

UV-B-SÄTEILYN VAIKUTUKSET SUBARKTISEN SUON ISOPREENI- JA MONOTERPEENIPÄÄSTÖIHIN

Janne Räsänen
Pro gradu -tutkielma
Ympäristötiede
Kuopion yliopisto
Ympäristötieteen laitos
Huhtikuu 2007

KUOPION YLIOPISTO, luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta

Ympäristötieteen laitos, ympäristötiede

Janne Räsänen: UV-B-säteilyn vaikutukset subarktisen suon isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin

Pro gradu -tutkielma 44 s.

Tutkielman ohjaajat: ma. Professori Jarmo Holopainen
FT Riikka Rinnan
FM Päivi Tiiva

Huhtikuu 2007

Avainsanat: Isopreeni, Monoterpeeni, VOC, UV-säteily, Suo, *Eriophorum russeolum*

Ihmisen toiminnan seurauksena lämpiävä ilmasto sekä oheneva yläilmakehän otsonikerros aiheuttavat muutoksia eliöiden kasvuympäristöissä. Tämän työn tarkoituksena oli selvittää otsonikadon seurauksena lisääntyvän UV-B-säteilyn vaikutuksia subarktisen suon vapauttamiin isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin.

Ultravioletti-B-säteilyn vaikutuksia subarktisen suon isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin tutkittiin Sodankylässä sijaitsevalla rimpinevalla 5.6.–15.8.2006 välisenä aikana. Tutkimusalueella oli satunnaisesti aseteltuna 30 koeruutua, joista kymmentä altistettiin kohotetulle UV-B-säteilylle, kymmentä kohotetulle UV-A-säteilylle ja kymmentä luonnolliselle taustasäteilylle. Näytteitä kerättiin kammiomenetelmällä Tenax:lla ja Carbopack:lla täytettyihin näyteputkiin, jotka analysoitiin Kuopion yliopistolla kaasukromatografi-massaspektrometrillä.

Kesän mittauksissa UV-B-käsittelyn havaittiin kohottavan isopreenipäästöä tilastollisesti merkitsevästi, vaikka kohotetun UV-B-säteilytason korotus, 20 %, vallitsevan säteilyn yläpuolella jäi alle puoleen tavoitetasosta (46 %). Mittausten keskimääräinen standardoitu isopreenipäästö kesän aikana oli $53 \pm 72 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Isopreenipäästö kasvoi lämpötilan noustessa ja suurimmat isopreenipäästöt mitattiinkin viimeisillä mittauskierroksilla elokuun aikana, jolloin myös tilastollisesti merkitsevä UV-B-käsittelyvaikutus oli havaittavissa.

Monoterpeenipäästöön UV-B-käsittelyllä ei kokonaisuutena tarkasteltuna ollut vaikutusta. Kesän mittausten keskimääräinen standardoitu monoterpeenipäästö oli $4 \pm 6 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, päästön ollessa suurimmillaan kesän ensimmäisten mittauskierrosten aikana. Limoneeni, α -pineeni ja sabineeni muodostivat pääosan monoterpeenipäästöistä.

Tässä tutkimuksessa mitatut isopreenipäästöt olivat noin 20 kertaa pienempiä kuin aiemmissa tutkimuksissa boreaalisilta soilta raportoidut päästöt. Matalasta UV-B-säteilyn kohotuksesta huolimatta UV-B-käsittelyn isopreenipäästöä suurentava vaikutus oli lämpimänä jaksena selkeästi havaittavissa.

Monoterpeenien osalta vastaavia UV-tutkimuksia ei ole aikaisemmin julkaistu. Boreaalisilta soilta määritetyt monoterpeenipäästöt ovat esimerkiksi limoneenin osalta neljä kertaa suurempia kuin tässä tutkimuksessa subarktisella suolla havaitut. Vaikka suoalueiden osuus subarktisella ja boreaalisella vyöhykkeellä on merkittävä, tietoja monoterpeenipäästöjen merkitsevyydestä ei ole.

Pitkäaikaisia tutkimuksia UV-B-säteilyn vaikutuksista isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin tulee jatkaa, jotta UV-B-säteilyn ja vuosittaisen vaihtelun merkitys päästöön saadaan selvitettyä.

UNIVERSITY OF KUOPIO, Faculty of Natural and Environmental Sciences
Department of Environmental Science, Environmental Science
Janne Räsänen: The effects of UV-B radiation on isoprene and monoterpene emissions
from a sub-arctic peatland
Master´s thesis 44 p.

Advisors: Professor Jarmo Holopainen
 PhD Riikka Rinnan
 MSc Päivi Tiiva

April 2007

Keywords: Isoprene, Monoterpene, VOC, UV radiation, Peatland, *Eriophorum
russeolum*

Human activities causes climate warming and thinning of stratospheric ozone layer which as a whole causes changes in the environment of organisms. Aim of this study was to examine changes in isoprene and monoterpene fluxes caused by increasing UV-B radiation.

The effects of UV-B radiation to isoprene and monoterpene fluxes from sub-arctic peatland were studied in a flark fen in Sodankylä between 5 June and 15 August in 2006. There were 30 randomly placed experimental plots in the research field of which ten were exposed to increased UV-B radiation, other ten to increased UV-A radiation and the rest ten were exposed to natural background radiation. Samples were collected into tubes filled with Tenax and Carbopack adsorbents by chamber technique. Samples were analysed by gas chromatography mass spectrometer in University of Kuopio.

UV-B radiation was found to statistically increase isoprene emission in the measurements of summer 2006 although the increase in UV-B radiation was only 20 % compared to ambient (aim was 46 % increase). Mean standardised isoprene emission in the summer was $53 \pm 72 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Isoprene emissions tended to increase with increasing temperature, and the highest isoprene emissions were measured in the last measurement round in August when statistically significant treatment effects were also observed.

UV-B treatment didn't have overall effects on monoterpene emission. Mean standardised monoterpene emission was $4 \pm 6 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, and the emissions were highest during the first measurement rounds. Limonene, α -pinene and sabinene were the main parts of the monoterpene emission.

In this study, isoprene emissions were 20 times smaller than those in previous studies from boreal peatlands. In spite of the low increase in UV-B radiation, the increase in isoprene emissions was clearly observed in UV-B treatment in the warm period.

UV radiation effects on monoterpene emissions haven't been studied before. For example, limonene emissions from boreal peatlands are four times higher than observed from sub-arctic peatland in this study. Although there are very large peatlands in the boreal and sub-arctic region, the significance of monoterpene emissions from these areas is not clear.

Long-term experiments of UV-B radiation effects on isoprene and monoterpene emissions should be conducted to find out UV-B radiation effects and the significance of annual variety to emissions.

ESIPUHE

Tämä työ on tehty osana kolmevuotista Emil Aaltosen Säätiön rahoittamaa projektia ”Pohjoisten ekosysteemien haihtuvat hiilivety päästöt – kasvilajien ja maaperän merkitys sekä vasteet ilmastonmuutokselle”. Haluankin tässä esittää syvimmat kiitokseni projektin johtajalle ja päättötyöni ohjaajalle FT Riikka Rinnanille. Kiitos Riikka tämän työn mahdollistamisesta sekä rakentavista ja kannustavista kommentteista pitkin kirjoitustyötä.

Suuren suuret kiitokset myös FM Päivi Tiivalle, joka väsymättömästi toimi lähimpänä ohjaajanani ja oli aina valmiina vastailemaan loputtomiin kysymyksiini sekä antamaan kehittäväää palautetta tuotoksistani. Kiitokset myös ohjaajalleni ma. professori Jarmo Holopaiselle asiantuntija-avusta.

Kiitokset Timo Oksaselle tutkimuslaitteiden teknisestä toteutuksesta. Mia Åbergille kiitos kenttäärien jakamisesta. Suuri kiitos kenttätyöhön perehdyttämisestä (Päivin ohella) Patrick Faubertille. Sinun kanssasi oli ilo työskennellä ja saunoa!

Vanhemmille tämä tuotos toimikoon kiitoksena tuesta opintojen aikana. Nooralle kiitos pitkästä pinnasta ja että osaltasi mahdollistit tämän työn suorituksen.

KUOPIOSSA 24.4.2007

Janne Räsänen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	7
2. SUO.....	8
2.1 Suon määritelmä, muodostuminen ja luokittelu.....	8
2.2 Suokasvillisuus.....	9
2.3 Suot hiilinieluinä ja -lähteinä	9
3. ISOPREENI JA MONOTERPEENIT	11
3.1 Yleistä	11
3.2 Syntetisointi ja varastointi kasveissa.....	12
3.3 Päästöt soista ja suokasvillisuudesta	13
3.4 Isopreeni ja monoterpeenit ilmakehässä	13
4. ULTRAVIOLETTISÄTEILY	14
4.1 Yleistä ultravioletisäteilystä.....	14
4.2 Otsonikato lisää ultravioletisäteilyn määrää	14
4.3 UV-B-säteilyn vaikutukset suokasvien toimintaan.....	16
4.4 Spektrien painottaminen UV-B-säteilyn mittauksissa	17
5. TUTKIMUKSEN TARKOITUS	19
6. AINEISTO JA MENETELMÄT	20
6.1 Tutkimusalueen kuvaus.....	20
6.2 UV-altistus	22
6.3 VOC-yhdisteiden keräys	23
6.4 Isopreenin ja monoterpeenien analysointi.....	24
6.5 Isopreeni- ja monoterpeenipitoisuuksien vakioiminen	24
6.6 Tilastolliset analyysit	26

7. TULOKSET	27
7.1 UV-B-säteily kasvukaudella 2006	27
7.2 Isopreeni	28
7.3 Monoterpeenit	30
7.3.1 Kokonaismonoterpeenipäästö	30
7.3.2 Limoneenipäästö	32
7.3.3 α -pineenipäästö	33
8. TULOSTEN TARKASTELU	34
9. JOHTOPÄÄTÖKSET	37
10. LÄHDELUETTELO	38

1. JOHDANTO

Maapallon keskilämpötilan ennakoidaan nousevan muutamilla asteilla, ja napa-alueilla lämpenemisen odotetaan olevan vielä keskimääräistä suurempaa (Richter-Menge ym. 2006). Ilmaston muutokset ovat maailman historiassa tavallisia, mutta nyt ihmisen toiminnan seurauksena vapautuvien kasvihuonekaasujen on osoitettu nopeuttavan ilmaston lämpenemistä merkittävästi.

Ilmaston lämpenemisen lisäksi ihmisen toiminta aiheuttaa yläilmakehän otsonikerroksen ohenemista (WMO 2006). Otsonikadon seurauksena yhä suurempia pitoisuuksia auringon ultraviolettisäteilyä pääsee maan pinnalle (Taalas ym. 2000). Lisääntyvä UV-säteilyn määrä, kohoava lämpötila ja muut ympäristön muutokset voivat aiheuttaa muutoksia eliöiden ja kasvillisuuden levinneisyyksissä ja toiminnassa. Erityisesti kasvillisuuden tiedetään olevan merkittävä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) lähde, ja mahdolliset ympäristömuutosten aiheuttamat vaikutukset näiden kasvien signaali- ja puolustusaineiden eritykseen on tärkeä tunnistaa (Guenther ym. 1995).

Maapallon pohjoisosassa sadanta on haihdunutta suurempaa viileän ilmaston johdosta (Laine & Vasander 1998). Ilmaston johdosta suot ovatkin tyypillisiä boreaalisella vyöhykkeellä. Boreaalisilla ja arktisilla soilla on merkittävä osuus ilmakehän hiiliyhdisteiden sidonnassa ja päästölähteenä (Turunen ym. 1998; Janson & De Serves 1998).

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää kohotetun UV-säteilyn vaikutuksia subarktisen suon isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin. Seuraavissa kappaleissa on koottuna perustietoja tutkimukseen liittyvistä aiheista. Ensimmäisenä on nostettu esille soiden kehittymisen ja Suomen soiden perustyytit, sekä soiden merkityksen hiilen kierrossa. Suo -osion jälkeen on tietoja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästölähteistä ja ilmakehävaikutuksista. Kolmannessa osiossa on perusteita UV-säteilystä ja sen kasvillisuudelle aiheuttamista vasteista. Lopulta tässä työssä havaittuja UV-B-säteilyn käsittelyvaikutuksia on tarkasteltu aiempien tutkimusten havaintoihin pohjautuen.

2. SUO

2.1 Suon määritelmä, muodostuminen ja luokittelu

Käsitteenä suo on ymmärrettävissä kahdella tavalla: Biologisesti tarkasteltuna suolla tarkoitetaan turvetta muodostavia kasviyhdyskuntia, kun taas geologisesti tarkasteltuna suo on turvekerrostuma, jossa voi olla myös lieju- ja mutaesiintymiä, mutta ei välttämättä kasvillisuutta. Erilaiset suokäsitteet eivät ole toisiaan poissulkevia, mutta geologisella määritelmällä viitataan suon kuolleeseen osaan, kun taas biologinen määritelmä perustuu suon elävään osaan. Määritelmien ero korostuu esimerkiksi turvealueilla, joilla kasvillisuus on täysin hävinnyt tai alueilla, joilla esiintyy suokasvillisuutta, mutta varsinaista turvekerrosta ei vielä ole (Kivinen 1948; Laine & Vasander 1998).

