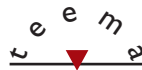


Harri Koivusalo, Mike Starr, Ari Laurén ja Leena Finér

# Päätihakkuun ja maanmuokkauksen vaikutus veden kiertoon ja ravinnekuormitukseen



## Veden kierron merkitys metsässä

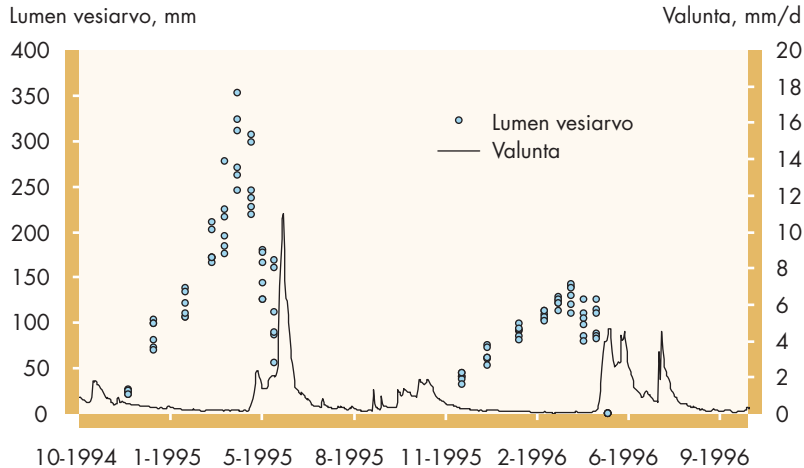
Veden kierron osatekijöitä ovat sadanta, haihdunta, veden varastoituminen ja valunta. Veden kierto ja sen osatekijät muuttuvat, kun puusto poistetaan päätihakkuun yhteydessä. Päätihakkuun vaikutusta veden kiertoon voidaan tarkastella joko hakkuualueen tai sitä ympäröivän valuma-alueen näkökulmasta. Ravinteet ja kiintoainepartikkelit kulkeutuvat vesistöihin veden mukana ja siitä syystä muutokset veden kierrossa vaikuttavat merkittävästi vesistöjen ravinne- ja kiintoainekuormitukseen. Päätihakkuun ja sitä seuraavan maanmuokkauksen aiheuttaman kuormituksen lisäykseen vaikuttavat muutokset sekä valunnan määrässä, että valumaveden kiintoaine- ja ravinnepitoisuuksissa. Valunnan mukana vesistöihin kulkeutuva kiintoaine ja ravinteet voivat johtaa vesistöjen rehevöitymiseen, samentumiseen, liettymiseen tai mataloitumiseen.

Lumen sulannan aiheuttamilla kevättulvilla on tärkeä merkitys vuotuisen valunnan ja siten mahdollisen kuormituksen syntymiselle. Suomessa lumien sulamisvesistä aiheutuvat kevättulvat muodostavat tavallisesti 40–50 % vuotuisesta valunnasta ja kevätajan kuormitus on vastaavasti 60–80 % vuotuisesta ravinteiden huuhtoutumisesta (Hyvärinen ja Puupponen 1986, Saukkonen ja Kortelainen 1995). Toinen huippu valunnassa ja kuormituksessa ajoittuu syksyyn. Talvi- ja kesäaikana valunta ja ravinteiden kuormitus ovat yleensä kevättä ja syksyä pienemmät. Kuvassa 1 on esimerkki lumen kertymisestä ja

valunnan määrästä Itä-Suomessa sijaitsevalla Kangasvaaran tutkimusalueella kahtena peräkkäisenä vuotena. Vuonna 1995 vuosisadanta oli 628 mm, vuosivalunta 317 mm, lumen sulamisen aikainen valunta 151 mm ja kevään maksimivesiarvo metsässä noin 300 mm.

