaine
Uudisojitus	$L_t = L_0 * 10.6e^{-0.25(t-1)}$	$L_t = L_0 * 7.61e^{-0.15(t-1)}$	$L_t = L_0 * 4.10e^{-0.19(t-1)}$	$L_t = L_0 * 86.6e^{-0.21(t-1)}$
Kunnostusojitus	$L_t = L_0 * 1.51e^{-0.72(t-1)}$	$L_t = L_0 * 1.36e^{-1.62(t-1)}$	$L_t = L_0 * 1.23e^{-0.33(t-1)}$	$L_t = L_0 * 7.81e^{-0.29(t-1)}$
Metsänuudistus	$L_t = L_0 * 1.80e^{-0.37(t-1)}$	$L_t = L_0 * 4.73e^{-0.58(t-1)}$	$L_t = L_0 * 1.41e^{-0.25(t-1)}$	$L_t = L_0 * 1.06e^{-0.21(t-1)}$

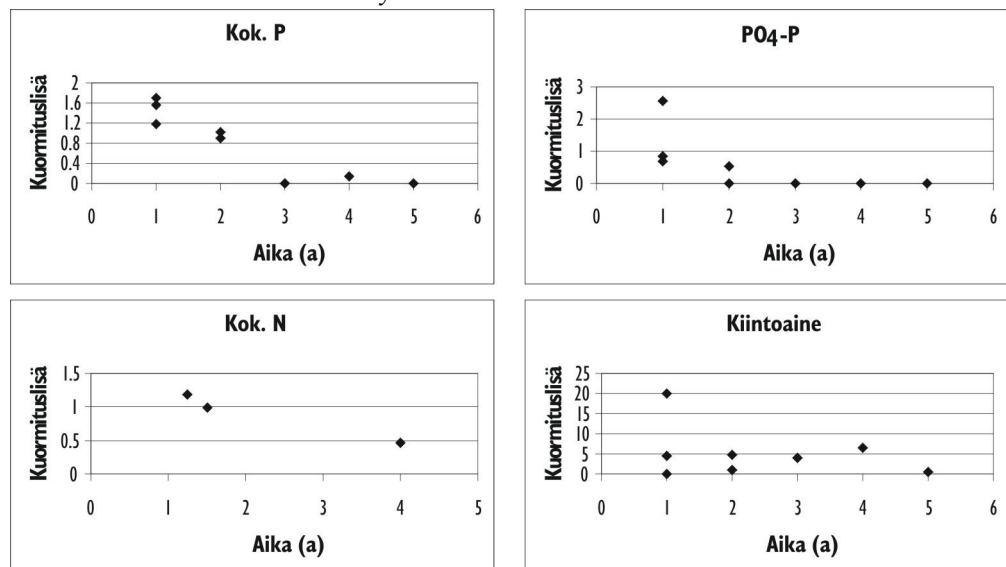
Yhdistettäessä kaikki aineistot uudisojituksen keskimääräistä kuormitusvaikutusta kuvaavat käyrät osoittavat, että uudisojitus tuottaa toimenpidealueelle ravinne- ja kiintoaineen lisäkuormituksen, jonka kesto kokonaan käsitellyillä valuma-alueilla on pisimmillään 19 – 33 vuotta (kuva 4). Nopeimmin alkuperäiselle tasolle palaava kokonaistypen ja kokonaisfosforin kuormitus. Kiintoaineen lisäkuormituksen lähtötaso, yli 80-kertainen luonnonhuuhtoumaan verrattuna, on kaikkein korkein. Kiintoaineen kuormituksen palautuminen toimenpidettä edeltäneelle tasolle on myös hitainta. Toimenpiteestä johtuva ylimääräinen ravinnekuormitus kokonaan käsitellyillä alueilla on kokonaistypellä aluksi noin 4-kertainen, fosfaattifosforilla yli 7-kertainen ja kokonaisfosforilla yli 10-kertainen luonnonhuuhtoumaan verrattuna (taulukko 5). Koko vaikutusaika huomioon ottaen luonnontilaisen alueen täydellinen ojittaminen aiheuttaa ravinteiden osalta 20–60 vuotuista luonnonhuuhtoumaa vastaavan kuorman. Kiintoaineen osalta vaikutukset ovat kertaluokkaa voimakkaammat. Uudisojituksen lähtötiedot koostuvat Nurmes-tutkimuksen alueista. Kolmesta kohteesta ainoastaan Suopuro oli suojavyöhykkeellinen, mutta oleellisesti tämä näkyy vain kokonaistypen kuormituksessa, joka oli Suopurolla selvästi alhaisempi kuin Murtopurolla ja Koivupurolla. Fosforin ja kiintoaineen huuhtoumissa ei sen sijaan toimenpidettä edeltäneeseen tilanteeseen suhteutettuna ollut havaittavaa eroa. Murtopuron poikkeuksellisen suuret kiintoainekuormat vielä yli kymmenen vuoden kuluttua ojituksesta vaikuttavat voimakkaasti kuormittavuuden keskiarvoihin.



Kuva 4. Uudisojituksen aiheuttama kuormituslisä suhteutettuna luonnonhuuhtoumaan. Pisteet kuvaavat eri tutkimusalueiden tiedoista yhdistettyä keskiarvokuormaa. Käyrä osoittaa aineistoon parhaiten sopivan eksponentiaalisen sovituksen.

4.2 Kunnostusojitus

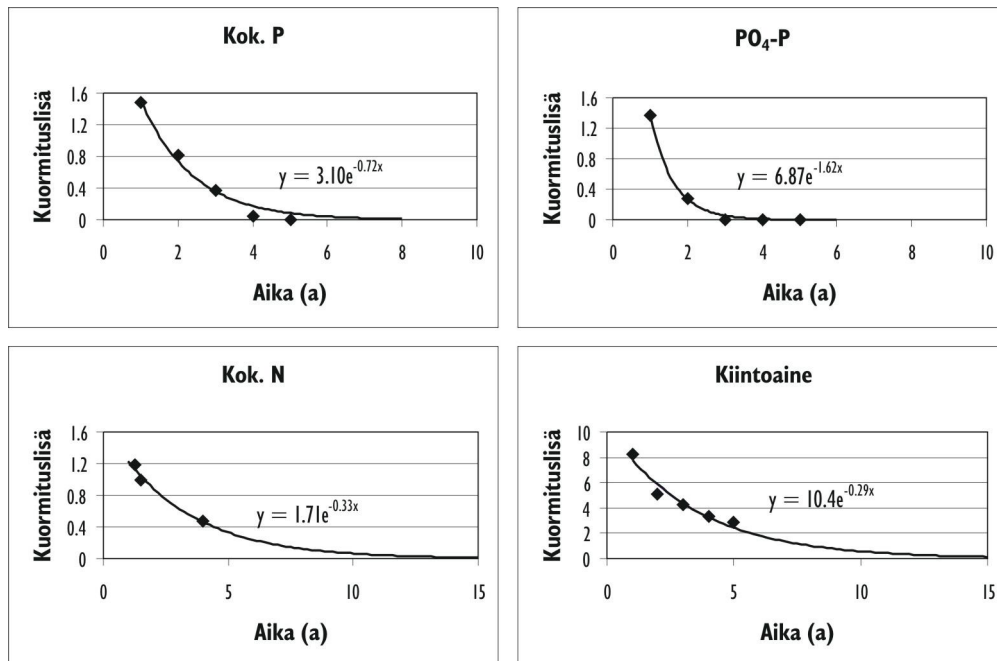
Kunnostusojituksen vesistöjä kuormittava vaikutus on käytävissä olevan aineiston perusteella alhaisempi kuin uudisojituksessa. Tiedot ovat peräisin kolmelta alueelta, joista kaksi, Ruununsuonoja ja Parkonsuonoja, sijaitsevat saman kunnan alueella. Kohdealueiden kunnostusojitusprosentti vaihtelee välillä 38 - 55 %. Kunnostusojituksen vaikutukset valuma-alueiden typpikuormiin vaihtelivat epä-säännöllisesti ja nousivat ensimmäisen viiden vuoden kuluessa ylimmillään 1,6-kertaisiksi. Ruununsuonojalla kuormitus oli suurinta vasta neljäntenä vuotena ojituksen jälkeen. Kokonaisfosforin huuhtoumat nousivat kaikilla alueilla luonnonkuormaan verrattuna 1,5–2,2-kertaisiksi. Toisin kuin typellä, fosforihuuhtoumat nousivat huippuunsa heti ensimmäisenä vuonna ojituksen jälkeen. Sama pätee fosfaattifosforin huuhtoumiin, joissa oli kuitenkin enemmän vaihtelua. Vuoden kuluttua ojituksen jälkeen fosfaattifosforin huuhtoumat olivat 1,3–2,4 -kertaiset luonnonkuormaan nähden. Kiintoaineen huuhtoumat kasvoivat Lodisin alueella selvästi korkeimmiksi, toisena ojituksen jälkeisenä vuonna melkein 20-kertaisiksi. Ruununsuonojalla kiintoainekuormat olivat ensimmäisten kolmen vuoden ajan 2,5–2,8-kertaisia ja nousivat vasta neljäntenä vuonna ylimmilleen, 3,5-kertaisiksi. Tämän jälkeen kuormitus aleni lähelle alkuperäistä tasoa. Parkonsuonojalla kiintoainekuormitus oli vähäisempää. Kaikkien alueiden kuormituslisä toimenpidepinta-alaan suhteutettuna on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kunnostusojituksen aiheuttama kuormituslisä. Kaikilta tutkimusalueilta kootut arvot osoittavat luonnonhuuhtoumaan suhteutetun laskennallisen kuormituksen toimenpiteiden kattaessa 100 % valuma-alueesta.

