

METSIIEN HIILITASEET

Hiilipäästöluokituksen käyttö metsäsuunnittelussa ojitetuilla soilla

Ojamaa Mikko

Opinnäytetyö
Luonnonvara-ala
Luonnonvarojen älykäs johtaminen
Metsätalousinsinööri (ylempi AMK)

2021

Luonnonvara-ala
Metsätalousinsinööri (ylempi AMK)
Luonnonvarojen älykäs johtaminen

Tekijä	Mikko Ojamaa	Vuosi	2021
Ohjaaja	Jussi Soppela		
Toimeksiantaja	Metsähallitus Metsätalous Oy		
Työn nimi	Metsien hiilitaseet. Hiilipäästöluokituksen käyttö metsäsuunnittelussa ojitetuilla soilla		
Sivu- ja liitemäärä	57		

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Metsähallituksen ja Luonnonvarakeskuksen yhteisprojektissa tuotetun hiilipäästölaskennan aineiston käytettävyyttä ja sen luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Päästölaskenta oli tehty valtion monikäyttömetsien turvemaille Pudasjärven pilottialueelle. Selvitys toteutettiin vertailututkimuksen otteella. Hiilipäästölaskennassa käytettyä paikkatietoaineistoa verrattiin maastomittauksista kerättyyn aineistoon. Tutkimuksessa myös testattiin päästöluokituksen käyttöä metsäsuunnittelussa sekä simuloitiin kolmen esimerkkikohteen hakkuun jälkeisen hiilivaraston ja -nielun kehitystä.

Vertailututkimuksen tulosten mukaan hiilipäästölaskennassa käytetty paikkatietoaineisto oli pääosin hyvälaatuista. Suurimmat epävarmuudet liittyivät paikkatietojärjestelmän turvemaiden kasvupaikkatyyppi- ja maalajitietoihin. Päästöluokitusaineisto soveltui monipuolisesti suometsien puunkorjuun ja metsänparannustöiden suunnitteluun. Sen avulla löydettiin isoimmat päästökohteet ja niillä toimiminen voitiin suunnitella ilmastonäkökohdat huomioiden. Hakkuusimulointien tulokset osoittivat, että turvemaiden hiilivarastojen ja -nielujen kehittyminen tutkimuskohteilla vaihteli huomattavasti. Vaihtelu on hyvä ottaa huomioon esimerkiksi hakkuuvoimakkuuden säätelyssä ja kunnostusojituksen suunnittelussa.

Tutkimuksen tulosten perusteella voitiin todeta, että päästöluokituksen käytöstä on hyötyä metsänhoidon suunnittelussa turvemilla. Karttatason laajempaa käyttöönottoa Metsähallituksen monikäyttömetsissä voidaan suositella. Käyttöönotossa tulee kiinnittää huomiota päästöarvojen teemoituksen ominaisuuksiin ja selkeyteen. Päästöluokituksen käyttöä voisi testata myös turvemaiden luonnonhoidon ja ennallistamistöiden suunnittelussa. Hiilipäästölaskennan aineistoista on myös mahdollista kehittää luokitus turvemaiden vedenpinnan korkeudesta. Luokitusta voitaisiin käyttää osana jatkuvapeliteisen metsänkasvatuksen suunnittelua.

Asiasanat Ilmastonmuutos, kasvihuonekaasupäästöt, metsien hiilitaseet, suometsät, metsätalouden suunnittelu

Degree Programme in Smart Management
of Natural Resources
Master of Engineering

Author	Mikko Ojamaa	Year	2021
Supervisor	Jussi Soppela		
Commissioned by	Metsähallitus Forestry Ltd.		
Subject of thesis	Carbon Balance in Boreal Forests. Usage of Carbon Emission Rating in Forest Planning in Drained Peatlands.		
Number of pages	57		

The main purpose of the thesis was to study the usage and reliability of carbon emission rating produced by Metsähallitus and Natural Resources Institute Finland. The rating was produced for drained peatlands in Multiple-use forests managed by Metsähallitus. The pilot area of carbon emission calculation was located in the county of Pudasjärvi. The study was committed by comparing the material used in the emission calculation to the material collected from the examination site. Using the emission rating in forestry planning was also tested in the examination site. The progress of carbon stock and carbon sink of three forest sites after thinning was also simulated in the study.

The results of the comparison study point out that the quality of the material used in the calculation was mostly reliable. The biggest uncertainty was related to soil and vegetation type qualities. Overall, the Carbon emission rating had potential in many ways in forest planning. It was found useful in planning forest preparation and logging. The rating pointed out the sites that were causing the biggest emissions. It was possible to pay attention in climate change effects of the planned operations for example by using methods of continuous cover forestry when needed. The logging simulation pointed out that the progress of the carbon stocks and sinks varies a lot. The variation should be considered for example when planning the thinning magnitude and soil draining.

The results of the study show that the use of the carbon emission rating can be recommended in a wider scale. It is very important to focus on planning the theme and content of the rating with care so the full advantage of it can be taken in the field work. The carbon emission rating could also be used in planning the ecological restoration and management in the peatlands. It is also possible to use the data produced in the emission calculation to design a rating of the water level. The rating could be used in planning the continuous cover forestry.

Key words Climate change, greenhouse gas emissions, carbon balance, peatlands, forest planning

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	KASVIHUONEKAASUT JA ILMASTONMUUTOS	3
2.1	Kasvihuonekaasut.....	3
2.2	Ilmastonmuutos.....	4
2.3	Metsien ja soiden vaikutus kasvihuonekaasuihin	6
2.4	Ilmastonmuutoksen vaikutukset puiden kasvuun	9
3	METSÄNHOIDON VAIKUTUKSET HIILITASEESEEN	13
3.1	Avohakkuu.....	13
3.2	Metsien jatkuvapeitteinen kasvatus ja luontainen uudistaminen.....	13
3.3	Metsäojitus	18
3.4	Metsien lannoittaminen.....	21
3.5	Maanmuokkaus.....	22
4	HIILITASELASKELMAT	25
4.1	Hiilitaselaskelmat kansainvälisellä ja kansallisella tasolla	25
4.2	Monikäyttömetsien ojitettujen turvemaiden hiilipäästölaskennat.....	25
5	TUTKIMUSASETELMA.....	28
5.1	Hiilipäästöluokituksen karttatasa	28
5.2	Koealajärjestelyt ja aineiston keruu.....	30
6	TUTKIMUSTULOKSET	34
6.1	Vertailututkimus hiilipäästölaskennan tausta-aineistosta	34
6.2	Hiilipäästöaineiston käyttö metsäsuunnittelussa	39
6.3	Hakkuusimulointi otanta-alueen esimerkkikohteille	44
6.4	Tulosten luotettavuuden arviointi.....	46
7	POHDINTA	48
	LÄHTEET	53

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Kasvihuonekaasujen elinikä ja ilmastonlämmityspotentiaali.....	4
Taulukko 2. Metsäojitettujen ja luonnontilaisten soiden kasvihuonekaasupäästöt Gg CO2 ekv./v (GWP 100v) Pohjois-Pohjanmaalla.....	9
Taulukko 3. Hakkuun jälkeisen puuston lakirajat eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatuksessa.....	15
Taulukko 4. Tutkimuskuvioiden maalaji	35
Taulukko 5. Tutkimuskuvioiden turvepaksuus.....	35
Taulukko 6. Hiilipäästölaskennassa käytetyn aineiston kasvupaikkatyypit	36
Taulukko 7. Tutkimuskuvioilta mitatut kasvupaikkatyypit	36
Taulukko 8. Hiilipäästölaskennassa käytetyt puustotiedot.....	37
Taulukko 9. Tutkimuskuvioilta mitatut puustotiedot.....	37
Taulukko 10. Hiilipäästölaskennassa käytetyt ojasyvyydet.....	38
Taulukko 11. Tutkimuskuvioilta mitatut ojasyvyydet.....	38
Taulukko 12. Tutkimuskuvioiden keskiarvoinen alikasvospuiden määrä puulajeittain.....	40
Taulukko 13. Tutkimuskuvioiden alikasvospuiden kokonaismäärä	42
Taulukko 14. Hakkuuehdotukset turvemaan tutkimuskuvioille	43
Taulukko 15. Metsänparannusehdotukset turvemaan tutkimuskuvioille	44
Taulukko 16. Simulointikuvioiden lähtöpuusto ja hiilivarasto kasvupaikoittain ..	45
Taulukko 17. Simulointikuvioiden puusto ja hiilivarasto hakkuiden jälkeen.....	45
Taulukko 18. Simulointikuvioiden puusto, hiilivarasto ja hiilinielu 15 vuoden päästä hakkuista.....	46
Taulukko 19. Simulointikuvioiden puusto, hiilivarasto ja hiilinielu 20 vuoden päästä hakkuista.....	46

KUVIOLUETTELO

Kuvio 1. Vuoden keskilämpötilan ja sademäärän muutos, eri skenaarioiden mukaan, Suomessa vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1971–2000 keskimääräisiin arvoihin	5
Kuvio 2. Lämpötilan ja sademäärän muutos, eri skenaarioiden mukaan, Pohjois- ja Etelä-Suomessa verrattuna jakson 1971–2000 keskimääräisiin arvoihin	6
Kuvio 3. Valtion monikäyttömetsien hiililuokitus monikäyttömetsille	8
Kuvio 4. Kasvihuonekaasupäästöt metsäojitettujen rehevien soiden maaperästä Suomessa	20
Kuvio 5. Kasvihuonekaasupäästöt metsäojitettujen karujen soiden maaperästä Suomessa	20
Kuvio 6. Lannoituksen vaikutus metsäojitetun suon kasvihuonekaasupäästöihin	22
Kuvio 7. Metsäekosysteemin hiilivarasto 25 vuoden kuluttua uudistamisesta ..	23
Kuvio 8. Pudasjärven pilottialueen hilapisteiden keskiarvoinen päästöarvo kasvupaikkatyypeittäin	27
Kuvio 9. Hiilipäästöluokitus maastosovelluksessa testivaiheessa	28
Kuvio 10. Hiilipäästöarvot hilapisteittäin	29
Kuvio 11. Esimerkki hilapisteen tietotaulun arvoista	30
Kuvio 12. Pudasjärven hiilipäästölaskennan pilottialue ja tutkimuksen kolme otanta-aluetta	31

1 JOHDANTO

Ihmisten tuottamat kasvihuonekaasupäästöt ja niiden aiheuttama ilmastonmuutos uhkaavat muuttaa maapallon lämpö- ja sääolosuhteita. Ilmasto lämpenee ja säiden ääriolosuhteet lisääntyvät. Pohjoisen metsillä on tärkeä asema kasvihuonekaasuihin vaikuttamisessa. Metsät muodostavat kasvihuonekaasuvarastoja ja -nieluja mutta myös tuottavat päästöjä. Kasvihuonekaasutaseeseen vaikuttaa keskeisimmin maaperän ravinteisuus ja puuston määrä sekä turvemaiden vedenpinnan korkeus ja turvepaksuus.

Metsätalous vaikuttaa keskeisesti kasvihuonekaasuvarastojen muutoksiin ja nielujen kehittymiseen. Metsätalouden toimenpiteistä kaasutaseita muuttavat eniten ojitus ja hakkuut. Ojitus laskee vedenpintaa ja sitä kautta muun muassa hiilidioksidi- ja metaanipäästöt muuttuvat. Puuston käsittely hakkuin taas vähentää välittömästi sen varastoiman ja sitoman hiilen määrää. Oikealla toimintatavalla voidaan ylläpitää ja kehittää hiilinieluja sekä pitää kasvihuonekaasupäästöt maltillisina. Muun muassa metsien jatkuvapeitteisellä kasvatuksella voidaan säädellä puuston hiilivarastojen ja -nielujen muutoksia ja vähentää maaperän päästöjä siirtämällä kunnostusojitustarvetta. Lisäksi metsien lannoittaminen ja kasvuolosuhteiden parantaminen uudistamisvaiheessa lisäävät puuston hiilensidontaa.

Metsähallitus on kehittänyt yhteistyössä Luonnonvarakeskuksen (Luke) kanssa hiilipäästön lähteet ja hiilinielut osoittavaa laskentamenetelmää valtion monikäyttömetsiin. Valtion metsien asemaan ilmastonmuutoksen hillinnässä kohdistuu isoja odotuksia. Hiilipäästölaskennan kehittäminen oli osa Metsähallituksen päätöstä selvittää monikäyttömetsien tilannetta ja mahdollisuuksia hiilensidonnassa suhteen. Laskelman tuloksena saatiin ensimmäisessä vaiheessa tietoon turvemaametsien tapauksessa hiilipäästöjä aiheuttavat kohteet ja niiden vaikutusta kompensoivat hiilinielujen kohteet ajantasaisin metsävaratiedoin. Samassa yhteydessä kehitettiin myös päästöluokitusta, joka ilmaisee metsikkökohtaisesti maaperän ja puuston hiilipäästöarvot.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli toimia osana Metsähallituksen ja Luken hiilipäästölaskennan kehittämistyötä. Tutkimuksessa keskityttiin tarkastelemaan

hiilipäästöluokituksen käyttöä. Työssä tutkittiin päästöluokitukseen vaikuttavia luotettavuustekijöitä ja arvioitiin luokituksen käytettävyyttä metsäsuunnittelussa valtion monikäyttömetsien turvemaidella. Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa tietoa siitä, miten hiilipäästölaskennan aineistolla voidaan tukea erilaisten metsänhoitomenetelmien valintaa metsäsuunnittelussa ja miten luokitusta ja laskentaa tulisi mahdollisesti kehittää. Lisäksi tavoitteena oli antaa käyttöön perustuvaa palautetta hiilitaseluokituksen karttatasosta; sen käytettävyydestä ja visuaalisesta ilmeestä. Tutkimuksessa myös simuloitiin kolmen eri ravinteisuustason tutkimuskuvion hiilivaraston- ja nielun kehitystä hakkuiden jälkeisinä vuosina. Opinnäytetyön tuloksia ja aineistoa voidaan hyödyntää hiilipäästölaskennan kehittämisen lisäksi myös Metsähallituksen metsänhoidon ohjeistuksen kehittämisessä ja mahdollisissa lisätutkimuksissa.

Tutkimuksen aineisto kerättiin hiilipäästölaskennan pilotointivaiheessa Pudasjärven pilottialueen monikäyttömetsistä tutkimuskoealoilta. Tärkeimpiä koealoilta mitattuja tunnuksia olivat puusto- ja kasvupaikkatiedot, turvepaksuus ja ojasyvyys. Lisäksi koealoilta määritettiin metsänhoitotarpeet, hiilipäästöluokitusta apuna käyttäen. Aineiston analysointi toteutettiin vertailututkimuksena. Maastosta kerättyä aineistoa verrattiin hiilipäästölaskennassa käytettyyn paikkatietoaineistoon. Simuloinnin analyysissä verrattiin eri kasvupaikkojen tapauksia toisiinsa. Myös hiilipäästöluokituksen avulla suunniteltuja metsänhoitotoimenpiteitä analysoitiin vertailututkimuksen menetelmillä.

Opinnäytetyön tutkimusongelmat kiteytyivät seuraaviin kysymyksiin:

- Miten luotettavaa ja käyttökelpoista hiilitaselaskennan tuottama aineisto on kuviotasolla tehtävässä päättelyssä?
- Mitkä tekijät selittävät hiilitaselaskennan ja sen avulla tuotetun luokituksen mahdollisesti havaittavissa olevaa epävarmuutta?
- Miten hiilitaselaskennan tuottamaa aineistoa voidaan hyödyntää metsäsuunnittelussa ilmastopoliittisia tavoitteita tukevalla tavalla?
- Miten eri kasvupaikkatyypin hiilivarastot ja -nielut kehittyvät simuloinnin mukaan tutkimuksen esimerkkikohteilla.

2 KASVIHUONEKAASUT JA ILMASTONMUUTOS

2.1 Kasvihuonekaasut

Kasvihuonekaasut ovat aineita, jotka aiheuttavat kasvihuoneilmiötä eli ilmaston lämpenemistä. Tärkeimpiä kaasuja ilmaston lämpenemisen kannalta ovat vesihöyry (H₂O), hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄), otsoni (O₃) ja dityppioksidi (N₂O). Ilmakehän valtakaasut happi ja typpi eivät aiheuta ilmaston lämpenemistä. (Kasvihuonekaasut s.a.; Ilmatieteenlaitos s.a.a.) Kasvihuonekaasujen molekyyli rakenne on sellainen, että ne pystyvät imemään itseensä lämpösäteilyä. Osa niiden imemästä säteilystä palautuu maan pinnalle ja lämmittää sitä. Osa taas karkaa avaruuteen. (Ilmatieteenlaitos s.a.a) Vesihöyry nostaa luonnollisesti maapallon ilmakehän lämpötilaa 21 asteella, hiilidioksidi 7 asteella ja muut ilmastokaasut 5 asteella (Kasvihuonekaasut s.a.).

Kasvihuonekaasujen ominaisuudet vaihtelevat paljon. Osa kaasuista säilyy ilmakehässä huomattavasti kauemmin kuin toiset (Taulukko 1). Esimerkiksi hiilidioksidi säilyy ilmakehässä 50–200 vuotta. Metaanin säilyvyys taas on 12 vuotta. Kaasujen vaarallisuusaste ilmastonlämpenemisen kannalta vaihtelee myös paljon. Vaarallisuusastetta vertailtaessa käytetään yksikkönä lämmityspotentiaalia (GWP). Se mittaa kaasun aiheuttamaa lämmitysvaikutusta verrattuna hiilidioksidiin massayksikköä kohti 20 tai 100 vuoden aikana. Kasvihuonekaasujen lämmityspotentiaalitietoa käytetään hyödyksi esimerkiksi laskettaessa kaasujen kokonaispäästövaikutusta. Arvot ilmaistaan hiilidioksidiekvivalentteina (ekv.) (Suomen virallinen tilasto 2019).

Taulukko 1. Kasvihuonekaasujen elinikä ja ilmastonlämmityspotentiaali (IPCC 2007)

Kaasu	Elinaika (v)	GWP 20 v	GWP 100 v
Hiilidioksidi	50–200	1	1
Metaani	12	72	25
Dityppioksidi	114	310	298
HFC:t	1,4–270	437–12 000	124–14 800
PFC:t	2 600–50 000	5 210–8630	7 390–12 200
SF6	3200	16300	22800
CFC:t	45–1700	5 310–11 000	4 750–14 400
HCFC:t	1,3–17,9	273–5 490	77–2 310
Halonit	16–65	3 680–8 480	1 640–7 140

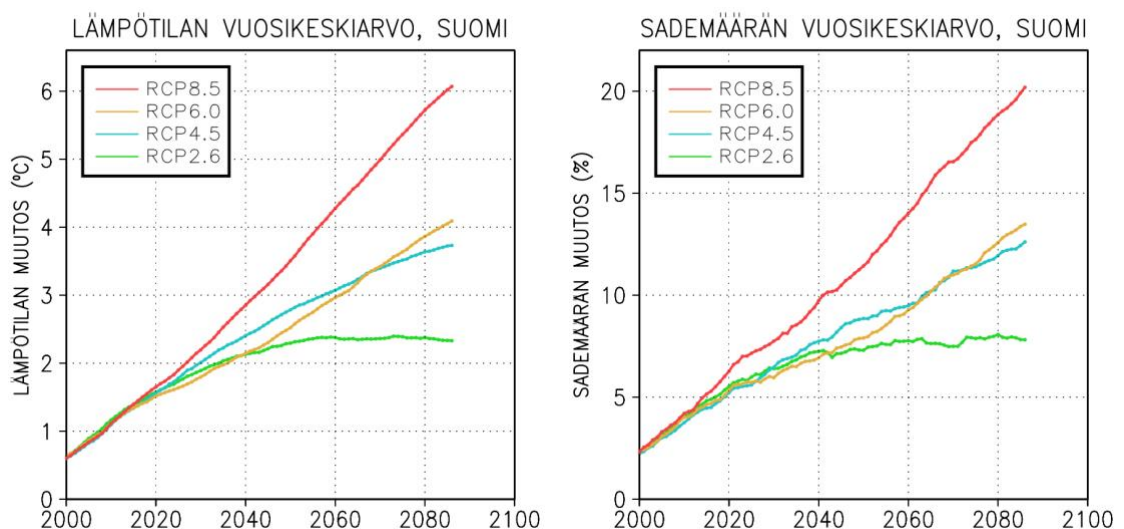
2.2 Ilmastonmuutos

Hiilidioksidi on yleisin kasvihuonekaasu, jota syntyy ihmisen toiminnan seurauksena. Se myös aiheuttaa suurimman osan (63 prosenttia) maapallon ilmaston lämpenemisestä. Metaanin osuus ilmaston lämpenemisestä on 16 prosenttia ja typpioksiduulin 6 prosenttia. Kasvihuonekaasupäästöt aiheutuvat pääasiassa luonnonvarojen hyödyntämisestä. Hiilen, öljyn ja kaasun poltto synnyttävät hiilidioksidia ja typpioksiduulia. Kotieläintuotannon lisääntyminen lisää metaanipäästöjä ja typpipitoisten lannoitteiden käyttö typpioksiduulipäästöjä. Myös metsien hävittäminen vaikuttaa ilmaston lämpenemiseen. Metsä sitoo kasvaessaan hiilidioksidia. Kun metsä hävitetään, sen hiilinieluvaikutus päättyy. (Euroopan komissio s.a.) Lähes 80 prosenttia metsien hävittämisestä johtuu soijan, naudanlihan, palmuöljyn, kahvin ja kaakaon kaltaisten hyödykkeiden tuotannon kasvusta (Euroopan komissio 2020, 1.)

