

Sari Siipola

Ilmastonmuutos ja lisääntynyt UV-säteily – mitkä ovat yhteisvaikutukset kasvillisuuteen?

Ilmastonmuutos

Yleistä ilmastonmuutoksesta

Hallitustenvälisen ilmastopaneelin (IPCC) uusimmassa raportissa todetaan, että maapallon keskilämpötila on kohonnut 0,74 astetta viimeisimmän sadan vuoden aikana. Tämän hetkisten skenaarioiden mukaan ilmasto tulee lämpenemään 1,1–6,4 astetta vuosien 1980–1999 keskilämpötilaan verrattuna vuoteen 2100 mennessä. Arktisilla alueilla lämpötilan nousun ennustetaan olevan vielä voimakkaampaa, jopa 4–7 astetta. Lämpenemisen syynä on todennäköisesti maapallon kasvihuoneilmiön voimistuminen, joka taas puolestaan on seurausta ihmistoiminnan aiheuttamasta maapallon ilmakehän kasvihuonekaasujen lisääntymisestä. Erityisesti lämpenemisen katsotaan johtuvan ilmakehän alati kohoavasta hiilidioksidipitoisuudesta, mikä ilmastonmuutoksen torjumisesta puhuttaessa tekee erilaisista hiilinieluista, kuten esimerkiksi metsistä, tärkeitä suojelun kohteita. Maapallon ilmastoon vaikuttavat monet muuttujat ja ilmastonmuutoksen vaikutuksia on mahdotonta ennustaa tarkasti. Vaikutukset tulevat todennäköisesti olemaan hyvin erilaisia eri puolilla maapalloa. Lisäksi ilmastonmuutoksella, lisääntyneellä UV-säteilyllä ja ilmansaasteilla, sekä monilla muilla tekijöillä on lukuisia yhteisvaikutuksia muun muassa kasvillisuuteen ja sitä kautta maaperään ja eliöyhteisöihin. Ilmastonmuutoksen voimakkuutta ja mahdollisia vaikutuksia globaalilla ja paikallisel-

la tasolla on yritetty ennustaa mallinnoilla, jotka perustuvat IPCC:n erilaisiin tulevaisuudennäkymiin muun muassa energiantuotannon, tavaroiden ja ihmisten liikkuvuuden sekä maankäytön muutoksista. Mallinnukset antavat jonkinlaista osviittaa siitä, missä rajoissa ilmastonmuutoksen vaikutukset tulevat näkymään. Muutosten nopeutta on kuitenkin mahdotonta ennustaa ja lukemattomat mallinnusten tuloksiin vaikuttavat muuttujat saavat aikaan sen, että tulokset varsinkin globaalilla tasolla ovat parhaimmillaankin suuntaa antavia (Räisänen 2007). Alueellisista ja tiettyihin kohteisiin suuntautuvista vaikutuksista tutkijoilla on sen sijaan tarkempi käsitys. Pyrin nyt kuvaamaan joitakin ilmastonmuutoksen mahdollisesti aiheuttamia muutoksia ja sitä, miten ne puolestaan muuttavat edelleen ilmastoa. Keskityn niihin muutoksiin, jotka tulevat todennäköisesti näkymään Suomen kasvillisuuden ja metsien tilassa ja siinä, miten voimme puuvarojamme käyttää.

Kasvillisuus

Ilmastonmuutoksen seurauksena vuoden keskilämpötila tulee siis kohoamaan ja näyttäisi siltä, että talvien lämpeneminen on voimakkaampaa kuin kesien. Lämpenemisen seurauksena maaperä tulee olemaan sulana kasvavan osan vuotta. On arvioitu, että kasvit pystyvät tulevaisuudessa aloittamaan kasvunsa aiemmin keväällä kun lämpötila nousee

ja valoakin on riittävästi. Lämpimät syksyt eivät luultavasti vaikuta kasvuun yhtä voimakkaasti juuri valon puutteen vuoksi. Voimakkaampaa kasvua ennakoii myös se, että ilman hiilidioksidipitoisuus kasvaa tasaisesti ja kasveilla tulee siis olemaan käytettävissään enemmän yhteyttämiseen tarvittavaa hiilidioksidia. Vaikuttaa tosin siltä, että kasvit tarvitsevat kasvunsa lisäämiseen myös enenevässä määrin maaperän tyypeä (Hyvönen ym. 2007). Tyyppien puuttuessa kasvit voivat mahdollisesti allokoida ylimääräisen hiilen niin sanottuihin sekundaarimetabolian tuotteisiin, joita kasveissa syntetisoidaan vasteena ulkoisille stressitekijöille. Voi myös olla, että ilmaston muuttuessa kasvu mukautuu vähitellen uusiin olosuhteisiin niin, että sen nopeutuminen jää odotettua pienemmäksi lisääntyneestä hiilidioksidista ja mahdollisesta tyypestä huolimatta. Sademäärät tulevat Suomessa todennäköisesti muuttumaan niin, että talvisin sataa nykyistä enemmän kun taas kesäisin esiintyvät kuivat jaksot saattavat tihentyä ja pidentyä. Kesäiset kuivat jaksot voivat alentaa kasvua ja heikentää kasvien vastustuskykyä muun muassa patogeenejä ja kasvituholaisia vastaan. Kasvi joutuu kuivissa olosuhteissa pitämään ilmarakojaan enemmän kiinni ja estämään näin veden haihtumista niiden kautta, mutta samalla se saa vähemmän yhteyttämislle tärkeää hiilidioksidia. Voi tietysti kysyä, onko kasvien ilman hiilidioksidipitoisuuden nousun myötä mahdollista tulevaisuudessa saada nykyistä vastaava määrä hiilidioksidia käytettäväkseen myös silloin kun niiden ilmaraot ovat vähemmän auki.

