

Oulun yliopisto, Biologian laitos

Ilmastonmuutoksen ja ympäristön vaikutukset kasveihin pohjoisella alueella

Luonnontieteiden kandidaatin tutkielma 750367A

Elisa Heilmann
22.7.2018

Sisällysluettelo

1. Johdanto	1
2. Ilmastonmuutos arktisella alueella.....	2
3. Hiilen kierto.....	5
4. Ilmaston lämpenemisen vaikutukset kasveihin	7
5. Talvilämpenemisen vaikutukset	10
6. Valoilmaston vaikutukset.....	13
7. Yhteenveto.....	17
Lähteet:.....	19

1. Johdanto

Ilmastonmuutosta on tapahtumassa kaikkialla maapallolla. On todettu, että sen vaikutukset ovat erityisen voimakkaita pohjoisella ja arktisella alueella, jonka vuoksi keskityn tässä kandidaatintyössä ilmastonmuutoksen ja lämpenemisen sekä muuttuvan ympäristön vaikutuksiin kasveissa juuri pohjoisilla alueilla. Ensimmäisenä perehdyn ilmastonmuutoksen yleisiin vaikutuksiin arktisella alueella, sekä alueen erityisominaisuuksiin muutokseen liittyen.

Seuraavaksi käsittelen hiilen kiertoa pohjoisella alueella ja siihen suuntautuvia muutoksia. Yli puolet maailman maanalaisista hiilivarannoista sijoittuu pohjoiselle alueelle, joten häiriöt ja muutokset pohjoisen hiilikierrossa vaikuttavat koko maapallolla mahdollisena hiilidioksidin määrän lisääntymisenä ilmakehässä. Käsittelen myös ilmaston lämpenemisen vaikutuksia kasveihin. Kasveilla on monia tapoja sopeutua muuttuviin ilmasto-oloihin, mutta käyn läpi myös niiden rajoitteita muun muassa pohjoisen suuntaan tapahtuviin populaatiosiirtymiin liittyen.

Kirjoitan myös talvilämpenemisen vaikutuksista kasviyhteisöihin. Kyseisellä ilmiöllä voi olla suuriakin vaikutuksia pohjoisten kasviyhteisöjen lajirikkauteen ja -koostumukseen, sillä monet pohjoiset kasvit ovat sopeutuneet lumen tuomaan eristeeseen kylmiä lämpötiloja vastaan talven aikana, ja nämä olosuhteet voivat olla muuttumassa. Lopuksi kirjoitan vielä pohjoisesta valoilmastosta sekä sen vaikutuksista liittyen kasvien odotettuun pohjoiseen muuttoliikkeeseen ilmaston lämmitessä. On todennäköistä, että muun muassa lämpötilan ja paikallisten kasviyhteisöjen lisäksi pohjoiseen levittäytymistä rajoittaa myös pohjoinen valon laatu sekä valon lisääntyvä määrä kasvukaudella, liikuttaessa korkeammille leveyspiireille.

On hyvin tärkeää ymmärtää ilmastonmuutoksen vaikutuksia pohjoisiin alueisiin, sillä muutokset arktisella alueella tulevat olemaan erityisen voimakkaita, ja vaikuttamaan maailmanlaajuisesti. Maailmanlaajuinen ilmastonmuutos etelämmillä alueilla puolestaan lisää lämpenemistä pohjoisessa, joka voi pahimmassa tilanteessa johtaa nopeutuvan lämpenemisen kierteeseen koko maapallolla. On siis olennaista tuntea syyt lämpenemiselle, ja niistä seuraavat vaikutukset.

2. Ilmastonmuutos arktisella alueella

On havaittu, että ilmakehän kohoavalla hiilidioksidipitoisuudella on yhteys yleisten lämpötilojen kohoamiseen maapallolla. Tätä voidaan mitata muun muassa selvittämällä menneiden aikakausien olosuhteita tekemällä kokeita muinaisella ydinjäällä, jota voidaan löytää muun muassa jäätiköiltä ja palsasoiden palsoista. Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden on havaittu kohonneen jopa 35% sitten teollisen vallankumouksen, ja suuren osan energiantuotannosta keskittyessä fossiilisiin polttoaineisiin, on odotettavissa, että pitoisuuden kohoaminen jatkuu. Tällä todistusaineistolla näyttäisi, että suurelta osin ihmisen aiheuttamat hiilidioksidi- ja muut kasvihuonepäästöt ovat johtamassa ilmaston lämpenemiseen (ACIA, 2004).

Ilmastonmuutoksen vaikutusten on todettu olevan erityisen voimakkaita arktisella alueella. Ilmakehä on huomattavasti ohuempi arktisilla alueilla verrattuna päiväntasaajaan, ja tämän johdosta se lämpenee nopeammin ja nopeuttaa siten myös maanpinnan läheisen ilmakerroksen lämpenemistä. Ylimääräinen energia puolestaan suuntautuu suurilta osin suoraan ilman lämmittämiseen, ei haihtumiseen, kuten lähempänä päiväntasaajaa. (ACIA, 2004)

Ilmaston lämpenemisen edetessä pohjoisen lumen ja jään peittämät alueet sulavat, ja paljastuva tummempi maa sitoo enemmän lämpöä itseensä. Jääpeitteen sulaessa taas veden kesäaikaan sitoma lämpö kulkeutuu helpommin ilmakehään talvella. Jääpeite vaikuttaa pohjoisilla alueilla moniin prosesseihin, joista mainittakoon pinnan heijastavuus, merenpinnan tasolla tapahtuva lämmön ja kosteuden vaihto ilman ja veden välillä, ilmakehän kosteus, pilvisuus sekä jopa merivirrat. Jääpeitteen ja jäätikköjen sulamisella on siis suoria vaikutuksia kaikkiin näihin tapahtumiin (ACIA, 2004).

Lämpenemisen seurauksia arktisella alueella ovat lisäksi muun muassa sademäärän nousu ja lyhyempien ja lämpimämpien talvien yleistyminen. Lämpenemisen johdosta vettä haihtuu yhä enemmän, mikä aiheuttaa myös sateiden lisääntymisen. Varsinkin talvisadannan oletetaan lisääntyvän huomattavasti lähes kaikilla mantereilla ja niiden osissa. Arktisilla alueilla sadannan kasvun uskotaan keskittyvän erityisesti rannikoille, ja näillä alueilla syys- ja talvisadanta voi kohota yli 30:llä prosentilla (IPCC, 2014).

Arktiset alueet huolehtivat myös maapallon lämmön säätelystä, sillä trooppisten alueiden sitoma lämpö kulkeutuu ilma- ja merivirtojen mukana kohti napa-alueita, joilla ilmakehä on ohuempi, ja lumen ja jään ansiosta suuri osa auringosta saadusta energiasta heijastuu takaisin avaruuteen. Ilman näitä ilma- ja merivirtoja trooppiset alueet kuumentuisivat huomattavasti, kun taas napa-alueet viilentyisivät merkittävästi. Jäätiköiden sulaminen ja sadannan kasvu ilmastonmuutoksen seurauksena, sekä näistä seuraava merenpinnan nouseminen, voi vaikuttaa näihin virtauksiin, ja siten koko maapallon lämmönsäätelyyn (ACIA, 2004).

