

Silvan metsälaskurin laskennan kuvaus

Mika Nieminen, Timo Pukkala, Sakari Sarkkola, Leena Stenberg, Petja Valkama, Annukka Valkeapää, Otso Valta ja Aleksi Vihonen.

Silvan metsälaskuri tuottaa kiinteistökohtaiset, suuntaa antavat arviot metsätalouden vesistö-, ilmasto- ja talousvaikutuksista jaksollisen ja jatkuvan kasvatuksen metsänsäveltelyllä. Alla on kuvattu laskurin käyttämät pohjatiedot lähteineen sekä laskennan vaiheet.

Metsätalouden vesistövaikutuksista tuotettiin uutta tietoa Metsän jatkuvan kasvatuksen yhdistys Silva ry:n koordinoimassa hankkeessa. Vesistövaikutuksia tarkasteltiin metsätalouden toimenpiteistä aiheutuvana typen ja fosforin kuormina. Käytetyt tiedot on kuvattu alla, ja aiheesta julkaistaan myöhemmin tieteellinen artikkeli.

Ilmastovaikutukset ja kannattavuus laskettiin aiemmin kehitetyllä menetelmällä, joka kuvataan myös lyhyesti alla. Ilmastovaikutusten osalta tarkasteltiin puuston ja maaperän hiilivarastoa ja sen muutosta. Kannattavuuden osalta tarkasteltiin nettotulojen nykyarvoa kolmen prosentin korolla.

Laskennassa käytettiin avoimesti saatavilla olevaa metsävaratietoa, jonka avulla laskettiin kullekin kuviolle arviot metsätalouden vesistö-, ilmasto- ja talousvaikutuksista. Laskuri tulostaa arviot kiinteistökohtaisesti.

Huom! Laskuri ei ota huomioon metsien suojelua vaan tuottaa tiedon siitä, mitä kullakin kiinteistöllä tapahtuisi kahdella eri metsänsäveltelymenetelmällä. Mikäli siis kiinteistö tai osa siitä on suojeltu virallisesti tai metsänomistajan omalla päätöksellä, laskurin tulokset eivät ole mielekkäitä.

1 Laskurin käyttämät taustatiedot

1.1 Metsätalouden vesistövaikutukset

Metsätalouden vesistökuormitus koostuu kahdesta keskeisestä tekijästä: 1) ojituksen pitkäaikaskuormituksesta eli ns. ojitustilasta ja 2) nykyisten metsätaloustoimenpiteiden eli kangas- ja turvemaiden hakkuiden ja lannoitusten sekä ojitettujen turvemaiden kunnostusojituksen aiheuttamasta kuormituksesta.

Ojitustilan laskenta

Ojitustila riippuu turpeen hajotusnopeudesta, joka taas riippuu ojitusalueen kuivatustilasta eli suon vedenpinnan syvyydestä. Mitä syvemmällä vedenpinta on, sitä nopeammin turve hajoaa (Ojanen & Minkkinen 2019). Suon vedenpinnan tasoon taas vaikuttaa mm. ilmastotekijät, ojasyvyys ja haihduttavan puuston määrä (Sarkkola ym. 2010).

Ojitustilan laskennassa ennustetaan ensiksi suon vedenpinnan taso kasvukauden lopulla. Tämä tehdään Sarkkolan ym. (2010) kokeellisella mallilla, joka ottaa huomioon seuraavat tekijät: vedenpinnan syvyys kasvukauden lopulla elokuussa, puuston tilavuus metsikkökuviolla, keskimääräinen kuukausisadanta kesä-elokuussa, ojien keskimääräinen syvyys ja leveysaste. Ojien todellista keskimääräistä syvyyttä ojitetuilla metsikkökuvioilla ei tunneta. Keskimääräiseksi oletussyvyyydeksi asetettiin 0,6 m, joka on inventointiaineistojen perusteella tyypillinen syvyysluokka yli 10 vuotta vanhoissa ojissa (Hökkä ym. 2020).