On muistettava, että vaikka metsien kasvu kiihtyisikin ilmastonmuutoksen seurauksena, myös tuulivahingot tulevat todennäköisesti kasvamaan, mikä tuo varmasti haasteita metsätaloudelle (Zeng ym. 2007). Lisäksi lämpimien talvien keskelle osuvat pakkasjaksot voivat aiheuttaa vaurioita puille, jos niiden dormanssi eli talvinen lepokausi on purkautunut kesken talven epätavallisen korkeiden lämpötilojen vuoksi (Hänninen 2006). Lämpenemisen myötä lukuisten eliölajien esiintymisalueen on havaittu leviävän pohjoisemmaksi. Tämä tarkoittaa myös sitä, että metsissämme havaitaan tulevaisuudessa luultavasti yhä enemmän erilaisia kasvituholaisia ja patogeenejä, joiden aiheuttamat tuhot voivat tutkijoiden mukaan osoittautua yllättävänkin suuriksi (mm. Ayres ja Lombardero 2000). Ilmaston lämmetessä kasvituholaiset pystyvät luultavasti myös

lisääntymään nykyistä tehokkaammin ja yhä suurempi osa niiden munista selviytyy elinkelpoisina lämpenevien talvien yli, mikä lisää huomattavasti tuholaisien räjähdysmäistä lisääntymistä ja niiden kesäisin aiheuttamia laajoja tuhoja. Ilman hiilidioksidipitoisuuden lisääntymisen myötä enemmän sekundaarimetabolian tuotteita sisältävät kasvit ovat ravinnollisesti heikompilaatuisia, ne muun muassa sulavat huonosti. Ravinnon laatua esimerkiksi kasveja syövät hyönteiset pyrkivät kompensoimaan sen määrällä, mikä saattaa tarkoittaa sitä, että lehtiä syövät tuhohyönteiset tekevät kasveille suurempaa vahinkoa. Monet sekundaarimetabolian tuotteet saattavat tosin myös vähentää herbivoriaa lukuisten vaikutusten kautta (Rousseaux ym. 2004). Ne myös lisäävät vastustuskykyä monia muita stressitekijöitä vastaan. Myös suoraan hyönteisiin kohdistuvat vaikutukset voivat näkyä melko pian kasveissa. Jos esimerkiksi kasvien pölyttäjien fenologiassa eli vuositaisessa elämänkierrössä tapahtuu lämpenemisen seurauksena suuria muutoksia niin, että pölyttäjien esiintyminen poikkeaa kasvien kukinnasta, voi se olla monille kasvilajeille hyvinkin kohtalokasta (Bale ym. 2002).

Muiden eliöiden lailla myös kasvit pystyvät ilmaston lämpenemisen seurauksena laajentamaan elinalueitaan yhä pohjoisemmaksi ja ylöspäin vuoristoissa. Suomeen tulee siis uusia kasvilajeja ja jo meillä olevat lajit leviävät pohjoiseen. Metsiemme osalta näyttää siltä, että puiden lajisuhteet voivat hyvinkin muuttua, mikäli muuttuvat olosuhteet suosivat lajien välisessä kilpailussa eri lajeja kuin nykyiset. Ennusteet antavat jossain määrin ristiriitaista tietoa siitä, mikä laji on mahdollisesti vallalla tulevaisuuden metsissämme. Yhden näkemyksen mukaan kuusi kärsii lisääntyneestä kuivuudesta ja sen esiintyminen vähenee suhteessa mäntyyn (Kellomäki ym. 2005). Taimien siirtokokeessa (Yrjönen 2007) taas havaittiin, ettei kuusi kärsinyt kuivuudesta mäntyä enemmän ja että molemmat lajit hyötyivät kasvun osalta kohonneesta lämpötilasta. Kun siirretään taimia pohjoisesta etelään ja näin simuloidaan ilmaston lämpenemistä, on kuitenkin muistettava, että monet tekijät, esimerkiksi valoisuusolosuhteet muuttuvat samalla. Näin ollen koe ei täysin vastaa todellista ilmaston lämpenemistä. On myös huomattu, että taimien kasvu paranee kun ne ovat sopeutuneet pidempään kasvukauteen. Toisaalta on myös

