

Hiilen kierto yleisellä tasolla sekä trooppisessa ja boreaalisessa biomissa

Juha Lahti

790351A

LuK-seminaari ja -tutkielma

Maantieteen laitos

Oulun yliopisto

30.04.2016.

Sisällysluettelo

1. Hiilen kierto yleisellä tasolla	1-6
1.1. Hiilen hidas kierto.....	4-5
1.2. Hiilen nopea kierto.....	5-6
2. Häiriöiden merkitys hiilen kierrossa.....	6-8
3. Hiilen kierto maaperässä.....	8-9
4. Trooppisen biomin ympäristöolosuhteet	10-11
4.1. Maannoksen rakenne trooppisessa biomissa.....	11
5. Boreaalisen biomin ympäristöolosuhteet.....	12-15
5.1. Maannoksen rakenne boreaalisessa biomissa.....	14-15
6. Tapausesimerkki hiilen kierrosta eri metsäekosysteemeissä	15-18
7. Pohdinta	19-26
8. Lähteet	27-31
8.1. Kirjallisuuslähteet.....	27-30
8.2. Internet-lähteet.....	30-31

Johdanto

Tutkielmassa tarkastellaan hiilen kiertoa ensin yleisellä tasolla. Hiilen kierto on biogeokemiallinen prosessi (Bonan 2008: 1444) ja hiilen kierrolla tarkoitetaan hiilen jatkuvaa liikkumista maapallon systeemin eri osien välillä. Maapallon systeemin osat ovat hydrosfääri, kryosfääri, ilmakehä, biosfääri sekä litosfääri, jotka ovat hiiltä ja muita kemikaa-leja varastoivia geokemiallisia varantoja (Grotzinger & Jordan 2014: 423). Hiilen kierron voidaan todeta olevan globaali prosessi, sillä esimerkiksi hiilen ja ilmaston välillä on keskinäisiä vuorovaikutussuhteita (Grotzinger & Jordan 2014: 426-427, Riebeek & Simmon 2011). Tämän perusteella voidaan väittää, että hiilen kierto liittyy globaaliin ilmastomuutokseen. Ilmastomuutos tarkoittaa ilmaston ominaisuuksissa tapahtuvia havaittavissa olevia muutoksia. Ilmastomuutos on havaittavissa vuosikymmenien aikana ja se on osittain luonnollinen prosessi. Lisäksi ihminen vaikuttaa toiminnallaan ilmastomuutokseen (Bernstein et. al. 2007: 78). Ilmastomuutos sisältää useita maailmanlaajuisia ilmiöitä, joita ovat esimerkiksi äärimmäiset sääilmiöt, lämpötilojen nousu, jäätiköiden sulaminen, muutokset kasvillisuuden aktiivisuudessa sekä muutokset merenpinnan korkeudessa. Kyseiset ilmiöt johtuvat suurimmaksi osaksi fossiilisten polttoaineiden poltosta, jotka lisäävät lämpöä sitovien kaasujen muodostumista ilmakehään (Jackson et. al. 2016). Globaalit prosessit vallitsevat myös spatiaalisesti pienemmällä tarkastelun tasoilla, joten hiilen globaalin kierron voidaan todeta vaikuttavan biomien toimintaan.

Tutkielmassa vertaillaan keskenään trooppista ja boreaalista biomia. Biomi tarkoittaa laajaa ja erillistä biosfäärin osaa, jonka sisällä on useita ekosysteemejä. Biomilla on tyypillinen eläimistä ja kasveista koostuva eliöstönsä (Bernstein et. al. 2007: 77). Hiilen kiertoa vertaillaan kokonaisvaltaisesti ja tasapuolisesti edellä mainittujen suurekosysteemien kesken. Tarkoituksena on selvittää, miten hiilen kierto eroaa trooppisen ja boreaalisen biomin välillä ja lisäksi tarkastellaan niissä ilmeneviä yhtäläisyyksiä. Tutkielmassa tarkastellaan erityisesti terrestrisissä biomeissa olevien biosfäärien merkitystä hiilen kiertoon. Hiilen kiertoa on tutkittu eri biomeissa, mutta trooppisen ja boreaalisen biomin välinen tutkimus vaatii syvempää tarkastelua. Tästä on osoituksena se, että hiilen kiertoon liittyvissä tutkimuksissa käsitellään usein monia biomeja samanaikaisesti, kuten tässä tutkielmassa mukana oleva tapausesimerkki antaa omalta osaltaan olettaa. Tällöin kahden

biomin välinen vertailu voi jäädä tutkimuksessa helposti vähälle huomiolle.

Nykyään on huoli ympäristön tilasta ilmastonmuutoksen ja ekosysteemien elinvoimaisuuden suhteen, joihin hiilen kierrolla on merkitystä. Tutkielmassa tarkasteltavat biomit ovat globaalisti merkittäviä hiilen kiertoon liittyen niiden sisältämän runsaan biomassan vuoksi (Pan et. al. 2013: 608). Ennusteiden mukaan ilmasto tulee lämpenemään tulevana vuosikymmeninä (Gonzalez et. al. 2010: 759, 761). Ilmaston tulevasta lämpenemisestä voidaan päätellä, että trooppiset alueet eivät ole vähenemässä ainakaan lämpötilan suhteen. Trooppiin lämpötilojen ennustetaan kohoavan entisestään, mutta sateisuudessa tulee olemaan alueellista vaihtelua (Kirschbaum et. al. 2007: 114). Boreaalisen biomin levinneisyys tulee luultavasti siirtymään nykyistä pohjoisemmaksi (Bergengren et. al. 2011: 11-12). Näistä syistä johtuen tutkielma on tieteellisesti tarkasteltuna ajankohtainen ja tärkeä.

Ympäristöolosuhteiden tarkastelu on olennaista tutkielmassa, sillä niillä on suuri merkitys hiilen kierrossa (Riebeck & Simmon 2011). Muita tutkielmassa käsiteltäviä asioita ovat hiilen kierron dynamiikka ja stabiilius. Lisäksi tarkastellaan biomeissa esiintyvien häiriöiden sekä kausittaisuuden vaikutuksia hiilen kiertoon sekä näihin vaikuttavia tekijöitä. Tutkielmassa käsiteltävillä häiriöillä tarkoitetaan lähinnä metsäpaloja, hyönteisinvaaasioita sekä ihmisen toimintaa hiilen kierron dynamiikkaa koskien. Kyseisiä näkökulmia tarkastellaan erityisesti pohdinnassa.

Tutkielmasta saatavaa tietoa voidaan soveltaa luonnonsuojelussa, ympäristönsuojelussa sekä ympäristövaikutusten arvioinnissa. Tutkielmasta saatava tieto auttaa ymmärtämään paremmin sekä hiilen kierron kompleksisuutta että ilmastonmuutoksen merkitystä hiilen kierrossa. Tutkielmassa käytettävät kuvat havainnollistavat kyseisiä ilmiöitä. Syy tutkielmassa käsiteltävien trooppisen ja boreaalisen biomin valinnalle on, että ne eroavat paljon toisistaan ja niitä tutkimalla kyseisten suurekosysteemien väliset erot tulevat hyvin esille. Niiden erilaisuus on pääteltävissä siitä, että ne sijaitsevat kaukana toisistaan ja eri leveysasteilla. Lisäksi hiilen kierron eroavaisuudet trooppisen ja boreaalisen biomin kesken indikoivat luultavasti vaihtuvista olosuhteista eri ekosysteemityyppien välillä. Boreaalissa ekosysteemissä on metsiä, joten se on vertailukelpoinen kohde trooppiin nähden, sillä hiilen kierrolla ja metsien olemassaololla on merkittävä keskinäinen yhteys metsien

biomassaan liittyen (Strahler & Strahler 2005: 657).

Oletuksena tutkielmassa on, että hiilen kierto vaikuttaa ekosysteemeihin ilmaston kautta sekä maaperän prosessien muodossa ja hiilen kiertoon sisältyy useita luonnon prosesseja. Lisäksi oletetaan, että trooppisessa ympäristössä hiilen kierto on nopeampaa ja suhteellisesti tarkasteltuna voimakkuudeltaan suurempaa kuin boreaalisessa ympäristössä. Hiilen kierto on luultavasti stabiilimpaa tropiikissa kuin boreaalisessa biomissa ainakin kausittaisuuden ja häiriöiden aiheuttamien vaikutusten suhteen. Tätä tukee käsitys, jonka mukaan boreaalinen biomi on ilmastonmuutokselle haavoittuvaisempi verrattuna trooppiseen biomiin (Gonzalez et. al. 2010: 755). Tutkielmassa pyritään välttämään ilmastonmuutoksen liiallista tarkastelua, vaikka se on olennainen osa hiilen kiertoa tulevaisuudessa. Tutkielmassa määritellään ensin aiheeseen liittyviä keskeisiä käsitteitä, jonka jälkeen hiilen kiertoa tarkastellaan yleisellä tasolla. Sitten keskitytään hiilen kierron ja häiriöiden välisen suhteen tutkimiseen. Tämän jälkeen hiilen kiertoa käsitellään yleisesti terestrisellä tasolla, jonka jälkeen luonnehditaan trooppisen ja boreaalisen biomin ympäristöolosuhteita ja niissä olevaa biosfääriä. Seuraavaksi metsäekosysteemeitä käsitellään hiilen kierron suhteen tapausesimerkin avulla. Hiilen kierron vertailu trooppisen ja boreaalisen biomin välillä esitetään pohdinnassa.

Tutkimuskysymykset:

1. Mitkä tekijät ja prosessit vaikuttavat hiilen kiertoon?
2. Miten hiilen kierto eroaa trooppisen ja boreaalisen biomin välillä?

1. Hiilen kierto yleisellä tasolla

Suurin osa maapallon hiilestä on varastoitunut kiviainekseen ja sitä on maaperän lisäksi valtamerissä, kasveissa, fossiilisissa polttoaineissa sekä ilmakehässä. Hiilen kierto tapahtuu näiden hiilivarantojen välillä ja hiilen ilmastoa lämmittävä vaikutus perustuu hiilen osuuden kasvuun ilmakehässä (Riebeek & Simmon 2011). Viimeksi mainittu prosessi saa aikaan sen, että kasvillisuus kasvaa tehokkaammin (Riebeek & Simmon 2011). Hiilivarannot ovat vuorovaikutuksessa ilmakehän kanssa, joiden välillä hiili liikkuu molempiin suuntiin. Hiilen kierrossa on kyse hiilidioksidin kaasumaisesta jatkuvasta virtauksesta eri

hiilivarantojen välillä (Grotzinger & Jordan 2014: 426). Hiilen sitominen (englanniksi carbon sequestration) tarkoittaa hiilidioksidin varastoimista muualle kuin ilmakehään. Hiilen sitominen suoritetaan pumpaamalla hiiltä eri varantoihin. Tavoitteena hiilen sitomisessa on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, joita vapautuu ilmaan fossiilisten polttoaineiden palamisen seurauksena. Mahdollisia varantoja hiilelle esiintyy sekä terrestriessä että merellisessä biosfäärissä. Lisäksi hiilidioksidia voidaan varastoida maan alle (Grotzinger & Jordan 2014: 669). Hiilivarannot ovat toisiinsa kytkeytyneitä, sillä hiilen osuuden muuttuminen yhdessä hiilivarannossa saa hiilen osuuden muuttumaan muissa varannoissa ja tämä muokkaa hiilen kiertoa varantojen välillä (Riebeek & Simmon 2011). Maapallolla vallitsee ilmastoa ja hiilen kiertoa säätelevä mekanismi, jota kutsutaan maapallon termostaatiksi. Se tarkoittaa sitä, että ilmakehässä oleva hiilidioksidi säätelee ja tasapainottaa maapallon lämpötiloja. Termostaattimekanismi ei voi silti estää lämpötilojen vaihtelua kokonaan, vaan lämpötiloissa on luonnollista vaihtelua. Tässä on kyse siitä että hiilidioksidi on kasvihuonekaasu, jolla on ilmastoa lämmittävä vaikutus. Ilmaston lämpeneminen johtaa takaisinkytkentämekanismiin eli pilvien sekä vesihöyryn globaalin levinneisyyden pysyvyyteen. Seurauksena vesihöyry ja pilvet voimistavat kasvihuoneilmiötä entisestään (Lacis 2010). Kyseinen sykli etenee seuraavasti: ilmakehässä lisääntyvä hiilidioksidi johtaa ilmaston lämpenemiseen, josta seuraa rapautumisen nopeutumista. Rapautumisprosessissa vaaditaan ilmakehässä olevaa hiilidioksidia, joten rapautuminen vähentää ilmakehässä olevan hiilidioksidin määrää jonka seurauksena ilmasto viilenee. Alentunut ilmakehän hiilidioksidipitoisuus ja globaalin ilmaston alentunut lämpötila hidastaa rapautumisnopeutta, jolloin sykli alkaa alusta ja hiilen määrä ilmakehässä jälleen kasvaa (Grotzinger & Jordan 2014: 440).

