

Jukka Matero

Kustannustehokkaita menetelmiä metsätalouden vesistökuormituksen vähentämiseen

Seloste artikkelista: Matero, J. 2004. Cost-effective measures for diffuse load abatement in forestry. *Silva Fennica* 38(3): 333–345.

Metsätaloustoimien aiheuttamia erilaisia muutoksia vesistöjen tilassa on Suomessa pidetty varsin merkittävänä metsätalouden ympäristövaikutuksena. Vesistöjen pistekuormituksen sääntelyn tiukentuessa kustannustehokkuus edellyttää samanaikaisesti myös metsätalouden aiheuttaman hajakuormituksen sääntelyä.

Metsätalouden vesistökuormitusta voidaan periaatteessa vähentää monella eri tavalla yhdistämällä erilaiset vesistöjen rannoille jätettävien suojavyöhykkeiden käsittelyrajoitteet kunnostusojitusalueille rakennettaviin laskeutusaltaisiin ja/tai (mahdollisesti ennallistettaviin) pintavalutuskenttiin. Ongelmana onkin hakkuiden ja niihin liittyvien metsänuudistustoimenpiteiden sekä muiden metsänparannustoimien toteuttaminen siten, että vesiensuojelutavoitteet saavutetaan minimikustannuksin.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin ensin analyytisesti kahden periodin hakkuumallia soveltaen metsänomistajan ja yhteiskunnan kannalta optimaalisen metsien käsittelyn suhdetta. Metsänomistajan oletettiin valitsevan ravinnehuuhtoumia aiheuttavien hakkuiden ja niihin liittyvien metsänuudistamistoimien määrän sekä aiemmin ojitettujen turvemaiden kunnostusojitusintensiteetin siten, että puunmyyntivoittojen nykyarvo maksimoituu. Yhteiskunnallisessa päätösongelmassa malliin lisättiin ennalta asetettu vesistöjen enimmäiskuormitusrajoite ja mahdollisuus jättää hakkaamaton suojavyöhyke

rannalle. Puuston kasvun oletettiin riippuvan puuston tilavuudesta ja kunnostusojitusintensiteetistä ja vesistöjen ravinnekuormituksen vastaavasti hakkuupinta-alasta, suojavyöhykkeen laajuudesta sekä kunnostusojitusintensiteetistä. Optimiehtojen vertailun perusteella kustannustehokas ravinnekuormituksen vähentäminen edellyttää suojavyöhykkeiden perustamista ja nykyisten (uudistus)hakkuiden vähentämistä sekä mahdollisen kunnostusojituksen intensiteetin alentamista. Mallin komparatiivisen statiikan mukaan kuormitusrajoitteen tiukentaminen edellyttää nykyisten hakkuiden vähentämistä ja suojavyöhykkeen laajentamista, kun taas vaikutusta kunnostusojitusintensiteettiin ei voida yksiselitteisesti määrittää.

Numeerisissa simulointilaskelmissa pyrittiin yhdistämään empiirinen tietämys vaihtoehtoisten kuormituksen vähentämiskeinojen vaikutuksista puuntuotantoon ja vesistöjen kokonaisfosforikuormitukseen. Etelä-Suomea (11,47 milj. ha metsämaata) edustavalla metsäalueella oletettiin olevan yhtä metsämaahehtaaria kohden 0,298 ha aiemmin ojitettua turvemaata ja 11 metriä rantaviivaa. Metsänomistajan optimissa 3 % reaalikorolla metsämaahehtaaria kohden ennustetut nykyarvot tuleville nettokantorahatuloille (ennen veroja) ja kokonaisfosforihuuhtoumille olivat 3 568 euroa ja 1,0 kg. Kokonaisfosforihuuhtoumien ennuste vastaa tasaisesti toistuvaa 0,03 kg:n vuosihuhtoumaa. Kertaalleen 25 vuoden aikana toteutetun aiemmin ojitettujen turvemaiden kunnostusojituksen osuus tulevien nettokantorahatulojen nykyarvosta oli tällöin 0,9 % ja kokonaisfosforikuormituksesta vastaavasti 33 %.

