

## **Ilmastonmuutos Lapissa – näkyvätkö muutokset – sopeutuuko luonto?**

Ari Nikula ja Martti Varmola (toim.)

Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute -sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmiä ja kokouskoosteita yms.

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan julkaisuiminnassa samaan ryhmään monisteiden kanssa.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>  
ISSN 1795-150X

#### **Toimitus**

Unioninkatu 40 A  
00170 Helsinki  
puh. 010 2111  
faksi 010 211 2101  
sähköposti [julkaisutoimitus@metla.fi](mailto:julkaisutoimitus@metla.fi)

#### **Julkaisija**

Metsäntutkimuslaitos  
Unioninkatu 40 A  
00170 Helsinki  
puh. 010 2111  
faksi 010 211 2101  
sähköposti [info@metla.fi](mailto:info@metla.fi)  
<http://www.metla.fi/>

<b>Tekijät</b> Nikula, Ari & Varmola, Martti (toim.)			
<b>Nimeke</b> Ilmastonmuutos Lapissa – näkyvätkö muutokset – sopeutuuko luonto?			
<b>Vuosi</b> 2006	<b>Sivumäärä</b> 58	<b>ISBN</b> ISBN-13: 978-951-40-2000-1 (PDF) ISBN-10: 951-40-2000-6 (PDF)	<b>ISSN</b> 1795-150X
<b>Yksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet</b> Rovaniemen toimintayksikkö			
<b>Hyväksynyt</b> Mikko Hyppönen, Rovaniemen toimintayksikön johtaja (va.)			
<b>Tiivistelmä</b> Rovaniemen ja Kolarin toimintayksiköiden tutkimuspäivän aiheena oli ilmastonmuutos Lapissa ja sen vaikutukset metsäluontoon. Tuomenvirta ja Drebs tarkastelevat Lapin ilmastoä Sodankylässä vuodesta 1908 lähtien tehtyjen lämpötilan mittausten perusteella. Aineisto osoittaa, että monien sovellusten kannalta tärkeissä lämpötilasuureissa on havaittavissa muutoksia, vaikka keskilämpötiloista ei pitkäkestoisia tilastollisesti merkitseviä trendejä löytyisikään.  Helteen artikkelissa tarkastellaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia poronhoitoon. Artikkelissa testattiin neljä yleisesti esitettyä ja tärkeimpänä pidettyä hypoteesia lumipeitteen ja kesälämpötilojen vaikutuksesta porojen vasomistulokseen, kuolleisuuteen ja painoihin.  Itkosen artikkelissa tarkastellaan ilmastonmuutoksen vaikutuksia luonnonsuojelualueisiin. Jotta luonnonsuojelun tavoitteet voidaan ilmaston muuttuessaakin saavuttaa, luonnonsuojelualueiden hoidossa on otettava muutoksen vaikutukset huomioon ja varauduttava niihin jo ennakolta.  Juntunen, Neuvonen ja Sutinen tarkastelevat männyn puurajan muutoksia viimeisen 400 vuoden aikana ja metsänraja-puuraja -vaihtumisvyöhykkeen ikärakennetta. Tulokset tukevat havaintoja, joiden mukaan 1900-lukua edeltäneet vuosisadat olivat yleisesti kylmiä ja sisälsivät ainoastaan muutamia uudistumisen kannalta suotuisia ajanjaksoja vuosisadassa. Männyn puuraja on edennyt 1900-luvulla Länsi-Lapissa yli 30 kilometrin päähän vuosisadan alun metsänrajasta.  Mikkola ja Virtanen esittävät paikkatietoaineistoihin ja -menetelmiin perustuvan tilastollisen mallin, jolla männyn metsänrajan sijainti voidaan mallittaa suhteessa maantieteelliseen sijaintiin, topografiaan ja lämpötilaan. Mallin parametreja muokkaamalla pystytään tarkastelemaan myös mahdollisen ilmastonmuutoksen aiheuttamia teoreettisia metsänrajan siirtymiä.  Syksyllä 2004 Kilpisjärvellä lensi "miesmuistiin" suurin määrä aikuisia tunturimittareita. Virtanen, Pekkanen, Mikkola ja Kauhanen esittävät maastotöihin ja satelliittikuvatulkintoihin perustuen, missä ja minkälaisina tunturimittarin syönte kasvillisuudessa esiintyi Kilpisjärven alueella vuosina 2004 ja 2005. Mielikäinen pohtii artikkelissaan ihmisen aiheuttamien muutosten vaikutusta metsien kasvuun sekä sitä, miten ilmastonmuutos tulisi ottaa huomioon metsien hoidossa.			
<b>Asiasanat</b> ilmastonmuutos, ilmastonvaihtelu, Lappi, metsänhoito, metsänraja, pohjoiset havumetsät, porotalous, tunturimittari			
<b>Julkaisun verkko-osoite</b> <a href="http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2006/mwp025.htm">http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2006/mwp025.htm</a>			
<b>Tämä julkaisu korvaa julkaisun</b>			
<b>Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla</b>			
<b>Yhteydenotot</b> Ari Nikula, Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemen toimintayksikkö, PL 16, 96301 Rovaniemi. Sähköposti <a href="mailto:ari.nikula@metla.fi">ari.nikula@metla.fi</a>			
<b>Muita tietoja</b>			

## Sisällys

Esipuhe	
<i>Ari Nikula ja Martti Varmola</i> .....	5
Muuttuva Lapin ilmasto	
<i>Heikki Tuomenvirta ja Achim Drebs</i> .....	7
Ilmaston ja maastonmuotojen vaikutus metsänrajaan	
<i>Kari Mikkola ja Tarmo Virtanen</i> .....	14
Männyn puurajan muutokset viimeisen 400 vuoden aikana ja metsänraja- puuraja vaihtumisvyöhykkeen ikärakenne	
<i>Vesa Juntunen, Seppo Neuvonen ja Raimo Sutinen</i> .....	25
Käsivarren tunturimittarituhot vuosina 2004 ja 2005	
<i>Tarmo Virtanen, Katja Pekkanen, Kari Mikkola ja Heikki Kauhanen</i> .....	33
Poronhoito ja muuttuva ilmasto	
<i>Timo Helle</i> .....	42
Ilmastonmuutos ja Lapin luonnonsuojelualueet	
<i>Pertti Itkonen</i> .....	49
Miten ilmastonmuutos tulisi ottaa huomioon metsien hoidossa?	
<i>Kari Mielikäinen</i> .....	54
Kirjoittajien yhteystiedot .....	58

## Esipuhe

Ari Nikula ja Martti Varmola

Vastikään Naturessa julkaistussa artikkelissa osoitetaan, kuinka ilmastonmuutoksen vaikutukset saattavat ilmetä monimutkaistenkin prosessien kautta (Both ym. 2006). Hollannissa tehdyn tutkimuksen mukaan meilläkin yleisen kirjosiepon kannat ovat vähentyneet jopa 90 % alueilla, joilla kirjosiepoille tärkeiden hyönteisten määrähuippu on aikaistunut eniten. Syy on se, ettei kirjosiepon muutto ole aikaistunut samalla tavalla kuin hyönteisten määrällinen huippu lämmenneen ilmaston vuoksi. Kirjosiepon pesimäalueilla Afrikassa ei ole vastaavaa muutosta ilmastossa, joten kirjosiepot saapuvat pesimäalueilleen liian myöhään optimaaliseen ravintotilanteeseen verrattuna. Paikkalinnuilla, jotka myös käyttävät hyönteisravintoa, ei vastaavaa populaatiomuutosta ole tapahtunut.

Ilmastonmuutos liitetään useimmiten ilmaston lämpenemiseen. Ilmaston muuttuessa myös lämpötilojen ja sadannan vaihtelu eri vuodenaikoina saattaa muuttua, millä on vähintäänkin yhtä suuria vaikutuksia metsäekosysteemien toimintaan ja metsiin perustuviin elinkeinoihin kuin keskimääräisten ilmastotunnusten muutoksilla. Kirjosieppotutkimuksessa osoitettu epäsymmetria ilmastonmuutoksessa, eli muutoksen eriaikaisuus eri alueilla, on hyvä esimerkki vaihtelun merkityksestä. Siksi ilmastonmuutostutkimuksissa on kiinnitettävä huomiota ilmastotekijöiden vaihtelun muutoksiin sekä ajallisesti että paikallisesti. On myös tärkeää ymmärtää, miten tämän vaihtelun muutokset näkyvät metsäekosysteemien toiminnassa sekä miten ne vaikuttavat metsien hoidon ja käytön edellytyksiin.

Erilaisten proksiaineistojen perusteella tiedetään, että ilmasto on pohjoisilla alueilla vaihdellut vuosisatojen ja vuosituhansien aikana huomattavasti. Lajit ja boreaaliset metsäekosysteemit ovat tämän seurauksena sopeutuneet suuriinkin ympäristötekijöiden vaihteluihin. Kuitenkin aikaisemmin vallinneissa oloissa esiintyneet ekosysteemit ovat olleet hyvinkin erilaisia nykypäivään verrattuna, mikä on seurausta vaihtelevasta lajien sopeutumiskyvystä ilmasto- ja muihin ympäristöoloihin. Sen vuoksi nykyolojen perusteella johdetut metsien käsittelytavat tai esimerkiksi monimuotoisuuden käsite sellaisena kuin se nykyajajiston ja metsäekosysteemien esiintymisen perusteella ymmärretään, eivät välttämättä päde muuttuneissa ilmasto-oloissa.

Ilmaston lämpenemisen on esitetty lisäävän puiden kasvua ja tuovan sitä kautta hyötyä metsänkasvatukselle. Luontaiseen häiriödynamiikkaan liittyvien tekijöiden kuten metsäpalojen, hyönteisten, patogeenien ja abiottisten tuhojen lisääntyminen saattaa kuitenkin viedä osan lämpenemisen tuomasta hyödystä. Vallitseva käsitys on, että ilmaston lämpeneminen lisää esimerkiksi hyönteistuhoriskiä boreaalisisissa metsissä. Erilaisten tuhonaiheuttajien esiintymisfrekvenssi ja voimakkuus suhteessa ilmastonmuutokseen ovat asioita, joista tiedetään toistaiseksi suhteellisen vähän.

Menneisyyttä kuvaavan ilmastonvaihtelun ja ilmastonmuutoksen tutkimuksen lisäksi tarvitaan myös tutkimusta, jolla voidaan ennakoita ilmastoon liittyvien ekosysteemivasteiden suuruutta ja suuntaa. Skenaariotarkasteluissa ja kokeellisissa tutkimuksissa erilaisia ilmastoparametreja voidaan muuttaa ja tarkastella muutokseen liittyviä vasteita. Käytännön päätöksenteon ja tulevaisuuteen varautumisen kannalta on tärkeää tietää, miten suurilla tai pienillä muutoksilla ekosysteemin toiminta muuttuu ja miten paljon.

Suomessa metsiä hoidetaan intensiivisesti ja metsien kasvu on lisääntynyt noin viidenkymmenen vuoden takaiseen tilanteeseen verrattuna puolitoistakertaiseksi, Lapissa jopa kaksinkertaiseksi. Metsien puumäärä on samana aikana kasvanut noin 40 %. Ennakoidulla ilmastonmuutoksella saattaa kuitenkin olla huomattavia vaikutuksia sille, kuinka metsävarat ja metsien rakenne jatkossa kehittyvät ja kuinka metsiä voidaan jatkossa hyödyntää. Siksi voisi päätellä, että metsiin liittyvä ilmastonmuutostutkimus tulee olemaan jatkossakin tärkeä tutkimusaihe.

Tähän julkaisuun on koottu Rovaniemen ja Kolarin toimintayksiköiden tutkimuspäivillä 24.11.2005 pidettyjen esitelmien kirjalliset raportit. Raporteissa käsitellään Lapin ilmaston kehitystä, metsänrajaa, poronhoitoa, tunturimittarin massaesiintymistä, luonnonsuojelualueiden merkitystä ja metsien hoitoa ilmastonmuutoksen kannalta.

## **Kirjallisuus**

ACIA, 2005. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press. 1042 s.

Both, C., Bouwhuis, S., Lessells, C.M. & Visser, M. 2006. Climate change and population declines in a long-distance migratory bird. *Nature* 441(4): 81–83.

Metlan työraportteja 25: 7–13

## Muuttuva Lapin ilmasto

Heikki Tuomenvirta ja Achim Drebs

### 1 Johdanto

Ihmiskunnan toimista johtuen kasvihuonekaasujen pitoisuus ilmakehässä on kasvanut. Tiedeyhteisö on jo 1980-luvun lopulta ollut huolissaan ilmakehän koostumuksen muutosten vaikutuksista maapallon ilmastojärjestelmään<sup>1</sup>. Kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kohoaminen on aiheuttanut pakotteen, joka pyrkii kohottamaan maapallon pintalämpötilaa.

Ihmisen toimesta kasvihuonekaasuja vapautuu ilmakehään fossiilisista polttoaineista, teollisuudesta ja biosfäärin hiilivuotoon johtavista maankäytön muutoksista. Tärkein ihmiskunnan ilmakehään lisäämä kasvihuonekaasu on hiilidioksidi, joka on peräisin lähinnä hiilen, öljyn ja maakaasun käytöstä. Noin viidennes on peräisin biosfääristä, lähinnä trooppisten metsien hävityksestä. Muita ihmisen toiminnasta lisääntyviä kasvihuonekaasuja ovat mm. metaani ja dityppioksidi. Toisaalta polttoprosessit synnyttävät ilmakehään leijuvia pienhiukkasia mm. rikki- ja typpiyhdisteitä. Myös nämä vaikuttavat säteilyn kulkuun ilmakehässä. Kaiken kaikkiaan niiden vaikutus on jäähdyttävä, mutta ilmiön suuruutta ei tunneta yhtä tarkasti kuin kasvihuonekaasujen aiheuttamaa positiivista säteilypakotetta. Lisäksi luontaiset tekijät kuten tulivuorien purkausten aiheuttamat päästöt ja auringon säteilytehon vaihtelut aiheuttavat pakotteen maapallon ilmastojärjestelmälle.

Maapallon ilmastojärjestelmä on hakeutumassa kohti uutta tasapainotilaa, mutta koska säteilypakote kasvaa koko ajan ja ilmastojärjestelmällä on oma hitautensa sekä sisäiset kytkentänsä, niin tällä hetkellä maapallon energiatase on epätasapainossa (Hansen ym. 2005). Maapallo absorboi energiaa auringosta enemmän kuin emittoi avaruuteen. Suurin osa maapallolle kertyneestä ”ylimääräisestä” energiasta on havaintojen mukaan päätyneet lämmittämään valtameriä (yli 80 %) ja selvästi pienemmälle osuudelle ovat jääneet energiataseen muut komponentit kuten esimerkiksi ilmakehän lämpö määrän kasvu, jäätiköiden sulamiseen kulunut energia ja maaperän lämpeneminen. Havainnot ja ilmastomallilaskelmat antavat hyvin yhteensopivia tuloksia.

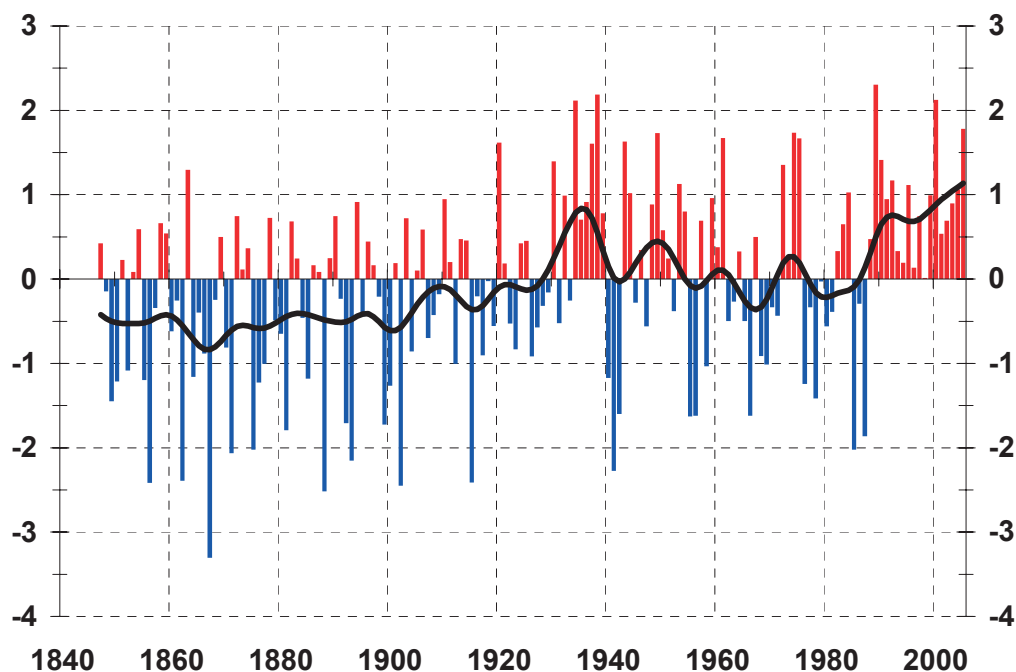
### 2 Keskilämpötilan muutokset Suomessa

Suomen tiedeseuran toimesta perustettiin säähavaintoasemaverkosto 1840-luvun jälkipuoliskolla. Tuon verkon asemista Kuopiossa, Kajaanissa ja Oulussa on havaintoja tehty lähes keskeytyksettä nykypäivään asti. Kun mukaan otetaan vielä Helsinki, niin näiden neljän aseman mittauksilla voidaan yli 150 vuoden ajalta kuvata kohtuullisella tarkkuudella lämpötilan muutoksia Suomessa (Tuomenvirta 2004).

Alkuperäisissä mittaussarjoissa on useita häiriötekijöitä, joten niissä esiintyy muitakin kuin ilmaston vaihteluista aiheutuvia muutoksia. Havaintoajat, -paikat ja mittausjärjestelyt ovat vuosien kuluessa muuttuneet. Ennen kuin mittaussarjoista voidaan luotettavasti määrätä pitkäaikaisia lämpötilan muutoksia, täytyy niistä poistaa muista kuin ilmastotekijöistä aiheutuvat vaihtelut. Lisäksi suuret kaupungit synnyttävät tietyissä säätilanteissa ympärilleen ”lämpösaarekkeen” (urban heat island) jolloin kaupunkiaseman lämpötilatrendeihin vaikuttaa suuren mittakaavan sään vaihteluiden lisäksi paikallinen ilmastotekijä (esim. Peterson 2003). Myös tämä paikallinen tekijä täytyy poistaa sarjoista, jotta ne kuvaavat alueellista ilmaston vaihtelua.

Helsingin, Kuopion, Kajaanin ja Oulun yhtenäistetyt lämpötilasarjat on yhdistetty kuvaamaan Suomen keskilämpötilan vaihtelua ( $T_4$ , kuva 1). Vaikka vuorokausien lämpötila eri puolilla Suomea voi vaihdella toisistaan poikkeavasti, niin pitemmän ajan keskiarvot käyttäytyvät samankaltaisesti. Kajaanin talven<sup>2</sup> (kesän) keskilämpötilojen korrelaatio muiden Suomen asemien kanssa on yli 0,95 (0,90) lähes koko maassa ja putoaa alle 0,95 (0,90) vasta lounaisrannikolla ja Keski-Lapissa (Heino 1994).

$T_4$ -sarjan vuosikeskilämpötilojen poikkeamat voi silmämääräisesti jakaa kolmeen jaksoon. Ensin oli nouseva suuntaus, joka huipentui lämpimään 1930-lukuun Suomessa ja laajemminkin pohjoisilla leveysasteilla. Sen jälkeen oli lievästi viilenevä jakso, joka päättyi erittäin kylmiin vuosiin 1980-luvulla, jonka jälkeen vuosikeskilämpötilat ovat olleet lähes kaikki jakson 1961–90 keskiarvoa korkeampia. Vuodesta 1988 alkanut keskimääräistä lämpimämpien vuosien jakso on jo kestoltaan 1930-luvun lämpöjaksoa pitempi ja on suuruudeltaankin vähintään samaa luokkaa.



Kuva 1. Suomen keskilämpötilan ( $T_4$ ) poikkeamat jakson 1961–90 keskiarvosta, 1847–2005. Tasoitettu käyrä vastaa suunnilleen kymmenen vuoden liukuvaa keskiarvoa. Yksikkö: °C.



Vaikka kuvasta 1 voidaan huomata, että lineaarinen trendi ei ole osuva kuvaamaan vuoden keskilämpötilan muutoksia Suomessa, niin lineaarinen trendi vuosikymmentä tai vuosisataa kohden on usein käytetty yksikkö lämpötilan muutoksille. Lineaaristen trendien tarkastelujaksoiksi valittiin koko aikasarjan pituus, muutos 1900-luvun alusta ja viimeiset 30 vuotta vuoden ja vuodenaikojen keskilämpötiloille. Viimeinen lyhyt jakso valittiin koko maapallon keskilämpötilan mukaan. Vuosi 1976 on käännepeiste koko maapallon keskilämpötilasarjassa, jonka jälkeen lämpötila on kohonnut jyrkemmin kuin aiemmin 1900-luvulla (IPCC 2001).

Vuosista 1847 ja 1901 alkavat trendit ovat samaa suuruusluokkaa. Pitkäaikainen lämpeneminen on ollut voimakkainta keväisin, mutta myös kesän ja koko vuoden trendit ovat merkitseviä<sup>3</sup>. Viimeisen kolmenkymmenen vuoden trendit ovat selvästi suurempia kuin yli sadan vuoden suuntaukset. Erityisesti 1990-luvun lämpimät talvet saavat aikaan sen, että talven ja koko vuoden lyhyen jakson trendi on suuri ja merkitsevä.

Taulukko 1. Suomen keskilämpötilan ( $T_4$ ) lineaarisia trendejä eri ajanjaksoille. Trendit, joiden  $p < 0,05$ , on merkitty tähdellä<sup>3</sup>.

[°C/10-v.]	Vuosi	Talvi	Kevät	Kesä	Syky
1847–2005	0,080*	0,075	0,150*	0,049*	0,049*
1901–2005	0,075*	0,019	0,144*	0,091*	0,049
1976–2005	0,700*	1,362*	0,270	0,581*	0,533

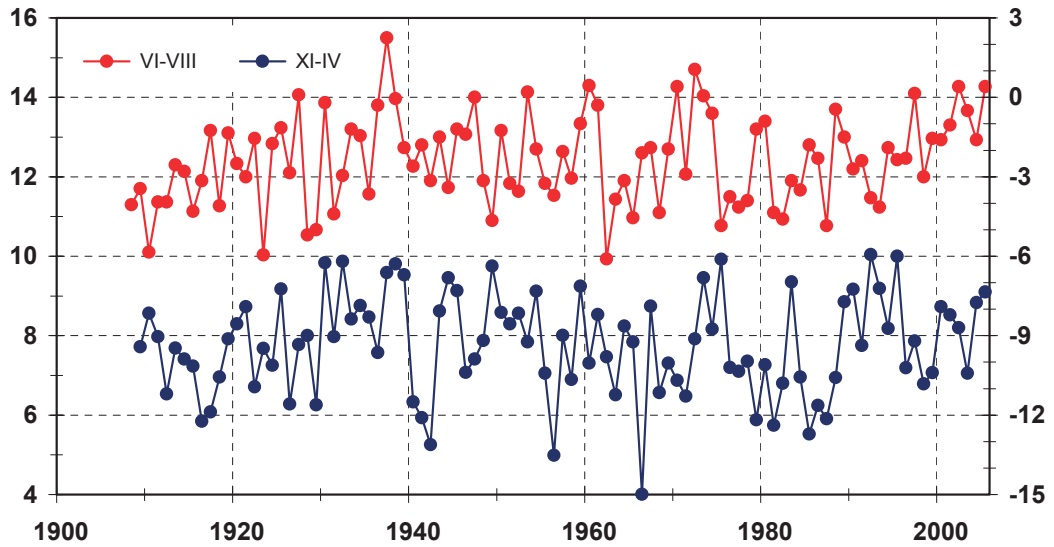
### 3 Lämpötilan muutoksia Lapissa

Sodankylästä on Suomen Lapin luotettavin lämpötilan mittausarja. Lähes yhtenäinen sarja alkaa vuodesta 1908 ja se jatkuu nykyisin Lapin Ilmatieteellisen tutkimuskeskuksen mittauksilla. Suurin osa havainnoista, joita on vähintään kolme vuorokaudessa, on digitaalisessa muodossa.