## Päätihakkuun vaikutus veden kiertoon

Päätihakkuussa poistetaan puusto ja siihen liittyvät veden kierron osatekijät. Sadannan pidättymisen puiden latvustoon, latvustoon pidättyneen veden haihdunta ja puuston ilmarakojen kautta tapahtuva haihdunta loppuvat. Puiden latvustoon pidättyneen veden haihdunta on tehokasta. Hakkuun jälkeen pintakasvillisuus ja hakkuualueelle jäävät hakkuutähteet pidättävät sadantaa, mutta vähemmän kuin kasvillisuus ennen hakkuuta. Myös pintakasvillisuuden ilmarakojen kautta tapahtuva haihdunta voi väliaikaisesti pienentyä lajistossa tapahtuvien muutosten seurauksena. Kokonaisuudessaan haihdunta pienenee hakkuualueelta päätihakkuun jälkeen. Pienentynyt haihdunta suurentaa maanpinnalle tulevaa osuutta sadannasta. Näin tapahtuu myös talvella ja lunta kertyy hakkuualalle enemmän kuin hakkuukypsään metsään. Puuston varjostuksen poistuminen lisää maan tai lumen pinnalle tulevan auringonsäteilyn määrää, sekä altistaa pinnan tuulen vaikutukselle. Nämä tekijät nopeuttavat lumen sulamista keväällä.



**Kuva 1.** Lumen vesiarvo (lumen määrä sulaksi vedeksi muutettuna) ja valunta Kangasvaaran tutkimusalueelta lokakuusta 1994 lokakuuhun 1996.

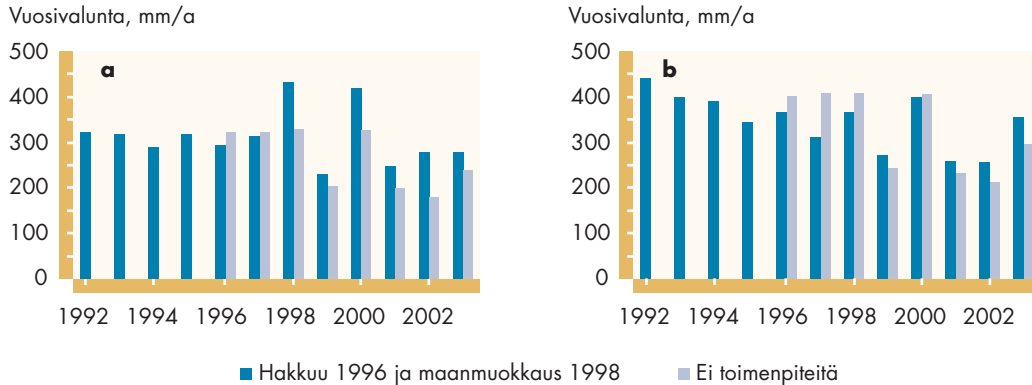
Pienentynyt haihdunta ja vastaavasti maan pinnalle tuleva suurempi vesimäärä kasvattavat maaperään imeytyvän veden määrää päätehakkuun jälkeen. Tämä lisää maan kosteutta ja voi paikoin johtaa pohjaveden pinnan nousuun, kuten havaitaan esimerkiksi suometsissä (Heikurainen ja Päivänen 1970). Suurentunut vesimäärä voi edelleen lisätä valunnan muodostumista pohjavesikerroksen, maan pintakerroksen tai maanpinnan kautta.

Valuma-alueella päätehakkuun vaikutus valunnan muodostumiseen riippuu hakkuualueen koosta sekä hakkuualueen sijainnista. Hakkuualueen koko suhteessa valuma-alueen kokoon vaikuttaa huomattavasti valunnan ajoittumiseen. Koska lumen sulaminen tapahtuu hakkuualueelta ja metsästä hieman eriaikaisesti, voivat sulamiserot pienentää valuntahuippuja osittain hakatulla valuma-alueella (esim. Kaitera 1939, Kokkonen ym. 2006). Tutkimusten mukaan päätehakkuun vaikutusta valunnan määrään on vaikea havaita mittauksin, jos hakkuualueen suuruus jää alle viidesosaan valuma-alueen pinta-alasta (esim. Brown ym. 2005). Lähellä uomia olevilla kosteilla alueilla valuntaa muodostuu sadannasta enemmän kuin kuivemmilla alueilla lähellä vedenjakajaa. Päätehakkuut lähellä uomia lisäävät valunnan muodostumista enemmän kuin hakkuut lähellä vedenjakajaa.