Maapallon keskilämpötilan arvioidaan nousevan 2°C vuoteen 2050 mennessä ja 4°C vuoteen 2100 mennessä. Lämpötilan nousua voidaan hidastaa vähentämällä kasvihuonekaasupäästöjä. Keskilämpötila ei nouse samassa suhteessa joka puolella maapalloa. Pohjoisilla alueilla lämpötilannousu on suurempaa varsinkin viileiden kuukausien osalta. Ilmastonmuutos aiheuttaa haihdunnan lisääntymistä, joka näkyy toisaalla sateiden lisääntymisenä ja toisaalla kuivuuden lisääntymisenä. (Halonen, Rinne, Tommila & Vanhanen 2013, 10.)

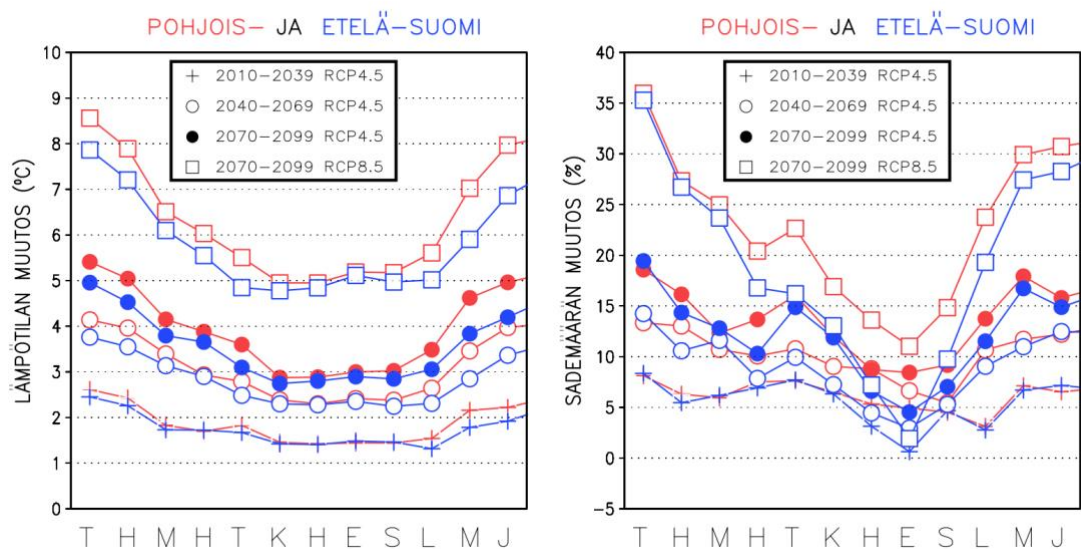
Lämpötilan nouseminen sulattaa jäätiköitä, minkä seurauksena tulvat lisääntyvät ja meriveden pinta nousee. Sulamisen seurauksena maa- ja merialueiden jää- ja lumipeite vähenevät. Jää- ja lumipeitteen vähentyminen taas vähentää valon heijastumista, lisää auringon lämmitysvaikutusta ja kiihdyttää ilmaston lämpenemistä. Merenpinnan nousuun vaikuttaa myös meriveden lämpölaajeneminen. (Halonen ym. 2013, 10.) Ilmaston lämpeneminen sulattaa myös pohjoisen alueen ikiroutaa. Ikiroudasta vapautuneet suoalueet lisäävät metaanipäästöjä ilmakehään. Niiden vaikutus lämpenemiseen voi olla moninkertainen verrattuna muihin ihmisen aiheuttamiin kasvihuonekaasupäästöihin. (Schaefer, Lantuit, Romanovsky & Schuur 2012.) Luonnon monimuotoisuus heikkenee ilmastonmuutoksen myötä. Mantereen eliölajien olosuhteet muuttuvat ja joidenkin uhanalaisten lajien elinolosuhteet heikkenevät entisestään. Kasvillisuus- ja eliövyöhykkeet voivat siirtyä jopa 400 kilometriä kohti napa-alueita vuosisadan loppuun mennessä. (Gonzales, Neilson, Lenihan & Drapek 2010, 755–768.)

Suomen ilmasto lämpenee maapallon keskiarvoa enemmän. Se lämpenee mahdollisesti jopa 6°C vuoteen 2085 mennessä, jos kasvihuonekaasupäästöjä ei rajoiteta nykyisestä. Maltillisimman arvion mukaan lämpötila nousee noin 2,5°C, jos päästöjä rajoitetaan voimakkaasti. Sateiden määrä Suomessa lisääntyy 7–20 prosenttia, riippuen siitä miten paljon päästömäärät vähentyvät. (Kuvio 1.)



Kuvio 1. Vuoden keskilämpötilan ja sademäärän muutos, eri skenaarioiden mukaan, Suomessa vuosina 2000–2085 verrattuna jakson 1971–2000 keskimääräisiin arvoihin. (Ilmatieteenlaitos s.a.b, 4.)

Ennusteiden mukaan sademäärän ja lämpenemisen kasvu tulee olemaan suurempaa talvikuukausina, kuin kesällä. Myös maantieteelliset erot ovat huomattavia. Lämpeneminen ja sateiden lisääntyminen tulevat olemaan Pohjois-Suomessa suurempia kuin Etelä-Suomessa. (Kuvio 2; Halonen ym. 2013, 28.) Lämpötilan nousu pidentää kasvukautta, mutta myös tuholaisten määrä kasvaa talvipakkasten vähennyttyä. Tulvien määrä lisääntyy myrskyjen, sateen lisääntymisen ja merenpinnan nousun seurauksena. Meren ja sisävesien jääpeitteinen aika vähenee. Jäättömyys nostaa vesistöjen ravinnepitoisuutta ja rehevöittää niitä. (Halonen ym. 2013, 29.)



Kuvio 2. Lämpötilan ja sademäärän muutos, eri skenaarioiden mukaan, Pohjois- ja Etelä-Suomessa verrattuna jakson 1971–2000 keskimääräisiin arvoihin. (Ilmatieteenlaitos s.a.b, 6.)

2.3 Metsien ja soiden vaikutus kasvihuonekaasuihin

Metsät vaikuttavat merkittävästi ilmaston lämpenemiseen. Metsien tehtävänä on toimia hiilinieluinä ja -varastoinä sekä uusiutuvan raaka-aineen lähteenä. (Lehtonen, Salminen, Kallio, Tuomainen & Sievänen 2016, 5.) Maapallon pinta-alasta noin kolmannes on metsien peittämää. Metsien ja niiden maaperän hiilivarastoon on sitoutunut noin 2,2-kertainen määrä hiiltä ilmakehään verrattuna. (IPCC 2007.) Metsät toimivat myös valtavinä hiilinieluinä. Ne sitovat vuosittain noin 4 miljardia tonnia hiiltä. (Soimakallio 2018.)

Suomen metsät sitoivat vuosien 2000 ja 2017 välillä hiiltä ja muita kasvihuonekaasuja keskimäärin 31,7 miljoonaa tonnia CO₂-ekvivalenttia vuodessa (Statistics Finland 2019, 295). Määrä vaihtelee vuosittain miljoonilla tonneilla muun muassa metsähakkuiden vaikutuksesta. (Yliluoma 2019, 9). Metsät sitovat ilmakehän hiilidioksidia sekä puustoon että maaperään. Suomessa valtaosa hiilestä on sitoutunut soiden turpeeseen ja kangasmetsien maaperään. Hiilidioksidin massasta 27 prosenttia on hiiltä ja loppuosa on happea. Jos puuston ja maaperän sitoma hiili ilmoitetaan hiilidioksidina, täytyy käyttää muuntokerrointa. Soiden maaperään on sitoutuneena hiiltä noin 5500 miljoonaa tonnia (20 200 miljoonaa tonnia CO₂) ja kangasmetsien kivennäismaapohjaan noin 1300 miljoonaa tonnia (4800 miljoonaa tonnia CO₂). Puustoon on sitoutunut hiiltä noin 700 miljoonaa tonnia (2500 miljoonaa tonnia CO₂). Suot ja turvepohjaiset metsät ovat siis Suomessa tärkein hiilivarasto. (Heikkinen s.a., 3; Hiilensidonnan laskutapa s.a.)

Puuston hiilivaraston muutos vaikuttaa keskeisimmin metsien kokonaishiilivarastoon. Puuston hiilivaraston kehittymiseen vaikuttavat pääasiassa puuston kasvu ja hakkuut. Puuston kariketuotos ja hakkuutähteet myös syöttävät maaperän hiilivarastoa. (Lehtonen ym. 2019,12.) Kuutio puuta sitoo keskimäärin 1000 kiloa hiilidioksidia. Hehtaarin alalla puusto sitoo keskimäärin 4700 kiloa hiilidioksidia. (Karvonen 2019.) Vuosina 2017–2018 läpiviedyssä kehittämissuunnitelmassa ”Ilmastoviisas metsätalous” Metsähallitus Metsätalous Oy teki valtion monikäyttömetsille hiililuokituksen. Luokituksen mukaan eri ikäinen ja eri kehitysvaiheessa oleva puusto sitoo hiiltä eri tavalla. Myös metsien käsittely on huomioitu luokituksessa. Kasvavien metsien hoitaminen suositusten mukaisesti tähtää metsien kasvun lisäämiseen. Kasvun lisääntyminen taas lisää hiilen sidontaa. Taimikot ja uudistuskypsät metsät sitovat kokonaismäärältään hiiltä hitaammin, kuin nuoret ja varttuneet metsät. Vanhat luonnontilaiset metsät taas toimivat hiilivarastoina tai saattavat osin olla jopa päästölähteitä. (Kuvio 3.)

Metsien hiililuokitus



 METSÄHALLITUS

Kuvio 3. Valtion monikäyttömetsien hiililuokitus monikäyttömetsille. (Vaara ym. 2018, 35)

Maaperän hiilivarasto kasvaa, jos maaperään tulevan hiilen massa on suurempi kuin mikrobitoiminnasta aiheutuva hiilen poistuma. Hapellisissa oloissa hiili poistuu maaperästä hiilidioksidina ja hapettomissa oloissa metaanina. Maaperässä oleva nitraatti ja ammonium voivat haihtua ilmakehään typpioksiduulina. (Hautanen & Ojanen 2014, 4.) Suomen kivennäismaiden hiilensidonnasta on tehty monia arvioita. Niiden mukaan ne sitovat vuositasolla kymmenistä kiloista satoihin kiloihin hiiltä hehtaarille, riippuen olosuhteista. Kivennäismaat sitovat metaania 1–3 kg/ha/v. (Lehtonen, Puolakka, Ihalainen, Heikkinen & Korhonen 2011; Liski ym. 2006.)

Minkkisen ja Ojaseen Pohjois-Pohjanmaata koskevan tutkimuksen mukaan (Taulukko 2) luonnontilaisten soiden maaperä toimii hiilinieluna, mutta niiden metaanipäästöt ovat suuret. Dityppioksidipäästöt ovat maltilliset. Metsäojitus vaikuttaa soiden kasvihuonekaasupäästöihin merkittävästi. Hiilidioksidi- ja dityppioksidipäästöt kasvavat, mutta metaanipäästöt vähenevät. Lisäksi hiilen huuhtoutuminen lähes kaksinkertaistuu. Kokonaisuutena kasvihuonekaasupäästöt laskevat hieman verrattuna luonnontilaisiin soihin.

Taulukko 2. Metsäojitettujen ja luonnontilaisten soiden kasvihuonekaasupäästöt Gg CO₂ ekv./v (GWP 100v) Pohjois-Pohjanmaalla. KHK = kasvihuonekaasut ja DOC = huuhtoutuva hiili. (Minkkinen & Ojanen 2013 ,87.)

Kaasutaseet ja DOC	Metsäojitetut	Luonnontilaiset
CO ₂	206	-747
CH ₄	213	1640
N ₂ O	232	6
KHK yhteensä	651	899
DOC	293	159
KHK yhteensä+DOC	944	1058

2.4 Ilmastomuutoksen vaikutukset puiden kasvuun

Ilmastomuutos vaikuttaa metsiin lämpötilan ja säteilyn muutosten sekä sateisuuden ja vedensaatavuuden muutosten kautta. Puiden kasvu ja niiden hiilensidonta määräytyvät sen mukaan, miten ne sopeutuvat voidenaikaisvaihteluun ja pitkän aikavälin ympäristömuutoksiin, sekä miten ne kestävät sään ääri-ilmiöitä. (Kellomäki ym. 2005; Vapaavuori ym. 2012; Hänninen 2016.) Ilmastomuutos tulee todennäköisesti lisäämään puiden kasvua, koska kasvukausi pitenee ja ilmakehän hiilidioksidimäärä kasvaa (Kellomäki ym. 2005).

Puiden sopeutumiskyky on keskeisessä asemassa muuttuvissa talveentumis-, lepotila- ja suveentumisoloissa. Lepotilan aikana puiden sisäisissä ominaisuuksissa tapahtuu muutoksia, jotka ovat tärkeitä puiden sopeutumiskyvyn ja kasvun kannalta. (Müller ym. 2012, 121–153.) Puiden juuristolla on tärkeä rooli vuosisyklin säätelyssä ja kasvussa. (Akujärvi, Lehtonen, Repo, Saksa, Sarkkola & Soimakallio 2020.) Sopeutumisen liikkeelle panevista voimista tärkeimpiä ovat ilman ja maan lämpötila, valaistus, valojaksoisuus ja maan kosteus (Repo 1993; Hänninen 2005). Lisäksi maan ravinteisuus, huokoisuus ja vedenpidätyskyky ovat puiden kasvukyvyn kannalta tärkeässä asemassa (Mannerkoski 2012). Myös geeneillä on tärkeä tehtävä puiden sopeutumisen ohjaamisessa. Saman puulajin geneettisen alkuperän vaihtelu ja eri puulajien väliset geneettiset erot vaikuttavat siihen miten eri puuyksilöt reagoivat ympäristöolojen muutoksiin (Beuker, Valtonen & Repo 1998).

Jokaiselle kasvupaikalle valikoituu tietty puustopopulaatio geneettisen sopeutumisen tuloksena (Akujärvi ym. 2020, 9).

Puiden kasvu kiihtyy keväällä, kun vuorokauden keskilämpötila nousee noin +5°C:een (Domisch, Finér & Lehto 2001). Ennen varsinaisen kasvukauden alkamista puiden silmujen lepotila purkaantuu ja niiden kasvukyky palautuu. (Hänninen 2016). Ilmastonmuutos ei todennäköisesti lämmitä Boreaalista talviilmastoa siinä määrin, että silmulepo vaarantuisi. Lämpötilan nousu tulee olemaan tulevaisuudessakin tärkeä osa kasvukauden käynnistymistä. (Akujärvi ym. 2020, 10.) Kasvukauden käynnistymiseen liittyy pakkasvaurioriski, jos puiden karaistuneisuus ehtii purkautua aikaisen lämpöjakson seurauksena (Hänninen 2005).

Kasvukauden mahdollinen piteneminen johtaa siihen, että entistä pienempi suhteellinen osuus puiden kasvukaudesta kuluu pituuskasvuun. Neulasten, päätesilmun, juuriston ja rungon paksuuden kasvun osuus kasvukaudesta taas kasvaa. Kasvun lisääntymisen edellytyksenä, lämpötilan nousun lisäksi, on ilman hiilidioksidipitoisuuden lisääntyminen. (Akujärvi ym. 2020, 11.) Koivu hyötyy kasvukauden pidentymisestä enemmän kuin mänty ja kuusi. Niiden geneettinen alkuperä rajoittaa kasvua enemmän kuin koivulla (Kellomäki ym. 2005).

Ilmastonmuutos nostaa ilman lämpötilaa, mutta päivän pituus ei muutu. Valon määrä ja päivän pituus ovat tärkeimpiä tekijöitä yhteyttämiselle. Osa pidentyneen kasvukauden tuottamasta lisäenergiasta meneekin hukkaan, koska puut eivät pysty hyödyntämään sitä tehokkaasti kasvukauden alussa ja lopussa. (Akujärvi ym. 2020, 12.) Myös lumipeitteen muutoksilla on vaikutusta puiden kasvulle. Oheneva lumipeite suojaa huonommin taimia ja puiden pintajuuria kylmyydeltä sekä jäätymis-sulamissykleiltä. Toisaalta oheneva lumipeite aikaistaa kasvun käynnistymistä (Domisch, Martz, Repo & Rautio 2018; Tranquillini 1982.) Lumipeitteen oheneminen lisää myös routaa. (Akujärvi ym. 2020, 12; Repo ym. 2014)

Maaperän vesipitoisuus vaikuttaa keskeisesti puiden kasvuun. Vesipitoisuuden tulee olla sopivalla tasolla, jotta kasvu olisi tehokkainta (Mannerkoski 2012). Muuten puusto kärsii joko kuivuudesta tai liiallisesta kosteudesta ja kasvu

hidastuu. Maaperän vesi toimii liuottimena, joka liuottaa ravinteet juuriston käytettäväksi. Vedensaannilla on myös tärkeä rooli puiden yhteyttämisessä. Ilman vettä yhteyttäminen ei toimi ja sokeria ei synny. Suurin osa juurten ottamasta vedestä kuluu puiden haihduttamiseen. Haihdunta viilentää lehtiä ja neulasia. (Akujärvi ym. 2020, 13–14.)

Kohonnut ilman hiilidioksidipitoisuus tehostaa puiden vedenkäyttöä yhteyttämisessä (Kellomäki & Peltola 2005). Ilmastonmuutoksen on kuitenkin ennustettu lisäävän sateita. Korkea ilmankosteus vähentää puiden haihduntaa, laskee puiden hiilidioksidinottoa ja hidastaa kasvua (Oksanen ym. 2019). Turvemailla ja huonosti vettä läpäisevillä kivennäismailla lisääntyneiden sateiden ja tulvien seurauksena pohjavesi voi nousta juuristokerrokseen. Tällöin juuristokerroksen happiolosuhteet muuttuvat huonoiksi ja puiden juuristo kärsii. Jos happiolosuhteet säilyvät huonoina pitkään, juuristo alkaa kuolla. (Repo, Heiskanen, Sutinen, Sutinen & Lehto 2017; Repo ym. 2020.) Ohutjuurten kuolleisuus ja juuriston keskittyminen maaperän pintakerrokseen lisää puiden kaatumisriskiä lumikuorman ja myrskyjen vaikutuksesta (Akujärvi ym. 2020, 14). Kuusi kärsii kuivuudesta muita puulajeja herkemmin, koska sen juuret ovat pinnassa. Ilmastonmuutos lisää todennäköisesti myös kuivia kasvukausia. Tällöin kuusi on herkimmässä asemassa. (Akujärvi ym. 2020, 14.)

