



Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 98/2020

Ilmastonmuutos ja metsänhoito

Yhteenveto ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsänhoitoon

Timo Saksa (toim.)

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 98/2020

Ilmastonmuutos ja metsänhoito

Yhteenveto ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsänhoitoon

Timo Saksa (toim.)

Kirjoittajat:

Luonnonvarakeskus: Timo Saksa, Tapani Repo, Sakari Sarkkola, Anna Repo
ja Aleksis Lehtonen

Suomen ympäristökeskus: Anu Akujärvi ja Sampo Soimakallio



Viittausohje:

Saksa, T. (toim.) 2020. Ilmastonmuutos ja metsänhoito : Yhteenveto ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsänhoitoon. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 98/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 48 s.

Viittausohje yksittäiseen artikkeliin:

Repo, T. 2020. Muuttuvan ilmaston vaikutus metsiin. s. 9–16. Julkaisussa: Saksa, T. (toim.) 2020.

Ilmastonmuutos ja metsänhoito : Yhteenveto ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsänhoitoon. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 98/2020. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 48 s.

Timo Saksa, ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0002-1776-2357>



ISBN 978-952-380-114-1 (Painettu)

ISBN 978-952-380-115-8 (Verkkajulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkajulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-115-8>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittaja: Timo Saksa (toim.)

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2020

Julkaisuvuosi: 2020

Kannen kuva: Timo Saksa

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Esipuhe

Metsänhoidon suositukset uudistetaan vuosina 2020–2022 ilmastokestävyyden näkökulmasta. Tähän sisältyy ilmastonmuutoksen sopeutumisen ja ilmastonmuutoksen hillinnän toimet. Uudistus tarjoaa metsänomistajille perusteltuja vaihtoehtoja ilmastokestävyyden huomioimiseen metsänhoidossa.

Metsänhoidon suositukset perustuvat tutkimustuloksiin ja käytännön metsätaloudessa saatuihin kokemuksiin tuloksekkaasta ja vastuullisesta metsänhoidosta. Tutkitulla tiedolla on hyvin keskeinen rooli myös ilmastokestävän metsänhoidon kuvaamisessa.

Tämä Luonnonvarakeskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen yhteistyönä Tapiolle laatima raportti Ilmastonmuutos ja metsänhoito – yhteenveto ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsänhoitoon kokoaa suositusten uudistamisen kannalta tärkeää tutkimusnäyttöä. Raportti keskittyy kysymyksiin, miten muuttuva ilmasto vaikuttaa metsiin ja millaista on ilmastonmuutokseen sopeutuva metsänhoito. Raportissa ei käsitellä metsätuhoihin liittyviä haasteita. Tuhokysymyksiä tarkastellaan Tapion toteuttamassa Metsäpolitiikkafoorumi-hankkeessa 2020–2021.

Kiireiselle tiedonetsijälle suosittelen erityisesti lukua viisi, jossa on raportin keskeiset viestit tiivistetynä. Helsingin yliopisto, Itä-Suomen yliopisto ja Jyväskylän yliopisto ovat laatineet hyvät opponoinnit tästä raportista metsänhoidon suositukset -prosessin käyttöön.

Yhdessä Ilmatieteen laitoksen tuottaman raportin Ilmastonmuutoksen vaikutukset Suomessa metsänhoidon näkökulmasta kanssa tämä raportti luo vahvan ilmasto- ja metsätieteellisen perustan metsänhoidon suositusten uudistamistyölle. Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsiin ja metsien vaikutukset ilmastoon tulevat olemaan lähivuosina erittäin vahvan tutkimus- ja kehittämistyön kohteena. Näin ollen tässäkin raportissa kuvattu tutkimusnäyttö tulee täydentymään ja laajenemaan. Metsänhoidon suositusten uudistamisessa tullaan hyödyntämään myös tämä tuleva tutkimustieto.

Metsänhoidon suositukset on tarkoitettu metsänomistajien ja heitä palvelevien ammattilaisten käyttöön. Suositusten laadinnassa näkökulmana on metsänomistaja ja hänen tavoitteensa. Suositukset tarjoavat metsänomistajalle vaihtoehtoja metsien monipuoliseen hoitoon ja käyttöön.

Metsänhoidon suositukset ovat maa- ja metsätalousministeriön tarjoama palvelu suomalaiselle metsätaloudelle ja osa kansallisen metsästrategian tavoitteiden toteutusta. Suosituksilla viedään käytäntöön metsien aktiivista, kestävä ja monitavoitteista käyttöä. Tällä tähdätään kokonaiskestävään metsien hyödyntämiseen sekä metsistä saatavan hyvinvoinnin kasvuun. Suositukset valmistellaan laajassa yhteistyössä metsä-, ympäristö- ja ilmastoalan tutkijoiden, asiantuntijoiden ja tiedon käyttäjien kanssa. Metsänhoidon suositusten valmistelua ja ylläpitoa koordinoi Tapio.

Kiitän Luonnonvarakeskuksen ja Suomen ympäristökeskuksen tutkijaryhmää yhteistyöstä, erinomaisen raportin tuottamisesta ja paneutumisesta tähän tärkeään tehtävään.

Tuusulassa 25.11.2020

Olli Äijälä

Metsänhoidon suositusten ohjausryhmän puheenjohtaja, Tapio Oy

Tiivistelmä

Timo Saksa¹⁾, Tapani Repo²⁾, Sakari Sarkkola³⁾, Anu Akujärvi⁴⁾, Anna Repo³⁾ Sampo Soimakallio⁴⁾ ja Aleksis Lehtonen³⁾

¹⁾ Luonnonvarakeskus, Juntintie 154, 77600 Suonenjoki

²⁾ Luonnonvarakeskus, Yliopistokatu 6 B, 80100 Joensuu

³⁾ Luonnonvarakeskus, Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki

⁴⁾ Suomen ympäristökeskus, Latokartanonkaari 11, 00790 Helsinki

Puiden kasvu ja hiilen sidonta perustuvat hyvään sopeutumiseen vaihtelevissa ja muuttuvissa ympäristöoloissa. Ilmaston lämpeneminen yhdessä kohonneen hiilidioksidipitoisuuden kanssa lisää puiden kasvua, mutta valojaksoisuuden pysyminen muuttumattomana vähentää lämpenemisestä saatavaa nettohyötyä. Aikainen kasvun alkaminen ja myöhäinen päättymisen lisäävät kasvua ja hiilensidontaa, mutta samalla hallavaurioriski kasvaa. Lumipeitteen oheneminen ja häviäminen muuttavat maan lämpö- ja kosteusoloja ja vaikuttavat puiden kasvuun. Toistuvan jäätyksen ja sulamisen todennäköisyys maassa ja maanpinnalla lisääntyy, mikä voi vaurioittaa juuria ja haitata pienten taimien talvehtimistä. Hengityksen lisääntyminen pitkän talven aikana kuluttaa myös energiavarastoja, mikä altistaa pakkasvaurioille. Kuivuuskausien lisääntyminen on kuivuudelle altteilla kasvupaikoilla pintajuurisille puille haitallista.

Metsät toimivat raaka-aineen ja uusiutuvan energian lähteenä, mutta myös tärkeänä hiilen nieluna ja varastona. Metsäojitetuilla soilla turve on suurin hiilivarasto. Karujen ojitusalueiden turve on keskimäärin hiilen nielu, mutta ravinteikkailla kasvupaikoilla turve on hiilen lähde. Ojitusalueilla hiilen hävikkä turpeesta voidaan pienentää välttämällä liian tehokasta kuivatusta ja suosimalla peitteellisen metsänkasvatuksen menetelmiä. Lyhyellä aikavälillä tuhkalannoitus on myös keino kasvattaa ojitetun puuston hiilivarastoa.

Metsien hiilinielua voidaan kasvattaa varmistamalla nopea ja onnistunut uudistuminen, pidentämällä kiertoaikaa ja myöhentämällä harvennuksia, lannoittamalla, lisäämällä lahopuun määrää, metsittämällä ja käyttämällä jalostettua metsänviljelymateriaalia. Metsien hiilinielua pienentävät hakkuiden lisääminen, nuorten metsien osuuden voimakas lisääminen, hakkuutähteiden ja kantojen korjuu, intensiiviset harvennukset, luonnonpoistuman välttäminen tai korjaaminen sekä metsien raivaaminen muuhun maankäyttöön (rakentaminen, viljelysmaat).

Metsänhoidossa tulee pyrkiä nopeaan ja onnistuneeseen uudistamiseen, jotta päätehakkuihin jälkeistä hiilipäästöjaksoa saadaan lyhennettyä ja edistettyä puuston hiilen sidontaa. Sään ääri-ilmiöistä aiheutuviin riskeihin voidaan varautua erilaisin metsänhoitotoimenpitein, kuten esimerkiksi huolehtimalla entistä paremmin maanmuokkauksen, viljelytyön sekä viljelymateriaalin hyvästä laadusta. Jalostetun viljelymateriaalin käytöllä on mahdollisuus lisätä puuntuotosta ja hiilensidontaa jopa yli 30 %:lla jalostamattomaan materiaaliin verrattuna. Metsien sopeutumista ilmastonmuutokseen edesautetaan tarkentamalla puulajivalintaa paikkaan sidotun kasvuolosuhdetiedon pohjalta sekä perustamalla ja kasvattamalla kuusi-koivu- ja mänty-kuusi-sekametsiä. Kuusen istutuksen kohdistaminen kasvupaikoille, joilla kuivuusriski on pieni sekä laajojen kuusimetsiköiden välttäminen parantavat mahdollisuuksia hallita tuhoriskejä etenkin Etelä-Suomessa.

Metsänhoitotoimenpiteiden oikea-aikaisuudella ja toimenpiteiden sopivalla voimakkuudella sekä sekametsärakenteen ylläpidolla pyritään pitämään kasvatettavat puustot terveinä ja elinvoimaisina. Suo- metsissä tulee kehittää metsänkäsittelymenetelmiä, joilla pystytään ylläpitämään tasainen puuston

haihduntakapasiteetti ja sitä kautta vähentämään pohjaveden pinnan äärevää vaihtelua. Poimintahakuilla sekä erilaisilla pienaukko- ja kaistalahakuilla on mahdollisuus ylläpitää puuston riittävä haihduntakapasiteetti, jolloin myös kunnostusojituksen tarve vähenee.

Raportti on laadittu yhteistyössä Luken ja SYKEN tutkijoiden kanssa Tapio Oy:n toimeksiantona. Raportti on koostettu Metsänhoitosuositusten kehittämistyön taustamateriaaliksi.

Asiasanat: ilmastonmuutos, metsänhoito, hiilen sidonta, ilmastonmuutokseen sopeutuminen, ilmastonmuutoksen hillintä

Sisällys

1. Johdanto	7
2. Muuttuvan ilmaston vaikutukset metsiin	9
2.1. Lämpötilassa ja säteilyssä tapahtuvien muutosten vaikutukset.....	9
2.1.1. Vuosisykli ja sen säätely	9
2.1.2. Kasvun alkaminen ja päättyminen: tärkeä osa vuosisykliä ja sopeutumista.....	10
2.2. Sateisuudessa ja vedensaatavuudessa tapahtuvien muutosten vaikutukset.....	13
2.2.1. Maan vesipitoisuus ja puiden vedentarve	13
2.2.2. Maan märkyyden vaikutusmekanismit	14
2.2.3. Talvisadannan vaikutukset, routa	15
2.2.4. Tuuliturhoriskit	15
2.2.5. Metsäpaloriskit	16
3. Metsänkäsittelyn vaikutukset metsien hiilivarastoihin ja -nieluihin muuttuvassa ilmastossa	17
3.1. Suomen metsien ja puutuotteiden hiilivarastot ja hiilen sidonta.....	17
3.2. Hakkuiden vaikutukset metsien hiilivarastoihin ja hiilen sidontaan.....	20
3.3. Metsänkäsittelyn vaikutus hiilivarastoihin kangasmailla.....	22
3.4. Metsänkäsittelyn vaikutus hiilivarastoihin metsäojitetuilla soilla	23
3.5. Jatkuvaiteinen vs. tasaikäismetsänkasvatus.....	24
3.6. Miten muuttuva ilmasto vaikuttaa puuston ja maaperän hiileen?	26
4. Metsänhoidon keinot vastata muuttuvaan ilmastoon	29
4.1. Mitä on ilmastonmuutokseen sopeutuva metsänhoito?	29
4.2. Uudistaminen.....	29
4.2.1. Siemensadot.....	29
4.2.2. Luontainen uudistaminen ja kylvö	30
4.2.3. Maanmuokkaus.....	30
4.2.4. Istutus.....	31
4.2.5. Jalostettu viljelymateriaali	31
4.2.6. Puulajivalinta, sekametsät	32
4.3. Kasvatusvaihe	33
4.3.1. Taimikonhoito ja kasvatushakuut.....	33
4.3.2. Kasvatusmenetelmät.....	34
4.3.3. Lannoitus.....	35
5. Raportin keskeiset viestit	36
5.1. Sään ääri-ilmiöt aiheuttavat ongelmia puille?	36
5.2. Kuinka hiilitase pidetään hyvänä?.....	36
5.3. Metsänhoidon mahdollisuudet vastata ilmastonmuutokseen?	37
Viitteet.....	38

1. Johdanto

Tässä raportissa kuvataan käytettävissä olevaan tutkimustietoon ja skenaariolaskelmiin perustuen ilmastomuutoksen vaikutuksia metsien puuston kehitykseen ja hiilensidontaan sekä esitetään millä keinoilla metsänhoidossa voidaan vastata muuttuvaan ilmastoon. Tämän raportin laadinnassa ilmaston on oletettu muuttuvan kuten Lehtosen ja Venäläisen (2020) laatimassa raportissa on kuvattu. Raportin mukaan ilmastonmuutos näkyy nyt ja tulevaisuudessa lämpötilan, sademäärän, tuulisuuden sekä säteilyn muutoksina. Näitä muutoksia kuvataan lyhyesti seuraavissa kappaleissa.

1800-luvun puolivälin jälkeen ilmasto on jo lämmennyt Suomessa parilla asteella, kun keskimäärin maapallolla lämpötila on noussut samaan aikaan osapuilleen asteen verran. Tästä lämpenemisestä noin puolet on tapahtunut viimeisten 30–40 vuoden aikana, ja tällä hetkellä ilmasto lämpenee Suomessa vajaat puoli astetta vuosikymmenessä. Seuraavien noin 20 vuoden aikana vuoden keskilämpötilan odotetaan siten kohoavan Suomessa todennäköisimmin 0,5–1,5 asteella. Lämpötilan nousu ei kuitenkaan todennäköisesti tule olemaan tasaista ja talvet lämpenevät kesiä voimakkaamin. Pohjois-Suomessa lämpeneminen on voimakkaampaa kuin Etelä-Suomessa.

Sademäärien ennakoitaan Suomessa hieman kasvavan ilmaston lämmetessä. Sademäärän ennakoitu kasvu on suurelta osin seurausta lisääntyvistä talvisateista. Kesällä ilmastomallit ennustavat keskimäärin sademäärän kasvavan vain vähän ja osa malleista ennakoivat sademäärän jopa pienenevän kesällä. Suomessa sademäärän ennakoitu kasvu on hieman suurempaa maan pohjois- kuin eteläosassa. Lämpenemisen seurauksena talvisateista entistä suurempi osuus tulee vetenä. Vesisateiden osuus kasvaa etenkin alku- ja loppupalvesta, mutta vuosisadan lopulla eteläisimmässä Suomessa tammi-helmikuun sateesta voi yli puolet tulla vetenä. Tämä johtaa lumisateiden kokonaismäärän pienemiseen, vaikka talven sademäärä jonkin verran kasvaa. Lämpenemisestä ja sateisuuden muutoksista johtuen myös roudan todennäköisyys pienenee etenkin Etelä-Suomessa.

Suomen alueella kovien tuulten voimakkuuksissa ei näyttäisi tapahtuvan suuria muutoksia. Talvella, ja Pohjois-Suomessa myös keväällä, kovat tuulet näyttäisivät hieman heikentyvän. Eri ilmastomuutosmallien antamat tulokset tuulten nopeuksien muutoksista kuitenkin poikkeavat merkittävästi toisistaan. Ukkosille ja kesäisille rajuilmoille suotuisat olosuhteet näyttäisivät ilmastomallitulosten perusteella yleistyvän.

Ilmastomuutosmallit ovat melko yksimielisiä auringonsäteilyn vähenemisestä talvella ja Etelä-Suomessa myös paisteen lisääntymisestä kesällä. Jonkin verran eri mallien antamat tulokset kuitenkin poikkeavat toisistaan. Yhteenvetona voisi sanoa, että talvella auringonsäteilyn määrä joko pysyy likimain ennallaan tai vähenee hieman ja kesällä se joko pysyy likimain ennallaan tai kasvaa hieman. Lisäksi valojaksoisuuden vuodenaikaisvaihtelu pysyy ilmaston lämpenemisestä huolimatta muuttumattomana.

Tässä raportissa käytetään seuraavia termejä:

Hiilivarasto = Ekosysteemi tai sen osa, jolla on kyky sitoa tai vapauttaa hiiltä ja johon hiiltä on kertynyt/varastoitunut. Valtameret ovat maapallon suurin hiilivarasto. Metsissä hiilivarastoja ovat maanpäällinen ja maanalainen biomassa (puut ja muut kasvit), kuollut puuaines, karike ja maaperä. Lisäksi hiilivarastoja ovat myös puusta valmistetut tuotteet. Suomessa suurin hiilivarasto on soiden ja metsien maaperä ja myös kangasmailla maaperän hiilivarasto on suurempi kuin puuston hiilivarasto.

Hiilinielu = Mikä tahansa prosessi, joka poistaa hiilidioksidinekvivalenttina ilmaistuna hiilidioksidia tai muuta kasvihuonekaasua tai kasvihuonekaasun esiastetta ilmakehästä maaperään, meriin tai kasvillisuuteen. Metsä on hiilinielu, kun siihen sitoutuu hiilidioksidiekvivalentteina ilmaistuna enemmän kasvihuonekaasuja ilmakehästä kuin metsästä vapautuu, jolloin metsän hiili(ekvivalentti)varasto kasvaa.

Hiilen lähde = Mikä tahansa prosessi, joka päästää hiilidioksidinekvivalenttina ilmaistuna hiilidioksidia tai muuta kasvihuonekaasua tai kasvihuonekaasun esiastetta ilmakehään. Metsä on hiilen lähde, jos sieltä vapautuu hiilidioksidiekvivalenteina ilmaistuna enemmän kasvihuonekaasuja ilmakehään kuin metsään sitoutuu, jolloin metsän hiili(ekvivalentti)varasto pienenee.

Hiilen sidonta = Prosessi, jossa ilmakehän hiiltä siirtyy ja kertyy maaperän, merien tai kasvillisuuden hiilivarastoon.

Hiilen kierto = Hiilen biogeokemiallinen kierto ilmakehän, vesistöjen ja maaperän välillä ja siihen osallistuvat myös kasvit ja eläimet.

Hiilitase = tiettyyn järjestelmään sitoutuvan ja sieltä vapautuvan hiilen tai hiiliekvivalentin erotus. Järjestelmä voi koskea erilaisia asioita. Esimerkiksi metsän käsittelyn vaikutuksia hiilitaseeseen voidaan tarkastella puuston, maaperän, puutuotteiden, niiden valmistuksen tai niillä korvattavien tuotteiden näkökulmasta. Kokonaishiilitaseeseen lasketaan mukaan kaikki ne tekijät, joiden oletetaan muuttuvan tietyn päätöksen (esimerkiksi jatkuvaan kasvatukseen siirtymisen) myötä.

Korvausvaikutus = tietty tuote tai palvelu (esimerkiksi puutuote) korvaa sille vaihtoehdoisen tuotteen tai palvelun (esimerkiksi uusiutumattomasta materiaalista tehty tuote) ja sen valmistuksessa aiheutuneet päästöt vältetään.

Raportti on kirjoitettu Luken ja SYKEN tutkijoiden yhteistyönä. Raportin tekstien työstämiseen on osallistunut kirjoittajien lisäksi lukuisa joukko muita Luken ja SYKEN tutkijoita. Kiitämme kollegojamme saamistamme kommentteista sekä keskusteluista, joita raportin teon erivaiheissa on käyty.

2. Muuttuvan ilmaston vaikutukset metsiin

2.1. Lämpötilassa ja säteilyssä tapahtuvien muutosten vaikutukset

Tapani Repo

2.1.1. Vuosisykli ja sen säätely

Puiden kasvu ja hiilen sidonta perustuu niiden kykyyn sopeutua ympäristöoloissa tapahtuviin vuodenaikaisvaihteluihin, kykyyn kestää sään ääri-ilmiöitä pitkän elinkaaren aikana ja kykyyn sopeutua ympäristöoloissa tapahtuviin pitkän ajan muutostrendeihin (Kellomäki ym. 2005, Vapaavuori ym. 2012, Hänninen 2016). Puiden vuosisyklin säätely, ja syklin aikana tapahtuvien ilmiöiden ajoittuminen, luovat pohjan hyvälle kasvulle. Sopeutuminen ohjaa puulajisuhteiden muodostumista ilman laajamittaisia, äkillisiä ja myrskytuhoihin verrattavia metsätuhoja.

Keskeistä on puiden sopeutumiskyky muuttuvissa talveentumis-, lepotila- ja suveentumisoloissa (Vapaavuori ym. 2012). Lepotilan aikana tapahtuu myös puiden sisäisessä tilassa muutoksia, jotka ovat sopeutumisen ja uuden kasvun kannalta keskeisiä. Lisäksi kasvun ja elossa säilymisen kannalta on tärkeää abioottisten ja bioottisten tekijöiden vuorovaikutus vuosisyklin eri vaiheissa, sillä abioottisten tekijöiden heikentämät puut ovat alttiita erilaisille bioottisille tuhoille (Müller ym. 2012).

Boreaalisten puiden vuosisykli on kokonaisuus, jossa tietyt fenologiset tapahtumat seuraavat vuosi vuoden jälkeen toisiaan (Hänninen 2005, Hänninen 2016). Puiden vuosisyklin aikana tapahtuu monia fenologisia ilmiöitä sekä maanpäällisissä että maanalaisissa osissa. Näitä ovat esimerkiksi kasvun alkaminen ja päättyminen, päätesilmun muodostuminen, soluseiniin puutumisen ja karaistumisen alkaminen. Fenologisten tapahtumien ajoittumista suhteessa ympäristöoloissa tapahtuviin muutoksiin pidetään yhtenä sopeutumisen indikaattorina. Useiden ympäristötekijöiden (esim. maan rakenne ja tiiviys, kosteus, lämpötila, ravinteisuus) vaikutukset kohdistuvat ensisijaisesti juuriin, josta ne välittyvät maanpäällisten osien toimintaan. Siten maanalaisten ja maanpäällisten osien välillä on vuorovaikutus, joka vaikuttaa eri osien toimintaan. Esimerkiksi jopa puolet vuotuisesta nettofotosynteesistä ohjautuu juuriin, ja erityisesti lyhytikäisiin sienijuuriin, joten niiden merkitys metsäekosysteemien toiminnassa on merkittävä (Helmisaari ym. 2002). Näin ollen juurten osuus vuosisyklin säätelyssä ja puiden kasvussa on tärkeä.

Sopeutumisen liikkeelle panevia voimia ovat ympäristötekijöissä tapahtuvat muutokset vuosisyklin eri vaiheissa. Tärkeimpiä ympäristötekijöitä ovat ilman ja maan lämpötila, valaistus, valojaksoisuus ja maan kosteus (Repo 1993, Hänninen 2005). Maan ravinteisuus, ja maan rakenteen kautta sen huokoisuus ja vedenpidätyskyky, ovat myös tärkeitä kasvuun vaikuttavia tekijöitä (Mannerkoski 2012). Fysiologisten muutosten ja niihin liittyvien puiden sisäisen tilan muutosten seurauksena puut kykenevät kasvamaan, kun olosuhteet ovat kasvun kannalta otolliset. Ne kykenevät myös muuttamaan aineenvaihduntaansa eli aklimoitumaan, kun olosuhteet ovat kasvulle epäsuotuisat. Aklimaatiokykyyn vaikuttaa puun sisäinen tila, joka muuttuu vuosisyklin aikana.

Sopeutumista ohjaavat perinnölliset tekijät eli geenit. Eri kasvinosat reagoivatkin ympäristöoloissa tapahtuviin muutoksiin eri tavoin. Lisäksi geneettiset erot vaikuttavat siihen, että eri puulajit ja alkuperät reagoivat ympäristöoloissa tapahtuviin muutoksiin eri tavoin (Koski ja Sievänen 1985, Beuker ym. 1998). Geneettisen sopeutumisen eli adaptaation tuloksena kullekin kasvupaikalle ja siellä vallitseviin olosuhteisiin valikoituu ja kehittyy kasvupaikan olosuhteisiin sopeutuneista yksilöistä muodostunut populaatio.

Vaikka dendrokronologiaan perustuvien, lämpötilan pitkäaikaismääritysten perusteella ilmaston tulisi jäähtyä tulevina vuosikymmeninä, malliennusteiden mukaan ilmakehän kasvihuonekaasupäästöjen lisääntymisen seurauksena ilmasto tulee lämpenemään (Asikainen ym. 2012, Mielikäinen ym. 2012). Ennusteiden mukaan Suomen oloissa kesäaikaisen lämpenemisen lisäksi erityisesti talvilämpötilat tulevat nousemaan. On ennustettu, että sään ääri-ilmiöt, kuten kuivuus, mutta myös voimakkaat sateet, tulevat lisääntymään. Kasvukauden pidentyminen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kohoaminen potentiaalisesti lisäävät puiden kasvua (Kellomäki ym. 1996, 2005). Talviaikaisten olosuhteiden muutoksiin liittyy lumipeitteen oheneminen, maanpinnan jäätymis-sulamissykliin lisääntyminen ja talvitulvien lisääntyminen, jotka voivat vaikuttaa merkittävästi boreaalisten metsäekosysteemien toimintaan.