Päätehakkuun jälkeen tehtävällä maanmuokkauk-

sella on myös vaikutusta veden kiertoön. Haihduntaa ja sadeveden imeytymistä tapahtuu eri tavalla paljastetulta kivennäismaan pinnalta, palteesta ja koskemattomasta maanpinnasta. Maanmuokkaus pienentää haihduntaa kunnes kasvillisuus palautuu muokkaukseen edeltävälle tasolle. Kokonaisuudessaan haihdunnan palautuminen päätehakkuuta edeltävälle tasolle kestää pitkään, koska puusto kehittyy pintakasvillisuutta hitaammin.

Kangasvaaran tutkimusalueella Itä-Suomessa hakattiin 29 % valuma-alueen pinta-alasta vuonna 1996 ja maanmuokkaus tehtiin vuonna 1998. Kangasvaarassa valunnan määrä hakkuun jälkeen vuoteen 2003 saakka oli 6 vuotena suurempi ja 2 vuotena pienempi verrattuna arvioituun valuntamäärään ilman hakkuuta (kuva 2a). Läheisellä Iso-Kauhean tutkimusalueella hakkuun pinta-ala oli pienempi (11 %) ja vaikutus valuntaan oli epäselvempi, sillä hakkuun jälkeen valunta lisääntyi 4 vuotena ja pieneni 4 vuotena (kuva 2b). Valunnan lisääntyminen hakkuun jälkeen on havaittu latvavaluma-alueilla tehdyissä tutkimuksissa, mutta vaikutukset jäivät vähäisiksi, jos käsittelypinta-alan suhteellinen osuus valuma-alueen pinta-alasta on pieni (esim. Kenttämies ja Mattsson 2006). Pitkäaikaiset tutkimustulokset NURMES-alueilta osoittavat, että toimenpiteiden toteutuksesta riippuen vaikutukset saattavat näkyä valunnassa pidempään kuin 10 vuotta. Suo-



**Kuva 2.** Kangasvaaran (a) ja Iso-Kauhean (b) tutkimusalueen havaittu valunta ja laskennallinen luonnon-tilainen valunta vuosina 1992–2003 (Kenttämies ja Mattsson 2006).

nessa tehdyissä metsätalouden kuormitustarkaste- luissa päätehakkuun vaikutusten on arvioitu palaa- van lähelle hakkuuta edeltäviä olosuhteita 10 vuo- den kuluessa (Kenttämies ja Mattsson 2006).

