

Maija Salo

METSÄOJITETTUIJEN SOIDEN ENNALLISTAMISEN PÄÄSTÖVAIKUTUKSET

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Antti Rissanen
Marika Kokko
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Maija Salo: Metsäojitettujen soiden ennallistamisen päästövaikutukset
Emission impacts of restored forestry-drained peatlands
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma, ympäristö- ja energiatekniikan
opintosuunta
Huhtikuu 2024

Monet luonnon ekosysteemit kuten suot, metsät ja vesistöt ovat heikentyneet ihmisen toiminnan seurauksena. Soiden osalta ojitustoiminta on aiheuttanut merkittäviä muutoksia suoekosysteemeissä. Jotta voidaan turvata monimuotoinen luonto jatkossakin, on luonnon ennallistaminen tarpeellista. Luonnon ennallistaminen tarkoittaa vahingoittuneen, heikentyneen tai tuhoutuneen ekosysteemin palauttamista takaisin lähelle luonnontilaa. Soiden ennallistamisella voidaan luonnon monimuotoisuuden turvaamisen lisäksi tavoitella myös ilmastoa viilentävää vaikutusta sekä ojituksesta aiheutuvan vesistökuormituksen minimoimista. Tässä työssä tutkitaan, mitä vaikutuksia metsäojitettujen soiden ennallistamisella on ilmastoon ja suon alapuoliseen vesistöön. Tarkemmin tutkitaan, miten ennallistaminen muuttaa metsäojitetun suon kykyä varastoida ja vapauttaa hiiltä sekä miten muiden kasvihuonekaasujen päästöt muuttuvat ennallistamisen jälkeen. Vesistövaikutusten osalta tarkastellaan, miten typen, fosforin ja orgaanisen hiilen kuormitus muuttuu ennallistamisen jälkeen.

Suomen noin 9 miljoonan hehtaarin suoalasta melkein 5 miljoonaa hehtaaria on metsäojitettu. Soiden metsäojitus tarkoittaa ojitustoimintaa, joka on tehty metsätalouden toiminnan tehostamiseksi. Metsäojitus laskee suon vedenpintaa, jolloin puiden kasvuolosuhteet paranevat. Ojitus kuitenkin lisää suon hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöjä ja ojituksen jälkeen myös suon kyky pidättää itsessään ravinteita heikentyy ja typen, fosforin sekä orgaanisen hiilen määrät suoloilta valuvissa vesissä kasvavat.

Soiden ennallistamista tehdään yleisimmin täyttämällä ja patoamalla oja turpeella, jotta soiden vedenpintaa saadaan nostettua. Ennallistamismenetelmillä ja ennallistettavan suon ravinteikkudella on vaikutusta siihen, millainen ilmastovaikutus metsäojitetulla suoloilla on ennallistamisen jälkeen. On arvioitu, että suometsän hylkääminen olisi hiilen varastoitumisen kannalta paras menetelmä. Typpioksiduulipäästöjen kannalta ravinteikkaiden soiden ennallistaminen vähentäisi päästöjä eniten. Metaanipäästöjen osalta taas vähäravinteisten soiden ennallistaminen olisi ilmastollisesti kestäväntä. Kaikkien kasvihuonekaasujen yhteisvaikutusta tutkimalla ilmastollisesti kestäväntä olisi kohdistaa ennallistamistoimenpiteitä sellaisille soille, missä metaanipäästöjen kasvu olisi mahdollisimman maltillista, sillä metaanipäästöjen kasvu voi helposti kumota vähenevien typpioksiduuli- ja hiilidioksidipäästöjen viilentävän ilmastovaikutuksen.

Ennallistettavan suon ravinteikkudella on havaittu olevan vaikutusta myös vesistöjen tilaan ennallistamisen jälkeen. Ravinteikkailla soilla on havaittu lyhytaikaista kasvua typen, fosforin ja orgaanisen hiilen päästöissä ennallistamisen jälkeen. Vähäravinteisilla soilla kasvua on havaittu vain fosforin osalta. Pitkän aikavälin tarkastelussa on havaittu, että päästöt lähtivät laskuun vähäravinteisilla soilla. Lisää tutkimusta tarvitaan kuitenkin ravinteikkaiden metsäojitettujen soiden ennallistamisen pitkäaikaisista typen, fosforin ja orgaanisen hiilen päästöistä, jotta tiedetään paremmin, millaisille soille ennallistamista kannattaisi tehdä.

Avainsanat: metsäojitetut suot, ennallistaminen, päästövaikutukset, ilmastovaikutukset, vesistövaikutukset

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. METSÄOJITETTUIJEN SOIDEN ENNALLISTAMINEN	3
2.1 Metsäojitetut suot.....	3
2.2 Luonnontilaisen ja metsäojitetun suon päästöt	6
2.3 Ennallistamismenetelmiä	9
3. ENNALLISTAMISEN ILMASTOVAIKUTUKSET	11
3.1 Hiilen varastoiminen ja vapautuminen.....	11
3.2 Muut kasvihuonekaasut	12
4. ENNALLISTAMISEN VESISTÖVAIKUTUKSET	15
4.1 Typpi ja fosfori.....	15
4.2 Orgaaninen hiili	18
5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	20
LÄHTEET	22

1. JOHDANTO

Luonnon ennallistamisen tehostaminen on osa Euroopan Unionin biodiversiteettistrategiaa 2030 (Euroopan komissio, 2020). Strategian pohjalta Euroopan komissio on esittänyt ennallistamisasetuksen, jonka tavoitteena on luonnon monimuotoisuuden lisääminen ja ilmastomuutoksen hillitseminen, kun luontoa eli esimerkiksi soita, jokia ja metsiä ennallistetaan (Euroopan komissio, 2022).

Ennallistaminen tarkoittaa prosessia, jossa pyritään auttamaan vahingoittunutta, huonontunutta tai tuhoutunutta ekosysteemiä elpymään takaisin lähelle luonnontilaa (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, 2004). Se on ensisijaisesti tärkeää luonnon monimuotoisuuden turvaamiseksi, mutta esimerkiksi soiden ennallistamisen kohdalla sillä voi olla myös ilmastomuutosta hillitseviä vaikutuksia ja sillä voidaan tavoitella myös suon alapuolisen vesistön laadun parantamista (Aapala et al., 2013).

Paljon luonnontilaisia soita on vahingoittunut ihmistoiminnan vuoksi. Suomessa yli puolet soiden noin 9 miljoonan hehtaarin kokonaispinta-alasta on metsäojitettu (Luonnonvarakeskus) eli ojitus on tehty metsätalouden toiminnan tehostamiseksi. Metsäojitusta on tehty, sillä sen on havaittu laskevan suon vedenpintaa, tehden suosta otollisemman paikan puiden kasvamiselle (Rehell et al., 2013b).

Viime vuosina on havaittu, että erityisesti ilmaston lämmitessä ojitetut suometsät aiheuttavat negatiivisia ympäristövaikutuksia. Suomen vuoden 2022 kasvihuonekaasuja tarkasteltaessa havaittiin, että ojitettujen suometsien maaperän, karikkeen ja kuolleen puun varastot olivat päästölähde 10,1 miljoonan hiilidioksiditonni verran. Vuoteen 2021 verrattuna kyseisen varaston päästöt olivat kasvaneet jopa 18 % johtuen kasvukauden keskilämpötilan noususta. (Tilastokeskus, 2023) Vesistövaikutusten osalta on havaittu, että metsäojitetut suot ovat selkeitä lähteitä kohonneille ravinnepitoisuuksille pintavesissä (Finér et al., 2021). Näiden syiden vuoksi on tärkeää tutkia, voisiko ennallistaminen parantaa nykyistä tilannetta ja millaisia ympäristövaikutuksia soiden ennallistaminen aiheuttaa.

Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan metsäojitettujen soiden ennallistamisen päästövaikutuksia ilmaston ja vesistöjen näkökulmasta. Työ tehdään kirjallisuuskatsauksena, jonka avulla tarkastellaan aiempaa tutkimustietoa metsäojitettujen soiden ennallistamisesta ja sen vaikutuksista soiden alapuolisiin vesistöihin ja ilmastoon.

Luvussa 2 taustoitetaan metsäojitusta ja sen päästövaikutuksia sekä kerrotaan ennallistamismenetelmistä. Luvussa 3 tarkastellaan ennallistamisen ilmastovaikutuksia hiilen vapautumisen ja varastoitumisen sekä muiden kasvihuonekaasujen osalta. Luvussa 4 tutustutaan vielä tarkemmin ennallistamisen vesistöpäästöihin typen, fosforin ja orgaanisen hiilen osalta. Lopuksi luvussa 5 kootaan yhteen työn tärkeimmät tulokset ja johtopäätökset.

2. METSÄOJITETTUJEN SOIDEN ENNALLISTAMINEN

Tässä luvussa kerrotaan yleisesti soiden metsäojituksesta sekä taustoitetaan ojituksen historiaa Suomessa. Lisäksi vertaillaan luonnontilaisen sekä metsäojitetun suon ilmasto- ja vesistövaikutuksia. Tämän jälkeen kerrotaan eri ennallistamistoimenpiteistä, joilla suo pyritään ojituksen jälkeen palauttamaan lähelle luonnontilaa.

2.1 Metsäojitetut suot

Metsäoitus tarkoittaa metsätalouden maalla tehtävää ojitusta eli haittaavan veden poistojohtamista. Se tehdään Suomessa yleensä avo-ojituksena, mutta myös salaojitusta ja vesivako-ojitusta on kokeiltu. (Päivänen, 2007, s.161) 1950-luvulle asti metsäojitusta tehtiin lapiotyönä, mutta sen jälkeen sitä on tehty pääasiassa koneellisesti kaivinkoneilla (Päivänen, 2007, s. 164–165). Ojituksen tarkoituksena on alentaa pohjaveden pinnan korkeutta, jotta maaperään pääsee happea ja puiden kasvuolosuhteet paranevat (Rehell et al., 2013b). Tällöin myös turpeen kertyminen suolle pysähtyy (Tahvanainen & Haapalehto, 2013) ja suo alkaa aluskasvillisuudeltaan muuttumaan metsän kaltaiseksi turvekankaaksi (Laitinen et al., 2020).