2.1.2. Kasvun alkaminen ja päättyminen: tärkeä osa vuosisykliä ja sopeutumista

Vaikka vuosisyklin aikana fysiologinen kehitys voi joissakin tapauksissa pysähtyä ja mennä jopa taaksepäin, fenologinen kehitys ei voi peruuttaa (Hänninen 2016). Näin ollen kasvun käynnistyttyä, kasvu voi hetkellisesti hidastua, mutta ei mennä taaksepäin. Verson pituuskasvutapa (ennalta määräytynyt/vapaa) on yksi fenologiaan vaikuttava ominaisuus, johon vaikuttaa puulaji ja ikä (Koski ja Sievänen 1985). Sen sijaan juurissa ei ole vastaavanlaista kasvutapaan liittyvää ennalta määräytynyttä ominaisuutta, vaan ne kasvavat, kun olosuhteet ja kasvuun käytettävissä olevat resurssit sen sallivat.

Keväällä maanpäällisten ja maanalaisten osien kasvu alkaa ja kasvunopeus lisääntyy, kun vuorokauden keskilämpötila nousee n. +5°C kynnyksarvon yläpuolelle, mutta vähäistä kasvua voi ilmetä jo alhaisemmissakin lämpötiloissa (Lyr ja Hoffmann 1967, Domisch ym. 2001). Keväistä kasvun alkamista edeltää lepovaiheen aikana tapahtunut silmun lepotilan purkaantuminen, ja silmun kasvukyvyyn palautuminen erityisesti viileiden nolla asteen yläpuolella olevien lämpötilojen vaikutuksesta (Hänninen 2016). Myös kasvun päättymisen ja karaistumisen alkamisen jälkeen lyhytaikaiset pakkaslämpötilat voivat saada aikaan lepotilan purkaantumisen (Rinne ym. 1996). Nykyilmastossa tällaisia viileitä lämpötiloja esiintyy lepokauden aikana riittävästi, että boreaalisten puiden silmulepo ehtii purkaantua. On myös oletettavaa, että tulevaisuudessa boreaalisten alueiden talvi-ilmasto ei lämpene siinä määrin, että silmulevon purkaantuminen vaarantuisi. Näin ollen lämpötilan nousu ja lämpösummayksiköiden kertyminen tulee olemaan keskeinen kasvun käynnistymisen liikkeelle paneva tekijä myös tulevaisuudessa. Päivänpituuden vaikutus pituuskasvun käynnistymiseen suhteessa lämpötilaan on Suomessa yleisimmin kasvavilla puulajeilla nykytietämyksen mukaan vähäinen. Mikäli roudan sulaminen ja maan lämpeneminen viivästyy, alhainen maan lämpötila voi hidastaa kasvun alkamista (Jyske ym. 2012, Repo ym. 2014).

Kasvukauden käynnistymiseen liittyy pakkasvaurioriskin mahdollisuus (Hänninen 2005). Pakkasvaurioriskissä on kysymys karaistuneisuuden purkaantumisen ja kasvun alkamisen ajoittumisesta suhteessa pakkaslämpötilojen esiintymiseen maantieteellisesti erilaisilla kasvupaikoilla. Golf-virta on tärkeä Fennoskandian säätilaan vaikuttava tekijä. Ilman sen tuomaa lämpöä, lämpötilat olisivat Suomessa huomattavasti nykyistä alhaisempia. Vaikka Golf-virran kulkureittiä koskeviin tulevaisuuden ennusteisiin liittyy epävarmuutta, on todennäköistä, että talviset ja keväiset pakkaslämpötilat ja niiden vaihtelut tulevat tuskin häviämään tulevaisuudessakaan. Koska puiden karaistuneisuuden purkaantuminen on solutasolla heikosti palautuva prosessi, lämpöjaksoa seuraavan kylmän jakson aikana karaistuneisuus ei palaudu lämpöjaksoa edeltävälle tasolle (Repo 1991, Leinonen ym. 1997). Siten aikaiset lämpöjaksot ja niiden aikana tapahtuva karaistuneisuuden purkaantuminen voivat lisätä niiden puulajien ja alkuperien pakkasvaurioriskiä, jotka aloittavat kasvunsa muita aikaisemmin (Hänninen 2005).

Puiden uusi verso, lehdet, neulaset ja juuret ovat yleensä herkimpiä vaurioitumaan pakkaslämpötiloissa. Pituuskasvun alkamisen aikoihin esimerkiksi männyn vanhat neulaset ja puhkeamassa olevat silmut kestävät kuitenkin huomattavan alhaisia pakkaslämpötiloja, joten niiden vaurioitumisriski on silloin alhainen (Repo ja Pelkonen 1986, Repo 1992). Verson pakkaskestävyys heikkenee nopeasti

pituuskasvun edetessä, ja se vaurioituu jo muutaman pakkasasteen lämpötilassa, kun pituuskasvu on nopeimmillaan (Rikala ja Repo 1987). Sen sijaan männyn kanssa samalla paikalla kasvavien kuusen silmujen puhkeaminen vaatii korkeamman lämpösumman ja tapahtuu siten hieman myöhemmin (Repo 1992). Kuusen uudet, vastapuhjenneet kerkät ovat kuitenkin herkkiä pakkaselle, samaan tapaan kuin koivun uudet lehdet. Juuret ovat suojassa maassa, joten ne eivät vaurioidu herkästi keväällä lyhytaikaisten pakkasten seurauksena, kenties taimitarhataimia lukuun ottamatta. Sen sijaan pitempiaikainen maan jäätyminen esimerkiksi lumettomina pakkastalvina voi lisätä juuristovaurioiden riskiä (Tierney ym. 2003).

Ennalta määräytyneen kasvutavan lajeilla (esim. kuusi ja mänty) verson pituuskasvu päättyy, kun tietty lämpösumma (vuorokauden keskilämpötilan $+5^{\circ}\text{C}$ ylittävät lämpötilat laskettu yhteen, yksikkönä 'degree days' d.d.) kasvukauden alusta lukien on kertynyt. Männyllä ja kuusella kyseinen lämpösumma on noin 450–500 d.d., jossa esiintyy jonkin verran alkuperästä aiheutuvaa vaihtelua (Koski ja Sievänen 1985, Repo ym. 2000). Poikkeuksena ovat taimet, joilla on elinkaarensa alkuvaiheissa vapaa kasvutapa. Niillä pituuskasvu päättyy yön pituuden ja lämpötilan yhteisvaikutuksen tuloksena. Myös koivulla on vapaa kasvutapa ja sen kasvu päättyy yön pituuden lisääntymisen ja lämpötilan alenemisen yhteisvaikutuksen tuloksena (Koski ja Sievänen 1985). Lisäksi eteläiset ja pohjoiset alkuperät reagoivat yön pituuden ja lämpötilan muutoksiin eri tavoin. Rungon paksuuskasvu ja neulasten pituuskasvu päättyy, kun yhteyttäminen syksyä kohden heikkenee. Niiden kasvun, kuin myös juurten kasvun päättymisessä ei ole kysymys päivänpituusreaktiosta sinänsä, tai sitä ei ole ainakaan selvästi osoitettu, vaan kysymys on lähinnä valomäärän vähentymisestä sekä muutoksista yhteytystuotteiden jakaantumisessa maanpäällisen ja maanalaisen osan välillä. Juurten kasvua säätelevät maan lämpötila ja kosteus (Lyr ja Hoffmann 1967). Hienojuurten kasvussa on puulajista ja kasvuoloista aiheutuvaa syklistyyttä, mikä johtuu yhteyttämisnopeudessa esiintyvistä vaihteluista sekä yhteytystuotteiden jakaantumisesta maanpäällisten ja maanalaisten osien kesken kasvukauden aikana. Tällä hetkellä tunnetaan vielä heikosti, kuinka ympäristöolojen vaihtelut vaikuttavat juurten kasvun syklistyyteen ja yhteytystuotteiden jakaantumiseen maanpäällisen ja maanalaisen osan välillä.

Kun kasvukauden on ennustettu pitenevän, verson pituuskasvun päättymisen lämpösummariippuvuus johtaa siihen, että entistä pienempi suhteellinen osuus kasvukaudesta käytetään pituuskasvuun. Sen sijaan suurempi osuus kasvukaudesta käytetään päätesilmun ja sen alkeisversojen muodostumiseen, neulasten pituuskasvuun, rungon paksuuskasvuun ja juurten kasvuun. Mikäli muut ympäristöolot esimerkiksi kosteuden suhteen ovat suotuisat, alkeisversojen muodostumiseen käytettävissä olevan jakson pidentyessä niiden määrä ja alkeisversojen väliin muodostuvien solujen määrä voi kasvaa. Tällöin myös seuraavan kasvukauden pituuskasvu lisääntyy, mikä kompensoi lyhentyneestä suhteellisesta pituuskasvujaksosta aiheutuneen potentiaalisen kasvun menetyksen. Suotuisissa oloissa alkeisversojen määrän lisääntyminen johtaa neulasmäärän lisääntymiseen, neulasten pidentymiseen, rungon paksuuskasvun ja juurten kasvun lisääntymiseen. Näiden kasvun kannalta positiivisten vaikutusten edellytyksenä on ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden lisääntyminen. Kammiokokeissa lämpötilan kohoaminen ei yksin lisännyt merkittävästi männyn kasvua, mutta vaikutus erityisesti rungon paksuuskasvuun oli merkittävä, kun lämpötilan kohoaminen tapahtui yhdessä kohonneen hiilidioksidipitoisuuden kanssa (Kellomäki ja Peltola 2005, Kilpeläinen ym. 2005). Pelkkä lämpötilan nousu lisää hengitystä, mikä vähentää kasvuun käytettäviä resursseja.

Koska verson pituuskasvu päättyy eri alkuperillä likimain saman lämpösumman saavuttamisen jälkeen, talveen valmistaviin prosesseihin jää pohjoisen oloissa vähemmän aikaa kuin etelässä, missä kasvukausi on pitempi. Jos kasvukausi pitenee myös pohjoisessa, kuten on ennustettu, tilanne kasvun ja talveentumisen kannalta paranee. Tätä tukevia havaintoja on saatu pitkäaikaisissa alkuperäsiirtokokeissa, joissa pohjoisia alkuperiä on kasvatettu eteläisillä kasvupaikoilla yhdessä paikallisten ja etelämästä siirrettyjen alkuperien kanssa (Beuker 1994a, b). Niissä pohjoisten alkuperien kasvu oli parempaa kuin alkuperäisillä kasvupaikoilla, mutta kuitenkin heikompaa kuin paikallisilla ja etelämpää

siirretyillä alkuperillä. Myös mallisimuloinnit männyille osoittivat, että kasvukauden alhaisen lämpösummakertymän tuloksena syntyy rungoltaan paksumpia puita kuin korkeammilla lämpösummilla (Kellomäki ym. 2008). Alkuperäsiirtokokeissa havaittiin myös, että pohjoiset alkuperät aloittavat karistumisen aikaisemmin kuin eteläiset (Beuker ym. 1998, Repo ym. 2000). Tämä indikoi sitä, että niiden kasvuprosessit päättyvät eri aikaan. Tämän mukaan kasvukauden lopulla pohjoiset ja eteläiset alkuperät reagoivat eri tavoin yön pituudessa ja lämpötilassa tapahtuviin muutoksiin. Sen sijaan karistuneisuuden purkaantumisen ajoituksessa keväällä, eikä myöskään talviaikaisessa maksimaalisessa pakkaskestävyydessä, havaittu alkuperien välillä eroja (Repo ym. 2001, Nilsson 2001). Havupuista poiketen koivulla ei ole samantapaista kasvutapaan liittyvää, silmurakenteisiin edellisen kasvukauden aikana tallentuvaa rajoitetta, jotka vaikuttaisivat seuraavan vuoden kasvuun (Koski ja Sievänen 1985). Siten koivun voi olettaa hyötyvän kasvutapansa puolesta kasvukauden pidentymisestä havupuita enemmän, mikäli alkuperä on muuttuneisiin valaistus- ja lämpötilaoloihin sopiva (Kellomäki ym. 2005).

Yksi ilmaston lämpenemiseen liittyvä paradoksi liittyy päivänpituuteen. Vaikka kasvukausi potentiaalisesti pitenee lämpenemisen seurauksena, yhteyttämisen kannalta keskeisen tekijän, valojakson, pituus ei muutu. Osa yhteyttämässä tuotetusta energiasta kuluu kasvuun ja ylläpitohengitykseen, ja osa soluhengitykseen pimeässä (Kellomäki ja Peltola 2005). Mitä pitempi on pimeäjakso suhteessa valojaksoon, sitä suurempi on pimeähengityksessä kulutettu energia. Näin ollen yhteyttämässä tuotetun ja hengityksessä kulutetun energian suhde vaikuttaa siihen, mikä on kasvukauden lämpenemisestä saatu nettohyöty. Nettohyöty pienenee kasvukauden loppua kohden, kun yön- ja päivänpituuden suhde ja päivääikainen valomäärä muuttuvat hengitystä suosiviksi. Myös talviaikaisen hengityksen mahdollinen lisääntyminen 0°C korkeammilla lämpötiloissa kuluttaa erityisesti havupuiden energia- varastoja. Tällöin niiden kyky sietää pakkaslämpötiloja heikkenee ja pakkasvaurioriski kasvaa (Ögren ym. 1997). Myös kevätahavaan liittyvien solutason muutosten riski lisääntyy talviaikaisen hengityksen lisääntymisen seurauksena (Tranquillini 1982, Ögren ym. 1997). Erilaisilla kasvupaikoilla kasvavien puiden ja alkuperien yhteyttämisen ja hengityksen väliseen problematiikkaan muuttuvissa ilmasto-oloissa liittyy kuitenkin vielä paljon epävarmuutta.

Lumipeitteellä on tärkeä merkitys boreaalisten metsäekosysteemien toiminnassa. Se on tehokas lämmön eriste, mutta heijastaa hyvin myös tulevaa auringonsäteilyä takaisin ilmakehään. Eristeenä se vaikuttaa maanpinnan ja maan lämpö- ja kosteusoloihin ja siten pintakasvillisuuden ja juurten kasvuympäristöön. Ilman lumisuojaa pienet taimet ovat alttiita lämpötilavaihteluille, jäätymis-sulamissykleille ja auringon säteilyn aiheuttamalle kuivumiselle erityisesti kevättalvella (Domisch ym. 2018, Tranquillini 1982). Lumipeite suojaa myös puiden pintajuuria talvipakkasilla. Ohut lumipeite tai sen puuttuminen johtaa maan lämpötilan laskuun ja roudan lisääntymiseen, joka voi olla juurten kannalta haitallista ja heikentää kasvua jopa vuosien viiveellä (Tierney ym. 2003, Repo ym. 2014, Repo ym. julkaisematon käsikirjoitus). Keväällä taas lumipeitteen puuttuminen lisää auringon säteilyn sitoutumista maahan, mikä nopeuttaa maan lämpenemistä ja edistää kasvun alkamista. Toisaalta paksu lumipeite ja sen hidas sulaminen keväällä lisäävät maan kosteutta, joka on kasvukauden käynnistymisen kannalta edullista.

Yhteenveto puiden vuosisyklin säätelystä

Puiden kasvun ja hiilen sidonnan edellytys on hyvä sopeutuminen vallitseviin olosuhteisiin. Sopeutuminen pohjautuu vuosisyklin aikana tapahtuvien ilmiöiden oikea-aikaisuuteen.

Vuosisykli on kokonaisuus, jossa tietyt fenologiset tapahtumat seuraavat vuosi vuoden jälkeen toisi-aan. Maanalaiset ja maanpäälliset osat ovat vuorovaikutuksessa keskenään vuosisyklin aikana.

Ympäristötekijät panevat vuosisyklin liikkeelle, mutta perintötekijät ohjaavat sitä. Lämpötila ja valaistus/valojaksoisuus ovat tärkeimmät vuosisyklin liikkeelle panevat tekijät. Talvi on tärkeä osa puiden vuosisykliä ja siten boreaalisten puiden sopeutumista.

Ilmaston lämpeneminen yhdessä kohonneen ilman hiilidioksidipitoisuuden kanssa lisää puiden kasvua. Aikainen kasvun alkaminen ja myöhäinen päättymisen lisäävät biomassan tuotosta ja hiilensidontaa, mutta samalla myös pakkasvaurioriskiä.

Puiden kasvutapa (ennalta määrätynyt/vapaa) vaikuttaa pituuskasvun päättymisen ajoittumiseen, ja siten epäsuorasti kasvuresurssien jakaantumiseen maanpäällisten ja maanalaisten osien kesken ja myös puiden sopeutumiseen.

Ilmastonmuutoksen seurauksena yön pituus ei muutu. Kasvukauden lopulla ilmaston lämpenemisen seurauksena lisääntyneessä hengityksessä kulunut energia pienentää kasvukauden piteneemisestä saatavaa nettohyötyä.

Talvilämpötilojen kohoaminen lisää puiden talviaikaista hengitystä, mikä kuluttaa myös energiavaroja ja altistaa pakkasvaurioille.

Lumipeitteen muutokset lisäävät maan ja maanpinnan toistuvan jäätyneen ja sulamisen todennäköisyyttä, mikä voi vaurioittaa juuria ja haitata erityisesti pienten taimien talvehtimistä.

2.2. Sateisuudessa ja vedensaataavuudessa tapahtuvien muutosten vaikutukset

Tapani Repo

2.2.1. Maan vesipitoisuus ja puiden vedentarve

Maan vesipitoisuus on keskeinen puiden kasvuun vaikuttava tekijä. Vesipitoisuus ja veden olomuoto vaihtelevat vuodenaikojen, topografian ja kasvupaikan maan rakenteen mukaan. Optimaalinen maan vesipitoisuus, johon vaikuttavat maan hienorakenne ja vedenpidätysominaisuudet, on juurten vedenoton ja kasvun kannalta tärkeää (Mannerkoski 2012). Liian kuiva tai liian märkä maa heikentävät kasvua.

Puiden vedentarve vaihtelee vuodenaikojen, puiden iän ja vuosisyklin vaiheen mukaan. Fysiologisessa mielessä vedellä on kolme päätehtävää. Se on tärkeä liuotin, jonka mukana kasvuprosesseissa tarvittavat ravinteet ja eri prosesseissa syntyvät yhdisteet liikkuvat. Rungossa tapahtuva nestevirtaus perustuu veden pintajännitykseen ja kapillaarivoimiin, joiden seurauksena johtosolukoihin muodostuu yhtenäinen vesipatsas. Jos vesipatsas katkeaa esimerkiksi kuivuuden vaikutuksesta, veden kulku juurista versoon ehtyy. Toinen tehtävä liittyy yhteyttämiseen. Vaikka yhteyttämässä kuluva vesimäärä on vain muutamia prosentteja juurten ottamasta ja lehtien/neulasten haihduttamasta kokonaisvesimäärästä, ilman nestemäistä vettä yhteyttäminen ei toimi ja kasvun raaka-aineina käytettäviä sokereita ei synny. Kolmas tehtävä liittyy puiden lämpötilan säätelyyn. Suurin osa juurten ottamasta vedestä kuluu

haihduttamiseen. Haihdunnan viilentävän vaikutuksen ansiosta lehtien ja neulasten lämpötila ei nouse liian korkealle. Jos veden kulku juuristosta versoon katkeaa, haihdunta heikkenee ja solukon lämpötila nousee solujen toiminnan kannalta liian korkealle.

Kasvukauden aikana puiden haihdunta, ja siten vedentarve, asteittain lisääntyy valaistuksen lisääntymisen ja uusien neulasten/lehtien kasvun myötä. Aurinkoisina kesäpäivinä isot puut voivat haihduttaa satoja litroja vettä eli hehtaarisella haihdunta voi olla useita tonneja. Kohonnut ilman hiilidioksidipitoisuus lisäsi männynllä vedenkäytön tehokkuutta eli sitä kuinka paljon yhteyttämisessä kuluu vettä suhteessa sidottuun hiilidioksidimäärään (Kellomäki ja Peltola 2005). Korkea ilmankosteus sen sijaan saa aikaan ilmarakojen sulkeutumisen ja haihdunnan vähenemisen, jolloin hiilidioksidin otto laskee heikentäen kasvua. Tätä vaikutusmekanismia on esitetty yhtenä mahdollisena ilmastomuutoksen seurauksena, mutta sen todennäköisyyteen vaikuttaa ennustetun lisääntyneen sadannan vuotuinen jakaantuminen (mm. Sellin ym. 2017, Oksanen ym. 2019). Kasvukauden lopulla lehtien ja neulasten vanheneminen ja variseminen, valomäärän väheneminen, yön pitempi kasvu ja lämpötilan aleneminen hidastavat elintoimintoja, jolloin vedentarve ja haihdunta vähenevät.

Pintajuurisena puuna kuusi on herkempi vedenpuutteesta aiheutuvalle stressille kuin mänty. Siten kasvupaikalla ja maalajilla on merkitystä puulajien menestymiseen kuivina kasvukausina. On esitetty, että merkittävä määrä viime vuosien metsätuhoista esimerkiksi Saksassa johtuu kasvupaikalle sopimattomasta puulajista, puiden kunnan heikkenemisestä kuivuusstressin vaikutuksesta ja näin muodoin altistumisesta bioottisille tuhoille. Koivu voi kuivuuden seurauksena varistaa lehtensä ja sillä tavoin selvittää stressitilanteesta. Sen sijaan havupuille neulasten variseminen kuivuuden seurauksena voi olla kohtalokasta. Normaalivuosina sadanta ylittää puiden ja metsämaan kautta tapahtuvan haihdunnan, mutta ilmastomuutos voi muuttaa tilannetta pintajuuristen kuusien kannalta heikompaan suuntaan. On myös oletettavaa, että saman lajin eri genotyyppien välillä on eroja kuivuuden sietokyvyssä, mutta niistä tiedetään tällä hetkellä vähän (Possen ym. 2015).

2.2.2. Maan märkyyden vaikutusmekanismit

Jos maa on märkää, maassa olevat ilmahuokokset täyttyvät vedellä ja maan happipitoisuus laskee. Juuret tarvitsevat toimiakseen happea, joten liikakosteudesta aiheutuva maan happivaje heikentää juurten energian saantia ja siten niiden toimintaa (Crawford 2003). Erityisesti sellaisilla turvemailla, joilla pohjavesi nousee juuristokerrokseen, puut voivat kärsiä maan liikakosteudesta. Myös hienojakoisilla kivennäismailla puut ovat alttiita märkyyden haittavaikutuksille (Repo ym. 2017).

Puulaji ja vuosisyklin vaihe vaikuttavat siihen, kuinka herkkiä puiden juuret ovat liikakosteudesta aiheutuvalle happivajeelle (Pelkonen 1975, 1979). Lepovaiheen aikana juurten fysiologinen aktiivisuus on alhaisempi kuin kasvukaudella, joten ne sietävät lepokaudella myös happivajetta paremmin (Wang ym. 2016, Roitto ym. 2019). Eri puulajien juurten happivajeen sietokyvyn vaihtelua kasvukaudella ei tunneta tarkasti, mutta sen oletetaan olevan havupuilla alhaisimmillaan kasvukauden lopulla. Kasvukauden keskivaiheilla vähähappisissa ja hapettomissa oloissa juurten kuolleisuus lisääntyy muutamien päivien viiveellä ja nousee merkittävästi 2–3 viikon altistuksen jälkeen, jolloin vaikutukset ilmenevät myös maanpäällisten osien toiminnassa (Repo ym. 2016, 2020). Näin ollen lyhytaikaiset rankkasateet ja kesätulvat voivat aiheuttaa ohimeneviä häiriötä juurten toiminnassa (Domisch ym. 2020), erityisesti sellaisilla kasvupaikoilla, joilla maan vedenpidätyskyky on suuri (Repo ym. 2017). Jos vähähappinen tila päättyy riittävän ajoissa, puut voivat palautua stressitilanteesta kasvattamalla uusia juuria kuolleiden tilalle.

Koska ohutjuurten kuolleisuus lisääntyy vähähappisissa oloissa, on oletettavaa, että pitkäaikainen pohjavedenpinnan nousu ohjaa juurten kasvua maan pintaosiin muuttaen juurten syvyysjakamaa. Tämä voi lisätä puiden kaatumisriskiä myrskyn ja/tai lumikuorman vaikutuksesta, kun pystyssä pysymisen

kannalta tärkeitä, alaspäin suuntautuneita juuria ei ole. Puulajeista hieskoivun on havaittu sietävän vähähappisia oloja rauduskoivua paremmin, minkä on selitetty johtuvan juuriston erilaisesta anatomisesta rakenteesta. Myös männyllä on havaittu kohonneen pohjavedenpinnan aiheuttamaa rakenteellista sopeumaa. Saman lajin eri genotyyppien välillä lienee märkyyden suhteen kestävyyseroja, mutta niistä tiedetään tällä hetkellä vähän.

2.2.3. Talvisadannan vaikutukset, routa

Talviaikaisen sadannan on ennustettu lisääntyvän ilmastomuutoksen seurauksena. Sadannan olomuodon ennustamisen hankaluus vaikeuttaa sadannan lisääntymisestä metsille koituvien hyötyjen ja haittojen arviointia. On todennäköistä, että mantereisilla alueilla sade tulee jatkossakin pääosin lumena, mereisillä alueilla vetenä ja välialueilla sekä lumena että vetenä. Jos lämpötilat liikkuvat 0°C ympäristössä, on todennäköistä, että sade tulee lumena. Tällöin puiden lumituhoriskit kasvavat erityisesti tykkylumelle alttiilla korkeilla kasvupaikoilla. Puiden lumituhoriskien onkin ennustettu lisääntyvän Pohjois-Suomessa ja vähenevän Etelä-Suomessa (Venäläinen ym. 2020). Myös alijäähtyneen veden kertyminen puihin lisää katkeamisriskiä. Puihin kertyvän lumen ja jään aiheuttamien tuhojen ennustaminen on kuitenkin vaikeaa, koska ne ovat yleensä paikallisia, mutta ilmaantuessa aiheuttavat metsissä huomattavia tuhoja.