Myös syvämeri varastoi itseensä hiilidioksidia merivirtausten ja suolatasapainon virtausten ansiosta. Merivirtauksia syntyy muun muassa lämpötilan vaihteluiden mukaan 4°C lämpöisen veden ollessa painavinta ja pyrkiessä siten vajoamaan pohjaa kohti. Tämänkaltaiset pystysuuntaiset virtaukset auttavat varastoimaan hiilidioksidia syvämereen. Lisäksi suolatasapaino vaikuttaa virtauksiin, sillä diffuusion kautta suolatasapaino pyrkii tasoittumaan, johtaen suolaisemman veden molekyylien liikkeeseen vähäsuolaisempaa liuosta kohti. Häiriöt näissä toiminnoissa tarkoittaisivat hiilidioksidin lisääntyntä haihtumista meristä ilmakehään (ACIA, 2004).

Viime vuosikymmeninä arktisen alueen vuoden keskilämpötila on noussut lähes kaksinkertaisella nopeudella verrattuna muuhun maailmaan. Hiilidioksidin (CO₂) ja muiden kasvihuonekaasujen globaalin konsentraation kasvulla on suuri vaikutus lämpenemiseen. Niiden on ennustettu lisäävän arktista lämpenemistä 4-7°C:lla seuraavien 100 vuoden aikana. Ikiroidan sulaminen voi joillain alueilla aiheuttaa järvien ja kosteikkojen kuivumista, luoden samalla uusia kosteikkoja toisille alueille. Tällainen sulaminen sekä kosteikkojen lämpeneminen, johtaa myös metaanipäästöjen lisääntymiseen. Arktisten alueiden ikirouta estää alueilla sijaitsevien mittavien maanalaisten hiilivarastojen, erityisesti turvesoiden, liiallista hajotustoimintaa. Tällaisten kosteikkoalueiden lämmitessä hajotustoiminta kiihtyy, ja ilmakehään muodostuu sen tuotteena metaania ja hiilidioksidia (ACIA, 2004).

Otsonikerroksen ohenemisen seurauksena lisääntynyt UV- eli ultraviolettisäteily (aallonpituus 100-380nm) vaikuttaa pohjoisiin ekosysteemeihin. UV-säteily on lisääntynyt napa-alueilla erityisen paljon, sillä kyseisillä alueilla suojaava otsonikerros on ohuempi kuin kauempana napa-alueista, ja se on ohentunut entisestään ihmisen aiheuttamien päästöjen vaikutuksesta. Otsonilla on suora yhteys UV-säteilyn määrään, sillä se toimii auringosta tulevan UV-säteilyn säätelijänä ilmakehän läpi.

Arktisen alueen UV-säteilyn saanti on erityisen voimakasta kevätaikaan, johtuen muun muassa stratosfäärin lämpötilasta ja sinne päätyvien otsonia tuhoavien aineiden vaikutuksesta (ACIA, 2004).

Ilmastonmuutos hankaloittaa otsonikerroksen toipumista, sillä siinä missä vapautuvat kasvihuonekaasut lämmittävät troposfääriä (alempaa ilmakehää), ne myös kylmentävät stratosfääriä, jossa otsoni sijaitsee. Tämä mahdollisesti jopa lisää otsonikatoa, sillä lämpötilan muuttuminen tällä tavoin vahvistaa napa-alueille tyypillisiä ilmavirtauksia, jotka puolestaan vaikuttavat stratosfääristen pilvien syntyyn. Otsonia tuhoavat kemialliset reaktiot tapahtuvat jäähiukkasissa, joista nämä pilvet koostuvat (ACIA, 2004). Myös troposfäärissä eli alemmassa ilmakehässä ilmenee otsonia, mutta tässä tapauksessa se toimii itse kasvihuone- ja saastekaasuna, auttaen ilmastonmuutosta. Sitä vapautuu luonnostaan pieniä määriä maaperästä ja kasveista, mutta suurempia, haitallisia määriä vapautuu muun muassa ihmisen teollisuustoiminnan seurauksena (UCAR, 2014).

Lisääntyneellä UV-säteilyllä on vaikutuksensa arktisiin ekosysteemeihin. Erityisesti kevät on hyvin herkkää aikaa eläville organismeille, ja otsonikerroksen ohentumisen vuoksi UV-säteily on voimakkaimmillaan juuri tänä aikana. Ilmaston lämpeneminen voi toimia yhteen UV-säteilyn lisääntymisen kanssa, muun muassa aiheuttaen aikaisempaa lumipeitteen sulamista pohjoisilla alueilla, jolloin muuten lumen säteilyltä suojaamat organismit altistuvat UV-säteilylle (ACIA, 2004).

UV-säteilyllä on eriäviä vaikutuksia eri organismeihin, sekä positiivisia että negatiivisia. Esimerkiksi monet kasvit pystyvät sopeutumaan säteilyn määrään kehittämällä lehtiinsä UV-säteilyltä suojaavia pigmenttejä. Tämä kuitenkin vaikuttaa lehtien ravintoarvoon, jolla puolestaan on vaikutuksia ympäröivään ekosysteemiin ja sen toimintoihin. Ravintoarvon aleneminen voi lisätä myös hyönteistuhoja pohjoisilla puilla, muun muassa tunturimittarin aiheuttamana (ACIA, 2004).

Ilmaston lämpeneminen johtaa myös monilla alueilla mahdollisten metsäpalojen lisääntymiseen. Muun muassa tästä syistä on odotettavaa, että vanhat metsät harvinaistuvat joka puolella maapalloa, erityisesti ihmisen hoitaessa metsäalueita tuotantometsinä. On myöskin odotettavaa, että puustolle haitalliset hyönteiset lisääntyvät huomattavasti, aiheuttaen entistä suurempia puustotuhoja. Ilmastonmuutos antaa uusia asettumismahdollisuuksia haitallisille tulokaslajeille, jotka leviävät etelästä kohti pohjoista (IPCC, 2014).

3. Hiilen kierto

Arktisilla ekosysteemeillä on merkittävä osa maailmanlaajuisessa hiilen kierrossa. Arviolta noin 50% maailmanlaajuisesta maanalaisesta hiilivarastosta sijoittuu pohjoisille ikiroudan alueille (Webb ym., 2014). Näiden arktisten alueiden viileät ja kosteat olosuhteet ovat mahdollistaneet ajan kuluessa hiilivarastojen kertymisen, niiden rajoittaessa mikrobien orgaanisen materiaalin hajotustoimintaa ja siten hiilen vapautumista ilmakehään.

Ilmaston lämpeneminen, jonka on todettu olevan erityisen voimakasta arktisilla alueilla, voi kuitenkin sekoittaa hiilen kierron tasapainoa. Riippuen muutoksista ekosysteemien kokonaissoluhengityksen ja -fotosynteesin, ja näistä johtuen ekosysteemin nettovaihdon tasapainosta, ilmastonmuutos voi muuttaa pohjoisilla alueilla hiilinieluna toimivia ekosysteemejä hiililähteiksi, ja päinvastoin (Cannone ym., 2016). Lisääntyneen maahengityksen johdosta tällaiset muutokset arktisissa ekosysteemeissä voivat jopa nopeuttaa ilmastonmuutosta ilmakehään vapautuvan hiilidioksidin johdosta.