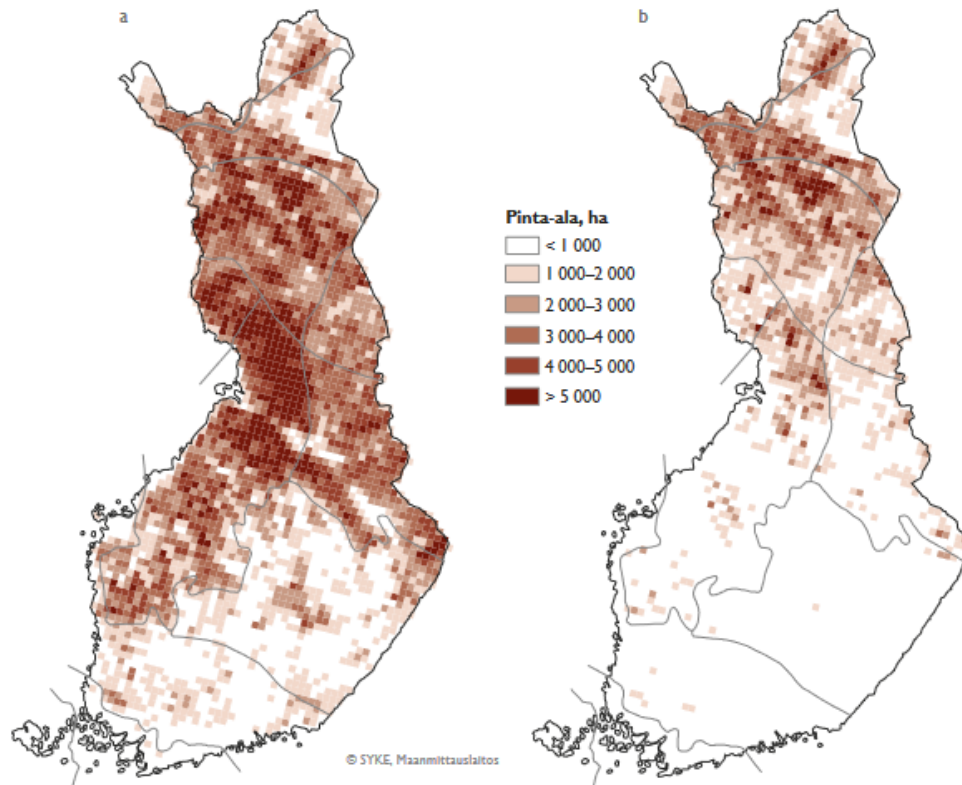
Soiden oitus ulottuu Suomessa pitkälle historiaan. Sitä tehtiin jo 1860-luvulla nälkävuosien aikaan. Ojituksen alkuperäinen tarkoitus oli uuden peltoalan valtaaminen ja väestön työllistäminen. Moni peltoja varten ojitettu alue jäi kuitenkin raivaamatta, ja alueet lopulta metsittyivät. (Päivänen, 2007, s. 155) Itse soiden metsäoitus alkoi Suomessa 1900-luvun alussa, kun havaittiin ojituksen hyödyt metsänkasvatuksessa (Tirkkonen, 1952, s. 17–19). Suomea uhkaavan puupulan vuoksi vuonna 1928 vahvistettiin määräaikainen metsänparannuslaki, jonka tarkoituksena oli varata tarpeeksi suomaa metsänkasvatusta varten. Tämä laki vahvistettiin pysyväksi vuonna 1967. 1960- ja 1970-luvuilla metsäojitustoiminta Suomessa olikin voimakkaimmillaan. (Päivänen, 2007, s. 156–165)

Vuonna 1987 metsänparannuslakiin lisättiin metsäoituksen lisäksi osuus liittyen metsäojien kunnostukseen. Tämä osuus lisättiin, sillä havaittiin, että metsäojitetujen soiden vesitalous on muuttuvaa ja vaatii myös kunnostusta sekä korjausta. Tässä vaiheessa yhteiskunnan tuki alkoi painottua enemmän metsäojien kunnostukseen kuin ensiojitukseen. Vuodesta 1997 alkaen ensiojitusta ei enää tuettu, ja sen jälkeen ensiojitus on käytännössä loppunut kokonaan. (Päivänen, 2007, s.159–160, 278)

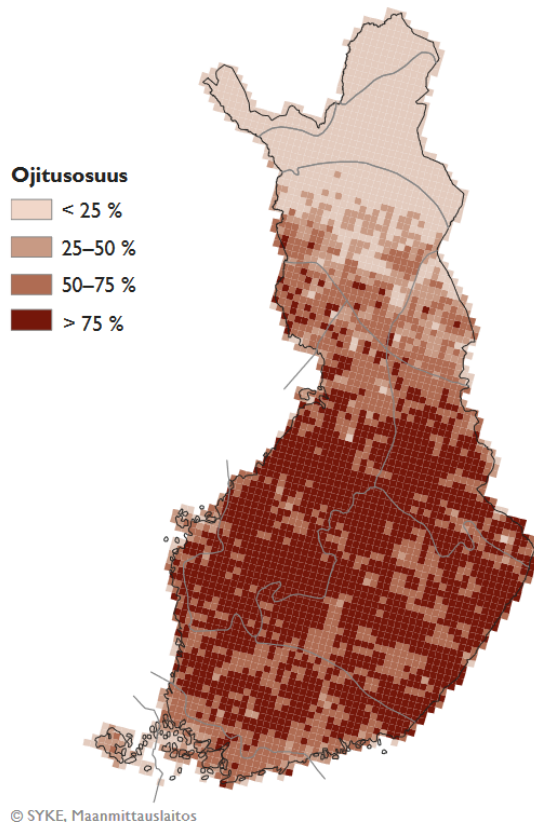
Metsäojien kunnostusojitusta on tuettu vielä 2020-luvulla kestävän metsätalouden rahoituksen tuella eli kemera-tuella. Tuki kohdistettiin yksityisille maanomistajille metsänhoidon tukemiseen. Tähän sisältyi myös suometsän hoito eli esimerkiksi ojien perkaus, täydennysojitus ja vesiensuojelutyöt. Kemera-tukeen liittyvän lain voimassaolo päättyi kuitenkin vuoden 2023 lopussa ja täten tukea ei ole enää mahdollista hakea. (Metsäkeskus, 2023a) Vuoden 2024 maaliskuun alusta yksityiset maanomistajat ovat kuitenkin pystyneet hakemaan metsätalouden kannustejärjestelmän mukaista tukea eli metka-tukea. Metka-tukea ei kuitenkaan myönnetä ojien kunnostustöihin, minkä vuoksi valtio ei enää tue metsäojitusta edes kunnostusojituksen muodossa (Metsäkeskus, 2023b).

Suomen soiden kokonaispinta-alasta yli puolet on ojitettu metsätaloutta varten. Alun perin metsäojitetun suon pinta-alaksi on arvioitu noin 5,5 miljoonaa hehtaaria ja koko Suomen suoalan pinta-alaksi noin 10,4 miljoonaa hehtaaria (Päivänen, 2007, s.23). Alkuperäisen kokonaissuoalan luvut vaihtelevat kuitenkin lähteen mukaan, sillä todellisen suoalan selvittäminen on haastavaa. Esimerkiksi valtakunnan metsien inventointien I-III mukaan soiden alkuperäinen pinta-ala on ollut Suomessa 9,742 miljoonaa hehtaaria (Ilvessalo, 1956). Tämä luku eroaa aiemmin mainitusta luvuista alkuperäiselle suoalalle, sillä valtakunnan metsien inventoinnin suoalan ulkopuolelle jää esimerkiksi maatalousmaa, rakennettu maa ja sisävedet (Päivänen, 2007, s.22).

Suomen nykyisen suoalan on valtakunnan metsien inventoinnin (VMI 12/13) perusteella laskettu olevan 9,078 miljoonaa hehtaaria. Tästä alasta 4,858 miljoonaa hehtaaria lasketaan nykyään metsäojitetuksi suoksi. (Luonnonvarakeskus) Metsäojitettujen soiden alkuperäisen pinta-alan ja nykyään luokiteltavan pinta-alan eron suurimpana syynä on se, että ohutturpeisten soiden turve on ojituksen myötä alkanut hajoamaan ja suo onkin lueteltu ojitetuksi kankaaksi (Ojanen et al., 2020). Kuvissa 1 ja 2 voidaan nähdä, miten turvemaiden ojitukset ovat sijoittuneet Suomen kartalle.



Kuva 1. Suomen a) kaikkien ja b) ojitamattomien turvemaiden kokonaispinta-alat havainnollistettuna kartalla (Kaakinen et al., 2018).



Kuva 2. Karttakuva Suomen ojitettujen turvemaiden osuudesta kaikista turvemaista (Kaakinen et al., 2018).

Metsäojitus on siis ollut hyvin merkittävä osa Suomen soiden käyttöä jo pitkään. Alun perin huoltovarmuuden tukemiseksi aloitettu ojitustoiminta laajenikin myöhemmin merkittäväksi osaksi metsätaloustoimintaa. Ojituksen aiheuttamien negatiivisten ympäristövaikutusten vuoksi valtion antama tuki metsäojitukselle on kokonaan päättynyt ja tästä eteenpäin voidaan keskittyä kestävämpään soiden käyttöön ja heikentyneiden ekosysteemien kunnostamiseen.

2.2 Luonnontilaisen ja metsäojitetun suon päästöt

Metsäojitus muuttaa luonnontilaisen suon ilmastovaikutusta. Luonnontilaisella suolla on sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia ilmastoon. Suot varastoivat ilmakehästä sidottua hiilidioksidia (CO_2) turpeessa, mutta ne myös vapauttavat ilmastoa lämmittävää metaania (CH_4) (Saarnio et al., 2008) ja pieniä määriä typpioksiduulia (N_2O) (Minkkinen et al., 2020) ilmakehään. Koska turvetta kertyy luonnontilaiselle suolle jatkuvasti, toimivat luonnontilaiset suot kokonaisuudessaan hiilidioksidin nieluina ja niillä on ilmastoa viilentävä vaikutus (Ojanen et al., 2021).