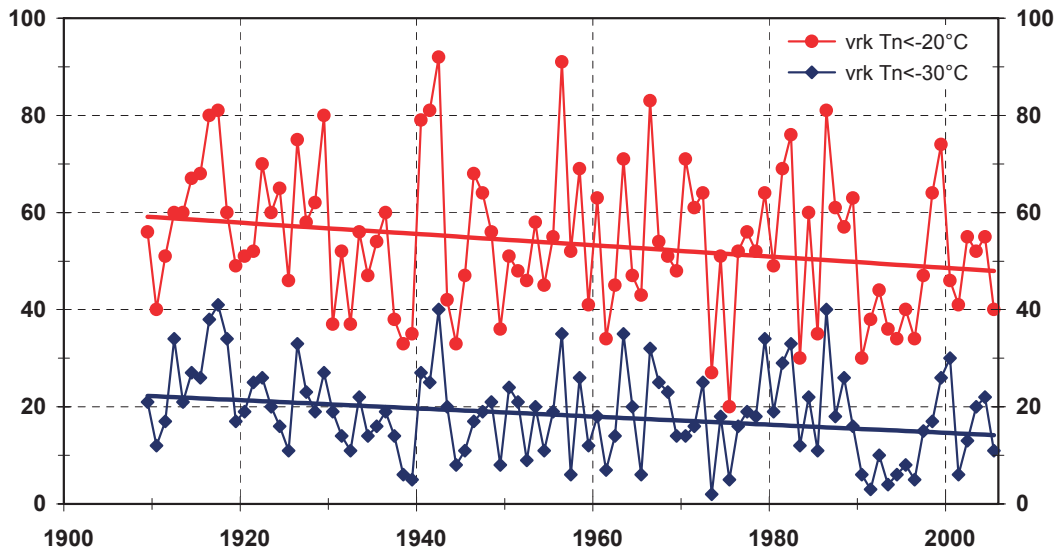
Lapin talvilämpötilojen vaihteluita esittämään valittiin marras-huhtikuun keskiarvo (kuva 2). Mitään selvää suuntausta ei ole nähtävissä, paitsi että kokonaisuudessaan erittäin kylmiä talvia ei 1990-luvun jälkeen ole ollut. Kesät ovat lämmenneet koko Suomea kuvaavassa lämpötilasarjassa (taulukko 1). Sodankylän kesälämpötiloissa ei pitkäaikaista suuntausta ole (kuva 2). Tosin viime vuosikymmeniin on osunut useita lämpimiä kesäiä.

Tarkastelemme myös talven lämpötilajakauman sekä kylmien että lämpimien ”puoliskojen” muutoksia. Talven lämpöindeksit eivät ole kovin ”ääreviä”, joten jakauman ”häntien” eli ääriämpötilojen muutoksia ei tarkastella. Kesän osalta emme tarkastele ääreviä lämpötiloja vaan kasvien yhteyttämistä kuvaavia lämpöindeksejä: kasvukauden lämpösummaa ja sen pituutta.

Jaksolla 1961–90 vuorokauden minimilämpötila oli vuoden aikana keskimäärin 53 (19) vuorokautena alle  $-20$  °C ( $-30$  °C). Indeksit siis kuvaavat ”kylmien päivien” lukumäärän muutoksia (kuva 3). Vaikka marras-huhtikuun keskilämpötila ei ole suuresti muuttunut, niin kylmien päivien määrän vähenevä trendi on tilastollisesti merkitsevä. Toisaalta vaikka kylmien päivien lukumäärä on Sodankylässä keskimäärin vähentynyt, niin Suomen alin lämpötila  $-51,5$  °C mitattiin 28.1.1999 Kittilän Pokassa.

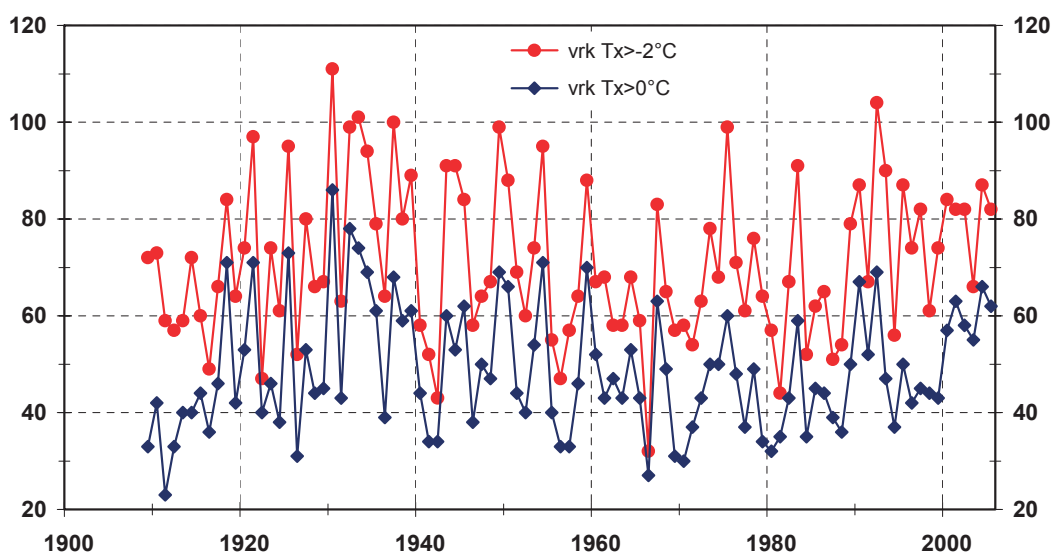


Kuva 2. Sodankylän keskilämpötila kesä-elokuussa (ylempi käyrä, vasen pystyakseli) ja marras-huhtikuussa (alempi käyrä, oikea pystyakseli), 1908–2005. Yksikkö: °C.



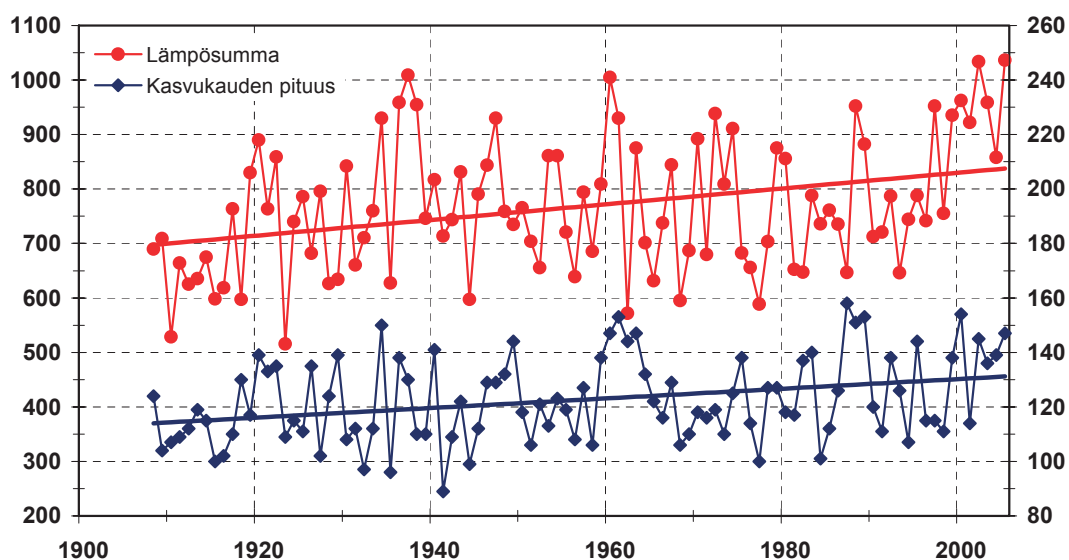
Kuva 3. Vuorokausien lukumäärä jolloin minimilämpötila on ollut alle -20 °C (ylempi käyrä) ja alle -30 °C (alempi käyrä) Sodankylässä, 1908–2005. Lineaaristen trendien  $p < 0.05$ . Yksikkö: vrk.

Keväiden lämpenemisen voisi olettaa lisäävän suoja päivien lukumäärää. Näin ei kuitenkaan ole käynyt Sodankylässä. Suojapäiviä oli marras-huhtikuussa runsaasti 1930-luvulla (kuva 4). 1980-luvulta lähtien suoja päivät ovat jonkin verran lisääntyneet, mutta trendi ei ole tilastollisesti merkitsevä.

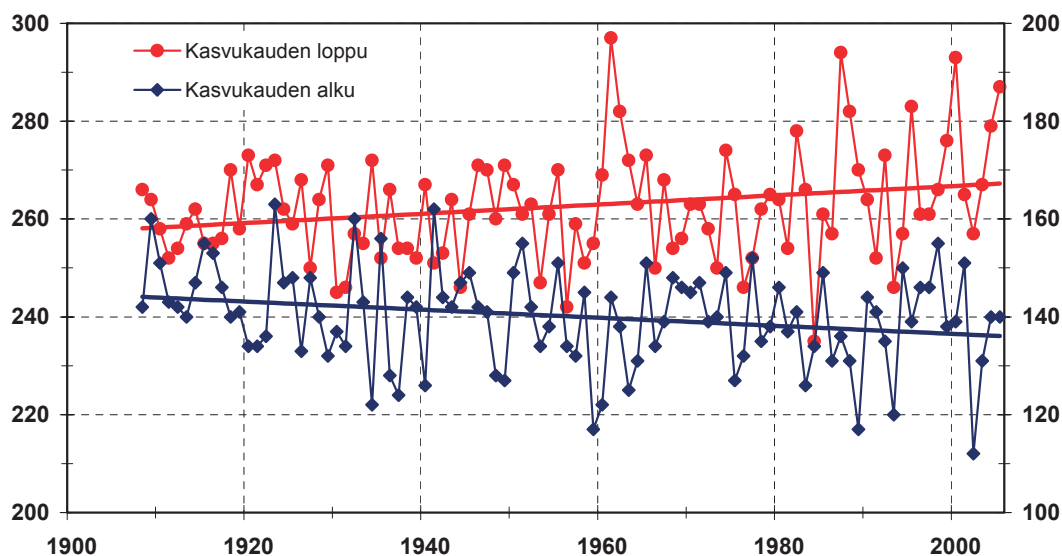


Kuva 4. Vuorokausien lukumäärä marras-huhtikuussa jolloin maksimilämpötila on ollut yli  $-2^{\circ}\text{C}$  (ylempi käyrä)<sup>4</sup> ja yli  $0^{\circ}\text{C}$  (alempi käyrä) Sodankylässä, 1908–2005. Yksikkö: vrk.

Kasvien yhteyttäminen ja monet fenologiset ilmiöt ovat riippuvaisia lämpötilasta. Kasvukauden lämpösumma ja sen pituus ovat keskeisiä biologista tuotantopotentiaalia kuvaavia suureita. Sodankylässä sekä kasvukauden lämpösumma että sen pituus<sup>5</sup> ovat kasvaneet (kuva 5). Lämpösumma korreloi kesän keskilämpötilan (korrelaatiokerroin 0,85) kanssa huomattavasti voimakkaammin kuin kasvukauden pituuden kanssa (0,46). Kasvukausi on Sodankylässä pidentynyt molemmista päistä. Lineaarisen trendin mukaan aikaistuminen keväällä on ollut 8 vuorokautta ja pidentyminen syksyllä 9 vuorokautta 98 vuoden aikana (kuva 6).



Kuva 5. Kasvukauden lämpösumma (ylempi käyrä, vasen pysty akseli yksikkönä  $^{\circ}\text{Cvrk}$ ) ja kasvukauden pituus (alempi käyrä, oikea pysty akseli yksikkönä vrk) Sodankylässä, 1908–2005.



Kuva 6. Kasvukauden alku- (alempi käyrä, oikea pysty akseli yksikkönä vrk) ja loppupäivämäärä (ylempi käyrä, vasen pysty akseli yksikkönä vrk) Sodankylässä, 1908–2005.

## 4 Tulosten tarkastelua

Keskiarvojen tarkastelu voi antaa harhaanjohtavan tuntuman, ettei Lapin lämpötiloissa ole tapahtunut huomattavia muutoksia. Tässä työssä esitetyt muutamat lämpöindeksit osoittavat, että monien sovellusten kannalta tärkeissä lämpötilasuureissa on havaittavissa muutoksia, vaikkei keskilämpötiloista pitkäkestoisia tilastollisesti merkitseviä trendejä löytyisikään.

Lapin osalta laskelmissa on käytetty ainoastaan Sodankylän mittauksia. Tulokset olisi syytä varmistaa laajemmalla aineistolla, jotta paikallisten ilmastotekijöiden ja aina pitkiä aikasarjoja kiu-saavien ei-ilmastollisten vaihtelujen vaikutus saadaan minimoitua.

Havaitut lämpötilan muutokset Suomen keskiarvossa ja Sodankylän aikasarjassa ovat samansuuntaisia kuin ilmastomallien tulosten perusteella laaditut skenaariot lämpötilanmuutoksista (Jylhä ym. 2004, Ruosteenoja ym. 2005). Sodankylän talvilämpötiloissa näkyi sama piirre kuin Kjellströmin (2004) tutkimissa Tukholman lämpötilajakaumissa. Sekä havaintojen että ilmastomallien mukaan talvien lämpeneminen tapahtuu siten, että kylmimmät lämpötilat kohoavat enemmän kuin mediaani tai jakauman lämmin puolisko. On kuitenkin syytä muistaa, että Suomen ilmasto on luonnehtiva suuri luontainen vaihtelu voi vaimentaa tai voimistaa koko maapalloa koskevan ilmastomuutoksen signaalia.

<sup>1</sup> IPCC 2001 ja aiemmat arviointiraportit vuosilta 1995 ja 1990.

<sup>2</sup> Ellei toisin mainita, niin vuodenajoilla tarkoitetaan tässä artikkelissa kolmen kuukauden jaksoja. Talvi on joulu-, tammi- ja helmikuu, jne.

<sup>3</sup> Tässä työssä käytettyä tilastollisen merkitsevyyden testiä on syytä pitää vain suuntaa antavana, sillä testattaessa ei ole huomioitu esimerkiksi sarjojen autokorrelaatiota.

<sup>4</sup> Keväisin auringon säteilyn vaikutuksesta sulaminen voi alkaa jo ilman lämpötilan ollessa vielä pakkasen puolella ja siksi myös -2 °C rajaa käytetään suojapäivien määritelmänä (Brown 2000).

<sup>5</sup> Tässä työssä on kasvukauden lämpösumma laskettu ja sen pituus määritetty vuorokauden maksimi- ja minimilämpötiloista, koska näin vältetään aikasarjoissa mittausaikojen muutoksista johtuvat epäjatkuvuudet. Vaikka kasvukauden rajalämpötilana on käytetty +5°C, niin eri menetelmästä johtuen lukuarvot poikkeavat jonkin verran Ilmatieteen laitoksen julkaisemista kasvukauden tiedoista.

## Kirjallisuus

- Brown, R. D. 2000. Northern Hemisphere snow cover variability and change, 1915–1997. *Journal of Climate* 13: 2339–2355.
- Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A., Koch, D., Lacis, A., Lo, K., Menon, S., Novakov, T., Perlwitz, J., Russell, G., Schmidt, G. A. & Tausnev, N. 2005. Earth's energy imbalance: Confirmation and implications. *Science* 308: 1431–1435.
- Heino, R. 1994. Climate in Finland during the period of meteorological observations. Finnish Meteorological Institute Contributions No. 12. 209 s.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K. & Johnson, C. A. (toim.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 881 s.
- Jylhä, K., Tuomenvirta, H. & Ruosteenoja, K. 2004. Climate change projections for Finland during the 21st century. *Boreal Environment Research* 9: 127–152.
- Kjellström, E. 2004. Recent and Future Signatures of Climate Change in Europe. *Ambio* 33: 193–198.
- Peterson, T. C. 2003. Assessment of urban versus rural in situ surface temperatures in the contiguous United States: No difference found. *Journal of Climate* 16: 2941–2959.
- Ruosteenoja, K., Jylhä, K. & Tuomenvirta, H. 2005. Climate scenarios for FINADAPT studies of climate change adaptation. FINADAPT Working Paper 15. Finnish Environment Institute Mimeographs 345. 38 s. Helsinki.
- Tuomenvirta, H., 2004. Reliable estimation of climatic variations in Finland. Finnish Meteorological Institute Contributions, No. 43. 80 s. + liitteet 78 s.

Metlan työraportteja 25:14–24

## Ilmaston ja maastonmuotojen vaikutus männyn metsänrajaan

Kari Mikkola ja Tarmo Virtanen

### 1 Johdanto

Pohjoisella metsänrajalla kohtaa kaksi merkittävää ekosysteemiä, boreaalinen taiga ja arktinen tundra. Kyseessä on vaihettumisvyöhyke, jossa kasvuympäristön muutokset ilmentyvät lajien runsaussuhteissa sangen herkästi. Varsinkaan laakeilla alueilla metsänraja ei ole niinkään terävä raja kuin laaja vaihettumisvyöhyke, metsämeren saarekkeinen liukuma aukeaksi tundraksi (Hustich 1966, Timoney ym. 1992, Payette ym. 2001, Virtanen ym. 2004).

Pohjoista metsänrajan sijaintia määrittävistä tekijöistä ilmasto-olot ovat tärkeimpiä. Jo varhain on todettu rajan noudattavan kutakuinkin vuoden lämpimimmän kuukauden +10° C tasa-arvokäyrää (Hustich 1966, Timoney ym. 1992, Tuhkanen 1999). Tästä peukalosäännöstä on kuitenkin useita alueellisia poikkeamia; useilla seuduilla on todettu rajan olevan lähempänä +11 °C, jopa +13 °C käyrää (Tuhkanen 1999, Virtanen ym. 2004).

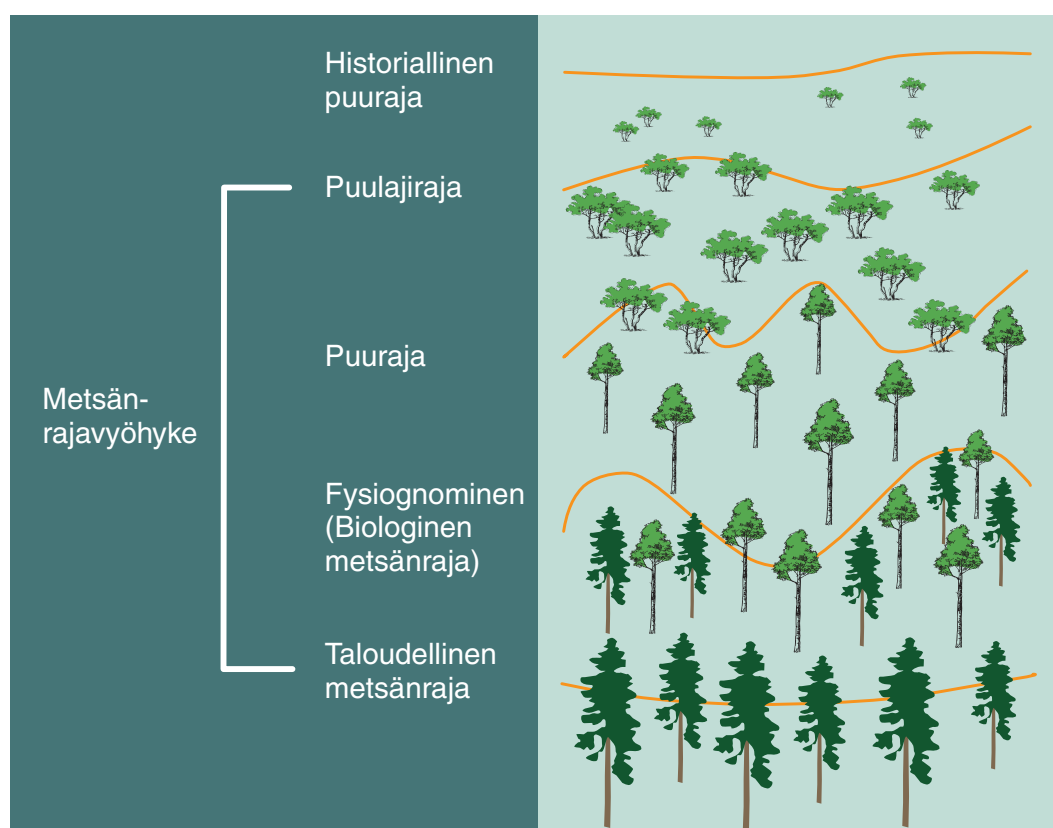
Poikkeamiin on monenlaisia syitä, esimerkiksi vaihtelevat kosteus- ja maaperätekijät (Sveinbjörnsson 2000, Skre ym. 2002), metsäpalot (Zackrisson 1977, Rupp ym. 2000), laidunnus (Kallio ja Lehtonen 1973, Niemelä ym. 1987, Oksanen ym. 1995, Stöcklin ja Körner 1999) ja ihmisen toimet (Mattsson 1995, Veijola 1998b, Hofgaard 1999) muokkaavat metsänrajaa. Metsänraja voi myös reagoida ilmastotekijöiden hyvinkin lyhytaikaisiin muutoksiin (Tuhkanen 1993, Eronen ym. 1999, Kullman 2001, Payette ym. 2001).

Tässä tutkimuksessa tarkastelemme metsänrajaa tilastollisten menetelmien avulla ja luomme sijaintiin ja ilmastomuuttujiin pohjautuvan logistisen mallin. Logistinen regressio on osoittautunut tehokkaaksi ekologisten ilmiöiden ja maisematason ilmiöiden todentajaksi (Franklin 1995, Virtanen ym. 2004). Työn mahdollisti Metsähallituksen Ylä-Lapin luonnonhoitoalueen biotooppikartoituksen laaja paikkatietokanta, josta saimme tiedon mäntymetsien sijainnista.

