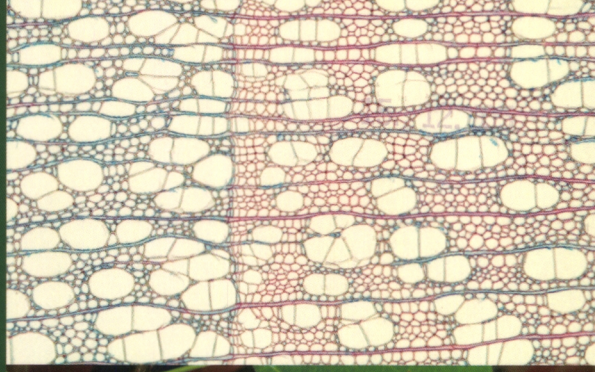
Ilmasto muuttuu –

mukautuvatko metsät







Johanna Riikonen ja
Elina Vapaavuori (toim.)

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 944, 2005

15. 12. 05.

Ilmasto muuttuu - mukautuvatko metsät

Johanna Riikonen ja Elina Vapaavuori (toim.)

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944, 2005
Metsäntutkimuslaitos - Suonenjoki



METSÄ

Johanna Riikonen ja Elina Vapaavuori (toim.) 2005. Ilmasto muuttuu – mukautuvatko metsät
Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 944. 128 s.
ISBN 951-40-1978-4

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki

Hyväksytty painettavaksi: Kari Mielikäinen 30.10.2005

Tilaukset: Metla, Vantaan tutkimusyksikkö, kirjasto, PL 18, 01301 Vantaa,
puh. 0102111, fax 010 211 2101

Kansikuvat: Etukannessa haavan ksyleemin poikkileikkaus (Elina Warsta), otsonin aiheuttamia lehtivaurioita haavalla (Elina Oksanen), kuva Suonenjoen avokammiokokeesta rauduskoivulla (Erkki Oksanen); takakannessa kuva Mekrijärven kammiokokeesta männyllä (Aija Ryyppö), kuva kammiokoepuusta Mekrijärven kokeessa (Aija Ryyppö) ja koivun mykorritsallista juuristoa (Pekka Voipio). Kiitokset Kuvaste Oy:lle kansikuvan taittopohjan käyttöoikeudesta.

Taitto: Eija Lappalainen

Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 2005

Sisältö

Alkusanat 4

Kirjoittajat 6

Ekologian murroskausi 1960-luvun lopulla, ja mitä siinä teki IBP?
Lauri Kärenlampi 7

Katsaus globaaliin ilmastonmuutokseen
Markku Rummukainen 15

Ilmastonmuutosskenaarioita Suomelle
Kirsti Jylhä, Kimmo Ruosteenoja ja Heikki Tuomenvirta 21

Metsämaan mikrobiologisten prosessien ilmakehällinen merkitys: Metaani (CH_4) ja dityppioksidi (N_2O)
Pertti J. Martikainen, Anne Saari ja Marja Maljanen 30

Ilmastonmuutoksen biologiset vaikutusmekanismit metsäpuilla
Elina Oksanen 41

Metsäpuiden kasvu ja ilmastonmuutos – männyn fysiologisia ja ekologisia vasteita kohoavaan ilman lämpötilaan ja hiilidioksidipitoisuuteen
Seppo Kellomäki ja Heli Peltola 52

Lehtipuut - menestyjiä tulevaisuuden ilmastossa? Tuloksia Suonenjoen kenttäkokeesta rauduskoivulla
Elina Vapaavuori, Johanna Riikonen, Petri Peltonen, Anne Kasurinen, Jarmo Holopainen, Elina Oksanen ja Toini Holopainen 68

Miten ilmastonmuutos vaikuttaa metsäpuiden puun kemiaan ja rakenteeseen – tuloksia eri puilla tehdyistä tutkimuksista
Seija Kaakinen ja Elina Vapaavuori 82

Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsätuhoihin ja -tauteihin boreaalisen vyöhykkeen metsissä
Pekka Niemelä ja Timo Veteli 92

Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsäekosysteemin toimintaan ja rakenteeseen sekä metsien hoitoon ja ainespuun tuotantoon
Heli Peltola ja Seppo Kellomäki 99

Suomen metsät ja puutuotteet ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden hallinnassa
Lauri Valsta, Johanna Pohjola, Jyri Mononen ja Kim Pingoud 114

Boreaalisen vyöhykkeen puiden talvehtiminen lämpenevässä ilmastossa
Heikki Hänninen 124

Alkusanat

Ilmastonmuutos on tullut monella tapaa osaksi jokapäiväistä elämäämme. Maailmanlaajuisen, ihmisen toimintaan liittyvän ympäristömuutoksen olemassaolo ja eteneminen ei kuitenkaan ole ollut yhteisesti ymmärretty ja hyväksytty käsite vielä kovin pitkään, ja edelleenkin epäilijöitä esiintyy sekä tutkijakunnassa että poliittisten päättäjien keskuudessa.

Ilmastonmuutoksen uhkasta on saatu monia hälyttäviä merkkejä. Vuosien keskilämpötilan kohoava trendi on ollut selvästi näkyvissä. Ilmastonmuutokseen liittyvät säätilojen heilahtelut ja ääriolosuhteiden lisääntyminen ovat tuottaneet rajuja myrskyjä ja hyvin voimakkaita sateita myös Suomen alueelle. Moni muistaa kesän 2002 Untomyrskyn, jollaista ei oltu nähty miesmuistiin. Se oli varsin vaikuttava sääilmiö ja aiheutti erityisesti Savossa melkoisia metsätuhoja. Viime vuosina pahat kesätulvat ovat koetelleet Keski-Eurooppaa sekä Pohjoismaita. Kesällä 2004 tämä äärimmäinen sääilmiö tuli tutuksi myös suomalaisille erityisesti Keski-Suomessa ja Pohjanmaalla. Vuoden 2004 lopulla julkaistusta Arktisen alueen maiden ilmastonmuutostutkijoiden ACIA-raportista (Arctic Climate Impact Assessment) heijastuu yhä suurempi yksimielisyys ja huoli ilmastonmuutoksen rajuudesta ja niistä kielteisistä vaikutuksista, joita sillä voi olla pohjoiseen ilmastoon ja kasvillisuuteen.

Suomessa ilmastonmuutoksen uhka on melko yksimielisesti tunnustettu, ja meillä on ollut 1990-luvulta lähtien käynnissä monialaisia ilmastonmuutoksen vaikutuksia selvittäviä kansallisia tutkimusohjelmia, kuten SILMU- ja FIGARE-ohjelmat. Nyt olemme vuonna 2002 päättyneen FIGARE-ohjelman jälkeen tilanteessa, jossa monien hankkeiden tulokset on äskettäin julkaistu tai ne ovat viimeistelyvaiheessa. Tutkimusohjelmat ovat tuottaneet uutta tietoa ilmastonmuutoksen metsävaikutuksista, minkä vuoksi tuloksia on tärkeä esitellä tuoreeltaan mm. metsäammattilaisille ja lähialojen tutkijoille. Sen vuoksi kokouksen järjestäjät, prof. Toini Holopainen, prof. Seppo Kellomäki, prof. Pertti Martikainen, MMT Raisa Mäkipää ja Dos. Elina Vapaavuori, päättivät järjestää "Ilmasto muuttuu - mukautuvatko metsät" -seminaarin Kuopiossa 11.11.2004 ja kutsua tilaisuuden puhujiksi ilmastonmuutostutkimuksen kotimaisia asiantuntijoita. Seminaarin tavoitteena oli jakaa ajankohtaista tietoa ilmastonmuutoksen metsävaikutuksista sekä tulevaisuuden ennusteista. Seminaariin osallistui runsas joukko metsäammattilaisia, tutkijoita ja jatko-opiskelijoita eri organisaatioista.

Uusi tieto ja teoria rakentuvat aina vanhemman pohjalle ja sen vuoksi tutkimusalan kehityksen ja historian tuntemus on tärkeää. Seminaarin aluksi professori Lauri Kärenlammen puheenvuoro valotti pitkäaikaista, jo 1960-luvulla tehtyä tutkimustyötä, joka on nykyisen ilmastonmuutostutkimuksen taustalla. Tuohon aikaan ei vielä puhuttu ilmastonmuutoksesta vaan enemmänkin paikallisten päästölähteiden vaikutuksista ja eliöiden bioindikaattorikäytöstä. Heränny t ympäristötietoisuus kuitenkin johti vähitellen laajenevaan tutkimustoimintaan, ja lisäksi ympäristönsuojeluun tai ympäristötieteeseen keskittyvien koulutusohjelmien aloittamiseen, esim. Kuopion yliopiston ympäristöhygienian (myöhemmin ympäristötieteen) koulutusohjelma perustettiin yli 30 vuotta sitten.

Globaalin ilmastonmuutoksen kehittyminen ja sen etenemiseen liittyvät skenaariot, sekä metsämaan biogeokemialliset prosessit kuuluivat seminaarin ohjelmaan ja muodostavat oleellisen pohjan pohdittaessa ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsien kehittymiseen ja metsäluontoon. Ilmastonmuutokseen liittyy lämpenemisen lisäksi monia muita kasveihin kohdistuvia stressitekijöitä, joiden vaikutusmekanismit solutasolla sekä vaikutukset kasvien fysiologiaan ja kasvuun on tunnettava, jotta voidaan arvioida ja ennustaa ilmastonmuutoksen laajempaa merkitystä metsien ke-

hityksen kannalta. Ilmastonmuutos vaikuttaa metsätuhojen ja tautien esiintymiseen, mikä puolestaan on otettava ennusteissa huomioon vuorovaikuttavana tekijänä. Ilmastonmuutos ja siihen liittyvät stressitekijät heijastuvat lopulta metsien kasvuun ja puun tuotantoon sekä metsien hoitokäytäntöihin. Ilmastonmuutokseen sopeutumisen kannalta on tarpeen pohtia ja selvittää metsien ja metsätalouden merkitystä hiilen nieluna, sekä pohjoisten metsien sopeutumismahdollisuuksia muuttuvaan ilmastoon. Kaikkia näitä aihepiirejä käsiteltiin seminaarissa ja ne ovat mukana myös käsillä olevassa julkaisussa.

Kirjan toimitustyöstä ovat vastanneet FT Johanna Riikonen ja Dos. Elina Vapaavuori. Esitämme parhaat kiitoksemme Metsämiesten Säätiölle arvokkaasta taloudellisesta tuesta, jonka turvin seminaari oli mahdollista toteuttaa. Samoin haluamme kiittää Suonenjoen tutkimusaseman ja Kuopion yliopiston ekologisen ympäristötieteen laitoksen henkilökuntaa avusta seminaarin käytännön järjestelyissä.

Kuopiossa ja Suonenjoella 1.6.2005

Toini Holopainen
Professori

Elina Vapaavuori
Dosentti

Johanna Riikonen
FT

Kirjoittajat

Toini Holopainen, Kuopion yliopisto, Ekologisen ympäristötieteen laitos, PL 1627, 70211 Kuopio. Toini.Holopainen@uku.fi
Jarmo Holopainen, Kuopion yliopisto, Ekologisen ympäristötieteen laitos, PL 1627, 70211 Kuopio. Jarmo.Holopainen@uku.fi
Heikki Hänninen, Helsingin yliopisto, Biotieteellinen tiedekunta, Kasvibiologia, Plant Ecophysiology and Climate Change Group (PECC), PL 65, 00014 Helsingin yliopisto. Heikki.Hanninen@helsinki.fi
Kirsti Jylhä, Ilmatieteen laitos, PL 503, 00101 Helsinki. Kirsti.Jylha@fmi.fi
Seija Kaakinen, METLA, Suonenjoen tutkimusyksikkö, 77600 Suonenjoki. Seija.Kaakinen@metla.fi
Anne Kasurinen, Kuopion yliopisto, Ekologisen ympäristötieteen laitos, PL 1627, 70211 Kuopio. Anne.Kasurinen@uku.fi
Seppo Kellomäki, Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Seppo.Kellomaki@joensuu.fi
Lauri Kärenlampi, Kuopion yliopisto, Ekologisen ympäristötieteen laitos, PL 1627, 70211 Kuopio. Lauri.Karenlampi@uku.fi
Marja Maljanen, Kuopion yliopisto, Ympäristötieteiden laitos, PL 1627, 70211 Kuopio. Marja.Maljanen@uku.fi
Pertti J. Martikainen, Kuopion yliopisto, Ympäristötieteiden laitos, PL 1627, 70211 Kuopio. Pertti.Martikainen@uku.fi
Jyri Mononen, Helsingin yliopisto, Kansainvälisen talousoikeuden instituutti, PL 4, 00014 Helsingin yliopisto. Jyri.Mononen@helsinki.fi
Pekka Niemelä, Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Pekka.Niemela@forest.joensuu.fi
Elina Oksanen, Joensuun yliopisto, Biologian laitos, PL 111, 80101 Joensuu. Elina.Oksanen@joensuu.fi
Heli Peltola, Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Heli.Peltola@joensuu.fi
Petri Peltonen, METLA, Vantaan tutkimusyksikkö, PL 18, 01301 Vantaa. Petri.Peltonen@metla.fi
Kim Pingoud, METLA, Vantaan tutkimusyksikkö, PL 18, 01301 Vantaa. Kim.Pingoud@metla.fi
Johanna Pohjola, METLA, Vantaan tutkimusyksikkö, PL 18, 01310 Vantaa. Johanna.Pohjola@metla.fi
Johanna Riikonen, Kuopion yliopisto, Ekologisen ympäristötieteen laitos, PL 1627, 70211 Kuopio. Johanna.Riikonen@uku.fi
Markku Rummukainen, Rossby Centre, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI), SE-601 76 Norrköping, Sverige. Markku.Rummukainen@smhi.se
Kimmo Ruosteenoja, Ilmatieteen laitos, PL 503, 00101 Helsinki. Kimmo.Ruosteenoja@fmi.fi
Anne Saari, Kuopion yliopisto, Ympäristötieteiden laitos, PL 1627, 70211 Kuopio. Anne.Saari@uku.fi
Heikki Tuomenvirta, Ilmatieteen laitos, PL 503, 00101 Helsinki. Heikki.Tuomenvirta@fmi.fi
Lauri Valsta, Helsingin yliopisto, Metsäekonomian laitos, PL 27, 00014 Helsinki. Lauri.Valsta@helsinki.fi
Elina Vapaavuori, METLA, Suonenjoen tutkimusyksikkö, 77600 Suonenjoki. Elina.Vapaavuori@metla.fi
Timo Veteli, Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu. Timo.Veteli@joensuu.fi

Ekologian murroskausi 1960-luvun lopulla, ja mitä siinä teki IBP?

Lauri Kärenlampi

Historiassa sattuu kausia, jolloin muutokset ovat suurempia kuin tavallisesti. Kun useat syyt vaikuttavat samanaikaisesti ja monet seikat muuttuvat, voidaan puhua murroskaudesta. Kirjoituksen tarkoituksena on lyhyesti kuvata ja pohtia, oliko 1960-luvun lopulla ekologiassa ja ekologisessa ympäristöntutkimuksessa murroskausi, ja mitä oikeastaan tapahtui, millaisia ilmiöitä oli käynnissä? Osittain ajatukset ja pohdinnat perustuvat itse mukana olleen kokemuksiin, mutta toki pääosin kirjoitettuihin lähteisiin. Pohdinnan kohteena eivät ole yksittäiset ekologiset läpimurrot tai oivallukset, vaan paremminkin yleiset ja laajoissa tutkijajoukoissa ilmenneet uudet lähestymistavat.

Ilmastonmuutoksen vaikutusten tutkijakin usein kohtaa kirjastossa tai tietoverkossa tietoa hakiessaan lyhenteen IBP (International Biological Programme). Tämä liittyy 1960- ja 1970-luvuilla toteutettuun laajaan kansainväliseen tutkimuskampanjaan, jonka tuloksilla on roolinsa vielä uuden vuosituhannen tietopankeissa, ja jonka merkittävyys on monissa lähteissä tunnustettu.

Vanhempaakin kvantitoitua tietoa ekosysteemien tuottavuudesta ja ravinnekierrosta toki on, mutta selvästi vähemmän ja se on ikään kuin aikaansa edellä olleiden tutkijoiden tuottamaa. Tämän kirjoitelman tavoitteena ei olekaan esimerkiksi tarkastella, kuka ensimmäisenä käytti käsitettä ekosysteemi, tai kuka ensimmäisenä osasi laskea ekosysteemin energian virtaa, vaan pohditaan paremminkin tutkijoiden ja opettajien "valtavirran kääntymistä".

Kirjoitelman ytimeksi muodostuu näkemys, että 1960-luvun lopulla ekologia ja ekologinen ympäristöntutkimus etenivät ja laajenivat erityisen nopeasti. Tietotekniikan kehitys mahdollisti monia uusia asioita. Ekosysteemikeskeisten oppimateriaalien kasvattamat uudet tutkijapolvet ja IBP-kampanja olivat kehityksen käyttövoimana.

Lähtökohtana vanhan Euroopan perinteet

Vielä 1960-luvun alussa Suomessa biologian opetus ja tutkimus yliopistoissa oli varsin voimakkaasti jakautunut eläintieteeseen ja kasvitieteeseen (omat yliopisto-opintoni sain aloittaa syksyllä 1960). 'Ekologia' sanana toki tunnettiin, mutta sitä käytettiin lähinnä lajikohtaista ekologiaa tarkoittavana. Koulutus perustui vahvasti lajintuntemukseen. Kun eliöryhmiä on paljon ja niissä on monia lajeja, oli (ja on tietysti vieläkin) kovan työn takana hankkia hyvä lajintuntemus. Tämä johti helposti "fakkiutumiseen" eikä ainakaan edistänyt kokonaisvaltaisten näkemysten muodostumista.

Kasvitieteen oppikirjoissa (kuten Strasburger: Lehrbuch der Botanik für Hochschulen) ei ollut erillistä ekologiaa käsittelevää osaa, vaan lajikohtaista ekologiaa ja olosuhteisiin sopeutumista koskevaa ainesta sisältyi sekä morfologiaan, fysiologiaan että systematiikkaan. Lisäksi oppikirjoissa oli aina kasvimaantieteellinen osa, jonka peruskäsitteenä oli ja on vieläkin lajin levinneisyysalue. Kasvimaantieteen tehtävänähän on selittää lajin levinneisyys; miten se johtuu ilmasto- ja maape-

rätekijöistä, kilpailusta, leviämishistoriasta, tms. tekijöistä.

Tällaiset aineksethan kuuluvat kattavan ekologian oppikirjan sisältöön, joten kasvimaantiede (ja tietysti yhtä hyvin eläinmaantiede ja eliömaantiede yleisemmin) olivat nykyisten ekologian kirjojen osittaisia edeltäjiä. Erään parhaisiin lukeutuvan ja paljon käytetyn ekologian oppikirjan nimessäkin levinneisyysalueen keskeisyys edelleen korostuu. Kirja on tietenkin Krebs: Ecology: the experimental analysis of distribution and abundance. Krebsin kirjan nimessä on syytä huomata myös sana 'experimental', joka merkitsee kokeellisen todistusvoiman korostamista myös ekologiassa. Eliömaantieteen tyyppinen ekologia luonnollisesti perustui pääosin vain havaintoihin maastosta ja muuttujien välisten korrelaatioiden tarkasteluun.

Kasvimaantieteen tutkijat syventyivät mm. siitepölyanalyysin kautta kasvillisuuden muutoksiin ilmastokausien mukana. Siinä ajatusmaailmassa oli ilmeistä, että kun ilmasto muuttuu, niin kasvillisuus muuttuu myös. Pohdittavaksi jää vain, millä nopeudella sukkessio etenee, millä nopeudella yhdyskunnan lajisto ja lajien runsaussuhteet alkavat muuttua. Leviäminen ja tilan valtaaminen kilpailun kautta ovat yleensä hitaita prosesseja. Huomio kiinnittyy helposti levinneisyysalueen rajoihin, koska siellä eteneminen tai taantuminen voi olla parhaiten nähtävissä. Äärialueilla muutokset voivat merkitä sietokykyrajojen ylittymistä tai ainakin rajojen lähenemistä tai etenemistä, ja samalla kilpailusuhteet voivat muuttua.

Levinneisyyden ohella toinen keskeinen käsite oli kasviyhdyskunta, samalla kasvupaikalla menestyvien lajien yhdyskunta, jossa kilpailun kautta runsaussuhteet määräytyvät. Kun kasviyhdyskunnissa on nähtävissä säännöllisyyttä (aina löytyvät jokseenkin samat lajit ja jokseenkin samoissa runsaussuhteissa), ajateltiin että yhdyskunnat edustavat eräänlaisia lajia vastaavia luonnollisia kokonaisuuksia, yhdyskuntatyyppejä, assosiaatioita. Näille oli oma valta- ja luonnehtijalajien perusteella johdettu nimistönsä ja taksonomiansa, jotka etenkin Keski-Euroopassa vieläkin ovat käytössä ja varmasti ovat edelleen hyödyllisiä työkaluja luontoa kuvailtaessa ja kartoitettaessa (alaa kutsutaan kasvisosiologiaksi).

Superorganismi vai kontinuumi?

Kun kasviyhdyskuntatyyppien sisäisiä vuorovaikutuksia korostettiin, päädyttiin käsitykseen, että ne ovat jopa eräänlaisia superorganismeja, jotka pyrkivät säilyttämään oman rakenteensa ja toimintansa, ja joilla on oma sukkessiokehityksensä. Tämä ajattelutapa yleensä liitetään pohjoisamerikkalaisen F. E. Clementsin nimeen, ja sillä on vahvat yhteydet suomalaiseen metsätyyppiteoriaan.

Toisaalta ilmeni ajattelua, että kasviyhdyskunnat sittenkin muotoutuvat kunkin paikan edellytysten mukaan, eikä niillä ole yksilöllistä rakennetta ja toimintaa. Näin yhdyskunnat vaihtuvat vähittäin toinen toisikseen jatkuvana sarjana, kontinuumina. Tähän ajattelutapaan ainakin pohjoisamerikkalaiset liittävät H. A. Gleasonin nimen. Samoilla linjoilla jatkoi R. H. Whittaker, joka oli aktiivinen vielä 1970-luvulla. Whittaker kehitti kasvillisuuden gradienttianalyysiä (jo 1950- ja 1960-luvuilla), minkä tuloksia usein on helppo tulkita niin, että lajit eivät jakaudu maastossa yhdyskuntasidonnaisesti vaan paremminkin kukin laji yksilöllisesti.

Vieläkin on erilaisia mielipiteitä, onko superorganismi vai kontinuumi lähempänä totuutta. Asia oli 1960-luvulla vielä niin ajankohtainen, että se ikään kuin vaati välitöntä henkilökohtaista kannanottoa. Kun Kevolla työskentelimme vuoristossa (loivapiirteisessä tunturimaastossa), joka muistutti Whittakerin kohteena ollutta Great Smoky Mountains -vuoristoa, heräsi into ja halu tehdä gradienttianalyysi. Varsin yksinkertaisella menetelmällä tehty kasvillisuuden gradienttianalyysi auttoikin sitten osoittamaan, millä tavalla IBP-havaintoalueet edustivat alueen luontoa (lähinnä mineraalimailla). Kasvillisuuden vaihtelu oli suurelta osin selitettävissä korkeuden (korkeus merenpinnan yläpuolella) ja lasketun kosteusindeksin avulla. Samaa aineistoa käsittelimme myös faktorianalyysillä, mikä oli menetelmän ensimmäisiä sovelluksia Suomessa.

Anglosaksisen maailman ekosysteemikeskeinen ekologia

Anglosaksisessa maailmassa kehitys lähti uusille urille nimenomaan ekosysteemi -käsitteen puitteissa. (Alaa voisi yksinkertaisesti kutsua systeemiekologiaksi, mutta koska tätä sanaa on käytetty vain mallinnusta tarkoittavana, niin tässä on otettu käyttöön 'ekosysteemikeskeinen ekologia'. Tämä on mielestäni parempi kuin 'ekosysteemiekologia', mitä on näkynyt myös.)

Ekosysteemin ensimmäinen selkeä määrittely katsotaan Tansleyn ansioksi (kirjoitus on vuodelta 1935). Syntyi näkemys, että eliöt ja ympäristötekijät muodostavat toiminnallisen kokonaisuuden, ekosysteemin (luonnon järjestelmän, ympäristöjärjestelmän). Näkemys alkoi levitä ja vähitellen huomattiin, että ekosysteemiä voidaan eritellä energianvirran ja aineidenkiertokulun malleilla. Nämä voidaan tavallaan yksinkertaisilla mittauksilla tehdä toimiviksi, operatiivisiksi. Ekosysteemi voidaan eritellä toiminnallisiin lokeroihin ja niiden välisiin toimintoihin, prosesseihin ja kaikki on kvantitoitavissa sekä kaavoilla ja malleilla laskettavissa.

Aluksi ekosysteemitarkastelu kohdistui vesiekosysteemeihin, mihin se käytännössä helpommin sopiikin. H. T. Odumin perustavanlaatuiset tutkimukset 1950-luvulla kohdistuivat juuri lammikkoihin (Silver Springs). IBP -kaudella vastaavia malleja haluttiin yhä enemmän soveltaa myös terrestrisiin systeemeihin, vaikka työ on metodisesti hankalampaa.

Uusi kehitys varmaankin johtui monista seikoista. Uranuurtajilla (yksittäisillä henkilöillä) on kiistämätön merkityksensä, mutta suurelta osin uskon muutoksen valtavirran liittyneen yleiseen samansuuntaiseen kehitykseen maailmassa. Myös tekniikassa mallinnus, kybernetiikka, tietojenkäsittely ja tilastotiede olivat uusia näkökulmia. Nämä inspiroivat ekologeja huomaamaan, että ekosysteemejä voidaan tutkia samoilla tai ainakin samantapaisilla menetelmillä. Ekosysteemi -käsitteen täyteen hyödyntämiseen päästiin vasta kun aika oli kypsä.

Henkilöistä Odumit (E. P. Odum ja H. T. Odum) olivat ekosysteemin "markkinoinnissa" tärkeitä. Odumien Fundamentals of ecology -oppikirjaan kiteytynyt uusi ekosysteemikeskeinen ekologia kehittyi Amerikassa 1950-luvulla. Oppikirjan ensimmäinen laitos (edition) on julkaistu 1953 ja toinen laitos vuonna 1959. E. P. Odumin mukaan kirjan laatimisen motivaationa olivat toiminnallisen tarkastelun tarve ja periaatteiden kriittisen pohdinnan tarve ("... need for a functional approach and a critical examination of principles, the twin motivations ..."). Uuden ekologian tarpeellisuutta perusteltiin edelleen mm. tähän tapaan (kirjan esipuheesta vapaasti käännettynä):
Ekosysteemien aineiden kiertokulun ja energianvirran suuruus ja jakautuminen on kvantitatiivisesti tunnettava, jotta voidaan hallita radioaktiivisten isotooppien kulkeutumista. Voi olla ihmisenkin ratkaisujen kannalta hyödyllistä tuntea ekosysteemin energianvirrat. Onhan fossiilisten polttoaineiden loppu nopeasti tulossa, ja on yhä enemmän nojauduttava atomienergiaan ja aurinkoenergiaan.

Muutoksen tulo Suomeen ja kielenvaihdos

Suomeen suuri murroskausi, siirtyminen kvantitatiivisen ekosysteemitarkastelun suuntaan tuli vasta 1960-luvun lopulla. Voi kysyä, miksi niin myöhään? Selityksiä on varmaankin useita. Euroopassa yleensäkin levinneisyys-yhdyskuntasukkessio ja vastaavaan käsitteistöön perustuva tiede omasi vahvat perinteet ja hienot saavutuksetkin. Eli ehkä Suomi ei ollutkaan kovin myöhässä suhteessa muihin maihin. Yliopistojen opettajakunta niin meillä kuin muuallakin oli harvalukuinen, eikä varsinaisia ekologian virkoja ollut.

Kielenvaihdoskin oli Suomessa hidastamassa kehitystä. Tieteen kieli on tunnetusti historian myötä usein vaihtunut. Meidän kannalta viimeisin suuri muutos oli siirtyminen saksankielestä englanninkieleen. Lähtökohta tietenkin oli toisessa maailmansodassa ja tämän seurauksissa. Muutos oli monista ymmärrettävistä syistä johtuen aluksi

hidas, mutta kerran vauhtiin päästyään se yhä nopeutui.

Kansainvälisen oppimateriaalin "sukupolvenvaihdos" oli osa samaa murrosta. Turun yliopistossa eläintieteen professori Paavo Voipio (professorina 1958-79) käytti ainakin jo 1960-luvun alussa oppikirjana Odumien "Fundamentals of Ecology" -teosta. Hänen valintansa eläintieteen perusteiden oppikirjaksi oli samoin englanninkielinen, joten me koulussa pitkän saksan lukeneet jouduimme ahkerasti käyttämään sanakirjaa. Muutosta vauhdittamassa oli tietenkin koululaitos, jossa jo oli suurelta osin otettu englanti suosituimmaksi pitkäksi kieleksi.

Vanhemmalle polvelle, joka oli sotansakin käynyt saksankielisten aseveljien rinnalla (ja lopulta heitä vastaan) ja julkaissut siihenastisen tieteellisen tuotantonsa mahdollisesti kokonaan saksaksi, oli kielen vaihtaminen varmasti paljon työläämpi prosessi, mutta kuitenkin he siitä ihailtavasti aikaa myöten selviytyivät.

IBP oli laaja-alainen ja todella kansainvälinen

IBP:n (International Biological Programme) käynnisti lähinnä Kansainvälinen tieteellisten järjestöjen neuvosto (ICSU, International Council for Scientific Unions). Tavoitteena oli selvittää "Biological basis of productivity and human welfare". Projekti, tai paremminkin kampanja oli monivuotinen: valmisteluvaiheeksi varattiin vuodet 1964-67 (metodien yhtenäistämistä ja valmistelua) ja varsinaiseen työskentelyyn 1967-1972, mikä joissakin maissa jatkui vuoteen1974 saakka, ja kirjoja ja julkaisuja valmistui vielä 1980-luvulla.

ICSU:n asettamaan IBP-toimikuntaan kuului alussa 20 maan edustus. IBP-toimikunta määritteli ohjelmaan 7 osa-aluetta, jotka on tässä hyvä listata osoittamaan ohjelman laajuutta:

1. Conservation of Terrestrial Communities (CT)
2. Human Adaptability (HA)
3. Productivity of Freshwater Communities (PF)
4. Productivity of Marine Communities (PM)
5. Production Processes (PP)
6. Productivity of Terrestrial Communities (PT)
7. Use and Management of Biological Resources (UM)

Ohjelma-alueisiin kuului siis luonnonsuojelua, ihmisen sopeutumista (esim. eskimoiden sopeutumista ympäristöönsä), makeanveden ja merien eliöyhdyskuntien tuotantoa, tuotantoprosessien tutkimusta (nyt ehkä käytettäisiin termiä ekofysiologia), terrestristen eliöyhdyskuntien tuottavuutta sekä biologisten voimavarojen käyttöä (mm. biologisesta torjunnasta ravintoanalyyseihin asti). Laajuuden vuoksi tuntuukin sana 'kampanja' perustellummalta kuin 'ohjelma'. Myöhemmin seuranneissa kansainvälisissä hankkeissa on kohde ollut rajatumpi, ehkäpä juuri IBP:n kokemusten perusteella.

IBP:hen osallistui merkittävästi ainakin 58 valtiota, joilla oli omat IBP-toimikuntansa (vuoden 1971 tilanne) ja ainakin joihinkin ohjelma-alueisiin osallistuvia rahoitusprojekteja (Vik 1975). IBP-aikana syntyi ennennäkemätön määrä kansainvälisiä kontakteja, joista osa vieläkin jatkuu joko yksilöiden, laitosten tai tutkimusasemien ja vastaavien tasolla. Todella konkreettinen yhteistyö oli aikaisemmin ollut vähäistä, minkä syitä löytynee sekä poliittisista, teknisistä että taloudellisista seikoista.

IBP katalysaattorina

IBP oli yhtenä ilmeisen tärkeänä katalysaattorina vauhdittamassa siirtymistä systeemiekologiaan. Kun tarkemmin eritellään seikkoja, jotka muuttivat ekologiaa, nousee tietotekniikan kehitys vahvasti mieleen (taulukko 1). Suurten havaintoaineistojen laskeminen ja tilastollinen testaaminen tulivat mahdollisiksi. Samalla malliajattelu yleistyi ja alkoi myös kiinnostaa, kun mallien tekninen toteutus helpottui. Oltiin innostuneita termeistä käsitemalli–lokeromalli–matemaattinen malli–simulointimalli. Ajoittain puhuttiin jopa "kokonaismallista", jolla ekosysteemin toiminta kokonaan simuloitaisiin, mikä viimeistään nyt näyttää naiivilta. Uudetkin mallit ovat edelleen lähinnä osasysteemimalleja eikä kaiken sisällyttäminen yhteen malliin liene enää järkevä tavoitteenakaan.

Taulukon 1 luettelemat murroskauden mahdolliset aiheuttajat (ainakin tietotekniikkaan liittyvät) ovat niin yleisluonteisia, että luultavasti useimmilla inhimillisen kulttuurin ja toiminnan aloilla oli nopeaa muutosta samoina vuosina. Tämä ei kuitenkaan vähennä ekologian muutoksen kiinnostavuutta.

Kvantitatiivinen systeemiekologia merkitsi uuden "kulttuurin" tuloa. Hyväksi anekdootiksi kelpasi juttu, että Amerikassa kuuluisa ekologi tutkii preeriaekosysteemin perustuotantoa ja energianvirtaa, vaikkei hän tunne kaikkia käsittelemiään lajeja. Lieneekö ollut keksitty juttu, tuntui joka tapauksessa hyvältä huomata, että prosesseja voidaan pitää niin tärkeinä, että epäoleellisista yksityiskohdista voidaan tinkiä. Entiseen biologikulttuuriin kuului, että jokainen niukkanakin esiintyvä laji huolella tunnistetaan.

Väittämäni suuri murros 1960-luvun lopulla ei tietenkään ole poikkeukseton tai totaalisesti kaikkea koskeva. Jollakin alalla ekosysteemitarkastelu ehkä jo aikaisemmin oli vallalla (hydrobiologia). Toisaalta tuottavuuden kvantitatiivinen mittaaminen oli rutiinia soveltavissa tieteissä (maa- ja metsätieteissä).

IBP jossain määrin merkitsi ilmastonmuutoksen vaikutustutkimuksen alkua, vaikka se puoli korostui paremmin MAB-ohjelmassa, joka käynnistyi jo IBP:n aikana. Ilmastonmuutos (hiilidioksidin nousu, lämpötilan nousu) olivat 1950-luvulla alkaneet saada huomiota, missä työssä ruotsalainen Bert Bolin kollegoineen oli merkittävässä asemassa.

Olivatko Suomessa IBP:n edellytykset kunnossa?

Varmuudella en tiedä, kuka suomalainen ensimmäisenä sai tietoa ja innostui IBP:stä, mutta ilmeisesti useatkin professorit pian huomasivat kansainvälisen suuren kampanjan hyödyllisyyden. Liikkeellelähtö oli niin kiireinen, että Suomen IBP-toimikuntaa sanottiin alussa "itse itsensä nimittäneeksi". Vaikka sillä oli valtuutuksensa tieteellisiltä järjestöiltä ja ICSU:lta, mutta kun ei valtiollisen komitean asemaa, niin siitä pieni pilkallisuus. IBP-projekteille tuli rahoitusta (kovan kädenväännön jälkeen, tietenkin) opetusministeriöltä ja tieteellisiltä toimikunnilta. Tieteellisten toimikuntien järjestelmähän jo oli toiminnassa ja sille v. 1969 annettiin nimeksi Suomen Akatemia (samalla entinen "maineikkaiden yksilöiden akatemia" lakkautettiin).

Taulukko 1. Oletettuja ekologian murroskauden aiheuttajia.

1. Tietotekniikan kehitys (suurten aineistojen käsittely, tilastotiede, mallinnus, monimuuttuja-analyysit, jne.)
2. Ekosysteemipainotteisen oppimateriaalin vakiintuminen (Odum) ja yleensäkin englanninkielisen kirjallisuuden käytön tehostuminen
3. Kansainvälisten yhteistyöprojektien alkaminen
4. Kansainvälisen julkaisemisen yleistyminen
5. Tiedehallinnon ja projektirahoituksen paraneminen, opiskelijat mukaan palkallisina tutkimusapulaisina
6. Tutkimusotteen muutos havaintoja tekevästä tarkemmin mittaavaan ja kokeelliseen suuntaan
7. Mittalaitteiden ja datankeruun kehittyminen
8. Tutkimusasemien voimistuminen
9. Kirjoitus- kopiointi ja painotekniikoiden edistyminen ja helpottuminen

Tämän kirjoitelman tavoitteena ei ole varsinaisen IBP-historiikin tai katsauksen laatiminen. Aiheesta on paljon saatavissa tietoa. Pohjoismaidenkin osalta Rolf Vikin toimittamassa Final report, Scandinavian countries (Vik 1975) on tarkkaan lueteltu kaikki osaprojektit ja tutkijat. Tässäkin kuitenkin haluan mainita Suomen IBP-toimikunnan jäsenet nimeltä:

Suomen IBP-toimikunnan puheenjohtaja oli prof. Hans Luther, varapuheenjohtaja prof. Peitsa Mikola ja sihteerinä ensin fil.lis. Matti Lähdeoja ja sitten fil.kand. Carl-Adam Häggström. Jäseninä olivat prof. Nils Ellfolk, prof. Henrik Forsius, apul.prof. Paavo Havas, prof. Paavo Kallio, prof. Reino Kalliola, prof. Veikko Kanervo, dos. E. Kivi, prof. Pontus Palmgren, prof. Reino Ryhänen ja fil.lis. Paavo Tulkki. Virallinen toiminta päättyi jo 1971, jonka jälkeen lopputehtävät siirtyivät Suomen Akatemian asettamalle MAB-toimikunnalle (MAB, Man and the Biosphere -ohjelma). Ehkä rahoituksen varhainen päättyminen vaikutti siihen, että kaikki aloitetut työt eivät kunnolla koskaan valmistuneet. Muissa pohjoismaissa IBP-toimikunnat jatkoivat työtään vuoteen 1974 tai 1975 saakka. Toki Suomessakin tehtiin asiallisesti IBP:hen kuuluvaa työtä ja tuotettiin julkaisuja vielä 1980-luvulla (esimerkiksi Erkki Haukioja ja hänen Kevolla toiminut tutkimusryhmänsä).

Jos rohkenen esittää joitakin arvioita IBP-kampanjan rahoituksen ja organisaation onnistumisesta, niin nähdäkseni asiat menivät siedettävän hyvin. Suomi tietenkin tuli mukaan ydinmaita myöhemmin, rahoitus oli suhteellisen pieni ja päättyi aikaisin. Tiedehallinto oli vasta kehittymässä ja kokemusta tutkimusohjelmista oltiin vasta hankkimassa. Joka tapauksessa aika oli kypsä kansainväliselle yhteistyölle, mikä maailmansodan jälkeisessä tilanteessa (resurssiniukkuutta, kansainvälisiä ennakkoluulojakin, jne.) oli jäänyt kehittymättä. Tätä kansainvälisen avautumisen tärkeyttä on muuallakin IBP:tä arvioitaessa korostettu (esim. Academy of Sciences of the Czech Republic 2005, National Science Foundation 2005).

Teknisesti ja tieteellisesti IBP:hen osallistumiseen oli Suomessa kohtuulliset edellytykset. Tutkimusasemat olivat ainakin olemassa ja kehittymässä (mukana olivat varsinkin Hyytiälä, Kevo, Lammi ja Oulanka). Tutkimusasemilla oli suuri merkitys IBP:lle, jos kohta toisinkin päin. Kansainvälinen ohjelma vauhditti asemien toimintaa ja korosti niiden tarpeellisuutta. Myös havaintojen ja tulosten tietojenkäsittelyyn oli juuri saatu mahdollisuudet. Biologien koulutukseen oli sisällytetty tilastotiedettä. Osittain havaintoaineistoja laskettiin magneettikortilla ohjelmoitavalla (ison mekaanisen kirjoituskoneen näköisellä) pöytäkoneella, mutta reikäkorteille lävistetyn datan käsittely isoilla tietokoneilla toimi myös, vaikkakin vaati alussa käyttäjältä melkoisesti ponnisteluja. Eli teknisesti ja tieteellisesti suomalaiset olivat nähdäkseni suunnilleen samalla tasolla kuin muutkin keskisuuret maat.

Tieteellisiä artikkeleita oli siihen asti julkaistu omissa sarjoissa, mikä oli hyväksyttyä ja täysin "hovikelpoista". *Reports from the Kevo Subarctic Research Station* oli Kevolla työskenteleville luonnollinen valinta julkaisupaikaksi, koska Kevon tutkimuksen mainetta oltiin luomassa ja nimi haluttiin iskostaa kansainväliseen tietoisuuteen. Vuoden 1970 volyymistä lähtien sarjassa oli runsaasti joko suoranaisesti tai ainakin asiasisällön puolesta IBP-projekteihin kuuluvia artikkeleita. Julkaisupolitiikassakin kansainvälisen yhteistyön trendi kuitenkin näkyi, ja juuri noihin aikoihin alkoi siirtyminen nykyistä tilannetta kohti.

Mitä Kevon IBP:ssä opittiin ilmastoasioista?

Kevon IBP-projekti, missä itse sain olla perustuotannon ja hajotuksen tutkijana, kuului ohjelma-alueeseen PT (Productivity of Terrestrial Communities). Johtajana oli professori Paavo Kallio, Kevon perustaja. Kansainvälinen toiminta oli Tundra-ryhmän nimellä, mihin osallistui norjalaisia, ruotsalaisia, brittejä, irlantilaisia, amerikkalaisia, kanadalaisia, itävaltalaisia, australialaisia (tutkimusta Antarktiksen läheisillä saarilla!) ja neuvostoliittolaisetkin saatiin mukaan. Kokouksia pidettiin eri maissa ja Kevollakin vuorollaan. Tundra-ryhmää voi hyvin verrata tämän päivän käsitteeseen tutkijakoulu. Menetelmiä yhtenäistettiin, niis-

tä keskusteltiin ja kritisoitiin ja pyrittiin opettaman toisille.

Paavo Kallio oli monipuolinen biologi, mutta pääasiassa kuitenkin kasvifysiologi. Hän oli Turun yliopiston kasvitieteen laitoksella pystyttänyt fotosynteesin mittauslaitteiston, joka kesäksi "roudattiin" Utsjoelle. Alhaisten lämpötilojen, pakkasjaksojen, jatkuvan valon, siis nimenomaan arktisten tekijöiden vaikutus fotosynteesiin kiinnosti häntä erityisesti, ja siltä osin työ kuului IBP:n ohjelma-alueeseen PP (Production Processes). Paavo Kallion johdolla tutkittiin myös typenyhteytystä. Ilmeni, että esimerkiksi tinajäkälän typenyhteytyksen lämpötilaoptimi ja äärirajatkin ovat paljon korkeammalla kuin hiilen yhteytyksen vastaavat.

Alhaiset lämpötilat, pitkä valorytmi yms. ajateltiin aikaisemmin pohjoisen metsänrajan läheisyydessä vallitsevan tärkeiksi asioiksi. Työn kuluessa osoittautui, että ainakin osa Lapin ekosysteemeistä (tunturipaljakka, hiekkaisella alustalla kasvava männikkö) on kesäaikana hyvin kuivia ja ekologisia prosesseja summattaessa kasvukauden läpi tulee kosteustekijä vahvasti esille. Niin kauan kuin jäkälä tai sammal on rutikuivaa, se ei tietenkään kasva tai toimi muutenkaan. Samoin karikkeen hajotus hidastuu kuivana ja vuosilustoanalyysi viittasi sademäärän merkitykseen myös Lapin männyn kasvulle. Vastaavasti ilmastonmuutoksen myötä ilmenevät sademäärän jakautumisen muutokset tulevat muuttamaan ekoprosessien nopeuksia (kvantitatiivinen muutos). Pitemmän ajan myötä sademäärän muutos varmaankin muuttaa myös lajien levinneisyyksiä ja runsaussuhteita (siis muuttaa eliöyhdyskuntien rakennetta), mitä voi kuvata sanalla kvalitatiivinen muutos.

IBP:n vaikutus näkyy vieläkin

Osa IBP:n myötä syntyneistä tutkimusprojekteista jatkaa edelleen. Kevolla Erkki Haukiojan johdolla alkanut koivun tuholaisten tutkimus painottui aluksi energiaekologiaan, mutta on sitten tunnetusti laajentunut ja syventynyt ketjun kaikkiin vuorovaikutuksiin, joiden parissa hän nyt akatemiaprofessorina työskentelee.

IBP kampanjan yhä jatkuva arvostaminen on nähtävissä mm. USA:n National Science Foundationin (2005) www-sivuilla, jossa kirjoitetaan näin: "The IBP helped to consolidate ecosystem ecology; resulted in a permanent increase in funding for the field, stimulated the use of computer modeling in ecology; produced smaller-scale models of ecological systems; and trained a generation of researchers."

Suurten maiden IBP kampanjassa tuottamaa aineistoa on yhä kansainvälisissä datapankeissa. IBP:n osaohjelmat tuottivat myös hyvin paljon julkaisuja ja kirjasarjoja. Cambridge University Pressin julkaisemassa keltakantisessa teossarjassa on lähes 30 paksua osaa (tundra-ekosysteemejä käsittelevä osa on numero 25). Yksi kirja käsittelee pelkästään IBP:n kehitystä (Worthington, ed.: The evolution of IBP), muut sentään käsittelevät varsinaisia asioita.

Pienempien maiden ja projektien osalta saavutukset tietenkin olivat monentasoisia. Osa aineistoista saattaa olla vieläkin hyllyillä ja pöytälaatikoissa, mutta tiiviin yhteistyön ansiosta "hävikki" lienee jäänyt kohtuullisen pieneksi.

Eräät IBP:n valmistelemat kansainväliset metodioppaat olivat niin huolella tehtyjä, että kelpaavat vieläkin. Primärituotannon määritystä koskeva kirja P. J. Newbould: Methods for Estimating the Primary Production of Forests (2. edition) on julkaistu www:ssä.

Tuloksia on luonnollisesti hyödynnetty myös oppikirjoissa. Suomalaisittain tärkeä Sisulan kirja (Heikki Sisula: Ekologian perusteet, 1975, uusittu laitos 1980) toi esille myös IBP:n tuloksia. Osaltaan se oli varmaankin vauhdittamassa myös koulun biologian kirjojen uudistumista.

Murroskauden ja IBP:n jälkeen

Myöhemmin tapahtuneiden muutosten ja kehitysilmiöiden suunta näyttää olevan, että 'ekosysteemi' on käsitteenä edelleen tärkeä, mutta se on "työkaluna" vaikea ja monimutkainen. Käytännössä tutkimustyö lähes aina kohdistuu johonkin pieneen osasysteemiin ja lähestymistapa (käsitteet, meto-

dit, tavoitteet) on rajattu. Voidaan tutkia levinneisyyttä, yhdyskuntien rakennetta ja luokittelua, eliöiden välisiä vuorovaikutuksia, populaatio- ja evoluutioilmiöitä, energianvirtaa ja ravinteiden kiertokulkua, tai ekofysiologiaa. Mikä tahansa näistä lähestymistavoista on käyttökelpoinen myös ilmastonmuutoksen vaikutuksia arvioitaessa ja ennakoitaessa. Biodiversiteetin tutkimus on nostanut eliöryhmien spesialistit jälleen suureen arvoon. Ehkä tilanne ekologian suuntausten välillä on nyt tasapainoinen ja kaikkien lähestymistapojen tärkeys ymmärretään.

Yksi huolenaihe on, että ekologinen käsitteistö ja terminologia eivät suinkaan ole vieläkään valmiita ja selkeästi määriteltyjä, vaan niitä käytetään monilla eri tavoilla. Sellaisetkin peruskäsitteet kuin habitaatti, biotooppi, ekologinen lokero, yhdyskunta ja ekosysteemi ovat monin tavoin käytettyjä (Looijen 1998). Jos käsitteistö olisi selkeä, sitä voitaisiin paremmin käyttää myös ilmastonmuutoksen vaikutuksia tutkittaessa ja arvioitaessa. Looijenin väitöskirjan ekologiaa koskevien osien lukeminen suorastaan hätkäyttää, niin terävästi hän analysoi käsitteiden puutteellisuutta. Ehkä käsitteistö ei vielä pitkään aikaan pysty selkiytymäänkään, koska sekava käytäntö on syvään juurtunut, eikä kohde ("luonto") ole yksinkertainen vaan sisältää monensuuntaista vaihtelua. Luontoa myös tarkastellaan monia eri tarkoituksia varten, jolloin helposti syntyy erilaisia käsitejärjestelmiä (esimerkiksi ekologien, maantieteilijöiden, metsäntutkijoiden, ympäristönsuojelijoiden käsitteistöt).

Lopuksi

On paikallaan kysyä, missä määrin edellä sanotut seikat murroskaudesta ja IBP:n merkityksestä edustavat "historiallista totuutta"? Luotettavan tarkastelun pitäisi perustua laajaan ja kriittisesti käytettyyn lähdeaineistoon. Kuinka suuri muutos 1960-luvun lopulla tapahtui tuotettujen tieteellisten julkaisujen sisällössä, opinnäytetutkielmissa, käytetyissä oppimateriaaleissa, tutkimusrahoituksen suuntaamisessa, jne. Millä aikataululla oppikirjat ja niiden kieli muuttuivat? Tällaiset asiathan olisivat periaatteessa selvitettävissä ja tilastoitavissa. Vastaukset saattavat joskus antaa parempaa tietoa murroskaudesta, jota tässä olen tapahtumissa mukana olleena, mutta myös kansainvälisten lähteiden nojalla hahmotellut (National Science Foundation 2005). Ehkäpä järjestelmällinen tutkimus aikanaan tuo uusia näkökantoja, mutta tällä hetkellä uskon, että edellä esittämäni ajatukset ovat myöhemminkin pääosin hyväksyttävissä.

Kiitokset

Kiitän Erkki Haukiojaa käsikirjoituksen lukemisesta ja hyödyllisistä kommenteista.

Kirjallisuus

Academy of Sciences of the Czech Republic 2005: (http://www.butbn.cas.cz/archive/lter/history.html, 21.2.2005).

Coweeta Long Term Ecological Research (http://coweeta.ecology.uga.edu/webdocs/1/ppforests.html, 9.3.2005).

Looijen, R. 1998. Holism and Reductionism in Biology and Ecology - The mutual dependence of higher and lower level research programmes Proefschrift, Rijks-universiteit Groningen, 241 ss. (http://www.ub.rug.nl/eldoc/dis/fil/r.c.looijen/, 9.3.2005).

National Science Foundation 2005: (http://www.nsf.gov/about/history/nsf0050/environment/thebirth.htm, 21.2.2005).

Odum, E. P. (yhteistyössä H. T. Odum): Fundamentals of Ecology. 2. painos, 1959, Saunders, Philadelphia. 546 s.

Vik, R. 1971 (toim.) International Biological Programme - Final Report; Scandinavian Countries Denmark, Finland, Norway, Sweden. Published by the Scandinavian National Committees of the IBP.

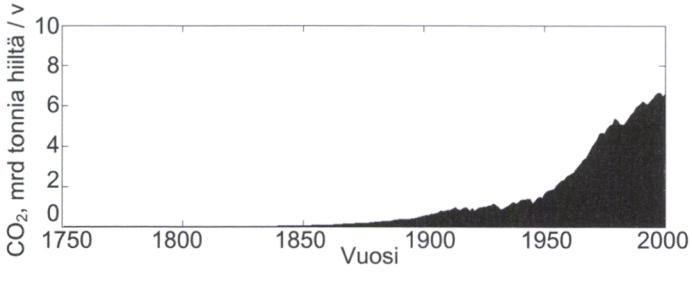
Katsaus globaaliin ilmastonmuutokseen

Markku Rummukainen

Ilmastonmuutos on ajankohtainen ja maailmanlaajuinen yhteiskunnallinen ongelma. Päätöksiä ja ratkaisuja tarvitaan, jotta ihmisten toiminnan vaikutusta ilmastoon saataisiin vähennettyä. Ilmastonmuutos kytkeytyy eri tavoin useimpiin muihin merkittäviin yhteiskunnallisiin ongelmiin, kuten väestönkasvu, köyhyys, energiantuotanto, ympäristön tila ja luonnon monimuotoisuus (biodiversiteetti) (Kuusisto ja Käyhkö 2004). Näitä kestävän kehityksen eri ongelma-alueita tuskin voidaan ratkaista yksitellen. Pikemminkin ratkaistavana on eri ongelmien kompleksi, mikä tietysti monimutkaistaa asioita. Toisaalta kestävämpi kehitys jollakin osa-alueella parantaa näkymiä myös toisilla osa-alueilla. Ihmisen toiminnan tiedetään vaikuttavan ilmastoon ja on selvää, että vaikutus tulee lähivuosikymmenien aikana voimistumaan. Näyttää myös varmalta, että muutokset ja niiden vaikutukset ovat pienimmillänkin "suuret" ja edellyttävät sopeutumista. Ilmastopoliittisilla toimenpiteillä muutokset voitaneen pidemmällä tähtäimellä rajoittaa jollekin tietylle tasolle. Problematiikkaan liittyvät epävarmuustekijät vaikeuttavat osaltaan päätöksentekoa, mutta samalla ne toimivat tärkeinä päätöksentekoa motivoivina tekijöinä.

Ihmiset vaikuttavat ilmastoon pääasiassa tuottamalla energiaa fossiilisia polttoaineita (kivihiili, öljy ja maakaasu) hyväksi käyttäen. Sivutuotteena syntyvät kaasupäästöt päätyvät ilmastosysteemin eri osiin ja muuttavat niiden luonnollista tasapainoa. Myös maankäytön muutokset ovat tärkeitä ilmastoon vaikuttavia tekijöitä, joiden seurauksena päästöjä kertyy ilmakehään. Viimeisten 250 vuoden aikana fossiilisten polttoaineiden käytöstä on aiheutunut yli 280 miljardin tonnin hiilipäästöt (kuva 1). Todettakoon kuitenkin, että noin puolet näistä päästöistä on tapahtunut viimeisten 35 vuoden aikana. Fossiilisten polttoaineiden käytön ja maankäytön muutoksien seurauksena muodostuneista hiilidioksidipäästöistä noin puolet on päätynyt ilmakehään, mikä vastaa yli 30 prosentin lisäystä ilmakehän hiilidioksidipitoisuuteen. Toinen puolikas on päätynyt pääosin biosfääriin ja valtamerien pintakerroksiin.

Ilmakehän kasvava hiilidioksidipitoisuus vaikuttaa maapallon säteilytasapainoon säätelemällä

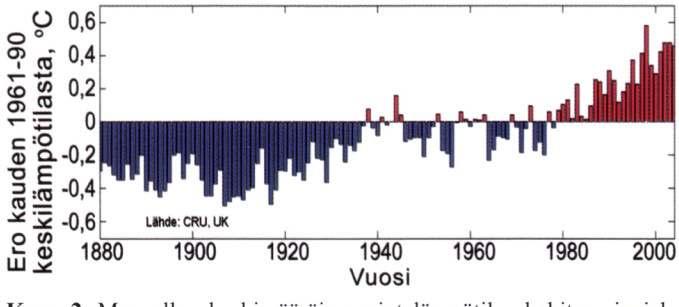


Kuva 1. Maapallonlaajuisten hiilidioksidipäästöjen kehitys vuoteen 2000 mennessä. Kuvassa on mukana fossiilisten polttoaineiden käytöstä seuranneet päästöt, mukaan lukien sementintuotannon aiheuttama pieni lisä (Marland ym. 2003).

maapallolle tulevan auringonsäteilyn, ja sitä tasapainottavan ulos suuntautuvan lämpösäteilyn määrää. Ilmakehän kohoavan hiilidioksidipitoisuuden suora vaikutus pinnanläheiseen lämpötilaan on melko rajallinen. Näennäisesti pienehköt muutokset voivat kuitenkin kertautua ilmastosysteemin eri osissa. Menneiden luonnollisten ilmastovaihteluiden, nykyaikaisten ilmastosysteemihavaintojen ja ilmastomallien valossa nämä ns. palautevaikutukset tehostavat huomattavasti lämpenemistä. Hiilidioksidin lisäksi myös muiden kasvihuonekaasupäästöjen (metaani, typpioksiduuli, erinäiset teolliset kaasut, samoin kuin rikkidioksidi- ja jopa nokipäästöt) merkitys on myös huomattava. Rikkipäästöillä on todennäköisesti viilentävä vaikutus, koska se lisää saapuvan auringonsäteilyn heijastumista takaisin avaruuteen. Vesihöyryn, joka on tehokas kasvihuonekaasu, määrä ilmakehässä määräytyy veden luonnollisen kiertokulun mukaan. Osa edellä mainituista palautevaikutuksista kuitenkin liittyy juuri vesihöyryyn. Lämpenevä ilmakehä pystyy sisältämään enemmän vesihöyryä, mikä voimistaa alkuperäistä lämpenemistä.

Ihmistoiminta on jo muuttanut ilmastoa

Historian kuluessa ilmastossa on esiintynyt paljon vaihtelua ja muutoksia. Ennen ihmisen vaikutusta ilmastonvaihtelut johtuivat luonnollisista tekijöistä. Pitkien ajanjaksojen saatossa ilmastoon vaikuttavat mannerlaattojen liikkeet, maapallon kiertoradan pienet heilahtelut, voimakkaat tulivuorenpurkaukset ja vaihtelu auringon omassa toiminnassa. Luonnolliset tekijät eivät kuitenkaan riitä selittämään viimeisten vuosikymmenten aikana tapahtunutta maailmanlaajuista lämpenemistä (kuva 2). Mittausten mukaan maapallon pinnanläheinen keskilämpötila on noussut viimeisten 100 vuoden aikana noin 0,6 astetta (Folland ym. 2001). Ilmaston näkökulmasta 100 vuotta on lyhyt jakso, jonka aikana luonnollisia ilmastoon vaikuttavia tekijöitä ovat lähinnä tulivuoritoiminta ja muutokset auringon säteilyssä. Tutkimustulosten valossa nämä selittänevätkin suurelta osin mitatut vaihtelut 1900-luvun puoliväliin asti. Mainittujen luonnollisten tekijöiden vaikutuksesta viime vuosisadan toisella puoliskolla ilmaston olisi kuitenkin lämpenemisen asemasta pitänyt viilentyä. Jatkuva lämpeneminen voidaan selittää ainoastaan ottamalla huomioon myös ihmisen toiminnan vaikutus ilmastoon päästöjen ja maankäytön muutosten muodossa (Mitchell ym. 2001). Mainitsemisen arvoista on, että ainakin menneen vuosisadan ja todennäköisesti myös viimeisten 2000 vuoden aikana (Moberg ym. 2005), maapallon kymmenen kaikkein lämpimintä vuotta ovat osuneet viimeisten 15 vuoden jaksolle. Lämpimimmät viisi vuotta ovat toistaiseksi olleet 1998, 2002 ja 2003, 2004 ja 2001. Pienet vuosittaiset vaihtelut kuuluvat ilmastosysteemin sisäiseen vaihteluun, ja voi-



Kuva 2. Maapallon keskimääräisen pintalämpötilan kehitys ajanjaksolla 1880-2004. Arvot ilmaisevat vuosittaisten arvojen eroa jakson 1961-90 keskilämpötilasta, jota käytännön syistä käytetään usein vertailujaksona ilmastotutkimuksessa (Jones ym. 1999, Jones ja Moberg 2003).

vat aiheutua esimerkiksi muutoksista ilmakehän ja valtamerien pintakerrosten vuorovaikutuksessa.

Ilmaston muuttumisella on muitakin seurauksia kuin pinnanläheisen keskilämpötilan kohoaminen. Pohjoisilla napa-alueilla merijääolosuhteet ovat selvästi lieventyneet, lähinnä kesäkautena. Pohjoisella pallonpuoliskolla on todettu myös lumi-ilmaston lauhtuneen etenkin kevätkautena. Erityisesti napa-alueiden ulkopuolella sijaitsevat vuoristojäätiköt ovat kutistumassa. Merien lämpösisältö on kasvanut. Mielenkiintoinen havainto on myös ilmakehän ylempien kerrosten jäähtyminen, mikä tukee teoriaa kasvihuoneilmiön voimistumisesta. Kasvihuonekaasujen määrähän ei lisää maapallon vastaanottamaa auringonsäteilyn määrää (paitsi mahdollisesti jo edellä mainittujen palautevaikutusten takia epäsuorasti, esimerkiksi pilviolosuhteiden muutosten muodossa). Kyse on näin ollen säteilykuljetuksen muutoksista ilmakehässä: ilmakehän alaosa lämpenee samalla kun sen yläosa jäähtyy.

Pinnanläheinen lämpeneminen etenkin viimeisten vuosikymmenien aikana on globaali ilmiö. Globaali lämpeneminen ei kuitenkaan ole alueellisesti aivan tasaisesti jakautunut. Tämä johtuu ilmastosysteemin ominaisuuksista, ja mahdollisesti myös ilmakehän ja valtamerien kiertoliikkeisiin vaikuttavista palautevaikutteista. Mantereet ovat lämmenneet merialueita nopeammin. Lämpeneminen on ollut voimakkainta talvisin. Maa-alueilla yölämpötilat ovat lisäksi kohonneet enemmän kuin päivälämpötilat.

Globaalisti myös sateisuus on saatavissa olevien mittatietojen mukaan lisääntynyt jonkun verran, etenkin pohjoisen pallonpuoliskon keskileveysasteilla. Subtrooppisilla alueilla sateisuus on ilmeisesti vähentynyt hieman. Merenpinnan tasokin nousee, mikä ainakin osittain selittyy merien pintakerrosten lämpölaajenemisen ja vuoristojäätiköiden sulamisella.

Ilmastonmuutoksen pysäyttäminen on hidas prosessi - hillitseminen syytä aloittaa heti

Lähivuosikymmenien aikana odotettavissa on jatkuva ilmaston lämpeneminen. Ilmastosysteemin hitaudesta johtuen tietty lisälämpeneminen olisi odotettavissa jopa siinä epätodennäköisessä tapauksessa, että päästöt pystyttäisiin pysäyttämään kertaheitolla. Fossiilisia polttoaineita ei kuitenkaan voida aivan helposti korvata maailman energialähteenä. Globaalisti noin 80 % lämmitykseen, jäähdyttämiseen, liikenteeseen sekä kotitalouksien ja teollisuuden ylläpitämiseen tarvittavasta energiasta tuotetaan fossiilisia polttoaineita käyttämällä. Saatavilla olevat öljy- ja maakaasumäärät arvioidaan rajoitetuiksi, mutta koska kivihiiltä riittää vielä pitkään, fossiilisten polttoaineiden saatavuus ei välttämättä aseta merkittävämpiä rajoituksia päästöjen määrälle lähivuosikymmenien aikana. Kuinka suuriksi päästöt vielä kehittyvät riippuu monista tekijöistä, kuten väestönkasvu, talouskasvu sekä tehokkaamman ja puhtaamman teknologian kehittyminen. Lienee helppoa ymmärtää, että esimerkiksi myös arvokäsitteiden muutokset ja yhteiskuntarakentaminen vaikuttavat tarvittavan energian määrään. Kaikkiin näihin kehityslinjoihin voidaan vaikuttaa kansainvälisin sopimuksin, mikä tietysti edellyttää kansallista osallistumista ja siten jokaisen yksilön myötävaikutusta.

Päästöjen tulevaa kehitystä tutkitaan skenaarioiden avulla (skenaario = johdonmukainen kuvaus tapahtumasarjasta, jonka toteutuminen on tulevaisuudessa mahdollinen). Edellä mainitut kehityslinjat huomioon ottaen on selvää, että päästöjen rajoittaminen ja vähentäminen ei ole yksinkertaista. Aiemmat päästöt, yhteiskunnan nykytila ja kehitystrendit hidastavat mahdollisten toimenpiteiden tehokkuutta. Ilmastomuutokseen ei juurikaan voitane vaikuttaa seuraavien 30-50 vuoden aikana. On kuitenkin tärkeää alkaa rajoittaa ja pienentää päästöjä jo nyt, jotta ilmastomuutosta voidaan ratkaisevasti hidastaa kuluvan vuosisadan aikana. Tämä onkin kansainvälisen ilmas-

toa koskevan yhteistyön päätavoite, jota etenkin EU ajaa voimallisesti. Helmikuussa vuonna 2005 viimein voimaan astunut Kioto-protokolla sisältää ensimmäiset kansainvälisesti sovitut ja sitovat päästörajoitukset. Sovitut rajoitukset eivät sellaisenaan ratkaise ongelmia mutta ne merkitsevät alkua ratkaisuihin johtaville toimenpiteille. Sama voidaan todeta hiilinielujen lisäämisestä, eli mahdollisuudesta sitoa ilmakehään jo päästettyä hiilidioksidia esimerkiksi metsiin. Biologisilla hiilinieluilla ei ongelmaa ratkaista mutta niillä on varmasti merkitystä osana suurempaa ratkaisujen joukkoa.

Vuoteen 2050 mennessä globaalin keskilämpötilan on arvioitu nousevan vajaasta asteesta jopa 2,5 asteeseen. Vuoteen 2100 mennessä lämpötilan nousun on arvioitu vaihtelevan vajaasta 1,5 asteesta lähes 6 asteeseen (Cubash ym. 2001). Näin ollen muutos olisi 2-10-kertainen 1900-luvulla havaittuun maapallon keskimääräiseen lämpenemiseen verrattuna. Ilmasto muuttunee siis sekä enemmän että nopeammin seuraavien vuosikymmenien aikana verrattuna viimeiseen sataan vuoteen ja luonnollisten ilmastovaihteluiden aiheuttamaan vaihteluun useiden vuosituhansien aikana.

