

Metsähakkuiden vaikutukset kuusimetsien maaperän hiilitaseeseen
Fenno-Skandiassa

Pro gradu-työ

Petri Salmela
Metsien ekologia ja käyttö
Metsätieteden laitos
Helsingin Yliopisto

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden osasto, metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä/Författare – Author Petri Salmela			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Metsähakkuiden vaikutukset kuusimetsien maaperän hiilitaseeseen Skandinaviassa			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji/Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika/Datum – Month and year Kesäkuu 2018	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 57
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Hiilensidonnasta on tullut globaalin ilmastonmuutoksen johdosta hyvin ajankohtainen aihe. Boreaaliset metsät kattavat 22% maapallon maa-alasta. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, vaikuttavatko metsähakkuut tasaikäisissä kuusimetsissä metsämaaperän hiilitaseeseen ja hiilivarastoihin verrattuna luonnontilaisiin metsiin pohjoismaissa (Suomi, Ruotsi ja Norja). Lisäksi tutkielmassa tarkastellaan tilannetta kahden eri ilmastoskenaarioiden valossa. Tutkimus on tehty käyttäen Yasso07 -mallia. Syötteet Yassoon on saatu FORMIT -mallista, joka hyödyntää kansallisista metsien inventoinneista saatua aineistoa.</p> <p>Tutkielman tulosten perusteella näyttäisi siltä, että metsähakkuut vaikuttavat merkittävästi maaperässä olevan hiilen kokonaismäärään sekä määrän muutokseen. Luonnontilaisissa metsissä hiilen määrän kasvu oli selvästi korkeampi, kuin tasaikäisissä talousmetsissä. Toinen merkittävä havainto saatujen tulosten perusteella on, että hiilen määrän kasvu hidastuu korkeammilla lämpötiloilla. Alhaisemman säteilypakotteen skenaario tuotti suuremman negatiivisen hiilivuon metsämaaperään, kuin korkeamman säteilypakotteen skenaario. Tulevaisuudessa hiilen määrän kertyminen maaperään tulee hidastumaan korkeamman lämpötilan vuoksi. Metsämaaperän hiilensidonta kasvaa merkittävästi, mikäli metsissä ei tehdä hakkuita.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords			
Hiilensidonta, maaperä, hiilitase, hiilivuo, kuusivaltaiset tasaikäismetsät, metsähakkuut, luonnontilaiset metsät			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällys

1. JOHDANTO.....	1
2. TEOREETTINEN TAUSTA.....	3
2.1 Hiilen kierto metsäekosysteemissä – teoreettinen viitekehys.....	3
2.2 Kokeellisia havaintoja hiilen kierrosta	4
2.2.1 Hiilitaseen kehitys kiertoaikana.....	5
2.2.2 Ympäristön ja ilmastomuutoksen vaikutus.....	5
2.2.3. Hakkuiden vaikutus metsän hiilitaseeseen	7
2.3. Metsän hiilitaseen malleista.....	8
2.3.1. Yleistä.....	8
2.3.2. FORMIT-malli puuston kasvulle.....	10
2.3.3. Yasso malli ja sen kytkentä FORMIT-malliin	14
2.3.4. FORMIT + Yasso simuloinnit.....	17
2.4. Tutkimuksen tavoite	19
3. AINEISTO JA MENETELMÄT.....	20
3.1 AINEISTO	20
3.1.1 Metsien alkutila	20
3.2 MENETELMÄT	34
4. Tulokset	36
4.1 BAU 45 Kuusivaltaiset, avohakkuin käsitellyt metsät	36
4.2 RCP 4.5 Luonnontilaiset metsät	38
4.3 BAU 26 Tasaikäiset kuusivaltaiset hoidetut metsät, joissa avohakkuu.....	39
4.4 RCP 2.6 Luonnontilaiset metsät	41
5. Tarkastelu	43
6. Päätelmät	45
Lähdeluettelo	46
Liite 1: Tutkimussuunnitelma.....	51
Liite 2: Metsien inventoinnin menetelmät Pohjoismaissa.....	51
Metsien inventointi Suomessa.....	51
Metsien inventointi Ruotsissa.....	55
Metsien inventointi Norjassa	57

Käsitteet

Ilmastonmuutos: Todettavissa oleva muutos ilmastossa, joka pysyy pitkiä aikoja, esim. vuosikymmeniä, tai pidempään. Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) määrittelee ilmastonmuutoksen muutoksen ilmastossa, joka on ihmisten suoraan, tai epäsuoraan aiheuttamaa.

Hiilitase: Metsän hiilen määrän muutos vuodessa

Hakkuutähteet: oksat, latvat, neulaset ja lehdet sekä kuolleet juuret

Bruttoprimäärituotanto (GPP): Kasvien sitoma hiili.

Nettoprimäärituotanto: (GPP) – puiden hengitys

Business as usual (BAU): Toiminta jatkuu nykyisellään.

1. JOHDANTO

Ilmaston lämpenemisen johdosta hiilen sidonta metsiin ja puutuotteisiin on yhä ajankohtaisempi aihe. Suuri osa metsien sisältämästä hiilestä sijaitsee maaperässä. Fennoskandiassa metsienhoidossa on yleisesti käytössä ns. tasaikäismalli, jossa metsä päätehakataan kiertoajan loppuksi.

Harvennuksista jäävät hakkuutähteet lisäävät karikesyötettä. Karikesyötteen lisääntyminen on kuitenkin väliaikaista. (Clarke ym. 2015; Jandl ym. 2007). Lisäksi karikkeentuotanto heikkenee harvennusten vaikutuksesta (Jandl ym. 2007).

Myös ilmastolla on vaikutusta hiilen kertymiseen maaperään. Ilmaston lämpenemisen johdosta kasvukausi pitenee, ja karikkeen maatumisen nopeutuu. Tämän seurauksena hiiltä kertyy maanpäällisiin kasveihin suhteellisesti enemmän ja maaperään vähemmän. (Grant ja Nadler 2000; Keyser ym. 2000; Karhu ym. 2010.)

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten tasaikäismallin mukaisesti suoritettavat hakkuut vaikuttavat kuusivaltaisten metsien maaperän hiilen määrään Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa. Aihetta on aiemmin tutkittu Suomessa (esim. Finér ym., 2003) sekä Ruotsissa (esim. Ågren ym., 2003). Kuusivaltaisiin metsiin keskitytään siksi, että useat metsäteollisuusyritykset ovat kiinnostuneita kuusesta eri tuotteiden raaka-aineena ja näin ollen voidaan olettaa, että kuusimetsiin sovelletaan tasaikäisen metsänhoidon mallia. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan maaperän hiiltä, koska kuten yllä todettiin, suuri osa metsien sisältämästä hiilestä sijaitsee maaperässä. Tutkimuksessa huomioidaan myös ilmaston lämpeneminen ja tuloksia verrataan luonnontilaisiin metsiin. Tutkimuksen ensimmäinen hypoteesi on, että hakkuut vähentävät maaperään kertyvää hiilen määrää. Toinen oletus on, että ilmaston lämpeneminen vähentää maaperään kertyvän hiilen määrää.

FORMIT-malli on kehitetty arvioimaan metsänhoidon ja ilmastonmuutoksen vaikutusta metsän ja metsätuotteiden hiilivarastoihin ja hiilen virtaukseen. FORMIT-malli pystyy käsittelemään suurta määrää aineistoa sekä eri ilmastonmuutos-skenaarioita.

Tässä tutkimuksessa maaperän hiilivarastoja estimoidaan Yasso07-mallilla. Karikesyöte ja eri skenaarioiden vaikutukset puustoon saadaan FORMIT-mallista, jotka syötetään Yassoon. Mallinnusta käytetään siksi, koska maaperän hiilivarastojen mittaaminen on kallista ja aikaa vievää. Tästä syystä on kehitetty useita maahiilen malleja, joita käytetään maaperässä olevan hiilivaraston estimoimiseen. Yasso on maaperän hiilen estimoimiseen kehitetty malli, joka kuvaa karikkeen maatumista ja maaperän hiilen kiertoa. Se perustuu orgaanisen aineksen kemiallisiin ominaisuuksiin ja ilmasto-oloihin. (Tuomi ym. 2011, Liski ym. 2005)

Seuraavissa kappaleissa käsitellään mm. hiilen kiertoa metsäekosysteemissä, minkälaisia kokeellisia havaintoja hiilen kierrosta on tehty sekä esitellään tässä tutkimuksessa käytettävä metsän hiilitaseen malli.

2. TEOREETTINEN TAUSTA

2.1 Hiilen kierto metsäekosysteemissä – teoreettinen viitekehys

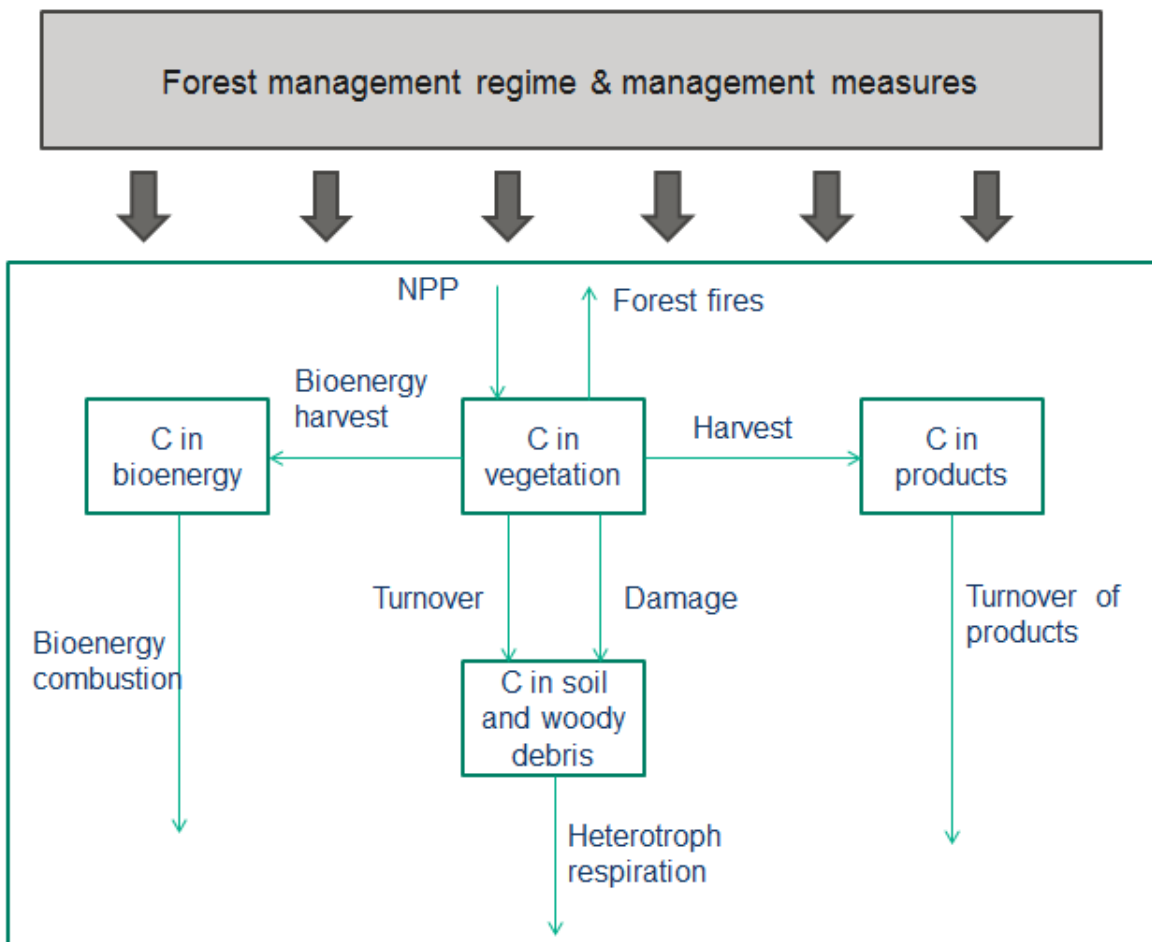
Kun kasvit yhteyttävät, ne sitovat hiilidioksidia ja tuottavat sokereita. Yhteyttämisen tuotteita käytetään soluhengitykseen tai varastoidaan kulutusta varten. Kasvit käyttävät varastoituja tuotteita esimerkiksi lisääntymiseen tai allokoivat niitä juurten, oksien tai rungon kasvuun. Kun jotain kasvin osaa ei enää tarvita, se kuolee pois (esim. neulasten ja hienojuurten kierto sekä varjossa olevat oksat) ja päättyy maahan. Kasvit siis tuottavat hiiltä maahan sekä maanalaisten, että maanpäällisten osien avulla. (Ashton, ym. 2012, s. 10-13)

Ilmakehään vapautuu orgaanista hiiltä kasvien hengityksessä. Maaperään hiiltä kertyy karikkeena. Myös herbivorit ja aluskasvillisuus tuottavat hiiltä maaperään. Maaperän eläimet sekoittavat maanpinnan orgaanista ainetta maaperän mineraalikerrokseen. Bakteerit ja saprotrofiset sienet hajottavat kasvien jäännökset. Näistä vapautuu useita erilaisia orgaanisia hiiliyhdisteitä, jotka liukenevat ja valuvat syvemmälle maaperään. Sadanta ja pH vaikuttavat liuenneen orgaanisen aineksen vuohon positiivisesti. Maaperästä vapautuu hiilidioksidia ilmakehään myös heterotrofisessa hengityksessä. Lisäksi hiilidioksidia poistuu metsäekosysteemistä hiilidioksidin valuessa pohjavesiin ja jokiin. Maaperässä tapahtuvasta, hengityksessä vapautuvasta hiilidioksidista noin puolet on peräisin juurista ja mykorritsoista. Loput vapautuneesta hengitetystä hiilidioksidista on peräisin heterotrofeista. (Ashton, ym. 2012, s. 10-13)

Karikkeen massan häviämisenopeus on pääasiassa suhteessa karikkeen kemiallisiin ja fyysisiin ominaisuuksiin (Berg ym. 2000). Lisäksi vuotuinen evapotranspiraatio on tärkein hajoamista rajoittava ilmastollinen tekijä.

Kaupallisesti hoidetuissa metsissä hiilen kierto on erilainen, kuin luonnontilaisissa metsissä. Kuvassa 1 on kuvattu hoidettujen metsien hiilen kiertoa. Puissa oleva hiili poistuu pääasiassa harvennuksissa ja avohakkuussa. Lisäksi hiiltä poistuu maaperästä heterotrofisessa hengityksessä ja metsäpaloissa. Riippuen jatkojalostuksesta, hiili voi palata ilmakehään hyvin nopeasti (puun polttaminen) tai hitaasti (sahatavaraan varastoitunut hiili).

Harvennuksessa jätetään yleensä hakkuutähteet maahan, jotka voivat nopeuttaa maatumista hetkellisesti, mutta metsän karikkeentuotanto heikkenee. Lisääntynyt lehtien ja neulasten määrä maaperässä voi nostaa maaperässä olevaa hiilen määrää ja maaperän hengitystä. Lisäksi harvennusalueelle jätettävät oksat ja latvat lisäävät hiilen määrää maaperässä. Toisaalta lisääntyneestä karikkeesta johtuva maaperässä tapahtuva hengitys lisää metsikön hiilidioksidipäästöjä. (Clarke ym. 2015; Jandl ym. 2007) Avohakkuun jälkeen metsän maaperä on hiilen lähde vähintään 14 vuoden ajan. Lisäksi maaperän hiilivarastot pienenevät merkittävästi avohakkuun jälkeisenä 20 vuoden aikana.



Kuva 1 Hiilen kierto. (FORMIT-hankkeen tutkimussuunnitelma)

2.2 Kokeellisia havaintoja hiilen kierrosta

2.2.1 Hiilitaseen kehitys kiertoaikana

Metsikön hiilitase vaihtelee suuresti metsikön eri kehitysvaiheiden välillä. Voimakkaan häiriön jälkeen (avohakkuu, tulipalo) metsästä tulee hiilen lähde. Tämä johtuu siitä, että häiriön jälkeen metsässä ei ole juuri hiiltä sitovaa kasvillisuutta. Lisäksi metsässä on tuolloin suuria määriä tuoretta kariketta, jonka seurauksena heterotrofinen hengitys lisääntyy. Kun tilalle kasvanut nuori metsä kasvaa riittävästi, sen hiilitase muuttuu negatiiviseksi ja metsästä tulee hiilivarasto. (Kolari, ym. 2004) Myös keski-ikäiset metsät ovat hiilivarastoja joilla on negatiivinen hiilitase (Valentini, ym. 2000). Vanhoissa, yli satavuotiaissa metsissä hiilitase on negatiivinen, mutta hiilen kertyminen metsään hidastuu. Tämä johtunee esimerkiksi itseharvenemisesta: vanhoja puita kuolee sienitauteihin, hyönteistuhoihin tai niitä kaatuu kovan tuulen seurauksena. Tästä huolimatta vanhojen metsien hiilivarasto voi olla hyvin suuri verrattuna keski-ikäisiin tai nuoriin metsiin. (Luyssaert, ym. 2008)

2.2.2 Ympäristön ja ilmastonmuutoksen vaikutus

Ilmastonmuutoksella on arveltu olevan sekä epäsuoria, että suoria vaikutuksia puustoon ja metsämaaperään (Hyvönen, ym. 2006). Toisaalta pelkkä maaperän lämpötila nousu ei saa aikaan merkittävää muutosta metsän hiilitaseessa (Hyungwoo, ym. 2019). Vaikuttaisi siltä, että useiden tekijöiden yhteisvaikutus saa aikaan muutokset metsän hiilitaseeseen.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksen tutkiminen on käytännössä melko haastavaa, koska pitkäaikaisia tutkimuksia ei välttämättä ole. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia voidaan myös mallintaa, mutta tällöin tulee huomioida malliin syötettävät parametrit sekä se, miten malli käyttää siihen syötettyä dataa.

Yleisimpiä käytettyjä orgaanisen aineksen kerrostumismalleja ovat CENTURY ja ROTH-C. Ne jakavat hiilen ositteisiin, joilla jokaisella on oma hajoamisnopeus. Nämä mallit selittävät hyvin paikallista ja alueellista vaihtelua nykyisiin hiilivarastoihin sekä hiilivarastojen muutoksia. Ei ole kuitenkaan konsensusta siitä, soveltuvatko nämä mallit mallintamaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia. (Davidson ja Janssens 2006) Yksi ongelma

malleissa on se, että ne olettavat nousseen lämpötilan ja CO₂ konsentraation lisäävän maaperän orgaanisen aineksen maatumista. Tämän seurauksena typen määrä maaperässä nousisi ja biomassatuotanto kasvaisi. Tälle väitteelle ei kuitenkaan ole tukea. (Hyungwoo, ym. 2019)

Lämpötila ja fotosynteesi korreloivat lehti- ja neulastasolla, mutta tavallisesti korkeampaan lämpötilaan liittyy myös korkeammat hiilidioksidipitoisuudet. Lisääntynyt CO₂ pitoisuus nostaa merkittävästi fotosynteesiä. Hiilidioksidilla voi olla voimakkaampi vaikutus korkeammassa lämpötilassa, kuin matalammassa lämpötilassa. Lisääntynyt lehtipinta-ala voi kuitenkin nostaa puuston hengityskustannuksia. Tämä johtuu siitä, että enemmän lehtipinta-alaa voi olla varjossa. Latvuton rakenne määrittää, onko nousseen lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden vaikutus hiilitaseeseen positiivinen vai negatiivinen. (Hyvönen, ym. 2006)

Lämpötilan nousun vaikutukset maaperään eivät ole yksiselitteiset. Hienojuurten tuotanto kasvaa kasvukauden pidetessä. Samalla kuitenkin hienojuurten kuolleisuus lisääntyy ja nämä vaikutukset voivat poissulkea toisensa. (Hyvönen, ym. 2006) Kuitenkin lämpötilalla on havaittu olevan merkitystä orgaanisen ja mineraalikerroksen hiilidioksidipäästöihin. Karhun ym. (2010) tutkimuksessa kohonneen lämpötilan vaikutus orgaanisen kerroksen hiilen määrään oli negatiivinen. Tutkimuksessa käytettyyn ylempään mineraalikerrokseen (0 – 15 cm) vaikutus oli pienempi ja alempaan mineraalikerrokseen (15 – 30 cm) pienin. Kaikista tuorein maaperän orgaaninen hiili oli lämpötilaherkintä ja vanhin stabiileinta. Heterotrofisen respiraation nousu oli 100 – 120%, mutta hiilivarasto ei muuttunut. Karhun löydöksiä hiilivarastojen muuttumattomuudesta tukee myös Huynwoon ym. (2019) tutkimus, jossa kohonneen maaperän lämpötilan vaikutus oli marginaalinen. Lisäksi lisääntynyt biomassatuotanto ei kompensoinut maaperän hiilen menetyksiä. Vaikuttaisi siltä, että maaperän hiilidioksidipäästöt nousevat lämpötilan noustessa.

Hiilivarastojen ennustaminen useiden vuosikymmenien päähän on hyvin epävarmaa. Tulevaisuudessa nuoret metsät toimivat hiilivarastoina ja sitovat lisää hiiltä. Epävarmaa on, ovat vanhat metsä hiilivarastoja vielä tulevaisuudessa. Metsien ekosysteemimallit indikoivat, että lyhyellä aikavälillä metsät toimivat hiilivarastoina, mutta

hiilensidonta hidastuu. Pidemmällä aikavälillä hiilensidonta voi jopa loppua kokonaan. (Hyvönen, ym. 2006)

2.2.3. Hakkuiden vaikutus metsän hiilitaseeseen

Hakkuilla on merkittävä vaikutus maaperän hiilitaseeseen. Pelkässä runkojen poistossa hakkuutähteet jäävät maaperään. Lisääntynyt neulasten ja lehtien määrä maaperässä nostaa maaperän hengitystä, joka nostaa hetkellisesti maaperän hiilidioksidipäästöjä. (Clarke, ym. 2015) Neulasten jättämisellä maaperään ei kuitenkaan ole havaittu olevan vaikutusta maaperän hiilimäärään. Harvennuksissa poistettava neulasmäärä on hyvin vähäinen verrattuna koko kasvukierron neulasmäärään, joka saattaa selittää neulastenpoiston vähäisen vaikutuksen. (Ågren ja Hyvönen 2003) Vaikka hiilen määrä maaperässä nousee hetkellisesti hakkuiden jälkeen, niin hiilen määrä maaperässä vähenee pidemmällä aikavälillä (Olsson, ym. 1996).