Hiilen kierto ei ole kuitenkaan stabiili prosessi, vaan siinä esiintyy kausittaisuutta, sillä hiilidioksidipitoisuuksilla on kausittaista syklistä josta kasvaa korkeammille leveysasteille kuljettaessa erityisesti pohjoisella pallonpuoliskolla 55° - 65° N (Wigley & Schimel 2000: 10). Hiili kiertää ekosysteemeissä erityisesti respiraation, hajoamisen, yhteyttämissen sekä palamisen vaikutuksesta (Grotzinger & Jordan 2014: 439). Respiraatiolla (Re) voidaan tarkoittaa eliöissä tapahtuvaa metabolista prosessia, jossa niihin sitoutunutta energiaa vapautuu ympäristöön. Samalla vapautuu vettä ja hiiltä (Grotzinger & Jordan 2014: 288). Maailmanlaajuisen lämpenemisen arvioidaan nopeuttavan hajoamistahtia,

jolloin hiiltä vapautuu yhä enemmän ilmakehään (Strahler & Strahler 2005: 11). Hajoamisella on merkitystä terrestristen ekosysteemien hiilen ja ravinteiden kierrossa, sillä se saa aikaan ravinteiden paremman saatavuuden eliöille. Hajoamisen nopeus riippuu ympäristön lämpötilasta ja kosteudesta sekä karikkeen laadusta (Liski et. al. 2003: 575). Sekä ekosysteemeissä olevilla eliöillä että maaperän koostumuksella on yhteys hiilen kiertoon (Grotzinger & Jordan 2014: 426).

Meriekosysteemit ovat vaarassa ilmastonmuutoksen vuoksi, sillä meret ovat happamoitumassa. Tämä johtuu siitä että hiilidioksidia liukenee vesistöihin, jolloin näihin muodostuu happamoittavaa hiilihappoa (Riebeek & Simmon 2011). Merten ja ilmakehän väliseen hiilen kiertoon vaikuttaa sekä meren että ilman lämpötila, tuulen nopeus ja meriveden koostumus (Grotzinger & Jordan 2014: 426). Lisäksi merivirroilla on yhteys tähän vuorovaikutukseen (Riebeek & Simmon 2011). Hiiltä siirtyy veden ja ilman välillä merisumun kautta (Grotzinger & Jordan 2014: 426).

Hiiltä varastoituu kasveihin yhteyttämisen avulla ja sitä vapautuu kasvimateriaalin hajotessa sekä respiraation seurauksena. Lisäksi hiiltä vapautuu ilmakehään hapettumisen seurauksena eli biomassan palaessa metsäpalojen seurauksena. Osa hiilidioksidista liukenee pintavesistöihin (Grotzinger & Jordan 2014: 426). Pintavesistöistä hiiltä kulkeutuu merieliöihin, joiden respiraation seurauksena hiiltä vapautuu ilmaan ja kyseinen sykli alkaa uudestaan alusta. Litosfäärin suhteen hiiltä vapautuu ilmakehään kiviaineksen, kuten karbonaattien ja silikaattien rapautuessa. Karbonaattien suhteen hiiltä vapautuu ilmakehään ja silikaattien rapautuessa hiiltä sitoutuu litosfääriin (Grotzinger & Jordan 2014: 427). Maannoksen koostumuksella on merkitystä kiviaineksen rapautumisnopeudessa ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuus säätelee rapautumisnopeutta. Lisääntyvä hiilidioksidipitoisuus ilmakehässä lisää myös hiilen määrää kiviaineksessa, josta seuraa rapautumisen kiihtymistä. Rapautumisprosessi kuluttaa ilmakehässä olevan hiilen pitoisuuksia, jolloin ilmasto viilenee. Erityisesti kalsiumpitoisten kivien rapautuminen vähentää ilmakehässä olevan hiilen määrää (Grotzinger & Jordan 2014: 439). Tämä selittyy sillä, että kalkkikiviin sitoutuu erityisen paljon hiiltä (Campbell & Reece 2005: 1196). Ilmaston viiletessä rapautumisnopeus laskee, jolloin ilmakehässä esiintyvä hiili lisääntyy ja ilmasto lämpeenee (Grotzinger & Jordan 2014: 439).

Hiiltä on sitoutunut maan pinnan yläpuolella olevan biomassan lisäksi maan pinnan alapuolella olevaan biomassaan (Grotzinger & Jordan 2014: 439). Putkilokasvien suhteen hiiltä varastoituu kasveihin lehtien ilmarakojen avulla, joita kasvit käyttävät yhteyttämiseen (Campbell & Reece 2005: 739). Kasveilla on osuutta hiilen sitoutumisessa maaperää koskien, sillä hiiltä sitoutuu maaperään lähinnä juurien ja lehtien karikkeen mukana (Davidson & Janssens 2006: 165). Olennaista hiilen kierrossa on metsien kasvun ja eloperäisen aineksen hajoamistahti etenkin pohjoisen pallonpuoliskon havumetsävyöhykkeellä (Strahler & Strahler 2005: 11). Metsien iällä on merkitystä edelliseen liittyen, sillä nuoret metsät sitovat tehokkaasti hiiltä ja ne kasvavat nopeasti vanhoihin metsiin verrattuna (Strahler & Strahler 2005: 657).

Hiilidioksidi aiheuttaa noin 20 % kasvihuoneilmiöstä (Riebeek & Simmon 2011) ja hiilidioksidi vaikuttaa vesihöyryn muodostumiseen lämpötilan vaihtelun kautta. Tämä toimii molemmin suuntaisesti, sillä hiilidioksidin lisääntyessä ilmakehässä ilmasto lämpenee. Samalla vesihöyryä muodostuu enemmän, mikä kiihdyttää kasvihuoneilmiötä. Hiilidioksidipitoisuuden vähentyessä ilmakehässä ilmasto viilenee eikä vesihöyryä muodostu niin paljon, jolloin kasvihuoneilmiö hidastuu (Riebeek & Simmon 2011). Hiilen varastoitumisen ja maailmanlaajuisten lämpötilojen välillä on monimutkaisia suhteita ja ilmastolla on keskeinen asema hiilen kierrossa. Alhaisilla leveysasteilla on lämmintä ja kosteaa, jolloin myös biologinen aktiivisuus kuten puiden kasvu ja yhteyttämisen tehokkuus on suurta. Tällöin kasvillisuus kykenee varastoimaan suuria määriä hiiltä. Toisaalta hiilen varastoituminen maaperään lisääntyy korkeille leveysasteille siirryttäessä, sillä hajoaminen on hitaampaa korkeilla leveysasteilla alhaisten lämpötilojen vuoksi (Wigley & Schimel 2000: 22).

1.1. Hiilen hidas kierto

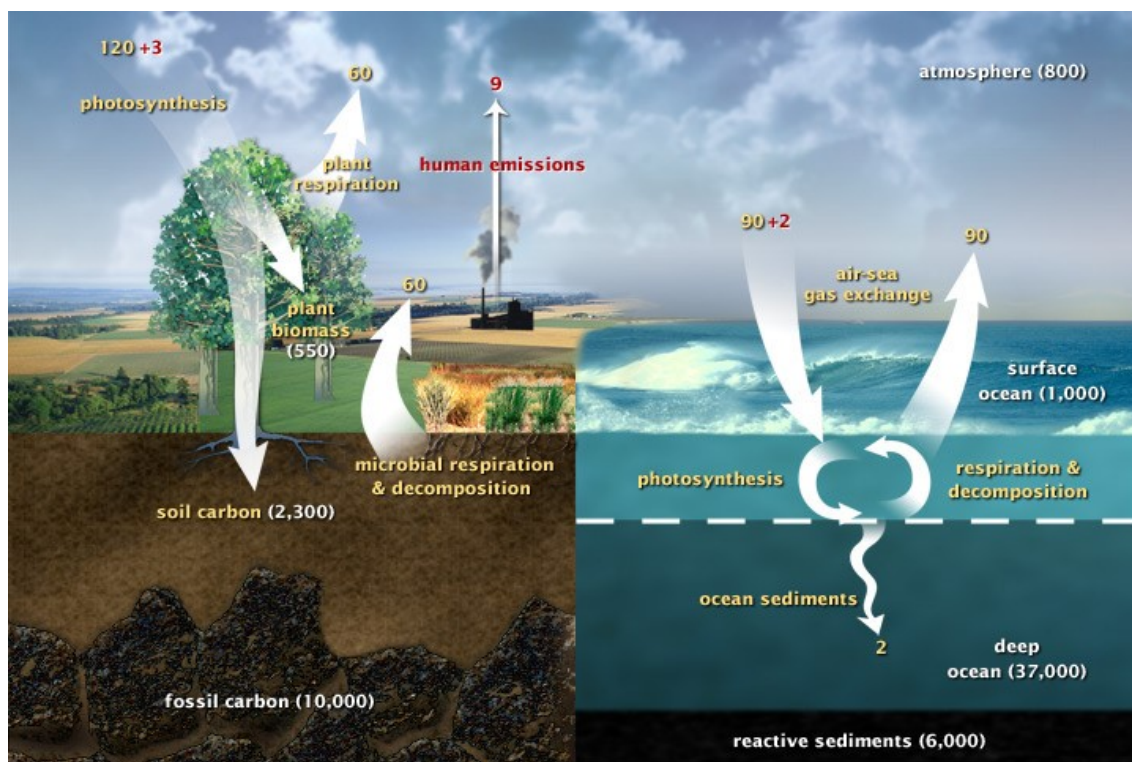
Hiilen hidas kierto tarkoittaa tektonisia ja kemiallisia prosesseja, joiden seurauksena hiili kiertää eri hiilivarantojen välillä. Ajallisesti tarkasteltuna hiilen hidas kierto tapahtuu 100-200 miljoonan vuoden aikana (Riebeek & Simmon 2011). Hiilen hitaassa kierrossa on kyse siitä, että hiiltä siirtyy ilmakehästä litosfääriin sateen mukana. Tästä alkaa kemiallinen rapautuminen mikä tarkoittaa sitä, että hiiltä yhdistyy veteen, jolloin muodostuu hii-

lihappoa joka liuottaa kivilajeja. Liukenevat kivilajit vapauttavat muun muassa kalsiumioneja, jotka siirtyvät pintaveden mukana meriin ja eliöihin. Lopulta eliöiden jäänteet sedimentoituvat kiviainekseksi, joihin sitoutuu hiiltä. Hiiltä vapautuu jälleen ilmakehään vulkanismin avulla kivilajien sulaessa (Riebeek & Simmon 2011).

1.2. Hiilen nopea kierto

Hiilen nopea kierto tarkoittaa hiilen liikkumista biosfäärissä. Tämä voidaan käsittää joka vuosi tapahtuvana kiertona (Riebeek & Simmon 2011). Kasveilla ja fytoplanktonilla on merkittävä asema hiilen nopeassa kierrossa, sillä ne absorboivat hiiltä soluihinsa. Hiiltä vapautuu takaisin ilmakehään eliöiden kuollessa sekä hajotessa hajottajabakteerien ja metsäpalojen vaikutuksesta. Hiilen nopea kierto määräytyy paljolti kasvukauden pituuden ja tämän ajoittumisen mukaan. Tämä on olennaista varsinkin korkeammilla leveysasteilla (Riebeek & Simmon 2011).

Kuvasta 1 ilmenee hiilen nopea kierto, jossa keltaiset arvot tarkoittavat hiilen luonnollista virtausta, valkoiset arvot tarkoittavat hiilen sitoutumista ja punaiset ihmisen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Kuvasta 1 voidaan havaita, että hiiltä on sitoutunut erityisen paljon valtameriin sekä fossiilisiin polttoaineisiin. Hiilen nopea kierto määräytyy lähinnä valtamerien, litosfäärin, ilmakehän sekä biosfäärin prosessien vaikutuksesta. Lisäksi ihminen muokkaa hiilen nopeaa kiertoa (Riebeek & Simmon 2011).