Ojituslisän laskennan toisessa vaiheessa käytetään SUSI-mallilla (Laurén ym. 2021) etukäteen laskettua ojituksen aiheuttaman ravinnekuormituksen keskimääräistä riippuvuutta vedenpinnan syvyydestä kasvupaikkatyypeittäin. Riippuvuudet laskettiin erikseen typpi- ja fosforikuormitukselle. Ravinteikkaammilla kasvupaikkatyypeillä tiettyä vedenpintaa vastaa suurempi kuormitus kuin karummilla kasvupaikoilla. Kun suon vedenpinta on luonnontilaisia soita vastaavalla korkealla tasolla (<20 cm), ojituslisää ei synny. Mutta kun vedenpinta laskee hyvin syvälle (>60 cm), ojituslisää syntyy SUSI-mallin perusteella typpikuormituksena vuosittain keskimäärin 1,5 - 3,5 kg ha⁻¹ ja fosforikuormituksena 0,1 - 0,3 kg ha⁻¹.

Nykyisten metsätaloustoimenpiteiden aiheuttama kuormitus

Nykyisten metsätaloustoimien kuormituksen arvioinnissa tarkasteltiin *kunnostusojitusten, lannoitusten ja hakkuiden aiheuttamaa kuormitusta*.

Kunnostusojitusten aiheuttama kuormitus laskettiin aiempien tutkimusten ominaiskuormitusluvuilla, jotka on kuvattu Finér ym. (2010) julkaisussa. Sen mukaan kunnostusojitus ei aiheuta typpikuormitusta, mutta lisää fosforikuormitusta yhteensä noin 0,97 kg ha⁻¹ kymmenen vuoden aikana.

Lannoituksen aiheuttaman kuormituksen laskennassa käytettiin seuraavia tietoja, jotka nekin perustuvat Finér ym. (2010) julkaisuun. Kangasmaiden lannoitus ei aiheuta fosforikuormitusta, mutta lisää typpikuormitusta kahden vuoden aikana yhteensä 15 kg ha⁻¹. Turvemaita ei lannoiteta typellä, joten typen ominaiskuormitus turvemaiden lannoitukselle on 0 kg ha⁻¹. Fosforikuormitusta turvemaiden lannoituksessa syntyy lähinnä siksi, että osa lannoitteista leviää ojiin aiheuttaen kuormitusta vuosittain 0,27 kg ha⁻¹ viiden vuoden ajan.

Kangas- ja turvemaiden hakkuiden aiemmat ominaiskuormitusluvut päivitettiin. Turvemaiden hakkuiden kuormituksesta oli käytettävissä uusia tuloksia ja kangasmaiden hakkuiden kuormituksesta aiemmin hyödyntämättömiä tuloksia.

Kangasmaiden hakkuiden kuormituksen laskennassa käytettiin aiempien koealueiden lisäksi Murtopuron, Vanneskorven ja Rudbäckenin huuhtoutumistuloksia kolmelta vuodelta avohakkuun jälkeen (Mattsson ym. 2006b, Mattsson ym. 2006a, Haapanen ym. 2006). Tämän jälkeen hakkuiden ominaiskuormitus laskettiin vastaavalla tavalla kuin aiemmin (Finér ym. 2010). Kuten aiemmissakin tutkimuksissa, avohakkuuta vähäisempien hakkuiden (harvennushakkuut, jatkuvan kasvatuksen hakkuut) ei oleteta lisäävän kuormitusta kangasmailta. Maanmuokkauksen aiheuttamaa kuormitusta taas ei ole mahdollista arvioida erikseen ja sen oletetaan sisältyvän avohakkuiden aiheuttamaan kuormitukseen.

Ojitettujen turvemaiden hakkuiden vesistökuormitus laskettiin ottamalla huomioon kaikki olemassa olevat tutkimukset, joista oli tiedossa poistetun puuston määrä ja joiden perusteella oli mahdollista tehdä arvio hakkuun vaikutuksesta keskimääräiseen vuotuiseseen typpi- ja/tai fosforikuormitukseen 3-4 vuoden aikana hakkuun jälkeen (Nieminen ym. 2022b, Nieminen 2004, Rodgers ym. 2010, Kaila ym. 2014, Kaila ym. 2015, Nieminen ym. 2022).

