

Metsäojitettujen soiden kasvihuonekaasupäästöistä

Paavo Ojanen, Helsingin yliopisto, metsätieteiden osasto (paavo.ojanen@helsinki.fi)

19.8.2019

Ojittamaton suo

Ojittamattomat suot kerryttävät turvetta, jonka kuivamassasta noin puolet on hiiltä (Turunen ym. 2002). Näin ne poistavat pysyvästi hiilidioksidia (CO₂) ilmakehästä ja viilentävät ilmastoa. Suo on siis hiilidioksidin nielu. Turvetta kertyy, koska maaperän hapettomat olot estävät orgaanisen aineen täydellisen hajoamisen. Suolla maahan päätyvästä orgaanisen aineksen, kuolleiden kasvien ja kasvinosien, massasta noin 10 % jää hajoamatta ja muodostaa turvetta. Maaperän hapettomuuden takia ojittamattoman suon hajotustoiminnassa syntyy metaania (CH₄). Vaikka osa metaanista hajoaa suon hapellisessa pintakerroksessa ja sammalkeroksessa, ojittamaton suo on merkittävä metaanin lähde ilmakehään (Minkkinen & Ojanen 2013, taulukko 2). Suon metaanipäästö lämmittää ilmakehää. Metaanipäästön takia suo lämmittää ilmakehää kehityksensä alussa. Koska metaani kuitenkin hajoaa nopeasti ilmakehässä, tämä lämmittävä vaikutus tasaantuu muutamassa kymmenessä vuodessa. Vähitellen, satojen tai tuhansien vuosien kuluessa, turvetta kertyy suohon niin paljon, että hiilidioksidinielun viilentävä vaikutus kasvaa metaanilähteen lämmittävää vaikutusta suuremmaksi. Tuhansia vuosia vanha suo on siten kehityksensä aikana merkittävästi viilentänyt ilmastoa (Frolking ym. 2006, Frolking & Roulet 2007, Mathijssen ym. 2014, 2017).

Ojituksen ilmastovaikutukset

Suon ojituksella on sekä ilmastoa viilentäviä että lämmittäviä vaikutuksia: Ojitus syventää vedenpintaa, jolloin suon hapellinen pintakerros syvenee. Tämä vähentää metaanin syntymistä ja lisää sen hajoamista. Siten ojitus pienentää suon metaanipäästöä tai suo muuttuu jopa pieneksi metaanin nieluksi (Ojanen ym. 2010). Ojat ovat kuitenkin merkittäviä metaanin lähteitä (Minkkinen ym. 2018, Minkkinen & Laine 2006), minkä takia metsäojitettu suo on parhaimmillaankin metaanineutraali. Metsäojitetulla suolla ojitus lisää puuston kasvua, ja kasvava puusto on hiilidioksidin nielu (Minkkinen ym. 2001). Hapellisen kerroksen syveneminen kuitenkin lisää turpeen hajotusta, jolloin suo alkaa turpeen kerryttämisen sijaan menettää turvetta (Hiraishi ym. 2014). Tällöin suon maaperä muuttuu hiilidioksidin lähteeksi. Koska turpeessa on runsaasti typpeä, turpeen hajotessa vapautuu myös voimakasta kasvihuonekaasua typpioksiduulia (N₂O) (Ojanen ym. 2010, 2018, Maljanen ym. 2003b).

Ensimmäisen ojituksen jälkeisen kiertoajan metsäojituksen vaikutus on yleensä ilmastoa viilentävä, koska vähentynyt metaanipäästö ja kasvavan puuston hiilidioksidinielu viilentävät ilmastoa enemmän kuin turpeen hajoamisesta syntyvät hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästö lämmittävät (Minkkinen ym. 2002, Lohila ym. 2010, Ojanen ym. 2013, Uri ym. 2017, Minkkinen ym. 2018, Hommeltenberg ym. 2014). Puustoon sitoutuneesta hiilestä suurin osa kuitenkin vapautuu muutamassa vuodessa päätehakkuun jälkeen hiilidioksidina takaisin ilmakehään. Niinpä, jos turvetta hajoaa vähitellen paksu kerros, metsäojituksen vaikutus on väijäämättä ilmastoa lämmittävä turpeesta syntyvien hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöjen takia. Puuston hiilivarasto voi korvata vain ohuen turvekerroksen hiilivaraston: 10 cm turvekerroksessa on yhtä paljon hiiltä kuin 100 m³/ha puustobiomassassa. Muutaman vuosikymmenen aikaskaalassa metsäojitetun suon ilmastovaikutusta voidaan parantaa edistämällä puuston kasvua tai vähentämällä hakkuita kuten kivennäismaillakin. Pitemmällä aikavälillä turpeen hajoamisen vähentäminen tai estäminen on kuitenkin keskeisin keino parantaa metsäojitetun suon ilmastovaikutusta.

Säteily- ja vesitase sekä haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Kasvihuonekaasujen aiheuttaman maailmanlaajuisen kasvihuoneilmion lisäksi metsäojituksella on ilmastoon myös muita vaikutuksia, jotka ovat luonteeltaan paikallisia tai alueellisia.

Märän suon vaihtuessa kuivaksi metsäksi säteily- ja vesitase muuttuvat (Lohila ym. 2010, Gao ym. 2014). Metsä pidättää auringosta saapuvaa säteilyä erityisesti keväisin paremmin kuin avoin suo (ojitus pienentää albedoa). Kun puiden latvukset ovat jo lumesta paljaat, lumen peittämä suon pinta vielä heijastaa tehokkaasti auringon säteilyä. Tämä albedon pieneneminen on aiheuttanut lumipeitteen sulamisen aikaistumisen (viisi päivää) ja huhtikuun lämpötilojen nousun (+0,5 °C) Pohjanmaalla, missä metsäojitettujen soiden osuus pinta-alasta on erityisen suuri (Gao ym. 2014). Lämmittävä vaikutus on samaa kokoluokkaa kuin puuston hiilinielun kasvamisen viilentävä vaikutus (Lohila ym. 2010). Kesällä taas lämpötilat jäävät hivenen (-0,1 °C) alhaisemmiksi, koska metsät haihduttavat soita enemmän vettä, mikä kuluttaa energiaa ja siten viilentää ilmaa (Gao ym. 2014).