Suot muodostuvat lähinnä vesistöjen umpeenkasvun, tulvamaiden soistumisen, mineraalimaan soistumisen ja merestä nousevan maan soistumisen seurauksena. Jäätyminen ja voimakas aallokko voi haitata vesistöjen umpeenkasvua, mutta matalilla paikoilla umpeutuminen on kuitenkin mahdollista. Myös helposti tulvivat alueet, kuten alavat jokien ja purojen varret ovat alttiina soistumiselle. Soistumisen edellytyksenä tulvivilla mailla on kuitenkin, että jatkuvat tulvat eivät peitä kehittyvää suoaluetta vaan maa pysyy kosteana tulvien mukana tulleen lietteen takia. Mineraalimaat voivat soistua, jos huonosti vettä läpäiseville maille alkaa lumien sulaessa tai kovien sateiden johdosta muodostua kosteikkoja. Pikkuhiljaa kosteikot voivat yhdistyä, ja alkuperäinen kasvillisuus puuttuaan mukana lukien alkaa hävitä alueelta märkyyden ja turvekerroksen takia. Hyvin vettä läpäisevillä alueilla soiden syntyminen on mahdollista pohjavedenpinnan noustessa tarpeeksi korkealle (Kivinen 1948).

Suot luokitellaan ravinne- ja vesitalouden mukaan kahteen luokkaan. Minerotrofiset suot saavat veden ja ravinteet valunnan, pohjaveden ja sateiden mukana. Ombrotrofiset suot puolestaan saavat veden ja ravinteet pelkästään sadeveden mukana (Laine & Vasander 2005).

2.2 Suokasvillisuus

Suot jaotellaan niille tyypillisen kasvillisuuden mukaan neljään pääluokkaan. Korpia ovat suot, joissa puusto koostuu yleensä kuusista, mutta joskus myös koivuista tai pajuista. Rahkasammalet (*Sphagnum* sp.), kerrossammalet (*Hylocomium* sp.) ja seinäsammal (*Pleurozium schreberi*) ovat tyypillisiä korpisoilla, kuten myös monet varvut ja ruohot (Kivinen 1948; Laine & Vasander 1998).

Rämeitä ovat puolestaan kituliaasti mäntyä, mutta yleensä hyvin runsaasti varpua (esim. *Andromeda polifolia* ja *Vaccinium oxycoccos*) kasvavat suot. Rämeissä sammalisto voi olla samantyyppistä kuin korvissa, mutta pohjakerroksessa ei yleensä ole kovin runsaasti ruohoja (Kivinen 1948).

Nevoille tyypillistä on korkea pohjaveden pinta, joka ylettyy suuren osan kasvukaudesta lähelle suon pintaa. Nämä vetiset suot ovat usein hyvin aukeita, ja kasvillisuus määräytyy pitkälti pohjaveden korkeuden mukaan. Sammalisto koostuu lähinnä rahkasammalista, joskin vetisimmiltä alueilta myös ne voivat puuttua. Sarakasveja nevoilla voi olla paikoin hyvin runsaasti (esim. *Carex limosa* ja *Carex magellanica*). Ruohoja (esim. *Menyanthes trifoliata*) nevoilla on hyvin vähän samoin kuin varpuja (esim. *Vaccinium oxycoccos*) (Kivinen 1948).

Letot ovat usein aukeita soita, jotka määritellään niiden ruskosammaleisuuden mukaan. Letoille tyypillistä on runsasravinteisuus (typpi ja kalsium) ja korkea pH. Kasvupaikkansa suhteen vaateliaat ruskosammallajit (esim. *Tomentypnum nitens*), lettorikko (*Saxifraga hirculus*) ja vaateliaat sarat (esim. *Carex flava*) ovat lettojen tunnuskasveja (Laine & Vasander 1998).

2.3 Suot hiilinieluinä ja -lähteinä

Kasvit ja muut suolla kasvavat eliöt sitovat kasvaessaan hiiliyhdisteitä. Hapettomat ja viileät olosuhteet suon vedenpinnan alla aiheuttavat orgaanisen materiaalin hajoamisen huomattavan hidastumisen, mikä tekee soista merkittäviä hiiliyhdisteiden nieluja, mutta

samalla myös huomattavia metaanin lähteitä. Suot ovat myös hiilidioksidin lähteitä eliöiden soluhengityksen ja hapellisissa osissa tapahtuvan orgaanisen aineksen hajoamisen takia, mutta nettovaikutukseltaan suot toimivat kuitenkin hiilinieluinä (Turunen ym. 2002; Laine & Vasander 1998; Cao ym. 1996).

Turunen ja kumppanit (2002) ovat mallintaneet boreaalisten ja arktisten soiden sisältämän hiilen määräksi 270–370 Pg (1 Pg = 10^{15} g). Soiden arvioidaan sitovan vuosittain noin 66 Tg (1 Tg = 10^{12} g) hiiltä. Suomen soiden sisältämän hiilen määräksi on arvioitu 2257 Tg ja vuotuisen sidonnan on laskettu olevan 0,79 Tg (Turunen ym. 2002).

Suot tuottavat huomattavan määrän metaania, ja niiden arvellaan olevan ilmakehässä olevan metaanin päälähde (Cao ym. 1996). Metaani muodostuu turpeen hapettomassa kerroksessa metaania muodostavien mikrobien toimesta. Osa syntyneestä metaanista hapetetaan hiilidioksidiksi turpeen hapellisessa kerroksessa metaania hapettavien mikrobien toimesta. Muodostunut metaani kulkeutuu ilmakehään kuplinnan, diffuusion tai kasvien tuuletussolukoiden kautta. Cao ja kumppanit (1996) ovat laskeneet kaikkien soiden vuotuiseksi metaanin tuotoksi 92 Tg. Pohjoisten soiden metaanin tuotoksi on arvioitu $40 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Cao ym. 1996).

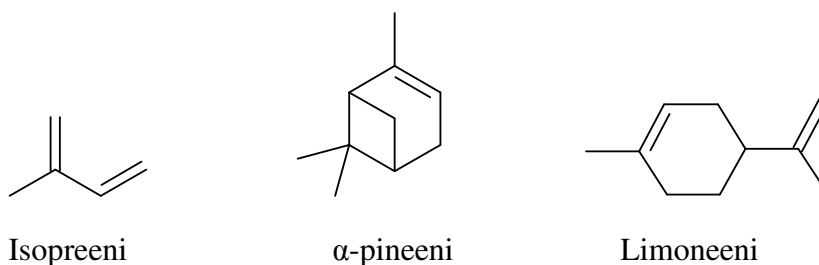
Hiilidioksidin ja metaanin muodostukseen vaikuttavat monet tekijät. Kaasujen muodostuminen ja vapautuminen riippuvat kasvillisuudesta, käytettävistä hiilivaroista, orgaanisen materiaalin hajoamisnopeudesta, maaperän kosteudesta, metaania muodostavien mikrobien aktiivisuudesta, vedenpinnan korkeudesta ja sääolosuhteista (Cao ym. 1996; Bubier ym. 2003).

3. ISOPREENI JA MONOTERPEENIT

3.1 Yleistä

Biogeenisillä haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä (volatile organic compounds, VOC) tarkoitetaan ilmakehän orgaanisia kaasuja pois lukien hiilidioksidi ja -monoksidi. Tässä tutkimuksessa myös metaani on jätetty pois VOC:eista puhuttaessa. Biogeenisiä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä ovat alkaanit, alkeenit, karbonyylit, alkoholit, esterit, eetterit ja hapot sekä näiden kaikkien tyydyttyneet, tyydyttymättömät ja hapettuneet johdannaiset (Kesselmeier & Staudt 1999).

Ilmakehän VOC:eista terpeeneihin kuuluvat isopreeni ja monoterpeenit ovat metaanin jälkeen runsaslukuisimmat. Biogeenisistä lähteistä arvioidaan vapautuvan VOC:eja noin 1150 Tg hiiltä vuodessa, josta 44 % on isopreeniä ja 11 % monoterpeenejä (Guenther ym. 1995). Ihmisen toiminnan seurauksena arvioidaan vapautuvan vain kymmenesosa biogeenisten VOC:ien määrästä eli noin 149 Tg hiiltä vuodessa (Müller ym. 1992).



Kuva 1. Vasemmalla hemiterpeenin (C_5 , isopreeni) ja oikealla kahden yleisen monoterpeenin (C_{10} , α -pineeni ja limoneeni) rakennekaavat.

Terpeenit ovat biogeenisiä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, joiden runko muodostuu viiden hiilen (C_5) yksiköistä (Kuva 1). Rungossa olevien viiden hiilen ketjujen lukumäärän mukaan terpeenit luokitellaan seitsemään ryhmään: hemiterpeenit (C_5 , esim. isopreeni), monoterpeenit (C_{10} , esim. α -pineeni ja sabineeni), seskviterpeenit (C_{15} , esim. β -caryofylleeni), diterpeenit (C_{20} , esim. fytoli), triterpeenit (C_{30} , esim. sterolit),

tetraterpeenit (C_{40} , esim. karotenoidit), sekä prenilit ja polyterpeenit ($>C_{45}$, esim. plastokinonit) (Kesselmeier & Staudt 1999).

Kemialliselta rakenteeltaan isopreeni (2-metyyli-1,3-butadieeni) on alkeeni. Monoterpeenit voivat olla avoketjuisia, mono-, bi- ja trisyklisiä yhdisteitä, jotka voivat esiintyä myös hapettuneessa muodossa (Kesselmeier & Staudt 1999).

3.2 Syntetisointi ja varastointi kasveissa

Isopreeni- ja monoterpeenisynteeseissä tarvittavaa isopentenyylipyrofosfaattia tuotetaan kasveissa kahta erilaista biokemiallista reittiä. Lähtöaineina isopentenyylipyrofosfaatin muodostuksessa käytetään palorypälehappoa (pyruvaatti) tai asetyylikoentsyymiA:ta. Isopreenisynteesi tapahtuu täysikasvuissa viherhiukkasissa, kun taas monoterpeenit muodostuvat plastideissa (Kesselmeier & Staudt 1999). Kaikki kasvit eivät tuota isopreeniä tai monoterpeenejä lainkaan (Kesselmeier & Staudt 1999).

Isopreeniä ei varastoida kasviin vaan sitä tuotetaan tarpeen mukaan. Ilmarakojen toiminnalla ei ole vaikutusta isopreenipäästöön vaikkakin isopreeni vapautuu kasvista ilmarakojen kautta. Valon ja lämpötilan on havaittu vaikuttavan isopreenipäästöön (Sharkey & Yeh 2001). Isopreenipäästö kasvaa vielä sen jälkeenkin, kun fotosynteesi saavuttaa maksimitohon tai alkaa pienentyä. Vallitsevien teorioiden mukaan isopreeni toimii kasvin suoja-aineena liian suurilla valomääriä ja lämpötiloilla vastaan, joko energiatalouden kautta (isopreenin muodostus) tai kemiallis-fysikaalisena suoja-aineena (Lerdau & Gray 2003).

Toisin kuin isopreeniä, monoterpeenejä voidaan varastoida kasveissa esim. pihkatiehyissä. Monoterpeenien on ajateltu toimivan isopreenin tavoin äärimmäisten valo- ja lämpötilaolosuhteiden suojana (Lerdau & Gray 2003). Monoterpeenipäästöjen on joskus havaittu noudattavan lämpötila- ja valoriippuvuutta, kun taas toisinaan riippuvuutta ei ole ollut havaittavissa (Lerdau & Gray 2003; Loreto ym. 1998). Monoterpeeneillä on myös merkittävä rooli kasvin kemiallisessa puolustautumisessa kasvinsyöjiä vastaan ja pölyttäjien houkuttelussa (Vuorinen ym. 2004).

3.3 Päästöt soista ja suokasvillisuudesta

Suoalueilta ja suokasvillisuudesta vapautuvia isopreeni- ja monoterpeenipäästöjä on tutkittu vielä melko vähän, vaikka soiden on osoitettu olevan merkittäviä VOC-lähteitä (Janson & De Serves 1998; Janson ym. 1999; Haapanala ym. 2006; Tiiva ym. 2007). Julkaistut tutkimukset painottuvat lähinnä boreaalisille rahkasammalvaltaisille soille, mutta tutkimuksia pohjoisemmilta ja muun kasvillisuuden vallitsemilta soilta ei ole.

Soilla tehdyissä isopreeni- ja monoterpeenitutkimuksissa ei ole yleensä tutkittu kasvillisuuden vaikutusta päästöön (Janson & De Serves 1998; Janson ym. 1999; Haapanala ym. 2006). Tiiva ja kumppanit (2007) ovat havainneet tilastollisesti merkitsevän korrelaation tupasvillan lehtitiheyden ja isopreenipäästön välillä. Lisäksi Hanson ja kumppanit (1999) ovat osoittaneet rahkasammalien (*Sphagnum*) tärkeyden isopreenin lähteenä.