Jos sade tulee vetenä, talvitulvien lisääntyminen on mahdollista. Koska juurten aineenvaihdunta ja energiatarve on kylmässä maassa alhainen, talvitulvien aiheuttamat riskit puiden kasvuun ovat vähäiset (Roitto ym. 2019). Kosteaa maata voi päinvastoin edesauttaa alkukesän kasvua. Juurten vaurioriskit kuitenkin lisääntyvät, mikäli vedellä kyllästynyt maa talvella jäätyy, kuten havaittiin lepotilan aikana toteutetussa koivun taimien tulvastreessikokeessa (Repo ym. julkaisematon käsikirjoitus). On myös mahdollista, että talvisadannan lisääntyminen, kuin myös lumen sulamis-jääntymissykliä lisääntyminen aiheuttavat jääkerroksen muodostumista maan pinnalle. Tällaiset olot ovat haasteellisia erityisesti pienille taimille (Domisch ym. 2018, 2019). Kevättulvien vaikutus puiden kasvuun ei yleensä ole merkittävä, koska tulvatilanne on lyhytaikainen ja maan happitilanne palautuu normaaliksi ennen kasvun alkamista. Hienojakoiset kivennäismaat ovat kuitenkin poikkeus, sillä siellä maankosteus voi säilyä korkealla pitemmän aikaa ja haitata juurten toimintaa ja puiden kasvua (Repo ym. 2017).

Roudan esiintymistä pidetään yhtenä merkittävänä puuston kasvun alueellisia eroja selittävänä tekijänä (Solantie 2003). Mitä ohuempi on lumikerros, sitä enemmän on routaa, mikä heikentää puiden kasvua. Runsaslumisilla alueilla taas routaa on vähän, ja siellä puiden kasvu on ohutlumisia alueita parempaa, elleivät kasvukauden pituus ja ravinteiden saatavuus ole rajoittavina tekijöinä. Ilmastomuutosennusteiden mukaan roudan määrä tulee vähenemään tulevaisuudessa. Näin lienee sellaisilla alueilla, joilla routaa esiintyy suojaavan lumipeitteen vähäisyyden vuoksi nykyilmastossa merkittävästi. Ilmastomuutosennusteissa on saanut vähän huomiota se mahdollisuus, että lumirajan siirtymisen vuoksi roudan esiintyminen lisääntyy sellaisilla alueilla, joilla sitä esiintyy tällä hetkellä vähän lumipeitteen paksuuden vuoksi (Groffmann ym. 2001, Kellomäki ym. 2010). Näillä alueilla roudan osuus yhtenä puuston kasvua rajoittavana tekijänä tulee ilmeisesti lisääntymään.

2.2.4. Tuulituhoriskit

Puiden kannalta haitallisia myrskytuulia esiintyy ympäri vuoden, mutta vähiten kuitenkin kesäkuukausina (Venäläinen ym. 2020). Roudalla on tärkeä merkitys puiden juurten ankkuroinnissa maahan. Roudan puuttuminen lisää siten myrskytuhojen riskiä. Merkittävä osa vuotuisista maksimaalisen tuulen nopeuksista esiintyy talvella, kun maa on jäässä. Eri kasvupaikoilla osuus vaihtelee Etelä- ja Keski-Suomessa välillä 20–50% ja Pohjois-Suomessa välillä 40–65%. Ennusteiden mukaan myrskytuhoriski kasvaa tulevaisuudessa roudan esiintymistodennäköisyyden pienentyessä (Kellomäki ym. 2005, Müller ym.

2012). Myrskytuhoriskien todennäköisyys kasvaa avohakkuualojen reunoilla. Lisäksi vanhat kuusikot, joilla on tiheä latvus, ovat alttiita myrskytuulien vaikutuksille.

2.2.5. Metsäpaloriskit

Metsäpaloriskiin vaikuttaa merkittävästi haihdunnan ja sadannan välinen suhde. Lämpötilan ennustettu kohoaminen kasvukaudella lisää haihduntaa, jolloin kuivuuskaudet lisääntyvät. Tällöin myös metsäpaloriskien mahdollisuus kasvaa (Kilpeläinen ym. 2010, Müller ym. 2010). Toisaalta on ennustettu metsien puulajisuhteiden muuttuminen erityisesti eteläisessä Suomessa havupuuvaltaisista lehtipuuvaltaisiksi, mikä todennäköisesti vähentää metsäpaloriskien mahdollisuutta. Suhteellisen tiheä metsätieverkosto mahdollistaa metsäpalojen sammuttamisen jo alkuvaiheissa, mikä pienentää laaja-alaisten metsäpalojen kehittymisen mahdollisuutta Suomessa.

Sadantamuutosten vaikutukset puiden kasvuun

Sateen olomuoto, sadannan vuodenaikaisjakauma ja määrä ovat puiden kasvun kannalta tärkeitä.

Kasvukauden aikana lisääntyvä kuivuus on erityisesti pintajuuristen puiden kasvun kannalta haitallista, se lisää metsäpaloriskiä ja johtaa pitemmällä aikavälillä muutoksiin puulajisuhteissa.

Talvisateiden lisääntyminen ei ole puille haitallista, jos sade tulee vetenä, eikä johda jääkerroksen muodostumiseen maanpintaan. Keväinen liikakosteus hienojakoisilla kivennäismailla voi olla juurten kannalta haitallista.

Lumisateiden lisääntyminen lisää lumituhoriskiä.

Lumipeitteen muutokset yhdessä lämpötilamuutosten kanssa johtavat roudan esiintymisen alueellisiin muutoksiin. Sillä on vaikutusta juurten kasvuun ja myrskytuhoriskeihin.

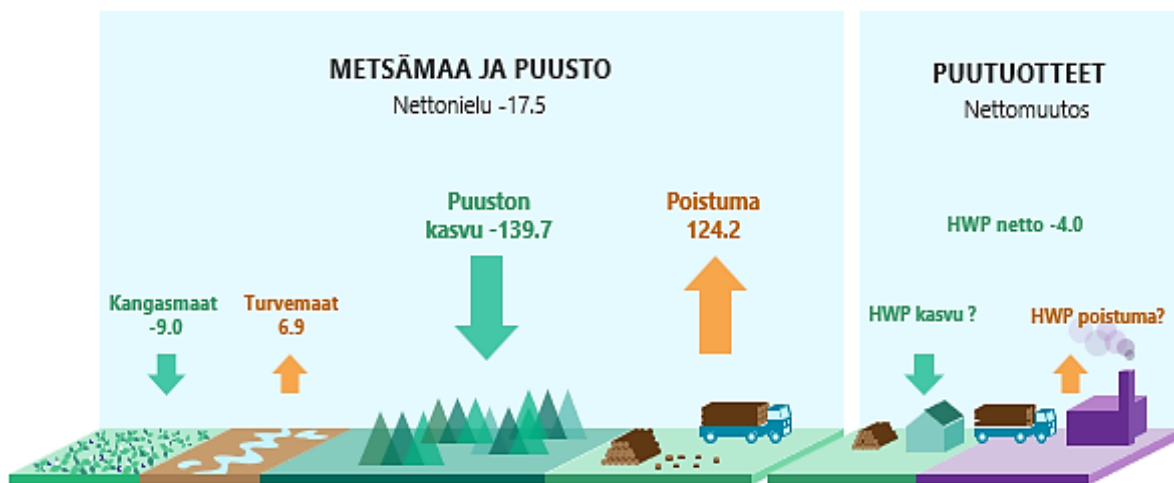
Voimakkaista kesäsateista aiheutuva pohjavedenpinnan nousu lähelle maanpintaa johtaa juurten happitilanteen heikkenemiseen, mikä on juurten kannalta haitallista.

3. Metsänkäsittelyn vaikutukset metsien hiilivarastoihin ja -nieluihin muuttuvassa ilmastossa

Sakari Sarkkola, Anu Akujärvi, Anna Repo, Sampo Soimakallio, Alekski Lehtonen

3.1. Suomen metsien ja puutuotteiden hiilivarastot ja hiilen sidonta

Suomen pinta-alasta metsät peittävät noin kolme neljäsosaa, mikä tekee Suomesta Euroopan metsäisimmän maan (Forest Europe, 2015). Suomen metsien kokonaispuuvaranto on viimeisimpien vuosikymmenien aikana jatkuvasti lisääntynyt metsien kasvun lisääntyessä ja kasvun ylittäessä poistuman. Viimeisimmän valtakunnanmetsien inventoinnin mukaan Suomen metsien vuotuinen kokonaiskasvu on n. 108 milj. m³ ja kokonaispuuvaranto n. 2,4 mrd. m³ (VMI12). Noin neljännes sekä vuotuisesta kasvusta että puuvarannosta on suometsissä. Jos puuston ja maaperän hiilivarasto kasvaa, metsä toimii hiilinieluna. Suomen metsät toimivat tällä hetkellä hiilen nieluina eli metsien puustoon ja maaperään sitoutuu vuosittain enemmän hiiltä kuin niistä vapautuu takaisin ilmakehään (Tilastokeskus 2020). Vuonna 2018 Suomen metsien nettohiilinielu oli -17,5 milj.t CO₂ ekv. ilman puutuotteita (Forest land) (Kuva 1). Puustoon (puuainekseen) sitoutuneen hiilen varasto on n. 3,196 mrd. CO₂ ekv. tonnia (842 milj. tonnia hiiltä) ja sen vuotuinen nettolisäys on 15,4 milj. t CO₂ ekv. vuonna 2018 (Tilastokeskus 2020). Puuston kasvu on siten Suomessa suurempi kuin sen poistuma.



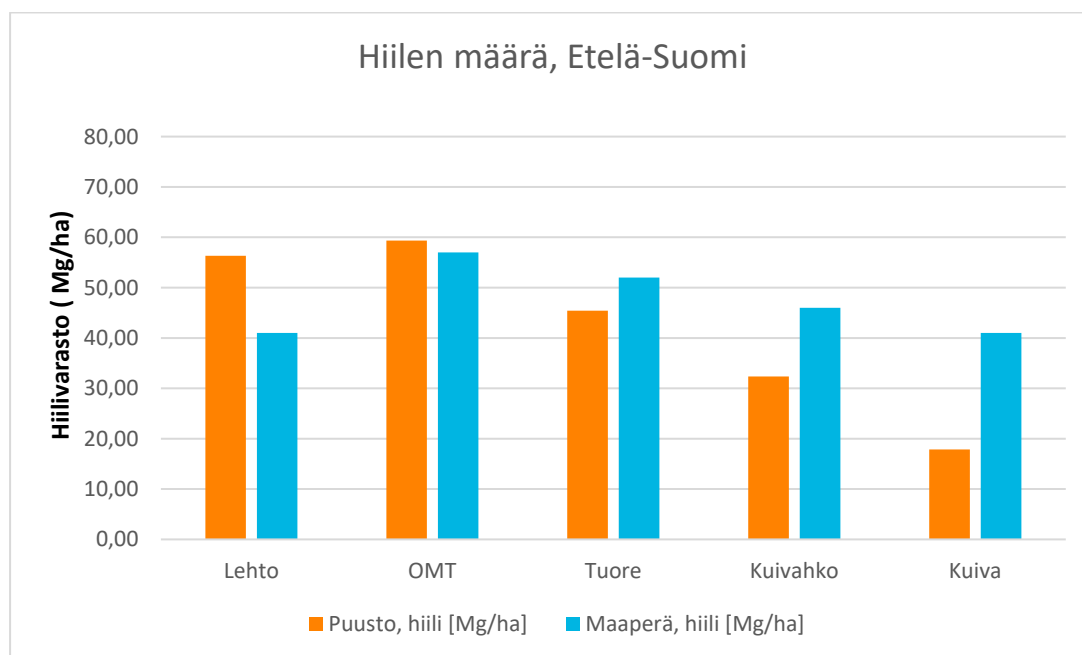
Kuva 1. Metsien ja puutuotteiden hiilen virrat vuonna 2018 (milj. CO₂ ekv. tonnia). Luvut perustuvat vuoden 2020 kasvihuonekaasuinventaarioon. Metsämaan ja puuston nettohielu = metsäekosysteemiin sitoutuvan hiilen määrän sekä puuston poistuman ja maaperän päästöjen kautta ekosysteemistä poistuvan hiilen määrän erotus. HPW-netto = puutuotteiden hiilivaraston kasvun ja poistuman erotus. HWP kasvu = puutuotteiden hiilivaraston kasvu; HWP poistuma = puutuotteiden hiilivaraston poistuma. Lähde: YM, MMM, TEM ja Ilmasto-opas.fi

Kangasmetsien maaperässä on hiiltä noin 960 milj. tonnia (Liski ym. 2006), joka vastaa noin 3550 milj. CO₂ ekv. tonnia. Suomessa turpeeseen on sitoutunut hiiltä yhteensä noin. 5600 milj. tonnia, joka vastaa noin 20200 milj. CO₂ ekv. tonnia (Turunen 2008), ja suot ja turvemaat ovat koko Suomen tärkein hiilivarasto. Puuston ja maaperän kasvupaikkakohtaiset hiilen määrät pohjautuen Biosoil-aineistoon (Heikkinen 2008) on esitetty kangasmaiden osalta kuvissa 2 ja 3 sekä metsäojitettujen soiden puustojen hiilimäärät kasvupaikkatyypeittäin kuvassa 4. Keskimäärin ojitettujen suometsien puustoon on sitoutunut hiiltä noin. 30 t ha⁻¹. Metsäojitettujen soiden turpeeseen sitoutuneen hiilen määrä riippuu merkittävästi eri kasvupaikoilla turvekerroksen paksuudesta, turvelajista ja turpeen

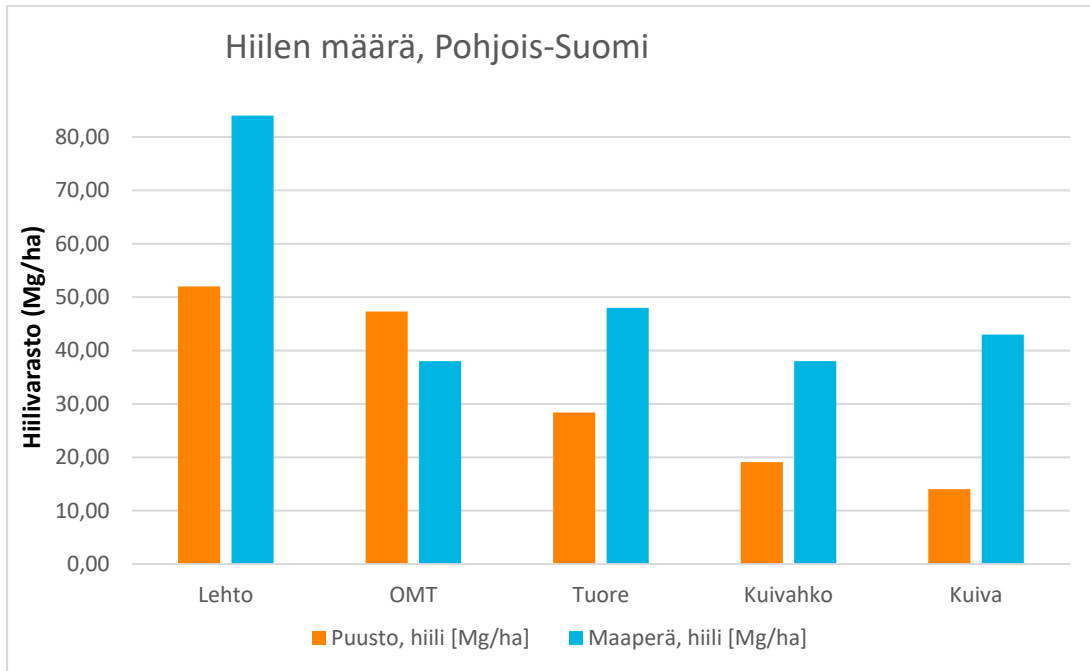
maatuneisuudesta. On arvioitu, että ojitusalueilla hiiltä on 10 cm:n paksuisessa turvekerroksessa keskimäärin noin 50 t ha⁻¹ (Paavo Ojanen, suullinen tiedonanto).

Keskimääräinen vuotuinen hiilensidonta on kangasmailla vaihdellut välillä 0,45–0,51 CO₂ ekv. t ha⁻¹ vuosina 1990–2017. Vuonna 2018 kangasmaiden maaperän ja lahoppuun hiilinielu oli -9 milj. t CO₂ ekv. (EU NIR 2019, Tilastokeskus 2020). Vuosina 2015–2017 metsäojitettujen soiden maaperän sekä lahoppuun hiilipäästöt ilman metaania ja typpioksiduulia (N₂O) olivat 4,3 milj. t CO₂ ekv. (EU NIR 2019, Tilastokeskus 2020).

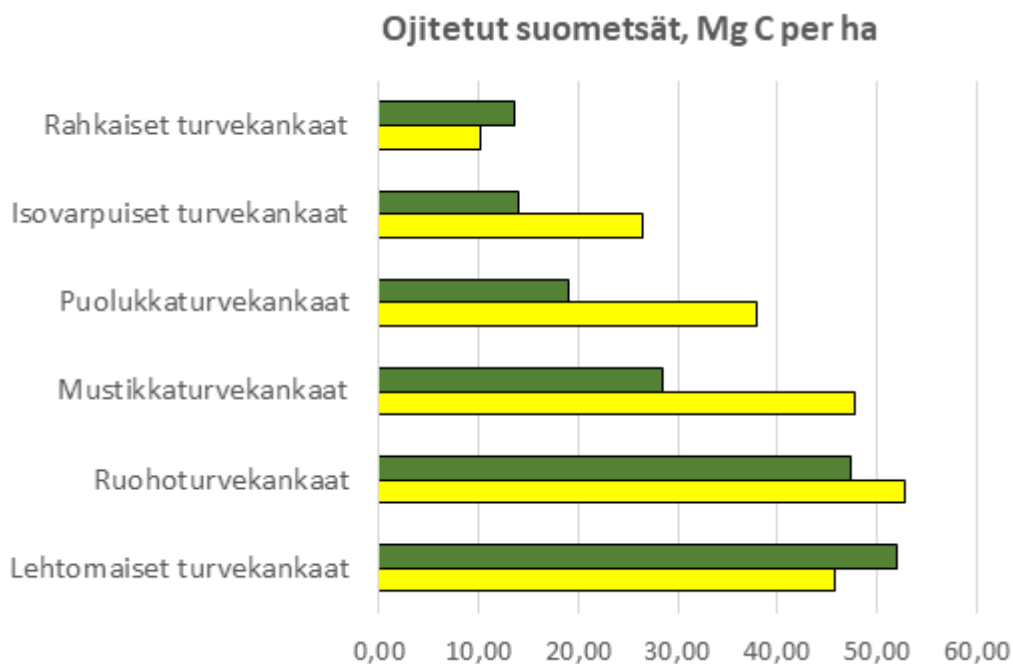
Puusta tehtyihin tuotteisiin varastoituu hiiltä. Kasvihuonekaasuinventaariorissa raportoidaan metsien ja maaperän hiilivarastojen muutosten lisäksi puutuotteiden hiilivaraston muutokset (kansainvälisten sääntöjen mukaan biomassan hiilidioksidin osalta ei raportoida hiilen varastoja vaan varaston muutoksia) (Seppälä ym. 2015). Puutuotteiden hiilivaraston muutokset pohjautuvat tuotantomääriin ja tuotekohtaisiin oletuspuoliintumisaikoihin. Vuonna 2018 puutuotteiden hiilivaraston kasvusta aiheutuneet raportoidut muutokset olivat yhteensä 4,4 milj. t CO₂ ekv. (Tilastokeskus 2020).



Kuva 2. Hiilen määrä (tonnia ha⁻¹) puustossa ja maaperässä Etelä-Suomessa kangasmaan kasvupaikoilla. Puuston hiilivarasto perustuu VMI12 (2014–2018) maastoaineistoon ja koealoihin, joiden puustoa on käsitelty viimeisen 30 vuoden aikana. Maaperän hiilivaraston määrät (orgaaninen kerros ja kivennäismaa 0–40 cm) on laskettu mittauksiin perustuvasta ns. Biosoil-aineistosta (Heikkinen 2008).



Kuva 3. Hiilen määrä (tonnia ha⁻¹) puustossa ja maaperässä Pohjois-Suomessa kangasmaan kasvupaikoilla. Puuston hiilivarasto perustuu VMI12 (2014–2018) maastoaineistoon ja koealoihin, joiden puustoa on käsitelty viimeisen 30 vuoden aikana. Maaperän hiilivaraston määrät (orgaaninen kerros ja kivennäismaa 0–40 cm) perustuvat ns. Biosoil-aineistoon (Heikkinen 2008).



Kuva 4. Metsäojitettujen soiden kasvupaikkatyyppittaiset (turvekangasluokat) puuston hiilivarastot (tonnia ha⁻¹) Etelä-Suomessa (keltaiset pylväät) ja Pohjois-Suomessa (vihreät pylväät) VMI12 aineistoon perustuen. Kasvupaikkatyyppit sisältävät varsinaisten turvekankaiden ohella myös ojikat ja muuttumat.

Suomen metsät ja puutuotteet sitoivat hiilidioksidia vuosittain määrän, joka kasvihuonekaasuinventoinnin aikana (1990–2018) vastasi noin 20–50 % Suomen kasvihuonekaasujen päästöistä (Tilastokeskus 2020). Metsien talouskäyttö säätelee merkittävästi metsien puuvarantoa sekä paikallisia hiilinieluja ja -päästöjä (Seppälä ym. 2015). Vaikka kokonaisuutena puuston ja maaperän hiilivarasto on

kasvanut, jolloin metsät ovat toimineet hiilen (netto) nieluina (Liski ym. 2006), spatiaalisesti ja alueellisesti nettositoutumisessa on suuria eroja. Erot johtuvat puuston kehitysluokkajakauman ja luontaisen ilmasto- ja kasvupaikkaolojen lisäksi metsien käsittelystä ja käsittelyhistoriasta sekä metsätuhoista (Seppälä ym. 2015). Esimerkiksi metsäojitettujen soiden pohjavedenpinnan yläpuolella oleva ns. vanha turve on keskimäärin hiilen lähde. Metsäojitettujen soiden hiilidioksidi (CO₂)-, typpioksiduuli (N₂O)- ja metaanipäästöt (CH₄) ovat noin 7,5 milj. t CO₂ ekv. vuodessa, mikä pienentää metsien kokonaishiilinielua (EU NIR 2019, Kärkkäinen ym. 2018, Ojanen ym. 2010). Metsäojitettujen soiden turpeen hävikistä johtuvat päästöt ovat verrattavissa fossiilisten polttoaineiden aiheuttamiin päästöihin, koska ilman ojitusta hiili olisi pysyvästi turpeeseen varastoituneena ja poissa ilmakehästä. Toisaalta metsäojitus on merkittävästi lisännyt puuston hiilivarastoa, mutta tämän lisäyksen voidaan ajatella olevan kertaluonteinen, kun taas maaperäpäästöt jatkuvat vuodesta toiseen.

3.2. Hakkuiden vaikutukset metsien hiilivarastoihin ja hiilen sidontaan

Metsä ja puutuotteet toimivat hiilennielluna silloin kun niiden yhteenlaskettu hiilivarasto kasvaa (Hildén ym. 2016). Tämä kasvu puolestaan riippuu hiilen sitoutumisen ja vapautumisen vuorosuhteesta. Jos sitoutuminen ja vapautuminen ovat tasapainossa, hiilen nettositontaa ei tapahdu, mutta ei myöskään nettopäästöjä, vaan tase on nolla (Seppälä ym. 2015). Puuston ja pintakasvillisuuden kasvun lisääntyminen lisää vastaavasti hiilen sidontaa metsiin. Orgaanisen aineksen, kuten kuolleen puun, kasvillisuuden karikkeen, humuksen ja turpeen hajoaminen, kasvien ja eliöiden hengitys sekä puun korjuu puolestaan pienentävät hiilivarastoa. Metsien merkitys hiilivarastona ja -nieluna perustuu etenkin niiden suureen pinta-alaan ja puuston luontaiseen kykyyn sitoa ja varastoida hiiltä biomassansa (Seppälä ym. 2015, 2019). Myös metsien kasvillisuuden karike ja kuollut puu kerryttävät hiiltä maaperään, kunnes tasapaino hiilen sitoutumisen ja vapautumisen välillä on saavutettu (Hildén ym. 2016).

Koska metsätalous on Suomessa tärkein puuston määrän säätelijä johtuen talousmetsien suuresta pinta-alasta verrattuna luonnonmetsiin, se käytännössä määrää puuston hiilivaraston suuruuden alueetasolla. Yksittäisessä metsikössä puuston hiilivarasto kasvaa puuston varttuessa. Vuotuinen puuston hiilinielu on suurin silloin, kun puusto on nuori ja elinvoimainen, hyödyntää hyvin kasvutilansa ja kasvaa nopeasti eli biomassatuotanto on huipussaan (Pingoud ym. 2016, 2018). Teoriassa vuotuinen puuston hiilinielu voidaan maksimoida käsittelemällä metsät siten, että puuston kasvu on niin suurta kuin kasvupaikan tuotoskyky enimmillään mahdollistaa ja puustoa ei hakata kyseisenä vuonna (esim. Cooper 1983, Harmon ym. 1990, Kurz ym. 2013, Odum 1969, Pregitzer ja Euskirche 2004). Pitkällä aikavälillä kumulatiivisesti laskettuna hiilinielu on kuitenkin suurimmillaan sellaisessa metsässä, mihin kertyy eniten hiiltä. Vanhoissa metsissä puuston kasvu, eli hiilen kertyminen, hidastuu, mutta maaperän ja kuolleen puuston hiilivaraston kasvu jatkuu ja jopa voimistuu ajan myötä (Luyssaert ym. 2008, Zhou ym. 2006). Vanhan metsän puustoon ja maaperään voi olla kertynyt huomattavasti enemmän hiiltä kuin nuoreen metsään ja metsän vanhetessa hiilen kertyminen jatkuu ainakin niin kauan, kun häiriöiden seurauksena metsästä tapahtuva hiilen poistuma ei pitkäaikaisesti ylitä hiilen kertymänopeutta (Scultze ym. 2012). Yleisesti voidaan todeta, että nuoret metsät ovat hyvä hetkellinen hiilinielu ja vanhat metsät suureksi hiilen varastoksi kumuloitunut nielu (Kurz ym. 2013, Cooper 1983). Kiertojen pidentäminen talousmetsissä edellyttää hyvää riskien hallintaa ja tietoa tuhoriskien lisääntymisestä, ks. esim. Suvanto ym. (2019).