Kasvit ja maaperä myös päästävät ilmakehään haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC = volatile organic compounds) (Mäki 2019). Ilmakehässä niistä syntyy aerosolihiukkasia (pieniä, ilmassa leijailtavia kiinteitä hiukkasia), jotka edistävät pilvien muodostumista toimimalla vesihöyryn tiivistymisytiminä. Pilvet viilentävät ilmastoa. Metsien osalta on näyttöä siitä, että tällä on merkittävä vaikutus (Teuling ym. 2017, Tunved ym. 2006). Ojittamattomat suot eroavat metsistä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden määrässä ja laadussa (Faubert ym. 2010a, b, Hanson ym. 1999, Hellén ym. 2006, Tiiva ym. 2007), mutta metsäojitettujen soiden päästöistä ei ole mittaustietoa. Vaatisi lisää mittauksia ja ilmakehän toiminnan mallinnusta, jotta metsäojituksen vaikutusta haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöihin ja sitä kautta ilmastoon voisi arvioida.

Tässä kirjoitelmassa keskitytään kasvihuonekaasuihin, koska albedomuutoksia lukuun ottamatta muista ilmastovaikutuksista ei käytännössä ole kvantitatiivista tietoa saatavilla.

Ojitettujen soiden merkitys ilmastolle Suomessa ja maailmalla

Maailmanlaajuisesti kasvihuonekaasupäästöt ojitettujen soiden turpeen hajoamisesta ovat erittäin suuret, 1–2 Gt CO₂-ekvivalenttia vuodessa, vaikka ojitettujen soiden pinta-ala on vain 30–50 miljoonaa hehtaaria (Joosten 2010, Ojanen ja Minkkinen käsikirjoitus a). Vertailun vuoksi kaikkien maankäytön, maankäytön muutoksen ja metsätalouden päästöjen arvioidaan olevan 4 Gt CO₂-ekvivalenttia vuodessa (Olivier ym. 2017). Suomessa turpeen hävikkiin liittyvät päästöt (maaperän päästöt metsäojitetuilta soilta, turvemaan pelloilta ja turvetuotantoalueilta) ovat virallisen raportoinnin mukaan 18 Mt CO₂-ekvivalenttia vuodessa (metsäojitettujen soiden osuus 8 Mt), mikä vastaa noin kolmannesta Suomen kasvihuonekaasupäästöjä ilman maankäyttöä, maankäytön muutosta ja metsätaloutta (Tilastokeskus 2019).

Ojitettujen soiden päästöt ovat sekä maailmanlaajuisesti että Suomessa niin merkittävät, että niitä on ilmastomuutoksen torjumiseksi vähennettävä radikaalisti. Maailman soiden turpeen hiilivarasto on samaa kokoluokkaa kuin ilmakehän tämänhetkinen CO₂-hiilen määrä (Page ym. 2011). Ilmastomuutoksen torjuminen on erittäin vaikeaa, jos merkittävä osa turpeen hiilivarastosta päätty ilmakehään. Turvemaiden käyttöön kohdistuu jatkossa väistämättä suurta painetta sääntelyn ja kansainvälisten sopimusten kautta. Suomi on soiden ojituksen suurvalta, joten saamme varmasti asiassa huomiota osaksemme.

Metsäojitetun suon maaperän kasvihuonekaasupäästöt

Metsäojitetun suon maaperän kasvihuonekaasupäästöt kasvuvaiheessa olevassa metsässä tunnetaan hyvin (Ojanen ym. 2010, 2013, 2019, Minkkinen ym. 1998, 1999, 2018, Simola ym. 2012, Korkiakoski ym. 2018, Uri ym. 2017). Niihin vaikuttaa voimakkaasti kaksi asiaa: kasvupaikan ravinteikkaus ja vedenpinnan syvyys. Ravinteikkaimmilla kasvupaikoilla (ruoho- ja mustikkaturvekankaat) on havaittu merkittävää turpeen hävikkiä ja siitä syntyviä CO₂- ja N₂O-päästöjä. Näitä karummilla kasvupaikoilla (puolukka-, varpu- ja jäkäläturvekankaat) ei ole havaittu merkittävää turpeen hävikkiä: maaperä voi olla maltillisella ojituksella jopa CO₂-neutraali ja N₂O-päästö on ojittamattoman suon tasolla. Sekä ravinteikkailta että karuilla kasvupaikoilla CO₂-päästö riippuu lineaarisesti vedenpinnan syvyydestä: Mitä syvemmällä vedenpinta on, sitä suurempi on päästö rehevillä paikoilla. Karutkin kasvupaikat muuttuvat päästölähteiksi, kun vedenpinta lasketaan tarpeeksi syvälle (yli 40 cm syvyydelle, Ojanen ja Minkkinen käsikirjoitus b). N₂O-päästöillä ei ole havaittu riippuvuutta vedenpinnan syvyydestä (Minkkinen ym. käsikirjoitus). Ravinteikkaiden kasvupaikkojen CO₂-päästön on myös havaittu olevan suurempi Etelä- kuin Pohjois-Suomessa (Ojanen ym. 2013). Syynä lienee se, että lämpimämpi ilmasto sekä kiihdyttää hajotusta sekä suoraan että epäsuorasti pitämällä vedenpinnan alempana.