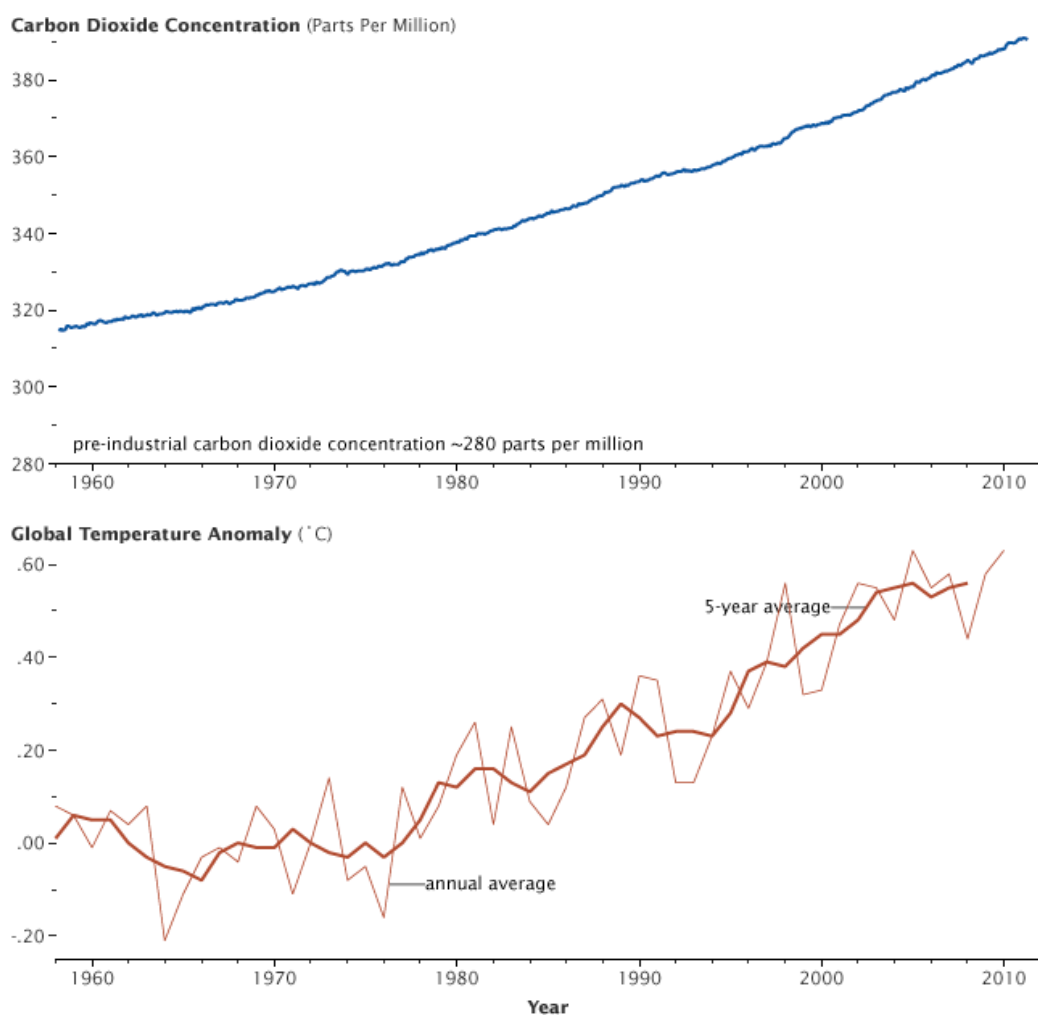
Kuva 1. Hiilen nopea kierto pääpiirteissään (Riebeek & Simmon 2011: The Carbon Cycle).

2. Häiriöiden merkitys hiilen kierrossa

Ihmisellä on nykyään merkittäviä vaikutuksia hiilen kiertoon. Fossiilisten polttoaineiden poltto sekä maankäytön muokkaus häiritsevät hiilen luonnollista kiertoa. Viimeksi mainittu häiriö tarkoittaa metsien raivausta erityisesti maanviljelyä varten (Strahler & Strahler 2005: 656). Trooppisten alueiden biomassa on vähenemässä hakkuiden vuoksi, mutta korkeammilla leveysasteilla metsien biomassa on kasvamassa. Metsien biomassan kasvua lisää se, että lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa globaalisti yhteyttämisen teho kasvaa, jolloin ekosysteemien biomassan tuottaminen kiihtyy. Yhteyttämisen tehoon vaikuttaa kuitenkin myös veden, valon sekä ravinteiden saatavuus (Strahler & Strahler 2005: 657).

Kuvasta 2 nähdään hiilidioksidipitoisuuden ja lämpötilan globaaleja muutoksia ilmake-

hässä. Hiilidioksidin osuus on lisääntynyt vuodesta 1958 lähtien. Vuonna 1958 hiilidioksidia oli noin 315 ppm ja vuonna 2012 osuus oli 390 ppm. Hiilidioksidin määrä on kasvanut melko tasaisesti viime vuosikymmeninä, kuitenkin kiihtyvällä tahdilla. Globaalin lämpötilan muutoksessa on ollut vaihtelua ja lämpötilat ovat keskimäärin kohonneet viime vuosikymmeninä (Riebeek & Simmon 2011). Tätä selittää osin se, että ilmakehä sisältää nykyään enemmän hiiltä kuin koskaan ainakin viimeisen kahden miljoonan vuoden aikana (Riebeek & Simmon 2011).



Kuva 2. Globaali hiilidioksidin osuus (ylempänä) ja lämpötilan vaihtelu (alempänä) ilmakehässä vuosina 1958-2012 (Riebeek & Simmon 2011).

Tuli on globaalisti merkittävin häiriötekijä terrestrisissä ekosysteemeissä. Sillä on sekä suoria että epäsuoria vaikutuksia ekosysteemien hiilen kiertoon ja se saa aikaan hiilen

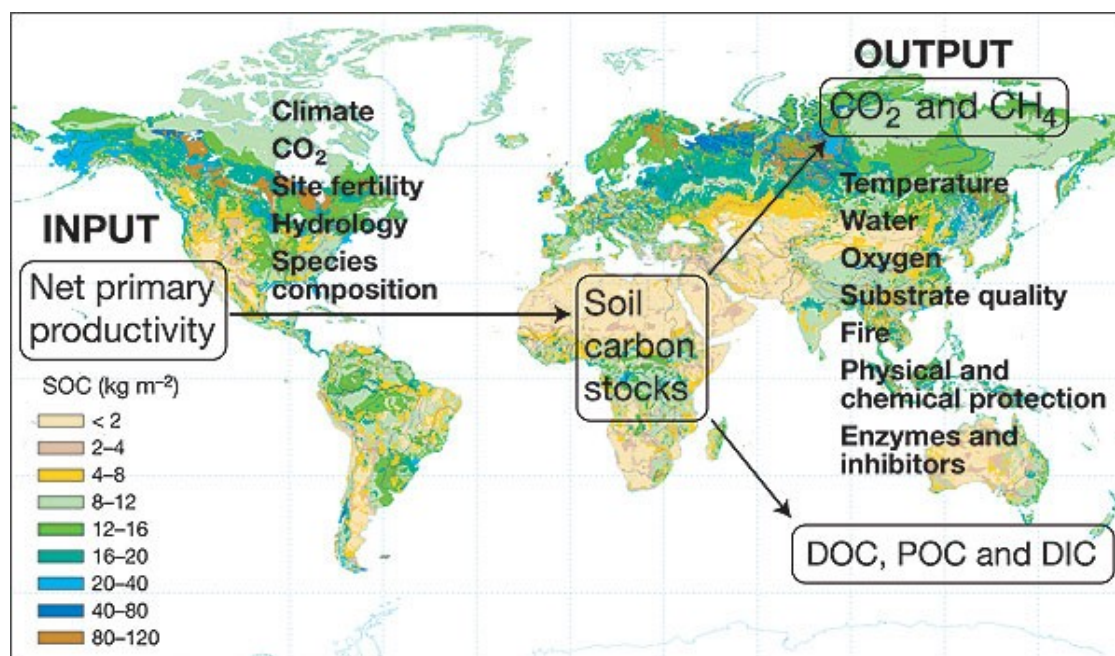
vapautumista ilmakehään kasvillisuuden palamisen myötä. Lisäksi tuli muokkaa ekosysteemien tuottavuutta ja sillä on kauaskantoisia vaikutuksia hiilen kiertoon. Tulen vaikutusalueella on esimerkiksi jälkeinpäin alentunut hiilensitomiskyky kasvillisuuden hävityä metsäpalon seurauksena (Li et. al. 2014: 1345). Tulen aiheuttamat häiriöt ovat lisääntyneet boreaalisilla alueilla viime vuosikymmeninä (Denman et. al. 2007: 527). Ilmaston lämmitessä boreaalisella vyöhykkeellä esiintyvät metsäpalot lisääntyvät kosteuden vähenemisen sekä lumipeitteen lyhytkestoisuuden vuoksi (Denman et. al. 2007: 550).

3. Hiilen kierto maaperässä

Kuvassa 3 on esitetty hiilen globaali kierto maaperässä. Kyseisessä kuvassa oleva merkintä DOC tarkoittaa liuennutta eloperäistä hiiltä (Davidson & Janssens 2006: 166). Tarkemmin määriteltynä liuennut eloperäinen hiili tarkoittaa liuoksessa olevaa eloperäisen hiilen kokonaisuutta. DOC indikoi liuoksen sisältämän eloperäisen aineksen määrästä (Bolan et. al. 2011: 3). Liuennutta eloperäistä hiiltä vapautuu ilmakehään terrestristen alueiden maaperästä (Davidson & Janssens 2006: 166). POC tarkoittaa pienhiukkaseloperäistä hiiltä (englanniksi particulate organic carbon) ja DIC tarkoittaa liuennutta elotonta hiiltä. SOC kuvaa maaperässä olevan eloperäisen hiilen osuutta (Davidson & Janssens 2006: 166). Nettoerustuotanto (NPP) tarkoittaa bruttoperustuotantoa, josta on vähennetty perustuottajien respiratioon käyttämä energiamäärä. Nettoerustuotanto kuvaa kemiallista energiaa joka on saatavilla ekosysteemin kuluttajille (Campbell & Reece 2005: 1187). Kuvassa 3 on esitetty nettoerustuotannon (englanniksi net primary productivity) merkitys liittyen hiilen kiertoon terrestrisissä ekosysteemeissä. Ekosysteemin nettoerustuotanto lisää ilmakehässä olevan hiilidioksidin varastoitumista maaperään. Maaperästä vapautuvat hiilen eri muodot sekä metaani vapauttavat hiiltä takaisin ilmakehään ja hiilidioksidi on merkittävin hajoamisen tuloksena ilmakehään vapautuva yhdiste. Maaperän sisältämän hiilen määrään vaikuttavat useat tekijät, kuten ilmasto ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuus. Lämpötila, veden saatavuus sekä kasvupaikkaolosuhteet ja metsäpalojen dynamiikka muokkaavat myös terrestrisen maaperän sisältämän hiilen pitoisuuksia. Kuvasta 3 voidaan havaita maaperän sisältämän eloperäisen hiilen osuuksia tropiikissa ja boreaalisessa biomissa. Molemmissa biomeissa on paljon maaperään sitoutunutta hiiltä.

SOC:n määrässä on vaihtelua kyseisten biomien välillä ja näiden sisällä. SOC:n määrä on korkea borealisessa biomassassa etenkin Pohjois-Amerikassa sekä Keski- ja Länsi-Venäjällä. Tropiikin sisältämä SOC on erityisen suuri Kaakkois-Aasiassa, Keski-Amerikassa sekä Afrikan sademetsissä. Maaperässä olevan eloperäisen hiilen pitoisuudet ovat suurempia borealisessa kuin trooppisessa biomassassa (Davidson & Janssens 2006: 166).

Camino-Serrano ym. (2014) ovat tutkineet edellä mainittua liuennutta eloperäistä hiiltä (DOC) ja sen dynamiikka saattaa olla samanlainen kuin hiilen muilla muodoilla. Heidän mukaansa hiili liikkuu luonnossa lateraalisesti terrestrisen ja akvaattisen ympäristön välillä, jossa olennaisena elementtinä on liuennut eloperäinen hiili maaperän liuoksessa (Camino-Serrano et al. 2014: 497). Kyseistä hiiltä sitoutuu maaperään lehtien karikkeeseen, biologisen hajoamisen sekä juurien eritteiden myötä (Bolan et al. 2011: 5). Noen ja tommun kerrostuminen sitoo myös hiiltä maaperään (Schulze et al. 2011: 464). Liuennutta eloperäistä hiiltä vapautuu maaperästä kaasujen vapautuessa ilmakehään sekä mineralisaation seurauksena. Lisäksi hiiltä huuhtoutuu jokien latvavesistöihin (Camino-Serrano et al. 2014: 497).



Kuva 3. Globaali hiilen kierron dynamiikka terrestristen alueiden maaperässä (Davidson & Janssens 2006: 166).