## 2 Aineisto ja menetelmät

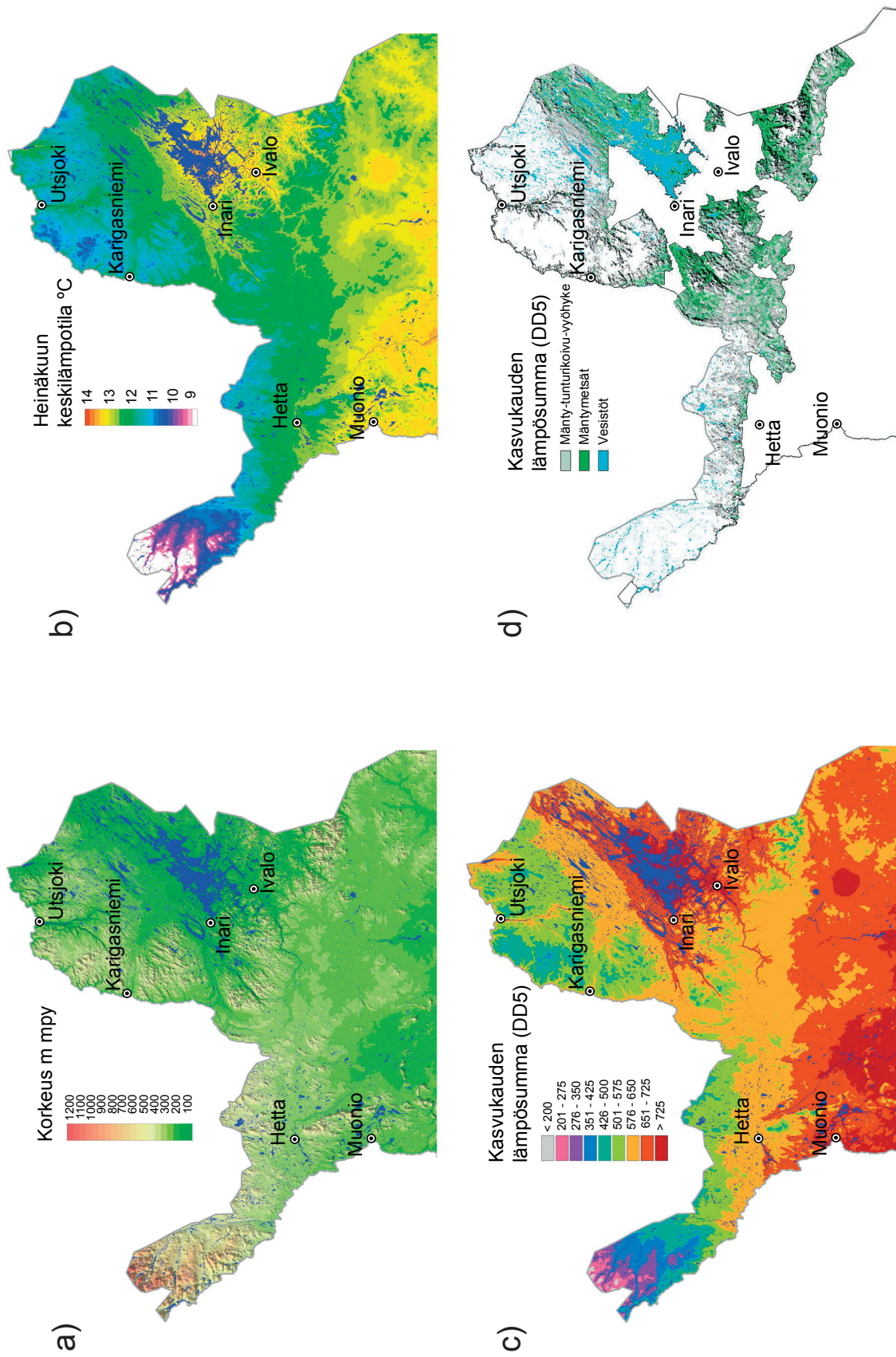
### 2.1 Tutkimusalue

Tutkimuksen kohdealue oli pohjoisin Suomi kattaen suurimman osan Inarin, Utsjoen ja Enontekiön kuntien alueesta. Tyypillistä alueelle ovat loivalakiset tunturit ja muutamat jyrkät jokilaaksot (Seppälä ja Rastas 1980), maaston keskikorkeus vaihtelee keskimäärin 200–300 m merenpinnan yläpuolella (kuva 2a). Heinäkuun keskilämpötila alueella vuosina 1961–1990 vaihteli 6,4° ja 14,2 °C välillä (kuva 2b) ja kasvukauden lämpösumma (DD5) 125:sta 800:aan asteeseen (kuva 2c).



Kuva 1. Kaavio metsänrajan vyöhykkeellisydestä mm. Hustichin (1966) ja Veijolan (1998b) mukaan.

Alue kuuluu kasvillisuusvyöhykkeiltään lievästi mantereiseen pohjoisboreaaliseen havumetsään ja lievästi mereiseen orohemiartiseen vyöhykkeeseen (Ahti ym. 1968) Havumetsänrajan muodostaa mänty (*Pinus silvestris* L.). Metsänraja on alueen tasaisilla mailla luonteeltaan epämääräinen ja saarekkeinen ja rinteillä selväpiirteisempi. Tunturikoivun (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii* (Orlova) Hämet-Ahti (syn. *B. pubescens* ssp. *tortuosa* Lebed.) osuus metsiköissä lisääntyy mäntymetsänrajaa lähestyttäessä ja koivu muodostaa monin paikoin metsänrajan 100–130 m mäntyä korkeammalla. Puurajan yläpuolella vallitsee tyypillinen tunturikasvillisuus varpuineen, sammalineen ja jäkälineen. Metsänrajan vyöhykkeellisyttä on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 2. a) Topografia, b) heinäkuun keskilämpötila 1961–1990, c) keskimääräinen lämpösomma (DD5) 1961–1990 ja d) kasvillisuuspeitto.



## 2.2 Vastemuuttajat

Metsänrajan ja puurajan määritelmiä on olemassa suuri joukko (ks. Hustich 1966, Timoney ym. 1992, Veijola 1998a, Tuhkanen 1999, Sveinbjörnsson 2000, Callaghan ym. 2002); tässä työssä metsänraja on määritelty koivikon ja männikön vaihettumisalueeseen vastaten kutakuinkin kuvan 1 fysiognomista metsänrajaa.

Käytimme Metsähallituksen kuviotietoaineiston männyn latvuspeittävyttä vastemuuttujana kuvaamaan metsänrajan sijaintia (kuva 2 d). Tietokanta koostuu 237000 kuvioista ominaisuustietoineen (Sihvo 2001) ja se kattaa koko pohjoisimman Suomen valtionmaat. Raja-arvoksi 0/1 vastemuuttujalle määritimme ykkösen niille kokonaislatvuspeittävydeltään yli yhden prosentin kuvioille, joiden mäntyosuus ylitti 1 % ja tätä alemmille nollan. Koska kuusi ei käytännössä muodosta missään alueella metsänrajaa ja sen osuus on hyvin vähäinen, sen runsaus summattiin mukaan männyn peittävyksiin.

## 2.3 Selittävät muuttajat

Selittävät muuttajat määritimme 200 x 200 metrin hilaamallaan, eli koko alueelle muodostettiin em. tarkkuudella kullekin muuttujalle rasterityyppinen tietokerros. Yksittäisten kuvioiden sijainnin laskimme keskiarvoistamalla kuviolle osuneiden 200 m hila-alkioiden sijainnin. Kuvion korkeuden merenpinnan yläpuolella laskimme samalla menetelmällä. Lämpösummarasteri tuotettiin Ojansuun ja Henttosen (1983) kuvaamalla menetelmällä, joka laskee kuukausikeskiarvojen pohjalta paikalliset lämpösummat ottaen huomioon vesistöjen läheisyyden ja korkeudesta johtuvan lämpötilavaikutuksen (adiabaattinen lämpötilan lasku). Männyn metsänrajan mallituksessa poistimme aluksi vesikuviot aineistosta.

## 2.4. Mallitus

Käytetty malli oli muotoa

$$P = \frac{e^x}{1+e^x}$$

ja

$$x = \text{logit}(P) = \ln \left[ \frac{P}{1-P} \right] = a + bX_1 + cX_2 + \dots + kX_n$$

jossa a, b, c, ... k olivat parametreja ja  $X_1, X_2 \dots X_n$  selittäviä muuttujia. Malli antaa tulokseksi männyn läsnäolon todennäköisyyden ruudussa välille 0–1. Tunturikoivikot ja paljakat saavat mallissa nollaa lähestyviä arvoja ja mäntymetsäalue taas ykkösen. Tuotimme mallilla kaksiulotteisen todennäköisysspinnan 200 x 200 m resoluutiolla käyttäen parametreina ilmastomuuttujia ja sijaintitietoa. Mäntyrajan havainnollistamiseksi jaoimme pinnan kahtia tasa-arvokäyrällä  $p = 0,5$ .

## 2.5 Ilmastonmuutosskenaariot

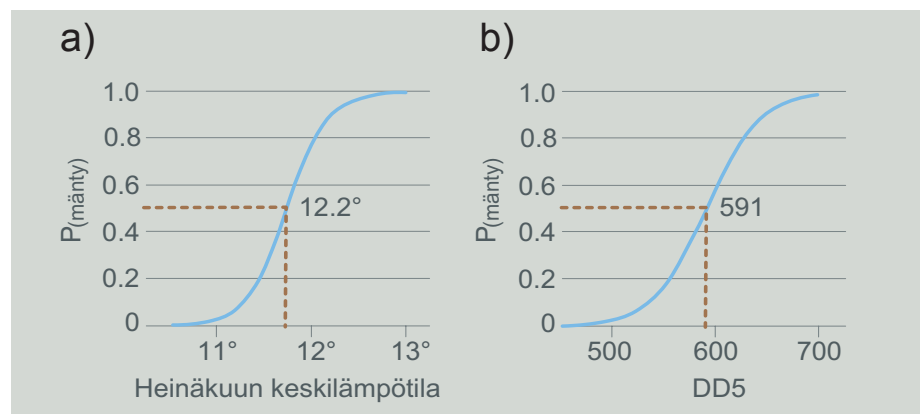
Mallin parametreja muokkaamalla pystyimme tarkastelemaan mahdollisen ilmastonmuutoksen aiheuttamia teoreettisia metsänrajan siirtymiä. Käyttäen heinäkuun keskilämpöön pohjautuvaa mallia (taulukko 1) laskimme rajan sijainnin erilaisten vaihtoehtoisten lämpötilamuutosten vallitessa. Valitsimme sellaiset heinäkuun keskilämpötilojen rajaukset ( $-1^{\circ}$ ,  $+1^{\circ}$  ja  $+3^{\circ}$ ) jotka mahtuvat tutkimusalueen historiallisten – todennettujen tai otaksuttujen – ilmastollisten vaihtelurajojen sisälle (Räisänen 2001, Seppä ja Birks 2001).

## 3 Tulokset

Mallin parametrit lämpösummille (DD5), heinäkuun keskilämmöille ja sijaintitiedoille on kuvattu taulukossa 1. Saimme parhaan sovituksen sijaintitietojen pohjalta tuotetulle mallille ( $R^2 = 0,53$ ) ja toiseksi parhaan heinäkuun keskilämpötiloille ( $R^2 = 0,47$ ). Lämpösumma ( $R^2 = 0,44$ ) tuotti hiekan heikomman selityssasteen. Korkeuteen ja koordinaatteihin pohjautuvassa mallissa pohjoisuus (Y-koordinaatti) selitti 61 %, korkeus 36 % ja itäisyys (X-koordinaatti) vain 3 % vaihtelusta.

Taulukko 1. Regressiomallit metsänrajan mallituksessa (N = 236272).

Malli	$P_{(0,5)}$	$r^2$	Termi	Estimaatti	Wald $\chi^2$
Sijaintimuuttujat	-	0,528	Vakio	-327,702	
			X_koord.	-0,0000065	$2,83 \cdot 10^8$
			Y_koord.	0,000045	$5,14 \cdot 10^9$
			Korkeus	0,02045	$2,99 \cdot 10^9$
Heinäkuun keskilämpö	12,2°C	0,468	Vakio	57,405	
			Keskilämpö	-0,0469	$5,34 \cdot 10^9$
Lämpösumma	591 DD5	0,440	Vakio	22,781	
			DD5	-0,0386	$5,48 \cdot 10^9$



Kuva 3. Metsänrajan sijaintitodennäköisyys logistisessa regressiomallissa suhteessa a) heinäkuun keskilämpöön ja b) keskimääräiseen lämpösummaan.

Logististen mallien käänteinen tulkinta antoi raja-arvon 0,5 kohdalla lämpösummaksi 591 d.d. ja heinäkuun keskilämmöksi 12,2 °C (taulukko 1, kuva 3). Nämä raja-arvot ovat mallissa käytetyn ilmastohavaintoaineiston mukaisia estimaatteja tuona aikana (1961–1990) vallinneesta tilanteesta mäntymetsän rajalla.

Eri mallien tuottamat mäntymetsänrajat on kuvattu kartakkeissa 4 a), b) ja c). Kaikki mallit onnistuvat kuvaamaan todellista rajaa kohtuullisen hyvin, mutta joitain paikallisia poikkeamia esiintyy. Heinäkuun keskilämpötilalla laskettu malli on hyvin samankaltainen kuin lämpösummasta tuotettukin, mutta alueen luoteisosassa malli tuottaa rajan alemmaksi. Molemmat mallit toimivat hyvin alueen länsiosissa (Enontekiö) ja idässä (UK-puisto) mutta keskiosissa mallin antama ennuste nousee korkeammalle kuin todellinen metsänraja. Pelkkään sijaintitietoon perustuva malli toimii hyvin erityisesti Inarinjärven pohjoispuolella, jossa maasto on laakeaa ja soista ja todellinen metsän ja tunturikoivikon vaihtumisvyöhyke on leveä. Kuvissa esitetty  $P = 0,3-0,7$  todennäköisyysvyöhyke kuvastaa mallin paikallista epävarmuutta ja samalla vaihtumisvyöhykkeen, ekotonin, leveyttä ao. alueilla. Jyrkemmällä rinnemailla tuo vyöhyke on hyvin kapea.

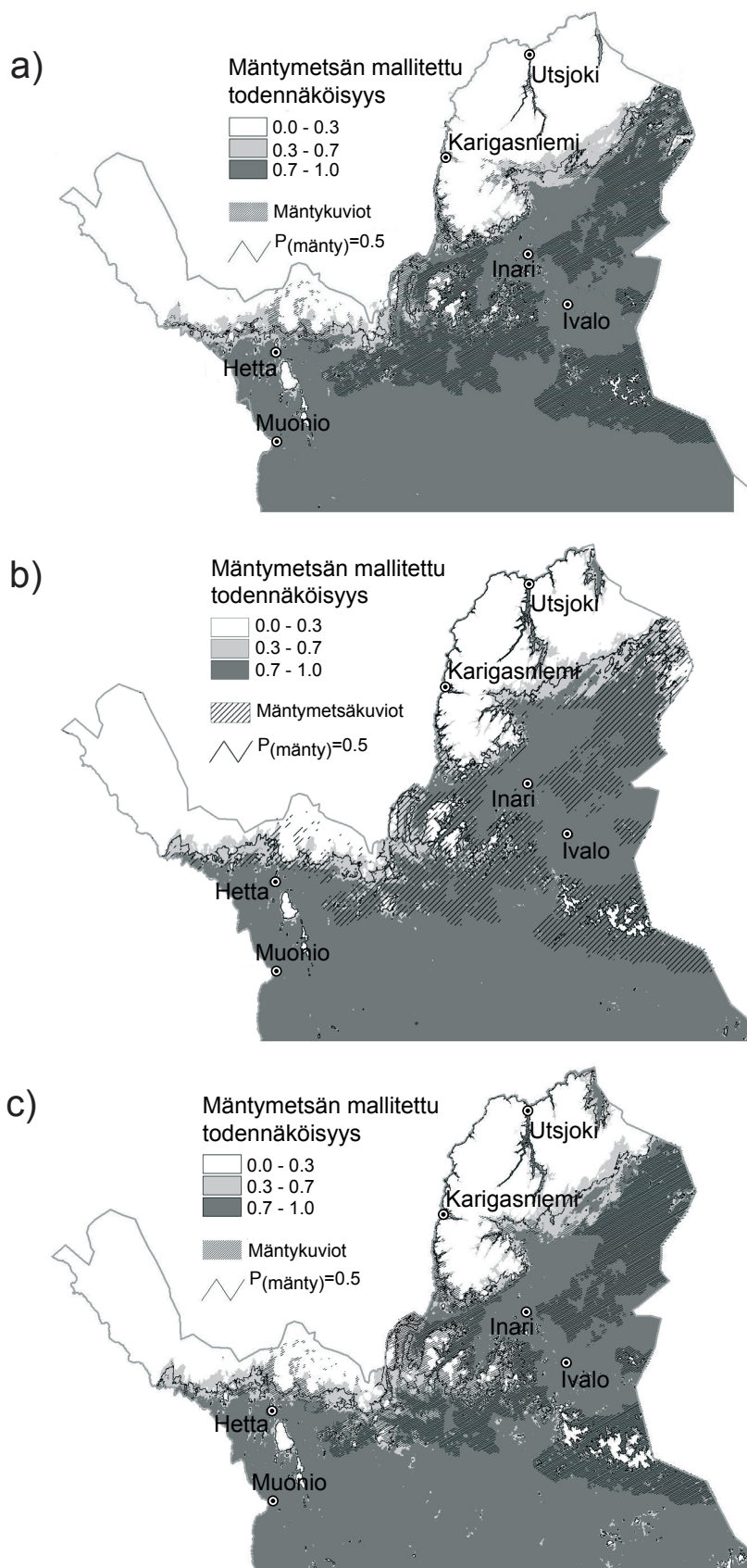
Kuvassa 5 on esitetty hypoteettiset mäntymetsänrajat erilaisten ilmastomuutoskenaarioiden vallitessa. Heinäkuun keskilämmön 1 °C asteen korotus nostaa rajan noin 30 km pohjoisemmaksi ja vastaava vähennys saman verran etelämmäksi. Kolmeen asteen nousu siirtää metsänrajan jo aivan korkeimmille tunturiseuduille, 800–1000 m korkeuteen merenpinnasta. Vallitsevassa nykytilanteessa tutkimusalueesta on 44,6 % männiköiden vallassa (poislukien vedet, suot ja louhikot) ja 1 asteen nousu heinäkuun keskilämpötilassa nostaisi tuon arvon 91,2 %:een ja 3 asteen nousu peräti 98,8 %:aan (taulukko 2).

Taulukko 2. Mahdolliset peitteellisyyspinta-alat eri ilmastoskenaarioiden vallitessa heinäkuun keskilämpömallieista laskettuina. Luokka muut sisältää vedet, suot, kivikot ja kulttuurialueet.

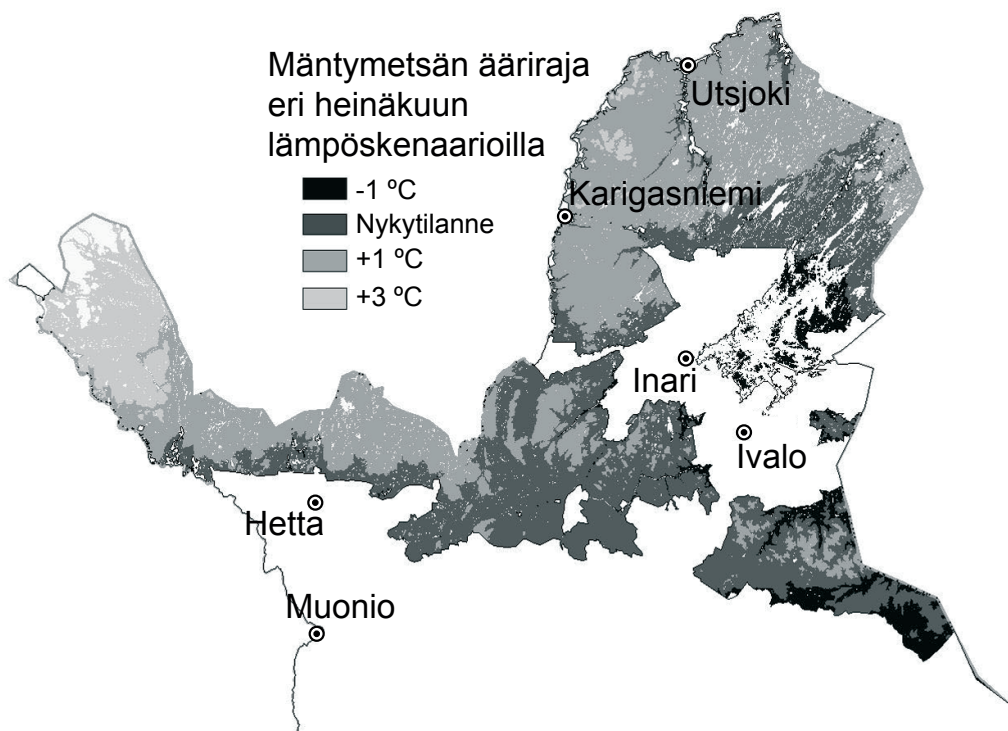
	Nykytila	+1° lämpeneminen	+3° lämpeneminen
Mäntyä ja/tai kuusta kasvava alue	29,9 %	61,3 %	66,4 %
Tunturikoivikot ja paljakat	37,3 %	5,9 %	0,8 %
Muut	32,8 %	32,8 %	32,8 %

## 4 Pohdinta

Koska mallimme on puhtaasti numeerinen näkökulma metsänrajadynamiikkaan, varsinaiset rajan olemukseen vaikuttavat ekologiset ja fysiologiset prosessit jäävät arvailujen varaan. Tulokset viittaavat kuitenkin vahvasti siihen suuntaan, että metsänrajan muodostumiseen vaikuttavat tekijät ovat vahvasti sidoksissa kasvukauden aikaisiin lämpöoloihin, jotka taas kytkeytyvät kohdekuviin sijaintiin ja korkeuteen. Mallissa selittäjinä käytetyt ilmastomuuttujat pohjaavat todellisiin ilmastohavaintoasemaverkon mittausarvoihin, mutta paikallinen pienvaihtelu muodostuu korkeusmallista ja siihen sisältyvästä adiabaattisesta (korkeusriippuvaisesta) lämpötilasta (Ojansuu ja Henttonen 1983). Jos tavoiteltaisiin vain metsänrajan paikantamista sinänsä, sijaintitieto tuottaisi riittävän tarkan kuvan; ilmastomuuttujilla luodut mallit antavat kuitenkin mahdollisuuden ekstrapoloida metsänrajan muutosta erilaisten lämpötilaskenaarioiden vallitessa.



Kuva 4. Männyn metsänrajamallit ( $P_{\text{mänty}} = 0,5$ ) eri vastemuuttujilla. a) maaston korkeus ja sijaintitieto b) heinäkuun keskilämpö ja c) DD5 (ks. taulukko 1). Mallin todennäköisyysvyöhyke  $P = 0,3 - 0,7$  on myös kuvattu.



Kuva 5. Heinäkuun keskilämpömalliin ekstrapoloituidut teoreettiset mäntiköiden maksimilaajuudet mahdollisissa ilmastonmuutostiloissa. Käytetyt arvot ovat: nykytila, -1 °, +1 ° ja +3 °.

Aiemmissa tutkimuksissa mäntymetsänrajan on arvioitu sijaitsevan kutakuinkin 600 d.d.:n lämpösummarajalla, puurajan 550 d.d.:n rajalla ja yksittäisten puiden selviävän hengissä jopa 450 d.d.:n alueella (Norokorpi 1995, Veijola 1998a). Tässä tutkimuksessa saimme raja-arvoksi 591 d.d. Vertailua vaikeuttaa sekä mahdollinen selittäjänä käyttämämme lämpösummamallin alueellinen epätarkkuus että metsänrajan käsitteelliset erot – kyseessä on todellakin vaihtumisvyöhyke eikä selväpiirteinen raja. Mittausajanjakso 1961–1990 oli myös jonkin verran pitemmän ajan keskiarvoja viileämpi (Solantie 1992). Usein viitattu heinäkuun keskilämmön raja-arvo 12,2 °C männylle (Hustich 1948) sopii hyvin saamaamme 12,2 °C arvoon.