Erilaisten lämpötilojen muutoslaskelmien erot saattavat vaikuttaa suurilta. Osittain ne johtuvat tiedon puutteesta: edelleenkään ei tiedetä miten ilmasto tarkalleen muuttuu päästöjen seurauksena. Toisaalta ne johtuvat epävarmuudesta päästöjen kehittymisen suhteen. Epävarmuudetkin huomioon ottaen maapallon keskilämpötilan lasketaan joka tapauksessa nousevan huomattavasti kuluvan vuosisadan aikana. Ilmastonmuutos ei koske vain lämpötilaa vaan kyse on myös sademäärästä, maankosteudesta, tuuliolosuhteista, merenpinnan tasosta, jäätiköistä ja myös muutoksien maantieteellisestä jakautumisesta ja vuodenaikaisjakaumasta. Ilmaston lasketaan lämpenevän huomattavasti enemmän monilla manneralueilla, ja etenkin pohjoisilla napa-alueilla ja niiden läheisyydessä, verrattuna maapallon vuosikeskilämpötilan nousuun.

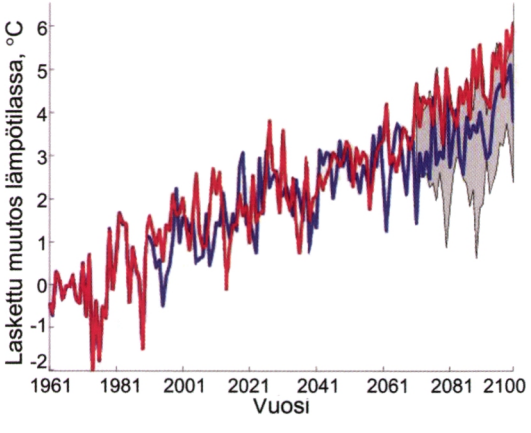
Epävarmuustekijät lisäävät ilmastomuutoksen ongelmallisuutta

Ilmaston muuttuminen vaikuttaa sekä ympäristön tilaan että useimpien yhteiskuntasektorien toimintaan, kuten rakentaminen, vesivoiman tuotanto, metsätalous, maatalous, maa- ja meriliikenne. Ilmaston keskimääräinen muutos on tärkeä, samoin kuin eri ääri-ilmiöiden muuttuminen. Yleinen lämpeneminen lieventänee pahimpia pakkaspiikkejä, mutta toisaalta nostattaa elohopeaa entistä korkeammalle myös hellepäivinä. Sateiden lasketaan yleisesti voimistuvan. Tuuli- ja myrskyolosuhteiden mahdollisista muutoksista tiedetään vielä vähän. Rajumyrskyjen voima voi lisääntyä jonkun verran. Myrskyratojen paikat ja pituudet voivat myös muuttua ilmaston muuttuessa. Pohjolassa ilmastonmuutoksen mahdolliset vaikutukset koskettavat etenkin yhteiskunnan infrastruktuuria (esim. satamat ja muu rantarakentaminen, rakentaminen yleensä, tie- ja rataverkosto, padot), luonnon monimuotoisuutta, sekä maa- ja metsätaloutta.

Ilmaston lämpenemisellä on monia vaikutuksia metsä- ja maatalouteen Pohjolassa (KSLA 2004, SILMU 1996). Lämpeneminen pidentää tietysti kasvukautta, mikä johtanee lisääntyvään kasvuun valo-olosuhteiden niin salliessa. Ilmakehän korkeampi hiilidioksidipitoisuus merkinnee myös parempia kasvuolosuhteita. Aikaistunut kasvukausi saattaa kuitenkin merkitä myös keväthallan merkityksen kasvamista. Lämpeneminen, samoin kuin kosteusolosuhteiden muutokset, saattavat altistaa kasveja erilaisille eläinten, hyönteisten ja taudinaiheuttajien aiheuttamille tuhoille. Lämpötilan ja sademäärän muutokset vaikuttavat myös routaan ja lumipeitteeseen. Suomen eri osissa muutokset voivat seuraavien vuosikymmenien aikana muodostua hyvinkin erilaisiksi. Lumipeite saattaa paikoitellen kasvaa jos sademäärä lisääntyy enemmän suhteessa lämpötilaan. Toisaalta, siellä missä lumipeite ohenee, routa saattaa lisääntyä, vaikka ilmasto olisikin jo alkanut lämmetä. Siellä missä routa hellittää, saattavat myrskytuhot

lisääntyä riippumatta siitä miten tuulet ja myrskyt muuttuvat, koska routa parantaa talvisaikaan juurten ankkuroitumista maahan. Metsän luonteen muuttuminen, esimerkiksi ilmastonmuutoksen ja taloudellisten tai muiden metsänhoidollisten syiden ajamana, vaikuttaa metsien ilmastoherkkyyteen. Mahdolliset ilmastonmuutoksen vaikutukset metsiin ja metsätalouteen nivoutuvat siten alan muihin kehitystekijöihin.

Yhteenvetona voitaneen todeta, että ilmastonmuutoksen mahdollisista vaikutuksista metsiin on saatavilla enemmän laadullista kuin määrällistä tietoa. Myös eri tekijöiden yhteyksistä ja yhteisvaikutuksista tiedetään vain vähän (KSLA 2004, Rummukainen ym. 2005). Tiedon merkitys päätöksenteon tueksi on kasvanut. Nykytiedon pohjalta voidaan varmasti ainakin sanoa, että ilmasto-olosuhteet tulevat jatkuvasti muuttumaan seuraavien vuosikymmenten aikana. Kuva 3 näyttää miten esimerkiksi Ruotsin alueella vuosikeskilämpötila voidaan laskea kehittyvän globaalien ilmastomuutoslaskelmien valossa. Taustalla olevan jatkuvan muutoksen lisäksi lämpötila vaihtelee vuodesta toiseen luonnollisista syistä. Vaihteluväli ja ääriarvot tietysti muuttuvat keskimääräisen muutoksen myötä uusille tasoille. Kuvan esimerkeissä alueellinen lämpeneminen ylittää 1900-luvun aikana vallinneen vuosikeskilämpötilan vaihteluvälin jo jaksolla 2020-30. Tällöin siis "normaalivuosi" on yhtä lämmin kuin lämpimin vuosi viimeisten sadan vuoden aikana ja "poikkeuksellisen lämmin" vuosi on huomattavasti aiemman vaihteluvälin yläpuolella.



Kuva 3. Kaksi SMHI:n Rossby-keskuksessa laskettua alueellista lämpötilamuutosarviota, jotka perustuvat kahteen eri arvioon globaalien päästöjen muutoksista vuoteen 2100 asti ja suhteellisen keskimääräiseen arvioon ilmastosysteemin herkkyydestä (vrt. teksti). Lasketut muutokset näytetään suhteessa jakson 1961-90 keskilämpötilaan, joka on kuvassa normitettu nollaksi.

Ilmasto siis todennäköisesti lämpenee selvästi seuraavien vuosikymmenien aikana. Lämpenemisen aiheuttamat muutokset voivat olla yllättäviä ja jopa dramaattisia, jos ilmastosysteemi reagoi päästöihin odottamattomilla tavoilla. Epävarmuus ilmastonmuutoksen kehittymisestä tulevaisuudessa vaikeuttaa odotettujen vaikutuksien arviointia ja päätöksentekoa. Alueellisesti ilmastonmuutoksella voi olla myönteisiäkin vaikutuksia mutta koko maapallon kannalta odotettujen vaikutusten summa on selvästi kielteinen.

Kirjallisuus

Cubash, U., Meehl, G.A., Boer, G.J., Stouffer, R.J., Dix, M., Noda, A., Senior, C.A., Raper, S. & Yap, K.S. 2001. Projections of Future Climate Change. Julkaisussa: Houghton J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K.Johnson, C.A. (toim.) IPCC 2001. Climate Change 2001. The Scientific basis: Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge. 881 s. (kts. myös http://www.ipcc.ch).

Folland, C.K., Karl, T.R., Christy, J.R., Clarke, R.A., Gruza, G.V., Jouzel, J., Mann, M.E., Oerlemans, J., Salinger, M.J. & Wang, S.-W. 2001. Observed climate variability and change. Julkaisussa: Houghton J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C.A. (toim.) IPCC 2001. Climate Change 2001. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge. 881 s. (Kts. myös http://www.ipcc.ch).

Jones, P.D., New, M., Parker, D.E., Martin, S. & Rigor, I.G. 1999. Surface air temperature and its changes

over the past 150 years. Reviews of Geophysics 37: 173-199. (Kts. myös http://www.cru.uea.ac.uk/).

Jones, P.D. & Moberg, A. 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. Journal of Climate 16: 206-223.

KSLA, 2004: Sonesson, J. (toim.) Climate Change and forestry in Sweden – a literature review. KSLA Tidskrift, årg. 143, nr 18. (Kts. http://www.ksla.se).

Kuusisto, E. & Käyhkö, J. 2004. Globaalimuutos - Suomen Akatemian FIGARE-ohjelma. Kustannusosakeyhtiö Otava. 176 s.

Marland, G., Boden, T.A. & Andres, R.J. 2003. Global, Regional, and National CO_2 Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee.

Mitchell, J.F.B., Karoly, D.J., Hegerl, G.C., Zwiers, F. W., Allen, M.R. & Marengo, J. 2001. Detection of Climate Change and Attribution of causes. Julkaisussa: Houghton J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C.A. (toim.) IPCC 2001. Climate Change 2001. The Scientific basis: Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge. 881 s (kts. myös http://www.ipcc.ch).

Moberg, A. Sonechkin, D.M., Holmgren, K., Datsenko, N.M. & Karlén, W. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high resolution proxy data. Nature 433: 613-617.

Rummukainen, M., Bergström, S., Persson, G. och Ressner, E. 2005. Anpassning till klimatförändringar. Kartläggning av arbete med sårbarhetsanalyser, anpassningsbehov och anpassningsåtgärder i Sverige till framtida klimatförändring. SMHI Reports Meteorology and Climatology No. 106. Norrköping. 44 s.

SILMU, 1996: Julkaisussa: Kuusisto, E., Kauppi, L. & Heikinheimo, P. (toim.) Ilmastonmuutos ja Suomi. Yliopistopaino. Helsinki. 265 s.

Ilmastonmuutosskenaarioita Suomelle

Kirsti Jylhä, Kimmo Ruosteenoja ja Heikki Tuomenvirta

Johdanto

Ilmastomallikokeiden tuloksia analysoimalla on laadittu skenaarioita siitä, miten Suomen ilmasto muuttuu tämän vuosisadan aikana. Odotettavissa on lämpenevää ja sateisempaa. Sääolot vaihtelevat vuodesta toiseen tulevaisuudessakin, mutta kylmät talvet harvinaistuvat ja leudot yleistyvät. Vuosisadan lopulla kevään viimeinen pakkaspäivä koittaa malliarvioiden mukaan keskimäärin 15-30 vrk aiemmin kuin nykyään ja suunnilleen saman verran myöhemmäksi siirtyvät syksyn ensimmäiset pakkaset. Talvisin sateet lisääntyvät, voimistuvat ja tulevat entistä useammin vetenä. Keskimääräinen lumensyvyys jää alle puoleen nykyisestä. Vaikka kesän kokonaissademäärä ei juurikaan muutu, rankkasateet näyttäisivät voimistuvan. Skenaariot kuvaavat keskimääräisten ilmastoolojen lisäksi myös sään vaihteluita, ja ne perustuvat aiempaa suurempaan määrään erilaisia mallikokeita. Siten ilmastonmuutoksiin liittyviä epävarmuustekijöitä saadaan otettua huomioon entistä monipuolisemmin arvioitaessa muutosten vaikutuksia ja niihin varautumiskeinoja.

FIGARE-tutkimusohjelmaan (Kuusisto ja Käyhkö 2004) kuuluneessa FINSKEN-hankkeessa (Carter ym. 2004) laadittiin vaihtoehtoisia tulevaisuudennäkymiä eli skenaarioita sille, miten maamme keskilämpötila ja keskimääräinen sademäärä muuttuvat seuraavan sadan vuoden aikana kasvihuoneilmiön voimistuessa (Jylhä ym. 2004). Eurooppalaisen PRUDENCE-hankkeen (Christensen ym. 2005) tuoreeseen satoon kuuluvat puolestaan mm. ilmaston ääri-ilmiöitä koskevat arviot. Seuraavassa kerromme skenaarioiden laadinnasta ja esitämme arvioita Suomen sateista, lämpötiloista ja lumipeitteestä tulevaisuudessa.

Kasvihuoneilmiö voimistuu

Ihmiskunnan toimet ovat jo muuttaneet ilmakehän koostumusta, ja tulevaisuudessa odotettavissa on yhä suurempia muutoksia. Hiilidioksidia on nykyisin noin 1,3-kertainen, ja metaania yli kaksinkertainen määrä ennen teollista vallankumousta vallinneeseen tasoon verrattuna. Lisäys on pääosin peräisin fossiilisten polttoaineiden käytöstä viime vuosikymmeninä. Myös maakäytön muutokset, kuten metsien hakkuut, ovat kohottaneet pitoisuuksia.

Hiilidioksidin, metaanin ja muiden kasvihuonekaasujen lisääntyminen voimistaa kasvihuoneilmiötä eli ilmakehän kykyä vähentää maapinnan säteilemän lämmön karkaamista avaruuteen. Kun entistä enemmän energiaa kertyy ilmastojärjestelmään, ilmasto vääjäämättä muuttuu. Hiilidioksidipäästöt vaikuttavat ilmakehässä vuosikymmeniä, jopa vuosisatoja. Metaanipäästöjen poistumaaika on runsaat kymmenen vuotta. Pitoisuuksien muutokset ovat maapallon kannalta häiriöitä (säteilypakotteita), joihin ilmasto reagoi. Ilmaston lämmetessä kasvaa myös ilmakehän tärkeimmän luontaisen kasvihuonekaasun eli vesihöyryn pitoisuus. Tämä voimistaa kasvihuoneilmiötä entisestään.

Fossiilisia polttoaineita käytettäessä ilmakehään joutuu myös rikki- ja typpiyhdisteitä, jotka ilma-

kehässä muuntuvat leijuviksi pienhiukkasiksi. Ne jäähdyttävät ilmastoa, mutta kuinka paljon - sitä on hyvin vaikea arvioida. On arveltu, että pienhiukkasten takia ilmasto on tähän mennessä lämmennyt hitaammin kuin pelkkä kasvihuonekaasujen lisääntyminen edellyttäisi. Toisin kuin kasvihuonekaasut, hiukkaset poistuvat ilmakehästä keskimäärin jo muutamassa viikossa. Niinpä niiden pitoisuudet ovat suurimmillaan lähellä päästölähteitä.

Lähtökohtana globaalit sosio-ekonomiset ja teknologiset skenaariot

Ilmastonmuutosskenaariot perustuvat arvioihin tulevista kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten pitoisuuksista ilmakehässä. Näiden pohjana ovat Hallitustenvälisen ilmastopaneelin (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) esittämät vaihtoehtoiset arviot taloudellisesta, teknologisesta ja yhteiskunnallisesta kehityksestä maapallolla tämän vuosisadan aikana (infotaulu 1). Riippuen siitä, oletetaanko tulevaisuudessa painotettavan taloudellista kasvua vai ympäristön hyvinvointia ja toisaalta globalisaatiota vai alueellista eriytymistä, päädytään erilaisiin arvioihin mm. talouden, energiantuotantoteknologian, maankäytön ja väkiluvun kehityksestä. Ilmastonmuutosten kannalta keskeiset kasvihuonekaasu- ja hiukkaspäästöt riippuvat näistä tekijöistä. Päästöistä voidaan aineen kiertoa kuvaavien mallien avulla edelleen laskea ilmakehän koostimuksen muutoksia. Vuonna 2004 ilmakehän hiilidioksidipitoisuus oli noin 375 ppm. Kaikissa IPCC:n SRES-skenaarioissa hiilidioksidipitoisuus kasvaa lähivuosikymmeninä lähes samaa tahtia, mutta vuosisadan loppupuolella skenaarioissa on selviä eroja. Vuonna 2100 pitoisuus vaihtelee 540 ppm:stä (B1) 960 ppm:ään (A1F1) IPCC:n (2001) arvion mukaan.

Työkaluina ilmastomallit

Muuttuvien kasvihuonekaasu- ja hiukkaspitoisuuksien vaikutusta tulevaisuuden ilmastoon tutkitaan ilmastomallien avulla. Niillä kuvataan ilmakehän, merten ja vesistöjen, lumen ja jään, kasvillisuuden sekä maaperän käyttäytymistä ja niiden vuorovaikutuksia. Mallit perustuvat fysiikan yhtälöihin, jotka on kirjoitettu tietokoneille soveltuvaan muotoon. Yhtälöt ratkaistaan kolmiulotteisessa hilapisteikössä aika-askel aika-askeleelta siten, että uusien laskujen pohjana ovat edellisen aika-askeleen tulokset. Mallien syöttötietoina käytetään jonkin päästöskenaarion mukaisia arvioita tulevista pitoisuuksista. Ilmakehän virtaukset lasketaan tyypillisesti 10-20 eri korkeudella, ja samoin lasketaan eri syvyyksillä valtamerten virtaukset. Vaakatasossa laskentapisteitä on maapallonlaajuisissa ilmakehämalleissa noin 300 kilometrin välein. Rajoitetun alueen malleissa hilapisteitä on tiheämmässä, tällä hetkellä tyypillisesti noin 50 kilometrin välein.

Paremman paikallisen erotuskykynsä ansiosta alueelliset ilmastomallit pystyvät kuvaamaan esi-

Infotaulu 1. Ilmatieteen laitoksessa viime vuosina laadittujen ilmastonmuutosskenaarioiden lähtökohtana ovat seuraavat neljä ilmakehän kasvihuone- ja hiukkaspitoisuuden skenaarioita (IPCC, 2001):

A1FI: Hyvin runsaat päästöt kulutusta suosivassa nopean talouskasvun yhdentyvässä maailmassa, jossa energiantuotanto perustuu pääasiassa fossiilisiin energialähteisiin.
A2: Melko runsaat päästöt kulutusta suosivassa maailmassa, jossa väestönkasvu ja alueelliset tuloerot säilyvät suurina.
B2: Hitaasti lisääntyvät päästöt kestävään kehitykseen tähtäävässä maailmassa, jossa paikalliset ratkaisut ohjaavat kehitystä ja alueelliset erot säilyvät suurina.
B1: Aluksi lisääntyvät, mutta vuosisadan puolivälin vaiheilla laskuun kääntyvät päästöt palveluja tietokeskeisessä, yhdentyvässä maailmassa, jossa tähdätään kestävään kehitykseen sekä tulo- ja kehityserojen tasoittumiseen.

merkiksi maanpinnan korkeuserojen sekä maan ja merien jakauman vaikutuksia ilmastoon paremmin kuin maapallonlaajuiset mallit. Ne ovat tarkempia myös sääilmiöiden yksityiskohtien simuloinnissa. Hienohilaiset alueelliset ilmastomallit ovat kuitenkin riippuvaisia maapallonlaajuisista malleista, sillä ne tarvitsevat niiden tuottamia kenttiä laskenta-alueensa reunoilla. Niinpä alueellisten ilmastomallien tehtävänä voidaan pitää globaalien mallien tulosten alueellista tarkentamista tiheämmän laskentapisteikön avulla.

FINSKEN-ilmastoskenaariot Suomelle perustuivat maapallonlaajuisiin mallikokeisiin, kun taas PRUDENCE-hankkeessa käytettiin Euroopan ja osan Atlantia kattavia alueellisia malleja. Analysoimamme malliajot on lueteltu taulukossa 1. Molemmilla mallityypillä, joskaan ei jokaisella alueellisella mallilla, tehtiin A2-skenaarion lisäksi B2-skenaarioon perustuvia ilmastokokeita. Toisaalta käytettävissä oli vain muutamia simulaatioita, jotka perustuivat IPCC:n suurimpaan (A1FI) tai pienimpään (B1) päästöskenaarioon. Näitä vastaavat ilmastonmuutosskenaariot jouduttiin johtamaan olemassa olevista simulaatioista käyttämällä taulukon 1 malleja yksinkertaisempaa ilmastomallia.

Koska paraskin malli on vain vajavainen kuvaus luonnosta, ilmastomallit eivät pysty täysin todenmukaisesti kuvaamaan kaikkia nykyilmaston havaittuja piirteitä. Tämän takia ilmastoskenaariot esitetäänkin yleensä tulevaa ja nykyistä ilmastoa kuvaavien mallitulosten erotuksina, jotka lisätään havaittuihin arvoihin. Jotta skenaarioita voidaan soveltaa ilmastonmuutoksen vaikutus- ja

Taulukko 1. a) FINSKEN-hankkeessa käytetyt maapallonlaajuiset ilmastomallit. Vaakasuntainen erotuskyky (itä-länsi x pohjois-etelä) on laskettu leveyspiirillä 65 °N (Jylhä ym. 2004). b) PRUDENCE-hankkeessa käytettyjä alueellisia ilmastomalleja sekä laskenta-alueen reunoilla kussakin kokeessa käytetty koko maapallon kattava malli. Malleilla tehdyt SRES-päästöskenaarioiden mukaiset simulaatiot on lueteltu 4. sarakkeessa (suluissa skaalatut, likiarvoiset tulokset).

a) Globaali yleisen kiertoliikkeen ilmakehä-valtamerimalli

Lyhenne	Alkuperämaa	Erotuskyky (km)	SRES-päästöskenaariot
HadCM3	Iso-Britannia	180 × 280	A1FI, A2, B2, B1
ECHAM4/OPYC3	Saksa	130 × 310	(A1FI), A2, B2, (B1)
CSIRO-MK2	Australia	260 × 350	(A1FI), A2, B2, B1
NCAR-PCM	USA	130 × 310	(A1FI), A2, B2, (B1)
CGCM2	Kanada	180 × 410	A2, B2
GFDL-R30	USA	170 × 250	A2, B2

b) Hienohilainen alueellinen malli

Lyhenne	Alkuperämaa	Erotuskyky (km)	SRES-päästö-skenaariot	Reunaehdot antava globaali ilmastomalli
HIRHAM	Tanska	50 × 50	A2	HadAM3H
			A2, B2	ECHAM4/OPYC3
HadRM3P	Iso-Britannia	50 × 50	A2, B2	HadAM3P
HadRM3H	Iso-Britannia	50 × 50	A2	HadAM3H
CHRM	Sveitsi	55 × 55	A2	HadAM3H
CLM	Saksa	56 × 56	A2	HadAM3H
REMO	Saksa	55 × 55	A2	HadAM3H
RCAO	Ruotsi	50 × 50	A2, B2	HadAM3H
			A2, B2	ECHAM4/OPYC3
RACMO2	Alankomaat	50 × 50	A2	HadAM3H

sopeutumistutkimuksissa, tarvitaan siten tavallisesti myös havaintotietoa tällä hetkellä vallitsevasta ilmastosta keskimääräisine arvoineen ja vaihteluineen.

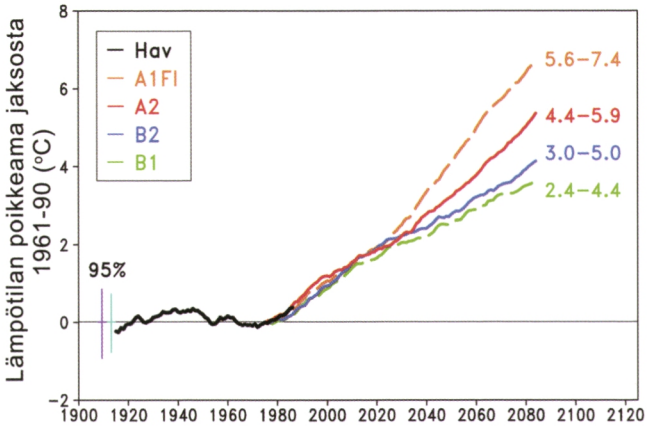
Keskimäärin lämpimämpää ja vähemmän pakkaspäiviä

Lämpenemisen alueellisen jakauman arvioiminen on epävarmempaa kuin koko maapallon keskilämpötilan ennustaminen. Pohjois-Euroopan lämpötilojen muutoksia on erityisen hankala ennustaa, koska niihin vaikuttavien Pohjois-Atlantin merivirtojen käyttäytyminen ilmaston lämmetessä on runsaasti lisätutkimusta vaativa kysymys. Tässä kappaleessa tarkastelluissa maapallon kattavissa malleissa ilmastonmuutos heikentää Pohjois-Atlantin kiertoliikettä jonkin verran, mutta se ei estä lämpötilan kohoamista ympäröivillä maa-alueilla.

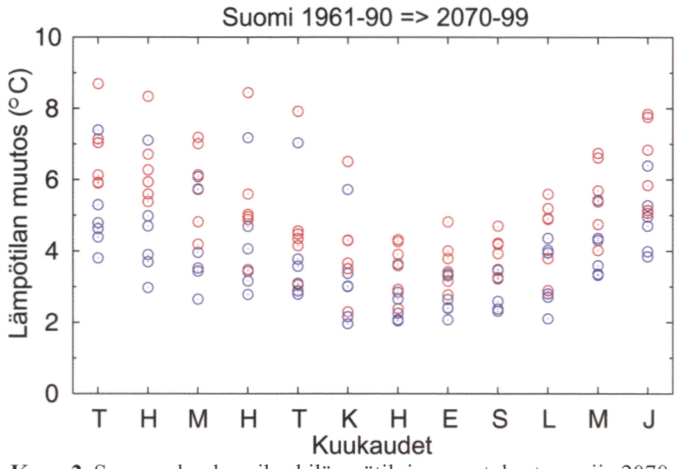
Globaalien mallien keskiarvona laaditun arvion mukaan Suomen keskilämpötila kohoaa tämän vuosisadan aikana 0,3–0,6 °C vuosikymmenessä (kuva 1). Koko 1900-luvun aikana havaittu lämpeneminen oli vain noin 0,7 astetta, mihin verrattuna ennakoitu muutos on 4-10 kertaa nopeampi. Eniten lämpötila kohoaa suurimpien kasvihuonekaasupäästöjen skenaariossa A1FI. Haarukan alarajaan päädytään B1-skenaariossa, jossa päästöt alkavat vuosisadan puolivälissä vähetä.

Ilmakehään jo päässeiden ja siellä pitkään viipyvien kasvihuonekaasujen takia eri päästöskenaarioita vastaavat kaasujen pitoisuudet ilmakehässä alkavat poiketa selvästi toisistaan vasta muutaman vuosikymmenen päästä. Lisäksi lämpötilan nousu seuraa pitoisuuksien lisääntymistä viiveellä, sillä valtameriin sitoutuva lämpö jarruttaa ilmaston muuttumista. Niinpä lämpötilan nousu ei vielä lähivuosikymmeninä näytä juuri riippuvan päästöjen kehityksestä (kuva 1). Sitäkin enemmän päästöjen rajoittaminen vaikuttaa siihen, millaisessa ilmastossa maamme metsät kasvavat muutaman ihmissukupolven kuluttua.

Eri tutkimuskeskusten mallit eivät ole samanlaisia, joten esimerkiksi Suomen alueella niiden tulokset eroavat jonkin verran toisistaan. Kuvan 1 oikeasta laidasta nähdään, minkä verran kuhunkin päästöskenaarioon liittyvä lämpeneminen



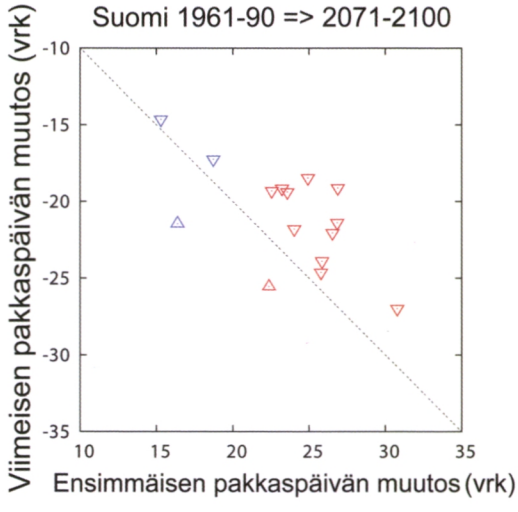
Kuva 1. Suomen keskilämpötilan muutos poikkeamana jakson 1961–1990 keskiarvosta. Käyrät esittävät 30 vuoden liukuvia keskiarvoja: musta käyrä havaittuja muutoksia ja värilliset käyrät päästöskenaarioihin A1FI, A2, B2 ja B1 perustuvia arvioita neljän ilmastomallin (HadCM3, ECHAM4/OPYC3, NCAR-PCM, CSIRO-Mk2) keskiarvona. Ilmaston luontaista vaihtelua 30-vuotisjaksosta toiseen kuvaavat pystypalkit (lila ja sininen), jotka osoittavat 95 % -vaihteluvälin kahdessa eri mallikokeessa. Ilmastomallien eroista aiheutuva epävarmuushaarukka kullekin päästöskenaariolle 2080-luvulla on annettu numeroarvoina kuvan oikeassa laidassa. (Kuva perustuu Jylhän ym. (2004) artikkeliin.)



Kuva 2. Suomen kuukausikeskilämpötilojen muutokset vuosiin 2070-2099 mennessä verrattuna jakson 1961–1990 keskiarvoihin kuuden maapallonlaajuisen ilmastomallin (taulukko 1) perusteella. Punaiset (siniset) ympyrät esittävät SRES-päästöskenaarioon A2 (B2) perustuvia tuloksia.

2080-luvulle mennessä poikkeaa eri mallien kesken. Esimerkiksi A2-skenaariossa mallien eroista aiheutuva lämpenemisen epävarmuushaarukka on 4,4–5,9 astetta. Eri skenaarioihin liittyvät epävarmuushaarukat ovat osittain päällekkäisiä vielä vuosisadan loppupuolellakin. Toisaalta kaikki mallit ja päästöskenaariot tuottavat luontaiseen vaihteluun verrattuna tilastollisesti merkitsevää lämpenemistä jo 30-vuotisjaksolle 2010-2039.

Kuvassa 2 on nähtävissä yksittäisten globaalien A2- ja B2-malliajojen antamia keskilämpötilan muutoksia eri kuukausina vuosisadan lopulla verrattuna vuosiin 1961-1990. Vuoden talvipuolisko lämpenee enemmän kuin kesäpuoli. Mallien väliset erot ovat suurimpia keväällä. Talvien lämpeneminen tietää myös pakkaspäivien (minimilämpötila < 0 °C) harvenemista sekä joulu-helmikuisten nollakelien lisääntymistä (Jylhä ym. 2005). Malliarvioiden mukaan ilman lämpötila käy syksyllä ensimmäisen kerran nolla-asteen alapuolella keskimäärin 15-30 vrk myöhemmin kuin nykyään, vastaavasti aikaistuu viimeinen pakkanen keväällä (kuva 3). Huomattakoon, että kuva 3 perustuu alueellisten ilmastomallikokeiden tuloksiin ja että näissä kokeissa tarvitut reunaehdot laskenta-alueen reunoilla oli otettu vain kahdesta maapallonlaajuisesta mallista (taulukko 1). Niinpä kuvan 3 voi olettaa ainakin jonkin verran aliar-

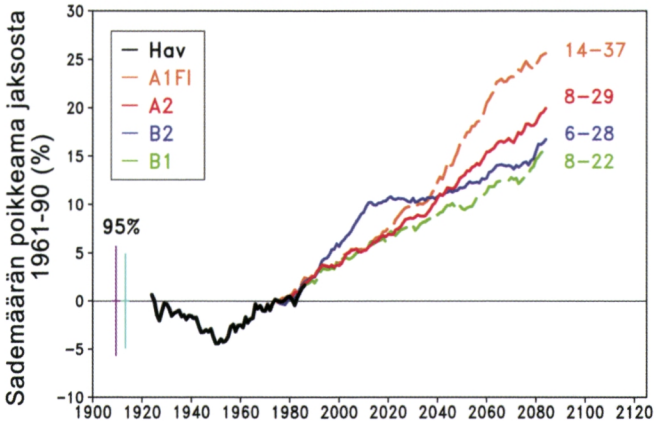


Kuva 3. Syksyn ensimmäisen ja kevään viimeisen pakkasen keskimääräisen ajankohdan muutos Suomessa vuosina 2071–2100 verrattuna jaksoon 1961–1990, alueellisten ilmastomalliajojen (taulukko 1) perusteella. Punaiset (siniset) kolmiot esittävät SRES-päästöskenaarioon A2 (B2) perustuvia tuloksia. Kärjeltään ylöspäin osoittavat kolmiot kuvaavat kokeita, joissa reuna-arvot on otettu ECHAM4/OPYC3 – mallista, muissa kokeissa reunamallina on HadAM3H/P.

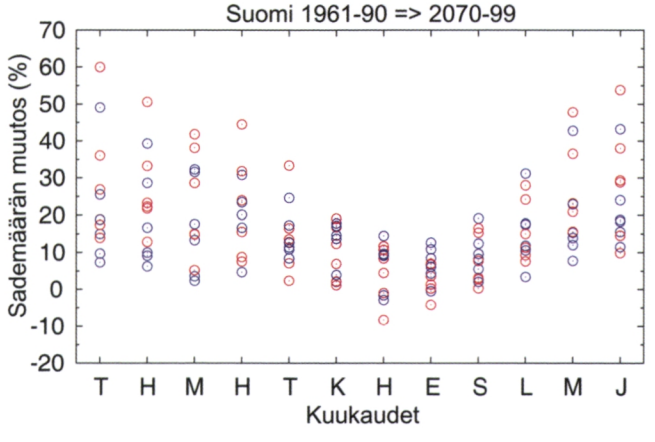
vioivan pakkasjakson muutoksiin liittyvää epävarmuutta.

Runsaampia sateita, niukemmin lunta

Sademäärien muutosten arvioiminen tuottaa ilmastomalleille vielä suurempia haasteita kuin lämpenemisen ennakoiminen. Koko maapallolla keskimäärin veden kiertoliike näyttäisi voimistuvan, jolloin sekä sademäärä että haihtuminen lisääntyisivät. Kaikkien tarkasteltujen malliajojen mukaan vuotuinen sademäärä Suomessa kasvaa, keskimääräisen muutoksen ollessa 1-2 % vuosikymmenessä. Koska sademäärät vaihtelevat luontaisesti enemmän kuin vuosikeskilämpötilat, muutokset tulevat tilastollisesti merkitseviksi myöhemmin kuin lämpötilaa tarkasteltaessa (kuva 4). Tähän mennessä maassamme mitatut sademäärät eivät ole vielä osoittaneet pitkäaikaista, tilastollisesti merkitsevää trendiä (Tuomenvirta 2004).



Kuva 4. Suomen keskimääräisen sademäärän muutokset poikkeamina jakson 1961–1990 keskiarvosta. Katso kuvan 1 selitystekstiä. (Kuva perustuu Jylhän ym. (2004) artikkeliin.)



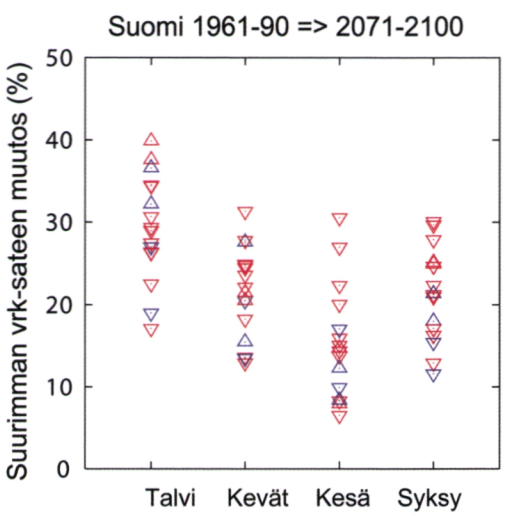
Kuva 5. Keskimääräiset kuukausisademäärän muutokset Suomessa vuosina 2070-2099 verrattuna jakson 1961–1990 keskiarvoihin kuuden globaalin ilmastomallin (taulukko 1) perusteella. Punaiset (siniset) ympyrät esittävät SRES-päästöskenaarioon A2 (B2) perustuvia tuloksia.

Kuten kuvan 4 oikeasta laidasta ilmenee, eri skenaarioita vastaavien sademäärän muutosten vaihteluvälit vuosisadan loppupuolella menevät vieläkin enemmän päällekkäin kuin lämpötilaa tarkasteltaessa. Niinpä kaikkien päästöskenaarioiden mukaan on mahdollista, että vuotuinen sademäärä lisääntyisi 2080-luvulle mennessä yli 20 %.

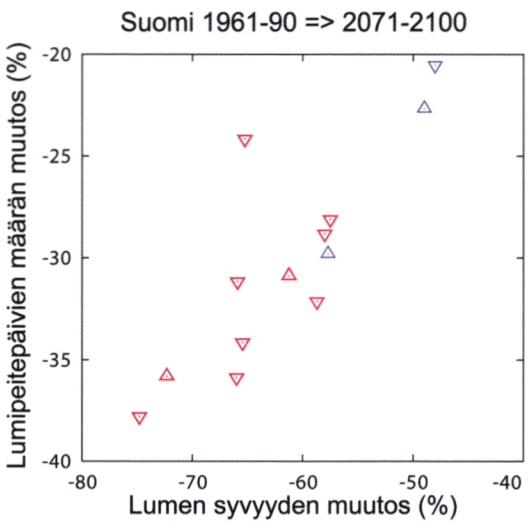
Vaikka muutoksen suuruus on epävarma, näyttää ilmeiseltä, että talvikuukausina sademäärä lisääntyy eniten ja kesällä muutos on vähäinen (kuva 5). Aluellisten ilmastomalliajojen mukaan rankat sateet näyttäisivät voimistuvan kaikkina vuodenaikoina, myös kesällä, vaikka tuolloin kokonaissademäärät saattavat jopa hieman pienetä (kuva 6). Pisimmät sateettomat jaksot lyhentyvät talvisin kaikissa simulaatioissa, mutta muina vuodenaikoina mallit antavat keskenään ristiriitaisia tuloksia. Kesäpoutien mahdollisesti pidetessä ja lämpötilojen kohotessa maaperä saattaisi olla ajoittain rutikuiva, kun taas voimistuvat rankkasateet toisaalta lisäisivät tulvimisriskiä. Kesäisin saattaisivat vaivata siis nykyistä enemmän vuoroin kuivuus, vuoroin rankkasateet, vaikka kesän kokonaissademäärät eivät juuri muuttuisi. Kaiken kaikkiaan sateen muutoksiin liittyy paljon epävarmuutta etenkin kesäisin.

Sateiden lisääntyminen talvella saattaa aluksi paksuntaa keskimääräistä lumipeitettä varsinkin Keski- ja Pohjois-Suomessa. Pakkasten väheneminen vuosisadan loppua kohti ohentaa kuitenkin lumipeitettä ja pienentää lumipeitepäivien määrää (kuva 7). Lumipeitepäivien määrä pienenee suhteellisesti vähemmän kuin lumen keskimääräinen syvyys. Lumipeitteen vähenemisen lisää entisestään ilman lämpenemistä: lumi heijastaa auringonsäteilyä takaisin avaruuteen, mutta lumen puuttuessa säteilyenergiaa imeytyy entistä enemmän maanpintaan lämmittämään sitä ja yläpuolista ilmaa.

Samoin kuin kuva 3, myös kuvat 6 ja 7 perustuvat kahdella globaalilla mallilla tehtyjen A2- ja B2-kokeiden alueellisiin tarkennusajoihin hienohilaisilla ilmastomalleilla. Vaikka tässä työssä on käytetty peräti seitsemän eri mallikeskuksen alueellisia malleja (taulukko 1), on hyvin mahdollista, että aluellisten mallien ajaminen käyttäen reu-



Kuva 6. Suurimman vuorokautisen sademäärän keskimääräinen suhteellinen muutos (%) Suomessa vuodenajoittain vuosina 2071-2100 verrattuna jaksoon 1961-1990 alueellisten ilmastomalliajojen perusteella. Punaiset (siniset) kolmiot esittävät päästöskenaarioon SRES A2 (B2) perustuvia tuloksia (katso kuvan 3 selitystekstiä). Talvi: joulu-tammi-helmikuu, kevät: maalis-huhti-toukokuu, kesä: kesä-heinä-elokuu, syksy: syys-loka-marraskuu.



Kuva 7. Lumen keskimääräisen syvyyden (vesisisällön) ja lumipäivien (lumen syvyys>0 cm) määrän suhteellinen muutos Suomessa vuosina 2071-2100 verrattuna jaksoon 1961-1990 alueellisten ilmastomalliajojen perusteella. Symbolit on selitetty kuvan 3 tekstissä.

naehtoja useammista maailmanlaajuisista malleista olisi tuottanut hieman erilaisia arvioita rankkasateiden ja lumipeitteen muutoksista.

Muutosten aikataulu

Usean mallin keskiarvojen perusteella 30-vuotisjaksojen keskilämpötila ja -sademäärä muuttuvat tämän vuosisadan aikana melko tasaisesti (kuvat 1 ja 3). Ilmastojärjestelmässä esiintyy kuitenkin myös luonnollista, kaoottista vaihtelua, jota on mahdotonta ennustaa. Joinakin vuosikymmeninä ilmavirtaukset saattavat käydä voittopuolisesti kylmiltä ilmansuunnilta, joilloin keskilämpötila saattaa jäädä selvästi alhaisemmaksi kuin mitä kuvasta 1 voisi päätellä. Vastaavasti jokin toinen vuosikymmen voi olla poikkeavan lämmin. Kymmenvuotisjaksojen todelliset keskilämpötilat voivat helposti heitellä ennakoiduista ainakin asteen verran ylös tai alas. Yksittäisinä vuosina vaihtelu on vielä paljon suurempaa.

Sademäärät vaihtelevat luontaisesti vieläkin enemmän kuin lämpötilat. Esimerkiksi kuvassa 4 mallien simuloiman luonnollisen vaihtelun vaikutus ilmenee selvästi B2-skenaariota esittävässä käyrässä. Sen mukaan sademäärä kasvaisi nopeasti 2010-luvulle saakka, minkä jälkeen kasvu taittuisi moneksi vuosikymmeneksi. Tämä ei siis kuitenkaan tarkoita, että todellisuudessa kävisi juuri näin.

Ennusteet tarkentuvat

Edellä on nähty, että eri ilmastomallien antamat tulokset poikkeavat melko paljon toisistaan. Epävarmuutta tuloksiin tuovat mallien puutteet ja päästöskenaarioiden erot sekä luonnollinen vaihtelu. Kunhan ilmaston käyttäytymistä opitaan tuntemaan entistäkin paremmin ja tietokoneet kehittyvät edelleen, saamme uusia, entistä tarkempia ilmastomalleja. Tällöin tässäkin kirjoituksessa esitetyt arviot menevät uusiksi – kuinka paljon, se jää nähtäväksi. Tulevaisuudessa tarkimmatkin alueelliset ilmastoennusteet tulevat joka tapauksessa olemaan todennäköisyysennusteita, joissa osa epävarmuudesta johtuu ilmaston luontaisesta vaihtelusta. Osa epävarmuudesta aiheutuu siitä, että vasta tulevaisuus näyttää, jatkavatko kasvihuonekaasujen päästöt kasvuaan vai kyetäänkö niitä oleellisesti rajoittamaan.

On mahdollista, että ilmastojärjestelmään vaikuttaa meille vielä tuntemattomia tekijöitä, joita mallit eivät osaa ottaa huomioon. Yllätykset ovat siis mahdollisia. Kasvihuoneilmiön voimistuminen on kuitenkin panemassa maapallon ilmastoa siinä määrin epätasapainoon, että tuntuvia muutoksia on varmasti odotettavissa. Niihin on syytä varautua yhteiskunnan eri aloilla (katso esim. Carter ja Kankaanpää 2003, Marttila ym. 2005).

Uusin suuntaus on kytkeä ilmakehä-, valtameri- ja vesistömallien lisäksi myös kasvillisuusmallit yhtenäiseksi systeemiksi. Tällä ilmastonmuutoksen vaikutus- ja sopeutumistutkimuksia tukevalla tiellä on esimerkiksi koti- ja ulkomaisena yliopistojen ja tutkimuslaitosten yhteistyönä käynnistynyt COSMOS-hanke (Community Earth System Models), jota koordinoi saksalainen Max Planck Institut für Meteorologie. Myös Suomi on mukana tässä hankkeessa.

Kirjallisuus

Carter, T.R. & Kankaanpää, S. 2003. Esiselvitys ilmastonmuutokseen sopeutumisesta Suomessa. A preliminary examination of adaptation to climate change in Finland. The Finnish Environment 640, Finnish Environment Institute. 66 s. (suomeksi ja englanniksi).

Christensen, J.H., Carter, T.R. & Rummukainen, M. 2005. Evaluating the performance and utility of regional climate models: the PRUDENCE project. Climatic Change, PRUDENCE special issue (käsikirjoitus).

IPCC 2001. Climate Change 2001: The Scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmetal panel on climate change. Houghton J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C.A. (toim.) Cambridge University Press. Cambridge. 881 s.

Jylhä, K., Fronzek, S., Tuomenvirta, H., Carter, T.R. & Ruosteenoja, K. 2005. Changes in frost, snow and Baltic sea ice by the end of the 21st century based on climate model projections for Europe. Climatic Change, PRUDENCE special issue (käsikirjoitus).

Jylhä, K., Tuomenvirta, H. & Ruosteenoja, K. 2004. Climate change projections for Finland during the 21st century. Boreal Environmental Research 9: 127–152.

Kuusisto, E. & Käyhkö, J. 2004. Globaalimuutos - Suomen Akatemian FIGARE-ohjelma, Kustannusosakeyhtiö Otava. 176 s.

Marttila, V., Granholm, H., Laanikari, J., Yrjölä, T., Aalto, A. Heikinheimo, P., Honkatuki, J., Järvinen, H., Liski, J., Merivirta, R. & Paunio, M. 2005. Ilmastomuutoksen kansallinen sopeutumisstrategia. Maa- ja metsätalousministeriö, MMM:n julkaisuja 1/2005. 276 s.

Tuomenvirta, H. 2004. Reliable estimation of climatic variations in Finland. Finnish Meteorological Institute Contributions, No. 43, Finnish Meteorological Institute. 80 s. + 78 s. liitteet.

Metsämaan mikrobiologisten prosessien ilmakehällinen merkitys: Metaani (CH_4) ja dityppioksidi (N_2O)

Pertti J. Martikainen, Anne Saari ja Marja Maljanen

Johdanto

Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuudet ovat kaasuja tuottavien ja niitä kuluttavien prosessien summa. Kasvihuonekaasuja tuotetaan ja kulutetaan sekä kemiallisissa että biologisissa prosesseissa. Eri prosessien suhteellinen merkitys vaihtelee kasvihuonekaasusta riippuen. Hiilidioksidipäästöistä (CO_2) alle puolet on peräisin bioprosesseista, kun taas metaanista (CH_4) 60% ja dityppioksidista (N_2O) 80% on syntynyt hiilen ja typen biogeokemialliseen kiertoon liittyvissä bioprosesseissa. Biogeokemialliset prosessit myös kuluttavat kasvihuonekaasuja vähentäen niiden päästöjä biosfääristä, tai poistaen kaasuja ilmakehästä. Metsien hiilidioksidinielu ja tähän vaikuttavat tekijät ovat ilmastomuutostutkimuksessa keskeisiä osa-alueita. Metsillä on maailmanlaajuista merkitystä myös metaani- ja dityppioksidivirroissa. Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa metsien biogeokemiallisiin prosesseihin, mikä heijastuu metsien ilmakehälliseen merkitykseen. Ympäristömuutokset voivat hidastaa tai kiihdyttää metsäekosysteemien biologisia prosesseja (Martikainen 1996). Monet vaikuttavat tekijät liittyvät ihmistoimintaan, kuten laskeumiin tai metsätalouteen. Nämä taustatekijät on huomioitava pohdittaessa ilmastomuutoksen vaikutuksia metsien biogeokemiallisiin prosesseihin ja näiden prosessien merkitystä ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuuksiin muuttuvassa ympäristössä. Tässä kirjoituksessa pääpaino on boreaalisissa metsissä, joista on eniten tietoa liittyen mm. metsätalouden vaikutuksiin metaani- ja dityppioksidivirtoihin. Boreaalisten metsien metaani- ja dityppioksididynamiikkaa verrataan lauhkean ja trooppisen vyöhykkeiden metsien metaani- ja dityppioksididynamiikkaan.

Metaani ja dityppioksidi hiilen ja typen kierroissa

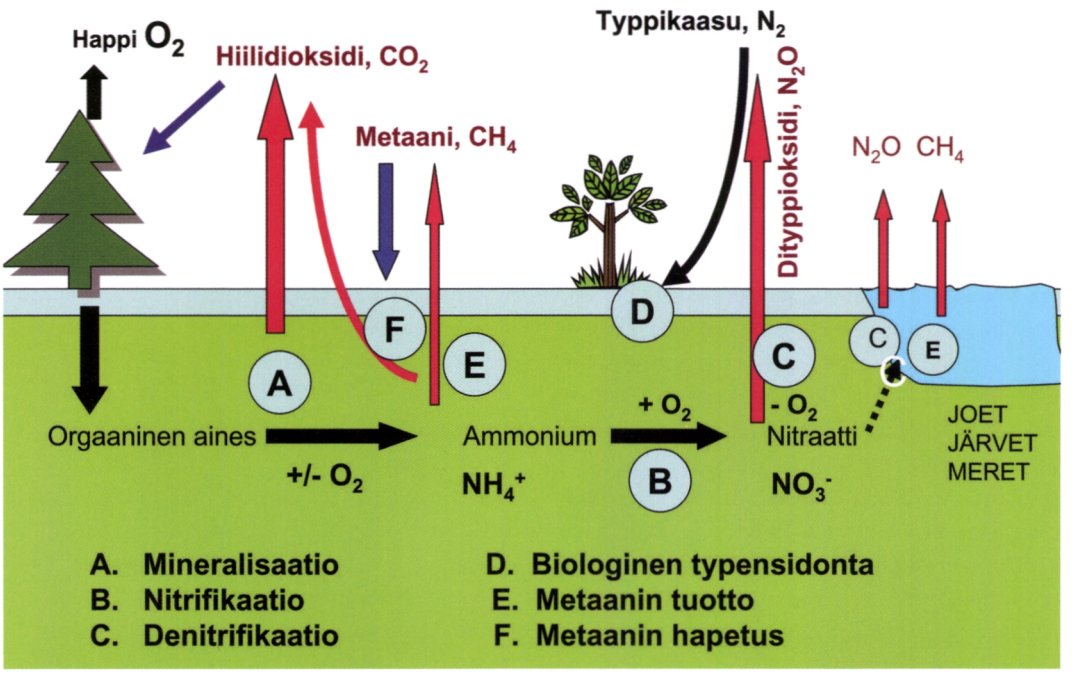
Metaanin ja dityppioksidin tuotosta ja kulutuksesta biosfäärissä vastaavat mikrobit. Metaanin ja dityppioksidin biogeokemia liittyy kiinteästi hiilen ja typen kiertoon ekosysteemeissä (kuva 1), joten näihin kaasuihin liittyvät prosessit kytkeytyvät koko ekosysteemin toimintaa säätteleviin fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin tekijöihin.

Orgaanisen aineksen hajotessa hapellisissa olosuhteissa, kuten vettä hyvin läpäisevässä mineraalimaassa, hiilidioksidi on hajoamisen pääasiallinen kaasumainen lopputuote. Heterotrofisesta hiilidioksidin tuotosta vastaavat pääosin mikrobit (bakteerit ja sienet). Mikäli maaperä kyllästyy vedellä, hapen diffuusio ilmakehästä maaperään hidastuu niin, että mikrobien hengitys kuluttaa hapen jo maan pintaosissa ja syvemmät maaprofiilit muuttuvat hapettomiksi. Äärimmäisenä esimerkkinä ovat suot. Hapettomissa olosuhteissa hajoamisessa syntyy hiilidioksidin ohella metaania, joka on 23 kertaa tehokkaampi kasvihuonekaasu kuin

hiilidioksidi 100 vuoden tarkastelujaksolla (IPCC 2001). Metaanin tuotosta vastaavat happea täysin karttavat ns. metanogeeniset mikrobit. Evoluutiossa mikrobit ovat kehittyneet niin, että lähes jokaiseen energiaa vapauttavaan reaktioon on kehittynyt jokin mikrobiryhmä, joka voi hyödyntää kasvussaan tämän reaktion energiaa. Näin on myös metaanin kohdalla. Eräät bakteerit, ns. metanotrofit (= metaania hapettavat bakteerit), voivat hapettaa maaperässä metaania ja saada metaanista sekä kasvun vaatiman energian että hiilen. Metaanin hapetuksella onkin suuri merkitys ilmakehän metaanipitoisuuden säätelyssä. Suurin osa hapettomissa turvekerroksissa syntyneestä metaanista hapetetaan suon hapellisissa pintakerroksissa metaanin diffuntoituessa turveprofiilissa kohti ilmakehää. Metaanin hapetuksessa syntyy hiilidioksidia, eli metaania tehottomampaa kasvihuonekaasua. Myös hapellisessa podsolimaannoksessa metaanin hapettajabakteerit ovat aktiivisia, minkä johdosta metsämaat vaikuttavat ilmakehän koostumukseen merkittävästi. Koska metsämaassa ei juurikaan synny metaania, metaania hapettavat bakteerit elävät metsämaassa ilmakehän metaanin varassa. Ne hapettavat maaperästä metaania niin, että maaperän metaanipitoisuus laskee alle ilmakehän metaanipitoisuuden (noin 2 ppm), jolloin metaani alkaa virrata ilmakehästä maaperään. Metsämaa toimii siis metaanin nieluna.

Dityppioksidi on 296 kertaa tehokkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi 100 vuoden tarkastelujaksolla (IPCC 2001). Dityppioksidia muodostuu kahdessa mikrobiologisessa prosessissa: nitrifikaatiossa ja denitrifikaatiossa (Davidson 1991).

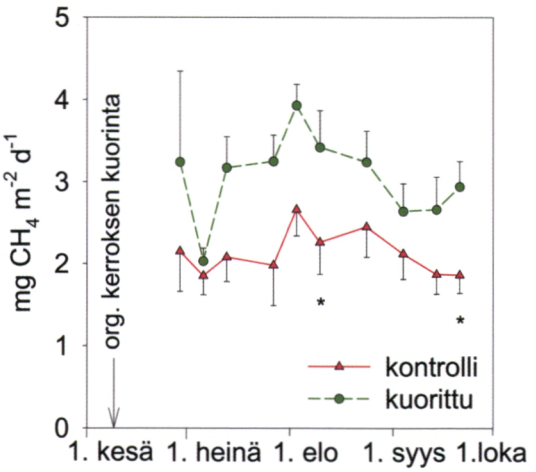
1. Happea vaativassa **nitrifikaatio**ssa typen mineralisaatiossa maaperään muodostunut ammonium (NH_4^+) hapetetaan nitriitin (NO_2^-) kautta nitraatiksi (NO_3^-). Näistä kahdesta hapetusreaktiosta vastaavat eri bakteerilajit. Nitrifikaatiobakteerit eivät vaadi kasvuunsa orgaanista ainesta sillä ne saavat energiansa joko ammoniumin tai nitriitin hapetuksesta, ja hiili otetaan hiilidioksidista. Luonnollisesti myös maaperään laskeumana tai lannoituksena tullut ammonium käy energialähteeksi näille bakteereille. Nitrifikaation ensimmäisessä vaiheessa, ammoniumin



Kuva 1. Metaani ja dityppioksidi hiilen -ja typenkierrossa

hapetuksessa, syntyy aina pieniä määriä dityppioksidia.

2. Maaperässä oleva nitraatti joutuu ns. **denitrifikaatio**bakteerien prosessoimaksi, mikäli maaperän hapen määrä vähenee. Denitrifikaatiobakteerit korvaavat hengityksessään hapen nitraatilla ja tässä prosessissa ne voivat pelkistää nitraatin aina typpikaasuksi (N_2) saakka. Dityppioksidi, joka on eräs reaktioketjun välituote, karkaa tietyissä ympäristöolosuhteissa maaperästä ilmakehään. Hapan ympäristö, kuten metsämaa, suosii dityppioksidin muodostumista reaktioketjussa, eli ketju ei etene tehokkaasti typpikaasuun saakka. Myös matala lämpötila aiheuttaa samankaltaisen ilmiön.



Kuva 2. Orgaanisen kerroksen poistamisen vaikutus suomalaisen CT (kanerva)- tyypin männikön metaaninieluun (Saari ym. 1998). Kuvassa on esitetty keskiarvot ja keskiarvon keskivirhe. Tilastollisesti merkitsevät erot ($p<0,05$) on merkitty tähdellä (*).

Boreaalisten metsämaiden metaanidynamiikka

Boreaalisilla moreenimailla olevilla metsillä on hyvä kyky niellä ilmakehän metaania (Saari ym. 1997). Tämä johtuu ilmeisesti moreenimaan rakenteesta, jossa on edustettuna sekä karkeampia että hienompia maa-aineksia. Hienommat jakeet antavat tartuntapintaa metaania hapettaville mikrobeille edistäen näiden aktiivisuutta ja karkeampi aines turvaa metaanin ja hapen diffuusion ilmakehästä maaperään. Metsämaan metaaninielussa siis myös maan fysikaalisella rakenteella on merkitystä; mitä paremmin kaasut diffuntoituvat ilmakehästä maaperään sitä voimakkaampi metaaninielu on. Tämä näkyy hyvin kokeissa, joissa metsämaan orgaaninen kerros on poistettu vaurioittamatta mineraalimaakerroksia. Kun orgaaninen kerros on poistettu, metsämaa nielee enemmän metaania kuin häiriintymätön metsämaa (kuva 2, Saari ym. 1998). Vielä tuntemattomista syistä metaania hapettavat mikrobit eivät pysty toimimaan podsolimaannoksen orgaanisessa kerroksessa, vaan niille optimaalinen ympäristö on mineraalimaannoksen pintaosissa. Yleensä mikrobien suurin aktiivisuus podsolimaannoksessa on orgaanisessa kerroksessa eli metaania hapettavat mikrobit ovat tästä poikkeus. Orgaaninen kerros toimii podsolimaannoksessa metaanin diffuusiota hidastavana tekijänä, joten orgaanisen kerroksen poistamisen jälkeen metaanin tunkeutuminen metaania hapettaviin mineraalimaakerroksiin nopeutuu. Podsolimaannoksesta poiketen orgaanisissa maissa metaanin hapettajat pystyvät toimimaan hyvin maan pintakerroksissa (Crill ym. 1994).

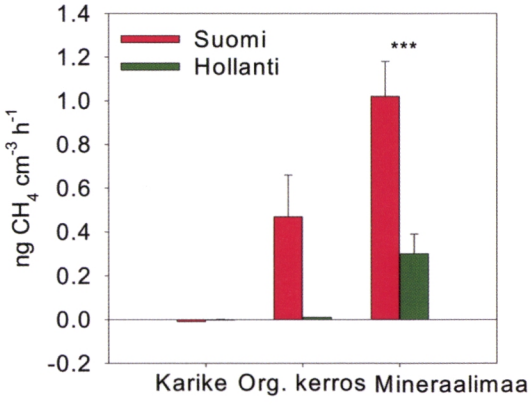
Ympäristömuutosten ja maankäytön vaikutukset metsämaan metaanin hapetukseen

Ammoniumtypen on todettu laboratoriokokeissa hidastavan metaania hapettavien mikrobien aktiivisuutta (O' Neill ja Wilkinson 1977). Suurta kiinnostusta on herättänyt kysymys siitä, voisiko typpilaskeuma heikentää metsämaan kykyä hapettaa ilmakehän metaania. Tämän asian selvittäminen on osoittautunut hankalaksi, sillä kokeista saadut tulokset ovat ristiriitaisia. Voidaan osoittaa, että ammoniumlisä maaperään kyllä hetkellisesti laskee metaanin hapetusta mutta pitkäaikaiset vaikutukset ovat epävarmemmat. Lisäksi myös nitraatti on joissain metsissä hidastanut metaanin hapetusta (Wang ja Ineson 2003), mutta nitraatin aiheuttamaa inhibitiomekanismia ei vielä tunneta.

Eräs tapa tutkia typpikuorman pitkäaikaisia vaikutuksia metsämaan metaanin hapetukseen on verrata metsämaan metaanin hapetuskykyä erilai-

sen typpilaskeuman omaavilla alueilla, joista Suomi ja Hollanti edustavat ääripäitä Euroopassa. Hollannissa vuotuinen ammoniumtyppilaskeuma metsiin voi olla lähes 100 kg hehtaarille, kun taas Suomessa typpilaskeuma on tyypillisesti alle 10 kg ha^{-1} a^{-1}. Suomalaisissa metsämaissa metaanin hapetus on nopeampaa kuin hollantilaisissa metsämaissa (kuva 3). Metsämaan metaanin hapetusnopeus korreloi negatiivisesti maaperän mineraalitypen pitoisuuteen. Metaanin heikompi hapettuminen hollantilaisessa metsämaassa ei kuitenkaan johdu ainoastaan suuresta typpimäärästä, sillä monimuuttuja-analyysien perusteella myös maan partikkelikoostumus liittyy metsämaiden metaanin hapetuskykyyn (Saari ym. 1997). Suomalainen moreenimaa näyttäisi suosivan metaanin hapetusta enemmän kuin keskieurooppalainen hiekkamaa (kts. edellinen luku). Niinpä suomalaiset moreenimailla olevat metsämaat ovatkin oivallisia ilmakehän metaanin nieluja.

Suomalaisen metsämaan metaanin hapetuksen herkkyyttä typpilisälle on voitu tutkia pitkäaikaisessa typpilannoituskokeessa, joissa metsämaahan on lisätty kolmen vuosikymmenen aikana typpeä yhteensä 860 kg ha^{-1} (Saari ym. 2004a). Typpilannoitus laski hieman metsämaan metaaninielua. Avohakkuu hidasti metaanin kulutusta hetkellisesti (kuva 4). Avohakkuun vaikutus liittyi luultavasti kohonneeseen maan ammoniumpitoisuuteen. Tulokset viittaavat siihen, että alhaisen luontaisen typpilaskeuman omaava metsämaa ei ole erityisen herkkä typpilisälle. Metaanin hapetus tapahtuu laajalla pH-alueella, joten hapetuksen herkkyys pH-muutoksille (mm. kalkitus) ei ole suuri (Saari ym. 2004b, kuva 5). Tuhkalannoituksen on todettu lisänneen joissain kangasmetsissä metaanin nielua (Maljanen, ym. käsikirjoitus).

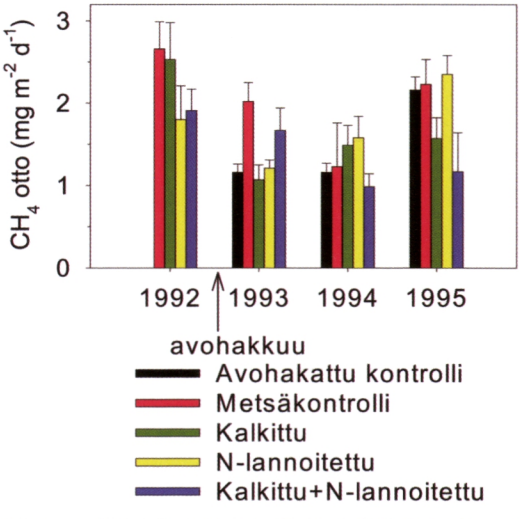


Kuva 3. Metaanin hapetuspotentiaali suomalaisten ja hollantilaisten havumetsien maannoksessa (Saari ym. 1997). Tutkimuksessa oli mukana 6 suomalaista ja 7 hollantilaista metsämaata. Typpilaskeuma vaihteli Suomessa 1-33 kg NH_4^+-N ha^{-1} a^{-1} ja Hollannissa 35-77 kg NH_4^+-N ha^{-1} a^{-1}. Suomen metsät, joissa typpilaskeuma oli korkea, sijaitsivat lähellä turkistarhoja. Tuloksissa on esitetty metaanin hapetuksen keskiarvo ja keskiarvon keskivirhe Suomen ja Hollannin metsämaille.

Ilmaston lämpenemisen ja ilman hiilidioksidipitoisuuden nousun vaikutuksia metsämaan metaanin hapetukseen on tutkittu vähän. Mekrijärven tutkimusaseman männikössä olevassa kammiokokeessa (kts. kirjan kappale 7), jossa puita ja maaperää altistettiin 6 vuotta kohonneelle lämpötilalle (+5 °C:n lisä vuotuiseen keskilämpötilaan) ja ilman hiilidioksidipitoisuudelle (700 ppm), havaittiin vähäinen lämpötilaan tai hiilidioksidiin liittyvä lasku metaanin hapetuksessa (Saari ym. julkaisemattomat tulokset). Lämpötilan nousu kiihdyttää yleensä metsämaan mikrobiaktiivisuuksia ja voisi siten vaikuttaa myös metaania hapettavien bakteerien toimintaan. Lämpötilalla on poikkeuksellisen vähän vaikutusta metsämaan metaanin hapetukseen (Crill ym. 1994). Ilmaston muutoksella voi olla myös epäsuoria vaikutuksia metaanin hapetukseen mikäli maan vesitaloudessa ja tähän liittyvässä kaasujen diffuusiossa tapahtuu muutoksia.