Kun vedenpinta on vähintään 20 cm syvyydellä eikä suokasvillisuutta esiinny, metsäojitettu suo on ojat huomioon ottaen ei ole metaanin lähde eikä nielu (Ojanen ym. 2010, Minkkinen ym. 2018). Tällainen tilanne on sellaisilla hyvin metsää kasvaville ruoho-, mustikka- ja puolukkaturvekankailla, joilla ojitus on teknisesti onnistunut (ovat luokituksessa turvekangasasteella). Tällaisilla paikoilla vedenpinnan laskeminen entistä syvemmälle ei enää vaikuta metaanin taseeseen. Teknisesti huonosti onnistuneilla ojituksilla vedenpinta voi olla korkealla ja suokasvillisuutta esiintyä edellä mainituilla kasvupaikoilla (jääneet ojikko- tai muuttuma-asteelle). Tällöin metaanipäästö on kuivimpien luonnontilaisten soiden tasoa (Ojanen ym. 2010). Karuimmilla kasvupaikoilla (varpu- ja erityisesti jäkäläturvekankaat) teknisesti onnistunut ojitukseen ei aina kuivata suota tehokkaasti veden hitaan liikkeen ja puuston vähäisen haihdutuksen takia, jolloin päästö on kuivimpien luonnontilaisten soiden tasolla (Ojanen ym. 2010, Heikkinen ym. 2016).

Metsäojitetun suon maaperän päästöt voidaan minimoida pitämällä vedenpinta niin korkealla, kuin se puuston kasvatuksen kannalta on mahdollista: CO₂-päästö on sitä pienempi, mitä korkeammalla vedenpinta on. CH₄-päästö alkaa kasvaa merkittävästi vasta sellaisissa oloissa, jotka ovat tavanomaisen metsänkasvatuksen kannalta liian märkiä. Koska juuri CO₂-päästö aiheuttaa suurimman osan metsäojitetun suon ilmastoa lämmittävästä vaikutuksesta (Ojanen ym. 2013), sen vähentäminen on avainasemassa.

Metsätalouden toimenpiteiden vaikutus

Useimpien metsätalouden toimenpiteiden vaikutuksia maaperän päästöihin on tutkittu melko niukasti eikä täsmällisiä lukuarvoja voida antaa. **Avohakkuu ja metsänuudistaminen** (Pearson ym. 2012, Saari ym. 2009, Korkiakoski ym. 2018, Huttunen ym. 2003, Mäkiranta ym. 2010, 2012) aiheuttavat päästöjä maaperästä: N₂O-päästö lisääntyy sekä maaperästä että hakkuutähdeksaasta. Tämä johtunee siitä, että hakkuun jälkeen tyypeä vapautuu runsaasti hakkuutähteistä ja kuolleesta pintakasvillisuudesta mutta tyyden tarve on vähäistä puuston ja usein pintakasvillisuudenkin puuttuessa. Jos vedenpinta hakkuualalla nousee korkealle tai maanmuokkaus synnyttää märkiä pintoja, syntyy CH₄-päästöjä. Turpeen hajotus vähenee vedenpinnan nousun takia, mutta toisaalta puuston ja pintakasvillisuuden yhteytyminen ja kariketuotos lähes loppuu, joten CO₂-päästö suurenee (Mäkiranta ym. 2010). **Harvennushakkuiden** vaikutuksista ei ole julkaistu tutkimuksia, mutta vaikutukset ovat todennäköisesti vähäisiä verrattuna avohakkuihin: Tyyden tarjonta ja kysyntä ovat paremmin tasapainossa, joten N₂O-päästöä syntyy lähinnä hakkuutähdeksaasta. Vedenpinta nousee yleensä vain vähän, joten CH₄-päästö jäänee vähäiseksi. Maltillinen vedenpinnan nousu vähentänee turpeen hajoamista, joten kariketuotoksen pysyessä kutakuinkin ennallaan CO₂-päästö voi pienentyä.

Kunnostusojituksen välittömistä vaikutuksista ei ole tutkimuksia. N₂O-päästöihin niillä ei liene suurta vaikutusta. Jos ojitus on ollut teknisesti huono, tästä aiheutunut CH₄-päästö vähentynee. Vedenpinnan laskiessa CO₂-päästö toisaalta lisääntyy. Kunnostusojitus on ravinteikkailla soilla erittäin merkittävä toimenpide ilmaston kannalta, koska se ylläpitää kuivatusta ja sitä kautta turpeen hävikkiä. Toistuvien kunnostusojitusten ja jatkuvan turpeen hävikin seurauksena suon pinta ja ojan pohja siirtyvät vähitellen syvemmälle hävittäen turpeen vuosikymmenten ja -satojen kuluessa.

Lannoituksen (puuntuhka tai PK) vaikutuksia on tutkittu melko paljon (Ernfors ym. 2010, Klemedtsson ym. 2010, Maljanen ym. 2006, 2014, Moilanen ym. 2002, 2012, Ojanen ym. 2019, Rütting ym. 2014, Saarsalmi ym. 2014). Lannoitusta seuraavien vuosien aikana ei ole havaittu vaikutuksia maaperän CO₂-, CH₄- tai N₂O-päästöihin. Vuosikymmenten aikaskaalassakaan lannoitus ei lisää N₂O-päästöä; jos CH₄-päästöjä on ollut ennen lannoitusta, ne vähenevät tai loppuvat lisääntyneen puuston laskiessa vedenpintaa. CO₂-päästö lisääntyy, mikä näyttäisi johtuvan lähinnä vedenpinnan laskusta. Kasvavan puuston CO₂-nielu kasvaa kuitenkin maaperän CO₂-päästöä enemmän, joten lannoituksella on päästöjä pienentävä nettovaikutus, kunnes puusto hakataan (Ojanen ym. 2019).