### Ravinteiden huuhtoutuminen

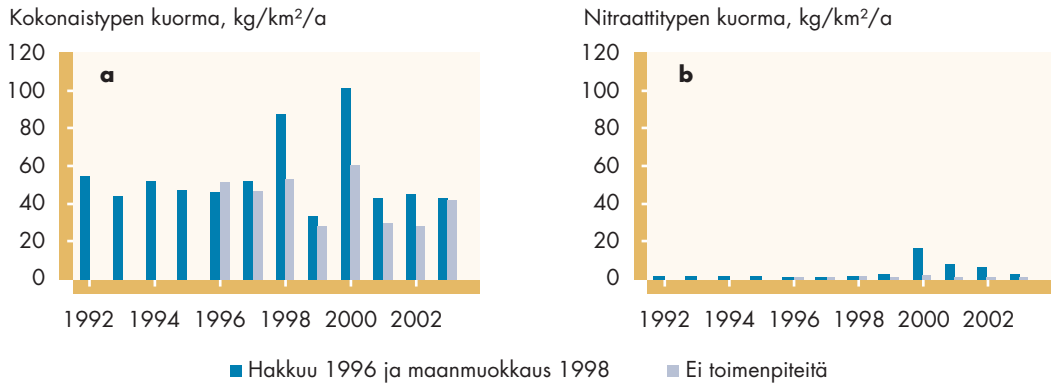
Metsän ravinnevarastot ja metsässä kiertävät ravin- nemäärät ovat hyvin suuria verrattuna huuhtoutuviin ravinnemääriin (esim. Piirainen 2002). Metsän ra- vinnekierto on lähes suljettua, sillä kasvillisuus ja eliöstö pyrkivät tehokkaasti hyödyntämään käytet- tävissä olevat ravinteet. Päätehakkuun jälkeen puus- ton ravinteiden otto loppuu, hakkuutähteistä vapau- tuu ravinteita ja pintakasvillisuuden ravinteiden otto muuttuu lajistomuutosten myötä, minkä seuraukse- na ravinteiden kuormitus voi lisääntyä (Laurén ym. 2005). Ravinnekuormituksen määrään vaikuttaa sekä veden kulkeutumisreitti hakkuualueelta vesistöön että ravinteiden kyky pidäytyä matkan aikana (Kok- konen ym. 2006). Ravinteita voi huuhtoutua erityi- sesti lähellä vesiuomia sijaitsevilta valuntaa synnyt- täviltä alueilta. Kuormitusta pyritäänkin pienentä- mään jättämällä käsittelemättömiä suojavyöhykkeitä hakkuualueen ja uoman väliin (esim. Ahtiainen ja Huttunen 1999).

Vesistöjä rehevöittävät erityisesti typpi- ja fosfori- yhdisteet. Typpi kulkeutuu veden mukana joko or- gaaniseen aineeseen sitoutuneena, ammoniumtyp- penä tai nitraattityppenä.

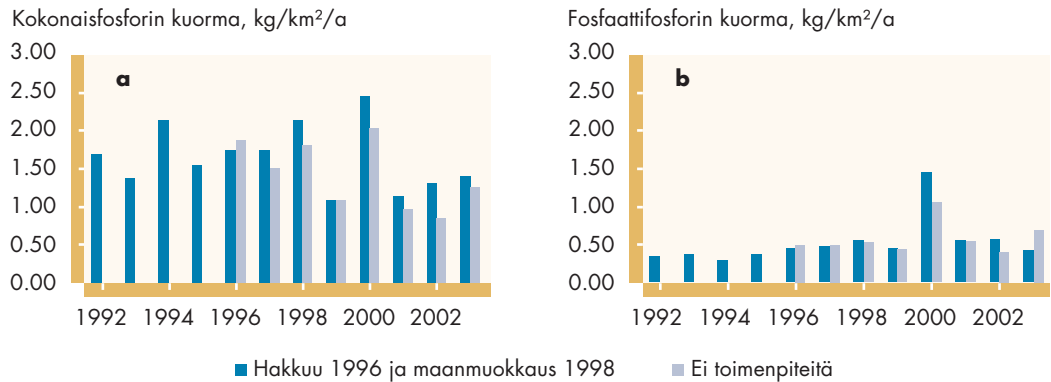
Päätehakkuu ja maanmuokkaus vaikuttavat eri ta- voin eri tyyppiyhdisteiden huuhtoutumiseen. Puuston poistaminen ja maanmuokkaus pienentävät kasvil- lisuuden typenottoa samaan aikaan, kun hakkuu- tähteiden ja muun orgaanisen aineen hajoaminen vapauttaa typpeä ja typen laskeuma maan pinnalle suurenee (Piirainen 2002). Tämä altistaa tyyppiyh- disteet huuhtoutumiselle. Hakkuutähteissä olevien hajottajamikrobien ja pintakasvillisuuden kehittymin- nen pienentävät typen huuhtoutumisriskiä (Laurén ym. 2005). Tyyppiyhdisteistä ammonium ja orgaanin- nen typpi pidäytyvät maaperään. Nitraatti on herkkä huuhtoutumaan, mikäli kulkeutumisreitillä varrella sijaitseva kasvusto tai eliöstö ei pysty käyttämään sitä hyväkseen.