3.4 Isopreeni ja monoterpeenit ilmakehässä

Ilmakehään vapautuvat isopreeni ja monoterpeenit eivät ole kasvihuonekaasuja, vaan tieteellinen kiinnostus kohdistuu näiden helposti haihtuvien orgaanisten yhdisteiden reaktioherkkyyteen ja ilmakehävaikutuksiin (Atkinson 2000). Haihtuvat orgaaniset yhdisteet reagoivat hyvin nopeasti ilmakehässä olevien otsonimolekyylien (O_3), hydroksyyli- (OH) ja typpioksidiradikaalien (NO_3) kanssa. Isopreenin ja monoterpeenien reaktiot ilmakehässä riippuvat radikaali- ja otsonimolekyylien määrästä, mutta Suomessa vallitsevilla pitoisuuksilla reaktiot tapahtuvat usein minuuteista tunteihin aikajaksolla (Atkinson & Arey 2003; Hakola 2001).

Isopreenin ja monoterpeenien reaktiot ilmakehässä tuottavat kasveille ja eläimille haitallista alailmakehän otsonia, orgaanisia happeja ja useita muita sekundäärisiä aerosoleja (Atkinson & Arey 2003; Hoffmann ym.1997). Sharkey ja Yeh (2001) ovat katsauksessaan tuoneet esille monoterpeenien taipumuksen hapettuessaan muodostaa sateenmuodostuspartikkeleita. Myöhemmin myös isopreenillä on osoitettu olevan samanlainen taipumus muodostaa sateenmuodostuspartikkeleita (Claeys ym. 2004).

4. ULTRAVIOLETTISÄTEILY

4.1 Yleistä ultraviolettisäteilystä

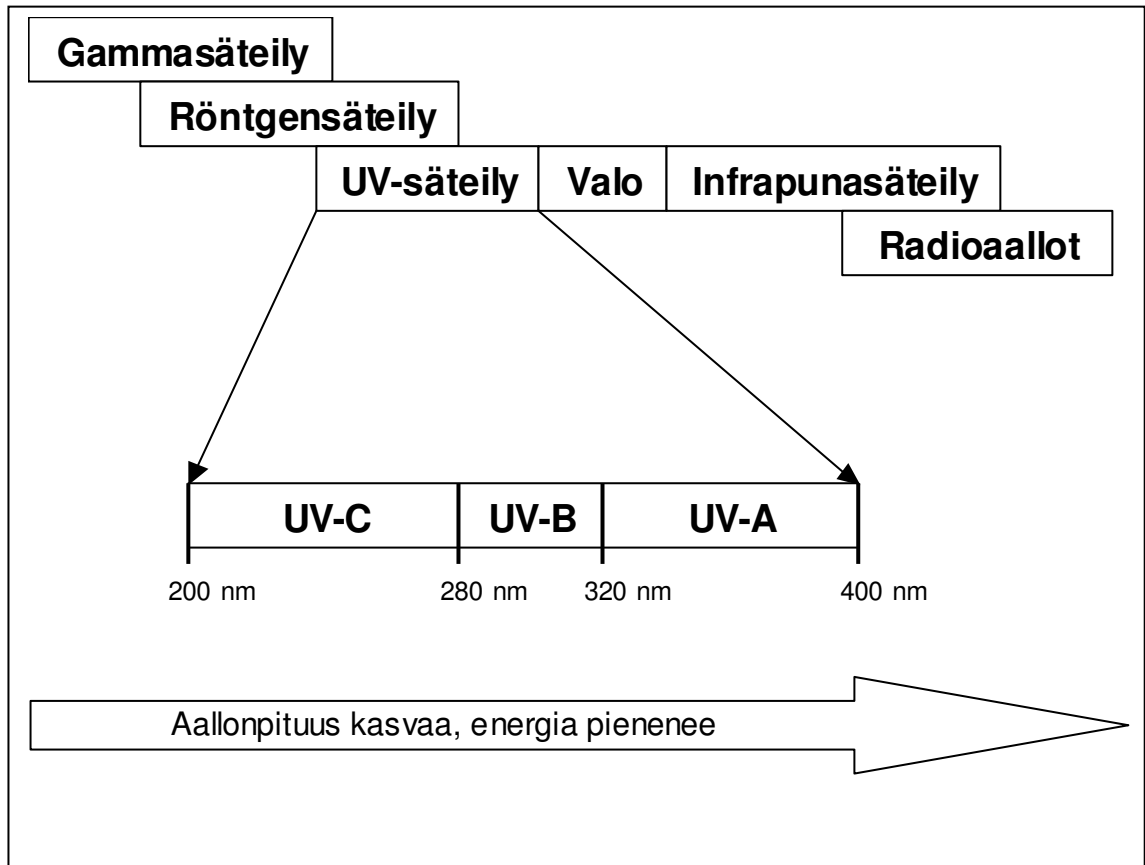
Maapalloon kohdistuu auringon ultraviolettisäteilyä, joka jaotellaan kolmeen ryhmään aallonpituuden perusteella (Kuva 2). Ultravioletti-A-säteily (UV-A, 320–400 nm) muodostaa noin 95 prosenttia saapuvasta säteilymäärästä. Enemmän energiaa sisältävää ultravioletti-B-säteilyä (UV-B, 280–320 nm) alailmakehään pääsee vain noin 5 prosenttia, kun taas erittäin polttava ultravioletti-C-säteily (UV-C, 200–280 nm) suodattuu täysin yläilmakehän (stratosfääri) otsonikerroksessa. UV-A-säteilyn on havaittu tunkeutuvan helpommin kudoksiin, mutta UV-B-säteilyn on havaittu olevan vaikutuksiltaan voimakkaampaa, vaikka sitä on vain murto-osa maahan saapuvasta säteilystä (STUK 2000).

4.2 Otsonikato lisää ultraviolettisäteilyn määrää

Kolmen happiatomin muodostamista otsonimolekyyleistä (O₃) koostuva, maapalloa auringon liialliselta UV-säteilyltä suojaava otsonikerros sijaitsee 12–45 kilometrin korkeudella stratosfäärissä (WMO 2006). Stratosfäärin otsonikerroksessa havaittiin aukkoja ensimmäisen kerran Etelämantereen yläpuolella (Farman ym. 1985). Tietämyksen lisääntyessä otsonikadon on osoitettu johtuvan pääosin ihmisen toimien seurauksena ilmakehään vapautuvista aineista. Merkittävimpiä otsonia tuhoavia yhdisteitä ovat muun muassa kylmälaitteissa käytetyt freonit (kloorifluorihiilivedyt, CFC), muut halogenoidut hiilivedyt ja typenoksidit (Graedel & Crutzen 1993; Stolarski ym. 1992). Otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden käyttöä on onnistuttu vähentämään kansainvälisillä sopimuksilla (Montrealin pöytäkirja 1987).

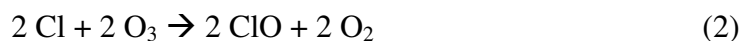
Taalas ja kumppanit (2000) ovat arvioineet, että otsonikadon seurauksena lisääntyvä UV-säteilyannos olisi keväänä 2010–2020 boreaalisilla ja arktisilla (60–90 °N) alueilla 90 prosenttia suurempi kuin keväänä 1979–1992 keskimäärin. Otsonin määrän odotetaan kääntyvän nousuun yläilmakehässä vuoden 2020 paikkeilla, mikä vähentäisi maahan pääsevän UV-säteilyn määrää. Tilanteen korjaantumiseen menevää aikaa ei

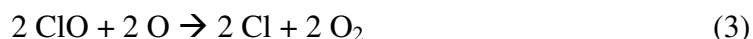
osata kuitenkin tarkasti ennustaa vaan otsonikerroksen korjautumiseen menevä aika riippuu ilmaston muutoksen kehityksestä ja siitä kuinka hyvin Montrealin pöytäkirjan vaatimukset toteutuvat (Taalas ym. 2000; WMO 2002).



Kuva 2. Sähkömagneettisen säteilyn spektri. Säteilyn aallonpituus vaihtelee gamma-säteilyn 10^{-13} m aallonpituudesta radioaaltojen kilometrien pituisiin aaltoihin. Aallonpituuden kasvaessa säteilyn energia pienenee.

Happimolekyylin (O_2) hajoaminen UV-säteilyn vaikutuksesta on esitettyä kaavassa (1). Kaavassa (2) on otsonimolekyylin pilkkoutuminen klooriatomin vaikutuksesta. Reaktioiden (1) ja (2) tuloksena tapahtuu reaktio (3) jossa vapautuu edelleen klooriatomeja, jotka voivat jatkaa otsonin pilkkomista. Nettoreaktio tapahtumasarjalle on esitettyä kaavassa (4).





4.3 UV-B-säteilyn vaikutukset suokasvien toimintaan

Kasvien vihreissä lehdissä on UV-B-säteilyä absorboivia flavonoideja, jotka toimivat yhteyttävien solukoiden suojana UV-B-säteilyä vastaan (Ormrod ym. 1995; Harborne & Williams 2000). Searles ja kumppanit (2001) ovatkin havainneet, että UV-B-säteilyä absorboivien yhdisteiden kerääntyminen lehtiin on yksi tyypillisimmistä kohonneen UV-B-säteilyn aiheuttamista muutoksista johtojänteellisissä kasveissa. UV-B-säteilyn onkin havaittu vaikuttavan merkittävästi herbivorian määrään mustikassa ja juolukassa (*Vaccinium myrtillus* ja *Vaccinium uliginosum*) verrattuna kontrollikasveihin, mikä voi olla seurausta kasvien fysiologisista ja kemiallisista muutoksista (Gwynn-Jones ym. 1997). UV-B-säteilyn vaikutuksista sarojen flavonoidien määrään ei ole julkaistua tietoa.

Kasvien vasteissa UV-säteilyyn voi olla vuosittaista vaihtelua. Niemi ja kumppanit (2002a, b) raportoivat kohotetun UV-B-säteilyn vaikutuksesta ilmenneistä morfologisista muutoksista tupasvillan (*Eriophorum vaginatum*) lehdissä kasvukaudella 1999, mutta vastaavia muutoksia ei havaittu matalamman UV-B-säteilytason kasvukaudella 2000.

Useimmilla sammalilla lehdet ovat vain yhden solukerroksen paksuisia ja niiltä puuttuu kutikulan antama suoja UV-säteilyä vastaan. Sammalien vesitalous on myös voimakkaasti riippuvainen ilmakehän kosteudesta, joten voimakas auringon säteily voi johtaa fysiologisen aktiivisuuden laskuun. Juurettomana sammalet eivät voi kompensoida maanpäällistä stressiä sijoittamalla yhdisteitä maanalaisiin varastoihin (Boelen ym. 2006).

Tutkimukset UV-B-säteilyn aiheuttamista DNA-vaurioista ovat osoittaneet sammalien olevan hyvin sopeutuneita vallitsevaan UV-B-säteilyn tasoon. Kohotetun UV-B-säteilyn ja vallitsevan UV-B-säteilyn välillä ei ole havaittu merkitseviä eroja DNA-vaurioiden osalta (Boelen ym. 2006). Lisäksi useissa tutkimuksissa on havaittu, että kohotetulla

UV-B-säteilyllä ei ole vaikutusta UV-B-säteilyä absorboivien yhdisteiden määriin sammalissa (Niemi ym. 2002b; Searles ym. 2002; Lud ym. 2003). Kenttätutkimuksissa sammalien (esimerkiksi *Sanionia uncinata*, *Sphagnum fuscum* ja *Bryum argenteum*) fotosynteesissä ei ole havaittu muutoksia kohotetun tai madalletun UV-B-säteilyn vaikutuksesta (Gehrke 1998; Green ym. 2000; Huiskes ym. 2001; Lud ym. 2002, 20003; Newsham ym. 2002). UV-B-säteilyn ei ole myöskään havaittu aiheuttavan muutoksia lehtivihreän määrässä useimmilla tutkituilla sammallajeilla (Gehrke 1999; Searles ym. 1999, 2002; Niemi ym. 2002a, 2002b; Newsham 2003).

4.4 Spektrien painottaminen UV-B-säteilyn mittauksissa

UV-altistuskokeissa halutaan usein altistaa kasvit tietyn suuruisen otsonikadon aiheuttamalle lisääntyneelle UV-säteilylle. Lampuilla kohotettu UV-säteily ei kuitenkaan täysin vastaa otsonikadon seurauksena maahan tulevaa auringon UV-säteilyn intensiteettiä (Björn 1999; Flint & Caldwell 2003). Lampuilla kohotetun UV-säteilyn tasoa on tarkkailtava antureilla, jotka painottavat tutkittavalle kohteelle merkityksellisiä UV-säteilyn aallonpituuksia (Björn 1999; Flint & Caldwell 2003). Kun tutkittavalle kohteelle merkitykselliset aallonpituudet asetetaan vastaamaan halutun suuruisen otsonikadon seurauksena maanpäällä kohoavaa UV-säteilyn tasoa, saadaan altistuslaitteisto vastaamaan vaikutuksiltaan mahdollisimman lähelle todellista auringon UV-säteilyn nousua.