Laskelmien perusteella Etelä-Suomen metsätaloustoimien kokonaisfosforihuuhtoumasta huomattava osa voidaan ehkäistä varsin pienillä kustannuksilla. Kuormituksen torjunta kannattaa aloittaa rajoittamalla hakkuita ja maanmuokkausta kapeilla metsärantojen suojavyöhykkeillä. Mikäli metsätalouden kokonaisfosforikuormitustavoitetta edelleen tiukennetaan, kannattaa luopua myös osasta kunnostus-

ojitushankkeita ja mahdollisesti leventää rantojen suojavyöhykkeitä. Kunnostusojituksen yhteydessä kaivettavien lietekuoppien ja laskeutusaltaiden tai vaihtoehtoisesti (ilman ennallistamistoimia) jätettävien perkaamattomien suojavyöhykkeiden kustannustehokkuus arvioitiin muihin kokonaisfosforikuormituksen vähentämiskeinoihin verrattuna heikoksi.

Tuloksiin on kuitenkin suhtauduttava varauksellisesti laskelmiin sisältyvien monien, varsin karkeiden oletusten ja laskelmissa huomiotta jätetyn ilmeisen suuren aluekohtaisen vaihtelun takia. Jatko-tutkimuksissa tulisikin huomiota kiinnittää siihen, miten seuraavat tekijät vaikuttavat vesistökuormituksen vähentämiskeinojen valintaan metsätaloudessa: metsänomistajien erityisesti ranta-alueisiin kohdistuvat ei-puuntuotannolliset arvostukset, rantojen suojavyöhykerajoitusten vaikutukset metsien monimuotoisuuteen sekä aluekohtaisen vaihtelun ja jakaumavaikutusten huomioon ottaminen. Samalla pitäisi tarkentaa arvioita osin kiintoaineeseen sitoutuneen kokonaisfosforihuuhtouman merkityksestä vesistöjen tilaa muuttavien tekijöiden kokonaisuudessa ja ottaa huomioon mahdolliset uudet haittojen torjuntakeinot erityisesti kunnostusojituksen yhteydessä.

■ MMT Jukka Matero, Joensuun yliopisto. Sähköposti jukka.matero@joensuu.fi

Markku Larjavaara, Timo Kuuluvainen, Heidi Tanskanen ja Ari Venäläinen

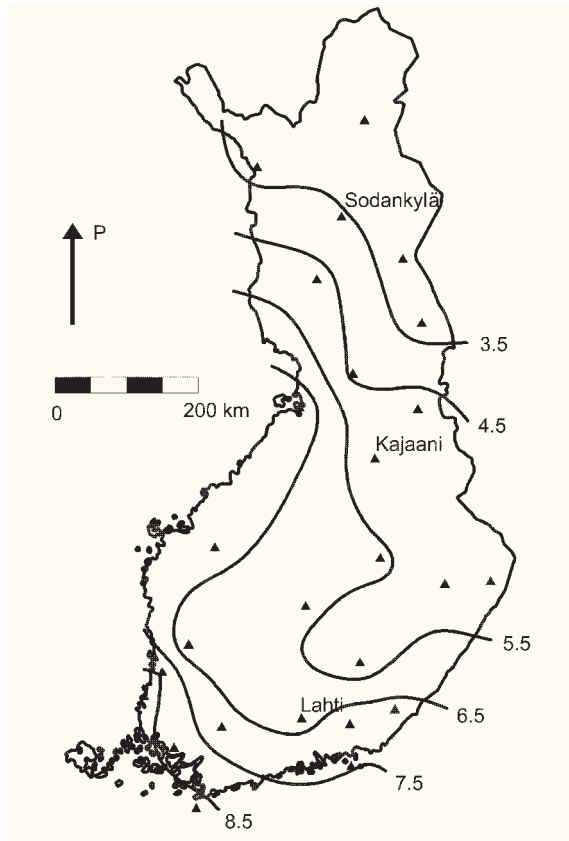
Metsäpalon syttymistodennäköisyyden ilmastosta johtuva vaihtelu

Seloste artikkelista: Larjavaara, M., Kuuluvainen, T., Tanskanen, H. & Venäläinen, A. 2004. Variation in forest fire ignition probability in Finland. *Silva Fennica* 38(3): 253–266.

Sää ja ilmasto vaikuttavat merkittävästi metsäpalojen syttymiseen ja käyttäytymiseen. Salamointia ja tuulen vaikutusta suurempi merkitys metsäpalojen esiintymiseen Suomessa on palavan aineksen kosteudella. Mikäli palavan aineksen kosteuden vaikutus metsäpaloihin on epälineaarinen, seuraa kosteuden keskiarvon käytöstä harhaan johtavia johtopäätöksiä. Tästä syystä tarkasteltaessa palavan aineksen kosteuden vaihtelua on se hyvä ensin liittää muuttajaan joka kuvaa metsäpalon syttymistä tai käyttäytymistä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ilmastosta johtuva metsäpalon syttymistodennäköisyyden ajallinen ja paikallinen vaihtelu Suomessa.