Typen kuormitus lisääntyi Kangasvaaran valuma- alueelta päätehakkuun ja maanmuokkauksen jälkeen (Kenttämies ja Mattsson 2006). Lisäys näkyi selvim- min kokonaistypen kuormituksessa vuosina 1998 ja 2000 (kuva 3a) ja nitraattitypen kuormituksessa vuo- sina 2000–2002 (kuva 3b). Kangasvaaran tutkimus- alueella hakkuu tai maanmuokkaus ei vaikuttanut selkeästi kokonaistypen pitoisuuksiin purovedessä. Kokonaistypen kuormituksen nousu (kuva 3a) sel- lityy täten pääasiassa muutoksissa valunnan mää- rässä (ks. kuva 2a). Sen sijaan nitraatin pitoisuudet purovedessä ja kuorma (kuva 3b) olivat muutama vuosi toimenpiteiden jälkeen kohonneet.

Fosfori kulkeutuu veden mukana siihen liuennee- na fosfaattina, liuenneisiin orgaanisiin yhdisteisiin sitoutuneena fosforina tai kiintoainepartikkeleihin



**Kuva 3.** Kangasvaaran tutkimusalueen arvioitu kokonaistypen kuorma (a) ja nitraattitypen kuorma (b) tilanteessa, jossa 29 % alueesta hakattiin 1996 ja muokattiin 1998, sekä tilanteessa, joka kuvastaa luonnon-tilaa (Kenttämies ja Mattsson 2006).



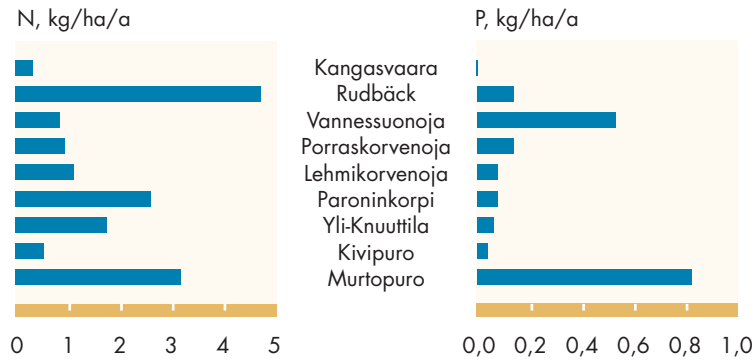
**Kuva 4.** Kangasvaaran tutkimusalueen arvioitu kokonaisfosforin kuorma (a) ja fosfaattifosforin kuorma (b) tilanteessa, jossa 29% alueesta hakattiin 1996 ja muokattiin 1998, sekä tilanteessa, joka kuvastaa luonnon-tilaa (Kenttämies ja Mattsson 2006).

sitoutuneena fosforina. Päätehakkuun jälkeen hakkuutähteistä vapautuu fosforia nopeammin kuin tyypeä. Maassa veden mukana kulkeutuva fosfori pidättyy tehokkaasti rauta- ja alumiiniyhdisteisiin. Toisaalta hakkuun vaikutuksesta kohonnut pohjaveden pinta saattaa johtaa fosforin vapautumiseen ja kuormitusriskin kasvuun (Jensen ym. 1999). Jos kiintoainetta lähtee liikkeelle veden mukana hakkuun tai maanmuokkauksen jälkeen, fosforia huuhtoutuu kiintoaineen mukana. Kiintoaineeseen sitoutuneen fosforin kulkeutumista vesistöön voidaan vähentää, mikäli hakkuualueen ja uoman väliin jätetään suojavyöhyke. Suotuisissa olosuhteissa myös

liukoinen fosfaattifosfori voi pidättyä suojavyöhykkeelle (esim. Kenttämies ja Mattsson 2006). Tietyillä alueilla maa- ja kallioperän korkea fosforipitoisuus lisää fosforin huuhtoutumista hakkuuden yhteydessä.