Flint & Caldwell (2003) raportoivat kauran (*Avena sativa*) vasteita viidelle eri UV-säteilyn aallonpituudelle (275, 297, 302, 313 ja 366 nm). Lyhyillä aallonpituuksilla UV-säteilyn havaittiin estävän kauran taimen sekä ensimmäisen lehden kasvua paljon pienemmällä annoksilla kuin pidemmällä aallonpituuksilla. Toisaalta toisen lehden kasvu hidastui UV-A-säteilyn (366 nm) vaikutuksesta, kun taas muiden kokeessa käytettyjen aallonpituuksien (UV-B) havaittiin nopeuttavan toisen lehden kasvua (Flint & Caldwell 2003).

Usein kasvivaikutustutkimuksissa käytetään antureita, jotka määrittävät UV-säteilyn tason käyttämällä ihmisen iholle punoitusta ja palovammoja aiheuttavia eli eryteemapainotettuja aallonpituuksia (Jalarvo 2000; Niemi ym. 2002a, b; Tiiva ym.

lähetetty). Eryteemapainotettujen anturien käyttö johtuu säänkestävien kasvivastepainotettujen anturien puutteesta. Eryteema on pääasiassa UV-B-säteilyn vaikutuksesta aiheutuvaa (Jalarvo 2000), joten sen mukaisesti UV-säteilyä tuottavien ja mittaavien altistuslaitteistojen soveltuvuus kasvivaikutustutkimuksiin on perusteltua.

5. TUTKIMUKSEN TARKOITUS

Ihmisen toiminnan seurauksena ilmakehän otsonikerros on ohentunut ja tulee ohenemaan entisestään tulevina vuosina. Lisääntyvä otsonikato altistaa maanpäällistä elämää yhä suuremmalle UV-säteilyn määrälle. Kuten edellisissä kappaleissa on tuotu esille lisääntyvä UV-säteily voi saada kasveissa aikaan huomattavia fysiologisia muutoksia. Kasvien kemiallisessa toiminnassa voi olla havaittavissa muutoksia paljon ennen selviä fysiologisia muutoksia. Kasvit voivat puolustautua kohonneen UV-säteilyn vaikutuksia vastaan mm. lisäämällä kemiallisten puolustusaineiden, kuten flavonoidien, synteesiä (Searles ym. 1999).

Aiempien tutkimusten perusteella tiedetään boreaalisten soiden merkitys VOC-lähteinä (Janson & De Serves 1998; Janson ym. 1999; Haapanala ym. 2006), mutta arktisten soiden VOC päästöistä ei ole julkaistua tietoa. Tutkimuksia UV-B-säteilyn ekologisen tason vaikutuksista boreaalisen suon haihtuviin hiilivetyihin on julkaistu vain metaanin osalta (Niemi ym. 2002b). Kasvien VOC-päästöjen vasteita on tietääkseni mitattu vain tammella (*Quercus gambelii*), jonka isopreenipäästöä 30 % otsonikatoa vastaavan UV-B-säteilytason havaittiin kasvattavan (Harley ym. 1996).

Tämän työn tarkoituksena oli lisätä tietämystä otsonikadon seurauksena kohoavan UV-B-säteilyn vaikutuksesta arktisen suon isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin. Koska kohotetun UV-B-säteilyn on raportoitu lisäävän tammen isopreenipäästöä (Harley ym. 1996), tutkimukselle asetettiin vaihtoehtohypoteesi (H_1):

H_1 : ”Subarktisen suon altistaminen 46 % vallitsevaa tasoa suuremmalle UV-B-säteilyn tasolle kasvattaa suolta erittyvää isopreeni- ja monoterpeenipäästöä.”

ja nollahypoteesi (H_0):

H_0 : ”Subarktisen suon altistaminen 46 % vallitsevaa tasoa suuremmalle UV-B-säteilyn tasolle ei kasvata suolta erittyvää isopreeni- ja monoterpeenipäästöä.”

6. AINEISTO JA MENETELMÄT

6.1 Tutkimusalueen kuvaus

UV-B-säteilyn vaikutuksia suon isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin tutkittiin luonnontilaisella minerotrofisella rimpinevalla (Laine & Vasander 2005) kasvukaudella 2006. Sodankylässä (67°22'N, 26°38'E, 179 m merenpinnan yläpuolella) Oulun yliopiston Geofysikaalisen observatorion ja Lapin ilmatieteellisen tutkimuskeskuksen läheisyydessä sijaitseva tutkimusalue on osa laajempaa suokokonaisuutta, Halssiaapaa.

Koeruutujen kasvillisuus koostui pääosin kattavasta *Warnstorfia exannulata* (hetesirppisammal) -kasvustosta ja siitä esiin työntyvistä tiheistä *Eriophorum russeolum* (ruostevilla) ja *Carex limosa* (mutasara) -kasvustoista. Koeruuduissa kasvoi paikoin myös *Carex magellanica* (riippasara), *Scheuchzeria palustris* (leväkkö), *Andromeda polifolia* (suokukka), *Vaccinium oxycoccos* (isokarpalo) ja *Menyanthes trifoliata* (raate). Vähälukuisena muutamassa koeruudussa esiintyi myös *Sphagnum flexuosum* (sirorahkasammal) ja *Sphagnum riparium* (happarahkasammal). Putkilokasvien lehtitiheydet koeruuduissa on esitetty taulukossa 1. Kokeen satunnaisjärjestelyistä johtuen *Eriophorum russeolum* lehtien lukumäärä oli huomattavasti suurempi ja *Carex limosa* sekä *Carex magellanica* lehtien lukumäärä päinvastoin huomattavasti pienempi UV-B-käsittelyn ruuduissa kuin UV-A ja kontrolliruuduissa. Erilaiset lehtitiheydet havaittiin jo kokeen perustamisen (2003) aikaan (Tiiva ym. käsikirjoitus).

Koeruutujen vedenpinnan korkeus pyrittiin mittaamaan päivittäin kasvukauden aikana. Vesipinta vaihteli 6 cm maanpinnan yläpuolelta 19 cm maanpinnan alapuolelle. Kesäkuukausien keskilämpötila, 14,2 °C, Sodankylässä oli korkeampi kuin pitkäaikaiskeskiarvo 12,4 °C (1971–2000) ja auringonpaistetunteja oli 275, joka on keskimääräistä (240 h) runsaammin. Sademäärä kesäkuukausien keskiarvona jäi 26 millimetriin, joka on huomattavasti keskimääräistä (60 mm) vähäisempi, ja kesä olikin kuivin sitten vuoden 1961, mistä lähtien tilastotietoja säästä oli saatavilla (Ilmatieteen laitos 2006). Kesän sääolosuhteet kuukausikohtaisesti ovat esitettynä taulukossa 2.

Taulukko 1. Koeruuduissa kasvavien putkilokasvien lehtien lukumäärä ± keskihajonta per neliömetri tutkittavaa aluetta (kontrolli, UV-A-kontrolli ja UV-B-käsittely) kesä-, heinä- ja elokuussa 2006.

		<i>Eriophorum russeolum</i>	<i>Carex limosa</i>	<i>Carex magellanica</i>	<i>Andromeda pollifolia</i>	<i>Scheuchzeria palustris</i>	<i>Vaccinium oxycoccos</i>	<i>Menyanthes trifoliata</i>
	Kontrolli	906±390	193±233	22±51	24±75	7±10	351±1051	4±13
Kesäkuu	UV-A	879±335	115±138	0 ¹	73±161	13±25	14±45	17±37
	UV-B	1120±344	45±73	2±5	0 ¹	14±31	6±19	0 ¹
	Kontrolli	1365±652	967±945	36±80	70±222	65±93	776±1918	33±104
Heinäkuu	UV-A	1289±553	618±749	1±2	187±463	118±154	437±1343	98±202
	UV-B	2002±493	149±154	7±22	0 ¹	51±111	169±531	0 ¹
	Kontrolli	1628±788	883±937	43±80	59±182	50±82	862±2133	20±65
Elokuu	UV-A	1671±881	545±669	0 ¹	157±361	104±128	369±1109	43±104
	UV-B	2662±839	209±317	6±20	0 ¹	44±95	31±97	0 ¹

¹Ruuduissa ei havaittu kyseessä olevia lehtiä lainkaan.

Taulukko 2. Sodankylän ilmastotietoja kesältä 2006, edelliseltä kesältä sekä pitkänajan keskiarvona vuosilta 1971–2000. Tietoja vuoden 2005 auringonpaistetunneista ei ollut saatavilla. *Lähde: Ilmastokatsaus 2005, 2006.*

Kesäkuu	2006	2005	1971–2000
Keskilämpötila	13,4	13	11,6
Sade (mm)	16	39	57
Auringonpaiste (h)	271	-	268
Heinäkuu	2006	2005	1971–2000
Keskilämpötila	14,5	16,3	14,3
Sade (mm)	34	79	63
Auringonpaiste (h)	288	-	269
Elokuu	2006	2005	1971–2000
Keskilämpötila	14,6	13,6	11,2
Sade (mm)	27	124	61
Auringonpaiste (h)	265	-	183

6.2 UV-altistus

Koe koostui yhteensä 30 koeruudusta (120 cm x 120 cm), joista kymmentä altistettiin kohotetulle UV-B-säteilylle, kymmentä kohotetulle UV-A-säteilylle ja loppuja kymmentä luonnolliselle taustasäteilylle. Koeruudut oli sijoitettu tutkimuskentälle sattumanvaraisesti. Käsittely, jossa kohotetaan UV-B-säteilyn määrää, kohottaa myös UV-A-säteilyn määrää, joten UV-A-kontrolli otettiin kokeeseen mukaan, jotta mahdollinen ero UV-B-käsittelyn ja UV-A-kontrollin välillä saadaan selville.

UV-säteilyä tuotettiin neljällä loisteputkella (Philips TL 40W/12 RS, Philips Lighting, Eindhoven, Alankomaat), jotka oli asetettu neliön muotoiseksi kehäksi 120 cm korkeudelle koeruuduista. UV-B-käsittelyssä loisteputket oli päällystetty selluloosa-asettaattikalvolla (vahvuus 100 µm; valmistaja Expopack, Jämkipohja), joka estää alle 290 nm taajuisen säteilyn läpipääsyn. UV-A-kontrollissa loisteputket oli päällystetty polyesterikalvolla (vahvuus 125 µm; Melinex, KTA-yhtiöt, Helsinki), joka estää UV-B-säteilyn ja lyhyemmät aallonpituudet. Taustasäteilyalat oli ympäröity lamppujen kehikoita vastaavilla puureunuksilla, jotta kehikoista aiheutuvat varjostukset olisivat samanlaisia kaikissa käsittelyissä.

Kohotetun UV-B-säteilyn laitteisto säätii lamppujen UV-tason automaattisesti ennalta määritellylle vallitsevaa säteilytasoa suuremmalle tasolle. Tavoitetaso oli 46 % vallitsevan tason yläpuolella, mikä vastaa noin 20 % otsonikatoa yläilmakehässä. UV-säteilyn tasoa seurattiin jatkuvatoimisesti eryteemapainotetulla UV-sensorilla (UV-B, PMA1102; UV-A, PMA1111; Solar Light Co inc, Glenside, Pennsylvania, USA). UV-B-säteilyä mitattiin kymmenestä UV-B-koeruudusta, yhdestä UV-A-koeruudusta ja yhdestä taustasäteilyn koeruudusta. UV-A-säteilyä mitattiin yhdestä koeruudusta kustakin eri käsittelystä.

Tutkimusalue on tutkimuskäytössä pitkäaikaisvaikutusten selvittämiseksi, ja kasvukausi 2006 oli neljäs altistusvuosi kokeen perustamisen (2003) jälkeen.

6.3 VOC-yhdisteiden keräys

Kaasunäytteitä kerättiin kasvukaudella 2006 kesäkuun 6. ja elokuun 15. päivän välisenä aikana. Näytteiden keräys suoritettiin läpinäkyvällä, polykarbonaatista (paksuus 1,5 mm, 60 cm x 60 cm, korkeus 26 cm, Vink Finland, Kerava) valmistetulla mittauskammiolla. Kuhunkin koeruutuun oli pysyvästi asennettuna alumiininen kaulus (sisään jäävä maa-ala 56 cm x 56 cm), jonka uraan mittauskammio asetettiin näytettä otettaessa. Kauluksen ura täytettiin vedellä, jolloin mittauskammioista saatiin ilmatyiviä. Samaa kammiomenetelmää on aikaisemmin käytetty samalla tutkimussuulla isopreenin keräykseen (Tiiva ym. lähetetty).

Kaasunäyte pumpattiin pienellä akkukäyttöisellä pumpulla (12 V, Rietschle Thomas, Puchheim, Saksa) teräksiseen näyteputkeen (ATD näyteputki, Perkin Elmer, Boston, Massachusetts, USA). Näyteputki oli täytetty Tenax- ja Carbopack-adsorbenteilla (Tenax TA, 100 mg ± 2mg; Carbopack B, 100 mg ± 2mg, 60/80, Supelco, Bellefonte, Pennsylvania, USA). Kahta adsorbenttia käytettiin, koska Carbopack sitoo paremmin pienimolekyylisiä orgaanisia hiilivetyjä (isopreeni ja monoterpeenit), kun taas Tenax sitoo suurempimolekyylisiä orgaanisia hiilivetyjä (muut VOC:it). Näytettä otettaessa ilmaa pumpattiin ensin Tenaxin läpi, jolloin suuret ja osittain pienemmätkin molekyylit adsorboituivat siihen ja Tenaxista läpi menevät pienet molekyylit adsorboituivat lopulta Carbopackiin.