Harvennus voi hetkellisesti nopeuttaa maatumista, koska metsän maaperä on tällöin lämpimämpi lisääntyneen valon johdosta. (Clarke ym. 2015; Jandl ym. 2007.) Tilanne ei ole kuitenkaan pysyvä ja metsikön mikroilmasto palautuu ennalleen ajan kuluessa. Jos harvennustiheys on suuri ja harvennuksien intensiteetti korkea, mikroilmasto voi pysyä muuttuneessa tilassa pidempään. Harvennusten vaikutuksesta myös karikkeentuotanto heikkenee. (Jandl, ym. 2007.)

Ågrenin ja Hyvösen (2003) simulaatiotutkimuksessa hiilen määrä maaperässä väheni keskimäärin 0,4 Tg vuodessa 150 vuoden simuloinnin aikana. Yli puolet menetetyistä hiilestä oli peräisin kuusivaltaisista metsistä. Lisäksi, Olssonin ym. (1996) tutkimuksessa maaperän hiilivarastoa mitattiin 15 – 16 vuotta harvennuksen jälkeen. Maaperän hiilivarasto pieneni 17 – 22 % harvennusten vaikutuksesta. Useat tutkimukset tukevat oletusta, että hiilen määrä maaperässä vähenee hakkuiden vaikutuksesta (esim. Olsson, ym. 1996, Vesterdahl, ym. 1995, Ågren ja Hyvönen 2003)

2.3. Metsän hiilitaseen malleista

2.3.1. Yleistä

Mallintamisen tavoitteet ovat keskeinen osa mallintamista. Tavoitteet vaikuttavat siihen, minkälaista mallinnusstrategiaa noudatetaan. Metsämallintamisen käyttäjäryhmät on jaettu kolmeen osaan: tutkijat, metsätalouden harjoittajat ja johtajat sekä yhteiskunnallinen hallinto. Eri käyttäjäryhmillä on erilaiset tarpeet mallintamisen suhteen. Aiemmin mallintaminen keskittyi lähinnä puuntuotantoon. Uusia lähestymistapoja on kuitenkin tullut eri ammattikuntien ja tieteenalojen tarpeisiin. (Amaro ym. 2003)

Aineiston suhteen joudutaan usein tekemään kompromisseja. Toisaalta olisi hyvä saada mahdollisimman laaja aineisto, mutta tällöin aineiston laatu kärsii. Mikäli aineiston keruussa panostetaan laatuun, aineiston määrä voi jäädä vähäiseksi. Tästä johtuen olisi hyvä tietää ennen kuin aineistoa kerätään, että panostetaanko laatuun vai määrään. Aineiston määrä ja laatu vaikuttavat mallien tarkkuuteen. Tarkkuutta voi parantaa keräämällä enemmän aineistoa, hankkimalla laadukkaampaa aineistoa tai parantamalla jo olemassa olevia malleja. (Amaro ym. 2003)

Metsänhoidon mallien kategoriat karkeasti jaoteltuna ovat:

- Inventoinnin päivittäminen
- Metsänhoidon suunnittelu
- Vaihtoehtoisten metsänhoitotapojen arviointi
- Hakkuiden aikataulutus

Kasvun ja tuotoksen informaatiota voidaan soveltaa useisiin eri tarkoituksiin. Kuitenkin tarvitaan useampia mallintamisen lähestymistapoja, sillä yksittäinen mallinnustapa ei ole välttämättä optimaalinen jokaiseen sovellukseen. Kasvu ja tuotosmallit voidaan jakaa metsikön malleihin sekä puumalleihin. Metsikön mallit voivat käyttää aggregoituja arvoja tai kokoluokkainformaatiota. Puumallit voivat olla paikkariippuvaisia tai -riippumattomia. (Amaro ym. 2003)

Metsikkömallit ennustavat laskettavissa olevia suureita kuten tilavuutta, pohjapinta-alaa sekä esimerkiksi puiden lukumäärää hehtaarilla. Metsikkömalleihin syötetään puiden ikä, kasvupaikkaindeksi ja puiden tiheys (tai pohjapinta-ala). Puumallit ennustavat metsikön kasvua ja tuotosta mallintamalla yksittäisiä puita ja aggregoimalla tulokset vastaamaan koko metsikköä. Puunkasvun tunnuksia ovat esimerkiksi puun pituuskasvu ja rinnankorkeusläpimitan kasvu. Paikkariippuvaisissa malleissa jokaisella mallinnetulla puulla on koordinoitu paikka. Jokaisen puun kasvu ennustetaan puun ominaisuuksien, sekä kasvupaikan laadun avulla. Myös naapuripuiden kilpailu huomioidaan. Paikkariippumattomat mallit ennustavat puun kasvua yksittäisten puiden tai kokoluokkien avulla. (Amaro ym. 2003)

On olemassa useita malleja, joilla voidaan analysoida laaja-alaisesti ilmastonmuutoksen vaikutuksia ekosysteemeihin. Esimerkiksi maailmanlaajuisista kasvien dynamiikkaa simuloivia malleja on kehitetty tätä tarkoitusta varten (Dynamic Global Vegetation Models, DVGM). Nämä mallit simuloivat niihin linkitettyjä muutoksia ekosysteemin toiminnassa sekä kasvuston rakenteessa, kun ilman hiilidioksidipitoisuutta ja ilmastoa muutetaan. (Cramer, ym. 2001, Mäkelä, ym. 2015) Lisäksi on olemassa malleja, jotka perustuvat kansallisista metsien inventoinneista saatuun aineistoon. Näissä on kuitenkin usein ongelmana se, etteivät ne reagoi ilmastoon.

DVGM-malleissa fysiologisten, biofyysisten ja biogeokemiallisten prosessien toiminta on melko mekaanista. Nämä prosessit sisältävät fotosynteesin, respiration, latvuksien energiabalanssin, latvurajan konduktanssin sekä hiilen ja typen allokoinnin. Mallien välillä on eroja niiden osa-alueiden painotuksissa. Esimerkiksi yksi malli saattaa painottaa kasvien fysiologian kuvaamista, toinen voi olla ensisijaisesti kasvillisuuden dynamiikan malli. Kuitenkin kaikki DVGM-mallit käsittelevät kasvipeitettä siten, että kasvipeite on jaettu eri ositteisiin. (Cramer, ym. 2001)

DVGM-mallien karikesyöte saadaan akkumuloidusta biomassasta. Osa kasvuston biomassasta päätyy maahan karikkeena. Karike hajoaa mallien ravinnekierto-moduuleissa. Nämä moduulit sisältävät maatumisnopeuden, ravinteiden kierron, maaperän respiration ja typen nettomineralisaation. (Cramer, ym. 2001)

EFISCEN (European forest information scenario model) on kehitetty mallintamaan metsien resurssien kehitystä. Malli toimii alueellisesta tasosta kattamaan koko Euroopan. Mallilla voidaan ennustaa metsävaroja 50 – 60 vuoden päähän. Syötteenä toimii kansallisista metsien inventoinneista saatu aineisto. Syötettyjen tietojen perusteella pystytään mallintamaan metsävarojen kehitystä eri skenaarioissa. Pääsääntöisesti skenaarioiden muuttujia ovat eri metsänkäsittelytavat. Mallista saadaan ulos tyypillistä metsävaratietoa kuten esimerkiksi lajit, pinta-ala, tilavuus, ym. Myös joitain ekosysteemipalveluita, kuten hiilen kierto, pystytään mallintamaan. (EFI 2019)

EFISCENillä on myös mahdollista simuloida maaperän hiilen dynamiikkaa. Tämä tapahtuu hyödyntämällä YASSO-mallia (kuvattu alla myöhemmin). Syötteet YASSOon saadaan siten, että EFISCEN mallintaa kuolleisuutta, joka voidaan määrittää tapauskohtaisesti. Kuolleisuus määritetään prosentuaalisesti. Lisäksi hakkuista tulee hakkuutähteitä, jotka voidaan mallissa jättää maaperään maatumään tai kerätä pois. (EFI 2019)

2.3.2. FORMIT-malli puuston kasvulle

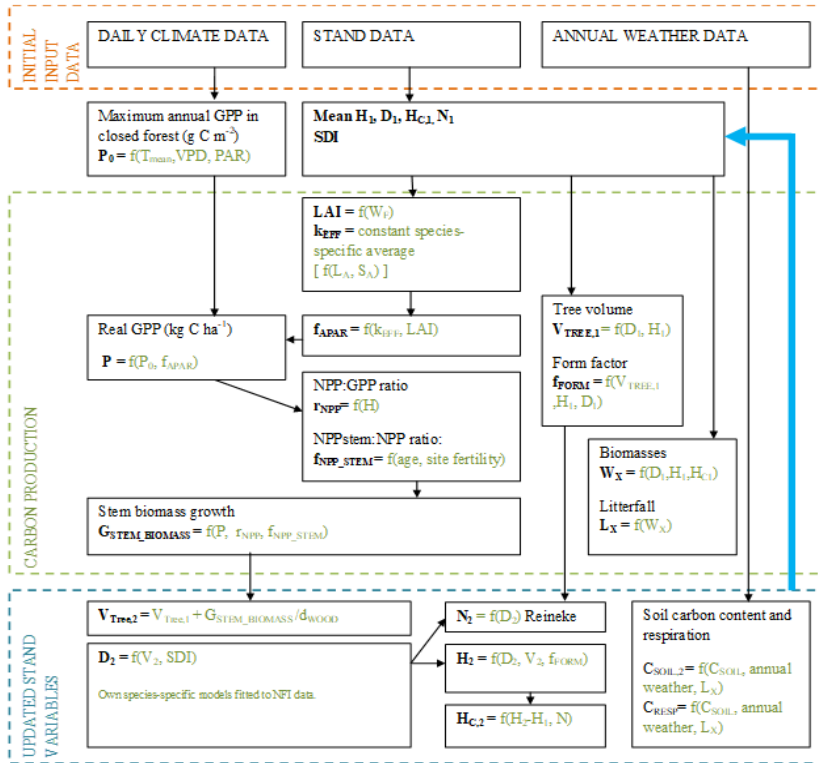
FORMIT -projektin tavoitteena oli arvioida metsänhoidon ja ilmastonmuutoksen vaikutusta metsän ja metsätuotteiden hiilivarastoihin ja hiilen virtaukseen. Tämän toteuttamiseksi projektiin tarvittiin metsänkasvua simuloiva malli, joka huomioi metsänhoidon vaikutukset ja ilmastonmuutoksen. Lisäksi mallin tuli pystyä käsittelemään suurta määrää aineistoa ja ilmastonmuutos-skenaarioita. Simulointien tuloksien täytyi pitää sisällään tärkeimpien metsätuotteiden joukko. Vaikka useita metsänkasvua estimoivia malleja on olemassa, ne eivät sopineet projektiin sellaisenaan. Jotkut mallit pitivät kasvustoa vakiona, mikä ei huomioi metsänhoidon vaikutusta. Toisaalta ne, jotka huomioivat metsänhoidon, eivät huomioi ilmastonmuutosta. FORMIT -projektissa kehitettiin uusi malli, joka hyödyntää aineistoa kansallisista metsien inventoinneista. Tavoitteena oli kuvailla oikeasti olemassa olevia metsäresursseja ja metsän kasvua. Tähän yhdistettiin prosessipohjainen, tiivistelmätyylinen lähestymistapa ilmaston vaikutuksiin. Näillä parametreilla estimoitaisiin

runkopuun kasvua sekä nettoprimäärituotantoa. FORMIT -malli estimoii maanpäälisiä ja -alaisia hiilivarastoja sekä hiilen virtauksia metsikössä. Se estimoii myös puutavaran määrää ja metsän biomassaa. Mallin on kehittänyt Annikki Mäkelä, Sanna Härkönen ja Frank Berninger. (Härkönen, ym. 2015)

FORMIT-malli tuottaa maanpäälisen hiilivaraston ja hiilen vaihdunnan arvion halutulle alueelle. Mallilla saadaan estimoitua myös puuntuotantoa sekä metsän biomassaa halutulla ilmastoskenaariolla. FORMIT metsän kasvun simulaattori käyttää useita alueellisia alamalleja (Kuva 2), mitkä perustuvat aiempaan tutkimukseen tai uusia malleja jotka on sovitettu maakohtaiseen metsien inventointi dataan.

Mallin parametrisoinnissa on käytetty 13 eri euroopan valtion kansallisista metsien inventoinneista saatua aineistoa. Aineisto laajennettiin kattamaan koko Euroopan. Metsät on jaettu seitsemään (7) eri ryhmään, jotka perustuvat ekologiseen lajien jaotteluun. Metsänkäsittely on jaettu kuuteen eri tapaan, joissa muuttujina ovat hakkuiden ajoitus sekä intensiteetti. Rungon kasvu määräytyy nettoprimäärituotannosta, joka estimoidaan bruttoprimäärituotannosta. Bruttoprimäärituotannon laskuun käytetään LUE (Ligh-Use Efficiency) mallia. Maaperän hiilen dynamiikkaan kuvaamiseen käytetään Yasso07 mallia, jota tulen hyödyntämään tässä tutkielmassa. (Härkönen, ym. 2015)

Malliin syötetään päivittäiset ilmastotiedot, puustotiedot sekä säätiedot. Ilmastotietojen avulla voidaan määrittää suurin mahdollinen bruttoprimäärituotanto. Puustotiedot ovat: keskimääräinen pituus, rinnankorkeusläpimitta, latvusrajan korkeus, puiden lukumäärä sekä pohjapinta-ala. Puustotunnusten avulla malli laskee lehtipinta-alan, josta johdetaan se osuus auringonsäteilystä, jonka kasvit pystyvät hyödyntämään. Hyödynnettyä auringonsäteilyä käytetään laskemaan toteutunut bruttoprimäärituotanto. Tästä johdetaan nettoprimäärituotanto, jonka avulla saadaan rungon kasvu. Rungon kasvun avulla johdetaan tilavuuskasvu. Puustotunnuksista saadaan myös lähtötilanteen tilavuus, muotokerroin, biomassaa sekä kariketuotanto. Kariketuotanto syötetään Yassoon. Taulukossa 1 on kuvattu simulaattorin alamallit, sekä se, mihin ne perustuvat.



Kuva 2 Simulaattorin rakenne. (Härkönen ym. 2015)

Simulaattori on jaettu alueellisiin osiin:

- 1. Pohjois-Eurooppa:** Tanska, Viro, Suomi, Latvia, Liettua, Norja, Ruotsi ja Islanti
- 2. Keski-Eurooppa. a) Länsi:** Belgia, Ranska, Irlanti, Liechtenstein, Alankomaat, Sveitsi, Yhdistynyt kuningaskunta, Andorra ja Monaco. **B) Itä:** Itävalta, Tšekki, Saksa, Unkari, Puola, Romania ja Slovakia
- 3. Etelä-Eurooppa:** Italia, Portugali, Espanja, San Marino, Vatikaani, Albania, Bosnia ja Hertsegovina, Bulgaria, Kroatia, Kypros, Kreikka, Malta, Montenegro, Serbia, Slovenia ja Makedonia

RESPONSE VARIABLE	GENERAL MODEL	REGIONAL APPLICATION IN FORMIT PROJECT	EXAMPLE: FINNISH SIMULATOR	EQN. REF. NUMBER
Annual maximum GPP	LUE model (Mäkelä et al. 2008) $GPP_{MAX} = f(T, VPD, \text{global radiation})$	Regional model parameters from Mäkelä et al. 2008	Parameters for Hyytiälä from Mäkelä et al. 2008 are used	1
Annual real GPP	Lambert-Beer law $GPP = f(GPP_{MAX}, f_{APAR}, k_{EFF})$	Species-specific averages of k_{EFF}	Averages of k_{EFF} estimated for Scots pine, Norway spruce and birch sites are taken from earlier study (Härkönen et al. 2010)	4
NPP:GPP ratio & NPP to stem (%)	$NPP_GPP_ratio = f(\text{stand mean } H)$ & $NPP_{stem\%} = f(\text{site fertility, stand age})$	Models parameterized based on measured NPP and simulated GPP values or parameters from earlier studies	Parameterised based on PipeQual simulations (Härkönen et al. 2010)	6, 7
Biomasses (foliage, stem etc)	-	Existing models from earlier studies	Repola (2008 and 2009) biomass models: $W_i = f(H_{TREE}, D_{TREE}, H_{C,TREE})$	9, 10
Stem volume	-	Existing models from earlier studies	Laasasenaho volume model (1982), $V_{TREE} = f(H_{TREE}, D_{TREE})$	11
Annual growth of stem volume, height and diameter	-	Own regional models fitted (NFI data) to describe relationship of mean diameter, stem volume and stand density index. The model is applied for defining new mean diameter, once the new stem volume is estimated based on annual NPP.	Fitting new model $D_2 = f(V_2, SDI)$ → $H_2 = f(\text{form factor}, D_2, V_2)$	16
Annual crown base rise	Valentine et al. (1994), Valentine and Mäkelä (2005) $\Delta H_C = f(N, \Delta H)$, species-specific parameters	Used only in Finnish biomass models		19
Stand density	Reineke's rule (e.g. Pretzsch & Pieber 2005) $N_2 = f(D_2)$, species-specific parameters			20
Litterfall	-	Turnover rates for biomass compartments to be searched from literature	Annual turnover rates by Liski et al. (2005), $L_i = f(W_i)$	22
NEE	Yasso07 model (Tuomi et al. 2008, 2009) $NEE = f(NPP, \text{litterfall, weather})$	Regional parameter sets	Parameters used in Finnish Greenhouse Gas Inventory (listed e.g in Härkönen et al. 2011)	24

Taulukko 1 Kuvaus simulaattiorin alamalleista. (Härkönen ym. 2015)

Puutuotteiden kysyntä on simuloitu EFI-GTM (European Forest Institute Global Trade Model) -mallilla. Malli koostuu kilpailevista ekonomisista ryhmistä, jotka ostavat ja myyvät metsäalan tuotteita silloin, kun se hyödyttää niiden ekonomista hyvinvointia. Mallissa oletetaan, että kuluttajat maksimoivat puutuotteiden käytön ja tuottajat maksimoivat tuottoja. Lisäksi malli olettaa kilpailun olevan täydellistä. Jokaiselle alueelle on määritetty kysyntäfunktiot lopputuotteille sekä tarjontafunktiot jätepaperille ja puutavaralle. Muut kuin metsäsektori on huomioitu mallissa epäsuorasti. (Kallio, ym. 2004)

Suomessa kuusimetsien hakkuut määräytyvät kysynnän perusteella. Hakkuissa noudatetaan Tapion ohjeita. BAU-skenaariossa kokonaishakkuut määräytyvät kysynnän mukaan. Kysyntä on pienempää kuin Tapion ohjeisiin perustuva potentiaalinen tarjonta.

Mallissa on 61 aluetta, jotka kattavat koko maailman. Malli keskittyy erityisesti Eurooppaan. Puukategorioita on 6, metsäteollisuuden tuotteita 26 ja kierrätetyn paperin luokkia on 4. (Kallio, ym. 2004)

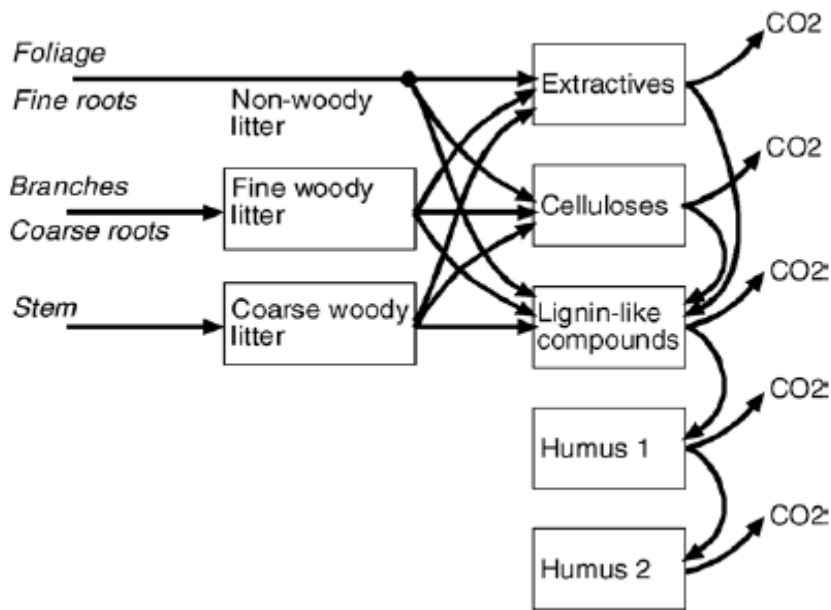
2.3.3. Yasso malli ja sen kytkentä FORMIT-malliin

Yasso on maaperän hiilen estimoimiseen kehitetty malli, joka kuvaa karikkeen maatumista ja maaperän hiilen kiertoa. Se perustuu orgaanisen aineksen kemiallisiin ominaisuuksiin ja ilmasto-oloihin. (Tuomi, ym. 2011, Liski ym. 2005) Yasso estimoii maaperässä olevan hiilen muutoksia karikesyötteen sekä säädatan avulla (Härkönen, ym. 2015).