Puiden lumituhoriskin arvioidaan kasvavan Pohjois-Suomessa ja vähenevän Etelä-Suomessa ilmastonmuutoksen seurauksena. Lumituhoriskiin vaikuttaa lisääntyvät sateet ja olomuoto missä sateet tulevat. (Venäläinen ym. 2020.) Myös talvitulvien arvellaan lisääntyvän, mutta niiden vaikutukset puiden kasvuun jäävät vähäisiksi (Roitto ym. 2019). Ohut lumipeite lisää roudan määrää. Lumirajan siirtymisen vuoksi routatuhot voivat lisääntyä alueilla, joilla talvet ovat nykyään paksulumisia (Kellomäki, Maajärvi, Strandman, Kilpeläinen & Peltola 2010). Myös tuuli- ja myrskytuhoriskit kasvavat ilmastonmuutoksen seurauksena. Riski kasvaa eniten syys-, talvi- ja kevätkausina. (Venäläinen ym. 2020.) Lämpötilan ennustettu nouseminen lisää kesän kuivia jaksoja ja sitä kautta metsäpalot yleistyvät (Müller ym. 2012). Toisaalta Etelä-Suomen metsien on arvioitu muuttuvan lehtipuuvaltaisemmiksi, joka taas laskee metsäpaloriskiä (Akujärvi ym. 2020, 16).

3 METSÄNHOIDON VAIKUTUKSET HIILITASEESEEN

3.1 Avohakkuu

Avohakkuussa hakkuualalta poistetaan puusto lähes kokonaan. Lisäksi hakkuutähteet ja kannot joko kerätään pois tai jätetään alalle ja maaperää muokataan seuraavaa puusukupolvea varten. Hakkuualan mikroilmasto, kasvillisuus ja maaperän lämpötila muuttuvat toimenpiteiden seurauksena huomattavasti. Muutokset vaikuttavat hakkuualan hiilitaseeseen. (Londo ym. 1999; Korkiakoski ym 2019, 3704.) Avohakkuu lisää maaperän lämpenemistä ja sitä kautta lisää maahengitystä sekä vaikuttaa hiilen kiertoon. Hiilidioksidin haihtuminen lisääntyy varsinkin kesäkuukausina, kun avoimeksi hakattu maaperä lämpenee nopeasti. Myös lahoavat hakkutähteet ja kannot lisäävät hiilidioksidin haihtumista. (Korkiakoski ym. 2019, 3704–3708.)

Turvemailla avohakkuu tosin nostaa yleensä vedenpintaa, mikä hidastaa maahengitystä ja turpeen hajoamista (Sarkkola ym. 2010). Puuston poiston ja aluskasvillisuuden vähenemisen seurauksena metsikön hiilensidonta häviää joksikin aikaa lähes kokonaan (Korkiakoski ym. 2019). Turvemailla aluskasvillisuus palautuu muutamassa vuodessa, mutta uuden metsikön muuttuminen hiilinieluksi voi kestää 8–20 vuotta (Mäkiranta, Riutta, Penttilä & Minkkinen 2010; Ojanen, Mäkiranta, Penttilä & Minkkinen 2017). Turvemaiden avohakkuu lisää myös metaanin haihtumista. Muutokset voivat olla pieniä mutta yleensä negatiivisia, muuttaen pienen nielun pieneksi lähteeksi. Muutokset ovat saman kaltaisia myös dityppioksidipäästöjen osalta. Päästöt lisääntyvät heti avohakkuun jälkeisinä vuosina ja ne ovat korkeimmillaan kesäkuukausina. (Korkiakoski ym. 2019, 3712.)

3.2 Metsien jatkuvapeitteinen kasvatus ja luontainen uudistaminen

Metsien jatkuvapeitteinen kasvatus eroaa avohakkuuseen perustuvasta jaksollisesta kasvatuksesta huomattavasti. Jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa metsästä ei poisteta missään vaiheessa puustoa kokonaan, vaan se säilyy

peitteisenä. Metsän uudistuminen tapahtuu luontaisen taimettumisen kautta, minkä vuoksi metsästä muodostuu myös eri-ikäisrakenteinen. Hakkuut kohdistuvat pääasiassa suuriin puihin, mikä lisää tukkipuukertymää. Luontaisella uudistamisella taas vältetään metsänuudistamiskustannukset. (Juutinen, Ahtikoski & Rämö 2020, 2.) Toisaalta metsikön puuntuotos ja hakkuukertymät jäävät yleensä pienemmiksi kuin tasaikäiskasvatuksessa (Hynynen, Eerikäinen, Mäkinen & Valkonen 2019). Hakkuukustannukset tosin ovat pienemmät, koska hakkuissa kertyy enemmän tukkia (Juutinen ym. 2020, 2). Jatkovapeitteisen kasvatuksen käytöllä voidaan parantaa metsien monimuotoisuutta ja vähentää huonoja ympäristövaikutuksia. Monimuotoinen metsä tarjoaa parempia ekosysteemipalveluja. Hiilen sidonnan kannalta jatkovapeitteinen metsänkasvatus on tutkimusten mukaan parempi vaihtoehto kuin tasaikäinen kasvatus (Pukkala 2016; Peura, Burgas, Eyvindson, Repo & Mönkkönen 2018).

Jatkovapeitteisen metsänkasvatuksen hakkuutapoja ovat poimintahakkuu, pienaukkohakkuu, suojuspuuhakkuu ja ylispuunpoistohakkuu. Metsähallitus käyttää lisäksi luontaiseen uudistamiseen tähtävillä kohteilla uudistuskypsan metsän väljennyshakkuuta; pienaukkohakkuusta käytetään termiä pienalakasvatushakkuu (Metsähallitus 2021, 30–31). Poimintahakkuussa metsästä poistetaan isoimpia puita sekä viallisia ja sairaita puita. Hakkuu toistetaan 10–15 vuoden välein tai pohjoisessa 15–30 vuoden välein. Hakkuilla tehdään kasvutilaa pienemmille puille ja taimille. Pienaukkohakkuussa metsikkökuviolle tehdään enintään 0,3 hehtaarin kokoisia aukkoja, jotka on tarkoitus saada taimettumaan luontaisesti reunametsästä. Kun aiemmin tehdyt aukot ovat taimettuneet, voidaan tehdä uusia aukkoja.

Poimintahakkuuta ja pienaukkohakkuuta voidaan käyttää yhdessä siten, että pienaukkojen teon lisäksi välialueet käsitellään poimintahakkuulla. (Valkonen 2020, 10–11; Metsä Group s.a.) Suojuspuuhakkuussa tavoitellaan alikasvoksen syntymistä ylispuiden alle. Ylispuut poistetaan vasta, kun taimet ovat 1,5 metrin pituisia. (Metsähallitus s.a.) Poimintahakkuilla toteutettu jatkovapeitteinen kasvatus soveltuu paremmin kuuselle kuin männylle. Mänty on valopuu, joka tarvitsee menestyäkseen enemmän kasvutilaa. Kivennäismailla suojuspuuhakkuu on männylle sopivampi jatkovapeitteinen käsittelytapa. (Äijälä ym. 2019.) Jatkuvan kasvatuksen hakkuita kangas- ja turvemilla ohjaa

valtioneuvoston määrittämät vähimmäistiheydet jäävälle puustolle (Taulukko 3). Käytännössä puustoa jätetään kasvamaan 1–2 neliötä hehtaarille enemmän, koska ajouraverkoston vaikutus tulee huomioida ja varautua mahdollisiin luonnontuhoihin.

Taulukko 3. Hakkuun jälkeisen puuston lakirajat eri-ikäisrakenteisen metsän kasvatuksessa (Valtioneuvoston asetus metsien kestävästä hoidosta ja käytöstä 30.12.2013/1308)

Maantieteellinen sijainti	Tuoreet tai sitä ravinteikkaammat kankaat	Kuivahkot tai sitä karummat kankaat
	Pohjanpinta-ala m ² /ha	Pohjanpinta-ala m ² /ha
Eteläinen Suomi	10	9
Keskinen Suomi	9	8
Muu pohjoinen Suomi	8	6
Suojametsäalue sekä Inari, Kittilä, Muonio, Salla, Savukoski ja Sodankylä	7	5

Saarisen ym. (2020, 4–6) mukaan turvemaiden jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa on tärkeintä, että ylläpidetään riittävää puustoa biologisen kuivatuksen varmistamiseksi. Laajat avo- ja siemenpuuhakkuut nostavat vedenpintaa liikaa, joten niitä tulee välttää. Uusi puusukupolvi syntyy luontaisesti ylemmän puustojakson alle tai rinnalle. Paimintahakkuu ylläpitää kuivatusta tasaisesti koko metsikkökuviolla. Puusto tulee kuitenkin hakata riittävän harvaksi, jotta uutta taimiainesta pääsee syntymään. Haasteena onkin saada aikaiseksi riittävän tiheä puusto kuivatuksen ylläpitämiseksi, mutta riittävän harva luontaisen uudistumisen aikaansaamiseksi. Turvemaidella voidaan myös käyttää kaistalehakkuuta tai pienaukkohakkuuta yhdistettynä paimintahakkuuseen. Männiköissä pienaukkojen tai kaistaleiden tulee olla suurempia kuin kuusikoissa, koska reunametsä vaikuttaa aukoilta syntyvien männyntaimien kasvuun voimakkaasti. Pienaukon tai kaistaleen tulee kuitenkin olla sopivan kokoinen, ettei biologinen kuivatus heikkene liikaa. Sopivasta koosta ei ole vielä yksiselitteisiä tutkimustuloksia.

Jatkuvapeitteisen kasvatuksen ilmastovaikutusten tutkiminen on vasta alkuvaiheessa. Tutkimuksia on tehty pelkän puuston sekä puuston ja maaperän hiilivaraston muutoksille. Osassa tutkimuksista on myös huomioitu hakatun puun jatkokäytön vaikutukset. Tutkimukset ovat keskittyneet sekä kivennäis- että turvemaille. (Akujärvi ym. 2020, 24.) Kivennäismailla hiilensidontaan vaikuttaa enemmän hakkuiden intensiteetti, kuin se onko hakkuu jatkuvapeitteisen tai tasaikäisrakenteisen metsänkasvatuksen mukaista (Shanin ym. 2016). Tärkeää ilmastovaikutusten kannalta on se, että puuston kasvu säilyy hyvällä tasolla ja miten hakattu puu jatkojalostetaan (Lundmark, Bergh, Nordin, Fahlvik & Poudel 2016, 211). Voimakkaan harvennuksen jälkeen puuston kasvu hidastuu huomattavasti tai aukoilla se pysähtyy vähäksi aikaa kokonaan. Pitkällä aikavälillä näillä käsittelytavoilla metsään sitoutuu hiiltä vähemmän kuin metsään, jossa hyvää kasvua ylläpidetään jatkuvasti. (Akujärvi ym. 2020, 24–25.)

Turvemaille jatkuvapeitteisellä metsänkasvatuksella voidaan vähentää ojitusalueiden ilmasto- ja vesistövaikutuksia sekä vähentää metsänuudistamisen kustannuksia (Nieminen ym. 2018). Runsaspuustoisilla ojitetuilla soilla ojien kunnostustarve on vähäinen. Tilavuudeltaan noin 100–120 m³/ha puusto yleensä riittää pitämään pohjaveden korkeuden sopivana (Sarkkola, Hökkä, Ahti, Koivusalo & Nieminen 2012). Sopiva pohjaveden taso puuston kasvukaudella on 30–40 cm (Sarkkola ym. 2013). Samalla vedenpinnantasolla myös metaani- ja hiilidioksidipäästöt pysyvät maltillisina (Ojanen 2015).

Metsien jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa tavoitellaan puuston luontaista uudistumista pitkällä aikavälillä. Luontaisen uudistamisen tulokset vaihtelevat ojitetuilla soilla enemmän kuin kivennäismailla. Vaihteluun vaikuttavat eniten vedenpinnan syvyys ja ojitusvaikutuksesta syntynyt kasvillisuus. Taimettumisalustan kosteuteen vaikuttaa myös ojituksen jälkeen syntynyt karikkekerrostuma. (Saarinen 2019, 33–34.) Tehokkaasti kuivuneilla ojitusalueilla taimettumisalustalle on syntynyt puiden ja muiden kasvien karikemassan vaikutuksesta raakahumuskerros (Saarinen 2013). Se hidastaa tai katkaisee taimettumisalustan ja turpeen vesipinnan välisen kapillaariyhteyden. Yhteyden katkeaminen heikentää luontaista taimettumista ja siten lisää maanmuokkaustarvetta. (Saarinen 2019, 33–34.) Heikosti onnistuneilla tai uusilla ojitusalueilla taimettumisalustalla on yleensä rahkasammalpintoja, jotka

hidastavat karikkekerrostumien syntymistä. Rahkasammalpinnot ovat hyviä itämisalustoja puiden siemenille (Saarinen 2002). Vedenpinnan tulisi kuitenkin olla kasvukaudella riittävän matalalla, jotta puuston kasvu ei häiriinny (Saarinen 2013). Siksi heikosti kuivuneiden soiden ojat pyritään kunnostamaan uudistamisen yhteydessä (Saarinen 2019, 34).

Ojitettujen soiden ja turvekankaiden raakahumuskerroksen paksuus vaihtelee muun muassa puustosta ja ravinteisuudesta riippuen. Raakahumuskerros on yleensä paksuinta hyvin kuivuneilla mäntyvaltaisilla puolukka- ja varputurvekankailla (Saarinen & Hotanen 2000). Varsinkin runsas varpukasvusto tehostaa turvekerroksen kuivumista ja rahkasammalien häviämistä. Rehevien kuusikoiden ja koivuvaltaisten turvekankaiden raakahumuskerros on yleensä melko ohut. Ne ovat herkempiä taimettumaan luontaisesti. (Saarinen 2019, 34.) Esimerkiksi korpikuusikot taimettuvat luontaisesti hyvin pienaukkohakkuiden jälkeen (Hökkä & Repola 2018). Taimettumista edistävä kapillaarivaikutus voimistuu, kun turvekerros paljastetaan poistamalla pintakasvillisuus ja raakahumusta sisältävä kerros (Saarinen, Alenius & Laiho 2013). Vedenpinnan liiallinen nousu tulee kuitenkin estää huolehtimalla muokattavan alan kuivatuksesta. Varsinkin voimakkaiden hakkuiden yhteydessä vedenpinta nousee puuston haihdutuksen vähentyessä, ja jos kuivatusojat ovat huonossa kunnossa. (Saarinen 2019, 34.)

Ojitusalueilla, joilla on olemassa riittävän tiheä alikasvos, maanmuokkausta ei kannata tehdä. Muokkauksesta on tällaisilla kohteilla haittaa, koska muokkauksen yhteydessä tuhoutuisi hyväkasvuisia taimia. Lisäksi ojitusalueita, joilla on laajoja rahkasammalkasvustoja tai raakahumuskerros on ohut, ei yleensä kannata muokata. Niillä luontaiselle taimettumiselle on jo olemassa vähintäänkin kohtalaiset olosuhteet, joten maanmuokkausinvestointi voi olla turha. Maanmuokkaus edistää yleensä männyn taimettumista, mutta lisää myös vähemmän arvokkaan hieskoivun määrää. Hieskoivun raivaaminen aiheuttaa lisäkustannuksia. (Saarinen 2019, 34) Jos näyttää siltä, että alueelle syntyy herkästi hieskoivua, muokkaus voidaan jättää tekemättä. Riittävän tiheä mäntytaimikko voidaan saada aikaiseksi ilman maanmuokkaustakin (Hökkä ym. 2016).

Muokatun maan luontaiseen taimettumiseen vaikuttaa monia asia. Siementen itämiseen ja sirkkataimien kehittymiseen vaikuttaa muun muassa lämpöolot, sateiden määrä ja niiden ajallinen vaihtelu. Sateet ja haihdunta vaikuttavat vedenpinnan tasoon ja muokatun turpeen kosteusolosuhteisiin. Runsaat sateet ja kylmyys hidastavat taimettumista kaikilla kasvualustoilla. Keskimääräisen sateisina kasvukausina mätästetyt alat taimettuvat yleensä parhaiten. (Saarinen 2019, 35.) Keskimääräistä kuivemmilla ja lämpimämmillä kasvukausilla taas laikutetut alat taimettuvat herkimmin (Saarinen 2013). Vähäsateisina kesinä mättäät voivat kuivua liikaa, koska kuiva turve hylkii vettä (Szajdak & Szatylowicz 2010).

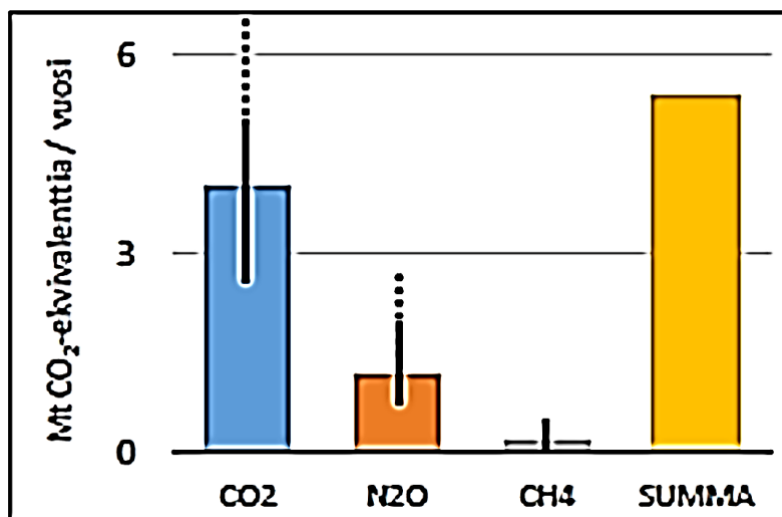
Saarisen (2019, 35) mukaan laikuttaminen, äestys ja jyrshintä sopivat turvemaiden luontaisen uudistamisen yhteydessä maanmuokkausmenetelmäksi hyvin. Muokkaus tulee tehdä siten, että poistetaan pintakasvillisuus ja raakahumuskerros turvekerros paljastaen. Jyrsinnessä turvekerrosta olisi hyvä möyhentää siten, että taimettumisalusta jää vähän koholleen ja siihen sekoittuu myös maaton turvetta (Saarinen 2013; Helenius & Saarinen 2013). Sirkkataimien syntyminen laikussa vaatii useamman vuoden, koska turvemaidella kosteusolot vaihtelevat huomattavasti vuosittain (Saarinen 2019, 36). Kääntömätästys on myös hyvä maanmuokkausmenetelmä, kun tähdätään luontaiseen uudistamiseen. Siinä mätäs käännetään ylösalaisin omaan kuoppaansa. Kääntömättäistä tehdään laakeita ja ne jätetään hieman koholleen. Niillä ei ole samanlaisia vettymisongelmia kuin laikuilla. Myös kapillaariyhteys mättään pinnalta vedenpintaan säilyy, eikä pintaturve kuivu niin helposti. (Saarinen 2019, 36.)

3.3 Metsäojitus

Metsäojituksen tavoite on laskea suon vedenkorkeutta, jotta puustolla olisi paremmat kasvuedellytykset. Ojitus on suometsissä keskeisin kasvihuonekaasujen vapautumiseen vaikuttava tekijä. Ojitusalueiden päästöihin vaikuttavat pääasiassa ojasyvyys ja kasvupaikan ravinteisuus. Vedenkorkeus muuttaa turpeen happiolosuhteita. Kun ojat ovat kasvamassa umpeen, vesi on korkealla ja turpeen hajoaminen tapahtuu hapettomissa oloissa. Tällöin

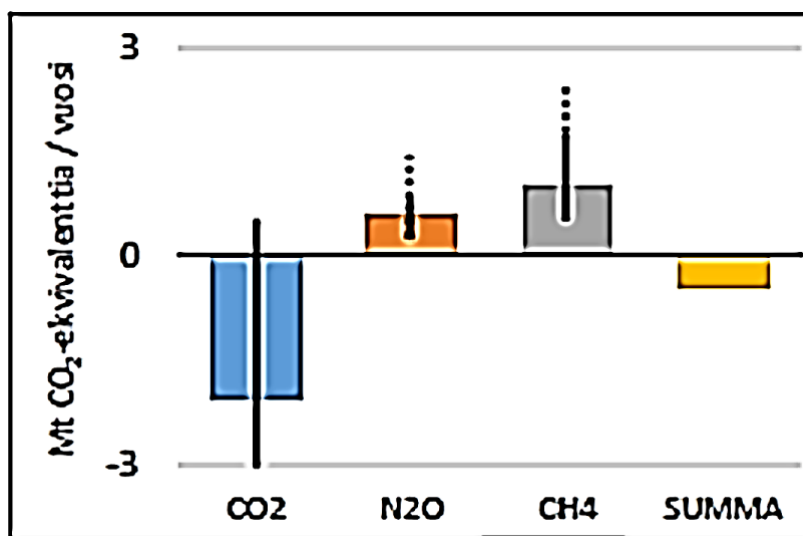
hiilidioksidipäästöt ovat vähäiset, mutta metaanipäästöt kasvavat. (Schneider & Päivinen 2020, 10.) Ojitetun suon metaanitaso on nolla, jos ojasyvyys on noin 20 cm, metsä kasvaa hyvin ja ojitus on hävittänyt suokasvillisuuden. Tällaiset kohteet ovat yleensä varputurvekangasta rehevämpiä turvekankaita. (Minkkinen ym. 2018). Jos ojitus ei ole onnistunut teknisesti hyvin, suo on jäänyt ojikoksi tai muuttuma-asteelle. Tällöin metaanipäästöt ovat kuivimpien luonnontilaisten soiden tasolla. Sama tilanne on myös ravinteisuudeltaan karuilla ja tasaisilla ojitusalueilla, joilla veden virtaama on hidasta. (Ojanen, Minkkinen, Alm & Penttilä 2010, Heikkinen ym. 2016.) Ojien ollessa syviä, turve kuivuu ja hapen määrä kasvaa. Turpeen hajoaminen hapellisissa oloissa lisää hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöjä ja laskee metaanipäästöjä. (Schneider & Päivinen 2020, 10.) Ojan syvyys vaikuttaa hiilidioksidin vapautumiseen lineaarisesti. Mitä syvempi oja, sitä enemmän turpeesta haihtuu hiilidioksidia. Hiilidioksidipäästöt kuitenkin alkavat tasoittua vedenpinnan ollessa 50-60 cm syvyydellä. (Ojanen & Minkkinen 2019, 3.) Ensimmäinen ojitus saattaa laskea kokonaiskasvihuonepäästöjä, koska haihtuvan metaanin määrä laskee suhteessa enemmän kuin hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöt kasvavat. (Schneider & Päivinen 2020, 10.)