Näyteputken läpi ilmaa imevän pumpun ilmavirtauksen nopeudeksi säädettiin 205 ml/min saippuakuplavirtausmittarin (A.P. Buck, Orlando, Florida) avulla, jolloin virtaus näyteputken läpi oli noin 200 ml/min. Mittauskammion sisälle korvausilmaa pumppaavan pumpun virtausnopeudeksi säädettiin 215 ml/min, jolloin mittauskammion sisälle muodostuva pieni ylipaine esti kaasuvirtauksen mittauskammion ulkopuolelta sen sisäpuolelle.

Näytettä kerättiin 30 minuuttia, minkä aikana mittauskammiossa olevaa ilmaa kierrätettiin pienellä tuulettimella. Näytteen keräämisen aikana mitattiin fotosynteettisesti aktiivista säteilyä (PAR, photosynthetically active radiation) kvantitatiivisella sensorilla (LI-COR, Lincoln, Nevada, USA) sekä mittauskammion

sisäistä lämpötilaa ja suhteellista kosteutta (Tinyview plus, Chichester, West Sussex, UK).

Näyteputket suljettiin heti näytteenoton jälkeen tiiviisti messinkisillä korkeilla ja säilöttiin alle +3 °C:een odottamaan kuljetusta Kuopion yliopistolle analysointia varten.

6.4 Isopreenin ja monoterpeenien analysointi

Näytteet irrotettiin adsorbenteista termodesorptiolla 250 °C lämpötilassa ja jäädyttämällä sen jälkeen -30 °C:een automaattisella lämpöhahduttimella (ATD400, Perkin Elmer, Wellesley, Massachusetts, USA), minkä jälkeen ne analysoitiin kaasukromatografi-massaspektrometrillä (Hewlet Packard 6890, MSD 5973, Palo Alto, Kalifornia, USA).

Isopreeni ja monoterpeenit eroteltiin HP-5 kapillaarikolonnilla (pituus 50 m, halkaisija 200µm, paksuus 0,5µm, Hewlet Packard). Kantokaasuna käytettiin heliumia. Uunin alkulämpötila oli 40 °C yhden minuutin ajan, minkä jälkeen lämpötilaa nostettiin 5 °C minuutissa 210 °C:een ja sen jälkeen 20 °C minuutissa 250 °C:een.

Isopreenin ja monoterpeenien tunnistus tehtiin vertaamalla määritettyä massaspekttriä Wileyn kirjaston tunnettuihin massaspektreihin. Yhdisteiden kvantifointi tehtiin määrittämällä näytteiden kanssa samassa ajossa ennalta tunnetut pitoisuudet standardeja. Käytetyt standardit olivat isopreeni sekä monoterpeeneistä: α-pineeni, sabineeni, β-pineeni, β-myrrseeni, limoneeni, cis-osimeeni, 1,8-sineoli, γ-terpineeni, linalooli, dimetyylinonatrieeni ja allo-osimeeni. Näytteissä olleiden pitoisuuksien perusteella laskettiin yhdisteiden määrä kammiossa, mikä suhteutettiin mittausaikaan ja kammion sisään jäävän suopinnan alaan. Tulokset ilmoitettiin yksikössä µg m⁻² h⁻¹.

6.5 Isopreeni- ja monoterpeenipitoisuuksien vakioiminen

Isopreenipäästöjen on osoitettu olevan hyvin valo- ja lämpötilariippuvaisia, joten kaasukromatografi-massaspektrometrillä määritetyt isopreenipitoisuudet muutettiin

vertailukelpoisiksi Guentherin ja kumppaneiden (1993; 1995) esittämällä algoritmilla (kaava 5). Algoritmia on käytetty aiemmin boreaalisten soiden isopreenipäästöjä tutkittaessa (esim. Hellén ym. 2006; Haapanala ym. 2006; Tiiva ym. 2007). Algoritmissa vakioidaan lämpötilaksi 30 °C ja PAR-arvoksi 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

$$E = E_S \times C_T \times C_L \quad (5)$$

Kaavassa 5 E tarkoittaa varsinaista isopreeni emissiota, E_S on standardoitu emissiomuuttuja ($T_S = 30 \text{ °C}$, PAR 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), C_L on valon funktio (kaava 6) ja C_T on lämpötilan funktio (kaava 7).

$$C_L = \frac{\alpha C_{L1} \text{PAR}}{\sqrt{1 + \alpha^2 \text{PAR}^2}} \quad (6)$$

$$C_T = \frac{\exp\left(\frac{C_{T1}(T - T_S)}{RT_S T}\right)}{1 + \exp\left(\frac{C_{T2}(T - T_M)}{RT_S T}\right)} \quad (7)$$

Kaavoissa R (8,134 J K⁻¹ mol⁻¹) tarkoittaa moolista kaasuvakiota, T kammion sisältä mitattua lämpötilaa ja T_S standardoitua lämpötilaa (30 °C). Vakiot α (0,0027), C_{L1} (1,066), C_{T1} (95000 J mol⁻¹), C_{T2} (230000 J mol⁻¹) ja T_m (41 °C eli 314 K) ovat kokeellisesti määritetyt, yleisesti käytössä olevia arvoja.

Määritetyt monoterpeenipitoisuudet vakioitiin Tingeyn ja kumppaneiden (1980) esittämällä algoritmilla (kaava 8).

$$E = E_S \times \exp(\beta \times (T - T_S)) \quad (8)$$

Kaavassa 8 E tarkoittaa päästöä lämpötilassa T, T_S vakioitu lämpötila 30 °C, β on kulmakerroin $\text{dln}E \text{ dT}^{-1}$ ja E_S on päästö vakiolämpötilassa. Yleisesti hyväksyttyinä kulmakertoimen arvona käytetään 0,09 °C⁻¹ (Fehsenfeld ym. 1992; Guenther ym. 1993).

Kaikki tässä työssä myöhemmin esitettävät isopreeni- ja monoterpeenipäästöt ovat standardoituja päästöjä, ellei toisin ole mainittu.

6.6 Tilastolliset analyysit

Tilastolliset analyysit tehtiin SPSS 14.0 for Windows -ohjelmalla (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA). Mittaukset suoritettiin seitsemän kertaa jokaisesta koeruudusta kesän 2006 aikana. Kohotetun UV-B-säteilyn vaikutuksia isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin kasvukauden aikana tarkasteltiin sekamallimenetelmällä (Mixed models) toistomittauksina ($n = 70$). Malliin sisällytettiin käsittely, aika sekä käsittelyn ja ajan yhdysvaikutus.

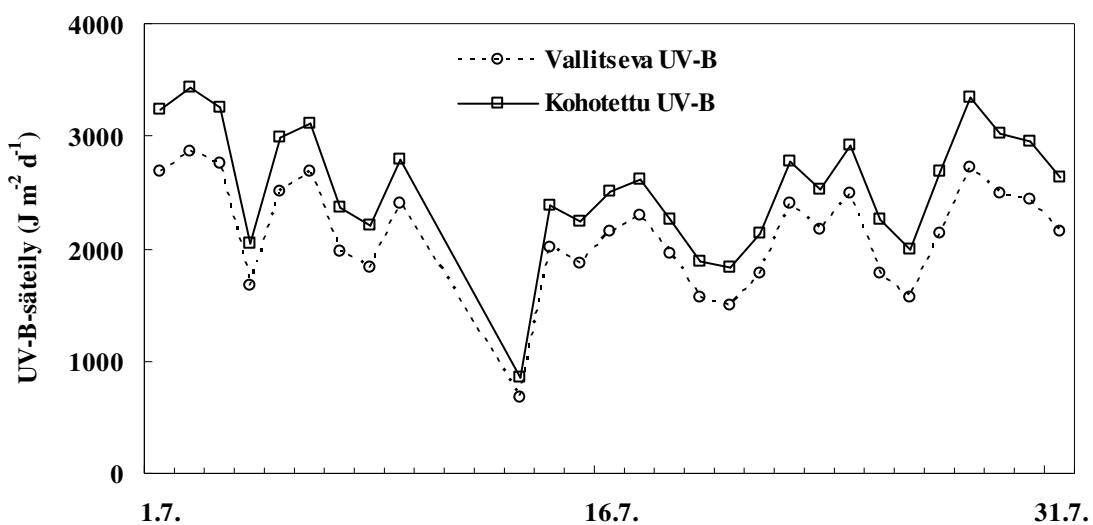
Isopreeni- ja monoterpeenipäästöön vaikuttaneita tekijöitä etsittiin aluksi Pearsonin 2-suuntaisella korrelaatiolla. Päästöjen kanssa korreloineet ($P < 0,05$) tekijät otettiin kovariaateiksi sekamalliin. Tuloksia analysoitaessa *Carex magellanica*, *Andromeda polifolia*, *Vaccinium oxycoccus* ja *Menyanthes trifoliata* -kasvustoja ei otettu huomioon, koska niitä esiintyi korkeintaan 1–3 ruudussa per käsittely.

Jatkotarkasteluna vertailtiin UV-B-käsittelyn eroa UV-A-kontrolliin ja taustasäteilyn kontrolliin kullakin mittauskerralla Dunnettin post hoc -testillä ($n = 10$). Testeissä tilastollista merkitsevyyttä osoittavat P-arvot, jotka ovat pienempiä kuin 0,05.

7. TULOKSET

7.1 UV-B-säteily kasvukaudella 2006

Vallitseva UV-B-säteilyannos mittausten aikana (1.6.–15.8.2006) oli keskimäärin 2060 J m⁻² päivässä. Tutkimuksissa käytetyt UV-B-lamput kohottivat päivittäisen UV-B-säteilyannoksen keskimäärin 2490 jouleen neliometrillä, mikä vastasi noin 22 % korotusta vallitsevaan pitoisuuteen. Kesäkuukausien keskimääräiset UV-B-annokset ja kohotuksen suuruus ovat tarkemmin taulukossa 3. Kesän aikana suurin päivittäinen UV-B-säteilyannoksen kohotus vallitsevaan säteilyyn verrattuna oli 37 % ja pienin 13 %. Kuvassa 3. on nähtävissä päivittäinen UV-B-annos ja UV-B-altistuslaitteiston toiminta heinäkuussa 2006.



Kuva 3. Vallitseva ja kohotettu eryteemapainotettu UV-B-säteilyannos heinäkuussa 2006.

Taulukko 3. Kesäkuukausien keskimääräiset eryteemapainotetut UV-B-annokset \pm keskihajonta tutkimuskentältä mitattuna. Vallitseva UV-B-säteilyannos on mitattu tutkimusalueella kontrolliruudusta, kun taas kohotettu UV-B-annos on mitattu kohotetun UV-B-säteilyn koeruuduista. UV-B kohotus -sarakkeessa on lampuilla aikaansaatu UV-B-säteilyannoksen keskimääräinen kohotus prosentteina vallitsevaan tasoon verrattuna.

	Vallitseva UV-B ($\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Kohotettu UV-B ($\text{J m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	UV-B kohotus (%)
Kesäkuu	1960 \pm 670	2450 \pm 790	26
Heinäkuu	2120 \pm 490	2550 \pm 560	20
Elokuu	2090 \pm 330	2450 \pm 330	18

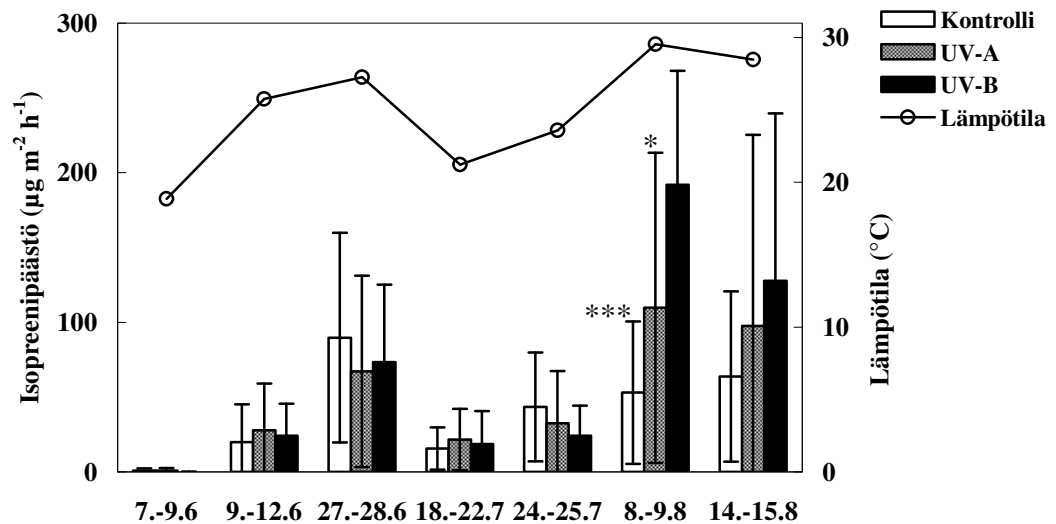
7.2 Isopreeni

Kesän mittauksissa isopreenipäästö vaihteli alle määrittäysrajan jäävistä pitoisuuksista 331 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ pitoisuuteen. Keskimääräinen (\pm keskihajonta) isopreenipäästö oli 53 \pm 72 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Kesän aikana mitattiin vain 33 näytettä 210:stä, joiden isopreenipitoisuudet olivat alle määrittäysrajan. Suurin osa näistä oli kesän ensimmäisellä mittauskerralla 7.-9.kesäkuuta.