Luonnontilaisella suolla pohjavedenpinnan korkeuden vuoksi märkyys aiheuttaa hapenpuutetta, jolloin kasvien hajotustoiminnassa syntyy hiilidioksidin lisäksi metaania (Saarnio et al., 2008). Metaani on kasvihuonekaasu, joka päästessään ilmakehään lämmittää maapalloa ja siten edistää ilmastomuutosta. Metaanin ilmastonlämpenemispotentiaali (eng. global warming potential, GWP) on kahdenkymmenen vuoden aikana 84 (IPCC, 2014, p. 87). Sadan vuoden aikana metaanin GWP arvo on 27. Näiden lisäksi metaanin elinikä ilmakehässä on 11,8 vuotta. (IPCC, 2022) GWP on mittari, joka kuvaa tarkasteltavan kasvihuonekaasun lämmitystehoa suhteessa hiilidioksidin lämmitystehoon. Se ottaa huomioon ajan, jonka kaasu pysyy ilmakehässä sekä sen, miten tehokkaasti kaasu lämmittää maapalloa. (IPCC, 2021)

Metaanin ja hiilidioksidin lisäksi pieniä määriä typpioksiduulia vapautuu luonnontilaiselta suolta ilmaan (Minkkinen et al., 2020). Typpioksiduuli on myös kasvihuonekaasu, joka lämmittää maapalloa päästessään ilmaan. Typpioksiduulin GWP-arvo on kahdenkymmenen vuoden aikana 264 (IPCC, 2014, p. 87). Sadan vuoden aikana GWP arvo on 273 ja typpioksiduulin elinikä ilmakehässä on 109 vuotta. (IPCC, 2022) Hiilidioksidin verrattuna metaanin ja varsinkin typpioksiduulin ilmastoa lämmittävä vaikutus on siis huomattavasti suurempaa, jolloin pienilläkin näiden kaasujen päästöillä on merkitystä ilmaston lämpenemisen kannalta. Metaanin ja typpioksiduulin päästöjen ilmastovaikutusta voidaan verrata hiilidioksidin ilmastovaikutukseen muuttamalla metaanin ja typpioksiduulin

päästöt hiilidioksidiekvivalenteiksi (CO₂e). Tämä voidaan tehdä kertomalla kyseiset päästöt niiden GWP-arvolla. (IPCC, 2021)

Ojituksen jälkeen luonnontilaiselle suolle tyypilliset metaanipäästöt useimmiten pienentyvät, mutta hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöt kasvavat (Ojanen et al., 2021). Myös suon hiilidioksidinsidontakyvyn on havaittu heikentyvän metsäojituksen johdosta, sillä turvetta ei enää ojituksen jälkeen aktiivisesti kerry suolle (Laine et al., 2019). Ilmastovaiikutusten suuruus riippuu suon ja ojituksen ominaispiirteistä. Enimmäkseen siihen vaikuttaa maaperän tyyppi eli kasvupaikan ravinteikkuus, turvekerroksen paksuus ja kasvukauden keskimääräinen vedenpinnan korkeus. (Ojanen & Minkkinen, 2020a) Kasvupaikan ravinteikkuuteen liittyen Minkkisen et al. (2020) tutkimuksessa havaittiin, että erityisesti soiden ravinteikkuudella on vaikutusta typpioksiduulipäästöjen suuruuteen (Taulukko 1). Tutkimuksessa kävi ilmi, että soiden ojittaminen metsätaloutta varten lisää typpioksiduulipäästöjä vain ravinteikkailla soilla. Vähäravinteisella suolla päästöt jopa pienenevät hieman, mutta ei merkittävästi, metsäojituksen jälkeen.

Taulukko 1. Typpioksiduulin (N₂O) päästöt luonnontilaisilta, metsäojitetuilta ja ennallistetuilta soilta tarkasteltaessa erikseen ravinteikasta ja vähäravinteista suota (Minkkinen et al., 2020).

	Ravinteikas	Vähäravinteinen
Luonnontilainen	0,11 g m ⁻² a ⁻¹	0,10 g m ⁻² a ⁻¹
Metsäojitettu	0,23 g m ⁻² a ⁻¹	0,08 g m ⁻² a ⁻¹
Ennallistettu	0,05 g m ⁻² a ⁻¹	0,08 g m ⁻² a ⁻¹

Turvekerroksen paksuuteen liittyen ohutturpeisten alueiden metsäojitusten on havaittu olevan jopa ilmastollisesti kestäviä, mutta paksuturpeisilla alueilla ilmastollisesti kestävä metsätalouden toteuttaminen on haastavaa. Ohutturpeisilla alueilla kestävyys johtuu siitä, että näillä alueilla puuston hiilivarasto on merkittävämpää kuin turpeen hiilivarasto. Tällöin ojituksen yhteydessä hajoavan turpeen määrä on vähäistä verrattuna esimerkiksi paksuturpeiseen suohon. (Ojanen & Minkkinen, 2020a) Vedenpinnan korkeuteen liittyen alueilla, joilla vedenpinta on ollut matalalla jo ennen ojitusta, metaanipäästöjen muutoksen on havaittu olevan hyvin vähäistä ojituksen jälkeen (Laine et al. 2019). Isoin muutos metaanipäästöjen laskussa on siis alueilla, joilla vedenpinta on ennen ojitusta ollut melko korkealla.

Luonnontilaiset suot toimivat valuma-alueellansa vesien puhdistajina pidättäessään vesien mukana tulleita ravinteita itsessään (Nieminen & Sallantaus, 2020). Suot voidaan

veden alkuperän ja ravinteikkuutensa mukaan luokitella eri kategorioihin. Ravinteikkaita soita, jotka saavat vetensä ympäröivältä alueelta kutsutaan minerotrofisiksi soiksi. Keskimertaisesti ravinteikkaita soita kutsutaan mesotrofisiksi ja vähäravinteisia soita, jotka saavat vetensä oikeastaan vain sateesta, kutsutaan ombrotrofisiksi soiksi. Muita vähäravinteisia soita ovat esimerkiksi oligotrofiset suot.

Soiden metsäojitus aiheuttaa muutoksia ympäröivän vesistön laatuun. Ojitettaessa minerotrofista suota ravinnehuuhtoumat kuten typpi ja fosfori virtaavat suoraan ympäröivältä alueelta ojja pitkin vesistöön kuormittaen sitä. Tällöin vesi ei virtaa soiden läpi, jolloin ravinteet pidättyisivät suohon. Ombrotrofisten soiden ojitus aiheuttaa muutoksen soilta valuvan valumaveden laatuun, kun happamat ja humuspitoiset suovedet sekä eroosion huuhtoma orgaaninen aines rikastuttavat valumavettä. (Nieminen & Sallantaus, 2020)

Finérin et al. (2021) tutkimuksessa saatiin selville, että suometsistä virtaa Pohjanlahteen korkeita pitoisuuksia typpeä, fosforia ja orgaanista hiiltä. Erityisesti typen ja orgaanisen hiilen osalta havaittiin, että pitoisuudet olivat suurempia, kun turvemaiden osuus tutkittu alueesta lisääntyi. Myös ojitusalueiden lisääntyessä havaittiin ravinteiden korkeampia pitoisuuksia pintavesissä. Viime vuosina onkin havaittu, että metsäojituksen aiheuttama typen ja fosforin vesistökuormitus on huomattavasti suurempaa kuin aikaisemmin on arvioitu (Nieminen & Sallantaus, 2020). Suurempi havaittu kuormitus johtuu siitä, että aiemmin kuormitus on laskettu vain metsänhoitotoimenpiteiden aiheuttaman kuormituksen perusteella. Metsänhoitotoimenpiteiksi on laskettu esimerkiksi kunnostusojitus, lannoitus ja uudistushakkuut. Uusimmissa tutkimuksissa näiden lisäksi on otettu huomioon niin kutsuttu ojituslisä eli se pysyvä kuormitus, jonka alkuperäinen ojitus on aiheuttanut vesistöön (Taulukko 2). (Nieminen et al., 2020a)

Taulukko 2. Metsäojitetun suon ojituslisän, metsätaloustoimenpiteiden ja niiden yhteenlaskettu kokonaiskuormitus typelle ja fosforille (Nieminen et al., 2020a).

	Typpi	Fosfori
Ojituslisä	8 073 Mg a ⁻¹	494 Mg a ⁻¹
Metsätaloustoimenpiteet	464 Mg a ⁻¹	91 Mg a ⁻¹
Kokonaiskuormitus	8 537 Mg a ⁻¹	585 Mg a ⁻¹

Metsäojitus aiheuttaa siis merkittäviä muutoksia soiden ympäristövaikutuksiin. Luonnontilaisen suon todettu ilmasto viilentävä vaikutus muuttuu, kun suohon kohdistetaan metsätaloutta tehostavaa ojitustoimintaa. Myös luonnontilaisen suon veden ja ravinteiden

pidätyskyky häiriintyy, kun vedet pääsevät valumaan soiden läpi suoraan vesistöön aiheuttaen ylimääräistä ravinnekuormitusta.

2.3 Ennallistamismenetelmiä

Soiden ennallistamisella tavoitellaan suoluonnon monimuotoisuuden säilyttämistä, mutta myös ilmastonmuutoksen hillitsemistä, sillä soiden turve toimii pitkäaikaisena varastona hiilelle. Tavoitteena on myös parantaa ympäröivän vesistön laatua palauttamalla suon vedenpidätys- ja suodatusominaisuudet. (Aapala et al., 2013) Soiden ennallistamisessa vedenpinnan nostamisella ja mahdollisesti puuston poistamisella pyritään palauttamaan suotyypin takaisin ojitusta edeltäneeseen tilaan (Kareksela et al., 2021, s.8).

Soiden ennallistamista on kokeiltu Suomessa jo 1970- ja 1980-luvuilla melkein heti ojituksen jälkeen sellaisissa kohteissa, jotka tunnustettiin luonnonsuojelullisesti arvokkaiksi. Näiden vuosien jälkeen soiden ennallistaminen alkoi lisääntymään Suomessa 1990-luvun puolivälistä eteenpäin. (Aapala & Similä, 2013) Nykyään soiden ennallistamista toteutetaan erilaisten hankkeiden ja ohjelmien avulla. Esimerkkinä tästä on ympäristöministeriön ja maa- ja metsätalousministeriön Helmi-elinympäristöohjelma, jossa ennallistamistoiminta on vapaaehtoista ja maanomistajat voivat saada siitä myös korvauksia (Gummerus-Rautiainen et al., 2021).