Päästöjen vähentäminen ja tulevaisuuden riskit

Jaksottaisessa metsänkasvatuksessa metsäojitetun suon maaperän kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää tekemällä kunnostusojituksia vain silloin, kun se on puuston kasvulle erityisen tärkeää. Lisäksi ojista ei pidä tehdä syvempiä kuin on välttämätöntä. Näin pystytään pitämään vedenpinta niin korkealla, kuin se on puuston kasvatuksen kannalta mahdollista.

Jatkuvapeitteisessä metsätaloudessa kunnostusojitusten tarve voi olla kiertoaikametsätaloutta vähäisempi ja lisäksi puustopääoma ei nousse yhtä korkeaksi kuin ennen päätehakkuuta. Näin vedenpintaa voitaneen pitää keskimäärin ylempänä kuin kiertoaikametsätaloudessa (koska kunnostusojitus ja runsas puusto alentavat vedenpintaa), mikä vähentää CO₂-päästöä. Lisäksi vältetään avohakkuun ja metsänuudistamisen aikaisilta päästöiltä. Kokonaisen kiertoajan käsittäviä mallinnuksia näillä keinoin saatavista päästövähennyksistä ei ole vielä tehty, joten ei ole mahdollista arvioida kuinka merkittävistä keinoista on kyse.

Karuilla kasvupaikoilla (Ptkg, Vatkg) turpeen hävikki voitaneen hyvin pitkälti estää pitämällä ojitus maltillisena. Näin metsätalous voi parhaassa tapauksessa olla pitkällä aikavälillä ilmastollisesti kestävä. Ravinteikkailla kasvupaikoilla (Rhtkg, Mtkg) vedenpinnan pitäisi kuitenkin olla hyvin lähellä maanpintaa (n. 10 cm syvyydessä, Ojanen ja Minkkinen käsikirjoitus b), jotta turpeen hävikki loppuisi. Niin märässä tavanomainen metsätalous ei liene mahdollista. Niinpä ojitukseen perustuvan metsätalouden jatkaminen väistämättä tarkoittaa turpeen hävikkiä CO₂- ja N₂O-päästöineen.

Metsäojituksella on kaksi merkittävää riskiä ilmastonmuutoksen edetessä: Jos kuivat kesät yleistyvät (Dai, 2013, Jolly ym. 2015), turvepalojen riski kasvaa suureksi. Turvepalot ovat jo nyt yleisiä Suomea mantereisemmissä ilmastoissa Venäjällä ja Kanadassa (Sirin ym. 2018, Turetsky ym. 2004). Mitä korkeammalla vedenpinta on, sitä pienempi palon riski. Ilmaston lämpeneminen myös edistää turpeen hajoamista, koska hajotusprosessi on hyvin voimakkaasti riippuvainen lämpötilasta. Tämän takia ojitettujen soiden turpeen hävikistä aiheutuvat CO₂- ja N₂O-päästöt voivat kasvaa huomattavasti.

Suon ennallistaminen

Turpeen hävikki voidaan estää ja palauttaa suo turvetta kerryttäväksi ennallistamalla suo (Hedberg ym. 2012, Maanavilja ym. 2014, 2015, Kareksela ym. 2015, Haapalehto ym. 2015, Komulainen ym. 1999, Laine ym. 2019,). Metsäojitettu suo ennallistuu hyvin, kunhan ojat tukitaan niin huolellisesti, että vedenpinta nousee ojittamattoman suon tasolle (Aapala ym. 2013). Jo muutamassa vuodessa suokasvillisuus valtaa alaa ja suon kasvihuonekaasutase palautuu ojittamattoman suon kaltaiseksi (Laine ym. 2019, Minkkinen ym. käsikirjoitus, Ojanen ym. julkaisemattomat aineistot). Tämä on pitkällä aikavälillä varmin tapa turvata turpeen hiilivarasto, koska suo on niin märkä kuin ilmaston puolesta mahdollista.

Nopeita ilmastoa viilentäviä vaikutuksia on kuitenkin vaikea saada aikaiseksi (Ojanen ym. käsikirjoitus a), koska suo palautuu CH₄:n lähteeksi (Koskinen ym. 2016, Komulainen ym. 1998, Juottonen ym. 2012, Heikkinen ym. 2016) ja puuston kasvu taantuu tai loppuu kokonaan. Tyypillisesti kestää kymmeniä tai satoja vuosia, ennen kuin ennallistamisen aiheuttamalla muutoksilla kaasunvaihdossa on ilmastoa viilentävä vaikutus (Ojanen ja Minkkinen, käsikirjoitus a). Karuilla, maltillisesti ojitetuilla kasvupaikoilla, joilla ei ole tällä hetkellä huomattavaa turpeen hävikkiä, ennallistamista parempi vaihtoehto sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä on todennäköisesti jättää suo ennallistumaan itseksensä.

Pellonraivaus ja metsitys

Metsäojitettujen soiden raivaamista pelloiksi on ehdottomasti vältettävä. Turvemaan peltojen turpeen hävikki on n. 10 kertaa niin suurta kuin ravinteikkaiden suometsien. Tämä näkyy kymmenkertaisina CO₂-päästöinä (Maljanen ym. 2001b, 2004, Lohila ym. 2004) ja seitsenkertaisina N₂O-päästöinä (Maljanen ym. 2003b, 2004, 2009, Regina ym. 2004). Syy turpeen nopeaan hajoamiseen on se, että peltojen toistuvat kalkitukset ja lannoitukset sekä metsiä tehokkaampi kuivatus parantavat huomattavasti hajottajamikrobien elinoloja. Lisäksi hiilen virta maaperään (kariketuotos) voi olla pienempi kuin metsissä ja viljelykasvien karike helposti hajoavaa havupuiden karikkeeseen verrattuna. Tehokkaasti kuivuneen metsäojitetun suon tapaan turvemaan pellolta ei tule metaanipäästöjä (Maljanen ym. 2003a, 2004, 2010, Regina ym. 2007).