Ilmaston lämpenemisestä johtuvan lumipeitteen aikaistuvan sulamisen ja kasvukauden pidentymisen on oletettu mahdollistavan ekosysteemien biomassan kasvun, ja tämän seurauksena vahvistavan hiilinielun toimintaa (Parmentier ym., 2011). On kuitenkin mahdollista, että kasvukauden pidentymisellä on eriäviä vaikutuksia, tarkasteltavasta ekosysteemistä riippuen. Parmentier ym. (2011) tutkimuksessa seuratussa Koillis-Siperiaan sijoittuvassa heinätundraekosysteemissä ilmeni yllä mainittua oletusta vastustavia tuloksia.

Em. tutkimuksen mukaan kyseisessä ympäristössä ekosysteemin tuotannossa ei näkynyt selvää kasvua pidemmän kasvukauden myötä. Päinvastoin, suurempi keskimääräinen hiilen sidonta todettiin vuosina, joina kasvukaudet olivat lyhimät ja kesät viileimmät. Vastaavasti pisimpinä, lämpimimpinä kasvukausina kokonaissidonta näytti olevan vähäisintä. Tutkimuksessa tämän on oletettu johtuvan siitä, että vaikka ekosysteemin nettotuotanto lisääntyikin lämpiminä, pitkinä kasvukausina, niin tapahtui myös keskimääräiselle soluhengitykselle. Hiilen kokonaissidontaa voidaan laskea muun muassa näiden kahden tekijän tasapainon mukaan, ja pidempinä kasvukausina

kummankin arvon kohoaminen johti siihen, ettei hiiltä näyttänyt sitoutuvan merkittävästi enemmän kuin muina kasvukausina (Parmienter ym., 2011).

Maan lämpötila on mahdollisesti tärkein maahengitykseen vaikuttava tekijä, sillä mikrobialiset entsyymit ovat herkkiä lämpötilan vaihdoksille, ja se vaikuttaa myös saatavilla olevaan veteen seoksessa. Maaperän lämpötila onkin talvisaikaisen ekosysteemin soluhengityksen merkittävä ajaja. Talven aikana tapahtuva CO₂:n kuluminen johtuu tämän huomioon ottaen todennäköisemmin biologisesta aktiivisuudesta maaperässä, kuin maahan kertyneiden CO₂-varastojen diffuusiosta (Parmienter ym., 2011).

Myös CO₂:n tuoton tutkimisen ajankohdalla on merkitystä. Tutkimuksessaan Webb ym. (2014) totesivat, että CO₂:ta vapautui enemmän heti kasvukauden ulkopuolisen kauden alussa, kuin sen myöhemmissä vaiheissa, jopa, kun muut olosuhteet olivat samat. On todennäköistä, että tämä johtuu muun muassa aikaisin kaudesta juuri kuihtuneiden kasvien varannoista, joiden hiilivarannot ovat helposti tavoitettavissa mikrobien toiminnan ansiosta. Myöhemmin kaudesta tämä varanto vähenee, joka voi selittää CO₂:n vapautumisen vähenemisen.

Webbin ym. (2014) tulokset heidän tutkimallaan kostealla subarktisella mätästundra-alueella Sisä-Alaskassa osoittivat, että ilmaston lämpeneminen voi johtaa suurempaan CO₂:n menetykseen talvikaudella. Lämmitetyillä koealueilla tundra-alue vapautti huomattavasti enemmän hiiltä kuin lämmittämättömillä alueilla. Ilmastonmuutoksella voisi olla entistäkin suurempia vaikutuksia kyseiseen ilmiöön, sillä suurimpia lämpenemisen nousuja odotetaan jouluihelmikuun ajankohdalle. Tutkimus myös osoitti, että tämä tutkimustundra toimi pääosin hiililähteenä koko tutkimuksen kestoajan. Tämä viittaa siihen, että kyseinen alue on siirtymässä hiilinielusta hiililähteeksi.

4. Ilmaston lämpenemisen vaikutukset kasveihin

Ilmaston lämpeneminen aiheuttaa muutoksia myös paikallisessa lajikoostumuksessa (IPCC, 2014). Kasvillisuusvyöhykkeiden odotetaan siirtyvän kohti pohjoista. Vyöhykkeellä sijaitseva kasvillisuus on sopeutunut vyöhykkeellään vallitseviin olosuhteisiin, ja nämä samat sopeumat ovat niille jopa haitaksi, lämpötilan noustessa ja eteläisemmiltä vyöhykkeiltä saapuvien uuteen lämpötilaan paremmin sopeutuneiden lajien kanssa käytävässä kilpailussa. Lajien on yksinkertaisempaa siirtyä pohjoista kohti kuin kilpailla voimakkaampien tulokaslajien kanssa.

Jäämeri kuitenkin rajoittaa pohjoisimpien kasvillisuusvyöhykkeiden siirtymistä, mikä voi ilmaston lämmitessä johtaa pohjoisimmille vyöhykkeille tyypillisten lajien taantumiseen ja sukupuuttoon. Kasvillisuuden levitessä kohti pohjoista, on myös mahdollista, että alueen hiilen sidonta voi lisääntyä kasvien tehokkaamman toiminnan johdosta. On kuitenkin kyseenalaista, riittääkö tämä tasapainottamaan ilmastonmuutoksesta aiheutuvia häiriöitä hiilen kierrossa ja ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuutta (ACIA, 2004).

Muiden kasvillisuusvyöhykkeiden tapaan myös havumetsävyöhykkeen oletetaan siirtyvän kohti pohjoista. Tämä tarkoittaa puurajan siirtymistä korkeammille leveyspiireille. Havumetsävyöhyke kerää, jakaa ja muokkaa suurta osaa valuma-alueelle saapuvasta makeasta vedestä, ja on siten tärkeä osa monia alueen tärkeitä toimintoja. Ilmastonmuutoksen edetessä eteläisemmät alueet voivat muuttua liian kuiviksi puiden kasvulle, mutta pohjoisessa siirros matalasta kasvillisuudesta puustoon ei tapahdu suorasukaisen nopeasti, sillä se vaatii muun muassa nykyisen tundra-alueen ja sen maaperän muuttumista kosteammaksi ja puiden kasvuun soveltuvammaksi (ACIA, 2004).

Muun muassa tästä syystä ilmastonmuutoksella voi olla eriäviä vaikutuksia puuvyöhykkeisiin. On mahdollista, että lämpenemisen myötä havu- ja lehtipuuvyöhykkeet siirtyvät lineaarisesti kohti pohjoista, mutta on myös mahdollista, että levinneisyysalueet voivat pysytellä pitkään samankaltaisina kuin nykyään, kunnes olosuhteet muuttuvat sietämättömiksi lajien selviytymisen kannalta. Joillain paikoin tämä voi tarkoittaa puulinjan vetäytymistä takaisin etelän suuntaan, mutta on myös mahdollista, että joillain alueilla puusto vähentyy huomattavasti tai jopa katoaa, aiheuttaen puuvyöhykkeiden kutistumisen tai kadon (ACIA, 2004).