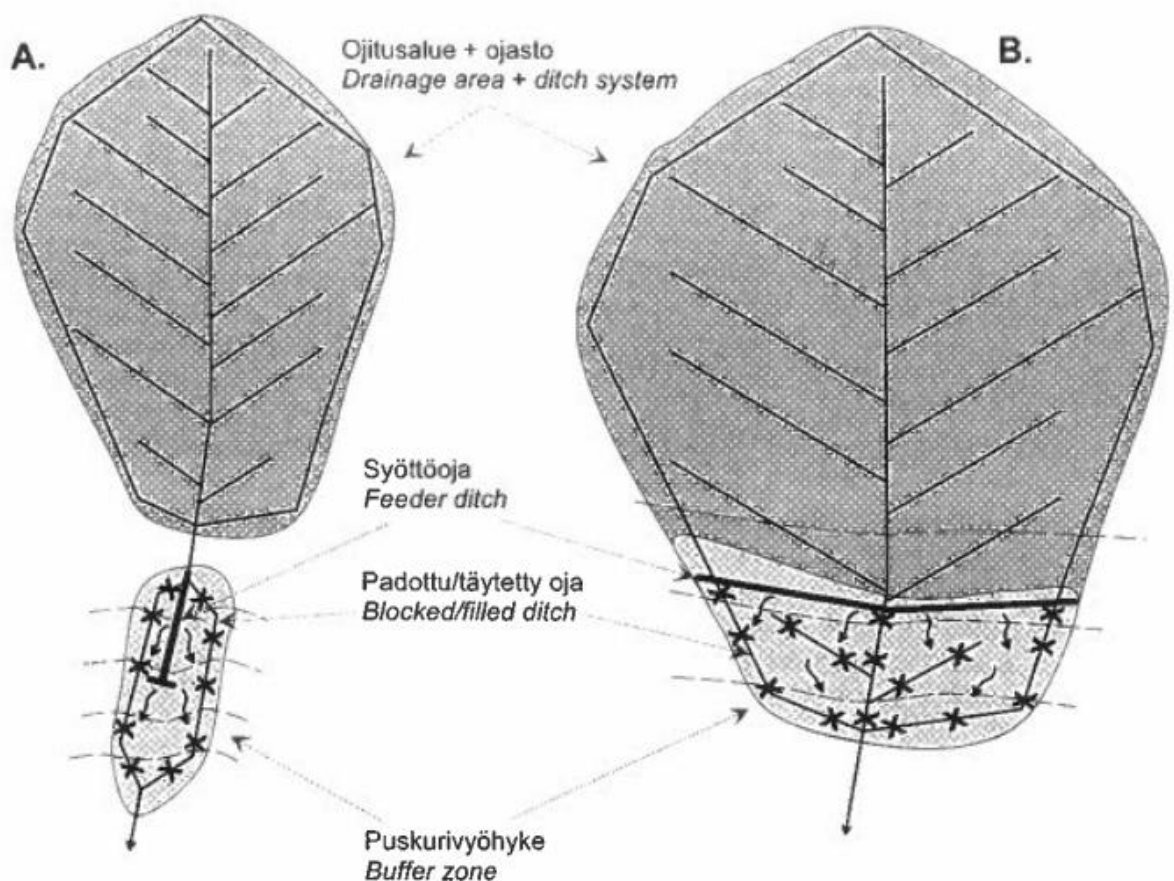
Soiden ennallistaminen toteutetaan yleisimmin ojia täyttämällä ja patoamalla. Muita ennallistamistoimenpiteitä ovat esimerkiksi ojalinjojen raivaus, puuston poisto, vesien ohjaaminen sekä lahoppuun määrän lisääminen. Ennallistamistoimenpiteet valitaan kuitenkin aina kyseisen suon olosuhteet huomioiden. (Vesterinen et al., 2013) Toimenpiteet tehdään useimmiten koneellisesti metsä- ja kaivinkoneilla, mutta vaikeasti saavutettavissa tai herkemmissä kohteissa myös käsityökaluja hyödynnetään (Kareksela et al., 2021, s.5).

Ojien täyttämisen ja patoamisessa käytetään useimmiten suosta kaivettua turvetta. Turvetta kaivaessa tulee varmistaa, ettei uusia ojia muodostu. Turvetta täytetään ojien pohjalta pintaan asti ja tietyin etäisyyksin turpeesta muodostetaan patoja. Patojen tekeminen on tärkeää, jotta voidaan varmistua siitä, että vesi nousee suolla tavoiteltuun korkeuteen. (Vesterinen et al., 2013)

Ojalinjojen raivauksella tarkoitetaan ojien penkoilla kasvavien puiden kaatamista (Vesterinen et al., 2013). Ojalinjojen raivaus on tarpeellista, jos puut hankaloittavat kaivinkoneen työskentelyä ojien täyttämisen yhteydessä (Rehell et al., 2013a). Tämä tehdään yleisimmin koneellisesti kuten muunkin puuston poisto. (Vesterinen et al., 2013) Yleisesti puuston kaadon tarkoituksena on vähentää veden haihtumista suolla ja parantaa suon

valo-olosuhteita. Erityisesti puuston poisto on tarpeellista, jos ojituksen seurauksena alun perin harvapuustoisesta tai avoimen suon puusto on lisääntynyt. (Rehell, Similä, et al., 2013).

Yksi mahdollinen ennallistamistoimenpide on myös niin kutsutun puskurivyöhykkeen käyttäminen (Kuva 3). Sen ideana on hyödyntää suon luonnollista kykyä pidättää ravinteita, jolloin ojitetuilta alueilta valuva ravinnekuormitus pienenee (Sallantaus et al., 1998). Puskurivyöhyke voidaan toteuttaa ojitetun alueen alapuolelle aluksi kaatamalla alueen puustoa ja sen jälkeen täyttämällä oja sekä rakentamalla turpeesta tehtyjä patoja (Nieminen et al., 2020b).



Kuva 3. Esimerkkikuva puskurivyöhykkeen toteuttamisesta A) metsäojitetulle suolle tai B) suon osalle (Sallantaus et al., 1998).

Ennallistamista voidaan tehdä myös vesien ohjaamisella. Siinä vettä palautetaan suolle kunnostusojituksen yhteydessä johdeojien avulla. Tällöin vesi ohjautuu ja levittyy suon luontaisen virtauksen mukaisesti. (Autio et al., 2018, s. 6) Aiemmin mainitun lahoppuun määrän lisäämisen tarkoituksena on usein metsien monimuotoisuuden lisääminen, mutta sen haittapuolena on mahdollinen hiilen sidonnan hidastuminen. (Haapalehto et al., 2013).

3. ENNALLISTAMISEN ILMASTOVAIKUTUKSET

Tässä luvussa tarkastellaan tarkemmin ennallistamisen ilmastovaikutuksia. Aluksi kerrotaan muutoksista hiilen varastoitumisen ja vapautumisen osalta ja sitten muiden kasvihuonekaasujen eli typpioksiduulin ja metaanin osalta.

3.1 Hiilen varastoiminen ja vapautuminen

Metsäojitetun suon ennallistamisen vaikutus hiilen varastoitumiseen ja vapautumiseen riippuu käytettävästä ennallistamistoimenpiteestä ja maaperän ravinteikkuudesta (Ojanen & Minkkinen, 2020b). Myös ennallistamisen jälkeen suolle kasvava kasvillisuus määrittelee vahvasti suon hiilidioksidivuon suuruutta (Purre et al., 2019).

Verratessa vain maaperästä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä metsäojitetulla ja sen jälkeen ennallistetulla suolla, voidaan huomata, että ennallistaminen muuttaa ilmastovaikutuksen viilentäväksi hiilidioksidin osalta (Taulukko 3). Voidaan huomata myös, että ravinteikkaalla suolla päästöjen määrän muutos on huomattavasti suurempaa. Näihin arvoihin ei ole kuitenkaan otettu huomioon puuston hiilivarastoa ja sen muutosta ennallistamisen jälkeen, jonka vuoksi nämä arvot eivät kerro ojitetun tai ennallistetun suometsän kokonaisvaikutuksesta hiilen varastoimisen tai vapautumisen osalta (Wilson et al., 2016).

Taulukko 3. Metsäojitetun ja ennallistetun suon maaperän hiilidioksidipäästöt (CO₂) ravinteikkaalla ja vähäravinteisella maalla. Positiivinen arvo tarkoittaa, että vaikutus on ilmastoa lämmittävä ja negatiivinen arvo kertoo ilmastoa viilentävästä vaikutuksesta. (Ojanen & Minkkinen, 2020b)

	Ravinteikas	Vähäravinteinen
Metsäojitettu	3,85 t ha ⁻¹ a ⁻¹	1,36 t ha ⁻¹ a ⁻¹
Ennallistettu	-1,64 t ha ⁻¹ a ⁻¹	-1,23 t ha ⁻¹ a ⁻¹

Puuston biomassan muutoksella ennallistamisen jälkeen on hyvin suuri vaikutus siihen, millainen suon hiilivarasto on (Ojanen & Minkkinen, 2020b). Puuston biomassan lisäksi myös ennallistamisen jälkeen suolle kasvavalla sammalkasvustolla voi olla vaikutusta suon kykyyn varastoida hiiltä (Purre et al., 2019). Jos ennallistaminen toteutetaan oja täyttämällä ja patoamalla eikä puustoa kaadeta, hiilen varastoitumisen on arvioitu vähenvän hieman, sillä tällöin puuston kasvuolosuhteet heikkenevät (Ojanen & Minkkinen,

2020b). Jos tällöin suon rahkasammalkasvusto myös lisääntyy, heikkenee suon hiilidioksidin talteenottokyky entisestään (Purre et al., 2019). Kun puustoa ei kaadeta, myös puutuotteiden hiilivarasto pienenee verrattaessa tilanteeseen, jossa suolla tehdään metsätaloustoimenpiteitä (Ojanen & Minkkinen, 2020b). Jos taas suolta kaadetaan kaikki puut ennallistamisen yhteydessä, jopa kaksi kolmasosaa maanpäällisestä hiilen varastosta menetetään, sillä teollisen jatkokäytön yhteydessä puiden sisältämä hiili vapautuu hiilidioksidina ilmaan. Toisaalta, jos ojitettu suometsä hylätään eikä mitään metsätaloustai ennallistamistoimenpiteitä toteuteta, hiilen varastoitumisen on arvioitu jopa kolminkertaistuvan sadan vuoden aikana. Tämän onkin arvioitu olevan hiilen varastoitumisen kannalta paras ennallistamiskeino Suomen olosuhteissa. (Ojanen & Minkkinen, 2020b)

Vaikka ennallistamisen on kokonaisuudessaan havaittu heikentävän metsäojitetun suon hiilidioksidinielua, on myös tutkimuksia, jotka väittävät toisin. Purren et al. (2019) tutkimuksessa mitattiin hiilidioksidin nettoekosysteeminvaihtoa (eng. net ecosystem exchange, NEE), kasvien hengitystä ja fotosynteesiä yhdellä kasvukaudella metsäojituksen jälkeen ennallistetuilla ja niitä vastaavilla luonnontilaisilla soilla. Tutkimuksessa havaittiin, että ennallistamalla päästiin lähelle luonnontilaisen suon hiilidioksidinielun suuruutta, mutta luonnontilaiset suot olivat kuitenkin voimakkaampia hiilidioksidinieluja kuin niitä vastaavat ennallistetut alueet.

Ei ole siis yksiselitteistä, että ennallistaminen parantaisi metsäojitetun suon kykyä varastoida hiiltä, sillä näillä soilla myös usein puusto on maaperän lisäksi hyvin merkittävä pitkäaikainen varasto hiilelle (Ojanen & Minkkinen, 2020b). Tutkimuksia kuitenkin on siitä, että maaperän hiilidioksidipäästöt vähentyisivät ennallistamisen jälkeen (Wilson et al., 2016). Tiedetään myös, että ennallistaminen on paras vaihtoehto turvata turpeen hiilivarasto myös tulevaisuudessa, sillä ojituksen jatkuessa turpeesta voi vapautua paljon enemmän hiiltä kuin puut pystyisivät ikinä varastoimaan (Ojanen & Minkkinen, 2020b). Jos ennallistamista on tarpeen toteuttaa esimerkiksi suoluonnon monimuotoisuuden turvaamiseksi, voisi se maaperän hiilivaraston maksimoimiseksi olla järkevintä toteuttaa ravinteikkailla soilla (Taulukko 3) niin, että suolla kasvavaa puustoa kaadetaan mahdollisimman vähän.