esitetty, että lehtipuut yleistyvät ja spekuloiu, että esimerkiksi tammi leviää Oulun korkeudelle. Arktisten alueiden kasvillisuuden kannalta eteläisimpien alueiden kasvilajien leviäminen on huolestuttava ilmiö, mikäli niiden elinympäristöön leviävät lajit osoittautuvat niitä itseään voimakkaammiksi kilpailijoiksi. Arktisten lajien on myöskään mahdotonta siirtyä enää kovin paljon pohjoisemmaksi, joten niiden ainoa mahdollisuus on sopeutua ympäristönsä hyvin nopeasti muuttuviin elinolosuhteisiin. Kaikki lajit eivät todennäköisesti tähän pysty ja tutkijat pelkäävätkin lukuisten arktisten lajien kuolevan sukupuuttoon ilmaston lämpenemisen seurauksena.

Maaperä

Kuten jo aiemmin todettiin, ilmaston lämpeneminen lyhentää kautta, jolloin maa on jäässä. Näin ollen myös maaperäeliöt voivat periaatteessa olla aktiivisia suuremman osan vuotta ja lämpenemisen myötä muun muassa karikkeen hajotustoiminta saattaa tehostua. Tehokkaampi hajotus voisi periaatteessa nostaa maaperän ravinnepitoisuutta ja lisätä muun muassa puiden kasvua. On arvioitu, että ravinteisuuden mahdollisesti noustessa puut voisivat suunnata kasvunsa enenevässä määrin varteen kun juurien biomassan ei saman ravinnemäärän saadaksesen tarvitsisi kasvaneessa ravinnepitoisuudessa olla yhtä suuri kuin nykyisin (Litton ym. 2007). Mietittäväksi jää, miten pienemmällä alalla olevat juuret pystyvät juurruttamaan kasvin kyllin tehokkaasti maahan jos tuulisuus ja myrskyt ennusteiden mukaisesti lisääntyvät.

Suomessa nimenomaan maaperä toimii tärkeänä hiilivarastona ja esimerkiksi metsissä siihen on sitoutunut hiilestä jopa kaksi kolmasosaa kun kasvillisuudessa hiiltä on vastaavasti vain lähes yksi kolmasosa. Lämpenemisestä ja maaperäeliöiden toiminnan kiihtymisestä voi seurata se, että maaperästä vapautuu eliöiden hengityksessä jonkin verran aiempaa enemmän hiilidioksidia (Karjalainen ym. 2003). Ilmiön ennustetaan olevan erityisen voimakas nykyistä lämpimämpinä syksyinä, jolloin maa pysyy sulana pitkään. Kasvien kasvuunsa sitoma hiili ei ilmeisesti pysty kompensoimaan tätä hiililähdettä, koska syksyisin kasvun kiihtyminen tulee ilmeisesti olemaan varsin vaatimatonta valon vähyyden vuoksi.

Maaperän tilassa tapahtuva muutos on erityisen suuri arktisilla ja varsinkin pysyvän roudan alueilla, missä nykyisissä olosuhteissa vain maaperän ohut pintaosa sulaa osaksi vuotta. Lämpenemisen aiheuttaman ikiroudan sulaminen aiheuttaa kyseisillä alueilla voimakkaita muutoksia muun muassa maaperän kosteusolosuhteisiin ja kasvillisuuteen. Mahdollinen sulava jää ja lisääntynyt sadanta voi joillakin alueilla lisätä soiden vesimäärää. Vaikka sademäärät kasvavatkin, saattaa kohonnut lämpötila lisätä soiden haihduntaa, minkä seurauksena veden pinta voi paikoittain laskea.

Ilmakehä

Ilmakehän koostumus on oleellinen kasvien yhteyttämisen ja kasvun kannalta ja kasvit puolestaan vaikuttavat ilmakehään tuottamalla hapen lisäksi erilaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Yhdisteitä on arveltu olevan yli 30 000 ja kasvit erittävät niitä hyvin moninaisissa tilanteissa, muun muassa biotitisessa ja abioottisessa stressissä (mm. Holopainen 2004). Niihin arvellaan kuuluvan jopa 10 % kasvien yhteyttämisen tuottamasta hiilestä. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat osa kasvien välistä vuorovaikutusta ja niistä muodostuu ilmakehässä muun muassa otsonia, sekä pienhiukkasia eli aerosoleja. Yhdisteiden muodostumisen arvellaan kasvavan ilmaston lämpenemisen myötä. Ilmakehään saapuvan auringonsäteilyn määrään aerosoleilla on kaksi merkittävää vaikutusta; toisaalta ne heijastavat takaisin osan auringon lämpöenergiasta ja vähentävät näin alailmakehään tulevan lämpösäteilyn määrää. Lisäksi ne toimivat tiivistymiskeskuksina pilville, jotka voivat omalta osaltaan vähentää maahan tulevaa lämpösäteilyä. Aerosolien arvellaan siis kaiken kaikkiaan voivan omalta osaltaan lieventää ilmaston lämpenemistä (Peñuelas ja Llusia 2003).