Kuten aiemmin on mainittu, arktisella alueella ilmaston lämpeneminen on korostunut verrattuna muuhun maailmaan. Yksi korostuneen arktisen lämpenemisen keskeisistä ilmiöistä on voimakas vuodenaikaisvaihtelu, jossa talvilämpeneminen ohittaa kesälämpenemisen (Chae ym., 2015). Maailmanlaajuisten lämpötilojen noustessa on odotettavaa, että kasvillisuustyypit tulevat muuttumaan, erityisesti pohjoisilla leveysasteilla. Lämpötilan noustessa arktisten varpu- ja ruohomaiden oletetaan vaihtuvan havumetsiksi. Lämpenemisestä johtuvia biomien eli suurekosysteemien muutoksia luonnehditaan habitaattien liikkumisella pohjoista kohti, pidemmällä kasvukaudella ja lisääntyneellä fotosynteesillä aktiivisuudella. Tätä kutsutaan myös arktisten alueiden ”vihertymiseksi”.

Ilmaston lämpenemisen myötä odotetaan, että hiilidioksidin määrä ilmakehässä lisääntyy, johtuen lämpenemisestä aiheutuvasta biosfääristä vapautuvasta hiilidioksidista (Slot & Kitajima, 2014). Tämän kaltaista vapautumista on muun muassa maaperän mikrobitoiminnan aiheuttama maahengitys sekä kasvien soluhengitys. Tämä taas loisi kierteen, jossa lämpeneminen aiheuttaa hiilidioksidin määrän lisääntymistä, joka puolestaan auttaa lämpenemistä. Kasvit voivat kuitenkin mahdollisesti mukautua kohonneisiin lämpötiloihin vähentämällä soluhengitystään. Tämä voisi vähentää kuvailusta kierteestä aiheutuvaa yhteisöjen keskituottavuuden laskua.

Lyhyellä aikavälillä kasvien respiraatio kohoaa huomattavasti lämpötilan noustessa. Tässä tilanteessa kasvi kuluttaa huomattavasti enemmän resurssejaan kuin sille optimaalisessa lämpötilassa. Kasveilla on kuitenkin kyky sopeutua pidemmällä aikavälillä muuttuneeseen lämpötilaan. Tämä tarkoittaa rakenteellista, fysiologista tai biokemiallista muutosta kasviyksilön toiminnassa suhteessa pitkäaikaiseen lämpötilan muutokseen. Yleisesti ottaen tällaiset muutokset johtavat kasvin vähentyneeseen respiraatioon uudessa lämpötilassa, joka säästää kasvin resursseja (Slot & Kitajima, 2014).

Mukautumista eli akliimaatiota voi tapahtua jo muutamassa päivässä lämpötilan muutoksesta. Pidempi altistus aika kuitenkin mahdollistaa kasvin pitkäkestoisemman sopeutumisen uuteen ilmastoon, joka voi johtaa huomattavampiinkin muutoksiin kasvin toiminnassa ja rakenteessa. Sopeutuminen on myös erilaista kasvin uusissa ja vanhoissa lehdissä. Uudet, kohonneessa lämpötilassa kehittyneet lehdet ovat paremmin sopeutuneet vallitsevaan ilmastoon, kun taas

vanhojen, aiemmin kehittyneiden lehtien aklimaatio riippuu kasviyksilön fysiologisesta joustavuudesta reaktioissa muuttuviin olosuhteisiin (Slot & Kitajima, 2014).

Myös lämpötilan muutoksen voimakkuus vaikuttaa kasvien kykyyn sopeutua muutokseen. Voimakas, nopea muutos, kuten äkillinen kuiva, kuuma kausi, on luonnollisesti haastavampi ja kuluttavampi kasville, kuin lievempi, hitaampi muutos, ja hidas, lievä muutos onkin todennäköisempi luomaan tasapainoista sopeutumista lämpötilaan kasveissa. On mahdollista, että myös kasvityypeillä ja lajeilla on suuria keskeisiä eroja niiden sopeutumisessa lämpötilan muutoksiin. On todettu, että havupuut voivat sopeutua lehtipuita helpommin muuttuneisiin ilmasto-olosuhteisiin (Slot & Kitajima, 2014).

Tämä viittaa siihen, että elämänsä aikana voimakkaampia lämpötilan vaihteluita kokeneet lehdet ovat kehittyneet vasteiltaan joustavammiksi. Tämän perusteella olisi myös todennäköistä, että eri ilmastoalueiden kasvit eivät ole yhtä sopeutuneita tämänkaltaisiin muutoksiin. Esimerkiksi trooppisen ilmaston kasvit ovat sopeutuneet vain muutaman asteen vuodenaikaisvaihteluihin, eivätkä välttämättä pystyisi sopeutumaan pitkäaikaisiin muutoksiin yhtä hyvin kuin viileämpien ilmastoalueiden kasvit (Slot & Kitajima, 2014).

Ilmastonmuutoksen myötä keskilämpötilan oletetaan nousevan hitaasti, joka tarkoittaisi, että teoriassa kasvit kykenevät sopeutumaan hyvin näihin hiljalleen muuttuviin olosuhteisiin. Ilmastonmuutoksen lämpötilanvaihtelut eivät kuitenkaan ole tasaisia, ja esimerkiksi lämpöaaltojen odotetaan yleistyvän ja voimistuvan. Tämä altistaisi kasvit huomattavasti niiden kehitysolosuhteista poikkeaville lämpötiloille, joka johtaisi parhaimmillaankin rajoitteelliseen tasapainoon sopeutumisessa. Kasvien lajikohtaiset erot kyvyssä sopeutua lämpötilojen muutoksiin voivat myös johtaa jopa muutoksiin yhteisöjen lajikoostumuksessa ja ekosysteemien toiminnassa (Slot & Kitajima, 2014).

5. Talvilämpenemisen vaikutukset

Ilmastonmuutoksen odotetaan lisäävän äärimmäisten ilmastollisten ilmiöiden yleisyyttä. Tällaisiksi voidaan luokitella varsinkin arktisella alueella muun muassa voimakkaat ja äkillisesti ilmenevät lämpenemisen jaksot talvisaikaan (ACIA, 2004). Tällaiset jaksot voivat johtaa nopeaan lumipeitteen sulamiseen, jonka jälkeen yleensä lumen alla eristyksissä oleva maaperä ja kasvit altistuvat lämpimän jakson jälkeen palaavalle kylmyydelle. Tällaisella altistuksella voi olla voimakkaitakin vaikutuksia pohjoisten kasvien ja ekosysteemin kasvuun ja toimintaan (Bokhorst ym., 2008).

Liian aikaisin lumen alta paljastuminen voi olla hyvinkin haitallista lumenaliselle kasvustolle. Haitat ilmenevät muun muassa kasvien kuivumisena niiden ollessa kykenemättömiä veden tarvittavaan hankintaan, tuulen ja jäähiukkasten kuluttavana vaikutuksena, ja mahdollisesti toistuvina sulamisen ja jäätyminen jaksoina, jotka voivat aiheuttaa kasvien kuorettumisen jäällä. Näiden ilmiöiden vaikutusten on jo todettu liittyvän tiettyjen kasvien populaatioiden taantumiseen. Niillä on myös vaikutuksensa kasveja ravinnokseen käyttävien eläinten populaatioihin, ravinnon ollessa tavoittamattomissa jääkuoren alla (Bokhorst ym., 2008).