Korvet ovat luontaisia turvemailla kasvavia metsiä. Korpien pintamaannos ei ole vesikyllästeinen ja korvet toimivatkin metaanin nieluna mineraalimaiden tapaan (Huttunen ym. 2003). Soiden ojitus metsätaloudellisiin tarkoituksiin muuttaa aiemmin vesikyllästeisen turvemaan pintaosan hapelliseksi, mikä vaikuttaa suuresti turvemaan metaanidynamiikkaan (taulukko 1). Metaanivirtojen osalta on ratkaisevaa, mille tasolle vesipinta asettuu ojituksen jälkeen. Luonnontilaisten soiden metaanipäästöt kasvavat ravinteisuuden kasvaessa. Niinpä minerotrofisten soiden (= suot, jotka saavat ravinteensa ja vetensä valunnan, pohjaveden sekä sateen kautta) metaanipäästöt ovat ombrotrofisten soiden (= suot, joiden kasvillisuus saa

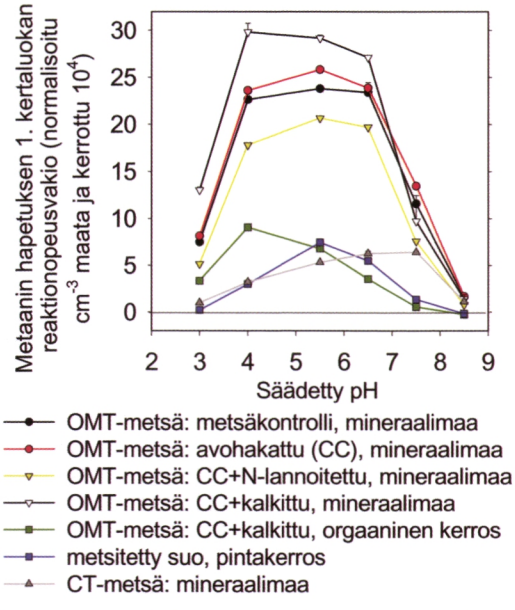
vetensä ja ravinteensa pelkästään sadevedestä) päästöjä suuremmat (Nykänen ym. 1998). Metaanipäästöjen erot selittyvät suotyyppien erilaisella hydrologialla, ravinteisuudella ja kasvillisuudella. Metsätalouteen ojitetut suot ovat tarjonneet suomalaisille tutkijoille mahdollisuuden selvittää miten pitkäaikaiset (vuosikymmeniä) hydrologiset muutokset vaikuttavat pohjoisten soiden metaanidynamiikkaan. Ojitus ja puuston kiihtynyt kasvu (lisääntynyt veden haihdunta) laskevat suon vesipintaa, jolloin erityisesti minerotrofisen suon turveprofiilin pintaosa on hapellinen. Näin aiemmin runsaasti metaania tuottanut (keskimäärin 190 kg CH_4 ha^{-1} a^{-1}) suo voi muuttua jopa metaanin nieluksi. Karuimmilla soilla, joissa ojituksen vaikutus vesitalouteen ja puustoon on minerotrofisia soita vähäisempi, ojitus on yleensä puolittanut metaanipäästöt (luonnontilaisilta keskimäärin 80 kg CH_4 ha^{-1} a^{-1}). Tulokset osoittavat, että globaalimuutoksen pitkäaikaiset vaikutukset soiden metaanidynamiikkaan ovat kiinteästi kytköksissä soiden hydrologiaan ja siinä tapahtuviin muutoksiin (Nykänen ym. 1998). Soiden metaanipäästöt nousevat ilmaston lämmetessä mikäli niiden hydrologia ei muutu (Christensen ym. 2003).



Kuva 4. Pitkäaikaisen typpilisän, kalkituksen ja avohakkuun vaikutukset suomalaisen OMT (oravamarja-mustikkatyyppi)- tyypin metsämaan metaanin nieluun (Saari ym. 2004a). Typpilannoitus on tehty ammoniumnitraatilla (Oulun salpietari) tai urealla yhteensä 7 kertaa 36 vuoden aikana (v. 1950-1986, yhteismäärä 860 kg N ha^{-1}). Kalkkia on lisätty v. 1958 ja 1980 yhteensä 6000 kg ha^{-1}. Avohakkuu tehtiin vuonna 1993 ja kaasuvirrat mitattiin vuosina 1992-1996.

Boreaalisten metsämaiden dityppioksididynamiikka

Mineraalimailla olevat metsät ovat yleisesti typpirajoitteisia ja niiden typenkierto on sulkeutunut. Metsämaassa mikrobit ja kasvillisuus kilpailevat mineraalitypen saatavuudesta. Ilman ekosysteemin ulkopuolelta tulevaa nitraattikuormaa dityppioksidin tuotto on mahdollista vain mikäli maaperän nitrifikaatiobakteerit toimivat hapettaen ammoniumia nitraatiksi. Happamassa metsämaassa nitrifikaatioprosessi voi tuottaa dityppioksidia (Martikainen 1985a, Martikainen ja DeBoer 1993, Martikainen ym. 1993a). Nitrifikaation tuottama nitriitti/nitraatti on välttämätön metsämaan denitrifikaatiolle (Paavolainen ja Smolander 1998) –



Kuva 5. Metaanin hapetuksen riippuvuus maan pH:sta erityyppisissä metsämaissa (Saari ym. 2004b). Metsätyyppien nimien lyhenteet tulevat nimikkokasvien tieteellisistä nimistä: OMT= oravanmarja-mustikkatyyppi (Oxalis, Myrtillus); CT= kanervatyyppi (Calluna).

mikrobiprosessille, joka on potentiaalisin dityppioksidin tuottaja. Metsämaan alhaisesta ammoniumin saatavuudesta ja maan happamuudesta johtuen metsämaan nitrifikaatiobakteerien lukumäärä ja nitrifikaatiokatiivisuus ovat tavattoman alhaiset (Martikainen 1984, 1985b, Smolander ym. 1998). Tästä johtuen luonnontilaisten metsämaiden dityppioksidipäästötkin ovat alhaiset (kuva 6). Boreaalisten mineraalimailla olevien metsien dityppioksidipäästö on keskimäärin vain 0,4 kg N_2O ha^{-1} a^{-1} (Brumme ym. 2005).

Mineraalimaiden ja orgaanisten maiden dityppioksidituoton herkkyys ympäristömuutoksille

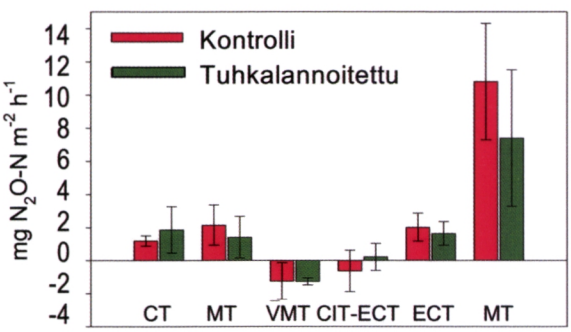
Tiedetään, että typpilisä, kalkitus ja tuhkalannoitus lisäävät metsämaan nitrifikaatioaktiivisuutta (taulukko 1) (Martikainen 1984, 1985bc, Smolander ym. 1998, Paavolainen ja Smolander 1998), samoin avohakkuu avatessaan metsämaan typenkierron (Smolander ym. 1998, Paavolainen ja Smolander 1998). Pelkkä tuhkalannoitus ei juuri vaikuta metsämaiden dityppioksidipäästöihin (kuva 6). Avohakkuu kiihdyttää nitrifikaatiota ja tähän kytkeytyvää denitrifikaatiota (Paavolainen ja Smolander 1998). Denitrifikaatiossahan dityppioksidi on välituote ennen sen pelkistymistä molekulaariseksi typeksi, joka ei ole kasvihuonekaasu. Dityppioksidin karkaamista denitrifikaatioprosessista suosii mm. alhainen pH ja matala lämpötila (Focht ja Verstraete 1977). Metsämaassa dityppioksidin onkin havaittu olevan denitrifikaation pääasiallinen lopputuote (Paavolainen ja Smolander 1998).

Taulukko 1. Metsään kohdistuvat toimenpiteet vaikuttavat metsämaan mikrobitoimintoihin ja kaasuvirtoihin:

Toimenpide	Metaani-nielu	Nitrifikaatio	N_2O-päästö
Typpilannoitus ↓	↑	↑	
Kalkitus	-	↑	-
Tuhkalannoitus ↑	↑	-	
Avohakkuu	↓	↑	↑
Ojitus			
- minerotrofinen suo	↑	↑	↑
- ombrotrofinen suo	↑*	-	-

* metaanin tuotanto puolittuu, ei kuitenkaan muutu nieluksi
↑ prosessi kiihtyy
↓ prosessi hidastuu
- ei selkeää vaikutusta prosessiin

Metsämaan dityppioksidin tuottoon liittyviä mikrobiprosesseja voidaan siis kiihdyttää metsään kohdistuvin toimenpitein (taulukko 1). Kenttämittaukset ovat osoittaneet, että typpilisä kiihdyttää dityppioksidin tuottoa, mutta boreaalisen, alhaisen typpilaskeuman omaavan metsämaan dityp-



Kuva 6. Tuhkalannoituksen vaikutus eräiden suomalaisten mineraalimailla olevien metsien dityppioksidipäästöihin (Maljanen ym., julkaisemattomat tulokset). Metsätyyppien nimien lyhenteet tulevat nimikkokasvien tieteellisistä nimistä: CT= kanervatyyppi (Calluna); MT= mustikkatyyppi (Myrtillus); VMT= puolukka-mustikkatyyppi (Vaccinium, Myrtillus); CIT-ECT= jäkälätyyppi-variksenmarja-kanervatyyppi (Cladina, Empetrum, Calluna); ECT= variksenmarja-kanervatyyppi (Empetrum, Calluna).

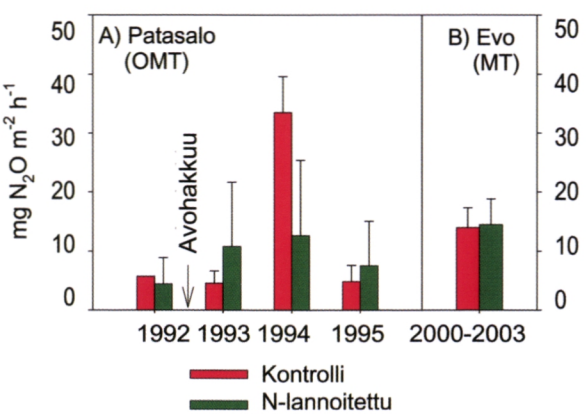
pioksidipäästöt jäävät varsin alhaiseksi suurellakin typpilisällä. Avohakkuu lisää typpeä saaneen metsämaan dityppioksidipäästöä enemmän kuin pelkkä avohakkuu ilman ylimääräistä typpeä (kuva 7).

Orgaaninen maa on maatyypeistä potentiaalisin dityppioksidin tuottaja. Orgaanisista metsämaista korvet tuottavat luontaisesti tätä kaasua (Huttunen ym. 2002, 2003) ja avohakkuu lisää edelleen korven dityppioksidipäästöjä (Huttunen ym. 2003). Korkean vesipinnan omaavat suot eivät päästä dityppioksidia lainkaan, päinvastoin, monet ovat heikkoja dityppioksidin nieluja (Regina ym. 1996). Metsätalouteen ojitetut minerotrofiset suot ovat dityppioksidin lähteitä mutta ombrotrofisten soiden vedenpinnan lasku ei johda dityppioksidipäästöihin (Martikainen ym. 1993b). Kuten edellä metaanin kohdalla esiteltiin, näitä havaintoja voidaan käyttää arvioitaessa dityppioksidin tuoton herkkyyttä hydrologisille muutoksille. Mikäli ilmaston lämpeneminen aiheuttaisi pohjoisilla alueilla soiden vedenpinnan laskua, niin erityisesti minerotrofiset suot alkaisivat tuottaa dityppioksidia ja muodostaisivat uuden dityppioksidilähteen ilmakehään. Ilmaston lämpeneminen ilman soiden kuivumista ei lisää dityppioksidipäästöjä. Dityppioksidin tuotto vaatii hapellisen pintaturpeen, jolloin typen mineralisaatio ja nitrifikaatio kiihtyvät, tarjoten nitraattia denitrifikaatiolle. Nimenomaan minerotrofisessa suossa vedenpinnan lasku johtaa näiden prosessien kiihtymiseen (Regina ym. 1996).

Vedenpinnan lasku ilman turvemaan muokkausta ei johda lähellekään niitä päästöjä, joita soiden ojitus maatalouskäyttöön aiheuttaa. Orgaanisten metsämaiden dityppioksidipäästöt ovat 1–7 kg N_2O ha^{-1} a^{-1} (Martikainen ym. 1993b, Maljanen ym. 2003b) ja orgaanisten maatalousmaiden dityppioksidipäästöt ovat 3 kg:sta jopa 58 kg N_2O ha^{-1} a^{-1} (Maljanen ym. 2003b, Maljanen ym. 2004, Regina ym. 2004).

Metsien metaani- ja dityppioksidivirtojen merkitys kasvihuonekaasuina

Kuten edellä esitettiin, boreaalisten metsien metaani- ja dityppioksididynamiikassa on eroja. Niinpä dityppioksidia tuottavissa metsissä metaaninielu ei pysty kompensoimaan dityppioksidin lämmit-

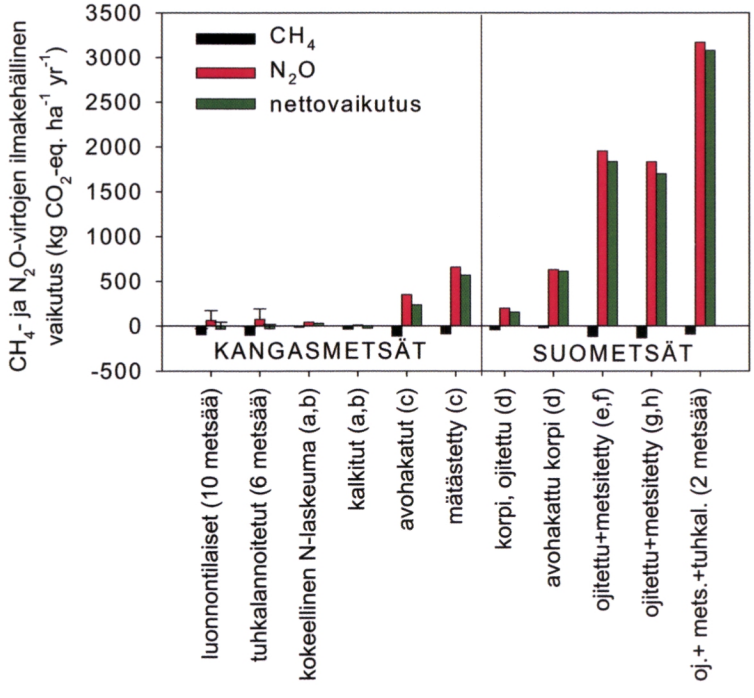


Kuva 7. Typpilannoituksen vaikutus kahden suomalaisen kangasmetsän dityppioksidipäästöön. A. Patasalo on OMT-tyypin kuusikko, johon on lisätty typpeä ammoniumnitraattina (Oulun salpietari) ja ureana v. 1958-1986 (7 kertaa, yhteensä 860 kg N ha^{-1}) (Saari ym., julkaisemattomat tulokset). B. Evo on MT-tyypin kuusikko, johon on lisätty kesällä 2000 typpeä 200 kg ha^{-1} ammoniumnitraattina (Maljanen ym. käsikirjoitus).

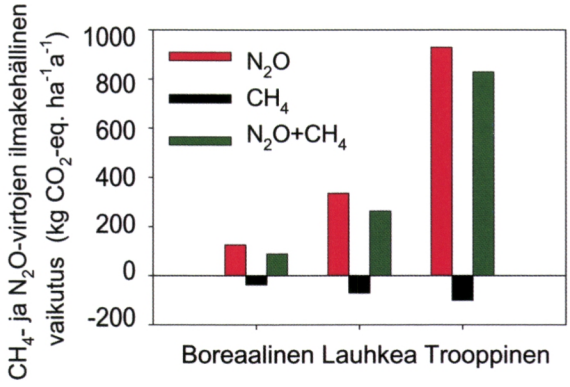
tävää vaikutusta – näitä metsiä on erityisesti turvemailla (kuva 8).

Trooppisten metsämaiden dityppioksidipäästöt ovat keskimäärin 3 kg N_2O ha^{-1} a^{-1} ja lauhkean vyöhykkeen päästöt keskimäärin 1 kg N_2O ha^{-1} a^{1} (Brumme ym. 2005). Keskimääräiset metaanivielut eri ilmastovyöhykkeiden metsissä ovat 37–10 kg CH_4 ha^{-1} a^{-1}, trooppisten metsien ollessa tehokkain metaanivielu pinta-alayksikköä kohden (Brumme ym. 2005). Varsinkin trooppisen ja lauhkean vyöhykkeiden metsämaissa metaanielu ei kompensoi dityppioksidipäästöjä, vaan näiden kahden kaasun yhteisvaikutus on ilmakehää lämmittävä. Trooppisissa metsissä tämä lämmitysvaikutus on lähes kymmenkertainen boreaalisiin metsiin verrattuina (kuva 9). Trooppisten metsien suuri dityppioksidipäästö liittyy näiden metsämaiden kiivaaseen orgaanisen aineksen mineralisaatioon. Trooppisten metsien dityppioksidipäästöissä on huomattavaa vuodenaikaista vaihtelua, päästöjen ollessa suurimmillaan sadeaikana (Brumme ym. 2005). Yhteenvetona voidaan siis todeta, että metsien dityppioksidipäästöt nousevat pohjoisesta etelään mentäessä. Lauhkean vyöhykkeen metsien dityppioksidipäästöjä lisännee tämän alueen korkeat typpilaskeumat.

Uusimpien arvioiden mukaan maailman metsien metaaninielu ei siis kompensoi niiden dityppioksidipäästön ilmakehää lämmittävää vaikutusta (taulukko 2 ja kuva 9). Dityppioksidipäästö heikentää näin metsien hiilinielun ilmakehää "viilentävää" vaikutusta (Brumme ym. 2005).



Kuva 8. Boreaalisten metsämaiden CH_4-virtojen (nielu negatiivinen = viilentävä) ja N_2O-päästöjen (positiiviset arvot = lämmittävä) lämmitysvaikutus muutettuna hiilidioksidiekvivalenteiksi (GWP, tarkastelujakso 100 vuotta). Kirjaimet viittaavat julkaisuihin, joista tiedot on otettu (a= Kasimir-Klemedtsson ja Klemedtsson 1997, b= Klemedtsson ym. 1997, c= Saari ym. 2004a ja julkaisemattomat tulokset., d= Huttunen ym. 2003, e= Maljanen ym. 2003a, f= Maljanen ym. 2003b, g= Martikainen ym. 1996, h= Regina ym. 1998).



Kuva 9. Metaani- ja dityppioksidivirtojen lämmitysvaikutus hiilidioksidiekvivalentteina (GWP, 100 vuoden tarkastelujakso) boreaalisen, lauhkean ja trooppisen vyöhykkeiden metsissä (Brumme ym. 2005).

Johtopäätökset

Metaanin ja dityppioksidin merkitys metsän kaasuvirroissa vaihtelee metsän eri kehitysvaiheissa - näiden kaasujen merkitys on vähäisin puuston hiilidioksidin sidonnan ollessa voimakkaimmillaan ja suurin puuston poiston jälkeen. Eri ilmastovyöhykkeiden metsien metaani- ja dityppioksididynamiikan vertailu antaa suuntaviivoja kuinka herkkiä näiden kaasujen virrat ovat ilmaston lämpenemiselle. Arvion varmuutta heikentää kuitenkin se, että kaasuvirtojen takana olevia prosesseja säätelevät myös ilmastosta riippumattomat tekijät, esimerkiksi maaperän ominaisuudet ja laskeumat. Viimeaikainen tutkimus on lisäksi osoittanut, että boreaalisellakin ilmastovyöhykkeellä talvikautiset kaasuvirrat, erityisesti dityppioksidipäästöt, voivat vastata yli puolta koko vuoden kaasutaseesta (esim. Maljanen ym. 2003b, Regina ym. 2004). Talviaikaisten mikrobiprosessien ymmärtäminen onkin tullut erääksi tärkeäksi biogeokemian tutkimuskohteeksi.

Taulukko 2. Maailman metsien vuosittaiset dityppioksidipäästöt ja metaaninielut (Brumme ym. 2005)

Metsävyöhyke	N_2O-päästöt Tg a^{-1}	Metaaninielut Tg a^{-1}
Tropiikki	6 - 6.3	8,8
Lauhkea vyöhyke	0,5 – 1,1	2,7
Boreaalinen vyöhyke	1	5,7
Yhteensä	**n. 8**	**n. 17**

Kirjallisuus

Brumme, R., Verchot, L.V., Martikainen, P.J. & Potter, C.S. 2005. Contribution of trace gases nitrous oxide (N_2O) and methane (CH_4) to the atmospheric warming balance of forest biomes. Julkaisussa: Griffiths, H. & Jarvis, P.G. (toim.) The Carbon Balance of Forest Biomes. Taylor & Francis Group, Oxon, New York. s. 293-318.

Christensen, T.R., Ekberg, A., Ström, L., Mastepanov, M., Panikov, N., Öquist, M., Svensson, B.H., Nykänen, H., Martikainen, P. & Oskarsson, H. 2003. Factors controlling large scale variations in methane emissions from wetlands. Geophysical Research Letters 30 (7): 10.1029/2002GL016848.

Crill, P.M., Martikainen, P.J., Nykänen, H. & Silvola, J. 1994. Temperature and N fertilization effects on methane oxidation in a drained peatland soil. Soil Biology & Biochemistry 26: 1331-1339.

Davidson, E. A. 1991. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems, pp. 219-235. Julkaisussa: Rogers, J.E. & Whitman W.B. (toim.) Microbial Production and consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen oxides and Halomethanes. American Society for Microbiology, Washington D.C.

Focht, D.D. & Verstraete, W. 1977. Biochemical ecology of nitrification and denitrification. Advanced Microbial Ecology 1: 135-214.

Huttunen, J.T., Nykänen, H., Turunen, J., Nenonen, O & Martikainen, P.J. 2002. Fluxes of nitrous oxide on natural peatlands in Vuotos, an area projected for a hydroelectric reservoir in Northern Finland. Suo 53: 87-96.

Huttunen, J.T., Nykänen, H., Martikainen, P.J. & Nieminen, M. 2003. Fluxes of nitrous oxide and methane from drained peatlands following forest clearfelling in southern Finland. Plant and Soil 255: 457-462.

IPCC 2001. Climate Change 2001. Julkaisussa: Houghton J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C.A. (toim.) The Scientific basis: Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press. Cambridge. 881 s.

Kasimir-Klemedtsson, Å. & Klemedtsson, L. 1997. Methane uptake in Swedish forest soil in relation to liming and extra N-deposition. Biology and Fertility of Soils 25: 296-301.

Klemedtsson, L., Klemedtsson, Å.K., Moldan, F. & Weslien, P. 1997. Nitrous oxide emission from Swedish forest soils in relation to liming and simulated increased N-deposition. Biology and Fertility of Soils 25: 290-295.

Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J. & Martikainen, P.J.. 2003a. Methane fluxes on agricultural and forested boreal organic soils Soil Use and Management 19: 73-79.

Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J. & Martikainen, P.J. 2003b. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. Soil Biology & Biochemistry 35: 689-700.

Maljanen, M., Komulainen, V.-M., Hytönen, J. Martikainen, P.J. & Laine, J. 2004. Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil characteristics. Soil Biology & Biochemistry 36: 1801-1808.

Maljanen, M., Jokinen, H., Saari, A., Strömmer, R. & Martikainen, P.J Wood ash increases methane uptake rate in boreal forest soil. Lähetetty lehteen Soil Use and Management.

Martikainen, P.J. 1984. Nitrification in two coniferous forest soils after different fertilization treatments. Soil Biology & Biochemistry 16: 577-582.

Martikainen, P.J. 1985a. Nitrous oxide emission associated with autotrophic ammonium oxidation in acid coniferous forest soil. Applied and Environmental Microbiology 50: 1519-1525.

Martikainen, P.J. 1985b. Numbers of autotrophic nitrifiers and nitrification in fertilized forest soil. Soil Biology & Biochemistry 17: 245-248.

Martikainen, P.J. 1985c. Nitrification in forest soil of different pH as affected by urea, ammonium sulphate and potassium sulphate. Soil Biology & Biochemistry 17: 363-367.

Martikainen, P.J. & De Boer, W. 1993. Nitrous oxide production and nitrification in acidic soil from a Dutch coniferous forest. Soil Biology & Biochemistry 25: 343-347.

Martikainen, P.J., Lehtonen, M., Lång, K., De Boer, W. & Ferm, A. 1993a. Nitrification and nitrous oxide production potentials in aerobic soil samples from the soil profile of a Finnish coniferous site receiving high ammonium deposition. FEMS Microbiology Ecology 13: 113-122.

Martikainen, P.J., Nykänen, H., Crill, P. & Silvola, J. 1993b. Effect of a lowered water table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. Nature 366 (4): 51-53.

Martikainen, P.J. 1996. Microbial processes in boreal forest soils as affected by forest management practices and atmospheric stress. Julkaisussa: Stotzky, G. & Bollag, J.-M. (toim.) Soil Biochemistry, vol 9. Marcell Dekker Inc. New York. s. 195-232.

Martikainen, P.J., Nykänen, H., Regina, K., Lehtonen, M. & Silvola, J. 1996. Methane fluxes in a drained and forested peatland treated with different nitrogen compounds. Julkaisussa: Laiho, R., Laine, J. & Vasander, H. (toim.) Northern Peatlands in Global Climatic Change: Proceedings of the International Workshop held in Hyytiälä, Finland, 8-12 Oct 1995. Publications of the Academy of Finland 1/96. s. 105–109.

O'Neill, J.G. & Wilkinson, J.F. 1977. Oxidation of ammonia by methane-oxidizing bacteria and the effects of ammonia on methane oxidation. Journal of General Microbiology 100: 407-412.

Nykänen, H., Alm, J., Silvola, J., Tolonen, K. & Martikainen, P.J. 1998. Methane fluxes on boreal peatlands of different fertility and the effect of long-term experimental lowering of the water table on flux rates. Global Biogeochemical Cycles 12: 53-69.

Paavolainen, L. & Smolander, A. 1998. Nitrification and denitrification in soil from a clear-cut Norway spruce (*Picea abies*) stand. Soil Biology & Biochemistry 30: 775-781.

Regina, K., Nykänen, H., Silvola, J. & Martikainen, P.J. 1996. Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity of the peat. Biogeochemistry 35: 401-418.

Regina, K., Nykänen, H., Maljanen, M., Silvola, J. & Martikainen, P.J. 1998. Emissions of N_2O and NO and net nitrogen mineralization in a boreal forested peatland treated with different nitrogen compounds Canadian Journal of Forest Research 28: 132-140.

Regina, K., Syväsalo, E., Hannukkala, A. & Esala, M. 2004. Fluxes of N_2O from farmed peat soils in Finland. European Journal of Soil Science 55: 591-599.

Saari, A., Martikainen, P.J., Ferm, A., Ruuskanen, J., W. De Boer, S.R. Troelstra & Laanbroek, H. 1997. Methane oxidation in soil profiles of Dutch and Finnish coniferous forests with different soil texture and atmospheric nitrogen deposition. Soil Biology Biochemistry 29: 1625-1632.

Saari, A., Heiskanen, J. & Martikainen, P.J. 1998. Effect of organic horizon on methane oxidation and uptake in a boreal scots pine forest soil. FEMS Microbiol. Ecol. 26: 245-255.

Saari, A.. Smolander, A. & Martikainen, P.J. 2004a. Methane consumption in a frequently nitrogen-fertilized and limed spruce forest soil after clear-cutting. Soil Use and Management 20: 65-73.

Saari, A., Niemi, R. & Martikainen, P.J. 2004b. Methane oxidation in boreal forest soils: kinetics and sensitivity to pH and ammonium. Soil Biology and Biochemistry 36: 1037-1046.

Smolander, A., Priha, O., Paavolainen, L., Steer, J. & Mälkönen, E. 1998. Nitrogen and carbon transformations before and after clear-cutting in repeatedly N-fertilized and limed forest soil. Soil Biology & Biochemistry 30: 477-490.

Wang, Z.-P. & Ineson, P. 2003. Methane oxidation in a temperate coniferous forest soil: effects of inorganic N. Soil Biology & Biochemistry 35: 427-433.

Ilmastonmuutoksen biologiset vaikutusmekanismit metsäpuilla

Elina Oksanen

Johdanto

Ilmastonmuutokseen liittyvät ilmiöt, kuten muutokset maapallon lämpötiloissa, sademäärissä, ilmakehän kaasukoostumuksessa ja UV-säteilyssä, vaikuttavat voimakkaasti metsäpuiden kasvuympäristöön. Tärkeimmät teollistumisen ja liikenteen kasvun myötä ilmakehässä lisääntyvät kasvihuonekaasut ovat hiilidioksidi (CO_2), otsoni (O_3), dityppioksidi (N_2O), metaani (CH_4) ja halogenoidut hiilivedyt, etenkin CFC-yhdisteet (kloori-fluori – yhdisteet) (infotaulu 1). Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on kohonnut esiteollisen ajan noin 280 miljoonasosasta (ppm) nykyiseen 370 miljoonasosaan, vuotuisen lisäyksen ollessa keskimäärin 1,5 ppm vuodessa. Merkittävimmät hiilidioksidilähteet maailmanlaajuisessa mittakaavassa ovat teollisuus, energiantuotanto (fossiilisten polttoaineiden käyttö) ja metsien hävittäminen. Viime vuosina hiilidioksidipitoisuuden nousu on kiihtynyt, ollen jopa 2,5 ppm vuodessa. Vaikka päästöt lopetettaisiin heti kokonaan, ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden pieneneminen kestäisi kauan, sillä hiilidioksidin elinikä on pitkä ja siten ilmakehän, biosfäärin ja merien tasapainotilan saavuttaminen kestää pitkän ajan.

Otsoni on yksi ilmakehän tärkeimmistä kaasuista. Se ylläpitää ilmakehän kemiallisia reaktioketjuja ja kykyä poistaa sinne pääseviä saasteita. Keski-ilmakehän, eli noin 20 kilometrin korkeudella sijaitsevan stratosfäärin otsonikerros suojaa maapalloa auringon UV-säteilyltä. Alailmakehän eli troposfäärin ns. maaotsoni on puolestaan haitallista sekä kasvien solukoille että eläinten (ihmisten) kudoksille otsonimolekyylin hapettavan vaikutuksen vuoksi. Liikenteen ja teollisuuden tuottamien typenoksidi- ja hiilivetypäästöjen lisäyksen vuoksi alailmakehän otsoni on lisääntynyt 0,5-2 % vuodessa.

Ihmistoiminta on vaikuttanut voimakkaasti myös metaanin pitoisuuksiin. Ilmakehän metaanipitoisuuden vuotuinen kasvuvauhti on noin 0,5 % vuodessa. Metaanin pitoisuus on jo kaksinkertaistunut esiteollisesta ajasta ja sen elinikä ilmakehässä on 9-15 vuotta. Dityppioksidin (eli typpioksiduuli tai ilokaasu) pitoisuus ilmakehässä on kasvanut noin 13 % esiteollisesta ajasta, johtuen pääosin maankäytön muutoksista, typpilannoitteiden käytöstä, typpihapon valmistuksesta ja polttoprosesseista. Dityppioksidin elinikä ilmakehässä on jopa 120 vuotta. Halogenoidut hiilivedyt (mm. CFC-yhdisteet) ovat pitkäikäisiä teollista alkuperää olevia kasvihuonekaasuja. CFC-yhdisteiden pitoisuuden kasvu ilmakehässä on onneksi pysähtynyt, vaikka ns. HCFC-yhdisteiden pitoisuudet jatkavat vielä kasvuaan. Näiden yhdisteiden tilalle on kuitenkin kehitetty HFC-yhdisteitä, jotka eivät tuhoa otsonikerrosta.

Ilmakehään saapuva lyhytaaltoinen säteily koostuu ultraviolettisäteilystä (8 % kokonaisenergiasta), näkyvästä valosta (39 %) sekä infrapuna- eli lämpösäteilystä (53 %). Lyhytaaltoinen UV-säteily jaetaan kolmeen osaan aallonpituuden mukaan (infotaulu 2). Ilmakehän happi vaimentaa UV-C -säteilyn jo ilmakehän yläosissa, ja siksi tätä lyhytaaltoista, biosfäärille tuhoisaa säteilyä ei saada

Infotaulu 1. Merkittävimmät kasvihuonekaasut, niiden elinaika ja tärkeimmät ihmistoiminnasta aiheutuvat päästölähteet. Lämmityspotentiaali (global warming potential, GWP) mittaa kaasun aiheuttamaa lämmitysvaikutusta hiilidioksidiin verrattuna massayksikköä kohti 100 vuoden aikana. Taulukossa on siis arvio lämmityspotentiaalista 100 vuoden aikana päästöistä (Lähde: IPCC 2001):

Nimi	Lyhenne	Elinaika (vuosi)	Päästölähde	Lämmityspotentiaali (GWP100 v)
hiilidioksidi	CO_2	50-200	teollisuus energian tuotanto metsien hävitys	1
metaani	CH_4	12	energian tuotanto karjatalous riisinviljely kaatopaikat jätevedenkäsittely	23
dityppioksidi	N_2O	114	lannoitteiden käyttö energian tuotanto biomassan poltto	296
otsoni	O_3	0,01-0,05	muodostuu fotokemiallisissa reaktioissa CH_4, CO, NO ja hiilivetyjen kanssa	2000
halogenoidut hiilivedyt				
klooratut hiilivedyt	CFC HCFC	1,4-170	jäähdytyslaitteet vaahtomuovi ponneaineet liuottimet	120-14000
fluoriyhdisteet	HFC PFC SF_6	0,3-50000	jäähdytyslaitteet vaahtomuovi ponneaineet liuottimet sähkö- ja elektroniikka teollisuus	12-22200
bromiyhdisteet = halonit	esim. CF_3Br	11-65	palosammuttimet torjunta-aineet	1300-6900

ilmakehän alaosiin eikä maanpinnalle lainkaan. Ilmakehän otsoni, hiukkaset eli aerosolit sekä pilvisyys puolestaan vaimentavat biosfääriin saapuvaa UV-B -säteilyä. Maanpinnalle saapuvan UV-B -säteilyn voimakkuus riippuu leveysasteesta sekä vuoden- ja vuorokaudenajasta. UV-A -säteily on aallonpituudeltaan pisintä ja siten energiamäärältään pienintä UV-säteilyä. UV-A -säteily ei absorboidu otsonikerrokseen, joten maan pinnalle sitä pääsee moninkertainen määrä UV-B -säteilyyn verrattuna. (http://www.fmi.fi/tutkimus_ilmasto/ilmasto_20.html; IPCC 2001).

Ilmastonmuutokseen liittyen kaikkein parhaiten tunnetaan otsonin, hiilidioksidin ja UV-säteilyn vaikutusmekanismit kasveissa. Näin ollen, tässä artikkelissa esitellään kyseisten, hyvin erilaisten ilmastonmuutostekijöiden vaikutusmekanismit, jotka kuitenkin vaikuttavat luonnossa usein yhtäaikaisesti. Yhteistä kaikille kolmelle tekijälle on se, että ne vaikuttavat pääasiassa lehtien/neulasten kautta.

Otsonin vaikutusmekanismit

Akuutti vs. krooninen altistuminen

Otsoni on metsäpuiden kannalta merkittävin kaasumainen ilmansaaste, koska se on lisääntynyt kaikkialla maapallolla, on toksinen kasveille ja kulkeutuu pitkiäkin matkoja, mm. Keski-Euroopasta Skandinaviaan ja Aasiaan, Aasiasta Yhdysvaltain länsirannikolle, Yhdysvalloista Eurooppaan. Akuutissa altistuksessa kasvit altistuvat lyhyen aikaa (tunteja) korkeille otsonikonsentraatioille (> 120 miljardisosaa, ppb), kun taas kroonisessa altistuksessa on kyseessä pitkäaikainen päivien – kuukausien altistuminen matalammille pitoisuuksille (40 - 120 ppb). Akuutti altistus johtaa usein paikalliseen solukuolemaan lehden/neulasen *mesofylli*ssä (infotaulu 3), joka saattaa indusoida ohjelmoidun solukuoleman, nopeutuneen lehden vanhenemisprosessin (seneskenssi), biokemiallisia puolustusreaktioita otsonin hajoamisen seurauksena muodostuneita aktiivisia happiradikaaleja vastaan, sekä muutoksia soluseinien rakenteessa. Jotkut näistä muutoksista lisäävät kasvin sietokykyä otsonia vastaan, kun taas toiset johtavat fotosynteesin ja kasvun alenemiseen. Myös krooninen altistuminen otsonille voi johtaa lehtivaurioiden (nekroottiset ja kloorottiset laikut) syntyyn mutta usein lehdet kuitenkin näyttävät oireettomilta. Fotosynteesin ja tuotannon aleneminen, biokemiallisten puolustusreaktioiden aktivoituminen, sekä kiihtynyt ja epätäydellinen seneskenssi ovat tyypillisiä seurauksia pitkäaikaisesta altistumisesta matalille otsonipitoisuuksille. Epätäydellisen seneskenssin seurauksena ravinteiden talteenotto lehdistä jää vajavaiseksi, mikä voi pitkällä aikavälillä heikentää esimerkiksi talvensietokykyä (Matyssek ja Sandermann 2003).

Otsonin kulkeutuminen lehteen ja oksidatiivinen purkaus

Otsoni kulkeutuu lehden/neulasen mesofylliin pääosin ilmarakojen kautta normaalin kaasunvaihdon ja veden haihdutuksen yhteydessä (Long ja Naidu 2002). Otsonin virtausnopeus on riippuvainen ilmarakojen johtavuudesta (ilmarakokonduktanssi), mihin puolestaan vaikuttaa ilmarakojen avautuneisuus sekä sääolot (ilmankosteus, tuulisuus, lämpötila, otsonigradientti). Lisäksi otsonin kuivalaskeuma lehden/neulasen pintaan on huomattavaa. Kosteat sääolot lisäävät laskeumaa lehvästön pintaan. *Kutikula* on kuitenkin useimmiten tehokas este otsonin tunkeutumiselle solukkoon. Mesofyllin *apoplasti*ssa otsoni liukenee välittömästi veteen (soluseinissä on 75-80 % vet-

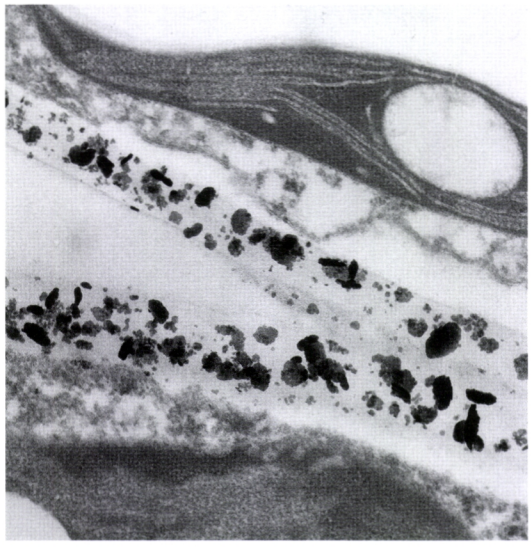
Infotaulu 2. UV-säteily:

UV-A	315 – 400 nm	ei suodatu ilmakehään	⇩ energiataso (haitallisuus) kasvaa
UV-B	280 – 315 nm	suodattuu osittain ilmakehään	
UV-C	200 – 280 nm	suodattuu ilmakehään	

tä) muodostaen vapaita happiradikaaleja kuten vetyperoksidi (H_2O_2), perihydroksyyli ($\cdot O_2H$), superoksidi ($\cdot O_2^-$) ja hydoksyyliradikaali ($\cdot OH$) (kuva 1). Oksidatiivisessa (eli hapettavassa) purkauksessa (= oxidative burst) muodostuneet happiradikaalit ovat hyvin reaktiivisia ja vahingollisia soluille. Ensimmäisenä vaikutuskohteena soluissa on solukalvo, jossa etenkin lipidien kaksoissidokset altistuvat *otsonolyysi*lle. Lipidien lisäksi solukalvon rakenneproteiinien aminohappojen SH-ryhmät ovat herkkiä otsonivaurioille (Long ja Naidu 2002).

Otsoni aktivoi puolustusreaktiot aiheuttamaansa oksidatiivista stressiä vastaan

Otsonin ja /tai sen hajotessa muodostuneiden happiradikaalien tunkeutuessa soluseinän lävitse solukalvolle tapahtuu tunnistus, joka käynnistää puolustuksen aktivoitumisen solulimassa monimutkaisen signaalinvälitysreitin kautta (infotaulu 4, Vranová ym. 2002; Conklin ja Barth 2004). Etyleenin (C_2H_4) muodostuminen on yksi ensimmäisistä tapahtumista signaalinvälityksessä (Sandermann ym. 1998). Etyleeni muodostuu solulimassa metioniinistä ACC-syntaasin ja ACC-oksidaasin katalysoimana. Ilmansaasteet, kuivuus ja mekaaninen vaurioituminen voi aktivoida ACC-syntaasia, johtaen kiihtyneeseen ns. stressietyleenin tuotantoon. Mutanttikasvien avulla on kyetty tunnistamaan useita etyleenireseptoriproteiineja, jotka tunnistavat muodostuneen stressietyleenin ja



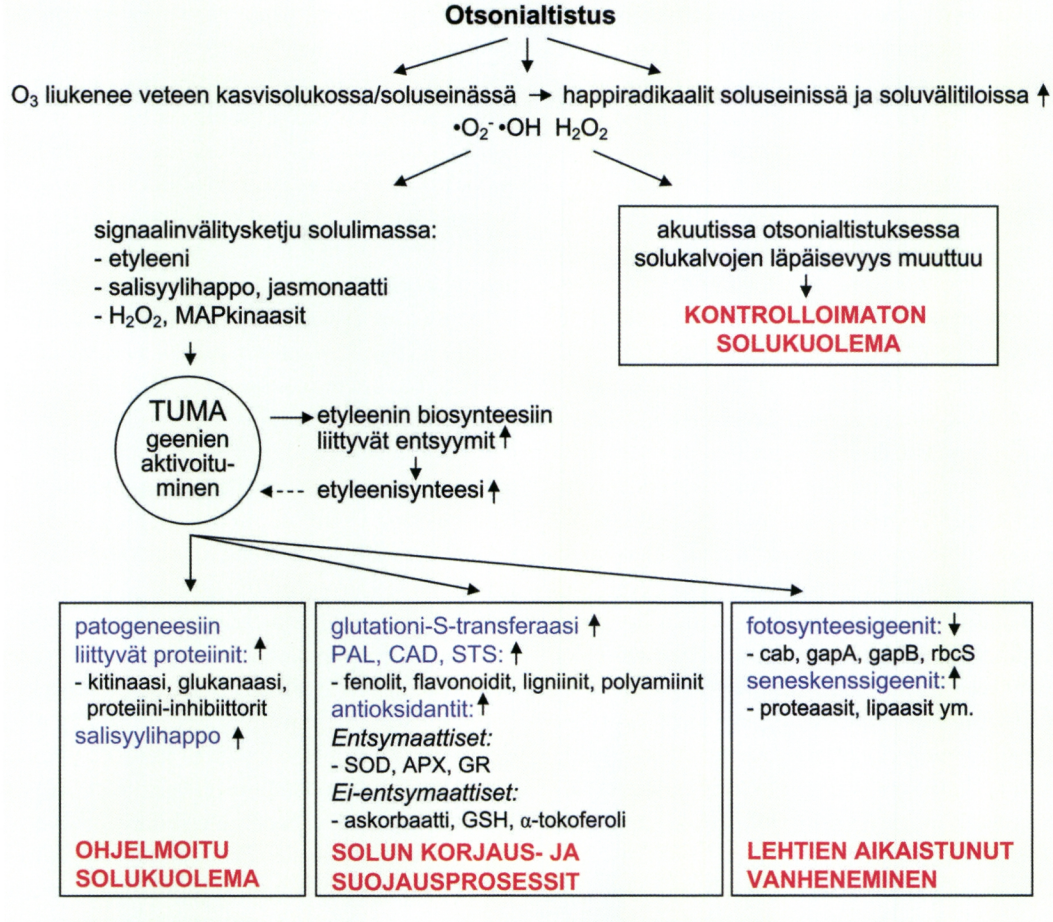
Kuva 1. Oksidatiivisen stressin ilmeneminen kasvisolukossa voidaan todeta spesifisellä värjäyksellä, jossa otsonin hajoamistuotteena syntynyt H_2O_2 näkyy elektronimikroskoopilla tarkasteltuna mustana sakkana (kuvassa soluseinissä).

Infotaulu 3. Sanastoa:

Apoplasti	Kasvisolukon soluvälien ja soluseinien muodostama kokonaisuus
Fotoinhibitio	Fotosysteemi II:n vaurioituminen voimakkaassa valaistuksessa, josta seuraa hiilidioksidin sitoutumisen väheneminen fotosynteesissä
Foto-oksidaatio	Voimakkaan valon aiheuttama kloroplastin rakenteiden hapettuminen
Kutikula	Kasvin maanpäällisiä osia mm. kuivuudelta suojaava vahakerros
Lipidien peroksidaatio	Happiradikaalit hapettavat solukalvon rasvahappoja aiheuttaen soluvaurioita ja lisääntynyttä happiradikaalien tuotantoa
Mesofylli	Lehden ylä- ja alapinnan välissä oleva yhteyttävä perussolukko
Otsonolyysi	Otsoni hapettaa solukalvojen lipidien hiiliatomien välisen kaksoissidoksen. Reaktiossa muodostuva otsonidi hydrolysoituu muodostaen aldehydejä ja vetyperoksidia, joka osaltaan voimistaa oksidatiivista stressiä solukoissa.
Rubisco	Ribuloosi-1,5-bisfosfaatti karboksylaasi/oksygenaasi on entsyymi, joka liittää hiilidioksidia viisihiiliseen sokerifosfaattiin fotosynteesin Calvinin kierrossa.
Sikimihappo	Kasvien orgaaninen happo, joka syntyy hiilihydraateista. Sikimihaposta reaktiotiet johtavat alkaloidien, fenolien ja tanniinien synteeseihin.

inaktivoivat puolestaan etyleeni-inhibiittorina toimivan CTR1-proteiinin. Tämän seurauksena muodostuu säätelyproteiineja, jotka aktivoivat etyleenintuotantoa säätteleviä geenejä. Näin ollen stressietyleeninmuodostus kiihdyttää omaa tuotantoaan. Muodostunut etyleeni yhdessä mm. abskisiinihapon (ABA) kanssa aktivoi useita seneskenssiin liittyviä geenejä (SAG), sekä inaktivoi fotosynteesissä tarvittavien proteiinien synteesiä, etenkin hiilidioksidia sitovan Rubisco-entsyymin pientä alayksikköä (rbsS). Näin ollen, etyleeni edistää lehtien vanhenemista ja varisemista, alentaa fotosynteesiä sekä lisäksi inhiboi solujen pituuskasvua. Etyleenintuotantoa stressitilanteessa (esimerkiksi kuivuus tai altistuminen patogeeneille) on selitetty teorialla, jonka mukaan vanhenemisprosessin kiihtyessä kasvi pystyy nopeasti siirtämään ravinteita lehdistä varastoelimiin tai siemeniin. Etyleenintuotanto yhdessä salisyylihapon (SA) ja jasmonihapon (JA) kanssa on osallisena ns. yleisten puolustusreaktioiden aktivoitumiseen. Näitä säätelyreittejä ei vielä täysin tunneta. Positiivisen roolin ohella etyleenin on todettu myös aiheuttavan lehtivaurioiden muodostumista. Etyleenin,

Infotaulu 4. Otsonin mahdolliset vaikutusmekanismit kasvisolussa (Pell ym. 1997 mukailtuna):



Fotosynteesigeenit: Klorofylli a/b-proteiini, cab; Glyseraldehydi-3-fosfaatti dehydrogenaasi, gap; Rubiscon pieni alayksikkö, rbcS. Lyhenteet – SOD, superoksididismutaasi; APX, askorbaattiperoksidaasi; GR, glutationireduktaasi; GHS, Glutationi; PAL, fenyylialaniiniammoniumlyaasi; CHS, kalkonisyntaasi; STS, stibeenisyntaasi.

SA:n ja JA:n lisäksi myös happiradikaalit, etenkin H_2O_2, toimivat tärkeänä osana signaalinvälityksessä.

Lievittääkseen tai estääkseen oksidatiivisia soluvauroita, kasvit muodostavat erilaisia antioksidantteja (Podila ym. 2001). Antioksidantit ovat joko entsymaattisia tai ei-entsymaattisia pienimolekyylisiä puolustusyhdisteitä (infotaulu 4). Ensimmäinen puolustus otsonia vastaan tapahtuu jo soluseinässä, jossa etenkin askorbaatti ja glutationi katalysoivat happiradikaalien hajottamista vaarattomaan muotoon (Podila ym. 2001, Conklin ja Barth 2004). Otsonin detoksifikaatioteho soluseinässä riippuu pääosin soluseinän paksuudesta ja askorbaattikonsentraatioista: laskelmien mukaan ohut soluseinä, jonka paksuus on 0,3–0,5 mm ja askorbaattikonsentraatio 0,5 m*M*, päästää 30-50 % otsonista lävitseen, kun taas 1 mm paksuinen soluseinä, jonka askorbaattikonsentraatio on 1 m*M*, pysyy hajottamaan otsonin lähes kokonaan (Moldau 1998).

Antioksidanttien ohella otsoni aktivoi muitakin yleisiä puolustusyhdisteitä, kuten patogeneesiin liittyviä (PR) proteiineja (infotaulu 4). PR-proteiinit ovat keskeisiä hypersensitiivisen reaktion (HR = hypersensitive reaction) muodostuksessa sekä systeemisen hankitun kestävyyden muodostuksessa (SAR = systemic acquired resistance). Hypersensitiivisessä reaktiossa vauriokohtaa ympäröivät solut kuolevat muodostaen nekroottisen solukon, jonka tarkoituksena on estää esimerkiksi patogeeni-infektion leviäminen ja näin ollen rajata infektio mahdollisimman pienelle alueelle. HR voi myös indusoida ympäröivissä soluissa ligniininmuodostusta, joka lujittaa soluseiniä estäen patogeenin etenemistä. SAR-reaktiossa vaurioituneet solut puolestaan lähettävät ennen kuolemistaan signaalin (salisyylihappo), joka leviää kaikkialle kasviin. Tämän seurauksena aktivoituu useita päiviä kestävä ei-spesifinen puolustus koko kasvin tasolla. (Ebel ja Mithöfer 1998).

Otsoni kiihdyttää useiden sekundaariaineenvaihduntaan kuuluvien yhdisteiden synteesiä, kuten fenoliyhdisteet, flavonoidit, stilbeenit, ligniinit ja polyamiinit (Dizengremel 2001). Nämä yhdisteet syntetisoidaan *sikimihappo*reittiä, jossa keskeisenä entsyyminä toimii fenyylialaniiniammoniumlyaasi (PAL). PAL-entsyymin aktiivisuuden kasvu on tyypillistä useille erilaisille stressitilanteille, kuten patogeeni-infektioille, kuivuudelle ja oksidatiiviselle stressille. Muita stressitilanteissa aktivoituvia entsyymejä ovat mm. stilbeenisyntaasi (STS) ja kalkonisyntaasi (CHS). Aktiivisuuden lisäys kyseisillä entsyymeillä johtuu pääasiassa lisääntyneestä transkriptiosta, eli geenien aktivoitumisesta. Polyamiinien (etenkin putreskiini) tehtävä otsonistressissä on suojata solukalvojen lipidejä otsonin hapettavalta vaikutukselta.

Otsoni alentaa fotosynteesitasoa ja hiilensidontaa

Fotosynteesin nopea aleneminen otsonialtistuksessa on tyypillistä metsäpuille, ja usein alentunut fotosynteesi onkin ainoa fysiologinen vaste kroonisessa altistuksessa. Otsonin on todettu voivan estää tai haitata lähes kaikkia fotosynteesiin kuuluvia reaktioita valoreaktioista hiilidioksidin sidontaan ja tärkkelyksen muodostumiseen asti (Dizengremel 2001). Minkä tahansa reaktion hidastuminen heikentää valoenergian siirtymistä kemialliseen muotoon (sokereiksi) ja lisää elektroninsiirtoketjun ylipelkistymisen vaaraa voimakkaassa valossa. Tällöin muodostuu ylimääräisiä happiradikaaleja, jotka ovat tuhoisia soluille aiheuttaen *fotoinhibitio*ta sekä *foto-oksidaatio*ita, jonka seurauksena lehden yläpinnalle voi muodostua vaaleita laikkuja (= chlorophyll bleaching, kuva 2). Otsoni alentaa usein valonkeruussa toimivien klorofylli a:n ja klorofyllin b:n määrää joko vähentämällä niiden synteesiä tai nopeuttamalla niiden hajoamista. Entsymaattisista reaktioista parhaiten tunnetaan otsonin vaikutus hiilen sidonnassa keskeiseen *Rubisco*-entsyymiin. Otsoni pystyy alentamaan myös Rubiscon määrää joko alentamalla sen synteesiä tai nopeuttamalla hajoamista. Rubiscon aktiivisuuden väheneminen kohotetussa otsonipitoisuudessa puolestaan voi johtua mm. Rubisco aktivaasi- proteiinin määrän vähenemisestä tai sen lähetti-RNA:n hajoamisesta tai alentuneesta synteesistä. Lisäksi otsonin aiheuttamat muutokset monissa muissa säätelyproteiineissa, kuten proteaaseissa, voivat johtaa muutoksiin Rubiscon toiminnassa (Dizengremel 2001). Rubiscon toimin-

nan heikentyessä hiilidioksidia alkaa kertyä mesofyllisolukkoon, jonka seurauksena ilmaraot sulkeutuvat ja hiilidioksidin sisäänvirtaus vähenee, johtaen lopulta fotosynteesitason alenemiseen. Myös otsonin suora hapettava vauriovaikutus ilmarakosolujen solukalvojen toimintaan (mm. K^+ kuljetus) on mahdollista korkeissa pitoisuuksissa. Vuotuista fotosynteesituotantoa alentaa luonnollisesti myös lehden/neulasen lyhentynyt elinikä (Andersen 2003).

Kasvun väheneminen suomalaisilla metsäpuilla

Fotosynteesin heikkeneminen johtaa väistämättä kasvun vähenemiseen. Kasvutappioissa on paljon lajienvälistä, paikallista, ajallista ja ympäristöolosuhteista riippuvaa vaihtelua, mutta sen arvioidaan olevan metsäpuilla jopa 10 % luokkaa (Chappelka ja Samuelson 1998, Matyssek ja Innes 1999). Suomessa otsonin metsävaikutuksia on tutkittu eniten rauduskoivulla (*Betula pendula* Roth). Avokentällä suoritetuissa realistisissa kokeissa (keskimäärin 1,5 x taustan otsonipitoisuus) otsonin on todettu alentavan koivun rungon kuivapainoa 23-30 %, juuren kuivapainoa 8-75 %, pituuskasvua 17 % ja lehvästön kasvua 11-45 % (Oksanen 2003). Taimikokeissa otsoniherkkyyden on todettu olevan suuresti riippuvainen genotyypistä (Pääkkönen ym. 1997). Kuitenkin pitkäaikaisissa, jopa 7 kasvukautta kestäneissä kenttäkokeissa havaittiin negatiivisten otsonivaikutusten kumuloituvan myös kestävillä klooneilla, johtaen lopulta 38 % alempaan kokonaisbiomassaan. Alustavat tulokset kotimaisen haavan ja hybridihaavan otsonialtistuksista osoittavat myös näiden lajien olevan herkkiä kohoavalle otsonipitoisuudelle. Yleisesti ottaen lehtipuut ovatkin herkempiä otsonille kuin hidaskasvuisemmat havupuut, mikä on havaittu myös altistettaessa mäntyä (*Pinus sylvestris*) ja kuusta (*Picea abies*) vastaavanlaisille otsonipitoisuuksille (Utriainen ym. 2000, Utriainen ja Holopainen 2001). Näissä alle 3 kasvukautta kestäneissä altistuksissa lievä kasvun väheneminen (5-10 %) alkoi näkyä vasta kokeen loppuvaiheessa. Yleisenä ongelmana metsäpuiden kanssa työskenneltäessä onkin kokeiden lyhytaikaisuus verrattuna puiden pitkään elinikään.



Kuva 2. Otsonin aiheuttamia lehtivaurioita kotimaisella hybridihaavalla elokuussa. Lehtivaurioiden synty liittyy fotosynteesitehon laskuun ja happiradikaalien muodostukseen valoreaktioissa.

Muutokset hiilen allokaatiossa voivat altistaa puun muille stressitekijöille

Kasvun heikkenemisen lisäksi otsonialtistus muuttaa herkästi hiilen allokaatiota, eli hiilivarojen jakautumista eri kasvinosien välillä (Andersen 2003). Tyypillisesti hiilen pidättyminen lehtiin kasvaa ja kulkeutuminen juuriin heikkenee. Lehtiin kertyvät hiilihydraatit (tärkkelys ja liukoiset sokerit) inhiboivat fotosynteesiä lopputuote-säätelyn kautta. Monissa yhteyksissä otsonin on todettu inhiboivan energiaa vaativaa nilalastausta (phloem loading), jossa hiilihydraatit kuljetaan sakkaroosimuodossa kasvupisteeseen, ei-fotosynteettiseen solukkoon (juuret), varastoelimiin, hedelmiin tai siemeniin. Juurten kasvu heikkenee hyvin nopeasti hiiliyhdisteiden saannin vähentyessä. Mikäli lehtibiomassa kasvaa suhteessa juuristoon on uhkana altistuminen kuivuudelle, koska haihduttava pinta-ala kasvaa suhteessa vedenottopinta-alaan. Juuriston heikkeneminen johtaa helposti myös ravinnepuutoksiin, puun yleiskunnon heikkenemiseen ja siten kasvavaan alttiuteen patogeeni- ja hyönteistuhoille (Andersen 2003).

Hiilidioksidin vaikutusmekanismit

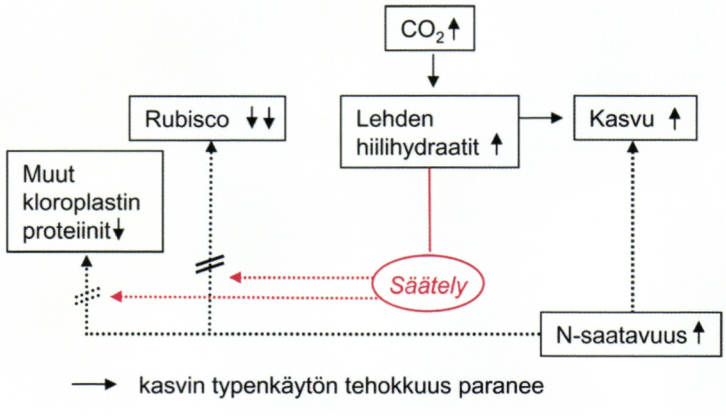
Hiilidioksidin lisäys kiihdyttää fotosynteesiä mutta voi johtaa akklimaatioon

Vallitseva ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on fotosynteesiä rajoittava tekijä, joten hiilidioksidipitoisuuden lisäys johtaa yleensä fotosynteesitason nousuun ja lisääntyneeseen biomassan kasvuun olosuhteissa, joissa ravinteita, vettä ja valoa on riittävästi käytettävissä (Nowak ym. 2004). Koska hiilidioksidi toimii substraattina Rubisco-entsyymille, sen lisäys näkyy hiilen sidonnan kasvuna. Lisäksi hiilidioksidipitoisuuden lisäys vähentää valohengitys-toimintoon liittyvän Rubiscon oksygenaasiaktiivisuutta CO_2/O_2-suhteen kasvaessa. Useissa tutkimuksissa puiden on todettu jossain määrin akklimoituvan (sopeutuvan) kohonneeseen hiilidioksidipitoisuuteen alentamalla fotosynteesitasoa (downregulation) etenkin olosuhteissa, joissa ravinteiden ja veden määrä on rajallinen (infotaulu 5, Moore ym. 1999). Fotosynteesin alasajo voidaan todeta vertaamalla kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa ja vallitsevassa hiilidioksidipitoisuudessa kasvaneiden kasvien fotosynteesivauhtia jälkimmäisissä olosuhteissa. Fotosynteesin alasajo voidaan selittää ainakin kahdella tavalla: ensiksi, kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa tarvitaan vähemmän Rubisco-entsyymiä tietyn fotosynteesitason ylläpitämiseksi. Rubisco sisältää jopa 25 % lehden kokonaistypestä, joten Rubiscon määrän alentuessa typpeä vapautuu kasvin muissa prosesseissa käytettäväksi. Usein kohotetussa hiilidioksidissa lehden N-pitoisuus onkin laskenut Rubiscon myötä, ja lisäksi lehtibiomassan lisääntynyt tuotanto johtaa N-pitoisuuden laimenemiseen. Toinen fotosynteesin alasajoa selittävä tekijä on hiilihydraattien kertyminen lehtiin. Kertymistä tapahtuu, mikäli kasvavien osien ja juurten (nielu) kasvua rajoittaa esimerkiksi veden tai ravinteiden saanti tai alhainen lämpötila. Hiilihydraattien kertyminen lehtiin aiheuttaa useita negatiivisia säätelyprosesseja, joista seuraa mm. useiden fotosynteettisten geenien aktiivisuuksien aleneminen. Hiilen sidonnan lisäksi hiilidioksidi vaikuttaa myös valoreaktioihin. Klorofyllipitoisuus laskee usein kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa, ja lisäksi vaikutuksia on todettu myös valoa vastaanottavan fotosysteemi II:n toiminnassa.

Fotosynteesitason kasvu johtaa yleensä biomassan lisääntyminen

Useissa kokeissa kasvun kiihtyminen kohotetun hiilidioksidipitoisuuden seurauksena on ollut ilmeistä vain ensimmäisinä altistusvuosina, vähentyen kokeen loppua kohden. Kasvuvasteet riippuvat voimakkaasti puun kehitysvaiheesta, puuston tiheydestä, ravinteiden saatavuudesta, valon ja veden määrästä, sekä puun geneettisistä ominai-

Infotaulu 5. Periaatteellinen esitys fotosynteesin sopeutumisesta kohonneeseen CO_2-pitoisuuteen (Drake ym. 1997 mukailtuna):



suuksista (Nowak ym. 2004). Kohotettu hiilidioksidipitoisuus lisää tyypillisesti lehtipinta-alaa joko kasvattamalla yksittäisen lehden kokoa tai lisäämällä lehtien määrää. Juurten kasvua kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa on tutkittu vähän, mutta alustavien tutkimusten mukaan ravinteiden ja veden saatavuudesta voi tulla nopeasti kasvua rajoittava tekijä.

Lehden ja soluseinän rakenne muuttuu kohoavassa hiilidioksidipitoisuudessa

Kohotettu hiilidioksidipitoisuus lisää yleensä lehden paksuutta, mikä aiheutuu suurentuneesta solukoosta, solujen määrän lisäyksestä, solukerrosten lisääntymisestä ja tärkkelyksen määrän kasvusta mesofyllissä (Taylor ym. 2001). Haavalla on todettu myös soluvälitilan kasvavan hiilidioksidialtistuksessa. Solukkorakenteen lisäksi kohotettu hiilidioksidipitoisuus muuttaa soluseinän rakennetta: ligniinin, selluloosan ja hemiselluloosan määrien on todettu muuttuvan, mikä voi johtaa muutoksiin tuhohyönteisten ja sieni-patogeenien esiintymisessä. Esimerkiksi koivulla todettiin hemiselluloosan lisääntyvän ja α-selluloosan sekä ligniinin vähenevän kohotetussa hiilidioksidissa kasvaneilla puilla (Oksanen ym. 2005).

Ilmarakokonduktanssi alenee kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa

Useissa avokenttäkokeissa ilmarakokonduktanssin on havaittu alenevan kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa. Meta-analyysissä, jossa aineisto oli kerätty 13:sta eri kenttäkokeesta, ilmarakokonduktanssi aleni metsäpuilla keskimäärin 21 % (Medlyn ym. 2001). Pääasiallisena syynä hiilidioksidin aiheuttamaan ilmarakokonduktanssin alenemiseen on ilmarakojen sulkeutuminen, vaikka eräissä kokeissa myös ilmarakojen määrä on ollut alhaisempi kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa. Alentuneesta ilmarakokonduktanssista ja lisääntyneestä fotosynteesistä johtuen puiden veden käytön tehokkuus (fotosynteesi/haihdutus) kasvaa. Tämä voi parantaa tulevaisuudessa puiden kuivuudensietokykyä. Toisaalta, lisääntynyt lehtipinta-ala voi lisätä veden haihtumista koko puun tasolla, jolloin puiden vesitalous ei välttämättä parane (Poorter ja Navas 2003).

UV-säteilyn vaikutusmekanismit

UV-B -säteily vahingoittaa solun makromolekyylejä

Lisääntyvä UV-säteily vaikuttaa ensisijaisesti nukleiinihappoihin (DNA ja RNA) sekä proteiineihin, etenkin Rubiscoon. UV-B -säteilyn reagoidessa DNA-molekyylin kanssa, muodostuu toksisia ja mutageenisia yhdisteitä, kuten syklobutaanipyrimidiini-dimeerejä. Vaikka kasveilla on tehokkaita korjausmekanismeja DNA-vaurioiden korjaamiseen (mm. DNA fotolyaasi-entsyymi), voi proteiinisynteesi hidastua UV-B -säteilyn vaikutuksesta. UV-B -säteilyn seurauksena solukossa muodostuu myös happiradikaaleja sekä peroksideja, jotka voivat hapettaa klorofylliä sekä lipidiyhdisteitä (Jordan 1996).

Fysiologisella tasolla UV-B -säteilyn on todettu alentavan fotosynteesitasoa, ilmarakojohtavuutta ja veden käytön tehokkuutta, pienentävän lehtialaa ja biomassan tuotantoa, sekä aiheuttavan muutoksia juuri-verso -suhteissa, kasvien välisessä kilpailussa ja kukinnassa, millä puolestaan voi olla vaikutuksia hyönteispopulaatioiden esiintymiseen (Runeckles ja Krupa 1994).