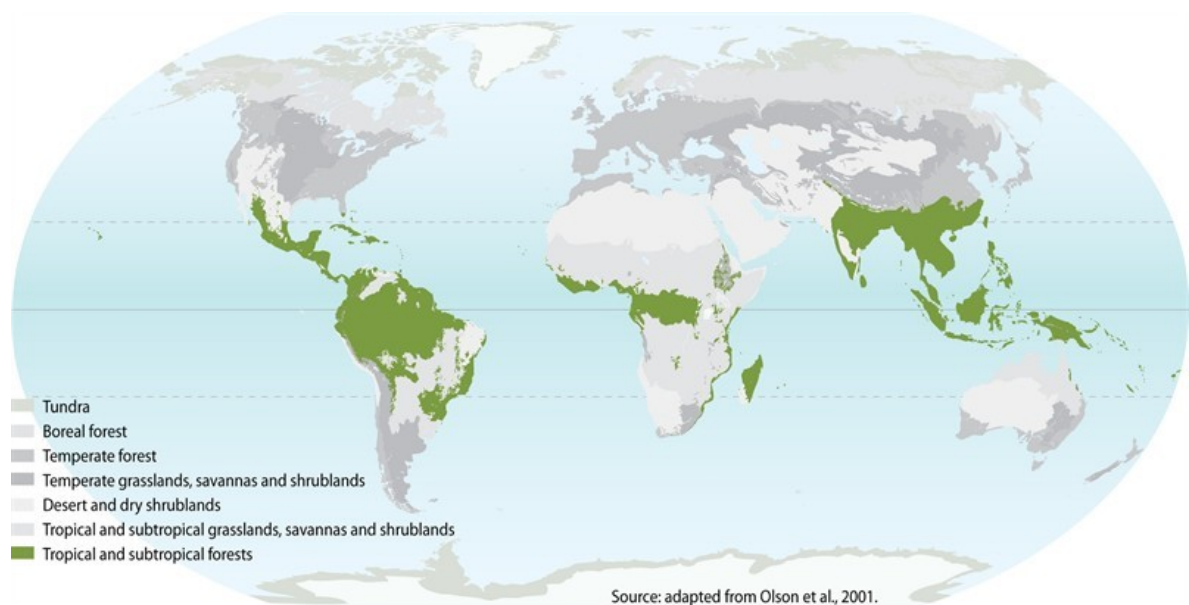
4. Trooppisen biomin ympäristöolosuhteet

Trooppisten alueiden sateisuus on säännöllistä ja vuosittainen sademäärä on siellä 200-400 cm. Kuivempien metsäekosysteemien sateisuudessa esiintyy kuitenkin kausittaisuutta, joissa kuiva kausi kestää kuudesta seitsemään kuukautta ja sadetta kertyy vuodessa 150-200 cm. Lämpötila on tropiikissa yleensä 25-29 asteen välillä (Campbell & Reece 2005: 1100). Grotzingerin & Jordanin mukaan trooppisten metsien lämpötila vaihtelee kuitenkin 20-30 asteen välillä (Grotzinger & Jordan 2014: 433). Trooppisten metsien kasvillisuus on kerrostunutta ja kilpailua esiintyy valon saannin suhteen. Tämän vuoksi puut kasvavat sulkeutuneen ja tiheän latvuston yläpuolelle. Latvustopuut ovat lisäksi oma kasvillisuuskerroksensa. Latvustopuiden alapuolella kasvavia puita on yksi tai kaksi kerrosta ja lisäksi tropiikissa esiintyy pensaita ja ruohokasveja. Kuivemmissä trooppisissa metsissä on vähemmän kasvillisuuskerroksia ja siellä puut pudottavat lehtensä kuivana kautena. Trooppisia sademetsiä luonnehtivat leveälehtiset ikivihreät lehtipuut. Epifyyttejä kuten orkideoja sekä ananaskasveja esiintyy varsinkin kosteammissa metsissä. Kuivemmissä trooppisissa metsissä sukkulentit ja okapensaat ovat yleisiä. Eliöt ovat tyypillisesti kryptisiä, eli niitä on vaikea havaita ympäristöstään. Eliöiden monimuotoisuus on tropiikissa suurempaa kuin muissa biomeissa (Campbell & Reece 2005: 1100).

Trooppiset metsät sisältävät 25 % terrestrisen biosfäärin hiilestä ja ne voivat varastoida suuria määriä hiiltä. Ne toimivat hiilinieluinä ja niillä on merkittävä osuus globaalissa ilmaston lämpenemisessä. Trooppiset metsät hillitsevät ilmastomuutosta haihduttavan viilenemisen sekä hiilen sitomisen kautta. Tropiikissa esiintyvät häiriöt, kuten kuivuus ja sen myötä esiintyvät metsäpalot sekä El Niño vaikuttavat hiilen kiertoon ja ilmaston välisiin suhteisiin. El Niñon aikaan tropiikissa on tavallista kuivempaa ja lämpimämpää, jolloin hiiltä siirtyy biosfääristä ilmakehään tavanomaista enemmän. Tällä on ilmastoa lämmittävä vaikutus. Trooppiset metsät ovat uhattuina ilmastomuutoksesta johtuen ja tropiikin ennustetaan lämpenevän sekä kuivuvan tulevaisuudessa, jolloin trooppisten alueiden haihduttava viileneminen alenee. Tämän seurauksena hiiltä vapautuu trooppisista ekosysteemeistä entistä enemmän ilmakehään. Tämä myötävaikuttaa siihen, että metsät kuolevat helpommin (Bonan 2008: 1445).

Kuvassa 4 on esitetty trooppisten metsien maailmanlaajuinen levinneisyys. Suurin osa

trooppisesta biomista sijaitsee kääntöpiirien välisellä alueella eli leveyspiirien $23,5^{\circ} \text{N}$ - $23,5^{\circ} \text{S}$ sisällä. Trooppisen biomin levinneisyys kattaa Keski-Amerikan manneralueet, laajoja alueita Etelä-Amerikasta sekä Karibian saaret. Madagaskar, Afrikan itärannikko ja Saharan eteläpuolisen Afrikan keski- ja länsiosat kuuluvat myös trooppiikkiin. Lisäksi Intian niemimaa sekä Kaakkois-Aasia ovat osa trooppista biomia (Trumper et. al. 2009: 26 Olsonin et. al. 2001: 934 mukaan).



Kuva 4. Trooppisten metsien globaali levinneisyys (Trumper et. al. 2009: 26 Olsonin et. al. 2001: 934 mukaan).

4.1. Maannoksen rakenne trooppisessa biomissa

Oksisolit ovat tyypillisiä Etelä-Amerikan sekä Afrikan trooppisilla alueilla. Oksisolit ovat iältään vanhoja ja ne ovat kehittyneet vakaissa ympäristöolosuhteissa, jolloin ilmasto on ollut kostea. Oksisolit ovat hauraita, rapautuneita sekä niukkaravinteisiä maannoksia. Lisäksi troopissa on ultisoleja, joita esiintyy erityisesti Kaakkois-Aasiassa ja Etelä-Amerikassa. Ultisolin vuorottaisesta vettymisestä ja kuivumisesta seuraa maannoksen kovettumista (Strahler & Strahler 2005: 621).

5. Boreaalisen biomin ympäristöolosuhteet

Boreaalisella biomilla voidaan tarkoittaa havumetsävyöhykettä. Se on laajin terrestrinen biomi ja sitä esiintyy Euraasiassa sekä Pohjois-Amerikassa (Campbell & Reece 2005: 1102). Vyöhyke on ilmastoltaan mantereinen ja pääosin kostea. Kyseinen ilmastotyyppi sijaitsee pohjoisella pallonpuoliskolla 50 ja 70 leveysasteen välillä (Strahler & Strahler 2005: 306). Boreaalisen biomin sademäärä on vuosittain 30-70 cm ja ajoittain esiintyy kuivuutta (Campbell & Reece 2005: 1102). Vuotuinen sademäärä on vähäinen boreaalisella vyöhykkeellä. Boreaalisten alueiden vuodenaikaisvaihtelut ovat lämpötilan suhteen vaihtelevampia kuin missään muussa biomissa (Strahler & Strahler 2005: 306). Esimerkiksi Siperiassa mantereinen ilmaston vuodenaikaisvaihtelu on äärimmäistä, sillä lämpötila voi vaihdella talven -70 asteen ja kesän 30 asteen välillä (Campbell & Reece 2005: 1102). Boreaalisten metsien keskimääräiset lämpötilat vaihtelevat noin -5 ja 5 asteen välillä (Grotzinger & Jordan 2014: 433). Havumetsien talvet ovat pitkiä ja kylmiä, kesät taas kuumia (Campbell & Reece 2005: 1102). Strahlerin & Strahlerin mukaan boreaalisen vyöhykkeen kesät ovat kuitenkin viileitä sekä lyhyitä ja suurin osa sateista johtuu siitä, että kesällä syklonit tuovat mukanaan kosteutta alueelle. Boreaalinen biomi sijoittuu syklonien sekä kylmien ja kuivien ilmassojen alueelle (Strahler & Strahler 2005: 306).

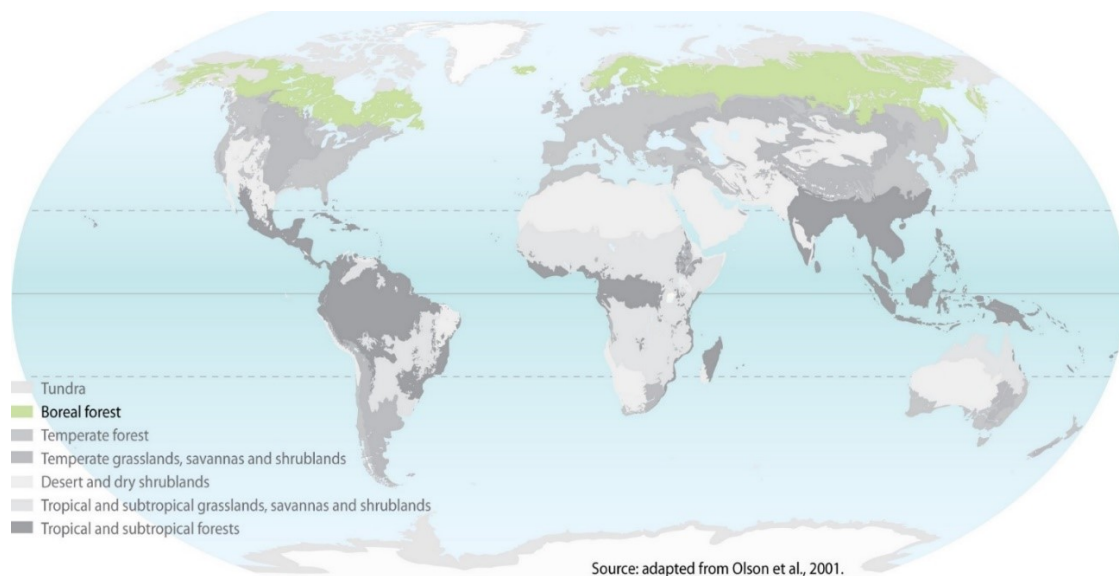
Taiga eli kylmä metsämaa kuuluu boreaaliseen biomiin, jota luonnehtivat harvassa esiintyvät matalat puut sekä sammalet ja naavat (Strahler & Strahler 2005: 307). Suurin osa biomin havupuista on ikivihreitä (Strahler & Strahler 2005: 718). Käpyjä tuottavat puut kuten kuusi, mänty, pihta ja hemlocki ovat yleisiä havumetsävyöhykkeellä (Campbell & Reece 2005: 1102). Kyseisessä biomissa esiintyy myös lehtipuita kuten haapaa, koivua, lehtikuusta sekä pajua (Strahler & Strahler 2005: 307). Puut ovat muodoltaan kartiomaisia, jotta niihin ei kohdistu liian suuri lumitaakka. Biomissa esiintyy myös ruohokasveja sekä pensaita. Nisäkkäiden monimuotoisuus on havumetsävyöhykkeellä korkea ja useat muuttolinnut pesivät boreaalisessa biomissa. Ajoittaiset hyönteisinvaasiot toimivat häiriötekijänä boreaalisella vyöhykkeellä, sillä hyönteiset voivat syödä puita laajalta alueelta (Campbell & Reece 2005: 1102).

USA:n luoteisrannikon havumetsät ovat lauhkeita sademetsiä, joissa sadetta voi kertyä vuosittain jopa yli 300 cm (Campbell & Reece 2005: 1102). Rannikkometsät ovat osa

havumetsävyöhykettä, joiden havupuut ovat ikivihreitä. Ne sijaitsevat Pohjois-Amerikan länsirannikolla ja aluetta luonnehtivat leudot lämpötilat, korkea kosteuspitoisuus sekä sateisuus. Puusto on tiheää ja alueen tyypillisiä puulajeja ovat setri, kuuset sekä jättiläispuunapuut (Strahler & Strahler 2005: 720).