Ruoho- ja mustikkaturvekankaat ovat luokitukseltaan ravinteikkaita turvekankaita. Niillä turpeen hävikki on nopeampaa kuin karuilla turvekankailla. Siksi varsinkin hiilidioksidipäästöt ja dityppioksidipäästöt kasvavat. (Ojanen, Saarinen, Schneider & Päivinen 2020, 5.) Ravinteikkailla turvemaidilla myös lämpöolosuhteet lisäävät hiilidioksidipäästöjä. Lämmön kasvaessa myös turpeen hajoaminen kiihtyy. Sen vuoksi Etelä-Suomessa ravinteikkaiden soiden päästöt ovat suurempia kuin Pohjois-Suomessa. (Ojanen, Minkkinen & Penttilä 2013.) Ravinteikkailla turvekankailla puuston kasvu on kuitenkin nopeaa. Kasvun ylläpito sitoo keskimäärin enemmän hiilidioksidia kuin maaperä ojituksen seurauksena vapauttaa. (Schneider ym. 2020, 10–11; Kuvio 4)



Kuvio 4. Kasvihuonekaasupäästöt metsäojitettujen rehevien soiden maaperästä Suomessa (Schneider & Päivinen 2020, 11)

Puolukka-, varpu- ja jäkäläturvekankaat luokitellaan karuiksi turvekankaiksi. Ne toimivat yleensä hiilinieluinä. Päästöjä syntyy lähinnä typpioksiduulista ja metaanista. Maaperä on mahdollista saada kokonaispäästöiltään jopa hiilineutraaliksi pitämällä ojasyvyys mahdollisimman korkealla (vedenpinta n. 30 cm syvyydellä) puuston kasvua häiritsemättä. (Schneider ym. 2020, 11 Kuvio 5.) Jos ojasyvyys on yli 40 cm, myös karummat turvekankaat voivat olla hiilidioksidin lähteitä (Ojanen ym. 2020, 5). Hiilidioksidi aiheuttaa suurimman osan metsäojituksen päästöistä, joten niiden vähentäminen tulisi olla ohjaava tekijä ojitettujen soiden käytön suunnittelussa (Ojanen ym. 2013 & Ojanen ym. 2020, 5).

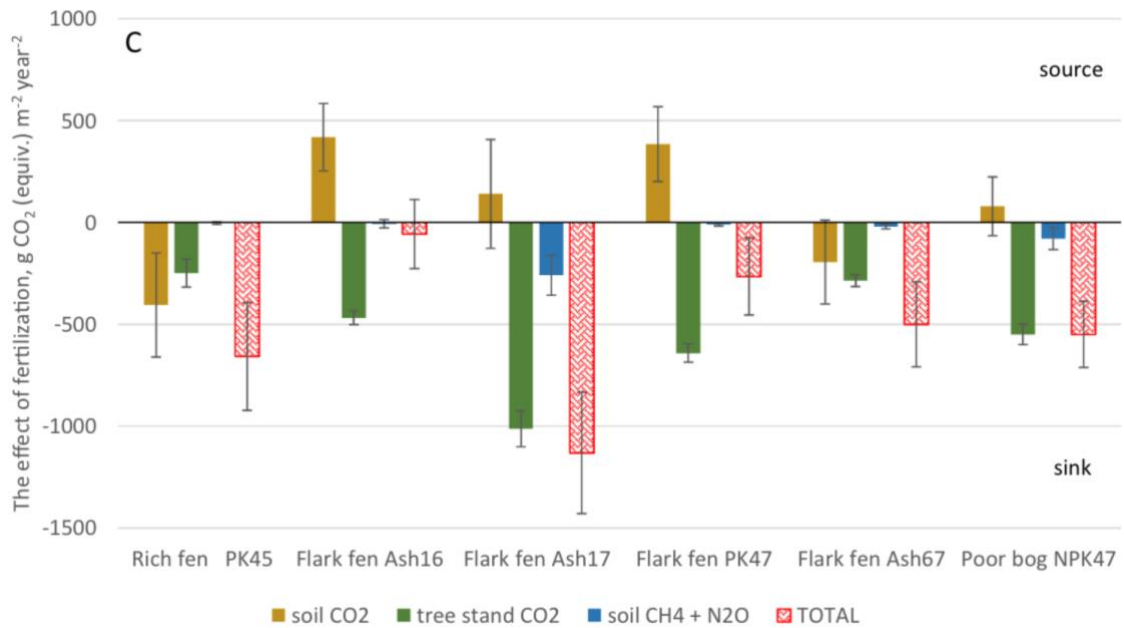


Kuvio 5. Kasvihuonekaasupäästöt metsäojitettujen karujen soiden maaperästä Suomessa (Schneider & Päivinen 2020, 11)

3.4 Metsien lannoittaminen

Metsien lannoittaminen vauhdittaa hiilen sidontaa nopealla aikataululla. Kivennäismailla puuston kasvulisäys on 1,5–3 m³/ha/v ja turvemaidella 1–3 m³/ha/v. Kivennäismailla kasvua lisäävä vaikutus kestää 6–8 vuotta ja turvemaidella 20–30 vuotta. Kivennäismaat kärsivät yleisimmin typen puutteesta, joka hidastaa puuston kasvua. (Hynynen, Huuskonen & Kojola 2017.) Ojitetuilla soilla ravinteiden puute voi näkyä erilaisina kasvuhäiriöinä. Lannoituksen edellytyksenä on yleensä, että turve on kohtalaisen pitkälle maatonutta. Tällöin se sisältää todennäköisimmin riittävästi typpeä puuston kasvulle. Suometsiä lannoitetaan puutuhkalla tai PK-lannoitteella. Levitettävän lannoitteen tärkeimmät ravinteet ovat kalium, fosfori, kalsium, magnesium ja boori (Metsäkeskus s.a.).

Ojasen ym. (2020, 6–7) mukaan lannoitus ei suoraan lisää ojitettujen soiden kasvihuonekaasupäästöjä. Haihtuvan metaanin määrä voi vähentyä puuston lisääntyneen kasvun laskiessa vedenpintaa. Dityppioksidipäästöt eivät juurikaan muutu. Hiilidioksidin haihtuminen todennäköisesti lisääntyy, koska puuston lisääntyneen kasvun aiheuttama vedenpinnan laskeminen kuivattaa turpeen pintakerrosta. Varsinkin rehevillä kasvupaikoilla, joilla myös ojat ovat syviä, lannoittaminen ei ole maaperän hiilensidonnan näkökulmasta järkevää (Ojanen ym. 2019, 793). Lannoituksen lisäämä puuston kasvu kuitenkin sitoo enemmän hiiltä, kuin sitä haihtuu maaperästä. Kokonaisuutena lannoittaminen siis kasvattaa ojitettujen soiden hiilinielua ainakin puuston hakkuuseen asti. (Ojanen ym. 2020, 6–7; Kuvio 6.) Myös vähätuottoisten turvemaiden lannoittaminen voi kymmenien vuosien aikavälillä lisätä hiilinielua puuston kasvun kautta. Jos lannoittamista ei kuitenkaan katsota taloudellisesti kannattavaksi, paras vaihtoehto kasvihuonekaasupäästöjen kannalta on jättää ravinteisuudeltaan karu ja vähätuottoinen ojitettu suo ennallistumaan itseksensä. (Ojanen ym. 2019, 793)



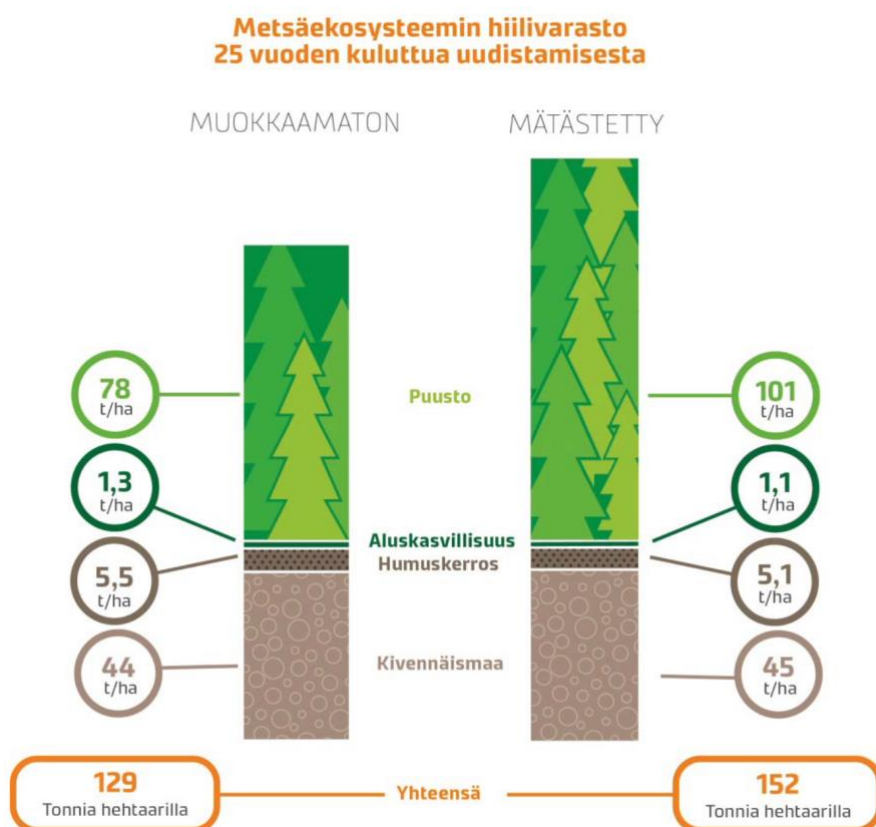
Kuvio 6. Lannoituksen vaikutus metsäojitetun suon kasvihuonekaasupäästöihin. (Ojanen ym. 2019, 794)

3.5 Maanmuokkaus

Maanmuokkauksen tavoitteena on luoda uudelle puusukupolvelle paremmat kasvuolosuhteet. Muokkaaminen muun muassa parantaa maaperän lämpö- ja happiolosuhteita ja parantaa taimen ravinteiden saantia. Lisäksi maanmuokkaus vähentää taimituhoja ja pintakasvillisuuden kilpailua taimivaiheessa. (Ilvesniemi 2019.) Maanmuokkauksen yhteydessä varmistetaan myös, että uudistusalan kosteusolosuhteet ovat uuden puusukupolven kasvulle otolliset. Pintavesiä ohjataan navero-ojilla pois muokkausalueelta tai turvemaidella kaivetaan ja kunnostetaan kuivatusojia. (Metsä Group s.a.b) Maanmuokkaus lisää maaperän mikrobitoimintaa ja sen seurauksena hiiltä ja ravinteita vapautuu mineralisaatiossa orgaanisesta aineksesta taimien käytettäväksi (Smolander & Lindroos 2019, 44). Mättäissä valtaosa mikrobitoiminnasta keskittyy humuskerrokseen (Smolander, Paavolainen & Mälkönen 2000).

Maanmuokkauksen vaikutuksia maaperän hiilivarastoon on tutkittu jo useita kymmeniä vuosia. Tutkimuksissa on verrattu uudistamisvaiheessa muokattuja alueita muokkaamattomiin. (Ilvesniemi, 2019.) Tutkimustulokset hiilivaraston muutoksista ovat olleet vaihtelevia. Esimerkiksi virolaisessa tutkimuksessa

mäntytaimikko oli 10 vuoden ajan uudistamisen jälkeen hiilen lähde, mutta muuttui sen jälkeen hiilinieluksi (Uri ym. 2019). Ruotsalaistutkimuksen mukaan maanmuokkaus lisäsi hiilidioksidipäästöjä hetkellisesti heti muokkauksen jälkeen. Vaikutus oli kuitenkin ohimenevä ja loppui muutamassa viikossa. Maanmuokkaus nopeutti juuriston ja karikkeen hajoamista, kun ne sekoittuivat muokkauksen yhteydessä maaperään. (Mjöfors, Strömgren, Nohrstedt & Gärdenäs 2015, 15.) Johtopäätöksiä on kuitenkin todettu, että maanmuokkaus ei vähennä maaperän hiilivarastoa merkittävästi ja lisää pitkällä aikavälillä puuston hiilivarastoa. Koko metsäekosysteemin hiilivarasto siis kasvaa maanmuokkauksen seurauksena. (Ilvesniemi 2019; Egnell, Jurevics & Peichl 2015; Kuvio 7.)



Kuvio 7. Metsäekosysteemin hiilivarasto 25 vuoden kuluttua uudistamisesta. (Mjöfors, Strömgren, Nohrstedt, Johansson & Gärdenäs 2017, Smolander & Lindroos 2019, 44 mukaan)

Kasvualustan muokkaus ei juuri vaikuta maaperän metaanipäästöihin. Uudistusalan metaanipäästöihin vaikuttaa lähinnä vedenpinnan korkeus. (Strömgren, Hedwall & Olsson 2016; Smolander & Lindroos 2019.) Maanmuokkauksen yhteydessä tehtävät kuivatusojien perkaukset voivat

vähentää metaanipäästöjä, kun vedenpinta laskee. Ojien kuivatusvaikutus tosin lisää turpeen hiilidioksidipäästöjä. Kasvihuonekaasutaseet voivat myös muuttua, jos alavien maastonkohtien tai metsäkoneen jättämien urien vedet johdetaan esimerkiksi navero-ojalla pois uudistusosalta.

Maanmuokkaus vaikuttaa maaperän nitraattitypen saatavuuteen ja happiolosuhteisiin. Sen seurauksena maaperän dityppioksidipäästöt lisääntyvät (Smolander & Lindroos, 47). Varsinkin happamilla mailla dityppioksidia pääsee haihtumaan ilmastoon. Strömgren ym. (2016) mukaan rehevillä kasvupaikoilla mätästys ei ole lisännyt dityppioksidipäästöjä samassa määrin. Maanmuokkauksen aiheuttamat päästöt ovat yleensä melko maltillisia ja ne vähenevät, kun kasvillisuuden kehittyessä typenotto lisääntyy (Smolander & Lindroos, 47).

4 HIILITASELASKELMAT

4.1 Hiilitaselaskelmat kansainvälisellä ja kansallisella tasolla

Maapallon kasvihuonekaasutaseita tarkastellaan monella tasolla. Kansainvälisesti metsien hiilivarastojen muutoksia seurataan vuosittain kasvihuonekaasuraportoinnissa YK:n ilmastositimusta ja Kioton pöytäkirjaa varten (Lehtonen, Salminen, Kallio, Tuomainen & Sievänen 2016, 3). Muutoksia seurataan myös Euroopan tasolla. Euroopan komissio hyväksyi vuonna 2018 asetusehdotuksen (EU 2018/841), jonka mukaan LULUCF (maankäyttö, maankäytön muutokset ja metsätalous) -sektori sisällytettiin 2030 energia- ja ilmastopakettiin. Asetuksen mukaan jäsenvaltiot veloitettiin toimittamaan vuonna 2018 metsien hiilinielun vertailutason vuosille 2020–2025 ja vuonna 2023 vuosille 2026–2030. (Lehtonen ym. 2019.)

Luke tuottaa Suomen osalta metsäsektorin päästötiedot sekä kansainväliseen että EU-tasoiseen seurantaan. Suomessa metsien hiilitaselaskelmia on tehty myös maakunta- ja kuntatasolla. Luke selvitti vuonna 2013 Pohjois-Pohjanmaan turvemaiden hiilitaseen ja simuloi sen kehitystä 50 vuoden päähän. Tutkimuksessa otettiin huomioon myös turvetuotannon vaikutukset. (Minkkinen & Ojanen 2013, 78–84.) Metsien hiilitaselaskelmia tehdään kivennäis- ja turvemaille. Niissä selvitetään yleensä puuston ja maaperän nielu- ja päästöarvot. Lisäksi voidaan selvittää myös puunjalostuksen vaikutuksia päästöarvoihin.

4.2 Monikäyttömetsien ojitettujen turvemaiden hiilipäästölaskennat

Metsähallitus Metsätalous Oy on kehittänyt yhteistyössä Luken kanssa hiilipäästölaskentaa valtion monikäyttömetsiin. Laskennan ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin monikäyttömetsien ojitettujen turvemaiden tilanne kasvihuonekaasupäästöjen suhteen tällä hetkellä ja tulevilla kymmenvuosikausilla. Laskelmassa selvitettiin puuston ja maaperän hiilipäästöarvot sekä simuloitiin miten ne kehittyvät muun muassa hakkuiden ja

puustonkasvun vaikutuksesta. Laskentatuloksia voidaan käyttää esimerkiksi valtion monikäyttömetsien käytön aluetason päätöksenteossa ja toimintamallien kehittämisessä. Laskelman perusteella on myös suunniteltu päästöluokituskarttatasoa metsätalouden toimenpiteiden suunnitteluun. Karttataso on tarkoitus laajentaa ilmaisemaan metsikkökohtaiset nykypuuston hiilipäästöarvot kaikilla hallinnollisilla alueilla, eli Etelä-Suomen, Pohjanmaa-Kainuun ja Lapin alueilla.