Kasvi puolustautuu UV-säteilyä vastaan fenoliyhdisteiden ja rakennemuutosten avulla

Kasvit puolustautuvat UV-säteilyä vastaan nopeasti tuottamalla UV-säteilyä suodattavia fenoliyhdisteitä, kuten flavonoideja, jotka kertyvät etenkin lehden yläpinnan solukkoon. Esimerkiksi koivulla UV-B -säteilyn on todettu aiheuttavan mm. lisääntynyttä (+)-katekiinin, kanelihappojohdannaisten ja apigeniinin tuotantoa vasteena lisääntyneelle *lipidien peroksidaatio*lle (Kostina ym. 2001). Pidempiaikaisessa altistuksessa fenolipuolustuksen todettiin muuttuvan altistuksen jatkuessa (Tegelberg ym. 2001); toisena altistusvuonna fenolihappojen merkitys lisääntyi, ja kolmantena

altistusvuonna fenolisen puolustuksen merkitys väheni. Luonnossa flavonoideilla on todettu olevan tärkeä merkitys koivun silmujen ja kehittyvien lehtien suojaamisessa voimakkaalta, keväiseltä UV-säteilyltä (Laitinen ym. 2002). UV-säteilyä suodattavien fenoliyhdisteiden ansioista epidermin läpi tunkeutuvan UV-B -säteilyn on mitattu olevan havupuiden neulasissa lähes olematonta, leveälehtisillä puilla 3-12 %, ja ruohovartisilla kasveilla 18-41 % (Day ym. 1992). Samoin kuin koivulla, myös pajulla (*Salix myrsinifolia*) flavonoidien ja fenolihappojen lisääntyminen on tyypillinen suojareaktio UV-B -säteilyä vastaan (Tegelberg ja Julkunen-Tiitto 2001). Fenoliyhdisteiden lisäksi kasvien tuottamat antioksidanttiset entsyymit kuten superoksididismutaasi ja katalaasi suojaavat kasvia UV-B -säteilyn hapettavalta vaikutukselta.

Kemiallisen puolustuksen lisäksi kasvit puolustautuvat UV-säteilyä vastaan muuttamalla lehden rakennetta. Lehden paksuuntuminen ja yläpinnan epidermisolukon paksuuntuminen vähentää lehden sisäosien altistumista UV-säteilylle (Kostina ym. 2001). Myös vaharakenteiden ja valoa heijastavien karvojen lisääntyminen lehden yläpinnalla vähentää UV-säteilyn tunkeutumista solukkoon.

Kuten kohoava otsoni ja hiilidioksidi, myös UV-B -säteily vaikuttaa geenien ilmenemiseen. UV-B -säteilyn on todettu lisäävän mm. flavonoidisynteesin säätelyssä keskeisiä PAL- ja CHS-entsyymejä koodaavien geenien aktiivisuutta. Fenolituotannon lisäksi UV-säteily muuttaa fotosynteesiin, lisääntymiseen ja kasvuun liittyvää geenitoimintaa.

Yhteenveto

Aktiivinen tutkimus useiden ilmastonmuutostekijöiden suhteen on osoittanut, että suorien vaikutusten lisäksi muuttuvat olosuhteet voivat muuttaa useiden erilaisten geenien toimintaa metsäpuilla. Nämä geenimuutokset johtavat muutoksiin puun metaboliassa, sekä lopulta muutoksiin koko ekosysteemin toiminnassa (mm. haihdutus, hiilen kulku). Ilmastonmuutoksen erilaiset komponentit, kuten otsoni, hiilidioksidi ja UV-B -säteily, vaikuttavat luonnossa yhtäaikaisesti eivätkä erillisinä tekijöinä. Näin ollen lisääntyvä tarve yhdysvaikutustutkimusten tekemiselle on ilmeistä. Lisäksi tutkimusten tulisi olla metsäpuiden osalta yhä pidempiaikaisia, jotta todelliset, sopeuttavat tai kertyvät vaikutukset saataisiin esille.

Kirjallisuus

Andersen, C.P. 2003. Source-sink balance and carbon allocation below ground in plants exposed to ozone. New Phytologist 157: 213-228.

Chappelka, A.H. & Samuelson, L.J. 1998. Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States. New Phytologist 139: 91-108.

Conklin, P.L. & Barth, C. 2004. Ascorbic acid, a familiar small molecule intertwined in the response of plants to ozone, pathogens, and the onset of senescence. Plant, Cell & Environment 27: 959-970.

Day, T.A., Vogelmann, T.C. & DeLucia, E.H. 1992. Are some plant life forms more effective than others in screening out ultraviolet-B radiation. Oecologia 92: 513-519.

Dizengremel, P. 2001. Effects of ozone on the carbon metabolism of forest trees. Plant Physiology and Biochemistry 39: 729-742.

Drake, B.G., Gonzàlez-Meler, M.A. & Long, S.P. 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmosperic CO_2? Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 48: 609-639.

Ebel, J.& Mithöfer, A. 1998. Early events in the elicitation of plant defence. Planta 206: 335-348.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis: URL: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/, Impacts, Adaptation and Vulnerability.

Jordan, B.R. 1996. The effects of ultraviolet-B radiation on plants: a molecular perspective. Julkaisussa: Callow, J.A. (toim.) Advances in Botanical Research, Vol 22. Academic Press. New York. s. 97-162.

Kostina, E., Wulff, A. & Julkunen-Tiitto, R. 2001. Growth, structure, stomatal responses and secondary metabolites of birch seedlings (*Betula pendula*) under elevated UV-B radiation in the field. Trees 15: 483-491.

Laitinen, M.-L., Julkunen-Tiitto, R. & Rousi, M. 2002. Foliar phenolic composition of European white birch during bud unfolding and leaf development. Physiologia Plantarum 114: 450-460.

Long, S.P. & Naidu, S.L. 2002. Julkaisussa: Bell, J.N.B. & Treshow, M. (toim.) Air Pollution and Plant Life. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. s. 69-88.

Matyssek, R. & Innes, J.L. 1999. Ozone – a risk factor for trees and forests in Europe? Water, Air and Soil Pollution 116: 1999-226.

Matyssek, R. & Sandermann, H. Jr. 2003. Impact of ozone on trees: and ecophysiological perspective. Julkaisussa: Esser, K., Lüttge, U., Beyschlag, W., Wellwig, F. (toim.) Progress in Botany, Vol 64. Springer-Verlag. Berlin. s. 349-404.

Medlyn, B.E., Rey, A., Barton, C.V.M. & Forstreuter, M. 2001. Above-ground growth responses of forest trees to elevated atmospheric CO_2 concentrations. Julkaisussa: Karnosky, D.F., Ceulemans, R., Scarascia-Mugnozza, G.E. & Innes, J.L. (toim.) The Impact of Carbon Dioxide and Other Greenhouse Gases on Forest Ecosystems. CABI Publishing. Oxfordshire. s. 127-146

Moldau, H. 1998. Hierarchy of ozone scavenging reactions in plant cell wall. Physiologia Plantarum 104: 617-622.

Moore, B.D., Cheng, S.-H., Sims, D. & Seeman, J.R. 1999. The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO_2. Plant, Cell and Environment 22: 567-582.

Nowak, R.S., Ellsworth, D.S. & Smith, S.D. 2004. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO_2 – do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions. Tansley review. New Phytologist 162: 253-280.

Oksanen, E. 2003. Responses of selected birch (*Betula pendula*) clones to ozone change over time. Plant, Cell & Environment 26: 875-886.

Oksanen, E., Riikonen, J., Kaakinen, S., Holopainen,. & Vapaavuori, E. 2005. Structural characteristics and chemical composition of birch (*Betula pendula*) leaves are modified by increasing and CO_2 and ozone. Global Change Biology 11: 732-748.

Pell, E.J., Schlagnhaufer, C.D. & Arteca R.N. 1997. Ozone-induced oxidative stress: Mechanisms of action and reaction. Physiologia Plantarum 100: 264-273.

Podila, G.K., Paolacci, A.R. & Badiani, M. 2001. The impact of greenhouse gases on antioxidants and foliar defence compounds. Julkaisussa: Karnosky, D., Ceulemans, R., Scarascia-Mugnozza, G.E. & Innes, J.L. (toim.) The Impact of Carbon Dioxide and Other Greenhouse Gases on Forest Ecosystems. CABI Publishing. Oxfordshire. s. 57-125.

Poorter, H. & Navas, M.-L. 2003. Tansley review, Plant growth and competition at elevated CO_2:on winners, losers and functional groups. New Phytologist 157: 175-198.

Pääkkönen, E., Holopainen, T. & Kärenlampi, L. 1997. Variation in ozone sensitivity of *Betula pendula* and *Betula pubescens* clones from southern and central Finland. Environmental Pollution 95: 37-44.

Runeckles, V.C. & Krupa, S.V. 1994. The impact of UV-B radiation and ozone on terrestrial vegetation. Environmental Pollution 83: 191-213.

Sandermann, Jr. H., Ernst, D., Heller, W. & Langebartels, C. 1998. Ozone: an abiotic elicitor of plant defence reactions. Trends in Plant Science 3: 47-50.

Taylor, G., Ceulemans, R., Ferris, R., Gardner, S.D.L. & Shao, B.Y. 2001. Increased leaf area expansion of hybrid poplar in elevated CO_2. From controlled environments to open-top chambers and to FACE. Environmental Pollution 115: 463-472.

Tegelberg, R. & Julkunen-Tiitto, R. 2001. Quantitative changes in secondary metabolites of dark-leaved willow (*Salix myrsinifolia*) exposed to enhanced ultraviolet-B radiation. Physiologia Plantarum 113: 541-547.

Utriainen, J., Janhunen, S., Helmisaari, H.-S. & Holopainen, T. 2000. Biomass allocation, needle structural characteristics and nutrient composition in Scots pine seedlings exposed to elevated CO_2 and O_3 concentrations. Trees 14: 475-484.

Utriainen, J. & Holopainen, T. 2001. Influence of nitrogen and phosphorus availability and ozone stress on Norway spruce seedlings. Tree Physiology 21: 447-456.

Vranová, E., Inzé, D. & Van Breusegem, F. 2002. Signal transduction during oxidative stress. Journal of Experimental Botany 53: 1227-1236.

Metsäpuiden kasvu ja ilmastonmuutos – männyn fysiologisia ja ekologisia vasteita kohoavaan ilman lämpötilaan ja hiilidioksidipitoisuuteen

Seppo Kellomäki ja Heli Peltola

Tausta

Ilmasto luo perusedellytykset metsien levinneisyydelle ja kehittymiselle. Metsäekosysteemin dynamiikka (puiden syntyminen, kasvu, kuoleminen) kytkeytyy kiinteästi ilmastoon: auringon energia ja säätekijät (säteily, lämpö, sade, tuuli jne.) pitävät yllä ja ohjaavat aineskiertoja (ravinnekierto, vedenkierto) ja energian sitoutumista puustoon ja koko metsäekosysteemiin. Keskeisessä asemassa on yhteyttäminen (fotosynteesi), jossa puut sitovat ilmakehästä hiilidioksidia (CO_2) kasvuun, elintoimintojen raaka-aineeksi ja energianlähteeksi. Fotosynteesinopeuteen vaikuttaa se, miten lehtien ja neulasten soluväleihin virtaa hiilidioksidia ilmakehästä ilmarakojen kautta ja kuinka nopeasti soluväleihin virrannut hiilidioksidi sitoutuu yksinkertaisiksi hiiliyhdisteiksi (CHO, kuva 1). Molemmissa tapauksissa säätekijät vaikuttavat yhteyttämisnopeuteen. Toisaalta ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kohoaminen ja ilmaston lämpeneminen voivat myös muuttaa puiden fysiologisia vasteita, eli puut voivat sopeutua muuttuneisiin olosuhteisiin. Tämän vuoksi ilmastonmuutoksen vaikutuksia puiden aineenvaihduntaan ja elintoimintoihin ei voida johtaa pelkästään puiden välittömistä vasteista lämpötilaan ja ilman hiilidioksidipitoisuuteen.

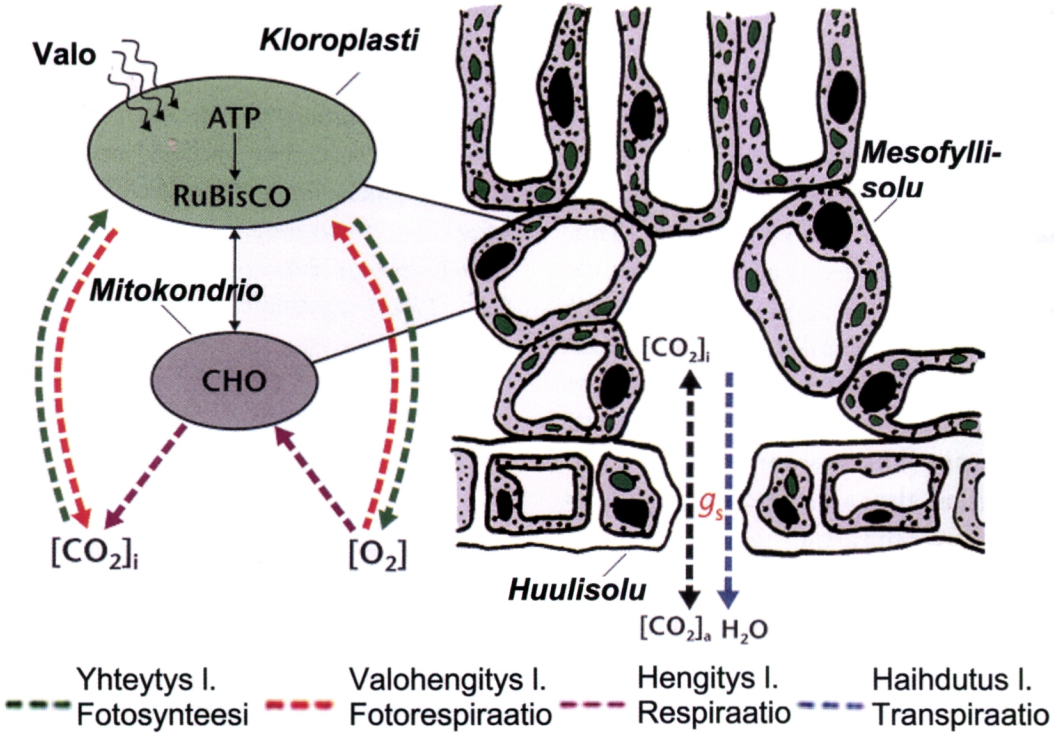
Fotosynteesissä tapahtuva hiilidioksidin sidonta on alku hiilen kierrolle metsäekosysteemissä. Yhteyttämiseenkin kuluu energiaa ja sen seurauksena hiiltä vapautuu ilmakehään, mutta pääosan hiilestä puut käyttävät kuitenkin kasvuun sekä ylläpito- ja kasvuhengitykseen. Lämpötila vaikuttaa puiden fotosynteesin, hengityksen (respiraatio) ja kasvun nopeuksiin, joten ilmaston lämpeneminen vaikuttaa tätä kautta välittömästi metsäekosysteemin dynamiikkaan. Fotosynteesin tavoin myös hengitys voi sopeutua vallitseviin olosuhteisiin. Tällainen jousto elintoiminnoissa muuttaa puiden vasteita ja pitkällä aikavälillä myös metsäekosysteemin dynamiikkaa.

Puut tarvitsevat vettä yhteyttämiseen ja kasvuun. Vettä haihtuu avoimien ilmarakojen kautta ilmakehään (transpiraatio), sillä maan ja ilmakehän välinen vesihöyryn paine-ero kuljettaa vettä maasta lehtiin ja neulasiin. Haihtuminen sellaisenaan on fysikaalinen ilmiö, jonka nopeus riippuu mm. neulasten saaman säteilyn määrästä ja ilman kosteudesta. Transpiraationopeus on kytköksissä myös ilmarakojen määrään ja avautumiseen, joten transpiraation ja ilmastonmuutoksen yhteys muodostuu monimutkaisemmaksi kuin pelkästään haihdunnan ja mikroilmaston välisen suhteen perusteella voitaisiin päätellä. Myös puiden vedenkäyttö näyttää sopeutuvan ilmastonmuutokseen, sillä korkeassa hiilidioksidipitoisuudessa puiden on havaittu yhteyttävän jokaista vesigrammaa kohti enemmän kuin alhaisessa pitoisuudessa.

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä, miten männyn fysiologisia ja ekologisia vasteita on tutkittu suhteessa kohoavaan ilman lämpötilaan ja hiilidioksidipitoisuuteen, ja miten ne vaikuttavat männyn fotosynteesiin, hengitykseen ja transpiraatioon. Pohdintaa raamittaa infotaulussa 1 esitelty biokemiallinen fotosynteesimalli (vrt. myös kuva 1), jota käytetään yleisesti monissa metsien kasvuun ja kehitykseen liittyvissä ekologisissa malleissa. Tämän luvun tekstiin voi kuitenkin paneutua ilman infotauluun perehtymistäkin.

Mekrijärven kenttäkokeessa tutkittiin männyn fysiologisia ja ekologisia vasteita ilmastonmuutokseen

Metsäpuiden reagointia ja sopeutumista kohotettuun hiilidioksidipitoisuuteen on viime vuosikymmenellä tutkittu erilaisten kammiokokeiden avulla. Varsinkin Euroopassa oli useita tällaisia kokeita, sillä Euroopan Unioni rahoitti alan tutkimusta 1990-luvulla. Myös Suomessa tehtiin tällaisia kokeita, joista pisimpään ovat jatkuneet Joensuun yliopiston Mekrijärven tutkimusaseman lähistölle perustetut kenttäkokeet. Hanke sai alkunsa Suo-



Kuva 1. Periaatekaavio hiilidioksidin oton, yhteyttämisen ja hengityksen sekä transpiraation suhteista, jotka kytkevät puiden aineenvaihdunnan ja elintoiminnot ilmastonmuutokseen. Ilmakehästä ilmarakojen kautta lehden soluväleihin virtaa hiilidioksidia, joka sitoutuu yksinkertaisiksi hiiliyhdisteiksi (CHO) fotosynteesireaktioissa viherhiukkasten sitoman valoenergian avulla. Toisaalta ilmaraoista haihtuu vettä ilmakehään (transpiraatio) nopeudella, joka riippuu ilmarakojen avautumisen suuruudesta. Fotosynteesin ja transpiraation suhteita ja näiden prosessien riippuvuutta ilmastotekijöistä on tarkennettu infotaulussa 1.

men Akatemian rahoittamassa Silmu-tutkimusohjelmassa, joka oli ensimmäinen laaja, Suomessa toteutettu monitieteinen ilmastonmuutoksen vaikutuksiin paneutunut tutkimusohjelma.

Mekrijärven kenttäkokeen ensimmäisessä vaiheessa (1991-1995) käytettiin avokattokammioita ja toisessa vaiheessa (1996-2002) suljettuja kammioita (infotaulu 2). Molemmissa tapauksissa hiilidioksidipitoisuutta ja lämpötilaa kohotettiin yksinään tai yhdessä siten, että käsittelyt tois-

Infotaulu 1. Mekrijärven kammiokokeen fotosynteesimittausten analyysissä sovelletun biokemiallisen fotosynteesimallin tärkeimpiä ominaisuuksia.

Mekrijärven kammiokokeen fotosynteesimittausten analyysissä käytettiin hyväksi Farquharin ym. (1982) kehittämää biokemiallista mallia, jonka keskeisten parametrien arvoja estimoitiin kammiokokeen avulla. Mallissa fotosynteesinopeus neulasten pinta-alaa kohti lasketaan kahdella tavalla, joista pienimmän arvoa käytetään fotosynteesinopeuden arvona:

$$A_n = \min(A_c, A_q) - R_{day} \quad (1)$$

Yhtälössä (1) A_n on käytettäväksi valittu bruttofotosynteesinopeus [µmol m^{-2} s^{-1}] sekä A_c and A_q ovat bruttofotosynteesinopeuksia, joista edellinen edustaa hiilidioksidin saatavuuden (tai Rubisco-entsyymin aktiivisuuden) rajoittamaa fotosynteesinopeutta ja jälkimmäinen valon saatavuuden (tai Rubisco-entsyymin uudistumisnopeuden) rajoittamaa fotosynteesinopeutta. Muuttuja R_{day} [µmol m^{-2} s^{-1}] ilmaisee puolestaan hiilidioksidin vapautumista valohengityksessä, eli fotorespiraatiossa. Hiilidioksidin saatavuuden rajoittama bruttofotosynteesinopeus voidaan ilmaista yhtälöllä:

$$A_c = \frac{V_{cmax}(C_{in} - \Gamma_*)}{C_{in} + K_c(1 + O_i / K_o)} \quad (2)$$

missä V_{cmax} [µmol m^{-2} s^{-1}] ilmaisee hiilen sitoutumisen maksiminopeutta, kun Rubisco-entsyymiä ja hiilidioksidia on tarjolla runsaasti. Muuttuja C_{in} ilmaisee hiilidioksidipitoisuutta soluväleissä [µmol mol^{-1}] sekä Γ_* [µmol mol^{-1}] fotosynteesinopeuden kompensaatiopistettä. Muuttuja O_i ilmaisee puolestaan soluväleissä olevan ilman happipitoisuutta (210 µmol mol^{-1}) sekä K_c ja K_o ovat vakioita. Valon saatavuuden rajoittama fotosynteesinopeus voidaan puolestaan ilmaista yhtälöllä:

$$A_q = \frac{J(C_{in} - \Gamma_*)}{4.5(C_{in} + 7/3\Gamma_*)} \quad (3)$$

J [µmol m^{-2} s^{-1}] ilmaisee elektronien siirtymisnopeutta fotosynteesin valoreaktioissa:

$$\theta J^2 - (Q\alpha + J_{cmax})J + \alpha Q J_{cmax} = 0 \quad (4)$$

missä J_{cmax} on maksimaalinen elektronien siirtymisnopeus, α elektronien siirtoon tarvittavien valokvanttien määrä, θ parametri ja Q on säteilyn irradianssi [µmol m^{-2} s^{-1}]. Soluvälien hiilidioksidipitoisuus C_{in} saadaan yhtälöstä:

$$C_{in} = C_a - \frac{1.6\,A_n}{g_s} \quad (5)$$

missä C_a on CO_2-pitoisuus [µmol mol^{-1}] ilmakehässä. Ilmarakojen johtavuus [g_s, µmol m^{-2} s^{-1}] voidaan ilmaista ympäristötekijöiden funktiona.

Infotaulu 2. Mekrijärven kammiokoe, jossa on tutkittu kohotetun lämpötilan ja hiilidioksidin vaikutuksia männyn fysiologiaan (1991-2002).

Mekrijärven kammiokokeessa käytettiin hyväksi avoimia (katottomia) ja suljettuja (katollisia) kammioita, jotka rakennettiin Joensuun yliopiston Mekrijärven tutkimusaseman läheisyydessä sijaitsevalle kuivalle kankaalle (kanervatyypin kasvupaikka hiekkamaalla) (kuva 2). Kammiot rakennettiin koekentällä kasvaneiden mäntyjen ympärille siten, että koepuut kasvoivat juuret mukaan lukien täysin kammioiden sisällä. Periaatteessa kukin kammio koepuineen muodosti miniekosysteemin. Koepuut olivat kokeen alkaessa 15-20 vuoden ikäisiä sekä 2-3 metriä pitkiä ja 2-3 cm paksuja.

Molemmissa tapauksissa koe toteutettiin faktorikokeena, jossa koepuut altistettiin pelkästään kohotettuun lämpötilaan (myöhemmin käytetty merkintä T) ja hiilidioksidipitoisuuteen (CO_2) sekä samanaikaisesti kohotettuun lämpötilaan ja hiilidioksidipitoisuuteen (CO_2 + T). Molempiin kokeisiin sisältyi myös kontrollikammioita, joiden avulla voitiin analysoida pelkän kammion vaikutusta koemäntyjen fysiologiaan. Tämän lisäksi mittauksia tehtiin kammioiden ulkopuolella kasvavista puista, joiden avulla kammioista saatuja tuloksia voidaan soveltaa myös kammioiden ulkopuolelle. Molemmissa kokeissa kukin käsittely toistettiin neljä kertaa.



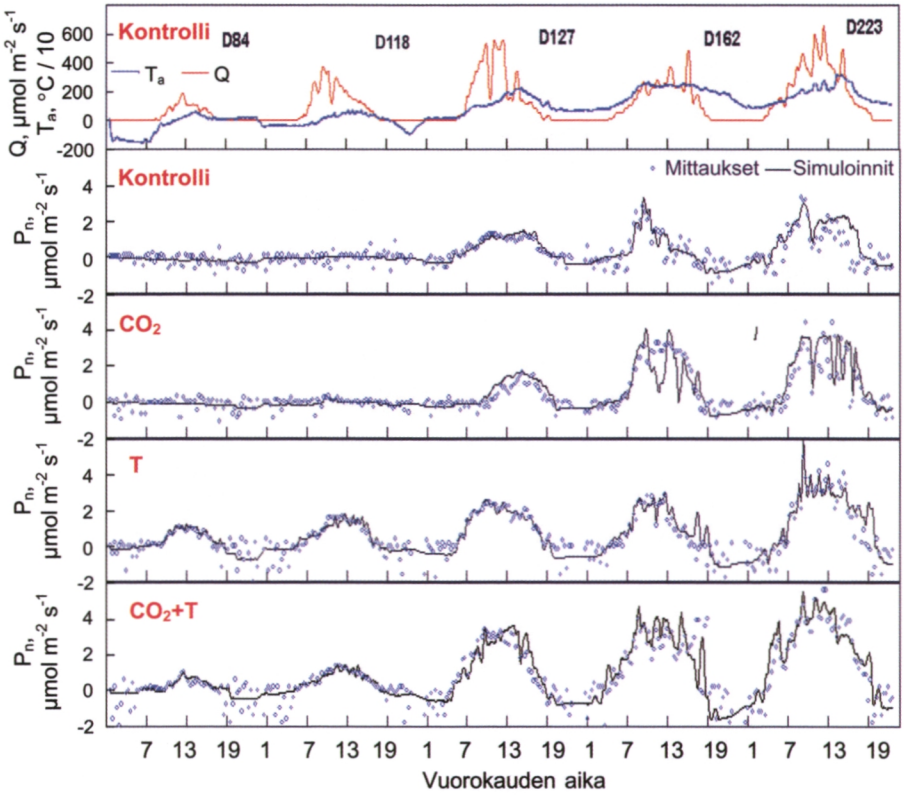
Kuva 2. Ilmavalokuva Mekrijärven kenttäkokeesta. Oikealla avoimet kammiot ja vasemmalla suljetut kammiot. Kuvan on ottanut Topi Ylä-Mononen vuonna 1996.

Molemmissa kokeissa tutkittiin kohotetun lämpötilan ja hiilidioksidin vaikutuksia männyn fysiologiaan. Avoimien kammioiden kokeessa kohotettu lämpötila tarkoitti sitä, että lämpötila oli sydäntalvellakin ≥0°C. Kasvukauden aikana (huhtikuun 15. – syyskuun 15.) lämpötila oli kokeessa 2 °C korkeampi kuin kammioiden ulkopuolella. Suljettujen kammioiden kokeessa lämpötila sopeutettiin lähemmäs kammioiden ulkopuolista lämpötilan vaihtelua: talvella (joulukuu-helmikuu) lämmitettyjen kammioiden lämpötila oli 6 °C, keväällä (maaliskuu-toukokuu) 4 °C, kesällä (kesäkuu-elokuu) 2 °C ja syksyllä (syyskuu-marraskuu) 4 °C korkeampi kuin kammioiden ulkopuolella. Kokeet poikkesivat myös hiilidioksidikäsittelyn suhteen toisistaan. Avoimissa kammioissa hiilidioksidia kohotettiin säästösyistä klo 6 ja klo 18 välillä vain kasvukauden aikana (huhtikuu 15.- syyskuu 15.). Näissä kammioissa hiilidioksidipitoisuus oli keskimäärin 580 µmol mol^{-1}. Suljetuissa kammioissa hiilidioksidipitoisuuden kohotus oli ympärivuotista ja näissä kammioissa pitoisuus oli likimain 700 µmol mol^{-1} (Kellomäki ym 2000).

Taulukko 1. Ilmastonmuutoksen vaikutus männyn fysiologiaan Mekrijärven kammiokokeissa, muutos % kontrollipuiden arvoista.

Parametri	CO_2	T	CO_2+T
Ilmarakojen johtavuus$_{tot}$	-30	-24	-24
Ilmarakojen johtavuus$_{min}$	+9	-7	-14
Ilmarakojen johtavuus$_{max}$	-19	+8	+9
Nettofotosynteesi	+28	+34	+34
Fotosynteesin optimilämpötila	↓	↑	↑
Respiraatio	↓	↑	-
Transpiraatio$_{max}$	↓	↑	-
WUE $_{alh. transp}$	↑	↓	↑
WUE $_{kork. transp}$	↑	-	↑

- ei vaikutusta ↑ positiivinen vaikutus ↓ negatiivinen vaikutus



Kuva 3. Esimerkki Mekrijärven kammioissa kasvaneiden mäntyjen fotosynteesinopeuden päivittäisestä kulusta ennen kasvukautta (D84, päivä vuoden alusta lukien), kasvukauden alkaessa (D118, D127) ja kasvukauden aikana (D162, D223). Kuvassa esitetyt aikasarjat ilmaisevat fotosynteesiä kontrollikammiossa, kohotetussa hiilidioksidissa, kohotetussa lämpötilassa, sekä kohotetussa hiilidioksidissa ja lämpötilassa. Kuvan ylimmässä aikasarjassa on esitetty lämpötilan (T_a) ja säteilyn (Q) vuorokautinen kulku ko. päivinä kontrollikammioissa.

tettiin neljä kertaa. Kokeissa vaikutuksia verrattiin vertailukammioon, jossa kammion lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus jäljittelivät kammioiden ulkopuolella vallitsevaa tilannetta. Tällaisella koejärjestelyllä saadaan selville kohotetun hiilidioksidin ja lämpötilan sekä niiden yhteisvaikutus koepuiden fysiologisiin vasteisiin. Koepuista tutkittiin mm. fotosynteesi-, hengitys- ja transpiraationopeuksia sekä puiden pituus- ja paksuuskasvua ja puuaineen fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Mittausten avulla saatuja kokeellisia tuloksia käytettiin hyväksi koepuiden fysiologisten vasteiden ja metsäekosysteemin dynamiikan mallintamisessa.

Ilmastonmuutoksen vaikutus fysiologisiin prosesseihin

Ilmarakojen toiminta, fotosynteesinopeus ja respiraatio

Mekrijärven kammiokokeessa mäntyjen altistaminen eri käsittelyille muutti ilmarakojen toimintaa (taulukko 1), mm. ilmarakojen kokonaisjohtavuus pieneni kaikissa käsittelyissä. Toisaalta kohotettu hiilidioksidipitoisuus lisäsi ilmarakojen minimijohtavuutta mutta toisaalta vähensi maksimijohtavuutta. Lämpötilan kohottaminen yksinään tai yhdessä hiilidioksidin kanssa vaikutti päinvastoin: minimijohtavuus pieneni ja maksimijohtavuus kasvoi. Myös ilmarakojen vaste lämpötilaan muuttui: kohotetussa lämpötilassa ilmarakojohtavuuden optimilämpötila nousi, kun taas kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa se laski (Wang 1996a).

Kontrollikammiossa ja kohotetussa hiilidioksidissa yhteyttäminen käynnistyi huhtikuun puolivälissä, mutta kohotetussa lämpötilassa yksinään tai yhdessä kohotetun hiilidioksidin kanssa jo maaliskuun loppupuolella (kuva 3). Hiilidioksidin kohottaminen nopeutti fotosynteesiä tuntuvasti heti kun fotosynteesi elpyi. Myös myöhemmin kesällä fotosynteesinopeus oli kohotetussa hiilidioksidissa selvästi suurempi kuin kontrollikammiossa tai kohotetussa lämpötilassa. Hiilidioksidin ja lämpötilan samanaikainen kohottaminen, kuten ilmaston muuttuessa todennäköisesti tapahtuu, vaikutti kokonaisfotosynteesin määrään kahdella tavalla: fotosynteesiin soveltuva kasvukausi piteni ja fotosynteesinopeus oli keskimäärin suurempi kuin muissa käsittelyissä. Tällaisten mittausaineistojen tarkempi analysointi osoittaa, että pääosa fotosynteesinopeuden kasvusta johtuu ympäristötekijöiden muutoksista.

Mekrijärven mittausten mukaan hiilidioksidipitoisuuden kohottaminen arvosta 230 µmol mol^{-1} arvoon 530 µmol mol^{-1} lisäsi kontrollikammioissa ja eri käsittelyissä kasvaneiden puiden fotosynteesinopeutta noin 30 % (taulukko 1). Toisaalta myös fotosynteesinopeuden optimilämpötila muuttui. Kohotettu hiilidioksidipitoisuus vähensi optimilämpötilaa, kun taas kohotettu lämpötila sekä yksin että yhdessä kohotetun hiilidioksidipitoisuuden kanssa lisäsi sitä (taulukko 1). Valosaturoituneen fotosynteesin maksimiarvot olivat eri käsittelyissä kuitenkin likimain samansuuruiset, vaikka optimilämpötiloissa tapahtuikin muutoksia (Wang ym. 1996, Wang ym. 1996a,b).

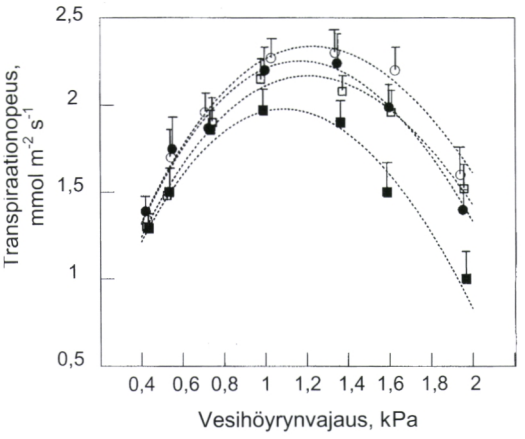
Metsäpuiden respiraatiolla tarkoitetaan kemiallisen energian käyttöä elintoimintojen ylläpitämiseen (ylläpitohengitys) sekä puiden eri osien kasvuun (kasvuhengitys). Kasvuhengitys riippuu suoraviivaisesti kasvunopeudesta, kun taas ylläpitohengitys riippuu pääasiassa vallitsevasta lämpötilasta. Mekrijärven kammiokokeessa erilaisissa olosuhteissa kasvaneiden neulasten hengitys mukautui kasvuolosuhteisiin: ominaishengitys (hengitysnopeus josta on puhdistettu lämpötilan välitön vaikutus) laski kohotetussa hiilidioksidissa verrattuna kohotettuun lämpötilaan. Nuorissa neulasissa ei tällaista mukautumista kuitenkaan havaittu kasvukauden alkupuolella (Zha ym. 2001).

Lämpötila ja hiilidioksidi vaikuttavat transpiraatioon ja vedenkäytön tehokkuuteen

Transpiraationopeus kasvoi ilman kuivuessa (ilman vesihöyryn paineen vajauksen kasvaessa) aluksi suoraviivaisesti, mutta taittui kun mittauksia tehtiin yhä kuivemmassa ja kuivemmassa ilmassa (kuva 4). Kohotettu hiilidioksidipitoisuus alensi neulasten haihdutusnopeutta, kun taas kohotetussa lämpötilassa kasvaneet männyt haihduttivat jopa hieman nopeammin kuin kontrollikam-

mioissa. Toisaalta ilman kuivuminen vähensi kohotetussa hiilidioksidissa transpiraatiota nopeammin kuin muissa kammioissa. Kohotetussa hiilidioksidissa kasvaneiden mäntyjen ilmarakojen johtavuus oli herkempi ilman kosteuden muutoksille kuin muissa käsittelyissä.

Tulosten perusteella voidaan siis sanoa, että ilmastonmuutos voi vaikuttaa myös männyn vedenkäytön tehokkuuteen, eli kuinka paljon vettä kuluu sidottua fotosynteesiyksikköä kohti (fotosynteesi/transpiraatio). Vedenkäytön tehokkuus oli tuntuvasti suurempi kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa ja yhdistetyssä hiilidioksidi- ja lämpötilakäsittelyssä. Pelkkä lämpötilan kohottaminen puolestaan vähensi vedenkäytön tehokkuutta. Muutokset olivat selvimmin havaittavissa alhaisilla transpiraationopeuksilla. Suurilla transpiraationopeuksilla hiilidioksidi lisäsi neulasen vedenkäytön tehokkuutta vähemmän kuin alhaisilla transpiraationopeuksilla. Myös kohotetun lämpötilan negatiivinen vaikutus pieneni; vettä kului fotosynteesiyksikköä kohti likimain yhtä paljon kuin kontrollikammioissa.



Kuva 4. Erilaisissa olosuhteissa kasvaneiden mäntyjen transpiraationopeuden riippuvuus ilman vesihöyrynvajauksesta. Mittaukset tehtiin 20 °C lämpötilassa fotosynteesinopeuden saturoivassa valaistuksessa (säteilyn irradianssi 1400 µmol m^{-2} s^{-1}) (Wang ja Kellomäki 1997). Merkkien selitykset: • = kontrollikammio, o = kohotettu lämpötila, ■ = kohotettu hiilidioksidi ja □ = kohotettu lämpötila ja hiilidioksidi.

Ilmastonmuutoksen vaikutus puiden kokopuufysiologiaan

Kokopuufysiologia

Puiden fysiologiset vasteet erilaisiin ympäristötekijöihin eivät vielä sellaisenaan selitä, miten puut menestyvät muuttuvassa ilmastossa. Puiden ja niiden ympäristön välinen vuorovaikutus on monimutkainen prosessi: fysiologiassa tapahtuvien muutosten lisäksi myös puiden rakenteessa tapahtuu muutoksia, jotka edesauttavat sopeutumista ympäristötekijöiden muutoksiin. Puhutaan kokopuufysiologiasta, jolla tarkoitetaan kokonaisten puiden vasteita ympäristötekijöihin.

Kuva 5 havainnollistaa männyn kokopuufysiologiaa käyttäen hyväksi infotaulu 1:ssä esitettyä fotosynteesimallia. Vuorovaikutusmallissa on otettu huomioon vain ilmastotekijöiden vaikutukset ilmarakojen toimintaan sekä fotosynteesiin, transpiraatioon ja respiraatioon. Nämä tekijät on puolestaan kytketty puun rakenteeseen neulasten pinta-alan ja latvuksessa vallitsevan mikroilmaston avulla. Mikroilmaston ja fysiologisten vasteiden avulla voidaan laskea fotosynteesi-, respiraatio- ja transpiraationopeudet, joita painotetaan mm. neulasten määrän avulla. Tulokseksi saadaan latvuksen kokonaisfotosynteesi ja -respiraatio sekä koko latvuksesta haihtuneen veden määrä (kokonaistranspiraatio) valitulla ajanjaksolla.

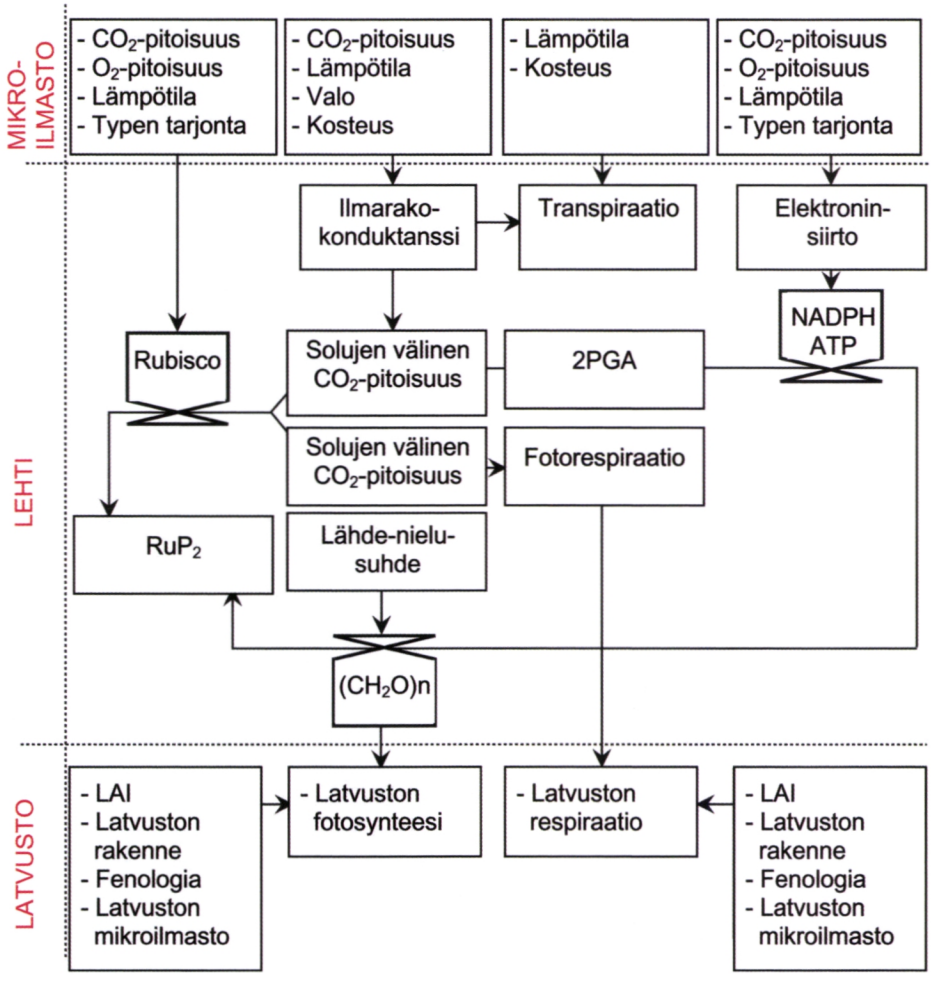
Neulaspinta-ala

Kokonaisfotosynteesin määrittämiseksi mäntyjen latvukset jaettiin pystysuunnassa neljään yhtä suureen kerrokseen neulasmassan ja neulasten fysiologisten ominaisuuksien määrittämiseksi ja mallintamiseksi latvusten eri osissa (mm. ilmarakojen avautuminen, fotosynteesinopeuden dynamiikka). Kohotetussa hiilidioksidissa sekä kohotetussa hiilidioksidissa ja lämpötilassa kasvaneiden mäntyjen neulaspinta-ala lisääntyi etenkin alalatvuksessa, ja neulaset olivat pidempiä kuin kontrollipuissa. Myös pelkästään kohotetussa lämpötilassa kasvaneissa puissa neulaset olivat pitempiä kuin kontrollipuissa, mutta neulasten pinta-ala kasvoi vain vähän, pääasiassa ylälatvuksessa.

Kohotettu lämpötila lyhensi selvästi neulasten elinikää toisin kuin kohotettu hiilidioksidi yksinään tai yhdessä lämpötilan kanssa (taulukko 2). Pelkkä hiilidioksidin kohottaminen lisäsi neulasten elinikää siinä määrin, että näissä puissa oli likimain yksi neulaskerta enemmän kuin kontrollipuissa.

Kokonaisfotosynteesi ja kokonaishengitys

Pelkästään neulaspinta-alan suuruudessa tapahtuvat muutokset osoittavat, että ilmastonmuutos voi vaikuttaa suuresti puiden kokonaisfotosynteesiin. Tämän lisäksi myös fotosynteesinopeudessa ja kasvukauden pituudessa (aika jolloin fotosynteesiä tapahtuu) tapahtuu muutoksia (kuva 6). Hiilidioksidin kohottaminen yksin tai yhdessä lämpötilan kanssa lisäsi kokonaisyhteyttämistä kontrollikammioissa kasvaneisiin mäntyihin verrattuna (taulukko 3). Pelkkä lämpötilan kohottaminen puolestaan pidensi kasvukautta, mutta nettofotosynteesinopeus jäi kuitenkin noin puoleen verrattuna hiilidioksidin kohottamiseen: lämpötilan kohottaminen toki nopeutti kokonaisfotosynteesiä mutta hengitys nopeutui vielä enemmän. Kohotettu lämpötila yksinään tai hiilidioksidin kanssa lisäsi kokonaishengitystä myös talvella (taulukko 3). Fotosynteesinopeuden muutos jäi puolestaan



Kuva 5. Periaatteellinen esitys siitä, miten ympäristötekijät vaikuttavat fotosynteesin valo- ja pimeäreaktioihin, fotosynteesinopeuteen ja hiilihydraattien muodostumiseen puussa (Wang 1996a).

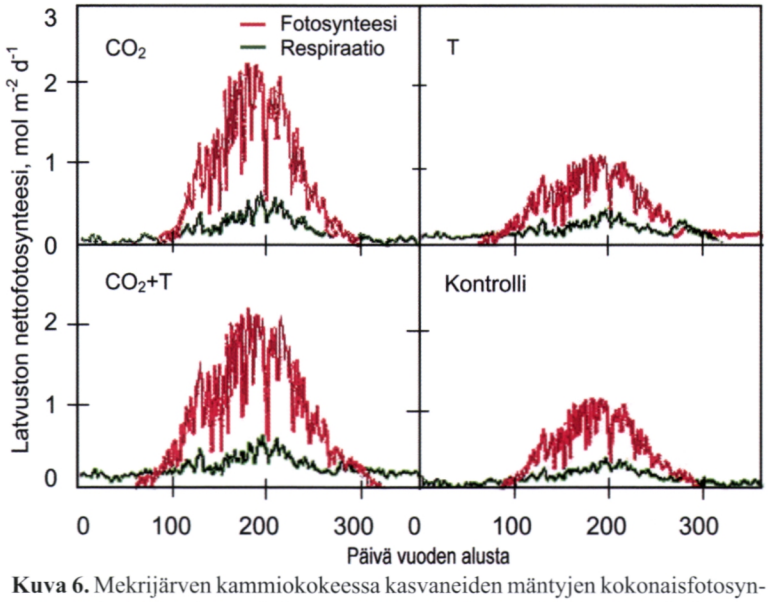
Taulukko 2. Hiilidioksidipitoisuuden (CO_2) ja lämpötilan (T) noston vaikutus männyn kokonaisfysiologiaan Mekrijärven kammiokokeissa, muutos % kontrollipuiden arvoista (Wang 1996a,b).

Muuttuja	CO_2	T	CO_2+T
Neulasten pinta-ala	+35	+5	+28
Neulasten elinikä	↑	↓	↑
Kokonaisyhteytys	+42	+5	+51
Kokonaishengitys	+4	+12	+8
Kokonaistranspiraatio	-11	+10	-38

- ei vaikutusta ↓ negatiivinen vaikutus ↑ positiivinen vaikutus

Taulukko 3. Mekrijärven kammioissa kasvaneiden mäntyjen vuotuinen kokonaisnettofotosynteesi ja kokonaisylläpitohengitys eri käsittelyissä (Wang 1996a,b).

Vuodenaika	Kokonaisfotosynteesi, mol m^{-2} a^{-1} käsittelyittäin			
	CO_2	CO_2+T	T	Kontrolli
Kasvukausi (D121 – D243)	106,6	113,7	77,9	75,4
Kasvukauden ulkopuolella	12,7	20,2	15,7	9,6
Yhteensä koko vuonna	119,3	133,9	93,6	85,0
	Kokonaishengitys, mol m^{-2} a^{-1} käsittelyittäin			
Kasvukausi (D121 – D243)	37,2	38,7	40,1	35,7
Kasvukauden ulkopuolella	11,8	25,6	25,9	12,7
Kasvukauden ulkopuolella, jolloin yhteyttämistä ei tapahtunut	10,5	18,0	22,8	15,3
Yhteensä koko vuonna	59,5	82,3	88,8	63,7



Kuva 6. Mekrijärven kammiokokeessa kasvaneiden mäntyjen kokonaisfotosynteesin ja kokonaishengityksen vuotuinen kulku eri käsittelyissä, laskettuna infotaulussa 1 esitetyn mallin avulla. Laskentajakson aikana hiilidioksidipitoisuus oli kasvukautena (huhtikuun 15. – syyskuun 15.) 550–600 µmol mol^{-1}, muulloin hiilidioksidipitoisuus oli yhtä suuri kuin kontrollikammioissa. Kammioissa, joissa lämpötilaa kohotettiin, oli lämpötila keskimäärin 2 °C korkeampi kuin kammioiden ulkopuolella. Muissa kammioissa lämpötila oli yhtä suuri kuin kammioiden ulkopuolella (Wang 1996a,b).

suhteellisen pieneksi kasvukauden loppupuolella, sillä tuolloin säteilyn määrä rajoitti voimakkaasti fotosynteesiä toisin kuin kasvukauden alkupuolella. Ilmastonmuutos voi siis aiheuttaa suuria muutoksia puiden energiataseeseen ja siten niiden kasvuun (taulukko 2).

Kokonaistranspiraatio

Myös puiden kokonaistranspiraatio muuttui selvästi hiilidioksidin ja lämpötilan kohottamisen seurauksena, kuten voidaan aavistella jo transpiraationopeudessa tapahtuvien muutosten perusteella. Kohotetussa hiilidioksidissa puiden rungon läpi virranneen veden virtausnopeus oli läpi koko kasvukauden pienempi kuin kontrollipuissa. Sen sijaan kohotettu lämpötila nopeutti veden virtausta (kokonaistranspiraatiota) selvästi. Kun lämpötilaa ja hiilidioksidia kohotettiin yhtä aikaa, veden virtaus oli samansuuruinen kuin kontrollipuissa. Hiilidioksidipitoisuuden kohottaminen vähensi kokonaistranspiraatiota ja lämpötilan kohottaminen puolestaan lisäsi sitä (taulukko 2). Kaiken kaikkiaan kohotetussa lämpötilassa ja hiilidioksidissa kasvaneiden mäntyjen erot olivat kuitenkin selviä myös silloin, kun puiden kokonaistranspiraatio laskettiin neulaspinta-alaa kohti: haihdutus yhden kuukauden mittausjaksolla (heinäkuun 25. – elokuun 25.) oli kontrollikammioissa 20 kg H_2O m^{-2}, kohotetussa hiilidioksidissa 17 H_2O m^{-2}, kohotetussa lämpötilassa 25 H_2O m^{-2} sekä samanaikaisesti kohotetussa lämpötilassa ja hiilidioksidissa 25 H_2O m^{-2} (Kellomäki ja Wang 1998).

Ilmastonmuutoksen vaikutus puiden kasvuun

Pituus- ja paksuuskasvun ajoittuminen ja määrä

Mekrijärven kammiokokeessa tutkittiin myös kasvumittausten avulla männyn menestymistä muuttuvassa ilmastossa mittaamalla koepuiden päivittäisen pituus- ja paksuuskasvun kulkua. Näiden mittausten perusteella voitiin analysoida ilmastonmuutoksen vaikutuksia kasvun ajoittumiseen. Koepuista mitattiin myös niiden pakkasenkestävyyttä. Kasvun ajoittumisen ja pakkasenkestävyyden perusteella haluttiin selvittää, lisääkö ilmastonmuutos puiden riskiä vaurioitua kevät- tai syyshallojen vuoksi.

Lämpötilan kohottaminen yksinään tai yhdessä hiilidioksidin kanssa aikaisti männyn pituuskasvua: ero kontrollipuihin oli runsaat kymmenen päivää (taulukko 4, kuva 7). Toisaalta kasvu myös päättyi selvästi aikaisemmin kohotetussa lämpötilassa. Ero kontrollipuihin oli liki kolme viikkoa, joten pituuskasvun kesto oli noin kymmenen päivää lyhempi verrattuna muihin käsittelyihin. Pelkästään kohotetussa hiilidioksidissa kasvaneiden puiden pituuskasvu oli likimain samanlainen kuin kontrollipuiden.

Mekrijärven kammiokokeissa saadut tulokset osoittavat, että ilmastonmuutos todennäköisesti aikaistaa männyn pituuskasvun alkamista ja lyhentää kasvun kestoa päivissä mitattuna. Pituuskasvun alkaminen ja loppuminen suhteessa lämpösummakertymään (kynnyslämpötila +5 °C) kuitenkin osoitti, että kohotetussa lämpötilassa pituuskasvu käynnistyi ja päättyi (taulukot 4, 5) korkeammalla lämpösumma-arvolla kuin kontrollikammioissa tai pelkästään kohotetussa hiilidioksidissa. Täten sopeutuminen kohotettuun lämpötilaan viivästytti kasvun alkamista verrattuna siihen, ettei sopeutumista olisi tapahtunut. Toisaalta kasvun kesto oli lämpösummana mitaten yhtä pitkä eri käsittelyissä (noin 450 d.d.).

Kasvun aikaistumiseen liittyy pakkasvaurioiden riski, jos lämpötila laskee voimakkaasti kasvun alkamisen jälkeen. Näin on etenkin silloin, jos puiden solukot eivät kasvun käynnistymisen jälkeen kestä hallaa. Kohotetussa lämpötilassa ja yhdistetyssä lämpötila- ja hiilidioksidikäsittelyssä pakkasenkestävyys oli selvästi heikompi kuin kontrollipuilla (-60…-70 °C). Hiilidioksidin kohottaminen yksinään ei sen sijaan vaikuttanut pakkasenkestävyyteen eikä sen purkautumiseen keväällä (taulukko 5). Mekrijärven kammiokokeen perusteella arvioiden männyn vaurioituminen keväthallojen vuoksi näyttää hyvin epätodennäköiseltä, sillä kohotetussakin lämpötilassa puiden pakkasenkestävyys oli kasvun alkaessa vielä noin -30 °C, ja alle

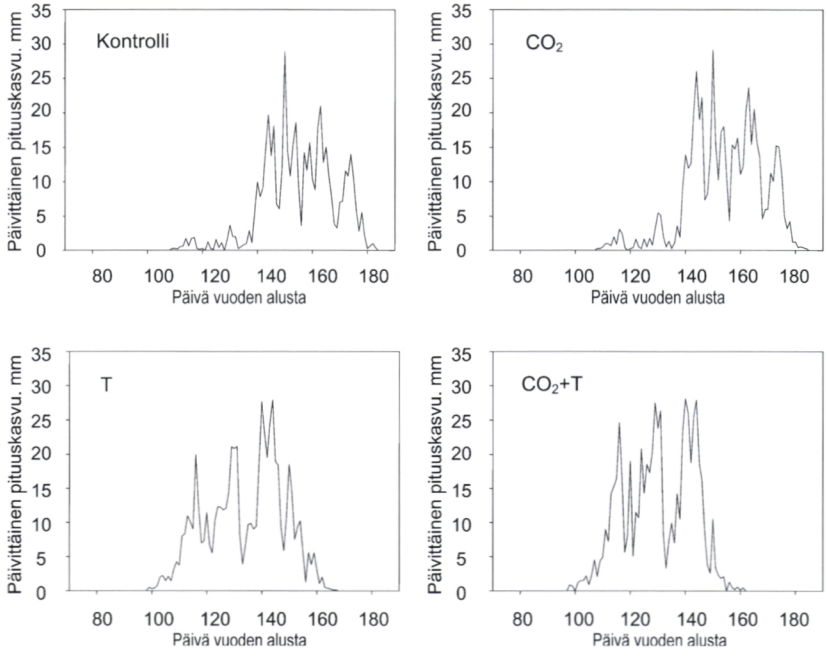
Taulukko 4. Männyn pituuskasvun alkaminen, loppuminen ja kasvujakson pituus Mekrijärven kammiokokeessa vuonna 2000 (Kilpeläinen, A., Peltola, H., Rouvinen, I. ja Kellomäki, S., julkaisematonta aineistoa).

Kasvuparametri	Kontrolli	CO_2	T	CO_2+T
Kasvun alkaminen, päiviä vuoden alusta	112	110	102	98
Kasvun loppuminen, päiviä vuoden alusta	182	182	162	159
Kasvujakson pituus, päivä	71	73	61	62
Lämpösumma kasvun alkaessa, d.d.	25	20	76	68
Lämpösumma kasvun loppuessa, d.d.	468	479	530	518
Kasvujakson pituus, d.d.	443	459	454	450

Taulukko 5. Ilmastonmuutoksen vaikutus männyn kasvuun Mekrijärven kammiokokeissa, muutos % kontrollipuiden arvoista.

Kasvuparametri	CO_2	T	CO_2+T
Pituuskasvun alkaminen	-	aikaistunut	aikaistunut
Pituuskasvun loppuminen	-	aikaistunut	aikaistunut
Pituuskasvu	+19	+12	+9
Paksuuskasvu	+66	+19	+47
Pakkasen kestävyys	-	↓	↓

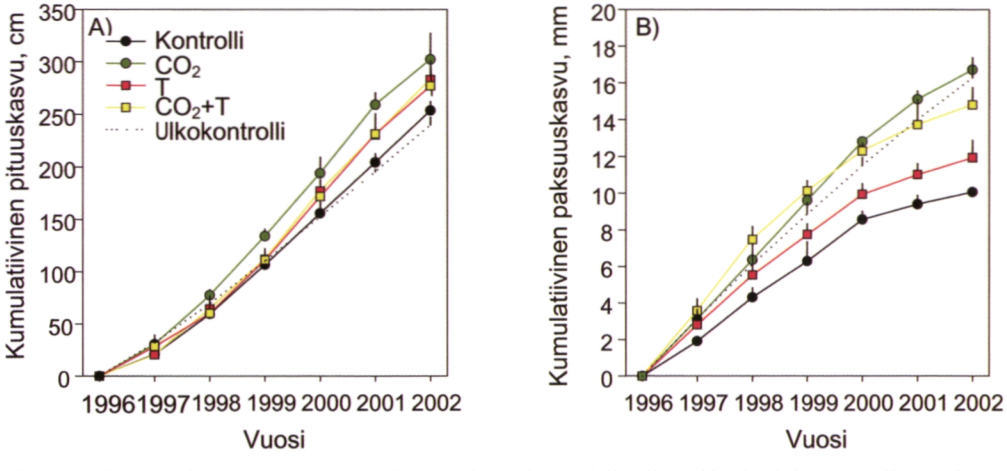
- ei vaikutusta ↓ negatiivinen vaikutus



Kuva 7. Männyn päivittäisen pituuskasvun kulku Mekrijärven kammiokokeessa vuonna 2000 (Kilpeläinen, A., Peltola, H., Rouvinen, I. ja Kellomäki, S., julkaisematonta aineistoa).

Taulukko 6. Mekrijärven kammiokokeissa saatuja tuloksia hiilidioksidin ja lämpötilan kohottamisen vaikutuksista männyn puuaineen ominaisuuksiin (Kilpeläinen 2005). Merkkien selitykset: na = ei mitattu, ns = vaikutus ei ole tilastollisesti merkitsevä, + = tilastollisesti merkitsevä lisäys, - = tilastollisesti merkitsevä vähennys. Ilman sulkuja esitetyt luvut edustavat vuosien 1996-2002 koetta ja suluissa olevat luvat vuosien 1991-1995 koetta.

Muuttuja	Vaikutus		Muutos, % verrattuna kontrollipuihin		
	CO_2	T	CO_2	T	CO_2+T
Pituuskasvu	ns(na)	ns(na)	+19(na)	+12(na)	+9(na)
Luston paksuus	+(ns)	ns(ns)	+66(+54)	+19(+30)	+47(+25)
Kevätpuun paksuus	+(ns)	ns(ns)	+70(+66)	+10(+25)	+46(+22)
Kesäpuun paksuus	+(ns)	ns(ns)	+56(+30)	+39(+41)	+50(+31)
Kevätpuun osuus, %	ns(ns)	ns(ns)	+7(+8)	-8(-4)	-3(-2)
Kesäpuun osuus, %	ns(ns)	ns(ns)	-14(-16)	+15(+8)	+6(+4)
Keskimäär. tiheys	ns(ns)	+(ns)	-6(+4)	+6(+4)	+6(+7)
Kevätpuun tiheys	ns(ns)	+(ns)	-6(+18)	+2(+20)	+6(+16)
Kesäpuun tiheys	ns(+)	ns(ns)	-1(+26)	+2(+9)	+2(+23)
Minimitiheys	ns(ns)	ns(ns)	-9(+2)	-3(+4)	+6(-5)
Maksimitiheys	ns(+)	ns(ns)	-2(+11)	+2(-4)	-1(+15)
Kuidun pituus	ns(ns)	+(+)	-2(+4)	+5(+12)	+6(+11)
Uuteaineet	ns(ns)	-(ns)	+11(-6)	-15(-18)	-20(-7)
Ligniini	ns(ns)	ns(+)	+3(+1)	-1(+7)	+3(+8)
Selluloosa	-(ns)	ns(ns)	-3(-1)	+2(-2)	-1(-3)
Hemiselluloosa	ns(ns)	ns(-)	-3(+1)	+0,4(-4)	-1(-4)



Kuva 8. Männyn pituuskasvu (vasemmalla) ja paksuuskasvu (oikealla) eri käsittelyissä Mekrijärven kammiokokeessa (Kilpeläinen ym. 2005).

-30 °C lämpötilojen todennäköisyys kasvukauden alussa on äärimmäisen pieni nykyilmastossakin. Myös keskitalvella kohotetussa lämpötilassa kasvatettujen mäntyjen pakkasenkestävyys on suuri (-60...-70 °C), mutta kuitenkin selvästi pienempi kuin lämmittämättömissä kammioissa.

Mekrijärven kammiokokeessa puiden pituuskasvu oli lähes samanlainen käsittelystä riippumatta. Puiden paksuuskasvu sen sijaan reagoi voimakkaasti hiilidioksidin kohottamiseen joko yksinään tai yhdessä lämpötilan kanssa (kuva 8). Pelkästään hiilidioksidin kohottaminen lisäsi mäntyjen paksuuskasvua 66 % kuusi vuotta kestäneen altistuksen aikana, kun taas hiilidioksidin ja lämpötilan samanaikainen kohottaminen lisäsi kasvua vähemmän, todennäköisesti voimakkaan ylläpitohengityksen vuoksi. Tähän viittaa myös se, että lämpötilan kohottaminen yksinään lisäsi paksuuskasvua vain 19 % verrattuna kontrollipuihin (taulukko 5).

Hiilidioksidin ja lämpötilan kohottaminen muuttavat myös puuaineen ominaisuuksia (taulukko 6), joskin avoimet ja suljetut kammiot antoivat jossain määrin erilaisia tuloksia. Kohotetussa hiilidioksidissa mm. kevätpuun ja kesäpuun paksuudet kasvoivat, mutta puuaineen selluloosapitoisuus väheni. Lämpötilan kohottaminen puolestaan lisäsi puuaineen tiheyttä ja puukuitujen pituutta. Myös puuaineen ligniinipitoisuus kasvoi, mutta uuteaineiden pitoisuus väheni. Kaiken kaikkiaan puuaineen ominaisuuksissa tapahtuneet muutokset olivat kuitenkin suhteellisen pieniä verrattuna kasvussa tapahtuneisiin muutoksiin. Toisaalta suuretkaan muutokset eivät olleet aina tilastollisesti merkitseviä, sillä kohotetussakin lämpötilassa ja hiilidioksidissa puuaineen ominaisuudet vaihtelivat suuresti.

Ilmastonmuutos ja puiden kasvu ja kehitys

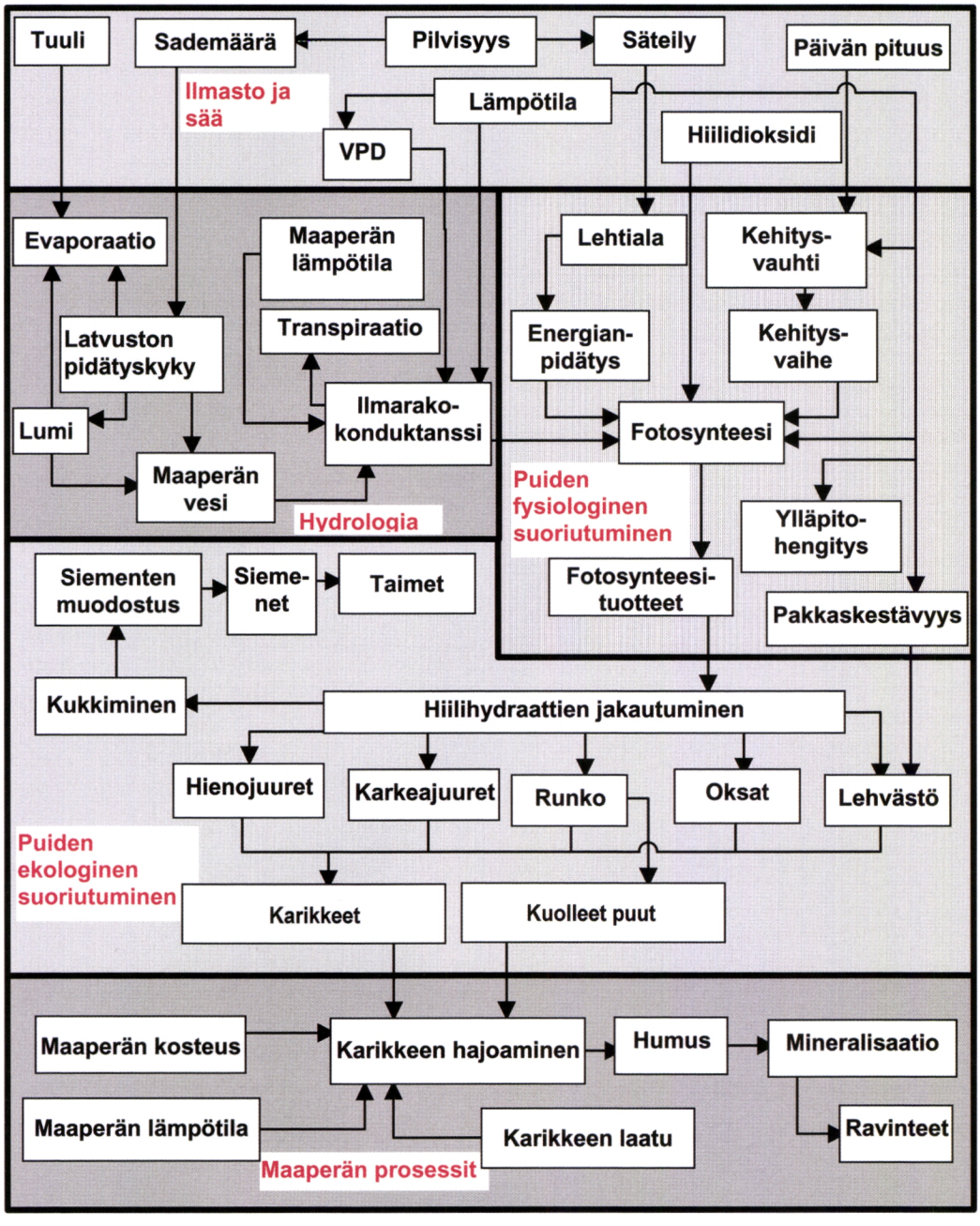
Mallinnus tulevaisuuden haarukoinnissa

Mekrijärven kenttäkokeessa havaitut muutokset puiden fysiologisissa vasteissa viittaavat siihen, että pitkällä aikavälillä puiden kasvu ja kehitys muuttuvat. Tähän viittaavat myös vuosikymmenien yli ulottuvat mallilaskelmat, joissa ilmaston annetaan muuttua ennusteiden kuvaamalla tavalla. Mallinnus lienee ainoa käyttökelpoinen tapa, millä lyhytaikaisten kokeiden tulokset voidaan yleistää laajoille alueille ja yli pitkien ajanjaksojen. Tämän vuoksi mallinnus ja mallit ovat tärkeitä työvälineitä, kun pyritään haarukoimaan metsien kasvua ja kehitystä muuttuvassa ilmastossa. Mallilaskelmien tulokset eivät kuitenkaan ole varsinaisia ennusteita vaan pikemminkin skenaarioita siitä, mitä voi tapahtua kun laskenta tietyistä lähtökohdista ulotetaan tulevaisuuteen.