Ilmastomallien mukaan boreaalisilla alueilla on erityisen suuri merkitys ympäristön lämpötilaan globaalisti. Boreaalisten metsien määrällä ja lämpötilan välillä on todettu korrelaatio, jonka mukaan metsien väheneminen alentaa ympäristön lämpötilaa ja metsien yleistymisen johtaa omalta osaltaan ilmaston lämpenemiseen (Bonan 2008: 1445). Maailmanlaajuinen lämpeneminen uhkaa boreaalisia alueita (Bonan 2008: 1446). Tämä merkitsee ikivihreiden ja kesävihantien metsien osuuksien muuttumista boreaalisen biomin sisällä. Häiriöiden kuten hyönteisinvaasioiden sekä metsäpalojen yleistymisen voi johtaa metsien iän nuorentumiseen (Bonan 2008: 1447). Boreaalisiin ekosysteemeihin varastoituu paljon hiiltä ikiroutaan, maaperään sekä kosteikkoihin ja vyöhykkeen ekosysteemit ovat hiilinieluja (Bonan 2008: 1446). Boreaalisten alueiden laajetessa tundralle hiiltä varastoituu aikaisempaa enemmän kasvillisuuteen lisääntyneen biomassin myötä. Tällöin maaperään sitoutuneen hiilen määrässä tapahtuu muutoksia alueella (Denman et. al. 2007: 503).

Kuvassa 5 on esitetty boreaalisten metsien globaali levinneisyys. Kuvasta 5 havaitaan, että boreaalinen biomi sijaitsee kokonaan pohjoisella pallonpuoliskolla ja sen levinneisyys on rajoittunut leveysasteiden suhteen. Boreaalinen biomi on laaja ja yhtenäinen suurekosysteemi, joka kattaa Euraasian ja Pohjois-Amerikan pohjoisosia. Islanti on lisäksi määritelty osaksi boreaalista biomia (Trumper et. al. 2009: 21 Olsonin et. al. 2001: 934 mukaan).



Kuva 5. Boreaalisten metsien globaali levinneisyys (Trumper et. al. 2009: 21 Olsonin et. al. 2001: 934 mukaan).

5.1. Maannoksen rakenne boreaalisessa biomissa

Hiiltä on erityisen runsaasti boreaalisen vyöhykkeen maannoksessa (Strahler & Strahler 2005: 657). Boreaalisessa biomissa esiintyy spodosolimaannosta Euraasiassa ja Pohjois-Amerikassa. Spodosolia voidaan kutsua myös podsoliksi. Spodosolia on varsinkin Ruotsista Venäjän keskiosiin ulottuvalla vyöhykkeellä sekä Kanadan itäosissa (Strahler & Strahler 2005: 622-623). Spodosolimaannosta muodostuu kylmässä boreaalisessa ilmastossa havupuiden karikkeen alapuolella. Spodosoli on pH-arvoltaan hapanta ja siinä on vain vähän ravinteita kasveille (Strahler & Strahler 2005: 623). Lisäksi humuksen määrä on vähäinen (Strahler & Strahler 2005: 623, 626). Spodosolit ovat muodostuneet viimeisimmän jääkauden aikana mannerjäätiköiden peittämällä alueella (Strahler & Strahler 2005: 626). Boreaaliseen biomiin kuuluu lisäksi boralfisoli, joka on alfisoleihin kuuluva maannos. Boralfisolia on lähinnä Kanadan keskiosissa sekä Etelä-Ruotsista Siperiaan asti ulottuvalla vyöhykkeellä (Strahler & Strahler 2005: 622-623).

Boreaalisen biomin kylmimmillä alueilla saattaa paikoitellen esiintyä tundramaannosta, joissa on kostea ilmasto (Strahler & Strahler 2005: 630). Tundramaannos sijaitsee ikiroudan päällä ja siinä esiintyy turvetta. Ympäristöolosuhteiden johdosta pintamaa sulaa

ja jäätyy vuorotellen vuodenaikojen mukaan, jonka seurauksena maannos pysyy kosteana. Lisäksi vuorottainen pintamaan sulaminen ja jäätyminen häiritsee kasvien juurien vakiintumista maaperään, joten kasvillisuuden esiintyminen alueella on rajoittunutta (Strahler & Strahler 2005: 631).

Boreaalisen biomin maaperässä on usein ikiroutaa ja syvälle maaperään on sitoutunut paljon eloperäistä hiiltä (Fan et. al. 2008: 2). Fan ym. 2008 julkaisemassa tutkimuksessa tarkasteltiin boreaalisen maaperän sisältämää eloperäistä hiiltä kolmessa eri ekosysteemissä jotka olivat kuiva paikka ilman ikiroutaa, kuiva paikka jossa oli ikiroutaa sekä hie-man kuivunut paikka joka sisälsi ikiroutaa (Fan et. al. 2008: 2). Tarkoituksena oli tutkia boreaalisen maaperän sisältämän eloperäisen hiilen hajoamista ja huomioida sen dynamiikkaa ilmaston lämpenemisen suhteen. Tulokset ennustivat ilmaston lämpenemisen vähentävän tulevaisuudessa maaperän sisältämän eloperäisen hiilen osuutta jopa 56-78 % etenkin hie-man kuivuneilla ikiroutaa sisältävillä paikoilla, jolloin noin 5-25 % maaperään sitoutuneesta hiilestä vapautuu ilmakehään. Kahdella muulla kuivalla paikalla ilmaston lämpenemisellä ennustettiin olevan pienempi vaikutus hiilen vapautumiseen. Syy tähän on se, että lämpötilalla on pienempi vaikutus hajoamisen nopeuteen kuivassa ympäristössä verrattuna kosteaan ympäristöön (Fan et. al. 2008: 7). Ikiroudan esiintyessä karikkeen määrä kasaantuu maaperään, joka lisää hiilen määrää maaperässä. Ilmaston lämpeneminen johtaa ikiroudan sulamiseen, jolloin hajoamisprosessi kiihtyy ja hiiltä vapautuu litosfääristä ilmakehään aikaisempaa enemmän. Ikiroudan on arvioitu sulavan jopa 25 % vuoteen 2100 mennessä (Davidson & Janssens 2006: 171).

6. Tapausesimerkki hiilen kierrosta eri metsäekosysteemeissä

Fernández-Martínez ym. 2014 julkaisemassa tutkimuksessa oli mukana useita metsäekosysteemejä, muun muassa boreaalinen ja trooppinen biomi. He tutkivat metsäekosysteemien spatiaalista vaihtelua koskien hiilen kiertoa, biomassan esiintymistä sekä resurssien käytön tehokkuutta. Resurssien käytön tehokkuudella tarkoitetaan tässä tapauksessa hiilen varastoimista, biomassan tuotantoa sekä valon ja veden käytön tehokkuutta. Resurssien käytön tehokkuus vaihteli metsäekosysteemien välillä vain vähän (Fernández-

Martínez et. al. 2014: 597). Tutkimuksessa oli yhteensä 400 metsäekosysteemiä, joista 102 kuului boreaaliseen ja 35 kuului trooppiseen ekosysteemiin. Trooppisista metsistä 25 metsää oli kosteita ja 10 oli semiarideja. Muut metsät olivat Välimeren kasvillisuuden metsiä (11 kappaletta) sekä lauhkean vyöhykkeen metsiä (252 kappaletta). Suurin osa datasta oli Euroopasta ja Pohjois-Amerikasta. On huomioitava, että trooppiset metsät olivat tutkimuksessa aliedustettuina (Fernández-Martínez et. al. 2014: 599).

Tutkimuksessa huomioitiin metsäekosysteemien ilmastollisia olosuhteita, kuten lämpötilaa ja sateisuutta (Fernández-Martínez et. al. 2014: 600). Tuloksista saatiin selville, että puuston iällä, lämpimän kauden pituudella sekä veden saatavuudella oli tärkeä osuus koskien metsien tilaa (Fernández-Martínez et. al. 2014: 597). Havupuiden ja lehtipuiden välinen vertailu otettiin tutkimuksessa huomioon, mutta hiilen virtauksessa ei ollut merkittäviä eroja niiden välillä. Hiilen virtauksessa oli kuitenkin merkittäviä eroja biomien välillä (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602). Tutkimuksessa saatiin viitteitä siitä, että hiilen sitomisen tehokkuus kasvoi metsien iän myötä (Fernández-Martínez et. al. 2014: 608). Puiden biomassan osuuden havaittiin olevan noin 10 % kaikesta sitoutuneesta hiilestä molemmissa biomeissa (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602). Trooppisten puiden lehtien sisältämä biomassa oli suurempi kuin boreaalisten metsien (Fernández-Martínez et. al. 2014: 607). Tutkimuksessa havaittiin, että boreaalisten havupuiden neulasten hiilensitomisosuus oli 6 % kaikesta puiden sitomasta hiilestä ja tropiikissa vastaava osuus oli melkein 12 % (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602).

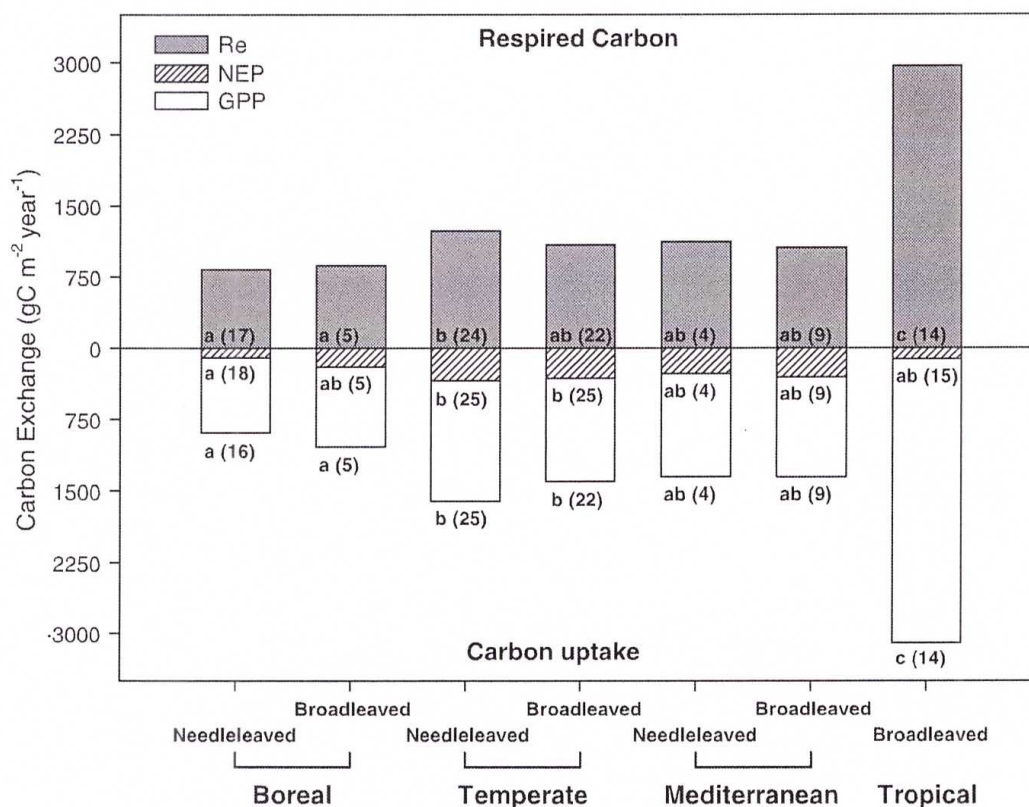
Tropiikissa oli korkea biomassan tuottavuus ja hiilen sitoutuminen oli biomissa suurta. Lisäksi tropiikissa oli suuret biomassavarastot (Fernández-Martínez et. al. 2014: 607). Hiilen virtaus oli suurinta tropiikissa yhteyttämisen ja respiraation vuoksi (Fernández-Martínez et. al. 2014: 597). Tropiikissa oli kuitenkin alhaisin ekosysteemien nettotuottavuus. Tropiikissa oli myös alhaisin hiilen käytön tehokkuus (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602). Trooppisten metsien puiden biomassan havaittiin olevan merkittävän suuri sekä maanpinnan yläpuolella että maanpinnan alapuolella (Fernández-Martínez et. al. 2014: 601). Tästä on osoituksena se, että tropiikissa kasvillisuuden juuret sitoivat 8 % bruttoperustuotannosta (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602). Tropiikin biomassan tuoton tehokkuus oli kuitenkin alhaisin kaikista tutkimuksen metsäekosysteemeistä. Ekosys-

teemien bruttoperustuotannon tehokkuus saattaa olla tropiikissa alhainen siksi, koska kyseisen biomin lämpötila ja sateisuus ovat hyvin korkeita. Tämän vuoksi respiraatio on voimakasta trooppisissa ekosysteemeissä. Lisäksi bruttoperustuotannon alhainen tehokkuus tropiikissa voi johtua ravinteiden niukkuudesta, josta seuraa kasvien juurien eritteiden yleistymistä (Fernández-Martínez et. al. 2014: 608). Ympäristössä vallitseviin rajoitteisiin liittyen on tutkittu, että Auringon säteilyn saatavuus on rajoittava tekijä biomassan kasvulle joissain trooppisissa ekosysteemeissä (Fernández-Martínez et. al. 2014: 607).