UV-säteily

Säteilyn lisääntyminen

Pääosin CFC-yhdisteiden käytön seurauksena yläilmakehämme otsonikerros on ohentunut ja sen myötä maahan tulevan haitallisen UV-säteilyn määrä on

lisääntynyt. Säteilyn määrä vaihtelee suuresti riippuen vuodenajoista ja leveyspiiristä. Sittenkin edellä mainittujen yhdisteiden käyttö on melko kattavasti kielletty Montrealin pöytäkirjassa, joka allekirjoitettiin 1987. Arvellaankin, että UV-säteily on tällä hetkellä lähellä maksimiaan ja otsonikerros miltei ohuimmillaan ennen kuin tilanne alkaa korjautua (WMO 2002, McKenzie ym. 2003). Prosessin arvellaan kuitenkin tapahtuvan hitaasti – 1980-luvun säteilymääriin ei todennäköisesti päästä ennen vuotta 2050–2060 – ja useat tekijät, mm. ilmastonmuutos, saattavat vaikuttaa sen kulkuun, mikä lisää tutkijoiden esittämien arvioiden epävarmuutta. UV-säteily on jaettu UV-A-, UV-B- ja UV-C-säteilyyn säteilyn aallonpituuden mukaan niin, että UV-A:n aallonpituus on 380–315 nm, UV-B:n 315–280 nm ja UV-C:n 280–100 nm.

Lisääntyneen säteilyn vaikutukset

UV-säteily ja erityisesti UV-B-säteily (kaikkein haitallisin, eli UV-C absorboidaan käytännössä kokonaan stratosfäärissä) on haitallista kaikille eliöille ja sen on todettu aiheuttavan lukuisia muutoksia kasveissa. Näitä ovat muun muassa: 1) Vaikutukset kasvuun ja sen myötä kasvien väliseen kilpailuun (Rousseaux ym. 2001) niin, että toiset kasvit ovat herkempiä UV-säteilylle, jolloin vähemmän herkät lajit saavat toleranssinsa ansiosta kilpailuedun ja voivat runsastua. 2) Kasvien kemiallisen koostumuksen muuttuminen, erityisesti erilaisten fenolisten yhdisteiden määrän kasvu (de la Rosa ym. 2001, Paul 2001). Fenolit toimivat kasveissa UV-altistuksen yhteydessä mm. antioksidanteina ja lehden pintakerroksessa eli epidermissä absorboimassa UV-säteilyä. 3) Vaikutukset kasvi-herbivori- ja kasvi-symbionti-vuorovaikutuksiin kasvien kemiallisen koostumuksen muuttumisen myötä (Caldwell ym. 2003). Kasveille tärkeä symbioosisuhde on esimerkiksi kasvin ja sienien symbioosi, mykoritsa, jossa sieni saa kasvilta sen yhteyttämällä tuotettuja sokereita ja vastaavasti sieni lisää kasvin juurien pinta-alaa sienirihmastollaan ja parantaa näin kasvin maasta ottamien ravinteiden saantia. Sienijuuri on kasveille hyvin tärkeä ja se on kehittynyt noin 85 prosentille kaikista kasveista. Vaikutukset symbioosin toimintaan ja herbivoriaan voivat olla hyvin moninaisia ja vaikuttaa

omalta osaltaan kasvien keskinäiseen kilpailuun. 4) Lisääntyneiden fenolien aiheuttamat muutokset karikkeen hajotukseen ja ravinteiden kiertoon ekosysteemeissä (Zepp ym. 2003) niin, että kasvin osien ja erityisesti lehtien sisältäessä enemmän fenoleita, ne saattavat olla vaikeammin hajotettavia, jolloin ravinteiden vapautuminen maaperään hidastuu. UV-säteily vaikuttaa siis kasvien ohella herbivoreihin ja maaperään ja niiden myötä sen vaikutukset yltävät hyvin laajalle ekosysteemeihin. Koska säteilyn aiheuttamat muutokset kohdistuvat esimerkiksi kasvien välisiin kilpailusuhteisiin ja ravintoverkkoon, joissa ne näkyvät ehkä vasta pitkänkin ajan kuluttua, on vaikutusten ymmärtämiseksi tarpeellista tehdä lyhyiden tutkimusjaksojen lisäksi myös pitkän aikavälin tutkimusta ja seuranta (Aphalo 2003).