Aineiston perusteella laskettiin vuosittaisen typpi- (N-kuorma, kg ha⁻¹) ja fosforikuormituksen (P-kuorma, kg ha⁻¹) riippuvuus valuma-alueelta poistetun puuston määrästä (HK, m³ ha⁻¹). Riippuvuutta kuvattiin typen ja fosforin osalta omilla malleillaan.

Näillä malleilla laskettiin hakkuun aiheuttama typpi- ja fosforikuormitus sekä harvennus- ja avohakkuissa että jatkuvan kasvatuksen hakkuissa. Kuormituksen siis oletetaan olevan kiinteämmin suhteessa valuma-alueelta poistetun puuston määrään kuin hakkuutapaan. Samoin kuin kangasmailla, ojitetuilla turvemaillekaan ei nykytiedon avulla voida erottaa maanmuokkauksen vaikutuksia hakkuiden vaikutuksista. Näin ollen niiden aiheuttaman kuormituksen oletetaan sisältyvän hakkuiden aiheuttamaan kuormitukseen.

Näiden tunnusten avulla laskettiin arvio alueellisesta ja valtakunnallisesta metsätalouden aiheuttamasta typpi- ja fosforikuormituksesta seuraavissa kahdessa metsien käsittelyvaihtoehdoissa: Metsänhoitosuositusten mukainen tasaikäismetsätalous ja jatkuva kasvatusta. Skenaariot simuloitiin 50 vuodeksi, joka jaettiin viiteen 10-vuotisjaksoon.

1.2 Talous

Talousvaikutusten kuvaamisessa tarkasteltiin metsänomistamisen yksityistaloudellista kannattavuutta, jonka mittarina käytetään nettotulojen nykyarvoa kolmen prosentin korolla. Se lasketaan diskonttaamalla kaikki odotettavissa olevat tulevat tulot ja menot nykyhetkeen.

Jaksollisen kasvatuksen osalta puuston käsittelyt simuloitiin Tapion ohjeiden (hyvän metsän hoidon suositukset) mukaisesti. Jaksollisessa kasvatuksessa ei käytetty muita rajoituksia. Jatkuvan kasvatuksen kohdalla taas käytettiin rajoitteita jäävän puuston pohjapinta-alassa, jotta harvennukset eivät toteudu liian voimakkaina. Harvennusvoimakkuuden rajoittaminen rajoittaa jatkuvan kasvatuksen kannattavuutta mutta lisää esimerkiksi metsien keskipuuston ja hiilivaraston kasvua.

1.3 Hiilivarasto

Metsätalouden hiilivarastoja on kolme: elävä puusto, metsämaa ja puusta valmistetut tuotteet. Elävän puuston hiilivarasto on puuston koko biomassa, juuret mukaan lukien. Metsämaan hiilivarasto tarkoittaa kuolleen orgaanisen aineen hiilivarastoa, joka on osittain maan sisällä ja osittain maan pinnalla karikkeena, hakkuutähteinä ja kuolleina puina. Koko Suomen mittakaavassa metsämaa on selvästi suurempi hiilivarasto kuin puusto. Puutuotteiden hiilivarasto on hyvin pieni puuston ja metsämaan hiilivarastoihin verrattuna.

Elävän puuston hiilivarastoa suurentavat puiden kasvu ja metsien uudistuminen. Varasto suurenee, kun biomassan kasvu on suurempi kuin hakattujen ja kuolleiden puiden biomassa. Ylivoimaisesti nopein keino metsätalouden hiilivarastojen suurentamiseksi on hakata vähemmän kuin mitä metsä kasvaa.

Soilla sekä pinta-alayksikkökohtainen että valtakunnallinen yhteenlaskettu turpeen hiilivarasto on moninkertainen kivennäismaiden hiilivarastoihin verrattuna. Soilla metsämaan hiilivarasto voidaan jakaa hapellisen ja hapettoman turvekerroksen varastoon. Hapettoman turvekerroksen hiilivarasto voi olla varsinkin paksuturpeisilla rämeillä moninkertainen hapellisen kerroksen hiilivarastoon verrattuna. Hapellisen turvekerroksen paksuus vaihtelee mm. ojituksen mukaan nolasta noin yhteen metriin.