Metsämaan päällimmäisen 30 mm kerroksen kosteus arvioitiin 26 sääaseman vuosien 1961 ja 1997 välisten havaintojen ja Ilmatieteen laitoksen metsäpaloindeksimallin perusteella. Arviot kosteuksista muunnettiin syttymistodennäköisyyksiksi hyödyntäen Lahden lähellä Lammilla tehtyjen sytytyskokeiden perusteella saatua metsämaan kosteuden ja syttymistodennäköisyyden välistä epälineaarista riippuvuutta. Sytytyskokeissa palava tulitikku asetettiin havumetsän pohjakerroksen päälle ja palavan aineksen syttymistä arvioitiin ennen sammutusta.

Keskimääräinen vuotuinen syttymistodennäköisyys vaihteli Kajaanissa 37 vuoden aikana 1,4 % ja 9,9 % välillä. Etelä- ja Pohjois-Suomessa keskimääräinen syttymistodennäköisyys oli ennen kesäkuun puoliväliä täysin toisistaan poikkeava, mutta sen jälkeen lähes samansuuruinen. Syttymistodennäköisyys nousi Lahdessa jyrkästi huhtikuun lopusta ja toukokuun alusta, ja oli toukokuun lopussa ja kesäkuun alusta yli 20 %. Kesäkuun lopussa alka-



Kuva 1. Keskimääräisen vuotuisen syttymistodennäköisyyden (%) vaihtelu Suomessa perustuen 26 sääaseman (musta kolmio) havaintoihin.

nut tasainen syttymistodennäköisyyden lasku loppui syyskuun alussa todennäköisyyden laskettua lähelle nollaa. Sodankylässä syttymistodennäköisyys nousi merkittävästi vasta toukokuun lopussa ja saavutti huippunsa kesäkuun lopussa. Lähinnä pohjoisen kosteasta toukokuusta johtuen keskimääräinen vuotuinen syttymistodennäköisyys on etelässä jopa kolme kertaa pohjoista suurempi (kuva 1). Myös Itämeren läheisyydellä oli syttymistodennäköisyyttä suurentava vaikutus (kuva 1).

Metsän palavan aineksen kosteuden lisääntymisen ja siitä aiheutuvan syttymistodennäköisyyden pienenemisen lisäksi myös sytyttäjiä, eli salamoiden ja ihmisten, vaikutus on vähentynyt pohjoista kohti ja siten vähentänyt metsäpalojen esiintymistä pohjoisessa. On siis selvää että ennen tehokasta palontorjuntaa metsäpalot ovat olleet selvästi harvinaisempia

pohjoisessa kuin etelässä. Mikäli historiallista tai luontaista metsäpalodynamiikkaa pyritään jäljittelemään hakkuilla tai muuten metsänkäsittelyssä, tulisi tämä Suomen sisäinen vaihtelu ottaa huomioon.

■ MMM Markku Larjavaara, MMT Timo Kuuluvainen, MMM Heidi Tanskanen, Helsingin yliopisto, Metsäekologian laitos; FT Ari Venäläinen, Ilmatieteen laitos.
Sähköposti markku.larjavaara@helsinki.fi

Tero Heinonen ja Timo Pukkala

Yksi- ja kaksi-naapuriston käyttö heuristisessa spatiaalisessa optimoinnissa

Seloste artikkelista: Heinonen, T. & Pukkala, T. 2004. A comparison of one- and two-compartment neighbourhoods in heuristic search with spatial forest management goals. *Silva Fennica* 38(3): 319–332.