Ilmastonmuutos ja otsonikato

Ilmastonmuutoksen vaikutukset stratosfääriin otsoniin

Ilmastonmuutoksen vaikutuksia stratosfääriin otsonin hajoamiseen tutkitaan yhä enenevässä määrin, mutta vaikutusmekanismit ovat monimutkaisia ja ne tunnetaan vielä varsin huonosti. Alailmakehän lämpenemisen katsotaan kuitenkin yleisesti pahentavan otsonikatoa. Syyksi arvellaan alailmakehän eli troposfääriin lämpenemisen seurauksena tapahtuvan yläilmakehän eli stratosfääriin kylmenemistä ja sen aiheuttamaa lisääntyvää niin sanottujen polaaripilvien muodostumista. Mitä kylmempää yläilmakehässä on, sitä voimakkaammin pilviä muodostuu. Lisäksi ilman kylmetessä ja painuessa alaspäin stratosfäärissä voi syntyä pyörteitä, joiden sisällä kylmä ilma pysyy ja jotka toimivat eräänlaisina reaktoreina polaaripilvien synnylle. Pilvet muodostavat aktiivisen pinnan, jolla voi tapahtua heterogeenisiä kemiallisia reaktioita eli reaktioita, joissa aineet reagoivat eri faasien rajapinnassa. Otsonikadon kannalta tärkeä ja epätoivottu reaktio on reaktio, jossa muodostuu Cl₂-molekyylejä. Kun aurinko alkaa keväällä lämmittää, nämä reaktion sisällä muodostuneet kloorimolekyylit hajoavat auringon valon vaikutuksesta klooriatomeiksi ja aloittavat otsonia tuhoavan syklin.

Ilmastonmuutoksen ja lisääntyneen UV-säteilyn yhteisvaikutukset

Kokeellisen tutkimuksen avulla on pyritty saamaan selville ilmastonmuutoksen ja lisääntyneen UV-säteilyn yhteisvaikutuksia, pääasiassa niin, että on tutkittu yhden ilmastonmuutoksen osa-alueen, esimerkiksi ilmakehän kohonneen hiilidioksidipitoisuuden vaikutusta koekasveihin yhdessä kohotetun UV-B-säteilyn kanssa. Tutkimuksissa on keskitytty UV-B-säteilyyn, koska sen katsotaan olevan biologisesti vaikuttavampaa kuin UV-A:n. Kahdella tai kolmella muuttujalla tehtävät kokeet kertovat tietenkin vain hyvin rajallisesti, millaisia vaikutuksia on syytä odottaa maailmanlaajuisesti. Laajempien, useita muuttujia sisältävien kokeiden kustannukset nousevat kuitenkin helposti hyvin korkeiksi. Myös kokeiden luotettavuus kärsii, jos niistä tulee turhan monimutkaisia. Tähän mennessä tehtyjen tutkimusten tuloksia tarkasteltaessa kokeiden rajallisuus on otettava huomioon ja pidettävä tuloksia lähinnä suuntaa antavana.

Ilman kohonnut hiilidioksidipitoisuus näyttäisi yleisesti ottaen stimuloivan kasvua ja lisääntyneen UV-B-säteily taas hidastavan sitä. Nykyistä tilannetta vastaavalla UV-säteilyn määrällä hiilidioksidin kasvua nopeuttava vaikutus näkyy selvästi kun taas säteilyn määrän lisääminen kaksinkertaiseksi ikään kuin mitätöi hiilidioksidin vaikutuksen. Kun kasveja altistetaan edellisten lisäksi lyhyiksi ajoiksi otsonille ja simuloidaan näin muun muassa kasvua alentavan alailmakehän otsonin vaikutusta, hiilidioksidin vaikutus häviää nimenomaan alhaisemmalla UV-säteilyn määrällä kun taas kohotetulla säteilyllä sen kasvua lisäävä vaikutus on havaittavissa (Hao ym. 2000). Jostain syystä otsoni yhdessä lisätyn UV-säteilyn kanssa näyttäisi tässä tapauksessa ikään kuin tehostavan hiilidioksidin kasvua edistävää vaikutusta. Kasvun ohella se, kuinka paljon herbivorit kasvia syövät, vaihtelee kohonneen hiilidioksidipitoisuuden ja lisääntyneen säteilyn myötä. Lavola ym. (1998) havaitsivat, että hyönteiset suosivat kasveja, jotka ovat kasvaneet altistuneena suuremmalle määrälle UV-B-säteilyä. Kyseisessä tutkimuksessa kohotettu hiilidioksidipitoisuus ja säteilymäärän lisääminen lisäsivät herbivoriaa entisestäänkin verrattuna pelkkään säteilymäärän lisäämiseen. Sitä vastoin toisessa tutkimuksessa lisääntynyt UV-B-säteily

lajista riippuen lisäsi tai vähensi herbivoriaa, eikä hiilidioksidipitoisuuden ja säteilyn määrän kasvulla ollut mitään havaittavia yhteisvaikutuksia (Gwynn-Jones ym. 1997).