Yasso käyttää viittä eri oletusta mallinnukseen. Nämä ovat: 1) Karike ja maaperän orgaaninen aines rakentuvat eri yhdisteistä, jotka ovat riippumattomia toisistaan. Yhdisteen hajoamisnopeus hidastuu sen muuttuessa monimutkaisemmaksi. 2) Puumaisen karikkeen maatuminen ei riipu sen kemiallisesta rakenteesta. Perusteluna tälle on se, että puumainen karike ei altistu mikrobien aiheuttamalle hajoamiselle heti. 3) Hajoavista yhdisteistä katoaa tietty määrä massaa tietyn ajan kuluessa. 4) Osa hajoavasta massasta poistuu maaperästä

heterotrofisen respiraation seurauksena. Myös huuhtoutumisen seurauksena katoaa osa massasta. 5) Lämpötila ja kosteusolosuhteet vaikuttavat mikrobien toimintaan, joka puolestaan vaikuttaa hajoamisnopeuteen. Humuksen maatumisen oletetaan olevan hitaampaa, kuin enemmän epävakaiden yhdisteiden. (Liski ym. 2005)

Malli jakaa hajoavan karikkeen viiteen ositteeseen (Kuva 3). Jokaisella ositteella on oma hajoamisnopeus. Puumainen karike on jaettu kahteen ositteeseen läpimitan perusteella. Maaperään päätyvän karikkeen katsotaan kuuluvan yhteen seuraavista: uuteaineet (extractives), selluloosa ja ligniinin tapaiset yhdisteet. Puumainen karike jaetaan hienoon puumaiseen karikkeeseen (oksat ja karkeat juuret) ja karkeaan puumaiseen karikkeeseen (runko). Puumaisesta karikkeesta fraktoituu tietyllä nopeudella yhdisteitä, jotka siirtyvät yhteen kolmesta hajoamisositteesta. Näiden hajotessa syntyy yhdisteitä, jotka edustavat hitaammine hajoavia ositteita, ja lisäksi osa poistuu maaperästä hiilidioksidina (CO₂). Lämpötila ja kuivuus määrittävät karikkeen hajoamisnopeuden, joka määräytyy mikrobisen toiminnan kautta. (Liski ym. 2005)

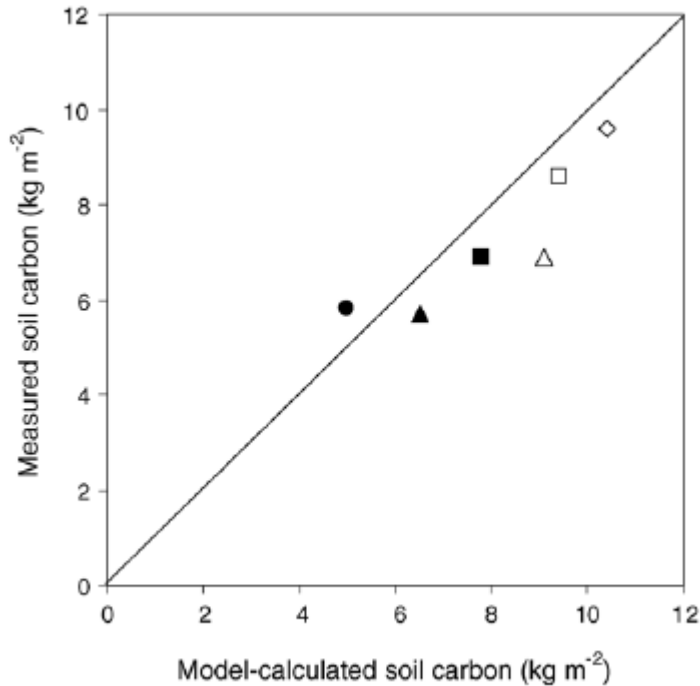


Kuva 3 Mallin vuokaavio (Liski, ym. 2005)

Liski ym. (2005) määrittivät hajoamisnopeuden useiden Ruotsin Jådraåsissa suoritettujen karikepussikokeiden perusteella. Kokeessa käytettiin kuusen (*Pinus sylvestris*) neulasia. Siinä määritettiin hajoamisnopeudet uuteaineille, selluloosalle sekä ligniinin kaltaisille yhdisteille. Myös siirtonopeudet ositteiden välillä määritettiin kokeessa. (Liski;Palosuo, ym. 2005) tutkivat lehtien hajoamisnopeutta kahdella kokella, jossa käytettiin rauduskoivun (*Betula pendula*) lehtiä. Tutkimuksessa verrattiin mitattuja arvoja jäljellä oleville yhdisteiden määrille mallinnuksesta saatuihin. Humuksen hajoamisnopeus määritettiin tutkijoiden mukaan käyttämällä aiemmin mitattua aineistoa Etelä-Suomesta. Ilmaston vaikutus määritettiin mittaamalla männyn (*Pinus sylvestris*) neulaskarikkeen hajoamista aiemmassa tutkimuksessa. Mittauskohteet olivat 34 eri paikassa Euroopassa.

Liski ym. (2005) havaitsivat, että malli on kaikista herkin ligniinien ja humus 1:den hajoamisositteiden muutoksille sekä humus 1:den ja humus 2:den hajoamisnopeuksille. Syynä tähän on se, että nämä parametrit määrittävät humuksen määrän mallissa ja humuksessa on suurin osa (83%) mallin estimoimasta maaperän hiilestä. Myös eri kariketyyppien ositteet vaikuttivat maahiilen määrään. Syyksi arvioitiin maahiilen määrän olevan suoraan verrannollinen karikesyötteeseen. Simuloidussa metsässä karkeaa puumaista kariketta oli pieni osa kokonaiskarikkeesta, minkä takia hieno puumainen karike ja ei puumainen karike olivat tärkeämpiä maaperän hiilimäärän kannalta.

Liski ym. (2005) testasivat Yasson validiteettia linkittämällä Yasson MOTTIin. MOTTI on empiirinen metsikön simulaattori, jolla estimoitiin karikesyöte maaperään. Estimoinnissa käytettiin eri metsätyyppejä ja puulajeja. Data simuloiteihin oli kerätty aiemmista tutkimuksista Hyytiälän alueelta. Mallinnuksesta saatuja tuloksia verrattiin mitattuihin arvoihin. Mallinnetut arvot olivat keskimäärin 15% korkeampia kuin mitatut (kuva 4). Ainoa poikkeus oli mäntyvaltaiset kuivan kankaan metsät.



Kuva 4. Mallinnetut ja mitatut maahiilen estimaatit eri metsätyypeillä ja puulajeilla Etelä-Suomessa. Mustat symbolit kuvaavat mäntyvaltaisia metsiä ja valkoiset kuusivaltaisia. Ympyrä kuvaa kuivaa kangasta, kolmio tuoretta kangasta, neliö kuivahkoa kangasta ja timantti lehtomaista kangasta. (Liski, ym. 2005)

2.3.4. FORMIT + Yasso simuloinnit

FORMIT-malliin syötetään eri muuttujia (Taulukko 4), joiden avulla estimoidaan hiilivarastoa ja -vuota. Malliin syötettävät puustotiedot ovat: keskipituus (H), rinnankorkeusläpimitan keskiarvo (D), keskimääräinen pituus latvuksen alarajaan (Hc) sekä metsikön tiheys (N). Taulukko 5 kuvaa Yassoon vaadittavaa säädataa. Yassoon syötettävä säädata on keskimääräinen vuosittainen lämpötila, vuosittainen sadanta sekä kuukausittainen minimi- ja maksimilämpötila. Lisäksi Yassoon syötetään pituus- ja leveysaste sekä vuosi.

Tutkimuksessa tulen käyttämään kahta eri ilmastoskenaariota (RCP 2.6 ja RCP 4.5). RCP tarkoittaa tyypillistä konsentraatiopolkua (Representative Concentration Pathway). Luvut RCP:n perässä tarkoittavat säteilypakotetta (W/m²) vuonna 2100. RCP 2.6 edustaa

hyvin pientä hiilidioksidipäästöjen ja lämpötilan nousua. Siinä lämpötila nousee 1,5 °C vuoden 1850 olosuhteista vuosiin 2080-2100 mennessä. Mallissa käytetty skenaario RCP 8,5 nostaa lämpötilaa 4,4 °C. RCP 4,5 lämpötila nousee RCP 2,6:n ja RCP 8,5:n välille. (Giorgetta, ym. 2013)

Variable	Site ID	LAT_LON of MODIS grid mid-point	Measuring year	Main tree species	Mean height (m)	Mean diameter (cm)	Mean crown base height (m)	Number of trees/ha	Stand basal area (m ² ha ⁻¹)	Stand age (years)	Site fertility class / site index
Name	<i>SITE_ID</i>	<i>LAT_LON</i>	<i>Meas_year</i>	<i>S_{Main}</i>	<i>H</i>	<i>D</i>	<i>H_C</i>	<i>N</i>	<i>B_A</i>	<i>t</i>	<i>S_C</i>

Taulukko 2 FORMIT mallin syötteen. (Härkönen, ym. 2015)

Variable	Site ID	LAT_LON of MODIS grid mid-point	Year	Mean annual temperature (°C)	Annual rainfall (mm)	Minimum of monthly mean temperatures (°C)	Maximum of monthly mean temperatures (°C)
Name	<i>SITE_ID</i>	<i>LAT_LON</i>	<i>Year</i>	<i>T_{mean}</i>	<i>R</i>	<i>T_{min, month}</i>	<i>T_{max, month}</i>

Taulukko 3 Yassoon vaadittava säädata (Härkönen, ym. 2015)

2.4. Tutkimuksen tavoite

Valitsin tutkimuksen kohteeksi Pohjoismaiset kuusimetsät, koska metsätaloudessa usein suositaan kuusta avohakatuilla alueilla. Kirjallisuuskatsauksen perusteella esitän tutkimukselleni kaksi hypoteesia:

- 1) Hakkuut tulevat vähentämään maaperään kertyvän hiilen määrää kuusivaltaisissa metsissä Pohjoismaissa
- 2) Ilmaston lämpeneminen vähentää maaperään kertyvää hiilen määrää kuusivaltaisissa metsissä Pohjoismaissa

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää toteutuvatko hypoteesit 1 ja 2 Yasso-mallilla toteutettavissa simuloinneissa. Tutkimuksen kohteena ovat kuusivaltaiset metsät Pohjoismaissa (Suomi, Ruotsi ja Norja). Kuusivaltaisten metsien aineisto suodatetaan FORMIT-mallin tuottamasta aineistosta ja syötetään Yassoon. Käytettävät ilmastoskenaariot ovat RCP 2,6 ja 4,5.

Oma tehtäväni on valita valmiista simuloinneista oikeat ositteet ja syöttää ne Yassoon. Yassoon syötetään lisäksi ilmastoskenaariot, jotka olen saanut valmiina. Tämän jälkeen suoritan Yasso-simuloinnit. Analysoin tulokset vertailemalla niitä graafisesti.

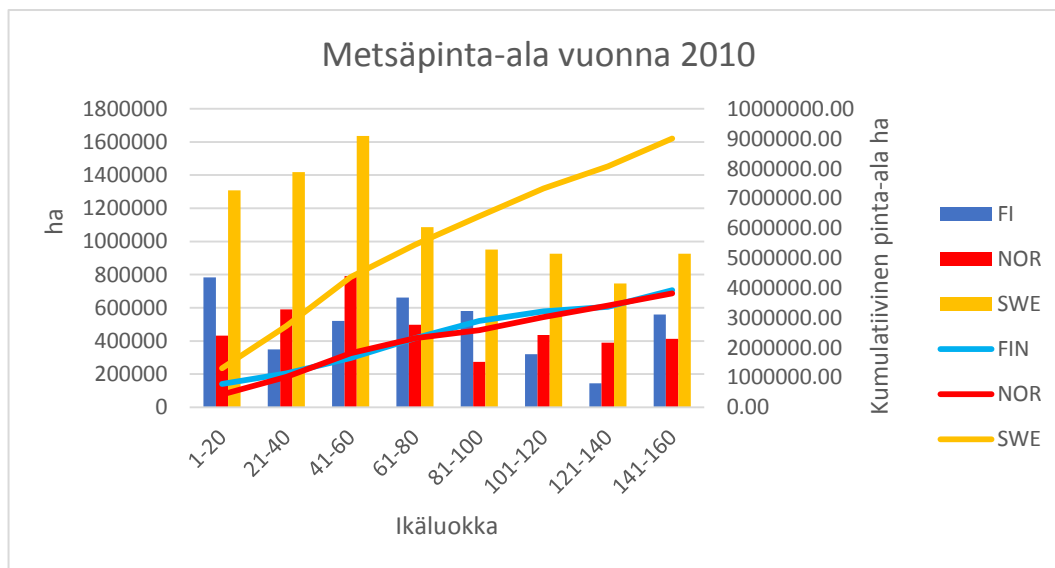
3.AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 AINEISTO

FORMIT-malliin syötettävät puustotiedot (tässä tutkimuksessa) ovat peräisin Suomen ja Norjan kansallisista metsien inventoinneista (kuvattu liitteessä 2). Tulokset Suomen metsien inventoinnista on yleistetty Ruotsiin. Ilmastoskenaariot ovat peräisin Max-Planck-Institute Earth System Model (MPI-ESM) –mallista

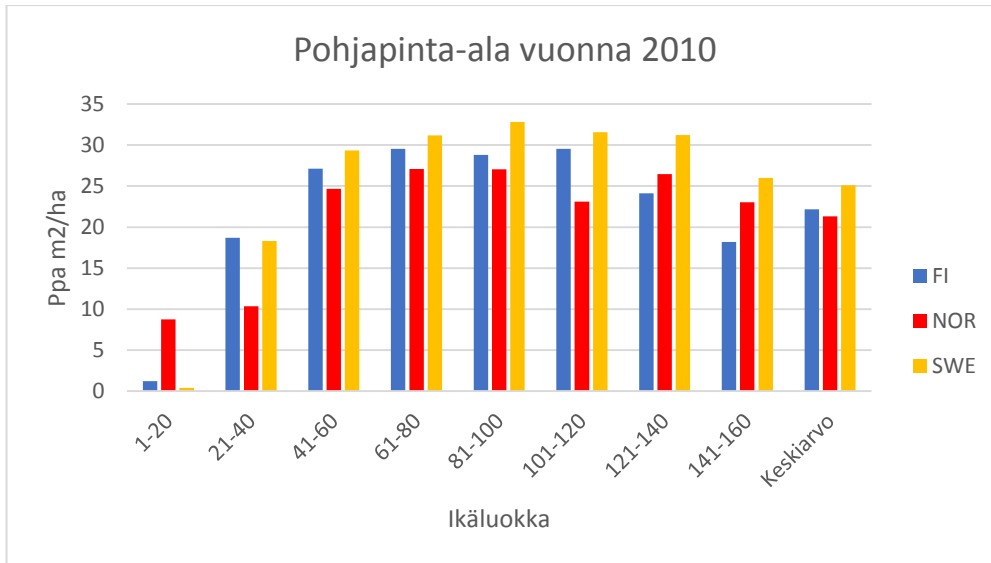
3.1.1 Metsien alkutila

Metsien alkutila tasaikäisissä kuusivaltaisissa metsissä, joissa yhtenäinen avohakkuu



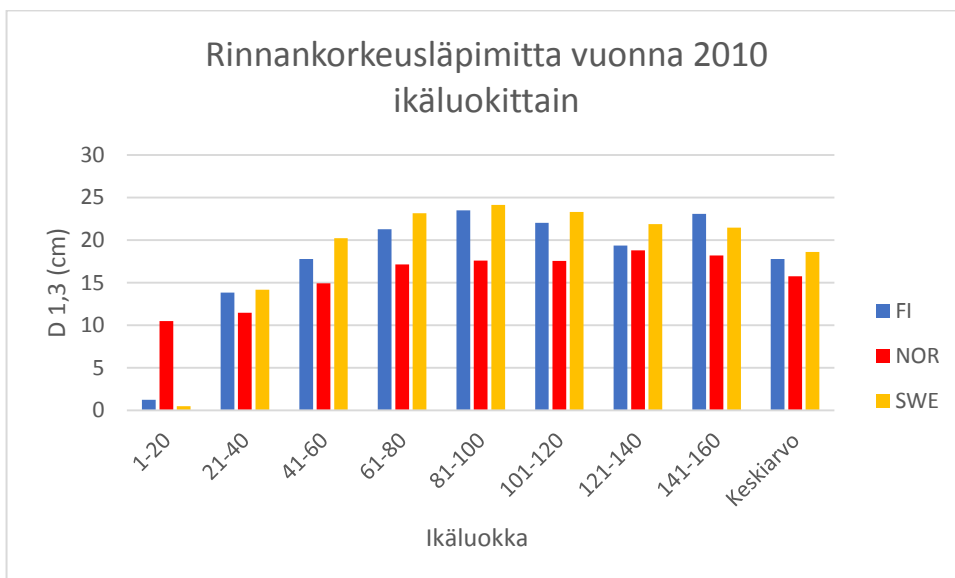
Kuva 5 Kuusivaltaisten tasaikäismetsiköiden pinta-ala vuonna 2010 Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa.

Kuva 10 havainnollistaa pinta-alaa ikäluokittain Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa. Suomessa ja Norjassa tasaikäisten, kuusivaltaisten metsien pinta-ala on n. 3,8 miljoonaa hehtaaria, Ruotsissa n. 9 miljoonaa hehtaaria.



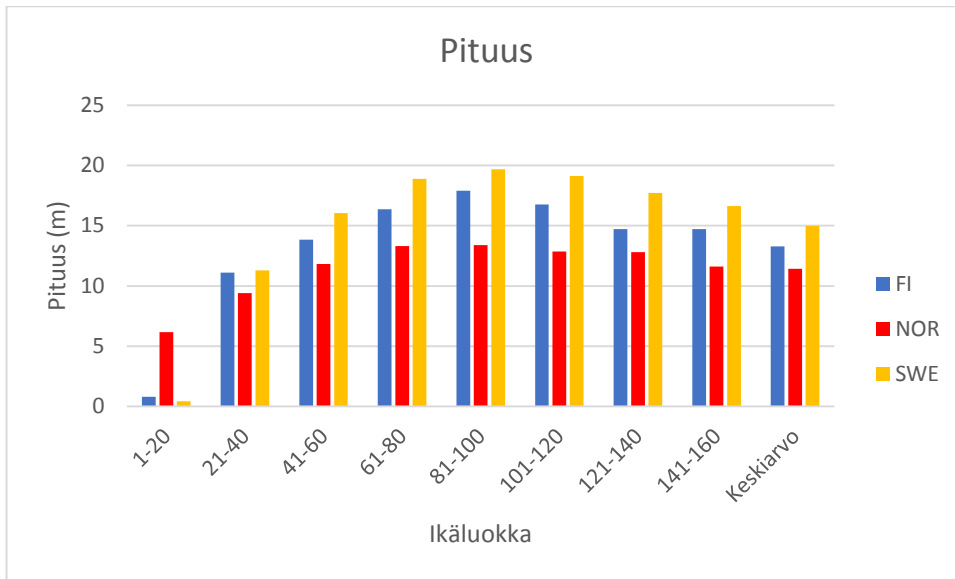
Kuva 6 Kuusivaltaisten tasaikäismetsiköiden pohjapinta-ala Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa.

Metsien pohjapinta-alan keskiarvo (kuva 11) oli vuonna 2010 22,16 m² Suomessa, 21,31 m² Norjassa ja 25,10 m² Ruotsissa. Ruotsissa on kaikissa muissa, paitsi kahdessa ensimmäisessä ikäluokassa (1-20 ja 21-40 vuotta) suurin pohjapinta-ala. Keskimäärin Suomen pohjapinta-ala on korkeampi, kuin Norjassa, mutta erityisesti vanhoissa metsissä Suomen pohjapinta-ala on alhaisempi, kuin Ruotsissa tai Norjassa.



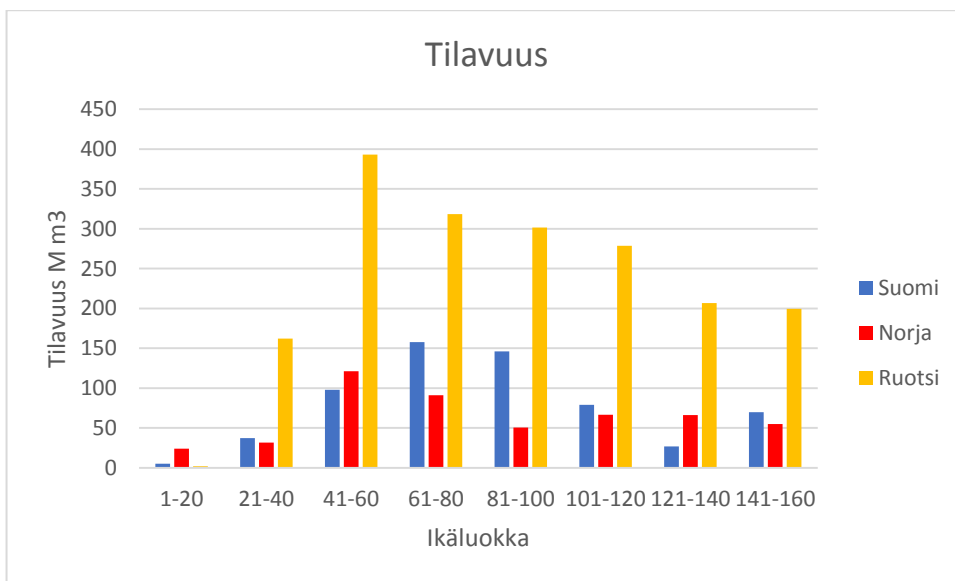
Kuva 7 Kuusivaltaisten tasaikäismetsiköiden keskimääräinen rungon rinnankorkeusläpimitta vuonna 2010 Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa.