3.2 Muut kasvihuonekaasut

Tutkimuksissa typpioksiduulipäästöjen on havaittu pienentyvän erityisesti ravinteikkailla metsäojitetuilla soilla ennallistamisen jälkeen (Laine et al., 2019; Minkkinen et al., 2020). Minkkinen et al. (2020) tutkimuksessa saatiin selville, että ensimmäisen 20 vuoden aikana ennallistamisesta typpioksiduulipäästöt ovat ravinteikkaalla suolla jopa pienempiä verrattessa luonnontilaiseen ravinteikkaaseen suohon (Taulukko 1). Vähäravinteisen

maan osalta typpioksiduulin päästöt ovat ennallistamisen jälkeen samaa suuruusluokkaa ja jopa hieman alhaisempia kuin luonnontilaisella vähäravinteisella maalla. Myös Keski-saaren (2023) tutkimuksessa havaittiin, että typpioksiduulipäästöt pienenevät ennallista-misen jälkeen ravinteikkailla metsäojitetuilla soilla lähelle luonnontilaisen suon typpiok-siduulipäästöjä.

Ennallistamisen jälkeen on havaittu kasvua suon metaanipäästöissä ravinteikkaalla sekä vähäravinteisella maalla (Taulukko 4). Tämä on odotettava tulos, sillä ennallistamisella tavoitellaan luonnontilaisen suon kaltaista tilaa, jossa metaanipäästöt ovat tyypillisiä (Saarnio et al., 2008). Metaanipäästöjen suuruuteen vaikuttaa huomattavasti ennallista-misen jälkeen suon pohjaveden pinnankorkeus, alueen kasvillisuus sekä kulunut aika ennallistamisesta. Metaanipäästöjen mittausvuosina, jolloin pohjaveden pinta on ollut korkeammalla ja maaperän kosteus on ollut tavallista suurempaa, ennallistetun alueen metaanipäästöjen on havaittu olevan hyvin lähellä ojittamattoman eli luonnontilaisen suon päästöjä. (Laine et al., 2019)

Taulukko 4. Metsäojitetun ja ennallistetun suon ravinteikkaan sekä vähäravinteisen maaperän metaanipäästöt (CH_4) (Ojanen & Minkkinen, 2020b).

	Ravinteikas	Vähäravinteinen
Metsäojitettu	$0,7 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$	$1,2 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$
Ennallistettu	$17,0 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$	$6,0 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$

Koska ennallistamisessa tavoitellaan luonnontilaisen suon kaltaista tilaa, on oletettua, että myös typpioksiduuli- ja metaanipäästöt palautuisivat takaisin luonnontilaisen suon tasolle. Positiivisten ilmastovaikutusten maksimoimiseksi typpioksiduulin osalta, ennallistamistoimenpiteitä olisi edellä esitettyjen tietojen (Taulukko 1) perusteella järkevää kohdistaa erityisesti ravinteikkaille metsäojitetuille soille. Metaanin osalta ennallistamistoimenpiteitä olisi taas järkevämpää toteuttaa vähäravinteisilla soilla, sillä silloin päästöjen kasvu olisi maltillisempaa (Taulukko 4).

Tarkasteltaessa ennallistamisen aiheuttamaa muutosta kaikkien kasvihuonekaasupäästöjen osalta (Taulukko 5), voidaan huomata, että ennallistaminen ei yksiselitteisesti vähennä metsäojitetun suon kasvihuonekaasupäästöjä, sillä metaanipäästöt kasvavat niin ravinteikkailla kuin vähäravinteisillakin soilla. Ennallistaminen kuitenkin vähentää typpioksiduulipäästöjä ravinteikkailla soilla ja maaperän hiilidioksidipäästöjä vähäravinteisilla ja ravinteikkailla soilla (Taulukko 5). Maaperän hiilidioksidipäästöjen väheneminen ei kuitenkaan ota huomioon ennallistamisen hiilivaraston muutosta esimerkiksi puuston ja

muun kasvillisuuden osalta, minkä vuoksi näiden tulosten perusteella ei voida kuvata ennallistamisen kokonaisilmastovaikutusta. Metaanipäästöt ennallistamisen jälkeen (Taulukko 4) ovat huomattavasti suurempia kuin typpioksiduulipäästöt ennallistamisen jälkeen (Taulukko 1), minkä vuoksi positiivisten ilmastovaikutusten maksimoimiseksi ennallistamisessa olisi järkevämpää keskittyä mahdollisimman maltillisiin metaanipäästöihin. Koska hiilidioksidin ja typpioksiduulin nykyiset päästöt metsäojitetuilta soilta ovat melko pieniä, on arvioitu, että ennallistamisesta aiheutuva pienikin metaanipäästöjen kasvu voisi siirtää suon ilmastoa viilentävää vaikutusta jopa kymmenillä vuosilla eteenpäin. (Ojanen & Minkkinen, 2020b)

Taulukko 5. Ennallistamisen vaikutukset ilma- ja vesistö päästöihin verrattaessa metsäojitettuun suohon. ↑ = päästöt kasvavat, ↓ = päästöt vähenevät, ↔ = ei muutosta, ? = tarvitaan lisää tutkimusta.

	Lyhyt aikaväli (<10 vuotta)		Pitkä aikaväli (>10 vuotta)	
	Vähäravinteinen	Ravinteikas	Vähäravinteinen	Ravinteikas
CO ₂	↓ ¹	↓ ¹	↓ ¹	↓ ¹
CH ₄	↑ ¹	↑ ¹	↑ ¹	↑ ¹
N ₂ O	↔ ²	↓ ²	↔ ²	↓ ²
Typpi	↔ ³	↑ ³	↓ ⁴	?
Fosfori	↑ ³	↑ ³	↓ ⁴	?
DOC*	↔ ³	↑ ³	↓ ⁴	?

¹(Ojanen & Minkkinen, 2020b), ²(Minkkinen et al., 2020), ³(Koskinen et al., 2017), ⁴(Haapalehto et al., 2014), *liuennut orgaaninen hiili (eng. dissolved organic carbon).

Ennallistamismenetelmien valinnalla ja ennallistettavan suon maaperän ravinteikkoudella on siis merkitystä siihen, millaiset ovat ennallistamisen aiheuttamat ilmastovaikutukset. On havaittu, että verrattaessa oja täyttämällä ja patoamalla tehtävää ennallistamista siihen, että metsäojitetulla suolla jatkettaisiin metsänhoitotoimenpiteitä, suon ilmastovaikutus muuttuisi viilentäväksi 10–20 vuoden jälkeen ennallistamisesta. Toisaalta, jos ennallistamiseen lisättäisiin vielä metsäojitetun suon puuston hakkuu, kuluisi yli sata vuotta ennen kuin nettopäästöt olisivat nollassa. (Ojanen & Minkkinen, 2020b)

4. ENNALLISTAMISEN VESISTÖVAIKUTUKSET

Soiden ennallistamisen vesistövaikutuksia on seurattu Suomessa jo vuodesta 1997 soiden ennallistamiseen liittyvässä Life-hankkeessa (Sallantaus, 2013). Viime vuosina on havaittu, että varsinkinkin ravinteikkaiden metsäojitettujen soiden ennallistaminen lisää lyhytaikaista ravinnekuormitusta vesistöön (Koskinen et al., 2017). Tässä luvussa käsitellään metsäojitetun suon ennallistamisen aiheuttamia vesistövaikutuksia typen, fosforin sekä orgaanisen hiilen osalta.

4.1 Typpi ja fosfori

Ravinteikkaiden metsäojitettujen soiden ennallistamisen on lyhyellä aikavälillä ennallistamisen jälkeen havaittu lisäävän typen ja fosforin ravinnepäästöjä valuma-alueella. Koskinen et al. (2017) tutkimuksessa ennallistettiin metsäojitettuja soita täyttämällä ja patoamalla ojia. Yhden vuoden ennallistamisen jälkeen kokonaistypen kokonaiskuormituksen valumavesissä havaittiin kasvavan jopa yli 30 kg ennallistettua hehtaaria kohden mesotrofisilla metsäojitetuilla soilla. Kolmen seuraavan vuoden aikana kokonaiskuormituksen kasvun havaittiin olevan 5–15 kg ennallistettua hehtaaria kohden. Ombro- ja oligotrofisilla soilla samanlaista typen kuormituksen kasvua ei havaittu.

Myös Niemisen et al. (2020b) tutkimuksessa havaittiin kokonaistypen pitoisuuksien kasvamista valumavesissä ennallistamisen jälkeen. Tässä tutkimuksessa ennallistaminen toteutettiin puskurivyöhykkeen avulla eli ojitusalueen alapuolelle tehtiin puskurivyöhykealue. Kokonaistypen pitoisuudet valumavesissä olivat suuria erityisesti ensimmäisen vuoden jälkeen ennallistamisesta, mutta myös toisen vuoden jälkeen pitoisuudet olivat korkeampia puskurivyöhykkeen alapuolella verrattuna sen yläpuolelle. Viidellä kuudesta tutkitusta alueista kokonaistypen päästöt valumavesissä kasvoivat jopa 26,5–55,5 % ensimmäisen vuoden jälkeen ennallistamisesta. Päästöjen määrä vaihteli näillä alueilla 10,1–32,1 kg:n välillä ennallistetun suon valuma-alueen pinta-alaa kohden. Valuma-alueiden pinta-alat vaihtelivat 20–50 ha:n välillä. Toisen vuoden jälkeen kokonaistypen päästöt vaihtelivat samoilla alueilla 8,3–13,5 kg:n välillä ennallistetun suon valuma-alueen pinta-alaa kohden. Tutkimuksessa ei eritelty alueita ravinteikkaiksi tai vähäravinteiksiksi, mutta typen pitoisuudet turpeessa vaihtelivat 1,76–2,28 %:n välillä ja fosforin pitoisuudet 767–990 mg/kg:n välillä näillä viidellä alueella.