Turvemailla Silvan metsälaskurin ilmoittama hiilivarasto sisältää puuston lisäksi koko turvekerroksen (hapellinen ja hapeton) hiilen määrän. Turvekerroksen paksuutena käytettiin keskiarvolukuja, jotka on selvitetty kasvupaikkaluokittain erikseen korville ja rämeille (Korhonen ym. 2013)

2 Skenaarioiden simulointi

Simuloinnin lähtötietoina käytettiin Metsään.fi-tietokannan metsävaratietoja, jotka tuotiin Monsu-metsäsuunnitteluohjelmistoon (Pukkala 2011). Simulointi kattoi kaikki ne metsäkuviot, joista on tietoa Metsään.fi-järjestelmässä (noin 10 miljoonaa metsäkuviota). Simuloinnin alussa metsikkötietojen perusteella muodostettiin joukko kuvauspuita ennustamalla jokaisen erikseen arvioidun puusto-ositteen läpimittajakauma. Puuston kehityksen ja hakkuiden simulointi perustui kuvauspuihin.

Puuston kehitystä simuloitiin Pukkalan ym. (2021) malleilla, jotka on laadittu valtakunnallisten metsäinventointien (VMI) pysyvien koealojen mittaustiedoista. Mallien laadinta-aineistona on käytetty VMI10- ja VMI11-mittauksia. Pukkalan ym. (2021) tutkimuksessa kuvataan mallit puun läpimitan kasvulle, todennäköisyydelle, että puu pysyy elossa seuraavat 5 vuotta, ja kynnyskasvulle. Kynnyskasvu kuvaa metsikön luontaista uudistumista ja tarkoittaa niiden puiden lukumäärää, jotka ylittävät 1,3 metrin pituuden seuraavan 5-vuotiskauden aikana. Mallien ennustajina ei ole käytetty metsikön ikää, valtapituutta tai pituusboniteettia, minkä vuoksi ne soveltuvat myös sellaiseen metsätalouteen, jossa tehdään yläharvennuksia.

Tasaikäismetsätalouden simulointi perustui hyvän metsänhoidon suosituksiin (Äijälä ym. 2014).

Suosituksissa on ohjeet pohjapinta-alalle, jossa metsikkö harvennetaan, harvennushakkuun jälkeiselle pohjapinta-alalle ja keskiläpimitalle, jossa metsikkö uudistetaan. Suositukset eivät anna täsmällisiä ohjearvoja vaan ainoastaan vaihteluvälejä. Tämän tutkimuksen simuloinneissa ohjeena käytettiin suosituksen vaihteluvälin puoliväliä. Harvennushakkuut simuloitiin alaharvennuksena, jossa puolet poistuvasta pohjapinta-alasta otettiin tasaisesti kaikista läpimittaluokista (eri läpimittaluokkia harvennettiin yhtä voimakkaasti) ja toinen puoli poistamalla puita pienimmistä läpimittaluokista alkaen, kunnes pohjapinta-ala oli pienentynyt jäävän pohjapinta-alan ohjearvoon. Vain ainespuumittaisia puita eli kuitu- ja tukkirunkoja poistettiin hakkuissa.

Uudistamismenetelmä oli useimmissa tapauksissa avohakkuu, maanpinnan käsittely ja istutus. Kuivahkolla kankaalla käytettiin männyn kylvöä. Kuivilla kankailla uudistamismenetelmä oli siemenpuuhakkuu, jos mänty oli uudistettavan puuston pääpuulaji. Jos metsikkö oli kaksijaksoinen ja alempi jakso oli kasvatuskelpoinen (riittävästi kasvupaikalle sopivien puulajien alikasvosta), hakkuutapa oli ylispuiden poisto. Istutettujen puiden oletettiin kasvavan 10 % kasvumallien ennustetta paremmin (mallin antama kasvuennuste kerrottiin luvulla 1,1) ja kylvettyjen puiden 5 % ennustetta paremmin. Näitä ”jalostuslisiä” sovellettiin vain niihin puihin, jotka istutettiin tai kylvettiin 50 vuoden simulointijakson aikana.