Spatiaaliset rajoitteet ja tavoitteet metsäsuunnittelussa ovat johtaneet heurististen optimointitekniikoiden käyttöön. Yksi tärkeä heurististen tekniikoiden ryhmä ovat paikallisen parannuksen menetelmät. Paikallisen parannuksen menetelmissä tuotetaan satunnainen alkuratkaisu, jota muutetaan vähittäin pyrkien maksimoimaan ongelmanmäärittelyssä annettua tavoitefunktiota. Paikallisen parannuksen menetelmät perustuvat tietyllä hetkellä voimassa olevan ratkaisun naapuriratkaisujen tutkimiseen. Naapuriratkaisuja ovat kaikki ratkaisut, joihin päästään yhdellä siirrolla. Perinteisesti metsäsuunnittelussa on käytetty 1-naapuristoja, joissa siirto tarkoittaa yhden kuvion käsittelyn muuttamista. Tutkimuksen tavoitteena oli testata, parantaako kahden kuvion käsittelyn yhtäaikainen muuttaminen (2-naapuristo) heurististen tekniikoiden suorituskykyä spatiaalisessa optimoinnissa. Optimointitekniikkoina käytettiin satunnaisnousua (*Random Ascent*), Heroa (*Hero*), simuloitua jäähdystä (simuloitua mellotusta) (*Simulated Annealing*) ja Tabu-hakua (*Tabu Search*).

Tekniikoita ja naapuristoja testattiin viidellä eri suunnittelualueella, joista neljä sijaitsi Vaivion alueella Pohjois-Karjalassa ja yksi oli ns. synteettinen metsä. Alueella yksi oli 736 metsikkökuvioita, alueella kaksi 677, alueella kolme 608 ja alueella seitsemän 803. Synteettisen metsän koko oli $3 \times 3 \text{ km}^2$ eli 900 ha, ja se koostui 900 hehtaarin kokoisesta neliön muotoisesta kuvioista, joiden yhden sivun pituus oli 100 metriä.

Optimoinnit tehtiin Monsu-metsäohjelmistolla. Käsittelyvaihtoehtoja alueen yksi kuvioille tuotettiin yhteensä 3 568 kpl, alueelle kaksi 2 986 kpl, alueelle kolme 3 228 kpl, alueelle seitsemän 4 274 kpl ja synteettiselle metsälle 4 773 kpl. Tutkimuksessa käytetty tavoitefunktio oli additiivinen hyötyfunktio, joka sisälsi kolme tavoitetta. Tavoitteita olivat tasaiset nettotulot kolmen kaksikymmenvuotisjakson aikana, puuston lopputilavuus 60-vuotiskauden lopussa ja leimikkokeskitykset 60-vuotiskauden lopussa. Tavoitteiden painot ja tavoitetasot asetettiin siten, että tasaisten nettotulojen ja lopputilavuuden tavoitetasot täyttyivät kaikilla alueilla ja kaikilla tekniikoilla, jolloin eroja syntyi ainoastaan spatiaaliseen tavoitteeseen. Leimikkokeskityksen astetta mitattiin laskemalla samalla kaudella hakattujen vierekkäin sijaitsevien metsikkökuvioiden yhteisen rajan osuus koko alueen kuvionrajan pituudesta.

Optimointi 2-naapuristolla tuotti parempia hyötyfunktion arvoja kaikilla alueilla ja tekniikoilla. 1-naapuristolla simuloitu jäähditys ja Tabu-haku löysivät selkeästi parempia ratkaisuja kuin muut tekniikat, mutta käytettäessä 2-naapuristoa menetelmien väliset erot tasoittuivat. Erityisesti satunnaisuudella ja Herolla 2-naapuristo tuotti selkeästi parempia hyötyfunktion arvoja kuin 1-naapuristo. Simuloidulla jäähdytyksellä ja Tabu-haulla parannus oli pienempi. Käytettäessä 2-naapuristoa simuloitu jäähditys saavutti spatiaalisen tavoitteen parhaiten neljällä alueella ja Tabu-haku yhdellä.

Hyötyfunktion arvo kehittyi optimoinnin alussa nopeammin 1-naapuristolla, mutta lopulta 2-naapuriston käyttö johti kuitenkin parempiin hyötyfunktion arvoihin kaikissa tapauksissa. Tämän pääteltiin johtuvan siitä, että kun tilavuus- ja tulotavoitteet oli saavutettu, voitiin hyötyä kasvattaa enää keskittämällä hakkuita. Koska 2-naapuristolla tämä voitiin tehdä kuvioiden välisin ”vaihtokaupoin” juurikaan muuttamatta tilavuus- ja tulotavoitteita, optimointi kykeni järjestelemään hakkuiden sijaintia vielä pitkään sen jälkeenkin, kun 1-naapuristolla oli juututtu paikoilleen.

■ MMM Tero Heinonen & Prof. Timo Pukkala, Joensuun yliopisto. Sähköposti timo.pukkala@joensuu.fi