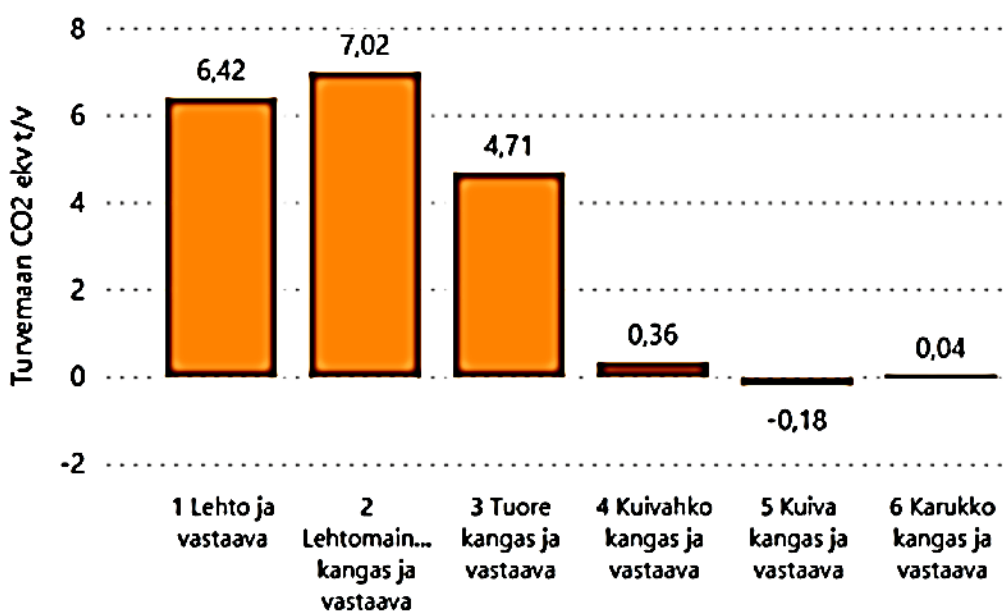
Luke teki pilottivaiheen hiilipäästölaskelman ja analysoinnin Metsähallituksen toimittaman paikkatietoaineiston perusteella. Hiilipäästölaskelma tehtiin hiilitaselaskennan menetelmöotteella ja nykypuuston tiedoin. Päästöestimoinnissa ei laskettu tulevien kausien hiilitaseita. Suometsien maaperän ja puuston hiilipäästöarvoista tuotettiin 1 hehtaarin kokoinen hilatason aineisto. Jokaiselle hilalle laskettiin puuston biomassa ja sen hiilivaraston muutos. Lisäksi hiloille laskettiin maaperän hiilivaraston muutos, huomioiden hiilidioksidi, metaani ja dityppioksidipäästöt. Niiden päästöarvot ilmaistiin CO₂ ekvivalentteina. Jokaiselle hilalle määritettiin myös kokonaispäästöarvo CO₂ ekvivalentteina. Hiilipäästölaskennan lisäksi laskettiin MELA-ohjelmistolla hakkuumäärien ja puuston tuleva kehitys neljälle kymmenvuotiskaudelle. Kehitys laskettiin metsämaille ja turvemaiden osalta pelkästään ojitetuille soille. (Luke 2020a)

Laskenta-aineisto sisälsi metsävaratiedot RSU-formaatissa, puuston kasvuun, tilavuuteen ja puulajikohtaisiin ominaisuuksiin liittyvät arvot, ojasuveys- ja sarkavälitiedot, kasvupaikkatyytit sekä hilapisteiden koordinaatit. Metsävaratietoja käytettiin biomassan ja latvuston peittävyden arviointiin. Ojasuvyystiedot taas saatiin Arbonaut Oy:n tuottamana laserkeilausaineiston tulkintana. Toimitetun aineiston perusteella laskettiin MELA-ohjelmistolla puuston hiilivarasto. Maaperän hiilipäästöarvot laskettiin kivennäismaille ja turvemaille erikseen. Turvemaiden päästöarvot laskettiin yhdistämällä pohjaveden vaihteluita mallintava SpaFH_y-malli (Launiainen ym. 2019) metaanin ja hiilidioksidin osalta Ojasen ym. (2010) sekä dityppioksidin osalta Minkkisen ym. (2020) malleihin. Kivennäismaiden osalta hiilipäästöt laskettiin Yasso07-mallilla. Se kuvaa maaperässä tapahtuvaa karikkeen hajoamista ja sen aiheuttamaa hiilidioksidin haihtumista (Liski, Palosuo, Peltoniemi & Sievänen 2005).

Laskelmiin yhdistettiin myös sääaineisto turvemaiden osalta vuosilta 2000–2015 ja kivennäismaiden osalta vuosilta 1961–2016. (Luke 2020a; Luke 2020b.)

Laskelman pohjalta suunniteltiin turvemaille hiilinielu-/päästölähdeluokitus. Päästöluokitus perustuu kahteen kriteeriin: päästön suuruuteen ja kasvupaikkatyyppiin. Päästön suuruus kuvaa hilakohtaisesti tämänhetkisen päästön. Kasvupaikkatyyppi on luokituksessa mukana, koska suositeltavat toimenpiteet riippuvat kasvupaikan rehevyydestä. Pohjaveden pinnan taso vaikuttaa eri kasvupaikoilla eri tavalla kasvihuonekaasuihin. Luokitus jaettiin kolmeen päästöluokkaan: nielu, päästö ja suuri päästö. Nielun päästöarvo on alle 0 CO₂ ekvivalenttitonnia/vuosi/hehtaari, päästölähteen arvo on 0–2 CO₂ ekvivalenttitonnia/vuosi/hehtaari, ja suuren päästölähteen arvo on yli 2 CO₂ ekvivalenttitonnia/vuosi/hehtaari. (Luke 2020c.) Pilottialueen suurimmat päästölähteet löytyivät rehevimmiltä kasvupaikoilta (Kuvio 8).

Turvemaan CO₂ ekv t/v hilapisteiden keskiarvo



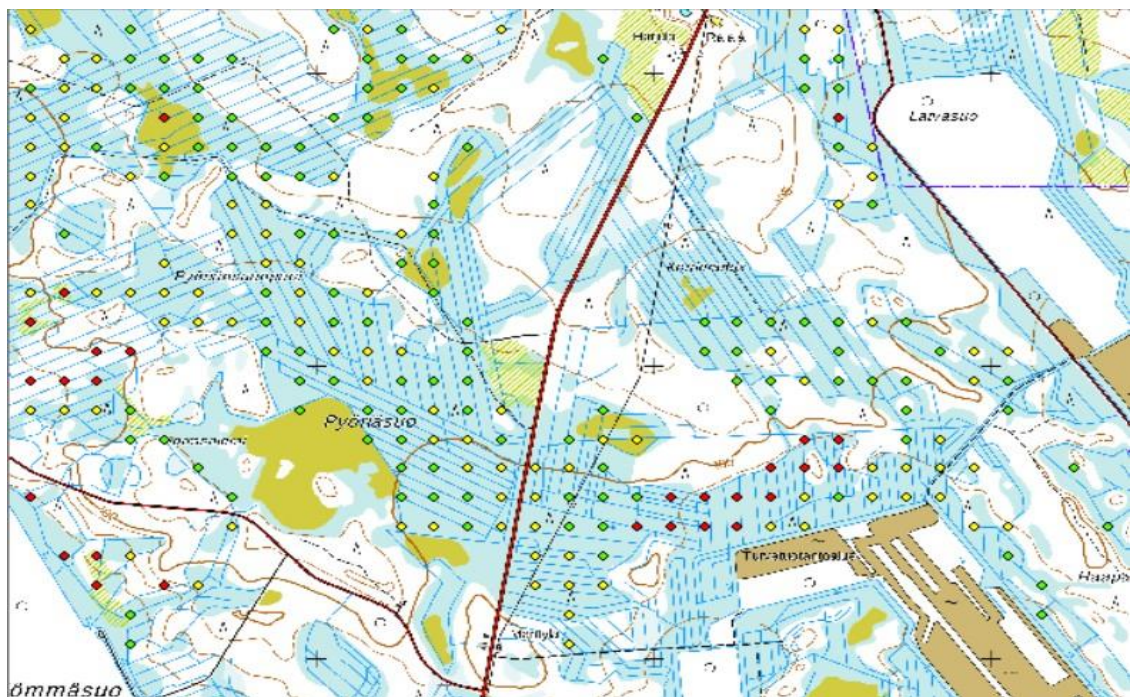
Kuvio 8. Pudasjärven pilottialueen hilapisteiden keskiarvoinen päästöarvo kasvupaikkatyypeittäin (Luke 2020c)

5 TUTKIMUSASETELMA

5.1 Hiilipäästöluokituksen karttataso

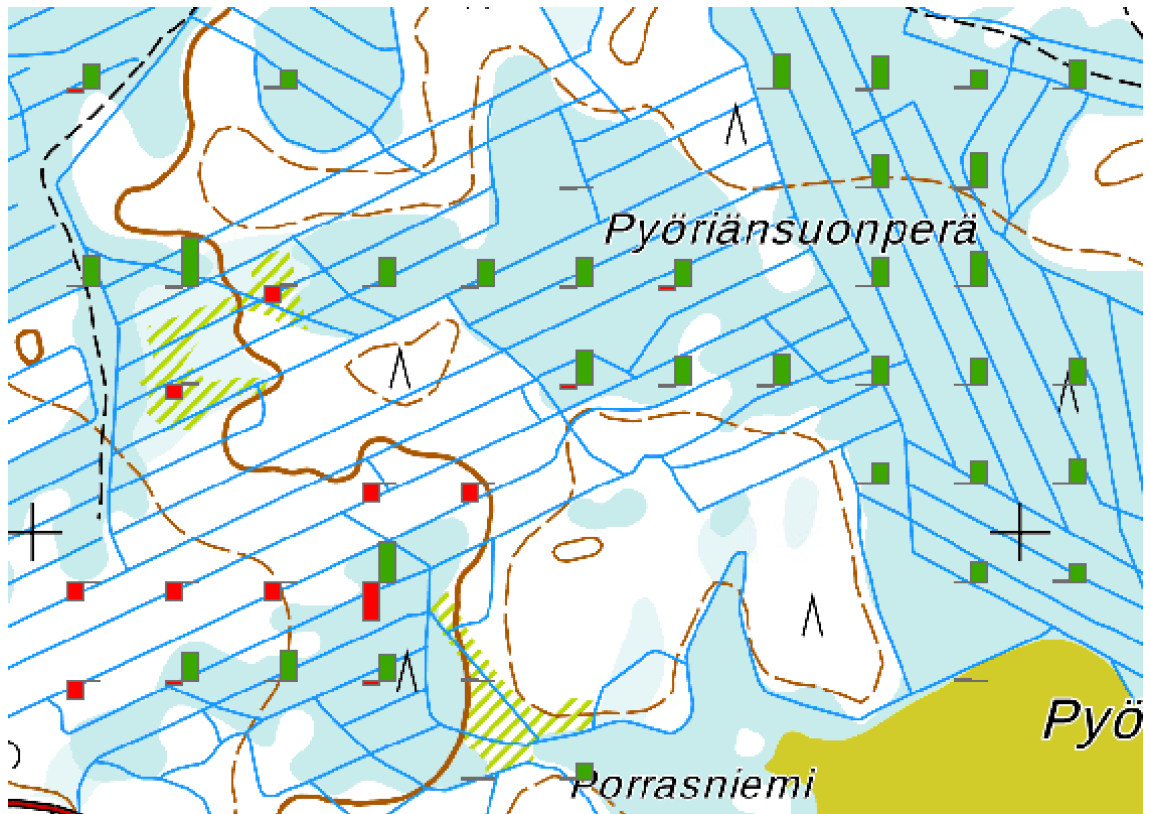
Tässä opinnäytetyössä keskityttiin Metsähallituksen ja Luken laskennassa tuotetun hiilipäästöluokituksen tutkimiseen ja testaamiseen turvemailla. Opinnäytetyössä tutkittiin hiilipäästölaskelmassa tuotetun aineiston luotettavuutta vertaamalla sitä tutkimuskoealoilta mitattuun tietoon. Lisäksi tutkimuksessa arvioitiin päästöluokituksen pohjalta tehdyn karttatason käytettävyyttä maastohavaintoihin perustuen sekä miten luokitus soveltuu puunkorjuun ja metsänparannustöiden suunnitteluun. Tutkimuksessa myös simuloitiin päästöluokituksen ohjaamana käsiteltyjen metsiköiden hiilinielukehitystä eri kasvupaikkatyypeillä.

Aineistonkeruuvaiheessa maastolaitteelle asennetulla karttatasolla näkyi hiilipäästölaskennasta tuotettu hilapistekohtainen päästöluokitus. Jokainen piste oli tuotettu 1 hehtaarin kokoiselle alueelle. Hilapisteet oli teemoitettu niiden maaperän päästöluokan mukaisesti. (Kuvio 9.)



Kuvio 9. Hiilipäästöluokitus maastosovelluksessa testivaiheessa (vihreä = nielu, keltainen = päästö ja punainen = suuri päästö)

Lisäksi karttatasosta tehtiin myöhemmin toinen versio, jossa hiilipäästö on jaettu puuston ja maaperän päästöarvoihin. Aineisto ilmaisi hiilipäästöarvon positiivisena (nousevana) pylväänä, jos kohde oli nielu, ja negatiivisena (laskevana) pylväänä, jos kohde oli päästö. Lyhyt pylväs tarkoitti neutraalia arvoa, eli päästön ja nielun erotus oli lähellä 0 CO₂ ekvivalenttitonnia/vuosi/hehtaari. (Kuvio 10.)



Kuvio 10. Hiilipäästöarvot hilapisteittäin (punainen = maaperä ja vihreä = puusto). Nouseva pylväs kuvaa nielua ja laskeva pylväs päästöä.

Jokaisesta hilapisteestä oli myös käytettävissä tietotaulu, josta näki muun muassa päästö- ja nieluarvojen jakautumisen puuston ja maaperän osalle, pohjaveden tason, ojasyvyyden ja maaperän päästöluokitusarvon (Kuvio 11).

Tunnista

Tunnista kohteesta: <Ylin karttataso>

Pudasjärvi

Sijainti: 454 352,287 7 269 650,973 Metriä

Kenttä	Arvo
NIELU_YHTEENSA	0,505881
OBJECTID_1	12179
OJAA_M	134
OJASYVYYS	67
PAARYHMA	11
Pohjaveden_taso_m	-0,56885
Puu_hillen_muutos_CO2_t_v	6,711472
Puu_hillen_muutos_t_v	1,830401
PUUSTON_NIELU	6,711472
SARKALEVEYS	30
Shape	Piste
SUON_NIELU	-6,205591
Turvemaan_CH4_t_v	-0,003071
Turvemaan_CO2_ekv_t_v	6,205591
Turvemaan_CO2_t_v	5,676195
Turvemaan_N2O_t_v	0,002642
Turvemaan_paaston_suuruus	suuri_paasto

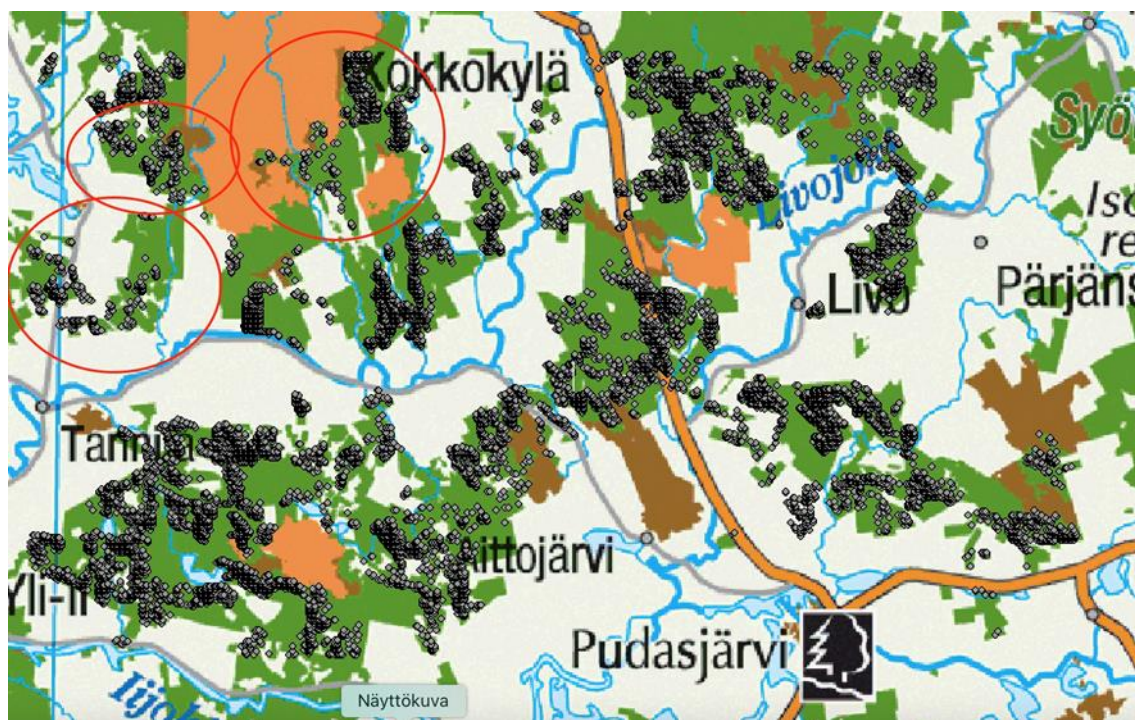
Tunnistettiin 1 kohde

Kuvio 11. Esimerkki hilapisteen tietotaulun arvoista. PUUSTON_NIELU ja SUON_NIELU osoittavat puuston ja maaperän hiilipäästöarvon. Positiiviset lukemat tarkoittavat nielua ja negatiiviset lukemat tarkoittavat päästöä.

5.2 Koealajärjestelyt ja aineiston keruu

Tutkimus keskittyi Metsähallituksen hallinnoimiin monikäyttömetsiin Pudasjärven pilottialueella (kuvio 12). Pudasjärvi valikoitui tutkimusalueeksi, koska sitä käytettiin Metsähallituksen ja Luken projektin testialueena. Sille oli siis valmistunut ensimmäisenä Luken tekemä hiilipäästölaskelma. Tutkimuksen valmistelu aloitettiin rajaamalla pilottialueelta karkeasti kolme pienempää aluetta. Valinnassa käytettiin apuna Pudasjärven metsätiimin toimihenkilöiden paikallistuntemusta ja paikkatietojärjestelmän kasvillisuuspaikkatasoa. Rajaamista ohjaavana tietona oli, että suurimmat päästökohteet sijaitsevat rehevillä turvemaidella. Hiilipäästöaineiston testaamisessa suurin kiinnostus kohdistui toimimiseen päästökohteilla. Sen vuoksi kaksi valintaa tehtiin alueilta, joilla oli oletettavasti keskimääräistä enemmän reheviä turvemaita. Lisäksi

valittiin yksi alue, jolla suoalueet olivat oletettavasti keskimäärin karumpia ja joka oli maastoltaan vaihtelevampaa. Alue valittiin, jotta tutkimusaineistosta tulisi monipuolisempaa. Lisäksi mahdollisia laskennassa käytetyn lähtöaineiston virheitä saataisiin tutkittua laajemmalla alueella.



Kuvio 12. Pudasjärven hiilipäästölaskennan pilottialue ja tutkimuksen kolme otanta-alueita.

Kolmelta alueelta lähdettiin edelleen rajaamaan tarkistettavat hilapisteet. Pisteet haettiin paikkatietohakuna hiilipäästölaskennan lähtöaineistosta. Pisteiden rajauskriteereinä käytettiin niiden maalajia, kasvillisuusluokkaa sekä etäisyyttä metsätiestä. Maalajiksi valittiin turve, koska tutkimus kohdistuu turvemaihin. Kasvillisuusluokka jaettiin hakua varten kahdeksi arvoksi, reheviksi ja karuiksi kasvupaikoiksi. Reheviä kasvupaikkoja olivat tuorekangas, lehtomainenkangas ja lehto sekä niitä vastaavat turvekankaat. Karuja kasvupaikkoja olivat kuivahkokangas, kuivakangas ja karukkokangas sekä niitä vastaavat turvekankaat.

Rehevien kohteiden etäisyydeksi metsätiestä asetettiin 0–500 metriä ja karujen kohteiden etäisyydeksi 50–150 metriä. Tällä rajauksella haluttiin lisätä rehevien kasvupaikkojen valikoitumisen mahdollisuutta sekä pitää tutkimuskohteet kohtuullisen kulkumatkan päässä ajoneuvolta. Tutkimusalueella oli

huomattavasti enemmän karuille kasvupaikoille sijoituvia hiloja. Niiden etäisyys metsätiestä määritettiin siten, että ne olisivat varmuudella turvemaalla, mutta myös lähellä ajoneuvoa. Haun perusteella löytyi noin 200 hiilipäästölaskelman hilapistettä. Hilapisteistä luotiin maastolaitteelle oma karttataso, jonka perusteella lähdettiin tekemään koelamittauksia. Pisteistä valittiin tutkimusaineiston keräämiseen 126. Näitä pisteitä nimitetään tekstissä myöhemmin tutkimuskoealoiksi. Loppuosa pisteistä säilytettiin varakohteina. Paikkatietoaineiston mukaan 63 tutkimuskoealaa sijaitsi rehevällä kasvupaikalla ja 63 karulla kasvupaikalla.

Tutkimuskoealoilta mitattiin hiilipäästölaskentaan vaikuttaneista taustamuuttujista puusto puulajeittain ja puustojaksoittain, maalaji, kasvillisuusluokka sekä ojasyvyys. Paikkatietoaineiston mukaan koealat sijaitsivat turvemaalla. Karttatulkinnan perusteella ei ollut kuitenkaan täyttä varmuutta oliko tieto paikkaansa pitävää. Tämän vuoksi maalaji selvitettiin ympyräkoelamittausten yhteydessä turverassilla 2–3 pistona jokaiselta tutkimuskoealalta. Jos mittausten keskiarvo oli alle 30 cm turvetta, kohteen maalaji tulkittiin kivennäismaaksi. Päästöluokituskarttatason suunnittelukäytön testausta varten koealoilta määritettiin myös heti toteutettavissa olevat metsänhoitotarpeet.