Kunnostusojituksen kuormitusyhtälöissä kuormituksen toimenpiteen jälkeinen lähtötaso on oleellisesti alempi kuin uudisojituksessa. Typen ja fosforin kunnostusojituksesta aiheutuva kuormitus kokonaan kunnostusojitetulla valuma-alueella on vuoden kuluttua toimenpiteestä enintään 1,5-kertainen luonnonhuuhtoumaan suhteutettuna (kuva 6). Lyhyestä seuranta-ajasta johtuen typen ja fosforin kuormitusluvuissa viiden vuoden kuluessa havaittava laskeva suuntaus ei välttämättä anna kunnostusojituksen vaikutuksista totuudenmukaista kuvaa. Kiintoaineella alkuvaiheen kuormituslisäys on noin 8-kertainen eli noin kymmenesosa uudisojituksen suhteellisesta kuormituslisästä. Myös kuormitusvaikutuksen kesto on lyhyempi, kokonaisfosforilla enimmillään 4 vuotta ja typellä 8 vuotta. Kiintoainekuormitus pysyy myös kunnostusojituksen jälkeen pitkään koholla ja alenee toi-

menpidettä edeltäneelle tasolle 15 vuoden kuluessa. Koko vaikutusajan yhteenlaskettu lisäkuorma on ravinteilla 2 - 4, kiintoaineella 30 vuotuisen luonnonhuuhtouman suuruinen. Kolmeen kohdealueeseen perustuvassa aineistossa on kokonaistypen ja kokonaisfosforin osalta melko vähän hajontaa. Fosfaattifosforin suhteellinen lisäkuorma sen sijaan on Parkonsuonojalla ensimmäisenä vuonna huomattavasti korkeampi kuin kahdella muulla alueella. Laskeutusaltaista ja liete-kuopista huolimatta Lodisin valuma-alueella puolestaan ensimmäisen vuoden suhteellinen kiintoainekuorma on suurin, yli 20-kertainen toimenpidettä edeltäneeseen tilanteeseen verrattuna.



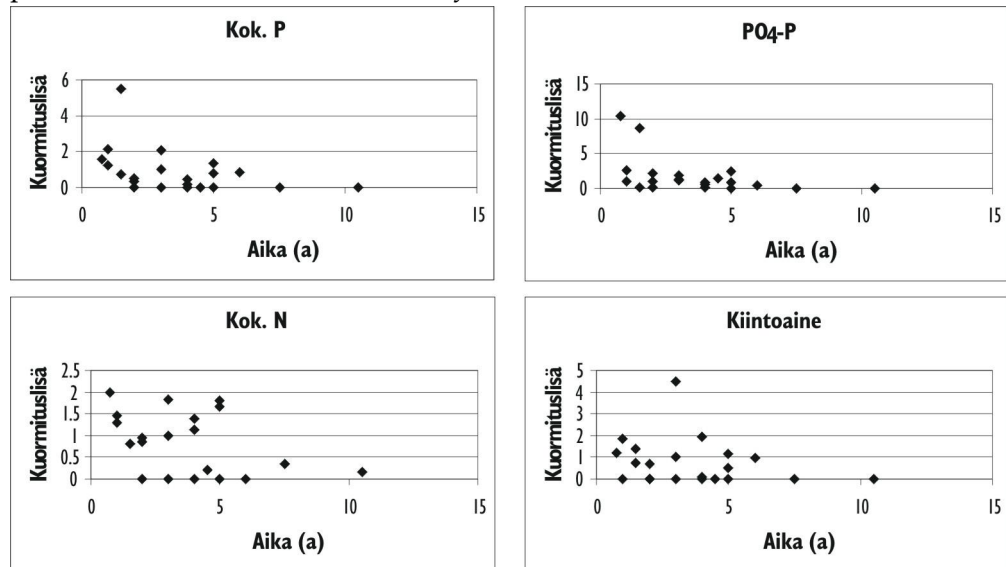
Kuva 6. Kunnostusojituksen aiheuttama kuormituslisä suhteutettuna luonnonhuuhtoumaan. Pisteet kuvaavat eri tutkimusalueiden tiedoista yhdistettyä keskiarvokuormaa. Käyrä osoittaa aineistoon parhaiten sopivan eksponentiaalisen sovitteen.

4.3 Metsänuudistus

Metsänuudistuksen eli avohakkuun ja sen jälkeisen maanmuokkauksen vaikutukset valuma-alueen ravinne- ja kiintoainekuormaan ovat selvästi havaittavat. Aluekohtaiset vaihtelut ovat kuitenkin suuret. Aineiston perusteella typen huuhtouma nousee 40 – 60 % valuma-alueen pinta-alasta kattavalla hakkuulla välittömästi (1 - 1,5 v.) toimenpiteiden jälkeen keskimäärin n. 2,5-kertaiseksi luonnontilaiseen verrattuna. Yli-Knuutilassa, missä hakattava osuus oli 80 %, vastaava kuormituskerroin on n. 3,3. Monilla hakkuualoilla kuten Lehmi- ja Vanneskorvenojalla sekä Kivipurolla vuosikuormat ovat välittömästi toimenpiteiden jälkeenkin vain n. 1,5-kertaiset luonnonhuuhtoumiin verrattuna. Typen kuormitus vähenee siten, että 10 vuoden kuluttua toimenpiteiden vaikutus on hakkuusuhteesta riippumatta hävinnyt tai näkyy enää heikkona, n. 1,1-kertaisena luonnonhuuhtoumana. Typpi-huuhtouma ei kuitenkaan vaikuta vähenevän täysin tasaisesti. Ensimmäisen kahden vuoden ajan kuormitus keskimäärin alenee, minkä jälkeen vuosittaiset kuormat pysyvät noin kolmen vuoden ajan ennallaan. Osalla kohteista typpikuorma on alkuun jopa alhaisempi ja nousee vasta sitten, 2 - 4 vuoden kuluttua toimenpiteestä huippuunsa.

Fosforikuormituksessa tällaista viivettä ei ole havaittavissa. Alueilla, joilla hakkuun ja maanmuokkauksen osuus on 40 - 80 %, kokonaisfosforin kuormitus nousee enimmillään 1,4-4,2-kertaiseksi luonnonhuuhtoumaan verrattuna. Toimen-

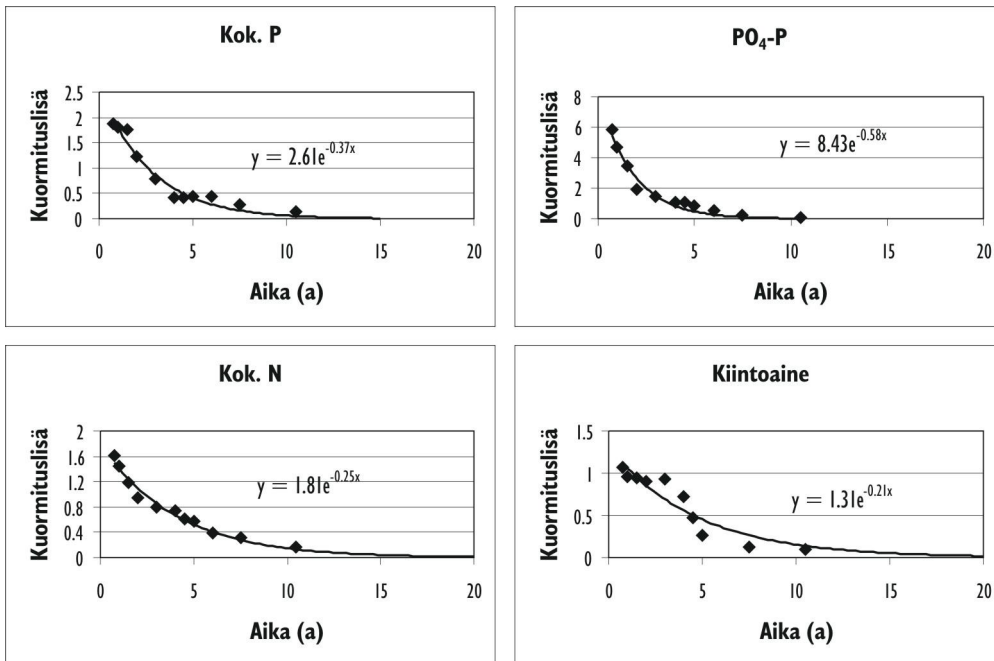
piteitä seuraavina vuosina keskimääräiset kuormat vähenevät eksponentiaalisesti. Kuormitusluvut laskevat alkuperäiselle tasolle viimeistään kahdeksan vuoden kuluessa. Kiintoaineen kuormitus kasvaa metsänuudistamisen jälkeen kaikilla tutkimusalueilla 1,7-2,7-kertaiseksi huipun ajoittuessa pääsääntöisesti ensimmäiseen toimenpiteiden jälkeiseen vuoteen. Kaikkien alueiden kuormituslisä toimenpidepinta-alaan suhteutettuna on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Avohakkuun ja maanmuokkauksen aiheuttama kuormituslisä. Kaikilta tutkimusalueilta kootut arvot osoittavat luonnonhuuhtoumaan suhteutetun laskennallisen kuormituksen toimenpiteiden kattaessa 100 % valuma-alueesta.

Metsänuudistuksen kuormitusvaikutus kestää mallin mukaan pisimmillään 7 – 11 vuotta (kuva 8). Fosforihuuhtouma palautuu toimenpiteitä edeltäneelle tasolle vähän nopeammin kuin typpi ja kiintoaine. Toisin kuin ojitustoimenpiteissä, ravinne- ja kiintoainekuormituksen kestolla ei kuitenkaan ole ratkaisevaa eroa. Sen sijaan kuormitushuippu on selvästi korkein fosfaattifosforilla: vuoden kuluttua toimenpiteestä ylimääräinen vuosikuorma vastaa noin viittä luonnonhuuhtoumaa. Kokonaisfosforin, ja kokonaistypen toimenpiteestä aiheutuvat kuormat kasvavat uudistushakkuun ja maanmuokkauksen jälkeen enimmillään kahden luonnonhuuhtouman verran. Vaikutukset kiintoaineen huuhtoumiin ovat vähäisimmät lisäkuormituksen vastatessa enimmillään valuma-alueen vuotuista luonnonhuuhtoumaa. Summautuen metsänuudistustoimenpiteet aiheuttavat keskimäärin kuormituslisän, joka vastaa 5 – 11 vuotuista luonnonhuuhtoumaa. Metsänuudistuksen kuormitusta kuvaavien yhtälöiden aineistossa on keskiarvona mukana Murtopuron hakkuun jälkeiset kolme ensimmäistä vuotta, joiden aikana varsinkin fosforikuormat olivat poikkeuksellisen suuret. Myös Vanneskorvenojalla huuhtoutui ensimmäisenä vuotena tavallista runsaammin fosforia. Yli-Knuutilassa ei tehty lainkaan maanmuokkausta, mutta myös siellä fosforin, etenkin fosfaattifosforin, huuhtoutuminen oli huomattavaa. Kivipuron ja Lehmikorvenojan fosforihuuhtoumat olivat huomattavasti alhaisemmat ja alentavat kuormitusmallin antamia keskiarvoistettuja tuloksia. Sama pätee myös Vanneskorvenojan tuloksiin, missä kuormituksen aleneminen ensimmäisen vuoden jälkeen oli erittäin nopeaa. Kokonaisuutena arvioiden on kuitenkin todennäköistä, että malli yliarvioi metsänuudistamisen aiheuttaman keskimääräisen fosforikuormituksen. Typen ja kiintoaineen osalta kohdealueiden kuormituksessa on vähemmän vaihtelua, mutta toisaalta eroja kuormituksen huipun ajoittumisessa. Yli-Knuutilassa ja Kivipurolla kokonaisty-

pen kuormat nousevat nopeasti huippuunsa ja alkavat laskea, kun taas Lehmikorvenojalla ja Vanneskorvenojalla kuormituksen kehityksessä ei ole yhtä selvää suuntausta.