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsiin on ennustettu mm. FINNFOR-mallin avulla. Tämän mallin laadinnassa on käytetty hyväksi myös Mekrijärven kammiokokeen tuloksia (kuva 9). FINNFOR-malli on ns. prosessimalli, jonka avulla puiden fysiologisia vasteita (mm. fotosynteesi, hengitys, transpiraatio) hyväksi käyttäen voidaan laskea puuston kasvua ja kehitystä. Laskennan pohjana on infotaulussa 1 esitetty fotosynteesin biokemiallinen malli, jonka avulla lasketaan puiden käyttöön tuleva yhteyttämistuotteiden määrä sekä niiden käyttö hengitykseen ja kasvuun. Puiden kasvua kuvataan mm. puun eri osien massan kasvun sekä rungon läpimitan ja pituuden kasvun avulla. Kun puiden koko kasvaa ajan myötä, tarvitsevat ne yhä enemmän tilaa kasvaa, jolloin osa puista kuolee, ellei puustoa harvenneta. Mallin avulla voidaan simuloida, kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa puiden uudistumiseen, kasvuun ja kuolemiseen ja miten ilmastonmuutos vaikuttaa puiden populaatiodynamiikkaan erilaisilla kasvupaikoilla. Mallilaskelmissa voidaan tehdä myös erilaisia harvennuksia tai puustoa voidaan uudistaa luontaisesti tai viljellen, jolloin voidaan tutkia metsänhoidon ja ilmastonmuutoksen vuorovaikutusta ja tarkoituksenmukaista metsänhoitoa muuttuvassa ilmastossa.

Laskentaesimerkki

Kuvassa 10 esitetään FINNFOR-mallin antamia tuloksia siitä, miten ilmastonmuutos vaikuttaa männyn fotosynteesiin Etelä- ja Pohjois-Suomessa. Laskenta perustui Tampereen ja Rovaniemen



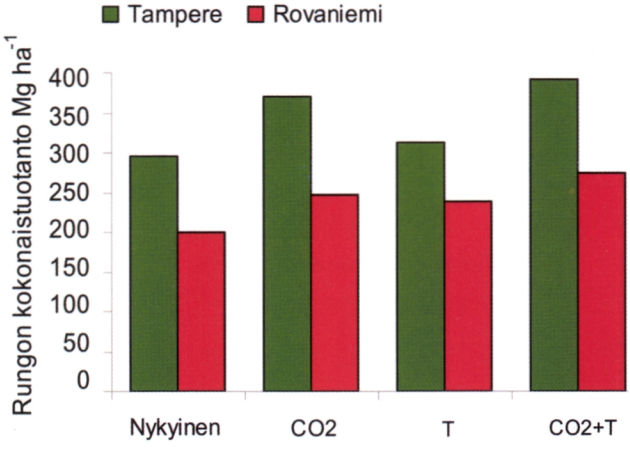
Kuva 9. Eräitä pääpiirteitä FINNFOR-mallin rakenteesta (Kellomäki ja Väisänen 1997). Mallin fysiologinen ydin noudattaa infotaulussa 1 esitettyjä periaatteita, joiden avulla Mekrijärven kammiokokeessa saatuja tuloksia on yhdistetty puiden populaatiodynamiikkaan.

lentosääasemien säätilastoon vuosilta 1961-1990 siten, että kyseessä olevan jakson keskisää edusti nykyilmastoa. Ilmastonmuutoksen vaikutusta simuloitiin puolestaan kohottamalla lämpötilaa 100 vuoden aikana vähitellen 4 °C. Kohotettu hiilidioksidipitoisuus edusti sen vähittäistä kaksinkertaistumista saman jakson aikana.

Kuvasta 10 käy ilmi, että lämpötilan kohottaminen lisäsi männyn runkopuun kokonaiskasvua Etelä-Suomessa 8 % ja Pohjois-Suomessa 19 %. Hiilidioksidipitoisuuden kohottaminen puolestaan lisäsi kasvua Etelä-Suomessa 23 % ja Pohjois-Suomessa 21 %. Molempien tekijöiden kohottaminen yhtä aikaa lisäsi kasvua kuitenkin eniten: Etelä-Suomessa kasvun lisäys on 32 % ja Pohjois-Suomessa 40 %. Tällaiset metsikkökohtaiset laskelmat antavat tavallisesti suurempia kasvun lisäyksiä kuin laskelmat, joissa laskenta kohdistetaan vaihtelevista puustoista koostuvalle metsäalueelle. Metsän puulajisuhteet sekä puuston kehitysluokka- ja ikärakenteet vaikuttavat todennäköisesti suuresti siihen, miten paljon ilmastonmuutos kaiken kaikkiaan vaikuttaa metsien ja metsävarojen kehitykseen.

Lopuksi

Kokeelliset tutkimukset ja mallilaskelmat osoittavat, että ilmastonmuutos todennäköisesti nopeuttaa puiden aineenvaihduntaprosesseja ja puiden elinkiertoa Suomen olosuhteissa. Toisaalta aineenvaihduntaprosessit voivat myös mukautua muuttuviin olosuhteisiin, mikä luo epävarmuutta metsien tulevaisuutta koskeviin laskelmiin. Myös lämpötilan ja sadannan muutosten jakautuminen eri vuodenaikojen kesken vaikuttaa siihen, miten metsät kasvavat ja kehittyvät tulevaisuudessa. Metsien kasvun lisääntyminen näyttää kuitenkin todennäköiseltä. Kasvu lisääntynee suhteellisesti eniten Pohjois-Suomessa, jossa lämpötilan kohoamisen vaikutus on suuri. Myös Etelä-Suomessa lämpötilan kohoaminen todennäköisesti lisää metsien kasvua, mutta ajoittaiset kuivuusjaksot saattavat vähentää lämpötilan kohoamisen vaikutuksia. Mallilaskelmat viittaavat siihen, että Etelä-Suomessa hiilidioksidin kohoamisen vaikutus on suhteellisesti suurempi kuin Pohjois-Suomessa. On mahdollista, että ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kohoaminen voi osittain kompensoida mahdolli-



Kuva 10. Esimerkki ilmaston lämpenemisen ja ilman hiilidioksidipitoisuuden kohoamisen vaikutuksesta männikön kokonaiskasvuun 100 vuoden aikana Tampereen ja Rovaniemen seuduilla. Laskenta edustaa mustikkatyypin kasvupaikkaa, jolla laskennan alussa kasvoi 2 500 taimea (pituus 1,3 m). Maassa oli 45 Mg ha^{-1} kariketta ja humusta, joiden hajoaminen syötti typpeä puiden käyttöön. Toisaalta maan typpivarasto täydentyi karikesadosta ja kuolleista puista. Metsä sai kasvaa ja kehittyä luontaisesti ilman hakkuita 100 vuoden ajan.

sen veden puutteen vaikutuksia puiden kasvuun, kuten vedenkäytön tehokkuudessa tapahtuvien muutosten perusteella voidaan olettaa.

Kirjallisuus

Farquhar, G.d., von Caemmerer, S & Berry, J.A. 1982. A biochemical model of photosynthetic assimilation in leaves of C_3 plants. Planta 149: 67-90.

Kellomäki, S. & Väisänen, H. 1997. Modelling the dynamics of the boreal forest ecosystems for climate change studies in the boreal conditions. Ecological Modelling 97(1,2): 121-140.

Kellomäki, S. & Wang, K.-Y. 1998. Sap flow in Scots pines growing under conditions of year-round carbon dioxide enrichment and temperature elevation. Plant, Cell and Environment 21: 969-981.

Kellomäki,S., Wang, K.-Y. & Lemettinen, M. 2000. Controlled environment chambers for investigating tree response to elevated CO_2 and temperature under boreal conditions. Photosynthetica 38: 69-81.

Kilpeläinen, A. 2005. Growth and wood properties of Scots pine trees (*Pinus sylvestris* L.) grown at elevated temperature and carbon dioxide concentrations. Väitöskirja Joensuun yliopiston metsätieteellisessä tiedekunnassa.

Kilpeläinen, A., Peltola, H., Ryyppö, A. & Kellomäki, S. 2005. Scots pine responses to elevated temperature and carbon dioxide concentration: growth and wood properties. Tree Physiology 25: 75-83.

Wang, K.-Y. 1996a. Canopy CO_2 exchange of Scots pine and its seasonal variation after four-year exposure to elevated CO_2 and temperature. Agricultural and Forest Meteorology 82: 1-27.

Wang, K.-Y. 1996b. Effects of long-term CO_2 and temperature elevation on gas exchange of Scots pine. Väitöskirja Joensuun yliopiston metsätieteellisessä tiedekunnassa.

Wang, K-Y., Kellomäki, S. & Laitinen, K. 1996. Acclimation of photosynthetic parameters in Scots pine after three years exposure to elevated temperature and CO_2. Agricultural and Forest Meteorology 82: 195- 217.

Wang, K.-Y. & Kellomäki, S.1997. Stomatal conductance and transpiration in shoots of Scots pine after 4-years exposure to elevated CO_2 and temperature. Canadian Journal of Botany 75: 552-561.

Zha, T., Ryyppö, A., Wang, K.-Y. & Kellomäki, S. 2001. Effects of elevated carbon dioxide concentration and temperature on needle growth, respiration and carbohydrate status in field-grown Scots pines during the needle expansion period. Tree Physiology 21: 1279-1287.

Lehtipuut - menestyjiä tulevaisuuden ilmastossa? Tuloksia Suonenjoen kenttäkokeesta rauduskoivulla

Elina Vapaavuori, Johanna Riikonen, Petri Peltonen, Anne Kasurinen, Jarmo Holopainen, Elina Oksanen ja Toini Holopainen

Johdanto

Ilmastonmuutos – monen tekijän yhteisvaikutuksen tulos

Hallitustenvälisen ilmastomuutospaneelin (IPCC) yhteisesti hyväksymä johtopäätös on, että maapallon ilmastojärjestelmä on muuttunut niin merkittävästi, että voidaan puhua ilmastomuutoksesta, jolloin muutokset ilmastossa ovat tilastollisesti merkittäviä ja kestävät pitkään, tyypillisesti vähintään kymmeniä vuosia (IPCC 2001). Ilmastonmuutos, kasvihuonekaasujen pitoisuuden lisääntyminen ja niiden aiheuttama lämpötilan nousu, on vakava uhka metsäekosysteemien toiminnalle, minkä vuoksi ilmastonmuutoksen vaikutuksia on tutkittu viimeisten vuosikymmenten aikana runsaasti. Metsäekosysteemit varastoivat suuria määriä hiiltä ja siksi niiden merkitys ilmastonmuutoksen hillitsijänä on erittäin tärkeä. Metsäpuut ovat kuitenkin haasteellinen tutkimuskohde kokonsa ja pitkäikäisyytensä vuoksi. Kokeellista tietoa ilmastonmuutoksen vaikutuksista puiden koko elinkierron ajalta on mahdotonta saada, vaikutukset puiden kasvuun ja elintoimintoihin ovat usein kumulatiivisia ja vaikutusmekanismit voivat nuoruusvaiheessa olla erilaisia kuin vanhoilla puilla. Tällä hetkellä valtaosa metsäpuilla käytettävissä olevasta tutkimustiedosta on saatu case–tutkimuksista, joissa yleensä vain yhtä ilmastonmuutoksen osatekijää on muunneltu. Tämä tekee tutkimustulosten yleistettävyyden ongelmalliseksi.

Hiilidioksidilla ja alailmakehän otsonilla on vastakkaiset vaikutukset puiden kasvuun

Nykyinen ilmakehän CO_2-pitoisuus on kohoamisestaan huolimatta metsäpuiden yhteyttämistä rajoittava tekijä. Tämän vuoksi lisääntyvän hiilidioksidipitoisuuden oletetaan tulevaisuudessa näkyvän yhteyttämisen tehostumisena, lisääntyneenä kasvuna ja kokonaisbiomassan nousuna riippuen muiden resurssien riittävyydestä, kasvilajista, genotyypistä ja iästä (esim. Moore ym. 1999, Nowak ym. 2004).

Kohoava otsonipitoisuus toimii kasvihuonekaasuna ja edistää ilmastonmuutoksen voimistumista, koska se heikentää kasvien CO_2:n sidontaa ja kasvua. Otsoni on metsien kannalta haitallisin ilmansaaste Euroopassa (Matyssek & Innes 1999) ja on arvioitu, että nykyään jopa 30 % maapallon metsistä altistuu haitallisen korkeille otsonipitoisuuksille (Fowler ym. 1999). Fennoskandian alueella otsonin taustapitoisuudet ovat yleensä alhaiset, joskin kaukokantautumisen vuoksi on havaittu jaksoja, joiden aikana otsonipitoisuudet voivat nousta haitallisen korkeiksi (Laurila ym. 1999). Otsonipitoisuus vaihtelee sekä vuoden- että vuorokaudenaikojen mukaan. Se on korkeimmillaan kevään ja alkukesän päivätunteina. Tällöin pitoisuus voi Suomessakin olla jopa 150 ppb (ppb= parts per billion=miljardisosa tilavuudesta), jolloin herkimpien kasvien vaikutuskynnys ylittyy selvästi. Liikenteen lisääntyessä alailmakehän otsonipitoisuus ja näin ollen myös sen haittavaikutukset metsäpuiden kasvulle tulevat todennäköisesti lisääntymään.

Hiilidioksidipitoisuuden nousu muuttaa hiilen allokaatiota lehtien sisällä

Kenttäolosuhteissa hiilidioksidipitoisuuden nosto on lisännyt fotosynteesiä puulajista, genotyypistä ja kasvuoloista riippuen 0-60 %, keskimääräisen fotosynteesinopeuden lisäyksen ollessa 26 % (Nowak ym. 2004). Metsäpuiden osalta tällainen fotosynteesin nousu on kasvattanut biomassan tuottoa keskimäärin 20 % (Nowak ym. 2004). Typen saatavuus vaikuttaa oleellisesti fotosynteesin nopeuteen: kun typpi tulee rajoittavaksi tekijäksi, fotosynteesin nousu kohotetussa CO_2-pitoisuudessa pienenee eli tapahtuu fotosynteesin alasajo (downregulation) (Drake ym. 1997). Tämä johtuu typpiaineenvaihdunnassa tapahtuvista muutoksista, joiden seurauksena typpeä allokoidaan uudella tavalla ja pienenevä osuus typestä ohjautuu hiilen sidontakoneiston rakennusaineeksi (Drake ym. 1997, Luomala ym. 2003). Fotosynteesin alasajoon vaikuttaa myös liukoisten sokerien ja tärkkelyksen kertyminen lehtisolukoihin (mm. Drake ym. 1997, Luomala ym. 2003). Tämä puolestaan voi olla seurausta siitä, että mekanismit, joiden avulla kasvi siirtää hiiliyhdisteitä lehtisolukoista pois, eivät toimi riittävän tehokkaasti. Toisaalta hiiliyhdisteiden kertyminen voi johtua myös kasvuprosessien rajallisuudesta: puiden kapasiteetti kasvaa, muodostaa uusia kasvupisteitä ja siten käyttää muodostuneet hiiliyhdisteet, tulee rajoittavaksi tekijäksi. Muutokset hiilen sidonnassa ja allokaatiossa lehtitasolla heijastuvat lehtien rakenteeseen ja kemialliseen koostumukseen. Näistä muutoksista huolimatta, tai niistä johtuen, lehtien vanheneminen ja kellastuminen voivat hidastua, jolloin yhteytyskoneiston aktiivinen toiminta-aika pitenee.

Otsonipitoisuuden nousun vaikutukset voivat näkyä viiveellä

Otsonin vaikutukset kasvien toimintaan riippuvat otsonipitoisuudesta, otsonialtistuksen kestosta ja kasvien kyvystä puolustautua kohonnutta otsonipitoisuutta vastaan (Matyssek & Sandermann 2003). Niinpä otsonin aiheuttamat kasvutappiot ovat olleet vaihtelevia ja ne ovat tulleet ilmi viiveellä, kun puut altistuvat kohotetulle otsonipitoisuudelle useamman vuoden ajan (Oksanen 2003).

Altistusolosuhteista riippuen kasvisolukoissa voi tapahtua puolustusmekanismien aktivoituminen tai, altistavan pitoisuuden ollessa korkea, solukkokuolema. Otsonista muodostuvat reaktiiviset happiyhdisteet vaurioittavat solukalvoja, heikentävät proteiinien synteesiä, nopeuttavat proteiinien hajotusta, alentavat fotosynteesiä sekä aiheuttavat solurakenteille eritasoisia vaurioita (Long & Naidu 2002). Otsonin aiheuttamat aineenvaihdunnan muutokset yleensä nopeuttavat vanhenemisprosesseja ja johtavat lehtien ennenaikaiseen kellastumiseen ja kuolemiseen (Long & Naidu 2002, Matyssek & Sandermann 2003) ja siten edistävät kasvutappioiden kehittymistä.

Pystyykö kohoava CO_2 korjaamaan otsonin aiheuttamia vaurioita?

Tulevaisuuden ilmastossa metsäpuut altistuvat samanaikaisesti kohoaville CO_2- ja otsonipitoisuuksille. Tämän vuoksi on tärkeä ymmärtää, miten nämä kaksi kasvihuonekaasua yhdessä vaikuttavat puiden aineenvaihduntaan ja kasvuun. Tuloksia useita vuosia kestäneistä kenttäolosuhteissa tehdyistä tutkimuksista on vähän ja ne ovat olleet vaihtelevia. Useimmissa tutkimuksissa kohotettu CO_2-pitoisuus on kuitenkin kompensoinut otsonin aiheuttamat kasvutappiot, mutta samalla CO_2-pitoisuuden nousun aiheuttama kasvunlisäys on hävinnyt (Isebrands ym. 2001). Mahdollisia syitä CO_2:n suojavaikutukseen on useita:

- CO_2-pitoisuuden noustessa ilmaraot sulkeutuvat, jolloin vähemmän otsonia kulkeutuu lehtiin ja vauriot jäävät pienemmiksi.
- CO_2-pitoisuuden noustessa hiilihydraattien ja pelkistävien yhdisteiden tuotanto kasvaa, mikä parantaa lehtien kykyä vaimentaa otsonin aiheuttamia reaktiivisia happimolekyylejä.
- Kohotetussa CO_2-pitoisuudessa solun normaaliin toimintaan liittyvä fotorespiraatio (valohengitys) usein vähentyy, jolloin fotorespiraatiossa muodostuvan vetyperoksidin tuotanto vähentyy ja siten reaktiivisten happimolekyylien määrä solukoissa pienenee.

Lehtipuut menestyjiä?

Lehtipuiden on ennustettu olevan havupuihin nähden menestyjiä tulevaisuuden ilmastossa (Kellomäki ym. 1996). Tämä johtuu siitä, että lehtipuilla on jatkuva kasvutapa, minkä vuoksi ne pystyvät jatkamaan pituuskasvua niin kauan kuin kasvuolosuhteet, päivänpituus ja lämpötila, ovat suotuisat. Boreaalisen vyöhykkeen havupuilla puolestaan vuotuinen kasvu on ennalta määräytynyt ja edellisen kasvukauden olosuhteet pääasiallisesti määräävät kasvun volyymin. Näiden tietojen pohjalta on ennustettu, että puulajisuhteet tulisivat Suomessa olennaisesti muuttumaan, lehtipuista erityisesti koivun osuus tulisi kasvamaan ja Etelä-Suomi muuttuisi tulevaisuudessa koivuvaltaiseksi (Kellomäki ym. 1996).

Kokeellista tietoa edellä esitettyjen malliennusteiden tueksi on kuitenkin niukasti. Kenttäolosuhteissa lehtipuilla on boreaalisessa vyöhykkeessä tehty tutkimuksia perin vähän, ja valtaosin tutkimustiedot ovat peräisin pienillä taimilla tehdyistä astiakokeista. Erityisesti tietoa puuttuu eri kasvihuonekaasujen, kuten CO_2:n ja otsonin yhteisvaikutuksista. Lehtipuiden, koivu mukaan lukien, tiedetään vaurioituvan havupuita herkemmin otsonipitoisuuden noustessa, mikä johtuu lehtipuiden yleisesti korkeammasta ilmarakokonduktanssista (Skärby ym. 1998). Näin ollen voitaisiin hyvinkin olettaa, että tulevaisuudessa CO_2-pitoisuuden ja lämpötilan nousun kasvua lisäävä vaikutus jäisi ennustettua pienemmäksi, mahdollisesti jopa kumoutuisi. Tämä puolestaan merkitsisi sitä, että ennusteet koivun kasvupinta-alan lisääntymisestä eivät toteutuisi.

Suonenjoen OTC-kokeessa tutkittiin rauduskoivua

Edellä esitettyihin kysymyksiin etsittiin vastauksia Metsäntutkimuslaitoksen Suonenjoen tutkimusasemalla vv. 1999-2001 toteutetussa tutkimuksessa (infotaulu 1). Tutkimuksessa kahta eteläsuomalaista rauduskoivukloonia (klooni 4, alkuperä Valkeakoskelta ja klooni 80, alkuperä Enosta) kasvatettiin avokammioissa (OTC, kuva 1) CO_2- ja otsonipitoisuuden suhteen nykyisiin olosuhteisiin nähden noin kaksinkertaisessa pitoisuudessa eli olosuhteissa, joiden ennustemallien perusteella odotetaan vallitsevan noin 100 vuoden kuluttua. Tutkimuksen alkaessa puut olivat 7-vuotiaita ja kokeen päättyessä v. 2001 niillä oli kymmenen kasvukauden historia takanaan.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, (1) hyötyykö rauduskoivu hiilidioksidipitoisuuden nousta; (2) aiheuttaako kokoava alailmakehän otsoni puissa vaurioita ja kasvutappioita kenttäolosuhteissa; (3) pystyykö kohotettu hiilidioksidipitoisuus kompensoimaan otsonin aiheuttamat kasvutappiot, jos sellaisia havaitaan. Keskeisenä tutkimuskohteena olivat muutokset puiden fysiologiassa ja erityisesti kasvuvasteissa. Näiden kysymysten lisäksi tutkittiin myös biologisia vuorovaikutuksia, kuten altistuskäsittelyjen vaikutuksia koivun lehtien kemialliseen koostumukseen ja sitä kautta lehtiä syövien hyönteisten kasvuun ja ravinnon valintaan sekä vaikutuksia juuristosysteemin toimintaan ja maaperään, mm. lehtikarikkeen hajotuksen kautta.

Tutkimuksessa mitattiin kasvuun liittyviä tunnuksia, kuten rungon pituus- ja läpimitan, runkotilavuuden ja juuristosysteemin kasvua, kokonaislehtialaa, lehtien varisemisen ajoittumista syksyllä sekä siementuotantoa. Tutkimuksen päättyessä puut kaadettiin ja niiden biomassat ja biomassan jakautuminen puun eri osien välillä määritettiin. Kasvutulokset ovat tärkeitä, koska ne kertovat integroidusti kasvuolosuhteiden hyvyyden kenttäolosuhteissa. Erilaisten kasvifysiologisten ja biokemiallisten tutkimusmenetelmien avulla, esim. fotosynteesimittaukset, fotosynteesin biokemia, lehtien rakenne ja kemia, puolestaan haluttiin saada tietoa kasvuvasteiden taustalla olevista muutoksista. Biologisia vuorovaikutuksia, kuten altistusten vaikutuksia lehtien puolustuskemiaan ja edelleen lehtiä syövien hyönteisten syöntikäyttäytymiseen tutkittiin syöttö- ja kafeteriatyyppisten tutkimusten avulla, joissa tutkitaan vaikutuksia ravinnon kulutukseen ja valintaan. Käsittelyjen vaikutuksia juuristosysteemin toimintaan tutkittiin useilla eri menetelmillä (ks. infotaulu 3).

Infotaulu 1. Suonenjoen avokammiokokeen (OTC-koe) kasvatusolosuhteet kokeen aikana vv. 1999 – 2001.

Koe toteutettiin osana laajempaa kloonikoetta ja siinä tutkittiin kohotetun hiilidioksidi- ja otsonipitoisuuden vaikutuksia kahden rauduskoivukloonin menestymiseen. Puut olivat kokeen alkaessa 7-vuotiaita ja niiden keskipituus oli noin 5 metriä. Altistukset toteutettiin 7.8 metriä korkeissa, ylhäältä avoimissa kammioissa (kuva 1), joita oli kokeessa 32 kpl, kussakin kammiossa yksi puu sisällä. Kammiottomia ulkokontrollipuita oli 8 kpl. Yhteensä kokeessa oli mukana 40 puuta, kustakin käsittelystä neljä riippumatonta toistoa. Altistusolosuhteita kammioiden sisällä sääteli tietokoneohjelma, jonka ohjaamana kammioilmaan syötettiin tarvittavat hiilidioksidi- ja otsonimäärät tavoitepitoisuuksien aikaansaamista varten. Puita altistettiin vuosittain kasvukauden aikana (toukokuu-syyskuu). Altistus hiilidioksidilla oli ympärivuorokautista, otsonialtistus tapahtui vain valoisaan aikaan (vv. 1999-2000 12 h/vrk, v. 2001 14 h/vrk). Tarkempi kuvaus kokeen teknisestä toteutuksesta on luettavissa osoitteessa http://www.metla.fi/julkaisut/mt/838.

Käsittelyt Suonenjoen OTC-kokeessa

2 × vallitseva CO_2-pitoisuus (EC)
2 × vallitseva O_3-pitoisuus (EO)
2 × vallitseva CO_2- ja O_3-pitoisuus (EC+EO)
Kammiokontrolli:vallitseva CO_2- ja O_3-pitoisuus (CC)
Ulkokontrolli: vallitseva CO_2- ja O_3-pitoisuus (EO)



Kuva 1. Suonenjoen tutkimuksessa altistukset tehtiin avokammioissa, joita oli yhteensä 32. Avokammiot ovat ylhäältä avoimia 'pienoiskasvihuoneita'. Kammion alaosassa oleva tuuletin säätää ilman virtausta ja samalla myös lämpötilaa kammion sisällä. Kuva: Metla/Erkki Oksanen.

Koeolosuhteet vv. 1999-2001 Suonenjoen OTC -kokeessa

Muuttuja	käsittely	1999	2000	2001
AOT40 (ppm h)	kammiokontrolli	2.8	2.5	1.7
	kohotettu O_3	20.6	24.4	30.9
AOT0 (ppm h)	kammiokontrolli	49.4	66.2	66.3
	kohotettu O_3	73.6	97.1	106.8
CO_2 (ppm)	kammiokontrolli	365	371	373
	kohotettu CO_2	651	720	729
Lämpösumma	ulkoilma	1390	1243	1303
	kammiot	1603	1618	1701

- ppm = parts per million (miljoonasosa tilavuudesta)
- ppb = parts of billion (miljardisosa tilavuudesta)

Infotaulu 1, jatkoa.

Määritelmiä

AOT40 (**a**ccumulated exposure **o**ver a **t**hreshold of 40 ppb) on käsite, jonka avulla arvioidaan kasvukauden aikaisen O_3-pitoisuuden kasvillisuudelle aiheuttamaa riskiä. Otsonipitoisuuden kriittiseksi raja-arvoksi valittu 40 ppb vastaa nykykäsityksen mukaan O_3-kuormitusta, jota alhaisempi O_3-pitoisuus ei todennäköisesti aiheuta kasvillisuudelle vaurioita. AOT40 lasketaan 40 ppb:n ylittävien tuntipitoisuuksien ja 40 ppb erotuksen kumulatiivisena summana kasvukauden ajalta laskettuna päivittäisistä tuntikeskiarvoista. Metsäpuilla kriittisenä arvona pidetään 10 ppm h, jonka on todettu aiheuttavan mallipuuksi valitulla pyökillä 10 % kasvutappioita (Fuhrer ym. 1997).

AOT00 (**a**ccumulated exposure **o**ver a **t**hreshold of 0 ppb) lasketaan 0 ppb:n ylittävien tuntipitoisuuksien kumulatiivisena summana kasvukauden ajalta laskettuna päivittäisistä tuntikeskiarvoista. AOT00 kuvaa O_3-altistuksen kokonaismäärää.

Lämpösummalla tarkoitetaan vuorokautisten keskilämpötilojen summaa termisen kasvukauden aikana. Terminen kasvukausi on ajanjakso, jolloin vuorokauden keskilämpötila on vähintään +5 °C.

Taulukko 1. Hiilidioksidialtistuksen vaikutukset rauduskoivukloonien 4 ja 80 kasvuun ja fysiologiaan Suonenjoen OTC-kokeessa 1999-2001. Tuloksissa on esitetty käsittelyn aiheuttama keskimääräinen muutos suhteessa kammiokontrolliin (%) kolmen altistusvuoden aikana. * tilastollinen P-arvo < 0.1.

Muuttuja	klooni 4 %	klooni 80 %
Kuivapaino, koko puu	- 2.4	40*
-juuret	- 5*	44*
-runko	4*	41*
-oksat	-18	30*
-lehdet	- 4	38*
Fotosynteesi	40*	25*
Lehtiala	- 10	29*
Siirtyminen generatiiviseen vaiheeseen	nopeutunut*	nopeutunut*
Lehden vanheneminen	hidastunut*	hidastunut*
Lehtien tärkkelyspitoisuus	64*	43*
Lehtien typpipitoisuus	- 5*	-11*
Lehtien C/N -suhde	16*	19*

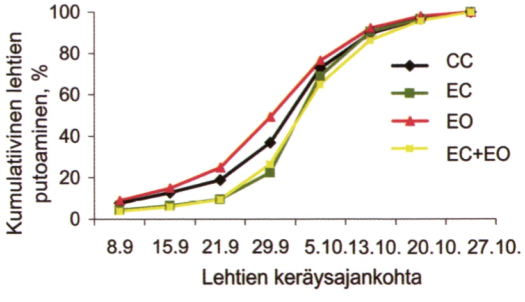
Hiilidioksidipitoisuuden nousu - vaikutukset kasvuun, fysiologiaan ja fenologiaan kloonikohtaisia

Rauduskoivukloonit reagoivat kohotettuun CO_2-pitoisuuteen eri tavoin. Molemmilla klooneilla rungon paksuuskasvu lisääntyi, mutta vain kloonilla 80 kasvun lisäys näkyi runkotilavuuden kasvuna (55 % lisäys, yksityiskohtaisemmat kasvutulokset ks. Riikonen ym. 2004). Kloonin 80 kokonaisbiomassa lisääntyi kohotetussa CO_2-pitoisuudessa 40 %, mikä johtui vilkastuneesta fotosynteesistä (taulukko 1). Myös kloonilla 4 fotosynteesi nopeutui selvästi, mutta tällä kloonilla kohotettu CO_2-pitoisuus ei lisännyt biomassan kasvua (taulukko 1). Kloonin 80 osalta lisääntynyt biomassa jakaantui tasaisesti eri kasvinosien välillä toisin kuin kloonilla 4, jolla kohotettu hiilidioksidipitoisuus lisäsi runkomassan suhteellista osuutta oksien, lehtien ja juurten kustannuksella (taulukko 1). Yhteytystoiminnan vilkastumisesta johtuen hiiliyhdisteitä kertyi lehtiin molemmilla klooneilla, mikä näkyi tärkkelyspitoisuuden ja hiili-typpisuhteen (C/N) lisääntymisenä. Tulosten perusteella näyttääkin ilmeiseltä, että eteläisem-

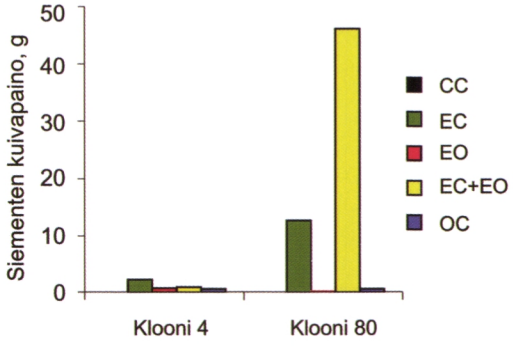
pää alkuperää edustava klooni 4 ei pystynyt kasvattamaan yhteyttävää lehtialaa, mikä olisi ollut välttämätön positiivisen kasvuvasteen aikaansaamiseksi. Sen sijaan lisääntyneet yhteytystuotteet ohjautuivat mm. puolustusyhdisteisiin, joita klooni 4 tuotti selvästi enemmän kuin klooni 80 (ks. infotaulu 2, kuva 4).

Lehtien vanheneminen on monien tarkoin säädeltyjen biokemiallisten ja fysiologisten prosessien tulos, joka lopulta johtaa ravinteiden talteenottoon vanhenevista lehdistä. Kohotetun CO_2-pitoisuuden vaikutuksia lehtien fenologiaan ei tunneta hyvin ja tulokset ovat olleet vaihtelevia: kohotettu CO_2-pitoisuus voi aikaistaa, viivyttää tai olla vaikuttamatta fenologiaan riippuen kasvilajista ja etenkin koeolosuhteista (Karnosky ym. 2003, Norby ym. 2003). Kohotetun CO_2-pitoisuuden on arvioitu viivästyttävän lehtien vanhenemista, koska kasvuolosuhteet pitävät lehtien hiilihydraattipitoisuuden korkeana, minkä vuoksi lehtien elinikä pitenee. Suonenjoen OTC-tutkimuksessa kohotettu CO_2-pitoisuus hidasti lehtien vanhenemista molemmilla klooneilla, mikä näkyi lehtien tippumisen viivästymisenä (kuva 2). Pidentyvän aktiivisen kasvukauden vuoksi hiilidioksidin positiivinen kasvuvaikutus voi siten tulevaisuudessa vielä voimistua niillä rauduskoivualkuperillä, joilla hiilidioksidipitoisuuden nousu lisää kasvua. Tähän liittyy kuitenkin riski, että kasvun jatkuminen myöhään syksyyn altistaa puut pakkasvaurioille, kun puiden karaistuminen viivästyy.

Tietoa hiilidioksidin vaikutuksesta puiden siementuotantoon on vähän, koska altistuskokeet on yleensä tehty nuorilla kasvullisessa vaiheessa olevilla taimilla. Aiemman kirjallisuuden perusteella kohotettu CO_2-pitoisuus yleensä edistää siementuotantoa, joskin eri lajit ovat reagoineet hyvin eri tavoin (Jach ym. 2001). Suonenjoen OTC -kokeessa puut olivat nuoria ja eivät olleet kokeen alkaessa vielä siirtyneet generatiiviseen vaiheeseen. Siemensatoa tutkittiin kokeessa v. 2001 eli 3. altistusvuoden päättyessä. Tutkimus osoitti, että kohotettu CO_2-pitoisuus aikaisti generatiiviseen vaiheeseen siirtymistä erityisesti kloonilla 80, jolla siementuotanto lisääntyi selvästi (taulukko 1, kuva 3). Tulos, jonka mukaan hiilihydraattien 'ylituotanto' jouduttaa puiden ontogeniaa aikaistamalla kukintaa ja siementuotantoa, on mielenkiintoinen. Tällä seikalla voi olla tulevaisuudessa tärkeä merkitys puiden lisääntymisbiologiaan ja puulajien keskinäiseen kilpailuun, jotka puolestaan voivat vaikuttaa käytännön metsänhoitomenetelmiin.



Kuva 2. Rauduskoivun lehtien kumulatiivinen variseminen (% kokonaislehtipinta-alasta) eri käsittelyissä. Kuvassa tulokset on esitetty kasvukauden 2000 osalta ja siinä on molempien kloonien tulokset yhdistetty. Lehtipinta-alan määrittämiseksi pudonneet lehdet kerättiin avokammioista kerran viikossa ja niistä määritettiin lehtipinta-ala. Keräämistä jatkettiin, kunnes kaikki lehdet olivat tippuneet. CC=kammiokontrolli, EC=kohotettu hiilidioksidipitoisuus (720 ppm), EO=kohotettu otsonipitoisuus (2 x vallitseva pitoisuus), EC+EO=kohotettu hiilidioksidi ja otsoni yhdessä. N=8.

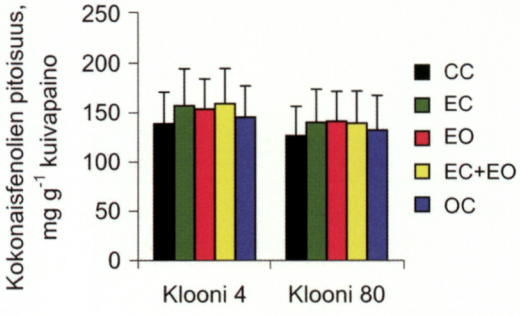


Kuva 3. Rauduskoivukloonien siementuotanto eri käsittelyissä vuonna 2001. Tuloksissa on esitetty neljän puun keskiarvot. CC= kammiokontrolli, EC= kohotettu hiilidioksidipitoisuus (720 ppm), EO= kohotettu otsonipitoisuus (2 x vallitseva pitoisuus), EC+EO=kohotettu hiilidioksidi ja otsoni yhdessä.

Infotaulu 2. Hiilidioksidi- ja otsonipitoisuuden nousun vaikutukset koivun lehtien kemialliseen koostumukseen ja lehtiä syövien hyönteisten käyttäytymiseen.

Suonenjoen OTC-kokeessa tutkittiin kohotetun hiilidioksidi- ja otsonipitoisuuden vaikutuksia fenolisten yhdisteiden muodostumiseen rauduskoivun lehdissä kolmen kasvukauden ajan. Fenoliset aineet koostuvat joukosta erilaisia yhdisteryhmiä (fenolihapot, flavonit, flavonolit, hydrolysoituvat ja kondensoituvat tanniinit), joilla on tärkeä merkitys kasvien evoluutiossa. Ne toimivat puolustus- ja signaaliyhdisteinä, joiden avulla kasvit puolustautuvat mm. kasveja syöviä tuholaisia vastaan. Lisäksi ne voivat toimia kasvunsäätelijöinä, antioksidantteina, entsyymien inhibiittoreina ja kasvipigmentteinä suojaamassa kasvia mm. UV-säteilyn haittavaikutuksia vastaan. Fenoliset yhdisteet ovat hiilipitoisia, minkä vuoksi on arveltu, että niihin ohjautuvat 'ylimääräiset' yhteytystuotteet, joita kasvit eivät pysty syystä tai toisesta käyttämään kasvuunsa.

Kokonaisfenolien pitoisuus rauduskoivun lehdissä on korkea, Suonenjoen OTC-tutkimuksen mukaan noin 14 % lehtien kuivapainosta on fenolisia yhdisteitä. Erot kloonien välillä olivat merkitsevät. Tutkimus osoitti, että hiilidioksidi- ja otsonipitoisuuden kaksinkertaistaminen vielä lisäsi merkitsevästi kokonaisfenolien pitoisuutta.

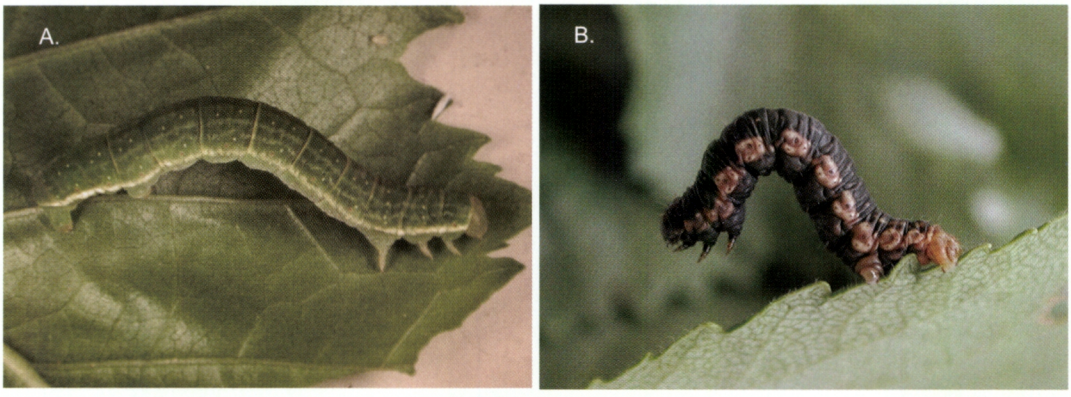


Kuva 4. Hiilidioksidi- ja otsonialtistusten vaikutukset kokonaisfenolipitoisuuksiin (mg g^{-1} kuiva-ainetta) rauduskoivukloonien 4 ja 80 vihreissä lehdissä. Tulokset ovat kolmen kasvukauden keskiarvoja (+SD). CC=kammiokontrolli, EC=kohotettu hiilidioksidipitoisuus (720 ppm), EO=kohotettu otsonipitoisuus (2 x vallitseva pitoisuus), EC+EO= kohotettu hiilidioksidi ja otsoni yhdessä.

Tunturimittarin (*Epirrita autumnata*, kuva 5A) ja keihäsmittarin (*Rheumaptera hastata*, kuva 5B) toukilla tehtyjen syöttökokeiden avulla tutkittiin, miten muutos lehtien kemiallisessa koostumuksessa vaikuttaa toukkien kasvuun ja ravinnon käytön tehokkuuteen. Näissä tutkimuksissa todettiin, että *hiilidioksidipitoisuuden kaksinkertaistaminen* lisäsi tunturimittarin toukkien ravinnon kulutusta 4 % ja keihäsmittarin toukkien ravinnon kulutusta 31 %. Tämä osoitti, että hiilidioksidilla altistettujen puiden lehdet olivat ravintoarvoltaan huonompilaatuisia kontrollipuiden lehtiin nähden, mikä aiheutti nk. 'kompensaatiosyöntiä'. Toukat söivät enemmän, jotta niiden kasvuun ja kehitykseen tarvittava ravintovaatimus täyttyi, ja se näkyi heikentyneenä ravinnon käytön tehokkuutena. Tunturimittarilla ravinnon käytön tehokkuus laski 8 % ja keihäsmittarilla 37 % (Peltonen ym., julkaisematon tulos).

Myös *kohotettu otsonipitoisuus* muutti lehtien ravintoarvoa. Otsonialtistuksen seurauksena tunturimittarin toukkien kotelopaino laski eli lehtien kemiallinen koostumus oli muuttunut ja myrkkyvaikutus oli ilmeinen. Vaikutukset olivat kuitenkin lajikohtaisia; vastaavia muutoksia ei havaittu keihäsmittarin toukilla (Peltonen ym., julkaisematon tulos).

Infotaulu 2, jatkoa.



Kuva 5. Suonenjoen OTC-kokeessa tutkittiin syöttökokeiden avulla, miten hiilidioksidi- ja otsonialtistukset muuttavat vihreiden lehtien laatua ja siten vaikuttavat lehtiä ravintonaan käyttävien hyönteisten toukkien kasvuun. Tutkimuksessa käytettiin tunturimittarin (A) ja keihäsmittarin (B) toukkia, jotka molemmat ovat rauduskoivun tuhohyönteisiä. Kuvat: Jarmo Holopainen.

Kohoavan otsonipitoisuuden vaikutukset kloonikohtaisia

Suonenjoen OTC-tutkimuksessa rauduskoivukloonit reagoivat otsonipitoisuuden lisäykseen hyvin eri tavoin. Myös puuyksilöiden välinen vaihtelu oli suurta, minkä vuoksi keskiarvotuloksien perusteella arvioiden joissakin tapauksissa isot erot käsittelyjen välillä eivät tulleet tilastollisesti merkitseviksi. Kohotettu otsonipitoisuus vähensi kloonin 4 kokonaisbiomassaa 26 %. Kloonin 80 biomassakertymään ja yhteytykseen otsonilla ei ollut vaikutusta kolmen vuoden altistusjakson aikana, joskin myös tällä kloonilla voitiin havaita merkkejä oksidatiivisen stressin vaikutuksista (ks. taulukko 2, Oksanen ym. 2005). Kloonilla 4 otsonin haittavaikutukset näkyivät juurten, oksien ja lehtien biomassan väheneminisenä (taulukko 2). Juuriston kasvun aleneminen on usein havaittu vaste kohotetulle otsonipitoisuudelle (Coleman ym. 1995, Rebbeck & Loats 1997, Oksanen & Rousi 2001). Otsonin on todettu vaurioittavan erityisesti vanhoja lehtiä, jotka tuottavat energian juuriston kasvua varten. Juuriston toiminnan heikkenemisellä puolestaan voi olla lukuisia seurausvaikutuksia, kuten altistuminen kuivuudelle ja muille stressitekijöille.

Hypoteesiemme vastaisesti biomassan väheneminen ei johtunut hiilidioksidin sidonnan hidastumisesta. Kasvukausien aikana tehtyjen lukuisten kaasunvaihtomittausten perusteella kohotettu otsoni ei heikentänyt yhteytysnopeutta kummankaan kloonin lehdissä, tosin merkkejä fotosynteesin biokemiallisten toimintojen heikkenemisestä voitiin havaita (ks. Riikonen ym. 2005). Sen sijaan vaikutukset kasvuun kanavoituivat yksittäisten lehtien koon ja kokonaislehtialan kautta. Suonenjoen tutkimuksessa kohotettu otsoni vähensi kokonaislehtialaa (taulukko 2), mikä väistämättä johtaa koko puun tasolla kokonaishiilensidonnan ja siten kasvun heikkenemiseen. Kasvutappioita edisti myös lehtien nopeutunut vanheneminen ja variseminen (taulukko 2, kuva 2), minkä vuoksi aktiivinen hiilidioksidin sidontajakso kasvukauden aikana lyheni ja siten osaltaan pienensi kokonaishiilikertymää ja kasvua. Aikaistunut lehtien vanheneminen voi johtua mm. siitä, että juuriston hidastuneen kasvun vuoksi puiden kapasiteetti ottaa maasta ravinteita ja kuljettaa niitä lehvästön käyttöön on heikentynyt (Jach ym. 2001). Seurausvaikutuksena voi olla muutoksia hormonitasapainossa (etyleeni, sytokiniini), jolla on tärkeä merkitys metaboliareittien säätelyssä. Suonenjoen kokeessa varhentuneen lehtien varisemisen yhteydessä havaittiinkin typpipitoisuuden lasku ja sen seurauksena C/N –suhteen nousu (taulukko 2), mitkä viittaavat ravinteiden ja muiden tärkeiden

aineenvaihduntatuotteiden nopeutuneeseen talteenottoon otsonistressin vaivaamista lehdistä (Long ja Naidu 2002).

Kompensoiko kohoava hiilidioksidipitoisuus otsonin haittavaikutukset?

Kokeellisessa ilmastonmuutostutkimuksessa hiilidioksidi- ja otsonipitoisuus on yleensä 'viritetty' vastaamaan ilmastoskenaarioiden mukaisia olosuhteita 50 tai 100 vuoden aikaperspektiivillä. Yksinkertaistus on ollut välttämätön, koska tarvittavat koejärjestelyt vaikutusten aikadynamiikan tutkimiseksi ovat monimutkaisia ja myös erittäin kalliita. Erityisesti tutkittaessa hiilidioksidin ja otsonin interaktioita tämä lähestymistapa on teoreettinen, koska siinä oletetaan, että puiden herkkyys reagoida näiden kaasujen pitoisuuksissa tapahtuviin muutoksiin pysyy samana. Näin ei todennäköisesti ole: lähestymistavassa ei huomioida sitä, että pitoisuuksien nousun dynamiikka ja erityisesti puiden herkkyys ja kapasiteetti reagoida muutokseen voi pitoisuuksien noustessa olla hiilidioksidin ja otsonin osalta erilainen. Otsonipitoisuuden nousun aiheuttamat vauriot voivat kumuloitua ja näkyä kasvutappioina vasta viiveellä, useiden vuosien altistusajan jälkeen (Oksanen & Saleem 1999). Nämä seikat on syytä pitää mielessä, kun arvioidaan tuloksia Suonenjoen OTC –tutkimuksesta ja muista vastaavista tutkimuksista, joissa on tutkittu hiilidioksidipitoisuuden nousun merkitystä otsonin aiheuttamien vaurioiden kompensoinnissa.

Suonenjoen tutkimuksen osalta keskeiset tulokset kohotetun hiilidioksidin ja otsonin yhteisvaikutuksista rauduskoivun kasvuun ja fysiologiaan on esitetty taulukossa 3. Tutkimus osoitti, että kohotettu hiilidioksidi pystyy kompensoimaan otsonin aiheuttamat vauriot. Vasteet olivat valtaosin samat, kuin mitä havaittiin kohotetussa hiilidioksidissa (taulukko 2, kuvat 2 ja 3). Joidenkin tutkittujen tunnusten osalta, kuten biomassan kasvu kloonilla 4 ja siementuotanto kloonilla 80 (kuva 3), havaittiin myös 'ylikompensaatiota'. Tällöin yhteiskäsittelyssä vaikutus oli suurempi kuin mitä olisi voinut ennustaa kaasujen yksittäisvaikutusten perusteella. Mekanismeja, jotka aiheuttavat 'ylikompensaation', ei tunneta. Siementuotannon voimistumisen perusteella voisi olettaa, että yhteiskäsittely on muuttanut kasvihormonien välisiä suhteita, mikä puolestaan on edistänyt kukintaa ja siementuotantoa.

Taulukko 2. Otsonialtistuksen vaikutukset rauduskoivukloonien 4 ja 80 kasvuun ja fysiologiaan Suonenjoen OTC-kokeessa 1999-2001. Tuloksissa on esitetty käsittelyn aiheuttama keskimääräinen muutos suhteessa kammiokontrolliin (%) kolmen altistusvuoden aikana. * tilastollinen P-arvo < 0.1.

Muuttuja	klooni 4 %	klooni 80 %
Kuivapaino, koko puu	- 26*	ei muutosta
-juuret	- 38*	- 8
-runko	- 22	- 4
-oksat	- 29*	ei muutosta
-lehdet	- 20*	- 14
Fotosynteesi	ei muutosta	ei muutosta
Lehtiala	- 21	- 14
Siirtyminen generatiiviseen vaiheeseen	ei muutosta	ei muutosta
Lehden vanheneminen	nopeutunut*	nopeutunut*
Lehtien tärkkelyspitoisuus	15	ei muutosta
Lehtien typpipitoisuus	- 9	- 2
Lehtien C/N -suhde	10	4

Ilmastonmuutoksen biologiset vuorovaikutukset

Biologisten vuorovaikutusten osalta Suonenjoen kenttäkokeen keskeiset tulokset on esitetty Infotauluissa 2 ja 3. Yksityiskohtaisempaa tietoa näiden tutkimusten tuloksista löytyy alkuperäisjulkaisuista (Kasurinen ym. 2004, 2005, Peltonen ym. 2005). Infotaulussa 3 esitettyjen tulosten perusteella on ilmeistä, että ilmastonmuutoksen aiheuttamat muutokset rauduskoivun fysiologiassa ja kasvussa heijastuvat maaperään ja maaperäeliöiden toimintaan, jotka palautevaikutuksiensa kautta (esim. vaikutukset mineralisaatioon) voivat vaikuttaa myös puiden kasvuun. Kokeellista tietoa näistä mahdollisista seurannaisvaikutuksista on vielä hyvin niukasti.

Hiilidioksidi- ja otsonipitoisuuden kohoaminen vaikuttavat myös lehtien kemiaan (infotaulu 2). Ravintoarvoltaan lehdet muuttuvat hiilihydraattipitoisemmiksi tai jopa toksisiksi, kuten Suonenjoen tutkimus osoitti. Vaikutukset voivat näkyä kompensaatiosyöntinä: kulutetun ravinnon määrä kasvaa, jotta yksilönkehitykseen tarvittava proteiinitarve tulee tyydytettyä. Näiden seikkojen vaikutuksia hyönteispopulaatioiden rakenteeseen voi vain arvailla.

Miksi kloonit reagoivat ilmastonmuutokseen eri tavalla?

Suonenjoen tutkimus osoitti hyvin selvästi, että eri genotyyppien reagointi muuttuvaan ilmastoon voi olla hyvin erilainen. Tutkituista klooneista klooni 4 ei pystynyt lisäämään kasvuaan kohotetussa CO_2-pitoisuudessa ja se oli myös herkempi otsonille kuin klooni 80. Syyt erilaisiin CO_2- ja otsonivasteisiin saattavat löytyä eroista kloonien fysiologiassa ja fenologiassa. Kloonilla 4 oli suhteessa enemmän haihduttavaa lehtibiomassaa kuin kloonilla 80. Huolimatta lannoituksen ja kastelun osalta yhtenäisistä kasvuolosuhteista koemetsikössä, kloonilla 4 oli alhaisempi ilmarakokonduktanssi ja vähemmän ilmarakoja kuin kloonilla 80. Tämä voidaan tulkita siten, että klooni 4 pystyy paremmin säätelemään veden kulutusta kuivuusstressin aikana. On siis mahdollista, että kloonin 4 kasvua rajoitti enemmän kuivuus kuin CO_2-pitoisuus. Hieman eteläisemmästä alkuperästä johtuen kloonin 4 lehtisilmut puhkesivat aikaisemmin keväällä ja lehdet varisivat myöhemmin syksyllä kuin kloonilla 80. Tästä johtuen klooni 4 altistui kohotetulle otsonipitoisuudelle pidemmän aikaa ja siten kumulatiivinen otsoniannos muodostui suuremmaksi kuin kloonilla 80.

Taulukko 3. Hiilidioksidi- ja otsonialtistuksen yhteisvaikutukset rauduskoivukloonien 4 ja 80 kasvuun ja fysiologiaan Suonenjoen OTC-kokeessa 1999-2001. Tuloksissa on esitetty käsittelyn aiheuttama keskimääräinen muutos suhteessa kammiokontrolliin (%) kolmen altistusvuoden aikana. * tilastollinen P-arvo < 0.1.

Muuttuja	**klooni 4** **%**	**klooni 80** **%**
Kuivapaino	11	49*
-juuret	2	53*
-runko	16	45*
-oksat	4	60*
-lehdet	17	44*
Fotosynteesi	40*	21*
Lehtiala	11	34*
Siirtyminen generatiiviseen vaiheeseen	nopeutunut*	nopeutunut*
Lehden vanheneminen	hidastunut*	hidastunut*
Lehtien tärkkelyspitoisuus	60*	53*
Lehtien typpipitoisuus	- 3	- 6
Lehtien C/N -pitoisuus	14*	18*

Infotaulu 3. Kohotetun hiilidioksidin ja otsonin vaikutukset rauduskoivun juuristosysteemin toimintaan Suonenjoen OTC-kokeessa.

Suonenjoen OTC-kokeessa ilmastonmuutoksen vaikutuksia rauduskoivun juuristosysteemin kasvuun ja toimintaan tutkittiin eri menetelmillä. Vaikutuksia hienojuurten ja mykorritsojen määrään tutkittiin juurisukkamenetelmällä (kuva 6). Menetelmässä maahan, juuriston sekaan upotetaan 'juurisukkia'. Ne ovat lieriömäisiä, seulotulla maalla täytettyjä tiheäsilmäisiä verkkopusseja, joihin hienojuuret pääsevät tunkeutumaan juuriston kasvaessa. Vuosittain osa juurisukista nostettiin ylös kairaamalla, jonka jälkeen verkkopussiin muodostuneet hienojuuret eroteltiin ja niiden biomassa sekä sienijuuri-infektiot määritettiin.

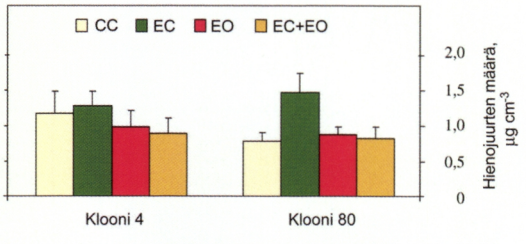
Juuriston kokonaisbiomassa määritettiin kokeen päättyessä kaivamalla juuret maasta (kuva 7, tulokset ks. taulukot 1-3). Kokeen kuluessa tutkittiin kaasunvaihtomittausten avulla kasvukauden aikaista muutosta maahengityksessä. Maahengitys kuvaa maaperän biologista kokonaisaktiivisuutta eli puiden juuriston ja maamikrobien hengityksessä vapautuvan hiilidioksidin tuottonopeutta.



Kuva 6. Juurisukkia rauduskoivun latvuksen alapuolella maahan upotettuina (A) ja yksi maasta nostettu juurisukka (B). Kuvat: Metla/Erkki Oksanen (A), Jarmo Holopainen (B).



Kuva 7. Suonenjoen OTC-kokeessa juuristot nostettiin ylös maasta kokeen päätyttyä juuriston kuivamassan määrittämistä varten. Kuva: Metla/Pekka Voipio.

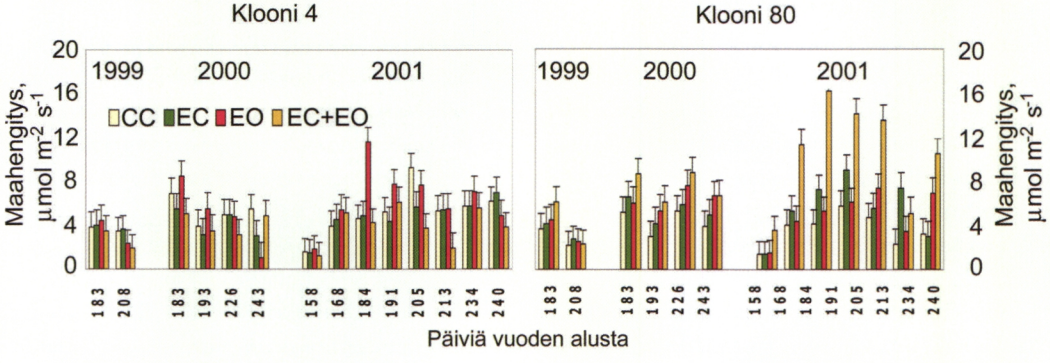


Kuva 8. Rauduskoivukloonien 4 ja 80 hienojuurten määrässä (mg cm^{-3} maata) tapahtuneet muutokset Suonenjoen OTC-kokeessa kolmen altistusvuoden jälkeen v. 2001. Tuloksissa on esitetty keskiarvo +SE. CC=kammiokontrolli, EC=kohotettu hiilidioksidipitoisuus (720 ppm), EO=kohotettu otsonipitoisuus (2 x vallitseva pitoisuus), EC+EO=kohotettu hiilidioksidi ja otsoni yhdessä.

Infotaulu 3, jatkoa.

Kohotettu hiilidioksidipitoisuus lisäsi hienojuurten määrää molemmilla klooneilla. Vaikutus oli selvempi kloonilla 80, joka muutenkin hyötyi hiilidioksidipitoisuuden nostosta. Myös mykorritsallisten hienojuurten määrä lisääntyi kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa ja näkyi molemmilla klooneilla kolmen altistusvuoden jälkeen (tuloksia ei esitetty). Hienojuurten ja mykorritsojen lisääntyminen on merkki yhteytystuotteiden 'ylijäämästä', jonka avulla puut pystyvät kasvattamaan juuriston kapasiteettia ottaa maasta vettä ja ravinteita lisääntyneen kasvun ylläpitämiseksi.

Kohotetun otsonipitoisuuden vaikutus paksujuurten kasvuun (taulukko 2) kloonilla 4 näkyi myös hienojuurten määrän vähentymisenä (kuva 8). Mykorritsallisten hienojuurten määrä puolestaan lisääntyi molemmilla klooneilla kolmen altistusvuoden jälkeen. Mykorritsojen lisääntyminen otsonin vaikutuksesta on havaittu myös aiemmissa tutkimuksissa muilla lajeilla. Syynä mykorritsojen määrän lisääntymiseen voi olla oksidatiivinen stressi, joka vaurioittaa hienojuurten solukalvoja. Vaurioitumisen seurauksena juurisolut tulevat 'vuotaviksi', eli soluista pääsee vuotamaan hiilihydraatteja ja orgaanisia happoja, mitkä puolestaan edistävät mykorritsojen kasvua. Suonenjoen OTC-tutkimuksessa *yhdistetty CO_2+O_3 –käsittely* osoitti, että hienojuurten ja mykorritsojen osalta kohoava otsoni kumoaa täysin hiilidioksidipitoisuuden aiheuttaman kasvun lisäyksen (kuva 8).



Kuva 9. Hiilidioksidi- ja otsonipitoisuuden vaikutukset rauduskoivukloonien 4 (A) ja 80 (B) maahengitykseen kolmen altistusvuoden aikana. Tuloksissa on esitetty keskiarvo +SE. CC=kammiokontrolli, EC=kohotettu hiilidioksidipitoisuus (720 ppm), EO=kohotettu otsonipitoisuus (2 x vallitseva pitoisuus), EC+EO=kohotettu hiilidioksidi ja otsoni yhdessä.

Kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa kloonilla 80 havaittu juuriston kasvun lisääntyminen näkyi myös maahengitysnopeuden nousuna (kuva 9). Kloonilla 4, joka ei pystynyt kasvattamaan biomassaa kohotetussa hiilidioksidissa, maahengitys puolestaan laski, mikä indikoi ongelmista juuristosysteemin toiminnassa.

Kohotettu otsonipitoisuus lisäsi maahengitystä molemmilla klooneilla (kuva 9). Kyse oli todennäköisesti stressihengityksestä, jonka avulla heikentynyt juuristo tuottaa vaurioiden korjaamiseen tarvittavan energian. Heikentyneestä kasvusta johtuen juuristosysteemin pitää myös tehostaa toimintaansa, jotta se pystyy ottamaan maasta kasvuun tarvitsemansa ravinteet, ja tämä voi myös näkyä maahengityksen lisääntymisenä.

Yhdistettyyn CO_2+O_3 –käsittelyyn kloonit reagoivat eri tavoin. Kloonilla 80 vaikutus oli pääasiallisesti additiivinen ja maahengitysnopeus korkein yhdistetyssä käsittelyssä. Kloonilla 4 puolestaan otsonin aiheuttama maahengityksen lisäys kumoutui hiilidioksidin vaikutuksesta (kuva 9).

Johtopäätökset

Suonenjoen OTC-kokeesta saatujen tuloksien perusteella voidaan todeta, että ilmaston muuttuessa rauduskoivun kasvussa ja fysiologiassa tapahtuu merkittäviä muutoksia. Erot genotyyppien välillä ovat ratkaisevassa asemassa, kun arvioidaan rauduskoivun menestymistä tulevaisuudessa. Otsonin aiheuttamat vauriot olivat yllättävän pienet siihen nähden, että lehtipuiden kriittiseksi AOT40 -arvoksi määritetty 10 ppm h ylittyi 2-3 -kertaisesti kaikkien kolmen kasvukauden aikana. On kuitenkin syytä muistaa, että pienetkin vuosittaisen kasvun vähennykset voivat pitkäaikaisessa altistumisessa kumuloitua merkittäviksi kasvutappioiksi, jotka heikentävät puiden kuntoa ja voivat tehdä niistä alttiimpia muille tuhoille. Kloonilla 4 kohotetun CO_2-pitoisuuden aiheuttama fotosynteesitason nousu ei näkynyt lisääntyneenä kasvuna, kuten olisi saattanut olettaa. Tämä klooni oli myös herkempi kohotetulle otsonipitoisuudelle kuin klooni 80. Suonenjoen tutkimuksen tulokset kertovat, että rauduskoivupopulaatioiden sisäinen vaihtelu ja kyky sopeutua muuttuvaan ilmastoon on suuri; vaihtelun laajuudesta kahdella genotyypillä toteutetun tutkimuksen perusteella ei tietenkään saada tietoa. Tutkimus osoitti, että kohotettu CO_2-pitoisuus vähentää otsonin haittavaikutuksia, jotka saattavat molempien kaasujen pitoisuuksien kohotessa olla pienemmät kuin aikaisempien otsonialtistuskokeiden perusteella voitaisiin olettaa. On kuitenkin otettava huomioon, että tässä tutkimuksessa projisoitiin ennustemallien mukaisia olosuhteita 100 vuoden kuluttua. Tällainen lähestymistapa ei anna mahdollisuutta tutkia muutoksen ja vaikutusten dynaamista luonnetta. Tulevien kenttätutkimusten haasteeksi jää selvittää, miten lehtipuiden reaktiot CO_2- ja O_3-pitoisuuksien nousuun muuttuvat puiden elinkaaren aikana, mm. mitkä ovat vaikutukset generatiivisen vaiheen saavuttaneiden täysikasvuisten puiden kasvuun, kun lehvästö on sulkeutunut.

Kirjallisuus

Coleman J.S., Isebrands J.G., Dickson R.E., & Karnosky D.F. (1995) Photosynthetic productivity of aspen clones varying in sensitivity to tropospheric ozone. *Tree Physiology* 15, 585-592.

Drake, B.G., Gonzàlez-Meler, M.A. & Long, S.P. 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmosperic CO_2? Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 48: 609-639.

Fowler, D., Cape, J.N., Coyle, M., Flechard, C., Kuylenstierna, J., Hicks, K., Derwent, D., Johnson, C. & Stevenson, D. 1999. The global exposure of forests to air pollutants. Water Air and Soil Pollution 116: 5-32.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 2001 Climate Change 2001: The Scientific Basis. Technical Summary. 63 s. URL: http://www.ipcc.ch/pub/wg1TARtechsum.pdf

Isebrands, J.G., McDonald, E.P., Kruger, E., Hendrey, G., Percy, K., Pregitzer, K., Sober, A. & Karnosky, D.F. 2001. Growth responses of *Populus tremuloides* clones to interacting elevated carbon dioxide and tropospheric ozone. Environmental Pollution 115: 359-371.