Ilmastonmuutos tulee todennäköisesti muuttamaan sadannan määrää, niin että joillakin alueilla sataa tulevaisuudessa nykyistä enemmän kun toisilla alueilla taas kuivuus lisääntyy. Suomessa sateet ajoittuvat siis ilmeisesti talveen kun taas kesien kuivuusjaksot saattavat pidentyä. Tarkkoja ennusteita on kuitenkin mahdotonta tehdä. Kokeissa, joissa on tarkasteltu kuivuuden ja UV-B-säteilyn yhteisvaikutuksia muun muassa kasvien fotosynteesiin ja kasvuun on havaittu, että päällekkäiset stressitekijät voivat tässä tapauksessa lieventää haittavaikutuksia kokonaisuudessaan. Selvästi on huomattu esimerkiksi se, että kuivuudesta kärsivien kasvien lisääntyneeseen UV-B-säteilyyn liittyvät stressivasteet, muun muassa kasvun hidastuminen, ovat pienemmät kuin tarpeeksi vettä saavien kasvien. Maaperän typen määrän lisääminen yhdessä lisätyn UV-B-säteilyn kanssa taas aiheuttaa voimakkaampaa kasvun hidastumista kuin pelkkä säteilyn lisääminen ilman typpeä. Mikäli siis typpilaskeuma pysyy ennallaan tai lisääntyy ja jos maaperän typen määrä kasvaa myös nopeamman karikkeen hajotuksen seurauksena, voi kasvaneella typpipitoisuudella olla kasveihin haitallisia vaikutuksia yhdessä voimistuvan UV-säteilyn kanssa.

UV-säteilyn aiheuttamien DNA-vaurioiden korjaaminen on entsyymaattinen prosessi. Kukin entsyymi toimii parhaiten juuri sille itselleen optimaalisessa lämpötilassa, mutta yleisesti ottaen luonnonkasveilla lämpötilan nousu tarkoittaa tehokkaampaa entsyymitoimintaa ja siis nopeampaa vaurioiden korjaamista (Paulsson ja Björn 2002). Toisaalta vaurioiden korjaaminen hidastuu merkittävästi, jos lämpötila nousee liikaa. Lisääntynyt UV-B-säteily voi myös alentaa kasvien kylmäkestävyyttä kuten esimerkiksi kokeessa, jossa kasvit, joita ei altistettu voimakkaammalle säteilylle, kestivät vaurioitumatta jopa viisi astetta alemmaa lämpötilaa kuin säteilylle altistetut kasvit. Kun kasveja pidettiin lisätyn UV-B-säteilyn ohella myös kohotetussa hiilidioksidipitoisuudessa, kylmäherkkyys lisääntyi pelkkään säteilyyn verrattuna (Beerling ym. 2001). Kun tämän tiedon yhdistää arvioon, jonka mukaan lämpimien talvien keskelle osuvat satunnaiset pakkasjaksot voivat aiheuttaa vaurioita puille (Hänninen 2006),

on aihetta olettaa, että tietyissä olosuhteissa kasvien pakkasvauriot saattavat jatkossa jopa kasvaa lämpenemisestä huolimatta.

Muutama sana politiikasta

Sekä Suomessa, että maailmanlaajuisesti pyrki- myksenä on toisaalta hillitä ilmastonmuutoksen vaikutuksia ja toisaalta sopeutua niihin painopis- teen ollessa yhtä lailla kummallakin alueella. Il- mastonmuutustyöhön liittyy paljon kansainvälistä yhteistyötä ja poliittista päätöksentekoa. Yksi kei- no saada talkoisiin mukaan mahdollisimman pal- jon osapuolia, on käyttää niin sanottua pehmeää lainsäädäntöä eli ”soft law” -tyyppistä menettelyä, joka on tyyppillinen nimenomaan ympäristöasioihin liittyvissä kansainvälisissä sopimuksissa. Ideana on, että osapuolina oleville valtioille asetetaan sopimuk- sen puitteissa tavoitteita, joita sitten pyritään nou- dattamaan ja ainakin jossain määrin raportoimaan sopimuksen noudattamisesta. Ilmastonmuutoksen puitesopimuksessa ja siihen liittyvässä Kioton pöy- täkirjassa nämä tavoitteet liittyivät lähinnä maiden kasvihuonekaasupäästöihin. Jokainen maa tekee viime kädessä kuitenkin omat ratkaisunsa, eikä so- pimuksen rikkomisesta ole säädetty minkäänlaisia varsinaisia sanktioita. Näin on mahdollista saada ainakin jossain määrin mukaan hyvin paljon sel- laisia maita, jotka muutoin eivät lainkaan liittyisi mukaan ympäristönsuojelullisiin tavoitteisiin. Suur- piirteisempi linja myös auttaa saamaan läpi prosesseja, jotka saattaisivat muutoin jäädä toteutumatta. Hyvä esimerkki onnistuneesta kansainvälisestä so- pimuksista on aiemmin mainitsemani Montrealin pöytäkirja, johon kirjatut otsonikerrosta tuhoavien aineiden vähennysaikataulut ovat pitäneet. Pöytä- kirjan toimimisen syinä pidetään sen vaatimusten säännöllistä tarkastamista ja toimivaa rahoitusjär- jestelmää. Otsonikerroksen osalta ongelma on siinä, että sitä tuhoavat yhdisteet ovat pitkäikäisiä ja vaikuttavat näin ollen kauan sen jälkeen kun niitä ei enää vapaudu ilmakehään. Yhdisteet myös kohoavat yläilmakehään varsin hitaasti.