Metsitetyt turvemaan pellot sitovat puustoon hiiltä, minkä takia metsitys vähentää päästöjä. Maanviljelyn aikana suuripäästöiseksi kalkittu, lannoitettu ja kuivatettu turvema ei kuitenkaan muutu saman tien metsäojitetun suon kaltaiseksi puita istuttamalla. Maaperän N₂O-päästöjen on havaittu olevan lähes yhtä suuret kuin peltojen päästöt vielä 20–30 vuotta metsityksen jälkeenkin (Pihlatie ym. 2004, Mäkiranta ym. 2007, Maljanen ym. 2001a, 2012). CO₂-päästöistä on vain vähän tietoa (Lohila ym. 2007, Mäkiranta ym. 2008), mutta todennäköisesti ne ovat suuripäästöisimpien ravinteikkaiden metsäojitettujen soiden tasoa. Metsitys niin, että samalla hallitusti nostetaan vedenpintaa, voisi tehokkaasti vähentää turpeen hajoamista ja sen CO₂-päästöä.

Metsäojitettujen soiden ilmastollisesti kestävä käyttö

Metsäojitettujen soiden ilmastollisesti kestävään käyttöön ei löydy yhtä helppoa ratkaisua. Karuilla kasvupaikoilla metsätalous hyvin maltillisella ojituksella vaikuttaa mahdolliselta ratkaisulta. Tämän ratkaisun huono puoli on se, että sen kansainvälinen markkinoiminen ilmastollisesti kestävästä metsätaloutena voi olla vaikeaa. Boreaalinen karu metsäojitettu suo on poikkeustapaus. Muissa maankäytöissä ja ilmasto-oloissa ojitus aiheuttaa merkittävää turpeen hävikkiä, joten soiden ojitusta pidetään yleisesti (ja aivan oikein) ilmaston kannalta haitallisena toimintana. Jos metsätaloutta karuilla kasvupaikoilla ei pidetä taloudellisesti kannattavana, suo voidaan hyvällä omallatunnolla jättää itseksensä ennallistumaan.

Ravinteikkailla kasvupaikoilla puuston kasvun kannalta riittävä kuivatus (vedenpinta n. 30 cm) ylläpitää turpeen hävikkiä. Siten kuivatuksen ylläpito ja ojien kunnostus on ilmaston kannalta ongelmallista. Hyvin

kasvava ravinteikas suometsä (maaperä ja puusto yhteensä) on kuitenkin yleensä kasvihuonekaasujen nielu tai neutraali (Ojanen ym. 2013), minkä takia välitön suon ennallistaminenkaan ei ole perusteltu tai nopea ratkaisu ilmastonmuutoksen torjumiseksi (Ojanen & Minkkinen käsikirjoitus a). Sekä ilmaston että metsätalouden kannalta toimiva ratkaisu voisi olla jatkaa puuston kasvatusta avohakkuita ja uudistamiskustannuksia välttämällä, niin kauan kuin se nykyisellä ojituksella on mahdollista. Koska tällä hetkellä kelpoisesti toimivien ojien tukkeutuminen kestää vuosikymmeniä, ilman kunnostusojitusta ehdittäneen nyt hyvin kasvavasta suometsästä korjata arvokas tukkisato ennen maaperän liiallista vettymistä. Jos oja ei syvennetä, syvät turvekerrokset pysyvät tallessa.

Lähteet

- Aapala, K., Similä, M. & Penttinen, J. 2013. Ojitettujen soiden ennallistamisopas. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja B 188.
- Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3: 51–58. doi: 10.1038/NCLIMATE1633
- Ernfors, M., Sikström, U., Nilsson, M., Klemetsson, L., 2010. Effects of wood ash fertilization on forest floor greenhouse gas emissions and tree growth in nutrient poor drained peatland forests. *Sci. Tot. Environ.* 408, 4580–4590. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.06.024>.
- Faubert, P., Tiiva, P., Rinnan, A., Räsänen, J., Holopainen, J. K., Holopainen, T., Kyrö E., & Rinnan, R. 2010a. Non-methane biogenic volatile organic compound emissions from a subarctic peatland under enhanced UV-B radiation. *Ecosystems* 13: 860–873
- Faubert, P., Tiiva, P., Rinnan, Å., Rätty, S., Holopainen, J. K., Holopainen, T., & Rinnan, R. 2010b. Effect of vegetation removal and water table drawdown on the nonmethane biogenic volatile organic compound emissions in boreal peatland microcosms. *Atmos. Environ.* 44: 4432–4439.
- Frolking, S., Roulet, N. & Fuglestedt, J. 2006. How northern peatlands influence the Earth's radiative budget: Sustained methane emission versus sustained carbon sequestration. *Journal of Geophysical Research* 111: G01008. doi: 10.1029/2005JG000091
- Frolking, S. & Roulet, N. 2007. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions- *Global Change Biology* 13: 1079–1088. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01339.x
- Gao, Y., Markkanen, T., Backman, L., Henttonen, H. M., Pietikäinen, J.-P., Mäkelä, H. M. and Laaksonen, A. Biogeophysical impacts of peatland forestation on regional climate changes in Finland. *Biogeosciences* 11: 7251–7267. doi: 10.5194/bg-11-7251-2014
- Haapalehto, T., Vasander, H., Jauhiainen, S., Tahvanainen, T. & Kotiaho, J. 2011. The Effects of Peatland Restoration on Water-Table Depth, Elemental Concentrations, and Vegetation: 10 Years of Changes. *Restoration Ecology* 19(5): 587–598.
- Hanson, D. T., Swanson, S., Graham, L. E., & Sharkey, T. D. 1999. Evolutionary significance of isoprene emission from mosses. *Am. J. Bot.* 86: 634–639.
- Hedberg, P., Kotowski, W., Saetre, P., Mälson, K., Rydin, H. & Sundberg, S. 2012. Vegetation recovery after multiple-site experimental fen restorations. *Biological Conservation* 147: 60–67.
- Heikkinen, T., Ojanen, P., Minkkinen, K., Penttilä, T., Haapalehto, T. & Tolvanen, A. 2016. Ennallistamisen vaikutus metsänkasvatuskelvottomien soiden metaanivirtoihin. *Suo* 67(1): 22–26.