Rinnankorkeusläpimitta vuonna 2010 oli keskimäärin 17,76 cm Suomessa, 15,76 cm Norjassa ja 18,59 cm Ruotsissa. Ruotsissa rinnankorkeusläpimitta on korkein kaikissa muissa, paitsi ensimmäisessä ikäluokassa. Norjassa rinnankorkeusläpimitta on alhaisin muissa, paitsi ensimmäisessä ikäluokassa.



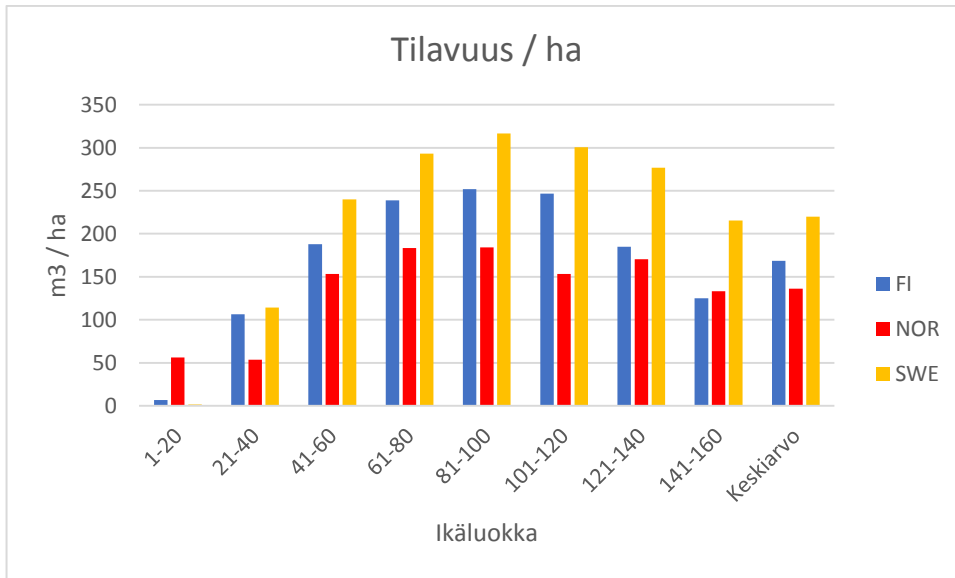
Kuva 8 Kuusivaltaisten tasaikäismetsiköiden pituus Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010

Keskimääräinen metsien pituus vuonna 2010 oli 13,3 m Suomessa, 11,4 m Norjassa ja 15,0 m Ruotsissa. Puiden pituus oli korkein Ruotsissa kaikissa muissa, paitsi ensimmäisessä ikäluokassa.



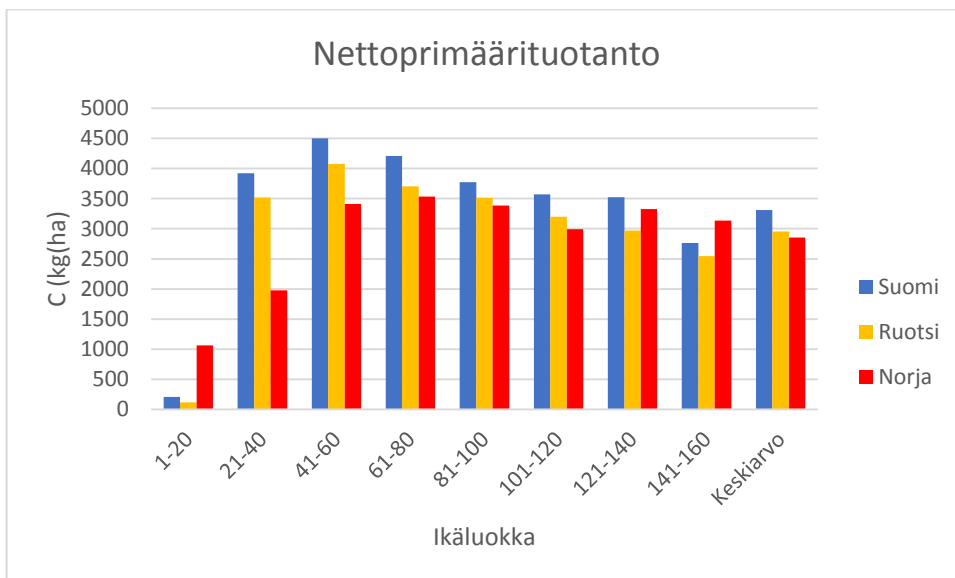
Kuva 9 Kuusivaltaisten tasaikäismetsiköiden tilavuus Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa 2010.

Metsien kokonaistilavuus on selkeästi korkeampi Ruotsissa, kuin Suomessa tai Norjassa. Suomessa näyttäisi olevan hieman korkeampi metsien tilavuus, kuin Norjassa.



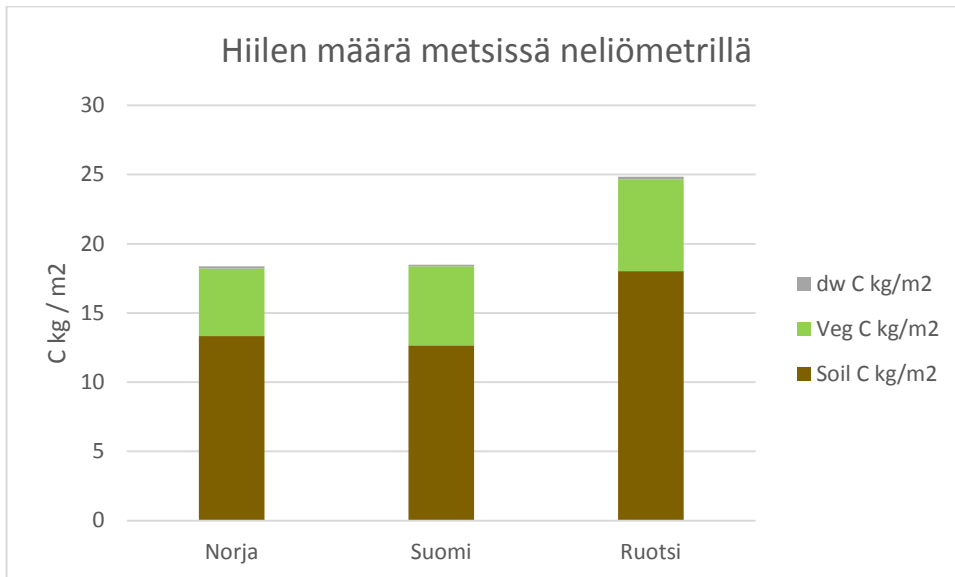
Kuva 10 Kuusivaltaisten tasaikäismetsiköiden tilavuus hehtaarilla Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa 2010.

Tilavuus hehtaarilla on korkein Ruotsissa ja matalin Norjassa. Ensimmäisessä ikäluokassa korkein tilavuus hehtaarilla on Norjassa, mutta kaikissa muissa luokissa Norjan metsien tilavuus hehtaarilla on matalin.



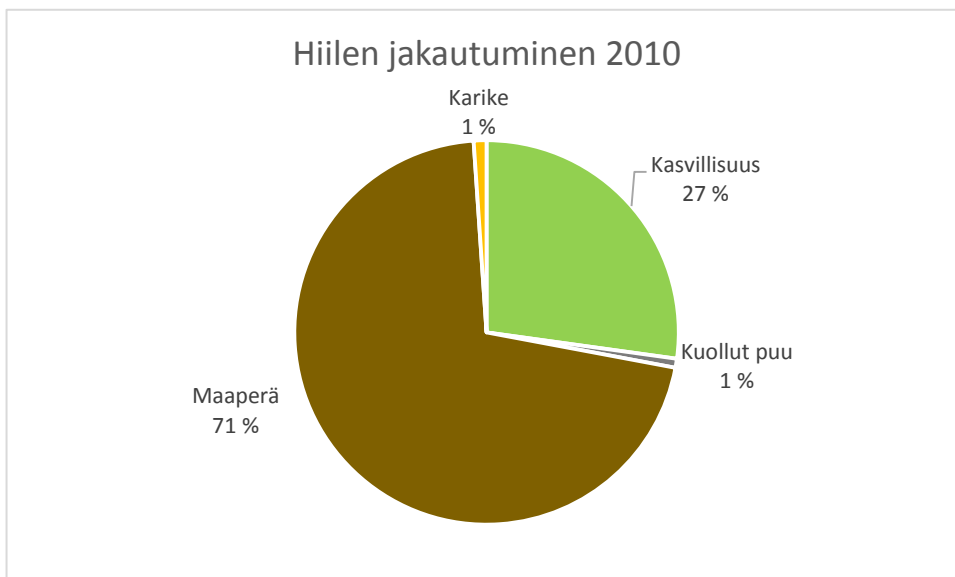
Kuva 11 Nettoprimäärituotanto kuusivaltaisissa tasaikäismetsiköissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Nettoprimäärituotanto hehtaarilla oli vuonna 2010 korkeinta Suomessa, alhaisinta Norjassa. Vanhojen metsien (141-160 -vuotta) nettoprimäärituotanto oli korkeinta Norjassa.



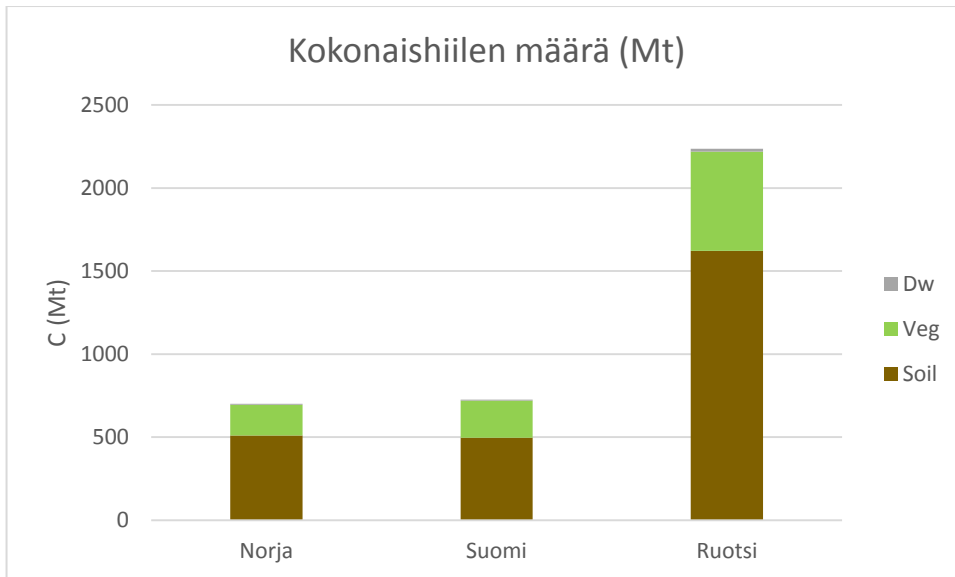
Kuva 12 Hiilen määrä neliömetrillä pohjoismaissa vuonna 2010.

Hiilen määrä neliömetrillä on Suomessa ja Norjassa lähes sama (n. 18 kg/m²). Sen sijaan ruotsissa hiilen määrä oli 25 kg/m².



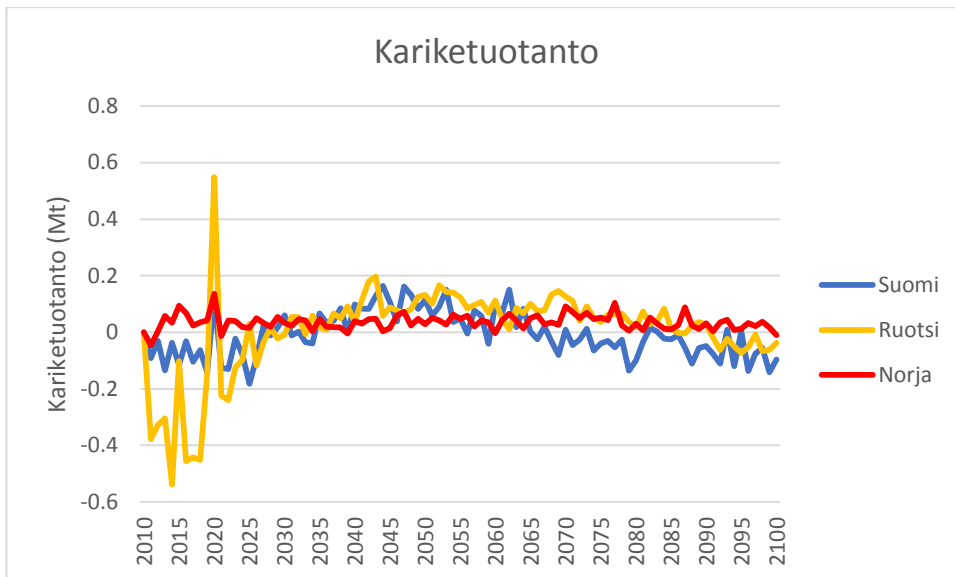
Kuva 13 Hiilen suhteellinen jakautuminen.

Kuvassa 17 on hiilen suhteellinen jakautuminen pohjoismaissa. Suurin osa (71 %) hiilestä on maaperässä. Kasvillisuudessa on 27 % hiilestä ja karikkeessa, sekä kuolleessa puussa loput.



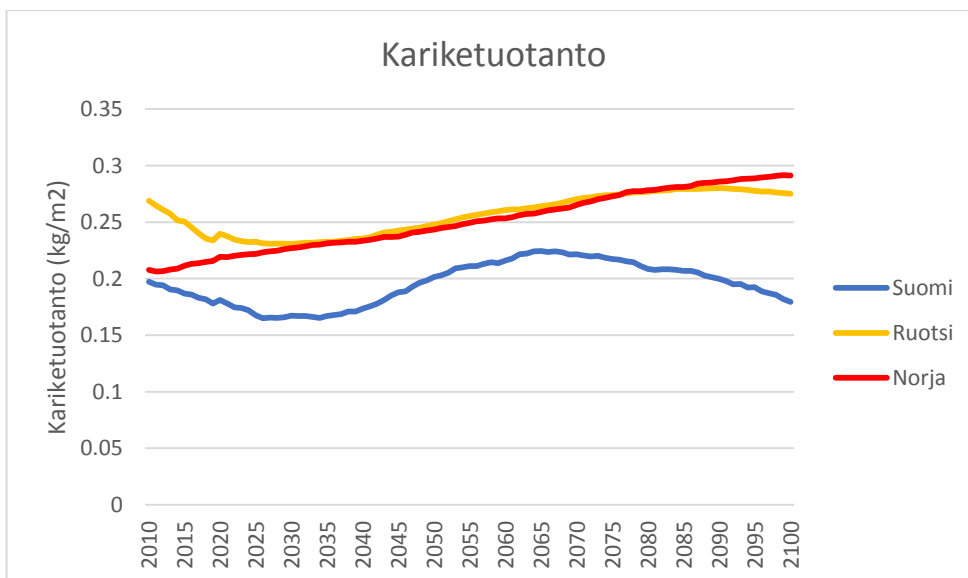
Kuva 14 Kokonaishiilen määrä metsissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Kokonaishiilen määrä on Suomessa ja Norjassa lähes sama. Norjan maaperässä oli hiiltä vuonna 2010 n. 509 Mt ja Suomessa n. 497 Mt. Ruotsissa hiiltä maaperässä oli 1623 Mt. Kasvillisuudessa hiiltä oli 186 Mt Norjassa, 223 Mt Suomessa ja 597 Mt Ruotsissa.

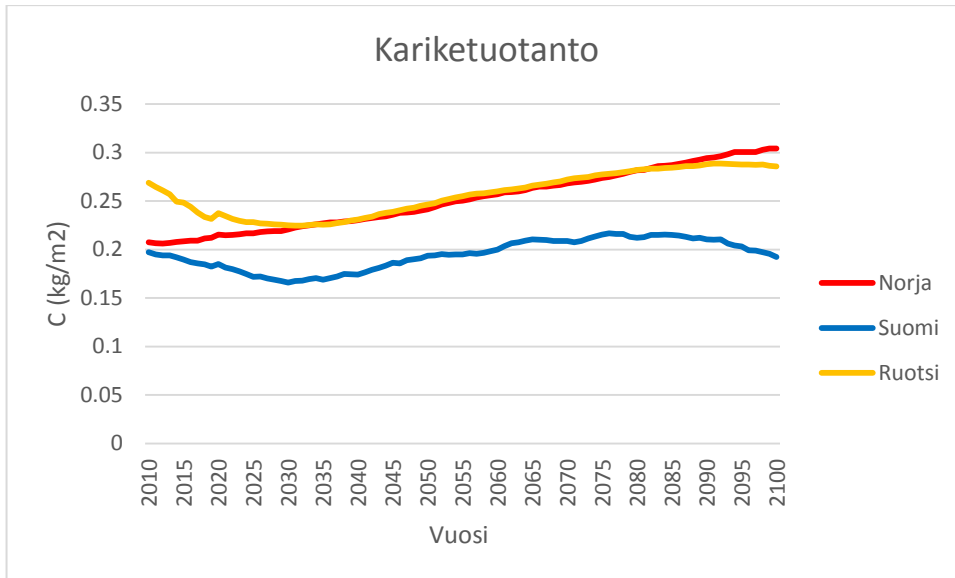


Kuva 15 Kariketuotanto Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa.

Kariketuotanto laskee aluksi Suomessa ja Norjassa (kuva 15), mutta nousee aina noin vuoteen 2050 asti. Tämän jälkeen kariketuotanto jälleen hidastuu. Norjassa kariketuotanto pysyy melko tasaisena koko tarkastelujakson ajan.



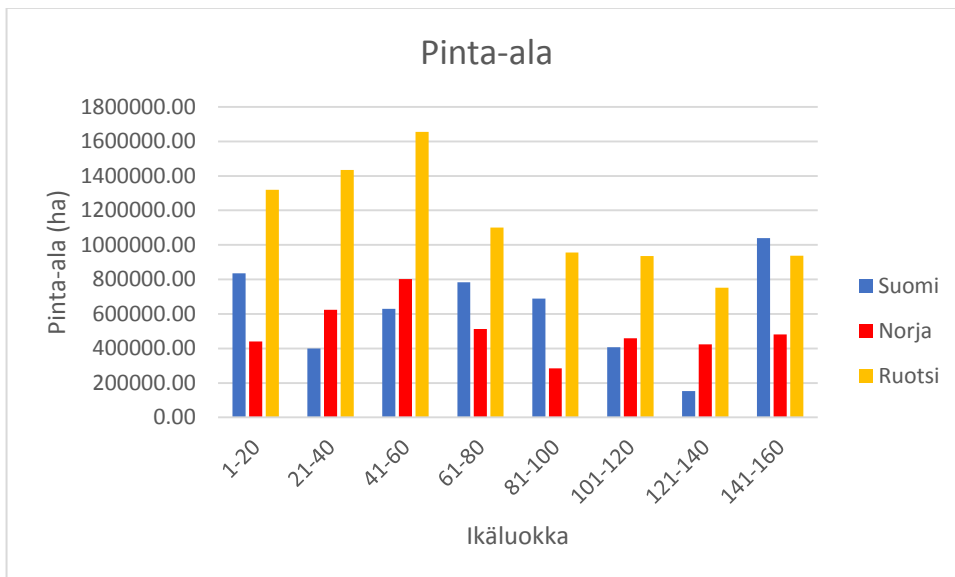
Kuva 16 Kariketuotanto Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa BAU26-skenaariossa.



Kuva 17 Kariketuotanto Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa BAU45-skenaariossa.

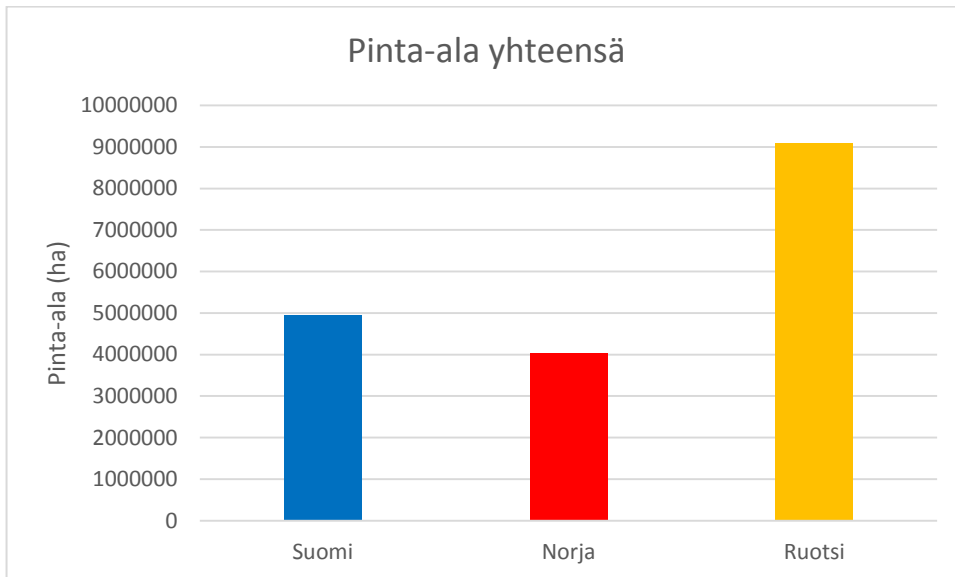
Metsien alkutila kuusivaltaisissa luonnontilaisissa metsiköissä

Alla on kuvattu metsien alkutila kuusivaltaisissa luonnontilaisissa kuusivaltaisissa metsissä vuonna 2010.