Boreaalisten metsien maanpinnan alapuolella esiintyvä biomassa oli alhaisin kaikista biomeista (Fernández-Martínez et. al. 2014: 601). Boreaalisten metsien vähäinen biomassa voi selittyä sillä, että kasvit kasvavat biomissa hitaasti (Fernández-Martínez et. al. 2014: 607). Boreaalisten metsäekosysteemien välillä oli vaihtelua, sillä boreaalisten havupuiden lehvästön biomassa oli korkeampi kuin boreaalisten lehtipuiden vastaava (Fernández-Martínez et. al. 2014: 601). Huomionarvoista on, että lämpötila on rajoittava tekijä boreaalisessa ekosysteemissä (Kramer et. al. 2000: 67).

Kuvassa 6 esitetään hiilen kierron dynamiikkaa boreaalisen, lauhkean, Välimeren ilmaston sekä trooppisen biomin suhteen. Kuvassa 6 käsitellään edellä mainittujen biomien sisältämien metsäekosysteemien ja ilmakehän välistä korrelaatiota hiilen kiertoa koskien. Biomien sisältämää kasvillisuutta on tarkasteltu sekä havupuiden että lehtipuiden osalta. Trooppisessa biomissa on ainoastaan lehtipuita. Kuvan 6 keskiviiva (arvo 0) jakaa hiilen sitomisen ja vapautumisen siten, että pylväiden ollessa keskiviivan yläpuolella hiiltä vapautuu ja sen alapuolella hiiltä sitoutuu metsiin (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602). Kuvassa 6 oleva lyhenne R_e tarkoittaa ekosysteemin respiraatiota hiilen suhteen (Fernández-Martínez et. al. 2014: 597) ja GPP tarkoittaa ekosysteemin bruttoperustuotantoa, joka merkitsee ekosysteemin kokonaisperustuotantoa. Tämä mitataan valoenergian määränä, joka muuttuu yhteyttämisen avulla kemialliseksi energiaksi (Campbell & Reece 2005: 1187). NEP tarkoittaa ekosysteemin nettotuottavuutta (Fernández-Martínez et. al. 2014: 597) eli bruttoperustuotantoa, josta on vähennetty ekosysteemissä tapahtuva respiraatio. Nettotuottavuus kuvaa ekosysteemissä olevan eloperäisen vapaan hiilen määrää, joka on varastoitavissa ekosysteemiin (Lovett et. al. 2006: 1).

Kuvasta 6 voidaan päätellä, että respiraation ja bruttoperustuotannon välillä vallitsee tasapaino biomien sisällä. Nettotuottavuus on määrältään huomattavasti vähäisempää kuin respiraatio ja bruttoperustuotanto. Biomien metsäekosysteemien nettotuottavuus on kuvassa 6 lähempänä hiilen sitomista kuin hiilen vapautumista, joten biomit sitovat enemmän hiiltä kuin vapauttavat sitä ilmakehään. Tämä tukee käsitystä, jonka mukaan metsät ovat hiilinieluja. Kuvasta 6 voidaan todeta, että troopiikissa ja boreaalisissa biomissa on alhainen nettotuottavuus. Trooppisessa biomissa on suurin respiraatio ja bruttoperustuotanto. Troopiikissa on siis suurin vaihtelu hiilen kierron dynamiikassa. Boreaalisen alueen respiraatio sekä bruttoperustuotanto ovat kuitenkin alhaisia ja hiilen kierrossa on pienin vaihtelu boreaalisissa metsäekosysteemeissä.



Kuva 6. Keskimääräinen hiilen vaihto metsäekosysteemien ja ilmakehän kesken boreaalisissa, lauhkeassa, Välimeren ilmastossa sekä trooppisessa biomissa (Fernández-Martínez et al. 2014: 602).

7. Pohdinta

Hiilen kierto on erittäin kompleksinen prosessi ja hiilen kiertoon vaikuttavat useat tekijät (Davidson & Janssens 2006: 166). Hiilen kierto tapahtuu paikallisella sekä globaalilla skaalalla ja siihen sisältyy ajallisesti nopeita ja hitaita prosesseja (Riebeek & Simmon 2011). Voidaan todeta, että hiilen kiertoon vaikuttavat prosessit ovat toisiinsa kytkeytyneitä ja ne vaikuttavat toisiinsa ympäristöolojen sanelemana. Respiraatio, tuottavuus, yhteyttämisen teho, häiriödynamiikka ja rapautumisen sekä biologisen hajoamisen nopeus ovat merkittäviä prosesseja hiilen kierrossa (Grotzinger & Jordan 2014: 439, Li et. al. 2014: 1345). Respiraatio saattaa olla tropiikissa suurempaa kuin boreaalisessa biomissa (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602). Respiraation seurauksena hiiltä vapautuu kaasumaisessa olomuodossa ilmakehään (Grotzinger & Jordan 2014: 426) ja sitä esiintyy paljon tropiikissa osittain siksi, koska biodiversiteetti on siellä suuri (Campbell & Reece 2005: 1100). Tämä perustuu siihen, että kasveihin sitoutuu hiiltä, ja muut eliöt käyttävät ravinnokseen esimerkiksi kasveja. Kyse on energian virtauksesta ekosysteemeissä, joissa Auringon energiaa varastoituu yhteyttäviin eliöihin. Osa eliöistä saa energiansa käyttämällä ravinnokseen muita eliöitä, jolloin niissä tapahtuva respiraatio vapauttaa hiiltä takaisin ympäristöön (Campbell & Reece 2005: 160). Tästä voidaan päätellä se, että mitä enemmän eliöitä on tietyllä alueella, sitä enemmän ne aiheuttavat respiraatiota. Toisaalta alueella oleva suurempi eliömäärä tekee mahdolliseksi myös sen, että energiaa ja hiiltä sitoutuu paljon ekosysteemiin. Biosfäärillä on keskeinen merkitys hiilen kierrossa kasvillisuuden tuottaman biomassan myötä (Riebeek & Simmon 2011). Biomassan tuotanto määräytyy ympäristön olosuhteiden, kuten häiriöiden dynamiikan kautta (Strahler & Strahler 2005: 657). Trooppisessa biomissa on korkeampi tuottavuus kuin boreaalisessa biomissa (Australian Geography Teachers Association 2013). Samoin yhteyttäminen on suurempaa tropiikissa kuin boreaalisessa vyöhykkeessä (Wigley & Schimel 2000: 22). Tuottavuus indikoi ekosysteemin biomassan määrästä eli kasvillisuuden kyvystä sitoa itseensä ilmassa olevaa hiilidioksidia. Tämä tapahtuu yhteyttämisen avulla (Grotzinger & Jordan 2014: 426). Yhteyttämisen tehoa lisää muun muassa se, että hiiltä on runsaasti saatavilla kasveille (Strahler & Strahler 2005: 657). Voisi olettaa että hiilidioksidin tulisi periaatteessa levitä suhteellisen tasaisesti ilmakehään, koska ilmastonmuutosta käsitellään globaalisti. Saattaa olla, että trooppisten alueiden yhteyttämisen tehoa voi lisätä

myös tropiikissa vallitseva voimakas alueellinen respiraatio. Häiriöiden merkitys tropiikin ja boreaalisen biomin välillä on kompleksinen ilmiö. On viitteitä siitä, että metsäpalot ovat lisääntyneet boreaalisilla alueilla viime vuosikymmeninä (Denman et. al. 2007: 527) ja trooppisten metsien biomassassa on vähenemässä ihmisen suorittamien hakkuiden takia (Strahler & Strahler 2005: 657). Rapautumisen ja biologisen hajoamisen nopeus on suurempaa trooppisessa kuin boreaalisessa biomassassa. Tätä tukevat käsitykset, joiden mukaan trooppisen biomin maannokset ovat usein rapautuneita (Strahler & Strahler 2005: 621) ja biologinen aktiivisuus on korkea alhaisilla leveysasteilla (Campbell & Reece: 1196, Wiggley & Schimel 2000: 22). Tästä johtuen voidaan todeta, että ravinteiden kierto on nopeampaa tropiikissa kuin boreaalisessa biomassassa, mistä voi päätellä hiilidioksidin virtauksen luonnetta. Hajoamisprosessin suhteen boreaalinen biomi on stabiilimpi kuin trooppinen biomi, sillä luonnon prosessit ovat hitaita boreaalisella vyöhykkeellä. Tästä on osoitukseksi esimerkiksi se, että hajoamisen nopeus on pienempi boreaalisella vyöhykkeellä kuin tropiikissa (Foster & Bhatti 2006: 718). Boreaalisen vyöhykkeen kausittaisuus osoittaa hajoamisdynamiikan olevan kyseisessä biomassassa kuitenkin ajallisesti vaihtelevampi kuin tropiikissa, sillä boreaalisen biomin vuodenaikaisvaihtelut ovat suurempia esimerkiksi lämpötilan suhteen verrattuna trooppiin (Strahler & Strahler 2005: 306).

Kasvupaikan piirteillä ja ilmastolla on suuri merkitys hiilen kiertoon. Hiilen kierron ja lämpötilan välisen suhteen ymmärtäminen on hyvin tärkeää ilmastonmuutokseen liittyen ja myös siksi, koska hiilen kierto sekä siihen vaikuttavat luonnonprosessit muokkautuvat ympäristön olosuhteiden mukaan (Davidson & Janssens 2006: 166). Olennaista hiilen kierrossa on, kuinka paljon hiilidioksidia ilmakehässä on verrattuna muihin hiilivarantoihin, sillä hiilen osuuden kasvu ilmakehässä lämmittää ilmastoa (Riebeek & Simmon 2011). Hiilen kierrossa on kyse hiilidioksidin varastoitumisesta ja vapautumisesta eri hiilivarantojen välillä. Hiilidioksidi on kasviuonekaasu (Bernstein et. al. 2007: 77), joten hiilidioksidipitoisuuden kasvaessa ilmakehässä globaali ilmasto lämpenee ja sen vähe- tessä ilmasto viilenee. Mikäli ennustettu ilmaston lämpeneminen etenee, niin trooppisten alueiden lämpötila tulee kohoamaan ja sateisuudessa tulee ilmenemään alueellisia muutoksia (Kirschbaum et. al. 2007: 114). Boreaalisen biomin ennustetaan siirtyvän entistä pohjoisemmaksi (Bergengren et. al. 2011: 11-12), josta seuraa ympäristön kausittaisu-

den muutoksia ainakin valon saannin suhteen. Globaalin lämpenemisen ennustetaan olevan suurempaa korkeilla leveysasteilla ja etenkin pohjoisella pallonpuoliskolla (Bernstein et. al. 2007: 9), joten lämpötilan nousu on tropiikissa vähäisempää kuin boreaalisilla alueilla. Trooppisen ja boreaalisen biomin ympäristöolosuhteiden välillä on eroja esimerkiksi sateisuudessa ja lämpötilassa (Campbell & Reece 2005: 1100, 1102, Grotzinger & Jordan 2014: 433), jotka ovat havaittavissa muun muassa kasvillisuuden biomassan tuotannossa. Boreaalisisessa biomissa ympäristöolosuhteet ovat vaihtelevampia kuin tropiikissa etenkin valoisuuden kausittaisuuden ja lämpötilan suhteen (Strahler & Strahler 2005: 306). Valoisuuden vaihtelun suuruus boreaalisisessa biomissa johtuu siitä, että kyseinen biomi sijaitsee korkeilla leveysasteilla toisin kuin tropiikki. Lisäksi tropiikin ja boreaalisen biomin välillä on eroja maan pinnan albedossa, maannoksen laadussa (Strahler & Strahler 2005: 621, 623) sekä biogeokemiallisten prosessien (Campbell & Reece 2005: 1196, Wigley & Schimel 2000: 22) nopeudessa. Albedo tarkoittaa jonkin pinnan heijastaman auringonsäteilyn osuutta. Albedolla on merkitystä etenkin lämpötilojen suhteen varsinkin silloin, kun boreaalisisella vyöhykkeellä on lumipeite, sillä albedo on korkea lumipeitteen esiintyessä. Boreaalinen ja trooppinen biomi voidaan käsittää vyöhykkeinä, joissa on paljon kasvillisuutta. Tämä voidaan päätellä siitä, että kyseisten biomien sisältämä biomassa on määrältään suuri (Pan et. al. 2013: 608). Tähän liittyen voidaan mainita, että albedo on alhainen kasvillisuuden peittämällä alueilla (Bernstein et. al. 2007: 76).