- Hellén, H., Hakola, H., Pystynen, K.-H., Rinne, J., & Haapanala, S. 2006. C₂–C₁₀ hydrocarbon emissions from a boreal wetland and forest floor. *Biogeosciences* 3: 167–174.
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, 527 T.G. (eds.) 2014. Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html>
- Hommeltenberg, J., Schmid, H.P., Drösler, M. & Werle, P. 2014. Can a bog drained for 531 forestry be a stronger carbon sink than a natural bog forest? *Biogeosciences* 11: 3477–3493. 532 doi: 10.5194/bg-11-3477-2014
- Huttunen, J., Nykänen, H., Martikainen, P.J. & Nieminen, M. 2003. Fluxes of nitrous oxide and methane from drained peatlands following forest clear-felling in southern Finland. *Plant and Soil* 255: 457–462.
- Jolly, W.M., Cochrane, M., Freeborn, P., Holden, Z., Brown, T., Williamson, G. & Bowman, D. 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications* 6: 7537. doi: 10.1038/ncomms8537
- Joosten, H. 2010. The global peatland CO₂ picture: Peatland status and drainage related emissions in all countries of the world. *Wetlands International*. Available at: www.wetlands.org
- Juottonen, H., Hynninen, A., Nieminen, M., Tuomivirta, T.T., Tuittila, E.-S., Nousiainen, H., Kell, D.K., Yrjälä, K., Tervahauta, A. & Fritze, H. (2012) Methane-cycling microbial communities and methane emission in natural and restored peatlands. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(17), 6386–6389.
- Kareksela, S., Haapalehto, T., Juutinen, R., Matilainen, R., Tahvanainen, T. & Kotiaho, J. Fighting carbon loss of degraded peatlands by jump-starting ecosystem functioning with ecological restoration. *Science of the Total Environment* 537: 268–276.
- Klemedtsson, L., Ernfors, M., Björk, R., Weslien, P., Rütting, T., Grill, P., Sikström, U., 2010. Reduction of greenhouse gas emissions by wood ash application to a *Picea abies* (L.) Karst. forest on a drained organic soil. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 734–744. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01279.x>.
- Korkiakoski, M., Ojanen, P., Minkkinen, K., Penttilä, T., Rainne, J., Laurila, T. & Lohila, A. 2018. The effect of partial harvesting and clearcutting on CO₂, CH₄ and N₂O balances in a drained peatland forest. *Geophysical Research Abstracts* 20: 12014.
- Korkiakoski, M., Tuovinen, J-P., Penttilä, T., Sarkkola, S., Ojanen, P., Minkkinen, K., Rainne, J., Laurila, T. & Lohila, A. 2018. Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clearcutting. *Biogeosciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/bg-2018-473>
- Koskinen, M., Maanavilja, L., Nieminen, M., Minkkinen, K. & Tuittila, A-S. 2016. High methane emissions from restored Norway spruce swamps in southern Finland over one growing season. *Mires and Peat* 17: Article 02. doi: 10.19189/MaP.2015.OMB.202
- Komulainen, V-M., Nykänen, H., Martikainen, P.J. & Laine, J. (1998) Short-term effect of restoration on vegetation change and methane emissions from peatlands drained for forestry in southern Finland. *Canadian Journal of Forest Research*, 28(3), 402–411.
- Komulainen, V-M., Tuittila, E-S., Vasander, H. & Laine, J. (1999) Restoration of drained peatlands in southern Finland: initial effects on vegetation change and CO₂ balance. *Journal of Applied Ecology*, 36(5), 634–648.