Kuva 8. Avohakkuun ja maanmuokkauksen aiheuttama kuormituslisä suhteutettuna luonnonhuhoumaan. Pisteet kuvaavat eri tutkimusalueiden tiedoista yhdistettyä keskiarvokuormaa. Käyrä osoittaa aineistoon parhaiten sopivan eksponentiaalisen sovitteen.

5

Tulosten tarkastelu

Metsätaloudellisten toimenpiteiden aiheuttama ravinne- ja kiintoainehuuhtouman lisäys perustuu pääasiassa eroosioalttiin maaperän paljastumiseen ja pohjaveden tason muutokseen. Kivennäismaa ja turve, josta peittävä kasvillisuus poistetaan, altistuu lisääntyvälle vesierosiolle. Huuhtoutuvan kiintoaineen mukana kulkeutuu samalla siihen sitoutuneita ravinteita. Pohjavedenpinnan muutokset puolestaan lisäävät ravinnehuuhtoumia muuttuneiden hapettumis-pelkistymis-olosuhteiden seurauksena. Ojitustoimet laskevat vesipintaa ja nopeuttavat näin parantuneen happitilanteen myötä orgaanisen aineksen hajoamisnopeutta. Mineralisoituvista ravinteista kaikki eivät sitoudu maaperään ja kasvillisuuteen vaan ne huuhtoutuvat vesistöön. Avohakkuun vaikutukset ovat useimmiten päinvastaiset: haihduttavan puuston poistamisesta seuraa pohjaveden pinnan nousu. Maakerrosten vesitalouden muuttuessa anaerobiseen suuntaan ravinteiden liukoisuus lisääntyy.

Mikä tahansa toiminta, joka rikkoo metsämaan orgaanisen pintakerroksen, kiihdyttää samalla helposti ravinteiden mineralisaatiota. Ravinteita vapautuu myös hakkuun seurauksena metsään jääneistä hakkuutähteistä ja juurista (Ahtiainen ja Huttunen 1999). Epäorgaaniseen muotoon muuttuneet ravinteet ovat alttiita huuhtoutumaan, koska puustoa on poistettu ja pintakasvillisuutta on tuhoutunut. Metsätaloudellisten toimenpiteiden yhteydessä lisääntyy myös kiintoaineiden huuhtoutumisherkkyys. Kuormituksen lisäys riippuu siitä, millainen maalaji on kyseessä ja miten paljon kivennäismaata tai pitkälle hajonnutta turvetta toimenpiteiden seurauksena paljastuu.

Turvemailla uudistushakkuu usein kohottaa pohjaveden pintaa, lisää valumaveden happamuutta ja humuksen huuhtoutumista. Tällaisissa olosuhteissa myös fosforin liukoisuus kasvaa, varsinkin karuilla turvemailla, missä on vähän fosforia sitovia rauta- ja alumiini-ioneita. Rehevämmiltä turvemailla ja karkeilla kivennäismailla, missä pohjaveden pinnan nousu ei usein ole kovin voimakasta, fosforin huuhtoutuminen hakkuiden seurauksena on raudan ja alumiinin runsauden vuoksi vähäisempää. Niiltä huuhtoutuu puolestaan herkästi typpeä ammonium- ja nitraattimuodossa (Joensuu ym. 2004).

Samankin toimenpiteen vaikutukset voivat eri kohteilla olla laadultaan, kestoltaan ja intensiteetiltään vaihtelevia. Suuren hajonnan takia on vaikeaa luotettavasti määrittää, millaisia ovat metsätaloustoimenpiteiden keskimääräiset vaikutukset. Tehtävää hankaloittaa edelleen riittävän perusteellisesti havainnoitujen tutkimuskohteiden vähäinen määrä ja siten kuormituslukujen painottuminen yksittäisten, mahdollisesti epäedustavien tulosten suuntaan. Siksi mallia on sovellettava sillä varauksella, että tulokset voivat sisältää huomattavia poikkeamia todelliseen tilanteeseen nähden. Tämä pätee varsinkin kiintoaineen huuhtoumiin, jotka ovat vahvasti sidoksissa virtaamiin ja maalajiin. Vaikka mallin yhtälöt kuvaisivat oikein kuormituksen keskimääräistä kehitystä, esimerkiksi toimenpidealueen epätyypilliset geologiset ominaisuudet aiheuttavat virhelähteen, jota ei voida yleisen tason mallissa eliminoida. Lisäksi on otettava huomioon mallin lähtöoletukset, jotka yksinkertaistavat todellista tilannetta. Varsinkin oletus kuormituksen eksponentiaalisesta alenemisestä heti toimenpiteen jälkeen aiheuttaa mallin luotettavuuteen epävarmuutta. Esimerkiksi kivennäismailla tehdyn hakkuun jälkeen nit-

raattityypen vapautuminen ei noudata oletusta. Tästä syystä mallilla voidaan paremmin kuvata yhteenlaskettua kokonaiskuormaa ja kuormituksen kestoja kuin kuorman suuruutta tietyinä vuotena toimenpiteen jälkeen.

Taulukossa 6 on esitetty mallin antama kuormitusvaikutus valuma-alueelle, joka on käsitelty kokonaan. Metsätaloudellisia toimenpiteitä tehdään harvoin koko valuma-alueen kattavalla pinta-alalla, joten arvot edustavat toimenpidekohtaisia enimmäisvaikutuksia. Uudisojituksella ja kunnostusojituksella näyttää olevan suuri ero sekä vaikutuksen voimakkuudessa että kestoajassa. Erityisesti ravinnekuorma on huomattavasti alempi kunnostusojituksen jälkeen kuin uudisojituksen seurauksena. Todennäköinen syy tähän on alueelle kehittyneen puuston ravinteita sitova vaikutus. Mahdollista on myös, että alkuperäisen ojituksen yhteydessä ravinteita huuhtoutuu eniten uomien välittömästä läheisyydestä, mikä johtaa vähempään kuormitukseen jatkossa. Metsänuudistuksen vaikutus on myös selvästi vähäisempi kuin uudisojituksen, mutta kunnostusojitukseen verrattuna hakkuu ja maanmuokkaus tuottavat suuremman ravinnekuormituksen: typen ja fosforin kuormitus on sekä voimakkaampi että pidempikestoisen kuin kunnostusojituksessa. Kiintoaineen huuhtoumissa tilanne on sen sijaan päinvastainen: kunnostusojituksen kiintoainehuuhtoumat kestävät pidempään ja ovat luonnonhuuhtoumaan suhteutettuna suuremmat kuin metsänuudistuksessa.

Taulukko 6. Eri metsätaloustoimenpiteiden aiheuttaman kuormituksen kesto vuosissa ja kuormituslisäyksen yhteenlaskettu suuruus aluekohtaisina luonnonhuuhtoumina valuma-alueella, joka on käsitelty kokonaan (100 %).

	Kok. P kesto kok. kuorma		PO ₄ -P kesto kok. kuorma		Kok. N kesto kok. kuorma		Kiintoaine kesto kok. kuorma	
Uudisojitus	19	48	29	54	20	23	33	460
Kunnostusojitus	4	2.8	2	1.6	8	4.1	15	31
Metsänuudistus	8	5.5	7	10.6	11	6.0	11	5.1

Esimerkkitapaus

Esimerkkitapauksessa Etelä-Suomessa uudistetaan metsä siten, että toimenpiteet koskevat 65 % valuma-alueesta (kuva 9). Jos käsiteltävän valuma-alueen ravinne- ja kiintoainekuormia on tutkittu toimenpidettä edeltäneenä aikana, näitä arvoja voidaan käyttää pohjatietoina lisäkuormituksen laskemiseksi. Muussa tapauksessa luonnonhuuhtoumina voidaan käyttää Saukkosen ja Kortelaisen (1995) antamia keskimääräisiä metsäisten valuma-alueiden huuhtoumatietoja, jotka on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Keskimääräiset metsätalousmaalta tulevat huuhtoumat maassamme Saukkosen ja Kortelaisen (1995) mukaan. Etelä- ja Pohjois-Suomen välinen raja-as kulkee tasolla 63°50' N.