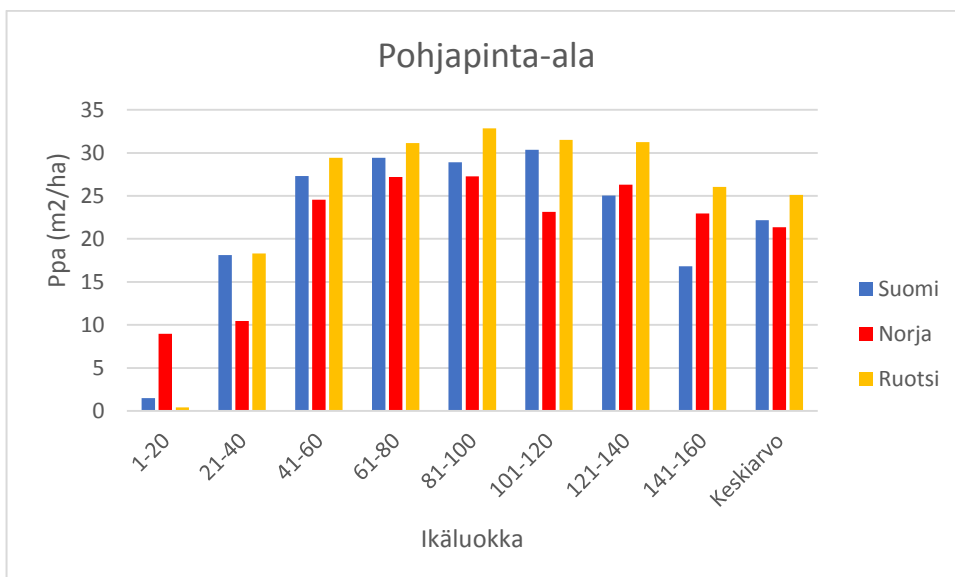
Kuva 18 Metsien pinta-ala luonnontilaisissa metsissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010

Suomessa luonnontilaisia metsiä on eniten ikäluokassa 141-160 (1 040 081 ha). Myös luokassa 1-20 on 834 853 ha. Ruotsissa ja Norjassa luonnontilaisia kuusimetsiä on eniten ikäluokassa 41-60.



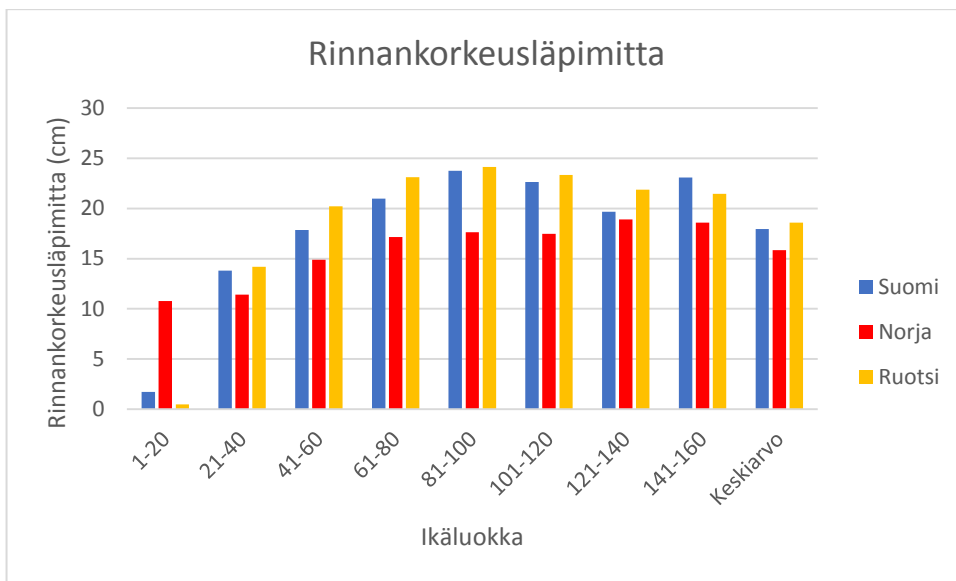
Kuva 19 Luonnontilaisten metsien pinta-ala yhteensä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Suomessa luonnontilaisten metsien pinta-ala vuonna 2010 oli 4 936 324,67 ha. Norjassa 4 028 300,11 ha ja Ruotsissa 9 091 127,51 ha.



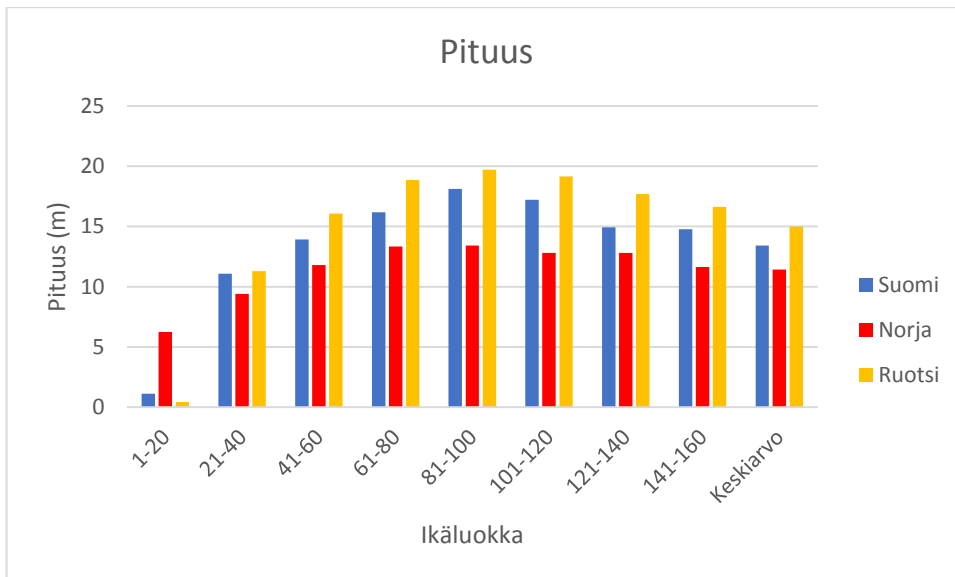
Kuva 20 Luonnontilaisten metsien pohjapinta-ala Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Keskimäärin luonnontilaisissa kuusimetsissä pohjapinta-ala oli 22,18 m² Suomessa, 21,36 m² Norjassa ja 25,11 Ruotsissa vuonna 2010.



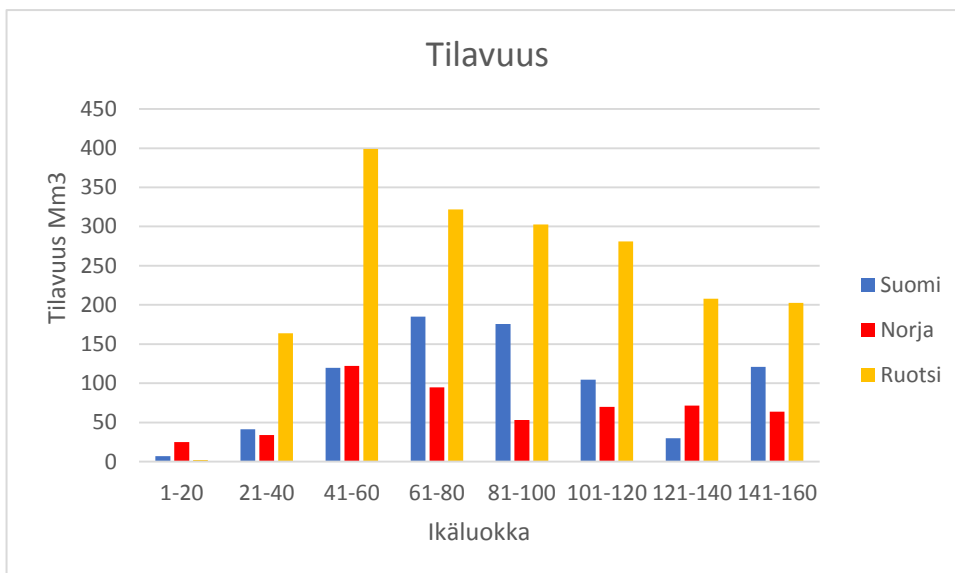
Kuva 21 Rinnankorkeusläpimitta luonnontilaisissa metsissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Rinnankorkeusläpimitan keskiarvo oli 17,94 cm Suomessa, 15,85 cm Norjassa ja 18,59 cm Ruotsissa.



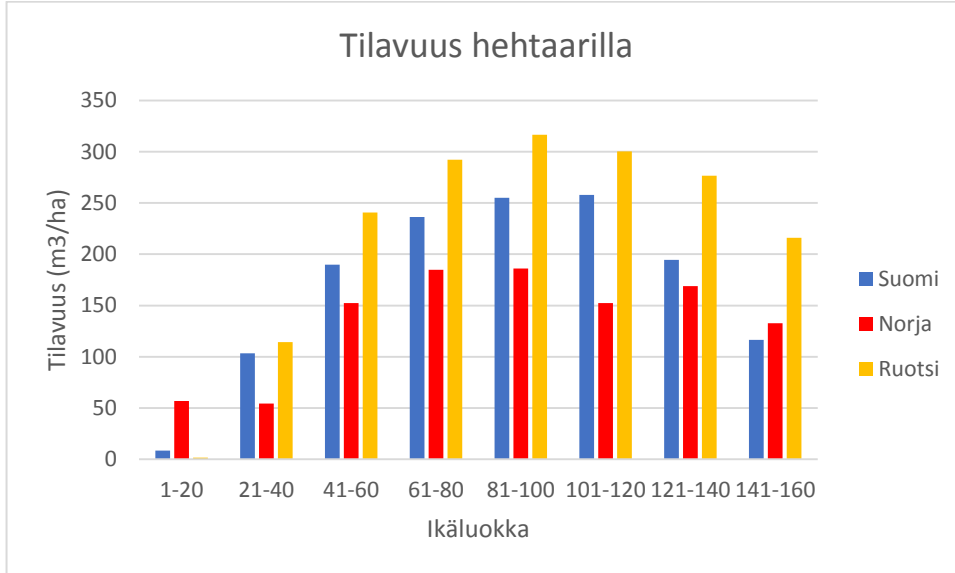
Kuva 22 Luonnontilaisten metsien keskipituus Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Keskipituus luonnontilaisissa kuusimetsissä oli 13,41 m Suomessa, 11,43 m Norjassa ja 14,98 m Ruotsissa vuonna 2010.



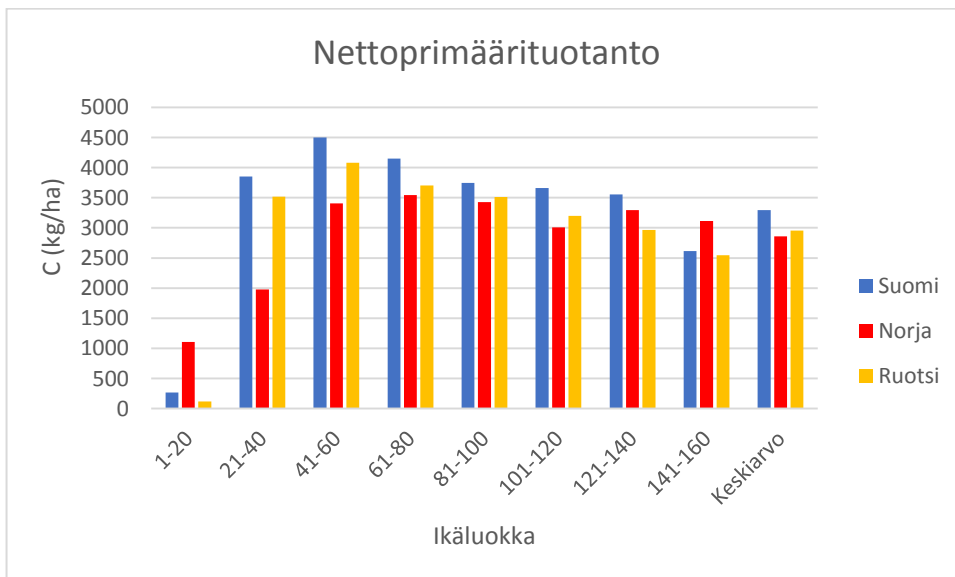
Kuva 23 Luonnontilaisten metsien tilavuus Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Luonnontilaisten kuusimetsien kokonaistilavuus vaihteli ikäluokittain. Suomessa näyttäisi olevan korkeampi keskitilavuus, kuin Norjassa. Korkein kokonaistilavuus oli Ruotsissa, mikä selittynee korkeimmalla pinta-alalla.



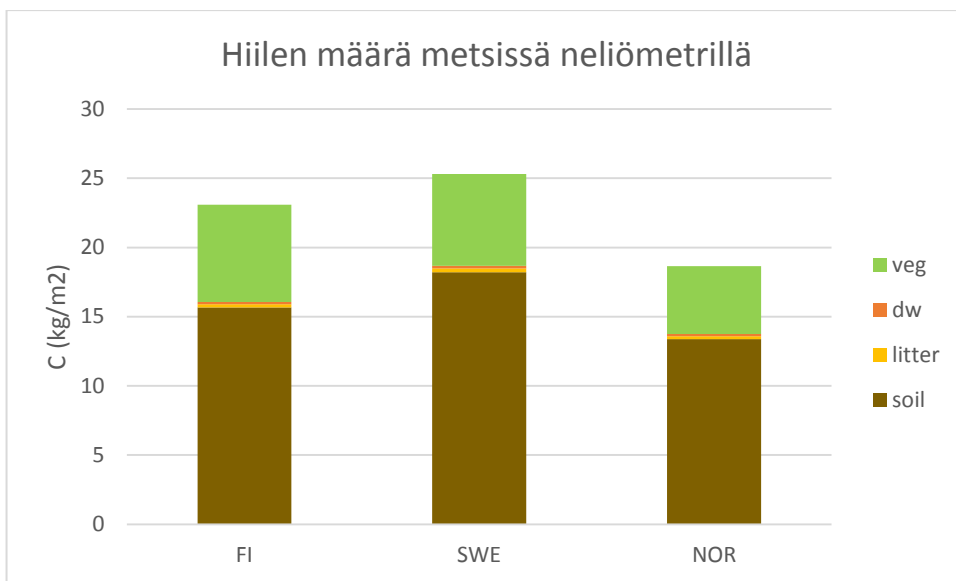
Kuva 24 Tilavuus hehtaarilla luonnontilaisissa metsissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Tilavuus hehtaarilla oli korkein Ruotsissa kaikissa muissa, paitsi ikäluokassa 1-20 vuotta. Norjassa tilavuus oli pienin muissa ikäluokissa, paitsi luokissa 1-20 vuotta ja 141-160 vuotta.



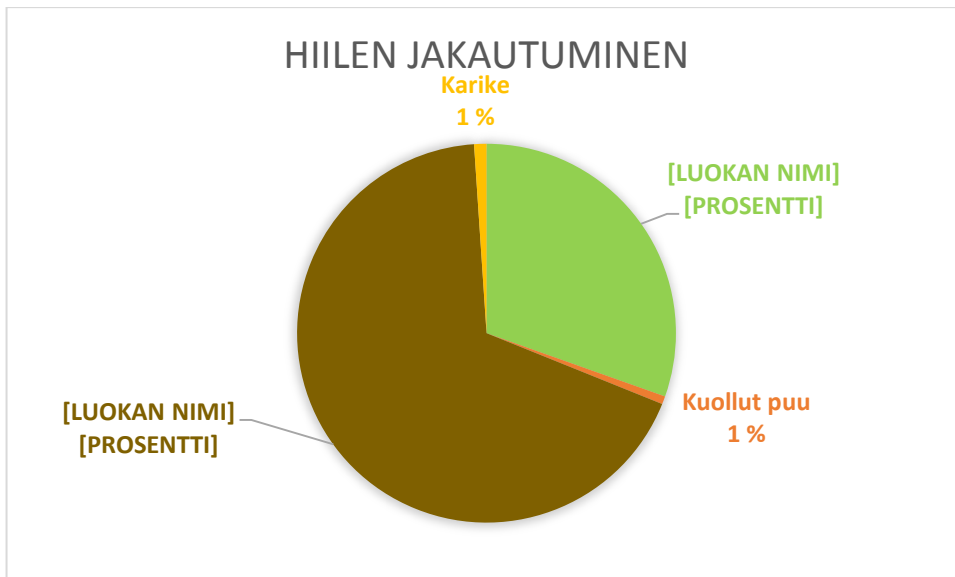
Kuva 25 Nettoprimäärituotanto luonnontilaisissa metsissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Nettoprimäärituotanto oli korkeinta Suomessa. Vuonna 2010 nettoprimäärituotanto Suomessa oli 3293,38 kg hiiltä hehtaarilla. Vastaavat luvut Norjassa ja Ruotsissa olivat 2859,55 kg/ha ja 2954,79 kg/ha.



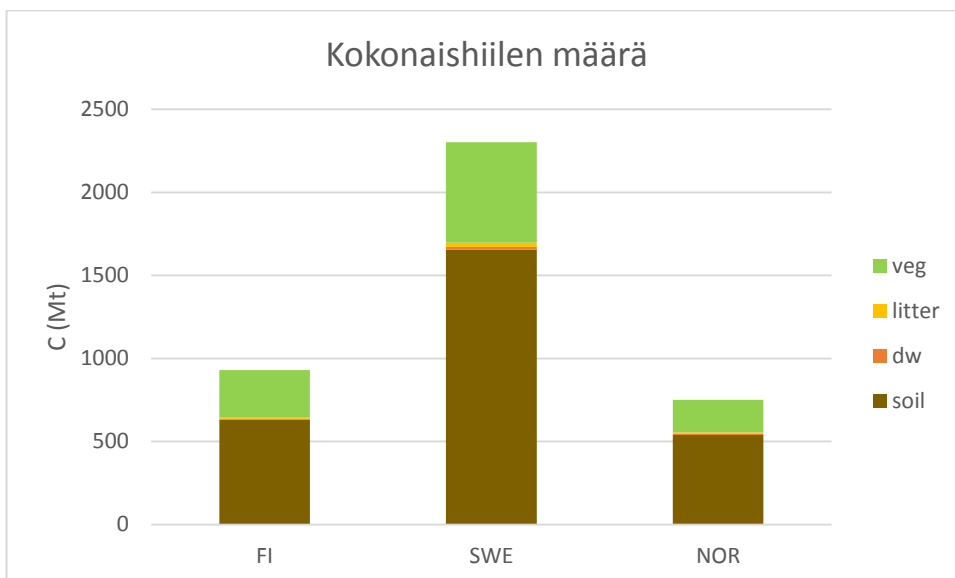
Kuva 26 Hiilen määrä neliömetrillä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Hiilen määrä maaperässä oli 15,66 kg/m² Suomessa, 18,21 kg/m² Ruotsissa ja 13,19 kg/m² Norjassa vuonna 2010. Kasvillisuudessa hiiltä oli 7,02 kg/m² Suomessa, 6,64 kg/m² Ruotsissa ja 4,89 kg/m² Norjassa.



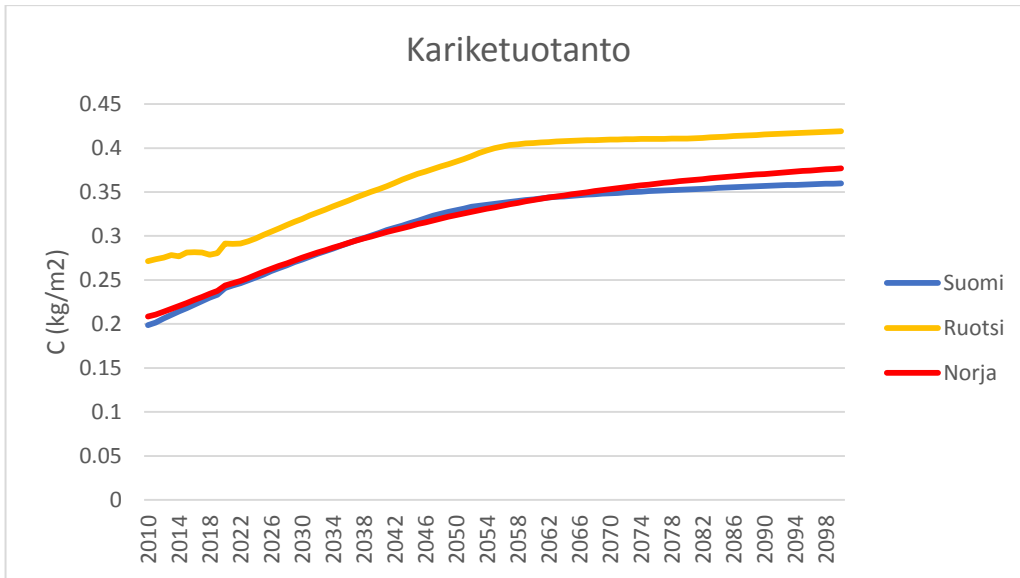
Kuva 27 Hiilen suhteellinen jakautuminen.

Luonnontilaisissa metsissä hiili jakautui suhteessa eniten maaperään (68%). Kasvillisuudessa oli 30% kokonaishiilestä. Karike ja kuollut puu sisälsi loput.

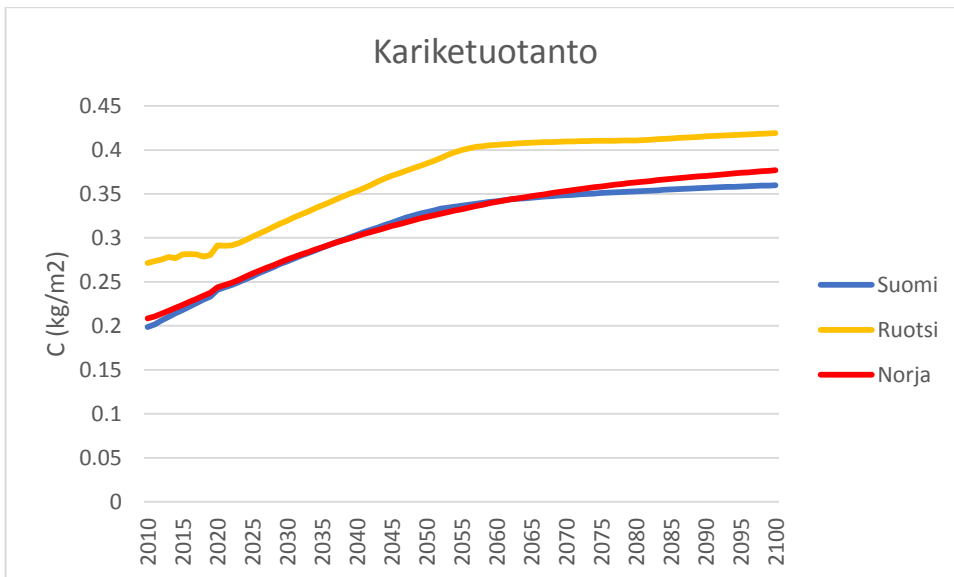


Kuva 28 Kokonaishiilen määrä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuonna 2010.