Kangasmailla kasvavat luonnontilaiset metsät ovat keskimäärin tiheämpiä ja runsaspuustoisempia kuin niillä kasvavat talousmetsät, joten samalla kasvupaikkatyyppillä ja samaa kehitysvaihetta edustavissa luonnontilaisissa metsissä puuston hiilivarasto on suurempi kuin vastaavissa talousmetsissä (Mäkipää ym. 2011). Metsäojitetuilla soilla puuston hiilivarasto on kuitenkin suurempi kuin luonnontilaisilla ojitamattomilla soilla, koska ojitamattomilla soilla liiallinen märkyys on haittannut kasvua ja ojitus on

merkittävästi parantanut puiden kasvuolosuhteita kaikkein karuimpia kasvupaikkoja lukuun ottamatta. Koska metsänhoito pienentää tehokkaasti luonnonpoistumaa, talousmetsissä hiiltä on varastoitunut kuolleeseen puustoon murto-osa luonnonmetsiin verrattuna. Mallilaskelmien mukaan maaperän hiilivarasto ja -nielu ovat suuremmat luonnontilaisissa kangasmaiden metsissä kuin talousmetsissä (Lehtonen ym. 2011, Shanin ym. 2016), mutta mittauksissa havaitut erot ovat olleet hyvin pieniä (Tamminen ja Ilvesniemi 2012). Mittauksiin perustuvassa vertailussa kangasmailla maaperän hiilivarasto (orgaaninen kerros + 10 cm kivennäismaa) oli 31,8 t ha⁻¹ talousmetsissä ja 32,5 t ha⁻¹ luonnontilaisissa metsissä (Tamminen ja Ilvesniemi 2012). Maaperän hiilivarastojen muutosten ja erojen mittaus ja mallinnus on tunnetusti haastavaa, ja erojen todentamiseen tarvitaan runsaasti mittauksia (Mäkipää ym. 2008). Luonnontilaisilla, metsää kasvavilla soilla maaperä on yleisesti hiilen nielu, mutta erityisesti viljavilla metsäojitetuilla soilla kuivatus on johtanut maaperän hiilivaraston pienentymiseen (Ojanen 2015).

Hakkuilla pienennetään metsien hiilivarastoja nopeasti, ja se, kuinka paljon runkopuuhun sitoutuneesta hiilestä päätyy ilmakehään eri aikajäniteillä, riippuu puusta tehtyjen tuotteiden ja niiden tuotannossa syntyneiden sivuvirtojen elinkaaresta. Kasvihuonekaasuinventaariorissa raportoidaan YK:n ilmastopöytäkirjan mukaisesti kansalliset kasvihuonekaasutaseet (päästöt ja poistumat). Taseet raportoidaan seuraavilta sektoreilta: energia, teollisuusprosessit ja tuotteiden käyttö, maatalous, jäte sekä maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous (ns. LULUCF). Lisäksi raportoidaan teollisuusprosesseissa ja energiasektorilla syntyvät epäsuorat CO₂-päästöt. Kasvihuonekaasuinventaariorissa käytettävien arvioiden mukaan puutuotteiden sisältämä hiili puoliintuu sahatavaraissa 35 vuodessa, puulevyissä 25 vuodessa ja sellussa kahdessa vuodessa. Energiapuun osalta hiilen oletetaan vapautuvan välittömästi (Tilastokeskus 2020). Hakkuutähteet vapauttavat hiilidioksidia ilmakehään hajotessaan. Hakkuutähteiden hyödyntäminen energiaksi vapauttaa hiilen nopeammin kuin hajotus metsässä, mikä pienentää maaperän hiilivarastoa ja -nielua verrattuna tilanteeseen, jossa hakkuutähteitä ei korjata (Mayer ym. 2020).

Kangasmaiden maaperään kertyy hiiltä maanpäällisen ja -alaisen kariketuotoksen kautta. Runsaspuustoisissa metsissä on tyypillisesti suurempi maaperän hiilivarasto kuin vähäpuustoisissa metsissä. Päätehakkuun jälkeen maaperä on päästölähde hakkuutähteiden hajoamisen ja karikesyötteen puuttumisen takia. Maanpinta altistuu myös korkeille lämpötiloille sekä maanmuokkauksen vaikutuksille, jotka voivat lisätä hiilihävikkiä kangasmailla (Thornley ja Cannell 2000, Harmon ja Marks 2002). Hiilen nettöhävikkiä tapahtuu, kunnes puusto on kasvanut niin suureksi, että sen tuottaman karikkeen hiilimäärä on yhtä suuri kuin hajotuksen vuoksi maaperästä syntynyt hiilipäästö. Päätehakkuun jälkeen maaperä toimii 15–20 vuotta päästölähteenä ja koko metsän hiilivarasto palautuu päätehakkuutta edeltävään kokoon 60–100 vuoden kuluessa mallinnustulosten perusteella (Peltoniemi ym. 2004).

Harvennuksen vaikutus maaperään on pienempi ja lyhytaikaisempi kuin avohakkuun, joskin vaikutuksia tunnetaan huonosti. Harvennukset pienentävät puuston hiilivarastoa ja siten puuston nettohiilua ainakin väliaikaisesti, mahdollisesti useiksi vuosikymmeniksi riippuen puuston kasvunopeudesta (Sievänen ym. 2014, Helin ym. 2016). Toisaalta Eddy-kovarianssimittaukset Hyytiälästä ja Norundasta osoittavat, että harvennuksen ekosysteemin nielua pienentävä vaikutus on vain muutaman vuoden pituinen. Eddy-kovarianssimittaukset mittaavat koko ekosysteemin nettohiilen vaihtoa ja näin ollen huomioivat mallinnusta paremmin sekä aluskasvillisuuden että maaperän hiilen kierron välittömästi harvennuksen jälkeen (Vesala ym. 2005, Lindroth ym. 2018). Hakkuiden ajoittuminen ja voimakkuus vaikuttavat myös maaperään kohdistuvaan hiilisyötteen ja täten maaperän hiilivarastoon. Hakkuiden, harvennusten ja energiapuun korjuun vaikutuksista syvempiin maakerroksiin tiedetään toisiksi vain vähän, ja vaikutukset riippuvat myös esim. kasvupaikasta ja maatyypistä (Mayer ym. 2020). Metsänkäsittelyn vaikutukset hiilinieluihin ja -varastoihin poikkeavat toisistaan kangasmailla ja ojitusalueilla. Kansallisella tasolla tehtyjen mallilaskelmien mukaan hakkuumäärien nosto pienensi metsien hiilinielua verrattuna tilanteeseen, jossa hakkuumääriä ei kasvatettu 50 vuoden

tarkastelujaksolla. Tarkastelussa ei otettu huomioon mahdollisesti lisääntyviä metsätuhoja (Sievänen ym. 2014, Koljonen ym. 2020).

3.3. Metsänkäsittelyn vaikutus hiilivarastoihin kangasmailla

Kiertoaikojen ja harvennusten voimakkuudella ja ajoituksella vaikutetaan metsien hiilivarastoihin ja niiden kehittymiseen (Cooper 1983, Kaipainen ym. 2004, Liski ym. 2001, Pukkala ym. 2011). Kiertoaikaa pidentämällä voidaan lisätä puustoon sitoutuneen hiilen määrää (Kaipainen ym. 2004, Liski 2000). Esimerkiksi simulaatiotutkimuksessa männikön kiertoajan pidentäminen 70 vuodesta 110 vuoteen lisäsi puuston keskimääräistä hiilivarastoa 17 t ha^{-1} (29 %) (Kaipainen ym. 2004). Suuremmat puut tuottavat enemmän karikesyötettä maaperään, jolloin kiertoajan pidentäminen voi kasvattaa myös maaperän hiilivarastoa kuusikoissa (Repo ym. 2015). Simulaatiotutkimuksen mukaan kuusikoiden kiertoaikojen pidentäminen kasvatti maaperän hiilivarastoa 80–90 ikävuooteen asti mutta ei enää tämän jälkeen (Kaipainen ym. 2004). Männiköissä kiertoajan pidentäminen 60 vuodesta 110 vuoteen pienensi maaperän hiilivarastoa 6 t ha^{-1} (9 %). Tämä johtui siitä, että vaikka suuret puut tuottivat paljon kariketta, hakkuutähteitä kertyi vähemmän, mikä pienensi koko kiertoajan keskimääräistä maaperän hiilivarastoa. Kiertoajan lyhentäminen puolestaan pienentää puuston keskimääräistä hiilivarastoa, mutta voi kuitenkin kasvattaa maaperän keskimääräistä hiilivarastoa koko kiertoajan yli tarkasteltuna, sillä hakkuutähteitä päättyy näin useammin osaksi maaperän hiilivarastoa (Liski ym. 2001).

Kiertoaikojen muutokset vaikuttavat myös metsistä saatavaan tukki-, kuitu- ja energiapuukertymiin ja siten niistä tehtävien puutuotteiden määriin. Suomen ilmasto-oloissa tehdyssä simulaatiotutkimuksessa puutuotteiden raaka-ainevarasto oli mäntymetsässä suurimmillaan 70 vuoden kiertoajalla (Kaipainen ym. 2004). Tätä lyhyemmällä kiertoajalla puusto oli pieniläpimittaista ja puuraaka-aine soveltui perinteisiin lyhytikäisiin tuotteisiin. Liskin ym. (2001) tutkimuksessa keskimääräinen puutuotteiden raaka-ainevarasto oli suurimmillaan männiköiden 90 vuoden kiertoajalla ja kuusikoiden 60 vuoden kiertoajalla. Tutkimuksissa puutuotteet olivat sahatavaraa, vaneria sekä paperia ja sellua. Tulevaisuuden muutokset puutuoteportfoliossa voivat muuttaa johtopäätöksiä. Kiertoaikojen pidentäminen kasvattaa metsien hiilivarastoja sekä kuusi- että mäntyvaltaisissa metsissä (Kaipainen ym. 2004, Liski ym. 2001). Vaikka kiertoaikojen muutokset voivat vaikuttaa eri suuntiin puustossa, maaperässä ja puutuotteiden varastoissa, kaikkien varastojen yhteistarkastelussa kiertoajan pidentäminen kasvattaa kokonaisvarastoa (Kaipainen ym. 2004, Liski ym. 2001).

Hakkuutähteen korjuu pienentää karikesyötettä maaperään, mikä pienentää metsien hiilinielua (Achat ym. 2015, Repo ym. 2011; Sievänen ym. 2014, Zanchi ym. 2012). Hiilinielun pienenemisen takia hakkuutähtede-energialla saavutettavat päästövähennykset tulevat vuosikymmenten viiveellä verrattuna fossiiliin polttoaineisiin (Agostini ym. 2013, Repo ym. 2011). Hakkuutähteden korjaamisen vähentäminen onkin yksi keino ylläpitää maaperän hiilivarastoja (Mäkipää ym. 2015, Repo ym. 2011). Avohakkuun jälkeen tehtävä hakkuutähteden korjuu helpottaa uudistamistoimenpiteitä ja voi parantaa uudistamistulosta, mutta toisaalta sen on raportoitu vaikuttavan joko negatiivisesti tai ei lainkaan seuraavan puusukupolven kasvuun (Thiffault ym. 2011). Toistuvan kokopuunkorjuun on havaittu aiheuttavan kasvutappioita (Kaarakka ym. 2014). Jos hakkuutähteden korjuu heikentää seuraavan puusukupolven kasvua, voimistuu korjuun hiilinielua pienentävä vaikutus.

Kansallisella tasolla hakkuista pidättymisen tai kiertoaikojen pidentämisen vaikutuksia hiilinieluun voidaan tarkastella skenaariolaskelmilla, jotka kuvaavat erilaisia hakkuutasoja ja niitä vastaavia metsien hiilivarastojen (tai nielujen) kehityksiä. Suomen ilmastopaneelin tekemässä viiden simulointimallin vertailussa (Kalliokoski ym. 2019) vuotuisten runkopuun hakkuumäärien nostaminen 40 milj. m^3 :stä 80 milj. m^3 :iin pienensi Suomen metsien hiilinielua noin 1,2–2,3 t CO_2 ekv. yhtä hakkuukertymässä poistuvaa hiilidioksiditonnia kohti 46 vuoden simulointijaksolla (2010–2055). Tämä johtui siitä, että suuremman hakkuun skenaarioissa puuston mukana korjattiin selvästi enemmän hiiltä, puuston kasvu

pieneni ja maaperään kertyi vähemmän hiiltä kuin pienenemmän hakkuun skenaariossa. Yllä mainitun työn tuloksia tulkittaessa tulee muistaa, että pienten hakkuiden skenaarioissa tulosten epävarmuudet kasvavat merkittävästi, koska puiden kasvua kuvaavien mallien tausta-aineistot ovat valtaosin metsistä, joita on aktiivisesti hoidettu (Hynynen 2002). Toisaalta tulokset ovat hyvin linjassa myös monien sellaisten skenaarioiden kanssa, joissa on tarkasteltu n. 70 milj. m³:n tasolta tapahtuvien hakkuiden lisäyksiä vaikutuksia hiilinieluun (ks. Koljonen ym. 2019). Hakkuutähteiden korjuun lisääminen pienentää myös metsien hiilinielua, mutta vaikutus on selvästi vähäisempi kuin runkopuun hakkuiden lisäyksessä, koska hakkuutähteet joka tapauksessa lahoaisivat metsässä ja vapauttaisivat merkittävän osan hiilestään ilmaan (Pingoud ym. 2016).

3.4. Metsänkäsittelyn vaikutus hiilivarastoihin metsäojitetuilla soilla

Luonnontilaiset suot ovat pääasiassa aktiivisen metsänkasvatuksen ulkopuolella ja siksi seuraavassa käsitellään metsänkäsittelyn vaikutuksia vain ojitetuissa suometsissä. Metsäojitetuilla soilla puuston määrän vaikutus maaperän hiilivarastoon on monimutkaisempi ilmiö kuin kivenniismailla. Päätehakkuu ja sen jälkeinen uuden puuston pitkään jatkuva pieni määrä aiheuttavat maaperän hiilivaraston pienenemistä karikesyötteen vähenemisen takia kuten kangasmaillakin (Laiho ym. 2008). Toisaalta veden pinta pysyy sitä korkeammalla ja turpeen hiilen hävikki sitä pienempänä, mitä vähäisempää puusto on. Ojitetuilla runsasravinteisilla kasvupaikoilla (korvet) puuston maahan tuottama karikesyöte ei korvaa niissä tapahtuvaa merkittävää turpeen hävikkiä ja maaperän hiilivarasto pienenee pysyvästi. Kun kasvupaikan puusto otetaan huomioon, ekosysteemitasolla tarkasteltuna myös rehevät metsäojitetut suot ovat tällä hetkellä yleensä hiilen nieluja, mutta puuston hiilensidonta tapahtuu osin turpeen hiilivaraston kustannuksella. Karut metsäojitetut kasvupaikat (rämeet) ovat kuitenkin keskimäärin hiilen nieluja, koska vanhan turpeen hajoaminen on hitaampaa suhteessa turpeeseen tulevaan orgaanisen aineksen syötteeseen (Ojanen 2015). Karutkin suokasvupaikat muuttuvat kuitenkin hiilen nettolähteeksi, mikäli vedenpinta laskee tarpeeksi syvälle (yli 40 cm) (Ojanen ja Minkkinen 2019). Rehevillä kasvupaikoilla myös typpioksiduulipäästöt kasvavat sitä enemmän mitä syvemmällä vedenpinta on (Minkkinen ym. 2020).

Puuston vedenkäytöllä eli haihdunnalla (evapotranspiraatio) on nykyisissä puustoltaan ja kasvualustaltaan muuttuneissa ojitetuissa suometsissä merkittävä vaikutus maan vesitaseeseen ja vedenpinnan tasoon (Sarkkola ym. 2010). Suurin vaikutus haihdunnalla on vedenpinnan tasoon loppukesällä heinäelokuussa, jolloin myös vedenpinnan korkeuden on todettu olevan kriittisintä puuston kasvun kannalta. Riittävän suuren ja hyväkuntoisen puustomäärän haihdunta riittää ylläpitämään erityisesti loppukesällä vedenpinnan yli 30 cm syvyydessä, jolloin puuston kasvu ei häiriinny (Sarkkola ym. 2012). Ilmasto-olojen ja turpeen ominaisuuksien vaihtelun vaikutus huomioon ottaen Etelä-Suomessa (Oulu-Kajaani -linjan eteläpuolella) noin 125 m³ ha⁻¹ puuston ja Pohjois-Suomessa 150 m³ ha⁻¹ puuston haihdutuspotentiaali on riittävä ylläpitämään hyvän kuivatustilaan juuristokerroksessa silloinkin, kun ojasto on huonossa kunnossa. Raja-arvoja sovellettaessa tulee ottaa huomioon, että puuston määrän tulee täyttää em. rajat myös hakkuiden jälkeen.

Vaikka puuston haihdunta riittäisi ylläpitämään kuivatuksen hyvänä, viimeistään uudistushakkuun jälkeen kasvupaikan kuivatustilanne heikkenee. Päätehakkuiden aiheuttama vedenpinnan nousu on suora seurausta puuston haihdunnan vähenemisestä. Keskimäärin vedenpinnan tason on todettu nousevan avohakkuun jälkeen 20–30 cm (Päivänen 1982, Laine 1986), ja usein vedenpinta saattaa nousta pintaturvekerrokseen saakka. Kosteaa pintaturvetta ja uudelleen levittäytyvä rahkasammalkasvusto edistävät metsäpuiden siementen itämistä, mutta liiallinen märkyys voi myös lisätä taimien kuolleisuutta (Saarinen 2013). Ilmastonmuutoksen ennustetaan nostavan sademääriä (Ruosteenoja ym. 2016) ja näiden aiheuttama vedenpinnan nousu voi lisätä suometsien kuivatustarvetta, jos erityisesti kesä- ja syksyaikaiset rankkasateet lisääntyvät. Todennäköisesti tällä on eniten vaikutusta Pohjois-Suomessa,

jossa sademäärän lisääntymisen ennustetaan olevan nopeinta. Toisaalta puuston haihdunnan ennustetaan kasvavan ja se voi alentaa vedenpintaa entisestään sadannan kasvusta huolimatta (Leppä ym. 2020). Myös kuivien jaksojen piteneminen kesäaikaan saattaa lisätä riskiä puuston kasvua heikentävien ylikuivatustilanteiden syntymiselle myös turvemaidilla. Tietoa näistä ilmiöistä ja niiden vaikutuksista tarvittaisiin enemmän.

Rehevillä ojitetuilla soilla vedenpintaa voidaan säädellä myös harvennusten tai harvennustyyppisten osittaihakkuiden, kuten esimerkiksi poimintahakkuiden avulla. Ensimmäisten empiirisiin kenttäkokeisiin pohjautuvien tutkimustulosten perusteella osittaihakkuun jälkeen vedenpinta nousee lähemmäs maanpintaa, mutta ei vielä liian korkealle puuston kasvun tai metaanipäästöjen lisääntymisriskin kannalta (Leppä ym. 2020, Korkiakoski ym. 2020) Suoalueiden välinen ja jopa mittauspisteiden välinen vaihtelu hiilikaasupäästöissä on huomattavaa. Edelleen on runsaasti epävarmuutta sen suhteen, voidaanko jonkun tietyn ojitusaluekasvupaikan sanoa olevan hiilen lähde vai nielu. Maaperän hiilitaseen muutosten kannalta voidaan kuitenkin erottaa kaksi päävaikutussuuntaa, joissa hiilen nettopäästöt muuttuvat voimakkaasti. Näitä ovat kasvupaikan ravinteisuustaso ja vedenpinnan syvyys: mitä rehevämpi kasvupaikka ja mitä syvemmällä vedenpinta on, sitä nopeammin turve yleensä hajoaa ja siihen sitoutunut hiili vapautuu ilmakehään (Ojanen ym. 2013, Ojanen 2014). Päästöt lisääntyvät varsinkin, jos vedenpinta laskee yli 30 cm syvyydelle (Ojanen ym. 2013, Ojanen ja Minkkinen 2019). Toisaalta päätehakkuun jälkeen lähelle maanpintaa (0–20 cm syvyydelle) nouseva vedenpinta lisää metaanipäästöjä (Ojanen ym. 2010, Korkiakoski ym. 2019).

Rehevimmillä metsäojitetuilla soilla hiilen hävikki turpeesta jatkuu, kunnes turve on kokonaan hajonnut. Puustoon sitoutuva hiilen määrä ei välttämättä riitä pitkällä tähtäimellä kompensoimaan turpeesta tapahtuvaa hävikkiä, ja viimeistään kasvupaikalta korjatun puun loppukäyttötapa vaikuttaa siihen, kuinka kestävää metsätalous on ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta kullakin kasvupaikalla (Ojanen 2015).

3.5. Jatkovapeitteinen vs. tasaikäismetsänkasvatus

Vertailuja jatkuvan/jatkovapeitteisen ja tasaikäisen eli jaksollisen kasvatuksen hiilitase vaikutuksista on toistaiseksi vähän, ja tutkimusten johtopäätökset poikkeavat osittain toisistaan. Jatkovapeitteisen kasvatuksen ilmastovaikutuksia tutkitaan metsäojitetuilla soilla aktiivisesti, mutta tutkimus on vasta alkuvaiheessa. Tutkimusten johtopäätöksiin vaikuttavat mm. tarkastellut hiilivarastot, käytetyt kasvu- ja hajoamismallit, mahdollinen fossiilisten raaka-aineiden korvausvaikutus ja vertailun lähtötilanne. Osassa tutkimuksista on tarkastelu vain puuston hiilivaraston kehitystä (mm. Nilsen ja Strand 2013), osassa puuston ja maaperän hiilivaraston kehitystä (mm. Peura ym. 2018) ja osassa on otettu huomioon myös mahdollinen puutuotteiden ns. korvausvaikutus (mm. Pukkala ym. 2011; Pukkala 2014; Lundmark ym. 2016).

Peuran ym. (2018) mukaan jatkovapeitteisessä kasvatuksessa kangasmailla keskimääräinen vuotuinen hiilensidonta maisematasolla ja 100 vuoden tarkastelujaksolla oli $0,68 \text{ t C ha}^{-1} \text{ vuosi}^{-1}$, kun hakkuita toteutetaan noin viidentoista vuoden välein ja pohjapinta-ala (ppa) lasketaan välille $10\text{--}12 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, ja tasaikäisessä kasvatuksessa vastaavasti $0,23 \text{ t C ha}^{-1} \text{ vuosi}^{-1}$. Tasaikäisessä kasvatuksessa päätehakkuunjälkeisen ”hiililähdevaiheen” lyhentymisen tai puuttuminen sekä maaperän hiilivaraston kasvu voivat selittää jatkuvan kasvatuksen keskimäärin suuremman hiilensidonnan kangasmailla. Huomionarvoista on, että mainitussa tutkimuksessa mallinnettu metsämaisema siirtyi simulaatiojakson aikana jatkovapeitteiseen kasvatukseen, ja hakkuukertymä oli jatkovapeitteisessä kasvatuksessa 100 vuoden aikana keskimäärin $92 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ pienempi kuin tasaikäisrakenteisessa kasvatuksessa. Toisessa mallinnustutkimuksessa (Shanin ym. 2016) jatkovapeitteisen kasvatuksen hakkuita tehtiin kangasmailla $10\text{--}30$ vuoden välein laskien pohjapinta-ala välille $8\text{--}16 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Siinä ekosysteemin nettoperustuotanto, ilman hakkuussa poistettua biomassaa, vaihteli erilaisissa jatkovapeitteisen kasvatuksen käsittelyissä -3

ja $+2 \text{ t C ha}^{-1} \text{ vuosi}^{-1}$ välillä. Jatkuvapeitteinen metsä toimi sekä hiilen lähteenä että nieluna. Vertailu tasaikäisrakenteiseen metsänkasvatukseen osoitti, että ilmastovaikutukset riippuivat hakkuiden intensiteetistä, ei niinkään siitä, että onko kyseessä jatkuvapeitteinen vai tasaikäinen metsänkasvatus (Shanin ym. 2016).

Pitkillä tarkastelujaksoilla jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen on esitetty kasvattavan maaperän hiilivarastoa, koska karikesyöte maaperään pysyy jatkuvana ja päätehakuun jälkeisen avoimen vaiheen puuttuessa maan pinta ei altistu korkeille lämpötiloille tai maanmuokkauksen vaikutuksille. Maaperämittauksia hyödyntävässä norjalaistutkimuksessa kangasmaillamaaperän hiilivarasto oli jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa tasaikäistä suurempi (Nilsen ja Strand 2013). Vastaava tulos saatiin mallinnustutkimuksessa, jossa vertailtiin jatkuvapeitteisen ja tasaikäisen kasvatuksen keskimääräisiä hiilivarastoja metsämaisemasolalla Keski-Suomessa (Peura ym. 2018) ja Itä-Suomessa (Díaz-Yáñez ym. 2019) sadan vuoden tarkastelujakson yli. Jatkuvapeitteinen kasvatus myös tasoittaa maaperän ja karikekerroksen hiilivaraston muutoksia kangasmailla (Lundmark ym. 2016, Peura ym. 2018). Siirtyminen jatkuvapeitteiseen kasvatukseen voi kuitenkin myös pienentää maaperän hiilivarastoa, jos käsittely on voimakasta. Tähän liittyen Shanin ym. (2016) arvioivat EFIMOD- ja ROMUL-mallien avulla, että yläharvennusten toteuttaminen 10–20 vuoden välein siten, että puuston pohjapinta-ala laskee alle $12 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, pienensi maaperän hiilivarastoa verrattuna lievempään metsänkäsittelyyn. Pohjapinta-alan maltillisempi lasku (käsittelyn jälkeinen pohjapinta-ala $16 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) johti kangasmailla maaperän hiilivaraston kasvuun riippumatta harvennustiheydestä. Jatkuvapeitteinen kasvatus voi siis kasvattaa maaperän hiilivarastoa, mutta ”kokonaishiililyöty” voi pienentyä, koska puuston tilavuuskasvu (Hynynen ym. 2019) on jatkuvapeitteisen kasvatuksen menetelmin käsitellyissä puustoissa pienempää kuin tasaikäisessä kasvatuksessa.