Talvilämpenemistapahtumien ei välttämättä tarvitse olla radikaaleja. Kevättalvella ilmenevä lievä lämpeneminen voi myös aiheuttaa kasvien kylmänkestävyyden nopeutunutta laskua. Taulavuori ym. (1997) totesivat yhtäjaksoisen muutaman asteen lämpenemisen välillä joulukuu-toukokuu aiheuttavan kylmänkestävyyden laskua mustikalla (*Vaccinium myrtillus*). Lämmityskäsiteltyjen kasvien todettiin tuottavan uutta kasvua ja osoittavan merkkejä fotosynteesistä, kun kontrolliryhmä oli yhä talvihorrossa. Tämä altistaa kylmänkestävyytensä menettäneet kasvit tuhoisille vaikutuksille siinä tapauksessa, että lämpötila laskee vielä kevättalven aikana.

Bokhorst ym. (2008) selvittivät tutkimuksessaan yhden äärimmäisen talvilämpenemisjakson vaikutusta sub-arktiseen varvikkopopulaatioon, erityisesti lajeihin pohjanvariksenmarja (*Empetrum hermaphroditum*), puolukka (*Vaccinium vitis-idaea*) ja mustikka (*Vaccinium myrtillus*). Koeasettelussa oli kolmenlaista käsittelyä koepalstoille; kontrollipalstoja, latvojen lämmityskäsittelypalstoja ja sekä maa- että latvalämmityspalstoja. Kokeellisen lämmitysjakson jälkeen koepalstat jätettiin rauhaan jäljellä olevaksi talveksi.

Käsittelyt läpikäyneissä koekasveissa todettiin seuraavana keväänä kontrolliryhmästä eroavia tapahtumia. Mustikalla ja pohjanvariksenmarjalla huomattiin silmujen aukeamisessa selkeää viivästymistä kontrollikasveihin verrattuna. Silmujen määrässä ei kuitenkaan havaittu merkittävää eroa. Puolukan tapauksessa muiden kaltaista viivästymistä ei havaittu. Myöhemmin keväästä koekäsittely aiheutti sekä mustikalla että puolukalla kukantuotannon selkeän vähenemisen. Pohjanvariksenmarjan kukantuotantoon käsittelyt eivät vaikuttaneet.

Mustikalla talvilämpenemisen vaikutukset aiheuttivat myöhemmin kasvukaudesta marjantuotannon romahduksen, kun taas puolukan marjantuotanto ei laskenut merkitsevästi, ja pohjanvariksenmarja ei kokenut negatiivisia vaikutuksia. Versojen kasvuun tai kasvien fotosynteesin tasoihin koejärjestelyt eivät näyttäneet vaikuttaneen merkitsevästi millään koelajeista. Talvilämpenemisjakso ei myöskään aiheuttanut kasveille näkyviä vammoja.

Tämän tutkimuksen perusteella Bokhorst ym. (2008) toteavat, että yhdelläkin kesken talven ilmenevällä lumipeitteen sulattavalla lämpenemistapahtumalla voi olla negatiivisia vaikutuksia kasvien kehitykseen ja lisääntymiseen tapahtumaa seuraavalla kasvukaudella. Talvilämpenemisjakson vasteet olivat erilaiset lajien kesken. Mikäli tulevina vuosina tämän kaltaiset äärimmäiset, nopeat talvilämpenemisjaksot yleistyvät, kuten on ennustettu tapahtuvan ilmastonmuutoksen myötä, ja kasvien vasteet niihin säilyvät samoina, on mahdollista, että seuraavat vaikutukset voivat aiheuttaa kasvilajien tuotantokyvyn ja jopa kasviyhteisöjen rakenteen muutoksia.

Puhuttaessa talvilämpenemisen vaikutuksista kasveihin, on otettava huomioon talviaikaisen kuivumisen vaikutukset. Tämä ilmiö johtuu yleensä lumipeitteen vähäisyydestä tai ennenaikaisesta sulamisesta, joka jättää paljastuneet kasvit tuulen, auringonvalon ja kylmyyden vahingoitettavaksi. Tahkokorpi ym. (2007) tutkivat talviaikaisen kuivumisen jälkivaikutuksia mustikkaan (*Vaccinium myrtillus L.*) niiden tultua altistetuksi lumettomille olosuhteille, verrattuna kontrollikasveihin, jotka talvehtivat lumipeitteen alla.

Tutkimuksessa kiinnitettiin huomiota silmujen fenologiaan, kuivumisen jälkeisen kasvukauden varsien kasvuun, sekä vaikutuksiin kukintaan ja marjantuotantoon. Todettiin kuivumiskäsittelylle altistettujen kasvien vesipitoisuuden laskevan huomattavasti maaliskuun aikana, johtaen

kuivumisstressiin, sekä lievään auringonvalosta johtuneeseen valostressiin. Todettiin myös kylmästressin vaikutuksia. Näiden stressien yhteisvaikutuksena kuivuuskokeelle altistettujen kasvien metabolismin käynnistyminen näytti viivästyneen sen normaalista aktivoitumisesta maaliskuussa.

Seuraavana kasvukautena todettiin muun muassa kasvun aloituksen myöhästymistä, varpujen vahingoittumista, silmujen puhkeamisen taantumista ja kukinnan vähentymistä tutkimuksen kolmesta käsittelystä vakavimmalla, täysin lumettomalla käsittelyllä. Keskimmäinen käsittely, jossa simuloitiin lumenalasia valo-olosuhteita ilman lumipeitettä, osoitti myöhästymistä silmujen puhkeamisessa, mutta käsittelyn kasveilla ei havaittu vakavaa vahingoittumista.

Kasvukauden kesäkuuhun mennessä kaikkien koekäsittelyjen kasvien vesipitoisuus palasi samalle tasolle, mutta kahdessa kontrollista poikkeavassa käsittelyssä voitiin yhä havaita stressiä. Tällainen pitkäaikainen stressireaktio saattoi johtua monen eri stressin yhdistelmästä, jolle aiemman vuoden varvut altistettiin koejärjestelyjen aikaisemmassa vaiheessa. Seuraavassa syyskuussa tehdyt mittaukset paljastivat, että käsiteltyjen kasvien kasvu oli huomattavasti vähäisempää kontrolliryhmään verrattuna. Tästä voidaan päätellä, että ilmastonmuutos voi aiheuttaa kevättalvella olosuhteita, jotka altistavat kasvipopulaatioita monen eri stressin yhdistelmälle, jolla on pitkäkestoisia negatiivisia vaikutuksia populaatiossa.