Kokonaishiilen määrä maaperässä oli 630,96 Mt Suomessa, 1655,23 Mt Ruotsissa ja 539,27 Mt Norjassa. Kasvillisuudessa vastaavat luvut olivat 282,95 Mt, 603,62 Mt ja 196,93 Mt.



Kuva 29 Kariketuotanto Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa BAU-26 skenaariossa.



Kuva 30 Kariketuotanto Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa BAU-45 skenaariossa.

3.2 MENETELMÄT

FORMIT-mallin simuloinneista käytin kolmea eri skenaariota: BAU45 Harvest iterated, BAU 26 Harvest iterated ja BAU 45 unmgd. BAUlla (business as usual) tarkoitetaan tilannetta, metsänhoito pysyy nykyisellä tasolla. Kuusimetsiköihin tämä on määritelty seuraavasti:

- Taimikonhoito, kun metsikön pituus 3 – 4 m, jätetään 1600 puuta / ha
- Ensiharvennus, kun metsikön pituus 15 – 16 m, jätetään 900 puuta / ha
- Alaharvennus, määräytyy kasvupaikkatyypin mukaan
- Päätehakkuu, kun metsikön rinnankorkeusläpimitta ylittää 25 cm

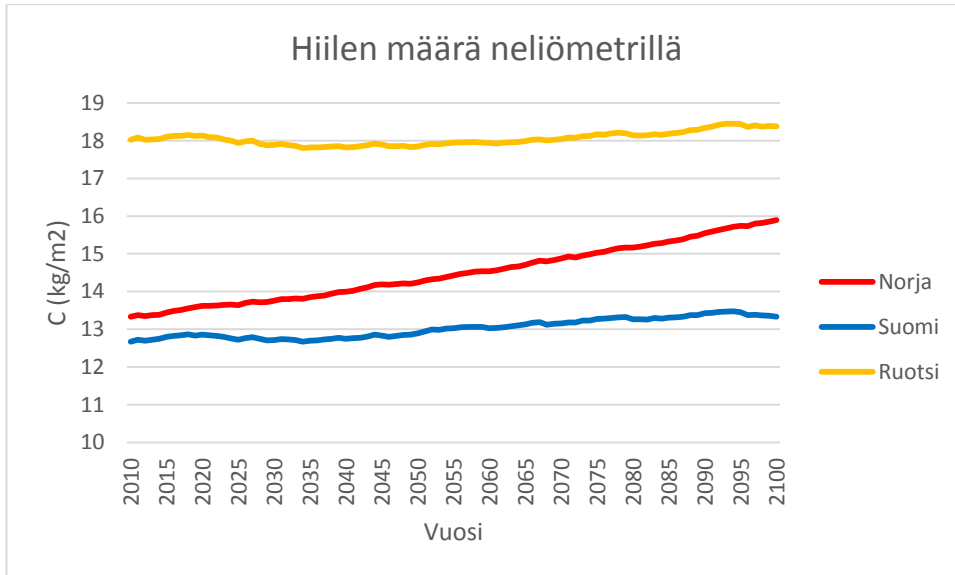
Numero BAUn perässä kuvaa säteilypakotetta: 45 tarkoittaa $4,5 \text{ W/m}^2$ ja 26 tarkoittaa $2,6 \text{ W/m}^2$. Harvest iterated kuvaa iteroitua, kysyntään perustuvaa hakkuiden määrää. Unmgd on tilanne, jossa hakkuuta ei suoriteta lainkaan. Luonnontilaisille metsille ei löytynyt kuin yksi ilmastoskenaario.

Suodatin käytettävistä hakkuuskenaarioista turhan datan pois. Suodatus on tehty MS-excelillä. Suodatus tapahtui seuraavasti: ensiksi valitsin maan, jolle simulointi tehdään. Sen jälkeen valitsin metsätyypin ja hakkuutavan. Tämän jälkeen muutin jäljellä olevan aineiston CSV muotoon ja syötin aineiston Yassoon. Ilmastoskenaariot olivat valmiina ja ne syötettiin Yassoon. Yasson tuottamista tuloksista sain tarkasteltaville maille maaperän hiilen kokonaismäärän jokaiselle vuodelle (2010-2100). Saadusta hiilen kokonaismäärästä laskettiin hiilen määrä neliömetrillä jakamalla hiilen kokonaismäärä maaperässä alueen pinta-alalla.

Aineisto on analysoitu vertaamalla tuloksia graafisesti keskenään sekä tarkastelemalla tiettyjä muuttujia. Saatujen tulosten perusteella arvioidaan, miten eri metsien käsittelytavat vaikuttavat metsien hiilitaseeseen ja minkälainen vaikutus ilmastonmuutoksella on. Hiilen kertymä maaperään on esitetty sekä absoluuttisena, että suhteellisena arvona tuloksissa. Tästä taulukosta sekä kuvaajista on tehty johtopäätökset.

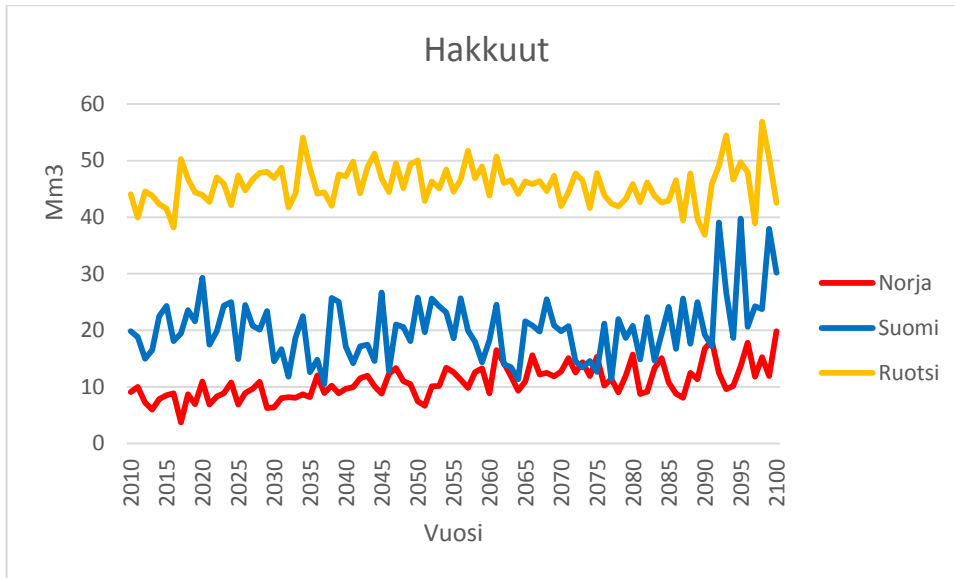
4. Tulokset

4.1 BAU 45 Kuusivaltaiset, avohakkuin käsitellyt metsät



Kuva 31 Hiilen määrä maaperässä kuusivaltaisissa, avohakkuin käsitellyissä metsissä neliömetrillä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuosina 2010 - 2100 BAU 45 skenaariossa.

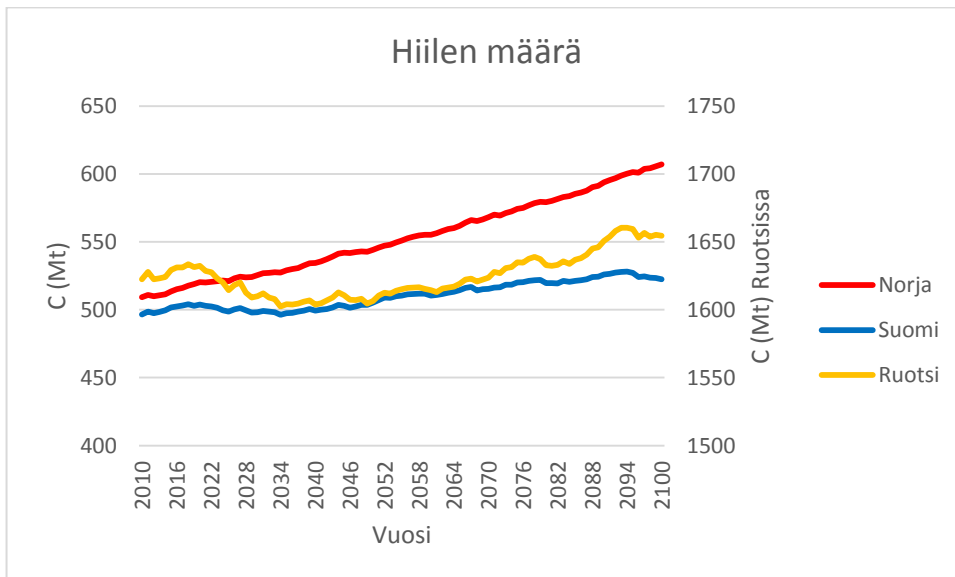
Hiilen määrä neliömetrillä pysyy Suomessa melko vakaana. Vuodesta 2010 ($12,67 \text{ kg} / \text{m}^2$) hiilen määrä kasvaa vuoteen 2100 mennessä $0,66 \text{ kg} / \text{m}^2$. Ruotsissa voidaan havaita samankaltainen ilmiö. Vuodesta 2010 vuoteen 2100 hiilen määrä neliömetrillä kasvaa $0,29 \text{ kg}$. Norjassa sen sijaan on havaittavissa merkittävä muutos. Vuodesta 2010 vuoteen 2100 mennessä hiilen määrä kasvaa $2,56 \text{ kg} / \text{m}^2$.



Kuva 32 Hakuut kuusivaltaisissa, avohakuin käsitellyissä metsissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa (Mm³) vuosina 2010 - 2100.

Keskimäärin Norjassa hakattiin 10,98 Mm³, Suomessa 20,49 Mm³ ja Ruotsissa 46,25 Mm³ vuodessa vuosina 2010 – 2100 kuusimetsissä joissa käytettiin BAU45-skenaariota.

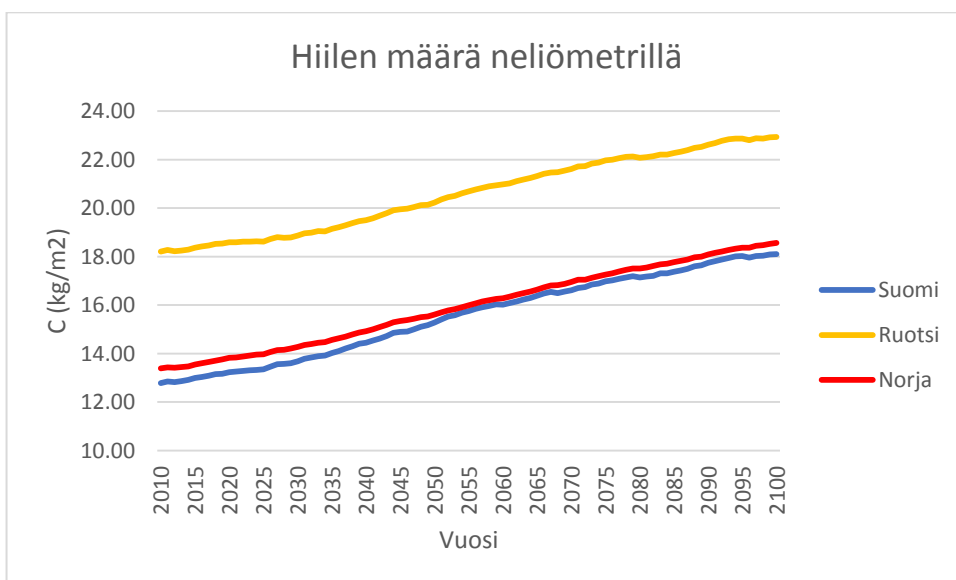
Kokonaishakuut vuonna 2017 olivat 62,9 Mm³ Suomessa (Luke 2018) ja 90,9 Mm³ Ruotsissa (Metsälehti 2018). Norjassa hakataan 10 – 12 Mm³ vuodessa (Metsälehti 2018).



Kuva 33 metsämaan hiilen määrä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa.

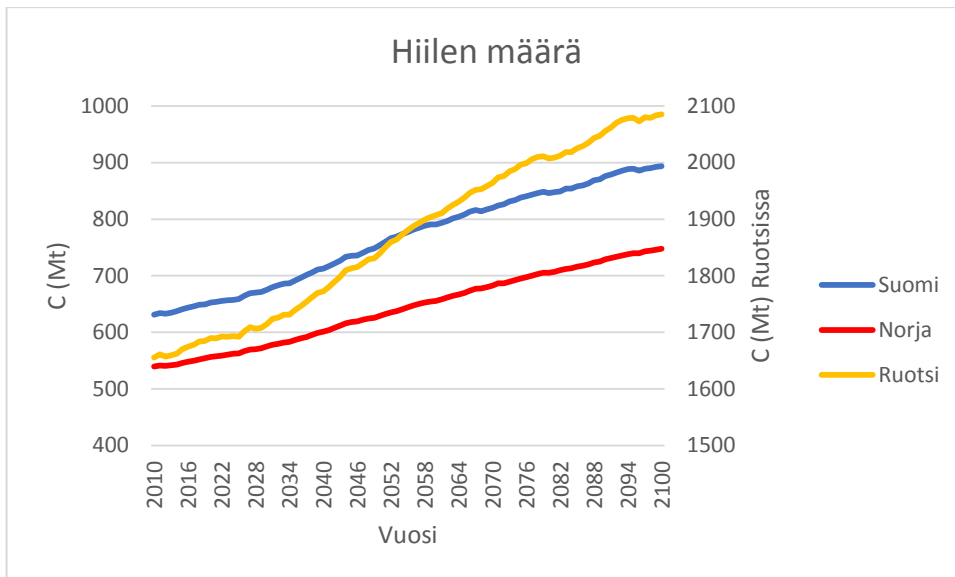
Hiilen määrä kasvoi simuloinneissa kaikissa kolmessa maassa. Suomessa hiilen määrä kasvoi 25,9 Mt. Ruotsissa hiilen määrä nousi 32,3 Mt. Norjassa kokonaishiilen määrä kasvoi 97,85 Mt.

4.2 RCP 4.5 Luonnontilaiset metsät



Kuva 34 Metsämaan hiilen määrä neliömetrillä luonnontilaisissa kuusivaltaisissa metsissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuosina 2010 - 2100.

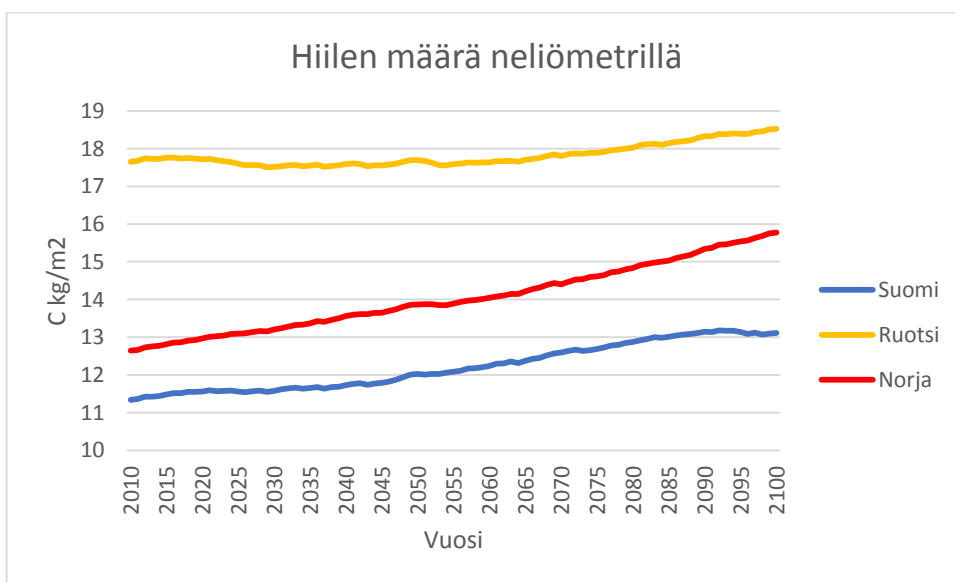
Luonnontilaisissa kuusimetsissä hiilen määrä maaperässä kasvoi jokaisessa tarkasteltavassa maassa vuosina 2010 – 2100. Suomessa hiilen määrä neliömetrillä kasvoi 5,79 kg, Norjassa 5,18 kg ja Ruotsissa 4,73 kg kuusimetsissä joissa käytettiin BAU45_unmgd-skenaariota.



Kuva 35 Metsämaan hiilen määrä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuosina 2010 - 2100.

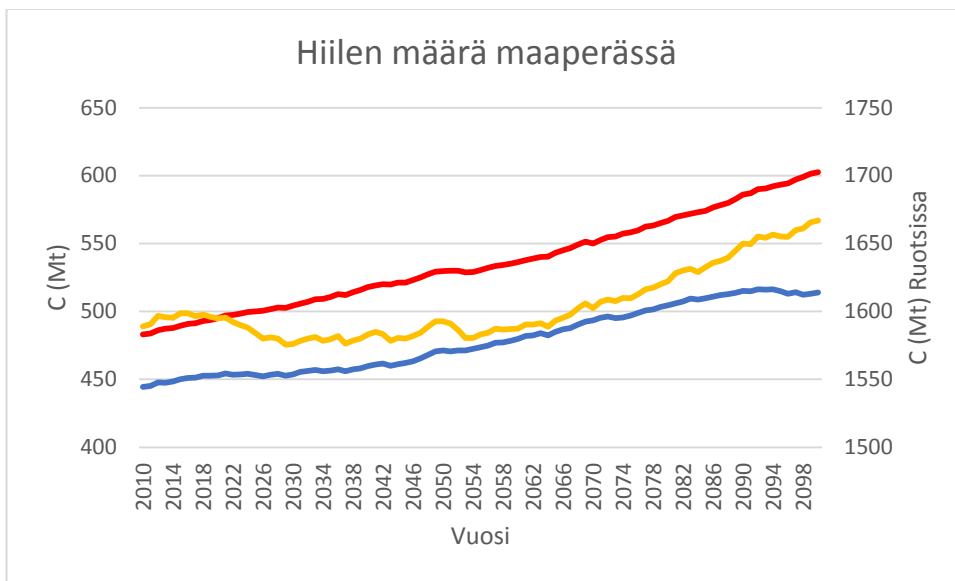
Hiilen määrä kasvoi jokaisessa maassa. Suomessa hiilen määrä kasvoi 262,58 Mt, Ruotsissa 423,97 Mt ja Norjassa 208,69 Mt.

4.3 BAU 26 Tasaikäiset kuusivaltaiset hoidetut metsät, joissa avohakkuu



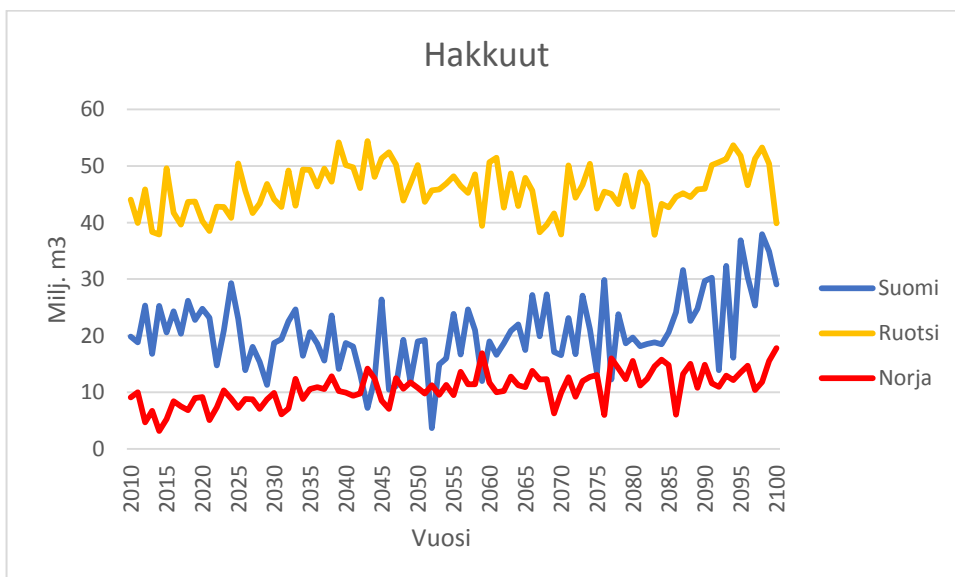
Kuva 36 Metsämaan hiilen määrä neliometrillä vuosina 2010 - 2100 Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa.

Hiilen määrä neliömetrillä kasvoi Suomessa 1,77 kg, Ruotsissa 0,87 kg ja Norjassa 3,13 kg kuusimetsissä joissa käytettiin BAU26-skenaariota.



Kuva 37 Metsämaan hiilen määrä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuosina 2010 - 2100.