Jatkuvapeitteisessä metsätaloudessa nuoren metsän harvennukset simuloitiin tasaikäismetsätalouden ohjeiden mukaan. Varttuneissa metsiköissä simuloitiin yläharvennuksia käyttäen optimointeihin perustuvia harvennusmalleja, jotka ilmoittavat leimausrajan (pohjapinta-ala, jossa metsikkö harvennetaan) ja jäävän puuston pohjapinta-alan. Päätehakkuita ei simuloitu. Ylispuiden poisto simuloitiin samoissa tilanteissa ja samalla tavalla kuin tasaikäismetsätaloudessa. Peitteisen metsätalouden harvennusmalleissa pohjapinta-alat riippuvat korkokannasta siten, että rajat ovat sitä alempana, mitä suurempaa korkokantaa käytetään. Tässä tutkimuksessa ohjeita sovellettiin 3 % korolla. Tuulituhojen riskin vähentämiseksi jäävälle puustolle asetettiin kuitenkin kasvupaikkaluokittaiset minimipohjapinta-alat. Ne olivat Suomen eteläpuoliskossa seuraavat: lehto ja lehtomainen 16 m²ha⁻¹, tuore 14 m²ha⁻¹, kuivahko 12 m²ha⁻¹, kuiva 10 m²ha⁻¹. Suomen pohjoispuoliskossa minimipohjapinta-alat olivat: lehto ja lehtomainen 14 m²ha⁻¹, tuore 12 m²ha⁻¹, kuivahko 10 m²ha⁻¹, kuiva 8 m²ha⁻¹.

Kivennäismailla simuloitiin kasvatuslannoituksia kuusivaltaisissa tuoreen kankaan metsiköissä ja mäntyvaltaisissa kuivahkon kankaan metsiköissä. Lannoituksia simuloitiin, jos puuston keskiläpimitta oli välillä 22–33 cm ja pohjapinta-aa välillä 15–40 m²ha⁻¹, ja kasvatusmenetelmä oli tasaikäismetsätalous (jatkuvapeitteisessä metsätaloudessa ei simuloitu kasvatuslannoituksia). Lannoitus tuli kysymykseen, jos edellisestä lannoituksesta oli kulunut vähintään 10 vuotta. Käytännössä lannoituksia simuloitui kerran kiertoajan kuluessa. Käytettävä typpimäärä oli 150 kg/ha. Lannoituksen vaikutus kasvuun laskettiin samalla tavalla kuin Heinosen ym. (2018) tutkimuksessa. Lannoituksen kasvuvasteen laskenta perustui Kukkolan ja Saramäen (1983) tutkimukseen.

Suometsiin simuloitiin peruslannoitus, jos puuston keskiläpimitta oli 5–30 cm, pohjapinta-ala 10–40 m²ha⁻¹ ja edellisestä peruslannoituksesta oli kulunut vähintään 50 vuotta. Varpuisilla soilla ei kuitenkaan simuloitu peruslannoituksia. Peruslannoituksen ei oletettu parantavan kasvua mallin ennusteeseen verrattuna vaan oletuksena oli, että peruslannoituksia tehdään kasvun ylläpitämiseksi mallin ennustamalla tasolla. Peruslannoituksia simuloitiin sekä tasaikäismetsätaloudessa että jatkuvassa kasvatuksessa.

Suometsissä simuloitiin kunnostusojituksia, jos puuston keskiläpimitta oli 5–30 cm, pohjapinta-ala 2–25 m²ha⁻¹ ja edellisestä kunnostusojituksesta oli kulunut vähintään 30 vuotta. Edellisestä avohakkuusta oli Pohjois-Suomessa oltava vähintään 60 vuotta ja Etelä-Suomessa 45 vuotta. Kunnostusojitusta ei simuloitu, jos puuston tilavuus oli 150 m³ha⁻¹ tai enemmän. Kunnostusojituksen vaikutus kasvuun laskettiin Heinosen ym. (2018) kuvaamalla menetelmällä, joka perustuu mm. Hökän ja Kojolan (2001, 2003) tutkimuksiin.