- Laine, A., Mehtätalo, L., Tolvanen, A., Frohling, S. & Tuittila, E-S. 2019. Impacts of drainage, restoration and warming on boreal wetland greenhouse gas fluxes. *Science of the Total Environment* 647: 169–181.
- Lohila, A., Aurela, M., Tuovinen, J-P. & Laurila, T. 2004. Annual CO₂ exchange of a peat field growing spring barley or perennial forage grass. *Journal of Geophysical Research* 109: D18116.
- Lohila, A., Laurila, T., Aro, L., Aurela, M., Tuovinen, J-P., Laine, J., Kolari, P. & Minkkinen, K. 2007. Carbon dioxide exchange above a 30-year-old Scots pine plantation established on organic-soil cropland *Boreal Environment Research* 12: 141–157.
- Lohila, A., Minkkinen, K., Laine, J., Savolainen, I., Tuovinen, J-P., Korhonen, L., Laurila, T., Tietäväinen, H. & Laaksonen, A. 2010. Forestation of boreal peatlands: Impacts of changing albedo and greenhouse gas fluxes on radiative forcing. *Journal of Geophysical Research* 115: G04011.
- Maanavilja, L., Aapala, K., Haapalehto, T., Kotiaho, J. & Tuittila, E. (2014) Impact of drainage and hydrological restoration on vegetation structure in boreal spruce swamp forests. *Forest Ecology and Management*, 330, 115–125.
- Maanavilja, L., Kangas, L., Mehtätalo, L. & Tuittila, E-S. 2015. Rewetting of drained boreal spruce swamp forests results in rapid recovery of Sphagnum production. *Journal of Applied Ecology* 52: 1355–1363.
- Maljanen, M., Hytönen, J. & Martikainen, P.J. 2010. Cold-season nitrous oxide dynamics in a drained boreal peatland differ depending on land-use practice. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 565–572.
- Maljanen, M., Hytönen, J. & Martikainen, P.J. 2001a. Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ on afforested boreal agricultural soils. *Plant and Soil* 231: 113–121.
- Maljanen, M., Jokinen, H., Saari, A., Strömmer, R., Martikainen, P.J., 2006. Methane and nitrous oxide fluxes, and carbon dioxide production in boreal forest soil fertilized with wood ash and nitrogen. *Soil Use Manage.* 22, 151–157. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2006.00029.x>.
- Maljanen, M., Komulainen, V-M., Hytönen, J., Martikainen, P.J. & Laine, J. Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil characteristics. *Soil biology & Biochemistry* 36: 1801–1808.
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J. & Martikainen, P.J. 2003a. Methane fluxes on agricultural and forested boreal organic soils. *Soil Use and Management* 19: 73–79.
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J. & Martikainen, P.J. 2003b. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. *Soil Biology & Biochemistry* 35(5): 689–700.
- Maljanen, M., Liimatainen, M., Hytönen, J., Martikainen, P.J., 2014. The effect of granulated wood-ash fertilization on soil properties and greenhouse gas (GHG) emissions in boreal peatland forests. *Bor. Environ. Res.* 19, 295–309.
- Maljanen, M., Martikainen, P.J., Walden, J. & Silvola, J. 2001b. CO₂ exchange in an organic field growing barley or grass in eastern Finland. *Global Change Biology* 7: 679–692.
- Maljanen, M., Shurpali, N., Hytönen, J., Mäkiranta, P., Aro, L., Potila, H., Laine, J., Li, C. & Martikainen, P.J. 2012. Afforestation does not necessarily reduce nitrous oxide emissions from managed boreal peat soils. *Biogeochemistry* 108: 199–218.
- Maljanen, M., Virkajärvi, P., Hytönen, J., Öquist, M., Sparrman, T. & Martikainen, P.J. 2009. Nitrous oxide production in boreal soils with variable organic matter content at low temperature – snow manipulation experiment. *Biogeosciences* 6: 2461–2473.

- Mathijssen, P., Kähkölä, N., Tuovinen, J-P., Lohila, A., Minkkinen, K., Laurila, T. & Väiliranta, M. 2017. Lateral expansion and carbon exchange of a boreal peatland in Finland resulting in 7000 years of positive radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122(3): 562–577. doi: 10.1002/2016JG003749
- Mathijssen, P., Tuovinen, J-P., Lohila, A., Aurela, M., Juutinen, S., Laurila, T., Niemelä, E., Tuittila, E-S. & Väiliranta, M. 2014. Development, carbon accumulation, and radiative forcing of a subarctic fen over the Holocene. *The Holocene* 24(9): 1156–1166. doi: 10.1177/0959683614538072
- Minkkinen, K., Korhonen, R., Savolainen, I. & Laine, J. 2002. Carbon balance and radiative forcing of Finnish peatlands 1990–2100 – the impact of forestry drainage. *Global Change Biology* 8: 785–799.
- Minkkinen, K. & Laine, J. 1998. Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest research* 28: 1267–1275.
- Minkkinen, K. & Laine, J. 2006. Vegetation heterogeneity and ditches create spatial variability in methane fluxes from peatlands drained for forestry. *Plant Soil* 285: 289–304.
- Minkkinen, K., Laine, J. & Hökkä, H. 2001. Tree Stand Development and Carbon Sequestration in Drained Peatland Stands in Finland – a Simulation Study. *Silva Fennica* 35(1): 55–69.
- Minkkinen, K. & Ojanen, P. 2013. Pohjois-Pohjanmaan turvemaiden kasvihuonekaasutaseet. *Metlan työraportteja* 258: 75–111.
- Minkkinen, K., Ojanen, P., Koskinen, M. & Penttilä, T. Käsikirjoitus. Nitrous oxide emissions of undrained, forestry-drained and rewetted boreal peatlands.
- Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J-P. & Lohila, A. 2018. Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences* 15: 3603–3624.
- Minkkinen, K., Vasander, H., Jauhiainen, S., Karsisto, M. & Laine, J. 1999. Post-drainage changes in vegetation composition and carbon balance in Lakkasuo mire, Central Finland. *Plant and Soil* 207: 107–120.
- Moilanen, M., Hytönen, J., Leppälä, M., 2012. Application of wood ash accelerates soil respiration and tree growth on drained peatland. *Eur. J. Soil Sci.* 63, 467–475. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01467.x>.
- Moilanen, M., Silfverberg, K., Hokkanen, T., 2002. Effects of wood-ash on the tree growth, vegetation and substrate quality of a drained mire: a case study. *For. Ecol. Manage.* 171, 321–338.
- Mäki, M. 2019. Volatile organic compound fluxes from northern forest soils. Väitöskirja. *Dissertationes Forestales* 275: 1–52.
- Mäkiranta, P., Hytönen, J., Aro, L., Maljanen, M., Pihlatie, M., Potila, H., Shurpali, N., Laine, J., Lohila, A., Martikainen, P.J. & Minkkinen, K. 2007. Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. *Boreal Environment Research* 12: 159–175.
- Mäkiranta, P., Laiho, R., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2012. The impact of logging residue on soil GHG fluxes in a drained peatland forest. *Soil Biology & Biochemistry* 48: 1–9.
- Mäkiranta, P., Minkkinen, K., Hytönen, J. & Laine, J. 2008. Factors causing temporal and spatial variation in heterotrophic and rhizospheric components of soil respiration in afforested organic soil croplands in Finland.