	Kok.P (kg a ⁻¹ km ⁻²)	PO ₄ -P(kg a ⁻¹ km ⁻²)	Kok. N(kg a ⁻¹ km ⁻²)	Kiintoaine(kg a ⁻¹ km ⁻²)
Etelä-Suomi	9,7	3,0	210	310
Pohjois-Suomi	10,5	2,4	160	470

Avohakkuun ja maanmuokkauksen jälkeisen kokonaisfosforikuormituksen arvioimiseksi yhtälö (7) kirjoitetaan muotoon

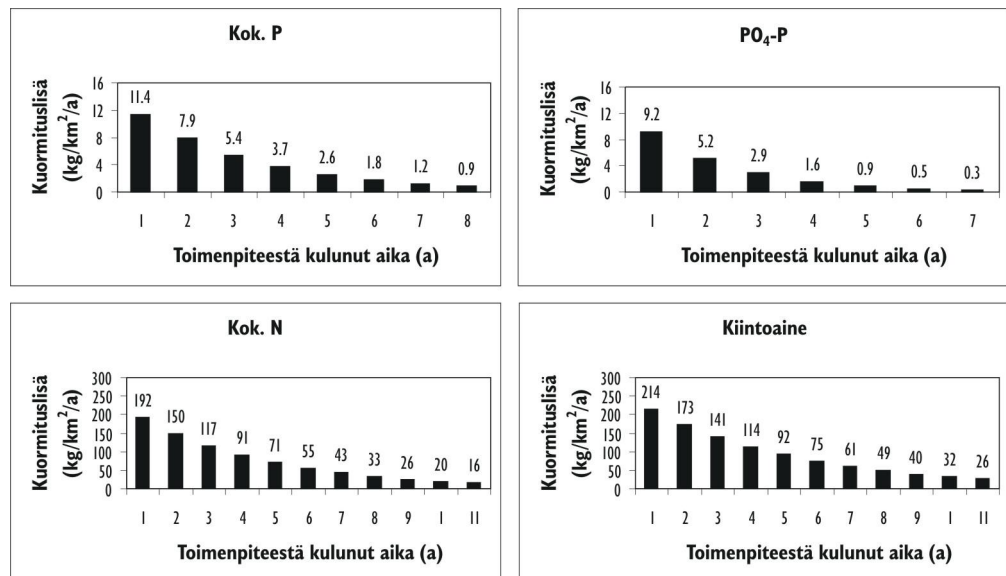
$$L(t)_{\text{kok-P}} = 9,7 * 0,65 * 1,80e^{-0,37(t-1)}$$

Toimenpidettä seuraavina vuosina kokonaisfosforin lisäkuormitus on siis

$$\begin{aligned} L(1)_{\text{kok-P}} &= 11,4 \text{ kg a}^{-1} \text{ km}^{-2} \\ L(2)_{\text{kok-P}} &= 7,9 \text{ kg a}^{-1} \text{ km}^{-2} \\ L(3)_{\text{kok-P}} &= 5,4 \text{ kg a}^{-1} \text{ km}^{-2} \quad \text{jne.} \end{aligned}$$

Vastaavasti fosfaattifosforin, kokonaistypen ja kiintoaineen lisäkuormat lasketaan kaavoista

$$\begin{aligned} L(t)_{\text{PO}_4\text{-P}} &= 3,0 * 0,65 * 4,73e^{-0,58(t-1)}, \\ L(t)_{\text{kok.N}} &= 210 * 0,65 * 1,41e^{-0,25(t-1)} \quad \text{ja} \\ L(t)_{\text{SS}} &= 310 * 0,65 * 1,06e^{-0,21(t-1)} \end{aligned}$$



Kuva 9. Mallin mukaan laskettu avohakkuusta ja maanmuokkauksesta aiheutuva ylimääräinen ravinne- ja kiintoainekuormitus eteläsuomalaisella valuma-alueella. Toimenpiteen kuormitusvaikutus tulkitaan päättyneeksi kun vuosittainen lisäkuorma laskee alle 10 %:iin toimenpidettä edeltäneistä arvoista.

Mikäli halutaan laskea alueelta tuleva kokonaiskuormitus eikä vain metsätaloustoimenpiteiden aiheuttama lisäkuorma, yhtälöön (7) on lisättävä luonnonhuuhtouma eli termi L_0 :

$$L(t) = L_0(1 + pk_{L(t)}e^{-\lambda(t-1)}) \quad (8)$$

Huuhtoumiin vaikuttavia tekijöitä ja niiden huomioiminen mallintamisessa

6

6.1 Toimenpiteen laatu ja intensiteetti

Metsätaloudellisten toimenpiteiden aiheuttama lisäys ravinne- ja kiintoainehuuhtoumissa vaihtelee tehdyn toimenpiteen mukaan. Soiden ja veden vaivaamien metsien uudisojitus on metsämaahan kohdistuvista käsittelytoimista rajuin. Sillä on pitkien havaintosarjojen perusteella vaikutusta valumiin ja ainehuuhtoumiin vähintään 10, yleensä 15 – 20 vuoden ajan (Seuna 1990, Kenttämies ja Saukkonen 1996). Tämänkin jälkeen ojitetun alueen hydrologia poikkeaa luonnontilaisesta, mutta ojien vedenjohtokyvyn heikkeneminen ja haihduttavan ja ravinteita sitovan kasvillisuuden kehittyminen aikaansaa vähitellen valumiin sekä typpi- ja fosforihuuhtoumien palautumisen ojitusta edeltäneelle tasolle. Selvästi kohonneista pitoisuuksista huolimatta turpeen nopeutuneen hajoamisen vapauttamista ravinnevaroista suurin osa sitoutuu varsin tehokkaasti ojitusalueen lisääntyvään biomassaan (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Kuvaavana esimerkkinä ojituksen voimakkaista vaikutuksista on Murtopuron valuma-alue, jonka käsittely aiheutti erittäin mittavan hienojakoisen aineen huuhtoutumisen alueelta.

Nykyisin tehtävät ojitustoimet ovat lähinnä vanhojen ojien perkausta, täydennysojitusta tai yksittäisten ojien kaivua. Niiden vaikutuksesta on toistaiseksi saatu toisistaan poikkeavia tuloksia, mikä luultavasti selittyy suurista tapauskohtaisista eroista kunnostusojituksen toteuttamisessa. Esimerkiksi Åströmin ym. (2005) tutkimuksessa Lappajärven Kytösaarennevan kunnostusojitus tuotti ainevirtoihin uudisojitukseen verrattavan muutoksen. Suuri kiintoaineen ja fosforin kuormituslisäys selittyy ainakin osaksi koealueen voimakkaalla käsittelyllä: alkuperäisten ojien perkaamisen lisäksi kaivettiin uusia täydennysojia, jotka lisäsivät ojaston kokonaispituutta 82 %. Lisäksi ojat ulottuivat pääsääntöisesti turverkerroksen alaiseen moreeniin asti. Kytösaarennevan kunnostusojitus osoittaa, että mallin tuloksista poiketen myös kunnostusojitus voi tuottaa voimakkaat ja pitkäkestoiset kuormitusvaikutukset.

Yleisesti tarkasteltuna on kuitenkin ilmeistä, että kunnostusojituksen vaikutukset toimenpidealueen valumiin ja ainehuuhtoumiin ovat lievemmät kuin uudisojituksessa. Joensuu (2002) on kunnostusojitusta koskevissa tutkimuksissa havainnut, että ojaprofiilin ominaisuudet vaikuttavat keskeisellä tavalla valuma-alueelta tuleviin kuormiin. Typen huuhtoutumista selittää parhaiten maatumattoman turpeen osuus kun taas fosforin osalta merkittävin selittävä tekijä on hienojakoisen kivennäismaan osuus. Kiintoaineen huuhtoutumiseen vaikuttaa eniten maaperän lajitekoostumus. Ravinne- ja kiintoainekuormien kehittymistä kuvaavaa mallia hankaloittaa se, ettei aineistosta käy selville, kuinka suuressa osassa ojitusaluetta ojat yltyvät kivennäismaahan asti ja mitä maalajia ojaprofiilissa esiintyy. Kunnostus- ja täydennysojituksen vaikutusten mallintamiseen vaikuttaa sekin, että eri kohteissa alkuperäisestä ojituksesta kulunut aika vaihtelee. Siten vesitalouden muutokset, kasvillisuuden kehittyminen ja sedimentaatio poikkeavat eri vaiheissa olevissa suometsämuuttumissa.

Koska myös hakkuu ja sitä mahdollisesti seuraava maanmuokkaus voidaan toteuttaa monin eri menetelmin, niidenkin vaikutuksissa vesistöjen kuormitukseen esiintyy voimakasta vaihtelua. Harvennus- eli kasvatushakkuun yhteydessä kasvualustaa ei muokata ja puustosta poistetaan vain osa. Siksi harvennushakkuu

vaikuttaa sekä kivennäis- että turvemaiden kiintoaine- ja ravinnehuuhtoumiin huomattavasti vähemmän kuin uudistushakkuu (Joensuu ym. 2004). Uudistushakkuista on viimeisen 10 vuoden aikana 65 – 80 % ollut avohakkuita, loput suojus- ja siemenpuuhakkuita (Peltola 2003).

Tarpeen mukaan toimenpiteiden toteutustapa ja intensiteetti vaihtelee. Siksi myös vaikutuksissa huuhtoumiin voi olla suuria eroja, vaikka kyse olisi nimellisesti samasta toimenpiteestä. Ruotsin Hudiksvallissa sijaitsevien Sniptjärnin ja Kullarnan koealueilla 95 % ja 50 % valuma-alueiden pinta-alasta kattaneet metsänuudistustoimet nostivat typpikuormituksen kahdessa vuodessa 6-7 –kertaiseksi (Rosén ym. 1996). Suomesta saatuihin tuloksiin verrattuna poikkeuksellisen suuri kuormituslisä selittynee kohteiden suurilla korkeuseroilla sekä tehtyjen toimenpiteiden rajuudella: uudistustoimenpiteenä osia valuma-alueesta ojitettiin ja jyrkempiä kohtia lautasäestettiin. Maanmuokkaus oli suomalaisen nykykäytäntöön nähden voimakas eivätkä kuormitusarvot siten ole täysin vertailukelpoisia mallissa käytettyjen uudistusalueitten kanssa. Vaikka erot menetelmissä ovat suuret, erilaisten maanmuokkaustoimenpiteiden aiheuttamia eroja ainekuormiin ei tietävästi ole tutkittu. Pitkiä kalibrointi- ja seuranta-aikoja vaativaa tutkimusta ajatellen muutkin metsätaloudelliset käytännöt muuttuvat nopeasti. Esimerkiksi nykyisin monin paikoin harjoitettava hakkuutähteiden poistaminen saattaa osaltaan vaikuttaa huuhtoumiin. Hakkuutähteet sisältävät 60 – 80 % puustoon sitoutuneista ravinteista. Mikäli ravinteita vapautuu lyhyessä ajassa paljon, maaperä, kehittyvä kasvillisuus ja hajottajaeliöt kykenevät pidättämään niistä todennäköisesti vain osan (Palviainen ym. 2003). Hakkuutähteiden poistaminen pienentää siten ravinteiden huuhtoumisriskiä.