Turvemailla jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen perusajatuksena on pitää yllä tietyn suuruisen puustopääoman jatkuva haihdutusvaikutus, siten, että vedenpinta ei näin ollen laskisi liian syväälle (pienempi turpeen hajotus ja siitä aiheutuva CO_2 -päästö) eikä toisaalta nousisi liian korkealle (pienempi vesistökuormitus ja metaanipäästö) (Nieminen ym. 2018, Saarinen ym. 2020). Koska menetelmä perustuu siihen, että vain osa puusadosta korjataan hakkuissa (esimerkiksi poimintahakkuut, kaistale- ja pienaukkohakkuut) ja metsän uudistuminen on enemmän tai vähemmän jatkuvaa, metsänkasvatuksen pitkän tähtäimen edellytys ja päämäärä on puuston kasvattaminen eri-ikäisenä (Saarinen ym. 2020). Kangasmaiden metsien jatkuvaan kasvatukseen verrattuna turvemailla erityishuomiota joudutaan kiinnittämään hakkuiden jälkeisen puuston määrään ja sen kuntoon, jotta haihdutuskapasiteetti säilyisi riittävänä ylläpitämään kuivatusta ilman vesitalouden järjestelyjä (Nieminen ym. 2018). Usein edellytykset jatkuvalla kasvatukselle ovat ojitetuissa suometsissä hyvät, koska suopuustoissa esiintyy jo ennestään runsaasti erirakenteisuutta, turvemaiden taimettumiskyky myös ojitettuna on kangasmaita parempi ja monilla turvemaan kasvupaikoilla esiintyy paljon hyödyntämiskelpoisia alikasvoksia (Sarkkola ym. 2003, 2004). Toisaalta joillakin kasvupaikoilla, kuten karuilla rämeillä Etelä- ja Keski-Suomessa, metsän uudistumisolosuhteet voivat olla heikentyneitä mm. paksun kuivuudelle alttiin kangashumuskuntan ja pintakasvillisuuden vuoksi (Saarinen 2013, Hytönen ym. 2019). Tämä voi osaltaan aiheuttaa haasteita turvemaiden jatkuvapeitteiselle kasvatukselle, ellei maanpinnan käsittelyjä tehdä.

Suometsien jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa kasvupaikan kuivatukseen liittyvät riskit ovat suurempia kuin perinteisessä metsänkasvatuksessa kun kasvupaikan kuivatus on pääasiassa puuston varassa. Jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa onkin tärkeää, että puuston riittävään hakkuunjälkeiseen määrään ja puuston kasvukunnon ylläpitämiseen kiinnitetään huomiota. Mikäli se ei syystä tai toisesta onnistu tarpeeksi hyvin, voidaan joutua tekemään ojaverkoston kunnostustoimenpiteitä tai siirtymään jaksolliseen kasvatukseen.

Jos jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen menetelmillä pystytään säätämään kasvupaikan vedenpinnan tasoa edelle mainitulla tavalla, menetelmillä saattaa olla merkittäviäkin mahdollisuuksia ainakin

metsikkö- tai suoaluetasolla hillitä turpeen hajoamista ja vähentää maaperästä tulevia päästöjä. Ensimmäiset havainnot jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen vaikutuksista turvemaan hiilipäästöihin tukevat tätä teoriaa. Korkiakosken ym. (2018) tutkimuksessa Tammelan Lettosuolla havaittiin, että jatkuvapeitteisen kasvatuksen hakkuin käsitelty koeala oli pieni hiilidioksidin lähde, mutta verrokkina olleella avohakkuulla hiilidioksidin nettopäästöt olivat viisi kertaa tätä suurempia. Vastaavasti alue säilyi osittaishakkuun jälkeen edelleen metaanin nieluna, kun taas avohakatusta alueesta tuli pieni metaanin lähde (Korkiakoski ym. 2019, Korkiakoski ym. 2020).

Jatkuvapeitteisen kasvatuksen kokonaishiilitasetarkasteluissa tärkeässä roolissa ovat myös puutuotteet, niiden korvausvaikutus sekä tuotantoketjun energian kulutus. Jatkuvapeitteisen kasvatuksen hiilitase voi olla ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta tasaikäistä parempi, johtuen hakkuukertymän suuremmasta tukkipuuosuudesta, josta voi seurata hiilen suurempaa varastoitumista pitkäikäisiin puutuotteisiin ja tuotantoketjujen pienempiä hiilipäästöjä (Pukkala ym. 2011, Pukkala 2014, 2016). Myös puun kuljetuksen ja puutuotteiden tuotannon hiilipäästöjen huomioonottaminen voi kääntää johtopäätöksen jatkuvaa kasvatasta suosivaksi (Pukkala 2014). Lisäksi pitkäikäisillä mekaanisen metsäteollisuuden puutuotteilla voi olla mahdollista välttää enemmän päästöjä kuin lyhytikäisillä tuotteilla (Pingoud ym. 2010, Soimakallio ym. 2016). Yhdysvalloissa Appalakeilla tehdyssä maisematason mallinnustutkimuksessa puuston ja puutuotteiden keskimääräinen kokonaishiilivarasto oli simulointijakson alussa suurempi jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa, mutta sen lopussa suurempi tasaikäisessä kasvatuksessa. Keskimääräinen hiilivarasto yli 100 vuoden tarkasteluajan oli samaa suuruusluokkaa molemmissa tapauksissa, mutta tasaikäisinä käsiteltyjen metsien hiilivarasto oli noin 9 % suurempi (Moore ym. 2012). Heikompi metsän kasvu jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa (Hynynen ym. 2019) voi puolestaan kääntää kokonaishiilitasetarkastelun tasaikäistä suosivaksi (Lundmark ym. 2016). Kokonaishiilitaseen kannalta metsän tuotos, hakkuiden intensiivisyys, biomassan hajotustoiminta, erilaiset häiriöt ja fossiilisten raaka-aineiden korvausvaikutukset voivatkin olla merkittävämpiä seikkoja kuin valittu metsänkäsittelymenetelmä.

3.6. Miten muuttuva ilmasto vaikuttaa puuston ja maaperän hiileen?

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvu kiihdyttää ilmastonmuutosta, joka vaikuttaa metsien kasvuolosuhteisiin. Ilman hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilan kasvun on arvioitu kiihdyttävän puiden kasvua pohjoisilla alueilla (Lindner ym. 2014). Ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsien kasvuun, puuntuotantoon ja hiilensidontaan Suomessa selvitettiin kahden ekosysteemimallin avulla (Holmberg ym., 2019). Ekosysteemin hiilensidontaa arvioitiin sekä PREBAS- että JSBACH -mallilla ja metsien kasvua ainoastaan PREBAS-mallilla, joka ottaa huomioon myös metsien käsittelyn. Arvioinnissa käytettiin viittä eri ilmastomallia ja kolmea ilmastoskenaariota. Mallinnustulosten perusteella ekosysteemien hiilensidonta kiihtyy Suomessa ilmastonmuutoksen seurauksena ja vaikutus on sitä suurempi, mitä voimakkaammin ilmasto muuttuu. Suomen metsien simuloitu mediaanikasvu nousi vertailujakson 1981–2010 arviosta $5,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ arvioon $8,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ vuosisadan puolivälissä (2041–2070) ja arvioon $8,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ vuosisadan lopussa (2071–2100). Muutokset vastaavat 48 %:n lisäystä vuosisadan puoliväliin mennessä ja 60 %:n lisäystä vuosisadan loppuun mennessä. Nettoekosysteemituotos kasvoi vastaavasti 48 % vuosisadan puoliväliin mennessä ja 39 % vuosisadan loppuun mennessä verrattuna vuosien 1981–2010 tilanteeseen. Nettoekosysteemituotoksen kasvu hidastui simulointijakson aikana, koska myös maaperän hajotustoiminta kiihtyi samanaikaisesti (Holmberg ym. 2019).

Mallien antamat arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsien kasvuun ja hiilensidontaan ovat monista yksinkertaistuksista johtuen epävarmoja. Edellä esitetyissä tuloksissa metsien oletettiin kasvavan nykyisten metsänhoitosuosituksen mukaisesti (Sved & Koistinen 2015) eikä mahdollisia muutoksia metsänhoitotavoissa otettu huomioon. Tulevaisuudessa metsänomistajat voivat pyrkiä sopeutumaan ilmastonmuutokseen esimerkiksi käyttäen vaihtelevaa puulajikoostumusta, kasvatustapaa tai puuston

kiertoaikaa, mitkä vaikuttavat puuston ja maaperän hiilivarastojen kehitykseen. Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsien kasvuun ja hiilensidontaan ovat myös muiden ympäristötekijöiden rajoittamia. Käytetyt mallit PREBAS ja JSBACH eivät ota huomioon esimerkiksi typpilaskeuman ja maaperän ravinnepitoisuuden vaihtelun vaikutusta puuston kasvuun, mikä voi antaa todellista paremman kuvan ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsien kasvuun (Holmberg ym. 2019). Arviot lämpenemisen vaikutuksista maaperän hiilivaraston muutokseen globaalisti ovat niin ikään epävarmoja. Puuston kasvun lisäksi myös maaperän orgaanisen aineen hajotuksen on arvioitu kiihtyvän (Kirschbaum ym. 2000). Kokonaisvaikutus ilmastoon riippuu siitä, korvaako lisääntyvästä kasvusta tuleva karikesyöte hajotustoiminnan kiihtymisestä aiheutuvan poistuman (Davidson ja Janssens 2006). Viimeaikaisten kokeellisten tutkimusten perusteella ilmaston lämpeneminen kiihdyttää maaperän hiilen vapautumista ilmakehään pohjoisilla leveysasteilla, mikä voi edelleen nopeuttaa ilmaston lämpenemistä (Crowther ym. 2016).

Ilmastonmuutoksen myötä lisääntyvät metsätuhot heikentävät puuston kasvua ja hiilensidontaa, mitä ei ole toistaiseksi otettu huomioon useimmissa käytetyissä simulointimalleissa (Holmberg ym. 2019). Kuivien ja lämpimien kesien on ennustettu aiheuttavan kuivuusstressiä, heikentävän puiden kasvua ja lisäävän vakavien metsätuhojen riskiä (Muukkonen ym. 2015, Aakala ym. 2011). Esimerkiksi kirjanpajana (*Ips typographus*) voi hyötyä lämpimämmistä kesistä ja aikaisemmasta kevään tulosta (Zang ym. 2015). Kasvukauden pidentyminen voi myös edesauttaa hyönteisten leviämistä pohjoisemmaksi. Talviaikaiset tuulituhot lisääntyvät, koska maa pysyy sulana nykyistä pitempään. Tuulet voivat myös välillisesti kasvattaa hyönteistuhojen riskiä lisäämällä kuolleen puun määrää metsässä (Pukkala 2018). Käytettyjen simulointimallien antamat tulokset kiihtyvistä metsän kasvusta ovat optimistisempia kuin tapauksessa, jossa tuhoriskit ja ravinteiden saatavuus otettaisiin huomioon (Holmberg ym. 2019).

Epävarmuusarvioinnin perusteella metsien käsittely vaikuttaa ekosysteemin hiilensidontaan selvästi voimakkaammin kuin mallin parametrit, ilmastomalli tai ilmastoskenaario (Mäkelä ym. 2020). Ilmastomallista johtuva epävarmuus pysyi samana koko tarkastelujakson 1980–2100 ajan, mutta ilmastoskenaarion vaikutus kasvoi jakson loppua kohti. Eteläsuomalaisessa metsikössä ilmastoskenaario ja metsänkäsittely vaikuttivat tulosten epävarmuuteen yhtä paljon vuosisadan puolivälissä ja ilmastoskenaarion vaikutus oli suurempi vuosisadan lopussa. Pohjoissuomalaisessa metsikössä metsänkäsittelyn aiheuttama epävarmuus oli pienempi, koska siellä hakkuita on harvoin (Mäkelä ym. 2020). Luonnonvarakeskuksen MELA-mallilla tehdyissä simulaatioissa, joissa huomioitiin ilmastonmuutoksen puuston kasvua lisäävä vaikutus mutta ei lisääntyviä tuhoja (Kallio ym. 2016), lisähakkuut pienensivät metsien hiilinielua enemmän kuin nykyilmastolla tehdyissä simulaatioissa (Lehtonen ym. 2016). Kaiken kaikkiaan tutkimukset osoittavat, että hakkuiden voimakkuus vaikuttaa merkittävästi metsien kykyyn sitoa hiiltä ja hillitä ilmastonmuutosta tulevaisuudessa. Ilmastotavoitteiden valossa metsänhoidon tulee tuottaa hiilinieluja ilmastonmuutoksen hillintää varten myös tulevaisuudessa, mutta kuitenkin siten että samanaikaisesti otetaan huomioon metsien käsittelyä suunniteltaessa ilmastonmuutoksen seurauksena kasvavat tuhoriskit.

Metsän hiilinielut ja hiilivarastot

Metsät toimivat raaka-aineen ja uusiutuvan energian lähteenä mutta myös tärkeänä hiilen nieluna ja varastona.

Metsäojitetuilla soilla turve on tärkein hiilivarasto. Keskimäärin karujen ojitusalueiden kasvupaikkojen turve on hiilen nielu, mutta ravinteikkailla kasvupaikoilla turve on hiilen lähde. Muuttuva ilmasto vaikuttaa metsien kasvuun mutta myös orgaanisen aineksen hajotusnopeuteen sekä tuhoriskien kautta hiilivarastojen pysyvyyteen.

Metsien hiilinielua voidaan kasvattaa varmistamalla hakkuiden jälkeen nopea uudistuminen, metsittä-mällä, käyttämällä jalostettua metsänviljelymateriaalia, pidentämällä kiertoaikaa ja myöhentämällä harvennuksia, lannoituksilla, edistämällä lahoppuun määrän syntymistä, sekä valitsemalla metsätuho-riskien näkökulmasta parhaat metsänhoitomenetelmät.

Turvemailla hiilen hävikkiä turpeesta voi pienentää välttämällä liian tehokasta kuivatusta ja suosimalla peitteellisen metsänkasvatuksen menetelmiä. Lyhyellä aikavälillä tuhkalannoitus on myös keino kas-vattaa ojitetujen suometsien hiilivarastoa.

Metsien hiilinielua pienentävät hakkuiden lisääminen, nuorten metsien osuuden voimakas lisääminen, hakkuutähteiden ja kantojen korjuu, intensiiviset harvennukset, luonnonpoistuman välttäminen tai korjaaminen sekä metsien raivaaminen muuhun maankäyttöön (rakentaminen, viljelysmaat).

4. Metsänhoidon keinot vastata muuttuvaan ilmastoon

Timo Saksa

4.1. Mitä on ilmastonmuutokseen sopeutuva metsänhoito?

Metsiin kohdistuvia ilmastoriskejä voidaan pienentää ja torjua metsänhoidon toimenpiteillä. Metsien altistumista ilmastoriskeille voidaan pienentää lisäämällä nykyisten metsiköiden riskinkestävyyttä eli resistanssia. Lyhyelläkin aikavälillä metsänhoidon toimenpiteillä voidaan lisätä metsien resistanssia mm. hyönteis-, tuuli- ja lumituhoja vastaan ja vähentäen esim. metsäpaloriskiä. Keskipitkällä tähtäimellä metsänhoidon keinoin voidaan vähentää nykyisten ja tulevien metsien haavoittuvuutta erilaisille riskeille eli vahvistaa metsien resilienssiä. Esimerkiksi metsänjalostus voi olla merkittävä keskipitkän tähtäimen työkalu ilmastonmuutoksen sopeutumisessa. Pitkän tähtäimen tavoitteena ovat muutuneisiin olosuhteisiin sopeutuneet metsät, joissa esim. puulajikoostumus, puuston kiertoaika ja metsien käsittelymenetelmät voivat olla nykyisestä poikkeavia. Koska muutokset metsissä tapahtuvat hitaasti, ilmastonmuutokseen sopeutuminen edellyttää eri aikaskaalalla vaikuttavia metsänhoidon toimenpiteitä (Silviculture & Climate Adaptation).

Seuraavissa kappaleissa esitetään metsikön kehitysvaiheittain, kuinka eri metsänhoidon toimenpitein voidaan pyrkiä pienentämään ilmastonmuutoksesta johtuvia riskejä ja samalla sopeutumaan ilmastonmuutokseen sekä mahdollisuuksia hillitä ilmastomuutosta.

4.2. Uudistaminen

4.2.1. Siemensadot

Lämpötilojen kohotessa voidaan ajatella myös siemensatojen runsastuvan. Näin saattaa käydä, mutta ilmastonmuutos ei yksioikoisesti lisää metsäpuiden siemensatoja. Luken ja Luomuksen yhteistutkimuksessa (Zamorano ym. 2018) selvitettiin eri puulajien siemensadon pitkäaikaistrendejä, jotka perustuvat pääosin vuosien 1979–2014 siemensadon tarkkailumetsikköaineistoihin. Tulokset osoittivat, että rauduskoivun ja hieskoivun trendi oli hieman laskeva, kuusella ei ollut havaittavissa selvää trendiä. Jos kasvukauden lämpöolot tulevaisuudessa kohoavat, laadullisesti hyvät männyn siemenvuodet voivat yleistyä pohjoisimmassa Suomessa, koska lämpötila on siellä tärkein siementen tuleentumiseen vaikuttava tekijä (Nygren 2020).

Lämpötilan kohoamisen myötä käpy- ja siemenhyönteisten tuhoriski todennäköisesti kasvaa. Ilmastonmuutoksesta hyötyvien tulokas- ja vieraslajien joukossa ennakoidaan olevan myös käpy- ja siementuholaisia. Toisaalta kuiva alkukesä voi kuusella vähentää käpyruostesienien esiintymistä. Kevätlämpötilojen noustessa puut alkavat kukkia yhä varhaisemmin, mikä saattaa pahimmillaan altistaa esim. kuusen emikukinnot lisääntyvässä määrin hallatuhoille.

Siemensadon kannalta keskilämpötilojen nousua merkittävämpi tekijä tulee olemaan lämpimien ja kylmien jaksojen ajoittuminen kasvukauden aikana. Ratkaisevaa on se, millaiset lämpö- ja sääolot vallitsevat kukka-aiheiden muodostumiselle herkkänä ajankohtana alkukesällä (Nygren 2020). Kuivuus on yksi syy, miksi varsinkin männyllä käpyjen kehitys voi keskeytyä kukinnan jälkeen (ns. pikkukäpyjen variseminen). Pahenevat kuivuusjaksot näin ollen kasvattavat eroa kukinnan määrän ja varisevien siementen määrän välillä. Sään ääri-ilmiöiden voimistuessa on todennäköistä, että siemensadon vuosivaihtelut voimistuvat entisestään. Kokonaisuutena voidaan kuitenkin olettaa hyvien siemensatojen

esiintymistodennäköisyyden kasvavan Pohjois-Suomessa, mutta Etelä-Suomessa ilmastonmuutoksen vaikutus siemensatoon jää paljon epävarmemmaksi.

4.2.2. Luontainen uudistaminen ja kylvö

Metsän luontaisessa uudistamisessa on syytä varautua tuulituhojen yleistymiseen siemen- ja suojuoppuuloilla (Gregow ym. 2011). Tuulituhoriskiä voidaan pienentää kiinnittämällä erityishuomio uudistusalan tuulioloihin tai sopeutua tuhoihin lisäämällä siemenpuiden lukumäärää. Luontaisesti uudistetavan metsikön viimeisenä harvennushakkuuna käytettävällä väljennyshakkuulla on mahdollisuus parantaa tulevien siemen/suojuspuiden tuulen kestävyttä sekä valmistaa latvusta siementuotantoon (Nyssönen 1995). Samalla tavoin jatkuvan kasvatuksen metsiköissä tulee huolehtia riittävästä elinvoimaisten, siementuotantokykyisten puiden määrästä luontaisen uudistumisen edellytysten varmistamiseksi (Nygren ym. 2017).

Lumipeitteen väheneminen lisää roustetuhoja niin kylvö- kuin luontaisen uudistamisen aloilla. Tiheä siemenpuuasento vähentää rousteen muodostumista. Kylvöaloilla vaikutukset voivat olla merkittäviä, koska rouste on jo nyt usein merkittävin kylvötulosta heikentävä tekijä. Roustetuhoja voi ehkäistä pinnallisella ja pienialaisella muokkauksella, jossa humustakin jätetään muokkausjälkeen. Lumipeitteen väheneminen vähentää jälki-itämistä (siemenet itävät kylvöä seuraavana kasvukautena). Etelä-Suomessa jälki-itäminen on tosin ollut marginaalista tähänkin asti. Pohjoisempaan asiassa voi merkitystä, koska hyvät siemensadot ovat harvinaisia ja jälki-itämisen osuus on ollut jopa 30 % (Ruotsalainen 2015).

Lumipeitteen vähenemisestä johtuen siementen itämiselle otollisin aika keväällä lyhenee Etelä-Suomessa. Kuivuuden ja poutakausien yleistymisen / pidentymisen lisää sirkkataimien kuolleisuutta, joskin aikaisin keväällä orastuneet taimet kestävät yllättävän pitkiäkin poutajaksoja. Poutajakso on erityisen haitallinen heti siemenkuoren aukeamisen jälkeen. Kylvön yhteydessä siementen peittämisellä voidaan vähentää sirkkataimien kuolleisuutta (Bergsten 1988). Siementen peittämiseen on haettu koneellisessa kylvössä uusilla jyrsein ja seularatkaisujen avulla (Helenius ja Saarinen 2013, Pesonen 2019). Rankkasateiden yleistymisen lisää eroosion aiheuttamia tuhoja itäville siemenille / sirkkataimille. Eroosioriskiä voidaan vähentää oikein tehdyllä (riittävän pinnallisella) maanmuokkauksella.

4.2.3. Maanmuokkaus

Maanmuokkauksella muutetaan maan lämpötilaa, kosteusoloja, maan tiheyttä ja ravinteiden saataavuutta, jotka parantavat siementen itämistä, taimien kasvua ja elossa säilymistä (Laine ym. 2019). Pohjoismaisen kirjallisuuskatsauksen mukaan maanmuokkauksen ansiosta 80–90 % havupuiden istutus-taimista jäi eloon, kun taas muokkaamattomalla kohteella elossaolo jää 15–20 %-yksikköä matalammaksi. Maanmuokkauksen positiivinen vaikutus näkyi myös pituuskehityksen nopeutumisena. Muokattun alueen istutustaimet olivat 10–25 % pidempiä 10–15 vuoden kuluttua istutuksesta kuin muokkaamattomaan maahan istutetut taimet (Sikström ym. 2020). Nykyisin käytössä olevat kohoumia muodostavat muokkausmenetelmät (esim. laikku/kääntömätästys) sekä jalostetusta siemenestä kasvatetut paakkutaimet takaavat nopean taimikon alkukehityksen.

Tutkimustulokset maanmuokkauksen vaikutuksista hiilidioksidin (CO₂) päästöihin ovat vaihtelevia. Virolaisissa hiilitasetutkimuksessa arvioitiin kangasmaan taimikon olevan hiilen lähde lyhyen aikaa avohakkuun jälkeen mutta muuttuvan jo 6–7 vuodessa hiilen nieluksi (Uri ym. 2019, Rebane ym. 2020). Kangasmailla maanmuokkauksen vaikutuksia metsämaan hiilivarastoihin on tarkasteltu myös pidemmällä aikavälillä. Useat tutkimukset, joissa on verrattu eri tavoin muokattuja aloja vastaavaan muokkaamattomaan tai vain käsin laikutettuun alaan, viittaavat siihen, ettei maanmuokkaus vähennä koko metsäekosysteemin hiilivarastoa, vaan parantunut puuston kasvu voi jopa lisätä sitä. Mätästäen

muokatulla uudistusalalla kasvaneessa havupuutaimikossa puuston hiilivarasto oli lähes 30 % suurempi ja koko ekosysteemin hiilivarasto 17 % suurempi kuin muokaamattomalla uudistusalalla 25 vuoden iässä (Mjöfors ym. 2017).

4.2.4. Istutus

Kevään kuivuus sekä kesän kuumien ja kuivien jaksojen yleistymisen lisää haasteita istutustaimien menestymiselle. Taimihuollon (pakkaustapa, varastointiaika, kastelu) (Helenius ym. 2002, Luoranen ym. 2019) sekä hyvän maanmuokkauksen ja istutustyön laadun merkitys korostuvat (Luoranen ym. 2011, 2018). Istuttaminen hyvään muokkausjälkeen riittävän syvälle parantaa taimien selviämistä kuivuusstressistä (Luoranen ja Viiri 2016) ja suojaa tukkimiehentäin tuhoilta (Viiri ja Luoranen 2017, Luoranen ym. 2017).

Lumeton ja lämpötiloiltaan vaihteleva talvi voi aiheuttaa myös pakkasvaurioita sekä versoihin että juuriin (Repo ym. 2001). Lisäksi lumettomissa olosuhteissa välillä sulava ja jäätyvä maanpinta aiheuttaa maaperältään hienojakoisilla mailla roustetta erityisesti muokatuilla kivennäismaapinnoilla. Rousterikin pienentämiseksi syysistutuksissa tulee välttää maaperältään hienolajitteisia kohteita sekä huolehtia hyvästä muokkausjäljen ja istutustyön laadusta (Luoranen ym. 2011, 2018). Lumipeitteen vähyys tai sen puuttuminen altistaa taimet kevättalvella ja keväällä ahavalle (kevätkuivumiselle). Erityisesti syksyllä istutettujen, huonosti juurtuneiden taimien toipuminen seuraavan kevään ahavatuhosta on heikompaa kuin aiemmin kasvukaudella istutettujen ja hyvin juurtuneiden taimien toipuminen.