Koko kesän aikana isopreenipäästöt muuttuivat tilastollisesti merkitsevästi ($P < 0,001$; ajan vaikutus, sekamalli; Kuva 4). Päästöt olivat alimmillaan ensimmäisellä mittauskerralla ja suurimmillaan elokuun mittausten aikaan. Yleisesti standardoimaton isopreenipäästö kasvoi lämpötilan noustessa (Pearsonin korrelaatiokerroin 0,631; $P < 0,001$). Ensimmäisellä mittauskierroksella isopreenipäästöt eivät noudattaneet lämpötila- tai aikariippuvuutta. Kesän muilla mittauskierroksilla suurimmat isopreenipäästöt mitattiin keskipäivän tuntumassa (n. 650–850 minuuttia keskiyöstä) ja 25–35 °C lämpötilassa.

Isopreenipäästön muutos ajan suhteen oli erilainen eri käsittelyissä ($P = 0,018$; käsittely * aika yhdysvaikutus, sekamalli, Kuva 4). Pääasiassa yhdysvaikutus johtui siitä, että päästöt eri käsittelyissä olivat lähes yhtäsuuret kesä- ja heinäkuun mittauksissa, kun taas elokuussa päästöt olivat suuremmat UV-B-käsittelyssä. Erillisiä mittauskierroksia

tarkasteltaessa havaittiinkin toiseksi viimeisellä mittauskierroksella, 8.–9. elokuuta, merkitsevä ero UV-B-käsittelyn ja taustasäteilyn kontrollin välillä ($P < 0,001$; Dunnett:n testi), sekä UV-B-käsittelyn ja UV-A-kontrollin välillä ($P = 0,004$; Dunnett:n testi). Myös viimeisellä kierroksella, 14.–15.8, UV-B-käsittelyn ja taustasäteilyn kontrollin välillä oli melkein merkitsevä ero ($P = 0,086$; Dunnett:n testi). Kesän muilla mittauskierroksilla UV-B-käsittelyn ja taustasäteilyn kontrollin välillä ei havaittu merkitsevää eroa ($P > 0,1$; Dunnett:n testi), kuten ei myöskään UV-B-käsittelyn ja UV-A-kontrollin välillä ($P > 0,1$; Dunnett:n testi). Kaiken kaikkiaan UV-B-säteily kohotti isopreenipäästöä koko mittausjaksoa tarkasteltaessa ($P = 0,009$; käsittelyvaikutus, sekamalli).



Kuva 4. Isopreenipäästö esitettyinä mittauskierroksittain käsittelyjen keskiarvona (\pm keskihajonta) kasvukaudella 2006. Lämpötila mitattiin kammista mittauskierrosten yhteydessä. Tilastollisesti merkitsevä ero UV-B-käsittelystä on merkattu tähdillä: ***, $P < 0,001$ ja *, $P < 0,05$ (Dunnett:n testi).

Mittauskaulusten sisäpuolella kasvavien sarakasvien, *Eriophorum russeolum*, *Carex limosa* ja *Carex magellanica* yhteenlasketut lehtitiheydet korreloivat isopreenipäästön kanssa merkitsevästi ($P < 0,001$ – $0,932$; $R = 0,016$ – $0,616$; Pearsonin korrelaatio). Myös näytteenottoaika minuutteina keskiyöstä korreloi isopreenipäästön kanssa merkitsevästi ($P < 0,001$ – $0,611$; $R = 0,097$ – $0,885$; Pearsonin korrelaatio). Nämä muuttujat otettiin kovariaateiksi sekamallianalyysiin, missä niiden havaittiin vaikuttavan

isopreenipäästöön tilastollisesti merkitsevästi ($P < 0,001$). Malliin otettiin mukaan myös tiheys * käsittely interaktio, sillä sarakasvien tiheyden vaikutus isopreenipäästöön oli erilainen eri käsittelyissä ($P < 0,001$).

7.3 Monoterpeenit

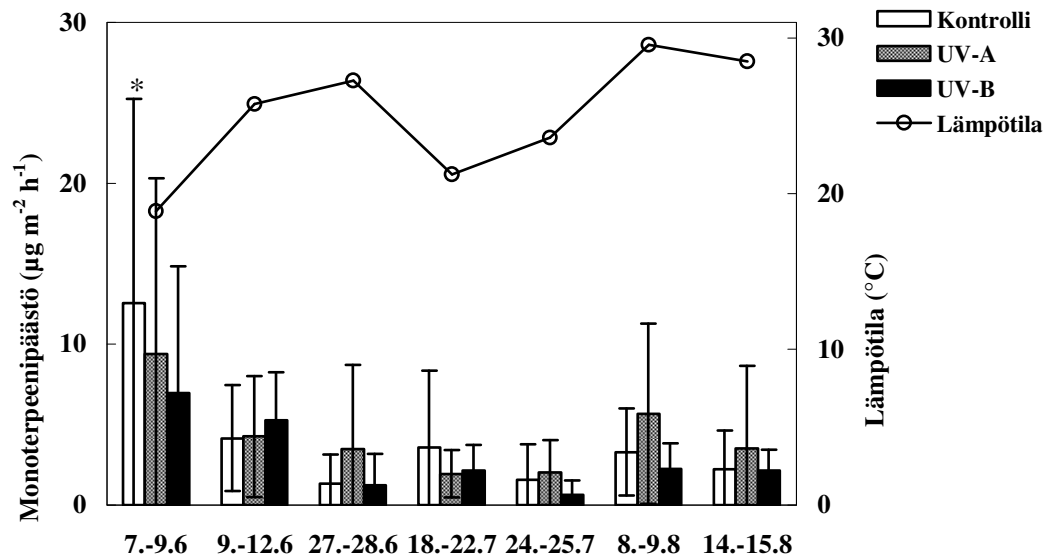
7.3.1 Kokonaismonoterpeenipäästö

Koko mittausjakson keskimääräinen kokonaismonoterpeenipäästö, $4 \pm 6 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, koostui pääosin limoneenista ja α -pineenista, joita on tarkasteltu erikseen kappaleissa 7.3.2 ja 7.3.3. Kokonaismonoterpeenipäästö vaihteli kesän mittausten aikana alle määritysrajan menevistä pitoisuuksista $38 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ pitoisuuteen. Alle määritysrajan meneviä pitoisuuksia mitattiin vain 34 kertaa 210:stä. Kokonaismonoterpeenipäästöä laskettaessa on huomioitu kaikkien analysoitujen monoterpeenien päästöt, jotka on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Monoterpeenipäästöt kasvukaudella 2006. Taulukossa on esitetty kesän mittausten keskimääräinen ja suurin yksittäinen monoterpeenipäästö. Kokonaispäästöprosentti on laskettu kyseessä olevan monoterpeenin suhteesta kokonaismonoterpeenipäästöön. Alle määritysrajan -sarakkeessa on prosentteina 210 mittauksesta ne, joissa ei havaittu kyseistä yhdistettä lainkaan.

Monoterpeeni	Keskimääräinen päästö (\pm SD) ($\text{ng m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	Suurin päästö ($\text{ng m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	%-kokonais-päästöstä	Alle määritysrajan pitoisuudet (%)
Limoneeni	2900 ± 1700	37000	78	31
α -pineeni	350 ± 2000	7700	9	31
Sabineeni	290 ± 1700	10000	8	92
β -myrseeni	63 ± 360	8100	2	98
γ -terpineeni	58 ± 340	4100	2	97
1,8-sineoli	49 ± 290	3600	1	96
β -pineeni	31 ± 180	2300	1	97

Standardeihin sisällytetyistä monoterpeeneistä cis-osimeenia, linaloolia, dimetyylinonatrieeniä ja allo-osimeenia ei ollut näytteissä kertaakaan yli määritysrajan. Kokonaismonoterpeenipäästö vaihteli koko kesän mittauksissa tilastollisesti merkitsevästi ($P < 0,001$; ajan vaikutus, sekamalli; kuva 5). Kokonaismonoterpeenipäästö oli suurimmillaan kesän ensimmäisellä mittauskierroksella, minkä jälkeen päästö puolittui ja pysyi melko tasaisena loppukesän mittauksissa. Monoterpeenipäästössä ei havaittu lämpötilariippuvuutta ($P = 0,138$; Pearsonin korrelaatio). Myöskään näytteenottoajalla (minuuttia keskiyöstä) ei ollut vaikutusta monoterpeenipäästön suuruuteen ($P = 0,204$; Pearsonin korrelaatio).



Kuva 5. Kokonaismonoterpeenipäästö esitettynä mittauskierroksittain käsittelyjen keskiarvona (\pm keskihajonta) kasvukaudella 2006. Lämpötila mitattiin kammiosta mittauskierrosten yhteydessä. Tilastollisesti merkitsevä ero UV-B-käsittelystä on merkattu tähdellä: *, $P < 0,05$ (Dunnett:n testi).

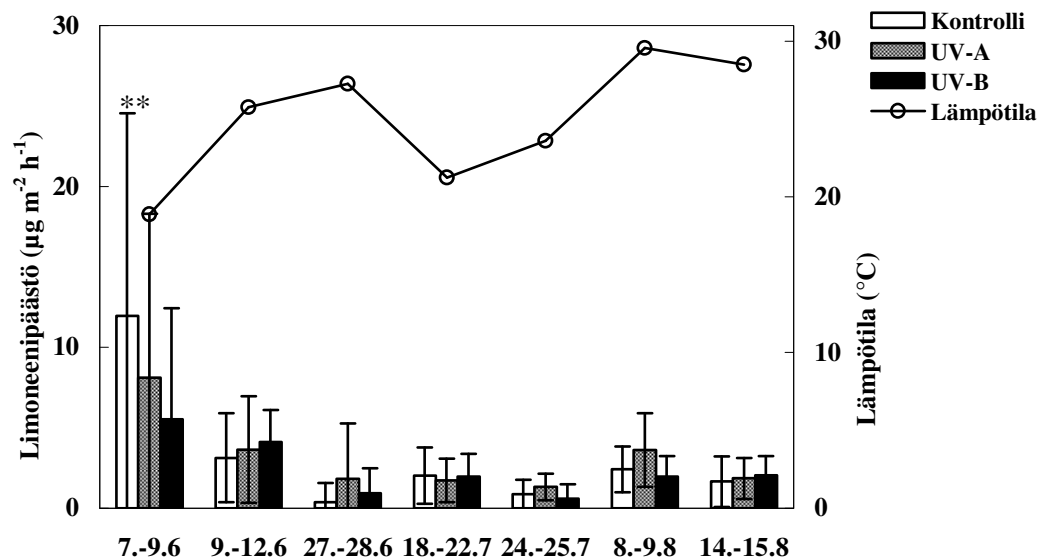
Kokonaismonoterpeenipäästön muutos ajan suhteen ei eronnut eri käsittelyjen välillä ($P = 0,712$; käsittely * aika yhdysvaikutus, sekamalli; kuva 5). Mittauskierroksittain tarkasteltuna kokonaismonoterpeenipäästö oli merkitsevästi alhaisempi UV-B-käsittelystä kuin taustasäteilyn kontrollissa ($P = 0,026$; Dunnett:n testi; kuva 5) ensimmäisellä mittauskierroksella, 7.-9. kesäkuuta. Muilla mittauskierroksilla käsittelyeroja ei ollut ($P > 0,1$; Dunnett:n testi). Kaiken kaikkiaan UV-B-säteilyn ei

havaittu vaikuttavan päästöön tilastollisesti merkitsevästi koko mittausjaksoa tarkasteltaessa ($P = 0,221$; käsittelyvaikutus, sekamalli).

7.3.2 Limoneenipäästö

Limoneenipäästö vaihteli tilastollisesti merkitsevästi koko kesän mittauksia tarkasteltaessa ($P < 0,001$; sekamalli). Limoneenipäästöissä ei havaittu muutoksia ajan suhteen eri käsittelyissä ($P = 0,426$; käsittely * aika yhdysvaikutus, sekamalli; kuva 6). Limoneenipäästö ei korreloinut muiden tutkittujen ominaisuuksien kanssa (esim. PAR, kosteus ja kasvillisuus).

Erillisiä mittauskierroksia tutkittaessa havaittiin, että limoneenipäästö oli merkitsevästi alhaisempi UV-B-käsittelyssä kuin taustasäteilyn kontrollissa ($P = 0,002$; Dunnett:n testi; kuva 6) ensimmäisellä mittauskierroksella, 7.-9. kesäkuuta. Muilla mittauskierroksilla käsittelyvaikutuksia ei havaittu ($P > 0,1$). Kaikkiaan UV-B-säteilyn käsittelyvaikutuksia ei ollut kesän mittauksia kokonaisuutena analysoitaessa ($P = 0,499$; sekamalli).