Jach, M.E., Ceulemans, R. & Murray, M.B. 2001. Impacts of greenhouse gases on the phenology of forest trees. Julkaisussa: Karnosky, D.F., Ceulemans, R., Scarascia-Mugnozza, G.E. & Innes, J.L. (toim.) The Impact of Carbon Dioxide and Other Greenhouse Gases on Forest Ecosystems. CABI Publishing. Oxfordshire. s. 193-236.

Karnosky, D.F., Zak, D.R., Pregitzer, K.S., ym. 2003. Tropospheric O_3 moderates responses of temperate hardwood forests to elevated CO_2: a synthesis of molecular to ecosystem results from the Aspen FACE project. Functional Ecology 17: 289-304.

Kasurinen, A., Kokko-Gonzales, P., Riikonen, J., Vapaavuori, E. & Holopainen, T. 2004. Soil CO_2 efflux of two silver birch clones exposed to elevated CO_2 and O_3 levels during three growing seasons. Global Change Biology, 10, 1654-1665.

Kasurinen, A., Keinänen, M. M., Kaipainen, S., Nilsson, L.-O., Vapaavuori, E., Kontro, M. H. & Holopainen, T. 2005. Below-ground responses of silver birch trees exposed to elevated CO_2 and O_3 levels

during three growing seasons. Global Change Biology 11, 1167-1179.

Kellomäki, S., Väisänen, H. & Strandman, H. 1996. Response of the boreal forest ecosystem to climatic change and its silvicultural implications: modelling. Julkaisussa: Roos, J. (toim.) The Finnish Research Programme on Climate Change. Final Report. Publications of the Academy, Edita. Helsinki. s. 252-253.

Laurila, T., Hakola, H., Lindfors, V., Meinander, O., Puhto, K. & Jokela, V. 1999. Ozone, VOC and nitrogen species concentrations in ambient air in the boreal region of Europe. Julkaisussa: Laurila T. & Lindfors V. (toim.) Biogenic VOC emissions and photochemistry in the boreal regions of Europe, Air pollution research report No 70. Comission of the European Communities. Luxenbourg. 158 s.

Long, S.P. & Naidu, S.L. 2002. Effects of oxidants at the biochemical, cell and physiological levels, with particular reference to ozone. Julkaisussa: Bell, J.N.B. & Treshow, M. (toim.) Air Pollution and Plant Life. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. s. 69-88.

Luomala, E.-M., Laitinen, K., Kellomäki, S. & Vapaavuori, E. 2003. Variable photosynthetic acclimation in consecutive cohorts of Scots pine needles during 3 years of growth at elevated CO_2 and elevated temperature. Plant, Cell and Environment 26: 645-660.

Matyssek, R. & Innes, J.L. 1999. Ozone – a risk factor for trees and forests in Europe? Water, Air, and Soil Pollution 116: 199-226.

Matyssek, R. & Sandermann, H. Jr. 2003. Impact of ozone on trees: an ecophysiological perspective. Julkaisussa: Esser, K., Lüttge, U., Beyschlag, W., Wellwig, F. (toim.) Progress in Botany, Vol 64. Springer-Verlag. Berlin. s. 349-404.

Moore, B.D., Cheng, S.-H., Sims, D. & Seeman, J.R. 1999. The biochemical and molecular basis for photosynthetic acclimation to elevated atmospheric CO_2. Plant, Cell and Environment 22: 567-582.

Norby, R.J., Hartz-Rubin, J.S. & Verbrugge, M.J. 2003. Phenological responses in maple to experimental atmospheric warming and CO_2 enrichment. Global Change Biology 9: 1792-1801.

Nowak, R.S., Ellsworth, D.S. & Smith, S.D. 2004. Tansley Review. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO_2 – do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions? New Phytologist 162: 253-280.

Oksanen, E. 2003. Responses of selected birch (*Betula pendula* Roth) clones to ozone change over time. Plant, Cell and Environment 26: 875-886.

Oksanen, E., Riikonen, J., Kaakinen, S., Holopainen, T., Vapaavuori, E. 2005. Structural characteristics and chemical composition of birch (*Betula pendula*) leaves are modified by increasing CO_2 and ozone. Global Change Biology 11, 1-17.

Oksanen E. & Rousi M. (2001) Differences of *Betula* origins in ozone sensitivity based on open-field experiment over two growing seasons. *Canadian Journal Forest Research* 31, 804-811.

Oksanen E. & Saleem A. (1999) Ozone exposure results in various carry-over effects and prolonged reduction in biomass in birch (*Betula pendula* Roth). *Plant, Cell and Environment* 22, 1401-1411.

Peltonen, P. A., Vapaavuori, E. & Julkunen-Tiitto, R. 2005. Accumulation of phenolic compounds in birch leaves is changed by carbon dioxide and ozone. Global Change Biology 11, 305-1324.

Rebbeck J. & Loats K.V. (1997) Ozone effects on seedling sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*): gas exchange. *Canadian Journal of Forest Research* 27, 1595-1605.

Riikonen, J., Lindsberg, M.-M., Holopainen, T., Oksanen, E., Lappi, J., Peltonen, P., Vapaavuori, E. 2004. Silver birch and climate change: Variable growth and carbon allocation responses to elevated concentrations of carbon dioxide and ozone. Tree Physiology 24: 1227-1237.

Riikonen, J., Holopainen, T., Oksanen, E. & Vapaavuori, E. 2005. Leaf photosynthetic characteristics of silver birch during three years of exposure to elevated CO_2 and O_3 in the field. Tree Physiology 25: 549-560.

Skärby, L., Ro-Poulsen, H., Wellburn, F.A.M. & Sheppard, L.J. 1998. Impacts of ozone on forest: a European perspective. New Phytologist 139: 109-122.

Miten ilmastonmuutos vaikuttaa metsäpuiden puun kemiaan ja rakenteeseen – tuloksia eri puilla tehdyistä tutkimuksista

Seija Kaakinen ja Elina Vapaavuori

Puun ominaisuudet – monen tekijän summa

Hiilidioksidin, lämpötilan ja alailmakehän otsonipitoisuuden kohoamisen vaikutuksia puiden kasvuun ja kasvunopeuteen on tutkittu parin viime vuosikymmenen aikana runsaasti ja näiden tekijöiden vaikutukset puiden kasvuun ja lehtien vasteisiin tunnetaan melko hyvin. Koska tutkimukset on pääosin tehty taimilla tai nuorilla puilla, joilla valtaosa kasvusta ohjautuu oksien ja lehvästön kasvuprosesseihin, vaikutuksia puuaineksen ei yleensä ole otettu huomioon. Niinpä tutkimus ilmastonmuutoksen vaikutuksista puuaineksen ominaisuuksiin on ollut vähäistä, ja kirjallisuuden perusteella vain alle 30 tutkimuksessa on paneuduttu puun ominaisuuksien, tiheyden, rakenteen tai kemian tutkimukseen. Koska ilmastonmuutos muuttaa oleellisesti puiden fysiologiaa ja kasvua voisi olettaa, että muutokset kasvuprosesseissa heijastuvat myös puun ominaisuuksiin. Tietoa ympäristötekijöiden vaikutuksista puun kuitujen ominaisuuksiin tarvitaan, koska puun rakenne ja kemialliset ominaisuudet määrittelevät pitkälti puun soveltuvuuden eri käyttötarkoituksiin sellu- ja paperiteollisuudessa sekä sahauksessa. Puun kemiallinen koostumus, kuitujen koko ja seinämien paksuus vaikuttavat kuitujen käyttäytymiseen teollisissa prosesseissa sekä lopputuotteen lujuuteen ja muihin fysikaalisiin ja optisiin ominaisuuksiin.

Puuaineksen tärkeimmät tehtävät ovat mekaanisen tuen antaminen ja ravinteiden ja veden kuljetus. Puun rungon perimmäinen tehtävä on kuitenkin saattaa vihreä latvus kohti auringonvaloa, joka toimii energianlähteenä yhteytykselle. Lisäksi runko toimii ravinteiden ja yhteyttämistuotteiden varastona lähinnä lepokauden aikana. Näistä seikoista johtuen muutokset puuaineksen rakenteessa ja kemiallisessa koostumuksessa voivat olla hyvinkin merkityksellisiä, vaikuttaen mm. lehvästön toimintaan sekä rungon lujuus- ja murtumisominaisuuksiin myrskyolosuhteissa.

Puun muodostuminen kasvukauden aikana on monivaiheinen tapahtuma, jossa jällen solut jakautuvat, erilaistuvat ja kasvavat, solujen paksu sekundääriseinä muodostuu ja lopulta suurin osa soluista kuolee. Syntyvään puuhun jää myös pieni määrä eläviä soluja, joita ovat mm. säteen suuntaiset ydinsäteiden solut. Kasvukauden aikaiset ympäristötekijät, joihin voidaan vaikuttaa myös metsänhoidon toimenpiteillä, vaikuttavat muodostuvan puun ominaisuuksiin ja laatuun, joiden pohjalta määritellään puun sopivuus eri loppukäyttökohteisiin.

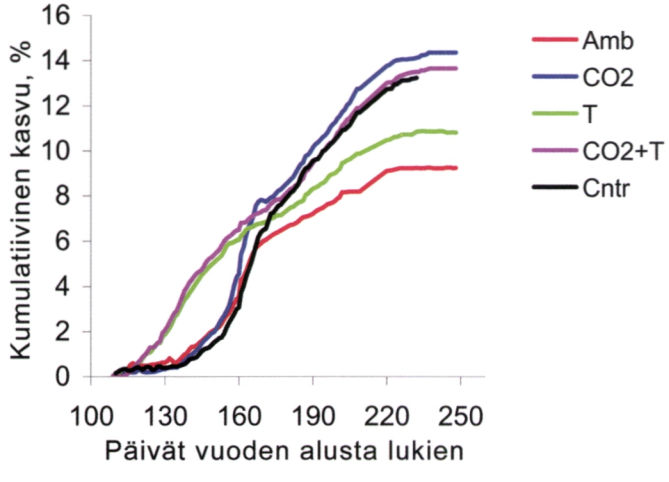
Ilmastonmuutoksen vaikutus puun ominaisuuksiin voi olla suora tai epäsuora. Suora vaikutus ilmenee siten, että puun muodostumiseen liittyvien eri prosessien käynnistymisajankohta ja/tai pituus muuttuu kun kasvukausi pitenee (kuva 1). Ilmastonmuutoksen epäsuora vaikutus kanavoituu puun kasvun ja energiatalouden kautta. Puut käyt-

tävät fotosynteesissä muodostuneet hiiliyhdisteet puun maanpäällisten ja maanalaisten osien kasvuun. Kasvuolosuhteilla, kuten valo, lämpötila, kosteus, ravinteiden saatavuus, hiilidioksidi- ja otsonipitoisuus, puolestaan on tärkeä merkitys siihen, miten kasvu jakautuu puun eri osien välillä, koska kasvuolot suorasti tai epäsuorasti vaikuttavat eri kasvinosien kykyyn toimia hiilinieluina. Puun tuotoksen kannalta vaikutus voi olla joko hyödyllinen (runkopuun osuus lisääntyy) tai haitallinen (runkopuun osuus vähenee). Epävarmaa sen sijaan on, miten tällaiset muutokset kasvun jakautumisessa vaikuttavat puun ominaisuuksiin.

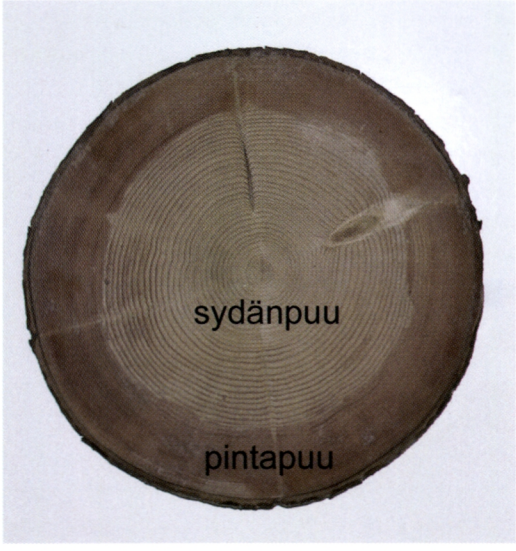
Ympäristötekijöiden lisäksi puun ominaisuudet vaihtelevat myös puun sisällä: puun rakenne ja kemia muuttuvat rungon tyvestä latvaan ja ytimestä pintaan. Ytimen ympärille syntyy nuorpuuta, josta myös puun latvaosa koostuu. Kuusella nuorpuuta muodostuu n. 10 vuotta, jonka jälkeen syntyy aikuispuuta, samalla kun etäisyys ytimestä kasvaa. Aikuispuu poikkeaa nuorpuusta mm. alhaisemman ligniinipitoisuuden ja korkeamman selluloosapitoisuuden vuoksi. Kun puu on riittävän iäkäs, nuorpuu ja sitä ympäröivä aikuispuu voi muuttua kuolleeksi sydänpuuksi lukuunottamatta puun pintaosan elävää ja toiminnallista pinta- eli mantopuuta. Sydänpuu poikkeaa kosteudeltaan ja kemialliselta koostumukseltaan elävästä puusta ja siihen kertyy mm. puuta säilyttäviä fenolisia yhdisteitä (kuva 2). Ominaisuuksiltaan poikkeavaa reaktiopuuta eli lylyä (havupuu) tai vetopuuta (lehtipuu) syntyy puun asennon poiketessa pystyasennosta.

Rungon pääasialliset rakennekomponentit ovat selluloosa, jota on n. 40-50 % kuivapainosta, ligniini (n. 20-30 % kuivapainosta) sekä hemiselluloosa (n. 10-20 %). Lisäksi puussa on muutamia prosentteja uuteaineita, liukoisia sokereita ja tärkkelystä. Tuhkaa, joka koostuu mineraaleista, on alle 1 %. Typpipitoisuus on 0,1 % paikkeilla.

Havupuiden puun rakenne on huomattavasti yksinkertaisempi kuin lehtipuiden rakenne (kuva 3). Putkisolut eli trakeidit muodostavat yli 90 % puuaineksesta kuusella. Ne toimivat sekä vettä ja ravinteita kuljettavana johtosolukkona että mekaanista tukea antavana tukisolukkona. Lehtipuiden puuaineksen johtosolukkona toimivat putkilot, jotka voivat olla huomattavasti muita soluja suurempia. Lehtipuiden yleisimmät tukisolutyypit ovat puusyyt ja kuitumaiset putkisolut, joita on n. 40-75 % puuaineksesta. Puunjalostusteollisuudessa havupuiden putkisoluista sekä lehtipuiden puusyistä ja kuitumaisista putkisoluista käytetään yhteisnimitystä kuitu.



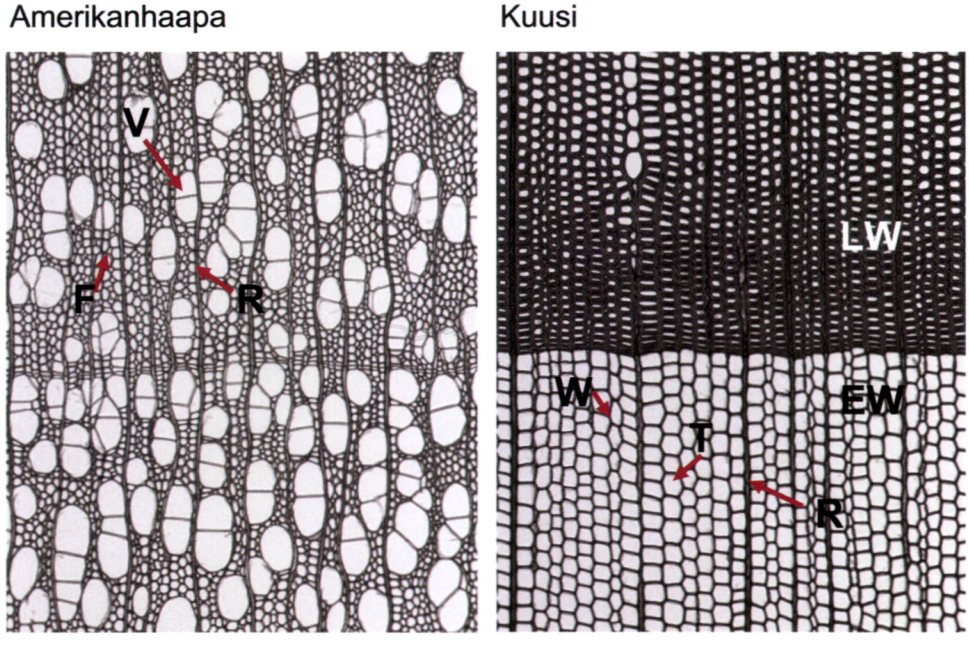
Kuva 1. Kohotetun hiilidioksidin ja lämpötilan keskimääräinen vaikutus männyn kumulatiiviseen paksuuskasvuun kolmen vuoden kokeessa (1997-1999). Kohotettu lämpötila ja hiilidioksidi lisäävät paksuuskasvua ja lämpötila aikaistaa paksuuskasvun käynnistymistä. Kuva on uudelleen piirretty julkaisusta Peltola ym. (2002).



Kuva 2. Kuusen rungon poikkileikkaus rinnankorkeudelta. Kuvassa erottuu kuivempi sydänpuu vaaleana ja kosteampi pinta- eli mantopuu tummempana. Kuva Pekka Voipio.

Tutkimuksia ilmastonmuutoksen vaikutuksista puun ominaisuuksiin on vähän

Taulukkoihin 1-2 ja kuviin 4-5 ja on koottu kirjallisuudesta löytyneet tulokset kaikista ilmastonmuutoskokeista, joissa on tutkittu puumateriaalia. Taulukosta 1 voidaan havaita, että kokeet on yleensä tehty nuorilla puilla, ja kokeiden kesto on ollut alle vuodesta kuuteen vuoteen, mikä vastaa vain lyhyttä jaksoa puun elinkaaresta puun varhaiskehityksen aikana. Kokeissa hiilidioksidin ja otsonin pitoisuudet on kohotettu puolitoista- tai kaksinkertaisiksi vallitsevan ilman pitoisuuteen verrattuna. Omat tutkimuksemme kohdistuivat Suomessa, Ruotsissa ja Yhdysvalloissa tehtyihin kokeisiin. Suonenjoella avokattokammioissa tutkittiin rauduskoivun kahta kloonia (Vapaavuori ym. 2002 ja tämä kirja, Kostiainen ym., julkaisematon tulos). Yhdysvalloissa Rhinelanderin avokenttäkokeessa tutkimuskohteina olivat amerikanhaavan viisi kloonia, paperikoivu ja sokerivaahtera



Kuva 3. Lehtipuun (amerikanhaapa) ja havupuun (kuusi) puuaineen rakenne. V=putkilo, F=kuitu, R=ydinsäde, LW=kesäpuu, EW=kevätpuu, W= soluseinä, T=trakeidi. Kuvat Elina Warsta.

(Dickson ym. 2000, Kaakinen ym. 2004). Kolmas tutkimamme koe oli kuusen kammiokoe Flakalidenissa, Ruotsissa (Wallin ym. 2001, Kostiainen ym. 2004).

Hiilidioksidin, lämpötilan ja ravinteiden vaikutus kasvuun ja puun ominaisuuksiin

Taulukkoon 1 on koottu tulokset kokeista, joissa on tutkittu kohotetun hiilidioksidin, kohotetun lämpötilan ja lannoituksen vaikutuksia puun tiheyteen ja luston leveyteen. Taulukosta voidaan nähdä, että kohotettu hiilidioksidi on lisännyt puiden kasvua ja että sillä on ollut suurempi vaikutus männyn kasvuun kuin kohotetulla lämpötilalla. Kuusen osalta lannoitus on ollut kasvun kannalta merkittävämpi tekijä kuin hiilidioksidi. Havupuilla hiilidioksidipitoisuuden kohotus on joko lisännyt puuaineen tiheyttä tai sillä ei ole ollut vaikutusta; myöskään lehtipuiden tiheyteen sillä ei ole ollut vaikutusta. Lämpötilan kohotus puolestaan on joko lisännyt havupuun tiheyttä tai sillä ei ole ollut vaikutusta. Lannoitus puolestaan on joko alentanut tiheyttä tai sillä ei ole ollut vaikutusta.

Kuviin 4a-b on koottu kohotetun hiilidioksidin vaikutukset lehtipuiden puuaineksen ominaisuuksiin. Tutkittuja lehtipuulajeja on ollut kaikkiaan yksitoista. Tulosten mukaan hiilidioksidipitoisuuden nosto on lisännyt kasvua, mutta vain kahdella tammi- ja poppelilajilla hiilidioksidi on vaikuttanut puun rakenteeseen lisäämällä putkiloiden ontelon läpimittaa ja vähentämällä soluseinän paksuutta (kuva 4a). Puun kemiassa (kuva 4b) ei-rakenteellisten hiilihydraattien (tärkkelys, liukoiset sokerit) tai uuteaineiden pitoisuus on noussut kolmella lajilla, mikä johtunee voimistuneesta yhteytyksestä ja näin ollen yhteytystuotteiden lisäyksestä. Soluseinän rakenteellisiin komponentteihin (selluloosa, hemiselluloosa, ligniini) hiilidioksidipitoisuuden kohotuksella ei ole yleensä ollut vaikutusta, mutta joissakin tutkimuksissa näiden aineiden pitoisuus puussa on laskenut. Vaikka pitoisuus vähenisikin, niin puuaineksen lisääntyvän kasvun johdosta soluseinän kemiallisten ainesosien absoluuttiset määrät puuta kohti eivät kuitenkaan vähene. Pyökillä alhaisella ravinnetasolla kasvaneissa taimissa kohotettu hiilidioksidi on lisännyt ligniinipitoisuutta, mutta riittävästi ravinteita saaneilla taimilla tätä muutosta ei ole havaittu. Tutkimukset, joissa on käytetty kloonimateriaalia (kokeet rauduskoivulla ja amerikanhaavalla), ovat osoittaneet myös, että eri genotyypit reagoivat hiilidioksidipitoisuuden nostoon eri tavoin.

Kuviin 5a-d on koottu kohotetun hiilidioksidin ja lämpötilan vaikutukset havupuiden puuaineksen ominaisuuksiin. Tutkittuja havupuulajeja on ollut kaikkiaan kahdeksan. Hiilidioksidipitoisuuden nosto on lisännyt havupuiden kasvua, mikä voidaan havaita myös vuosilustojen paksuuskasvun lisääntymisenä (taulukko 1). Puun rakenteessa muutokset ovat näkyneet sekä kesäpuun että soluseinien paksuuden kasvuna (kuva 5a). Vaikutus kuitujen läpimittaan on vaihdellut lajista riippuen. Männyllä ja kuusella muutoksia on havaittu myös puun kemiallisessa koostumuksessa typen, liukoisten sokerien tai selluloosan pitoisuuksien vähentymisenä tai tärkkelyspitoisuuden nousuna (kuva 5b).

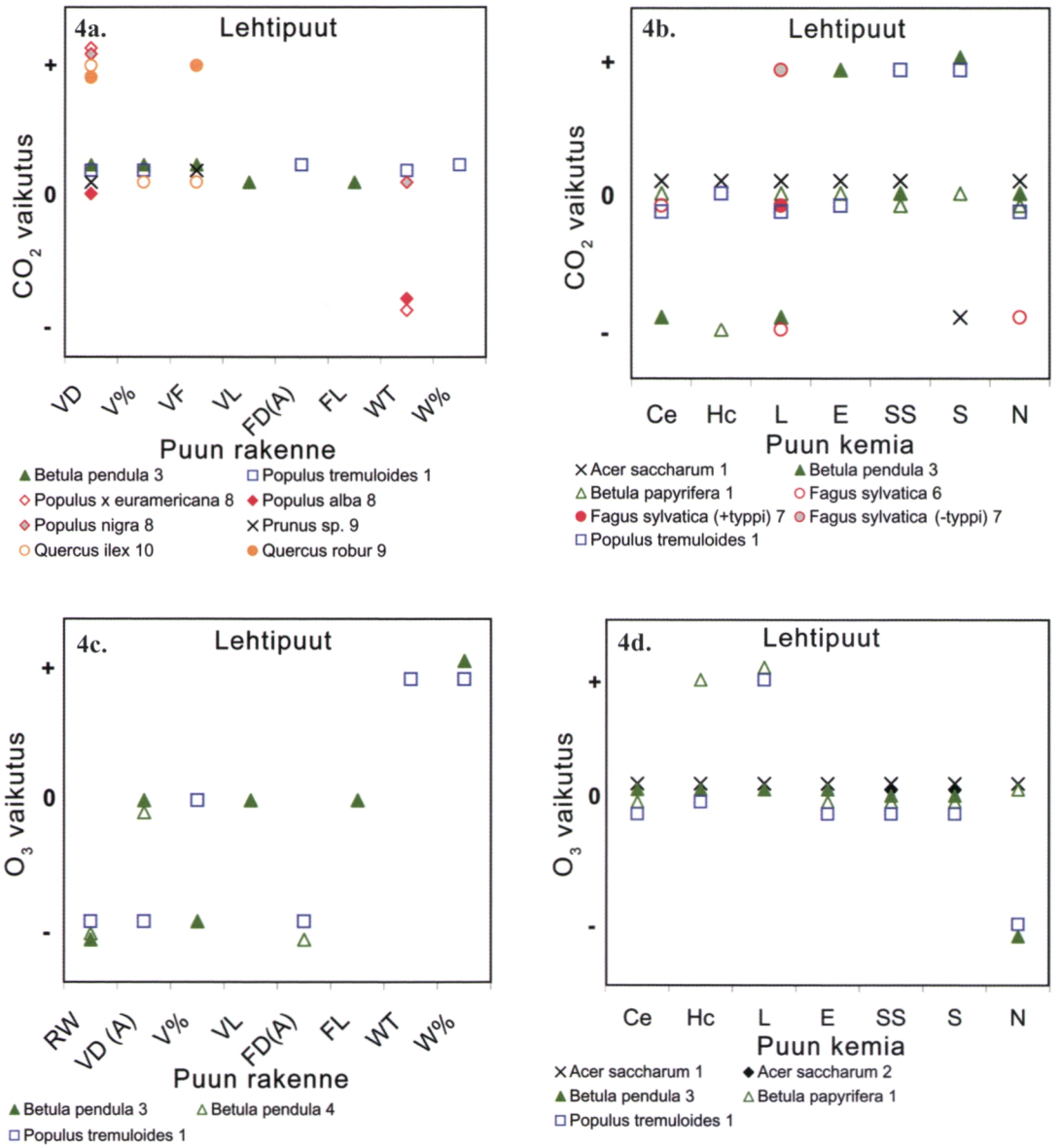
Lämpötilan kohoamisen vaikutusta puuaineksen ominaisuuksiin on tutkittu vain männyllä. Tulosten mukaan lämpötilan nosto on lisännyt kuidun pituutta, ohentanut soluseinän paksuutta sekä kasvattanut pihkatiehyiden suhteellista määrää (kuva 5c). Lämpötilan nousu on muuttanut myös puun kemiallista koostumusta, mikä on näkynyt hemiselluloosan tai uuteaineiden pitoisuuksien vähentymisenä ja joissakin tutkimuksissa ligniinipitoisuuden kasvuna (kuva 5d).

Alailmakehän otsonin kohoaminen heikentää puun kasvua ja materiaaliominaisuuksia

Kuviin 4c-d on koottu kohotetun otsonipitoisuuden vaikutukset lehtipuiden puuaineksen ominaisuuksiin. Otsonin vaikutusta puuainekseen on tutkittu vain neljällä lehtipuulajilla (kuvat 4c-d). Tulosten mukaan otsonin haitallinen vaikutus kasvuun on näkynyt puun rakenteessa putkiloiden ja/tai kuitujen läpimitan ja osuuden pienentymisenä ja soluseinäosuuden kasvuna (kuva 4c). Putkiloiden läpimitan pieneneminen vaikuttaa heikentävästi puiden vesitalouteen, koska kuljetussolukon

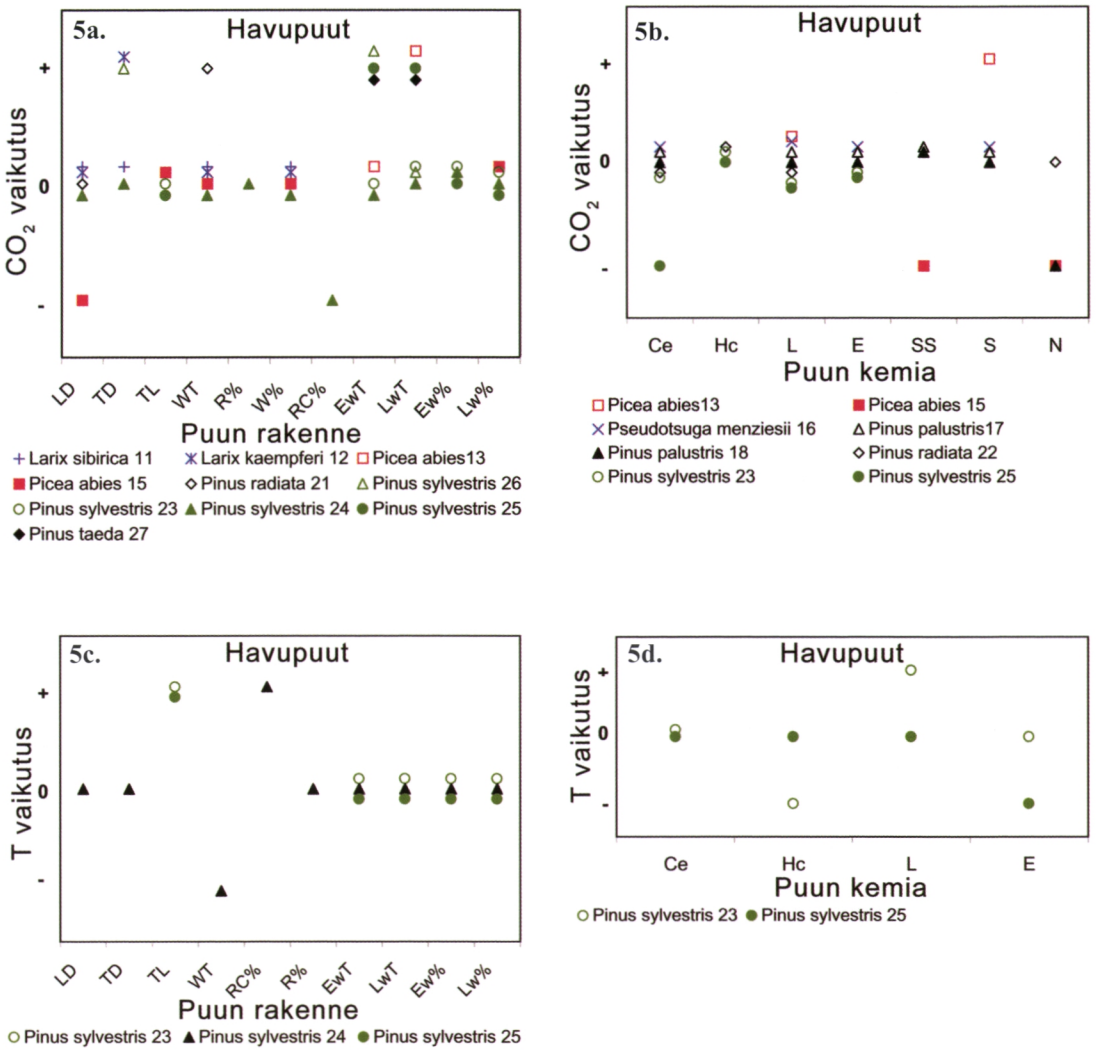
Taulukko 1. Kohotetun hiilidioksidipitoisuuden (CO_2), lämpötilan (T) ja typpilannoituksen (N) vaikutus puiden luston leveyteen ja tiheyteen kontrolliin verrattuna eri puulajeilla. Vaikutus luston leveyteen on esitetty kertoimena, jolla kontrollipuiden tulos pitää kertoa; vaikutus puun tiheyteen: 0 = ei vaikutusta, + = kasvu, - = pieneneminen. • Ei ole tutkittu. [1]Säde, [2]Kesäpuu.

Laji	Käsittely, sen pituus, ja puun ikä			Luston leveys	Puun tiheys	Viite
Betula pendula	CO_2	3 v.	10 v.	1,21	•	Kostiainen ym., julkaisematon data
Fagus sylvatica	CO_2	4 v.	7 v.	•	0	Beismann ym. 2002
	N	”	”	•	0	”
Larix sibirica	CO_2	2 v.	1.5 v.	1,0 – 1,34	•	Yazaki ym. 2001
	N	”	”	1,67 - 2,24	•	”
L. kaempferi	CO_2	0,3 v.	2 v.	0,92 - 1,01	•	Yazaki ym. 2004
	N	”	”	2,14 - 2,36	•	”
Populus sp.	CO_2	3 v.	3 v.	•	0	Calfapietra ym. 2003
P. tremuloides	CO_2	3 v.	3 v.	1,12[1]	•	Kaakinen ym. 2004
Prunus sp.	CO_2	0,2 v.	< 1 v.	1,43	•	Atkinson ja Taylor 1996
Quercus ilex	CO_2	1,5 v.	1 v.	•	0	Gartner ym. 2003
Q. robur	CO_2	0,9 v.	0,9 v.	1,34	•	Atkinson ja Taylor 1996
Pinus radiata	CO_2	2 v.	2 v.	1,20	+	Conroy ym. 1990
	CO_2	3 v.	3 v.	1,22	•	Atwell ym. 2003
P. taeda	CO_2	4 v.	4 v.	1,15	0	Telewski ym. 1999
P. sylvestris	CO_2	3 v.	6 v.	1,42	0	Ceulemans ym. 2002
	CO_2	3 v.	15 v.	1,54	+[1]	Kilpeläinen ym. 2003
	T	”	”	1,30	•	”
	CO_2	6 v.	20 v.	1,47-1,66	0	Kilpeläinen ym. 2005
	T	”	”	1,19	+	”
	CO_2	3 v.	3 v.	1,11	0	Ziche ja Overdieck 2004
	T	”	”	0,88	0	”
Picea abies	CO_2	3 v.	7 v.	1,26[2]	+	Hättenschwiler ym. 1996
	N	”	”	1,44[2]	-	”
	CO_2	4 v.	7 v.	•	0	Beismann ym. 2002
	N	”	”	•	0	”
	CO_2	3 v.	41 v.	1,41	0	Kostiainen ym. 2004
	N	”	”	1,51	-	”



Kuva 4 a-d. Lehtipuiden rakenteen ja kemian vasteet kohotetulle hiilidioksidille (a, b) ja otsonille (c, d). Pystyakselilla on esitetty hiilidioksidi- / otsonipitoisuuden nousun aiheuttama muutos rakenteellisissa ja kemiallisissa komponenteissa suhteessa vallitseviin olosuhteisiin: 0 = ei muutosta; + = positiivinen muutos eli rakenteellisen/kemiallisen komponentin lisääntyminen; - = negatiivinen muutos eli rakenteellisen/kemiallisen komponentin väheneminen.

Vaaka-akselien lyhenteet: Puun rakenne: RW= luston paksuus, VD(A)= putkilon ontelon läpimitta tai (ala), V%= putkilo %, VF= putkilofrekvenssi, VL= putkilon pituus, FD(A)= kuidun ontelon läpimitta (ala), FL= kuidun pituus, LD= luumenin eli soluontelon läpimitta, TD= trakeidin läpimitta, TL= trakeidin pituus, WT= soluseinän paksuus, W%= soluseinien suhteellinen osuus , RC%= pihkatiehyiden suhteellinen osuus, R%= ydinsäteiden suhteellinen osuus, EW%= kevätpuun suhteellinen osuus, LW%= kesäpuun suhteellinen osuus, EwT= kevätpuun paksuus, LwT= kesäpuun paksuus. Puun kemia: Ce= selluloosa, Hc= hemiselluloosa, L= totaaliligniini, E= uuteaineet, SS= liukoiset sokerit, S= tärkkelys, N= typpi. Kirjallisuusviitteet: ks. kuva 5.



Kuva 5 a-d. Havupuiden rakenteen ja kemian vasteet kohotetulle hiilidioksidille (a, b) ja lämpötilalle (c, d). Pystyakselilla on esitetty hiilidioksidipitoisuuden / lämpötilan nousun aiheuttama muutos rakenteellisissa ja kemiallisissa komponenteissa suhteessa vallitseviin olosuhteisiin: 0 = ei muutosta; + = positiivinen muutos eli rakenteellisen / kemiallisen komponentin lisääntyminen; - = negatiivinen muutos eli rakenteellisen/kemiallisen komponentin väheneminen. Vaaka-akselien lyhenteet ovat samat kuin kuvassa 4.

Kuvissa 4 ja 5 puulajin jälkeen esitetty numero viittaa seuraaviin kirjallisuusluettelossa oleviin julkaisuihin: [1]Kaakinen ym. 2004, [2]Bertrand ym. 1999, [3]Kostiainen ym. julkaisematon, [4]Matyssek ym. 2002, [6]Cotrufo ja Ineson 2000, [7]Blaschke ym. 2002, [8]Luo ym. 2005, [9]Atkinson ja Taylor 1996, [10]Gartner ym. 2003, [11]Yazaki ym. 2001, [12]Yazaki ym. 2004, [13]Hättenschwiler ym. 1996, [14]Kurczyñska ym. 1998, [15]Kostiainen ym. 2004, [16]Tingey ym. 2003, [17]Entry ym. 1998, [18]Runion ym. 1999, [19]Andersen ym. 1997, [20]Grulke ym. 2001, [21]Conroy ym. 1990, [22]Atwell ym. 2003, [23]Kilpeläinen ym. 2003, [24]Ziche ja Overdieck 2004, [25]Kilpeläinen ym. 2005, [26]Ceulemans ym. 2002, [27]Telewski ym. 1999.

Taulukko 2. Havupuiden puuaineen vasteet kohotetulle otsonille (O_3). ↑ kasvu, ↓ pieneneminen tai vähentyminen. TD= trakeidin läpimitta, SS=liukoiset sokerit, S=tärkkelys.

Laji	Ominaisuus	Viite
Picea abies Kuusi (lannoitus)	TD↑	Kurczyńska ym. 1998
(ei lannoitusta)	TD↓	”
P. ponderosa Ponderosamänty	SS↑ S↓	Andersen ym. 1997
	SS↑ S↑	Grulke ym. 2001

vedenkuljetuskapasiteetti ja yhteyttävän lehvästön vedensaanti voivat vähentyä. Puun kemiassa otsonin vaikutukset ovat näkyneet typpipitoisuuden laskuna sekä ligniinin ja hemiselluloosan pitoisuuksien nousuna (kuva 4d). Tutkimuksissa, joissa amerikanhaapaa ja paperikoivua on altistettu samanaikaisesti kohotetulle hiilidioksidille ja otsonille, on todettu, että hiilidioksidi on pystynyt kumoamaan otsonin vaikutuksen ligniinipitoisuuteen. Puiden reagointi otsonipitoisuuden muutokseen on vaihdellut eri genotyyppien välillä. Tämä on havaittu mm. rauduskoivulla ja amerikanhaavalla tehdyissä kloonikokeissa, joissa eri kloonien vasteet kohotettuun otsonipitoisuuteen poikkesivat selvästi toisistaan.

Havupuilla (taulukko 2) otsonin vaikutuksia puuainekseen on tutkittu kuusella ja ponderosamännyllä. Ponderosamännyllä on tutkittu vain puun ei-rakenteellisia komponentteja, liukoisia sokereita ja tärkkelystä, joiden määrä on kohotetussa otsonipitoisuudessa joko kasvanut tai vähentynyt. Muutokset kuvastavat otsonin aiheuttamia epäsuoria vaikutuksia puumateriaaliin. Otsonin aiheuttamat muutokset kuusen puun rakenteessa ovat olleet vastakkaisia riippuen puiden ravinnetilanteesta: kuidun läpimitta on kasvanut runsaasti ravinteita saaneilla taimilla ja pienentynyt niukasti ravinteita saaneilla taimilla.

Johtopäätökset

Tällä hetkellä olemassa olevan kirjallisuuden perusteella on ilmeistä, että hiilidioksidin ja lämpötilan nousu lisäävät puun kasvua, minkä vuoksi puuraaka-aineen määrä tulee todennäköisesti kasvamaan. Näiden tekijöiden vaikutukset puun materiaaliominaisuuksiin, erityisesti puun rakenteeseen, ovat selvästi havaittavia. Lisääntyneestä yhteytyksestä ja kasvusta johtuva puukemian muutos - sokerien ja tärkkelyksen pitoisuuden nousu - lehtipuiden puuaineksessa voi vaikuttaa puun käyttäytymiseen esim. kuivauksessa.

Alailmakehän otsonin kohoamisen vaikutus puun kasvuun on vahingollista ja vaikutukset materiaaliominaisuuksiin ovat todennäköisiä. Ligniinipitoisuuden lisääntyminen on haitallinen ominaisuus kemiallisessa puunjalostusteollisuudessa, koska se pidentää keittoaikaa ja kemikaalien tarvetta. Tärkeä kysymys onkin tulevaisuudessa se, miten kohoava hiilidioksidipitoisuus pystyy kompensoimaan otsonin haitallisia vaikutuksia, jos otsonipitoisuuden nousua ei pystytä hillitsemään. Havupuiden osalta tutkimustieto hiilidioksidin ja otsonin yhdysvaikutuksista puuaineksen ominaisuuksiin puuttuu vielä kokonaan.

Vaikka ilmastonmuutos vaikuttaa puun kasvuun sekä puuaineksen kemiaan ja rakenteeseen ja sitä kautta puun materiaaliominaisuuksiin, on kuitenkin huomattava että muutokset ovat riippuvaisia puulajista ja puiden genotyypistä. Jotta päästäisiin laji- ja metsikkötason yleistyksiin vaikutusten arvioinnissa, tarvitaan lisätietoa puun ominaisuuksien vasteista pitkäaikaisissa ilmastonmuutoskokeissa eri puulajeilla ja genotyypeillä sekä eri-ikäisillä puilla.

Kiitokset

Kiitokset tutkimusavusta Katri Kostiaiselle, Fredrik Ekille, Hanna Jalkaselle ja Elina Warstalle. Suonenjoen tutkimusasemalla toteutetut tutkimukset on tehty yhteistyössä Pekka Saranpään, Sune

Linderin, David Karnoskyn, Bjarni Sigurdssonin, Mark Kubisken ja Jaak Soberin kanssa.

Kirjallisuus

Andersen, C.P., Wilson, R., Plocher, M. & Hogsett, W.E. 1997. Carry-over effects on root growth and carbohydrate concentrations on ponderosa pine seedlings. Tree Physiology 17: 805-811.

Atkinson, C.J. & Taylor, J.M. 1996. Effects of elevated CO2 on stem growth, vessel area and hydraulic conductivity of oak and cherry seedlings. New Phytologist 133: 617-626.

Atwell, B. J., Henery, M. L. & Whitehead, D. 2003. Sapwood development in *Pinus radiata* trees grown for three years at ambient and elevated carbon dioxide partial pressures. Tree Physiology 23: 13-21.

Beismann, H., Schweingruber, F., Speck, T. & Körner, C. 2002. Mechanical properties of spruce and beech grown in elevated CO_2. Trees 16: 511-518.

Bertrand, A., Robitaille, G., Nadeau, P. & Castonguay, Y. 1999. Influence of ozone on cold acclimation in sugar maple seedlings. Tree Physiology 19: 527-534.

Blaschke, L., Forstreuter, M., Sheppard, L., Leith, I., Murray, M.B. & Polle, A. 2002. Lignification in beech (*Fagus sylvatica*) grown at elevated CO_2 concentrations: interaction with nutrient availability and leaf maturation. Tree Physiology 22: 369-477.

Calfapietra, C., Gielen, B., Galema, A.N.J., Lukac, M., de Angelis, P., Moscatelli, M.C, Ceulemans R. & Scarascia-Mugnozza, G. 2003. Free-air CO_2 enrichment (FACE) enhances biomass production in a short-rotation poplar plantation. Tree Physiology 23: 805-814.

Ceulemans, R., Jach, M.E., Van De Velde, R., Lin, J.X. & Stevens, M. 2002. Elevated atmospheric CO_2 alters wood production. Wood quality and wood strength of Scots pine (*Pinus sylvestris* L) after three years of enrichment. Global Change Biology 8: 153-162.

Conroy, J.P., Milham, P.J., Mazur, M. & Barlow, E.W.R. 1990. Growth, dry weight partitioning and wood properties of *Pinus radiata* D. Don after 2 years of CO_2 enrichment. Plant, Cell and Environment 13: 329-337.

Cotrufo, M.F.& Ineson, P. 2000. Does elevated CO_2 concentrations affect wood decomposition? Plant Soil 224: 51-57.

Dickson, R.E., Lewin, K.F., Isebrands, J.G., Coleman, M.D., Heilman, W.E., Riemenschneider, D.E., Sôber, J., Host, G.E., Zak, D.R., Hendrey, G.R., Pregitzer, K.S. & Karnosky, D.F. 2000. Forest atmosphere carbon transfer and storage (FACTS-II). The aspen free-air CO_2 and O_3 enrichment (FACE) project: an overview. *General Technical Report*, NC 214, St. Paul, MN, USDA Forest Service, North Central Research Station, 68 s.

Entry, J., Runion, G. B., Prior, S.A., Mitchell, R.J. & Rogers, H.H. 1998. Influence of CO_2 enrichment and nitrogen fertilisation on tissue chemistry and carbon allocation in longleaf pine seedlings. Plant Soil 200: 3-11.

Gartner, B.L., Roy, J. & Huc, J. 2003. Effects of tension wood specific conductivity and vulnerability to embolism of *Quercus ilex* seedling growth at two atmospheric CO_2 concentrations. Tree Physiology 23: 387-395.

Grulke, N., Andersen, C.P. & Hogsett, W.E. 2001. Seasonal changes in above- and belowground carbohydrate concentrations of ponderosa pine along a pollution gradient. Tree Physiology 21: 173-181.

Hättenschwiler, S., Schweingruber, F.H. & Körner, C. 1996. Tree ring responses to elevated CO_2 and increased N deposition in *Picea abies*. Plant Cell and Environment 19: 1369-1378.

Kaakinen, S., Kostiainen, K., Ek, F., Saranpää, P., Isebrands, J.G., McDonald, E.P., Sober, J., Karnosky, D.F. & Vapaavuori, E. 2004. Stem wood properties in *Populus tremuloides* clones, *Betula papyrifera* and *Acer saccharum* after three years of treatments to elevated carbon dioxide and ozone. Global Change Biology 10: 1513-1525.

Kilpeläinen, A., Peltola, H., Ryyppö, A., Sauvala, K., Laitinen, K. & Kellomäki, S. 2003. Wood properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*) grown at elevated temperature and carbon dioxide concentration. Tree Physiology 23: 889-897.

Kilpeläinen, A., Peltola, H., Ryyppö, A. & Kellomäki, S. 2005. Scots pine responses to elevated temperature and carbon dioxide concentration: growth and wood properties. Tree Physiology 25: 75-83.

Kostiainen, K., Kaakinen, S., Saranpää, P., Sigurdsson, B.D., Linder, S. & Vapaavuori, E. 2004. Effect of elevated CO2 on wood properties of mature Norway spruce grown at different soil nutrient availability. Global Change Biology 10: 1526-1538.

Kostiainen, K., Kaakinen, S., Jalkanen, H., Saranpää, P. & Vapaavuori, E. 2005. Effects of elevated carbon dioxide and ozone on stem wood properties of two silver birch clones. Käsikirjoitus.

Kurczyñska, E.U., Bastrup-Birk, A. & Mortensen, L. 1998. Influence of ozone and soil nitrogen content on the stem anatomy of Norway spruce saplings grown in open-top chambers. Environmental and Experimental Botany 40: 113-121.

Luo, Z.-B., Langenfeld-Heyser, R., Calfapietra, C. & Polle, A. 2005. Influence of free air CO_2 enrichment (EUROFACE) and nitrogen fertilisation on the anatomy of juvenile wood of three poplar species after coppicing. Trees 19: 109-118.

Matyssek, R., Gunthardt-Goerg, M.S., Maurer, S. & Christ, R. 2002. Tissue structure and respiration of stems of *Betula pendula* under contrasting ozone exposure and nutrition. Trees 16: 375-385.

Peltola, H., Kilpeläinen, A. & Kellomäki, S. 2002. Diameter growth of Scots pine (*Pinus sylvestris*) trees grown at elevated temperature and carbon dioxide concentration under boreal conditions. Tree Physiology 22: 963-972.

Runion, G. B., Entry, J. A. , Prior, S.A., Mitchell, R.J. & Rogers, H.H. 1999. Tissue chemistry and carbon allocation in seedlings of *Pinus palustris* subjected to elevated atmospheric CO_2 and water stress. Tree Physiology 19: 329-335.

Telewski, F.W., Swanson, R.T., Strain, B.R. & Burns, J.M. 1999. Wood properties and ring width responses to long-term atmospheric CO_2 enrichment in field-grown loblolly pine (*Pinus taeda* L.). Plant Cell and Environment 22: 213-219.

Tingey, D.T., McKane, R.B., Olszyk, D.M., Johnson, M.J., Rygiewicz, P.T. & Lee, E.H. 2003. Elevated CO_2 and temperature alter nitrogen allocation in Douglas-fir. Global Change Biology 9: 1038-1050.

Vapaavuori, E., Oksanen, T., Holopainen, J.K., Holopainen, T., Heiskanen, J., Julkunen-Tiitto, R., Kasurinen, A., Laitinen, J., Oksanen, E., Peltonen, P., Poteri, M., Repo, T., Riikonen, J. & Syrjälä, L. 2002. Technical Report. Open-top chamber fumigation of cloned silver birch (*Betula pendula* Roth) trees to elevated CO_2 and ozone: description of the fumigation system and the experimental site. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 838. 28 ss.

Wallin, G., Linder, S., Lindroth, A., Räntfors, M., Flemberg, S. & Grelle, A. 2001. Carbon dioxide exchange in Norway spruce at the shoot, tree and ecosystem scale. Tree Physiology 21: 969-976.

Yazaki, K., Funada, R., Mori, S., Maruyami, Y., Abaimov, A., Kayama, M. & Koike, T. 2001. Growth and annual ring structure of *Larix sibirica* grown at different carbon dioxide concentrations and nutrient supply rates. Tree Physiology 21: 1223-1229.

Yazaki, K., Ishida, S., Kawagishi, T., Fukatsu, E., Maruyama, Y., Kitao, M., Tobita, H., Koike, T. & Funada, R. 2004. Effects of elevated CO_2 concentrations on growth, annual ring structure and photosynthesis in *Larix kaempferi* seedlings. Tree Physiology 24: 941-949.

Ziche, D. & Overdieck, D. 2004. CO_2 and temperature effects on growth, biomass production, and stem wood anatomy of juvenile Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). Journal of Applied Botany 78: 120-132.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsätuhoihin ja -tauteihin boreaalisen vyöhykkeen metsissä

Pekka Niemelä ja Timo Veteli

Johdanto

Ilmastonmuutoksen on ennustettu muuttavan subboreaalisen metsävyöhykkeen ekologiaa huomattavasti. Kasvukauden on arvioitu pidentyvän merkittävästi ja etenkin talviset lämpötilat nousevat sekä vuotuiset sademäärät kohoavat. Ilmastollisista muutoksista seuraa, että etenkin Etelä-Suomessa lumipeite on maassa lyhyemmän aikaa mutta Pohjois-Suomessa lumipeite voi sitä vastoin paksuuntua olennaisesti. Vastaavasti nämä elinympäristössä tapahtuvat muutokset voivat vaikuttaa metsissämme esiintyviin eläin- ja sienituhoihin usean mekanismin kautta:

- vaikuttamalla eliöiden kehitysnopeuteen tai elinkiertoon
- muutamalla ravintokasvien saatavuutta ja laatua
- muuttamalla elinympäristöä suotuisammaksi
- vaikuttamalla loisten, tautien ja petojen määriin

Seuraavassa esitämme nykyisen tutkimuksen tuottamia esimerkkejä näistä ilmastonmuutoksen vaikutuksista tuhojen- ja taudinaiheuttajiin. On tärkeää huomioida, että eri tekijöiden vaikutukset voivat olla vastakkaisia ja siten toistensa kumoavia. Toisaalta eri tekijät voivat tukea toisiansa. Todellinen vaikutus on siten aina eri tekijöiden "nettosumma".

Eliöiden kehitysnopeus ja elinkierto

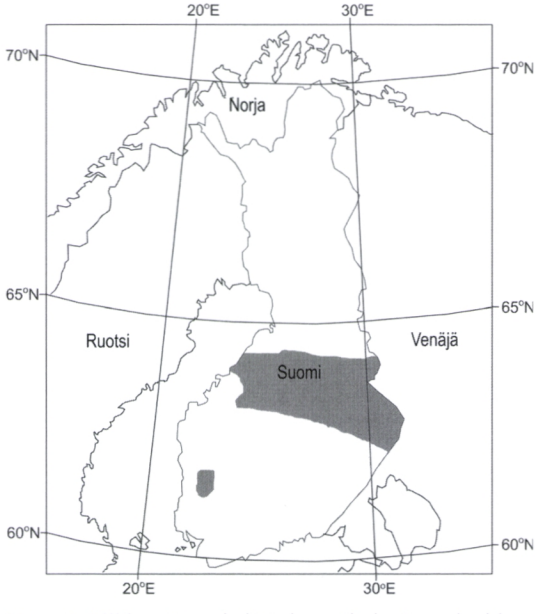
Ilmastonmuutoksen myötä pidentynyt kasvukausi ja lämpimämmät kesät mahdollistavat erityisesti vaihtolämpöisten kasvinsyöjien, kuten hyönteisten, eri kehitysvaiheiden nopeamman yksilönkehityksen mikä mahdollistaa usean sukupolven tuottamisen saman kasvukauden aikana. Monella eurooppalaisittain merkittävällä hyönteistuholaisella esiintyykin kaksi tai useampia sukupolvea kasvukauden aikana. Tällaisiin lajeihin kuuluvat esimerkiksi kaarnakuoriaisiin kuuluvat kirjanpainajat (*Ips*–suku), jotka aiheuttavat laaja-alaisia tuhoja Etelä-Skandinavian ja Keski-Euroopan kuusimetsissä. Keski-Euroopassa ja jo Virossa kirjanpainajilla esiintyy kaksi sukupolvea vuodessa ja sama kehitys voi tapahtua myös meillä ilmaston lämpenemisen seurauksena. Usean sukupolven seurauksena syntyvä voimakas lisääntymispotentiaalin kasvu lisää huomattavasti kirjanpainajatuhojen todennäköisyyttä myös Suomen metsissä.

Toinen esimerkki pidentyneen kasvukauden potentiaalisesta vaikutuksesta on männyn merkittävä neulastuholainen, pilkkumäntypistiäinen (*Diprion pini*). Myös tällä lajilla esiintyy kaksi sukupolvea Keski- ja Etelä-Euroopassa. Mielenkiintoista on, että juuri pilkkumäntypistiäisen tuhot ovat viime vuosina selvästi lisääntyneet Suomessa. Vuoden 1998-1999 tuhoalue oli kooltaan ainakin 50 000 hehtaaria ja peitti käytännöllisesti

katsoen koko Suomi-neidon "vyötärön" (kuva 1). Nykyisillä uusilla laaja-alaisilla pilkkumäntypistiäistuhotuhoilla ei välttämättä ole tekemistä ilmastomuutoksen kanssa koska kahta sukupolvea ei meillä ole havaittu, mutta ne sopivat hyvin yleiseen kuvaan hyönteistuhojen yleistymisestä.

Toisaalta pidentynyt kasvukausi mahdollistaa eteläisten tulokaslajien leviämisen pohjoiseen. Suomi on monille metsähyönteislajeille levinneisyyden pohjoista äärialuetta, jossa joukkoesiintymiset ja tuhot ovat harvinaisia. Ilmaston lämmetessä kyseiset lajit todennäköisesti kykenevät levittäytymään pohjoiseen, jolloin myös suuremman tuhoriskin alueet siirtyvät levinneisyyden mukana. Hyviä esimerkkejä tällaisista lajeista ovat havu- (*Lymantria monacha*) ja lehtinunna (*L. dispar*). Molemmat nunnalajit ovat erittäin merkittäviä havu- (havununna) ja lehtimetsien (lehtinunna) tuholaisia Keski-Euroopassa ja molempia tavataan satunnaisesti Suomen eteläisimmässä osassa. Levinneisyysalueen pohjoisreunan siirtymisen myötä myös tuhojen todennäköisyys kasvaa.

Myös paikallisten lajien levinneisyysalue voi muuttua ilmaston lämpenemisen myötä. Useat tutkimukset ovat osoittaneet päiväperhosten laajentaneen viime vuosikymmeninä levinneisyysalueet-



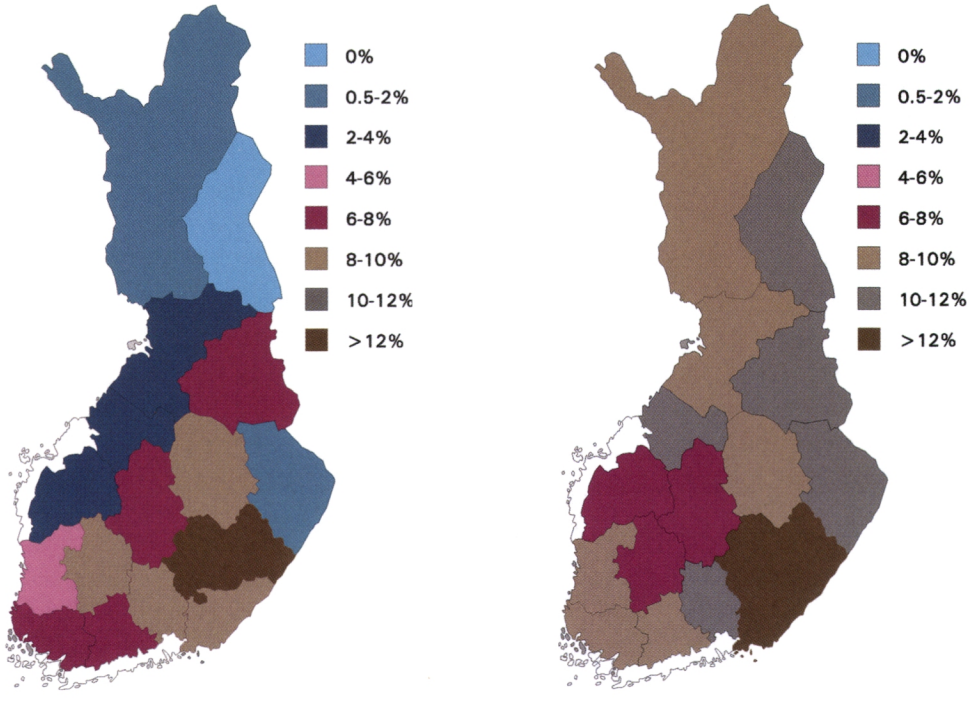
Kuva 1. Pilkkumäntypistiästuhovyöhyke Suomineidon vyötäröllä vuosina 1998-1999.

taan pohjoiseen ainakin Iso-Britanniassa ja Fennoskandiassa. On myös huomattava, että levinneisyysalueiden eteläisen rajan on viimeaikaisissa tutkimuksissa havaittu siirtyvän pohjoiseen mahdollisten lajeille sopimattomien ympäristöolosuhteiden yleistyessä, tällaisia olosuhteita voivat olla kuumuus ja kuivuus. Samat ilmiöt ovat erittäin todennäköisiä myös metsähyönteisten kohdalla, vaikka tutkimukset tältä saralta toistaiseksi puuttuvatkin. Levinneisyysalueiden muuttuessa myös tuhoriskit todennäköisesti kasvavat (kuva 2).

Ravintokasvien saatavuus ja laatu

Uusien puulajien leviämisen myötä myös uudet hyönteislajit saattavat levitä boreaaliselle metsävyöhykkeelle. Lehtipuulajien ennustettu yleistyminen lisännee lehtipuihin kohdistuvaa tuhoriskiä. Tällaisia lajeja voisi ajatella olevan hallamittari (*Operopthera brumata*) koivumetsissä ja tammikääriäinen (*Tortrix virdiana*) eteläisen Suomen tammimetsissä. Parhaimpana, tai pahimpana, esimerkkinä uusien tuholaislajien leviämisestä voitaneen pitää merkittävän perunatuholaisen, koloradonkuoriaisen (*Leptinotarsa decemlineata*), viimeaikaista levittäytymistä Kaakkois- ja Itä-Suomeen. Luultavimmin lähimmän kahdenkymmenen vuoden kuluessa tuo pelätty tuholainen on muodostanut pysyvän kannan Suomeen.

Kasvit kuitenkin puolustautuvat kasvinsyöjiä ja taudinaiheuttajia vastaan mm. tuottamalla puolustusyhdisteitä, jotka ovat joko pelkästään myrkyllisiä (esimerkiksi alkaloidit) ja/tai vaihtoehtoisesti alentavat ravinnon sulavuutta (esimerkiksi havupuiden pihka, lehtipuiden lehtien ja kuorten tanniinit ja fenolit). Ilmastonmuutoksen on todettu voivan vaikuttaa näiden yhdisteiden määriin ja muuttaa ravintokasvin laatua paremmaksi tai huonommaksi tuholaisen kannalta. Lukuisat laboratoriotutkimukset ovat osoittaneet, että kohotettu hiilidioksidipitoisuus pääsääntöisesti lisää hiilipohjaisten puolustusyhdisteiden (fenolit, tanniinit, jne.) määriä puiden lehdissä tai neulasissa ja muuttaa siten ravinnon huonommaksi kasvinsyöjän

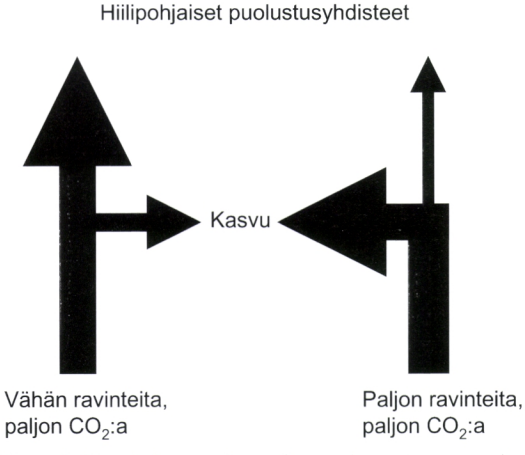


Kuva 2. Ruskomäntypistiäistuhot, tilanne a) 1960-1990, b) ennuste vuodelle 2050 (Muokattu Virtanen ym. 1995 mukaan).

kannalta (kuva 3). Kasvit näyttävän siten ohjaavan "ylimääräisen" hiilen pääsääntöisesti puolustusyhdisteisiin etenkin tilanteissa joissa kasvu on ravinteiden niukan saatavuuden takia rajoittunut.

Puolustusyhdisteiden ohella kasvit "varastoivat" tätä ylimääräistä hiiltä myös ligniininä ja tärkkelyksenä soluseiniin. Ne voivat muodostaa myös syömistä hidastavia rakenteita kuten karvoja. Tällöin hiilen määrä suhteessa ravintoaineisiin, erityisesti typpeen, kasvaa ja lehdet ovat ravintoarvoltaan huonompia. Toisaalta hyönteiskasvinsyöjät pyrkivät kompensoimaan isäntäkasvin kohonnutta resistenssiä tai heikentynyttä ravintoarvoa lisäämällä ravinnon kulutusta mikä vuorostaan aiheuttaa isäntäkasville suurempaa vahinkoa.

Joensuun yliopiston Mekrijärven tutkimusasemalla suoritetut kokeet (ks. Kellomäen ja Peltolan artikkeli) ovat osoittaneet, että kohotettu ilman hiilidioksidipitoisuus ja kohotettu lämpötila lisäävät rauduskoivun vastustuskykyä myyrien ja jäniksien talvista syöntiä vastaan. Syynä kohonneeseen vastuskykyyn on lisääntynyt kasvinsyöjille myrkyllisten hartsinystyjen määrä oksien pin-



Kuva 3. Kasvin kasvun ja puolustusainetuotannon suhde ravinteiden ja hiilidioksidin määrään. Lämpötilan nousu käyttäytyy ravinnelisäyksen tavoin.

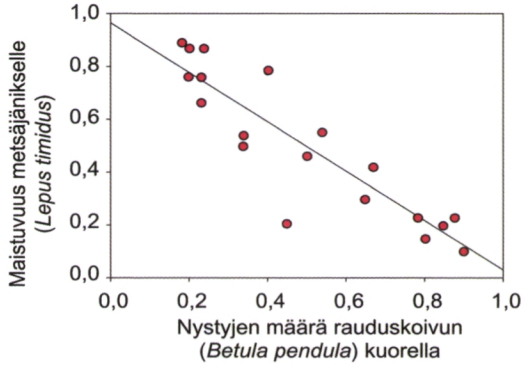
nalla (kuva 4). Tässäkin tapauksessa koivu ohjaa osan kohonneen hiilidioksidipitoisuuden "ylimääräisestä" hiilestä puolustusyhdisteiden tuottamiseen, mikä näkyy kohonneena vastuskykynä nisäkästuhonaiheuttajia vastaan. Hirvi, joka on erittäin kookas kasvinsyöjä ja erinomainen käsittele-

mään ja neutraloimaan kasvien puolustusyhdisteitä, ei näytä kuitenkaan välittävän rauduskoivun hartsinystyjen kohonneesta määrästä. Ilmastomuutos ei siten valitettavasti merkitse rauduskoivun kohonnutta vastustuskykyä hirvituhoja vastaan.