Viljelymateriaalin eteläisten alkuperien hyödyistä lämpenevässä ilmastossa (pitenevässä kasvukaudessa) ei ole toistaiseksi kokeellista näyttöä. Kasvukauden pidentymisestä huolimatta puiden pituuskasvun päättymisen on riippuvainen päivänpituudesta. Männyn siemenviljelyaineistojen käyttöalueet määritettiin vastikään hieman pohjoisemmiksi (Ruotsalainen ym. 2016), mutta siirto koski lähinnä käyttöalueen etelärajaa. Viljelymateriaalin alkuperää valittaessa on hyvä ottaa huomioon uudistusalalla paikalliset olosuhteet erityisesti Pohjois-Suomessa. Pitkiin etelä-pohjoissuuntaisiin alkuperäsiirtoihin liittyy ilmaston muuttuessa korostunut riski taimien sopeutumisesta. Näin ollen voimassa olevia suosituksia puiden alkuperäsiirtojen osalta on viisasta noudattaa. Metsänjalostuksesta vastaavien ja metsänviljelyaineiston tuottajien on huolehdittava metsänviljelymateriaalin riittävästä geneettisestä monimuotoisuudesta, jotta turvataan riittävä laajuus puuston sopeutumiselle ilmastomuutokseen.

4.2.5. Jalostettu viljelymateriaali

Jalostetun viljelymateriaalin vaikutus parempana puuston kasvuna näkyy voimakkaimmin muutaman vuosikymmenen kuluttua metsikön perustamisesta. Nykyisellä jalostetulla materiaalilla on mahdollista saada 10–35% lisäys tilavuuskasvuun (Ruotsalainen 2014). Männyllä jalostushyödyn on laskettu olevan 10–25% tilavuuskasvussa. Sen lisäksi jalostuksella saadaan parannettua puuaineen laatua merkittävästi (Haapanen ym. 2016). Vastaavasti kuusella jalostushyödyksi on saatu ensimmäisen sukupolven siemenviljelyssiemenellä 20 % ja 1,5-polven siemenviljelyssiemenellä peräti 37% (Haapanen 2020). Nämä kasvunlisäykset mahdollistavat kiertoajan lyhentämisen ja samanaikaisesti metsiköstä saatavan järeän tukkipuun määrän kasvun (Ahtikoski 2017). Ilmastomuutokseen sopeutumiseksi erityisesti kuusen jalostuksessa tulisi ottaa huomioon kasvulisäyksen lisäksi kuivuuden ja muiden tuhojen kestävyden parantaminen aiempaa voimaakkammin.

Jalostetulla materiaalilla perustettu metsikkö tarjoaa parantuneen kasvun avulla mahdollisuuden tehostaa hiilensidontaan, vaikka toistaiseksi vain puuntuotanto tuottaa taloudellista arvoa metsänomistajalle (Ahtikoski ym. 2020, 2018). Eri skenaariolaskelmien mukaan jalostetun viljelymateriaalin ja tehostetun metsänhoidon avulla voitaisiin hakuaita nostaa 80–90 miljoonaan kuutiometriin vuodessa

(Heinonen ym. 2017, Hynynen ym. 2015) puuston hiilensidonnin pienentymättä nykyisestä (Hynynen 2015).

4.2.6. Puulajivalinta, sekametsät

Puulajin valinnan lähtökohtana on kunkin kasvupaikan ilmasto, ravinteisuus ja kosteusolosuhteet sekä tuhoalttius. Viime vuosikymmeninä kuusen viljelyn osuus on ollut aiempaa selvästi korkeampi. Kuusta on istutettu viime aikoina yli puolelle metsänviljelypinta-alasta (Huuskonen ym. 2016). Nykyään lähes kaikki kasvupaikaltaan tuoreen kankaan kohteet uudistetaan kuuselle, vaikka osalla tuoreen kankaan kohteista männyn tai rauduskoivun viljely olisi puun tuotoksen tai monimuotoisuuden kannalta perustellumpaa. Erityisesti Etelä-Suomessa kuusta on istutettu, hirvieläintuhoriskista johtuen, karuille ja kuiville kasvupaikoille, joilla kuivuusstressi altistaa puut taimivaiheessa mm. tukkimiehentäin aiheuttamille tuhoille ja myöhemmin varttuneessa metsässä esim. kirjanpainajatuhoille. Laaja-alaisen puhtaiden kuusikoiden perustaminen Etelä-Suomeen heikentää kirjanpainatuhoriskin hallintaa tulevaisuudessa.

Ilmaston lämpenemisen myötä kuusen kasvuolosuhteet tulevat heikkenemään ja tuhoalttius kasvaamaan Etelä-Suomessa erityisesti herkästi kuivuvilla ja karuilla kohteilla (Venäläinen ym. 2020). Tällaisten kohteiden uudistaminen männylle olisi ilmastonmuutosriskien hallinnan kannalta järkevämpää, mutta puulajivalintaa ohjaa liiaksi hirvieläintuhoriski. Vähäisemmän hirvieläintuhoriskin kohteiden ohjaamisella männyn ja rauduskoivun viljelyyn sekä esim. mänty-kuusisekametsien perustamisella voidaan pienentää kuusen istutuksen osuutta ja vähentää ilmastonmuutoksesta aiheutuvia riskejä. Lisäksi ilmaston lämpeneminen saattaa mahdollistaa tällä hetkellä vain eteläisimmässä Suomessa kasvavien puulajien (ml. jalojen lehtipuiden) laaja-alaisemman tai kokonaan uusien puulajien, kuten pyökin viljelyn, kun taimikkovaiheen hirvieläintuhoriski hallitaan karkotteiden tai muun suojauksen avulla.

VMI:n mukaan metsikkö luokitellaan yhden puulajin metsäksi, jos vallitsevan puulajin osuus on yli 95% ja jossain määrin sekapuustoiseksi, jos vallitsevan puulajin osuus on 75–95%. Sekametsässä vallitsevan puulajin osuus jää alle 75%:n (Korhonen ym. 2017). Taimikoissa vallitsevuus määritetään runkuluvun ja varttuneemmissa metsiköissä tilavuuden perusteella.

Sekapuustoisuuden on todettu lisäävän metsän monimuotoisuutta, esteettisyyttä ja monikäytön mahdollisuuksia sekä pienentävän hyönteis- ja sienituhoriskia (Felton ym. 2016). Parhaimmillaan sekapuustot käyttävät kasvutekijät (ravinteet, vesi, valo) yhden puulajin puustoja tehokkaammin. Keskieurooppalaisissa tutkimuksissa on saavutettu sekametsällä tuotosetuja ”over-yielding”, mutta pohjoismaisissa tutkimuksissa ei juurikaan. Erot johtuvat siitä, että pohjoismaisissa tutkimuksissa metsät ovat olleet hoidettuja ja käsiteltyjä, eikä täystiheitä tai lähes täystiheitä kuten Keski-Euroopassa tehdyissä tutkimuksissa (Pretzch ym. 2015). Kyseessä voi olla myös erilaisista puulajikoostumuksista johtuvat syyt. Pohjoismaisten tutkimusten mukaan sekametsän kasvatusta ei pienennä metsikön tuotosta. Samalla metsänkasvatuksessa saadaan toteutettua muita hyötyjä ja tavoitteita, kuin pelkästään puuntuotanto (Huuskonen ym. 2020a).

Sekametsien perustamisen mahdollisuudet ovat parantuneet nykyisen jalostetun viljelymateriaalin sekä kehittyneiden maanmuokkausmenetelmien ansiosta. Jalostetun kuusen viljelymateriaalin nopea kasvuun lähtö mätästetyllä uudistusalalla antaa mahdollisuuden mänty-kuusisekametsikön kasvatukseen. Tällöin kuusi istutetaan ja mänty joko kylvetään tai se syntyy luontaisesti esim. reunametsän siemennyksen avulla. Yksijaksoisen kuusi-rauduskoivumetsikön perustaminen on myös mahdollista, kun kuusen istutustaimikossa hyödynnetään alalle syntyneitä rauduskoivun taimia taimikonhoitovaiheessa (Huuskonen ym. 2020a).

Sekametsän positiivisia puolia voidaan myös tavoitella uudistamalla laajempi uudistusala kasvupaikan kasvupotentiaalivaihteluun perustuvaa mikrokuviointia hyödyntämällä. Mikrokuviointi voi perustua

edellisen puuston laserkeilaukseen tai päätehakuussa hakkuukoneella kerättyyn valtapuiden paikan-
nettuun puustotietoon. Mikrokuvioiden kasvupotentiaalin, maalajin ja esim. edellisessä puustossa
esiintyneen tyvilahoisuuden mukaan valitaan kullekin mikrokuviolle viljeltävä puulaji. Taimikonhoi-
dossa ja harvennuksissa koko uudistusala käsitellään kokonaisuutena (Lindeman ym. 2018). Tällaisen
täsmämetsänhoidon avulla hyödynnetään kasvupaikan tuottokyky mahdollisimman täysimääräisesti,
ja jo pinta-alaltaan pienetkin toisen puulajin mikrokuviot voivat parhaimmillaan toimia esim. tuhoepi-
demiaa rajoittavina tekijöinä.

Ilmastonmuutoksen huomioon ottaminen uudistamisvaiheessa

Viivyttelämätön, tehokas metsän uudistaminen lyhentää päätehakkuun jälkeistä hiilipäästöjaksoa ja edistää puuston hiilen sidontaa. Nykyisin käytössä olevat kohoumia muodostavat muokkausmenetelmät (esim. laikku/kääntömätöstys) sekä jalostetusta siemenestä kasvatetut paakkutaimet takaavat nopean taimikon alkukehityksen. Jalostetun viljelymateriaalin käytöllä on mahdollisuus lisätä puuntuotosta ja hiilensidontaa jopa yli 30 %:lla jalostamattomaan materiaaliin verrattuna.

Ilmastonmuutoksen myötä lisääntyvät kesän kuivuusjaksot sekä talven lämpötilan nousu ja edestakainen maanpinnan sulaminen ja jäätyminen sekä lumipeitteettömien olosuhteiden lisääntyminen Etelä-Suomessa lisäävät rouste- ja ahavatuhoriskiä pienillä taimilla. Näitä riskejä voidaan välttää huolehtimalla entistä paremmin maanmuokkauksen, viljelytyön sekä -materiaalin hyvästä laadusta.

Kuusen istutuksen kohdistaminen kasvupaikoille, joilla kuivuusriski on pieni sekä laajojen kuusimetsiköiden välttäminen parantavat mahdollisuuksia hallita tuhoriskejä etenkin Etelä-Suomessa.

Puulajivalinnan tarkentaminen paikkaansidotun kasvuolosuhdetiedon pohjalta ja tavoitteellinen kuusikoivu- ja mänty-kuusisekametsien perustaminen ja kasvattaminen edesauttavat metsien sopeutumista ilmastonmuutokseen.

4.3. Kasvatusvaihe

4.3.1. Taimikonhoito ja kasvatushakkuut

Metsän kasvatusvaiheessa, taimikonhoidosta lähtien, ovat lähtökohtina oikea-aikaiset ja voimakkuudeltaan sopivat toimenpiteet, jolloin puuston terveys ja elinvoimaisuus säilyy mahdollisimman hyvänä. Taimikonhoitojen tekeminen ajallaan varmistaa tavoitteen mukaisen puulajisuhteiden ylläpitämisen, nopeuttaa kasvatettavan puuston kehitystä, erityisesti sen järeytymistä. Oikea-aikaisella taimikonharvennuksella estetään myös lumi- ja tuulituhoille alttiiden tiheiköiden syntymistä puuston nuoruusvaiheessa (Gregow ym. 2011). Tällaisia tiheiköitä voi syntyä jaksollisessa kasvatuksessa, mutta myös jatkuvan kasvatuksen hakkuiden pienaukoissa.

Taimikonhoidolla nopeutettu puuston järeytyminen edesauttaa taloudellisesti järkevän ensiharvennuksen toteuttamisesta. Taimikonhoidolla lisätään myös järeämmän ainespuun tuotantoa koko metsikön kiertoaikana. Nykyistä tasoa tehostetummalla taimikonhoidolla on mahdollisuus nostaa tukkipuiden hakkuita 34 milj. m³ (9%) seuraavan sadan vuoden aikana Suomessa (Huuskonen ym. 2020b). Tämä mahdollistaa myös sen, että entistä suurempi osa puustoon varastoidusta hiilestä voidaan sitoa pitkäikäisiin puutuotteisiin.

Harvennushakkuulla ylläpidetään puuston elinvoimaisuutta laajentamalla jäävän puuston latvuston elintilaa ja muita kasvuresursseja. Kun käytetään tavanomaista lievempää harvennusvoimakutta ja/tai yläharvennusta sille sopivilla kohteilla voidaan kiertoaikaa pidentää ja nostaa puuston hiilivarastoa. Tämä ei kuitenkaan välttämättä lisää hiilensidontan tehokkuutta. Jos harvennuksen jälkeinen

kasvatustiheys jätetään huomattavasti suuremmaksi, johtaa se seuraavan harvennuksen aikaistamiseen, jotta puuston elinvoimaisuus ja terveys eivät vaarannu.

Harvennushakkuissa sekapuustoisuuden ylläpitäminen parantaa puuston kykyä vastata ilmastonmuutoksen tuomiin riskeihin (Huuskonen ym. 2020a). Yhden puulajin metsikön sijasta kuivuudelle alttiilla kasvupaikoilla tulee suosia mänty-kuusisekametsiköitä. Lisäksi viljavammilla kohteilla lehtipuusekoitus parantaa biodiversiteettiä ja mm. metsikön virkistysarvoja (Felton ym. 2017). Samoin etenkin riskikohteissa kiertoajan lyhentäminen voi olla ratkaisu hyvän kasvun ja metsikön elinvoimaisuuden ylläpitämiseksi (Kellomäki ym. 2008, ALRahahleh ym. 2018).

Toimenpidekuvioiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon vallitsevan tuulensuunnan ja kovien tuulten toistuvuus esim. tuulituhoriskikarttojen avulla (<https://metsainfo.luke.fi/fi/tuulituhoriskikartta>). Suuret vierekkäisten kuvioiden puuston pituuden erot sekä maaston korkeuserot voivat lisätä paikallisesti tuulituhoriskiä. Viivästyneet ja/tai voimakkaat harvennukset sekä samanaikainen puuston lannoittaminen lisää myrskytuhoriskiä. Samoin kasvavan tuulituhoriskin vuoksi varttuneissa metsissä kannattaa välttää tarpeettomia harvennuksia. Vaikka harvennukset nostavat väliaikaisesti tuulituhoriskiä, pidemmällä aikavälillä ne parantavat metsikön tuhon kestävyttä (tuuli-, lumi- ja hyönteis- ja sienituhot).

Hiilensidonnan maksimoimiseksi on esitetty hakkuista pidättäytymistä. Hakkuista pidättäytyminen lisää hiilivarastoa lyhyellä, mutta ei välttämättä pidemmällä aikavälillä (ks. luku 3). Talousmetsässä harvennus- ja poimintahakkuiden viivästyttäminen aiheuttaa tiheän kasvatuseron seurauksena latvusten supistumista, mikä pidemmällä aikavälillä heikentää puuston elinvoimaa ja lisää tuhoalttiutta. Latvusten supistuminen tapahtuu nuorissa metsissä hyvinkin nopeasti ja varttuneemmassa puustossa sekä karummilla kasvupaikoilla muutos on hitaanpaa. Jatkuvan kasvatuksen metsikössä hakkuun viivästyttäminen heikentää alemman latvuseroksen puuston elinvoiman lisäksi myös luontaisen uudistumisen edellytyksiä sekä alikasvoksen kehitysmahdollisuuksia valtapuiden käyttäessä yhä suuremman osan kasvutilasta (Valkonen 2020). Pitkään käsittelemättä olleen metsikön ottaminen hakkuutoiminnan piiriin vaatii varovaisuutta hakkuussa, jotta suuri muutos puuston tiheydessä ei johda tuuli- ja lumituhoihin.

4.3.2. Kasvatusmenetelmät

Lähtökohtaisesti metsänomistajan tavoitteet ratkaisevat käytettävän metsänkasvatustavan. Kangasmailla metsikön rakenne on yleensä ratkaisevin tekijä kasvatusmenetelmän valinnassa. Puuston eriarokkuus luo edellytykset pienpuuston ja alikasvoksen hyödyntämiseen jatkuvan kasvatuksen hakkuumenetelmin. Puuntuotosvertailuja jaksollisessa ja jatkuvassa kasvatuksessa on simuloitu erilaisilla malleilla (esim. Pukkala ym. 2011., Kellomäki ym. 2019). Useamman sadan vuoden simulointiin perustuen vuotuinen kasvu ja hiilen sidonta sekä hiilivarasto olivat molemmissa menetelmissä likimain samalla tasolla, kun luontainen uudistuminen tuotti riittävästi alikasvosta jatkuvalla kasvatuksella hoide-tussa metsässä. Siemensatojen pudotessa 25–75 % täydestä siemensadosta laski puuston tilavuuskasvu jatkuvassa kasvatuksessa 44–74 % (Kellomäki ym. 2019). Empiirisiin aineistoihin perustuvat vertailut osoittavat, että puuntuotos jää jatkuvassa kasvatuksessa alhaisemmalle tasolla verrattuna tasaikäiskasvatukseen (Hynynen ym. 2019, Bianchi ym. 2020).

Ojitettujen soiden metsissä kasvatusmenetelmän valinnassa vesitalouden säätely on avainasemassa. Puuston kasvun kannalta riittävä vedenpinnan syvyys kasvukauden loppupuolella on 30 cm. Vedenpinnan lasku tätä syvemmälle lisää turpeen hajoamisprosessia pintaturpeessa (hiilipäästö). Toisaalta vedenpinnan liiallinen nousu (yli 20 cm:n tason) voi johtaa metaani- ja ravinnepäästöihin sekä puiden kasvun heikkenemiseen. Pohjaveden pinnan vaihteluiden pitäminen vakaana, edellyttää puuston haihduntakapasiteetin ylläpitämistä metsänkäsittelystä huolimatta (Nieminen ym. 2018).

Poimintahakkuilla sekä erilaisilla pienaukko- ja kaistalahakkuilla on mahdollisuus ylläpitää puuston riittävä haihduntakapasiteetti, jolloin pohjaveden pinnan vaihtelu pysyy hallinnassa. Tällöin myös kunnostusojituksen tarve vähenee verrattuna avohakkuun sisältävään jaksollisen kasvatuksen menetelmiin (ks. luku 2.3). Myös suometsien käsittelyn negatiiviset vesistövaikutukset pysyvät nykykäytäntöjä pienempinä (Nieminen ym. 2018).

4.3.3. Lannoitus

Jalostetun metsänviljelymateriaalin ja lannoituksen avulla metsien kasvua ja hiilen sidontaa voidaan nostaa merkittävästi nykyisestä. Lannoitus on nopein ja taloudellisesti kannattava metsänhoidon toimenpide puuston kasvun lisäämiseksi (Heinonen ym. 2017, Moilanen ym. 2015). Kivennäismailla typen puute on tavallisin kasvua rajoittava tekijä. Yhdellä kasvatuslannoituksella varttuneissa kuusikoissa ja männiköissä voidaan lisätä puuston kasvua $1,5\text{--}3\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ vuodessa 6–8 vuoden ajan. Turvemaiden tuhkalannoituksella voidaan lisätä puuston kasvua pitkäkestoisesti $1\text{--}3\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ vuodessa 20–30 vuoden ajan (Hynynen ym. 2017).

Ilmastonmuutoksen huomioon ottaminen kasvatusvaiheessa

Metsänhoitotoimenpiteiden oikea-aikaisuudella ja toimenpiteiden sopivalla voimakkuudella sekä sekametsärakenteen ylläpidolla pyritään pitämään metsä tuottavana ja hallitsemaan tuhoriskejä.

Suometsissä tulee kehittää metsänkäsittelymenetelmiä, joilla pystytään ylläpitämään tasainen puuston haihduntakapasiteetti ja sitä kautta vähentämään pohjaveden pinnan äärevää vaihtelua. Poimintahakkuilla sekä erilaisilla pienaukko- ja kaistalahakkuilla on mahdollisuus ylläpitää puuston riittävä haihduntakapasiteetti, jolloin myös kunnostusojituksen tarve vähenee ja vältetään uudistuhakkuun jälkeinen vedenpinnan nousu. Toisaalta näillä keinoin voidaan välttää myös vedenpinnan voimakasta laskua ja siten hillitä turpeen hajoamista.

Lannoitus on varttuneissa metsissä nopein ja taloudellisesti kannattava metsänhoitokeino lisätä kasvua ja hiilensidontaa.

Ilmastonmuutoksen tarkkoja kokonaisvaikutuksia ja metsänkäsittelyjen vaikutuksia metsien resistanssin ja resilienssin parantamiseen ei tarkasti tunneta. Metsänhoidon ja metsien käytön sopeuttaminen ilmastonmuutokseen vaatii joustavuutta ja käytössä olevien metsänhoitomenetelmien vaikutusten arvioimista ja uusien menetelmien kehittämistä.

5. Raportin keskeiset viestit

5.1. Sään ääri-ilmiöt aiheuttavat ongelmia puille?

Ennustettu ilmastonmuutos pidentää puiden potentiaalista kasvukautta. Kasvun ennustetaan lisääntyvän erityisesti Pohjois-Suomessa. Alueellisten erojen vuoksi eri puulajit hyötyvät ilmastonmuutoksesta eri tavoin. Sekä kesäaikainen kuivuus että mahdollisten lisääntyvien sateiden myötä kohonnut ilman kosteus voivat kuitenkin johtaa kasvun vähenemiseen. Pintajuuruisuutensa takia kuusi on herkempi kuivuudelle kuin mänty ja koivu. Tähän perustuen kuusen on ennustettu väistyvän ja koivun kasvualan lisääntyvän ajan myötä eteläisessä Suomessa. Toisaalta runsaat sateet kasvukaudella vaikuttavat juurten toimintaan ja puiden kasvuun turvemaidella ja myös hienojakoisilla kivennäismailla, mikäli pohjavedenpinta nousee liian korkealle ja/tai maan vesipitoisuus pysyy korkealla liian pitkään. Valojaksoisuus ei muutu ilmaston lämmetessä, mikä asettaa rajoitteita kasvupotentiaalin lisääntymiselle, koska puulajit ja alkuperät reagoivat valojaksoisuuteen eri tavoin. Säteilyn väheneminen kasvukauden loppua kohden heikentää yhteyttämisen hyötysuhdetta (yhteyttäminen vs. hengitys) sitä enemmän, mitä korkeampi on lämpötila, mikä pienentää kohonneesta lämpötilasta saatavaa nettohyötyä.

Talvi vaikuttaa boreaalisten metsäekosysteemien toimintaan. Talvilämpötilojen muutoksen suuruus vaikuttaa puiden kasvuun tulevaisuudessa. Puut ovat sopeutuneet sietämään alhaisia lämpötiloja. Pakkaslämpötilat tuskin häviävät, mutta niiden alueellinen jakaantuminen muuttuu. Lumipeitteen alueellinen muutos vaikuttaa pienien taimien alkukehitykseen ja myös roudan muodostumiseen, mikä toisaalta vaikuttaa juurten toimintaan ja puiden kasvuun. Sadannassa tapahtuvien muutosten seurauksena puiden lumituhoriskin ennustetaan vähenevän Etelä-Suomessa, mutta lisääntyvän Pohjois-Suomessa. Talven minimilämpötilojen aiheuttama pakkasvaurioriski pienenee, mutta lämpötilavaihteluihin ja jäätymis-sulamissykleihin liittyvä riski säilyy. Nolla-asteen yläpuolella olevien talvilämpötilojen lisääntyminen on puille haitallista, koska puiden energiavarastoja kuluu hengitykseen, mikä altistaa niitä pakkasvaurioille ja kevättalven aikaiselle kuivumiselle. Silmulevon purkaantumiseen tarvittavan viileän jakson pituus riittänee myös tulevaisuudessa. Näin ollen kasvukauden alkamisen aikaistumiseen liittyvä pakkasvaurioriski säilyy vähintäänkin samana kuin nykyilmastossa.

Useiden ilmastonmuutoksen myötä muuttuvien ympäristötekijöiden vaikutukset kohdistuvat puiden juuriin ja niiden kasvuympäristöön. Juuret ovat myös yksi merkittävä, mutta melko huonosti tunnettu osa boreaalisten metsäekosysteemien hiilenkiertoa. Eri puulajien juurten sopeutumisesta, kasvudynamiikasta ja yhteisvaikutuksista maanpäällisten osien kanssa erilaisissa ympäristöoloissa tarvitaan lisätietoa.

5.2. Kuinka hiilitase pidetään hyvänä?

Ilmastonmuutoksen hillinnässä metsät toimivat paitsi uusiutuvan raaka-aineen ja energian lähteenä myös tärkeänä hiilen nieluna ja varastona. Maaperän hiilivarasto on suurempi kuin puustoon sitoutunut hiilen määrä. Erityisen korostunut tämä ero on soilla, joilla metsäojitetuinakin turpeessa on hiiltä moninkertainen määrä puuston hiilivarastoon verrattuna – jopa ohutturpeisilla kasvupaikoilla. Karujen ojitusalueiden turve on keskimäärin hiilen nielu, mutta ravinteikkailla kasvupaikoilla turve on hiilen lähde. Ravinteikkaiden suometsien turpeen hiilivaraston hävikin pienentämiseen olisi kiinnitettävä huomiota. Kangasmailla metsien hiilinielua pienentävät hakkuiden lisääminen, nuorten metsien osuuden voimakas lisääminen, hakkuutähteiden ja kantojen korjuu, intensiiviset harvennukset, luonnonpoistuman välttäminen tai korjaaminen sekä metsien raivaaminen muuhun maankäyttöön.

Muuttuva ilmasto vaikuttaa metsien kasvuun, mutta myös orgaanisen aineksen hajoitusnopeuteen sekä tuhoriskien kautta hiilivarastojen pysyvyyteen. Metsien hiilinielua voidaan kasvattaa varmista-

malla hakkuiden jälkeen nopea uudistuminen, pidentämällä kiertoaikaa ja myöhentämällä harvennuksia, edistämällä lahopuun määrän kasvua, keventämällä maanmuokkausmenetelmiä, metsittämällä sekä valitsemalla metsätuhoriskien hallinnan näkökulmasta parhaat metsänhoitomenetelmät. Lyhyellä aikavälillä nopeimmin metsien hiilinielua voidaan kasvattaa pidentämällä kiertoaikaa ja vähentämällä hakkuita.