- Mäkiranta, P., Riutta, T., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2010. Dynamics of net ecosystem CO₂ exchange and heterotrophic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1585–1596.
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. käsikirjoitus a. Rewetting offers fast climate benefits for tropical and agricultural but not for forestry-drained peatlands. Arvioitavana julkaisua varten.
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. käsikirjoitus b. The dependency of soil net CO₂ emissions on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. Arvioitavana julkaisua varten.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J., Penttilä, T., 2010. Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *For. Ecol. Manage.* 260, 411–421.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.036>.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J., Penttilä, T., 2018. Corrigendum to “Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands” [*Forest Ecology and Management* 260: 411–421]. *For. Ecol. Manage.* 412, 95–96. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.01.020>.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Penttilä, T., 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *For. Ecol. Manage.* 289, 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.008>.
- Ojanen, P., Penttilä, T., Tolvanen, A., Hotanen, J.-P., Saarimaa, M., Nousiainen, H. & Minkkinen, K. 2019. Long-term effect of fertilization on the greenhouse gas exchange of low-productive peatland forests. *Forest Ecology and Management* 432: 786–798.
- Olivier, J., Schure, K. & Peters, J. 2017. Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2017 report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague. 69 p. Available at: www.pbl.nl/en
- Page, S. E., Rieley, J. O., & Banks, C. J. 2011. Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology* 17, 798–818. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02279.x>
- Pearson, M., Saarinen, M., Minkkinen, K., Silvan, N. & Laine, J. 2012. Short-term impacts of soil preparation on greenhouse gas fluxes: A case study in nutrient-poor, clearcut peatland forest. *Forest Ecology and Management* 283: 10–26.
- Pihlatie, M., Rinne, J., Lohila, A., Laurila, T., Aro, L. & Vesala, T. 2004. Nitrous oxide emissions from an afforested peat field using eddy covariance and enclosure techniques. Teoksessa: Päivänen, J. (toim.): *Proceedings of the 12th International Peat Congress. Volume 2. International Peat Society.* s. 1010–1014.
- Regina, K., Syväsalo, E., Hannukkala, A. & Esala, M. 2004. Fluxes of N₂O from farmed peat soils in Finland. *European Journal of Soil Science* 55: 591–599.
- Regina, K., Pihlatie, M., Esala, M. & Alakukku, L. 2007. Methane fluxes on boreal arable soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 346–352.
- Rütting, T., Björk, R., Meyer, A., Klemmedtsson, L., Sikström, U., 2014. Reduced global warming potential after wood ash application in drained Northern peatland forests. *For. Ecol. Manage.* 328, 159–166.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.033>.
- Saari, P., Saarnio, S., Kukkonen, J., Akkanen, J., Heinonen, J., Saari, V. & Alm, J. 2009. DOC and N₂O dynamics in upland and peatland forest soils after clear-cutting and soil preparation. *Biogeochemistry* 94: 217–231.

- Saarsalmi, A., Smolander, A., Moilanen, M., Kukkola, M., 2014. Wood ash in boreal, lowproductive pine stands on upland and peatland sites: long-term effects on stand growth and soil properties. *For. Ecol. Manage.* 327, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.031>.
- Simola, H., Pitkänen, A. & Turunen, J. 2012. Carbon loss in drained forestry peatlands in Finland, estimated by re-sampling peatlands surveyed in the 1980s. *European Journal of Soil Science* 63: 798–807.
- Sirin, S., Medvedeva, M., Maslov, A. & Vozbrannaya, A. 2018. Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data. *Land* 7(2): 71. doi: 10.3390/land7020071
- Teuling, A., Taylor, C., Meriink, J., Melsen, L., Miralles, D., Heerwaarden, C., Vautard, R., Stegehuis, A., Nabuurs, G-J. & Vilà-Guerau de Arellano, J. 2017. Observational evidence for cloud cover enhancement over western European forests. *Nature Communications* 8: 14065. doi: 10.1038/ncomms14065
- Tiiva P., Rinnan R., Faubert P., Räsänen J., Holopainen T., Kyrö E. & Holopainen J.K. 2007. Isoprene emission from a subarctic peatland under enhanced UV-B radiation. *New Phytologist* 176: 346–355.
- Tilastokeskus 2019. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2018. 2., korjattu painos. *Ympäristö ja luonnonvarat 2019*. ISBN 978-952-244-616-9
- Tunved, P., Hansson, H-C., Kerminen, V-M., Ström, J., Dal Maso, M., Lihavainen, H., Viisanen, Y., Aalto, P., Komppula, M. & Kulmala, M. 2006. High Natural Aerosol Loading over Boreal Forests. *Science* 312: 261–263. doi: 10.1126/science.1123052
- Turetsky, M., Amiro, B., Bosch, E. & Bhatti, J. 2004. Historical burn area in western Canadian peatlands and its relationship to fire weather indices. *Global Biogeochemical Cycles* 18: GB4014. doi: 10.1029/2004GB002222
- Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K. & Reinikainen, A. (2002) Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland - application to boreal and subarctic regions. *The Holocene*, 12(1), 69–80.
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Morozov, G. & Karoles, K. 2017. 684 Ecosystems carbon budgets of differently aged downy birch stands growing on well-drained 685 peatlands. *Forest Ecology and Management* 399: 82–93. doi: 10.1016/j.foreco.2017.05.023