Mallimme selittivät 44:stä 55:een prosenttia mäntymetsänrajan alueellisesta vaihtelusta. On selvää, että mallit ovat hyvin deterministisiä yleistyksiä monisyisestä prosessista. Metsänraja on tutkimusalueella luonteeltaan sekä orografinen että pohjoisempaan osin arktinen. Tämä ilmenee rajan selkeänä alenemisena pohjoiseen päin, korkeimmillaan raja on vedenjakajaturureilla ja alueen länsiosissa. Malli on myös hyvin herkkä valitulle 0/1-latuspeittävyuden raja-arvolle. Tutkimuksessa käyttämämme raja-arvo vastaa kutakuinkin sulkeutuneen metsän ja yksittäisten puiden välisen vyöhykkeen keskiarvoa.

Joillekin ilmastodatalla tuotettujen mallien ja todellisen metsänrajan eroille löytyy luontevat selitykset. On tiedossa, että metsiä on hakattu, joillain alueilla jopa intensiivisesti viimeksi kuluneiden 200 vuoden aikana (Hustich 1948 ja 1966, Mattsson 1995, Veijola 1998b). Mallimme ennustaa mäntymetsää esimerkiksi Pulmankijärven laaksoon – nykyään siellä on vain muutamia metsiköitä jäljellä, mutta aluella tiedetään avohakatun mäntiköitä 1800-luvun lopulla (Veijola 1998b).

Mäntymetsien laajuus on vaihdellut runsaasti holoseenikauden aikana ilmastovaihteluihin liittyen (Eronen ym. 1999, Kultti ym. 2006). Tekemässämme yksinkertaistetussa skenaariossa (kuva 5) metsänrajan sijainti muuttui hyvin merkittävästi otaksutun ilmastomuutoksen (Räisänen 2001) myötä. On kuitenkin otettava huomioon, että muutos ei todellisuudessa ole näin suoraviivainen, vaan metsänrajan siirtyminen seuraa viiveellä ilmaston muuttumista. Puiden leviämisyfysiologia asettaa omat rajoituksensa – vallisevassa nykyilmastossa siementen laadulle, niiden itämiselle ja taimien alkukehitykselle otolliset kesäkaudet tutkimusalueella ovat harvinaisia (Henttonen ym. 1986, Kellomäki ym. 1997, Juntunen ym. 2002). Luontaiset leviämisseet kuten laajat vesistöt, louhikkoalueet ja jyrkät rinteet voivat edelleen hidastaa mäntyjen leviämistä (Rupp ym. 2000, Clark ym. 2001). Lisäksi on otettava huomioon karut maaperäolot, suoalueet (Sveinbjörnsson 2000, Skre ym. 2002), metsäpalot (Zackrisson 1977, Rupp ym. 2000), tuuliolot (Sveinbjörnsson 2000), erilaiset patogeenit (Jalkanen 2003), sekä muiden biottisten tekijöiden kuten mäntypistiäisen (Niemelä ym. 1987), myyrien ja sopulien (Hustich 1948), poron (Oksanen ym. 1995, Jalkanen 2003), hirven (Stöcklin ja Körner 1999) ja paikallisen puunkäytön (Mattsson 1995, Veijola 1998b, Hofgaard 1999, Skre ym. 2002) vaikutus.

Tässä tutkimuksessa esitimme, kuinka laaja-alaista ekologista vaihtumisvyöhykettä voidaan tarkastella onnistuneesti suhteellisen yksinkertaisella tilastollisella mallilla, kunhan käytettävissä on riittävän mittava, edustava ja yksityiskohtainen paikkatietoaineisto. Työssämme käyttämä mallituslähestymistapa on eräs tärkeä työkalu pyrittäessä ymmärtämään pohjoisten ekosysteemiin käyttäytymistä muuttuvassa ilmastossa (Sykes ja Prentice 1996, Kellomäki ym. 1997, Kittel ym. 2000, Rupp ym. 2000, Skre ym. 2002).

## Kiitokset

Metsähallituksen käyttöömme luovuttama Ylä-Lapin luonnonhoitoalueen biotooppikartoituksen paikkatietokanta mahdollisti tämän työn toteuttamisen. Osaa työstä tuki myös Suomen Akatemian rahoittama ARCTICA-projekti. Ari Nikula antoi useita rakentavia kommentteja työn kuluessa ja Vesa Nivala auttoi ilmastomalliaineiston käyttöönotossa.

## Kirjallisuus

- Ahti, T. Hämet-Ahti L. & Jalas, J. 1968. Vegetation zones and their sections in northwestern Europe. *Annales Botanici Fennici* 5:169–211.
- Callaghan, T. V., Werkman, B. R. & Crawford, R. M. M. 2002. The tundra-taiga interface and its dynamics: concepts and applications. *Ambio Special Report* 12: 6–14.
- Clark, J. S., Lewis, M. & Horvath, L. 2001. Invasion by extremes: population spread with variation in dispersal and reproduction. *American Naturalist* 157: 537–554.
- Eronen, M., Lindholm, M., Saastamoinen, S. & Zetterberg, P. 1999. Variable Holocene climate, tree line dynamics and changes in natural environments in northern Finnish Lapland. *Chemosphere – Global Change Science* 1: 377–387.
- Franklin, J. 1995. Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography* 19: 474–499.
- Henttonen, M., Kanninen, M., Nygren, M. & Ojansuu, R. 1986. The maturation of *Pinus sylvestris* seeds in relation to temperature climate in northern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1: 243–249.
- Hofgaard, A. 1999. The role of “natural” landscapes influenced by man in predicting responses to climate change. *Ecological Bulletins* 47: 160–167.

- Hustich, I. 1948. The Scots pine in northernmost Finland and its dependence on the climate in the last decade. *Acta Botanica Fennica* 42: 75 s.
- 1966. On the forest-tundra and the northern tree-lines. A preliminary synthesis. Reports from the Kevo Subarctic Research Station 3: 7–47.
- Jalkanen, R. 2003. Havupuutaimikoiden tuhojen esiintyminen ja merkittävyys Suomessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2003: 59–68.
- Juntunen, V., Neuvonen, S., Norokorpi, Y. & Tasanen, T. 2002. Potential for timberline advance in Northern Finland, as revealed by monitoring during 1983–99. *Arctic* 55: 348–361.
- Kallio, P. & Lehtonen, J. 1973. Birch forest damage caused by *Oporinia autumnata* (Bkh.) in 1965–66 in Utsjoki, N Finland. Reports from the Kevo Subarctic Research Station 10: 55–69.
- Kellomäki, S., Väisänen, H. & Kolström, T. 1997. Model computations on the effects of elevating temperature and atmospheric CO<sub>2</sub> on the regeneration of Scots pine at the timber line in Finland. *Climatic Change* 37: 683–708.
- Kittel, T. F. G., Steffen, W. L. & Chapin, F. S. III 2000. Global and regional modeling of arctic-boreal vegetation distribution and its sensitivity to altered forcing. *Global Change Biology* 6 (Suppl. 1): 1–18.
- Kullman, L. 2001. 20th Century climate warming and tree-limit rise in southern Scandes of Sweden. *Ambio* 30: 72–80.
- Kultti, S., Mikkola, K., Virtanen, T., Timonen, M. & Eronen, M. 2006. Past changes in the Scots pine forest line and climate in Finnish Lapland – a study based on megafossils, lake sediments, and GIS-based vegetation and climate data. *The Holocene* 16(3). Painossa.
- Mattsson, J. 1995. Human impact on the timberline in the far north of Europe. Julkaisussa: Heikkinen, O., Obrebska-Starkel, B. & Tuhkanen, S. (toim.): Environmental aspects of the timberline in Finland and Polish Carpathians. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellonskiego* 956, *Prace Geograficzne*, Zeszyt 98: 41–56.
- Niemelä, P., Rousi, M. & Saarenmaa, H. 1987. Topographical delimitation of *Neodiprion sertifer* (Hym., *Diprionidae*) outbreaks on Scots pine in relation to needle quality. *Journal of Applied Entomology* 103: 84–91.
- Norokorpi, Y. 1995. Havumetsänrajan sijainnin määräytyminen Suomessa. Julkaisussa: Tasanen, T., Varmola, M. & Niemi, M. (toim.). Metsänraja tutkimuksen kohteena. Tutkimuspäivä Ylläksellä 1994. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 539: 7–15.
- Ojansuu, R. & Henttonen, H. 1983. Estimation of the local values of monthly mean temperature, effective temperature sum and precipitation sum from the measurements made by the Finnish Meteorological Office. *Silva Fennica* 17: 143–160.
- Oksanen, L., Moen, J. & Helle, T. 1995. Timberline patterns in northernmost Fennoscandia. Relative importance of climate and grazing. *Acta Botanica Fennica* 153: 93–105.
- Payette, S., Fortin, M.-J. & Gamache, I. 2001. The subarctic forest-tundra: the structure of a biome in a changing climate. *Bioscience* 51: 709–718.
- Rupp, T. S., Chapin, F. S. & Starfield, A. M. 2000. Response of subarctic vegetation to transient climatic change on the Seward Peninsula in north-west Alaska. *Global Change Biology* 6: 541–555.
- Räisänen, J. 2001. The impact of increasing carbon dioxide on the climate of northern Europe in global climate models. *Terra* 113: 139–151.
- Seppä, H. & Birks, H. J. B. 2001. July mean temperatures and annual precipitation trends during the Holocene in the Fennoscandian tree-line area: pollen based reconstructions. *The Holocene* 11: 527–539.
- Seppälä, M. & Rastas, J. 1980. Vegetation map of the northernmost Finland with the special reference to subarctic forest limits and natural hazards. *Fennia* 158: 41–61.
- Sihvo, J. 2001. Ylä-Lapin luonnonhoitoalueen ja Urho Kekkosen kansallispuiston luontokartoitus. Loppuraportti osa 1. Projektikuvaus. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja, Sarja A 130. 76 s.
- 2002. Ylä-Lapin luonnonhoitoalueen ja Urho Kekkosen kansallispuiston luontokartoitus. Loppuraportti osa 2: Ylä-Lapin luontotyytit. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja, Sarja A 137. 175 s.
- Skre, O., Baxter, R., Crawford, R. M. M., Callaghan, T. V. & Fedorkov, A. 2002. How will tundra-taiga interface respond to climate change? *Ambio Special Report* 12: 37–46.

- Solantie 1992. On the change of thermal climate in Finland between the "normal" periods 1931–1960 and 1961–1990. The Research Society of Lapland Year Book XXXIII 1992: 33–42.
- Stöcklin, J. & Körner, C. 1999. Recruitment and mortality of *Pinus sylvestris* near the Nordic treeline: the role of climatic change and herbivory. Ecological Bulletins 47: 168–177.
- Sveinbjörnsson, B. 2000. North American and European treelines: external forces and internal processes controlling position. Ambio 29: 388–395.
- Sykes, M. T. & Prentice, I. C. 1996. Climate change, tree species distributions and forest dynamics: a case study in the mixed conifer/northern hardwoods zone of northern Europe. Climatic Change 34: 161–177.
- Timoney, K. P., Laroi, G. H., Zoltai S. C. & Robinson, A. L. 1992. The high Sub-arctic forest-tundra of northwestern Canada: position, width, and vegetation gradients in relation to climate. Arctic 45: 1–9.
- Tuhkanen, S. 1999. The northern timberline in relation to climate. Julkaisussa: Kankaanpää, S., Tasanen, T. & Sutinen, M.-L. (toim.). Sustainable development in northern timberline forests. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 734: 29–61.
- Vejjola, P. 1998a. The northern timberline and timberline forests in Fennoscandia. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 672. 242 s.
- 1998b. Suomen metsänrajametsien käyttö ja suojele. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 692. 171 s.
- Virtanen, T., Mikkola, K., Nikula, A., Christensen, J. H., Mazhitova, G. G., Oberman, N. G. & Kuhry, P. 2004. Modeling the location of the forest line in NE European Russia with remote sensed vegetation and GIS-based climate and terrain data. Arctic, Antarctic and Alpine Research 36(3): 313–321.
- Zackrisson, O. 1977. Influence of forest fires on the north Swedish boreal forests. Oikos 29: 22–32.



Metlan työraportteja 25: 25–32

## **Männyn puurajan muutokset viimeisen 400 vuoden aikana ja metsänraja-puuraja vaihettumisyöhykkeen ikärakenne**

Vesa Juntunen, Seppo Neuvonen ja Raimo Sutinen

### **1 Johdanto**

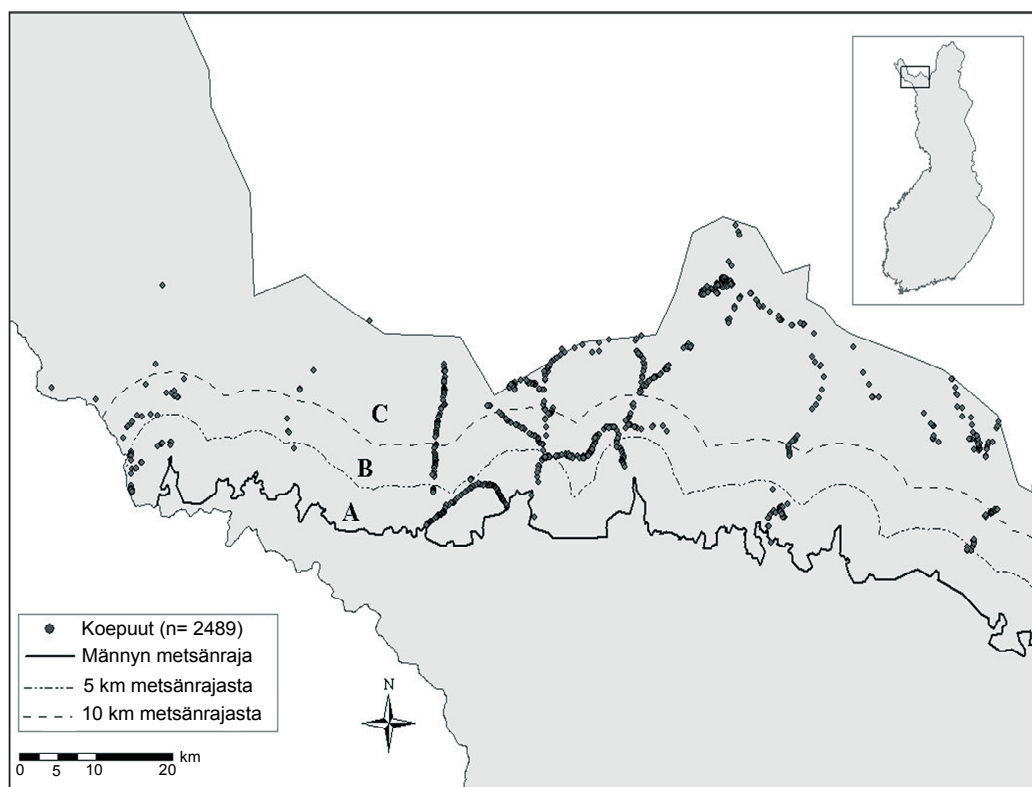
Maapallon ilmasto on lämpenemässä nopeasti. 1900-luku oli vuosituhannen lämpimin vuosisata (Mann ym. 1998, Briffa 2000, Jacoby ym. 2000, IPCC 2001), ja useat tutkimukset osoittavat, että ilmaston lämpeneminen on jo vaikuttanut arktisten ja subarktisten ekosysteemien rakenteeseen. Metsänraja-alueilla voimistunut metsien uudistuminen on johtanut rajojen siirtymiseen pohjoisemmaksi ja vuorten rinteillä ylemmäksi niin Amerikassa (Payette ja Filion 1984, Luckman ja Kavanagh 2000, Sturm ym. 2001, Cuevas 2002) kuin Euraasiassakin (Holmgren ja Tjus 1996, MacDonald ym. 1998, Kremenetski ym. 1999, Kullman 2001). Fennoskandiassa aiemmat tutkimukset ovat kohdistuneet ensisijaisesti alpiinisen metsän- tai puurajan dynamiikkaan. Pohjoisen puurajan siirtymistä sekä puurajadynamiikkaa kontrolloivia tekijöitä on tutkittu vähemmän.

Havupuiden uudistumisen onnistumista kontrolloi ensisijaisesti kesälämpötila, sillä niin uudistumissilmujen muodostuminen kuin siemenen tuleentuminenkin ovat voimakkaasti kesälämpötiloista riippuvaisia (Tranquillini 1979, Holtmeier ym. 2003). Metsänrajapopulaatioiden ikärakenne on osoittanut, että menneinä vuosisatoina männyn uudistuminen on ollut hyvinkin episodimaista, keskimäärin 3–5 uudistumisvuotta vuosisadassa (Henttonen ym. 1986, Steijlen ja Zackrisson 1986, Kullman 1992, 1996, Sirén 1993, Holtmeier ja Broll 2005). On kuitenkin selkeitä viitteitä, että 1900-luvun lämpöjakson myötä uudistumisvuodet ovat yleistyneet niin, että paikoin voidaan puhua jo ”jatkuvasta” uudistumisesta (Holtmeier ym. 1996, MacDonald ym. 1998, Stöcklin ja Körner 1999, Luckman ja Kavanagh 2000). Täten kesälämpötilat eivät enää olisikaan metsänrajan asemaa ensisijaisesti kontrolloiva tekijä.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, kuinka männyn puurajan sijainti ja puurajavyöhykkeen populaatorakenne ovat muuttuneet Länsi-Lapissa ilmaston lämpenemisen myötä viimeisten 400 vuoden aikana. Männynsi laskettiin kaikki yksilöt koosta riippumatta, joten tässä yhteydessä puurajalla tarkoitetaan itse asiassa puulajirajaa. Lisäksi regressioanalyysin avulla tarkasteltiin ikärakenteeseen vaikuttavia tekijöitä.

## 2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimusalueena oli Enontekiön kunta Länsi-Lapissa (kuva 1). Aluetta luonnehtii topografinen vaihtelevuus korkeimpien tunturihuippujen noustessa yli 700 metriä m.p.y. ja laaksojen sijaitessa noin 300 m m.p.y. Alavat alueet ovat usein soistuneita. Tuntureiden ohella vaihtelevuutta maanpinnan muotoihin tuovat paikoin hyvinkin jyrkkärinteiset hiekkaharjut sekä erityisesti pohjoisosissa hiekkadyynit.



Kuva 1. Tutkimusalue, vyöhykejako ja mäntyjen sijainnit.

Mänty on ainoa havupuu alueella ja männyn pohjoinen metsänraja rajoittuu yleisesti tunturikoivuvyöhykkeeseen. Männyt esiintyvät tunturikoivuvyöhykkeen sisällä joko yksittäisinä puina tai pieninä puuryhminä, jolloin vanhojen mäntyjen ympärillä esiintyy useita nuorempia yksilöitä. Pöyrisjärven pohjoispuolella tunturikoivuvyöhyke rajoittuu puuttomaan tundraan, jossa yhä esiintyy yksittäisiä mäntyjä. Mänty näin ollen muodostaa paikoin absoluuttisen puurajan. Männyn metsänraja-puuraja-tundra-vaihtumisvyöhykkeen leveys tutkimusalueella vaihtelee välillä 20–35 kilometriä.

Maastotyöt suoritettiin kesinä 2000 ja 2001. Tutkimuslinjastoiksi valittiin kaikki männyn pohjoiselta metsänrajalta pohjoiseen suuntautuvat tai puurajavyöhykkeellä sijaitsevat mönkijällä kuljettavat kulku-urat. Otantamenetelmänä oli ns. totaaliotanta eli kulku-urien varrelta kaikki havaitut männyt (koosta riippumatta) sisällytettiin tutkimusaineistoon. Kaikkiaan linjastojen yhteispituus oli noin 275 kilometriä. Puiden ikä määritettiin laskemalla vuosilustojen (puut) tai oksakiehkuroiden (taimet) lukumäärä. Kunkin puun sijainti määritettiin GPS:llä ja tästä sijainnista laskettiin lyhin etäisyys männyn metsänrajaan, joka määritettiin Metsähallituksen luontotyyppi-inventoinnin

GIS-tietokannasta. Kullekin puulle määrättiin lisäksi korkeus merenpinnasta ja keskimääräinen lämpösumma (1961–1990) käyttäen Ojansuu ja Henttonen (1983) kehittämää ohjelmaa paikallisten lämpötila-arvojen johtamiseksi Ilmatieteen laitoksen mittaustiedoista.

Tutkimusalue jaettiin kolmeen vyöhykkeeseen perustuen etäisyyteen nykyisestä männyn pohjoisesta metsänrajasta: A-vyöhyke (alle 5 kilometriä), B-vyöhyke (5–10 kilometriä) ja C-vyöhyke (yli 10 kilometriä) (kuva 1). Ikärakennetta tarkasteltiin erikseen kullakin vyöhykkeellä. Mäntyjen (tietynä vuonna syntyneet) lukumäärän vaihtelua analysoitiin regressioanalyysillä, jossa selittävinä muuttujina olivat vuosi sekä seuraavat lämpötilamuuttujat: kesälämpötilojen (kesä–elo) keskiarvo itämistä ja itämistä edeltäneinä neljänä vuotena (ST–), kesälämpötilojen keskiarvo itämistä seuraavina viitenä vuotena (ST+) sekä talvilämpötilojen (marras–maaliskuun) keskiarvo itämistä seuraavina viitenä vuotena (WT+). Analyysissä käytettiin Karesuvannon meteorologisen aseman ilmastodataa ajanjaksolta 1890–1999 (NORDCLIM). Kyseiset lämpötilamuuttujat valittiin, koska ilmasto vaikuttaa ikärakenteeseen sekä uudistumisen että (taimi)kuolleisuuden kautta. Uudistumisessa itämistä edeltävät kesälämpötilat ovat ratkaisevan merkityksellisiä, kun vastaavasti taimien elossa säilymiseen vaikuttavat ensisijaisesti ensimmäisten elinvuosien aikana vallitsevat ilmasto-olot. Vuosimuuttujan valitseminen analyysiin on perusteltua, sillä on todennäköistä, että kasvavissa populaatioissa populaatiotiheys ja erityisesti siemenpuiden määrä vaikuttaa vuosittain syntyvään taimimäärään kumulatiivisesti. Myös regressioanalyysi suoritettiin kullekin vyöhykkeelle erikseen.

### 3 Tulokset ja pohdinta

#### 3.1 Puurajan ja populaatiotiheyden muutokset

Tutkimusaineistomme vanhin mänty ajoitettiin syntyneeksi vuonna 1638, mutta yleisesti yli 100-vuotiaat männyt olivat harvassa (taulukko 1). Ainoastaan 41 mäntyä ajoitettiin syntyneeksi ennen 1800-lukua ja 111 mäntyä ennen 1900-lukua. Yli 100-vuotiaat männyt esiintyivät säännöllisesti alle 8 km:n etäisyydellä nykyisestä metsänrajasta.