Kuvassa 4 on esitetty kokonaisfosforin ja fosfaattifosforin kuormitus Kangasvaaran tutkimusalueelta. Leveiden suojavyöhykkeiden jättämisen ja korkeuskäyrien suuntaisesti toteutetun katkonaisen äestysmuokkauksen ansiosta päätehakkuut eivät juuri lisänneet valuma-alueelta lähtevää fosforikuormaa.

Päätehakkuiden ja maanmuokkauksen aiheuttama vesistökuormitusta on tutkittu Suomessa kai-



**Kuva 5.** Typen ja fosforin kuormituksen keskimääräinen lisäys kolmena päätehakkuun jälkeisenä vuotena eri tutkimusalueilla (Kenttämies ja Mattsson 2006).

ken kaikkiaan yhdeksällä valuma-alueella, ja kuormituksen lisäys, eli ominaiskuormitus, on vaihdellut suuresti eri alueiden välillä (kuva 5). Alueellisia kuormituslaskelmia varten päätehakkuulle ja maanmuokkaukselle on määritetty ominaiskuormitusluvut eli arvioitu, kuinka paljon kuormitus lisääntyy keskimäärin toimenpidehehtaaria kohti 10 vuoden kuluessa toimenpiteestä. Keskimääräisen kuormituksen on havaittu kasvavan muokkausvoimakkuuden mukana, ja siitä syystä ominaiskuormitusluvut (taulukko 1) on määritetty erikseen päätehakatuille ja voimakkaasti maanmuokatuille/suojavyöhykkeetömmille alueelle (mätästys tai auraus) sekä päätehakatuille ja kevyesti muokatuille/suojavyöhykkeellisille alueelle (äestys ja laikutus). Alueellisten ja valtakunnallisten ravinteiden huuhtoutumista koskevien laskelmien teossa on sovellettu yksittäisiltä valuma-alueilta saatuja ominaiskuormituslukuja, vaikka todellinen vaihtelu eri toimenpidealueiden välillä onkin suurta. Tällä hetkellä ei ole riittävästi tietoa alueellisten tekijöiden ottamiseksi huomioon kuormituksen laskennassa.

## Päätelmät

Veden liikkeillä ja valunnan muodostumisella on keskeinen rooli vesistökuormituksen syntymisessä. Päätehakkuu ja maanmuokkaus pienentävät kokonaisuudessaan väliaikaisesti, mikä näkyy valunnan kasvuna. Hakkuun yhteydessä kasvuston pienenty-

**Taulukko 1.** Valtakunnallisissa laskelmissa käytettävät ominaiskuormitusluvut, kuormituksen lisäys yhteensä kymmenvuotisjaksolla toimenpiteen jälkeen (kg/ha)(Kenttämies 2006).

	Fosfori	Typpi
Päätehakkuu + auraus tai mätästys ilman suojavyöhykettä kg/ha/10 a	5,75	35,20
Päätehakkuu + auraus tai mätästys suojavyöhykkeen kanssa kg/ha/10 a	0,161	4,80
Päätehakkuu + äestys tai laikutus kg/ha/10 a	0,35	7,50