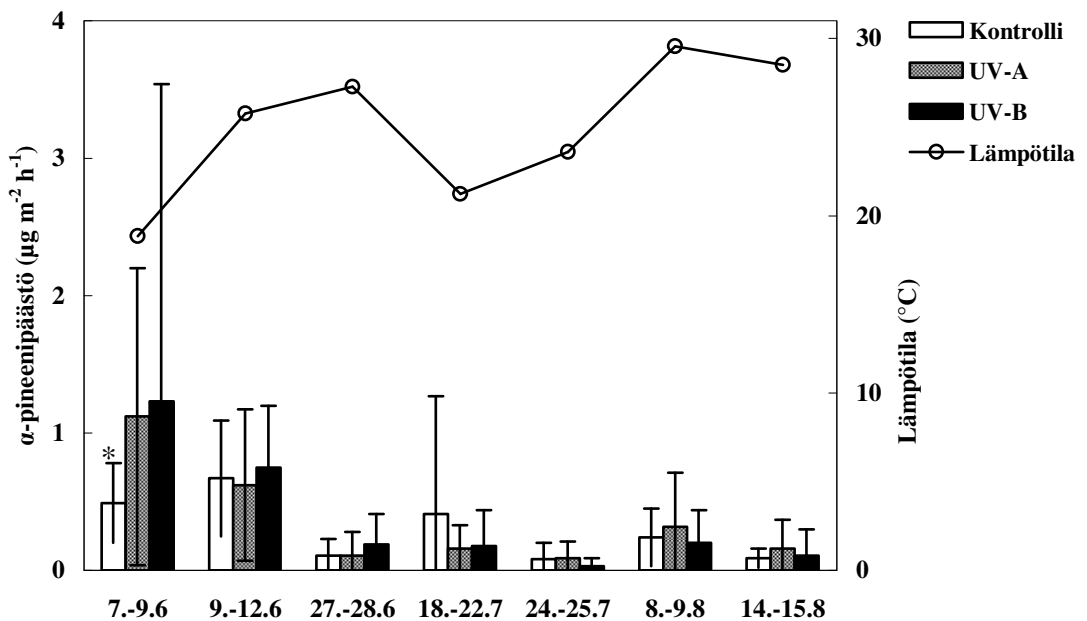


Kuva 6. Limoneenipäästö esitettynä mittauskierroksittain käsittelyjen keskiarvona (\pm keskihajonta) kasvukaudella 2006. Tilastollisesti merkitsevä ero UV-B-käsittelystä on merkattu tähdillä: **, $P < 0,01$ (Dunnett:n testi).

7.3.3 α -pineenipäästö

Koko kesän mittausten aikana α -pineenipäästö vaihteli tilastollisesti merkitsevästi ($P < 0,001$; sekamalli). α -pineenipäästössä ei havaittu muutoksia ajan suhteen eri käsittelyiden välillä ($P = 0,734$; käsittely * aika yhdysvaikutus, sekamalli; kuva 7). α -pineenipäästön ei havaittu korreloivan muiden tutkittujen ominaisuuksien kanssa (esim. PAR, kosteus ja kasvillisuus).

Erillisiä mittauskierroksia tutkittaessa UV-B-käsittelyn havaittiin suurentavan α -pineenipäästöä taustasäteilyn kontrolliin verrattuna ($P = 0,022$; Dunnett:n testi) ensimmäisellä mittauskierroksella, 7.-9. kesäkuuta. Muilla mittauskierroksilla käsittelyn vaikutuksia ei ollut ($P > 0,1$; Dunnett:n testi). Kaiken kaikkiaan UV-B-käsittelyllä ei havaittu olevan vaikutusta α -pineenipäästöön koko kesän mittausten aikana ($P = 0,695$; sekamalli).



Kuva 7. α -pineenipäästö esitettynä mittauskierroksittain käsittelyjen keskiarvona (\pm keskihajonta) kasvukaudella 2006. Tilastollisesti merkitsevä ero UV-B-käsittelystä on merkattu tähdellä: *, $P < 0,05$ (Dunnett:n testi).

8. TULOSTEN TARKASTELU

Tässä tutkimuksessa käytetty kohotettu UV-B-säteilytaso, 20 % vallitsevan säteilyn yläpuolella, jäi alle puoleen tavoitellusta 46 prosentista. Tämä lievästi kohotettu UV-B-säteilytaso kuitenkin kasvatti merkittävästi subarktista suolta erittyvää isopreenipäästöä, mutta ei vaikuttanut monoterpeenipäästöön koko kesän mittauskertojen keskimääräisiä päästöjä tarkasteltaessa. Tulokset poikkeavat Tiivan ja kumppaneiden (lähetetty) samaisella tutkimusalueella vuonna 2005 suoritetuista tutkimuksista, jossa UV-B-säteilyn vaikutuksia isopreenipäästöön ei ollut havaittavissa. Tulokset ovat kuitenkin samankaltaiset kuin Tiivan ja kumppaneiden aiemmin, vuonna 2004, samaisella tutkimusalueella tekemät tutkimukset. Isopreenipäästön osalta tämän tutkimuksen tulokset tukevat aiempaa tutkimusta tammella (*Quercus gambelii*), jossa isopreenipäästön havaittiin kasvavan kohotetun UV-B-säteilyn vaikutuksesta (Harley ym. 1996). Monoterpeenien osalta UV-tutkimuksia ei ole aiemmin julkaistu, joten tämä tutkimus tuo täysin uutta tietoa monoterpeenien erityksestä subarktista suolta kohotetun UV-B-säteilyn vaikutuksesta.

Kesän aikana mitattu keskimääräinen isopreenipäästö, $53 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, oli huomattavasti alhaisempi kuin Tiivan ja kumppaneiden (lähetetty) samalta suolta keskimääräistä lämpimämmän heinäkuun 2005 (taulukko 2) aikana mitattama keskimääräinen isopreenipäästö ($1101 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Samansuuruisia (n. $1000 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) isopreenipäästöjä on havaittu tutkimuksissa borealisilla *Sphagnum*-soilla (Tiiva ym. 2007). Tämän tutkimuksen keskimääräinen isopreenipäästö oli kuitenkin samansuuntainen kuin Tiivan ja kumppaneiden (lähetetty) samaisella suolla (Sodankylässä) vuonna 2004 viileän heinäkuun aikana suorittamissa mittauksissa ($103 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Tässä tutkimuksessa käytetty Carbopack/Tenax yhdistelmäadsorbentti poikkesi Tiivan ja kumppaneiden (lähetetty) aiemmin (2004 ja 2005) käyttämästä pelkästään Tenax:ista koostuvasta adsorbentista, mikä voi osaltaan vaikuttaa yhdisteiden adsorbtiioon.

Sammalten ja putkilokasvien on osoitettu olevan merkittäviä isopreenin lähteitä borealisilla soilla (Hellén ym. 2006; Hanson ym. 1999). Tässä tutkimuksessa ei ollut mahdollista tutkia yksittäisten lajien vaikutusta päästöön, mutta tilastollisissa testeissä

havaittiin sarakasvien tiheyden ja isopreenipäästön suuruuden välillä positiivinen riippuvuus. Näytteenottoaika keskiyöstä mitattuna oli merkitsevä tekijä isopreenipäästöä mitattaessa, mutta se johtunee lämpötilan kohoamisesta päivän edetessä. Alkukesän mittauksissa isopreenipäästö pysytteli hyvin matalana, mutta lämpötilan noustessa isopreenipäästö nousi loppukesää kohti. Suurimmillaan isopreenipäästö oli toiseksi viimeisellä kierroksella, jolloin tilastollisesti merkitsevä ero UV-B-käsittelyn ja kontrollien välillä havaittiin vaikka UV-B-säteilyannoksen korotus UV-B-käsittelyn ruuduissa oli vain 18 % ja säteilyannos oli pienempi kuin heinäkuun aikana (taulukko 3). Tämä viittaa siihen, että pitkäaikainen altistus kohotetulle UV-B-säteilylle lisää isopreenipäästöä.

Ympäristöstressien merkitys isopreenipäästöön näyttäisi korostuvan lämpötilan kohotessa. Samanlaisiin tuloksiin on päätynt Tiiva ja kumppanit (2007) tutkimuksissaan otsonin vaikutuksista isopreenipäästöön borealisilla *Sphagnum* -mikrokosmoksilla. Kohotetulla otsonipitoisuudella ei havaittu tilastollista eroa isopreenipäästöissä kontrolliin verrattuna, mutta lämpötilan noustessa päästön suuruuden vaihtelu oli kohotetulle otsonipitoisuudelle altistetuilla mikrokosmoksissa suurempaa kuin kontrollimikrokosmoksissa (Tiiva ym. 2007). Tässä työssä havaittu, tilastollisesti merkitsevä, suurempi isopreenipäästö UV-B-käsittelyssä verrattuna kontrolleihin korkeiden lämpötilojen aikana tukee Tiivan ja kumppaneiden (2007) vastaavia löydöksiä kohotetun otsonipitoisuuden vaikutuksesta.

Monoterpeenien osalta tämä tutkimus on subarktisilla soilla ensimmäinen laatuaan. Aiemmin boreaalisten soiden on osoitettu vapauttavan monoterpeenejä (Rinnan ym. 2005; Janson ym. 1999), joskaan Hellén ja kumppanit (2006) eivät havainneet monoterpeenipäästöjä lainkaan. Tässä tutkimuksessa mitattu keskimääräinen monoterpeenipäästö, $4 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, ei ole verrattavissa aiempiin tutkimuksiin, koska tutkitut monoterpeenit poikkeavat toisistaan (esim. Janson ym. 1999). Janson ja kumppanit (1999) määrittivät keskimääräiseksi limoneenipäästöksi noin $12 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, mikä on huomattavasti suurempi kuin tässä tutkimuksessa mitattu $3 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Vastaavasti Jansonin ja kumppaneiden (1999) mittaamat keskimääräiset α -pineeni- ja sabineenipäästöt (molemmat erikseen), $< 6 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, ovat suuremmat kuin tässä tutkimuksessa mitatut näiden yhdisteiden päästöt, $0,3 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$. Erilaiset

monoterpeenipäästöt ovat hyvin ymmärrettävissä, koska suot eivät ole samanlaisia ja varsinkin kasvillisuus poikkeaa toisistaan merkittävästi.

Ensimmäisellä kierroksella mitatut monoterpeenipäästöt olivat puolet suurempia kuin kesän muilla mittauskierroksilla. Huomattavaa on, että UV-B-käsittely pienensi monoterpeenipäästöä tilastollisesti merkitsevästi ensimmäisellä mittauskierroksella, ja myöhemmin päästöt pysyttelivät alkukesää matalampina huolimatta lämpötilan ja UV-B-säteilyannoksen kasvusta. Yksittäisiä monoterpeenipäästöjä tarkasteltaessa havaittiin, että limoneenipäästö käyttäytyi kokonaispäästön tavoin, mutta α -pineenipäästö oli merkitsevästi suurempi UV-B-käsittelyssä kuin kontrolliruuduissa. Sabineenipäästöissä ei havaittu käsittelyn vaikutuksia. Erot limoneeni- ja α -pineenipäästöjen UV-B-käsittelyssä johtunevat monoterpeenien erilaisesta roolista esim. kasvien kemiallisessa puolustautumisessa. Tämän tutkimuksen perusteella on kuitenkin mahdotonta erotella monoterpeenipäästön lähteitä, koska yksittäisiä päästölähteitä (esim. kasvillisuus ja mikrobitoiminta) ei eroteltu. Monoterpeenipäästöt eivät myöskään korreloineet tilastollisissa testeissä koeruuduissa yleisesti kasvaneiden sarakasvien lehtitiheyksien kanssa.

Mittausten aikana vedenpinta vaihteli maanpinnan yläpuolelta jopa 19 cm maanpinnan alapuolelle. Vedenpinnan vaihtelu ei kuitenkaan korreloinut isopreeni- tai monoterpeenipäästöjen kanssa. *Sphagnum* -soilla sammalten on osoitettu olevan suurimpia isopreenin päästölähteitä (Hellén ym. 2006). Lisäksi sammalten on osoitettu olevan hyvin kestäviä UV-B-säteilyn vaikutuksia vastaan (Boelen ym. 2006; Niemi ym. 2002b; Green ym. 2000). Juurettomana sammalten vesitalous on riippuvainen ilmankosteudesta (esim. sateet) eikä välttämättä pelkästään vedenpinnan korkeudesta (Boelen ym. 2006). Kuivuus johtaa sammalilla fysiologiseen aktiivisuuden laskuun (Boelen ym. 2006), mikä voisi aiheuttaa muutoksia isopreenipäästöön.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että otsonikadon seurauksena voimistuva UV-B-säteily kasvattaa isopreenipäästöä, mutta ei vaikuta monoterpeenipäästöön subarktisella suolla. Isopreenipäästön kasvu voi olla vielä tässä tutkimuksessa havaittua suurempi, jos ilmaston lämpötila jatkaa kasvuaan kuten on ennustettu.