Taulukko 1. Mäntyjen kappalemäärät eri etäisyysvyöhykkeillä itämivuoden mukaan.

Itämivuosi	0-5 km	5-10 km	10-15 km	15-20 km	20-25 km	25-30 km	30-35 km
1601–1800	24	27	0	0	0	0	0
1801–1900	30	30	5	0	0	0	0
1901–1950	122	295	86	71	32	31	0
1951–1999	787	646	165	79	25	31	4
Yhteensä (1600–1999)	963	998	256	150	57	62	4

Merkittävä männyn puurajan eteneminen tapahtui 1920-luvulla, jolloin se työntyi 28 kilometrin päähän nykyisestä metsänrajasta ja uusia yksilöitä ilmestyi aiemmin puuttomalle tundralle ja tunturikoivuvyöhykkeelle. Sekä lustoanalyysit että instrumentaalimittaukset osoittavat, että 1920-luvulla niin Pohjois-Suomen (Tuomenvirta ja Heino 1996, Lee ym. 2000) kuin koko pohjoisen pallonpuoliskonkin ilmasto lämpeni merkittävästi (Jacoby ja D'Arrigo 1989, MacDonald ym. 1998, Briffa 2000, Lloyd ja Fastie 2002). Pohjois-Suomesta tunnetaan 1920-luvulta yleisesti männyn siemenvuodet 1920–1921 ja 1926–1927 (Hustich 1948, Sirén 1993). Myös 1930-luvun lopun lämpökausi näkyy aineistossa, sillä suuri osa kaikkein pohjoisimmista männystä ajoittui tuolle

ajalle. Vastaavia kyseisen lämpöjakson seurauksena tapahtuneita metsän- ja puurajan etenemisiä on havaittu myös muualla Fennoskandiassa ja Pohjois-Amerikassa tehdyissä tutkimuksissa (Hustich 1948, Holtmeier 1974, Payette ja Filion 1984, Steijlen ja Zackrisson 1987, Kremenetski ym. 1999, Kullman 1992, 2001, Sirén 1998, Luckman ja Kavanagh 2000).

1930-luvun jälkeen puuraja ei tutkimusalueellamme ole juurikaan edennyt pohjoisemmaksi. Pohjoisimmat yksilöt, noin 33 km nykyisestä metsänrajasta, ovat itäneet 1950-luvulla. Säännöllisen uudistumisen seurauksena puurajavyöhykkeen populaatio on kuitenkin tihentynyt. Kun tutkimusaineiston männyistä 111 oli itänyt ennen 1900-lukua, oli 1900–1950 välillä itäneitä jo 637 ja vuoden 1950 jälkeen itäneitä 1737 yksilöä (taulukko 1). Yli 15 kilometrin etäisyydellä nykyisestä metsänrajasta ei ennen 1900-lukua esiintynyt lainkaan mäntyjä, mutta 1900-luvulla itäneitä oli jo 273 yksilöä.

Vaikka 1920- ja 1930-luvun jälkeen puurajan siirtyminen pohjoiseen on ollut hidasta, on puuraja siirtynyt tunturien rinteillä jatkuvasti yhä ”arktisempaan” suuntaan. Kun tutkimusalueen metsänrajalla keskimääräinen lämpösumma on 591 d.d., sijaitsivat ennen 1800-lukua syntyneet männyt alueella, jolla lämpösumma oli vähintään 565 d.d. 1920-luvulla mäntyjä syntyi lämpösumma-alueelle 510 d.d. ja 490 d.d. saavutettiin 1930-luvulla. ”Arktisimmat” yksilöt (428 d.d.) ovat syntyneet 1980- ja 90-luvun vaihteessa.

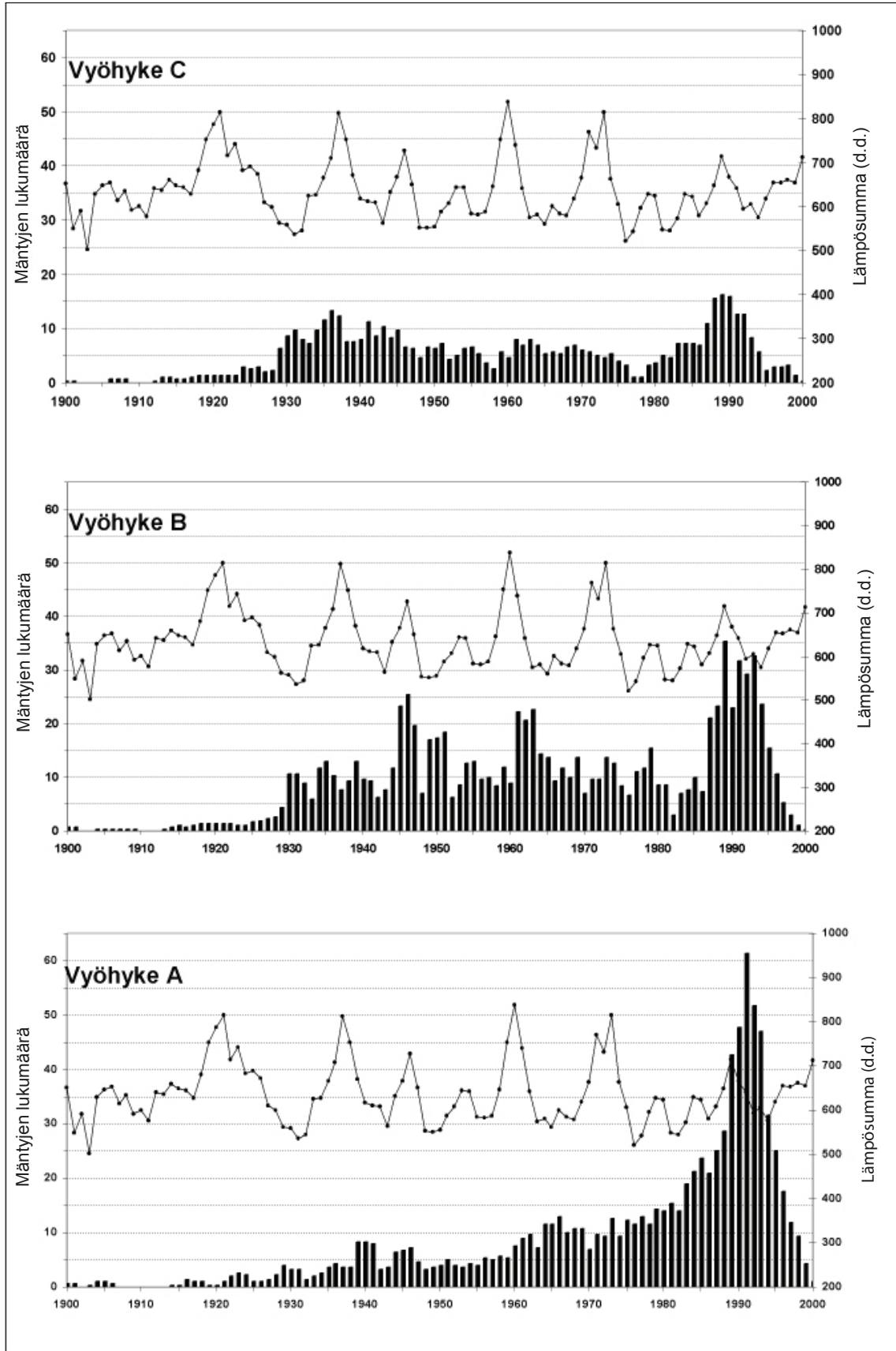
Tulostemme mukaan männyn puuraja on edennyt 1900-luvulla Länsi-Lapissa yli 30 kilometrin päähän nykyisestä metsänrajasta. Etenemisnopeus 1788-1973 oli täten 140 metriä vuodessa. Tämä nopeus vastaa myös muualla havaittuja puurajan etenemisnopeuksia (Payette ym. 2002, McLachlan ym. 2005). On kuitenkin muistettava, että eteneminen ei ole ollut tasaista, vaan tapahtunut suotuisten ajanjaksojen aikana ”hyppäyksittäin”, jolloin nopeus on ollut useita kilometrejä vuodessa. On myöskin huomioitava, että vaikka puuraja saattaa yhdenkin yksilön vaikutuksesta edetä kerralla pitkiäkin matkoja, ei ekosysteemin rakenteeseen vaikuttava metsänraja suinkaan kykene etenemään samalla nopeudella. Kauaksi metsänrajan taakse työntyvillä pioneeriyksilöillä on kuitenkin sukukypsyuden saavutettuaan merkittävä rooli uusien sukupolvien tuottajana ja sitä kautta populaatiotiheyden kasvattajana.

### 3.2 Ikäjakauma eri vyöhykkeillä

Männyistä 963 sijaitti alle 5 kilometrin etäisyydellä metsänrajasta (vyöhyke A), 1000 etäisyydellä 5-10 kilometriä (vyöhyke B) ja 527 mäntyä yli 10 kilometrin etäisyydellä (vyöhyke C). Uudistusrakenteessa havaittiin selkeitä eroja vyöhykkeiden välillä.

Lähinnä metsänrajaa olevalla A-vyöhykkeellä vanhimmat puut olivat yli 350-vuotiaita, mutta kaikkiaan ikäjakaumassa korostui voimakkaasti nuorten puiden, erityisesti 1980- ja 90-lukujen vaihteessa syntyneiden, osuus. Ikäjakauma muistutti J-muotoa, jossa lukumäärät kasvoivat eksponentiaalisesti nuorempia ikäluokkia kohti (kuva 2). Ikäjakauma heijastanee nuorempien vuosikertojen osalta paitsi voimakasta uudistumista, myös vähäistä kuolleisuutta.

B-vyöhykkeellä (5–10 km nykyisestä metsänrajasta) havaittiin vain hyvin vähän ennen 1930-lukua syntyneitä mäntyjä. Tämän jälkeen ikäjakauma on ”monihuippuinen”, jossa uudistumispiikit ajoittuvat ajanjaksoille 1930–1945, 1960-luvun alkupuoli ja 1985–1995 (kuva 2). Monihuippuisuus heijastaa uudistumisen episodimaisuuden ja siten ilmaston kontrollin lisääntymistä. C-vyöhykkeellä ikäjakauma on jo selkeästi kaksihuippuinen, jossa näkyy 1920- ja 30-luvun lämpökausi sekä 1980- ja 90-luvun vaihteen uudistumisjakso (kuva 2).



Kuva 2. Mäntypopulaation ikäjakauma (pylväät) ja lämpösumma (musta viiva) ajanjaksolla 1900–1990. Sekä mäntyjen lukumäärien että lämpösumman vuosittaisissa arvoissa on käytetty liukuvaa 5-vuotiskeskisarvoa.

Kaikkiaan 1600-luvulta aina 1900-luvulle saakka männyn puurajavyöhykkeen populaatiotiheys oli alhainen ja uudistuminen episodimaista. Vaikka intensiivistä männyn uudistumista ei tapahtunut ennen 1900-lukua, 35 mäntyä ajoitettiin syntyneeksi ajanjaksolla 1780–1810 ja 17 mäntyä 1847–1857. Yksittäisistä vuosista vuosi 1800 oli taimettumisen kannalta merkittävin (10 mäntyä). Tulokset tukevat havaintoja, että 1900-lukua edeltäneet vuosisadat olivat yleisesti kylmiä ja sisälsivät ainoastaan muutamia uudistumisen kannalta suotuisia ajanjaksoja vuosisadassa. Ikäjakamaa tarkasteltaessa ei kuitenkaan voida tehdä kovin tarkkoja johtopäätöksiä menneiden vuosisatojen uudistumisrakenteesta, sillä nykyinen ikärakenne ei heijasta ainoastaan siementuotannon ja uudistumisen vaihtelua vaan myös menneiden olosuhteiden aiheuttaman kuolleisuuden vaihtelua.

### 3.3 Ikäjakamaan vaikuttavat tekijät

Regressioanalyysissä A-vyöhykkeellä vuosi selitti vuosien välisen lukumäärän vaihtelusta peräti 82 %. Tulos ilmentää populaatiotiheyden merkitystä taimituotannolle alueilla, joilla populaatiotiheys on yhä alhainen. Vuosisadan alkupuoliskolla syntyneet yksilöt ovat jo saavuttaneet sukukypsyyden ja siten kykenevät tuottamaan uusia sukupolvia. Täten 1980-luvulla alueella on moninkertainen määrä siemenpuita 1900-luvun alkupuolella olevaan tilanteeseen verrattuna ja siten myös siemensadon ja syntyneiden taimien määrät ovat moninkertaistuneet.

Taimien vuosittaiset lukumäärät ja kesälämpötilat eivät A-vyöhykkeellä korreloi, eivätkä ilmastotekijät selitä lukumäärän vaihtelua regressioanalyysissä. Tulos indikoi sitä, että ilmaston merkitys uudistumista rajoittavana tekijänä metsänrajan läheisissä metsissä on vähentynyt. Kesälämpötilat ovat pysyneet korkealla verrattuna aiempiin vuosisatoihin ja siten uudistuminen on ollut säännöllistä vaikkakin vaihtelevaa. Täten voidaan olettaa, että uudistuminen on muuttunut 1900-luvun alussa episodimaisesta kohti jatkuvaa uudistumista.

B- ja C-vyöhykkeillä vuoden vaikutus vähenee ja ilmastotekijöiden merkitys lisääntyy, vaikkakin yhä vuosi on selkeästi paras yksittäinen lukumäärän vaihtelua selittävä tekijä (selitysaasteet: B ; 54 %; C; 44 %). B-vyöhykkeellä ilmastotekijät paransivat selitysaastetta 7 %-yksikköä (ST–, WT+) ja C-vyöhykkeellä 20 %-yksikköä (WT+, ST–, ST+). Tämä ilmentää ilmaston korostuvaa vaikutusta siirryttäessä metsänrajalta pohjoiseen. Lukumäärät eivät enää yksiselitteisesti lisääntyneet ajan myötä, vaan ikärakennetta kontrolloi yhä lisääntyvästi sekä siemenvuosien esiintyminen että taimikuolleisuus.

Ilmastotekijöistä itämistä edeltävät vuodet (uudistuminen) ovat B-vyöhykkeellä merkittävin lukumäärän vaihteluun vaikuttava muuttuja. C-vyöhykkeellä puolestaan itämistä seuraavat talvilämpötilat selittävät vaihtelusta suuremman osan kuin itämistä edeltävät tai sitä seuraavat kesälämpötilat. Tämä korostaa taimikuolleisuuden merkityksen lisääntymistä sitä enemmän, mitä pohjoisemmaksi siirrytään.

Todellisuudessa ilmastotekijöiden vaikutus on varmasti suurempi kuin analyysimme pystyi osoittamaan. Erityisesti kuolleisuuden merkityksen osoittaminen on ongelmallista, sillä kuolleisuus on usein seurausta lyhytkestoista ääreivistä ilmastojaksoista, eikä kuukausikeskiarvoista, joita analyysimme käsitteli. Lisäksi kuolleisuutta tapahtuu merkittävässä määrin myös viiden ensimmäisen elinvuoden jälkeenkin. Kuolleisuus on lisäksi yleensä seurausta useista eri ympäristötekijöistä, joiden yhteisvaikutusta on vaikea jäljittää. Tutkimusalueelta emme kuitenkaan löytäneet kuolleita mäntyjä.

## Kirjallisuus

- Briffa, K. R. 2000. Annual climate variability in the Holocene: interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Reviews* 19: 87–105.
- Cuevas, J. G. 2002. Episodic regeneration at the *Nothofagus pumilio* alpine timberline in Tierra del Fuego, Chile. *Journal of Ecology* 90: 52–60.
- Henttonen, H., Kanninen, M., Nygren, M. & Ojansuu, R. 1986. The maturation of *Pinus sylvestris* seeds in relation to temperature climate in northern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1: 243–249.
- Holmgren, B. & Tjus, M. 1996. Summer air temperatures and tree line dynamics at Abisko. *Ecological Bulletins* 45: 159–169.
- Holtmeier, F.-K. 1974. Geoökologische Beobachtungen und Studien an der subarktischen und alpinen Waldgrenze in vergleichender Sicht. *Erdwissenschaftliche Forschung* 8, Wiesbaden, 130 s.
- , Muterthies, A. & Stevens, G. E. 1996. Effektive Verjüngung und Zuwachs der Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Fichte (*Picea abies*) an ihrer Höhengrenze in Finnish-Lapland während der letzten 100 Jahre. *Julkaisussa: Holmeier, F.-K. (toim.) Beiträge aus den Arbeitsgebieten am Institut für Landschaftsökologie. Institut für Landschaftsökologie, Westfälische Wilhelms-Universität: Band 1: 85–99.*
- , Broll, G. Muterthies, A. & Anschlag, K. 2003. Regeneration of trees in the treeline ecotone: northern Finnish Lapland. *Fennia* 181: 2:103–128.
- & Broll, G. 2005. Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography* 14: 395–410.
- Hustich, I. 1948. The Scots pine in northernmost Finland and its dependence on the climate in the last decades. *Acta Botanica Fennica* 42: 1–74.
- IPCC. Watson, R. T. and the core writing team (toim.) 2001. *Climate change 2001: Synthesis report*. IPCC, Geneva, Switzerland. 184 s.
- Jacoby, G. C., Jr., & D'Arrigo, R. 1989. Reconstructed northern hemisphere annual temperature since 1671 based on high-latitude tree-ring data from North America. *Climatic Change* 14: 39–59.
- Jacoby, G., Lovelius, N., Shumilov, O. Raspopov, O. Kabainov, J. & Frank, D. 2000. Long-term temperature trends and tree growth in the Taymir region of northern Siberia. *Quaternary Research* 53: 312–218.
- Kremenetski, C., Vaschalova, T., & Sulerzhitsky, L. 1999. The Holocene vegetation history of the Khibiny Mountains: implications for the postglacial expansion of spruce and alder on the Kola Peninsula, northwestern Russia. *Journal of Quaternary Science* 14 (1): 29–43.
- Kullman, L. 1992. Climatically induced regeneration patterns of marginal populations of *Pinus sylvestris* in northern Sweden. *Oecologia Montana* 1: 5–10.
- 1996. Structural population dynamics of pine (*Pinus sylvestris* L.) during the past 500 years close to the tree-limit in northern Sweden. *European Palaeoclimate and Man*. 13: 75–82.
- 2001. 20th century climate warming and tree-limit rise in the southern Scandes of Sweden. *Ambio* 30(2): 72–80.
- Lee, S. E., Press, M. C. & Lee, J. A. 2000. Observed climate variations during the last 100 years in Lapland, Northern Finland. *International Journal of Climatology* 20: 329–346.
- Lloyd, A. H. & Fastie, C. L. 2002. Spatial and temporal variability in the growth and climate response of treeline trees in Alaska. *Climate Change* (52): 481–509.
- Luckman, B. H. & Kavanagh, T. 2000. Impact of climate fluctuations on mountain environments in the Canadian Rockies. *Ambio* 29(7): 371–380.
- MacDonald, G. M., Case, R. A. & Szeicz, J. M. 1998. A 538-year record of climate and treeline dynamics from the lower Lena river region of northern Siberia, Russia. *Arctic and Alpine Research* 30(4): 334–339.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. 1998. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392: 779–787.
- McLachlan, J. S., Clark, J. S. & Manos, P. S. 2005. Molecular indicators of tree migration capacity under rapid climate change. *Ecology* 86: 2088–2098.
- NORDKLIM. [http://www.smhi.se/hfa\\_coord/nordklim/](http://www.smhi.se/hfa_coord/nordklim/)

- Ojansuu, R. & Henttonen, H. 1983. Kuukauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen Ilmatieteen laitoksen mittaustiedoista. *Silva Fennica* 17(2): 143–160.
- Payette, S. & Fillion, L. 1984. White spruce expansion at the tree line and recent climatic change. *Canadian Journal of Forest Research* 15: 241–251.
- , Eronen, M., & Jasinski, J. J. P. 2002. The circumboreal Tundra-Taiga interface: late Pleistocene and Holocene changes. *Ambio Special Report* 12: 15–22.
- Sirén, G. 1993. Pine seed year frequency in the subarctic of Finland: a pilot study. *World Resource Review* Vol. 5(1): 95–103.
- 1998. Results and conclusions of pine advance in subarctic Finland in the 20th century. Julkaisussa: Tasanen, T. (toim.). Research and management of the northern timberline region. Proceedings of the Gustav Sirén symposium in Wilderness Center Inari, September 4.–5.1997. The Finnish Forest Research Institute. *Research Papers* 677: 7–16.
- Steijlen, I. & Zackrisson, O. 1987. Long-term regeneration dynamics and successional trends in a northern Swedish coniferous forest stand. *Canadian Journal of Botany* 65: 839–848.
- Sturm, M., Racine, C. & Tape, K. 2001. Climate change: Increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature* 411: 546–547.
- Stöcklin, J. & Körner, C. 1999. Recruitment and mortality of *Pinus sylvestris* near the nordic treeline: the role of climatic change and herbivory. *Ecological Bulletins* 47: 168–177.
- Tranquillini, W. 1979. *The Physiological Ecology of the Alpine Timberline*. Springer-Verlag, New York. 137 s.
- Tuomenvirta, H. & Heino, R. 1996. Climatic changes in Finland – recent findings. *Geophysica* 32(1–2): 61–75.



Metlan työraportteja 25: 33–41

## Käsivarren tunturimittarituhot vuosina 2004 ja 2005

Tarmo Virtanen, Katja Pekkanen, Kari Mikkola ja Heikki Kauhanen

### 1 Johdanto

Tunturimittari (*Epirrita autumnata*) on viime vuosikymmeninä ollut pohjoisimman Suomen laaja-alaisimmat puustokuolemat aiheuttanut hyönteinen. Tunturimittarin ainakin jossakin päin Suomen Lappia tai Köli-vuoristoa noin kymmenen vuoden väliajoin tapahtuvat massaesiintymät tappavat tunturikoivuja (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*) toisinaan jopa tuhansien neliökilometrien laajuisilta alueilta (Tenow 1972, Kallio ja Lehtonen 1973, Seppälä ja Rastas 1980, Haukioja ym. 1988, Neuvonen ym. 2005). Tuhoilla on erittäin merkittävä vaikutus tunturikoivuekosysteemin tilaan ja toimintaan (Kallio ja Lehtonen 1973, Neuvonen ym. 2001). Tunturikoivikoilla on myös suuri merkitys porolaitumina, sillä koivun lehdet ovat poroille tärkeää kesäravintoa (Skjenneberg ja Slagvold 1968, Warenberg ym. 1997, Helle 2001). Tuhon aiheuttamat ekosysteemivaiikutukset heijastuvat poronhoidon lisäksi muihin luontaiselinkeinoihin ja matkailijoiden kiinnostuksen kohteisiin kuten riekonpyyntiin ja kalastukseen. Tunturikoivikoiden toipuminen voi olla hidasta. Esimerkiksi noin puolella Utsjoen-Inarin Lapin 1960-luvun puolivälin laajoista koivukuolema-alueista puusto ei ole vielääkään toipunut, vaan alueet ovat muuttuneet paljakaksi (Sihvo 2002).