Metsävaratiedot olivat kuviokohtaisia ja ne jaoteltiin kunnittain. Laskenta tuotti jokaiselle kuviolle simulointiohjeiden mukaiset tulokset.

Silvan metsälaskuria varten simulointeja tehtiin kaksi:

- Jatkuva kasvatus (erilaisia harvennuksia ja ylispuiden poistoa, varttuneessa metsässä yläharvennuksia, ei avohakkuita)
- Tasaikäinen kasvatus (metsänhoidon suositusten mukaista metsänhoitoa)

Simuloinnit tehtiin kunnittain kunkin kunnan jokaiselle metsäkuviolle. Metsälaskuria varten kullekin metsäkuviolle laskettiin seuraavat tunnuksat:

- Typpikuorma
- Fosforikuorma
- Puuston hiilivarasto
- Metsämaan hiilivarasto
- Nettotulojen nykyarvo 3 prosentin korkokannoilla

3 Simulointitulosten vieminen Silvan metsälaskuriin

Metsään.fi avoimesti saatavilla oleva metsädata ja tämän hankkeen tuottamat mallinnustulokset tallennettiin Avoin Map tietokantaan. Silvan metsälaskuri verkkosivu hakee Avoin Map tietokannasta kiinteistötunnuksen perusteella kaksi simulointitulosta: tasaikäinen kasvatus ja jatkuva kasvatus. Laskuri esittää arviot metsänhoitomuotojen vaikutuksista vesistöjen ravinnekuormiin, nettotulojen nykyarvoon sekä puuston ja metsämaan hiilivarastoihin viidelle kymmenvuotiskaudelle.

Lähteet

Finér, L., Mattsson, T., Joensuu, S., Koivusalo, H., Laurén, A., Makkonen, T., Nieminen, M., Tattari, S., Ahti, E., Kortelainen, P., Koskiahio, J., Leinonen, A., Nevalainen, R., Piirainen, S., Saarelainen, J., Sarkkola, S., Vuollecokski, M. 2010. Metsäisten valuma-alueiden vesistökuormituksen laskenta. Suomen ympäristö 10/2010. 33 p.

Haapanen, M., Kenttämies, K., Porvari, P., Sallantaus, T. 2006. Kivennäismaan uudistushakkuun vaikutus kasvinravinteiden ja orgaanien aineen huuhtoutumiseen; raportti Kurussa ja Janakkalassa sijaitsevien tutkimusalueiden tuloksista. Teoksessa: Kenttämies, K., Mattsson, T. (toim.). Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti. s. 43-62.

Hökkä H, Kojola S (2001) Kunnostusojituksen kasvureaktioon vaikuttavat tekijät. Kirjassa: Hiltunen I., Kaunisto S. (toim.). Suometsien kasvatuksen ja käytön teemapäivät. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja - 832, s 30–36.

Hökkä H, Kojola S (2003) Suometsien kunnostusojitus – kasvureaktion tutkiminen ja kuvaus. Kirjassa: Jortikka S, Varmola M, Tapaninen S (toim.) Soilla ja kankailla – metsien hoitoa ja kasvatusta Pohjois-Suomessa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 903, s 13–20.

Heinonen, T., Pukkala, T., Asikainen, A., & Peltola, H. 2018. Scenario analyses on the effects of fertilization, improved regeneration material, and ditch network maintenance on timber production of Finnish forests. European Journal of Forest Research, 137(1), 93-107.

Hökkä, H., Stenberg, L., Laurén, A. 2020. Modelling depth of drainage ditches in forested peatlands of Finland. Baltic Forestry 26(2): article id 453. <https://doi.org/10.46490/BF453>.