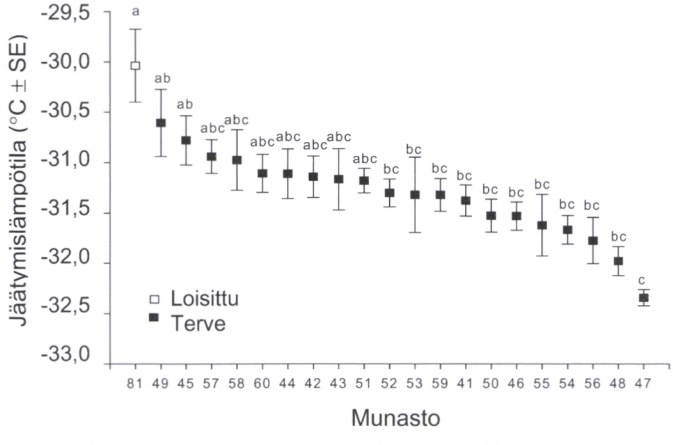
Suotuisat elinympäristömuutokset

Talvilämpötilojen muutokset

Ilmastonmuutoksen seurauksena tapahtuva todennäköinen talvilämpötilojen nousu vaikuttaa eritoten kahden merkittävän metsiemme tuhohyönteisen, tunturikoivulla tuhoja aiheuttavan tunturimittarin (*Epirrita autumnata*) ja männyllä laaja-alaisia neulastuhoja aiheuttavan ruskomäntypistiäisen (*Neodiprion sertifer*) kannanvaihteluihin alentamalla talvehtivien munien kuolleisuutta (kuva 5). Tunturimittarit aiheuttavat laaja-alaisia, jopa tuhansien neliökilometrien laajuisia tuhoja Kölivuoriston ja Pohjois-Suomen tunturikoivikoissa. Vuoden 1964-1966 tuhojaksossa pelkästään Suomen Lapissa noin 5000 km^2 tunturikoivikkoa syötiin paljaaksi ja noin 1500 km^2 tunturikoivikkoa ei useasta syystä kyennyt toipumaan vaan muuttui puuttomaksi paljakaksi. Tunturimittarituhojen topografialle on tyypillistä, että tuhot esiintyvät tunturien yläosassa ja alarinteet sekä jokilaaksot säilyvät terveinä. Syynä ilmiöön on alaville paikoille talvisin muodostuvat "kylmän ilman järvet", jotka tappavat tunturikoivujen rungoissa ja oksissa talvehtivat munat. Monissa kokeissa on osoitettu, että talvehtivat tunturimittarin munat eivät säily elävinä alle -36 °C lämpötiloissa. Munien talvikuolleisuus selittää siten hyvin tuhojen alueellisen jakautumisen. Mikäli talvilämpötilat kohoavat ilmastomuutoksen myötä alenee myös munien talvikuolleisuus, mikä vuorostaan johtaa



Kuva 4. Jänikselle on vastenmielistä syödä hartsinystyjä sisältäviä rauduskoivuntaimia.



Kuva 5. Ruskomäntypistiäisten munat kestävät pakkasta. Talvilämpötilojen kohotessa munat selviävät entistä paremmin, jolloin lajin potentiaali aiheuttaa metsätuhoja kasvaa. Lisäksi loisitut munat jäätyvät korkeammassa lämpötilassa jättäen mäntypistiäisille "ikkunan" paeta loisintaa sopivissa olosuhteissa. Munastolla (x-akseli) tarkoitetaan yhden naaraan munaryhmää, kirjaimet (a, b ja c) osoittavat tapausten tilastollista eroa ja SE = keskiarvon keskivirhe.

tunturimittarituhojen yleistymiseen ja tuhoalueiden laajentumiseen tuntureiden alaosiin ja kaikille alueille, missä talvilämpötila ei alita kriittistä -36 °C lämpötilaa.

Ruskomäntypistiäinen on ainoa mäntypistiäislajimme, joka talvehtii munana mäntyjen neulasten sisällä. Muut lajit ovat kotelotalvehtijoita. Ruskomäntypistiäistuhoja esiintyy taajaan kaikilla Etelä-Suomen mäntyvaltaisilla metsäalueilla. Kainuu-Tornio -linjan pohjoispuolella tuhot ovat satunnaisia. Samoin kun tunturimittarilla, myös ruskomäntypistiäisellä talvehtivat munat eivät kestä alhaisia lämpötiloja. Ruskomäntypistiäisen munat kuolevat alle –34 °C lämpötiloissa, mikä ilmeisimmin rajoittaa sen leviämistä Pohjois-Suomen mäntymetsiin. Talvisten minimilämpötilojen nousu ilmastonmuutoksen myötä merkitsisi mitä ilmeisimmin ruskomäntypistiäistuhoalueen siirtymistä pohjoiseen päin ja kattamaan koko Suomen mäntymetsät.

Ilmastonmuutos ja etenkin muuttunet talvehtimisolosuhteet voivat vaikuttaa myös tuholaiskantoja säätelevien tautien, loisten ja petojen määriin. Tällöin tuholaiskannat saattavat karata näiden aiheuttamasta "biologisesta kontrollista". Hyvänä esimerkkinä tästä on ruskomäntypistiäisen munaloisen kohonnut talvikuolleisuus (kuva 5.). Loisitut munat ovat herkempiä kuolemaan talvella. Tällöin tietyissä talvilämpöolosuhteissa ruskomäntypistiäiskannat voivat karata loisten aiheuttamasta säätelystä.

Vaikutukset taudinaiheuttajiin

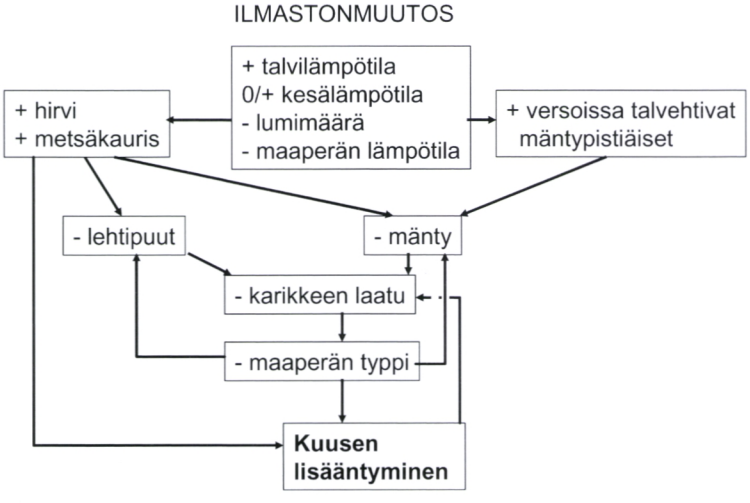
Ilmastonmuutoksen ja metsätautien välisestä suhteesta tiedetään toistaiseksi hyvin vähän. Monet sienituhot (esimerkiksi versosurma ja koivuruoste) lisääntyvät voimakkaasti kosteiden ja lämpimien kesien aikana. Kesäisten kosteusolosuhteiden muutos tietäisi siten erittäin todennäköisesti sienitaudeille parempia lisääntymis- ja leviämismahdollisuuksia. Esimerkiksi juurikäävän (*Heterobasidion annosum/pariporum*) itiöiden leviämiskausi on perinteisesti "äitienpäivästä isänpäivään". Kasvukauden pidentyminen lisännee olennaisesti itiöiden leviämiskautta ja vastaavasti juurikäävän leviämisen todennäköisyyttä. Samalla levinneisyysalue mitä todennäköisimmin siirtyy entistä pohjoisemmaksi.

Ekosysteemivaikutukset

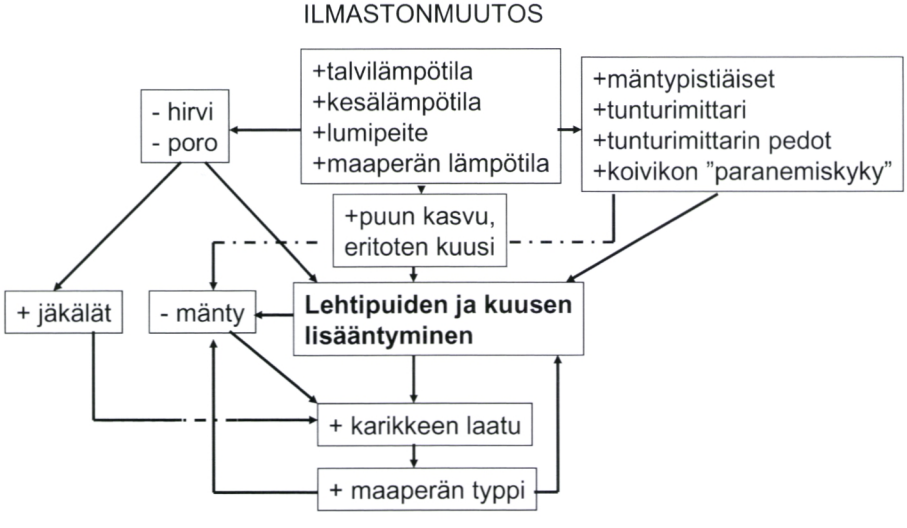
Ilmastonmuutoksen vaikutuksen ennustaminen eliöyhteisö- tai metsäekosysteemitasolla on vaikeaa monimutkaisten ekologisten vuorovaikutusten takia. Lisäksi ilmastomuutoksen lopputulos on usein vastakkaisiin suuntiin vaikuttavien tekijöiden summa. Oikeaan lopputulokseen päätyminen edellyttää eri tekijöiden kvantitatiivisuuden tuntemista. Eliöyhteisötason muutoksista esimerkkinä on kasvinsyöjänisäkkäiden vaikutus. Nisäkäslajistossa saattaa tapahtua muutoksia eteläisten lajien levittäytyessä pohjoiseen. Toisaalta monien, erityisesti lumipeitteen paksuudesta riippuvien lajien populaatiot saattavat taantua. Vähenevä lumipeite vähentää suojaa ja lisää pienpetojen ja petolintujen taholta tulevaa saalistuspainetta. Tällainen laji on esimerkiksi peltomyyrä. Tällä voi olla vaikutuksia erityisesti eteläisessä Suomessa, jossa kasvillisuus voi myyrien aiheuttaman laidunnuspaineen puuttuessa muuttua huomattavasti. Myyrien laidunnuksen on todettu vähentävän kasvien välistä kilpailua ja siten lisäävän kasvilajiston monimuotoisuutta. Tilanteessa jossa myyrien laidunnuspaine pienenee, kilpailu kasvilajien välillä voimistuu ja parhaimmat kilpailijat yleistyvät yksipuolistaen kasvillisuutta.

Esimerkkinä ekosysteemivaikutuksista voidaan esittää voimakkaasti lisääntyneiden hirvieläinkantojen ja mäntypistiäisten sisällyttäminen ilmastonmuutosskenarioihin (kuvat 6 ja 7). Perinteiset ilmastonmuutosennusteet olettavat etenkin Etelä-Suomen metsien muuttuvan lehtipuuvaltaisiksi. Toisaalta vähentynyt lumipeite sallii ylitiheiden hirvieläinkantojen entistä tehokkaamman lehtipuiden ja myös tärkeimmän talvisen ravintokasvin – männyn - käytön. Lehtipuiden osuuden väheneminen aiheuttaa karikkeen laadun muutoksen. Lumipeitteen eristävän vaikutuksen heiketessä myös karikkeen hajoamisnopeus putoaa. Lisäksi

jo muutenkin hitaasti hajoava neulaskarike yleistyy ja nopeasti hajoava lehtipuukarike vähenee. Seurauksena on karikkeen hajoamisen ja edelleen ravinnekierron hidastuminen. Tästä edelleen seuraa maaperän köyhtyminen, joka suosii etenkin kuusta. Kuten edellä esitettiin, alentuneet talvilämpötilat voivat lisätä mäntypistiäisten aiheuttamia tuhoja ja etenkin pilkkumäntypistiäisen kohdalla lisääntyviä puukuolemia. Seurauksena on männyn väheneminen, mikä osaltaan suosii myös kuusta. Lopputuloksena on, että jos nisäkäskasvinsyöjien ja tuhohyönteisten vaikutus sisällytetään ennustemalleihin, tuloksena ei ole lehtipuiden vaan kuusen yleistymien Etelä-Fennoskandiassa. Tähän skenaarioon voimme tietenkin vaikuttaa mm. säätelemällä hirvieläinkantoja tehokkaasti ja tarkoituksenmukaisesti. Pohjoinen Fennoskandiassa taas



Kuva 6. Kaaviokuva eteläisen Fennoskandian ekosysteemimuutoksista nykyisten ilmastonmuutos ennustusten toteutuessa, + tarkoittaa positiivista ja – negatiivista nettovaikutusta.



Kuva 7. Kaaviokuva pohjoisen Fennoskandian ekosysteemimuutoksista nykyisten ilmastonmuutos ennustusten toteutuessa, + tarkoittaa positiivista ja – negatiivista nettovaikutusta.

kaavio ennustaa kuusen ja lehtipuiden lisääntymistä vastaavilla mekanismeilla (kuva 7).

Johtopäätökset

Yleisesti taudinaiheuttajista ja tuholaisista voitaneen sanoa, että niiden elinolosuhteet paranevat mikäli ilmastonmuutosennustukset toteutuvat. Tämä tarkoittaa entisten, meillä jo pysyviä kantoja muodostaneiden tuholaisten mahdollisia laaja-alaisempia tuhoja, sekä mahdollisesti uusien maahamme "muuttavien" lajien aiheuttamia ongelmia. Toisaalta myös tuholaislajiemme loisten ja tautien elinolosuhteet muuttuvat, mikä aiheuttanee entistä suurempia heilahteluita tuhohyönteisten kannanvaihtelussa. Muutoksia tapahtuu myös isäntäkasveissa, niiden kemiallisessa koostumuksessa ja esiintymisessä. Useat eri suuntiin vaikuttavat tekijät tekevät lopputuloksen ennustamisen vaikeaksi. Joka tapauksessa muutoksia omassa pohjoisessa ekosysteemissämme tulee varmasti tapahtumaan, mutta vain aika näyttää mihin ne muutokset loppujen lopuksi johtavat.

Kirjallisuus

Virtanen, T., Neuvonen, S., Nikula, A., Varama, M. & Niemelä, P. 1996. Climate change and the risks of *Neodiprion sertifer* outbreaks on Scots pine. Silva Fennica 30(2-3): 169-177.

Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsäekosysteemin toimintaan ja rakenteeseen sekä metsien hoitoon ja ainespuun tuotantoon

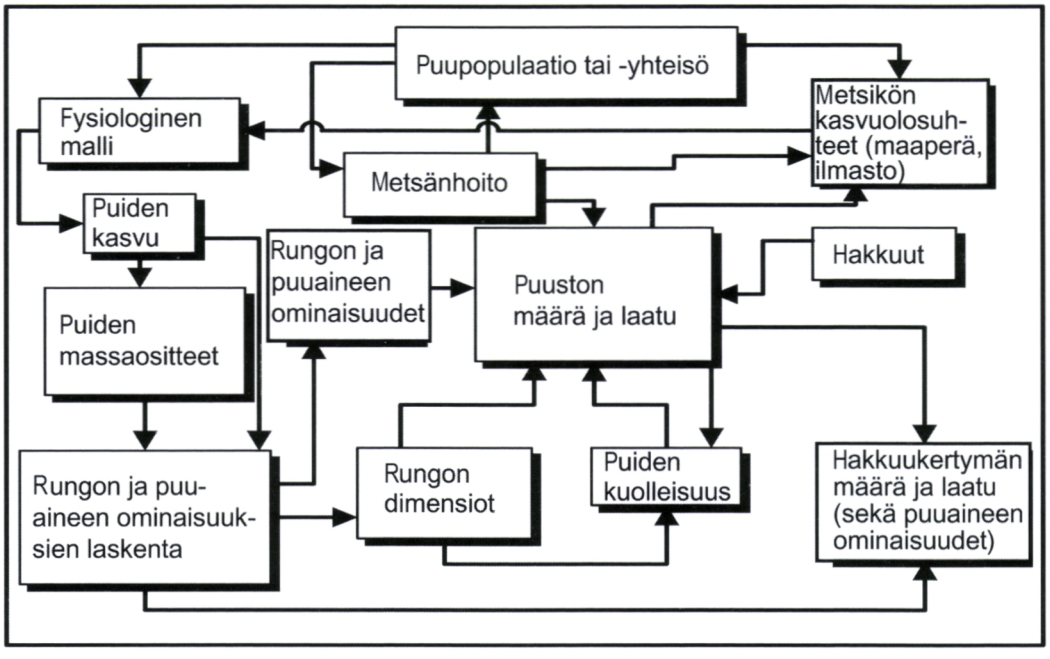
Heli Peltola ja Seppo Kellomäki

Tausta

Suomelle tehdyt uusimmat ilmastoskenaariot ennakoivat vuotuisen keskilämpötilan kohoavan 2,4–7,4 °C ja vuosisadannan 6–37 % vuoteen 2080 mennessä (Carter ym. 2002). Tämän oletetaan vaikuttavan useiden eri mekanismien välityksellä metsäekosysteemin toimintaan ja rakenteeseen. Ilmaston lämpenemisen oletetaan lisäävän mm. puiden kasvua ja tuotosta sekä erityisesti luontaisen uudistamisen edellytyksiä puulajista riippumatta (mänty, kuusi ja koivu). Tämä korostuu eritoten Pohjois-Suomessa, jossa lämpötila nykyisin rajoittaa selvästi sekä puiden kasvua että luontaista uudistamista. Myös metsänviljelyn onnistumismahdollisuuksien oletetaan paranevan. Metsänhoidon merkitys korostuu muuttuvassa ilmastossa, sillä sen avulla voidaan säädellä kasvupaikan ominaisuuksia ja ympäristötekijöiden saatavuutta siten, että puuston kasvu ja tuotos sekä uudistamisedellytykset turvataan. Metsäekosysteemin toiminta ja rakenne todennäköisesti kykenevät mukautumaan muuttuviin ilmasto-oloihin, jos muutoksen nopeus ei ylitä puiden sopeutumiskykyä.

Metsänhoito vaikuttaa puiden aineenvaihduntaan epäsuorasti muokkaamalla puuston rakennetta. Tämän vuoksi sekä metsänhoito että ilmastonmuutos vaikuttavat puuston kasvuun ja uudistumiseen. Myös puiden kuolemista voidaan pitää yhdistettynä vasteena, jota voidaan kontrolloida säätelemällä puiden kasvutilaa harvennusten avulla. Metsän kasvu ja kehitys etenevät kuitenkin ihmisen aikahorisontista katsoen hitaasti. Täten ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsän pitkän ajan kehitysdynamiikkaan ei voida tutkia kokeellisesti, vaan kaikki ennusteet perustuvat erilaisiin mallilaskelmiin. Metsäekosysteemimallit ovatkin viime vuosina kehittyneet voimakkaasti ja niistä on tullut yhä tärkeämpiä apuvälineitä metsien tulevan kehityksen ennakoinnissa sekä muuttuvassa että nykyisessä ilmastossa. Mallien avulla on mahdollista tutkia mm. metsänhoidon ja ilmastonmuutoksen samanaikaisia vaikutuksia metsien kasvuun ja kehitykseen, koska metsänhoito ja ilmastonmuutos vaikuttavat yhdessä puuston kasvu- ja uudistumisdynamiikkaa ohjaaviin prosesseihin.

Kuvassa 1 on esitetty FINNFOR-ekosysteemimalli (Kellomäki ja Väisänen 1997). Sen avulla voidaan simuloida metsäpuiden fysiologisia vasteita (valo, lämpötila, CO_2, ravinteet ja vesi), joiden avulla metsänhoidon ja ilmastonmuutoksen vaikutukset puuston kasvuun ja tuotokseen (sekä uudistumiseen) kytketään metsäekosysteemin dynamiikkaan. Puiden kasvua kuvataan mallissa puiden eri osien massan kasvun sekä rungon sädekasvun ja pituuskasvun avulla. Puiden kasvaessa ja metsikön sulkeutuessa kilpailu eri kasvutekijöistä lisääntyy, jolloin puita kuolee, ellei puustoa harvenneta.

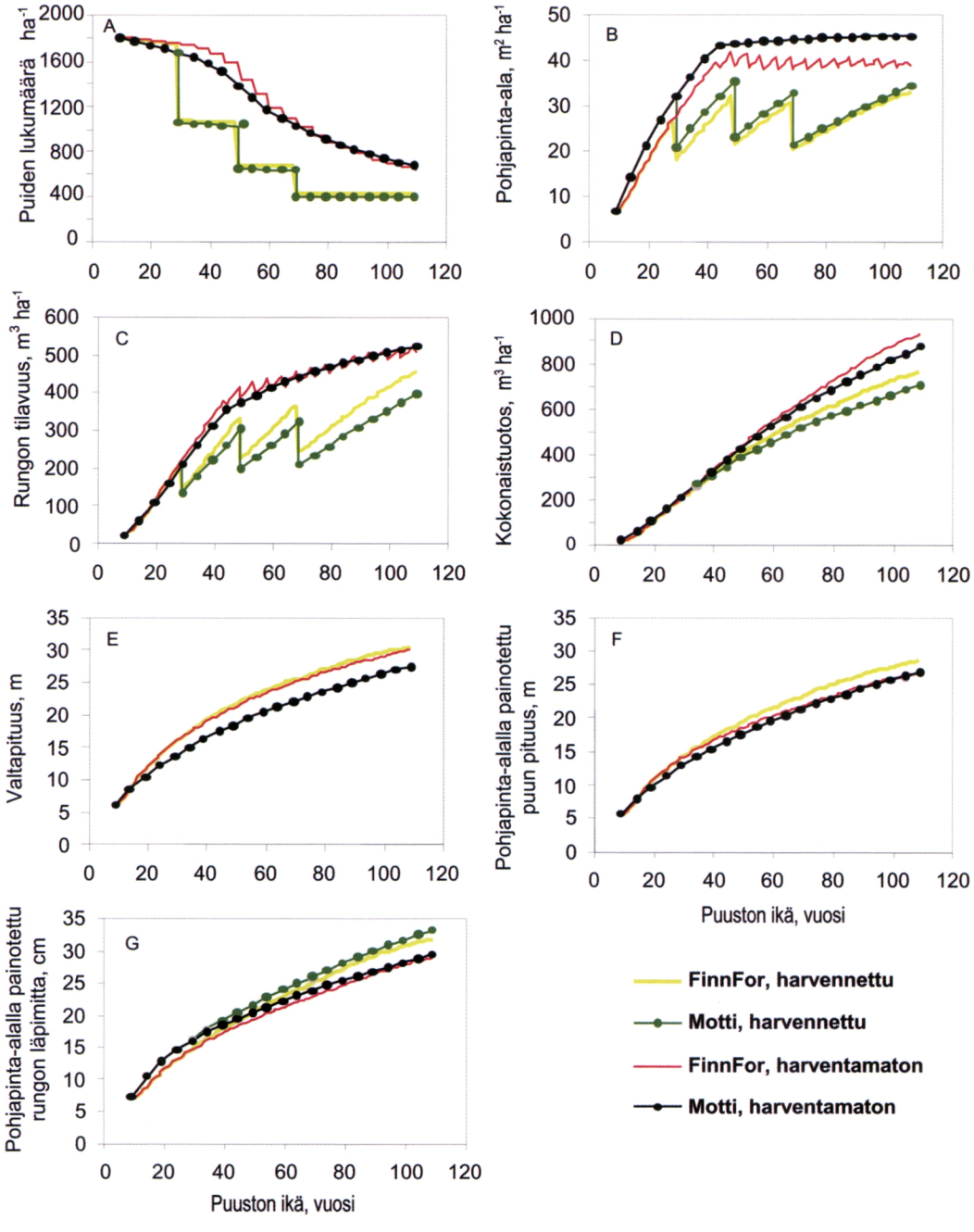


Kuva 1. Periaatekaavio FINNFOR-mallin rakenteesta (Kellomäki ja Väisänen 1997).

FINNFOR-mallin, kuten muidenkin vastaavien mallien ja niillä tehtävien mallilaskelmien uskottavuuden lähtökohtana on, että malli simuloi riittävän hyvin metsien kasvua nykyilmastossa. Tämän ehdon täyttyessä voitaneen olettaa, että malli simuloi metsien kasvua ja kehitystä järkevästi myös muuttuvassa ilmastossa. Voidaanko sitten metsäpuiden fysiologiaan perustuvilla malleilla, kuten FINNFOR-mallilla, laskea luotettavasti metsän kasvun ja kehityksen kulkua? Tätä asiaa selvittivät Matala ym. (2003), kun he vertasivat FINNFOR-mallin simulointikykyä vastaaviin Metsäntutkimuslaitoksessa kehitetyn Motti-mallin (Hynynen ym. 2002) laskelmiin. Jälkimmäinen malli tarjosi hyvän vertailupohjan nykyilmaston vallitessa, koska sen laadinnassa on käytetty hyväksi laajoja mittausaineistoja, jotka kattavat koko Suomen metsissä esiintyvän kasvun vaihtelun.

Vertailu osoitti, että molemmat mallit tuottivat likimain samanlaisia tuloksia mutta myös eroja löytyi testimetsiköiden kehityskuluista mm. puuston pohjapinta-alan ja tilavuuden kehityksessä (kuva 2). Molempien mallien perusdynamiikka toimi kuitenkin samalla tavalla puiden kasvun ja kuolemisen suhteen. Voidaan siis olettaa, että FINNFOR-mallilla voidaan simuloida luotettavasti metsän kasvua ja kehitystä sekä nykyisessä että muuttuvassa ilmastossa. Täten mallin avulla voidaan tutkia, kuinka ilmastonmuutos ja metsänhoito vaikuttavat yhdessä puiden uudistamiseen, kasvuun ja tuotokseen sekä kuolemiseen erilaisilla kasvupaikoilla. Tämä antaa mahdollisuuden tutkia tarkoituksenmukaista metsänhoitoa (metsikön kasvatustiheys, harvennukset ja kiertoaika) muuttuvassa ilmastossa. Edellytyksenä kuitenkin on, että metsien kasvu- ja kehitysdynamiikka muuttuvassa ilmastossa on vastaavanlainen kuin nykyilmastossa huolimatta siitä, että ilmastonmuutoksen on todettu nopeuttavan kasvua ja lyhentävän puiden elinkaarta.

Tämän luvun tarkoituksena on esitellä tutkimustuloksia siitä, miten ilmakehän kohoava lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus voivat vaikuttaa metsän uudistamis- (erityisesti luontainen uudistaminen), kasvu- ja kehitysdynamiikkaan, ja miten metsien hoitoa tulisi sopeuttaa muuttuvassa ilmastossa kun tavoitteena on metsien kestävä ainespuun tuotanto. Esitettävät tulokset perustuvat pääosin ekologisilla malleilla (kuten FINNFOR) teh-



Kuva 2. Harventamatta ja harventaen kasvavan männikön kasvu ja kehitys laskettuna FINNFOR- ja Motti-malleilla (Matala ym. 2003). Laskelma on tehty Kuopion seudulle siten, että kasvupaikka oli mustikkatyyppiä ja puuston alkutiheys 1800 puuta hehtaarilla, jakautuneena useaan kokoluokkaan (läpimittavaihtelu 3,6–8,9 cm, pituusvaihtelu 4,0–6,3 m, puuston keski-ikä 9 vuotta). Harvennukset tehtiin alaharvennuksina siten, että kussakin harvennuksessa poistettiin 30 % puuston tilavuudesta.

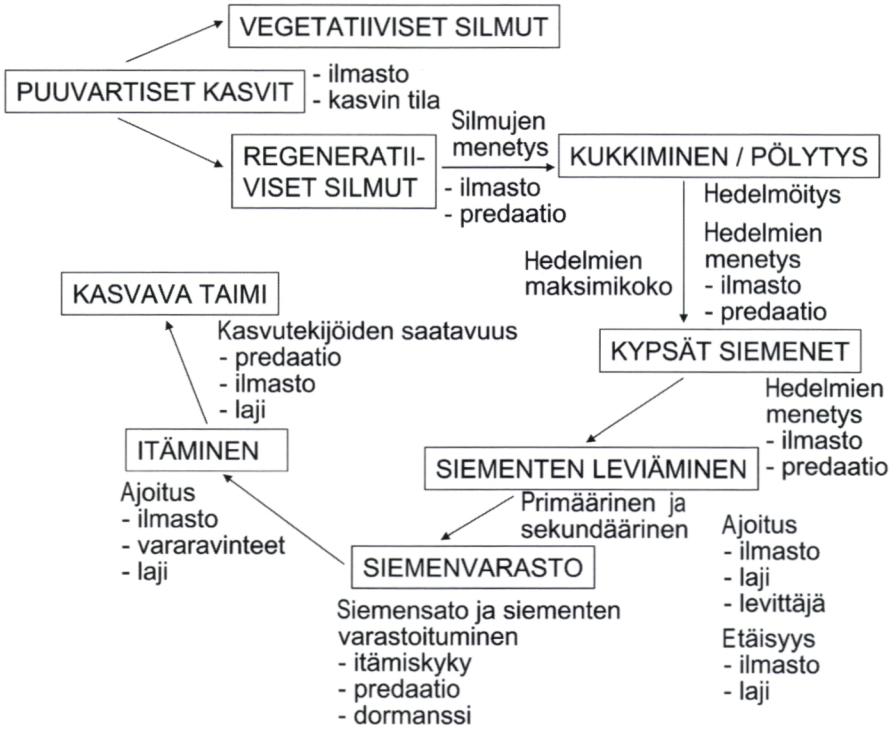
tyihin simulointeihin, joissa on käytetty hyväksi ilmastonmuutosskenaarioita ja metsiä koskevaa inventointitietoa.

Metsän luontainen uudistaminen nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa

Metsän luontaiseen uudistamiseen vaikuttavia tekijöitä

Metsäpuiden luontaisen uudistamisen onnistumiseen vaikuttaa mm. puiden kukkiminen ja siementen muodostuminen, sekä siementen itäminen ja taimien ensikehitys. Ilman lämpötila vaikuttaa näihin kaikkiin tekijöihin (kuva 3). Esimerkiksi männyn pohjoinen metsänraja sijoittuu alueelle, missä kasvukauden lämpöolot ovat siementen muodostumista ja kypsymistä ajatellen vain harvoin suotuisat (Henttonen ym. 1986). Siementen itäminen ja sirkkataimien kasvu vaativat lämmön lisäksi myös riittävästi sadantaa (maan kosteus). Koska veden haihdunta luultavasti lisääntyy ilmaston lämmetessä, on mahdollista, ettei lisääntyvä sadanta välttämättä paranna maan kosteusoloja luontaista uudistamista ajatellen. Toisaalta on myös esitetty, että kohoavassa hiilidioksidipitoisuudessa taimien vedenkäyttö tehostuu, jolloin ne sietävät vedenpuutetta ja varjostusta nykyistä paremmin.

Kaiken kaikkiaan lämmön ja kosteuden vaikutukset uudistamistulokseen riippuvat siitä, millaiset olosuhteet vallitsevat uudistamisprosessin eri vaiheissa. Itämiskykyisiä siemeniä syntyy varmimmin, kun lämpimien ja kosteiden kasvukausien toistuvuus on suuri (esim. Koski ja Tallqvist 1978). Siemenlepo purkautuu puolestaan nopeimmin viileissä ja kosteissa olosuhteissa. Itäminen sen sijaan on nopeampaa lämpimissä ja riittävän kosteissa olosuhteissa. Toisaalta tällaisissa olosuhteissa siementen itämiskyky heikkenee nopeasti. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvu ei luultavasti vaikuta itämiseen, sillä metsämaassa on



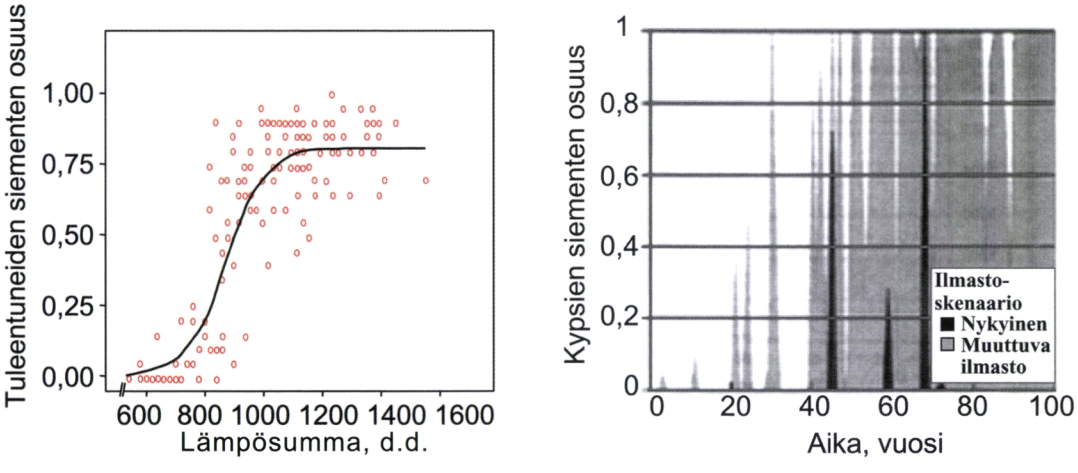
Kuva 3. Periaatteellinen esitys luontaisen uudistamisen prosessista ja sen onnistumiseen vaikuttavista tekijöistä (Nygren 1990).

aina runsaasti hiilidioksidia. Taimien ensikehitys on itämisen lailla nopeinta lämpimissä ja riittävän kosteissa olosuhteissa. Tällöin siemeniä ja taimia hyväkseen käyttävät hyönteis- ja sienilajit voivat kuitenkin lisääntyä, joten kokonaisuudistamistulos ei välttämättä parane samassa suhteessa. Kaiken kaikkiaan uudistamisprosessin eri vaiheiden sekä ilmaston vaihtelun synkronoituminen vaikuttaa suuresti metsän luontaisen uudistamisen nopeuteen ja varmuuteen nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa. Jos lämpimien kesien jakso on tulevaisuudessa riittävän pitkä, voi yhtenäisen mäntymetsän alue laajentua pohjoiseen.

Ilmastonmuutoksen vaikutus siemensadon ominaisuuksiin

Metsärajalla, jossa lämpösumma on noin 600 d.d., vain hyvin pieni osa siemensadosta ylimalkaan tuleentuu ja siemensadon määrä näissä olosuhteissa jää aina alhaiseksi (kuva 4A). Lämpösumma 600-700 d.d. muodostaa kynnysalueen, jonka jälkeen tuleentuneiden siementen osuus alkaa kuitenkin lisääntyä nopeasti. Maksimiarvo saavutetaan 900-1000 d.d. lämpösummalla. Esimerkiksi männyn siementen katsotaan kehittyvän normaalisti, jos toisen kasvukauden lämpösumma kohoaa noin 85 %:iin kasvukauden keskimääräisestä lämpösummasta (900-1100 d.d. Etelä- ja Keski-Suomessa). Ilmastonmuutos siis saattaa vaikuttaa esimerkiksi männyn siemensadon laatuun Etelä-Suomessa vain vähän verrattuna Pohjois-Suomeen, jossa lämpösumman nykyisellä metsärajalla ennakoidaan kohoavan 800–900 d.d:hen. Suoraviivaisesti tulkiten tämä tarkoittaisi sitä, että nykyisellä metsärajallakin olisi tulevaisuudessa odotettavissa riittävä siemensato. Täten mäntyjen uudistuminen ja leviäminen olisi mahdollista jopa nykyisen metsärajan pohjoispuolelle ja ylemmäs kohti tuntureiden lakialueita. Tämän seurauksena havumetsävyöhykkeen eteläraja voisi siirtyä jopa 400-500 km nykyistä pohjoisemmaksi.

Kellomäen ym. (1997a) tekemän laskelman mukaan Utsjoella kasvavien mäntyjen tuleentuneiden siementen osuus koko siemensadosta muuttuu nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa, kun jälkimmäisessä tapauksessa ilman lämpötila kohoaa lineaarisesti 4 °C 100 vuoden kuluessa (kuva 4B). Laskelman mukaan nykyilmastossa esiintyi sadan vuoden aikana vain pari sellaista siemensatoa, joissa siemenet olivat pääosin tuleentuneita, ja useimpina vuosina siemeniä ei syntynyt lainkaan tai ne eivät tuleentuneet. Lämpötilan 4 °C:een nousu muutti tilannetta merkittävästi. Tuleentuneiden siementen osuus lisääntyi voimakkaasti jo 1,6 asteen lämpötilan nousun jälkeen (40 vuotta simuloinnin alusta lukien) ja simulointijakson loppu-



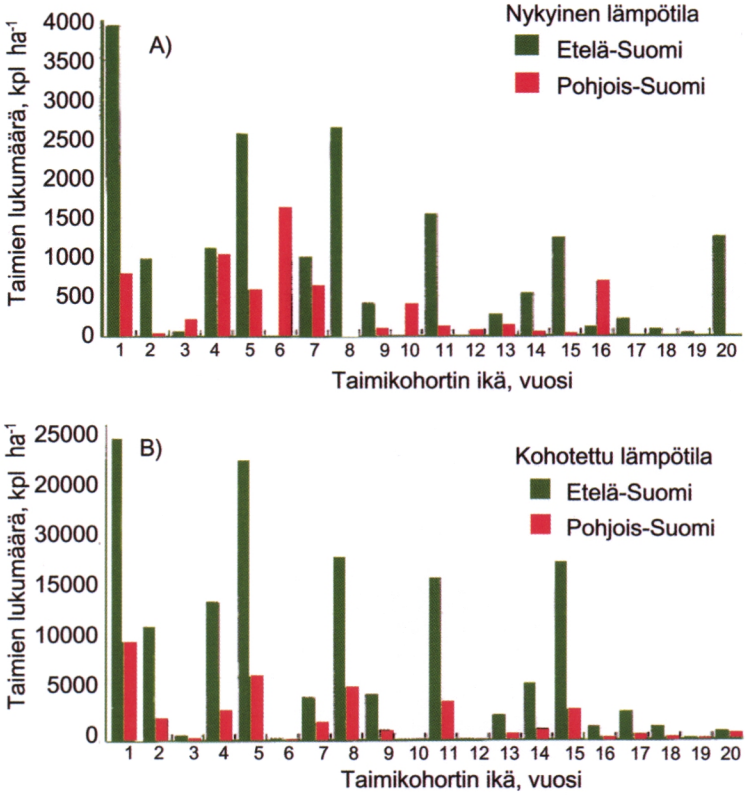
Kuva 4. A. Anatomisesti tuleentuneiden männyn siementen osuus ja sitä vastaava lämpösumma (kynnysarvo +5 °C) (Henttonen ym. 1986). B. Männyn tuleentuneiden siementen osuus nykyisessä ja muuttuvassa ilmastossa männyn metsärajalla (Kellomäki ym. 1997a).

puolella siemensadon laatu ei enää rajoittanut männyn uudistumista.

Ilmastonmuutoksen vaikutus luontaisen uudistamisen tulokseen

Kaiken kaikkiaan sääolot siis määräävät, missä laajuudessa emopuuston potentiaalinen siemensato toteutuu: kuinka paljon puut kukkivat, miten pölytys onnistuu, kuinka suuri osa siemenaiheista kypsyy itämiskykyisiksi siemeniksi ja kuinka suuri osuus kypsistä siemenistä lopulta itää ja muodostaa elinkelpoisen taimen. Toisaalta luontaisen uudistamisen onnistumiseen vaikuttavat myös emopuuston (puulaji, koko, tiheys, kehitysvaihe) ja kasvupaikan ominaisuudet (kasvupaikan rehevyys, maalaji ja paljastetun kivennäismaan määrä) (Pukkala 1986). Emopuuston ominaisuudet asettavat periaatteelliset rajat sille, kuinka paljon siemeniä voi varista pinta-alayksikköä kohti. Toisaalta kivennäismaan paljastaminen (maanmuokkaus) parantaa yleensä aina uudistamisedellytyksiä aivan karuimpia kasvupaikkoja lukuun ottamatta. Rehevillä kasvupaikoilla pintakasvillisuuden kilpailu vaarantaa taimien alkukehitystä.

Metsän luontaiselle uudistamiselle on tyypillistä, että taimikko syntyy harvoin vain yhden siemensadon seurauksena. Etelä-Suomessakin hyvien siemenvuosien tiheys vaihtelee. Myös lajit poikkeavat toisistaan: koivulla on hyvä siemen-



Kuva 5. Esimerkki eri-ikäisten männyntaimien elossa säilymisestä siemenpuuhakkuulla käsitellyllä uudistusalalla Etelä- (Tampere) ja Pohjois-Suomessa (Rovaniemi) nykyilmaston (A) ja muuttuvan ilmaston (B) vallitessa, eli tilanteessa jossa vuoden keskilämpötilan oletettiin kohoavan 4 °C sadassa vuodessa (toisaalta sadanta sama kuin nykyilmastossa). Esimerkkilaskelmassa jäävän emopuuston tiheys oli 50 kpl/ha (keskipituus 24 m ja -läpimitta 24 cm) ja simulointijakson pituus 20 vuotta (Kellomäki ym. 1997a). Kunakin vuonna elossa olevien taimien lukumäärä on esitetty taimikohortin iän funktiona.

vuosi lähes joka vuosi, kun taas männyllä ja kuusella harvemmin. Täten varsinkin kuusen taimikot syntyvät pitkähkön ajan kuluessa ja usein huomattava osa taimista on syntynyt jo ennen varsinaista uudistushakkuuta. Myös luontaisesti syntyneet männyn taimikot koostuvat useista ikäluokista, jotka ovat syntyneet usean vuoden kuluessa (varsinkin jos uudistushakkuusta kulunut aika emopuuston poistamiseen on pitkä). Myös muuttuvassa ilmastossa siemensadon määrässä ja laadussa, sekä siementen itämisolosuhteissa ja taimien kasvuolosuhteissa tapahtuvat muutokset näkyvät taimikon synty- ja vakiintumisprosesseissa. Tämä kävi ilmi FINNFOR-malliin liitetyn luontaisen uudistamisen osamallilla (Pukkala 1986) tehdystä kuvassa 5 esitetystä mallilaskelmasta (ks. Kellomäki ym. 1997a).

Kellomäen ym. (1997a) esittämässä laskelmassa oli simulointijakson lopussa (20 vuotta uudistamishakkuusta) taimikon tiheys nykyilmastossa Etelä-Suomessa 16 000–17 000 taimea hehtaarilla ja Pohjois-Suomessa 5 000–6 000 taimea hehtaarilla (kuva 5). Ilmaston lämpeneminen muutti tilannetta voimakkaasti: Etelä-Suomessa taimia oli 20 vuoden simulointijakson lopussa yli 100 000 kpl hehtaarilla ja Pohjois-Suomessakin noin 30 000 taimea hehtaarilla. Toisaalta taimien ikä- ja kokovaihtelu oli huomattavan suuri molemmissa simuloinneissa. Taimettuminen kuitenkin parani merkittävästi muuttuvassa ilmastossa, mikä voidaan tulkita myös siten, että tulevaisuudessa luontaiseen uudistamiseen tähtäävästä hakkuusta (siemen- tai suojuspuuhakkuu) kulunut aika taimikon vakiintumiseen lyhenee. Täten siemen- ja suojuspuut voidaan poistaa aiemmin, mikä parantaa myös taimikossa olevien taimien ikä- ja kokojakaumaa. Vastaavasti voidaan olettaa, että myös metsänviljelyn onnistuminen paranee, kun taimien alkukehitys ja kasvu nopeutuvat muuttuvassa ilmastossa. Toisaalta niin luontaisessa uudistamisessa kuin metsänviljelyssäkin taimikonhoidon tarve lisääntyy, eli varhaistaimikonhoidon, taimikon perkauksen ja harvennuksen merkitys kasvaa.

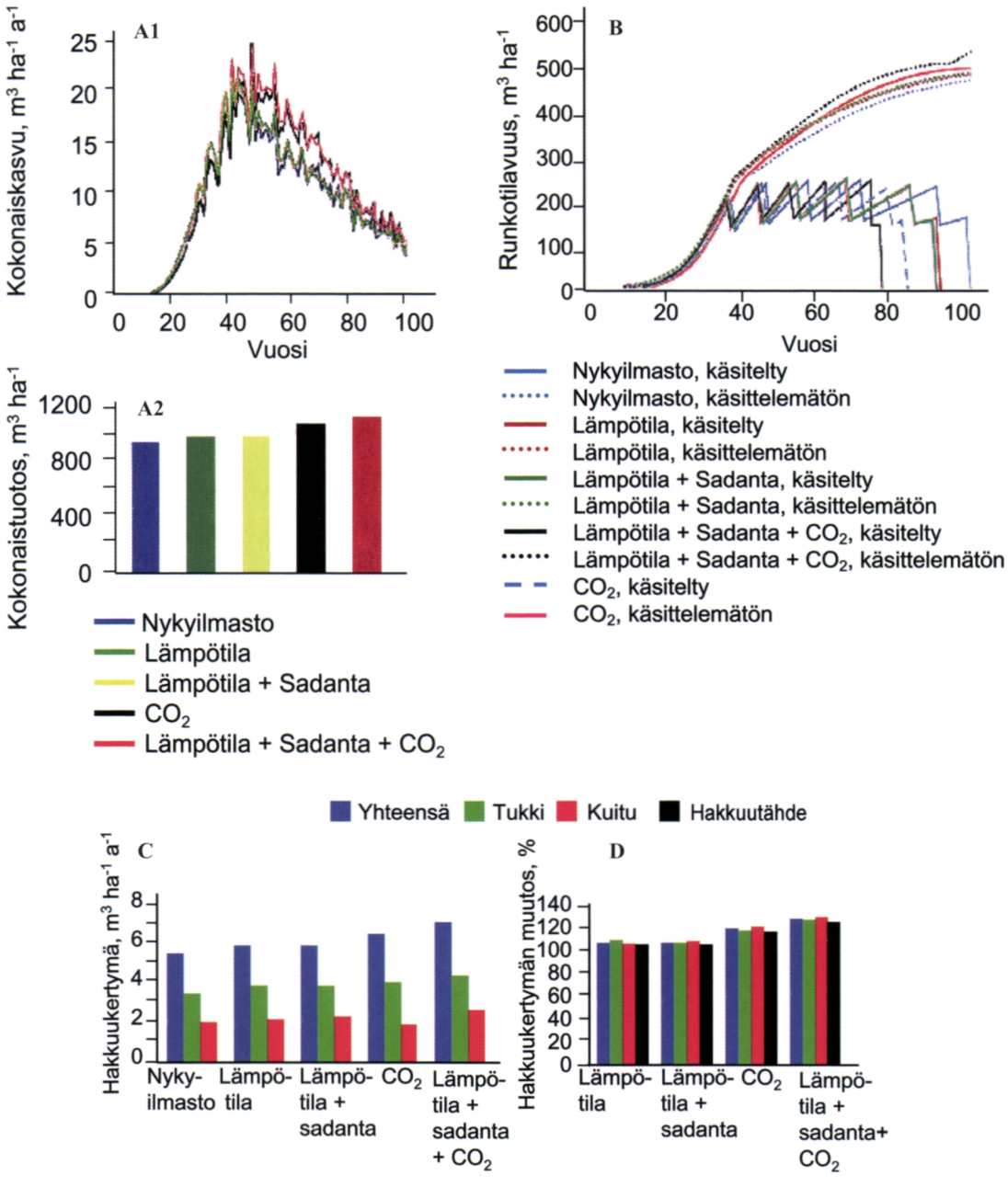
Metsän kasvu ja kehitys muuttuvassa ilmastossa

Esimerkkilaskelma metsikön kasvusta ja kehityksestä

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia metsän kasvuun ja kehitykseen voidaan analysoida joko yksittäisen metsikön tai metsäalueen tasolla. Edellisessä tapauksessa saadaan tietoa mm. siitä miten puusto reagoi eri kehitysvaiheissaan ilmastonmuutokseen. Jälkimmäisessä tapauksessa voidaan puolestaan analysoida sitä, miten metsien puulajisuhteet ja puuston ikärakenne vaikuttavat koko metsäalueen vasteisiin suhteessa ilmastonmuutokseen.

FINNFOR-mallilla tehdyt laskelmat havainnollistavat yksittäisen mäntymetsikön reaktioita ilmastonmuutokseen Etelä-Suomessa (kuva 6). Laskelma osoitti, että kasvu voi lisääntyä 20 % pelkästään ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kohoamisen seurauksena. Myös pelkkä ilman lämpötilan kohoaminen lisäsi kasvua 10 %. Kasvu lisääntyi kuitenkin eniten, jos ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta ja lämpötilaa kohotettiin samanaikaisesti (noin 30 %). Pohjois-Suomessa vastaavan kasvun lisäyksen odotetaan olevan vieläkin suurempi kuin Etelä-Suomessa.

Ilmastonmuutoksen vaikutus metsän kasvuun ja ainespuun tuotokseen on sidoksissa myös metsikössä suoritettaviin hakkuisiin ja metsätaloudessa sovellettavaan kiertoaikaan (aika uudistamisesta päätehakkuuseen). Kuvan 6 laskelmissa noudatettiin harvennuksissa nykyisin voimassa olevia harvennusmalleja (Hyvän metsänhoidon… 2001) ja päätehakkuu tehtiin, kun puuston keskiläpimitta ylitti 30 cm rajan. Nykyilmastossa kiertoaika oli noin 100 vuotta, mutta lämpötilan ja sadannan lisääntyessä kiertoaika lyheni 90 vuoteen. Hiilidioksidipitoisuuden kohoaminen lyhensi kiertoaikaa 15-20 vuotta, jolloin kiertoajaksi saatiin 80-85 vuotta. Kaikkien säätekijöiden muuttuessa kasvulle suotuisammiksi kiertoaika lyheni edelleen 75-80 vuoteen. Kokonaishakkuupoistuma harvennetuissa metsiköissä lisääntyi likimain suorassa suhteessa siihen, miten eri ilmastoskenaariot lisäsivät metsän kasvua.



Kuva 6. Esimerkkilaskelmia männikön kasvusta ja kehityksestä Etelä-Suomessa erilaisilla ilmastoskenaarioilla, joissa ilman lämpötilaa, sadantaa ja/tai ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta kohotetaan (joko erikseen tai yhdessä eri kombinaatioilla) 100 vuoden kuluessa (Kellomäki 1996, Kellomäki ym. 1997b). Luonnontilaisena kehittyvän männikön vuotuinen runkopuun kokonaiskasvu (A1) ja -tuotos (A2) sadan vuoden kiertoajalla. Kuvassa B ilman hakkuita (tasaviiva) ja hakkuin (murtoviivat) käsitellyn männikön runkotilavuuden kehitys. Kuvassa C hakkuin käsitellyn männikön keskimääräinen vuotuinen hakkuukertymä sekä sen muutos suhteessa nykyilmastoon (D). Lähtötilanteessa taimet olivat 2-vuotiaita ja 10 cm pituisia, taimien tiheys oli 2500 kappaletta hehtaarilla mustikkatyypin kasvupaikalla. Nykyilmasto: Tampereen lentosääasema. Muuttuvassa ilmastossa lämpötilan odotettiin nousevan vähitellen 100 vuoden aikana 4 °C (lämpösumma kohosi 1250 d.d:sta 2310 d.d:hen) ja sadannan lisääntyvän 90 mm ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kaksinkertaistuvan nykyisestä.

Voidaanko metsissä tuottaa ainespuuta samalla kun niihin varastoidaan hiiltä?

Ilmastomuutoksen vaikutuksia metsän kasvuun ja ainespuuntuotokseen sekä hiilensidontakapasiteettiin metsäekosysteemissä havainnollistetaan Pohjois-Savossa sijaitsevalle metsäalueelle FINNFOR- mallilla tehdyillä laskelmilla (infotaulu 1) (lähde: SilviStrat projekti, ks. Kellomäki ja Leinonen 2005). Nykyilmastoa (CRU) kuvattiin pitkän ajan säätilastoista (Kuopio, 1961-1990) saaduilla arvoilla. Muuttuvaa ilmastoa kuvattiin puolestaan kahdella vaihtoehtoisella ilmastoskenaariolla, joiden laskentajaksojen lopun ilmasto, vuosina 2071–2100 (viimeiset 30 vuotta), on kuvattu

Infotaulu 1. FINNFOR-mallilaskelman kuvaus Pohjois-Savossa sijaitsevalle metsäalueelle.

Mallilaskelmat

Ilmaston kuvaus	**keskilämpötila, °C**	**sadanta, mm**	**CO_2, ppm**
Nykyilmasto (CRU)	3,5	478	350
Muuttuva ilmasto			
HadCM2-skenaario	7,2	560	700
ECHAM4-skenaario	8,6	591	700

Metsäalueen kuvaus

Metsäalue 1451 ha (108 metsikköä): kuusi 64 %, mänty 28 %, koivu 7 %

Metsiköiden käsittelyvaihtoehdot

Harvennusohjelmat:

1. nykyisten harvennussuositusten mukaan (MT-kasvupaikka)
2. lisäämällä ja vähentämällä harvennuksen käynnistävää ja harvennuksen jälkeistä pohjapinta-alan rajaa verrattuna nykyisiin suosituksiin
3. harventamaton käsittely

Päätehakkuu kaikissa metsänkäsittelyvaihtoehdoissa:

- kun rinnankorkeusläpimitta > 30 cm (pohjapinta-alaan painotettu) tai
- kun metsikön ikä >100 vuotta

Metsikön uudistaminen:

- ennen päätehakkuuta vallinneella puulajilla
- 2500 taimea hehtaarille

Tarkasteltavat tulokset

Hakkuupoistuma ja siitä saatavat tulot (sekä niiden nykyarvo):

- sahatukki, latvaläpimitta ≥ 16 cm
- kuitupuu, latvaläpimitta ≥ 6 cm

Hakkuupoistumasta saatavat tulot (myös nykyarvo, 2 % korkokanta):

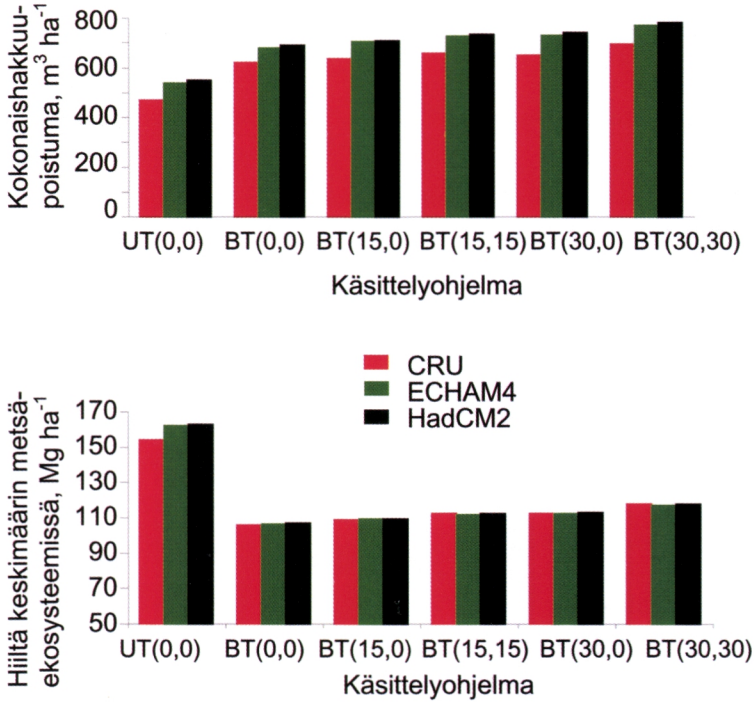
Hiilen määrä:

- metsäekosysteemissä (metsämaa ja puusto) ja puutuotteissa (raaka-aine hakattu metsäalueelta)

infotaulussa 1.

Laskelmat osoittivat, että ilmastonmuutos lisäsi puuston kokonaiskasvua ja -tuotosta 10–15 % (kuva 7). Kasvun lisäys oli suurinta harventamattomassa vaihtoehdossa, jossa puuston keskimääräinen tilavuus koko simulointijakson ajan oli suurin muihin käsittelyohjelmiin verrattuna. Myös eri harvennusohjelmien keskinäinen vertailu osoitti, että puuston kokonaiskasvu lisääntyi keskimääräisen puuston määrän kasvaessa. Näin tapahtui myös metsäalueelta korjatun ainespuun määrässä: pohjapinta-alan ylä- ja alarajan muuttaminen 30 % lisäsi hakkuupoistumaa nykyilmastossa 12 %, ja muuttuvassa ilmastossa 14 % verrattuna nykyisten, Hyvän metsänhoidon suositusten (2001) mukaisiin hakkuisiin. Ilmastonmuutos lisäsi hakkuupoistumaa myös silloin, kun metsää kasvatettiin ilman harvennuksia. Tässä tapauksessa kokonaishakkuupoistuma jäi kuitenkin selvästi pienemmäksi kuin harvennuksia käyttäen, sillä harvennusten pois jättäminen lisäsi luontaista poistumaa samassa suhteessa kuin ilmastonmuutos lisäsi kasvua. Laskelmista kävi myös ilmi, että ECHAM4-skenaariolla kokonaiskasvu ja -hakkuupoistumat lisääntyivät enemmän kuin HadCM2-skenaariolla.

Metsäalueelle tehdyt laskelmat osoittivat myös, että metsiin voi sitoutua hyvinkin erilaiset määrät hiiltä paikallisista olosuhteista ja metsänkäsittelystä riippuen (kuvat 7 ja 8). Toisaalta myös puutuotteisiin sitoutuu hiiltä, joka on poissa ilmakehästä tuotteen elinkaaren ja hajoamisen määräämän ajan. Metsänkasvatus ilman harvennuksia tarjosi tietenkin suurimmat mahdollisuudet lisätä metsän ja puutuotteiden hiilivarastoja verrattuna nykysuositusten mukaiseen metsänhoitoon. Harvennuksista kokonaan pidättäytyminen (UT(0,0), pelkkä päätehakkuu) kuitenkin vähensi hakkuu-



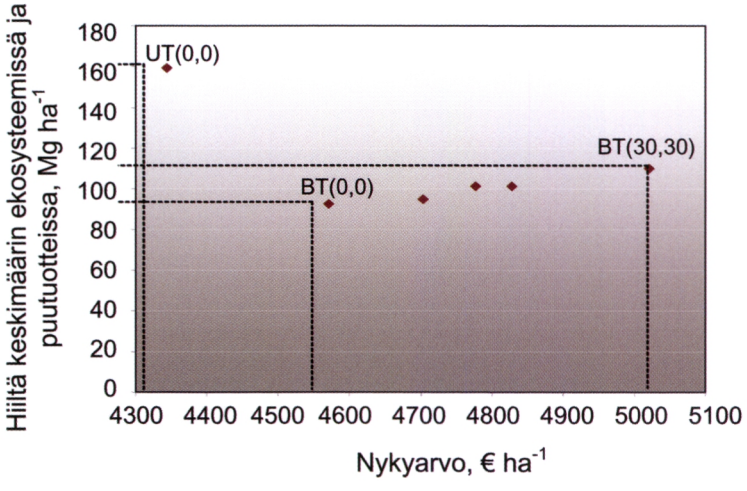
Kuva 7. Metsäalueen kokonaishakkuupoistuma (ylempi kuva) ja hiilivarasto (alempi kuva) kiertoajan kuluessa erilaisia harvennusohjelmia ja ilmastoskenaarioita sovellettaessa (lähde: SilviStrat-projekti, ks. Kellomäki ja Leinonen 2005). Kuvissa käsittelyohjelma UT(0,0) tarkoittaa kasvatusta ilman harvennusta, BT (0,0) kasvatusta nykyisillä harvennussuosituksilla, BT(15,0) harvennuksen pohjapinta-alan kohottamista 15 % ja alarajan pitämistä samanlaisena kuin nykyisillä harvennussuosituksilla jne.

poistumaa ja puutuotteiden määrää; jolloin syntyi 13 € vaihtoehtoiskustannus jokaista metsään varastoitua ylimääräistä C tonnia kohti (yhteensä +70000 tC lisää) verrattuna nykyisten metsänhoitosuositusten mukaiseen ainespuuntuotantoon ja sen käyttöön.

Nykyisistä harvennussuosituksista poikkeaminen edellä esitetyllä tavalla (esim. kohottamalla harvennuksen pohjapinta-alan ylä- ja alarajaa 30 %:lla, BT(30,30)) lisäsi sekä metsän keskimääräistä hiilivarastoa (+ 25000 tC) että hakkuupoistumaa verrattuna nykyisten metsänhoitosuositusten mukaisiin hakkuisiin (BT(0,0), eli hiilen lisävarastointi ei aiheuttanut lisäkustannuksia. Mikään edellä esitetyistä metsänkäsittelyvaihtoehdoista ei välttämättä ole vielä optimiratkaisu ko. metsäaluetason metsänhoidon kannalta, vaan todennäköisesti harvennuspoistumaa olisi ollut jopa mahdollista lisätä ja kiertoaikaa lyhentää nyt esitettyjen vaihtoehtojen lisäksi. Samaa käsittelyohjelmaa sovellettiin myös koko metsäalueelle, kun taas optimiratkaisua haettaessa tulisi eri metsiköille soveltaa erilaisia käsittelyohjelmia. Edellä esitetty esimerkki osoitti kuitenkin, että ainespuun tuottaminen ja hiilen varastoiminen eivät välttämättä ole toisiaan täysin poissulkevia metsänkäyttövaihtoehtoja. Järkevä tasapaino näiden kahden tavoitteen välissä lienee saavutettavissa, jos puuston kasvu onnistutaan pitämään suhteellisen suurena samalla kun pidetään myös puuston määrä nykyisiä harvennussuosituksia suuremmalla tasolla. Metsäaluetasolla tämä tarkoittaa mm. sitä, että puuston ikäluokkajakauman tulisi olla likimain normaali (em. laskelmissa se oli nuoriin metsiin painottunut). Laskelma osoittaa myös, että metsänhoidon sopeuttaminen metsän kasvunopeuteen on avainasemassa linjattaessa metsän käyttöä muuttuvaan ilmastoon sopivaksi.

Metsänhoidon sopeuttaminen muuttuvaan ilmastoon

Luvussa 3 esitetyt laskentaesimerkit osoittavat, että metsänhoidon vaikutus metsän kasvuun ja kehitykseen on sidoksissa vallitsevaan ilmastoon. Tämän vuoksi metsänhoito on suhteutettava sekä ilmastoon että eri puulajien kykyyn sopeutua kohoavaan ilman hiilidioksidipitoisuuteen ja lämpötilaan. Metsänhoidolla ei voida estää väistämättä tapahtuvia muutoksia, mutta metsänhoidon avulla voidaan auttaa metsiä mukautumaan niihin. Mukautuva (adaptiivinen) metsänhoito luo mahdolli-



Kuva 8. Metsäalueelta sadan vuoden aikana korjatun ainespuun ja siitä valmistettujen tuotteiden nykyarvo (2 % korko) sekä samanaikaisesti metsään ja puutuotteisiin varastoituneen hiilen kokonaismäärä (lähde: SilviStrat-projekti, ks. Kellomäki ja Leinonen 2005).

suuksia hyödyntää ilmastonmuutoksen tarjoamia mahdollisuuksia, mutta toisaalta se myös mahdollistaa varautumisen ilmastonmuutokseen liittyviin riskeihin (kuten abioottiset ja bioottiset riskit).

Metsikkötason sisäinen ja populaatioiden välinen geneettinen muuntelu auttaa sopeuttamaan eri puulajeja muuttuviin olosuhteisiin, mikä näyttäisi puoltavan luontaisia menetelmiä metsän uudistamisessa. Myös metsänviljelyssä puiden perinnöllisen vaihtelun säilyttäminen on tärkeää, jos kohta metsäpuut ovat sopeutuneet laajaan ilmastolliseen vaihteluun, kuten puiden siirtokokeet osoittavat. Ilmastonmuutos näyttäisi siis tarjoavan jopa mahdollisuuden viljellä puiden eteläisiä ekotyyppejä nykyistä pohjoisempana. Toisaalta lyhyttä päivää edustavat eteläiset alkuperät eivät kuitenkaan välttämättä sopeudu pohjoisen yöttömiin öihin, mikä rajoittaa eteläisten alkuperien ja/tai uusien puulajien käyttöä meillä metsänviljelyssä.

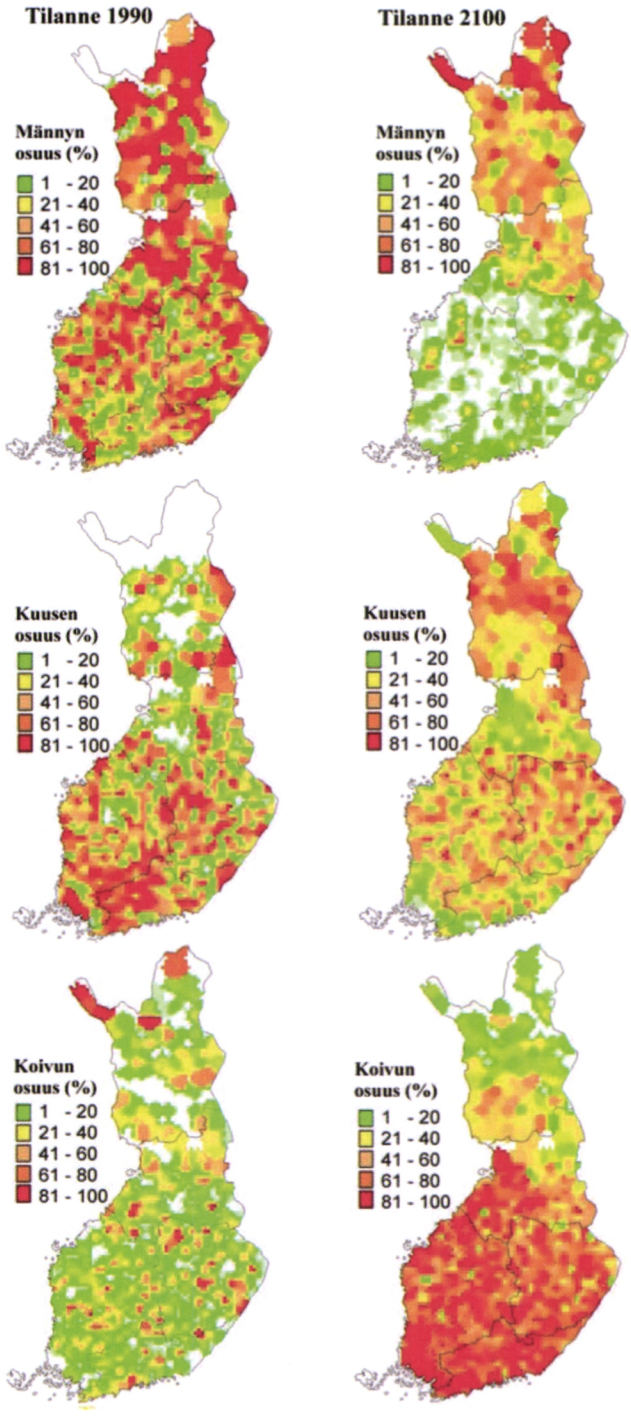
Metsän uudistamisessa tehtävät valinnat vaikuttavat metsien fysiologiseen ja geneettiseen kykyyn kestää poikkeuksellisia sääoloja. Metsien vastustuskykyä erilaisia tuholaisia vastaan voidaan parantaa suosimalla sekapuustoja mm. metsän uudistamisessa ja taimikonhoidossa (mutta myös kasvatushakkuissa). Ilmastonmuutoksen myötä lehtipuiden osuuden oletetaan lisääntyvän voimakkaasti erityisesti Etelä-Suomessa, ellei puulajisuhteita ohjata haluttuun suuntaan metsänhoidollisin keinoin (kuva 9). Tulevaisuudessa taimikonhoidon ja harvennushakkuiden merkitys puulajisuhteiden säätelyssä korostuu, mikäli halutaan edelleen pitää havupuuvaltaiset metsiköt havupuuvaltaisina. Myös Pohjois-Suomessa lehtipuiden oletetaan valtaavan alaa, mutta männyn ja kuusen oletetaan silti menestyvän siellä lehtipuita paremmin. Tulevaisuudessa Suomessa metsäluonto voi muuttua voimakkaasti eri puulajien keskinäisen kilpailukyvyn sekä puuston kasvu- ja uudistumisnopeuksien muuttuessa.