6.2 Toimenpiteiden laajuus ja sijainti valuma-alueella

Hakkuun jälkeinen valunnan kasvu on suoraan verrannollinen poistetun puuston määrään (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Sen sijaan ravinnekuormien kasvun riippuvuus toimenpiteiden pinta-alasta ja intensiteetistä on epäselvä. Yleensä tutkimuksissa ilmoitetaan kuormituksen lisäys toimenpidehehtaaria kohti. Riippuvuuden oletetaan siis olevan lineaarinen, mikä on oletuksena myös tässä työssä. Kuitenkin valuma-alueen käsittelemättömällä osuudella on havaittu olevan huomattava merkitys metsätaloustoimenpiteiden mobilisoimien ainevirtojen puskuroimisessa (Joensuu ym. 2004). Jo 10 – 15 % toimenpidealueen pinta-alasta kattava suojavaiohyke tai suotautumisalue vähentää huomattavasti hakkuun vesistövaikutuksia, mikäli pintavaluntana tapahtuvia oikovirtauksia ei esiinny (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Näin ollen on mahdollista, että lähestyttäessä 100 % osuutta valuma-alueen pinta-alasta metsätaloustoimet aiheuttanevat suhteellisesti ottaen suuremman kuormituksen kuin suppeammalti käsitellyillä alueilla, ainakin mikäli valumavedet ennen lasku-uomaan päätymistään virtaavat käsittelemättömän vyöhykkeen läpi. Käytännössä hakkuiden tarkentunut suunnittelu johtaa harvoin jos koskaan koko valuma-alueen kattaviin toimenpiteisiin. Mallinnuksessa käytetyssä aineistossa suurin toimenpideosuus oli 80%.

Myös toimenpiteen sijainnilla valuma-alueella sekä maanmuokkauksessa ja ojituksessa syntyvien urien suunnalla voi olla vaikutusta kuormien suuruuteen, mutta näiden tekijöiden merkitystä on vaikea ottaa mallinnuksessa huomioon, varsinkin kun aineisto on pieni. Kaikkien maaperää paljastavien toimenpiteiden osalta on kuitenkin ilmeistä, että mitä lähempänä valuma-alueen lasku-uomaa toimitaan, sitä todennäköisemmin ravinteita ja kiinto-ainetta huuhtoutuu. Ojitusalueilla ravinteet ja hienojakoinen kiintoaines kulkeutuvat valuma-alueen sisällä pitkiä matkoja esteettömästi ja siksi myös kauempana lasku-uomasta tehdyt toi-

menpiteet voivat kasvattaa kuormitusta voimakkaasti. Toisaalta valuma-alueelta lähtevien huuhtoumien suuruuteen voidaan vaikuttaa huomattavasti erilaisin kaitteknisin ratkaisuin.

6.3 Ajalliset tekijät

Monissa tutkimuskohteissa on tehty useita erilaisia toimenpiteitä peräkkäin, ennen kuin edellisen aiheuttamat vaikutukset ovat lakanneet näkymästä. Tästä aiheutuu huomattavaa epävarmuutta yritettäessä selvittää yksittäisen toimenpide-
muodon nettovaikutusta valumiin ja ainehuuhtoumiin.

Lyhyen ajan sisällä tehtävät toimenpiteet voivat vahvistaa toistensa vaikutuksia tai aiheuttaa toisaalta eri suuntaisia ilmiöitä esimerkiksi pohjaveden pinnan muutosten osalta. Siten kuormitusta ei välttämättä voida luotettavasti arvioida yhdistämällä erillisten toimenpidekohtaisten mallien tuloksia. Alueilla, jotka ovat saaneet olla pitkään koskemattomina, huuhtoumat ovat yleensä alhaisia. Avohakkuu ja uudisojitus suoritetaan tavallisesti juuri tällaisilla kohteilla, joten niiden osalta kuormitusmallinnuksessa ei tarvitse ottaa huomioon edellisestä toimenpiteestä kulunutta aikaa. Sen sijaan kunnostusojituksen kyseessä ollen kuormitukseen saattaa oleellisesti vaikuttaa, kuinka pitkä aika uudisojituksesta on ehtinyt kulua ja mitä toimenpiteitä alueella on sen jälkeen tehty. Koska kasvavalla puustolla on merkittävä osuus ravinteiden sitouttamisessa, metsänuudistuksen kuormittavuus voi puolestaan riippua siitä, miten nopeasti alueelle hakkuun ja maanmuokkauksen jälkeen istutetaan taimikko.

Metsätaloudellisen toimenpiteen jälkeisen kuormitushuipun ajoittumisessa on aluetekijöistä johtuen huomattavia eroja. Myös toimenpiteiden aiheuttaman ravinne- ja kiintoainekuormituksen kesto vaihtelee tapauskohtaisesti. Avohakkuun jälkeen hakkuutähteistä vapautuvien ravinteiden mineralisaationopeudessa on eroja. Kalium on nopeimmin vapautuva ravinne ja melkein kaikki hakkuutähteiden sisältämä kalium vapautuu jo ensimmäisenä hakkuun jälkeisenä vuotena. Fosfori vapautuu myös melko nopeasti, ainoastaan paksut oksat ja juuret sitovat sitä pidempään. Typen mineralisaatio on hitainta (Palviainen ym. 2003, Joensuu ym. 2004). Varsinkin nitraattitypen pitoisuuksien nousu huippuunsa vie monessa tapauksessa kaksi vuotta tai enemmänkin ja pitoisuustasot pysyvät etenkin pohjavesissä kohonneina pitkään (Kubin 1998).

Turvemailla tehtyjen ojitusten vaikutuksesta valtaosa tyypestä, Murtopuron ja Suopuron tapauksissa yli 90 %, huuhtoutuu usein orgaanisessa muodossa (Alatalo 2000). Tästä syystä kokonaistyyppikuorma on usein suurimmillaan välittömästi ojituksen jälkeen, koska suon vesipinnan laskiessa humusyhdisteet nostavat valumavesien tyyppipitoisuutta. Epäorgaanisen typen osuus sen sijaan kasvaa hitaammin. Tämä johtuu siitä, että lisääntyvä hajottajabiomassa aluksi sitoo vapautuvia tyyppivaroja ja vasta kun sen kasvu pysähtyy ja työntarve on tyydytetty, huuhtoutumista alkaa tapahtua (Silvola 1988). Turvemaille on tyyppillistä, että ojituksen jälkeen happamista ja hapettomista suokerroksista vapautuva epäorgaaninen typpi huuhtoutuu aluksi pääosin ammoniummuodossa. Vähitellen, kun maaperän olosuhteet muuttuvat nitrifikaatiolle suotuisammiksi, nitraattitypen osuus huuhtoumassa nousee. Nitraattimuotoisen typen osuus huuhtoumassa voi olla suurimmillaan vasta 5 – 10 vuoden kuluttua ojituksesta. Ammonium- ja nitraattitypen huuhtoutuminen ojituksen jälkeen liittyy siten vesipinnan alenemisen aiheuttamiin muutoksiin ammonifikaatio- ja nitrifikaatioprosesseissa (Åström ym. 2005). Typen epäorgaanisten fraktioiden huuhtoutumisen mallintaminen on siten tapauskohtaisista eroista johtuen vaikeaa.

Huuhtouman kasvun nopeuteen vaikuttaa myös toimenpiteen ajankohta. Aineistossa on mukana sekä kesällä että talvella tehtyjä toimenpiteitä. On ilmeistä, että sulan maan aikana tehdyt toimenpiteet näkyvät kuormitusarvoissa nopeammin kuin maan ollessa roudassa. Esimerkiksi fosforin mobilisoituminen pohjaveden pintaa kohottavien toimenpiteiden jälkeen edellyttää riittävän korkeaa lämpötilaa (Sallantaus 2004). Pisimmillään vuodenajasta johtuva viive voi toimenpidealueella olla lähes vuoden pituinen.

6.4 Aluetekijät

Toimenpiteiden laadun, intensiteetin ja ajankohdan lisäksi ravinnekuormituksen kehitykseen voivat vaikuttaa ainakin toimenpidealueen biologiset, geologiset ja fysikaaliset ominaisuudet. Vaikutuksiltaan merkittävimpiä, tutkimuksissa usein parametrisoituja muuttujia ovat suon ja kangasmetsän osuus valuma-alueesta, kallioperä, maalaji, turvekerroksen paksuus, alueen topografia (viettävyys), kasvupaikkatyyppi (metsätyyppi, puulaji), leveyspiiri ja ilmasto (mereisyys – manteeisuus, sademäärä). Jos tutkittavaa aineistoa olisi riittävästi, se voitaisiin jakaa yhden tai useamman mainitun muuttujan perusteella osiin, joista voitaisiin muodostaa tarkempia ennusteita tuottavia osamalleja. Toistaiseksi perusteellisia ja riittävän pitkään seurattuja tutkimuskohteita on liian niukasti.

6.5 Tutkimuksen toteutus

Kalibrointikauden pituus

Kaksoiskalibrointia käyttävissä tutkimuksissa vertailualueen ja toimenpidealueen ravinne- ja kiintoainehuuhtoumien välinen riippuvuus voi olla heikko. Metsänuudistuksen kohdealueilla selitysaste (R^2) vaihteli 0,52 ja 0,98 välillä ja oli yleensä alhaisin kiintoaineella (Lepistö ym. 1995, Alatalo 2000, Haapanen ym. 2001). Malliaineiston tutkimuksissa kalibrointikauden kesto on ollut 2-5 vuoden pituinen. Riippuvuutta heikentävän satunnaisvaihtelun minimoimiseksi kalibrointikauden tulisi olla mahdollisimman pitkä, mieluiten vähintään kolme vuotta. Verrattaessa toimenpiteiden aiheuttamaa kuormitusta alueen keskimääräiseen luonnonhuuhtoumaan kalibrointijakson arvojen edustavuus edelleen korostuu. Käyttämällä satunnaista kahden perättäisen vuoden kalibrointijaksoa suhdelukuun voidaan helposti aiheuttaa jopa 40 % vääristymä. Kiintoaineen ja kokonaisfosforin huuhtoutuminen kasvaa voimakkaasti sateisina vuosina suurten valuntojen aikana (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Niinpä ne ovat kahden hydrologialtaan samankaltaisen vuoden sattuessa peräkkäin erityisen alttiita liian lyhyen vertailuajanjakson aiheuttamille virheille.