Ekosysteemitason tutkimukset sisältävät monia muuttujia, joiden yhteisvaikutusta voi olla vaikea havaita. Tässä tutkimuksessa selvitettiin UV-B-säteilyn vaikutuksia suoekosysteemin isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin. Jatkossa tulisi selvittää tarkemmin subarktisen suon isopreeni- ja monoterpeenilähteitä kuten esimerkiksi sammalten, sarojen ja muun kasvillisuuden sekä maaperän (mikrobien) osuus päästöissä. Yksittäisten päästölähteiden tunnistaminen on tärkeää myös, että voidaan arvioida kohotetun UV-B-säteilyn merkitystä päästölähteelle. Monoterpeenin osalta kokonaismonoterpeenipäästön tilastollisen tutkimisen sijaan kannatta tutkia yksittäisiä monoterpeenejä, koska päästöt voivat olla erilaisia eri käsittelyissä.

Pitkäaikaisia tutkimuksia UV-B-säteilyn vaikutuksista isopreeni- ja monoterpeenipäästöihin tulee jatkaa, että säteilyn ja vuosittaisen vaihtelun merkitys päästöön saadaan selvitettyä.

10. LÄHDELUETTELO

Atkinson R. & Arey J. 2003. Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review. *Atmospheric Environment* **37**: S197-S219.

Atkinson R. 2000. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. *Atmospheric Environment* **34**: 2063-2101.

Björn L. 1999. Ultraviolet-B radiation, the ozone layer and ozone depletion. Kirjassa: Stratospheric ozone depletion: the effects of enhanced UV-B radiation on terrestrial ecosystem. ss. 21-37. Edited by Rozema J. Backhuys Publishers. Leiden, Alankomaat.

Boelen P., de Boer K., de Bakker N. & Rozema J. 2006. Outdoor studies on the effects of solar UV-B on bryophytes: overview and methodology. *Plant Ecology* **182**: 137-152.

Bubier J., Bhatia G., Moore T., Roulet N. & Lafleur P. 2003. Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems* **6**: 353-367.

Cao M., Marshall S. & Gregson K. 1996. Global carbon exchange and methane emissions from natural wetlands: application of a process-based model. *Journal of Geophysical Research* **101**: 14399-14414.

Claeys M., Wang W., Ion A., Kourtchev I., Gelencsér A. & Maenhaut W. 2004. Formation of secondary organic aerosols from isoprene and its gas-phase oxidation products through reaction with hydrogen peroxide. *Atmospheric Environment* **38**: 4093-4098.

Farman J., Gardiner B. & Shanklin J. 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x-NO_x interaction. *Nature* **315**: 207-210.

Fehsenfeld F., Calvert J., Fall R., Goldan P., Guenther A., Hewitt C., Lamb B., Liu S., Trainer M., Westberg H. & Zimmerman P. 1992. Emissions of volatile organic

compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry. *Global Biogeochemical Cycles* **6**: 389–430.

Flint S. & Caldwell M. 2003. A biological spectral weighting function for ozone depletion research with higher plants. *Physiologia Plantarum* **117**: 137-144.

Gehrke C. 1998. Effects of enhanced UV-B radiation on production-related properties of a *Sphagnum fuscum* dominated subarctic bog. *Functional Ecology* **12**: 940-947.

Gehrke C. 1999. Impacts of enhanced ultraviolet-B radiation on mosses in a subarctic heath ecosystem. *Ecology* **80**: 1844-1851.

Graedel T. & Crutzen P. 1993. *Atmospheric change*. New York, NY, USA. Freeman. 431 pp.

Green T., Schroeter B. & Seppelt R. 2000. Effects of temperature, light and ambient UV on the photosynthesis of the moss *Bryum argenteum* Hedw. in continental Antarctica. In: Davison W., Howard-Williams C., Broady P. (eds.), *Antarctic Ecosystems: Models for Wider Understanding*. Caxton Press. Christchurch 165-170.

Guenther A., Hewitt C., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T., Harley P., Klinger L., Lerdau M., McKay W., Pierce T., Scholes R., Steinbrecher R., Tallamraju R., Taylor J. & Zimmerman P. 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research* **100**: 8873-8892.

Guenther A., Zimmerman P., Harley P., Monson R & Fall R. 1993. Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses. *Journal of Geophysical Research* **98**: 12609-12617.

Gwynn-Jones D., Lee J. & Callaghan T. 1997. Effects of enhanced UV-B-radiation and elevated carbon dioxide concentrations on a sub-arctic forest heath ecosystem. *Plant Ecology* **128**: 243-249.

- Haapanala S., Rinne J., Pystynen K-H., Hellén H., Hakola H. & Riutta T. 2006. Measurements of hydrocarbon emissions from a boreal fen using the REA technique. *Biogeosciences* **3**: 103-112.
- Hakola H. 2001. Biogenic volatile organic compound (VOC) emissions from boreal deciduous trees and their atmospheric chemistry. Finnish Meteorological Institute Contributions No. 34.
- Hanson D., Swanson S., Graham L. & Sharkey T. 1999. Evolutionary significance of isoprene emission from mosses. *American Journal of Botany* **86**: 634-639.
- Harborne J. & Williams C. 2000. Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry* **55**: 481-504.
- Harley P., Deem G., Flint S. & Caldwell M. 1996. Effects of growth under elevated UV-B on photosynthesis and isoprene emission in *Quercus gambelii* and *Mucuna pruriens*. *Global Change Biology* **2**: 149-154.
- Hellén H., Hakola H., Pystynen K-H., Rinne J. & Haapanala S. 2006. C₂-C₁₀ hydrocarbon emissions from a boreal wetland and forest floor. *Biogeosciences* **3**: 167-174.
- Huiskes A., Lud D. & Moerdijk-Poortvliet T. 2001. Field research on the effects of UV-B filters on terrestrial Antarctic vegetation. *Plant Ecology* **154**: 77-86.
- Hoffmann T., Odum J., Bowman F., Collins D., Klockow D., Flagan R. & Seinfeld J. 1997. Formation of organic aerosols from the oxidation of biogenic hydrocarbons. *Journal of Atmospheric Chemistry* **26**: 189-222.
- Ilmastokatsaus. 2005. Joulukuu 2005. Ilmatieteen laitos.
- Ilmastokatsaus. 2006. Joulukuu 2006. Ilmatieteen laitos.

Jalarvo V. 2000. Use of sunbeds by Finnish population. STUK-A181. Helsinki. 36 pp. + apps. 35 pp.

Janson R., De Serves C. & Romero R. 1999. Emission of isoprene and carbonyl compounds from a boreal forest and wetland in Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology* **98**: 671-681.

Janson R. & De Serves C. 1998. Isoprene emissions from boreal wetlands in Scandinavia. *Journal of Geophysical Research* **103**: 25513-25517.

Kesselmeier J. & Staudt M. 1999. Biogenic volatile organic compounds (VOC): an overview on emission, physiology and ecology. *Journal of Atmospheric Chemistry* **33**: 23-88.

Kivinen E. 1948. Suotiede. Werner Söderström osakeyhtiön kirjapaino. Porvoo. 224 s.

Laine J & Vasander H. 1998. Suo ekosysteeminä. Kirjassa: Suomen suot. Suoseura ry. Gummeruksen kirjapaino. Toimittaja Vasander H.

Laine J. & Vasander H. 2005. Suotyypit ja niiden tunnistaminen. Metsä kirjat. Hämeenlinna. s. 63.

Lerdau M. & Gray D. 2003. Ecology and evolution of light-dependent and light-independent phytochemical volatile organic carbon. *New Phytologist* **157**: 199-211.

Loreto F., Förster A., Dürr M., Csiky O. & Seufert G. 1998. On the monoterpene emission under heath stress and on the increased thermotolerance of leaves of *Quercus ilex* L. fumigated with selected monoterpenes. *Plant, Cell & Environment* **21**: 101-107.

Lud D., Moerdijk T., van de Poll W., Buma A. & Huiskes A. 2002. DNA damage and photosynthesis in Antarctic and Arctic *Sanionia unicata* (Hedw.) Loeske under ambient and enhanced levels of UV-B radiation. *Plant Cell Environment* **25**: 1579-1589.

Lud D., Schlenzog M., Schroeter B. & Huiskes A. 2003. The influence of UV-B radiation on light-dependent photosynthetic performance in *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske in Antarctica. *Polar Biology* **26**: 225-232.

Müller J.-F. 1992. Geographical distribution and seasonal variation of surface emissions and deposition velocities of atmospheric trace gases. *Journal of Geophysical Research* **97**: 3787-3804.

Newsham K., Hodgson D., Murray A., Peat H. & Smith R. 2002. Response of two Antarctic bryophytes to stratospheric ozone depletion. *Global Change Biology* **8**: 972-983.

Newsham K. 2003. UV-B radiation arising from stratospheric ozone depletion influences the pigmentation of the Antarctic moss *Andreaea regularis*. *Oecologia* **135**: 327-331.

Niemi R., Martikainen P., Silvola J., Sonninen E., Wulff A. & Holopainen T. 2002a. Responses of two sphagnum moss species and *eriophorum vaginatum* to enhanced UV-B in a summer of low UV intensity. *New Phytologist* **156**: 509-515.

Niemi R., Martikainen P., Silvola J., Wulff A., Turtola S. & Holopainen T. 2002b. Elevated UV-B radiation alters fluxes of methane and carbon dioxide in peatland microcosms. *Global Change Biology* **8**: 361-371.

Ormrod D., Landry L. & Conklin P. 1995. Short term UV-B radiation and ozone exposure effects on aromatic secondary metabolite accumulation of flavonoid-deficient *Arabidopsis* mutants. *Physiologia Plantarum* **93**: 602-610.

Richter-Menge J., Overland J., Proshutinsky A., Romanovsky V., Bengtsson L., Brigham L., Dyurgerov M., Gascard J.C., Gerland S., Graversen R., Haas C., Karcher M., Kuhry P., Maslanik J., Melling H., Maslowski W., Morison J., Perovich D., Przybylak R., Rachold V., Rigor I., Shiklomanov A., Stroeve J., Walker D., & Walsh J.

2006. State of the Arctic Report. NOAA OAR Special Report, NOAA/OAR/PMEL, Seattle, WA, 36 pp.

Rinnan R., Rinnan Å., Holopainen T., Holopainen J. & Pasanen P. 2005. Emission of non-methane volatile organic compounds (VOCs) from boreal peatland microcosms – effects of ozone exposure. *Atmospheric Environment* **39**: 921-930.

Searles P., Flint S. & Caldwell M. 2001. A meta-analysis of plant field studies simulating stratospheric ozone depletion. *Oecologia* **127**: 1-10.

Searles P., Flint S., Diaz S., Rousseaux M., Ballare C. & Caldwell M. 1999. Solar ultraviolet-B radiation influence on *Sphagnum* bog and *Carex* fen ecosystem: first field season findings in Tierra del Fuego, Argentina. *Global Change Biology* **5**: 225-234.

Searles P., Flint S., Diaz S., Rousseaux M., Ballare C. & Caldwell M. 2002. Plant response to solar ultraviolet-B radiation in a southern South American *Sphagnum* peatland. *Journal of Ecology* **90**: 704-713.

Sharkey T. & Yeh S. 2001. Isoprene emission from plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **52**: 407-436.

Stolarski R., Bojkov R., Bishop L., Zerefos C., Staehelin J. & Zawodny J. 1992. Measured trends in stratospheric ozone. *Science* **256**: 342-349.

Säteilyturvakeskus. 2000. Ultraviolettisäteily ja ihminen. Säteilyturvakeskus, Pl 14, 00881 Helsinki.

Taalas P., Kaurola J., Kylling A., Shindell D., Sausen R., Dameris M., Grewe V., Herman J., Damski J. & Steil B. 2000. The impact of greenhouse gases and halogenated species on future solar UV radiation doses. *Geophysical Research Letters* **27**: 1127-1130.

Tingey D., Manning M., Grothaus L. & Burns W. 1980 Influence of light and temperature on monoterpene emission rates from slash pine. *Plant Physiology* **65**: 797-801.

Tiiva P., Rinnan R., Holopainen T., Mörsky S. & Holopainen J. 2007. Isoprene emissions from boreal peatland microcosms; effects of elevated ozone concentration in an open field experiment. *Atmospheric Environment*, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.01.005

Tiiva P., Rinnan R., Faubert P., Räsänen J., Holopainen T., Kyrö E. & Holopainen J. Isoprene emission from a sub-arctic peatland under enhanced UV-B-radiation. *Lähetetty*.

Turunen J., Tomppo E., Tolonen K. & Reinikainen A. 2002. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland –application to boreal and subarctic regions. *The Holocene* **12**: 69-80.

Vuorinen T., Reddy G., Nerg A.-M. & Holopainen J. 2004. Monoterpene and herbivore-induced emissions from cabbage plants grown at elevated atmospheric CO₂ concentration. *Atmospheric Environment* **38**: 675-682.

WMO. 2002. Scientific assessment of ozone depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report no. 47. World Meteorological Organization.

WMO. 2006. Scientific assessment of ozone depletion: 2006. URL: http://www.wmo.ch/web/arep/reports/ozone_2006/exec_sum_18aug.pdf