Metsänhoidon toimenpiteitä ei lähdetty ennustamaan pidemmälle aikajaksolle. Määritettyjä metsänhoitotarpeita olivat kunnostusojitus, lannoitus ja puunkorjuu. Puunkorjuu suunniteltiin puustoltaan nuorena kasvatusvaiheessa olevilla tutkimuskuvioilla tasarakenteisen metsän harvennushakkuina ja uudistuskypsillä koealoilla jatkuvan kasvatuksen mukaisina hakkuina olosuhteiden mukaisesti. Uudistuskypsien metsien hakkuutavan suunnittelussa tavoitteena oli, että uuden puusukupolven luomiseksi hyödynnettäisiin olemassa olevaa alikasvosta mahdollisuuksien mukaan. Lisäksi hakkuut ja kunnostusojitus suunniteltiin siitä lähtökohdasta, että negatiiviset vaikutukset tutkimuskuvion hiilitaseen jäisivät mahdollisimman pieniksi. Kerätty aineisto tallennettiin maastolaitteelle paikkatietoon sidottuina koelapisteinä. Tiedot siirrettiin maastolaitteelta Excel-
tauluktoon, jossa ne lajiteltiin eri taulukoihin ominaistietojensa mukaisesti. Kasvun simulointi tehtiin Hakkuri-sovelluksella. Tutkimuksen aineiston analysointi toteutettiin vertailevana tutkimuksena.

6 TUTKIMUSTULOKSET

6.1 Vertailututkimus hiilipäästölaskennan tausta-aineistosta

Hiilipäästölaskennan tausta-aineisto toimitettiin Metsähallituksen paikkatietojärjestelmästä Luken käytettäväksi. Tausta-aineisto perustui laserkeilausaineistoon ja Metsähallituksen toimihenkilöiden tallentamiin tietoihin. Laserkeilausdata keilattiin 14.6.2019. Se sisälsi puustodatan sekä oja- ja pohjaveden korkeuteen liittyvät tiedot. Muu data on tallennettu paikkatietojärjestelmään vuosien varrella. Muusta datasta laskentaan käytettiin muun muassa tietoa kasvupaikkatyypeistä, maalajeista ja maaluokista.

Ennakolta oletettiin, että varsinkin vuosien varrella paikkatietojärjestelmään tallennetut tiedot voivat olla joiltakin osin virheellisiä tai epätarkkoja. Epätarkkuus on luonteenomaista perinteisillä kuvioittaisen arvioinnin menetelmillä, koska paikkatieto on kerätty merkittävästi nykyistä epätarkemman paikkatiedon pohjalta. Päivittämättömät metsikkökuvioiden rajaukset ovat aiheuttaneet vääristymiä tietoihin. Toisaalta myös isojen suokuvioiden sisälle oli voinut jäädä kivennäismaasaarekkeita, joten turvemaaksi näissä tapauksissa tulkittu hila saattoi olla todellisuudessa kivennäismaata. Lisäksi ojitetut suot saattoivat olla muuttuneita kuivumisen myötä ja kasvupaikkaluokitus ei välttämättä ollut ajan tasalla. Laskennan tausta-aineiston ja koealamittausten vertailututkimuksen tarkoituksena oli selvittää, onko laskennassa käytetyissä tiedoissa merkittäviä poikkeamia maastotarkastuksiin nähden.

Hiilipäästölaskennan lähtöaineiston maalajitietojen mahdollisia virheitä tarkasteltiin ensin paikkatietoaineistosta. Peruskartan ja vinovalokuvan tutkimisen perusteella huomattiin, että kaikki hilapisteet eivät välttämättä ole turvemaalla tai ovat aivan kankaan ja suon välimaastossa. Ojien kuivatusvaikutus olisi voinut laskea näillä kohteilla turvekerrosta niin, että ne ovat muuttuneet kivennäismaiksi. Osa tutkimuskuvioista valittiin tarkoituksella rajatapauksilta näyttäviltä hilapisteiltä. Tutkimus ei siis anna maalajin osalta kokonaiskuvaa pilottialueen tilanteesta, vaan selvittää virheiden ilmenemistä laskennassa käytetystä aineistosta. Turvepaksuus mitattiin 150 cm pituisella turverassilla 2–3

piston keskiarvona. Jos turvetta ei ollut tai sitä oli alle 30 cm, tutkimuskuvio luokiteltiin kivennäismaaksi. Turvepaksuustietoa käytettiin myös metsänparannustöiden suunnittelussa.

Suurin osa (n. 89 prosenttia) tutkimuskuvioista oli maalajiltaan turvemaata. Turvepaksuus vaihteli paljon. Eniten (n. 40 prosenttia) tutkimuskuvioista sijoittui 51–100 cm luokkaan. Runsas neljäsosa kuvioista oli ohutturpeista (30–50 cm) ja hieman alle kolmanneksella turvetta oli yli 100 cm. Myös turvemaan ja kivennäismaan rajalla olleista kuvioista valtaosa oli turvemaata. Osalla tutkituista kuvioista (n. 11 prosentilla) turvetta oli kuitenkin alle 30 cm, joten ne luokiteltiin kivennäismaaksi. Suurimmalla osalla kivennäismaiksi luokitelluilla kuvioilla ei ollut turvetta lainkaan. Niiden maalajitieto oli siis määritetty väärin. Tällaiset kuviot olivat lähtöoletuksen mukaisia turvemaiden keskellä olevia kivennäismaaniemekkeitä ja -saarekkeita, joita ei ollut leikattu paikkatietoaineiston turvemaakuvion ulkopuolelle omaksi kuviokseen. (Taulukko 4; Taulukko 5.)

Taulukko 4. Tutkimuskuvioiden maalaji

Maalaji	kpl	%
Kivennäismaa	14	10,8
Turve	116	89,2

Taulukko 5. Tutkimuskuvioiden turvepaksuus

Turvepaksuus	kpl	%
30–50 cm	32	27,6
51–100 cm	48	41,4
101–150 cm	25	21,6
Yli 150 cm	11	9,5

Suurin osa otanta-alueen kasvupaikkatyypeistä oli tuoreen, kuivahkon ja kuivan kankaan tasoisia kasvupaikkoja. Lehtojen ja lehtomaisten kankaiden tasoisia kasvupaikkoja oli vain muutama kappale. Hiilipäästölaskennassa käytetyt ja tutkimuskuvioilta mitatut kasvupaikkatyypit poikkesivat huomattavasti toisistaan.

Suurin ero oli ravinteisuudeltaan kuivien ja kuivahkojen kankaiden tasoisten kasvupaikkojen välillä. Hiilipäästölaskennan lähtöaineiston kasvupaikoista oli kuivia 40,5 prosenttia ja kuivahkoja 9,5 prosenttia. Koealamittauksissa iso osa kuivista kasvupaikoista osoittautui kuivahkoiksi. Kuivia kasvupaikkoja oli 10,3 prosenttia ja kuivahkoja 43,7 prosenttia. Tuoreiden kasvupaikkojen suhteen muutos oli melko pieni. Laskennan aineistossa niitä oli 48,4 prosenttia ja koealamittauksissa 43,7 prosenttia. Lehtojen ja lehtomaisten kasvupaikkojen määrät olivat erilaiset aineistojen välillä, mutta niiden kokonaismäärä pysyi samana. Tutkimusaineiston rehevien kasvupaikkojen määrä oli kokonaisuutena hieman pienempi kuin laskennassa käytetyssä aineistossa. (Taulukko 6; Taulukko 7.)

Taulukko 6. Hiilipäästölaskennassa käytetyn aineiston kasvupaikkatyypit

Kasvupaikkatyyppi	kpl	%
Lehto	0	0,0
Lehtomainen	2	1,6
Tuore	61	48,4
Kuivahko	12	9,5
Kuiva	51	40,5

Taulukko 7. Tutkimuskuvioilta mitatut kasvupaikkatyypit

Kasvupaikkatyyppi	kpl	%
Lehto	1	0,8
Lehtomainen	1	0,8
Tuore	56	44,4
Kuivahko	55	43,7
Kuiva	13	10,3

Hiilipäästölaskennan puustotiedot tuotettiin hilakohtaisesti vuoden 2019 laserkeilausaineistosta. Kasvu määritettiin vertaamalla vuodelle 2020 laskettua puustoa vuodelle 2015 laskettuun puustoon. Tutkimuskuvioilta puusto mitattiin jokaiselta kuviolta 3–4 relaskoopikoealan keskiarvona. Tutkimuskuvioiden ja hiilipäästölaskennan puuston tilavuudesta ja vuosittaisesta kasvusta laskettiin keskiarvot puulajeittain sekä kokonaistilavuus ja -kasvu. Otanta-alueen puusto oli mäntyvaltaista. Männyn osuus tutkimuskuvioilla oli yli 60 prosenttia. Noin

viidennes puustosta oli kuusta ja loput lehtipuita. Laskennassa käytetyt puustotiedot ja koealamittauksien puustotiedot olivat hyvin lähellä toisiaan. Aineistojen puulajisuhteet olivat saman suuntaiset ja kokonaistilavuudet ovat myös hyvin lähellä toisiaan – eroa oli alle 3 prosenttia. Myös vuosittainen kasvu oli lähes sama, vaikka poikkesikin hieman eri puulajien välillä. Laserkeilausaineistoon perustuvat puustotiedot olivat siis kokonaisuutena tarkasteltuna luotettavia. (Taulukko 8; Taulukko 9.)

Taulukko 8. Hiilipäästölaskennassa käytetyt puustotiedot

Puulaji	Tilavuus m ³ /ha	Kasvu m ³ /ha
Mänty	64	2,2
Kuusi	20	0,8
Lehtipuut	17	0,5
Yht.	101	3,5

Taulukko 9. Tutkimuskuvioilta mitatut puustotiedot

Puulaji	Tilavuus m ³ /ha	Kasvu m ³ /ha
Mänty	67	2,3
Kuusi	17	0,7
Lehtipuut	20	0,6
Yht.	104	3,6

Hiilipäästölaskennassa käytettiin vedenkorkeustietoa, joka perustui vuoden 2019 laserkeilausmittauksiin. Syvyystieto oli laskettu ojassa olevan veden pinnalta maanpinnan tasolle. Tutkimuskoealoilta ojasyvyys mitattiin 2–3 mittauksen keskiarvona. Ojasyvyys mitattiin ojan pohjalta asti, koska syksy oli ollut sateinen ja vedenpinta oli normaalia korkeammalla. Laserkeilauksen ja koealamittausten tiedot eivät olleet siis suoraan verrattavissa toisiinsa. Luotettavaan vertailuun vaadittaisiin vertailuaineisto useamman vuoden ajalta. Mitatut tiedot näyttivät kuitenkin suuntaa siitä, miten ojasyvyudet vaihtelevat pilottialueella.

Laserkeilauksen tietojen ja maastomittauksen tiedot osoittivat, että pilottialueen ojasyvyudet vaihtelevat paljon. Laserkeilausaineiston mukaan viidenneksellä tutkimuskuvioista ojasyvyys oli alle 30 cm. Kasvihuonekaasupäästöjen ja

puuston kasvun kannalta sopiva ojasyvyys on 30–40 cm. Tutkimuskuvioista vähän yli viidennes kuului tähän luokkaan. Ojista 12 prosenttia oli yli 60 cm syviä ja yli 80 cm syvyisiä ojia ei ollut ollenkaan. Maastomittausten mukaan hieman yli 10 prosenttia tutkimuskuvioiden ojista oli 0–40 cm syvyisiä. Ojista 39 prosentilla syvyys oli 41–60 cm, jonka voisi olettaa olevan sopiva jatkuvan kasvatuksen ja kasvihuonekaasujen sidonnan kannalta. Noin 55 prosenttia ojista oli yli 60 cm syviä. Molemmat aineistot osoittavat, että pääosa metsäojista on hyvässä tai kohtalaisessa kunnossa. Kunnostusojitukselle ei siis ole tällä hetkellä suurta tarvetta. Biologisen kuivatuksen kehittämiseen jatkuvapeitteistä metsänkasvatusta käyttämällä on myös hyvät mahdollisuudet. Noin puolet ojaverkostosta oli kuitenkin syvyydeltään sellaisia, että niiden kuivatusvaikutus lisää maaperän hiilidioksidipäästöjä huomattavasti. (Taulukko 10; Taulukko 11.)

Taulukko 10. Hiilipäästölaskennassa käytetyt ojasyvyudet

Ojasyvyys	kpl	%
0–29 cm	20	20,2
30–40 cm	23	23,2
41–60 cm	44	44,4
61–80 cm	12	12,1
Yli 80 cm	0	0,0

Taulukko 11. Tutkimuskuvioilta mitatut ojasyvyudet

Ojasyvyys	kpl	%
0–29 cm	3	3,0
30–40 cm	9	9,1
41–60 cm	29	29,3
61–80 cm	35	35,4
Yli 80 cm	23	23,2

6.2 Hiilipäästöaineiston käyttö metsäsuunnittelussa

Koealamittausten yhteydessä tarkasteltiin hiilipäästölaskennan yhteydessä tehdyn päästöluokituskarttatason visuaalista ilmettä sekä testattiin sen käytettävyyttä metsäsuunnittelussa. Karttataso oli suunniteltu hiilipäästölaskentaprojektin yhteydessä ja sen käytöstä haluttiin kokemuksia ja palautetta. Hilapisteen tiedot oli tuotettu 1 hehtaarin alueelle. Opinnäytetyön tilaaja halusi muun muassa selvittää, onko pistekoko käytettävyydeltään sopiva. Lisäksi hilaverkostolle muodostetun päästöluokituksen visuaalisesta käytettävyydestä haluttiin palautetta. Koealoilla myös suunniteltiin puunkorjuun ja metsänhoidon toimenpiteet käyttämällä päästöluokitustasoa päätöksenteon tukena. Suunnittelun ohjaavana tekijänä olivat toimenpiteiden vaikutukset puuston hiilinieluun ja maaperän kasvihuonekaasupäästöihin. Lähtökohtana oli suunnitella toimenpiteitä, jotka eivät huononna voimakkaasti hiilitasetta, mutta ovat kuitenkin taloudellisesti järkeviä toteuttaa. Toimenpidesuunnittelu perustui Metsähallituksen metsänhoito-ohjeeseen.

Karttatason ominaisuuksia ja käytettävyyttä arvioitiin tutkimuskuvioiden mittausten yhteydessä. Tutkimuksen alkuvaiheessa karttataso ilmaisi maaperän päästöarvon pistemäisenä verkostona ja myöhemmin hiilipäästöarvot jaettiin puusto- ja maaperäarvoihin (ks. kuvat 9 ja 10). Yksi hila edusti 1 hehtaarin kokoista alaa. Hilakoko vaikutti sopivalta varsinkin päästökohteiden ilmaisemiseen. Pudasjärven suot olivat rehevyydeltään valtaosin puolukka- tai varputurvekankaan tasoisia ja rehevien soiden määrä oli pienempi. Rehevät suot ovat usein myös pinta-alaltaan pieniä. Pinta-alaltaan pienemmätkin päästökohteet löytyivät helposti 1 hehtaarin kokoiselta hilaverkostolta. Hilakokoa kasvattamalla, osa päästökohteista voisi jäädä havaitsematta. Toisaalta isompi hilakoko toimisi karummilla soilla paremmin, koska niillä metsikkökuviot ovat huomattavasti suurempia kuin rehevillä soilla.

Tutkimuksen yhteydessä havaittiin, että hilapisteen tietojen yhdistämiseen voisi tehdä työkalun. Sillä voisi esimerkiksi valita useamman hilapisteen ja laskea keskiarvoisen hiilitaseen valitulle alueelle. Tällaista työkalua voisi käyttää esimerkiksi hakkutoimenpiteen hiilitaseen laskentaan. Päästöluokituskarttatason hilakohtainen teemoitus oli selkeä ja sen avulla oli helppo tehdä huomioita

suunnittelun yhteydessä. Varsinkin hiilipäästöarvojen jakaminen puusto- ja maaperäarvoihin auttoi arvioimaan eri metsänkäyttövaihtoehtojen vaikutuksia hiilipäästöihin. Kunnostusojituksen suunnittelussa oli tärkeintä tietää maaperän päästöarvo ja hakkuiden suunnittelussa taas puuston ja maaperän kokonaishiilitase. Hiilipäästöarvojen lisäksi voitaisiin tuottaa karttataso vedenpinnan korkeudesta. Sen auttaisi jatkuvapuiteisen kasvatuksen ennakkosuunnittelua, kun nähtäisiin millä alueilla vesi on sopivalla korkeudella päästöarvojen ja metsän kasvun kannalta.

Hakkuun ja metsänparannuksen toimenpiteet suunniteltiin koealoilta mitattujen puustotietojen, maastoarvioinnin ja hilakohtaisen päästöluokitustason perusteella. Koealoilta mitattiin puuston pääjakson lisäksi alikasvospuusto. Lisäksi tarkistettiin metsäojien kunto. Arbonaut Oy oli tuottanut laserkeilauksen yhteydessä hilapistekohtaisen tiedon ojien vedenpinnan korkeudesta. Lähes 80 prosentilla ojista vedenpinta oli yli 30 cm syvyydellä, mikä on riittävä syvyys puuston kasvun kannalta. Viidesosalla ojista vedenpinta oli alle 30 cm syvyydellä, mutta puusto oli niilläkin pääosin hyvässä kasvukunnossa.

Alikasvospuustoa oli tutkimuskuvioilla keskimäärin noin 1600 runkoa hehtaarilla. Yli 50 prosenttia alikasvoksesta oli havupuita. Hieskoivun osuus alikasvoksesta oli noin 45 prosenttia. Muita lehtipuita ei tässä tutkimuksessa mitattu. Kuviokohtainen alikasvospuuston määrä vaihteli huomattavasti, muutamasta kymmenestä rungosta tuhansiin runkoihin hehtaarilla. Yli 30 prosentilla tutkimuskuvioista alikasvospuustoa oli 500 runkoa/hehtaari tai vähemmän. Hieman alle 25 prosentilla kuvioista alikasvospuustoa oli yli 2000 runkoa/hehtaari. Otanta-alueen alikasvospuuston määrä kokonaisuutena oli siis melko vähäinen, jotta sitä voisi hyödyntää välittömästi metsän uudistamiseen. (Taulukko 12; 13.)

Taulukko 12. Tutkimuskuvioiden keskiarvoinen alikasvospuuiden määrä puulajeittain

Puulaji	Runkoluku kpl/ha
Mänty	476
Kuusi	438

Hieskoivu	709
Yht.	1623

Taulukko 13. Tutkimuskuvioiden alikasvospuiden kokonaismäärä

Runkoluku kpl/ha	kpl	%
0–500	36	30,8
501–1000	18	15,4
1001–1500	23	19,7
1501–2000	13	11,1
2001–3000	10	8,6
3001–4000	4	3,4
4001–5000	4	3,4
Yli 5000	9	7,7

Hakkuutapoina käytettiin ensiharvennusta, poimintahakkuuta, suojuspuuhakkuuta, pienaukkohakkuuta ja ylispuiden poistoa. Jos tutkimuskuvioilla ei ollut kiireellistä hakkuutarvetta, puustolle ehdotettiin lepoa. Ensiharvennusta ehdotettiin nuoriin kasvatusmetsiin ja muita hakkuutapoja varttuneisiin kasvatusmetsiin tai uudistuskypsiin metsiin. Suurimmalla osalla tutkimuskuvioista ei ollut tarvetta käsitellä puustoa. Niille oli joko tehty hakkuu lähivuosina, puusto ei vielä täyttänyt ainespuumittoja tai hakkuukertymä olisi jäänyt liian pieneksi.