Viime vuosina on Käsivarressa ollut laajin tunturimittarin massaesiintymä vuosikymmeniin, jopa ehkä sataan vuoteen. Norjan puolella Tenon laaksossa koivikoita ja valtaosa kenttäkerroksesta on syöty laajoilla alueilla lehdettömäksi jo vuodesta 2002 lähtien. Käsivarren Lapissa tuhoja havaittiin ensimmäisen kerran kesällä 2003, ja kesällä 2004 paljaaksisyönti laajeni ulottuen lopulta lähes koko Käsivarteen ja jatkui jonkin matkaa pohjoiseen Norjan puolelle. Etelän suunnalla tuho ulottui Torniojärven eteläpuolelle ollen siis yli 200 km etelä-pohjoisuunnassa. Kesällä 2005 voimakas paljaaksisyönti jatkui laajoilla alueilla (kuvat 1 ja 2). Tässä artikkelissa esitämme maastotöihimme ja satelliittikuvatulkintoihin perustuen, missä ja minkälaisia tuhoja esiintyi Kilpisjärven alueella vuosina 2004 ja 2005.



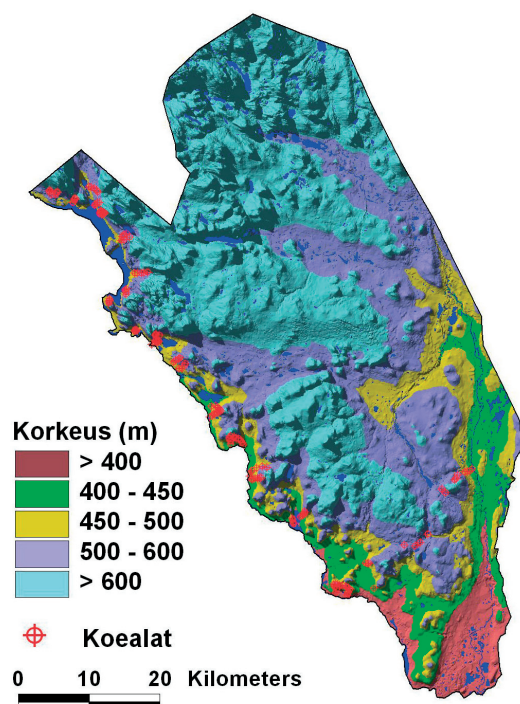
Kuva 1. Näkymä Kivijärven kaakkoispuolen Dálvas-tunturilta koilliseen. Etualalla tuholta säästyneitä koivuja, kauempana valtaosa koivikoista paljaaksisyötyjä. Kuva 5.7.2005, Tarmo Virtanen.



Kuva 2. Tyypillisiä tuhokoivikoita, kenttäkerrostakin syöty, erityisesti erottuvat syödyt vaivaiskoivut. Näkymä kuvassa 1 näkyvästä alarinteestä. Kuva 5.7.2005, Tarmo Virtanen.

## 2 Aineisto ja menetelmät

Tutkimusalueeksemme rajasimme Suomen puoleisen Käsivarren Lapin Kilpisjärveltä Lätäsenon valuma-alueen itä-reunaan (kuva 3). Kesällä 2005 (30.6–20.7.) perustimme 138 maastokoealaa niin tuhokoivikoihin kuin myös säästyneisiin vertailukoivikoihin topografisesti erilaisiin paikkoihin ja eri-ikäisiin koivikoihin (kuva 3). Ympyräkoealoilta mitattiin ja arvioitiin puuston ja kenttäkerroksen peittävyys ja lajisto, puuston pohjapinta-ala ja keskipituus, lehtisyönnin määrä, puuston kuolleisuus sekä laskettiin toukkien määrää kuvaava indeksi (Ruohomäki ja Haukioja 1992).



Kuva 3. Kilpisjärven tutkimusalueen korkeus ja kesän 2005 maastokoealat.

Hankkimistamme Landsat satelliittikuvista (taulukko 1) yhdistimme vuosittaiset kuvamosaiikit joista leikkasimme tutkimusalueemme kattavat palat. Sen jälkeen laskimme joka vuoden kuvasta NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) kasvillisuusindeksi-arvot. Indeksiksi lasketaan satelliittikuvan lähi-infra kanavan (NIR) ja punaisen kanavan (RED) avulla seuraavasti:  $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ . Tämä kanavasuhde-indeksi kuvaa vihreän kasvillisuuden määrää ja sitä on käytetty yleisesti tämänkaltaisissa tutkimuksissa (Tømmervik ym. 2001, Rees ym. 2002). Tuhoalueet analysoimme ns. erotusanalyysillä eli tutkimme, kuinka paljon NDVI-arvot olivat vähentyneet verrattuna tilanteeseen ennen tuhoa, siis kesän 2000 kuvan tilanteeseen. Poistaaksemme ilmakehän olosuhteista ja fenologiasta johtuneet erot, laskimme vuosien 2004 ja 2005 NDVI-kuville lineaarisen regressiokorjauksen käyttäen useita, yhtenäisiä ja muuttumattomia pieniä tukialueita. Korjaus teki ne vertailukelpoisiksi vuoden 2000 kuvaan.

Taulukko 1. Käytetyt satelliittikuvat, kaikki ETM+ kuvia.

Polku	Rivi(t)	Päivämäärä	SLC-off
195	11, 12	27.7.2000	Ei
195	11, 12	22.7.2004	Kyllä
196	11, 12	30.6.2005	Kyllä
194	12	2.7.2005	Kyllä

Johtuen Landsat 7 ETM+-sensorissa kesästä 2003 alkaen olleesta viasta (ns. SLC-off, aiheesta lisätietoa mm. U.S. Geological Survey:n verkkosivuilla) uudemmissa kuvissa on reunoja kohti kasvavia raitoja joilla ei ole arvoja, joten nämä alueet jäivät aina ko. vuoden analyysistä pois. Lisäksi kasvillisuusmuutosanalyysiamme varten luokittelimme kuvissa olevat muutamat pilvet sekä vesistöt analyysialueen ulkopuolelle. Tutkimusalueemme kokonaismaapinta-ala on 3095 km<sup>2</sup>, josta analyysin ulkopuolelle em. syistä jäi vuonna 2004 10,5 % ja 2005 13,9 %.

Teimme myös vuoden 2000 kuvaan perustuen ohjatun 5-luokkaisen kasvillisuus- ja maanpeittoluokituksen käyttäen tukiaineistona maastohavaintoja, valokuvia, peruskarttoja ja erityisesti Metsähallituksen Ylä-Lapin luontokartoitusaineistoa (Sihvo 2002). Päädyimme tekemään oman luokituksen, koska luontokartoitusaineisto kattaa vain valtion maat. Lisäksi se on luonteeltaan kuvio-aineisto, jolloin sen spatiaalinen tarkkuus myös poikkeaa rasteripohjaisesta Landsat-kuvasta (pikseli 30 m).

Massaesiintymän syntyyn tarvitaan muutama tunturimittarille menestyksenkäs vuosi, jotta matalan tiheyden populaatiokokoko ehtii kasvaa tuhoa aiheuttavan suureksi (Haukioja ym. 1988). Jotta tietyllä paikalla siis saavutettaisiin tuhotiheys, mm. talvipakkaskuolleisuutta ei muutamaaan peräkkäiseen talveen saa tapahtua. Tunturimittarin munat kuolevat alle -36 °C pakkasissa (Niemelä 1979, Tenow 1996, Virtanen ym. 1998). Talvella kylmä ilma kerääntyy alaville paikoille, laaksonpohjiin ja jokivarsiin (Virtanen ym. 1998). Selittääksemme tuhojen sijoittumista olemme keränneet tietoa talven minimilämpötiloista Kilpisjärven sääaseman mittauksista viime talvilta sekä talvelta 2004–2005 kahdelta korkeusgradientilta (7 dataloggeria).

### 3 Tulokset

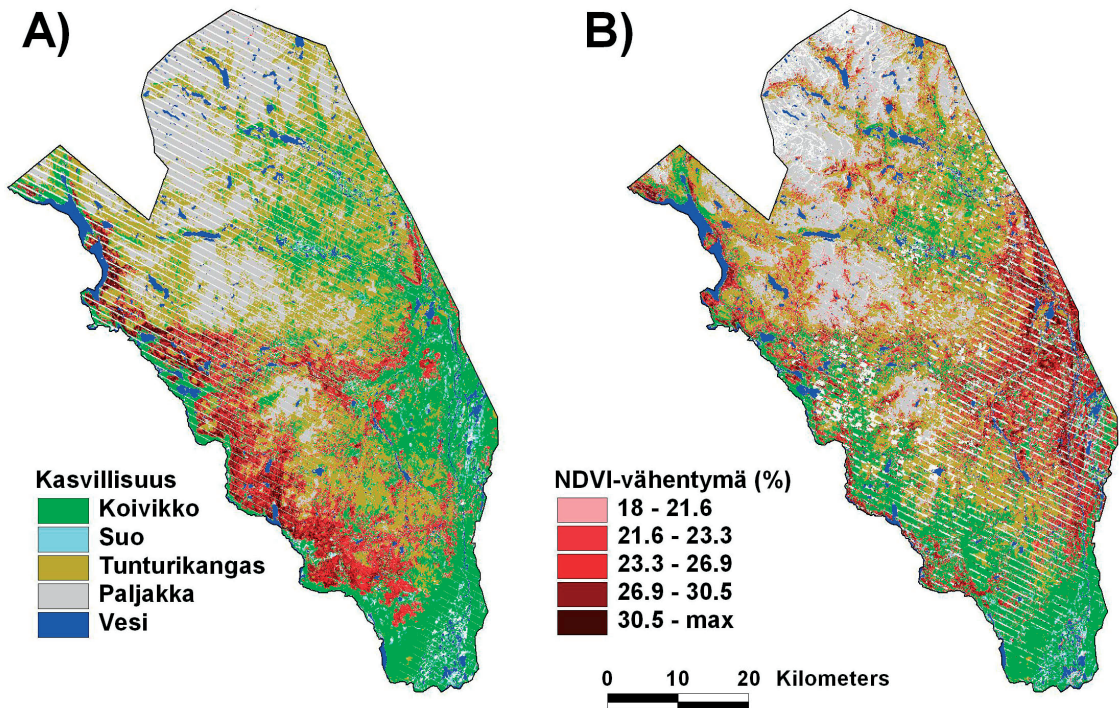
Kesällä 2004 vähän vajaa puolet tutkimusalueemme koivikoista syötiin lehdettömiksi ja kesällä 2005 hieman yli puolet (kuvat 4 ja 5, taulukko 2). Osa vuoden 2004 tuhoalueista säästyivät kesällä 2005 voimakkaalta syönniltä. Toisaalta tuhot levittyivät myös vielä uusille alueille. Uusia voimakkaan tuhon kohteeksi joutuneita alueita oli ennen kaikkea Lätäsenon varressa. Muillakin jokivarsilla ja tunturinrinteillä tuhot siirtyivät alemmaksi. Lisäksi kesällä 2005 tuhoalue levittyi myös tunturikankaille kauaskin koivumetsänrajasta (kuvat 4 ja 5, taulukko 3).

Taulukko 2. Tuhopinta-alat (km<sup>2</sup>). Koivikko tekemämme luokituksen mukaan.

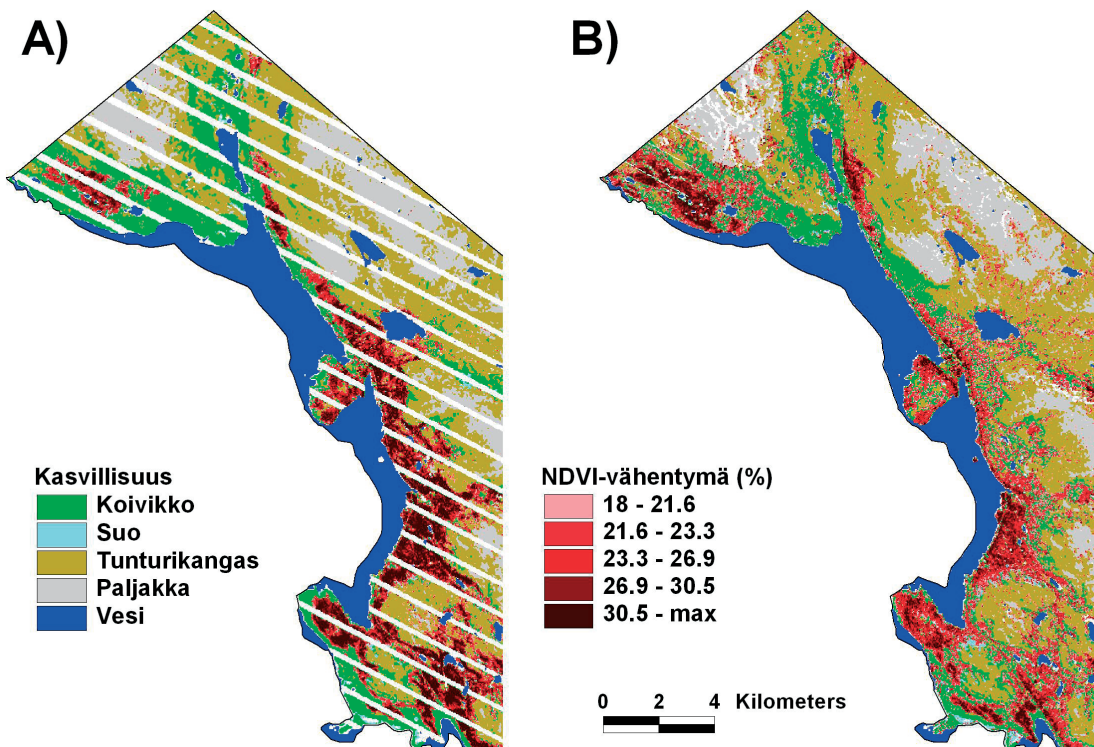
Vuosi	Analyysialue	Kokonaistuhot	Tuho koivikoissa	Koivikoista tuhoutunut
2004	2769,7	605,7	512,4	44,3 %
2005	2665,5	863,2	583,5	54,4 %

Taulukko 3. Tuhoalueiden pinta-alat suhteessa korkeusvyöhykkeeseen (%).

korkeus (m)	2004			2005		
	Osuus alueesta	Vyöhykkeestä tuhoutunut	Josta koivikkoa	Osuus alueesta	Vyöhykkeestä tuhoutunut	Josta koivikkoa
< 400	4,87	2,24	90,41	5,40	13,99	82,61
400–450	8,29	29,87	95,37	8,05	51,01	86,99
451–500	11,79	42,09	95,37	11,18	57,77	88,68
501–600	28,00	38,69	86,30	27,08	44,05	75,57
> 600	47,04	6,99	55,44	48,29	17,35	31,60

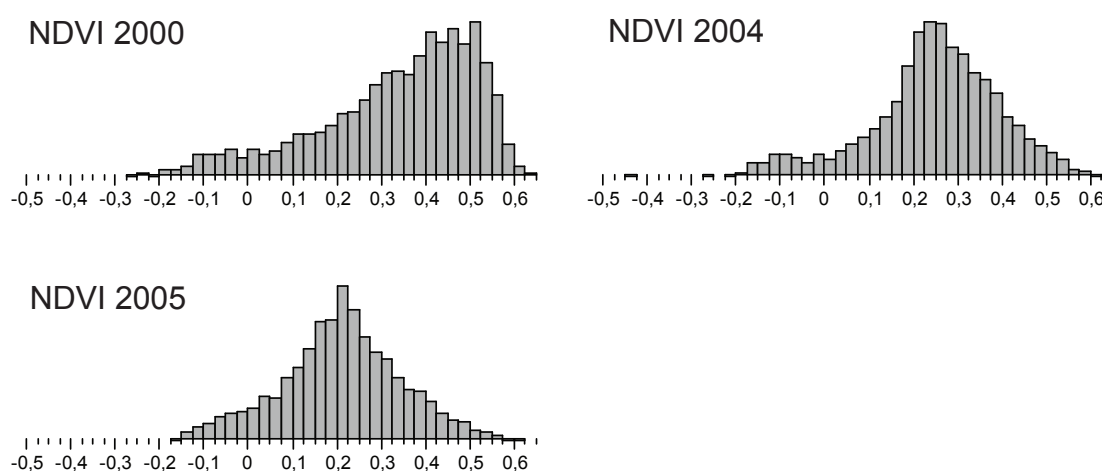


Kuva 4. Kasvillisuus- ja maanpeittoluokat sekä tuholuokitus a) kesällä 2004 ja b) 2005.



Kuva 5. Lähinäkömä Kilpisjärven lähiympäristöön a) kesällä 2004 ja b) 2005.

Kesän 2005 maastokoealoilta oli tunturikoivujen puhjenneiden silmujen määrästä mahdollista arvioida myös kesän 2004 tuhoa, sillä edellisen vuoden paljaaksisyönnistä johtuen koivujen puhjenneiden silmujen ja siten myös lehtien määrä oli monin paikoin huomattavan alhainen. Koivujen defoliaatio oli yli 95 % runsaassa viidenneksessä kesän 2005 maastotukialoistamme. Aloista 70 % sijaitsi ns. tuhokoivikoissa, kun tuhokoivikoksi luokittelimme alueet, joissa samana kesänä lehtipinta-alasta oli syöty yli 33 % tai jos kumulatiivinen totaalidefoliaatio (harsuuntuminen johtuen edellisesän syönnistä yhdistettynä tämän kesän syöntiin) oli yli 60 %. Nämä raja-arvot vastaavat suunnilleen tuhorajana käyttämäämme 18 % NDVI-vähentymää. Satelliittikuvan saamat arvot tosin ovat tulosta kasvillisuuden kokonaisheijasteesta, joten NDVI-arvot siis osaltaan riippuvat myös kenttäkerroksen syönnistä ja sen vehreydestä. Analyysialueen NDVI-arvot muutuivat huomattavasti tuhon seurauksena (kuva 6, taulukko 4).



Kuva 6. Satelliittikuvien NDVI-jakauma analyysialueilla vuosina 2000, 2004 ja 2005.

Taulukko 4. Satunnaispisteotos NDVI-arvojen jakaumista eri vuosien analyysialueilla.

	Keskiarvo	Keskihajonta	N	Kvantiili 99,5 %	Kvantiili 0,5 %
NDVI 2000	0,340	0,176	4798	0,600	-0,166
NDVI 2004	0,247	0,146	4253	0,560	-0,167
NDVI 2005	0,209	0,135	4121	0,539	-0,126

Tuhopinta-alaksi luokitellun alueen koko riippui suuresti valitusta NDVI-vähentymän raja-arvosta. Käyttämämme 18 % arvo rajaa tuhoalueen hyvin tiukasti. Jos asettaisimme raja-arvoksi 15 %, kokonaistuhopinta-alat nousisivat liki 30 %:lla. Maastoaineistomme perusteella 15 % NDVI-vähentymä vastaisi suunnilleen tilannetta, jossa yli 25 % kesän 2005 lehtipinta-alasta olisi syöty tai jossa totaalidefoliaatio olisi yli 50 %. Tuhoalan sijoittumisen visuaalinen tulkinta kuitenkin indikoi, että tällöin jo joitakin ei-tuho-pikseleitäkkin saattaisi luokittua tuhoalueeksi, joten päädyimme esittämään tiukemman kriteerin (18 %) mukaiset pinta-alat.

Voimakkaamman tuhon alueilla toukat olivat kesällä 2005 laskeutuneet jo aikaisessa vaiheessa maahan, jolloin myös kenttäkerroksen kasvillisuus oli hyvin intensiivisesti syöty jo kesäkuun lo-

pulla. Näiden alueiden toukista monet varmastikin nälkiintyivät eivätkä selviytyneet koteloitumisvaiheeseen saakka. Täysikasvuiseksi ehtineistä toukistakin monin paikoin lähes kaikki vaikuttivat loisituilta, mutta alhaisemman tiheyden paikoilla oli jonkin verran terveenoisiakin toukkia. Lämpimistä säästä johtuen toukat alkoivat olla täysikasvuisia jo heinäkuun ensimmäisellä viikolla. Osa koivuista alkoi tehdä uusia lehtiä jo heinäkuun puolen välin jälkeen. Esim. Mallan luonnonpuiston lehdettömäksi syöty ja kesäkuun lopulla maisemassa ruskeana näkyvä koivikko oli uusien lehtien ansiosta kuukautta myöhemmin vihreä. Syötyjen puiden lähempi tarkastelu osoitti kuitenkin, että uusia lehtiä ja lehtiryhmiä oli puhjennut sen verran harvakseltaan, että ne korvasivat vain osan syönnissä menetetyistä lehtipinta-alasta. Nämä uudetkin lehdet ehtivät valtaosin saada ruskavärikyksen, tosin syömättömiä koivuja myöhemmin.

Kilpisjärven sääasema sijaitsee melko alavalla paikalla. Siellä talven minimilämpötilat ovat olleet viime vuosina seuraavat: 2001–02: -35,8 °C, 2002–03: -39,2 °C, 2003–04: -34,7 °C, 2004–05: -32,8 °C. Kesän 2004 laajaa massaesiintymää siis edelsi kohtalaisen leuto talvi, mutta sitä vuotta aiemmin talvella 2002–03 munat ovat varmasti kuolleet laajasti alavilta alueilta. Nämä talvilämpötilat selittänevät sen, miksi alavat alueet säästyivät melko hyvin tuholta kesällä 2004 (kuvat 4 ja 5, taulukko 3). Talvi 2004–2005 oli alueella vielä leudompi. Mittaamillamme Saanan (rantaköivikosta 484 m–544 metriin) ja Lammasoaivi (454–525 m) linjoilla ainoastaan Saanajärven rannassa mitattiin 16.3. -35 °C, muilla paikoilla talven minimi vaihtelivat välillä -32 °C – -24,8 °C. Tämä selittääkin sitä, miksi tuhot kesällä 2005 levittäytyivät jokivarsissa kesää 2004 alemmaksi (taulukko 3, kts. myös kuvat 4 ja 5).

## 4 Tulosten tulkinta ja johtopäätökset

Tunturimittarin aiheuttama paljaaksisyönti on hyvin luokiteltavissa Landsat-satellittikuvalta, kuten myös Tømmervik ym. (2001) havaitsivat huomattavasti pienialaisemmassa työssään. Luokituksessa on mahdollista myös saada esille erilaisia tuhon voimakkuusvyöhykkeitä (kuvat 4 ja 5). Satelliittikuvaluokittelussa tulee aina jonkin verran myös virheluokituksia, ja tästä johtuen taulukoissamme antamamme arvot ovat vain suuntaa-antavia. Erityisen merkityksellistä pinta-aloille oli, mihin NDVI-vähentymän raja-arvoon tuhon esiintymisen kytkimme. Selvä virhelähde koko maa-alueita käsittelevässä analyysissämme on vedenpinnan vaihteluista soilla ja ranta-alueilla aiheutuneet erot. Vuoden 2005 tulkinassamme luokitui tuhoalueiksi yllättävän paljon alueita ylhäällä kaukanakin koivikoista. Varvikon paljaaksisyöntiä todella tapahtui maastohavaintojemme mukaan kaukanakin metsänrajasta. Tämä selittyy sillä, että syksyllä 2004 erittäin runsaista tunturimittarinaaraista melkoinen osa oli kyennyt levittäytymään sinnekin. Lisäksi vastakuoriutuneiden toukkien tiedetään kulkeutuvan pitkiäkin matkoja tuulen mukana (Ruohomäki ym. 2000). Voi olla, että joku osa luokitelluista tuhoista ennen kaikkea myöhäisimmässä ekosysteemeissä kuitenkin selittyy myös tuolla liki yhden kuukauden fenologiaerolla, vaikka tätä eroa pyrimmekin poistamaan lineaarisella korjausfunktiolla.