Alustavien tutkimustulosten mukaan turvemailla hiilen hävikkiä turpeesta voidaan pienentää välttämällä liian tehokasta kuivatusta ja suosimalla peitteellisen metsänkasvatuksen menetelmiä. Lyhyellä aikavälillä tuhkalannoitus on myös keino kasvattaa suometsien hiilivarastoa.

5.3. Metsänhoidon mahdollisuudet vastata ilmastonmuutokseen?

Ilmastonmuutoksen hillinnän kannalta nopea ja onnistunut metsän uudistaminen parantavat uudistamistulosta ja edistävät kasvavan puuston hiilen sidontaa. Lämpenevät, lumettomat mutta sateiset talviolosuhteet nostavat pienten taimien rouste- ja ahavatuhoriskejä etenkin Etelä-Suomessa. Näiden riskien hallitsemiseksi maanmuokkausmenetelmään ja viljelyn ajoitukseen sekä työn laatuun tulee kiinnittää erityistä huomiota. Jalostetun viljelymateriaalin käyttö osana tehokasta metsänviljelyä lisää puuntuotosta (erityisesti järeän ainespuun määrää) sekä hiilensidontaa. Samalla se mahdollistaa nykyistä suuremmassa määrin hiilen sitoutumisen pitkäikäisiin puutuotteisiin.

Ilmastonmuutokseen sopeutumiseksi kuusen istutukseen tulee valita kasvupaikat, joilla kuivuusriski jää pieneksi yleistyvistä kasvukauden kuivuusjaksoista huolimatta. Etelä-Suomessa kuusen istutuksen osuuden pienentäminen ja muiden puulajien laajempi käyttö kasvupaikka huomioon ottaen alentaa ilmastonmuutoksen tuomia riskejä. Laajojen yhden puulajin metsiköiden, erityisesti kuusiköiden, muodostamista vältetään hyödyntämällä täsmämetsänhoitoa, jossa paikkaan sidottua tietoa aiemman puuston kasvusta ja tuhoista sekä kasvupaikan maaperästä ja kosteusolosuhteista hyödynnetään puulajivalinnan tarkentamisessa. Tavoitteena on perustaa elinvoimaisia sekametsiä sekä eri puulajien pienkuvioista koostuvia sekapuustoisia metsiä mahdollisten hyönteis-, sieni- ja tuulituhoriskien hallinnan helpottamiseksi.

Metsän kasvatusvaiheessa metsänhoitotoimenpiteiden (taimikonhoito ja harvennushakkuut) oikea-aikaisuudella ylläpidetään puuston elinvoimaisuutta ja hallitaan tuhoriskejä. Kasvatusvaiheessakin tavoitteena on säilyttää sekapuustoisuus puuston terveyden ja monimuotoisuuden ylläpitämiseksi. Suometsissä tulee kehittää metsänkäsittelymenetelmiä, joilla pystytään ylläpitämään tasainen puuston haihduntakapasiteetti ja sitä kautta vähentämään pohjaveden pinnan huomattavaa vaihtelua. Poimintahakkuilla sekä erilaisilla pienaukko- ja kaistalehakkuilla on mahdollisuus säilyttää puuston riittävä haihduntakapasiteetti, jolloin myös kunnostusojituksen tarve vähenee. Metsänlannoitus on nopein ja taloudellisesti kannattava keino lisätä kasvua ja hiilensidontaa varttuneessa metsässä.

Viitteet

- Aakala, T., Kuuluvainen, T., Wallenius, T. & Kauhanen, H. 2011. Tree mortality episodes in the intact *Picea abies*-dominated taiga in the Arkhangelsk region of northern European Russia. *Journal of Vegetation Science* 22(2): 322–333. doi: 10.1111/j.1654-1103.2010.01253.x
- Achat, D. L. L., Deleuze, C., Landmann, G., Pousse, N., Ranger, J. & Augusto, L. 2015. Quantifying consequences of removing harvesting residues on forest soils and tree growth - A meta-analysis. *Forest Ecology and Management* 348: 124–141. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.042>
- Agostini, A., Giuntoli, J. & Boulamanti, A. (ed. Marelli, L.) 2013. Carbon accounting of forest bioenergy. Joint Research Centre of the European Commission, Ispra. <https://doi.org/10.2788/29442>
- Ahtikoski, A., Ahtikoski, R., Haapanen, M., Hynynen, J. & Kärkkäinen, K. 2020. Economic Performance of Genetically Improved Reforestation Material in Joint Production of Timber and Carbon Sequestration: A Case Study from Finland. *Forests* 2020, 11(8): 847. <https://doi.org/10.3390/f11080847>
- Ahtikoski, A., Haapanen, M., Hynynen, J., Karhu, J. & Kärkkäinen, K. 2018. Genetically improved reforestation stock provides simultaneous benefits for growers and a sawmill, a case study in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 33(5): 484–492. doi: 10.1080/02827581.2018.1433229
- AlRahahleh, L., Kilpeläinen, A., Ikonen, V.-P., Strandman, H., Venäläinen, A. & Peltola, H. 2018. Effects of CMIP5 Projections on Volume Growth, Carbon Stock and Timber Yield in Managed Scots Pine, Norway Spruce and Silver Birch Stands under Southern and Northern Boreal Conditions. *Forests* 9(4): 208. 21 p. doi:10.3390/f9040208
- Asikainen, A., Viiri, H., Neuvonen, S., Nevalainen, S., Lintunen, J., Laturi, J., Uusivuori, J., Venäläinen, A., Lehtonen, I. & Ruosteenoja, K. 2019. Ilmastonmuutos ja metsätuhot – analyysi ilmaston lämpenemisen seurauksista Suomessa. Suomen ilmastopaneeli, Raportti 1/2019 13 s. Suomen Ilmastopaneeli, Raportti 1/2019. Helsinki. 11 s.
- Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen T. (toim.). 2012. Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja 240. 211 s.
- Bergsten, U. 1988. Pyramidal indentations as a microsite preparation for direct seeding of *Pinus sylvestris* L., *Scandinavian Journal of Forest Research*, 3(1–4): 493–503.
- Beuker, E. 1994a. Long-term effects of temperature on the wood production of *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst. in old provenance experiments. *Scandinavian Journal of Forest Research* 9: 34–45.
- Beuker, E. 1994b. Adaptation to climatic changes of the timing of bud burst in populations of *Pinus sylvestris* L. and *Picea abies* (L.) Karst. *Tree Physiology* 14: 961–970.
- Beuker, E., Valtonen, E. & Repo T. 1998. Seasonal variation in frost hardiness of Scots pine and Norway spruce in old provenance experiments in Finland. *Forest Ecology and Management* 107: 87–98.
- Bianchi, S., Huuskonen, S., Siipilehto, J. & Hynynen, J. 2020. Differences in tree growth of Norway spruce under rotation forestry and continuous cover forestry. *Forest Ecology and Management* 458. 7 p.
- Crawford, R. M. M. 2003. Seasonal differences in plant responses to flooding and anoxia. *Can. J. Bot. Canadian Journal of Botany* 81(12): 1224–1246. doi:10.1139/b03-127.
- Cooper, C. F. 1983. Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research* 13: 155–166.
- Crowther, T. W., Todd-Brown, K. E. O., Rowe, C. W., Wieder, W. R., Carey, J. C., Machmuller, M. B., Snoek, B. L., Fang, S., Zhou, G., Allison, S. D., Blair, J. M., Bridgman, S. D., Burton, A. J., Carrillo, Y., Reich, P. B., Clark, J. S., Classen, A. T., Dijkstra, F. A., Elberling, B., Emmett, B. A., Estiarte, M., Frey, S. D., Guo, J., Harte, J., Jiang, L., Johnson, B. R., Kroel-Dulay, G., Larsen, K. S., Laudon, H., Lavalley, J. M., Luo, Y., Lupascu, M., Ma, L. N., Marhan, S., Michelsen, A., Mohan, J., Niu, S.,

- Pendall, E., Penuelas, J., Pfeifer-Meister, L., Poll, C., Reinsch, S., Reynolds, L. L., Schmidt, I. K., Sistla, S., Sokol, N. W., Templer, P. H., Treseder, K. K., Welker, J. M. & Bradford, M. A. 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature* 540(7631): 104–108.
- Davidson, E. A. & Janssens, I. A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440(7081): 165–173.
- Díaz-Yáñez, O., Pukkala, T., Packalen, P. & Peltola, H. 2019. Multifunctional comparison of different management strategies in boreal forests. *Forestry: An International Journal of Forest Research* 93(1): 84–95. cpz053. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz053>
- Domisch, T., Finér L. & Lehto, T. 2001. Effects of soil temperature on biomass and carbohydrate allocation in Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings at the beginning of the growing season. *Tree Physiology* 21: 465–472.
- Domisch, T., Martz, F., Repo, T. & Rautio, P. 2018. Winter survival of Scots pine seedlings under different snow conditions. *Tree Physiology* 38: 602–616. DOI: 10.1093/treephys/tpx111.
- Domisch, T., Martz, F., Repo, T. & Rautio, P. 2019. Let it snow! Winter conditions affect growth of birch seedlings during the following growing season. *Tree Physiology* 39: 544–555. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpy128>
- Domisch, T., Qi, J., Sondej, I., Martz, F., Lehto, T., Piirainen, S., Finér, L., Silvennoinen, R. & Repo, T. 2020. Here comes the flood! Stress effects of continuous and interval waterlogging periods during the growing season on Scots pine saplings. *Tree Physiology* 40: 869–885. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa036>
- EU NIR 2019: European Union. National Inventory Report (NIR). <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/national-inventory-submissions-2019> (21.1.2020)
- Felton, A., Nilsson, U., Sonesson, J., Felton, A.M., Roberge, J.-M., Ranius, T., Ahlström, M., Bergh, J., Björkman, C., Boberg, J., Drössler, L., Fahlvik, N., Gong, P., Holmström, E., Keskkitalo, C. H., Klapwijk, M. J., Laudon, H., Lundmark, T., Niklasson, M., Nordin, A., Pettersson, M., Stenlid, J., Sténs, A. & Wallertz, K. 2016. Replacing monocultures with mixed species stands: Ecosystem service implications of two production forest alternatives in Sweden. *Ambio* 45: 124–139. doi: 10.1007/s13280-015-0749-2.
- FOREST EUROPE 2015. State of Europe's Forests 2015. Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe FOREST EUROPE Liaison Unit Madrid. 314 s.
- Gregow, H., Peltola, H., Laapas, M., Saku, S. & Venäläinen, A. 2011. Combined occurrence of wind, snow loading and soil frost with implications for risks to forestry in Finland under the current and changing climatic conditions. *Silva Fennica* 45(1): 35–54.
- Groffman, P. M., Driscoll, C. T., Fahey, T. J., Hardy, J. P., Fitzhugh, R. D. & Tierney, G. L. 2001. Colder soils in a warmer world: A snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. *Biogeochemistry* 56: 135–150.
- Haapanen, M., Hynynen, J., Siipilehto, J. & Kilpeläinen, M.-L. 2016. Realised and projected gains in growth, quality and simulated yield of genetically improved Scots pine in southern Finland. *European Journal of Forest Research* 135: 997–1009. Doi 10.1007/s10342-016-0989-0
- Haapanen, M. 2020. Performance of genetically improved Norway spruce in one-third rotation-aged progeny trials in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 35(5–6): 221–226. <https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1776763>.
- Harmon, M. E. & Marks, B. 2002. Effects of silvicultural practices on carbon stores in Douglas-fir western hemlock forests in the Pacific Northwest, U.S.A.: results from a simulation model. *Canadian Journal of Forest Research* 32(5): 863–877. Doi: 10.1139/x01-216
- Harmon, M. E., Ferrell, W. K., Franklin, J. F. 1990. Effects on Carbon Storage of Conversion of Old-Growth Forests to Young Forests. *Science* 247: 699–702. <https://doi.org/10.1126/science.247.4943.699>
- Heikkinen, J. 2008. Hiilen määrän maantieteellinen ja vertikaalinen vaihtelu maaperän pintaosassa. Pro gradu. Oulun yliopisto.

- Heinonen, T., Pukkala, T., Asikainen, A. & Peltola, H. 2017. Scenario analyses on the effects of fertilization, improved regeneration material, and ditch network maintenance on timber production of Finnish forests. *European Journal of Forest Research* 137: 93–107. <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1093-9>
- Helenius, P., Luoranen, J. & Rikala, R. 2002. Kesällä istutettavien, kasvussa olevien kuusen paakkutaimien käsittelykestävyys ja maastomenestyminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 4: 547–558.
- Helenius, P., Luoranen, J., Rikala, R. & Leinonen, K. 2002. Effect of drought on growth and mortality of actively growing Norway spruce container seedlings planted in summer. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17: 218–224.
- Helenius, P. & Saarinen, M. 2013. Regeneration result of excavatormounted rototiller in direct seeding of Scots pine on forestry-drained peatland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 28(8): 752–757. Doi: 10.1080/02827581.2013.844849
- Helin, T., Salminen, H., Hynynen, J., Soimakallio, S., Huuskonen, S. & Pingoud, K. 2016. Global warming potentials of stemwood used for energy and materials in Southern Finland: differentiation of impacts based on type of harvest and product lifetime. *Gcb Bioenergy*, 8(2), pp. 334–345.
- Helmsaari, H.-S., Makkonen, K., Kellomäki, S., Valtonen, E. & Mälkönen, E. 2002. Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. *Forest Ecology and Management* 165: 317–326. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00648-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00648-X)
- Hildén, M., Soimakallio, S., Seppälä, J. & Liski, J. 2016. Metsien hiilinielut otettava mukaan biotalouden kestävyystarkasteluihin. SYKE Policy Brief. <http://hdl.handle.net/10138/164752>
- Holmberg, M., Aalto, T., Akujärvi, A., Arslan, A. N., Bergström, I., Böttcher, K., Lahtinen, I., Mäkelä, A., Markkanen, T., Minunno, F., Peltoniemi, M., Rankinen, K., Vihervaara, P. & Forsius, M. 2019. Ecosystem Services Related to Carbon Cycling – Modeling Present and Future Impacts in Boreal Forests. *Frontiers in Plant Science* 10: 343.
- Huuskonen, S., Domisch, T., Finér, L., Hantula, J., Hynynen, J., Matala, J., Miina, J., Neuvonen, S., Nevalainen, S., Niemistö, P., Nikula, A., Piri, T., Siitonen, J., Smolander, A., Tonteri, T., Uotila, K. & Viiri, H. 2020a. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? *Forest Ecology and Management* 479. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118558>
- Huuskonen, S., Haikarainen, S., Sauvula-Seppälä, T., Salminen, H., Lehtonen, M., Siipilehto, J., Ahtikoski, A., Korhonen, K. T. & Hynynen, J. 2020b. Benefits of juvenile stand management in Finland—impacts on wood production based on scenario analysis. *Forestry* 93: 458–470. doi:10.1093/forestry/cpz075
- Huuskonen, S., Kojola, S., Ihalainen, A. & Hynynen, J. 2016. Istutetaanko kuusta jo liikaa? Tutkimuksesta tuotteiksi ja päätöksiksi. *Metsätieteen päivä 2016*. Suomen Metsätieteellinen Seura. 22 s.
- Hynynen, J., Eerikäinen, K., Mäkinen, H. & Valkonen, S. 2019. Growth response to cuttings in Norway spruce stands under even-aged and uneven-aged management. *Forest Ecology and Management* 437: 314–323.
- Hynynen, J., Huuskonen, S. & Kojola, S. (toim.) 2017. METSÄ 150 – Metsänkasvatuksen keinot lisätä puuntuotantoa kestävästi ja kannattavasti. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 16/2017. 89s.
- Hynynen, J., Salminen, H., Ahtikoski, A., Huuskonen, S., Ojansuu, R., Siipilehto, J., Lehtonen, M. & Eerikäinen, K. 2015. Long-term impacts of forest management on biomass supply and forest resource development: a scenario analysis for Finland. *European Journal of Forest Research*: 134: 415–431. Doi 10.1007/s10342-014-0860-0.
- Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. *Metsäntutkimuslaitoksen Tiedonantoja* 835. 116 s.
- Hytönen, J., Hökkä, H. & Saarinen, M. 2019. The effect of site preparation on seed tree regeneration of drained Scots pine stands in Finland. *Baltic Forestry* 25(1): 9 s.

- Hänninen, H. 2005. Boreaalisen vyöhykkeen puiden talvehtiminen lämpenevässä ilmastossa. Teoksessa: Riikonen J. & Vapaavuori E. (toim.). Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944: 124–128.
- Hänninen, H. 2016. Boreal and temperate trees in a changing climate: Modelling the ecophysiology of seasonality. Springer, Dordrecht, 342 p.
- Jyske, T., Manner, M., Mäkinen, H., Nöjd, P., Peltola, H. & Repo, T. 2012. The effects of artificial soil frost on cambial activity and xylem formation in Norway spruce. *Trees* 26: 405–419. Doi 10.1007/s00468-011-0601-7
- Kaarakka, L., Tamminen, P., Saarsalmi, A., Kukkola, M., Helmisaari, H.-S. & Burton, A. J. 2014. Effects of repeated whole-tree harvesting on soil properties and tree growth in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand. *Forest Ecology and Management* 313: 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.11.009>
- Kaipainen, T., Liski, J., Pussinen, A. & Karjalainen, T. 2004. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environmental Science & Policy* 7: 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.03.001>
- Kallio, A. M. I., Salminen, O. & Sievänen, R. 2016. Forests in the Finnish low carbon scenarios. *Journal of Forest Economics* 23(1): 45–62.
- Kalliokoski, T., Heinonen, T., Holder, J., Lehtonen, A., Mäkelä, A., Minunno, F., Ollikainen, M., Packalen, T., Peltoniemi, M., Pukkala, T., Salminen, O., Schelhaas, M.-J., Seppälä, J., Vauhkonen, J. & Kanninen, M. 2019. Skenaarioanalyysi metsien kehitystä kuvaavien mallien ennusteiden yhtäläisyyksistä ja eroista. Suomen ilmastopaneeli Raportti 2/2019. 88 s.
- Kellomäki, S., Beuker, E., Hari, P., Holopainen, J., Holopainen, T., Hypén, H., Hänninen, H., Karjalainen, T., Juurola, E., Koski, V., Laine, K., Leinonen, I., Liski, J., Neuvonen, S., Niemelä, P., Nissinen, A., Peltola, H., Repo, T., Talkkari, A., Wang, K. Y. & Westman C. J. 1996. Metsät. Teoksessa: Ilmastonmuutos ja Suomi (toim. Kuusisto, E., Kauppi, L. & Heikinheimo, P.). Helsinki University Press: 71–106.
- Kellomäki, S., Strandman, H., Nuutinen, T., Peltola, H., Korhonen, K. T. & Väisänen, H. 2005. Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change. FINADAPT Working Paper 4, Finnish Environment Institute Mimeographs 334, Helsinki, 44 s.
- Kellomäki, S. & Peltola, H. 2005. Metsäpuiden kasvu ja ilmastomuutos – männyn fysiologia ja ekologia vastetta kohoavaan ilman lämpötilaan ja hiilidioksidipitoisuuteen. Teoksessa: Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät (toim. Riikonen, J. & Vapaavuori, E.). Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944: 52–67.
- Kellomäki, S., Peltola, H., Nuutinen, T., Korhonen, K. T. & Strandman, H. 2008. Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. *Philosophical transactions of the Royal Society B* 363: 2341–2351. Doi:10.1098/rstb.2007.2204
- Kellomäki, S., Maajärvi, M., Strandman, H., Kilpeläinen, A. & Peltola, H. 2010. Model computations on the climate change effects on snow cover, soil moisture and soil frost in boreal conditions over Finland. *Silva Fennica* 44: 213–233. <https://silvafennica.fi/pdf/article455.pdf>
- Kellomäki, S., Strandman, H. & Peltola, H. 2019. Effects of even-aged and uneven-aged management on carbon dynamics and timber yield in boreal Norway spruce stands: a forest ecosystem model approach *Forestry* 92: 635–647. doi:10.1093/forestry/cpz040.
- Kilpeläinen, A., Peltola, H., Ryyppö, A. & Kellomäki, S. 2005. Scots pine responses to elevated temperature and carbon dioxide concentration: growth and wood properties. *Tree Physiology* 25: 75–83. <https://doi.org/10.1093/treephys/25.1.75>
- Kilpeläinen, A., Kellomäki, S., Strandman, H. & Venäläinen, A. 2010. Climatic change impacts on forest fire potential in boreal conditions in Finland. *Climatic Change* 103: 383–398.
- Kirschbaum, M. U. F. 2000. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? *Biogeochemistry* 48(1): 21–51.
- Koljonen, T., Soimakallio, S., Lehtilä, A., Similä, L., Honkatukia, J., Hildén, M., Rehunen, A., Saikku, L., Salo, M., Savolahti, M., Tuominen, P. & Vainio, T. 2019. Pitkän aikavälin kokonaispäästökehitys. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 24/2019.

- Koljonen, T., Lehtilä, A., Siikavirta, H., Aakkula, J., Haakana, M., Hirvelä, H., Kilpeläinen, H., Kärkkäinen, L., Laitila, J., Lehtonen, H., Maanavilja, L., Ollila, P., Tuomainen, T., Soimakallio, S. & Honkatukia, J. 2020. Hiilineutraali Suomi 2035 – Skenaariot ja vaikutusarviot. 150 s. VTT Technical Research Centre of Finland.
- Korkiakoski, M., Tuovinen, J.-P., Penttilä, T., Sarkkola, S., Ojanen, P., Minkkinen, K., Rainne, J., Laurila, T. & Lohila, A. 2019. Greenhouse gas and energy fluxes in a boreal peatland forest after clear-cutting, *Biogeosciences* 16: 3703–3723. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3703-2019>
- Korkiakoski, M., Ojanen, P., Penttilä, T., Minkkinen, K., Sarkkola, S., Rainne, J., Laurila, T. & Lohila, A. 2020. Impact of partial harvest on CH₄ and N₂O balances of a drained boreal peatland forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 295: 108168. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108168>
- Koski, V. & Sievänen, R. 1985. Timing of growth cessation in relation to the variations in the growing season. In: Tigerstedt PMA, Puttonen P, Koski V (eds.) *Crop physiology of forest trees*. Helsinki University Press, Helsinki, s. 167–193.
- Korhonen, K. T., Ihalainen, A., Ahola, A., Heikkinen, J., Henttonen, H. M., Hotanen, J.-P., Nevalainen, S., Pitkänen, J., Strandström, M. & Viiri, H. 2017. Suomen metsät 2009–2013 ja niiden kehitys 1921–2013. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 59/2017. Luonnonvarakeskus, Helsinki.
- Kurz, W. A., Shaw, C. H., Boisvenue, C., Stinson, G., Metsaranta, J., Leckie, D., Dyk, A., Smyth, C. & Neilson, E. T. 2013. Carbon in Canada's boreal forest — A synthesis. *Environ. Rev.* 21: 260–292. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0041>
- Kärkkäinen, L., Haakana, M., Heikkinen, J., Helin, J., Hirvelä, H., Jauhiainen, L., Laturi, J., Lehtonen, H., Lintunen, J., Niskanen, O., Ollila, P., Peltonen-Sainio, P., Regina, K., Salminen, O., Tuomainen, T., Uusivuori, J., Wall, A. & Packalen, T. 2018. Maankäyttösektorin toimien mahdollisuudet ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 67/2018, 68 s.
- Laiho, R., Minkkinen, K., Anttila, J., Vávřová, P. & Penttilä, T. 2008. Dynamics of Litterfall and Decomposition in Peatland Forests: Towards Reliable Carbon Balance Estimation? Teoksessa: Vymazal, J. (toim.) *Wastewater treatment, plant dynamics and management in constructed and natural wetlands*, s. 53–64. Springer. Doi: 10.1007/978-1-4020-8235-1_6.
- Laine, J. 1986. Kuivatustekniikan, kuivatussyvyyden ja puuston kasvun välisiä vuorosuhteita 25 vuotta vanhoilla rämeojitusalueilla. Tutkimussopimushankkeen ”Metsäojitettujen soiden ekologia” loppuraportti. Helsinki. 49 s.
- Laine, T., Luoranen, J. & Ilvesniemi, H. (toim.) 2019. Maanmuokkaus metsissä: kirjallisuuskatsaus maanmuokkauksen vaikutuksista metsänuudistamiseen, vesistöihin sekä ekologiseen ja sosiaaliseen kestävyteen. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 58/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 83 s.
- Lehtonen, A., Puolakka, P., Ihalainen, A., Heikkinen, J. & Korhonen, K. T. 2011. Metsähallituksen hallinnoimien metsien hiilitaseet. *Metlan työraportteja* 199. 24 s.
- Lehtonen, A., Salminen, O., Kallio, M., Tuomainen, T. & Sievänen, R. 2016. Skenaariolaskelmiin perustuva puuston ja metsien kasvihuonekaasutaseen kehitys vuoteen 2045. Selvitys maa- ja metsätalousministeriölle vuoden 2016 energia- ja ilmastostrategian valmistelua varten. Luonnonvarakeskus, Helsinki. 28 s.
- Leinonen, I., Repo, T. & Hänninen, H. 1997. Changing environmental effects on frost hardiness of Scots pine during dehardening. *Annals of Botany* 79: 133–138.
- Leppä, K., Korkiakoski, M., Nieminen, M., Laiho, R., Hotanen, J.-P., Kieloaho, A.-J., Korpela, L., Laurila, T., Lohila, A. K., Minkkinen, K., Mäkipää, R., Ojanen, P., Pearson, M., Penttilä, T., Tuovinen, J.-P., & Launiainen, S. 2020. Vegetation controls of water and energy balance of a drained peatland forest: Responses to alternative harvesting practices. *Agricultural and Forest Meteorology* 295: 108198. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108198>
- Lindeman, H., Häyrynen, E., Saksa, T., Uustalo, J., Kulju, S. & Huuskonen, S. 2018. Economical unit size in precision forestry. Deliverable 2.6. / EFFORTE – Efficient forestry by precision planning and management for sustainable environment and cost-competitive bio-based industry.