6. Valoilmaston vaikutukset

Valo on yksi kasvien ehdottomasti tärkeimmistä resursseista. Valon voimakkuus määrää fotosynteesin tason kasveilla, ja siten myös niiden keskituotannon. Valon laatu puolestaan vaikuttaa niin fotosynteesiin kuin kasvin fenotyyppiinkin ja toimii ilmentäjänä metaboliselle säätelylle. Päivän pituus auttaa kasveja määräämään eri fenologisten tapahtumien ajoituksen. Muutokset näissä ominaisuuksissa voivat aiheuttaa fenologisia siirtymiä kasveilla, mukaan lukien kukinnan alkamisen ja siementen itämisen, ja määrätä biomassan sijoittamisen lehtien, tukisolukon ja juurten välillä, sekä fotosynteesin tuotteiden jakamisen kasvin symbionteille, kuten juurten sienirihmastoille (Markkola ym., 2016).

Pohjoisten leveysasteiden valoilmasto eroaa huomattavasti alempien leveysasteiden valoilmastosta, ja vaikuttaa hyvin todennäköisesti kasvien kilpailukykyyn kasvukaudella. Arktisella alueella suurimman osan kasvukaudesta aurinko ei laske lainkaan, ja yö on parhaimmillaankin vain hiukan päivää hämärämpi. Pimeyden puutteen lisäksi pohjoiselle valoilmastolle on tyypillistä vähempi valon voimakkuus. Myös valon laatu eroaa eteläisemmistä leveysasteista, sillä saatavan auringonvalon kulma on huomattavasti alempana, joka lisää suhteellisesti pohjoisten öiden sinisen valon osuutta valon gradientista (Taulavuori ym., 2010).

Päivän pituudella on suuri merkitys kasveille niiden fenologisten toimintojen ajoituksen kannalta, liittyen erityisesti talvea varten valmistautumiseen. Näihin fenologisiin toimintoihin kuuluvat muun muassa lehtien putoaminen, kylmänhorros, kylmänkestävyyden vaihtelut, silmujen aukeaminen ja kukinta. Säätilat vaihtelevat vuosittain, joten niiden täsmällisyys on vaihtelevaa, josta johtuen monet fenologiset toiminnot käynnistyvät päivän pituuden muutosten mukaan. Arktisella alueella on mahdollista, että arktiset kasvit luottavat myös muutoksiin valon laadussa päivän keston sijaan (Taulavuori ym., 2010).

Kasvien reaktiot päivän ja yön pituuksiin toisiinsa nähden, eli fotoperiodiin, vaihtelevat siinä määrin, että lajin sisällä voi syntyä niin sanottuja fotoperiodisia ekotyyppejä, jotka poikkeavat toisistaan geneettisesti. Tämä on tyypillistä muun muassa pohjoisille puulajeille. Ne osoittavat asteittaista sopeutumista seurattaessa lajin yksilöitä eri leveysasteilla pohjoista kohti. Tämän kaltainen sopeutuminen fotoperiodiin kuitenkin vaihtelee lajien välillä. Näiden havaintojen

perusteella on mahdollista, että pohjoinen valoilmasto voi huomattavasti vaikuttaa kasvilajien ja fotoperiodisten ekotyypin väliseen kilpailuun ilmastonmuutoksen vaikuttaessa puulajien siirtymiin pohjoista kohti (Markkola ym., 2016).

On ennustettu, että kasvilajit pyrkivät seuraamaan niille optimaalisia lämpöolosuhteita siirtymissään, joka johtaa ilmaston lämmitessä muuttoliikkeeseen pohjoisen suuntaan. Tällä tavoin kasvilajin kasvuympäristön lämpötila ei muutu huomattavasti, kun taas valoilmastossa tapahtuu pohjoista kohti huomattaviakin muutoksia. On todennäköistä, että lajien siirtymät seuraavat muuttuvia ympäristöolosuhteita aikaviiveellä, joka rajoittaa niiden kykyä levitä ja vallata uusia alueita. Uudelle alueelle asettuminen voi näin vaatia useita yrityksiä, ja levittäytymisen voidaan odottaa seuraavan tavanomaisten invaasioiden mallia. Myös uuden alueen aikaisempi kasvillisuus voi rajata uusien lajien levittäytymistä alueelle (Taulavuori ym., 2010; Markkola ym., 2016).

Lajien levinneisyyksien muutosten ennustaminen ilmastonmuutoksen myötä on tärkeää, koska eksoottisten lajien invaasiot muokkaavat biodiversiteettiä, ja siten ekosysteemin toimintaa. Toisin kuin lämpötila, päivän pituuden vaihtelu vuodenaikojen mukaan on vakaa ympäristöllinen osatekijä, joka ei muutu riippuen paikallisesta tai maailmanlaajuisesta ilmastosta. Levinneisyysalueiden laajentumisen ennustamisessa leveyspiirien yli ja siitä seuraavista vaikutuksista alkuperäisille yhteisöille tarvitaan parempaa ymmärrystä siinä, miten lajit käyttävät päivän pituutta koordinoitakseen kasvua, lisääntymistä, fysiologiaa ja elinkaarten synkronisaatiota keskenään vuorovaikutuksessa olevien yksilöiden ja lajien välillä (Saikkonen ym., 2012).

Maanviljelys, metsänhoito ja ilmastonmuutos ovat voimakkaimpia ilmiöitä, jotka lisäävät lajien invaasioita maailmanlaajuisesti, sekä helpottavat lajien asettumista uusiin habitaatteihin. Ilmastonmuutoksen odotetaan helpottavan lajien levinneisyyden muutoksia erityisesti leveys- ja pituuspiirien yli. Lajien laajemmalle leviäminen voi lisätä lajirikkkautta uudessa ympäristössä, mutta tähän liittyy myös riskejä. Tulokaslajien invaasiot ja ilmastonmuutoksen vaikutukset voivat ajaa paikallisia lajeja sukupuuttoon niiden nykyisillä levinneisyysalueilla, ja maailmanlaajuisesti eliöstö voi muuttua homogeeniseksi (Saikkonen ym., 2012).

Tulokaslajit ovat yksi suurista uhista paikalliselle biodiversiteetille ja sen yhteydessä ekosysteemin toiminnoille, sillä ne voivat voittaa paikallislajit kilpailussa, muodostaa niiden kanssa hybridejä,

tuhota lajeja tai loisia paikallislajien kustannuksella. Saikkosen ym. (2012) artikkelissa painotetaan fotoperiodismin roolia, kun ennustetaan ilmastonmuutoksen aiheuttamia levinneisyysalueiden muutoksia ja laajentumia yli leveyspiirien.

Muutokset lämpötilassa tai sademäärässä vaikuttavat lajeille sopivan ilmastollisen ”ikkunan” kokoon leveyspiirien halki ekologisessa ajassa. Vuodenajasta riippuwaitset muutokset päivän pituudessa vaihtelevat riippuen leveyspiiristä, ja ovat vakaa abioottinen ekologinen suodatin. Vuodenaikojen välinen vaihtelu päivän pituudessa lisääntyy mitä lähempänä ollaan napa-alueita (Saikkonen ym., 2012).