Myös kokonaisfosforin osalta lyhyellä aikavälillä kuormituksen on havaittu kasvavan ennallistettaessa ravinteikkaita metsäojitettuja soita. Mesotrofisella suolla ensimmäisen

kahden vuoden aikana ennallistamisesta kokonaisfosforin kuormitus kasvoi 5–6 kg ennallistettua hehtaaria kohden per vuosi. Kolmannen ja neljännen vuoden aikana kuormitus kasvoi vuosittain noin 2 kg ennallistettua hehtaaria kohden. Kokonaisfosforin osalta myös ombrotrofisella suolla kuormituksen on havaittu kasvavan. Kuormitus tällä alueella lisääntyi 1,5 kg ennallistettua hehtaaria kohden kahden ensimmäisen vuoden aikana ennallistamisesta. (Koskinen et al., 2017)

Puskurivyöhyke-ennallistuksella kokonaisfosforin pitoisuudet valumavesissä lisääntyivät erityisesti ensimmäisen vuoden aikana ennallistamisesta. Tällöin viidellä kuudesta ennallistetusta alueesta kokonaisfosforin määrä kasvoi jopa 142–274 %. Kokonaisfosforin päästöt vaihtelivat näillä alueilla 1,2–6,5 kg:n välillä ennallistetun suon valuma-alueen pinta-alaa kohden. Valuma-alueiden pinta-alat vaihtelivat 20–50 ha:n välillä. Kuormitus puskurivyöhykkeen alapuolella oli korkeampaa kuin puskurivyöhykkeen yläpuolella vielä kaksi vuotta ennallistamisen jälkeen. Tällöin kokonaisfosforin päästöt vaihtelivat viidellä kuudesta tutkitusta alueesta 1,0–3,3 kg:n välillä ennallistetun suon valuma-alueen pinta-alaa kohden. (Nieminen et al., 2020b)

Typen vesistökuormituksen kasvu heti ennallistamisen jälkeen ravinteikkailla soilla voi johtua esimerkiksi ennallistettavan suon turpeen korkeasta rautapitoisuudesta (Kaila et al., 2016). Myös vedenpinnan noustessa suolla lisääntyvät anoksiset olosuhteet voivat lisätä typen kuormitusta vesissä (Koskinen et al., 2017). Kohonneille fosforin pitoisuuksille ravinteikkaiden soiden alapuolisissa vesissä heti ennallistamisen jälkeen ei ole yksiselitteistä vastausta. On kuitenkin havaittu, että sillä on merkitystä, miten liukenevaa ennallistettavan suon turpeen sisältämä fosfori on ja miten helposti fosfori pystyy imeytymään takaisin turpeeseen. (Kaila et al., 2016)

Pitkällä aikavälillä ennallistamisen jälkeen typen ja fosforin pitoisuuksien soiden huokosvesissä on havaittu palautuvan lähelle luonnontilaisen suon tilannetta vähäravinteisilla metsäojitetuilla soilla. Haapalehdon et al. (2014) tutkimuksessa havaittiin, että typen ja fosforin konsentraatiot huokosvesissä kasvoivat ensimmäisen viiden vuoden aikana ennallistamisesta, mutta kääntyivät laskuun, kun ennallistamisesta oli kulunut kymmenen vuotta. Viisi vuotta ennallistamisen jälkeen typen pitoisuuden ojissa mitattiin olevan noin 2,5 mg/l ja kymmenen vuoden jälkeen noin 1,5 mg/l. Luonnontilaisen suon ojien typpipitoisuuden mitattiin olevan noin 1,0 mg/l. Fosforin pitoisuus ojissa viisi vuotta ennallistamisen jälkeen mitattiin olevan noin 0,2 mg/l ja kymmenen vuoden jälkeen noin 0,1 mg/l. Luonnontilaisen suon ojissa kyseisen arvon mitattiin olevan hyvin lähellä nollaa (<0,1 mg/l).

On myös pyritty löytämään yleistettäviä malleja siihen, miten veden laatu palautuu ennallistamisen jälkeen. Näiden mallien tuloksien perusteella ei kuitenkaan voida ottaa kantaa siihen, miten veden laatu muuttuu erikseen ravinteikkailla tai vähäravinteisilla soilla. On kuitenkin havaittu, että esimerkiksi huokosveden kokonaistyyppipitoisuus laskee jo kaksi vuotta ennallistamisen jälkeen metsäojitetun suon huokosveden kokonaistyyppipitoisuutta pienemmäksi. Huokosveden pitoisuudet eivät kerro suoraan suolta valuvien vesien pitoisuuksista, mutta ne antavat arviota valumavesien pitoisuuksien suuruusluokasta. (Menberu et al., 2017)

Menberun et al. (2017) tutkimuksessa metsäojitetun suon huokosveden kokonaistyyppipitoisuuden mitattiin olevan 2 290 µg/l ja jo kaksi vuotta ennallistamisesta kokonaistyyppipitoisuuden mitattiin olevan 1 771 µg/l. Arvon havaittiin laskevan, kun lisää vuosia kului ennallistamisesta, jolloin esimerkiksi 5 vuotta ennallistamisen jälkeen huokosveden tyyppipitoisuuden mitattiin olevan 1 319 µg/l. Tämä arvo on kuitenkin vielä korkeampi kuin luonnontilaisen suon huokosveden tyyppipitoisuus, jonka mitattiin olevan 778 µg/l. Kokonaisfosforin osalta tutkimuksessa metsäojitetun suon huokosveden pitoisuuden mitattiin olevan noin 150 µg/l. Kolme vuotta ennallistamisen jälkeen myös fosforin pitoisuus laski alle metsäojitetun suon pitoisuuden ollen noin 143 µg/l. Tämäkään ei kuitenkaan ole vielä lähellä luonnontilaisen suon huokosveden kokonaisfosforipitoisuutta, jonka on mitattu olevan noin 46 µg/l.

Ennallistamisen jälkeen valumaveden kasvaneiden typpi- ja fosforipitoisuuksien vuoksi on havaittu muutoksia alapuolisten vesistöjen tilassa. Vakavimmaksi vedenlaadun riskiksi on havaittu fosforin huuhtoutumisen lisääntyminen ravinteikkailla soilla. Sen seurauksena ennallistettujen soiden alapuolisissa järvissä on havaittu vähähappisuutta ja korkeita A-klorofyllipitoisuuksia. Myös rehevöitymishaittoja järvissä on havaittu. (Sallantaus, 2013) Rehevöityminen voi aiheuttaa muun muassa järven veden laadun ja ekologisen tilan heikkenemistä sekä lisätä vesikasvillisuutta ja levien kasvua, mikä voi aiheuttaa järveen happikatoa ja lopulta esimerkiksi kalakuolemia (Sarvilinna & Sammalkorpi, 2010).

Ennallistamisen positiivisten vesistövaikutusten maksimoimiseksi tärkeää olisi kohdistaa ennallistamistoimenpiteet sellaisille alueille, joiden vesistöt eivät ole jo ennen ennallistamista rehevöityneitä. Menberun et al. (2017) tutkimuksessa ehdotetaan, että vesistöhaittoja voitaisiin minimoida, jos veden virtausta ohjattaisiin suon ojien väliseen osaan, jotta ravinteita pidäytyisi suohon, eivätkä ne huuhtoutuisi suoraan vesistöön aiheuttaen ylimääräistä ravinnekuormitusta.

Vaikka pidemmän aikavälin tarkasteluissa vähäravinteisilla soilla onkin havaittu laskua typen ja fosforin pitoisuuksissa valumavesissä (Haapalehto et al., 2014), voivat ensimmäisinä vuosina ennallistamisen jälkeen tapahtuneet kuormitukset vaikuttaa vesistöjen tilaan vielä pitkään myöhemminkin. Lisää tutkimusta typen ja fosforin pitoisuuksista tarvitaan pidemmällä aikavälillä ennallistamisen jälkeen erityisesti ravinteikkailta soilta (Taulukko 5), vaikka onkin jo tutkimustuloksia siitä, että yleisesti soiden ennallistamisen jälkeen ravinnekuormitus mahdollisesti laskee jo lyhyelläkin aikavälillä (Menberu et al., 2017).

4.2 Orgaaninen hiili

Ravinteikkaiden metsäojitettujen soiden ennallistamisen on arvioitu lisäävän lyhyellä aikavälillä myös orgaanisen hiilen pitoisuuksia valumavesissä. Ojia täyttämällä ja patoamalla suoritettussa ennallistamisessa liunneen orgaanisen hiilen (eng. dissolved organic carbon, DOC) konsentraation on mitattu kasvavan 50 mg/l:sta 250 mg/l:aan mesotrofisen suon valumavesissä ennallistamisen jälkeen. Ensimmäisen vuoden aikana ennallistamisen jälkeen pitoisuudet olivat erityisen korkeita. DOC:n kuormituksen laskettiin tällöin kasvavan jopa 1 200 kg ennallistettua hehtaaria kohden yhdellä tutkitulla alueella. Ombro- ja oligotrofisilla alueilla samanlaista kasvua ei havaittu. (Koskinen et al., 2017) Puskurivyöhyke-ennallistamisella havaittiin myös DOC:n pitoisuuden kasvua erityisesti ensimmäisen, mutta myös toisen vuoden aikana ennallistamisen jälkeen. Ennallistaminen lisäsi DOC:n pitoisuuksien määrää valumavesissä 15,7–25,3 % viidellä kuudesta tutkitusta alueesta ensimmäisen vuoden jälkeen ennallistamisesta. Tällöin DOC:n päästöt vaihtelivat 559–919 kg:n välillä ennallistetun suon valuma-alueen pinta-alaa kohden. Valuma-alueiden pinta-alat vaihtelivat 20–50 ha:n välillä. Kaksi vuotta ennallistamisen jälkeen DOC:n päästöt valumavesissä vaihtelivat 232–377 kg:n välillä ennallistetun suon valuma-alueen pinta-alaa kohden. (Nieminen et al., 2020b)

On havaittu, että kohonneella DOC:n vesistökuormituksella ennallistamisen jälkeen on yhteys siihen, millainen rautapitoisuus kyseisen suon turpeella on. Kun turpeen rautapitoisuus on korkea, ovat DOC:n päästöt myös suurempia. (Kaila et al., 2016) Ennallistaminen voi aiheuttaa suolle myös eräänlaisen stressitilanteen, jonka seurauksena DOC:n päästöt kasvavat, sillä myös ennallistaminen muokkaa suon totuttuja olosuhteita kuten ojituskin.

DOC:n pitoisuuden on havaittu laskevan vähäravinteisten metsäojitettujen soiden oja- ja huokosvesissä lähelle luonnontilaisen suon tilaa kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen. Viisi vuotta ennallistamisen jälkeen ojissa ja turvekaistaleilla DOC:n pitoisuuden mitattiin olevan noin 90 mg/l. Kymmenen vuotta ennallistamisen jälkeen sama luku oli

noin 80 mg/l. On arvioitu, että ennallistaminen voisi johtaa siihen, että hiilen huuhtoutuminen vähenee ojitetuilta soilta huomattavasti, jolloin valumavesien laatu paranee pitkällä aikavälillä. (Haapalehto et al., 2014)

Menberun et al. (2017) tutkimuksessa havaittiin hieman eroavia tuloksia edellisiin verrattuna. Tutkimuksessa havaittiin, että metsäojitetun suon huokosveden DOC:n pitoisuus laskee hyvin nopeasti ennallistamisen jälkeen alemmalle pitoisuudelle kuin ojitetun suon DOC:n pitoisuus. Kaksi vuotta ennallistamisen jälkeen DOC:n pitoisuuden huokosveissä mitattiin olevan 55,8 mg/l, kun metsäojitetuilla soilla DOC:n pitoisuudeksi mitattiin 73,4 mg/l. Viiden vuoden jälkeen ennallistamisesta pitoisuus oli laskenut jo 44,1 mg/l:aan. Pitoisuus on kuitenkin silti korkeampi kuin vastaavilla luonnontilaisilla soilla, missä DOC:n pitoisuudeksi on mitattu 34,0 mg/l.