Voidaan arvelia, että maannoksessa esiintyvien ravinteiden koostumuksella ja määrällä on merkitystä maan pinnan alaisen kasvillisuuden suhteen ja tätä kautta hiilen vapautumisen dynamiikkaan. Trooppiset maannokset ovat vähäravinteisia (Strahler & Strahler 2005: 621), josta voidaan päätellä hiilen kiertävän nopeasti maaperän ja ilmakehän välillä. Osa trooppisista maannoksista on hauraita (Strahler & Strahler 2005: 621) mikä tarkoittaa sitä, että hiiltä ei sitoudu maaperään ainakaan kovin suuria määriä. Myös boreaaliset maannokset ovat vähäravinteisia (Strahler & Strahler 2005: 623), mutta boreaalisten ekosysteemien maaperään on sitoutunut paljon hiiltä (Davidson & Janssens 2006: 166). Tätä tukee käsitys, jonka mukaan maaperään sitoutuneen hiilen osuus kasvaa siirryttäessä korkeammille leveysasteille (Wigley & Schimel 2000: 22).

Häiriöillä on keskeinen asema hiilen kierrossa, sillä ne muokkaavat erityisesti biosfääriä

biomassan suhteen (Li et. al. 2014: 1345, Strahler & Strahler 2005: 657). Ihmisen suorittamat hakkuut lisäävät maan pinnan eroosioriskiä muun muassa lisäämällä valuntaa (WWF 2016), jolloin kasvillisuuden on vaikea vakiintua takaisin puuttomalle alueelle. Hiilivarannot ovat toisiinsa kytkeytyneitä (Riebeek & Simmon 2011) ja laajoilla alueilla esiintyvät häiriöt, kuten suuret metsäpalot muokkaavat hiilen takaisinkytkentämekanismia hiilivarantojen välillä. Tämä selittyy sillä, että esimerkiksi metsäpalojen vaikutukset ekosysteemeihin ovat hyvin moninaisia (Li et. al. 2014: 1345). Eliöiden aiheuttamat ajoittaiset häiriöt kuten hyönteisinvaasiot vähentävät ekosysteemien biomassaa syömällä kasvillisuutta, jolloin hiiltä vapautuu ilmakehään kaasumaisessa olomuodossa. On muistettava, että osa hiilestä siirtyy eliöihin itseensä näiden ruokaillessa kasveilla. Tämä perustuu siihen, että Auringon energiaa siirtyy ekosysteemissä eliöltä toiselle ravinnon muodossa. Kyseinen energia muuttuu osittain hiileksi eliössä tapahtuvan respiraation vaikutuksesta (Campbell & Reece 2005: 160). Tämä on osoitus hiilen kierron kompleksisesta suhteesta biosfääriin ja ilmakehän välillä.

Ihmisen aiheuttamat häiriöt uhkaavat erityisesti trooppisia alueita metsien hakkuiden takia, sillä hakkuut aiheuttavat sen, että trooppisten alueiden biomassa on vähenemässä (Strahler & Strahler 2005: 657), minkä seurauksena suuria määriä hiiltä vapautuu ilmakehään. Voidaan siis todeta, että metsät ovat vähenemässä trooppisessa biomassassa. On muistettava että trooppisessa biomassassa on otolliset ympäristöolosuhteet biomassan kasvulle, koska tuottavuus on siellä suuri (Thomas & Baltzer 2002: 5), samoin biomassa (Pan et. al. 2013: 608). Trooppiset ekosysteemit saattavat palautua häiriöistä nopeammin kuin boreaalisen biomin ekosysteemit, sillä kasvillisuuden sukkessio tapahtuu tropiikissa nopeasti ja voidaan olettaa, että metsien häviämisen seurauksena ravinteita vapautuu eliöiden käyttöön näiden kasvua varten. Edellä mainittua näkemystä puoltaa se, että eliöillä on kapeat ekolokerot tropiikissa, mikä mahdollistaa nopean sukkession (Thomas & Baltzer 2002: 6). On syytä huomioida, että kasvillisuuden puuttuessa aluskasvillisuus saa runsaasti valoa toisin kuin vanhoissa metsissä, joissa puiden latvustot peittävät osan maan pinnalle saapuvasta valosta (Campbell & Reece 2005: 1100). Valoahan tarvitaan yhteyttämiseen ja tätä kautta biomassan kasvua varten (Grotzinger & Jordan 2014: 287). Hiilidioksidipitoisuuden kasvu ilmakehässä edesauttaa yhteyttämisen tehoa (Strahler & Strahler 2005: 657) ja täten biomassan kasvua. Ihmisen aiheuttama maankäytön muokkaus on

tropiikissa kuitenkin hyvin intensiivistä, minkä takia trooppisten metsien on vaikea palautua takaisin luonnontilaisiksi hakkuiden jälkeen. Tästä on osoituksena se, että ihmisen suorittamien hakkuiden seurauksena trooppiset metsät ovat vähenemässä (Strahler & Strahler 2005: 657). Ilmastonmuutoksen ennustetaan johtavan trooppisen biomin kuivumiseen (Bonan 2008: 1445), mikä oletettavasti edesauttaa metsäpalojen esiintymistä. Lisäksi trooppisessa ekosysteemissä on lämmintä (Campbell & Reece 2005: 1100), mikä edesauttaa metsäpalojen esiintymistä alueella. Trooppiset ekosysteemit ovat kuitenkin usein kosteita, koska sademäärä on siellä suuri (Campbell & Reece 2005: 1100), joten se hillitsee omalta osaltaan metsäpalojen esiintymistä tropiikissa. Oletettavasti metsäpaloja esiintyy kuitenkin tropiikissa kuivemmilla alueilla varsinkin kuivan kauden aikana alentuneen sateisuuden johdosta, jolloin ekosysteemien stabiilius alenee kyseisen häiriön myötä.

Borealisilla alueilla on myös hakkuita, mutta niiden aiheuttamat haitat ovat pienempiä kuin tropiikissa. Tropiikin arvokkaan biodiversiteetin (Campbell & Reece 2005: 1100) menetyksen ja hakkuiden aiheuttaman biomassan vähenemisen lisäksi edellä mainittua näkökulmaa puoltaa käsitys, jonka mukaan boreaalisten metsien biomassassa on lisääntymässä (Strahler & Strahler 2005: 657). Tämä selittyy osin talousmetsien olemassaolon kautta. Eräs talousmetsän määritelmä on seuraava: ”Talousmetsä on metsää, jota ihminen hoitaa ja kasvattaa metsätalouden tarpeisiin. Talousmetsissä kasvaa usein vain yhtä puulajia, ja puut ovat samanikäisiä. Talousmetsissä on vähemmän lajeja kuin luonnontilaisissa metsissä” (Virtuaalimetsä). Oletan, että boreaalisten metsien biomassan runsaus saattaa selittyä osin sillä, että kaadettujen metsien tilalle istutetaan talousmetsiä joissa voi olla suhteellisen korkea biomassa. Lisäksi talousmetsien biodiversiteetti saattaa olla pieni, joka luultavasti johtaa eliöiden välisen kilpailun kasvuun ravinteiden saatavuudesta. Talousmetsät ovat rakenteeltaan yksipuolisia, joten niiden kasvillisuus saattaa olla haavoittuvainen eliöiden aiheuttamille invaasioille. Ilmastonmuutoksen seurauksena boreaalisten alueiden lämpötilat kohoavat (Bonan 2008: 1446), josta seuraa biomassan kasvua (Strahler & Strahler 2005: 657) sekä biogeokemiallisten prosessien nopeutumista. Tästä johtuen boreaaliset ekosysteemit muuttuvat entistä vakaammiksi häiriödynamiikan suhteen. Boreaalinen eliöstö on kuitenkin adaptoitunut vaihteleviin luonnonolosuhteisiin

Raportin säännön mukaisesti, jonka mukaan eliöiden ekolokerot ovat laajempia korkeammilla leveysasteilla verrattuna alhaisten leveysasteiden eliöiden vastaaviin. Mitä laajempi ekolokero, sitä paremmin eliö on sopeutunut ympäristön vaihteluihin (Thomas & Baltzer 2002: 5). Täten mahdollinen boreaalisten ekosysteemien stabiiliuden yleistymisen ei aiheuta merkittäviä hyötyjä kyseisessä biomissa. Boreaalisen biomin kasvillisuus on vaarassa siltä osin, että lämpötilojen kohoaminen lisää biomissa esiintyviä metsäpaloja (Denman et. al. 2007: 550). Samalla vieraslajien leviämiskasvu biomiin kasvaa (Sanderson et. al. 2012: 2) esimerkiksi hyönteisinvaasioiden yleistymisen myötä. Ilmastonmuutoksen ennustetaan lisäävän boreaalisen biomin sateisuutta, joka vähentää omalta osaltaan metsäpaloja (Gonzalez et. al. 2010: 761). Alueellisesti tarkasteltuna osa boreaalisista metsäekosysteemeistä kärsii happamoitumisesta, jonka seurauksena puut kuolevat ja hiiltä vapautuu ilmakehään. Tästä on todisteena Kuolan niemimaan metsien happamoituminen ja sieltä on levinnyt happamoittavia saasteita myös alueen ulkopuolelle (Miettinen 2008: 5). Trooppisessa ja erityisesti boreaalisessa biomissa on tulevaisuudessa luultavasti kohonnut häiriöriski, mutta kyseiset biomit kykenevät palautumaan häiriöistä entistä nopeammin biogeokemiallisten prosessien nopeutumisen ansiosta.

Sekä hyönteisinvaasioiden että metsäpalojen merkitys on korkeampi boreaalisessa kuin trooppisessa biomissa. Tämä voidaan perustella sillä, että troopiikissa on korkeampi biodiversiteetti kuin boreaalisessa biomissa (Campbell & Reece 2005: 1100). On olemassa esimerkiksi väite, jonka mukaan jääkarhut ovat erityisen suuressa vaarassa ilmastonmuutoksen suhteen siksi, koska eliölajeja on alueella niin vähän. On tiedossa, että tunturimitari on tuhonnut tunturikoivikkoja esimerkiksi Lapissa (Kankaanhuhta et. al. 2013). Korkeilla leveysasteilla on ilmeisesti vähän eliölajeja verrattuna alhaisiin leveysasteisiin, joten tästä voidaan päätellä, että myös hyönteisinvaasiot ovat haitallisempia boreaalisessa biomissa kuin troopiikissa. On muistettava, että tämä on vastakkainen näkemys Raportin säännölle (Thomas & Baltzer 2002: 5). Molemmissa biomeissa on rajoittavia tekijöitä, sillä troopiikissa on pulaa ravinteiden saatavuudesta biodiversiteetin runsauden ja eliöiden välisen voimakkaan kilpailun vuoksi. Tästä on osoituksena trooppisen maannoksen vähäravinteisuus (Strahler & Strahler 2005: 621) sekä näkemys, jonka mukaan ravinteita ei ole saatavilla eliöille niin paljon silloin kun eliöitä on tietyllä alueella paljon. On olemassa

yleinen käsitys, jonka mukaan tropiikin sisältämä biodiversiteetti on suurin kaikista biomeista (Campbell & Reece 2005: 1100). Tropiikissa on korkea biomassa (Pan et. al. 2013: 608), josta voidaan päätellä, että kasvillisuutta esiintyy siellä tiheästi. Voidaan todeta, että ravinteiden kierto on nopeaa tropiikissa. Tämä voidaan päätellä siitä, että tropiikissa on korkea biologinen aktiivisuus (Campbell & Reece: 1196, Wigley & Schimel 2000: 22). Latvuston tiheyden takia tropiikin aluskasvillisuus saa vain vähän valoa (Campbell & Reece 2005: 1100). Edellä mainituilla olosuhteilla on merkitystä kasvien lehtien sitoman hiilen ja niiden juurien vapauttaman hiilen dynamiikkaan. Tropiikissa tapahtuva hiilen kierto on nopeampaa kuin boreaalisessa biomissa, sillä biogeokemialliset prosessit tapahtuvat nopeammin tropiikissa kuin boreaalisessa ekosysteemissä. Tämä perustuu biologisen aktiivisuuden välisiin eroihin leveysasteiden mukaan (Campbell & Reece: 1196, Wigley & Schimel 2000: 22) sekä ilmastollisiin olosuhteisiin. On pääteltävissä, että erityisesti lämpötila määrää biogeokemiallisten prosessien dynamiikkaa. Boreaalisessa biomissa on lyhyt kasvukausi (Riebeek & Simmon 2011) ja valoisuus sekä lämpötila ovat siellä rajoittuneita usean kuukauden ajan. Kausittaisuuden dynamiikka selittyy ilmeisesti leveysasteiden perusteella. Boreaalinen biomi on ajallisesti tarkasteltuna ympäristöolosuhteiltaan hyvin vaihteleva esimerkiksi lämpötilan suhteen (Strahler & Strahler 2005: 306). Rajoittavat tekijät hillitsevät ekosysteemien biomassan tuotantoa, jolloin hiiltä ei sitoudu niin paljon eloperäiseen ainekseen. Tästä on osoituksena se, että boreaalisessa biomissa osa kasvillisuudesta kuolee talveksi jolloin ne eivät voi yhteyttää, toisin sanoen ne eivät kykene sitomaan itseensä hiiltä ilmakehästä. Yhteyttämiseen vaaditaan kasvien lehtiä (Campbell & Reece 2005: 739), mutta se ei voi siis onnistua silloin, kun kasvit kuolevat tai pudottavat lehtensä. Tällöin hiilen osuus ilmakehässä kasvaa, ellei hiiltä sitoudu muihin hiilivarantoihin, sillä hiilivarannot ovat toisiinsa kytkeytyneitä (Riebeek & Simmon 2011). Toisaalta biogeokemialliset prosessit ovat hitaita kylmemmissä olosuhteissa (Campbell & Reece: 1196, Wigley & Schimel 2000: 22), joten hiiltä ei oletettavasti juurikaan vapaudu kasvien juurista talvella boreaalisessa biomissa. Lisäksi on muistettava, että boreaalisessa biomissa on paljon ikivihreitä havupuita (Strahler & Strahler 2005: 718) talvella kuolevien lehtipuiden lisäksi.