Kaiken kaikkiaan ilmastonmuutoksesta hyötyvien puulajien suosiminen vähentää metsänhoidon riskejä. Toisaalta puuston kasvun lisääntyessä myös kiertoaikoja voidaan lyhentää sekä harvennuksia aikaistaa ja niiden toistuvuutta ja/tai voimakkuutta lisätä. Tässä suhteessa metsien lisääntyvä tuotospotentiaali tarjoaa monia mahdollisuuksia arvioida uudelleen metsänhoidon käytäntöjä. Kaiken kaikkiaan ilmastonmuutos on metsätaloudellinen mahdollisuus, johon liittyvää epävarmuutta voidaan vähentää tarkoituksenmukaisella metsien hoidolla (infotaulu 2).

Lopuksi

Ilmaston lämpenemisen oletetaan lisäävän Suomessa puuston kasvua ja tuotosta puulajista riippumatta. Suurimmat kasvun lisäykset on odotettavissa Pohjois-Suomessa, jossa nykyään lämpötila rajoittaa puuston kasvua Etelä-Suomea enemmän. Samalla myös metsien luontaisen uudistamisen edellytykset paranevat varsinkin Pohjois-Suomessa, jossa luontainen uudistaminen on tällä hetkellä ongelmallista harvoin toistuvien hyvien siemensatovuosien vuoksi. Ilmaston lämpenemisen oletetaan parantavan myös taimettumista metsän uudistamistavasta riippumatta. Toisaalta myös pintakasvillisuuden ja lehtipuiden kasvu paranee, mikä vaikuttaa erityisesti havupuutaimikoiden kehitykseen. Täten maanmuokkauksen ja taimikonhoidon merkitys korostuu. Taimikonhoidossa puulajisuhteita ohjaamalla voidaan kuitenkin haluttaessa pitää havupuuvaltaiset taimikot edelleen havupuuvaltaisina.

Puuston kasvun lisääntyminen tuo haasteita myös metsien hoitoon (harvennukset) ja käyttöön. Tämä voi edellyttää nykyisten metsänhoidon käytäntöjen muuttamista, jotta lisääntynyt puuston kasvu ja tuotos saadaan hyödynnettyä. Esimerkiksi harvennuksia voitaneen tehdä aiempaa aikaisemmin ja useammin ja/tai voimakkaampina. Myös kiertoaikoja on mahdollista lyhentää ainakin jos metsien uudistamiskriteerit säilyvät nykyisten metsänhoitosuositusten mukaisina. Lisäksi joudutaan pohtimaan myös nykyisistä metsänhoidon suosituksista poikkeavia harvennuskäytäntöjä. Tämä tulee kysymykseen eritoten, mikäli metsien merkitys hiilen sitojana korostuu yhtenä puuntuotannon kanssa kilpailevana tavoitteena. Lisäksi tulevaisuudessa tulee metsänhoidossa kyetä varautumaan mahdollisesti lisääntyviin abioottisiin ja bi-



Kuva 9. Ilmastonmuutoksen vaikutus metsien puulajisuhteisiin (% runkotilavuudesta). Tilanne vuonna 1990 on laskettu valtakunnan metsien inventoinnin pysyvien koealojen perustella ja vastaava tilanne vuonna 2100 Sima-mallin (lähde: Kellomäki, julkaisematon aineisto) avulla samoilla koealoilla. Laskelmissa on oletettu vuotuisen keskilämpötilan kohoavan 4 °C, ja sadannan vastaavasti 15 %, vuoteen 2100 mennessä (ilman hiilidioksidin kohoamisen vaikutusta ei otettu huomioon laskelmissa). Laskelmissa metsien hoidossa ja hakkuissa oli tavoitteena suurin mahdollinen kestävä hakkuupoistuma. Lisäksi harvennushakkuissa noudatettiin nykyisiä hoitosuosituksia ja uudistushakkuut tehtiin avohakkuuna (istutettiin samaa puulajia, joka kasvoi siellä ennen hakkuuta, mutta alalle saattoi kuitenkin syntyä luontaisesti myös muiden puulajien taimia). Tämä suosi koivujen yleistymistä erityisesti viljavilla kasvupaikoilla, joilla männyn kilpailukyky suhteessa koivuun (ja kuuseen) oli heikko.

Infotaulu 2. Metsänhoidollisia sopeutumiskeinoja ilmastonmuutokseen (Kellomäki 1996).

Metsänuudistaminen

Puulajivalinta: eteläiset ja mereiset alkuperät menestyvät nykyistä paremmin mutta myös paikalliset alkuperät joustavat; lehtipuut hyötyvät Etelä-Suomessa ilmastonmuutoksesta enemmän kuin havupuut, Pohjois-Suomessa mänty ja kuusi ovat tuottoisimpia, mutta myös lehtipuiden tuottavuus kasvaa; puulaji- ja alkuperävalinnassa on säilytettävä laaja geneettinen vaihtelu.

Kylvö: siementen itäminen ja taimien ensikehitys paranevat, lisääntyvä haihdunta voi olla riski; maan käsittelyä tarvitaan itämisen ja taimien ensikehityksen parantamiseksi ja pintakasvillisuuden haittojen vähentämiseksi.

Istutus: taimien eloonjäänti lisääntyy ja taimien ensikehitys paranee; maankäsittelyä tarvitaan taimituhojen vähentämiseksi ja pintakasvillisuuden haittojen vähentämiseksi.

Luontainen uudistaminen: mahdollisuudet paranevat kaikkialla Suomessa; maanmuokkausta tarvitaan siementen itämisen ja taimien ensikehityksen parantamiseksi; luontaiset taimet edustavat laajaa geneettistä vaihtelua, luontainen uudistaminen on laajassa mitassa käyttökelpoinen menetelmä sopeuttaa metsien geneettinen rakenne muuttuviin olosuhteisiin.

Taimikonhoito

Pintakasvillisuuden torjunta: heinien ja ruohojen osuus kasvaa pintakasvillisuudessa, pintakasvillisuus rehevöityy muutoinkin ja lisää torjunnan tarvetta; maankäsittely mekaanisesti ja kulottaen vähentävät pintakasvillisuuden kilpailua sekä parantavat taimien kasvua ja kehitystä.

Perkaus: havupuutaimikoiden kasvatuksessa perkaustarve lisääntyy lehtipuiden yleistyessä ja lehtipuiden kilpailukyvyn parantuessa; lehtipuiden suosiminen ja niiden kasvavan tuottokyvyn hyväksikäyttö vähentävät perkaustarvetta; lehtipuusekoitteisten metsien kasvatusmahdollisuudet paranevat.

Harvennus: tarvittaessa taimikoita voidaan kasvattaa nykyistä tiheämpinä, sillä kasvutekijöiden saatavuus paranee; männyn laatukasvatukseen tarvitaan tiheitä taimikoita, laadusta huolehtiminen tulee entistä tärkeämmäksi nopeutuvan kasvun seurauksena.

Metsänkasvatus

Ilman CO_2-pitoisuuden lisääntyminen sekä lämpötilan ja sadannan muutos ja epäpuhtauksina tulevat typpiyhdisteet nopeuttavat kasvua ja lyhentävät puiden elinkaarta; kiertoaikoja voidaan lyhentää sekä harvennuskertoja ja/tai voimakkuutta lisätä; kiertoaikojen ja kasvatushakkuiden sopeuttaminen metsän nopeutuvaan kehitykseen vähentää metsätuhojen riskiä ja tehostaa kasvavan tuottavuuden hyväksikäyttöä; puunkorjuu voi vaikeutua routakauden lyhentyessä.

Metsänsuojelu

Äkillisten katastrofien (myrskytuhot, lumituhot, metsäpalot, pakkasvauriot) seurauksena metsissä voi esiintyä kroonisia biologisia tuhoja; eteläiset tuholaiset työntyvät pohjoista kohti ja uusia tuholaisia voi levitä Suomeen; raakapuuntuontia tulisi rajoittaa alueilta joilla esiintyy potentiaalisia tuholaisia; puulaji- ja alkuperävalinta sekä säännöllinen harventaminen ja kiertoaikojen lyhentäminen vähentävät metsätuhojen riskiä; metsien hygieniasta huolehtiminen tulee yhä tärkeämmäksi.

Metsämaanhoito

Lannoitus: ilman epäpuhtauksina tulevat typpiyhdisteet lisäävät metsien kasvua mutta voivat aiheuttaa ravinteiden epätasapainoa ja maan happamoitumista; metsämaan hoitamiseksi voidaan tarvita tasapainottavaa lannoitusta ja kulotusta; lehtipuiden suosiminen vähentää maan kunnostustarvetta ja nopeuttaa ravinnekiertoa; tasapainoinen ravinteisuus vähentää metsätuhoja.

Maankäsittely: maanmuokkauksen tarve ravinnekierron nopeuttamiseksi vähenee; maan lämpöolot voivat parantua riittävästi ilman maanmuokkaustakin.

Metsäojitus: ojituksen (kunnostusojituksen) merkitys voi lisääntyä jos sadanta lisääntyy voimakkaasti, toisaalta haihdunnan lisääntyminen ja puiden kasvun nopeutuminen voivat vähentää ojituksen tarvetta.

oottisiin riskeihin. Metsänhoitoon tulisi löytää sellaisia käytäntöjä, jotka lisäävät samanaikaisesti sekä puuston kasvua ja tuotosta että myös metsiin sitoutuneen hiilen määrää (maaperä ja puusto) pitkällä aikavälillä, mutta toisaalta vähentävät myös metsiin kohdistuvia abioottisia ja bioottisia riskejä.

Kirjallisuus

Carter, T., Bärlund, I., Fronzek, S., Kankaanpää, S., Kaivo-oja, J., Luukkanen, J., Wilenius, M., Tuomenvirta, H., Jylhä, K., Kahma, K., Johansson, M., Boman, H., Launiainen, J., Laurila, T., Lindfors, V., Tuovinen, J.-P., Aurela, M., Syri, S., Forsius, M. & Karvosenoja, N. 2002. The FINSKEN global change scenarios. Julkaisussa: Käyhkö, J. & Talve, L. (toim.) Understanding the global system, The Finnish perspective. Painosalama. Turku. (http://figare.utu.fi/UGS/index.html.). 232 s.

Henttonen, H., Kanninen, M., Nygrén, M. & Ojansuu, R. 1986. The maturation of Scots pine seeds in relation to temperature climate in northern Finland. Scandinavian Journal of Forest Research 1: 243–249.

Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Salminen, H., Siipilehto, J. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Finnish Forest Research Institute. Research Papers 835: 1-116.

Hyvän metsänhoidon suositukset. 2001. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. 95 s.

Kellomäki, S. (toim.). 1996. Metsät. Teoksessa: Kuusisto, E., Kauppi, L. Heikinheimo, P. (toim.) Ilmastonmuutos ja Suomi. Yliopistopaino. s. 73–106.

Kellomäki, S. & Väisänen, H. 1997. Modelling the dynamics of the boreal forest ecosystems for climate change studies in the boreal conditions. Ecological Modelling 97: 121-140.

Kellomäki, S., Väisänen, H. & Kolström, T. 1997a. Model computations on the effect of elevating temperature and atmospheric CO_2 on the regeneration of Scots pine at the timber line in Finland. Climate Change 37: 683-708.

Kellomäki, S., Karjalainen, T. & Väisänen, H. 1997b. More timber from boreal forests under changing climate? Forest Ecology and Management 94: 195-208.

Kellomäki, S. & Leinonen, S. (toim.), 2005. Management of European forests under changing climatic conditions. University of Joensuu, Faculty of Forestry. Research Notes 163. 427 p.

Koski, V. & Tallqvist, R. 1978. Tuloksia monivuotisista kukinnan ja siemensadon määrän mittauksista metsäpuilla. Summary: results of long-time measurement of quantity of flowering and seed crop of forest trees. Folia Forestalia 364: 1-60.

Matala, J., Hynynen, J., Miina, J., Ojansuu, R., Peltola, H., Sievänen, R., Väisänen, H., & Kellomäki, S. 2003. Comparison of a physiological model and a statistical model for prediction of growth and yield in boreal forests. Ecological Modelling 161: 95–116.

Nygrén, M. 1990. Seed production response to climate. Blesco Workshop. Helsinki, December 12-14, 1990. Moniste. 3 s.

Pukkala, T. 1986. Kuusen ja männyn siemensadon ennustemalli. Abstract: A model for predicting the seed crop of *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. Silva Fennica 21: 135-144.

Suomen metsät ja puutuotteet ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden hallinnassa

Lauri Valsta, Johanna Pohjola, Jyri Mononen ja Kim Pingoud

Johdanto

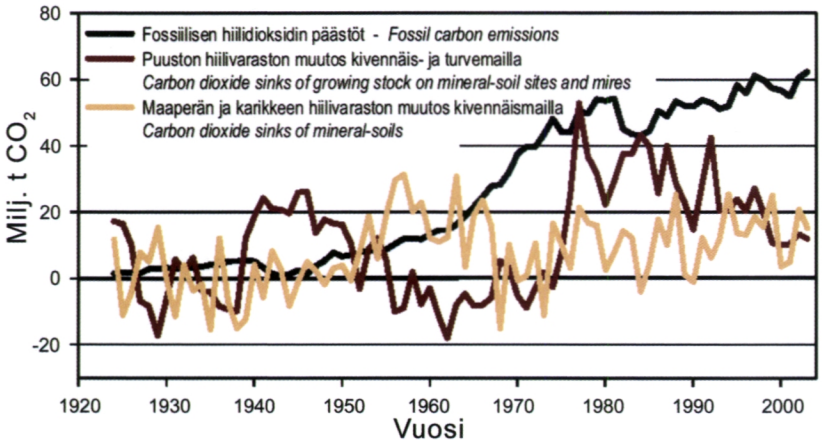
Suomen ennustetut kasvihuonekaasujen päästöylitykset kaudella 2008-2012 ovat n. 4 Tg hiiliekvivalenttina ilmaistuna (Kasvihuonekaasujen vähentämistarpeet… 2001). Päästökiintiö ao. kaudelle on 21 Tg vuodessa. Suomen kansantalouden tulisi siis sopeutua noin viidesosan nykyistä alhaisemmalle päästötasolle. Keinoina tähän ovat mm. energian säästö, bioenergian ja ydinvoiman käytön lisääminen ja päästökauppa.

Fossiilisten polttoaineiden käytöllä on Suomessa ns. hiilidioksidivero, jonka suuruus oli v. 2001 17 €/t CO_2 (Kasvihuonekaasujen vähentämistarpeet ... 2001). Runkopuun sisältämään hiileen suhteutettuna vero vastaa noin 12 €/m^3, mikä on huomattava summa ottaen huomioon vallitseva puun hintataso. Vertailuna voidaan pitää kantohintoja, jotka olivat vuoden 2005 alkupuoliskolla puutavaralajista riippuen 12-46 €/m^3, tai hintoja käyttöpaikalla, noin 30-57 €/m^3 (sisältäen korjuu- ja kaukokuljetuskustannukset) (Örn ja Väkevä 2005).

Vuonna 1992 solmittu kansainvälinen ilmastosopimus (United Nations Convention on Climate Change) ja sen puitteissa hyväksytty Kioton pöytäkirja tarjoavat ns. ensimmäisenä sopimuskautena vv. 2008-2012 vain rajoitetut mahdollisuudet lukea metsien hiilivarannon muutoksia päästökiintiöihin. Suomen puuston hiilivaranto on nykyisin n. 700 Tg ja sen muutos noin + 5 Tg vuodessa, toisin sanoen puuston kasvu on hakkuita ja luonnonpoistumaa suurempaa (Metsätilastollinen vuosikirja 2004). Lisäksi metsämaahan ja karikkeeseen kertyvän hiilen määrän on arvioitu olevan samaa suuruusluokkaa kuin puustoon kertyvän (kuva 1). Näin ollen Suomen metsiin on arvioitu kertyvän hiiltä enemmän kuin Suomen päästökiintiön ennustetut ylitykset vuosina 2008-2012, mutta tätä ei voida Kioton pöytäkirjan kriteerien mukaan laskea Suomen eduksi tällä ensimmäisellä sopimuskaudella. Pidemmän aikavälin tavoitteena Suomen metsäpolitiikassa voisi kuitenkin olla lisätä metsien hiilivarantoa ja puutuotteiden sekä energiapuun käyttöä.

Metsien ohella puuperäistä hiiltä on sitoutuneena puutuotteisiin noin 18 Tg, eniten sahatavarana ja puulevyinä (Pingoud ym. 2001 ja 2003). Edellisen muutoksen on arvioitu olevan noin + 0,4 Tg vuodessa, siis vajaa kymmenesosa metsiin kertyvän hiilen määrästä. Kaatopaikkoihin kertyy myös merkittäviä määriä hiiltä. Niiden varannon muutokseksi on arvioitu + 0,5 Tg vuodessa (Pingoud ym. 2003)

Kansantalouden näkökulmasta kannattaa etsiä kohteita, joissa päästökiintiön mukaiselle tasolle päästään minimikustannuksin. Periaatteessa voidaan vähentää päästöjä, ostaa päästöoikeuksia ja lisätä nieluja. Päästöjen vähentämisessä verotus on keskeinen politiikkatoimi. Sillä voidaan ohjata energian kokonaiskäyttöä sekä fossiilisten polttoaineiden osuutta. Osa verotuksen vaikuttavuudesta vaatii kuitenkin aikaa: esim. investoinnit bioenergian tuottamiseen ja käyttöön edellyttävät pitkäaikaista ja johdonmukaista energiapolitiikkaa.



Kuva 1. Puuston sekä maaperän ja karikkeen hiilivarastojen muutos 1900-2000 – luvuilla suhteessa fossiilisen hiilidioksidin päästöihin (Lähteet: Metsätilastollinen vuosikirja 2004; Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Eggers, T., Muukkonen, P. & Mäkipää, R., käsikirjoitus).

Maailmanlaajuisesti katsoen metsien biologinen merkitys maapallon hiilitaseelle on suuri. Houghtonin (2003) mukaan ilmakehään tulee hiiltä vuodessa fossiilisista polttoaineista n. 6,3 Pg ja metsien häviämisestä n. 2 Pg, yhteensä runsaat 8 Pg. Siitä sitoutuu maanpäälliseen kasvillisuuteen arviolta 3 Pg ja meriin 2,5 Pg. Ilmakehän hiilen määrä kasvaa siten n. 3 Pg vuodessa. Metsäalueiden hiilen kokonaismääräksi on arvioitu 1000-1200 Pg (House 2002), josta maanpäällisen kasvillisuuden osuus olisi n. 300-500 Pg. Vaikka ei voida ajatella metsien hiilinielua lisättävän koko 3 Pg:n määrällä, jolloin päästöt nollaantuisivat, voi metsien hiilinielun lisääntyminen kuitenkin merkittävästi auttaa päästöjen hallinnassa.

Puutuotteilla on kolme keskeistä merkitystä ilmastonmuutoksen hallinnassa. Puutuotteet ovat hiilidioksidin varasto (jona aikana hiili on poissa ilmakehästä), puutuotteiden energiakäyttö vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja siten päästöjä, ja puutuotteiden materiaalikäyttö vähentää välillisesti fossiilisien polttoaineiden päästöjä, kun puutuotteet korvaavat muita materiaaleja (esim. rakennusmateriaaleja), joiden valmistuksesta aiheutuu enemmän päästöjä.

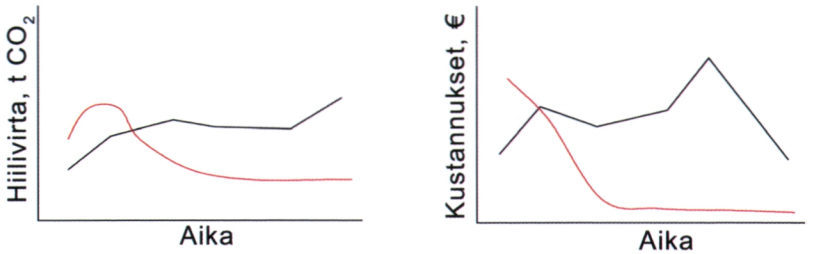
Puutuotteisiin kuten kaikkiin materiaaleihin sisältyy myös ns. sivuvirtoja: energian ja materiaalien virtoja, jotka eivät sisälly itse tuotteeseen, mutta jotka välttämättä aiheutuvat tuotteen käytöstä sen elinkaaren eri vaiheissa. Puun kohdalla näitä energian sivuvirtoja syntyy

- puun kasvatuksessa (metsänhoito- ja parannustyöt)
- puu korjuussa
- puun teollisessa prosessoinnissa
- puutuotteen loppukäytössä (esim. rakentaminen, rakennuksen ylläpito)
- käytön jälkeisessä prosessoinnissa jätteenä

Verrattaessa puutuotteita muihin materiaaleihin tulee tarkasteluun sisällyttää koko tuotteen elinkaari ja edellä mainitut energian sivuvirrat.

Metsän hiilinielujen arvottaminen

Metsät Suomessa ja globaalisti voisivat biologisesti katsottuna sisältää huomattavasti nykyistä enemmän hiiltä. Taloudellisen tarkastelun lähtökohtana on, että metsänomistajat käsittelevät metsiään omien tavoitteidensa kannalta parhaalla tavalla. Jos metsään sidotun hiilen määrää lisätään, poiketaan metsänomistajan muutoin valitsemasta, hänen kannaltaan edullisimmasta käsittelystä, jolloin syntyy kustannus. Metsien hoidon ja metsäpolitiikan kannalta on kiinnostavaa, millä tavoin metsien hiilen määrää voitaisiin lisätä kustannus-



Kuva 2. Kahden vaihtoehtoisen hypoteettisen hiilivirran nieluvaikutuksen ja kustannusten kuvaajat.

tehokkaasti. Tätä varten on laskettava sidotun hiilen yksikkökustannukset.

Yksikkökustannusten laskenta ei kuitenkaan ole yksinkertaista. Metsien hiilivarantoa lisäävät toimenpiteet kohdistuvat yleensä johonkin ajanjaksoon eivätkä vain yksittäiseen vuoteen. Vertailtavaksi tulee näin ollen kahden aikauran (kustannukset ja hiilivirta) suhde (kuva 2).

Yksikkökustannus on periaatteessa kustannukset jaettuna hiilivirran suuruudella. Kuvan 2 esimerkin mukaisia aikauria ei voi kuitenkaan matemaattisesti suoraan jakaa keskenään, vaan aikaurista on ensin laskettavat jotkin kaksi lukuarvoa. Tätä ongelmaa on tarkasteltu 'carbon accounting' -käsitteen avulla. Yksikkökustannusten laskemiseksi on tavallisimmin erotettu seuraavat kolme tapaa (Richards ja Stokes 2004):

- Virtaperiaate: Diskontataan kustannukset jonain ajanjaksona ja jaetaan ajanjakson positiivisten ja negatiivisten hiilivirtojen summalla
- Keskimääräisen varastonmuutoksen periaate: Diskontataan kustannukset jonain ajanjaksona ja jaetaan ajanjakson keskimääräisen hiilivaraston muutoksella
- Diskonttausmenetelmä: Diskontataan kustannukset jonain ajanjaksona ja jaetaan ajanjakson diskontattujen positiivisten ja negatiivisten hiilivirtojen summalla

Keskeisiä kysymyksiä nielujen arvioinnin kannalta ovat

- Miten verrata keskenään hiilivirtoja, jotka tapahtuvat 5 tai 50 vuoden kuluttua?
- Kuinka kauas tulevaisuuteen tulisi katsoa?

Virta- ja varastonmuutosperiaatteet eivät arvota hiilinieluja ajankohdan perusteella. Tämä johtaa helposti ongelmiin, sillä jos 20 vuoden päästä saatava nielu on yhtä arvokas kun 1 vuoden päästä saatava, onko väliä silläkään, saadaanko nielu 1 vai 100 tai 200 vuoden kuluttua? Diskonttausmenetelmä antaa nieluille aikapainotuksen, joka määräytyy diskonttokoron perusteella. Tällöin aiemmin tapahtuvilla nieluilla on suurempi arvo. Diskonttausmenetelmässä voidaan haluttaessa käyttää ikuisuuteen ulottuvaa aikahorisonttia. Virta- ja varastonmuutosperiaatteissa aikajakso pitää sen sijaan rajata, mikäli ei verrata ns. tasapainotiloja. Jotkut nieluprojektit ovatkin kestoltaan rajattuja, jolloin aikajakson rajallisuudesta ei aiheudu ongelmia.

Mallilaskelmia metsän hiilinielun kustannuksista

Menetelmä

Lähtökohtana laskelmissa on metsänomistaja, joka maksimoi diskontattuja nettotuloja ikuisella aikahorisontilla. Vaikka laskelma kohdistuu yksityistaloudelliseen päätöksentekoon, tuloksia voidaan soveltaa myös metsäpolitiikan suunnitteluun, sillä kilpailullisilla markkinoilla kantohinta vastaa resurssin kansantaloudellista arvoa.

Metsänomistajan päätöksenteko mallitetaan kahden hyödykkeen, puutavaran ja hiilen sidonnan, yhteistuotantona. Diskontatut nettotulot (π) saadaan kaavalla

$$\pi = \left[\sum_{t=0}^{T} (h_t - l_t - ec_t)(1+r)^{-t} - w + \sum_{t=0}^{T} cr_t (1+r)^{-t} \right] \frac{1}{1-(1+r)^{-T}}$$

jossa
h_t = puuston tienvarsiarvo hakkuusta vuonna t,
l_t = korjuukustannukset hakkuusta vuonna t,
ec_t = hakkuusta johtuva diskontattu päästökustannus vuonna t,
w = uudistamiskustannukset,
cr_t = hiilinielutulo puustoon sitoutuvasta hiilestä vuonna t.
Kaikki tekijät kaavassa on ilmaistu diskontattuna korolla r ja kiertoajalla T.

Mallissa lasketaan kantorahatulot tienvarsihinnan ja korjuukustannusten erotuksena. Tämä sen vuoksi, että korjuukustannusten ja sen kautta kantorahatulon riippuvuus hakattavan puuerän ominaisuuksista tulee otettua huomioon. Tässä esitettävissä laskelmissa on oletettu ilmastosopimuksen mukaisesti, että hiili vapautuu välittömästi hakkuiden yhteydessä eikä sitoutumista puutuotteisiin oteta huomioon. Hakkuusta johtuva diskontattu päästökustannus voidaan laskea myös puutavaralajikohtaisten elinkaaritietojen perusteella (Karjalainen ym. 1994), jolloin sahapuun kuitupuuta pidempi elinkaari otetaan huomioon diskonttauksessa.

Kun kaava sijoitetaan tavoitefunktioksi optimointimalliin, jossa ohjattavina muuttujina ovat metsikön käsittelypäätökset, voidaan määrittää optimaalinen metsänkäsittely annetulla hiilen arvolla, ja tutkia käsittelyn riippuvuutta hiilen hinnasta. Mallilla voidaan myös laskea, kuinka paljon metsänomistajan nettotulot muuttuvat annetulla hiilen hinnalla. Tätä mallia kutsutaan jäljempänä kompensaatiomalliksi, koska siinä metsänomistajalle kompensoidaan hiilen hinnan suuruisesti hiilen sitominen metsikköön ja hakkuutulojen lykkääntyminen. Malli vastaa edellä kuvattua diskonttausmenettelyä.

Mallista voidaan muodostaa toinen versio, kun hiilitulojen ja -menojen sijasta asetetaan rajoite biomassan määrälle, jonka metsikön tulee keskimäärin sisältää kiertoajan kuluessa (Pohjola ym. 2004, Valsta ym. 2004). Tämä määrä vastaa normaalimetsän tilanteessa metsäalueen keskimääräistä biomassan määrää. Nostamalla rajoitetta saadaan vaihtoehtoja, jossa metsäalueen sisältämä hiilen määrä kasvaa ja samalla metsänomistajan nettonykyarvot laskevat, kun lähtökohtana oli nettonykyarvoja maksimoiva, vapaa optimikäsittely. Malli vastaa edellä kuvattua varastonmuutosmenettelyä.

Seuraavassa esitettävät tulokset perustuvat metsikkökohtaiseen laskentaan käyttäen SMA-optimointiohjelman (**S**tandard **M**anagement **A**ssistant; Valsta ja Linkosalo 1996) hiilitaloudella täydennettyä versiota. Laskennassa käytettiin ns. MELA-malleihin pohjautuvia puiden kasvumalleja (Hynynen 1996).

Laskelmia tehtiin kahdenlaisilla aineistoilla. Koko kiertoaikaa koskevat analyysit pohjautuivat 10 männikön ja 7 kuusikon aineistoon Etelä- ja Keski-Suomesta. Lisäksi tehtiin laskelmia metsikön eri ikävaiheista alkaen 4 männiköllä Etelä- ja Keski-Suomesta. Puuston alkutilanne simulointiin

Taulukko 1. Hiilitalouden vaikutus metsänkasvatuksen kannattavuuteen.

	Hiilen hinta 0 €/t CO_2	Hiilen hinta 10 €/t CO_2	Muutos €/ha	Muutos %
Nykyarvo yht.	916	1700	784	86
Puuntuotannon nykyarvo	916	838	-78	-8,5
Hiilinykyarvo		862	862	

eri ikävaiheisiin Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion metsänhoitosuositusten mukaisesti.

Kompensaatiomalli

Metsänomistajalle maksettavan hiilinielukorvauksen vaikutusta taloudellisesti kannattavimpaan metsänkäsittelyyn tutkittiin käyttämällä hiilidioksidin hintana 0, 10 ja 20 €/ton CO_2. Puutavaran ja hiilen sidonnan yhteistuotanto paransi metsänhoidon kannattavuutta (nykyarvo) selkeästi (taulukko 1). Puuntuotannon nykyarvo pieneni esim. 10 € hiilidioksidin hinnalla 8,5 %, mutta hiilensidonnan nykyarvo muodostui yhtä suureksi kuin puuntuotannon nykyarvo, joten nettotulojen nykyarvo lähes kaksinkertaistui. Tätä edesauttaa se, että hiilitulot syntyvät valtaosin kiertoajan alkupuolella ja niiden taloudellinen nykyarvo diskontattuna on suuri. On huomattava, että hiilinielukorvaus kohdistui koko sidotun hiilen määrään eikä vain lisäykseen peruskäsittelyyn verrattuna.

Taulukko 2. Puuntuotos eri hiilidioksidin hintatasoilla puutavaralajeittain 10 männikön keskiarvona.

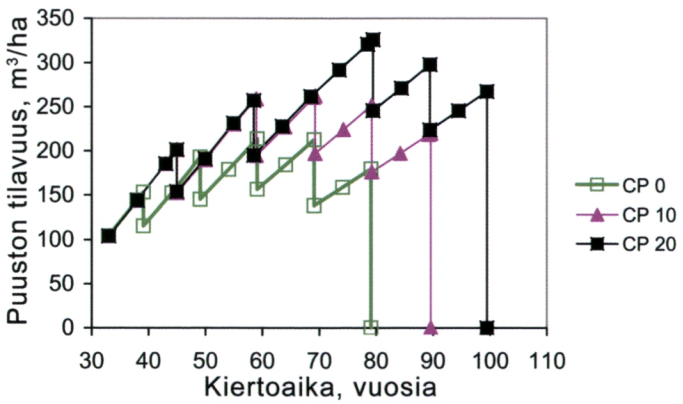
Hiilidioksidin hinta, €/t CO_2	0	10	20
Puuntarjonta, m^3/ha/v			
Tukkipuu	3.6	4.0	4.2
Kuitupuu	1.9	1.7	1.5
Kokonaistuotos	5.6	5.8	5.8
%-muutos verrattuna vaihtoehtoon 0			
Tukkipuu		11.0	17.3
Kuitupuu		-8.6	-19.6
Kokonaistuotos		5.2	4.7

Männikön harvennukset ja päätehakkuut muuttuivat siten, että puustopääomatasoa nostettiin harvennuksia myöhentämällä ja toisinaan lieventämällä ja kiertoaikaa pidennettiin (kuva 3). Samalla metsikön keskimääräinen hiilivaranto kiertoajan aikana nousi selvästi.

Metsäpolitiikan ja metsävarojen hyödyntämisen kannalta on mielenkiintoista, miten edellä kuvattu muutos vaikuttaisi metsien keskikasvuun ja sitä

Taulukko 3. Hiilikompensaation vaikutus metsänkäsittelyyn 10 männikön keskiarvona.

Hiilidioksidin hinta, €/t CO_2	0	10	20
Kiertoaika, v	79	88	100
Keskitilavuus, m^3/ha	116	148	178
Hiilen määrä, t CO_2/ha	150	192	230



Kuva 3. Hiilidioksidin hinnan vaikutus edullisimpaan metsänkäsittelyyn kiertoajan kuluessa VT-männikössä (CP = Hiilen hinta €/tonni CO_2).

Puutuotteiden merkitys

Puutuotteilla on merkitystä ensinnäkin hiilivarastoina, jolloin varaston lisääntyminen toimii hiilen nieluna. Nielut ovat kuitenkin luonteeltaan kertaluonteisia, kyllästyvät ja voivat muuttua joissain tapauksissa myöhemmin hiilen lähteiksi.

Puutuotteiden toinen, ehkä tärkeämpi merkitys hiilidiksiditaseen hallinnassa on niiden käyttö energiaintensiivisempien materiaalien tai fossiilisten polttoaineiden korvaajina. Tälläinen vaikutus on periaatteessa kestävä: saadaan pysyvä vuosittainen päästövähennys, vaikka puuperäisen hiilen varastot eivät samalla kasvaisikaan. Kaikkein suurin hyöty puutuotteista saadaan yhdistämällä ensin käyttö materiaalina ja sitten puun poltto energiaksi.

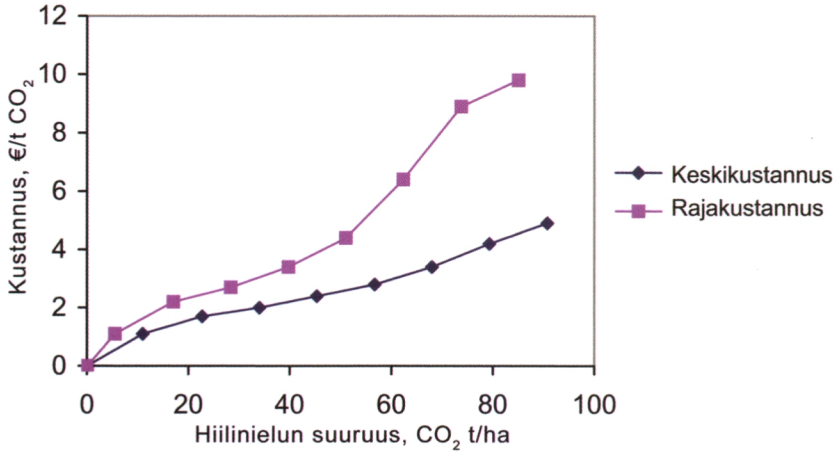
Puutuotteiden hiilivaraston on arvioitu olevan kasvussa Suomessa. Valtaosa hiilivarastosta on rakennuksissa. Vuodesta 1995 vuoteen 2000 talokannan hiilivarasto lisääntyi n. 0,18 Tg vuodessa ja sahatavaran varasto muualla n. 0,22 Tg vuodessa (kuva 7, Pingoud ym. 2001 ja 2003).

Puulla on myös huomattava merkitys bioenergian lähteenä. Puuperäisen energiakäytön suuruus on n. 4 Tg C vuodessa, mistä suurin osa tapahtuu metsäteollisuuden valmistusprosessien yhteydessä (Pingoud ja Lehtilä 1997). Varsinaisen bioenergian käyttöä on arvioitu voitavan lisätä kaksinkertaiseksi n. 1 Tg:lla hiiltä vuodessa.

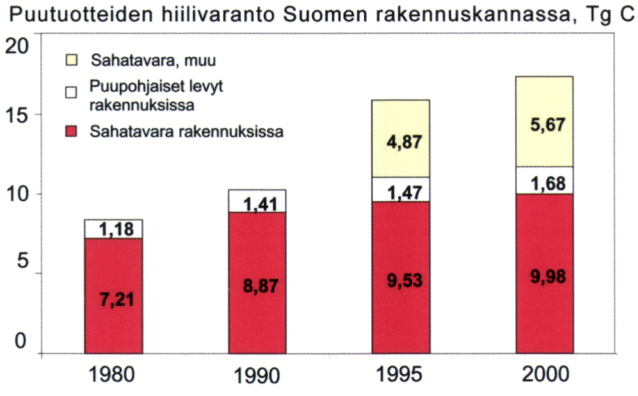
Puutuotteiden substituutiovaikutus on periaatteessa huomattavan suuri. Lähtökohtana tällaisissa tutkimuksissa on verrata puutuotetta toiseen materiaaliin, jolla on sama funktio ja joka siis voisi korvata puuta. Esimerkiksi puupolttoaineen elinkaaren kasvihuonekaasuvaikutuksia pitää verrata fossiiliseen polttoaineen vastaaviin vaikutuksiin tai puutalon rakentamisen kasvihuonekaasuvaikutuksia betonitaloon. Tällöin tarkastellaan samassa käyttötarkoituksessa saatavaa suhteellista päästövähennystä absoluuttisen vähennyksen sijasta.

Taulukko 6. Hiilinielun kustannukset eri ikävaiheiden männiköissä.

Puuston ikä	€/lisätty tonni CO_2	Nielulisäyksen aikajakso, v.	Nielunopeus, t CO_2 $ha^{-1}y^{-1}$
Paljas maa	2,0	86	0,26
24-36 v.	3,2	53	0,43
50 v.	3,3	31	0,72
70 v.	11,6	12	1,9



Kuva 6. Hiilinielun (kiertoajan keskimääräinen puuston biomassa) keski- ja rajakustannukset esimerkkimännikössä (varastonmuutosmalli).



Kuva 7. Hiilen määrät puutuotteissa rakennussektorilla.

Tapaustutkimusten mukaan puun käytöstä saatava vähennys fossiilisten polttoaineiden kulutukseen voi olla saman suuruinen tai jopa suurempi kuin puutuotteiden energiasisältö (Gustavsson ym. 2005). Näin ollen puun käyttö ei aiheuttaisi ollenkaan päästöjä vaan päin vastoin päästöjen vähenemän. Jos puunkäyttö rakentamiseen olisi Suomessa vähäistä, kuten Keski-Euroopassa, voidaan näiden laskelmien perusteella arvioida, että kasvihuonekaasupäästöt olisivat Suomessa useita miljoonia hiilidioksiditonneja suuremmat.

Yhteenveto

Metsillä on huomattava merkitys hiilen kierrossa ja siten ilmakehän hiilidioksidipitoisuus riippuu merkittävästi metsien hoidosta. Metsien käytöllä vaikutetaan niiden hiilivarantoon. Myös puutuotteiden käyttö on otettava laskelmissa huomioon, sillä puun käyttö vähentää hiilidioksidipäästöjä korvaamalla sekä fossiilista energiaa että enemmän päästöjä aiheuttavia vaihtoehtoisia materiaaleja.

Tällä hetkellä metsien hiilinielu Suomessa on suurempi kuin päästökiintiön ylitys, mutta Kioton pöytäkirjan ensimmäisellä sopimuskaudella tätä hiilinielua ei voida laskea Suomen hyväksi päinvastoin kuin puutuotteiden käytöstä aiheutuvaa fossiilisten päästöjen vähenemää. Metsien hiilinielua on mahdollista lisätä Suomessa. Hakkuulaskelmaskenaarioden mukaan hiilinielu olisi lievässä kasvussa ainakin seuraavien 20 vuoden aikana (Sievänen 2000). Metsä- ja ilmastopolitiikan kannalta keskeinen tavoite on lisätä sekä hiilinieluja että puun käyttöä siten, että hiilidioksidipäästöt vähenevät. Mallilaskelmien perusteella vaikuttaa, että molempia on mahdollista lisätä samanaikaisesti, eli saavutettaisiin ns. 'win-win –tulos'. Samalla metsäsektorin on kuitenkin huolehdittava metsien monimuotoisuuden ylläpitämisestä ja alueellisen sosiaalisen kestävyyden tarpeista.

Lähteet

Gustavsson, L., Sathre, R. & Pingoud, K. 2005. Carbon dioxide balance of wood substitution: comparing concrete- and wood-framed buildings. IEA Bioenergy T38. 6 s.

Houghton, R. A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000. Tellus 55B, 378–390.

House, J.I., Prentice, I.C. & Le Quere, C. 2002. Maximum impact of future reforestation or deforestation on atmoshpheric CO_2. Global Change Biology 8: 1047-1052.

Hynynen, J. 1996. Puuston kehityksen ennustaminen MELA-järjestelmässä. Julkaisussa: Hynynen, J. & Ojansuu, R. (toim.). Puuston kehityksen ennustaminen - MELA ja vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla 1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612: 21-38.

Karjalainen, T., Kellomäki, S. & Pussinen, A. 1994. Role of wood-based products in absorbing atmospheric carbon. Silva Fennica 28: 67-80.

Kasvihuonekaasujen vähentämistarpeet ja –mahdollisuudet Suomessa. Kansallisen ilmastostrategian taustaselvitys. 2001. Kauppa- ja teollisuusministeriön julkaisuja 4/2001. Edita, Helsinki. 169 s.

Liski, J., Lehtonen, A., Palosuo, T., Peltoniemi, M., Eggers, T., Muukkonen, P. & Mäkipää, R. Carbon balance of the Finnish forests 1922-2002 estimated based on forest inventory data. Käsikirjoitus.

Metsätilastollinen vuosikirja 2004. Metsäntutkimuslaitos.

Pingoud K. & Lehtilä, A. 1997. Role of forest sector and bioenergy in limiting the carbon emissions of Finland. Biomass and Bioenergy 13: 413-420.

Pingoud, K., Perälä, A.-L. & Pussinen, A. 2001. Carbon dynamics in wood products. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change Vol. 6: 91-111.

Pingoud, K., Perälä, A.-L., Soimakallio, S. & Pussinen, A. 2003: Greenhouse gas impacts of harvested wood products. Evaluation and development of methods. VTT Research Notes 2189, 138 p.

Pohjola, J., Valsta, L. & Mononen, J. 2004. Costs of carbon sequestration in Scots pine stands in Finland. Scandinavian forest economics 40:81-90.

Richards, K. R. & Stokes, C. 2004. A review of forest carbon sequestration cost studies: a dozen years of research. Climatic Change 63:1-48.

Sievänen, R. 2000. Kansallisen ilmasto-ohjelman metsätoimialan taustaselvitys. Metsäntutkimuslaitos. 32 s.

Valsta, L. & Linkosalo, T. 1996. Stand Management Assistant (SMA): Työväline metsikön käsittelyohjeiden määrittämiseen. In: Hynynen, J. ja Ojansuu, R. (toim.). Puuston kehityksen ennustaminen - MELA ja vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla 5.11.1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612:85-106.

Valsta, L., Mononen, J. & Pohjola, J. 2004. Economics of carbon sequestration with special reference to Finnish private forests. Proceedings: FORCOM2004 conference, 17-22.10.2004, Utsunomiya, Japan. 17 p.

Örn, J. & Väkevä, J. 2005. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2004. Metsätehon katsaus 4/2005. 4 s.

Boreaalisen vyöhykkeen puiden talvehtiminen lämpenevässä ilmastossa

Heikki Hänninen

Johdanto

Boreaalisen vyöhykkeen kasvit kasvavat ilmastossa, jota luennehtii ilman lämpötilan suuri vuodenaikaisvaihtelu. Äärimmäisessä tapauksessa Siperiassa lämpötila voi olla yli +30 °C kesällä ja alle –70 °C talvella, joten ilman lämpötilan vaihtelu vuodenaikojen välillä voi olla jopa yli sata astetta. Pintakasvillisuus talvehtii suojaavan lumipeitteen alla, joten se ei altistu talven äärimmäisen koville pakkasille. Toisin on laita metsäpuiden kohdalla, joiden maan yläpuoliset kasvusolukot altistuvat talvehtiessaan kaikille sään vaihteluille. Puiden poikkeuksellisen suuri sopeutumiskyky perustuu niiden vuosittaiseen kehityssykliin ja sen tapahtumien synkronoimiseen ilmastollisen vuosisyklin kanssa. Puut ovat kesällä aktiivissa kasvutilassa, johon väistämättä liittyy hyvin vähäinen pakkaskestävyys. Talvella puut kestävät erittäin kovia pakkasia, kokeellisesti on havaittu monien havupuulajien kestävän talvella jopa nestemäisen typen lämpötilaa (-196 °C). Tällaiseen kestävyyteen liittyy oleellisesti syvä talvihorros, jonka vallitessa puissa ei tapahtu kasvuprosesseja vaikka lämpötila nousisikin lyhyeksi ajaksi kasvulle suotuisiin lukemiin.

Vuoden keskilämpötilan ennustetaan nousevan boreaalisessa vyöhykkeessä lähivuosikymmenien aikana useilla asteilla, ja lämpenemisen ennustetaan olevan talvella voimakkaampaa kuin kesällä. Näiden ennusteiden toteutuminen merkitsee puiden talviaikaisen pakkasstressin vähenemistä, jolloin ilmaston lämpeneminen saattaisi tätäkin kautta edesauttaa boreaalisen vyöhykkeen puiden kasvua. Tätä taustaa vasten tuntuu yllättävältä, että ilmaston lämpenemisen on ennustettu myös lisäävän puiden pakkasvaurioita, ja äärimmäisessä tapauksessa jopa estävän nykyisten puulajien esiintymisen boreaalisessa vyöhykkeessä. Tässä kirjoituksessa tarkastellaan tätä 1980-luvun puolivälissä esitettyä hypoteesiä lähemmin. Kuinka tutkijat päätyivät aikoinaan hypoteesiin, kuinka hypoteesiä on testattu ja miltä boreaalisten puiden tulevaisuus näyttää viimeisimmän hypoteesiä koskevan tutkimuksen valossa?

Puiden vuosirytmin säätyminen

Vakiintuneen käsityksen mukaan ilman lämpötila ja päivänpituus ovat tärkeimmät puiden vuosisyklin tapahtumien ajoittumista (eli puiden vuosirytmiä) säätelevät tekijät. Tarkkaanottaen päivänpituuden sijasta fysiologisesti vaikuttava tekijä on yönpituus, eli vuorokauden yhtäjaksoisen pimeän jakson pituus. Tähän käsitykseen on päädytty kokeissa, joissa pimeä jakso on keskeytetty lyhytaikaisella, joitakin minuutteja kestävällä valokäsittelyllä. Jos esimerkiksi puut altistetaan vuorokauden aikana 12 tunnin ajaksi valolle ja 12 tunnin ajaksi pimeälle siten, että pimeän jakson puolivälissä valot ovat päällä joidenkin minuuttien ajan, niin puut aistivat tällaisen käsittelyn 18 tunnin päiväksi ja 6 tunnin yöksi. Tässä kirjoitukses-

sa puhutaan täsmällisyyden vuoksi yönpituuden vaikutuksesta, vaikka näitä ilmöitä käsiteltäessä kirjallisuudessa käytetään varsin usein tutumpaa käsitettä päivänpituus.

Yönpituuden kasvu loppukesällä on keskeinen puiden kasvun päättymiseen ja talveentumisen alkamiseen vaikuttava tekijä. Puhutaan ns. kriittisestä yönpituudesta, jonka saavuttaminen aiheuttaa näiden kehitystapahtumien alkamisen. Kriittinen yönpituus on saman lajin pohjoisilla alkuperillä lyhyempi kuin eteläisillä alkuperillä. Tämä on varsin ymmärrettävää kun muistetaan, että ennen syyspäivän tasausta yö on tietyllä päivämäärällä pohjoisessa lyhyempi kuin etelässä. Vaikka talveentuminen siis alkaisi samana päivänä pohjoisessa ja etelässä, niin se alkaisi pohjoisessa lyhyemmällä yönpituudella kuin etelässä. Aikaisempi talventulo pohjoisessa lisää luonnollisesti eri puualkuperien välisten kriittisten yönpituuksien eroja vielä tätä, puhtaasti maantieteellisistä syistä aiheutuvaa eroa suuremmaksi.

Yönpituus ei ole ainoa kasvun päättymiseen ja talveentumisen alkamiseen vaikuttava tekijä. Viimeksi kuluneen parinkymmenen vuoden aikana erityisesti suomalaisissa tutkimuksissa on havaittu, että myös kasvukauden lämpöoloilla on merkitystä kasvun päättymiseen. Korkeat lämpötilat nopeuttavat kasvun päättymistä. Kriittinen yönpituus ei siis ole tämän mukaan vakio, vaan se on sitä pienempi mitä lämpimämpi edeltävä kasvukausi oli. Myös kuivuus ja ravinteiden saatavuus kasvupaikalla voivat vaikuttaa kasvun päättymiseen ja talveentumisen alkamiseen.

Kasvun päättymisen jälkeen matalat lämpötilat aiheuttavat puiden karaistumista, eli niiden pakkaskestävyyden lisääntymistä. "Matalat lämpötilat" tarkoittaa tässä sekä viileitä, lähellä +5 °C olevia lämpötiloja että myös nollan alapuolisia pakkaslämpötiloja. Toisaalta altistuminen viileille lämpötiloille aiheuttaa tässä vaiheessa puiden silmujen kasvukyvyn palautumisen, eli silmulevon purkautumisen. Kasvun päättymisen jälkeen silmut ovat fysiologisessa lepotilassa, jolloin niissä ei havaita kasvua, vaikka ulkoiset olosuhteet (erityisesti ilman lämpötila) olisivatkin kasvulle suotuisia. Joidenkin viikkojen mittainen altistuminen viileille lämpötiloille poistaa silmujen lepotilan, jolloin ne ovat valmiita lähtemään kasvuun ilman lämpötilan kohotessa uudelleen. Tähän ilmiöön viitataan käsitteellä *silmulevon purkautumisen kylmävaatimus*. Ilmiön fysiologista perustaa ei tunneta tarkkaan, mutta sen merkitys puiden sopeutumisen kannalta on ilmeinen. Silmulevon purkautumisen kylmävaatimus varmistaa puiden säilymisen lepotilassa syksyllä niin pitkään, että kasvuunlähtöä mahdollisesti aiheuttavia korkeita lämpötiloja ei enää esiinnny ennen seuraavaa kevättä. Kasvuunlähtö syksyllä olisi puiden kannalta tuhoisaa, koska sen seurauksena puut olisivat pakkaselle alttiissa kasvutilassa talven tullessa. Taimikokeiden mukaan silmulepo purkautuu myöhään syksyllä, yleensä loka-marraskuussa.

Silmulevon purkautumisen jälkeen riittävän pitkä altistus korkeille lämpötiloille saa aikaan puiden suveentumisen, eli pakkaskestävyyden vähenemisen, ja lopulta myös kasvuunlähdön. Vaadittava aika on sitä lyhyempi mitä korkeammalle lämpötila nousee. Tähän ilmiöön viitataan käsitteellä *kasvun alun lämpövaatimus*. Ilmiö lienee varsin tutttu muillekin kuin tutkijoille, siinä määrin ilmeinen lämpötilan nousun ja puiden ja muidenkin kasvien kasvuunlähdön yhteys keväällä on.

Pakkasvauriohypoteesin johtaminen

Edelläkuvatun puiden vuosirytmin säätymistä koskevan teorian pohjalta on laadittu matemaattisia simulointimalleja, joiden avulla voidaan ennustaa puiden sopetumista erilaisiin ilmastoihin. Tutkittaessa tällä tavoin teoreettisesti puiden sopeutumista lämpeneviin talviin saatiin yllättävä tulos: simulointien mukaan talvien lämpeneminen lisää boreaalisessa vyöhykkeessä merkittävästi puiden pakkasvaurioriskiä. Ääräimmäisten tulosten mukaan näytti jopa siltä, että nykyiset puulajimme joutuvat väistymään kokonaan ilmaston lämmetessä.

Lämpenevässä ilmastossa puiden silmulevon purkautumisen kylmävaatimus täyttyy simulointien mukaan joitakin viikkoja myöhemmin kuin

nykyisessä ilmastossa. Tämä vuosisyklin etenemisen hidastuminen kumoutuu kuitenkin silmulevon purkautumisen jälkeen tapahtuvan nopeutuneen kehityksen vuoksi. Simulointien mukaan puiden kevätkehitys käynnistyy lämpiminä talvina silmulevon purkautumisen jälkeen esiintyvien pitkien lauhojen jaksojen aikana, jolloin lämpötila saattaa nousta päivittäin jopa kymmeneen asteeseen. Puiden pakkaskestävyys purkautuu asteettain näiden lauhojen jaksojen aikana, ja mikäli lauha jakso on tarpeeksi pitkä ja lämmin, kasvu käynnistyy kasvun alun lämpövaatimuksen täytyttyä. Tällainen keskellä talvea tai hyvin aikaisin keväällä tapahtuva kasvuunlähtö on puiden kannalta vahingollista, ellei suorastaan tuhoisaa, koska lauhojen jaksojen jälkeen esiintyy hyvin usein kovia pakkasia. Tilannetta kuvaa joululaulusta tuttu säe "*no onkos tullut kesä nyt talven keskelle*". Tällainen ilmaston vuosisyklin muuttuminen on monien simulointitutkimusten mukaan erittäin vahingollista boreaalisen vyöhykkeen puille.

Pakkasvauriohypoteesin testaaminen

Pakkasvauriohypoteesin johtamisessa käytetyt mallit perustuvat vuosikymmenien mittaan tehtyihin laajoihin kokeellisiin tutkimuksiin. Suomessa tämän tutkimustradition aloitti Metsäntutkimuslaitoksella työskennellyt professori Risto Sarvas 1960-luvulla. Mallit saivat lisäksi vahvistusta tutkimuksissa, joissa niitä testattiin riippumattomilla, luonnonolosuhteissa kerätyillä aineistoilla. Tässä vaiheessa näytti siis siltä, että nämä pahoja pakkasvaurioita ennustavat mallit kuvaavat kohtuullisen hyvin puiden vuosirytmin säätymistä. Nämä huolestuttavat tutkimustulokset vaikuttivat osaltaan siihen, että Joensuun yliopiston Mekrijärven tutkimusasemalle perustettiin 1990-luvun alussa laajamittainen kenttäkoe, jossa mäntyjä kasvatetaan luontaisella kasvupaikallaan kohotetussa lämpötilassa (katso luku 7). Tutkittaessa mäntyjen pakkaskestävyyden kehitystä ja kasvuunlähtöä kohotetussa lämpötilassa havaittiin, että aikaisemmat simulointitutkimukset olivat mitä ilmeisemmin yliarvioineet puiden pakkasvaurioriskin kasvun lämpenevässä ilmastossa. Kohotetussa lämpötilassa kasvavat männyt talveentuivat kyllä myöhemmin ja suveentuivat aikaisemmin kuin luontaisessa lämpötilassa kasvavat kontrollimännyt, mutta ero oli paljon pienempi kuin mitä aikaisemmissa simulointitutkimuksissa oli ennustettu. Kohotetussa lämpötilassa kasvavat puut lähtivät kasvuun tyypillisesti huhtikuussa noin kuukautta kontrollipuita aikaisemmin, eivät siis keskellä talvea, kuten simulointitutkimuksissa ennustettiin. Keskellä talvea puiden pakkaskestävyydessä ei ollut eroja eri koeryhmien välillä.

Pakkasvauriohypoteesiä testattiin myös puiden alkuperäsiirtojen avulla. Näissä tutkimuksissa havaittiin, että Pohjois-Suomalaiset puualkuperät menestyvät hyvin Etelä-Suomalaisilla kasvupaikoilla. Siirrossa toteutui yhtä suuri tai suurempi ilmaston lämpeneminen kuin mitä ennustetaan tapahtuvan lähivuosikymmenien aikana puiden luontaisilla kasvupaikoilla Pohjois-Suomessa. Myös tämän havainnon katsottiin osaltaan kumoavan pakkasvauriohypoteesiä, vaikka toisaalta huomautettiin, että talvet eivät lämmenneet siirrossa sillä tavoin kuin ennustetaan tapahtuvan ilmastomuutoksen seurauksena Pohjois-Suomessa.

Vaara ei ole ohi

Viimeaikaisissa tutkimuksissa saadut hyvät uutiset eivät merkitse sitä, että hypoteesi puiden kasvaneesta pakkasvaurioriskistä voidaan hylätä lopullisesti. Hypoteesin virheellisyyteen viittaava havaintoaineisto on varsin pieni, minkä lisäksi viimeisimmät simuloititutkimukset osoittavat, että suhteellisen pienet erot puiden vuosirytmin ympäristövasteessa aiheuttavat varsin suuren eron simulointitutkimuksessa saatavaan ennusteeseen. Puiden tulevaisuudesta on mahdotonta sanoa mitään varmaa, mutta tällä hetkellä käytettävissä oleva tieto viittaa siihen, että pakkasvauriot tulevat kyllä lisääntymään jossain määrin, mutta hurjimpien ennusteiden mukaisia laajamittaisia pakkasvaurioista aiheutuvia massatuhoja tuskin tullaan näkemään, vaikka ilmasto lämpenisi merkittäväs-

tikin. Pienetkin vauriot voivat kuitenkin altistaa puut erilaisille seuraustuhoille, minkä vuoksi ne saattavat vaikuttaa olennaisesti puulajien väliseen kilpailuun ja eri puulajien menestymiseen. Pakkasvaurioille alttiimpia näyttävät olevan sellaiset puulajit, jotka aloittavat nykyisessäkin ilmastossa kasvunsa muita lajeja aikaisemmin. Näyttää myös siltä, että monilla lajeilla kukkiminen ja siementuotanto ovat suuremmassa vaarassa kuin puun kasvu ja hengissäsäilyminen.

Tähän mennessä kertyneet tutkimustulokset korostavat ennen muuta jatkotutkimusten tärkeyttä. Nykyisiin malleihin on kerätty suuri määrä puiden vuosirytmiä koskevaa tietoa, mutta kohotetussa lämpötilassa tehdyt kokeet osoittavat, että jotain ilmastomuutosten seurausten kannalta keskeistä malleista edelleen puuttuu. Lisätutkimuksia kaivataan erityisesti silmulevon purkautumisesta. Edelläkuvattu teoria, jonka mukaan silmulepo purkautuu myöhään syksyllä viileiden lämpötilojen vaikutuksesta, on testattu moneen otteeseen eri puulajien taimilla. Viimeaikaiset aikuisilla puilla tehtyt tutkimukset viittaavat kuitenkin siihen, että aikuisten puiden silmulepo purkautuu huomattavasti myöhemmin keväällä. Jatkotutkimuksissa on selvitettävä, pitääkö tämä hypoteesi paikkansa ja mitä muita tekijöitä viileäaltistuksen lisäksi mahdollisesti aikuisten puiden silmulevon purkautumiseen tarvitaan. Tässä riittää työsarkaa pitkäksi ajaksi, koska aikuisilla puilla tehtävä tutkimus on tunnetusti menetelmällisesti hyvin vaikeaa.

Entä muut metsäkasvit?

Tutkimuksessa ja myös käytännön metsänhoidossa on kiinnitetty parin viimeksi kuluneen vuosikymmenen aikana kasvavaa huomiota luonnon monimuotoisuuden säilyttämiseen. Toisaalta, kuten Kuopiossa syksyllä 2004 pidetty seminaarikin osaltaan osoittaa, ilmastomuutoksen vaikutuksia metsäpuihin ja metsäekosysteemin toimintaan on tutkittu varsin laajalti. On yllättävää huomata, että monimuotoisuustutkimus yhtäältä ja ilmastomuutostutkimus toisaalta eivät ole juuri kohdanneet toisiaan. Eri kasvilajien esiintymisen ilmastovaatimuksia kuvaavien mallien avulla on ennustettu, että Pohjois-Euroopassa noin puolet nykyisestä kasvilajistosta korvautuu uusilla lajeilla ilmaston lämmetessä lähimmän viidenkymmenen vuoden kuluessa. Käykö ilmaston lämmetessä todella näin, vai onko näissä tutkimuksissa käytetyissä malleissa samankaltaisia piileviä puutteita kuin mitä paljastui metsäpuiden talvehtimista kuvaavista malleista testattaessa niitä kokeellisesti? Tätä ei voida tietää, ellei mainittuja kasvistomalleja testata laajamittaisen koetoiminnan avulla. Tällainen koetoiminta on toistaiseksi niin vähäistä, että voisi luulla metsissämme viidenkymmenen vuoden päästä havaittavan monimuotoisuuden olevan tämän päivän ihmisille yhdentekevää. Tässäkin asiassa tarvittaisiin sitä kymmenien vuosien mittaista aikahorisonttia, jota käytännön metsäammattilaiset ovat metsiemme puuvaroja hoitaessaan perinteisesti soveltaneet.

Kirjallisuus

Häkkinen, R. 1999. Analysis of bud-development theories based on long-term phenological and air temperature time series: application to *Betula* sp. leaves. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 754. 59 s.

Hänninen, H. 1990. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. Acta Forestalia Fennica 213. 47 s.

Hänninen, H. 1991. Does climatic warming increase the risk of frost damage in northern trees? Plant, Cell and Environment 14: 449-454.

Hänninen, H. 1995. Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modelling of bud burst phenology. Canadian Journal of Botany 73: 183-199.

Hänninen, H. 1996. Effects of climatic warming on northern trees: testing the frost damage hypothesis with meteorological data from provenance transfer experiments. Scandinavian Journal of Forest Research 11: 17-25.

Hänninen, H., Leinonen, I., Repo, T. & Kellomäki, S. 1996. Overwintering and productivity of Scots pine in a changing climate. Silva Fennica 30: 229-237.

Hänninen, H., Beuker, E., Johnsen, Ø., Leinonen, I., Murray, M., Sheppard, L. & Skrøppa, T. 2001. Impacts of climate change on cold hardiness of conifers. Julkaisussa: Bigras, F.J. & Colombo, S.J. (toim.), Conifer Cold Hardiness. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. s. 305-333.

Kellomäki, S., Hänninen, H. & Kolström M. 1995. Computations on frost damage to Scots pine under climatic warming in boreal conditions. Ecological Applications 5: 42-52.

Koski, V. & Sievänen, R. 1985. Timing of growth cessation in relation to the variations in the growing season. Julkaisussa: Tigerstedt, P.M.A., Puttonen, P. & Koski, V. (toim.), Crop physiology of forest trees. Helsinki University Press, Helsinki. s. 167-193.

Leinonen, I. 1996. A simulation model for the annual frost hardiness and freeze damage of Scots pine. Annals of Botany 78: 687-693.

Leinonen, I. 1997. Frost hardiness and annual development of forest trees under changing climate. D.Sc. (Agr. and For.) thesis. Joensuun yliopiston Metsätieteellisen tiedekunnan julkaisuja 60. 42 s.

Linkosalo, T. 2000. Analyses of the spring phenology of boreal trees and its response to climate change. Helsingin yliopiston Metsäekologian tiedekunnan julkaisuja 22. 55 s.

Partanen, J. 2004. Regulation of growth onset and cessation in Norway spruce, Scots pine and silver birch. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 921. 39 s.

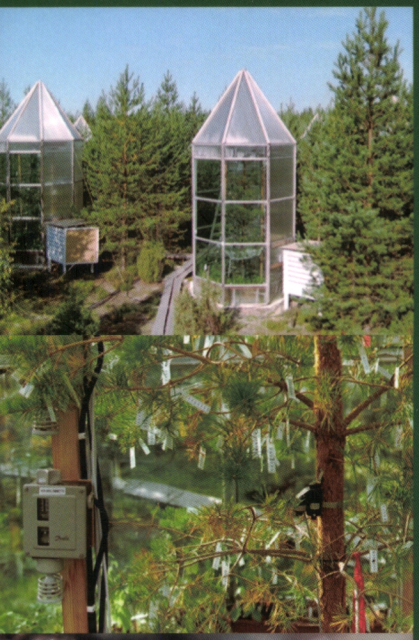
Repo, T. 1993. Impedance spectroscopy and temperature acclimation of forest trees. Joensuun yliopiston Metsätieteellisen tiedekunnan julkaisuja 9. 53 s.

Repo, T., Hänninen, H. & Kellomäki, S. 1996. The effects of long-term elevation of air temperature and CO_2 on the frost hardiness of Scots pine. Plant, Cell and Environment 19: 209-216.

Sarvas, R. 1972. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. Active period. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 76(3): 1-110.

Sarvas, R. 1974. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. II. Autumn dormancy and winter dormancy. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 84(1): 1-101.

ISSN 0358-4283
ISBN 951-40-1978-4



Ilmasto muuttuu –

mukautuvatko metsät