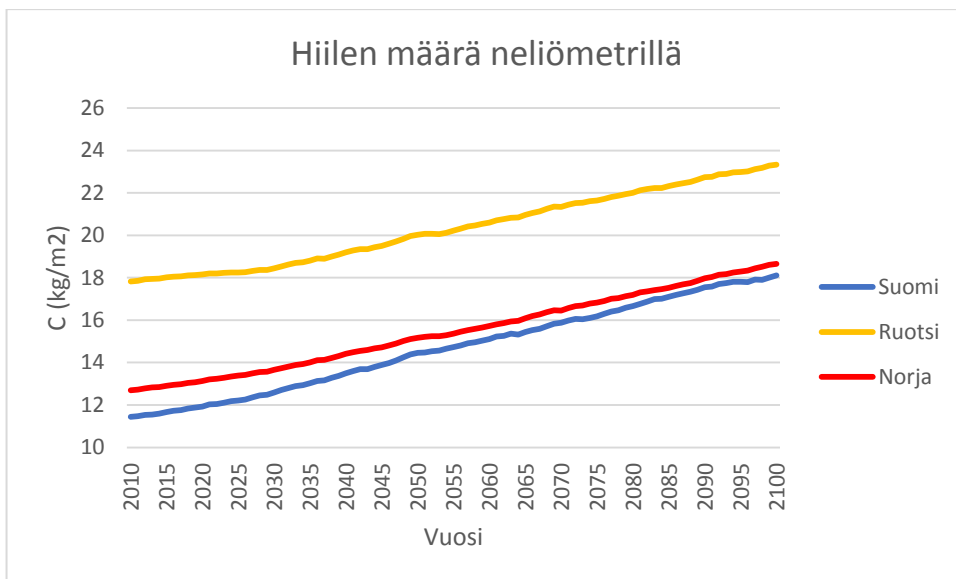
Hiilen määrä maaperässä kasvoi Suomessa 69,51 Mt, Ruotsissa 78,09 Mt ja Norjassa 119,60 Mt.



Kuva 38 Hakuut (Mm³) Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuosina 2010 - 2100.

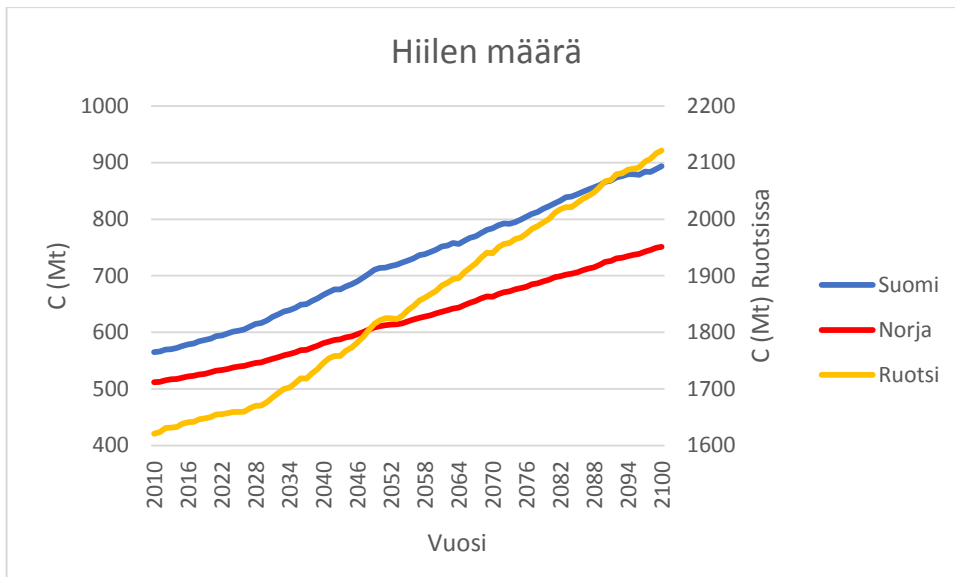
Keskimäärin hakkuita tehtiin Suomessa 20,79 Mm³, Ruotsissa 46,40 Mm³ ja Norjassa 10,85 Mm³ vuodessa vuosina 2010 – 2100.

4.4 RCP 2.6 Luonnontilaiset metsät



Kuva 39 Metsämaan hiilen määrä neliometrillä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuosina 2010 – 2100 luonnontilaisissa kuusimetsissä.

Hiilen määrä maaperässä neliometrillä lisääntyi Suomessa 6,67kg, Ruotsissa 5,51 kg ja Norjassa 5,95 kg kuusimetsissä joissa käytettiin BAU45_unmgd-skenaariota ja RCP 2,6 ilmastoskenaariota.



Kuva 40 Metsämaan hiilen määrä luonnontilaisissa kuusimetsissä Suomessa, Ruotsissa ja Norjassa vuosina 2010 - 2100.

Hiilen määrä maaperässä lisääntyy 329,08 Mt Suomessa, 500,60 Mt Ruotsissa ja 239,77 Mt Norjassa kuusimetsissä, joissa käytettiin BAU45_unmgd-skenaariota ja RCP 2,6 ilmastoskenaariota.

5. Tarkastelu

Hiilen määrä maaperässä kasvoi BAU 26-skenaariossa 1,77 kg/m² Suomessa, 0,87 kg/m² Ruotsissa ja 3,13 kg/m² Norjassa. Vastaavat luvut olivat BAU 45-skenaariossa 0,66 kg/m² Suomessa, 0,29 kg/m² Ruotsissa ja 2,56 kg/m² Norjassa. Luonnontilaisissa metsissä 2,6 W/m² säteilypakotteella hiilen määrä maaperässä kasvoi 6,67 kg/m² Suomessa, 5,51 kg/m² Ruotsissa ja 5,95 kg/m² Norjassa. Luonnontilaisissa metsissä säteilypakotteella 4,5 W/m² hiilen määrä maaperässä kasvoi 5,79 kg/m² Suomessa, 4,73 kg/m² Ruotsissa ja 5,18 kg/m² Norjassa. (Taulukko 4).

	Hiilen määrän kasvu (C kg/m²)	BAU 26 Karikesyöte ka (C kg/m²)	Hakkuut (Mm³/a)
Suomi	1.77	0.197	20.79
Ruotsi	0.87	0.253	46.4
Norja	3.13	0.259	10.85
BAU 45			
Suomi	0.66	0.197	20.49
Ruotsi	0.29	0.26	46.25
Norja	2.56	0.254	10.98
Luonnontilainen 2.6			
Suomi	6.67	0.317	0
Ruotsi	5.51	0.374	0
Norja	5.95	0.321	0
Luonnontilainen 4.5			
Suomi	5.79	0.317	0
Ruotsi	4.73	0.374	0
Norja	5.18	0.322	0

Taulukko 4 Simulointien tulokset

Esimerkiksi Ortizin ym. (2013) tutkimuksessa hiilen määrä maaperässä Ruotsissa kasvoi keskimäärin $0,0061 \text{ kg/m}^2$ vuodessa Yasso07-mallilla ja $0,0075 \text{ kg/m}^2$ vuodessa Q-mallilla. Jos lukemat yleistettäisiin vastaamaan 90-vuoden simulointia (kuten tässä tutkimuksessa) olisi hiilen määrän kasvu maaperässä $0,55 \text{ kg/m}^2$ (Yasso07) ja $0,68 \text{ kg/m}^2$ (Q). Ortizin tutkimus oli tehty vuosille 1926-2000.

Tulosten perusteella hakkuut vähentävät hiilen määrän kerääntymistä maaperään. Ågrenin ja Hyvösen (2003) tutkimuksessa hiilen määrän kertyminen maaperään hidastui entisestään, kun metsästä poistettiin neulaset, oksat ja latvat. Tuloksille löytyy tukea myös muista tutkimuksista (esim. Clarke ym. 2015, Vesterdahl ym. 1995). Hiilen kokonaismäärä maaperässä kasvoi jokaisessa skenaariossa. Luonnontilaisissa metsissä määrän muutos on selvästi korkeampi, kuin talousmetsissä.

Norjassa hiilen määrän muutos oli metsänhoitoskenaariossa selvästi muita korkeampi. Syynä tälle voi olla Norjan metsien alkutila: vuonna 2010 Norjassa oli merkittävästi enemmän metsiä ikäluokassa 1-20, kuin Suomessa tai Ruotsissa. Norjan karikesyöte oli lähes sama kuin Ruotsissa.

Hiilen määrän kasvu erosi merkittävästi hoidettujen ja luonnontilaisten metsien välillä. Säteilypakotteella $2,6 \text{ W/m}^2$ hiilen määrän kasvu luonnontilaisten metsien maaperässä oli $4,9 \text{ kg/m}^2$ enemmän Suomessa, $4,64 \text{ kg/m}^2$ Ruotsissa ja $2,82 \text{ kg/m}^2$ Norjassa. Säteilypakotteella $4,5 \text{ W/m}^2$ vastaavat luvut olivat $5,13 \text{ kg/m}^2$ Suomessa, $4,44 \text{ kg/m}^2$ Ruotsissa ja $2,62 \text{ kg/m}^2$ Norjassa.

Lämpötila vaikutti hiilen akkumuloitumiseen maaperään käänteisesti: kohonneen lämpötilan seurauksena hiilen akkumuloituminen maaperään hidastui. Hiilen määrän kasvu hoidetuissa metsissä oli $1,11 \text{ kg/m}^2$ enemmän Suomessa, $0,58 \text{ kg/m}^2$ Ruotsissa ja $2,57 \text{ kg/m}^2$ Norjassa alhaisemmalla säteilypakotteella. Luonnontilaisissa metsissä hiilen määrä kasvoi alhaisemmissa lämpötiloissa $0,88 \text{ kg/m}^2$ enemmän Suomessa, $0,78 \text{ kg/m}^2$ Ruotsissa ja $0,77 \text{ kg/m}^2$ Norjassa. Esimerkiksi Karhun ym. (2010) tutkimuksessa kohonneella lämpötilalla oli negatiivinen vaikutus maaperässä olevan hiilen määrään. Toisaalta Huynwoon (2019) tutkimuksessa maaperän kohonnut lämpötila ei juuri vaikuttanut hiilen määrään. Huynwoon tutkimuksessa kuitenkin kasteltiin maaperää ja lämpötilaa nostettiin ainoastaan maaperässä. Lämpötilan noustessa hiiltä kertyy

maanpäällisiin kasveihin enemmän ja maaperään vähemmän (Grant ja Nadler 2000; Keyser ym. 2000; Karhu ym. 2010). Maaperän hiilivarasto laskee maatumisnopeuden nousun johdosta (Ågren ja Hyvönen, 2003).

Karikesyötteet olivat luonnontilaisissa metsissä selkeästi korkeammat kuin hoidetuissa. Tämä johtuu luonnollisesti pienemmästä puumäärästä hoidetuissa metsissä. Kuitenkaan ilmastoskenaarioiden välillä ei ollut juuri eroa. Vähentynyt hiilen akkumuloituminen ei siis johdu vähentyneestä karikesyötteestä.

Simulointien tulokset vahvistavat molempia hypoteeseja. Sekä hakkuut, että ilmastonmuutos vähensivät maaperään kertyvän hiilen määrää. Määrän muutos on selvästi nopeampi luonnontilaisissa metsissä kuin talousmetsissä. Tuloksille löytyy tukea useista tutkimuksista (esim. Clarke ym. 2015, Karhu ym. 2010, Vesterdahl ym. 1995, Ågren ja Hyvönen 2003).

6. Päätelmät

Saatujen tulosten perusteella näyttäisi siltä, että tulevaisuudessa hiilen määrän kasvu maaperään tulee hidastumaan korkeamman lämpötilan vuoksi. Korkeampi lämpötila nostaa maatumisnopeutta, josta aiheutuu korkeammat hiilidioksidipäästöt kohonneen heterotrofisen respiraation seurauksena (Karhu ym. 2010, Ågren ja Hyvönen, 2003).

Luonnontilaisiin metsiin kertyy selvästi enemmän hiiltä ja huomattavasti nopeammin. Syynä tälle voi mahdollisesti olla se, että luonnontilaisista metsistä ei viedä hiiltä pois hakkuissa.

Saaduista tuloksista on huomioitava, että ne ovat mallinnettuja, eivätkä empiirisiä kokeita. Syötteet Yassoon tulevat FORMIT -mallin simuloinneista ja lisäksi ilmastoskenaariot ja kysyntä on mallinnettu.

Lähdeluettelo

- Amaro, A., D. Reed, and P. Soares. 2003. *Modelling forest systems*. CABI Pub cop.
- Ashton, M., M. Tyrrell, D. Spalding, and B. Gentry. 2012. *Managing Forest Carbon in a Changing Climate*. Springer.
- Berg, B. 1984. Decomposition of root litter and some factors regulating the process: long-term root litter decomposition in a scots pine forest. *Soil Biol. Biochem.* 16 (6): 609-617.
- Berg, B., and C. O. Tamm. 1991. Decomposition and nutrient dynamics of litter in long-term optimum nutrition experiments. *Scaninavian Journal of Forest Research* (6:1-4): 305-321. doi:10.1080/02827589109382670.
- Berg, B., and H. Staaf. 1980. *Decomposition rate and chemical changes of scots pine needle litter. II. Influence of chemical composition*. Tukholma: Ecol. Bull.
- Berg, B., M. Johansson, and V. Meentemeyer. 2000. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control. *Canadian Journal of Forest Research* (30): 1136-1147.
- Berg, B., P. Berg, P. Bottner, E. Box, A. Breymeyer, R. Calvo de Anta, M. Couteaux, et al. 1993. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. *Biogeochemistry* (Springer) 20 (3): 127 - 159.
- Bergh, J., M. Freeman, B. Sigurdsson, S. Kellomäki, K. Laitinen, S. Niinistö, H. Peltola, and S. Linder. 2003. Modelling the short-term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries. *Forest Ecology and Management* (183): 327 - 340.
- Betts, A., and J. Ball. 1997. Albedo over the boreal forest. *Journal of geophysical research* (102): 28901-28909.
- Betts, R.A. 2000. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature* (408): 187 - 190.
- Blume-Werry, G., J. Kreyling, H. Laudon, and A. Milbau. 2016. Short-term climate change manipulation effects do not scale up to long-term legacies: effects of an absent snow cover on boreal forest plants. *Journal of Ecology* (104): 1638-1648. doi:10.1111/1365-2745.12636.
- Bonan, G., D. Pollard, and S. Thompson. 1992. Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature* (359): 716 - 718.
- Bright, R., C. Ández, R. Astrup, F. Cherubini, M. Kvalevåg, and A. Stromman. 2014. Climate change implications of shifting forest management strategy in a boreal forest ecosystem of Norway. *Global Change Biology* (20): 607 - 621.

- Chapin, F., A. Mcguire, J. Randerson, R. Pielke SR, D. Baldocchi, S. Hobbie, N. Roulet, et al. 2000. *Arcitic and boreal ecosystems of western North America as components of the climate system*. *Global Change Biology*, 211-223.
- Clarke, N., P. Gundersen, U. Jönsson-Belyazid, O. Kjonaas, T. Persson, B. Sigurdsson, I. Stupak, and L. Vesterdal. 2015. Influence of different tree-harvesting intensities on forest soil carbon stocks in boreal and northern temperate forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* (Elsevier) (351): 9 - 19.
- Cramer, W., A. Bondeu, F. Woodward, I. Prentice, R. Betts, V. Brovkin, P. Cox, et al. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology* 357-373.
- Davidson, E., and I. Janssens. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change" *Nature* Vol 440: 165 - 173.
doi:doi:1038/nature04514.
- Dixon, R., S. Brown, R. Houghton, A. Solomon, M. Trexler, and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* (263): 185 - 190.
- EFI. 2019. *European Forest Institute*. Accessed Tammikuu 14, 2019. <https://www.efi.int/>.
- Falloon, P., and P. Smith. 2002. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. *Soil Use and Management* 101-111. doi:10.1079/SUM2001108.
- Finér, L., H. Mannerkoski, S. Piirainen, and M. Starr. 2003. Carbon and nitrogen pools in an old-growth, Norway spruce mixed forest in eastern Finland and changes associated with clear-cutting. *Forest Ecology and Management* (174): 51 - 63.
- Finér, L., M. Ohashi, K. Noguchi, and Y. Hirano. 2011. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management* (Elsevier) (262): 2008-2023.
- Giorgetta, Marco, Johann Jungclaus, Christian Reick, Stephanie Legutke, Jürgen Bader, Michael Böttinger, Victor Brovkin, et al. 2013. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of advances in modeling earth systems* (5): 572-597. doi:10.1002/jame.20038.
- Grant, R., and A. Nalder. 2000. Climate change effects on net carbon exchange of a boreal aspen-hazelnut forest: estimates from the ecosystem model ecosys. *Global Change Biology* (6): 183-200.
- Helbig, M., L. Chasmer, A. Desai, N. Kljun, W. Quinton, and O. Sonnetag. 2017. Direct and indirect climate change effects on carbon dioxide fluxes in a thawing boreal

forest-wetland landscape. *Global Change Biology* (23): 3231-3248.
doi:10.1111/gcb.13638.

- Hyungwoo, L., R. Oren, T. Näsholm, M. Strömberg, T. Lundmark, H. Grip, and S. Linder. 2019. Boreal forest biomass accumulation is not increased by two decades of soil warming. *Nature climate change* 9 (January 2019): 49 - 52. doi:10.1038/s41558-018-0373-9.
- Hyvönen, R., G. Ågren, S. Lynder, T. Persson, M. Cotrufo, A. Ekblad, M. Freeman, et al. 2006. The likely impact of elevated [CO₂], nitrogen deposition, increased temperature and management on carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *Tansley (New Phytologist)* 463 - 480.
- Härkönen, S., A. Mäkelä, A. Moiseyev, G. Gardellini, T. Valada, F. Berninger, K. Bronisz, et al. 2015. *Deliverable 2.5 Consolidated results for use in scenario analysis - FORMIT simulator: implementation of the forest management scenarios*. FORMIT.
- IPCC. 2014. "Summary for policymakers." In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, by C.B. Field, D.J. Barros, K.J. Dokken, M.D. Mach, T.E. Mastrandrea, M. Bilir, K.L. Chatterjee, et al., 1-32. New York: Cambridge University Press, United Kingdom and New York.
- Jandl, R., M. Lindner, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, D. Johnson, K. Minkinen, and K. Byrne. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* (Elsevier) (137): 253 - 268.
- Kallio, M., A. Moiseyev, and B. Solberg. 2004. *The global forest sector model EFI-GTM - the model structure*. Sisäinen raportti, European Forest Institute.
- Karhu, K., H. Fritze, K. Hämäläinen, P. Vanhala, H. Junger, M. Oinonen, E. Sonninen, et al. 2010. Temperature sensitivity of soil carbon fractions in boreal forest soil. *Ecological Society of America* (91): 370 - 376.
- Karhu, K., H. Fritze, M. Tuomi, P. Vanhala, P. Spetz, V. Kitunen, and J. Liski. 2010. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in two boreal forest soil profiles. *Soil Biology & Biochemistry* 72-82.
- Kellomäki, S., and M. Kolström. 1992. Simulation of Tree Species Composition and Organic Matter Accumulation in Finnish Boreal Forests under Changing Climatic Conditions. *Vegetatio* (102): 47-68. <http://www.jstor.org/stable/20046200>.
- Keyser, A., J. Kimball, R. Nemani, and S. Running. 2000. Simulating the effects of climate change on the carbon balance of North American high-latitude forests. (*Global Change Biology*) (6): 185-195.

- Kolari, P., J. Pumpanen, Ü. Rannik, H. Ilvesniemi, P. Hari, and F. Berninger. 2004. Carbon balance of different aged Scots pine forests in Southern Finland. *Global Change Biology* (10): 1106-1119. doi:10.1111/j.1365-2486.2004.00797.x.
- Laganière, J., F. Podrebarac, S. Billings, K. Edwards, and S. Ziegler. 2015. A warmer climate reduces the bioreactivity of isolated boreal forest soil horizons without increasing the temperature sensitivity of respiratory CO₂ loss. *Soil Biology and Biochemistry* (Elsevier) (84): 177 - 188.
- Liski, J., and C. J. Westman. 1997. Carbon storage in forest soil of Finland." *Biogeochemistry* (36): 239 - 260.
- Liski, J., T. Palosuo, M. Peltoniemi, and R. Sievänen. 2005. Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. *Ecological Modelling* (189): 168-182.
- Luke. 2018. *Teollisuuspuun hakkuut jatkoivat kasvuaan vuonna 2017*. Luke.
- Luyssaert, S., E. Schulze, A. Börner, A. Knohl, D. Hessenmöller, B. Law, P. Ciais, and J. Grace. 2008. Old-growth forests as global carbon sinks. *Letters to nature* (Nature) 455: 213-215. doi:10.1038/nature0176.
- Metsälehti. 2018. *Kuitupuun hinta kohonnut jopa 30 prosenttia - Norjassa*. Metsälehti.
- Metsälehti. 2018. *Ruotsin hakkuumäärät laskivat viime vuonna*. Metsälehti.
- Mäkelä, A., S. Härkönen, and F. Berninger. 2015. *FORMIT model for analysing the implications of forest management on forest products and carbon balance under climate change*. Metsätieteiden laitos, Helsingin Yliopisto, Helsinki: Helsingin Yliopisto.
- Olsson, Bengt, Staaf, Lundkvist, Heléne Håkan, Jan Bengtsson, and Rosén Kaj. 1996. Carbon and nitrogen in coniferous forest soils after clear-felling and harvests of different intensity. *Forest ecology and management* 82: 19-32.
- Ortiz, C., J. Liski, A. Gårdenäs, A. Lehtonen, M. Lundblad, J. Stedahl, G. Ågren, and E. Karlton. 2013. Soil organic carbon stock changes in Swedish forest soils - A comparison of uncertainties and their sources through a national inventory and two simulation models. *Ecological modelling* (Elsevier) 251: 221-231.
- Price, S., M. Bradford, and M. Ashton. 2012. Characterizing Organic Carbon Stocks and Flows in Forest Soils. In *Managing Forest Carbon in a Changing Climate*, by M. Ashton, M. Tyrrell, D. Spalding and B. Gentry, 10-13. Springer.
- Steele, S., S. Gower, J. Vogel, and J. Norman. 1997. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree physiology* (Heron Publishing - Victoria) (17): 577-587.