Suurin osa suunnitelluista hakkuista oli poimintahakkuuta tai suojuspuuhakkuuta. Poimintahakkuuta ehdotettiin kuvioille, joilla ei vielä kasvanut kovin tiheää alikasvospuustoa tai sitä ei ollut ollenkaan. Myös kuvion päästöarvo vaikutti hakkuutavan valitsemiseen. Jos maaperän päästö oli karttatason mukaan suuri, puustoa jätettiin enemmän, jotta kokonaishiilitase ei laskisi voimakkaasti. Suojuspuuhakkuuta taas ehdotettiin kuvioille, joilla alikasvosta oli jo syntynyt ja edellytykset luontaiselle uudistumiselle näyttivät hyviltä. Lisäksi maaperän päästöarvo ei saanut olla näillä kohteilla kovin suuri, jotta puuston nielun väheneminen ei muuttaisi kokonaishiilitasetta suuresti. Myös ojat olivat hyvässä tai tyydyttävässä kunnossa, joten riskiä vedenpinnan liiallisesta noususta ei ollut. Suojuspuuhakkuulla tähdättiin harvempaan puustoon, jotta männyn taimien valo-olosuhteet paranisivat. Pienaukkohakkuu suunniteltiin männyn kasvupaikalle, jolla ei ollut alikasvospuustoa. Pienaukoille suunniteltiin kääntömätästys, jotta luontaisen taimettumisen mahdollisuudet paranisivat. Välialueille suunniteltiin harvennus poimintahakkuuna. Hakkuun jälkeistä puustoa suunniteltiin

jätettäväksi sen verran, että biologinen kuivatus säilyy. Ylispuiden poisto suunniteltiin kohteille, joilla oli valmiiksi tiheä alikasvospuusto ja ojat olivat hyvässä kunnossa. (Taulukko 14.)

Taulukko 14. Hakkuuehdotukset turvemaan tutkimuskuvioille

Hakkuuehdotus	kpl	%
Ensiharvennus	3	2,6
Poimintahakkuu	20	17,2
Suojuspuuhakkuu	10	8,6
Pienaukkohakkuu	1	0,9
Ylispuiden poisto	3	2,6
Lepo	79	68,1

Päästöluokitusta käytettiin myös metsänparannustöiden suunnittelun apuvälineenä. Koealamittausten yhteydessä tarkistettiin ojien kunto ja määritettiin kunnostusojitustarve. Lisäksi arvioitiin terveyslannoitustarve puuston tilan ja kasvupaikkaominaisuuksien perusteella. Maanmuokkaus suunniteltiin hakkuusuunnittelun yhteydessä. Jos metsänparannustöille ei ollut tarvetta tai edellytyksiä, kuvioille ehdotettiin lepoa. Lähes 80 prosentille tutkimuskuvioista ehdotettiin lepoa.

Suurin osa suunnitelluista metsänparannustöistä oli lannoituksia. Lannoitusehdotuksen edellytyksenä oli, että kuvion puusto on ojituksen jälkeen kasvanut vähintään tyydyttävästi ja puusto on havupuuvältaista sekä kasvupaikkatyyppi vähintään puolukaturvekangasta. Lisäksi lannoitusta ei suunniteltu ohutturpeisimmille tutkimuskuvioille, joiden turvepaksuus on alle 50 cm, koska niiden juuristolla on todennäköisesti yhteys kivennäismaahan eikä lannoituksen kasvuvaikutus jäisi kovin suureksi. Kunnostusojitusehdotukset jäivät yhteen kappaleeseen. Suurin syy tähän oli se, että ojien kuivatustilanne oli pääosin hyvä. Rehevillä kohteilla ojitusta ei harkittu ollenkaan, jos puuston biologinen kuivatus oli riittävä tai ojat olivat kohtalaisessa kunnossa. Ojitus lisäisi rehevillä kasvupaikoilla maaperän hiilidioksidipäästöjä huomattavasti. Maanmuokkausta ehdotettiin yhdelle pienaukkohakkuun kohteelle, jolla haluttiin varmistaa luontaisen taimettumisen onnistuminen. (Taulukko 15.)

Taulukko 15. Metsänparannusehdotukset turvemaan tutkimuskuvioille

Metsänparannusehdotus	kpl	%
Kunnostusojitus	1	0,9
Lannoitus	20	17,2
Maanmuokkaus	1	0,9
Lepo	94	81,0

6.3 Hakkuusimulointi otanta-alueen esimerkkikohteille

Hiilipäästöaineiston ja päästöluokitustason tutkimisen lisäksi päätettiin simuloida otanta-alueelle suunniteltujen hakkuiden vaikutuksia tutkimuskuvioiden hiilipäästöarvoihin. Tutkimuksen kohteeksi valittiin puuston hiilivaraston ja -nielun muutokset. Otanta-alueen ojat olivat hyvässä kunnossa, joten maaperän muutoksia ei lähdetty tutkimaan. Tutkimus rajattiin käsittämään kolmea eri ravinteisuustason kuviota turvemaalta. Simuloinnin hakkuuvoimakkuus valittiin siten, että hakkuu on taloudellisesti kannattava, mutta myös kasvihuonekaasutaseelle edullinen. Lisäksi haluttiin selvittää, miten nopeasti puuston kasvu eli hiilinielu palautuu hakkuun jälkeen.

Valitut kuviot olivat ravinteisuudeltaan tuoreen kankaan, kuivahkon kankaan ja kuivan kankaan tasoisia. Simulointiin käytettiin Hakkuri-sovellusta. Sovellukseen syötettiin aluksi jokaiselta kuvioilta niiden puusto- ja kasvupaikkatiedot. Sen jälkeen kuvioille määritettiin hakkuutavat ja -voimakkuus. Tuoreen ja kuivahkon kankaan kuvioille valittiin jatkuvapeitteisen kasvatuksen mukainen poimintahakkuu. Kuivan kankaan kuvioille valittiin hakkuutavaksi ensiharvennus. Kuviot sijaitsivat Pohjois-Suomessa, jossa jatkuvan kasvatuksen hakkuuta suositellaan tehtäväksi aikaisintaan 15 vuoden välein (ks. sivu 12). Tämän vuoksi hakkuun jälkeistä puustoa päätettiin kasvattaa simuloinnilla 15 ja 20 vuoden päähän. Eri puulajien tilavuus laskettiin yhteen ja ne ilmaistiin kokonaistilavuutena. Hiilivarasto laskettiin muuttamalla puuston tilavuus siihen sitoutuneen hiilen massaksi. Puusto sitoo Suomessa keskimäärin 270 kilogrammaa hiiltä kuutioon puuta. Hiilinielu laskettiin vähentämällä kasvatetun

puuston tilavuudesta edeltävän laskennan tilavuus ja jakamalla se kasvatusvuosilla.

Puuston tilavuus ja hiilivarasto vaihtelivat lähtötilanteessa tutkimuskuvioiden välillä huomattavasti. Tuoreen kankaan kuviolla puuston määrä ja siten myös hiilivarasto olivat suurimmat. Arvot laskivat kasvupaikan ravinteisuuden muuttuessa karummaksi. Hakkuun jälkeinen puusto suunniteltiin jäämään 100–120 m³/ha tiheyteen, jotta biologinen kuivatus säilyisi, eikä puuston hiilivarasto ja -nielu pienenesi voimakkaasti. Kuivan kankaan kuviolla puusto hakattiin 75 m³/ha tiheyteen, koska lähtöpuustoa oli vähän ja hakkuutulot haluttiin järkeviksi. Kuvion kuivatusojat olivat kuitenkin hyvässä kunnossa, joten kunnostusojitusta ei tarvinnut toteuttaa hakkuun jälkeen. Kokonaismäärältään hiilivarasto väheni eniten tuoreen kankaan kuviolla, koska sillä hakkuu oli voimakkain. Hiilivarasto pieneni vähiten kuivan kankaan kuviolla. (Taulukko 16; Taulukko 17.)

Taulukko 16. Simulointikuvioiden lähtöpuusto ja hiilivarasto kasvupaikoittain

Kasvupaikka	Lähtö til (m ³ /ha)	Lähtö Cvar (kg/ha)
Tuore	213	57510
Kuivahko	172	46440
Kuiva	125	33750

Taulukko 17. Simulointikuvioiden puusto ja hiilivarasto hakkuiden jälkeen

Kasvupaikka	Til 0v (m ³ /ha)	Cvar 0v (kg/ha)
Tuore	131	35370
Kuivahko	113	30510
Kuiva	75	20250

Simulointikuvioiden puuston tilavuus lisääntyi 15 vuoden päähän kasvatettuna kymmeniä kuutioita hehtaarilla jokaisella kasvupaikalla. Hiilivarasto kasvoi samassa suhteessa. Hiilivarasto oli edelleen suurin tuoreen kankaan kuviolla ja pienin kuivan kankaan kuviolla. Kuivan kankaan puuston kokonaistilavuus ja hiilivarasto kasvoivat suuremmaksi, kuin mitä ne olivat ennen hakkuuta vallinneessa tilanteessa. Kuivan kankaan hiilinielu oli suurempi kuin kuivahkolla kankaalla. Tilannetta selittää se, että kuivan kankaan kohde oli nuorta kasvatusmetsää, jossa puuston kasvu on metsän kiertoajan nopeimmassa

vaiheessa. Tuoreen kankaan kuvion hiilinielu oli vertailukuvioiden suurin. (Taulukko 18.)

Taulukko 18. Simulointikuvioiden puusto, hiilivarasto ja hiilinielu 15 vuoden päästä hakkuista

Kasvupaikka	Til 15v (m ³ /ha)	Cvar 15v (kg/ha)	C niel 15v (kg/ha/v)
Tuore	193	52110	1116
Kuivahko	161	43470	864
Kuiva	127	34290	936

Puuston kokonaistilavuus ja hiilivarasto olivat 20 vuoden kasvun jälkeen edelleen suurimmat tuoreen kankaan kuviolla ja pienenivät ravinteisuustason laskiessa. Tuoreen ja kuivahkon kankaan kuvioilla kokonaistilavuudet kasvoivat lähtötilannetta suuremmiksi. Hiilinielut alkoivat tasaantua tuoreen ja kuivahkon kankaan kuvioiden välillä. Molempien kuvioiden kokonaistilavuus kasvoi 34 kuutiometriä/hehtaari viidessä vuodessa. Hiilinielu kasvoi eniten kuivahkon kankaan kuviolla viiden vuoden takaisin arvoihin nähden. Kuivan kankaan kuviolla kokonaistilavuus kasvoi muita kasvupaikkoja hitaammin, 15 m³/ha viidessä vuodessa. Sen hiilinielu pieneni yli 100 kg/ha/v 5 vuoden takaisesta lukemasta. (Taulukko 19.)

Taulukko 19. Simulointikuvioiden puusto, hiilivarasto ja hiilinielu 20 vuoden päästä hakkuista

Kasvupaikka	Til 20v (m ³ /ha)	Cvar 20v (kg/ha)	C niel 20v (kg/ha/v)
Tuore	227	61290	1836
Kuivahko	195	52650	1836
Kuiva	142	38340	810

6.4 Tulosten luotettavuuden arviointi

Tutkimuksen tulosten luotettavuuden voitiin todeta kokonaisuutena olevan hyvällä tasolla. Tutkimuskoealojen lukumäärä oli runsas ja ne sijoittuivat useammalle otanta-alueelle. Myös mittauskoealojen määrä oli runsas. Varsinkin kasvupaikan ja puuston ominaisuuksien suhteen tulokset olivat tarkkoja ja

antoivat hyvän kuvan hiilipäästölaskennan pilottialueen olosuhteista. Lehtojen ja lehtomaisten kasvupaikkojen osuus tutkimuskuvioista oli pieni, joten niiden osalta ei voitu tehdä kattavaa tutkimusta. Niiden määrä pilottialueella oli muutenkin vähäinen, joten mahdollisuuksia tarkempaan tutkimukseen ei ollut. Ojasyvyystietojen osalta tuloksia voitiin pitää suuntaa antavina. Luotettavien tulosten saamiseksi mittauksia olisi tullut tehdä useampana vuonna, koska ojien vedenpinnan korkeus vaihtelee hyvin paljon. Hiilipäästölaskennassa käytetty laserkeilausaineisto oli mitattu kesäkuussa ja tutkimuskoealojen aineisto kerättiin syys-lokakuussa. Kosteusolosuhteet olivat jo lähtökohtaisesti erilaiset ja syksy oli muutenkin sateinen. Päästöluokitustason testaamisen tuloksia voitiin pitää luotettavuudeltaan hyvinä, koska olosuhteet olivat helppo todeta karttatason tarkastelun lisäksi koealamittausten yhteydessä. Suunnitellut toimenpiteet myös perustuivat Metsähallituksen käyttämään metsänhoito-ohjeeseen. Metsän käsittelyyn on tosin yleensä useampi vaihtoehto, joiden valintaan voi vaikuttaa suunnittelijan omat näkemykset. Tulokset voisivat siis poiketa jonkin verran, jos päästöluokitustason testauksen olisi toteuttanut eri henkilö. Hakkuusimulointi perustui maastosta mitattuun aineistoon, joten lähtökohdat simuloinnille olivat luotettavuuden kannalta hyvät. Valitettavasti tässä tutkimuksessa ei voitu käyttää Motti-laskentasovellusta käyttöjärjestelmän yhteensopivuusongelmien vuoksi. Hakkuri-sovelluksessa oli omat rajoitteensa. Esimerkiksi puuston ikää ei huomioitu puustotiedoissa ollenkaan. Turvemaidella puuston kasvu vaihtelee huomattavasti ja osa vanhasta puustosta voi olla nuoren kasvatusmetsän kokoista. Hakkuri-sovelluksessa oli kuitenkin mahdollisuus muuttaa puuston kasvua keskimääräistä huonommaksi tai paremmaksi, mikä paransi simulointien luotettavuutta.

7 POHDINTA

Hiilipäästölaskennan tuottama aineisto oli pääosin luotettavaa ja käyttökelpoista käytettäväksi metsäsuunnittelussa. Laserkeilauksesta tuotetut puusto- ja ojatiedot olivat laajemmin tarkasteltuna erittäin tarkalla tasolla. Metsikkökuviotasolla oli hajontaa varsinkin puulajisuhteiden osalta, mutta kokonaistilavuudet ja kasvutiedot olivat hyvällä tasolla. Suurin epävarmuustekijä hiilipäästölaskennan aineiston luotettavuudessa oli kasvupaikkatyyppitieto. Varsinkin karumpien varpu- ja puolukkaturvekankaan tasoisten kasvupaikkojen osalta tieto oli virheellistä. Niiden määrä otanta-alueella oli myös runsain. Rehevämmät kasvupaikkatyyppit oli kuitenkin tyyppitetty tarkemmin. Se oli positiivinen asia, koska juuri rehevimpien turvemaiden kasvihuonekaasupäästöt ovat suurimpia. Jos isompi osa karummista kasvupaikoista olisikin ilmennyt reheviksi, otanta-alueen soiden päästöt olisivat olleet todellisuudessa huomattavasti suuremmat. Puolukkaturvekankaan tasoisten kasvupaikkojen runsaampi määrä ei kasvata kokonaispäästöarvoja merkittävästi.

Myös maalajitiedoissa oli poikkeamaa. Osa suoalueiden ympäristön kivennäismaista oli virheellisesti luokitettu turvemaaksi. Kivennäismaasaarekkeet olivat osin jääneet metsikkökuvioinnissa turvemaakuvioiden sisälle tai turvekerros oli ohentunut niin, että kasvualusta oli muuttunut kivennäismaaksi. Hiilipäästölaskennan aineiston käytössä, varsinkin metsikkötasolla, tulisi kiinnittää erityistä huomiota kasvupaikkatyyppi- ja maalajitietoihin. Tarkastetut ja muutetut tiedot tulisi myös tallentaa paikkatietojärjestelmään esimerkiksi metsäsuunnittelun yhteydessä. Tällä hetkellä Metsähallituksen käyttämän paikkatieto-ohjelman kasvupaikkatason ja maalajin päivittäminen muille kuin korjuun- tai metsänhoidon toimenpidekuvioille on hyvin työlästä. Kasvupaikkatason muokkaamista tulisi helpottaa nykyisestä esimerkiksi siten, että se päivittyisi automaattisesti korjuun ja metsänhoidon karttatasoilta.

Hiilipäästölaskennan aineistosta kehitetty päästöluokituskarttataso sopi hyvin metsäsuunnittelun apuvälineeksi, kun haluttiin tietoa metsikkökohtaisista maaperän ja puuston hiilipäästöarvoista. Luokituksen avulla oli myös helppo

suunnitella jatkuvan kasvatuksen hakkuita. Hakkuutapavalintoja voitiin perustella päästömäärillä. Karttatasoa voitaisiin käyttää myös laajemman alueen tarkasteluun ja arvioida esimerkiksi hakkuulohkon tai yksittäisen toimenpiteen kokonaisvaikutuksia hiilitaseeseen. Tasoja tulisi kehittää sellaiseksi, että valintatyökalulla voisi laskea rajatulle alueelle useamman hilan kokonaispäästöarvon.

Lisäksi olisi tärkeää kehittää suunnittelukäyttöön karttataso turvemaiden vedenpinnan korkeudesta. Tason avulla voitaisiin kartoittaa toimistotyönä mahdolliset hiilitaseen kannalta sopivat vedenpinnan tasot metsikkökohtaisesti. Tieto voitaisiin yhdistää päästöluokituksen kanssa. Rehevillä kasvupaikoilla, joilla myös vedenpinnan korkeus on sopiva, voitaisiin priorisoida peitteisempää metsänkäsittelyä. Tällöin puuston biologinen kuivatus säilyisi hyvällä tasolla. Myös kunnostusojitusta voitaisiin lykätä tai se voitaisiin välttää kokonaan ja maaperän kasvihuonekaasupäästöt pysyisivät maltillisella tasolla. Vedenpinnan ollessa syvällä, voitaisiin jatkuvapeitteisessä kasvatuksessa puusto hakata harvemmaksi. Hakkutapoina voitaisiin käyttää suojuspuuhakkuuta tai ylispuunpoistoa, jos alikasvospuustoa on riittävästi. Vedenpinta todennäköisesti nousisi, kun puuston haihdutus vähenisi. Se kuitenkin vähentäisi maaperän hiilidioksidipäästöjä. Seuraavilla hakkuukerroilla tilanne arvioitaisiin uudelleen vedenpinnan tason ja puuston kehityksen mukaan.

Päästöarvoluokitusta voitiin hyödyntää myös metsänparannustöiden suunnittelussa. Tulokset osoittivat, että kunnostusojituksen suunnittelussa suuret päästökohdeet olisi helppo rajata ojitusyömaan ulkopuolelle, jos ojituksen tekninen suunnittelu sen mahdollistaa. Päästöluokituksen avulla oli myös helppo löytää kohteita, joilla maaperän päästöarvo oli pieni. Kunnostusojitusehdotukset oli helppo priorisoida niille. Kunnostusojitussuunnittelussa voisi myös huomioida ilmaston muutoksen myötä lisääntyvien kuivien kasvukausien vaikutus. Vedenpinnan taso turvemailla pysynee maltillisempana, kun kuivat ja lämpimät kesät yleistyvät. Turvemailla, joilla kasvihuonekaasupäästöt ovat kohtalaiset, voitaisiin kunnostusojituksen sijaan harkita metsän kasvun parantamista terveyslannoituksilla. Biologisen kuivatuksen tulisi olla tällöin riittävä tai sen tulisi oletettavasti parantua lannoituksen lisäämän kasvun seurauksena. Myös huonompikasvuisilla karuilla rämeillä lannoitusmääriä voitaisiin lisätä. Valtio on

päättänyt tukea metsälannoituksen määrän kasvattamista osana ilmastotavoitteitaan. Päähuomiota on kiinnitetty nimenomaan turvemaiden lannoitusten lisäämiseen. Jos karujen rämeiden ojat ovat kohtalaisessa kunnossa, voitaisiin ne passiivisen metsänhoidon sijaan lannoittaa. Tällöin puuston hiilensidonta paranisi pitkällä aikavälillä, vaikka investointi ei olisikaan taloudellisesti kovin kannattava.

Tutkimuksen viitekehyksessä kiinnitettiin erityistä huomiota maanmuokkauksen vaikutukseen kasvihuonekaasutaseeseen ja luontaisen uudistamisen onnistumiseen. Pienaukkohakkuualoilla on ollut haasteita saada syntymään uutta taimiainesta pienaukoille. Ongelmakohteita on ollut varsinkin turvemaidella, joilla hakkuuta edeltävässä tilanteessa ei ole ollut merkkiä taimettumisesta. Maanmuokkaaminen tällaisilla kohteilla voisikin edistää taimettumista huomattavasti. Raakahumuskerrosta rikkomalla kasvualustan olosuhteet muuttuvat edullisemmaksi siementen itämiselle ja sopivan kosteuden ylläpitämiseksi. Maanmuokkauksen ei ole myöskään todettu huonontavan uudistusalojen hiilitasetta, vaan pikemminkin lisäävän uuden puusukupolven hiilensidontaa pitkällä aikavälillä. Maanmuokkauksen käyttöä pienaukkohakkuun yhteydessä tulisikin harkita herkemmin, jos suunnitteluvaiheessa taimettumisen onnistuminen epäilyttää. Kunnostusojitus suunnittelussa jatkuvapeitteisen kasvatuksen kohteilla tulisi myös huomioida luontaisen taimettumisen olosuhteet. Siemenet itävät paremmin kostealla kasvualustalla, joten hakkuun jälkeisen ojituksen lykkäämistä muutamilla vuosilla tulisi harkita tapauskohtaisesti. Liian aikainen ojien perkaus kuivattaa kasvualustaa ja taimettumisen mahdollisuudet heikkenevät.