Syksyllä 2004 Kilpisjärvellä lensi ”miesmuistiin” suurin määrä aikuisia tunturimittareita. Koska toukista näytti kesällä 2005 olevan suuri osa loisittuja ja aikuisten määrä syksyllä 2005 oli edellistä vuotta huomattavasti alhaisempi, näyttää siltä, että tunturimittarien massaesiintymä alkaa Käsivarren alueella tällä erää olla ainakin pääosin ohi. On selvää, että tämä tuho aiheutti oksa- ja runkokuolleisuutta ja huomattavia kasvatappioita Käsivarren alueen tunturikoivuille. Sitä, kuinka paljon varsinaisia koivukuolema-alueita mahdollisesti tulee syntymään, on kuitenkin vielä liian aikaista ennustaa. Koivujen mahdollinen kuolema ja myös toipuminen on useampivuotinen pro-

sessi, johon vaikuttavat mm. sääolot, sienitaudit ja muut kasvinsyöjät (Lehtonen ja Heikkinen 1995, Tenow ym. 2004).

Jos tulevaisuudessa lämpimät talvet jatkuvat, talvien kylmyys ei enää kykene rajoittamaan tunturimittarin aiheuttamia koivutuhoja (Tenow 1996, Virtanen ym. 1998). Toisaalta jos myös kesät lämpenevät, koivutuhojen voimakkuus voi vähetä ennen kaikkea koivujen parantuneen toipumiskyvyn ja mahdollisesti tunturimittarin kantoja säätelevien loishyönteisten paremman toimintakyvyn ja muiden saalistajien lisääntymisen ansiosta (Kallio ja Lehtonen 1973, Karhu ja Neuvonen 1998, Tanhuanpää ym. 1999, Virtanen ja Neuvonen 1999, Niemelä ym. 2001).

## Kiitokset

Kesän 2005 maastotyö toteutettiin Helsingin Yliopiston ja Metlan Kolarin yksikön toimesta Metlan metsätuhotietopalvelu-hankkeelta saamamme tuen ja yhteistyön avulla. Tästä kiitokset Heikki Henttoselle, Seppo Neuvoselle ja Antti Poutulle. Kiitokset myös Kilpisjärven toimipaikan Kuisma Rannalle ja Viktor Mannelle avusta sekä tiedoista alkukesän ja syksyn tuhotilanteesta. Ympäristöministeriön luonnonsuojelualueiden hoitoon myöntämällä rahalla voitiin hankkia satelliittikuvia ja talvilämpötilojen seurannassa tarvittavia dataloggereita.

## Kirjallisuus

- Haukioja, E., Neuvonen, S., Hanhimäki, S. & Niemelä, P. 1988. The Autumnal moth in Fennoscandia. Julkaisussa: Berryman, A. A. (toim). Dynamics of Forest Insect Populations: Patterns, Causes, and Implications. s. 163–178. Plenum Press, New York.
- Helle, T. 2001. Mountain birch forest and reindeer husbandry. Julkaisussa: Wielgolaski, F. E. (toim.). Nordic mountain birch ecosystems. s. 279–291. Butler and Tanner Ltd., Frome and London, UK.
- Kallio, P. & Lehtonen, J. 1973. Birch forest damage caused by *Oporinia autumnata* (Bkh.) in 1965–66 in Utsjoki, N Finland. Reports from the Kevo Subarctic Research Station 10: 55–69.
- Karhu, K. J. & Neuvonen, S. 1998. Wood ants and a geometrid defoliator of birch: predation outweighs beneficial effects through the host plant. *Oecologia* 113: 509–516.
- Lehtonen, J. & Heikkinen, R. K. 1995. On the recovery of mountain birch after *Epirrita* damage in Finnish Lapland, with a particular emphasis on reindeer grazing. *Ecoscience* 2: 349–356.
- Neuvonen, S., Ruohomäki, K., Bylund, H. & Kaitaniemi, P. 2001. Insect herbivores and herbivory effects on mountain birch dynamics. Julkaisussa Wielgolaski, F. E. (toim). Nordic mountain birch ecosystems. s. 207–222. Butler and Tanner Ltd., Frome and London, UK.
- , Bylund, H. & Tømmervik, H. 2005. Forest defoliation risks in birch forest by insects under different climate and land use scenarios in northern Europe. Julkaisussa Wielgolaski, F. E. (toim.): Plant Ecology, Herbivory and Human Impact in Northern Mountain Birch Forests. Springer Verlag, Ecological Studies Vol. 180: 126–138.
- Niemelä, P. 1979. Topographical delimitation of *Oporinia*-damages: experimental evidence of the effect of winter temperature. Reports from the Kevo Subarctic Research Station 15: 33–36.
- , Chapin, F. S. III, Danell, K. & Bryant, J. P. 2001. Herbivory-mediated responses of selected boreal forests to climatic change. *Climatic Change* 48(2–3): 427–440.
- Ruohomäki, K. & Haukioja, E. 1992. Interpopulation differences in pupal size and fecundity are not associated with occurrence of outbreaks in *Epirrita autumnata* (Lep., Geometridae). *Ecological Entomology* 17: 69–75.
- , Tanhuanpää, M., Ayres, M. P., Kaitaniemi, P., Tammaru, T. & Haukioja, E. 2000. Causes of cyclicality of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera, Geometridae): grandiose theory and tedious practice. *Population Ecology* 42: 211–223.



- Seppälä, M. & Rastas, J. 1980. Vegetation map of the northernmost Finland with the special reference to subarctic forest limits and natural hazards. *Fennia* 158: 41–61.
- Sihvo, J. 2002. Ylä-Lapin luonnonhoitoalueen ja Urho Kekkosen kansallispuiston luontokartoitus. Loppuraportti osa 2: Ylä-Lapin luontotyypit. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja, Sarja A 137. 175 s.
- Skjenneberg, S. & Slagvold, L. 1968. Reindriften og dens naturgrunnlag. Universitetsforlaget, Oslo. 332 s.
- Tanhuanpää, M., Ruohomäki, K., Kaitaniemi, P. & Klemola, T. 1999. Different impact of pupal predation on populations of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera, Geometridae) within and outside the outbreak range. *Journal of Animal Ecology* 68: 562–570.
- Tenow, O. 1996. Hazards to a mountain birch forest – Abisko in perspective. *Ecological Bulletins* 45: 104–114.
- , Bylund, H., Karlsson, P. S., and Hoogesteger, J. 2004. Rejuvenation of a mountain birch forest by an *Epirrita autumnata* outbreak. *Acta Oecologica* 25: 43–52.
- Tømmervik, H., Høgda, K. A. & Karlsen, S. R. 2001. Using remote sensing to detect caterpillar outbreaks in mountain birch forests – a new approach. Julkaisussa: Wielgolaski, F. E. (toim). Nordic mountain birch ecosystems. s. 241–249. Butler and Tanner Ltd., Frome and London, UK. .
- Virtanen, T. & Neuvonen, S. 1999. Performance of moth larvae on birch in relation to altitude, climate, host quality and parasitoids. *Oecologia* 120: 92–101.
- , Neuvonen, S. & Nikula, A. 1998. Modelling topoclimatic patterns of egg mortality of *Epirrita autumnata* (Lepidoptera, Geometridae) with a Geographical Information System: predictions for current climate and warmer climate scenarios. *Journal of Applied Ecology* 35: 311–322.
- Warenberg, K., Danell, Ö., Gaare, E. & Nieminen, M. 1997. Flora i reinbeiteland. Julkaisussa: Ekendahl, B. & Bye, K. (toim.). Landbruksforlaget, Oslo. 112 s.

Metlan työraportteja 25: 42–48

## Poronhoito ja muuttuva ilmasto

Timo Helle

### 1 Johdanto

Klassisessa lumiekologiaa esittelevässä työssään Formozov (1948) kuvaa poron ja sen villit sukulaiset (*Rangifer tarandus*) ”luntasietäväksi” lajiksi sen monien lumisopeutumien vuoksi. Sopeutumien ovat sekä rakenteellisia että käyttäytymiseen liittyviä. Kriittiset kynnyksarvot ylitettyään lumipeitteen syvyys ja kovuus lisäävät kuitenkin liikkumisen ja ravinnon kaivamisen energiakustannuksia (Thing 1977, Helle 1984). Poronhoidossa lumen ratkaiseva merkitys ilmenee runsaana saamenkielisenä lumisanastona (Ryd 2001). Ravinnon saannin vaikeutuminen voi johtua lumipeitteen paksuudesta (Pruitt 1979, Helle 1984) tai sen saa aikaan jääkerros, joka syntyy maan tai hangen pintaan suojasään kostuttaman lumen jäätyessä (Reimers 1977, Aenes ym. 1999, Helle ym. 2001, Heggberget ym. 2002). Avomaastossa myös kovat tuulet saattavat kovettaa lumen (Bergerud 1974, Skogland 1986, Collins ja Smith 1991). Lumen myöhäisestä sulamisesta puolestaan seuraa, että vihreän, korkealaatuisen ravinnon (kevätvihanta) saanti viivästyy, mikä alentaa poronaaraan maidon tuotantoa ja heijastuu vasojen kasvuun (Caughley ja Gunn 1993, Post ja Klein 1998).

Toinen kriittinen vaihe poron vuosikierrossa ajoittuu keskikesään. Syynä ovat vertaimevät tai porossa loisivat hyönteiset. Reimersin (1983) esittämä hypoteesi, jonka mukaan hyönteisten aiheuttama häiriö lisää eläinten liikkuvuutta ja vähentää ruokailuun käytettävää aikaa, on saanut tukea monista myöhemmistä tutkimuksista. Kuumien keskikesän vaikutukset näkyvät pahimmillaan korkeana vasakuolleisuutena ja yleisesti alhaisina syyspainoina (Helle ja Kojola 1994, Wladji ym. 2003). Hyönteishaitta, räkkä, on pahimmillaan, kun vuorokauden keskilämpötila ylittää + 15° C (Helle ja Aspi 1984).

Useimpien tämänhetkisten mallien tai skenaarioiden mukaan ilmasto lämpenee voimakkaimmin pohjoisilla alueilla (Tuomenvirta ja Drebs 2006). Lämpötilan nousu koskee kaikkia vuodenaikojia, erityisesti kuitenkin talvea. Pitkällä aikavälillä seurauksena on kasvillisuusvyöhykkeiden siirtyminen kohti pohjoista. Sateisuuden on ennustettu lisääntyvän, mikä merkitsee pohjoisilla alueilla lisääntyvää lumimäärää lähivuosisikymmenien aikana.

Tässä kirjoituksessa tutkitaan ilmastonmuutoksen oletettuja vaikutuksia poroon ja poronhoitoon testaamalla seuraavat hypoteesit:

1. Talvisateiden kasvaessa lumipeite vahvenee lähitulevaisuudessa, mistä on seurauksena porojen ravinnon saannin vaikeutuminen, mikä ilmenee alhaisena vasaprocenttina ja korkeana kuolleisuutena (Gunn ja Skogland 1997, Heggberget ym. 2002, Weladji ym. 2002).
2. Talvi-ilmaston lämmitessä riski suojasään jälkeen hangen pintaan muodostuvasta jääkerroksesta kasvaa, mikä vaikeuttaa porojen ravinnon saantia (Gunn ja Skogland 1997, Heggberget ym. 2002).
3. Luminen aikaa lyhenee sekä syksystä että kevästä, mikä helpottaa porojen ravinnon saantia. Vihreää ravintoa on kesällä varhain saatavilla, mikä parantaa porojen kuntoa (Caughley ja Gunn 1993, Post ja Klein 1998).
4. Kesälämpötilojen nousu lisää vertaimevien hyönteisten määrää ja aktiivisuutta, mistä seuraa porojen kunnan heikkeneminen (Weladji ym. 2003).

## 2 Aineisto ja menetelmät

Hypoteesien testaaminen edellyttää pitkiä aikasarjoja, sillä säiden vuosivaihtelut ovat suuret ja porokannan kehitykseen erityisesti vaikuttavia poikkeusoloja esiintyy suhteellisen harvoin. Artikkelit perustuu osin jo aiemmin julkaistuihin tuloksiin (Helle ja Kojola 1994, Helle ym. 2001) ja osin vielä julkaisemattomaan käsikirjoitukseen (Helle ja Kojola 2006). Lumipeitteen vaikutusta vasaprocenttiin ja kuolleisuuteen on tutkittu Käsivarren paliskunnassa Enontekiöllä vuosina 1960–2000. Analyysissä käytetyt säätiedot ovat peräisin Ilmatieteen laitoksen Kilpisjärven sääasemalta. Poroa koskeva tilastotieto on koottu virallisista poroluetteloista. Lisäksi alkuperäis-tutkimuksissa on käyty läpi paliskunnan vuosikertomukset, joihin sisältyy luonnehdintoja sääoloista; erityisen tarkasti on kuvattu poikkeuksellisen vaikeat lumitalvet. Fenologiset havainnot koivunlehden tulosta hiirenkorvalle vuosina 1959–1983 on tehty Kilpisjärvellä Metsäntutkimuslaitoksen toimesta.

Vuosina 1960–2000 Käsivarren paliskunnan poroluku (sisältää aikuiset ja vasat) vaihteli 4 700 ja 20 400 välillä, mikä vastaa 1,0–4,2 porotiheyttä maapinta-alaa kohti laskettuna. Paliskunnan poronhoito on kokenut monia muutoksia viimeisten 40 vuoden aikana. Niistä merkittävin tämän analyysin kannalta koskee porojen lisäruokintaa poikkeuksellisen vaikeina lumitalvina 1997–98 ja 1998–99. Koska tarkoitus oli tutkia nimenomaan lumitekijöiden vaikutusta, ruokintaa harjoittaneet porokylät jätettiin näinä vuosina analyysin ulkopuolelle.

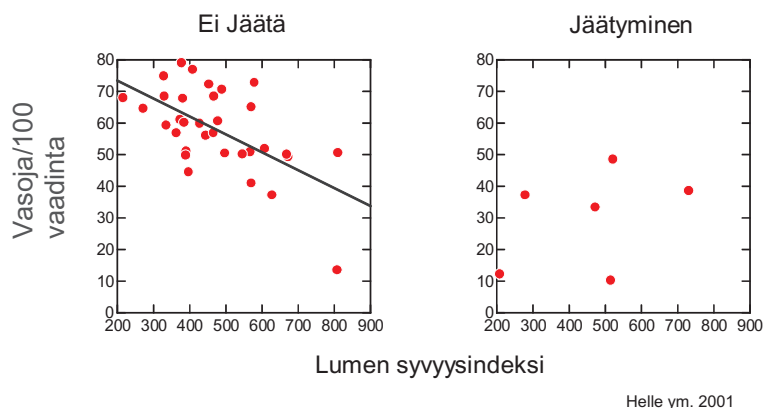
Räkän vaikutusta porojen painoihin on selvitetty Kaldoaivin paliskunnassa Utsjoella vuosina 1974–1990 ja 2002–2004. Painot koskevat satunnaisesti valitun 50 urosvasan teuraspainoja. Analyysissä on käytetty Ilmatieteen laitoksen Kevon sääaseman tietoja.

## 3 Tulokset

### 3.1 Lumipeitteen vaikutus vasaprocenttiin ja kuolleisuuteen

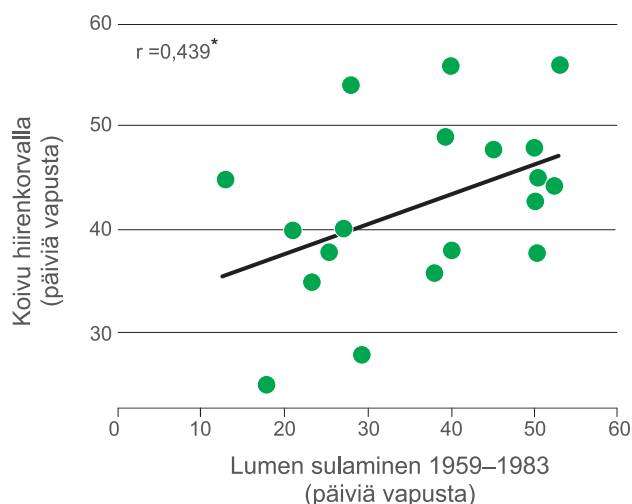
Käsivarren paliskunnan vasaprocentti ei ollut riippuvainen porotiheydestä suoraan tai 1–3 vuoden viiveellä. Sen sijaan vasaprocentti korreloi negatiivisesti loka-huhtikuun sademäärän (-0,337\*), kovien tuulten (>10 m/sek) esiintymisfrekvenssin (-0,406\*) ja lumen sulamisajankohdan kanssa (-0,335\*). Suojasäitä keskitalvella (tammi-maaliskuu) esiintyi harvoin eikä niillä ollut vaikutusta vasaprocenttiin. Tutkimuksessa käytettyyn 41 vuoden aikasarjaan sisältyi kuusi ”jätikkötalvea”, jotka saivat alkunsa, kun suojasään kostuttama lumi jäättyi alkutalven vaihtelevissa sääoloissa.

Jäätikkökalvien jälkeen vasaprocentti (43, SD = 0,08) oli merkitsevästi alhaisempi kuin ”normaalitalvien” (58, SD 0,13) jälkeen (ANOVA,  $F = 7,1$ ,  $P = 0,012$ ). Kun jäätikkö- ja ”normaalitalvia” tarkasteltiin erikseen, havaittiin, että ”normaalitalvina” vasaprocentti oli riippuvainen lumipeitteen vahvuutta kuvaavasta lumi-indeksistä, kun taas ”jäätikkövuosina” lumi-indeksi oli alhaisempi eikä sillä ollut vaikutusta vasaprocenttiin (kuva 1).



Kuva 1. Vasaprocentin riippuvuus lumen syvyydestä ja alkutalvella muodostuneesta kovasta jääkerroksesta Käsivarren paliskunnassa 1960–2000 Helteen ym. (2001) mukaan. Lumen syvyysindeksi on saatu laske-malla yhteen kunkin talvikuukauden 15. päivänä mitatut lumen syvyydet Ilmatieteen laitoksen Kilpisjärven sääasemalta.

Kun vasaprocentin vuosivaihtelua tutkittiin GLM-mallien (Generalized Linear Model) avulla, lumi-indeksi ja jäätyminen selittivät 57,3 % vaihtelusta. Malli, johon sisältyi lumi-indeksin lisäksi lumen sulamisajankohta oli selitysasteeltaan heikompi (selitysaste 40,1 %), joskin tilastollisesti merkitsevä. Lumi hävisi vuosina 1959–83 toukokuun 14. päivän ja kesäkuun 24. päivän välillä. Lumen sulamisajankohdan ja koivun hiiren korvalle tulon välillä oli positiivinen korrelaatio (kuva 2), mikä kuvaa kevätvihannan saatavuuden riippuvuutta lumen sulamisajankohdasta yleisemminkin. Sitä, että lumen sulamisajankohdalla on itsenäinen ekologinen merkitys, tukee myös havaittu positiivinen korrelaatio lumen sulamisen ja vuotuisen populaatiomuutoksen välillä.

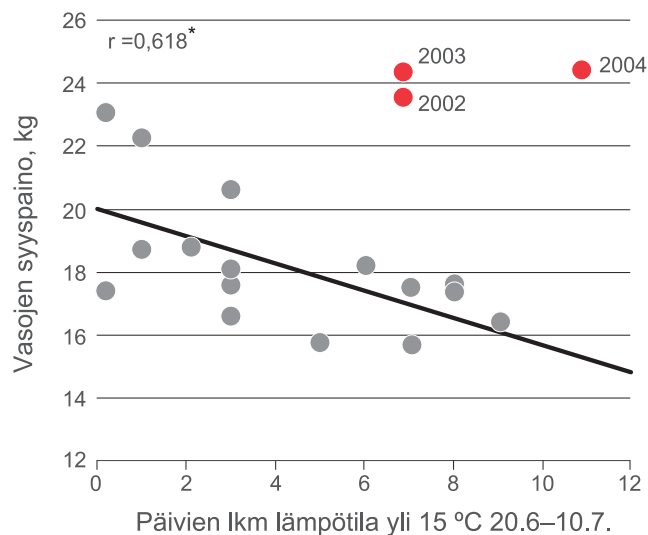


Kuva 2. Lumipeitteen häviäminen ja koivun tulo hiirenkorvalle Kilpisjärvellä 1959–1983 (Metsäntutkimuslaitos, julkaisematon aineisto).

Kuolleisuus oli lievästi porotiheydestä riippuvainen, mutta aikaviiveitä ei havaittu. ”Jäätikkötalvina” kuolleisuus oli trendinomaisesti korkeampi kuin ”normaalitalvina” (21,3 vs 14,1, parittainen t-testi,  $P = 0,061$ ) ja ero oli merkitsevä, kun huomioon otettiin myös seuraavan talven kuolleisuus ( $P = 0,050$ ). Selitys on ilmeisimmin se, että osa ”jäätikkötalven” jälkeen heikkokuntoisina syntyneistä vasoista selviää keskimääräistä heikommin ensimmäisestä talvestaan. Lumi-indeksillä tai muilla lumeen liittyvillä muuttujilla ei ollut vaikutusta kuolleisuuteen.

### 3.2 Keskikesän lämpötilojen vaikutus painoihin

Kaldoaivin paliskunnan urosvasojen teuraspainon riippuvuus keskikesän lämpötiloista on esitetty kuvassa 3. Vuosina 1974–90 parhaaksi selittäjäksi osoittautui niiden päivien lukumäärä 20.6.–10.7., jolloin vuorokauden keskilämpötila ylitti  $+15^{\circ}$ . Vuosien 2002–04 keskikesät olivat keskimääräistä lämpimämmät, mutta keskipainot olivat odotusten vastaisesti tarkastelujakson korkeimpia. Tämä selittyy sillä, että noina kolmena kesänä räkkää ei ollut käytännöllisesti katsoen lainkaan, jolloin myöskään hyönteisten aktiivisimman lentoajan sinänsä suotuisilla lämpötiloilla ei voinut olla vaikutusta keskipainoihin. Syynä hyönteisten puuttumiseen oli mitä ilmeisimmin varhaisesta lumen sulamisesta ja toukokuun vähäateisuudesta johtuva kuivuus, joka kuivatti pienet lammikot ennen kuin hyttysten ja paarmojen toukat/kotelot ehtivät kehittyä aikuisiksi. Sama koski myös jokien ja purojen vesirajaan kotoituneita mäkärän toukkia, sillä kevättulvan nostama vedenpinta laski kesäkorkeuteen viikkoja normaalia aikaisemmin (Kalevi Kuusela, suull. ilmoitus).



Kuva 3. Poron urosvasojen keskimääräinen syksyinen teuraspaino Kaldoaivin paliskunnassa 1974–1990 ja 2002–2004 (Helle ja Kojola, julkaisematon aineisto).

## 4 Tulosten tarkastelu

Artikkelissa testattiin neljä yleisesti esitettyä ja tärkeimpänä pidettyä hypoteesia lumipeitteen ja kesälämpötilojen vaikutuksesta porojen vasomistulokseen, kuolleisuuteen ja painoihin. Tulokset tukivat esitettyjä hypoteeseja. On kuitenkin huomattava, että ilmastonmuutoksen vaikutuksia voidaan arvioida edes suhteellisen luotettavasti ainoastaan, jos historiallisen säättekijöiden vaihtelu

todetussa empiirisessä aineostossa kattaa edes suunnilleen tulevan ilmaston säätekijöiden vaihteluvälin. Tämän vuoksi arviot pätevät todennäköisesti vain muutamina tulevina vuosikymmeninä.