Maailmanlaajuisesti ja myös Suomea ajatellen il- mastonmuutokseen liittyvien toimenpiteiden piiriin kuuluu suunnaton määrä eri alueita politiikasta aina yksittäisten kansalaisten jokapäiväisiin päätöksiin.

Toimenpiteitä on käsitelty Suomen eduskunnan aloitteesta laaditussa sopeutumisstrategiassa, joka pohjautuu kansalliseen ilmastostrategiaan. Edel- leen osana sopeutumisstrategiaa toimii puolestaan kansallinen metsäohjelma, jossa pyritään mahdol- lisimman kattavasti käymään läpi metsänhoidossa tarvittavia sopeutumistoimenpiteitä ja antamaan esi- merkiksi metsänhoidon suosituksia. Toimenpiteet ja suositukset mainitaan strategiassa varsin yleisellä tasolla. Jo tässä käsittelemieni asioiden ohella siinä mainitaan tärkeinä seikkoina metsätalouden kilpai- luvyyn ylläpitäminen ja kehittäminen, metsien biodiversiteetin ja ympäristöarvojen vaaliminen, metsänhoidon tietotaidon ja sosiaalisen arvostuksen vahvistaminen, metsien virkistyskäytön lisääminen ja kestävä metsätalouden tuominen kansainväliseen politiikkaan. Jotta nämä hienot tavoitteet voisivat toteutua, on niiden tueksi laadittava konkreettisia toimenpiteitä, jotka ulottuvat kaikille metsiin liit- tyvän toiminnan sektoreille. Näin meidän on mah- dollista säilyttää metsämme arvokkaana uusiutuvana luonnonvarana, joka tarjoaa myös virkistysmahdol- lisuuksia ja toimii lukuisten metsistä riippuvaisten lajien elinympäristönä.

Kirjallisuus

- Aphalo, P. 2003. Do current levels of UV-B radiation affect vegetation? The importance of long term experiments. *New Phytologist* 160: 273–280. Commentary.
- Ayres, M.P. & Lombardero, M.J. 2000. Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *The science of the total environment* 262: 263–286.
- Berling, D.J., Terry, A.C., Mitchell, P.L., Callaghan, T.V., Gwynn-Jones, D. & Lee, J.A. 2001. Time to chill: Effects of simulated global change on leaf ice nucleation temperatures of subarctic vegetation. *American Journal of Botany* 88: 628–633.
- Caldwell, M.M., Ballaré, C.L., Bornman, J.F., Flint, S.D., Bjötn, L.O., Teramura, A.H., Kulandaivelu, D. & Tevini, M. 2003. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation and interactions with other climatic change factors. *Photochemical and Photobiological Sciences* 2: 29–38.
- de la Rosa, T.M., Julkunen-Tiitto, R., Lehto, T. & Aphalo,