- Kaila, A., Laurén, A., Sarkkola, S., Koivusalo, H., Ukonmaanaho, L., Xiao, L., Asam, Z., O'Driscoll, C., Nieminen, M. 2015. The effect of clear-felling and harvest residue removal on nitrogen and phosphorus export from drained Norway spruce mires in southern Finland. *Boreal Environment Research* 20, 693-706.
- Kaila, A., Sarkkola, S., Laurén, A., Ukonmaanaho, L., Koivusalo, H., Xiao, L., O'Driscoll, C., Asam, Z., Tervahauta, A., Nieminen, M. 2014. Phosphorus export from drained Scots pine mires after clear-felling and bioenergy harvesting. *Forest Ecology and Management* 325: 99-107.
- Korhonen, K.T., Ihalainen, A., Viiri, H., Heikkinen, J., Henttonen, H.M., Hotanen, J.-P., et al. 2013 Suomen metsät 2004–2008 ja niiden kehitys 1921–2008 (Finnish forests 2004–2008 and their development in 1921–2008). *Metsätieteen aikakauskirja* 3, 269–608
- Laurén, A., Palviainen, M., Launiainen, S., Leppä, K., Stenberg, L., Urzainki, I., Nieminen, M., Laiho, R., & Hökkä, H. (2021). Drainage and stand growth response in peatland forests - Description, testing, and application of mechanistic peatland simulator SUSI. *Forests* 12, 293. 23 p.
<https://doi.org/10.3390/f12030293>
- Mattsson, T., Ahtiainen, M., Kenttämies, K., Haapanen, M. 2006a. Avohakkuun ja ojituksen pitkäaikaisvaikutukset valuma-alueen ravinne- ja kiintoainehuuhtoumiin. Teoksessa: Kenttämies, K., Mattsson, T. (toim.). *Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti*. s. 73-81.
- Mattsson, T., Finér, L., Kenttämies, K., Ahtiainen, M., Haapanen, M., Lepistö, A. 2006b. Avohakkuun vaikutus fosforin, typen ja kiintoaineen huuhtoumiin; raportti VALU-tutkimushankkeen ja Siuntion Rudbäckenin alueiden tutkimuksista. Teoksessa: Kenttämies, K., Mattsson, T. (toim.). *Metsätalouden vesistökuormitus. MESUVE-projektin loppuraportti*. s. 63-70.
- Nieminen, M. 2004. Export of dissolved organic carbon, nitrogen and phosphorus following clear-cutting of three Norway spruce forests growing on drained peatlands in southern Finland. *Silva Fennica* 38: 123-132.
- Nieminen, M., Hasselquist, E. M., Mosquera, V., Ukonmaanaho, L., Sallantausta, T., Sarkkola, S. 2022a. Post-drainage stand growth and peat mineralization impair water quality from forested peatlands. Submitted to *Journal of Environmental Quality*.
- Nieminen, M., Stenberg, L., Leppä, K., Sarkkola, S. 2022b. Effect of partial harvesting on exports of dissolved organic carbon and nutrients from drained Scots pine mires. Valmisteilla oleva käsikirjoitus *Boreal Environment Research* -sarjaan.
- Rodgers, M., O'Connor, M., Healy, M. G., O'Driscoll, C., Asam, Z.-u-Z., Nieminen, M., Poole, R., Muller, M., Xiao, L. 2010. Phosphorus release from forest harvesting on an upland blanket peat catchment. *Forest Ecology and Management* 260(12), 2241-2248.
- Ojanen, P., & Minkkinen, K. 2019. The dependence of net soil CO₂ emissions on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. *Mires and Peat*.
- Pukkala, T. 2011. Optimizing forest management in Finland with carbon subsidies and taxes. *Forest Policy and Economics*, 13(6), 425-434.
- Pukkala, T., Vauhkonen, J., Korhonen, K. T., & Packalen, T. 2021. Self-learning growth simulator for modelling forest stand dynamics in changing conditions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94(3), 333-346.
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Koivusalo, H., Nieminen, M., Ahti, E., Päivänen, J., Laine, J. 2010. Role of tree stand evapotranspiration in maintaining satisfactory drainage conditions in drained peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 1485-1496. <https://doi.org/10.1139/X10-084>

Äijälä, O. (2014). Hyvän metsänhoidon suositukset: Metsänhoito. Julkaisija: Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Metsäkustannus.