- Tomppo, E., J. Heikkinen, H. Henttonen, A. Ihalainen, M. Katila, H. Mäkelä, T. Tuomainen, and N. Vainikainen. 2010. *Designing and conducting a forest inventory.case: 9th national forest inventory of Finland*. Springer.
- Tomppo, E., T. Gschwantner, M. Lawrence, and R. McRoberts. 2010. *National forest inventories*. New York: Springer.
- Tuomi, M., J. Rasinmäki, A. Repo, P. Vanhala, and J. Liski. 2011. Soil carbon model Yasso07 graphical user interface. *Environmental modelling & software* (Elsevier) (26): 1358 - 1362.
- Valentini, R., G. Matteucci, A. J. Dolman, E.-D. Schulze, C. Rebmann, E. J. Moors, A. Granier, et al. 2000. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Letters to nature* 861-864.
- Wang, W., C. Peng, D. Kneeshaw, G. Larocque, X. Song, and X. Zhou. 2012. Quantifying the effects of climate change and harvesting on carbon dynamics of boreal aspen and jack pine forests using the TRIPLEX-Management model. *Forest Ecology and Management* (281): 152-162.
- Vesterdahl, Lars, Mads Dalsgaard, Claus Felby, Raulund-Rasmussen Karsten, and Bruno Bilde Jorgensen. 1995. Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands. *Forest ecology and management* (Elsevier) 77: 1-10.
- Ågren, G., and R. Hyvönen. 2003. Changes in carbon stores in Swedish forest soils due to increased biomass harvest and increased temperatures analysed with a semi-empirical model. *Forest Ecology and Management* (174): 25 - 37.

Liite 1: Tutkimussuunnitelma

Tutkimuksen toteutuspaikka on Helsinki. Tutkimus aloitettiin syksyllä 2017 tutustumalla kirjallisuuteen sekä kirjoittamalla kirjallisuuskatsaus. Työn toteutus tapahtuu pääsääntöisesti kotioloissa, sillä varsinaista kenttätöitä ei tässä tapauksessa ole. Aineiston hankinnan menetelmät raportoidaan alempana. Vastuuprofessoreina toimivat metsätieteiden professorit Annikki Mäkelä ja Frank Berninger.

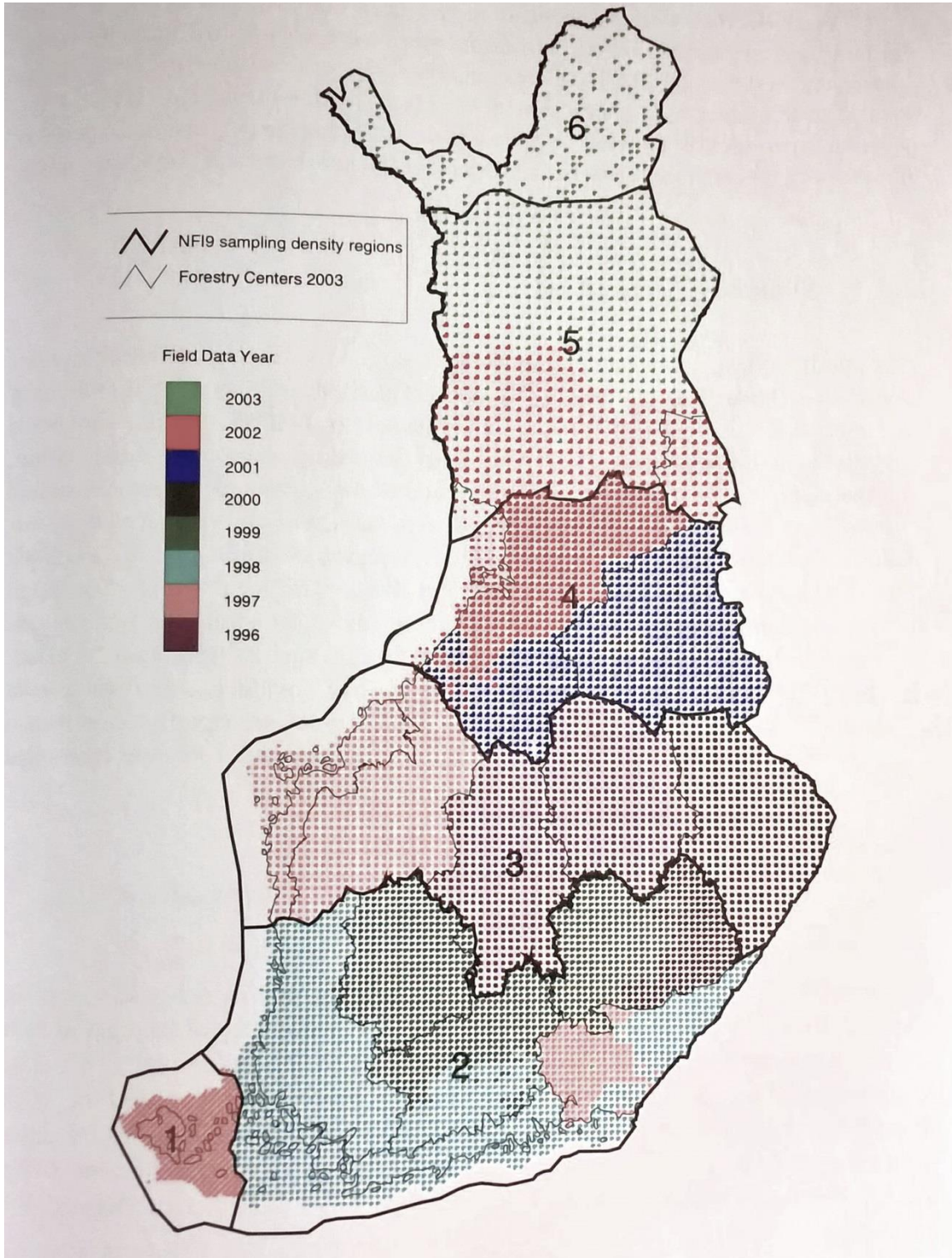
Liite 2: Metsien inventoinnin menetelmät Pohjoismaissa

Metsien inventointi Suomessa

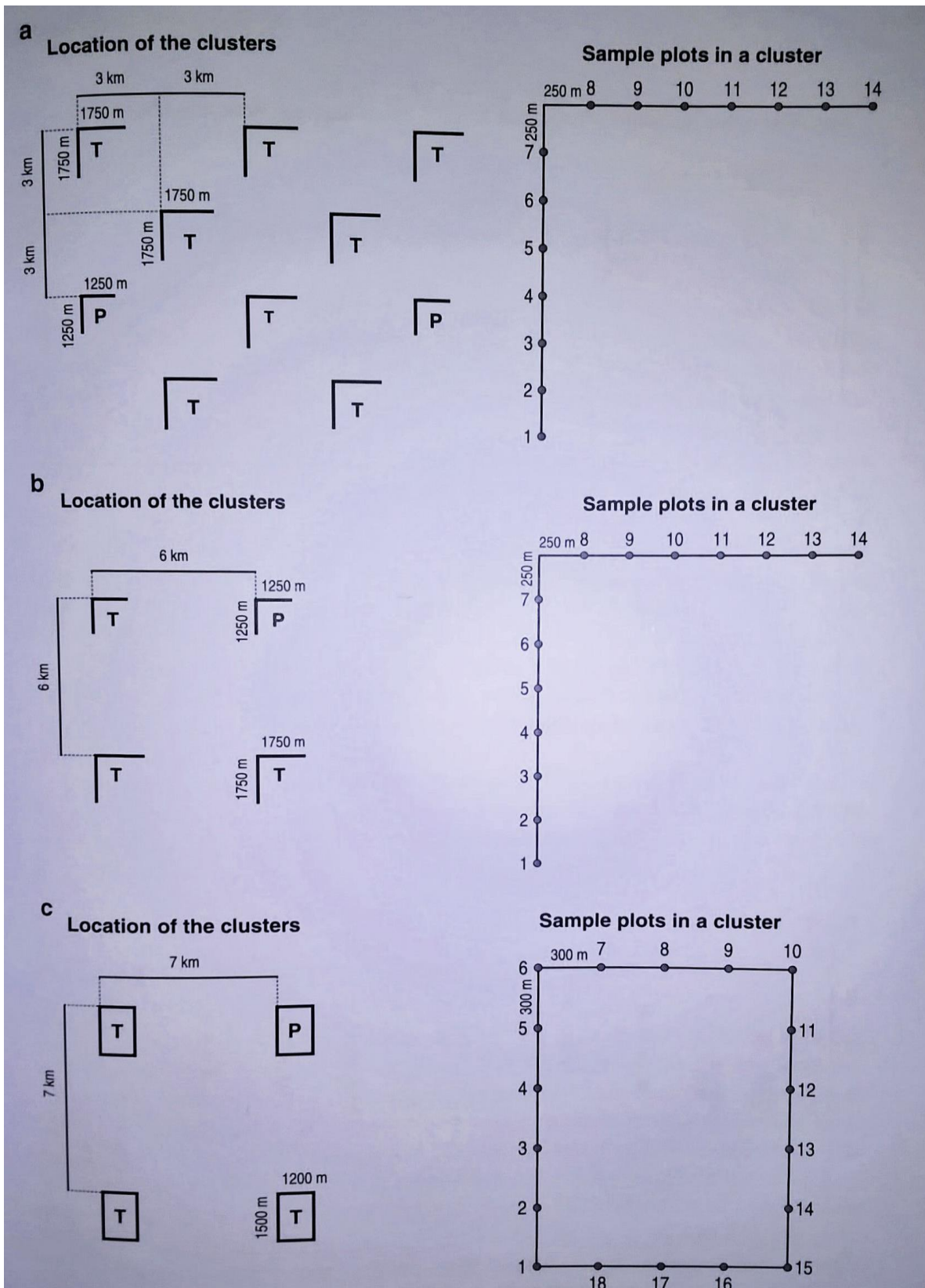
Valtakunnallisessa metsien inventoinnissa koealat on pyritty laittamaan ryhmiin, joiden läpikäymiseen menee noin yksi työpäivä. Yhden ryhmän koealat ovat tarpeeksi lähellä toisiaan, että liikkuminen niiden välillä jalan on mahdollista, mutta kuitenkin siten, että samalle metsikköpalstalle ei tulisi yhtä useampaa koealaa. Koealaryhmät on jaettu systemaattisesti käyttäen neliskanttista verkostoa. Pohjoisessa käytetään väljempää koealaverkostoa. Alueelliset koealasuunnitelmat valitaan aikaisempien simulaatiotutkimusten pohjalta, sekä käyttämällä digitaalisia karttoja, joista käy ilmi maankäyttö sekä puuston tilavuus. Kuva 4 kuvaa koealojen tiheyttä alueittain. Alueiden 2 ja kolme sisältä on valittu 60 km x 60km koealaverkostoja, joiden sisällä on koealapisteet. Alueella 2 on 13 tällaista koealaverkostoa ja alueella 3 on 8 koealaverkostoa.

Kuvissa 5 ja 6 kuvataan alueellista koealaverkostoa. Koealaverkoston muodon valinta Etelä-Suomessa (alueet 1-3) perustuu maankäytön teemakarttoihin sekä kasvavan metsän tilavuuteen. Tästä syystä eri koealoilla saatetaan käyttää erimuotoista koealaryhmää. Alueella kaksi käytettiin L:n muotoista koealaryhmää, mutta alueella kolme suorakulmion muotoista koealaryhmää. Koealaryhmien väli alueella 2 oli 6 km x 6 km ja alueella 3 koealaryhmien väli oli 7 km x 7km. Pohjois-Suomessa (alueet 4 ja 5) koealaverkoston koealaryhmien muodon valinta perustui kahdeksanteen kansalliseen metsien inventointiin. Pohjois-Suomessa koealaryhmän muodoksi valittiin L (kuva 6).

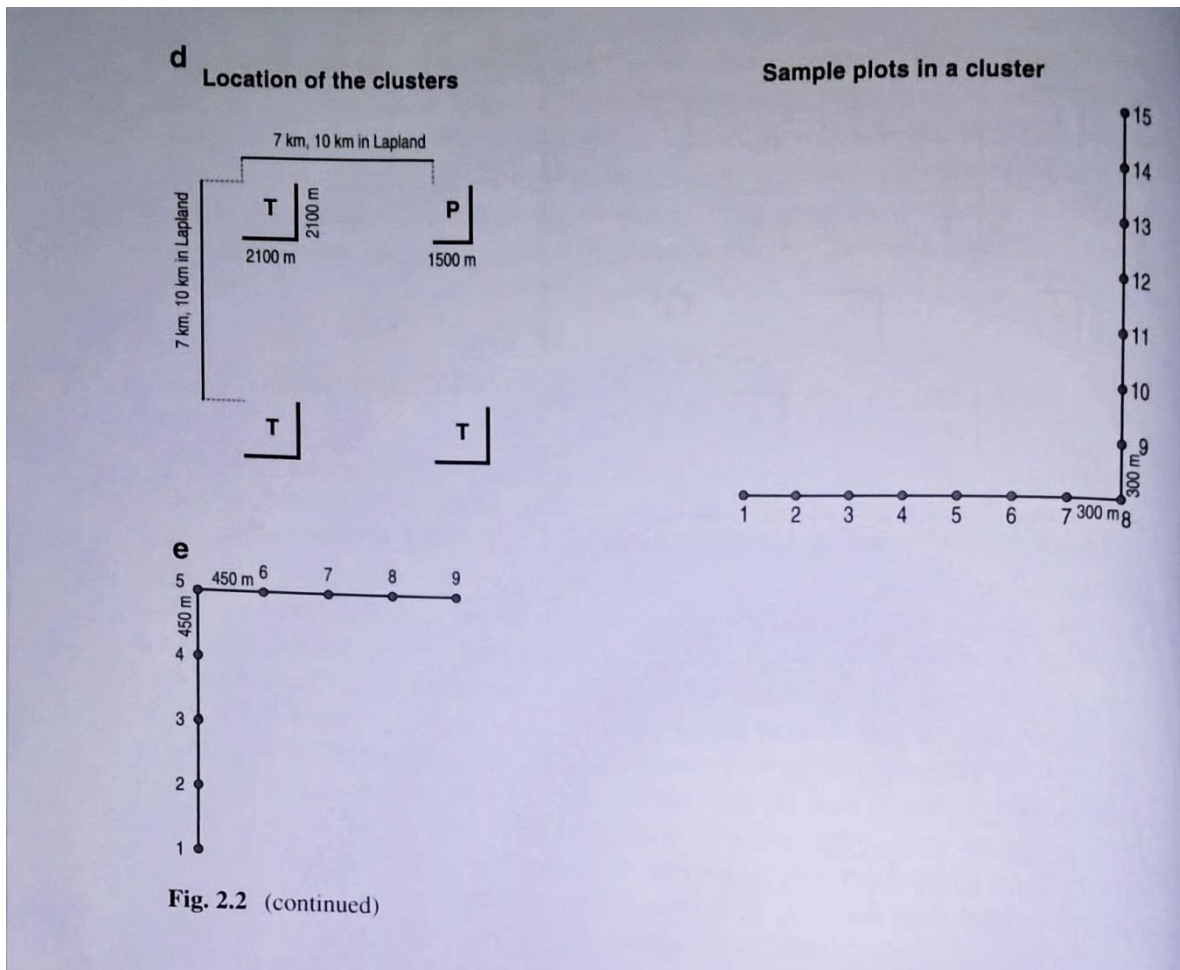
Alueella 4 koealaryhmien väli oli 7 km ja alueella 5 väli oli 10 km. Pohjois-Lapissa (alue 6) koealaryhmät asetettiin 7 km x 7 km verkkoon. Pohjois-Lapin koealaryhmistä karsittiin pois sellaiset alat, joiden arveltiin olevan tuottamattomia, tai ne olivat pitkän kävelymatkan päässä. Yhteensä Pohjois-Lapissa mitattiin 180 koealaryhmää.



Kuva 41. Suomen koala-alueet koalojen tiheyden mukaan. (Tomppo;Heikkinen, ym. 2010)



Kuva 42 Yhdeksännenen valtakunnallisen inventoinnin koelaverkoston suunnitelma: a) Alue 1, b) alue 2, c) alue 3. (Tomppo;Heikkinen, ym. 2010)



Kuva 43 Yhdeksännen valtakunnallisen inventoinnin koealaverkoston suunnitelma: d) alue 4, e) alue 6. (Tomppo;Heikkinen, ym. 2010)

Koealojen pohjapinta-ala laskettiin käyttäen relaskooppiä. Koealojen säde Etelä-Suomessa oli 12,52 m ja Pohjois-Suomessa 12,45 m. Keskiläpimitta ja keskipituus mitattiin pohjapinta-alojen mediaanipuusta. Puiden ikä mitattiin kairaamalla tai laskemalla oksakiehkuroiden avulla. Taimikoista mitattiin taimien lukumäärä keskipituus. (Tomppo;Heikkinen, ym. 2010)

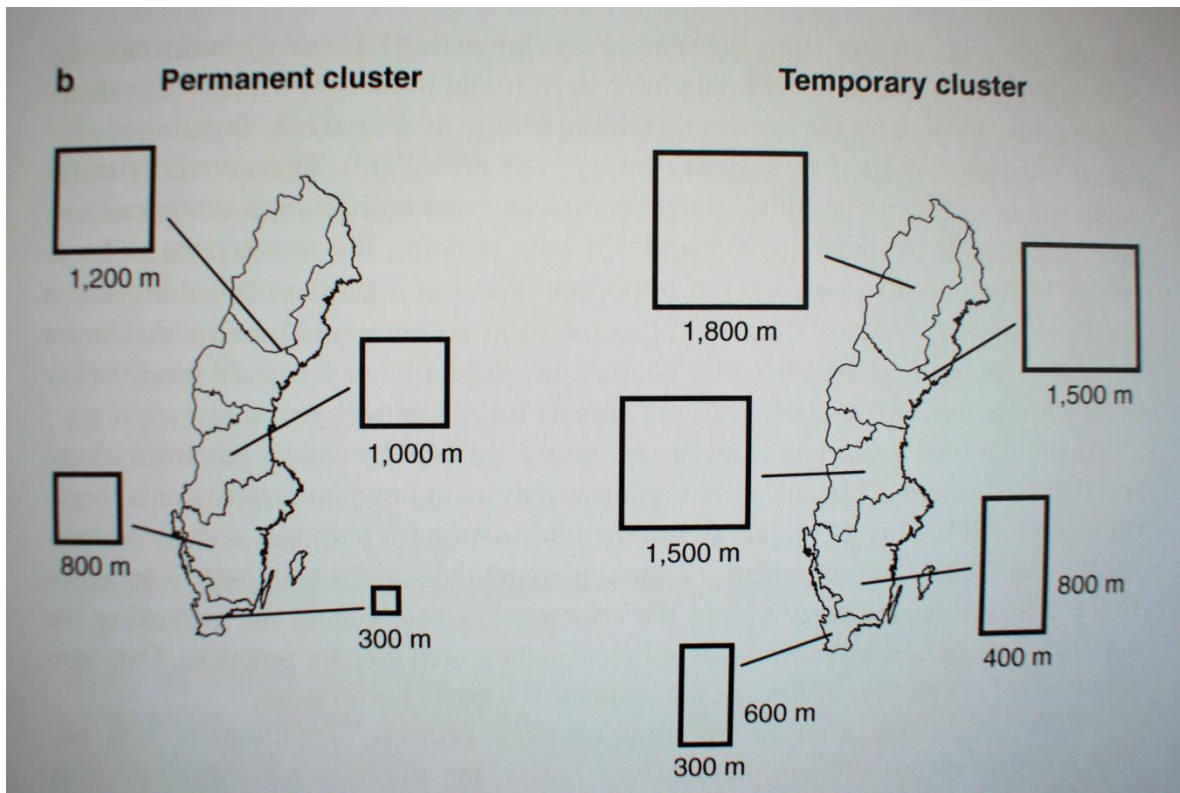
Metsien inventointi Ruotsissa

Ruotsissa metsien inventoinnissa käytetään ympyräkoealoja. Koealat ovat koealaryppäissä, joka on neliön tai suorakulmion muotoinen. Koealaryppään koko vaihtelee alueittain. Ryppäät ovat jaettu systemaattisesti koko Ruotsin alueelle ja ryppäiden väli Etelä-Ruotsissa

on pienempi, kuin Pohjois-Ruotsissa. Sekä vakituksia, että kertaluontoisia ryppäitä käytetään metsien inventoinnissa. Toisin kuin Suomessa, Ruotsissa ei lasketa kuollutta puuta metsävaroihin. Alueet on jaettu viiteen osaan (kuva 7) ja koealaryppäiden muoto vaihtelee alueittain (kuva 8). Inventoinnissa mitataan perinteisiä metsien inventoinnin muuttujia, kuten: puuston ja metsikön ikää, puulajijakaumaa, läpimittajakaumaa, puiden lukumäärää sekä maaperän ja metsikön muuttujia (Tomppo, ym. 2010)



Kuva 44 Kansallisen metsien inventoinnin alueet Ruotsissa. (Tomppo, ym. 2010)



Kuva 45 Vakituisten ja väliaikaisten koelaryppäiden muoto Ruotsissa. (Tomppo, ym. 2010)

Metsien inventointi Norjassa

Norjan yhdeksännessä valtakunnallisessa metsien inventoinnissa (2005 – 2009) käytettiin systemaattista otantaa, johon kuului pysyviä koelaryppäitä, sekä väliaikaisia koelaryppäitä. Inventoinnissa mitataan perinteisiä metsien inventoinnin muuttujia, kuten: puuston ja metsikön ikää, puulajijakaumaa, läpimittajakaumaa, puiden lukumäärää sekä maaperän ja metsikön muuttujia. Lisäksi mitataan eri muuttujia kuvaamaan metsikön biodiversiteettiä. Norjan metsien inventointi kattaa kaikki omistajaryhmät, suojellut metsät sekä kaikki muut maankäytön luokat. Inventoinnin tarkoituksena on tuottaa tietoa metsäteollisuudelle sekä päätöksentekijöille.