- P.J. 2001. Secondary metabolites and nutrient concentrations in silver birch seedlings under five levels of daily UV-B exposure and two relative nutrient exposure rates. *New Phytologist* 150: 121–131.
- Gustavsson, L., Pingoud, K. & Sathre, R. 2006. Carbon dioxide balance of wood substitution: comparing concrete- and wood framed buildings. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 667–691.
- Gwynn-Jones, J., Lee, J.A. & Callaghan, T.V. 1997. Effects of enhanced UV-B radiation and elevated carbon dioxide concentrations on a sub-arctic forest heath ecosystem. *Plant Ecology* 128: 242–249.
- Hao, X., Hale, B.A., Ormrod, D.P. & Papadopoulos, A.P. 2000. Effects of pre-exposure to ultraviolet-B radiation on responses of tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. New Yorker) to ozone in ambient and elevated carbon dioxide. *Environmental Pollution* 110: 217–224.
- Heikkinen, J.E.P., Virtanen, T., Huttunen, J.T. ym. 2004. Carbon balance in East European tundra. *Global Biogeochemical Cycles* 18, GB1023, doi: 10.1029/2003Gb002054.
- Holopainen, J.K. 2004. Multiple functions of inducible plant volatiles. *Trends in Plant Science* 9(11): 529–533.
- Hyvönen, R., Ågren, G.I., Linder, S., Persson, T., Gotrufo, M.F., Ekblad, A., Freeman, M., Grelle, A., Janssens, J.A., Jarvis, P.G., Kellomäki, S., Lindroth, A., Lous-tau, D., Lundmark, T., Norby, R.J., Oren, R., Pilegaard K., Ryan, M.G., Sigurdsson, P.D., Ström-gren, M., van Oiden, M & Wallin, G. 2007. The likely impact of elevated CO₂, nitrogen deposition, increased temperature and management of carbon sequestration in temperate and boreal forest ecosystems: a literature review. *New Phytologist* 173: 463–480.
- Hänninen, H. 2006. Climate warming and the risk of frost damage to boreal forest trees: identification of critical ecophysiological traits. *Tree Physiology* 26: 889–898.
- Karjalainen, T., Pussinen, A., Liski, J. ym. 2003. Scenario analysis of the impacts of forest management and climate change on the European forest sector carbon budget. *Forest Policy and Economics* 5(2): 141–155.
- Kellomäki, S., Strandman, H., Nuutinen, T., Peltola, H., Korhonen, K.T. & Väisänen, H. 2005. Adaptation of forest ecosystems, forests and forestry to climate change. FINADAPT Working Paper 4, Finnish Environment Institute Mimeographs 334. 44 s.
- Lavola, A., Julkunen-Tiitto, R., Roininen, H. & Aphalo, P. 1998. Host-plant preference of an insect herbivore mediated by UV-B and CO₂ in relation to plant secondary metabolites. *Biochemical Systematics and Ecology* 26.
- Li, S., Paulsson, M. & Björn, O. 2002. Temperature-dependent formation and photorepair of DNA damage induced by UV-B radiation in suspension-cultured tobacco cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology* 66: 67–72.
- Litton, C.M. ym. 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13: 2089–2109, doi 10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x.
- McKenzie, R.L., Björn, L.O., Bais, A. & Ilyas, M. 2003. Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the earth's surface. *Photochemical and Photobiological Sciences* 2: 5–15.
- Paul, N.D. 2001. Plant responses to UV-B: time to look beyond the stratospheric ozone depletion? *New Phytologist* 150: 5–8.
- Pohjola, J. & Valsta, L. 2007. Carbon credits and management of Scots pine and Norway spruce stands in Finland. *Forest Policy and Economics* 9: 789–798.
- Peñuelas, J. & Llusia, J. 2003. BVOCs: plant defence against climate warming? *Trends in Plant Science* 8: 1360–1385.
- Rousseaux, M.C., Scopel, A.L., Searles, P.S., Caldwell, M.M., Sala, O.E. & Ballaré, C.L. 2001. Responses to solar ultraviolet-B radiation in a shrub-dominated natural ecosystem of Tierra del Fuego (southern Argentina). *Global Change Biology* 7: 467–478.
- Rousseaux, M.C., Julkunen-Tiitto, R., Searles, P.S., Scopel, A.L., Aphalo, P.J. & Ballaré, C.L. 2004. Solar UV-B radiation affects leaf quality and insect herbivory in the southern beech tree *Nothofagus antarctica*. *Oecologia* 138: 505–512.
- Räisänen, J. 2007. How reliable are climate models? *Tellus A* 59: 2–29.
- Sathre, R. & Gustavsson, L. 2006. Energy and carbon balances of wood cascade chains. *Resources, Conservation and Recycling* 47: 332–355.
- Strack, M. & Waddington, J.M. 2007. Response of peatland carbon dioxide and methane fluxes to a water table drawdown experiment. *Global Biogeochemical Cycles*, 21, GB1007. doi: 10.1029/2006GB002715.
- Turetsky, M.R., Wieder, R.K., Vitt, T.H., Evans, R.J. & Scott, K.D. 2007. The disappearance of relict permafrost in boreal north America: effects on peatland carbon storage and fluxes. *Global Change Biology* 13:

1922–1934.

- Valsta, L. 2007. Sequester or harvest – the optimal use of managed forests to mitigate climate change. University of Helsinki, Department of Forest Economy. Reports 46. 23 s.
- Wayne, R.P. 2000. Chemistry of atmospheres. Oxford University Press. s. 246–247.
- Wickland, K.P., Striegl, R.G., Neff, J.C. & Sachs, T. 2006. Effects of permafrost melting CO₂ and CH₄ exchange of a poorly drained black spruce lowland. Journal of Geophysical Research-Biogeosciences 111, G02011.
- WMO. 2002. Scientific assessment of ozone depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report 47. World Meteorological Organization.
- Yrjönen, J. 2007. What do provenance trials tell about tree adaptation to climate change? Master's thesis. Department of Forest Ecology, University of Helsinki.
- Zeng, H., Pukkala, T. & Peltola, H. 2007. The use of heuristic optimization in risk management of wind damage in forest planning. Forest ecology and management 241: 189–199.
- Zepp, R.G., Callaghan, T.V. & Erickson, D.J. 2003. Interactive effects of ozone depletion and climate change on biogeochemical cycles. Photochemical and Photobiological Sciences 2: 51–61.

■ LuK Sari Siipola, Haukilahdenkatu 6 B 16, 00550 Helsinki.
Sähköposti sari.siipola@helsinki.fi