nyt ravinteiden otto, hakkuutähteistä vapautuvat ravinteet ja maanmuokkaus lisäävät vesistökuormitusta. Liukoiset ravinteet ja eroosion tapahtuessa kiintoaine ja siihen sitoutuneet ravinteet ovat alttiina kulkeutumiselle vesistöön veden mukana. Hajottajamikrobien ravinteiden otto viivästyttää kuormituksen alkamista. Pintakasvillisuuden elpyminen taas lyhentää kuormitusvaikutuksen kestoa. Kuormitus on voimakkaimmillaan muutama vuosi päätehakkuun ja maanmuokkauksen jälkeen ja sitten pienenee. Suojavyöhykkeen käytöllä vesistön ja hakkuualueen välissä voidaan pienentää sekä kiintoaineeseen sitoutuneiden, että liukoisten ravinneyhdisteiden kuormaa. Veteen liuenneiden ravinneyhdisteiden pidättäminen suojavyöhykkeelle on kuitenkin vaikeaa, jos veden virtausreitit varrella ei ole ravin-

teita hyväksikäyttävää kasvustoa tai eliöstöä.

Päätehakkuun ja maanmuokkauksen aiheuttamat kuormitusmäärät pinta-alayksikköä kohden ovat muihin maankäyttömuotoihin, kuten peltoviljelyyn nähden pieniä. Alueiden ominaisuuksista, sääolosuhteista, eri toimenpiteiden välisestä ajasta ja toimenpiteiden toteutustavasta johtuen kuormitusmäärät voivat vaihdella eri alueiden välillä.

## Kirjallisuus

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

Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W. & Vertessy, R.A. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology* 310: 28–61.

Heikurainen, L. & Päivänen, J. 1970. The effect of thinning, clear cutting, and fertilization on the hydrology of peatland drained for forestry. *Acta Forestalia Fennica* 104. 23 s.

Hyvärinen, V. & Puupponen, M. 1986. Valunta. Julkaisussa: Mustonen, S. (toim.). *Sovellettu hydrologia*. Vesi- ja maanmuokkauksen tutkimuskeskuksen julkaisu. 503 s.

Jensen, M.B., Hansen, H.C.B., Nielsen, N.E. & Magid, J. 1999. Phosphate leaching from intact soil column in response to reducing conditions. *Water, Air, and Soil Pollution* 113: 411–423.

Kaitea, P. 1939. Lumen kevätsumamisesta ja sen vaikutuksesta vesiväylien purkautumissuhteisiin Suomessa. *Maataloushallituksen kulttuuriteknillisiä tutkimuksia* 2. 255 s.

Kenttämies, K. & Mattsson, T. (toim.). *Metsätalouden vesistökuormitus MESUVE-projektin loppuraportti*. Suomen ympäristö 816. 160 s.

Kokkonen, T., Koivusalo, H., Laurén, A., Penttinen, S., Starr, M., Kellomäki, S. & Finér, L. 2006. Implications of processing spatial data from a forested catchment for a hillslope hydrological model. *Ecological Modelling* 199: 393–408.

Laurén, A., Finér, L., Koivusalo, H., Kokkonen, T., Karvonen, T., Kellomäki, S., Mannerkoski, H. & Ahtiainen, M. 2005. Water and nitrogen processes along a typical water flowpath and streamwater exports from a forested catchment and changes after clear-cutting: a modelling study. *Hydrology and Earth System Sciences* 9: 657–674.

Piirainen, S. 2002. Nutrient fluxes through a boreal coniferous forest and the effects of clear-cutting. *Väitöskirja*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 859. 50 s.

Saukkonen, S. & Kortelainen, P. 1995. Metsätaloustoimenpiteiden vaikutus ravinteiden ja orgaanisen hiilen huuhtoutumiseen. Julkaisussa: Saukkonen, S. & Kenttämies, K. (toim.). *Metsätalouden vesistövaikutukset ja niiden torjunta*. METVE-projektin loppuraportti. Suomen ympäristö 2: 87–104.

■ TkT Harri Koivusalo, MMT Ari Laurén, prof. Leena Finér, Metsäntutkimuslaitos, Joensuun toimintayksikkö; Ph.D. Mike Starr, Helsingin yliopisto, metsäekologian laitos. Sähköposti harri.koivusalo@metla.fi