- https://www.luke.fi/efforte/wp-content/uploads/sites/14/2019/01/EFFORTE_D2.6_Economical-unit-size-in-precision-forestry.pdf
- Lindner, M., Fitzgerald, J. B., Zimmermann, N. E., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., Schelhaas, M.-J., Lasch, P., Eggers, J., van der Maaten-Theunissen, M., Suckow, F., Psomas, A., Poulter, B. & Hanewinkel, M. 2014. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management* 146: 69–83.
- Lindroth, A., Holst, J., Heliasz, M., Vestin, P., Lagergren, F., Biermann, T., Cai, Z. & Mölder, M. 2018. Effects of low thinning on carbon dioxide fluxes in a mixed hemiboreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 262: 59–70.
- Liski, J. 2000. Millainen kiertoaika eduksi metsien hiilitaloudelle? *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2000.
- Liski, J., Pussinen, A., Pingoud, K., Mäkipää, R. & Karjalainen, T. 2001. Which rotation length is favourable to carbon sequestration? *Canadian Journal of Forest Research* 31: 2004–2013. <https://doi.org/10.1139/cjfr-31-11-2004>
- Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Eggers, T., Muukkonen, P. & Mäkipää, R., 2006. Carbon accumulation in Finland's forests 1922–2004 – an estimate obtained by combination of forest inventory data with modelling of biomass, litter and soil. *Annals of Forest Science* 63: 687–697. <https://doi.org/10.1051/forest:2006049>
- Lundmark, T., Begh, J., Nordin, A., Fahlvik, N. & Poudel B. C. 2016. Comparison of carbon balances between continuous-cover and clear-cut forestry in Sweden., *Ambio* 45(S2): 203–213. doi: 10.1007/s13280-015-0756-3.
- Luoranen, J., Pikkarainen, L., Poteri M., Peltola, H. & Riikonen, J. 2019. Duration limits on field storage in closed cardboard boxes before planting of Norway spruce and Scots pine container seedlings in different planting seasons. *Forests* 10(12): 1126. <https://doi.org/10.3390/f10121126>.
- Luoranen, J., Saksa, T. & Lappi, J. 2018. Seedling, planting site and weather factors affecting the success of autumn plantings in Norway spruce and Scots pine seedlings. *Forest Ecology and Management* 419–420: 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.04>
- Luoranen, J., Viiri, H., Sianoja, M., Poteri, M. & Lappi, J. 2017. Predicting pine weevil risk: Effects of site, planting spot and seedling level factors on weevil feeding and mortality of Norway spruce seedlings. *Forest Ecology and Management* 389: 260–271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forece.2017.01.006>
- Luoranen, J. & Viiri, H. 2016. Deep planting decreases risk of drought damage and increases growth of Norway spruce container seedlings. *New Forests* 47: 701–714. DOI: 10.1007/s11056-016-9539-3
- Luoranen, J., Rikala, R. & Smolander, H. 2011. Machine planting of Norway spruce by Bracke and Ecoplanter: an evaluation of soil preparation, planting method and seedling performance. *Silva Fennica* 45(3) article id 107. <https://doi.org/10.14214/sf.107>
- Luyssaert, S., Schulze, E.D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmoller, D., Law, B.E., Ciais, P. & Grace, J., 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455(7210): 213–215.
- Lyr, H. & Hoffmann, G. 1967. Growth rates and growth periodicity of tree roots. *International Review of Forestry Research* 2: 181–236. doi:10.1016/B978-1-4831-9976-4.50011-X
- Mannerkoski, H. 2012. Metsien ekologiset ja hydrologiset suojavaikutukset. *Silva Carelica* 57. Itä-Suomen yliopisto, metsätieteiden osasto.
- Mayer, M., Prescott, C. E., Abaker, W. E. A., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G. W. D., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J.-P., Laganière, J., Nouvellon, Y., Paré, D., Stanturf, J. A., Vanguelova, E. I. & Vesterdal, L., 2020. Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management* 466: 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>
- Mielikäinen, K., Timonen, M. & Helama, S. 2012. Ilmastonmuutokset ja niiden syyt puulustojen ja muiden proksitietojen pohjalta. Teoksessa: Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. (toim. Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T). *Metlan työraportteja* 240: 32–52.

- 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. 10 s.
- Mjöfors K., Strömberg M., Nohrstedt H.-Ö., Johansson M.-B. & Gärdenes A. I. 2017. Indications that site preparation increases forest ecosystem carbon stocks in the long-term. *Scandinavian Journal of Forest Research* 32: 717–725.
- Moilanen M., Hytönen J., Hökkä H. & Ahtikoski A. 2015. Fertilization increased growth of Scots pine and financial performance of forest management in a drained peatland in Finland. *Silva Fennica* 49(3): id 1301. 18 p.
- Moore, P. T., DeRose, R. J., Long, J. N. & vanMiegroet, H. 2012. Using Silviculture to Influence Carbon Sequestration in Southern Appalachian Spruce-Fir Forests. *Forests*, 3(2): 300–316. doi: 10.3390/f3020300.
- Müller, M., Hantula, J., Henttonen, H., Huitu, O., Kaitera, J., Matala, J., Neuvonen, S., Piri, T., Sievänen R., Viiri, H. & Vuorinen, M. 2012. Metsien terveys. Teoksessa: Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. (toim. Asikainen A., Ilvesniemi H., Sievänen R., Vapaavuori E. & Muhonen T.). *Metlan työraportteja* 240: 121–153.
- Muukkonen, P., Nevalainen, S., Lindgren, M. & Peltoniemi, M. 2015. Spatial occurrence of drought-associated damages in Finnish boreal forests: results from forest condition monitoring and GIS analysis. *Boreal Environment Research* 20: 172–180.
- Mäkelä, J., Minunno, F., Aalto, T., Mäkelä, A., Markkanen, T. & Peltoniemi, M. 2020. Sensitivity of 21st century simulated ecosystem indicators to model parameters, prescribed climate drivers, RCP scenarios and forest management actions for two Finnish boreal forest sites. *Biogeosciences* 17(9): 2681–2700.
- Mäkipää, R., Häkkinen, M., Muukkonen, P. & Peltoniemi, M. 2008. The costs of monitoring changes in forest soil carbon stocks. *Boreal Environment Research* 13(supp.B): 120–130.
- Mäkipää, R., Linkosalo, T., Niinimäki, S., Komarov, A., Bykhovets, S., Tahvonen, O. & Mäkelä, A. 2011. How forest management and climate change affect the carbon sequestration of a Norway spruce stand. *Journal of Forest Planning* 16: 107–120.
- Mäkipää, R., Linkosalo, T., Komarov, A. & Mäkelä, A. 2015. Mitigation of climate change with biomass harvesting in Norway spruce stands: are harvesting practices carbon neutral? *Canadian Journal of Forest Research* 45(2): 217–225. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0120>
- Nieminen, M., Hökkä, H., Laiho, R., Juutinen, A., Ahtikoski, A., Pearson, M., Kojola, S., Sarkkola, S., Launiainen, S., Valkonen, S., Penttilä, T., Saarinen, M., Haahti, K., Mäkipää, R., Miettinen, J. & Ollikainen, M. 2018. Could continuous cover forestry be an economically and environmentally feasible management option on drained boreal peatlands? *Forest ecology and management* 424: 78–84.
- Nilsen, P. & Strand, L. T. 2013. Carbon stores and fluxes in even- and uneven-aged Norway spruce stands. *Silva Fennica*, 47(4): id1024. doi: 10.14214/sf.1024.
- Nilsson, J.-E. 2001. Seasonal Changes in Phenological Traits and Cold Hardiness of F1-populations from Plus-trees of *Pinus sylvestris* and *Pinus contorta* of Various Geographical Origins. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16: 7–20. <http://dx.doi.org/10.1080/028275801300004361>
- Nygren, M. 2020. Metsäpuiden uudistumisbiologia. *Metsäkustannus*. 151 s.
- Nygren, M., Rissanen, K., Eerikäinen, K., Saksa, T. & Valkonen, S. 2017. Norway spruce cone crops in uneven-aged stands in southern Finland: A case study. *Forest Ecology and Management* 390: 68–72.
- Nyysönen, A. 1995. Väljennyshakkuut. *Folia Forestalia – Metsätieteen aikakauskirja* 1995(4): 293–302.
- Odum, E. P. 1969. An understanding of ecological succession provides a basis for resolving man's conflict with nature. *Science* 164: 262–270.
- Ojanen, P. 2014. Estimation of greenhouse gas balance for forestry drained peatlands. *Dissertationes Forestales* 176: 1–26.

- Ojanen, P. 2015. Metsäojituksen vaikutuksesta ilmastoon. *Suo-Mires & Peat* 66: 44–55.
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm J. & Penttilä T. 2010. Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260: 411–421.
- Ojanen, P., Minkkinen, K. & Penttilä T. 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 289: 201–208.
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. 2019. The dependence of net soil CO₂ emissions on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. *Mires and Peat* 24, Article 27: 1–8.
<https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1751>
- Oksanen, E., Lihavainen, J., Keinänen, M., Keski-Saari, S., Kontunen-Soppela, S., Sellin, A. & Söber, A. 2019. Northern Forest Trees Under Increasing Atmospheric Humidity. *Progress in Botany* 80: 317–336. DOI 10.1007/124_2017_15,
- Pelkonen, E. 1975. Vuoden eri aikoina korkealla olevan pohjaveden vaikutus männyn kasvuun. Effects on Scots pine growth of ground water adjusted to the ground surface for periods of varying length during different seasons of the year. *Suo* 26: 25–32. (In Finnish with English summary)
- Pelkonen, E. 1979. Männyn ja kuusen taimien kyvystä sietää tulvaa vuoden eri aikoina. Seasonal flood tolerance of Scots pine and Norway spruce seedlings. *Suo* 30: 35–42. (In Finnish with English summary)
- Peltoniemi, M., Mäkipää, R., Liski, J. & Tamminen, P. 2004. Changes in soil carbon with stand age – an evaluation of a modelling method with empirical data. *Global Change Biology* 10: 2078–2091.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-2486.2004.00881.x>
- Pesonen, K. 2019. Siementen peittämisen vaikutus taimien orastumiseen ja työn tuottavuuteen männyn koneellisessa kylvössä. Pro gradu. Helsingin yliopisto.
- Peura, M., Burgas Riera, D., Eyvindson, K., Repo, A., & Mönkkönen, M. 2017. Continuous cover forestry is a cost-efficient tool to increase multifunctionality of boreal production forests in Fennoscandia. *Biological Conservation* 217: 104–112. doi:10.1016/j.biocon.2017.10.018
- Pingoud, K., Pohjola, J. & Valsta, L. 2010. Assessing the integrated climatic impacts of forestry and wood products. *Silva Fennica* 44(1): 155–175.
- Pingoud, K., Ekholm, T., Soimakallio, S. & Helin, T. 2016. Carbon balance indicator for forest bioenergy scenarios. *GCB Bioenergy* 8: 171–182.
- Pingoud, K., Ekholm, T., Sievänen, R., Huuskonen, S. & Hynynen, J. 2018. Trade-offs between forest carbon stocks and harvests in a steady state – A multi-criteria analysis. *Journal of Environmental Management* 210: 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.076>
- Possen, B., Heinonen, J., Anttonen, M.J., Rousi, M., Kontunen-Soppela, S., Oksanen, E. & Vapaavuori E. 2015. Trait syndromes underlying stand-level differences in growth and acclimation in 10 silver birch (*Betula pendula* Roth) genotypes. *Forest Ecology and Management* 343: 123–135.
- Pukkala, T., Lähde, E., Laiho, O., Salo, K. & Hotanen, J.-P. 2011. A multifunctional comparison of even-aged and uneven-aged forest management in a boreal region. *Canadian Journal of Forest Research* 41: 851–862.
- Pukkala, T. 2014. Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration? *Forest Policy and Economics* 43: 41–50. doi: 10.1016/j.forpol.2014.03.004
- Pukkala, T. 2016. Which type of forest management provides most ecosystem services? *Forest Ecosystems* 3(1): 1–16. doi: 10.1186/s40663-016-0068-5.
- Pukkala, T. 2018. Effect of species composition on ecosystem services in European boreal forest. *Journal of Forest Research* 29: 261–272. doi: 10.1007/s11676-017-0576-3
- Päivänen J. 1982. Hakkuun ja lannoituksen vaikutus vanhan metsäojitusalueen vesitalouteen. *Folia Forestalia* 516: 1–19.
- Rebane, S., Jögeste, K., Kiviste, A., Stanturf, J. A. & Metslaid, M. 2020. Patterns of carbon sequestration in a young forest ecosystem after clear-cutting. *Forests* 11/126. Doi: 10.3390/f11020126
- Repo, A., Tuomi, M. & Liski, J. 2011. Indirect carbon dioxide emissions from producing bioenergy from forest harvest residues. *GCB Bioenergy* 3: 107–115. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01065.x>

- Repo, A., Tuovinen, J.P. & Liski, J. 2015. Can we produce carbon and climate neutral forest bioenergy? *Global Change Biology Bioenergy* 7: 253–262. <https://doi.org/doi:10.1111/gcbb.12134>
- Repo, T. 1991. Rehardening potential of Scots pine seedlings during dehardening. *Silva Fennica* 25: 13–21.
- Repo, T. 1992. Seasonal changes of frost hardiness in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1949–1957.
- Repo, T. 1993. Impedance spectroscopy and temperature acclimation of forest trees. Res. Notes 9, University of Joensuu, Faculty of Forestry. 53 s. PhD-thesis, summary.
- Repo, T. & Pelkonen P. 1986. Temperature step response of dehardening in *Pinus sylvestris* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1: 271–284.
- Repo, T., Zhang, G., Ryyppö, A., Rikala, R. & Vuorinen, M. 2000. Growth cessation and frost hardening of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in a provenance trial in Finland. *Trees* 14: 456–464.
- Repo, T., Nilsson, J.-E., Rikala, R., Ryyppö, A. & Sutinen, M.-L. 2001. Cold Hardiness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Teoksessa: *Conifer Cold Hardiness*. F.J. Bigras and S.J. Colombo (eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. Chapter 17: 463–493.
- Repo, T., Sirkiä, S., Heinonen, J., Lavigné, A., Roitto, M., Koljonen, E., Sutinen, S. & Finér, L. 2014. Effects of soil frost on fine root growth and longevity of Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 313: 112–122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.11.002>
- Repo, T., Launiainen, S., Lehto, T., Sutinen, S., Ruhanen, H., Heiskanen, J., Lauren, A., Silvennoinen, R., Vapaavuori, E. & Finér, L. 2016. Lethal effects of waterlogging on Scots pine appear with delay. *Canadian Journal of Forest Research* 46: 1439–1450. <http://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2015-0447>
- Repo, T., Heiskanen, J., Sutinen, M.-L., Sutinen, R. & Lehto, T. 2017. The responses of Scots pine seedlings to waterlogging in a fine-grained till soil. *New Forests* 48: 51–65. <http://dx.doi.org/10.1007/s11056-016-9555-3>
- Repo, T., Domisch, T., Kilpeläinen, J., Piirainen, S., Silvennoinen, R. & Lehto, T. 2020. Dynamics of fine-root production and mortality of Scots pine in waterlogged peat soil during the growing season. *Canadian Journal of Forest Research* 50: 510–518. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0163>
- Rikala, R. & Repo, T. 1987. Frost Resistance and Frost Damage in *Pinus sylvestris* Seedlings during Shoot Elongation. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2: 433–440.
- Rinne P., Hänninen H., Kaikuranta, P., Jalonen, J. E. & Repo, T. 1997. Freezing exposure releases bud dormancy in *Betula pubescens* and *B. pendula*. *Plant, Cell and Environment* 20: 1199–1204.
- Roitto, M., Sutinen, S., Wang, A. F., Domisch, T., Lehto, T. & Repo, T. 2019. Waterlogging and soil freezing during dormancy affected root and shoot phenology and growth of Scots pine saplings. *Tree Physiology* 39: 805–818. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpz003>
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Kämäräinen, M. 2016. Climate projections for Finland under the RCP Forcing scenarios. *Geophysica* 51: 17–50.
- Ruotsalainen, S. 2015. Jälki-itäminen männyn kylvössä. Teoksessa: *Taimiutiset 3/2015*. *Taimiutiset* 18 (3): 6–9.
- Ruotsalainen, S. 2014. Increased forest production through forest tree breeding. *Scandinavian Journal of Forest Research* 29: 333–344. <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2014.926100>
- Ruotsalainen, S., Beuker, E. & Haapanen, M. 2016. Männyn siemenviljelysaineiston käyttöalueen määrittäminen. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 39/2016. 36 s.
- Saarinen, M. 2013. Männyn kylvö ja luontainen taimettuminen vanhoilla ojitusalueilla – turvemaiden uudistamisen erityispiirteitä. *Dissertationes Forestales* 164. 64 s.
- Saarinen, M., Valkonen, S., Sarkkola, S., Nieminen, M., Penttilä, T. & Laiho, R. 2020. Jatkovapeitteisen metsänkasvatuksen mahdollisuudet ojitetuilla turvemaiden. *Metsätieteen aikakauskirja*, 2020, id 10372. <https://doi.org/10.14214/ma.10372>
- Sarkkola, S., Alenius, V., Hökkä, H., Laiho, R., Päivänen, J. & Penttilä, T. 2003. Changes in structural inequality in Norway spruce stands on peatland sites after water-level drawdown. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 222–231.

- Sarkkola, S., Hökkä, H. & Penttilä, T. 2004. Natural development of stand structure in peatland Scots pine following drainage: results based on long-term monitoring of permanent sample plots. *Silva Fennica* 38(4): 405–412.
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Koivusalo, H., Nieminen, M., Ahti, E., Päivänen, J. & Laine, J. 2010. Role of tree stand evapotranspiration in maintaining satisfactory drainage conditions in drained peatlands. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 1485–1496.
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Ahti, E., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2012. Depth of water table prior to ditch network maintenance is a key factor for tree growth response. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27: 1–10.
- Sculze, E.-D., Körner, C., Law, B. E., Haberl, H. & Luysaert, S. 2012. Large-scale bioenergy from additional harvest of forest biomass is neither sustainable nor greenhouse gas neutral. *Bioenergy* 4: 611–616. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01169.x>
- Sellin, A., Alber, M., Keinänen, M., Kupper, P., Lihavainen, J., Löhmus, K., Oksanen, E., Söber, A., Söber, J. & Tullus, A. 2017. Growth of northern deciduous trees under increasing atmospheric humidity: possible mechanisms behind the growth retardation. *Regional Environmental Change* 17: 2135–2148. DOI 10.1007/s10113-016-1042-z
- Seppälä, J., Kanninen, M., Vesala, T., Uusivuori, J., Kalliokoski, T., Lintunen, J., Saikku, L., Korhonen, R. & Repo, A. 2015. Metsien hyödyntämisen ilmastovaikutukset ja hiilinielujen kehittyminen. Ilmastopaneelin raportti 3. Helsinki. 43 s.
- Seppälä, J., Heinonen, T., Pukkala, T., Kilpeläinen, A., Mattila, T., Myllyviita, T., Asikainen, A. & Peltola, H. 2019. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. *Journal of Environmental Management* 247: 580–587.
- Shanin, V., Valkonen, S., Grabarnik, P. & Mäkipää, R. 2016. Using forest ecosystem simulation model EFIMOD in planning uneven-aged forest management, *Forest Ecology and Management* 378: 193–205. doi: 10.1016/j.foreco.2016.07.041.
- Sievänen, R., Salminen, O., Lehtonen, A., Ojanen, P., Liski, J., Ruosteenoja, K. & Tuomi, M. 2014. Carbon stock changes of forest land in Finland under different levels of wood use and climate change. *Annals of Forest Science* 71: 255–265.
- Sikström, U., Hjelm, K., Holt-Hanssen, K., Saksa, T. & Wallertz, K. 2020. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fennica* 54: 10172. 35 s.
- Silviculture & Climate Adaptation. <https://www.adaptivesilviculture.org/silviculture-climate-adaptation>
- Soimakallio, S., Saikku, L., Valsta, L. & Pingoud, K. 2016. Climate change mitigation challenge for wood utilization – the case of Finland. *Environmental Science & Technology* 50: 5127–5134. Doi: 10.1021/acs.est.6b00122.
- Solantie R. 2003. On the definition of ecoclimatic zones in Finland. Finnish Meteorological Institute, Reports 2003(2): 44s.
- Sved, J. & Koistinen, A. (toim.). 2015. Metsänhoidon suositukset kannattavaan metsätalouteen, työopas. Tapion julkaisuja. ISBN 978-952-5632-25-5.
- Suvanto, S., Peltoniemi, M., Tuominen, S., Strandström, M. & Lehtonen, A. 2019. High-resolution mapping of forest vulnerability to wind for disturbance-aware forestry. *Forest Ecology and Management* 453: 13 s.
- Tamminen, P. & Ilvesniemi, H. 2012. Maaperän hiili ja tyyppi luonnontilaisissa ja talousmetsissä. Metlan työraportteja, 236. 16 s.
- Thiffault, E., Hannam, K. D., Paré, D., Titus, B. D., Hazlett, P. W., Maynard, D. G. & Brais, S. 2011. Effects of forest biomass harvesting on soil productivity in boreal and temperate forests – A review. *Environmental Reviews* 19: 278–309. <https://doi.org/10.1139/a11-009>
- Thornley, J. H. M. & Cannell, M. G. R. 2000. Managing forest for wood yield and carbon storage, *Tree Physiology*, 20: 477–484.

- Tierney, G. L., Fahey, T. J., Groffman, P. M., Hardy, J. P., Fitzhugh, R. D., Driscoll, C. T. & Yavit, T. J. B. 2003. Environmental control of fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Global Change Biology* 9: 670–679. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00622.x
- Tilastokeskus, 2020. Statistics Finland: Greenhouse Gas Emissions in Finland 1990–2018, National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto protocol, Helsinki. 2020.
- Tranquillini, W. 1982. Frost-drought and its ecological significance. Teoksessa: Lange, O. L. Nobel, P. S. Osmond, C. B. & Ziegler, H. (toim.). *Physiological plant ecology II* (s. 379–400). Berlin: Springer
- Turunen, J. 2008. Development of Finnish peatland area and carbon storage 2000. *Boreal Environment Research* 13: 319–334.
- Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Aun, K., Krasnova, A., Morozov, G., Ostonen, I., Mander, Ü., Lõhmus, K., Rosenthal, K., Kriiska, K. & Soosaar, K. 2019. The carbon balance of a six-year-old Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) ecosystem estimated by different methods. *Forest Ecology and Management* 433: 248–262.
- Wang, A. F., Roitto, M., Sutinen, S., Lehto, T., Heinonen, J., Zhang, G. & Repo, T. 2016. Waterlogging in the late dormancy and the early growth phase affected root and leaf morphology in *Betula pendula* and *Betula pubescens* seedlings. *Tree Physiology* 36: 86–98. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tpv089>
- Valkonen, S. 2020. Metsän jatkuvasta kasvatuksesta. *Metsäkustannus & Luonnonvarakeskus*. 127 s.
- Vapaavuori, E., Henttonen, H., Peltola, H., Mielikäinen, K., Neuvonen, S., Hantula, J. & Müller, M. 2010. Climate change impacts and most susceptible regions of severe impact in Finland. Teoksessa: *Finland's Forests in Changing Climate*. Parviainen, J., Vapaavuori, E., & Mäkelä, A. (toim.). *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 159: 17–25. <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp159.htm>
- Vapaavuori, E., Pulkkinen, P., Haapanen, M., Helmisaari, H.-S., Ilvesniemi, H., Korpela, L., Kubin, E., Leppälampi-Kujansuu, J., Mikkola, K., Pasanen, J., Poikolainen, J., Rautio, P., Repo, T., Roitto, M., Rousi, M., Salemaa, M., Tamminen, M., Tamminen, P., Tonteri, T. & Varis, S. 2012. Metsäpuiden ja -kasvien sopeutuminen nyt ja tulevaisuudessa. Teoksessa: Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T. (toim.) *Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät*. *Metlan työraportteja* 240: 97–120.
- Venäläinen, A., Lehtonen, I., Laapas, M., Ruosteenoja, K., Tikkanen, O.-P., Viiri, H., Ikonen, V.-P. & Peltola, H. 2020. Climate change induces multiple risks to boreal forests and forestry in Finland: a literature review. *Global Change Biology* 26(8): 4178–4196. <https://doi.org/10.1111/gcb.15183>.
- Vesala, T., Suni, T., Rannik, U., Keronen, P., Markkanen, T., Sevanto, S., Grönholm, T., Smolander, S., Kulmala, M., Ilvesniemi, H., Ojansuu, R., Uotila, A., Levula, J., Mäkelä, A., Pumpanen, J., Kolari, P., Kulmala, L., Altimir, N., Berninger, F., Nikinmaa, E. & Hari, P. 2005. Effect of thinning on surface fluxes in a boreal forest, *Global Biogeochemical Cycles* 19: GB2001. doi:10.1029/2004GB002316.
- Viiri, H. & Luoranen, J. 2017. Deep planting of Norway spruce seedlings: effects on pine weevil feeding damage and growth. *Canadian Journal of Forest Research* 47: 1468–1473. <dx.doi.org/10.1139/cjfr-2017-0192>.
- Zamorano, J. G., Hokkanen, T. & Lehtonen, A. 2018. Climate driven synchrony in seed production of masting deciduous and conifer tree species. *Journal of Plant Ecology* 11(2): 180–188.
- Zanchi, G., Pena, N. & Bird, N. 2012. Is woody bioenergy carbon neutral? A comparative assessment of emissions from consumption of woody bioenergy and fossil fuel. *GCB Bioenergy* 4: 761–772. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01149.x>
- Zang, C., Helm, R., Sparks, T. H. & Menzel, A. 2015. Forecasting bark beetle early flight activity with plant phenology. *Climate Research* 66: 161–170. doi: 10.3354/cr01346.
- Zhou, G.Y., Liu, S.G., Li, Z., Zhang, D.Q., Tang, X.L., Zhou, C.Y., Yan, J.H., Mo, J.M., 2006. Old-growth forests can accumulate carbon in soils. *Science* 314(5804): 1417–1417.
- Ögren, E., Nilsson, T. & Sundblad, L.-G. 1997. Relationship between respiratory depletion of sugars and loss of cold hardiness in coniferous seedlings over-wintering at raised temperatures: indications of different sensitivities of spruce and pine. *Plant Cell & Environment* 20: 247–253.



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000