Fenologinen ajoitus on olennaista yksilön elinkelpoisuudelle, erityisesti korkeammilla leveyspiireillä, missä lämpötilan ja valon voimakkuuden, keston ja laadun vuodenaikaisvaihtelu on suurta. Lauhkealla ja napavyöhykkeellä suuri vaihtelu lämpötilassa ja valon ominaisuuksissa kesän ja talven välillä määrittää sopivan ajan organismien eri toiminnoille, kuten kasvamiselle, lisääntymiselle, vaeltamiselle ja horrokseen vaipumiselle (dormanssi). Muun muassa lisääntymisen ajoitus on elintärkeää yksivuotisille kasveille. Resurssien allokaatio varastoelimiin, talvisilmujen muodostaminen ja lehtien putoaminen, kuten myösilmujen puhkeaminen (bud break) ja kylmänkestävyyden muutokset ovat tärkeitä monivuotisille kasveille (Saikkonen ym., 2012).

Fotoperiodinen adaptaatio vaihtelee lajien välillä. Esimerkkinä, kasvit voidaan lajitella ’pitkän päivän’, ’lyhyen päivän’ tai ’päiväneutraaleihin’ kasveihin, ja monien kasvien fenologiaa säädellään muutoksilla päivän pituudessa, erityisesti trooppisen vyöhykkeen etelä- ja pohjoispuolella. Saikkosen ym. (2012) artikkelissa ehdotetaan, että se, miten tärkeitä fotoperiodiset vasteet ovat yksilön fenologialle, kuvastaa organismin levinneisyyttä leveyspiireillä, sen riippuvaisuutta auringosta energianlähteenä ja sen kanssa kanssakäyvien lajien riippuvaisuutta fotoperiodisista vasteista. Kasvit tuottajina ovat suoraan riippuvaisia valosta, kun taas kasvinsyöjät, loiskasvit ja muut organismit ovat riippuvaisia siitä ravintoketjun kautta. On mahdollista, että joissain tapauksissa geneettiset mekanismit voivat edesauttaa tai hillitä lajin adaptiivista evoluutiota, ja siten myös lajin levinneisyyden muutoksia.

On todettu ilmastonmuutoksen tuottavan trofista desynkronisaatiota kasvinsyöjähyönteisillä, muuttolinnuilla ja akvaattisissa yhteisöissä. Monien lajien fenologia on muuttunut

ilmastonmuutoksen vaikutuksesta, erityisesti pohjoisen pallonpuoliskon korkeilla leveysasteilla. Fenologisen muutoksen aste vaihtelee kuitenkin lajien välillä niiden käyttäessä eri ympäristöllisiä ilmentäjiä ajoittaakseen fenologisia tapahtumia. Esimerkiksi, ilmastonmuutos voi aiheuttaa paikallisia sukupuuttoja kasvinsyöjissä, jotka käyttävät ravinnokseen hyvin nuoria isäntälehtiä toukkavaiheessa, jos toukkien kuoriutuminen ajoittuu lämpötilan mukaan, mutta lehtien kasvukausi käynnistyy riippuen fotoperiodismista. Samoin lintuyhteisöissä epäyhtenäisyys muuton ajoituksen ja ravinnoksi käytettävien hyönteisten saatavuuden välillä voi vahingoittaa lintupopulaatioita (Saikkonen ym., 2012).

Epäyhtenevä ajoitus voi mahdollisesti muokata kasviyhteisöjä paikallis- ja tulokaslajien kilpailussa muuttuvassa ympäristössä. Leveyspiirien yli tapahtuvien invaasioiden odotetaan lisäävän fenologisten ajoitusten eriyvyyttä yhteisöissä. Tämä perustellaan sillä, että fotoperiodismi ja muut ympäristön vasteet voivat olla eriarvoisia ajoitettaessa vuodenaikaistapahtumia tulokaslajeilla ja paikallislajeilla. Invaasioiden onnistuminen riippuu tulokaslajin kyvystä sopeutua paikalliseen vuodenaikaisvaihteluun (Saikkonen ym., 2012).

Lämpötila määrittää suuresti puulajien talvehtimistä, kasvua ja lisääntymistä. Saikkosen ym. (2012) artikkelissa ehdotetaan kuitenkin, että fotoperiodismi voi hidastaa tai rajoittaa kasvien invaasioita pohjoisen suuntaan. Tätä ilmenisi erityisesti puilla, joilla on pitkä elinkaari, sillä ne ovat yleisesti ottaen hyvin sopeutuneet ja ajoittaneet fenologiset tapahtumansa vallitsevan päivänpituuden ja valon laadun mukaan.

Taulavuoren ym. (2017) tutkimuksessa todettiin, että valoilmasto todellakin aiheuttaa valintapainetta kasvipopulaatioille niiden siirtyessä kohti pohjoista. Tutkimuksessa testattiin rauduskoivun (*Betula pendula*) ja pihlajan (*Sorbus aucuparia*) pohjoisten ja eteläisten populaatioiden suhtautumista pohjoiseen ja eteläiseen (Pohjois-Suomi, Etelä-Suomi) valoilmastoon verrattuna toisiinsa. Eteläiset populaatiot suoriutuivat paremmin niin eteläisessä kuin pohjoisessakin valoilmastossa, osoittaen korkeaa adaptaation tasoa kapasiteetissa, kun taas pohjoiset populaatiot osoittivat selviytymisadaptaation merkkejä. Eteläinen koivupopulaatio panosti kasvuun selviytymisen sijasta pohjoisessa ympäristössä, josta merkinä oli lehtien syysvärityksen myöhästyminen.

Taulavuoren ym. (2017) tutkimuksessa todettiin myös, että pihlaja näyttäisi *Rosacea*-suvun jäsenenä vastaavan valoympäristöön heikommin kuin koivupopulaatiot. On mahdollista, että pihlajapopulaatiot käyttävät fenologisissa tapahtumisissaan ilmentäjänä lämpötilaa valoilmaston muutosten sijaan, tai antavat sille enemmän painoa. Tästä voidaan päätellä, että valoilmastolla on vaikutuksia kasvien pohjoissuuntaiseen leviämiseen ja eri populaatioiden adaptaatioon uusiin olosuhteisiin, mutta sen vaikutusten voimakkuus on lajikohtaista.

Vaikka tutkimukset osoittavat joidenkin lajien kykenevän kasvamaan laajemmilla maantieteellisillä alueilla, niiden elinkelpoisuus on usein korkein niiden alkuperäisympäristössä. Korkeilla leveysasteilla seuraukset voivat olla tuhoisia, jos lajit eivät ole sopeutuneet lyhyen kasvukauden ja kylmien talvien yhdistelmään. Ilmastonmuutos voi lieventää joitain lämpötilasta johtuvia leviämisrajoitteita. Alkuperäislajit voivat kuitenkin säilyttää etuja kilpailussa, koska ne ovat paremmin sopeutuneet seuraamaan leveysasteensa fotoperiodisia ilmentäjiä (cues), joihin ilmastonmuutoksella ei ole vaikutusta (Saikkonen ym., 2012).

7. Yhteenveto

Ilmastonmuutoksen vaikutukset kasveihin ovat moninaisia pohjoisella alueella. Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa erityisen voimakkaasti pohjoisella ja arktisella alueella, ja sen vaikutukset yltävät niin kasvien kasvuvyöhykkeiden muutoksiin ja valoilmaston aiheuttamiin mahdollisiin haasteisiin pohjoista kohti levittäytymisessä, talvilämpenemisestä johtuviin ongelmiin, kuin hiilen maailmanlaajuisen kierron muutoksiinkin.