Otanta-alueen tutkimuskoealojen suuret päästökohteet olivat useassa tapauksessa myös metsäluonnoltaan monimuotoisia. Ne sijaittivat useassa tapauksessa purojen varsilla. Päästöluokitustietoja voitaisiinkin hyödyntää myös ennallistamisen ja luonnonhoidon suunnittelussa. Purovarsien suoalueiden vedet oli monessa tapauksessa johdettu suoraan vesistöön kaivamalla veto-ojia. Soilta kulkeutui kiintoainesta ja ravinteita ojia pitkin puroihin. Rantatörmien rehevät suot kuivuvat, jos ojia on kaivettu tiheästi tai laajemmalla alueelta tulevat vedet kulkevat rantasoiden ohi kanavaa pitkin puroon. Päästöluokituskarttataso voisi helpottaa tällaisten kohteiden etsimistä. Metsänkasvatuksen kannalta

rehevien puronvarsisoiden vesitalouden ennallistaminen ei olisi kannattavaa, mutta sillä saataisiin lisättyä metsien monimuotoisuutta. Monimuotoisuuden säilyttäminen ja lisääminen ovat tärkeimpiä Metsähallituksen ympäristötavoitteita.

Hakkuusimuloinnin tulokset osoittivat, että metsän kasvupaikkatyypillä, kehitysvaiheella ja puuston rakenteella on suuri vaikutus hiilivaraston muodostumiseen. Rehevillä kasvupaikoilla puuston määrä oli yleensä runsain ja hakkuut voitiin suunnitella tehtäväksi voimakkaammin vähentämättä puuston kasvua ja hiilen sidontaa oleellisesti. Karuilla kasvupaikoilla hiilivarasto kasvoi nopeimmin metsän ollessa nuorena kehitysvaiheessa, mutta kasvu hidastui metsän varttuessa. Niiden puuston kokonaistilavuus putosi melko pieneksi varsinkin ensiharvennusvaiheessa. Hakkuusimuloinnin esimerkkitaapauksessa hakkuun jälkeinen puusto ei olisi riittänyt ylläpitämään biologista kuivatusta. Jos ojat olisivat olleet huonossa kunnossa, olisi hakkuun lisäksi täytynyt tehdä kunnostusojitus.

Hakkuun jälkeisen biologisen kuivatuksen ylläpitäminen on todennäköisesti helpompaa keskivänteisillä ja sitä rehevämmillä turvemaidella. Tämä tarkoittaa samalla myös sitä, että samoilla kasvupaikoilla puuston hiilivarasto palautuu nopeammin kuin karuilla turvemaidella. Karuilla turvemaidella maaperän päästöarvot eivät kuitenkaan ole kovin suuret tai maaperä voi olla jopa nielu. Sen vuoksi niillä jatkuvan kasvatuksen systemaattinen käyttö ei ole ainakaan ilmastotavoitteiden kannalta välttämätöntä. Jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen hakkuilla käsiteltyjen metsien kehityssuunnitteet tulevat tarkentumaan jatkossa kehitteillä olevien kasvumallien siirtyessä laskentajärjestelmiin. Uusilla kasvumalleilla saadaan tarkempaa tietoa esimerkiksi pienaukkohakkuin käsitellyistä metsistä.

Tämän tutkimuksen keskeisimpänä tuloksena voitiin todeta, että tietoa turvemaiden metsikkökohtaisesta hiilipäästöarvosta oli mahdollista käyttää monella tavalla hyödyksi metsäsuunnittelussa, jos metsien käytössä haluttiin huomioida ilmastovaikutukset. Huolellisella metsikkökohtaisella suunnittelulla voitiin aluetasolla hillitä kasvihuonekaasupäästöjä, kohdistaa metsänhoitotyöt oikeisiin kohteisiin ja saada metsä tuottamaan puuta mahdollisimman taloudellisesti. Päästöluokituksen avulla suunnittelussa voitiin myös huomioida

metsien ja maaperän kasvihuonekaasutaseen kehittyminen tulevina vuosina ja vuosikymmeninä. Haasteena turvemailla toimimisessa olivat puuston ja kasvualustan suuri vaihtelevuus. Oikeiden toimintamallien valitseminen oli osin haastavaa. Päästöluokituskarttataso on yksi työkalu oikeiden valintojen tekemiseen. Suunnittelussa on hyvä muistaa, että turvemaan metsissä sekä taloudelliset että ilmastolliset hyödyt voivat molemmat täyttyä samalla kohteella.

LÄHTEET

Akujärvi, A., Lehtonen, A. Repo, T., Saksa, T., Sarkkola, S. & Soimakallio, S. 2020. Ilmastonmuutos ja metsänhoito. Yhteenveto ilmastonmuutoksen vaikutuksista metsänhoitoon. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 98/2020.

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.

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

Egnell, G., Jurevics, A., Peichl, M. 2015. Negative effects of stem and stump harvest and deep soil cultivation on the soil carbon and nitrogen pools are mitigated by enhanced tree growth. *Forest Ecology and Management* 338: 57–67.

Euroopan komissio s.a. Ilmastonmuutoksen syyt. Viitattu 17.12.2020.
https://ec.europa.eu/clima/change/causes_fi

Euroopan komissio 2020. Minimising the risk of deforestation and forest degradation associated with products placed on the EU market. Euroopan komission alustava vaikutustenarviointi - Ares(2020)744911. Viitattu 17.12.2020
<https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/12137-Minimising-the-risk-of-deforestation-and-forest-degradation-associated-with-products-placed-on-the-EU-market>

Gonzalez, P., Neilson, R. P., Lenihan, J. M., & Drapek, R. J. 2010. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 19(6), 755–768.

Halonen, M., Rinne, P., Tommila, P. & Vanhanen, J. 2013. Miten Suomi selviää yli 4 astetta lämpimämmässä maailmassa? Sitran selvityksiä 74. Helsinki 2013.

Hautanen, J. & Ojanen, P. 2014. Eri kaasujen ja metsänhoitotöiden merkitys metsien kasvihuonekaasutaseessa: esimerkkinä Etelä- ja Keski-Pohjanmaa. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2014.

Heikkinen, E. s.a. Metsät, metsäenergia ja hiilensidonta. Metsäkeskus. Viitattu 29.12.2020.
https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/metsat-metsaenergia_ja_hiilensidonta.pdf

Heikkinen, T., Ojanen, P., Minkkinen, K., Penttilä, T., Haapalehto, T. & Tolvanen, A. 2016. Ennallistamisen vaikutus metsänkasvatuskelvottomien soiden metaanivirtoihin. *Suo* 67(1): 22–26.

Helenius, P., Saarinen, M. 2013. Regeneration result of excavator-mounted rototiller in direct seeding of Scots pine on forestry-drained peatland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(8): 752–757.

Hiilensidonnan laskutapa s.a. Hiilipörssin verkkosivusto. Viitattu 4.1.2021.
<https://hiiliporssi.fi/info/laskenta/>

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.

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.

Hökkä, H., Repola, J. 2018. Pienaukkohakkuun uudistumistulos Pohjois-Suomen korpikuusikossa 10 vuoden kuluttua hakkuusta. *Metsätieteen aikakauskirja* 2018/7808: 17 s.

Ilmatieteenlaitos s.a.a. Kasvihuonekaasut lämmittävät. Viitattu 15.12.2020
<https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/3a576a6e-bec5-44bc-a01d-11497ebdc441/kasvihuonekaasut-lammittavat.html>

Ilmatieteenlaitos s.a.b. Maailmanlaajuisiin ilmastomalleihin perustuvia lämpötila- ja sademääräskenaarioita. s.a. Viitattu 18.12.2020.
<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/setuklim>

Ilvesniemi, H. 2019. Maanmuokkaus lisää metsän kasvua ja sen myötä hiilivarastoa. Blogi kirjoitus 13.11.2019. Viitattu 13.1.2021.
<https://www.luke.fi/blogi/maanmuokkaus-lisaa-metsan-kasvua-ja-sen-myota-hiilivarastoa/>

IPCC 2007. Fourth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Viitattu 29.12.2020.
<https://www.ipcc.ch/reports/>

Juutinen, A., Ahtikoski, A. & Rämö, J. 2020. Puuntuotannon kannattavuuteen vaikuttavat tekijät jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 2020-10313.

Karvonen, R. 2019. Metsä sitoo 38 kesäpäivässä henkilöautojen vuoden päästöt. *Maaseudun tulevaisuus* 26.9.2019. Viitattu 7.1.2021.
<https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/metsa/artikkeli-1.453472>

Kasvihuonekaasut s.a. Ilmasto.org. Viitattu 15.12.2020
<http://ilmasto.org/ilmastonmuutos/kasvihuoneilmio-ja-ilmastonmuutos/kasvihuonekaasut.html>

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.
 Kellomäki, S. & Peltola, H. 2005. Metsäpuiden kasvu ja ilmastonmuutos – 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., 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.

Lehtonen, A., Puolakka, P., Ihalainen, A., Heikkinen, J. & Korhonen, K.T. 2011. Metsähallituksen hallinnoimien metsien hiilitaseet. *Metlan työraportteja* 199.

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. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 36/2016.

Lehtonen, A., Salminen, O., Sievänen, R., Tuomainen, T., Ollila, P., Packalen, T., Asikainen, A., Thessler, S., Ahtikoski, A., Uotila, E. & Mäkipää, R. 2019. Suomen metsien hiilinielun vertailutason arviointi. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus* 20/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki.

Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, T., 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.

Liski J., Palosuo, T., Peltoniemi, M. & Sievänen, R. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils.

Londo, A. J., Messina, M. G., & Schoenholtz, S. H. 1999. Forest Harvesting Effects on Soil Temperature, Moisture, and Respiration in a Bottomland Hardwood Forest, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 637–644

Luke 2020a. Valtion monikäyttömetsien testausvaiheen hiilitaselaskennat ja turvemaiden metsien hiilinielu-/päästölähdeluokitus Pudasjärven testialueelle. Powerpoint-esitys. Viitattu 27.1.2021.

Luke 2020b. Valtion monikäyttömetsien turvemaiden päästölähdeluokitus ja monikäyttömetsien hiilitaselaskennat. Projektisuunnitelma. Viitattu 27.1.2021.

Luke 2020c. Turvemaitten päästölähdeluokitusehdotus. Powerpoint-esitys. Viitattu 27.1.2021.

Mannerkoski, H. 2012. Metsien ekologiset ja hydrologiset suojavaikutukset. *Silva Carelica* 57. Itä- Suomen yliopisto, metsätieteiden osasto.

Metsä Group s.a.a. Maanmuokkaus. Viitattu 19.1.2021.
<https://www.metsaforest.com/fi/Metsanhoito/Pages/Maanmuokkaus.aspx>

Metsä Group s.a.b. Poimintahakkuut ja pienaukkohakkuut. Viitattu 25.1.2021.
<https://www.metsaforest.com/fi/Metsanhoito/Pages/Poimintahakkuut-ja-pienaukkohakkuut.aspx>

Metsähallitus s.a. Hakkuutavat. Viitattu 25.1.2021.
<https://www.metsa.fi/vastuullinen-liiketoiminta/metsatalous/metsanhoito/hakkuutavat/>

Metsähallitus 2021. Metsänhoito-ohje. Viitattu 8.4.2021.

Metsäkeskus s.a. Tuhkalannoitus materiaalit. Viitattu 14.1.2021.
<https://www.metsakeskus.fi/tuhkalannoitus-materiaalit>

Minkkinen, O. & Ojanen, P. 2013. Pohjois-Pohjanmaan turvemaiden kasvihuonekaasutaseet. *Metlan työraportteja* 258: 75–111. Viitattu 5.1.2021.
http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2013/mwp258_3_75-111.pdf

Minkkinen, K., Ojanen, P., Koskinen, M., & Penttilä, T. 2020. Nitrous oxide emissions of undrained, forestry-drained, and rewetted boreal peatlands. *Forest Ecology and Management*, 478, 118494.gy and *Earth System Sciences*, 23(8), 3457-3480.

Minkkinen, K., Ojanen, P., Penttilä, T., Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J-P. & Lohila, A. 2018. Persistent carbon sink at a boreal drained bog forest. *Biogeosciences* 15: 3603–3624.

Mjöfors K., Strömgren M., Nohrstedt H.-Ö., Gärdenäs A.I. 2015. Impact of site-preparation on soil-surface CO₂ fluxes and litter decomposition in a clear-cut in Sweden. *Silva Fennica* vol. 49 no. 5 article id 1403.

Mjöfors K., Strömgren M., Nohrstedt H.-Ö., Johansson M.-B., Gärdenäs A.I. 2017. Indications that site preparation increases forest ecosystem carbon stocks in the long-term. *Scandinavian Journal of Forest Research* 32: 717–725.

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.

Mäkiranta, P., Riutta, T., Penttilä, T., & Minkkinen, K. 2010. Dynamics of net ecosystem CO₂ exchange and heterotrophic soil respiration following clearfelling in a drained peatland forest, *Agr. Forest Meteorol.*, 150, 1585–1596

Nieminen M., Hökkä H., Laiho R., Juutinen A., Ahtikoski A., Pearson M., Kojola S., Sarkkola S., Launiainen S., Valkonen S., Penttilä T., Lohila A., 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.

Ojanen P. 2015. Metsäojituksen vaikutuksesta ilmastoon. *Suo* 66(2): 49–55.

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*, Volume 24 (2019), Article 27.

Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J., Penttilä, T., 2010. Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *For. Ecol. Manage.* 260, 411–421.

Ojanen, P., Minkkinen, K., Penttilä, T., 2013. The current greenhouse gas impact of forestry-drained boreal peatlands. *For. Ecol. Manage.* 289, 201–208.

Ojanen, P., Mäkiranta, P., Penttilä, T. & Minkkinen, K. 2017. Do logging residue piles trigger extra decomposition of soil organic matter? *Forest Ecol. Manage.* 405, 367–380.

Ojanen, P., Penttilä, T., Tolvanen, A., Hotanen, J-P., Saarimaa, M., Nousiainen, H. & Minkkinen, K. 2019. Longterm effect of fertilization on the greenhouse gas exchange of low-productive peatland forests. *Forest Ecology and Management* 432.

Ojanen, P., Saarinen, M., Schneider, H. & Päivinen, R. 2020. Suometsien kokonaisanalyysi. Ojitettujen soiden kasvihuonekaasupäästöistä ja uudistamisesta. *Tutkijapaneeli 2*. Tapio Oy.

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.

Peura M., Burgas D., Eyvindson K., Repo A. & Mönkkönen M. 2018. Continuous cover forestry is a cost-efficient tool to increase multifunctionality of boreal production forests in Fennoscandia. *Biological Conservation* 217: 104–112.

Pukkala T. 2016. Which type of forest management provides most ecosystem services? *Forest Ecosystems* 3 article 9.

Repo, T. 1993. Impedance spectroscopy and temperature acclimation of forest trees. *Res. Notes* 9, University of Joensuu, Faculty of Forestry. 53 s.

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.

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.

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.

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.

Saarinen, M. 2002. Kasvillisuuden ja maanmuokkauksen vaikutus männyn ja koivun taimettumiseen varpu- ja puolukkaturvekankailla. *Suo* 53(2): 41–60.

Saarinen, M. 2013. Männyn kylvö ja luontainen taimettuminen vanhoilla ojitusalueilla - turvemaiden uudistamisen erityispiirteitä. *Dissertationes Forestales* 164. 64 s.

Saarinen, M. 2019. Taimettumiseen vaikuttavat tekijät turvemilla. Julkaisussa: Laine, T., Luoranen, J. & Ilvesniemi, H. (toim.). *Metsämaan muokkaus: kirjallisuuskatsaus maanmuokkauksen vaikutuksista metsänuudistamiseen, vesistöihin sekä ekologiseen ja sosiaaliseen kestävytyteen*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki.

Saarinen, M., Alenius, V. & Laiho, R. 2013. Kosteusolosuhteiden vaikutus siementen itämiseen ja taimien varhaiskehitykseen turvemaan metsänuudistusalan muokkauspinoilla. *Suo* 64(2–3): 51–75.

Saarinen, M. & Hotanen, J.-P. 2000. Raakahumuksen ja kasvillisuuden yhteisvaihtelu Pohjois-Hämeen vanhoilla ojitusalueilla. *Suo* 51(4): 227–242.

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(7): 649–658.

Sarkkola S., Hökkä H., Jalkanen R., Koivusalo H. & Nieminen M. 2013. Kunnostusojitustarpeen arviointi tarkentuu - puuston määrä tärkeä kriteeri. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2013: 159–166.

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, *Can. J. For. Res.*, 40, 1485–1496

Schaefer, K., Lantuit, H., Romanovsky, V. & Schuur, E. 2012. Policy Implications of Warming Permafrost. UNEPIN julkaisu DEW/1621/NA. Viitattu 17.12.2020
<https://epic.awi.de/id/eprint/33086/1/permafrost.pdf>

Schneider, H. & Päivinen, R. 2020. Suometsien kokonaisanalyysi. Loppuraportti. Tapio Oy.

Sievänen, R., Vapaavuori, E. & Muhonen, T.(toim.) Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja 240: 97–120.

Smolander, A. & Lindroos A.-J. 2019. Maan ravinnetalous ja hiilitase kivennäismailla. Julkaisussa: Laine, T., Luoranen, J. & Ilvesniemi, H. (toim.). Metsämaan muokkaus: kirjallisuuskatsaus maanmuokkauksen vaikutuksista metsänuudistamiseen, vesistöihin sekä ekologiseen ja sosiaaliseen kestävyYTEEN. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki.

Smolander, A., Paavolainen, L., Mälkönen, E. 2000. C and N transformations in forest soil after mounding for regeneration. *Forest Ecology and Management* 134: 17–28.

Soimakallio, S. 2018. Miksi puuntuotannon maksimointi ei maksimoi hiilinielua? SYKE Ratkaisuja-blogi. Viitattu 29.12.2020
[https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Ratkaisujablogi/Sampo_Soimakallio_Miksi_puuntuotannon_ma\(47869\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Ratkaisujablogi/Sampo_Soimakallio_Miksi_puuntuotannon_ma(47869))

Statistics Finland 2019. Greenhouse gas emissions in Finland 1990–2017. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto protocol. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu 4.1.2021
https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/fi_eu_nir_2017_2019-03-15.pdf

Strömgren, M., Hedwall, P.-O., Olsson, B. A. 2016. Effects of stump harvest on N₂O and CH₄ emissions from boreal forest soils after clear-cutting. *Forest Ecology and Management* 371: 15–22

Suomen virallinen tilasto 2019. Kasvihuonekaasut. Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2018. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu: 4.1.2021.
http://www.stat.fi/til/khki/2018/khki_2018_2019-05-23_kat_001_fi.html

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.

Uri, V., Kukumägi, M., Aosaar, J., Varik, M., Becker, H., Aun, K., Krasnova, A., Morozov, G., Ostonen, I., Mander, Ü., Lõhmus, K., Rosensvald, 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.

Vaara, I., Björkqvist, N., Honkavaara, T., Karvonen, L., Kiljunen, N., Salmi, J. & Vainio, K. 2018. Ilmastoviisas metsätalous. Ilmastonmuutosta hillitsevä metsätalous (47314) -projektin tulosraportti. Metsähallitus Metsätalous Oy. Viitattu 7.1.2021.

http://www.e-julkaisu.fi/metsahallitus/ilmastoviisas_metsatalous/pdf/Metsahallitus_IlmastoviisasMetsatalous.pdf

Valkonen, S. 2020. Metsän jatkuvasta kasvatuksesta. 2. painos. Tallinna: Metsäkustannus.

Valtioneuvoston asetus metsien kestävästä hoidosta ja käytöstä 30.12.2013/1308. Viitattu 26.1.2021.

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.

Yliluoma, R. 2019. Hiilinielujen ABC. Johdatus metsien ja maankäytön ilmastovaikutuksiin. Viitattu 7.5.2021.
<https://www.ajatuspajavisio.fi/wp-content/uploads/2019/12/Hiilinielujen-ABC.pdf>