Respiraation ja nettotuottavuuden välinen suuri vaihtelu tropiikissa (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602) selittyy luultavasti biogeokemiallisten prosessien nopeuden ja suuren

biomassan vaikutuksesta. Ihmisen aiheuttamat hakkuut lisäävät respiraatiota tropiikissa, sillä ne vähentävät tropiikin sisältämää biomassaa (Strahler & Strahler 2005: 657). Hakkuiden seurauksena kasvillisuus kuolee, jolloin respiraation määrä kasvaa, sillä kasvillisuuteen on sitoutunut hiilidioksidia yhteyttämisen ansiosta (Campbell & Reece 2005: 739). Hiiltä vapautuu siis ympäristöön eliöiden kuollessa. Lisäksi biomassan vähetessä tuottavuus laskee, koska yhteyttäviä eliöitä on tällöin yksinkertaisesti vähemmän. Mikäli menetetyn kasvillisuuden tilalle kasvaa uusia kasveja, niin perustuotanto on suurta. Tämä selittyy sillä, että nuorilla puilla on suuri kasvunopeus sekä tehokas hiilensitomiskyky verrattuna vanhempiin puihin. Vanhoihin puihin on sitoutunut kuitenkin paljon hiiltä (Strahler & Strahler 2005: 657), joten niiden kuoleminen lisää respiraatiota huomattavasti.

Yhteenvedon voidaan todeta, että hiilen kierto vaikuttaa ekosysteemeihin muun muassa ilmaston sekä maaperän kautta ja hiilen kiertoon kuuluu useita prosesseja (Riebeek & Simmon 2011). Hiilen kierto on luultavasti stabiilimpaa tropiikissa kuin boreaalisella vyöhykkeellä, mutta erityisesti boreaalisen biomin stabiilisuus saattaa lisääntyä tulevaisuudessa ilmastomuutoksen seurauksena. Ilmastomuutos voi kuitenkin myös lisätä alueellisia häiriöitä (Jackson et. al. 2016). Lisäksi kausittaisuuden vaihtelut tulevat kasvamaan molemmissa biomeissa, mikäli ne leviävät kohti napa-alueita. Vaikuttaa siltä, että hiilen kierto on nopeampaa tropiikissa kuin boreaalisessa biomissa, mutta tutkielmassa saatiin viitteitä siitä, että hiilen ja resurssien käytön tehokkuus ovat tropiikissa erityisen alhaisia (Fernández-Martínez et. al. 2014: 602). Edellä mainittujen ilmiöiden tutkiminen voisi olla sopiva jatkotutkimuksen aihe ja sen voisi yhdistää esimerkiksi ilmastomuutoksen aiheuttamiin vaikutuksiin tulevaisuuden suhteen.

8. Lähteet

8.1. Kirjallisuuslähteet

Bergengren, J. C., D. E. Waliser & Y. L. Yung (2011). Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change. *Climatic change*. 11-12.

Bernstein, L., P. Bosch, O. Canziani, Z. Chen, R. Christ, O. Davidson, W. Hare, S. Huq, D. Karoly, V. Kattsov, Z. Kundzewicz, J. Liu, U. Lohmann, M. Manning, T. Matsuno, B. Menne, B. Metz, M. Mirza, N. Nicholls, L. Nurse, R. Pachauri, J. Palutikof, M. Parry, D. Qin, N. Ravindranath, A. Reisinger, J. Ren, K. Riahi, C. Rosenzweig, M. Rusticucci, S. Schneider, Y. Sokona, S. Solomon, P. Stott, R. Stouffer, T. Sugiyama, R. Swart, D. Tirkpak, C. Vogel & G. Yohe (2007). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. 9, 76-78.

Bolan, N. S., D. C. Adriano, A. Kunhikrishnan, T. James, R. McDowell & N. Senesi (2011). Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils. *Advances in Agronomy*. 3, 5.

Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*. 1444-1447.

Camino-Serrano, M., B. Gielen, S. Luyssaert, P. Ciais, S. Vicca, B. Guenet, B. De Vos, N. Cools, B. Ahrens, M. Altaf Arain, W. Borken, N. Clarke, B. Clarkson, T. Cummins, A. Don, E. Graf Pannatier, H. Laudon, T. Moore, T. M. Nieminen, M. B. Nilsson, M. Peichl, L. Schwendenmann, J. Siemens & I. Janssens (2014). Linking variability in soil solution dissolved organic carbon to climate, soil type, and vegetation type. *Global Biogeochemical Cycles*. 497.

Campbell, N. A. & J. B. Reece (2005). Biology. *Pearson / Benjamin Cummings, San Francisco*. 160, 739, 1100, 1102, 1187, 1196.

Davidson, E. A. & I. A. Janssens (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*. 165-166, 171.

Denman, K. L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P. M. Cox, R. E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S. Ramachandran, P. L. da Silva Dias, S. C. Wofsy & X. Zhang (2007). Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA. 503, 527, 550.

Miettinen, J. O. (2008). Effects of the Kola Air Pollution Sources in Finnish Lapland Surface Waters during 1990–2006. *Lapin Ympäristökeskus*. 5.

Fan, Z., J. C. Neff, J. W. Harden & K. P. Wickland (2008). Boreal soil carbon dynamics under a changing climate: A model inversion approach. *Journal of Geophysical Research*. 2, 7.

Fernández-Martínez, M., S. Vicca, I. A. Janssens, S. Luysaert, M. Campioli, J. Sardans, M. Estiarte & J. Peñuelas (2014). Spatial variability and controls over biomass stocks, carbon fluxes, and resource-use efficiencies across forest ecosystems. *Trees*. 597, 599, 600, 601, 602, 607, 608.

Foster, N. W., J. S. Bhatti (2006). Forest Ecosystems: Nutrient Cycling. *Encyclopedia of Soil Science*. 718.

Gonzalez, P., R. P. Neilson, J. M. Lenihan & R. J. Drapek (2010). Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change. *Global Ecology and Biogeography*. 755, 759, 761.

Grotzinger, J. P. & T. H. Jordan (2014). Understanding earth. *W. H. Freeman & Co., New York, NY*. 287, 288, 423, 426-427, 433, 439-440, 669.

Kirschbaum, M. U. F., A. Fischlin, Cannell, M. G. R., R. V. O. Cruz, W. Galinski, W. P. Cramer, Alvarez, M. P. Austin, H. K. M. Bugmann, T. H. Booth, N. W. S. Chipompha, W. M. Ciesla, D. Eamus, J.G. Goldammer, A. Henderson-Sellers, B. Huntley, J. L. Innes, M. R. Kaufmann, N. Kräuchi, G. A. Kile, A. O. Kokorin, Ch. Körner, J. Landsberg, S. Linder, R. Leemans, R. J. Luxmoore, A. Markham, R. E. McMurtrie, R. P. Neilson, R. J. Norby, J. A. Odera, I. C. Prentice, L. F. Pitelka, E. B. Rastetter, A. M. Solomon, R. Stewart, J. van Minnen, M. Weber & D. Xu. *Climate Change Impacts on Forests (2007). IPCC.* 114.

Kramer, K., I. Leinonen, D. Loustau (2000). The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: an overview. *International journal of biometeorology.* 67.

Li, F., B. Bond-Lamberty & S. Levis (2014). Quantifying the role of fire in the Earth system - Part 2: Impact on the net carbon balance of global terrestrial ecosystems for the 20th century. *Biogeosciences.* 1345.

Liski, J., A. Nissinen, M. Erhard & O. Taskinen (2003). Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biology.* 575.

Lovett, G. M., J. J. Cole & M. L. Pace (2006). Is Net Ecosystem Production Equal to Ecosystem Carbon Accumulation?. *Ecosystems.* 1.

Olson, D. M., E. Dinerstein, E. D. Wikramanayake, N. D. Burgess, G. V. N. Powell, E. C. Underwood, J. A. D'Amico, I. Itoua, H. E. Strand, J. C. Morrison, C. J. Loucks, T. F. Allnutt, T. H. Ricketts, Y. Kura, J. F. Lamoreux, W. W. Wettengel, P. Hedao & K. R. Kassem (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: a new map of life on Earth. *BioScience.* 934.

Pan, Y., R. A. Birdsey, O. L. Phillips & R. B. Jackson (2013). The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics.* 608.

Sanderson, L. A., J. A. Mclaughlin & P. M. Antunes (2012). The last great forest: a review of the status of invasive species in the North American boreal forest. *Forestry.* 2.

Schulze, K., W. Borken & E. Matzner (2011). Dynamics of dissolved organic C-14 in throughfall and soil solution of a Norway spruce forest. *Biogeochemistry*. 464.

Strahler Alan & Arthur Strahler (2005). Physical Geography. *John Wiley, cop., Hoboken, N.J.* 11, 306-307, 621-623, 626, 630-631, 656-657, 718, 720.

Thomas, S. C., J. L. Baltzer (2002). Tropical Forests. *Encyclopedia of Life Sciences*. 5, 6.

Trumper, K., M. Bertzky, B. Dickson, G. van der Heijden, M. Jenkins & P. Manning (2009). The natural fix? the role of ecosystems in climate mitigation. *UNEP*. 21, 26.

Wigley, T. M. L. & D. S. Schimel (2000). The Carbon Cycle. *Cambridge University Press, Cambridge*. 10, 22.

8.2. Internet-lähteet

Australian Geography Teachers Association (2013). World biomes. *GeogSpace*. <http://www.geogspace.edu.au/verve/_resources/2.4.3.2_4_World_biomes.pdf>. 2013.

Jackson, R., H. Shaftel & L. Tenenbaum (2016). What's in a name? Weather, global warming and climate change. *NASA*. <<http://climate.nasa.gov/resources/global-warming/>>. 22.04.2016.

Kankaanhuhta, V., K. Heliövaara & I. Mannerkoski (1987), L. Jukka (1988), M. Nuorteva (1982), U. Saalas (1949), A. Uotila & V. Kankaanhuhta (1999) (2013). Tunturimittari. *Luonnonvarakeskus*. <http://www.metla.fi/metinfo/metsienterveys/lajit_kansi/epautun.htm>. 18.01.2013.

Lacis, A. (2010). CO₂: The Thermostat that Controls Earth's Temperature. *NASA*. <http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/lacis_01/>. Lokakuussa 2010.

Riebeek, H. & R. Simmon (2011). The Carbon Cycle. The Slow Carbon Cycle. The Fast Carbon cycle. Changes in the Carbon Cycle. Effects of Changing the Carbon Cycle. Studying the Carbon Cycle. *NASA*. <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/CarbonCycle/page1.php>>. 16.06.2011.

Virtuaalimetsä. Metsäsanasto. *Virtuaalimetsä*. <<http://www.helsinki.fi/biosci/biopop/virtuaalimetsa/metsasanasto.html>>.

WWF (2016). Deforestation. *WWF*. <http://wwf.panda.org/about_our_earth/deforestation/>. 2016.