Vuosikuormien laskentatapa

Vuosikuormien määrittämiseksi käytössä on useita vaihtoehtoisia laskentamenetelmiä, joita ovat vertailleet esim. Rekolainen ym. (1991) ja Alatalo (2000). Käytetyimpien menetelmien välinen poikkeama on tyypillisesti alle 10 %, mutta voi ääritapauksissa olla luokkaa 100 %. Valumapainotetulla menetelmällä saadaan helposti suurempia kuormitusarvoja erityisesti kiintoaineelle ja fosforille. Syynä saattaa olla valunnan, kiintoaineen ja kokonaisfosforin positiivinen korrelaatio (Alatalo 2000). Ero valumaa painottamattomiin menetelmiin voi ravinteiden osalta olla 10 – 20 % ja kiintoaineen osalta 30 – 40 %.

Valumakorjauksen vaikutus

Runsas valunta ei laimenna maa-alueilta tulevien vesien ainepitoisuuksia, vaan yleensä tapahtuu päinvastoin. Varsinkin kiintoaineen ja kokonaisfosforin huuhtoumat kasvavat voimakkaasti sateisina vuosina (Kenttämies ja Saukkonen 1996). Lisäksi huuhtoumien estimointiin vaikuttaa, jakautuuko vuotuinen sademäärä normaalisti vai sisältääkö se voimakkaita piikkejä. Valumien interpolointia käyttävät laskentamenetelmät ovat herkkiä yksittäisille korkeille pitoisuuksille, etenkin jos ne sijoittuvat ajanjaksolle, jolloin näytteitä on otettu harvoin. Valuma-alueen koko, kaltevuus ja toimenpiteiden sijoittuminen valuma-alueelle vaikuttavat niinkään valumiin, sekä siihen miten ravinteita ja kiintoainetta alueelta huuhtoutuu (Mustonen ja Seuna 1971, Ekholm ym. 1995, Kenttämies ja Saukkonen 1996).

Näytteenoton ajoitus

Jotta valuma-alueelta tulevasta ainevirroista saataisiin luotettava arvio, näytteenoton on oltava riittävän tiheää ja oikein ajoitettua. Esimerkiksi Yli-Knuutilassa yhteensä noin viisi kuukautta kestävien kevät- ja syysylivalumien aikana on todettu tapahtuvan 87 % valumasta ja 89 - 91 % typen, fosforin ja kiintoaineen ainehuuhtoumista (Kohonen 1982). Nurmes-tutkimuksen alueilla näytteet otettiin pääsääntöisesti kerran kuussa. Ahtiaisen ja Huttusen (1995) mukaan virtaamahuippujen aikana näytteenotto ei ole ollut riittävän tiheää, mikä on johtanut fosforikuormituksen aliarvioon. Erityisesti pienikokoisilla alueilla valuman ja vedenlaadun vaihtelut ovat suuria koska sulamis- ja sadevesien vaikutusta tasaava viive on lyhyt. Siten niillä näytteenottovälit olisi hyvä pitää lyhyinä (Kohonen 1982). Yleistä periaatetta näytteenoton tiheydestä on kuitenkin vaikeaa antaa, koska vasta kattavat kohdekohtaiset tiedot ainevirtaamien vuodenaikaisesta variaatiosta ja käyttäytymisestä ratkaisevat, miten usein näytteitä olisi otettava (Rekolainen ym. 1991).

Myös vuorokautisella näytteenottoajalla voi olla suuri merkitys pyrittäessä luotettaviin kuormitusarvioihin. Kohosen (1982) mukaan väärään aikaan suoritettu näytteenotto voi aiheuttaa metsäiseltä valuma-alueelta huuhtoutuvan typen pitoisuudessa 20-30 %, fosforin pitoisuudessa 45 % ja kiintoaineen pitoisuudessa 60 - 80 % virheen suhteessa pitoisuuksien keskiarvoihin.

Mittaus ja analytiikka

Kiintoainehuuhtoumien mittaustuloksiin aiheuttaa epävarmuutta partikkelien kulkeutuminen sekä veteen suspendoituneena että pohjakuormana. Ahtiaisen ja Huttusen (1995) mukaan Nurmes-kohteilla kiintoaineen kuormat ovatkin todellisuudessa suurempia kuin mitä tutkimuksessa on havaittu, koska kiintoaineen pohjakuorma menee mittauksen ohi. Virtauksen voimakkuudesta ja kiintoainepartikkelien kokojakaumasta riippuen eri kulkeutumistapojen suhteellinen merkitys voi lisäksi vaihdella.

Kiintoainemäärityksen tulos riippuu myös käytetystä suodatintyypistä, minäkä vuoksi suodatintyyppi pitää spesifioida. Tutkimuksesta tai seurannasta riippuen kiintoaine on määritetty borosilikaatti-lasikuitusuodattimella, polykarbonaattisuodattimella, tai kalvosuodattimella. Siten saatu tulos vaihtelee suodatintyyppin mukaan. Kiintoainehiukkasten kokojakauma eri näytteissä voi vaihdella suuresti. Mitään yksiselitteistä muuntokerrointa ei voida antaa yhdellä suodatintyypillä saatujen tulosten muuttamiseksi toisella suodatintyypillä saaduiksi tuloksiksi. Myös fosfaattifosforin mittaamiseen on malliaineiston seurantakaudella käytetty toisistaan poikkeavia menetelmiä. Vesi- ja ympäristöhallinnon tutkimusalueilla fosfaattifosfori on vuoteen 1986 asti mitattu reaktiivisena fosforina suodattamattomista

näytteistä. Vuodesta 1987 lähtien on määritetty liuennutta reaktiivista fosforia suodatetuista näytteistä. Suodattamalla ja suodattamatta saatuja tuloksia ei voi suoraan verrata keskenään (Alatalo 2000).