Heti ennallistamisen jälkeen kohonneet DOC:n pitoisuudet voivat aiheuttaa veden sameutumista ja siten heikentää valumaveden kirkkautta. Myös järvien epilimnionin eli järven pintakerroksen paksuuden on havaittu pienentyvän DOC:n pitoisuuden kasvaessa. (Strock et al., 2017) Kun järvet ruskettuvat ja sameutuvat, valon määrä vedessä vähentyy ja levien sekä vesikasvien perustuotanto heikkenee. Evansin et al. (2005) mukaan alueilla, joilla DOC:n pitoisuuden on havaittu kasvavan, on havaittu myös raudan ja alumiinin konsentraation kasvua. Rauta ja alumiini voivat heikentää vesiekosysteemiä ja aiheuttaa negatiivisia vaikutuksia vesieliöihin.

Lisää tutkimusta tarvitaan vielä siitä, miten DOC:n pitoisuudet muuttuvat pitkällä aikavälillä ravinteikkailta ennallistetuilta metsäojitetuilla soilla (Taulukko 5). Vaikka onkin jo tutkimustuloksia siitä, että yleisesti metsäojitetujen soiden ennallistaminen vähentää DOC:n pitoisuuksia jo muutamassa vuodessa (Menberu et al., 2017), on tärkeää tietää mille alueille ennallistamista kannattaisi kohdistaa, jotta vesistökuormitus voidaan minimoida mahdollisimman hyvin.

Tarkasteltaessa metsäojitetujen soiden ennallistamisen kokonaisvaikutusta vesistö-päästöihin voidaan huomata, että lyhyellä aikavälillä päästöt voivat jopa kasvaa (Taulukko 5). Pitkällä aikavälillä päästöjen on havaittu kääntyvän laskuun vähäravinteisilla soilla, mutta lisää tutkimusta tarvitaan ravinteikkaiden soiden ennallistamisen vesistö-päästöistä (Taulukko 5), jotta voidaan antaa tarkempi arvio metsäojitetujen soiden ennallistamisen kokonaisvesistövaikutuksista.

5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, millaisia päästövaikutuksia metsäojitetujen soiden ennallistamisella on ilmastoon ja vesistöihin. Työ rajattiin tarkastelemaan juuri metsäojitettuja soita Suomessa, sillä Suomen soiden noin 9 miljoonan hehtaarin kokonaispinta-alasta yli puolet eli noin 5 miljoonaa hehtaaria on metsäojitettu. Työ rajautui ennallistamisen päästövaikutusten tarkasteluun, sillä metsäojituksen on havaittu lisäävän ilmasto- ja vesistöpäästöjä. Haluttiin siis selvittää, voisiko ennallistaminen parantaa metsäojituksesta aiheutuvia negatiivisia ilmasto- ja vesistövaikutuksia.

Metsäojitustoiminta on ollut Suomessa hyvin laajaa johtuen siitä, että valtio on tukenut soiden ensiojitusta hyvin vahvasti 1900-luvulla. Laajimmillaan ojitustoiminta on ollut 1960- ja 1970-luvuilla. Metsäojitusta tehtiin, sillä havaittiin, että puiden kasvuolosuhteet paranevat, kun soiden vedenpinta laskee ojituksen jälkeen. Soiden ojituksella pyrittiin alun perin parantamaan huoltovarmuutta puumateriaalin osalta, mutta myöhemmin se vakiintui osaksi metsätaloustoimintaa. Myöhemmin kuitenkin ymmärrettiin myös metsäojituksen negatiiviset ympäristövaikutukset, minkä vuoksi ojitustoiminnan tukeminen lopetettiin. Näitä negatiivisia ympäristövaikutuksia ovat esimerkiksi lisääntyneet hiilidioksidin- ja typpioksiduulipäästöt ilmaan sekä ravinnekuormituksen lisääntyminen vesistöihin.

Ennallistamisen päätarkoitus on palauttaa heikentyneitä ekosysteemejä takaisin lähelle luonnontilaa ja turvata ekosysteemien monimuotoisuus. Soiden ennallistamista tehdään yleisimmin ojaia täyttämällä ja patoamalla. Näiden toimenpiteiden lisäksi tarvittaessa esimerkiksi ojalinjoja raivataan ja puustoa kaadetaan tai suon vesiä ohjataan kunnostusojituksen yhteydessä. Myös puskurivyöhykkeen käyttö on yksi mahdollinen ennallistamismenetelmä.

Ennallistamisen vaikutus hiilen varastoitumiseen ja vapautumiseen riippuu siitä, miten ennallistaminen toteutetaan ja siitä, miten ravinteikas ennallistettavan suon maaperä on. Tarkasteltaessa pelkästään suon maaperän hiilidioksidipäästöjä saatiin selville, että ennallistaminen muuttaa päästöjen ilmastovaikutuksen niin ravinteikkaalla kuin myös vähäravinteisella suolla ilmasto viilentäväksi, kun metsäojitetulla suolla ilmastovaikutus oli lämmittävä. Nämä tulokset eivät kuitenkaan kerro ennallistetun suon kokonaishiilivaraston muutoksesta. Kokonaishiilivaraston muutosta tarkasteltaessa tulee myös ottaa huomioon se, miten metsäojitetun suon puusto reagoi ennallistamiseen ja millaista kasvus-

toa suolle kasvaa ennallistamisen jälkeen. Esimerkiksi skenaario, jossa suometsä hylätään eikä mitään ennallistamis- tai metsätaloustoimenpiteitä tehdä, on havaittu tehokkaimmaksi menetelmäksi hiilen varastoitumisen kannalta, sillä silloin puuston hiilivarasto säilyy parhaiten. Jos suo halutaan kuitenkin ennallistaa, olisi se hiilivaraston kannalta kestäväntä toteuttaa niin, että puuston kaataminen olisi mahdollisimman vähäistä.

Myös suon maaperän ravinteikkuudella on vaikutusta ennallistamisen jälkeisiin typpioksiduuli- ja metaanipäästöihin. Ravinteikkaiden soiden ennallistaminen vähentää typpioksiduulipäästöt jopa alle luonnontilaisen suon päästöjen, ollen vuosittain noin $0,05 \text{ g/m}^2$. Toisaalta taas vähäravinteisten soiden ennallistaminen olisi metaanipäästöjen kannalta järkevämpää. Vähäravinteisilla soilla metaanipäästöjen suuruus olisi ennallistamisen jälkeen vuosittain $5,5 \text{ g/m}^2$ verrattuna ravinteikkaan suon päästöihin ennallistamisen jälkeen, jotka olisivat vuosittain $16,6 \text{ g/m}^2$. Ilmastollisesti kannattavinta olisi valita ennallistamiskohde niin, että voitaisiin minimoida metaanipäästöjen kasvu, sillä kasvavat metaanipäästöt voivat kumota vähentyvien typpioksiduuli- ja hiilidioksidipäästöjen ilmastovaiikutuksen viilentävästä lämmittäväksi. Tämä tarkoittaisi siis ennallistamisen keskittämistä esimerkiksi vähäravinteisille soille.

Ennallistettavan suon maaperän ravinteikkuudella on myös vaikutusta typen, fosforin ja liuenneen orgaanisen hiilen vesistökuormitukseen. Vähäravinteisella maalla lyhyellä aikavälillä ennallistamisen jälkeen on havaittu kasvua vain kokonaisfosforin kuormituksessa. Ravinteikkaalla maalla lyhyellä aikavälillä on havaittu kuormituksen kasvua typen, fosforin ja liuenneen orgaanisen hiilen osalta. Pitkällä aikavälillä ennallistamisen jälkeen vähäravinteisilla alueilla kuormituksen on havaittu kääntyvän laskuun. Lisää tutkimusta tarvittaisiin kuitenkin pitkän aikavälin ravinteikkaan maaperän vesistökuormituksen tarkastelusta, jotta voitaisiin paremmin analysoida, millaisten soiden ennallistaminen olisi vesistökuormituksen kannalta kestäväntä.

Tarkasteltaessa metsäojitettujen soiden ennallistamisen päästövaikutuksia kokonaisuudessaan, voidaan todeta, että ennallistaminen ei yksiselitteisesti palauta metsäojituksen aiheuttamaa muutosta päästöissä takaisin luonnontilaisen suon tasolle. Ennallistaminen on kuitenkin tärkeä toimi luonnon monimuotoisuuden turvaamiseksi, turpeen hiilivaraston säilymiseksi ja on merkkejä siitä, että oikeissa paikoissa tehtynä se voi pitkällä aikavälillä vähentää soilta valuvien vesien ravinnepäästöjä.

LÄHTEET

- Aapala, K. & Similä, M. (2013). Johdanto. Teoksessa K. Aapala, M. Similä, & J. Penttinen (toim.), *Ojitettujen soiden ennallistamisopas*, Metsähallitus, Vantaa, s. 13–15. <https://julkaisut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/>
- Aapala, K., Rehell, S., Similä, M. & Haapalehto, T. (2013). Ennallistamisen tarve ja tavoitteet. Teoksessa K. Aapala, M. Similä, & J. Penttinen (toim.), *Ojitettujen soiden ennallistamisopas*, Metsähallitus, Vantaa, s. 19–23. <https://julkaisut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/>
- Autio, O., Jämsén, J., Rinkineva-Kantola, L. & Joensuu, S. (2018). *Veden palauttaminen kuivuneille suojeleusoille kunnostusojituksen yhteydessä* (Raportteja 10/2018). Etelä-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-314-668-6>
- Euroopan komissio. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. *EU Biodiversity Strategy for 2030. Bringing nature back into our lives.* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52020DC0380>
- Euroopan komissio. (2022). Nature restoration law. Saatavissa (viitattu 30.3.2024): https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/nature-restoration-law_en
- Evans, C. D., Monteith, D. T., & Cooper, D. M. (2005). Long-term increases in surface water dissolved organic carbon: Observations, possible causes and environmental impacts. *Environmental Pollution*, 137(1), pp. 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.12.031>
- Finér, L., Lepistö, A., Karlsson, K., Räike, A., Härkönen, L., Huttunen, M., et al. (2021). Drainage for forestry increases N, P and TOC export to boreal surface waters. *Science of The Total Environment*, 762, 144098. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144098>
- Gummerus-Rautiainen, P., Alanen, A., Eisto, K., Ilmonen, J., Keskinen, H.-L., Krüger, H., et al. (2021). Helmi-elinympäristöohjelma 2021–2030. Valtioneuvoston periaatepäätös. (H.-L. Keskinen, T. Rintala, & J. Siitonen, toim.). Valtioneuvosto. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-899-4>
- Haapalehto, T., Kareksela, S., & Kotiaho, J. S. (2013). Ekosysteemien ennallistamisen ja luonnonhoidon ekologia. Teoksessa K. Aapala, M. Similä, & J. Penttinen