Arviolta 50 prosenttia maailmanlaajuisesta maanalaisesta hiilivarastosta sijoittuu arktiselle alueelle, mutta ilmaston lämpeneminen voi aiheuttaa sekoittumista hiilen kierron tasapainossa. On todettu, että ilmastonmuutos voi aiheuttaa hiilinielujen ja -lähteiden muuttumista toiseen. Tästä voi aiheutua ilmakehään vapautuvan hiilidioksidin määrän nousu, joka puolestaan taas voimistaa ilmaston lämpenemistä.

Lämpenemisen vaikutuksena on todettu, että niin puuvyöhyke kuin muutkin kasvillisuusvyöhykkeet ja -populaatiot pyrkivät muuttamaan pohjoista kohti. Tästä johtuen pohjoisemmat kasvipopulaatiot joutuvat kilpailemaan ja mahdollisesti väistymään tulokkaiden tieltä, kun taas tulokkaiden tulee sopeutua uusiin olosuhteisiin. Varsinkin pohjoisimmilla alueilla levittäytymistä voi hidastaa se, että maaperän tulee ensin muuttua, ennen kuin se kykenee ylläpitämään esimerkiksi puiden kasvua. Tulokaslajit myös haastavat paikallislajien selviytymisen, ja uhkana on, että maailmanlaajuinen kasvillisuus muuttuu homogeeniseksi, biodiversiteetin kärsiessä.

Talvilämpeneminen aiheuttaa haasteita pohjoisille populaatioille, niiden ollessa sopeutuneita lumipeitteen alla talvehtimiseen. Talvien muuttuessa lämpimämmiksi, lumipeitteen suojaava vaikutus vähenee, ja altistaa kasvit kylmälle, tuulelle, valolle, ja näistä tekijöistä aiheuttavalle stressille, joka voi olla hyvin vahingollinen kasvipopulaatioille. Talvilämpenemisen on todettu muun muassa vahingoittavan varpukasvilajeja, aiheuttavan niiden kasvun ja silmujen puhkeamisen myöhästymistä, kukinnan ja kasvun vähenemistä, ja marjakatoja.

Myös pohjoinen valoilmasto voi vaikuttaa kasvien pohjoiseen muuttosuuntaukseen. Pohjoisilla leveysasteilla valon laatu, kesto ja voimakkuus ovat erilaisia kuin etelämmillä leveyspiireillä, mikä aiheuttaa valintapainetta kasvipopulaatioille. On kuitenkin lajikohtaista, kuinka vahvasti valoilmasto vaikuttaa kasvipopulaation fenologiseen ajoitukseen. On todettu, että ilmastonmuutos aiheuttaa myös ajoituksellista desynkronisaatiota eri toisistaan riippuvaisten lajien välillä, kun toinen laji luottaa ajoituksessaan lämpötilaan ja toinen valon määrään.

Yhteenvetona, on tärkeää ymmärtää ilmastonmuutoksen vaikutuksia pohjoisiin alueisiin, sillä niillä on puolestaan huomattavia maailmanlaajuisia vaikutuksia. Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa ympäristöön ja pohjoiseen ekosysteemiin hyvin moninlaisilla tavoilla, kasvihuonekaasujen vapautumisesta kasvillisuusvyöhykkeiden muutoksiin ja kasvien monimuotoisuuden kohtaamiin haasteisiin, ja näiden mekanismien tutkiminen on olennaista ilmastonmuutoksen ymmärtämiseksi.

Lähteet:

ACIA (2004), Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press,. <http://www.acia.uaf.edu> 2.3.2018

Bokhorst S., Bjerke J. W., Bowles F. W., Melillo J., Callaghan T. V. and Phoenix G. K. (2008). Impacts of extreme winter warming in the sub-Arctic: growing season responses of dwarf shrub heathland. *Global Change Biology*. Vol. 14, Iss. 11, pp. 2603–2612.

Cannone N., Augusti A., Malfasi F., Pallozzi E., Calfapietra C. and Brugnoli E. (2016). The interaction of biotic and abiotic factors at multiple spatial scales affects the variability of CO₂ fluxes in polar environments, *Polar Biology*, Vol. 39, Iss. 9. Pp 1581–1596.

Chae Y., Kang S. M., Jeong S-J., Kim B. and Frierson D. M. W. (2015). Arctic greening can cause earlier seasonality of Arctic amplification. *Geophysical Research Letters*. Vol. 42, Iss. 2, pp. 536–541.

IPCC (2014): Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L.White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

Markkola, A.M., Saravesi, K., Aikio, S., Taulavuori, E., Taulavuori, K. (2016). Light-driven host-symbiont interactions under hosts' range shifts caused by global warming: A review. *Environmental and Experimental Botany*. Vol. 121, pp. 48-55.

Parmentier F. J. W., van der Molen M. K., van Huissteden J., Karsanaev S. A., Kononov A. V., Suzdalov D. A., Maximov T. C., Dolman A. J. (2011). Longer growing seasons do not increase net carbon uptake in the northeastern Siberian tundra. *Journal of Geophysical Research*. Volume 116, Issue G4.

Saikkonen, K., Taulavuori, K., Hyvönen, T., Gundel, P.E., Hamilton, C.E., Vänninen, I., Nissinen, A. and Helander, M. (2012). Climate change-driven species' range shifts filtered by photoperiodism. *Nature Climate Change*. Vol. 2. Pp. 239–242.

Slot M. and Kitajima K. (2015). General patterns of acclimation of leaf respiration to elevated temperatures across biomes and plant types. *Oecologia*. Vol. 177, Iss. 3. Pp 885–900.

Tahkokorpi, M., Taulavuori, K., Laine, K., Taulavuori, E. (2007). After-effects of drought-related winter stress in previous and current year stems of *Vaccinium myrtillus* L. *Environmental and Experimental Botany* 61 (2007) 85–93

Taulavuori, E., Taulavuori, K., Niinimaa, A., and Laine, K. (2010). Effect of Ecotype and Latitude on Growth, Frost Hardiness, and Oxidative Stress of South to North Transplanted Scots Pine Seedlings. *International Journal of Forestry Research*, Volume 2010, Article ID 162084, 16 pages.

Taulavuori, K., Laine, K., Taulavuori, E., Pakonen, T., and Saari, E. (1997). Accelerated dehardening in bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) induced by a small elevation in air temperature. *Environmental Pollution*, Vol. 98, No. 1, pp. 91-95, 1997

Taulavuori, K., Taulavuori, E., Saraveri, K., Jylänki, T., Kainulainen, A., Pajala, J., Markkola, A., Suominen, O., ja Saikkonen, K. (2017). Competitive success of southern populations of *Betula pendula* and *Sorbus aucuparia* under simulated southern climate experiment in the subarctic. *Ecology and Evolution*. 2017;7:4507–4517.

2014 UCAR with portions adapted from *Windows to the Universe* (© 2005 NESTA), <https://scied.ucar.edu/ozone-troposphere>

Webb E. E., Schuur E. A. G., Natali S. M., Oken K. L., Bracho R., Krapek J. P., Risk D., Nickerson N. R. (2016). Increased wintertime CO₂ loss as a result of sustained tundra warming Vol. 121, Iss. 2. Pp. 249–265.