Kirjallisuus

- Ahti, E., Joensuu, S & Vuollekoski, M. 1995. Laskeutusaltaiden vaikutus kunnostusojitusalueiden kiintoainehuuhtoumaan. Julkaisussa: Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.). Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE -projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 2: 139-156. ISBN 952-11-0007-9. ISSN 1238-7312.
- Ahtiainen, M. & Huttunen, P. 1995. Metsätaloustoimenpiteiden pitkäaikaisvaikutukset purevesien laatuun ja kuormaan. Julkaisussa: Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.). Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE -projektin loppuraportti. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. s. 33-50. Suomen ympäristö 2. ISBN 952-11-0007-9. ISSN 1238-7312.
- Ahtiainen, M. & Huttunen, P. 1999. Nurmestutkimus 20 vuotta – metsätaloustoimenpiteiden pitkäaikaisvaikutukset kuuden pienen puron vesistökuormaan. Julkaisussa: Ahti, E., Granlund, H. & Puranen, E. (toim.): Metsätalouden ympäristökuormitus. Seminaari Nurmeksessa 23.-24.9.1998. Tutkimusohjelman väliraportti. Helsinki. Metsäntutkimuslaitos. Vantaan tutkimuskeskus. s. 127-138. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 745. ISBN 951-40-1694-7. ISSN 0358-4283.
- Alasaarela, E., Kubin, E., Seuna, P., Ylitolonen, A. & Välihalo, J. 1995. Päätehakkuun ja maanmuokkauksen vesistövaikutukset: kalibrointiajan tuloksia. Julkaisussa: Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.). Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE -projektin loppuraportti. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. s. 399-412. Suomen ympäristö 2. ISBN 952-11-0007-9. ISSN 1238-7312.
- Alatalo, M. 2000. Metsätaloustoimenpiteistä aiheutunut ravinne- ja kiintoainekuormitus. Helsinki. 64 s. Suomen ympäristö 381. ISBN 952-11-0653-0. ISSN 1238-7312.
- Ekholm, P., Kronvang, B., Posch, M. & Rekolainen, S. 1995. Accuracy and precision of annual nutrient load estimates in Nordic rivers. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja –sarja A. Helsinki. 50 s.
- Haapanen, M., Kenttämies, K., Porvari, P. & Sallantausta, T. 2001. Kivennäismaan uudistushakkuun vaikutus kasvinravinteiden ja orgaanisen aineen huuhtoutumiseen: raportti Kurussa ja Janakkalassa sijaitsevien tutkimusalueiden tuloksista. Suomen ympäristökeskus. Helsinki. 14 s.
- Holopainen, A.-L. & Huttunen, P. 1995. Avohakkuun, maanmuokkauksen ja ojituksen hydrobiologiset vaikutukset ja niiden kesto Nurmestutkimusalueella. Julkaisussa: Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.). Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE -projektin loppuraportti. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. s. 185-198. Suomen ympäristö 2. ISBN 952-11-0007-9. ISSN 1238-7312.
- Joensuu, S. 2002. Effects of ditch network maintenance and sedimentation ponds on export loads of suspended solids and nutrients from peatland forests. Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 868. ISBN 951-40-1852-4. ISSN 0385-4283.
- Joensuu, S., Makkonen, T. & Matila, A. 2004. Metsätalouden vesien suojeleminen. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Helsinki. Hyvän metsänhoidon opassarja. ISBN 952-9891-93-8.
- Johansson, M.-B. 1995. The chemical composition of needle and leaf litter from Scots pine, Norway spruce and white birch in Scandinavian forests. *Forestry* 68: 49-62.
- Järvinen, O., Vänni, T., 1990. Bulk deposition chemistry in Finland. Julkaisussa: Kauppi, P., Anttila, P., Kenttämies, K. (toim.), Acidification in Finland. Springer, Berlin, s. 151-165.
- Karjalainen, J., Kokkonen, J. & Salpakivi-Salomaa, P. 1995. Vesien ja vesiluonnon suojeleminen käytännön metsätaloudessa. Julkaisussa: Vesien ja vesiympäristöjen suojeleminen metsätaloudessa. Metsäteho Oy. Moniste 25.4.1994. s. 50-73.
- Kenttämies & Saukkonen 1996. Metsätalous ja vesistöt. Yhteistutkimusprojektin "Metsätalouden vesistöhaitat ja niiden torjunta" (METVE) yhteenveto. Helsinki. MMM:n julkaisuja 4/1996. ISBN 951-53-0869-0. ISSN 1238-2531.
- Kohonen, T. 1982. Influence of sampling frequency on the estimates of runoff water quality. Vesihallitus – National Board of Waters, Finland. Helsinki. 30 s.
- 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., Ahtiainen, M., Finér, L., Mattsson, T., Sallantausta, T. & Saukkonen S. 1999. Luonnonhuuhtouma metsävaluma-alueilta. Julkaisussa: Ahti, E., Granlund, H. & Puranen, E. (toim.): Metsätalouden ympäristökuormitus. Seminaari Nurmeksessa 23.-24.9.1998. Tutkimusohjelman väliraportti. Helsinki. Metsäntutkimuslaitos. Vantaan tutkimuskeskus. s. 9-13. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 745. ISBN 951-40-1694-7. ISSN 0358-4283.
- Kortelainen, P., Finér, L., Mattsson, T., Ahtiainen, M., Sallantausta, T., Kubin, E. & Saukkonen, S. 2003. Luonnonhuuhtouma metsäisiltä valuma-alueilta. Julkaisussa: Finér, L., Laurén, A. & Karvinen, L. (toim.): Ajankohtaista metsätalouden ympäristökuormituksesta - tutkimustietoa ja työkaluja – seminaari Kolin Luontokeskus Ukko 23.9.2002. Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus. s. 89-95. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 886. ISBN 951-40-1873-7. ISSN 0385-4283.
- Kubin, E. 1983. Nutrients in the soil, ground vegetation and tree layer in an old spruce forest in Northern Finland. *Annales Botanici Fennici* 20: 361-390.
- Kubin, E. 1998. Leaching of nitrate nitrogen into the groundwater after clear felling and site preparation. *Boreal Environment Research* 3: 3-8.
- Lahermo, P., Väänänen, P., Tarvainen, T. & Salminen, R. 1996. Suomen Geokemian Atlas. Osa 3: Ympäristögeokemia – purovedet ja –sedimentit. Geologian tutkimuskeskus. Espoo. 149 s.
- Laurén, A., Koivusalo, H., Kokkonen, T., Penttinen, S., Nenonen, K., Hänninen, P., Finér, L. & Mannerkoski, H. 2003. Uusia työvälineitä metsätalouden ympäristökuormituksen hallintaan – Femma. Julkaisussa: Finér, L., Laurén, A. & Karvinen, L. (toim.): Ajankohtaista metsätalouden ympäristökuormituksesta - tutkimustietoa ja työkaluja – seminaari Kolin Luontokeskus Ukko 23.9.2002. Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus. s. 89-95. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 886. ISBN 951-40-1873-7. ISSN 0385-4283.
- Lepistö, A., Seuna, P., Saukkonen, S. & Kortelainen, P. 1995. Hakkuun vaikutus hydrologiaan ja ravinteiden huuhtoutumiseen rehevältä metsävaluma-alueelta Etelä-Suomessa. Julkaisussa: Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.). Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE -projektin loppuraportti. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. s. 73-84. Suomen ympäristö 2. ISBN 952-11-0007-9. ISSN 1238-7312.
- Lepistö, A. 1999. Metsätalouden ja typpilaskeuman aiheuttama kuormitus vesiin – valuma-alueilta vesistöaluemittakaavaan. Julkaisussa: Ahti, E., Granlund, H. & Puranen, E. (toim.): Metsätalouden ympäristökuormitus. Seminaari Nurmeksessa 23.-24.9.1998. Tutkimusohjelman väliraportti. Helsinki. Metsäntutkimuslaitos. Vantaan tutkimuskeskus. s. 127-138. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 745. ISBN 951-40-1694-7. ISSN 0358-4283.
- Manninen, P. 1998. Effects of forestry ditch cleaning and supplementary ditching on water quality. *Boreal Environment Research* 3(1): 23-32.
- Manninen, P. 1999. Kunnostus- ja täydennysojituksen vesistövaikutuksia. Veden laatu, kuormitus ja vesiensuojelu. Suomen ympäristö 372. ISBN 952-11-0628-X. ISSN 1238-7312.
- Markkanen, S.-L., Lepistö, A., Granberg, K., Huttunen, M., Kenttämies, K., Rankinen, K. & Virtanen, K. 2001. Kainuun vesistöjen ravinnekuormitus. Kajaani. 100 s. Suomen ympäristö 509. ISBN 952-11-0959-9. ISSN 1238-7312.
- Marttunen, M. (toim.) 1998. Vesiensuojelun tavoitteet vuoteen 2005. Vaihtoehtoisten kuormitustasojen vaikutukset sisävesissä. Helsinki. Suomen ympäristökeskus. 66 s. Suomen ympäristö 160. ISBN 1238-7312. ISSN 952-11-0195-4.
- 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.
- Mustonen, S. E. & Seuna, P. 1971. Metsäojituksen vaikutuksesta suon hydrologiaan. Vesientutkimuslaitoksen julkaisuja 2. 63 s.
- Nieminen, M. 2003. Effects of clear-cutting and site preparation on water quality from a drained Scots pine mire in southern Finland. *Boreal Environment Research* 8: 53-59.
- Nordlund, G., 1998. Ilman epäpuhtaudet. Julkaisussa: Mälkönen, E. (toim.), Ympäristön muutos ja metsien kunto. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja, Vol. 691. Gummerus, Jyväskylä, s. 46-53.

- Palviainen, M., Finér, L., Kurka, A.-M., Mannerkoski, H., Piirainen, S. & Starr, M. 2003. Ravinteiden vapautuminen hakkuutähteistä. Julkaisussa: Finér, L., Laurén, A. & Karvinen, L. (toim.): Ajankohtaista metsätalouden ympäristökuormituksesta - tutkimustietoa ja työkaluja – seminaari Kolin Luontokeskus Ukko 23.9.2002. Metsäntutkimuslaitos, Joensuun tutkimuskeskus. s. 43-48. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 886. ISBN 951-40-1873-7. ISSN 0385-4283.
- Peltola, A. (toim.) 2003. Metsätalostollinen vuosikirja 2003. Metsäntutkimuslaitos. Vammala. 382 s. ISSN 0359-968X. ISBN 951-40-1894-X.
- Rekolainen, S. 1989. Phosphorus and nitrogen load from the forest and agricultural areas in Finland. *Aqua Fennica* 19: 95-107.
- Rekolainen, S., Posch, M., Kämäri, J. & Ekholm, P. 1991. Evaluation of the accuracy and precision of annual phosphorus load estimates from two agricultural basins in Finland. *Journal of Hydrology* 128: 237-255.
- Rekolainen 1993. Assessment and mitigation of agricultural water pollution. Publications of the Water and Environment Research Institute 12. National Board of Waters and the Environment, Helsinki, Finland. 34 s.
- Rosén, K., Aronson, J.-A., Eriksson, H. M. 1996. Effects of clear-cutting on streamwater quality in forest catchments in central Sweden. *Forest Ecology and Management* 83: 237-244.
- Sallantausta, T. 1987. Turvetuotanto vesistöjen kuormittajana – vertailu muihin soidenkäyttömuotoihin. *Lisensiaattityö*. 49 s.
- Sallantausta, T. 2004. Hydrochemical impacts set constraints on mire restoration. Julkaisussa Päivänen, J. (toim.): *Wise use of Peatlands. Proceedings of the 12th International Peat Congress. Volume 1. Oral Presentations.* 831 s.
- Saukkonen, S. & Kortelainen, P. 1995. Metsätaloustoimenpiteiden vaikutus ravinteiden ja orgaanisen aineen huuhtoutumiseen. Julkaisussa Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.): *Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE-projektin loppuraportti.* Helsinki. Suomen ympäristökeskus. s. 15-32. Suomen ympäristö 2. ISBN 952-11-0007-9. ISSN 1238-7312.
- Schroderus-Härkönen, S. & Markkanen, S.-L. 1999. Kainuun ympäristölaadun kuvaus. Suomen ympäristö 356. 312 s. ISSN 1238-7312. Seuna, P. 1990. Metsätalouden toimenpiteet hydrologisina vaikuttajina. *Vesitalous* 31 (2): 38-41 ISSN 0505-3838.
- Silvola, J. 1988. Ojituksen ja lannoituksen vaikutus turpeen hiilen vapautumiseen ja ravinteiden mineralisoitumiseen. *Suo* 39 (1-2): 27-37.
- Suomen ympäristökeskus 2005, Vesistömallijärjestelmä (SYKE-WSFS). Julkinen osoite: <http://www.ymparisto.fi/vesistoennusteet>. Ympäristöhallinnon sisällä: <http://kk625.vyh.fi/vuok/html/main.shtml>
- Vuori, K.-M., Joensuu, I., & Latvala, J. 1995: Metsäojitusten vaikutukset veden laatuun, pohjaeläimistöön ja taimen ravintoon Isojoen vesistössä. Julkaisussa Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.): *Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta. METVE-projektin loppuraportti.* Helsinki. Suomen ympäristökeskus. s. 265-280. Suomen ympäristö 2. ISBN 952-11-0007-9. ISSN 1238-7312.
- Ympäristöministeriö 1998: *Vesien suojeleminen vuoteen 2005.* Helsinki. 82 s. Suomen ympäristö 226. ISBN 951-37-2574-X. ISSN 1238-7312.
- Åström, M., Aaltonen, E.-K., & Koivusaari, J. 2001: Impact of Ditching in a Small Forested Catchment on Concentrations of Suspended Material, Organic Carbon, Hydrogen Ions and Metals in Stream Water. *Aquatic Geochemistry* 57: 57-73.
- Åström, M., Aaltonen, E.-K., & Koivusaari, J. 2002. Impact of forest ditching on nutrient loadings of a small stream – a paired catchment study in Kronoby, W. Finland. *The Science of the Total Environment* 297: 127-140.
- Åström, M., Aaltonen, E.-K., & Koivusaari, J. 2005. Changes in leaching patterns of nitrogen and phosphorus after artificial drainage of a boreal forest – a paired catchment study in Lappajärvi, western Finland. *Boreal Environment Research* 10: 67-78.