- (toim.), *Ojitettujen soiden ennallistamisopas*, Metsähallitus, Vantaa. <https://julkaisut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/>
- Haapalehto, T., Kotiaho, J. S., Matilainen, R. & Tahvanainen, T. (2014). The effects of long-term drainage and subsequent restoration on water table level and pore water chemistry in boreal peatlands. *Journal of Hydrology*, 519, pp. 1493–1505. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.013>
- Ilvessalo, Y. (1956). Suomen metsät vuosista 1921-24 vuosiin 1951-53. Kolmeen valtakunnan metsien inventointiin perustuva tutkimus. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 47. 1958. <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/522456>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. (2021). Annex VII: Glossary [Matthews, J.B.R., V. Möller, R. van Diemen, J.S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, S. Semenov, A. Reisinger (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2215–2256, doi:10.1017/9781009157896.022.
- IPCC. (2022). Annex II: Definitions, Units and Conventions. In A. Al Khourdajie, R. van Diemen, W. F. Lamb, M. Pathak, A. Reisinger, S. de la Rue du Can, et al. (Eds.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1821–1840). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kaakinen, E., Kokko, A., Aapala, K., Autio, O., Eurola, S., Hotanen, J.-P., et al. (2018). Suot. Teoksessa T. Kontula & A. Raunio (toim.), *Suomen luontotyyppien uhanalaisuus 2018. Luontotyyppien punainen kirja – Osa I: Tulokset ja arvionnin perusteet*. Suomen ympäristökeskus ja Ympäristöministeriö, Helsinki, s. 117–170. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4816-3>
- Kaila, A., Asam, Z., Koskinen, M., Uusitalo, R., Smolander, A., Kiiikkilä, O., et al. (2016). Impact of Re-wetting of Forestry-Drained Peatlands on Water Quality—a Labor-

- atory Approach Assessing the Release of P, N, Fe, and Dissolved Organic Carbon. *Water, Air, & Soil Pollution*, 227(8), 292. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-2994-9>
- Kareksela, S., Ojanen, P., Aapala, K., Haapalehto, T., Ilmonen, J., Koskinen, M., et al. (2021). Soiden ennallistamisen suoluonto-, vesistö-, ja ilmastovaikutukset. Vertaisarvioitu raportti. *Suomen Luontopaneelin julkaisuja*, 2021/3b. <https://doi.org/10.17011/jyx/SLJ/2021/3b>
- Keskisaari, O. (2023). *N2O emissions from restored peatlands in Southern and Central Finland*. Helsingin yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-202306273337>
- Koskinen, M., Tahvanainen, T., Sarkkola, S., Menberu, M. W., Laurén, A., Sallantausta, T., et al. (2017). Restoration of nutrient-rich forestry-drained peatlands poses a risk for high exports of dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus. *Science of The Total Environment*, 586, pp. 858–869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.065>
- Laine, A. M., Mehtätalo, L., Tolvanen, A., Frolking, S., & Tuittila, E.-S. (2019). Impacts of drainage, restoration and warming on boreal wetland greenhouse gas fluxes. *Science of The Total Environment*, 647, pp. 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.390>
- Laitinen, J., Ojanen, P., Aapala, K., Hotanen, J.-P., Kokko, A., Punttila, P., et al. (2020). Soiden kasvillisuus. *Suo 71(2) — Ojitettujen soiden kestävä käyttö*, s. 141-148. Luonnonvarakeskus. VMI 12/13. Saatavissa (viitattu 26.2.2024): https://statdb.luke.fi/PxWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE__04%20Metsa__06%20Metsavarat/1.02_Kankaat_ja_suot_metsatalousmaalla.px/table/tableViewLayout2/
- Menberu, M. W., Marttila, H., Tahvanainen, T., Kotiaho, J. S., Hokkanen, R., Kløve, B., & Ronkanen, A.-K. (2017). Changes in Pore Water Quality After Peatland Restoration: Assessment of a Large-Scale, Replicated Before-After-Control-Impact Study in Finland. *Water Resources Research*, 53(10), pp. 8327–8343. <https://doi.org/10.1002/2017WR020630>
- Metsäkeskus. (2023a). Kemera-tuki suometsien hoitoon. Saatavissa (viitattu 18.3.2024): <https://www.metsakeskus.fi/fi/palvelut/kemera-tuki-suometsan-hoitoon>
- Metsäkeskus. (2023b). Suometsän hoidon tuki. Saatavissa (viitattu 18.3.2024): <https://www.metsakeskus.fi/fi/palvelut/suometsan-hoidon-tuki>
- Minkkinen, K., Ojanen, P., Koskinen, M. & Penttilä, T. (2020). Nitrous oxide emissions of undrained, forestry-drained, and rewetted boreal peatlands. *Forest Ecology and Management*, 478, 118494. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118494>
- Nieminen, M. & Sallantausta, T. (2020). Metsäojitettujen soiden vesistökuormitus. *Suo 71(2) — Ojitettujen Soiden Kestävä Käyttö*, s. 205- 209.

- Nieminen, M., Sarkkola, S., Haahti, K., Koskinen, M. & Ojanen, P. (2020a). Metsäojitet-
tujen soiden typpi- ja fosfori- kuormitus Suomessa. *Suo* 71 (1), s. 1–13.
- Nieminen, M., Sarkkola, S., Tolvanen, A., Tervahauta, A., Saarimaa, M. & Sallantaus, T.
(2020b). Water quality management dilemma: Increased nutrient, carbon, and
heavy metal exports from forestry-drained peatlands restored for use as wetland
buffer areas. *Forest Ecology and Management*, 465, 118089.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118089>
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. (2020a). Metsäojitetun suon ilmasto vaikutukset. *Suo* 71(2):
Ojitettujen Soiden Kestävä Käyttö.
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. (2020b). Rewetting Offers Rapid Climate Benefits for Tropical
and Agricultural Peatlands But Not for Forestry-Drained Peatlands. *Global
Biogeochemical Cycles*, 34(7), e2019GB006503.
<https://doi.org/10.1029/2019GB006503>
- Ojanen, P., Aapala, K., Hotanen, J.-P., Hökkä, H., Kokko, A., Minkkinen, K., et al. (2020).
Soiden käyttö Suomessa. *Suo* 71(2) — *Ojitettujen soiden kestävä käyttö*. s.115-
124. <http://suo.fi/article/10593>
- Ojanen, P., Minkkinen, K. & Regina, K. (2021). Ojituksen vaikutus maaperän kasvihuo-
nekaasupäästöihin. *Suo - Mires and peat*, 71(1).
- Päivänen, J. (2007). *Suot ja suometsät – järkevän käytön perusteet*. Metsäkustannus,
Hämeenlinna. 368 s.
- Purre, A.-H., Penttilä, T., Ojanen, P., Minkkinen, K., Aurela, M., Lohila, A. & Ilomets, M.
(2019). Carbon dioxide fluxes and vegetation structure in rewetted and pristine
peatlands in Finland and Estonia. *Boreal Environment Research*, 24(1–6), pp. 1–
11.
- Rehell, S., Similä, M., Vesterinen, P., Ilmonen, J. & Haapalehto, S. (2013a). Ennallista-
misen suunnittelu. Teoksessa K. Aapala, M. Similä, & J. Penttinen (toim.), *Ojitet-
tujen soiden ennallistamisopas*, Metsähallitus, Vantaa, s. 113–127. [https://julkai-
sut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/](https://julkai-
sut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/)
- Rehell, S., Sallantaus, T., Tahvanainen, T., Haapalehto, T. & Joensuu, S. (2013b). Soi-
den vesitalous. Teoksessa K. Aapala, M. Similä, & J. Penttinen (toim.), *Ojitettujen
soiden ennallistamisopas*, Metsähallitus, Vantaa, s. 41–53. [https://julkai-
sut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/](https://julkai-
sut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/)
- Saarnio, S., Minkkinen, K., Maljanen, M., & Laine, J. (2008). Soiden hiilitaseet ja kasvi-
huonekaasujen vaihto. Teoksessa R. Korhonen, L. Korpela, & S. Sarkkola
(toim.), *Suomi - Suoma. Soiden ja turpeen tutkimus sekä kestävä käyttö*.
- Sallantaus, T. (2013). Ennallistamisen vesistövaikutukset. Teoksessa: K. Aapala, M. Si-
milä, & J. Penttinen, *Ojitettujen soiden ennallistamisopas*, Metsähallitus, Vantaa,

- s. 167–171. <https://julkaisut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamis-opas/>
- Sallantaus, T., Vasander, H. & Laine, J. (1998). Prevention of detrimental impacts of forestry operations on water bodies using buffer zones created from drained peatlands. *Suo - Mires and peat*, 49(4).
- Sarvilinna, A. & Sammalkorpi, I. (2010). *Rehevöityneen järven kunnostus ja hoito*. Helsinki: Suomen ympäristökeskus.
- Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. (2004). *The SER International Primer on Ecological Restoration*. <https://www.ser.org/>
- Strock, K. E., Theodore, N., Gawley, W. G., Ellsworth, A. C. & Saros, J. E. (2017). Increasing dissolved organic carbon concentrations in northern boreal lakes: Implications for lake water transparency and thermal structure. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 122(5), pp. 1022–1035. <https://doi.org/10.1002/2017JG003767>
- Tahvanainen, T. & Haapalehto, T. (2013). Pintaturpeen ominaisuudet ja turpeen kertyminen. Teoksessa K. Aapala, M. Similä & J. Penttinen (toim.), *Ojitettujen soiden ennallistamisopas*, Metsähallitus, Vantaa, s. 66–71. <https://julkaisut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/>
- Tilastokeskus. (2023). Kasvihuonekaasupäästöt vähenivät vuonna 2022. Saatavissa (viitattu 11.4.2024): <https://www.stat.fi/julkaisu/cl8d190lnb47r0bvvg344apf0>
- Tirkkonen, O. O. J. (1952). Suomen metsäojitus 1900-luvun alkupuoliskolla. *Silva fenica* 72, s. 17-19. <http://hdl.handle.net/1975/9094>
- Vesterinen, P., Similä, M., Rehell, S., Haapalehto, S. & Perkiö, R. (2013). Ennallistaminen. Teoksessa K. Aapala, M. Similä & J. Penttinen (toim.), *Ojitettujen soiden ennallistamisopas*, Metsähallitus, Vantaa, s. 138–151. <https://julkaisut.metsa.fi/julkaisu/ojitettujen-soiden-ennallistamisopas/>
- Wilson, D., Blain, D. & Couwenberg, J. (2016). Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, (17), pp. 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>