Kuvailulehti

Julkaisija	Pirkanmaan ympäristökeskus	Julkaisu-aika Helmikuu 2006
Tekijä(t)	Pekka Sillanpää, Amer Bilaletdin, Heikki Kaipainen, Tom Frisk ja Tapani Sallantaus	
Julkaisun nimi	Metsätalouden aiheuttaman kuormituksen laskentamenetelmä	
Julkaisun osat/ muut saman projektin tuottamat julkaisut		
Tiivistelmä	<p>Suomen maapinta-alasta yli 87 % kuuluu voimaperäisen metsätalouden piiriin. Monet metsätaloudelliset toimenpiteet aiheuttavat metsäekosysteemissä selkeästi havaittavan häiriötilan ja johtavat voimakkaisiin ja pitkäkestoisiin muutoksiin valuma-alueen ainetaseissa. Kuormittavuuden kannalta merkittävimpiä toimenpiteitä ovat ojitus, avohakkuu ja maanmuokkaus, jotka kaikki kasvattavat mm. typen, fosforin ja kiintoaineen huuhtoumia. Lisääntyneellä ravinteiden ja kiintoaineen kuormituksella on haitallisia vaikutuksia vesistöissä ja siksi metsätaloutta pyritään jatkuvasti ohjaamaan ympäristöystävällisempään suuntaan. Oikeiden menettelytapojen löytämiseksi tarvitaan luotettavaa tietoa eri metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksista. Tässä työssä esitellään malli, joka kokoaa yhteen tietoa tähän mennessä tutkituilta alueilta. Sen avulla voidaan tarkastella uudisojituksen, kunnostusojituksen sekä metsän uudistamisen aiheuttamaa kuormitusvaikutusta suhteessa alueen luontaiseen huuhtoumaan. Tuloksena määritellään toimenpiteestä johtuvan kuormitusvaikutuksen eksponentiaalista vähenemistä kuvaavat yhtälöt. Niiden mukaan voimakkaimman ja pitkäkestoisimman suhteellisen kuormituksen niin typen, fosforin kuin kiintoaineenkin osalta tuottaa uudisojitus. Erityisesti kiintoaineen huuhtoumat ovat ojitusta edeltäneeseen tilaan verrattuna suuret ja aluksi monikymmenkertaistuvat. Vaikutus saattaa pisimmillään kestää n. 30 vuotta. Myös kunnostusojitus vaikuttaa voimakkaasti kiintoainehuuhtoumiin, mutta jo kerran ojitetulla alueella toimenpiteen vaikutukset jäävät huomattavasti vähäisemmiksi kuin uudisojituksessa. Uudistushakkuun ja maanmuokkauksen aiheuttama kiintoainekuorma on molempiin ojitustoimenpiteisiin nähden pieni. Ravinteita, erityisesti fosfaattifosforia, huuhtoutuu kuitenkin suhteellisesti tarkasteltuna enemmän kuin kunnostusojituksessa.</p>	
Asiasanat	metsätalous, kuormitus, valuma-alue, ainetase, ravinteet, kiintoaine, mallinnus	
Julkaisusarjan nimi ja numero	Suomen ympäristö 817	
Julkaisun teema	Ympäristönsuojelu	
Projektihankkeen nimi ja projektinumero		
Rahoittaja/ toimeksiantaja	Pirkanmaan ympäristökeskus	
Projektiryhmään kuuluvat organisaatiot		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-2173-4
		952-11-2174-2 (PDF)
	Sivuja 41	Kieli Suomi
	Luottamuksellisuus Julkinen	Hinta 10 €
Julkaisun myynti/ jakaja	Pirkanmaan ympäristökeskus, PL 297, 33101 Tampere, puh. 03 242 0111, telefax 03 242 0266 Oy EDITA Ab, PL 800, 00043 EDITA, vaihde 020 450 00 ASIAKASPALVELU, puh. 020 450 05, telefax 020 450 2380	
Julkaisun kustantaja	Pirkanmaan ympäristökeskus	
Painopaikka ja -aika	Tampereen yliopistopaino Oy 2006	

Documentation page

Publisher	Pirkanmaa Regional Environment Centre	Date February 2006
Author(s)	Pekka Sillanpää, Amer Bilaletdin, Heikki Kaipainen, Tom Frisk and Tapani Sallantaus	
Title of publication	Calculation method for forestry loading	
Parts of publication/ other project publications		
Abstract	<p>87 % of Finland's land area is within a heavy forestry. Many forestry practises cause disorder in forest ecosystem and end in strong and long-lasting changes in catchment's mass balances. As regards loading the most significant practises are ditching, clear cutting and tilling, all of which increase e.g. leaching of nitrogen, phosphorus and suspended solids. The increased loading of nutrients and suspended solids have harmful effects on water bodies and therefore forestry practises are constantly tried to guide into more environmental friendly direction. In order to find the right procedures for this reliable knowledge of the effects of different forestry practises is needed. This report represents a model that aggregates knowledge from all the areas studied so far. Through it the loading effect caused by first-time ditching, ditch cleaning and supplementary ditching and regeneration of the forest can be examined relative to the natural leaching of the area. As a result the equations that describe the exponential decreasing of the loading effect are being specified. According to these equations the most powerful and long-lasting relative loading regarding nitrogen, phosphorus and suspended solids is caused by first-time ditching. Especially leaching of suspended solids is considerable comparing to the state before ditching. It increases more than a tenfold. The effect can last as long as 30 years. Also ditch cleaning and supplementary ditching has strong effect to leaching of suspended solids but in the area where ditching is already done before the effects of this forestry practise are significantly lower than first-time ditching. The suspended solid load caused by regeneration cutting and tilling is small comparing to the both ditching practises. However leaching of the nutrients, especially phosphate-phosphorus, is relatively higher than in ditch cleaning and supplementary ditching.</p>	
Keywords	forestry, loading, catchment area, mass balance, nutrients, suspended solids, modelling	
Publication series and number	The Finnish Environment 817	
Theme of publication	Environmental protection	
Project name and number, if any		
Financier/ commissioner	Pirkanmaa Regional Environment Centre	
Project organization		
	ISSN 1238-7312	ISBN 952-11-2173-4 952-11-2174-2 (PDF)
	No. of pages 43	Language Finnish
	Restrictions Public	Price 10 €
For sale at/ distributor	Pirkanmaa Regional Environment Centre, phone +358 3 242 0111, telefax +358 3 242 0266 Edita Publishing Ltd, phone +358 20 450 05, telefax +358 20 450 2380 Internet: www.edita.fi/netmarket	
Financier of publication	Pirkanmaa Regional Environment Centre	
Printing place and year	Tampereen yliopistopaino Oy, Tampere 2006	



YMPÄRISTÖN- SUOJELU

Metsätalouden aiheuttaman kuormituksen laskentamenetelmä

Suomen maapinta-alasta yli 87 % kuuluu voimaperäisen metsätalouden piiriin. Monet metsätaloudelliset toimenpiteet aiheuttavat metsäekosysteemissä selkeästi havaittavan häiriötilan ja johtavat voimakkaisiin ja pitkäkestoisiin muutoksiin valuma-alueen ainetaseissa. Kuormittavuuden kannalta merkittävimpiä toimenpiteitä ovat ojitus, avohakkuu ja maanmuokkaus, jotka kaikki kasvattavat mm. typen, fosforin ja kiintoaineen huuhtoumia. Lisääntyneellä ravinteiden ja kiintoaineen kuormituksella on haitallisia vaikutuksia vesistöissä ja siksi metsätaloutta pyritään jatkuvasti ohjaamaan ympäristöystävällisempään suuntaan. Oikeiden menettelytapojen löytämiseksi tarvitaan luotettavaa tietoa eri metsätaloustoimenpiteiden vaikutuksista. Tässä työssä esitellään malli, joka kokoaa yhteen tietoa tähän mennessä tutkituilta alueilta. Sen avulla voidaan tarkastella uudisojituksen, kunnostusojituksen sekä metsän uudistamisen aiheuttamaa kuormitusvaikutusta suhteessa alueen luontaiseen huuhtoumaan. Tuloksena määritellään toimenpiteestä johtuvan kuormitusvaikutuksen eksponentiaalista vähenemistä kuvaavat yhtälöt. Niiden mukaan voimakkaimman ja pitkäkestoisimman suhteellisen kuormituksen niin typen, fosforin kuin kiintoaineenkin osalta tuottaa uudisojitus. Erityisesti kiintoaineen huuhtoumat ovat ojitusta edeltäneeseen tilaan verrattuna suuret ja aluksi monikymmenkertaistuvat. Vaikutus saattaa pisimmillään kestää n. 30 vuotta. Myös kunnostusojitus vaikuttaa voimakkaasti kiintoainehuuhtoumiin, mutta jo kerran ojitetulla alueella toimenpiteen vaikutukset jäävät huomattavasti vähäisemmiksi kuin uudisojituksessa. Uudistushakkuun ja maanmuokkauksen aiheuttama kiintoainekuorma on molempiin ojitustoimenpiteisiin nähden pieni. Ravinteita, erityisesti fosfaattifosforia, huuhtoutuu kuitenkin suhteellisesti tarkasteltuna enemmän kuin kunnostusojituksessa.

Julkaisua on saatavissa myös Internetissä:
<http://www.ymparisto.fi/julkaisut>

ISBN 952-11-2173-4
ISBN 952-11-2174-2 (PDF)
ISSN 1238-7312

Myynti:
Pirkanmaan ympäristökeskus
PL 297, 33101 Tampere
puh. 03 242 0111, telefax 03 242 0266

Oy EDITA Ab
PL 800, 00043 EDITA, vaihde 020 450 00
ASIAKASPALVELU
puh. 020 450 05, telefax 020 450 2380
EDITA-KIRJAKAUPPA HELSINGISSÄ
Annankatu 44, puh. 020 450 2566