Parhaiten vasaprocentin ja osin myös kuolleisuuden vuosivaihtelua selittivät koko talven lumen-syvyyttä kuvaava lumi-indeksi ja maan pintaa kattavan jääkuoren syntyminen alkutalven vaihtelevissa sääoloissa. Ennustettu talvisen sademäärän kasvu merkitsee porojen ravinnon saannin vaikeutumista. Lämpötilan nousu puolestaan lisää riskiä jääkuoren muodostumisesta, sillä se edellyttää suojasään ja pakkasen vaihtelua alkutalvella. Keskitalven (tammi-maaliskuu) suojasääät olivat Käsivarressa harvinaisia ja lämpötila nousi enimmilläänkin ja vain lyhyeksi ajaksi yli + 2 °C, mikä ei aiheuttanut poroa haittaavaa jääkerrosta. Suojasään todennäköisyys keskitalvella on sidoksissa keskilämpötilaan. Ilmatieteen laitoksen mukaan tammi-maaliskuun keskilämpötila on Keski-Suomessa (Jyväskylä) kolme astetta korkeampi kuin Lapissa (Sodankylä). Keski-Suomessa on tammi-maaliskuussa keskimäärin kuusi suojapäivää, mutta Lapissa vain yksi ([www.fmi.fi/saa/tilastot](http://www.fmi.fi/saa/tilastot)). On siis todennäköistä, että talvien leudontuessa riski keskitalven suojasäiden aiheuttamista lumen kovettumisista kasvaa Lapissakin.

Ongelma koskee erityisesti arktisia ja subarktisia alueita, missä porojen on kaivettava kaikki ravinto lumen alta. Lumen kovettuminen on kuitenkin ilmiö, joka ei tule ilmi sääasemilla tehtävissä lumensyvyysmittauksissa, vaan se joudutaan päättämään suojapäivien perusteella (Aanes ym. 1999). Käsivarren kaltaisissa olosuhteissa, joille ovat tyypillisiä suuret korkeusvaihtelut, menetelemään sisältyy riski, että alhaalla sijaitsevalla sääasemalla sekä lämpötilat että lumensyvyydet käyttäytyvät eri tavalla kuin varsinaisella tunturiylängöllä, jossa porot pääasiallisesti talvisin laiduntavat. Niinpä alhaalla suojasää saattaa sulattaa kaiken lumen, mutta lumi säilyy ylempänä, ja siihen syntyy seuraavan pakkasen aikana kova jääkerros. Ilmiö voi tapahtua myös toisin päin: suojasää kostuttaa lumen alhaalla, mutta tunturiylängöllä lämpötila pysyy koko ajan pakkasen puolella eikä jääkerrosta synny. Tämän vuoksi käyttämämme paliskunnan vuosikertomukset talvea koskevina luonnehdintoineen ovat olleet suureksi avuksi, sillä ne kuvaavat lumioloja porojen pääasiallisilla laitumilla.

Toiseksi keskeiseksi muuttujaksi nousi lumen sulamisajankohta. Varhainen lumen häviäminen paransi vasomatulosta ja alensi kuolleisuutta. ”Kevätvihantakoulukunnan” mukaan juuri loppukevät on kriittisin ajankohta poron villien sukulaisten vuosikierrossa (Caughley ja Gunn 1993, Post ja Klein 1998). Käsivarren aineistossa lumi-indeksin ja lumen sulamisajankohdan välillä oli positiivinen korrelaatio, ts. jos talvella lunta oli paljon, se sulii myöhään keväällä. Keskinäiskorrelaatiosta johtuen niiden suhteellisen merkityksen tarkka arviointi on vaikeaa. Poroille vaikeina ”jäätikkötalvina” tai erityisen vahvalumisina talvina heikko vasomatulos oli kuitenkin nähtävissä jo helmi-maaliskuussa, kun osa nälkiintyneistä vaatimista abortoi sikiönsä. Abortointi on yleistä vastaavissa olosuhteissa, mistä ovat osoituksena monet sitä kuvaavat sanat sekä suomalaisessa että saamelaisessa poronhoitoterminologiassa.

Kevään tulo on jo aikaistunut erityisesti Keski-Euroopassa ja siitä on nähtävissä merkkejä myös Etelä-Suomessa (Tuomenvirta ja Drebs 2006). Seurauksena on ollut mm. lintujen kevätmuuton ja pesinnän varhaistuminen (Forchhammer ym. 1998). Porolla yhtä selvää lisääntymisfenologian muutosta ei ole odotettavissa, sillä syksyn kiima-ajan määräävät muut tekijät kuin lämpötila eikä kantoajan ole todettu juurikaan vaihtelevan (Skjenneberg 1965). Porojen kuntoa ennakoitavissa oleva kevään tulon varhaistuminen kuitenkin parantaa. Lumen häviäminen helpottaa ja tarkentaa ravinnon valintaa, minkä lisäksi lumenlähtö ennakoii myös kevätvihannan ilmestymistä, kuten Kilpisjärven koivua koskevat fenologiset havainnot osoittivat. Näyttää kuitenkin ilmeiseltä, että

varhainen kevään tulo ei pysty kompensoimaan erityisen runsaasta lumesta tai maanpinnan jäätymisestä johtuvia ongelmia.

Kaldoaivin paliskunnassa Utsjoella keskikesän korkeat lämpötilat alensivat odotuksen mukaisesti urosvasojen syyspainoa vuosina 1974–1990. Tämä tukee hypoteesia, jonka mukaan hyönteishaitta tulee kasvamaan ilmaston lämmitessä (Weladji ym. 2003). Vuosina 2002–04 painot olivat korkeammat kuin kertaakaan aiemmin tutkimusjakson aikana keskimääräistä lämpimämistä keskikesistä huolimatta. Pääasiallisesti syyksi esitettiin poikkeuksellisen kuivista keväistä johtuva vertaimevien hyönteisten lähes täydellinen puuttuminen. Osaltaan korkeita painoja selitti Käsivarressa merkitykselliseksi osoittautunut varhainen kevään tulo ja ohutluminen talvi. Merkillä pantavaa kuitenkin on, että talvisen lisäruokinnan taso ei ole noussut 1990-luvun puolivälin jälkeen. Näiltä osin analyysia on syytä tarkentaa.

Kaldoaivin vasojen painot ovat kuitenkin erinomainen esimerkki siitä, että tietyn muuttujan (keskikesän lämpötila) selitysvoima saattaa kokonaan hävitä, jos samanaikaisesti jokin toinen kriittinen muuttuja muuttuu (kevään kuivuus). Ilmiötä kutsutaan ilmastomuutoksen epäsymmetriaksi, ts. kaikki vuodenaajat eivät muutu suhteellisesti samalla tavalla. Siitä tiedetään vielä vähän. On vielä aivan ennen aikaista sanoa, että pahat räkkäkesät ovat Utsjoella ohi ja että viime kesien porojen huippupainot olisivat pysyvä ilmiö.

## Kiitokset

ansaitsevat Aarno Niva ja Raimo Pikkupeura monenlaisesta teknisestä avusta käsikirjoituksen valmistelussa. Lisäksi olen saanut vapaasti käyttää Ilpo Kojolan kanssa keräämiämme aineistoja.

## Kirjallisuus

- Aanes, R., Saether B. & Öritsland N. 2000. Fluctuations of an introduced population of Svalbard reindeer: the effects of density dependence and climatic variation. *Ecography* 23: 437–443.
- , Saether, B-E., Smith, F., Cooper, E., Wookey, P. & Öritsland, N. 2002. The Arctic Oscillation predicts effects of climate change in two trophic levels in a high-arctic ecosystem. *Ecology Letters* 5: 445–453.
- Adamczewski, J., Gates, C., Soutar, B. & Hudson, R. 1988. Limiting effects of snow on seasonal use and diets of caribou (*Rangifer tarandus groenlandicus*) on Coats Island, Northwest Territories, Canada. *Canadian Journal of Zoology* 66: 1986–1996.
- Bergerud, A. 1974. Relative abundance of food in winter for Newfoundland caribou. *Oikos* 25: 379–387.
- Caughley, G. & Gunn, A. 1993. Dynamics of large herbivores in deserts: kangaroos and caribou. *Oikos* 67: 47–55.
- Collins, W. & Smith, T. 1991. Effects of wind-hardened snow on foraging by reindeer. *Arctic* 44: 217–222.
- Créte, M. & Huot, J. 1993. Regulation of a large herd of a migratory caribou: summer nutrition affects calf growth and body reserves of dams. *Canadian Journal of Zoology* 71: 2291–2296.
- Forchhammer, M., Post, E. & Stenseth, N. C. 1998. Breeding biology and climate. *Nature* 391: 29–30.
- Formozov, A. 1948. Snow as an integral factor of the environment and its importance in the ecology of mammals and birds. English translation 1969. Boreal Institute of University of Alberta, Occas. Publ. 1: 1–141.
- Gunn, A. & Skogland, T. 1996. Responses of Caribou and Reindeer to Global Warming. In: Oechel, W., Callaghan, T., Gilmanov, T., Holten, J., Maxwell, B., Molau, U. & Sveinbjörnsson, B. (toim.). Global Change and Arctic Terrestrial Ecosystems. *Ecological Studies* 124: 189–200.

- Heggberget, T. M., Gaare, E. & Ball, J. 2002. Reindeer (*Rangifer tarandus*) and climate change: Importance of winter forage. *Rangifer* 22 (1): 13–32.
- Helle, T. 1984. Foraging behaviour of semi-domesticated reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) in relation to snow in Finnish Lapland. Reports from the Kevo Subarctic Research Station 19: 35–47.
- & Aspi, J. 1984. Do sandy patches help reindeer against insects? Reports from the Kevo Subarctic Research Station 19: 57–62.
- & Kojola, I. 1994. Body mass variation in semidomesticated reindeer. *Canadian Journal of Zoology* 72(4): 681–688.
- & Kojola, I. 2006. Demography in an alpine reindeer herd: effects of density and winter weather. *Käsi-kirjoitus*.
- , Kojola, I. & Timonen, M. 2001. Lumipeitteen vaikutus Käsivarren porolukuihin: mikä on Pohjois-Atlantin säävaihtelun (NAO) merkitys? *Suomen Riista* 47: 75–85.
- LaPerriere, A. & Lent, P. 1977. Caribou feeding sites in relation to snow characteristics in northeastern Alaska. *Arctic* 30: 101–108.
- Post, E. & Klein, D. 1999. Caribou calf production and seasonal range quality during a population decline. *Journal of Wildlife Management* 63(1): 335–345.
- Pruitt, W. 1979. A numerical “Snow Index” for reindeer (*Rangifer tarandus*) winter ecology (*Mammalia, Cervidae*). *Annales Zoologici Fennici* 16: 271–280.
- Reimers, E. 1977. Population dynamics in two subpopulations of reindeer in Svalbard. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 9: 369–381.
- 1982. Winter mortality and population trends of reindeer on Svalbard, Norway. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 14: 295–300.
- 1983. Growth rate and body size differences in Rangifer, a study of causes and effects. *Rangifer* 3: 141–149.
- Ryd, Y. 2001. *Snö*. Stockholm, Ordfront. 326 s.
- Sjenneberg, S. 1965. *Rein og reindrift*. Lesjaskog. 326 s.
- Skogland, T. 1978. Characteristics of the snow cover and its relationship to wild mountain reindeer (*Rangifer tarandus tarandus* L.) feeding strategies. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 10 (3): 569–580.
- Thing, A. 1977. Behaviour, mechanics and energetics associated with winter cratering by caribou in north-western Alaska. *Biologica Papers of the University of Alaska* 18: 1–41.
- Tuomenvirta, H. & Drebs, A. 2006. Muuttuva Lapin ilmasto. Metlan työraportteja xx: 7–13.
- Weladji, R. & Holand, Ö. 2003. Global climate change and reindeer: effects of winter weather on the autumn weight and growth of calves. *Oecologia* 136: 317–323.
- , Holand, Ö. & Almøy, T. 2003. Use of climatic data to assess the effect of insect harassment on autumn weight of reindeer (*Rangifer tarandus*) calves. *Journal of Zoology* 260: 79–85.
- , Klein, D., Holand, Ö. & Mysterud, A. 2002. Comparative response of reindeer/caribou and other northern ungulates to climatic variability. *Rangifer* 22: 33–50.



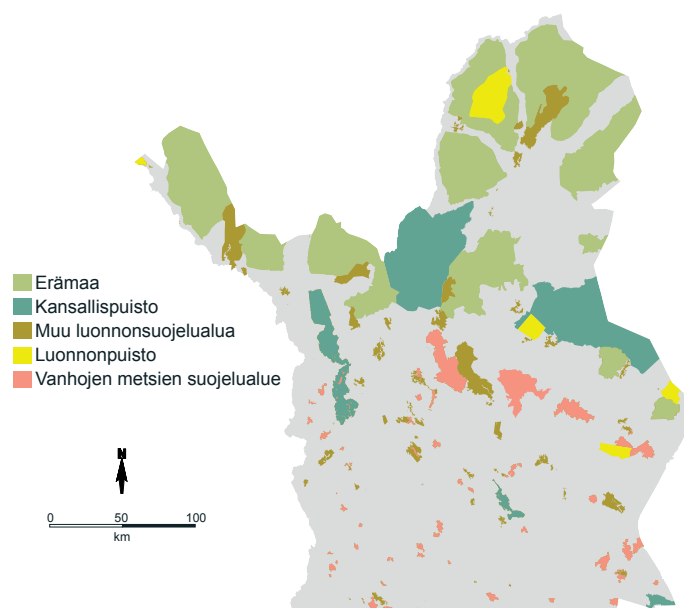
Metlan työraportteja 25: 49–53

# Ilmastonmuutos ja Lapin luonnonsuojelualueet

Pertti Itkonen

## 1 Luonnonsuojelun tilanne Lapissa

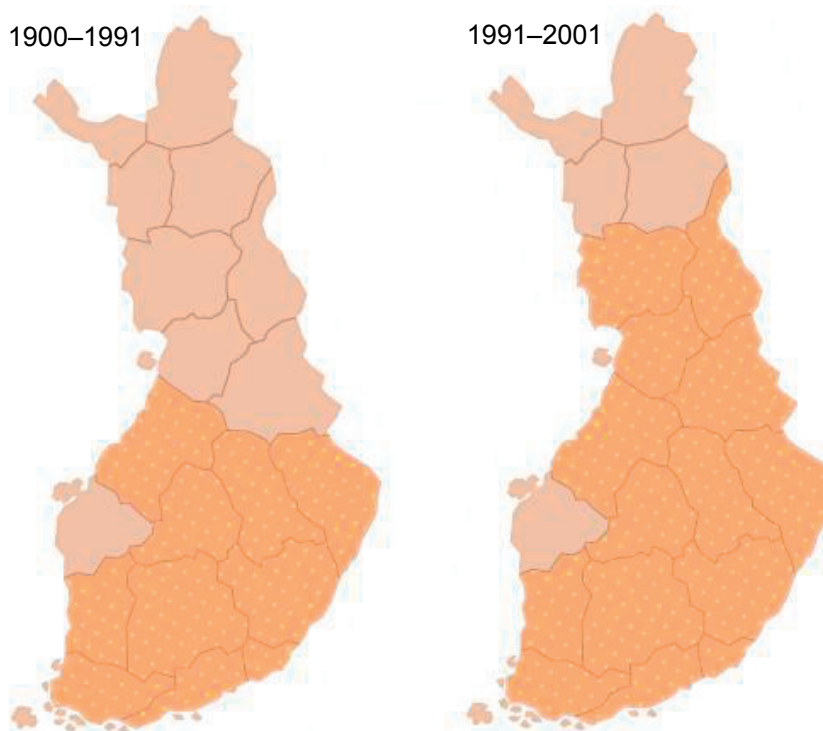
Lakisääteiset luonnonsuojelu- ja erämaa-alueet kattavat Lapin läänin maapinta-alasta 27 % (kuva 1). Ne eivät kuitenkaan ole jakautuneet tasaisesti, vaan keskittyneet läänin pohjoisosiin ja tunturialueille. Silti läänin eteläosissakin, samoin kuin pohjoisten havumetsien ja lähes kaikkien Lapin luontotyyppien osalta päästään noin 10 % pinta-alaosuuteen. Sitä esitetään usein asiantuntijoiden ja järjestöjen taholta metsien suojelun tavoitetilaksi. Suojelualueet ovat lisäksi pääasiassa varsin luonnontilaisia. Ihmisen vaikutus ulottuu jossain muodossa kaikille alueille, mutta elinympäristöä merkittävästi muuttavia toimenpiteitä ei yleensä ole tehty. Suojelualueiden läheisyydessäkin alueiden käytön historia on usein lyhyt ja ihmisen vaikutus luontoon siten vähäisempi kuin tiheämmin asutuilla seuduilla. Suojelualueilla porotalous ja virkistyskäyttö vaikuttavat luontoon eniten. Luontomatkailu kasvaa voimakkaasti, mutta vain muutamilla alueilla sitä voidaan vasta kutsua intensiiviseksi luonnon käytöksi. Ilman suojelualueiden ulkopuolelta tulevia vaikutuksia tilanne olisi Lapin alkuperäisen luonnon säilymisen kannalta vähintään tyydyttävä ja hallittavissa.



Kuva 1. Luonnonsuojelu- ja erämaa-alueiden verkosto Lapissa. Lähde: Metsähallitus ja Suomen ympäristökeskus.

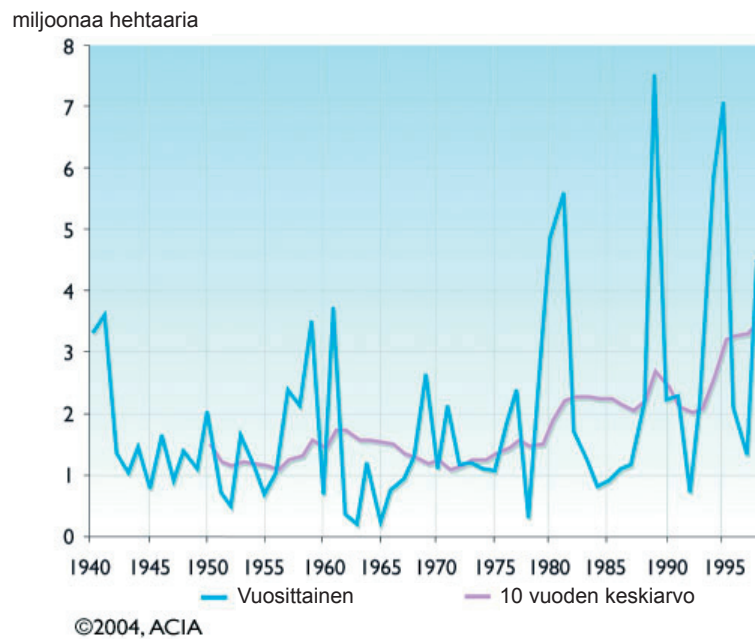
## 2 Ilmastonmuutoksen vaikutus Lapin luontoon ja sen käyttöön

Viime vuosikymmenien aikana ilmaston selvä muutos on näkynyt paitsi säätilastoissa myös Lapin ihmisen elinympäristössä. Talvet ovat lyhentyneet molemmista päistään ja kesät lämmenneet. Ennusteet ovat varsin yksimielisiä muutoksen jatkumisesta. Ilmaston muutos vaikuttaa väistämättä luontoon. Yksittäisten eläinlajien levinneisyydessä ja käyttäytymisessä muutokset voidaan havaita nopeasti, kuten monien muuttolintujen aikaistunut saapuminen tai eteläisten perhoslajien kuten keisarinviitan leviäminen Lappiin (kuva 2). Nopeimmin ilmaston muutokseen reagoivatkin juuri linnut ja hyönteiset, joiden leviämiskyky on hyvä. Näkyviä muutoksia ovat myös kasvien aikaistunut kukinta tai lehtien puhkeaminen. Hitaammin, mutta varmasti muuttuvat myös kokonaiset ekosysteemit. Metsänrajalla on selviä merkkejä havumetsänrajan etenemisestä, ja puulajisuhteet voivat muuttua havupuiden vallatessa alaa tunturikoivikoissa. Toisaalta puiden pitkä ikä ja hidas kasvu sekä muun ekosysteemin kuten maaperän ominaisuuksien erittäin hidas muutos toimivat puskureina. Lapin luonto on myös sopeutunut ilmaston vaihteluun: vuotuiset erot ovat aina olleet huomattavia, samoin pitempiaikaiset vaihtelut, kuten tilastot pelkästään 1900-luvulta osoittavat. Nämä tekijät todennäköisesti vähentävät laajojen äkillisten muutosten tai luonnonkatastrofien riskiä. Lapin metsät siis tuskin muuttuvat hetkessä keskieurooppalaisiksi lehtimetsiksi.



Kuva 2. Keisarinviitan levinneisyyden muutos 1900-luvulla. Lähde: Suomen lajisto muuttuvassa ilmastossa. Suomen WWF 2002.

Toisaalta ilmaston muutos merkitsee myös sääilmiöiden äärevöitymistä eli niiden entistä nopeampaa ja voimakkaampaa vaihtelua, mikä lisää puolestaan myrsky- ja metsäpalariskiä. Lämpiminä vuosina metsäpalojen lisäksi erityisesti hyönteistuhot voivat olla metsien uhkana. Pohjois-Amerikassa tästä on jo runsaasti näyttöä (kuva 3) (Hassol 2004). Suomen Lapissakin viime vuosien leudot talvet ovat johtaneet tunturimittarin lisääntymiseen ja tuhoihin tunturikoivikoissa.



Kuva 3. Metsäpalojen määrä Pohjois-Amerikan havumetsäalueella vuosina 1940–2000. Lähde: Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) 2004.

Erityisen haavoittuvia ovat Lapissa levinneisyytensä ääri rajoilla esiintyvät arktiset luontotyypit ja lajit. Ikiroudan muodostamat palsasuot ovat vähentyneet ja lienevät ensimmäinen Suomen alueelta kokonaan häviävä luontotyyppi. Kylmien vesien lohikalat, kuten rautu, kärsivät vesien kestäisistä lämpenemisistä. Toiset kalalajit, kuten särkikalat sekä ahven ja kuha, taas hyötyvät siitä. Kylmään ilmastoon sopeutuneiden lajien ohella vaarassa ovat sellaiset lajit, joiden luontainen leviämiskyky on heikko. Valitettavasti tähän joukkoon kuuluu paljon elinympäristöjen häviämisestä kärsineitä lajeja, kuten vanhojen metsien uhanalaisia sieniä ja hyönteisiä (Pöyry ja Toivonen 2005).

Ilmastonmuutos luo edellytykset myös täysin vieraan lajiston leviämiseen alueelle. Lapissa tulokaslajien määrä ja vaikutus alkuperäiseen lajistoon on toistaiseksi ollut varsin vähäinen, mutta Etelä-Suomessa jo huomattava. Tulokaslajien leviämiseen liittyy yleensä myös muita syitä kuin ilmaston lämpeneminen. Lienee kuitenkin selvää, että se on edistänyt esimerkiksi puutiaisen (punkin) ja metsäkauriin leviämistä Lappiin.

Ilmastonmuutoksen ajallinen mittakaava on siis erilainen ekosysteemin eri tasoilla. Yksittäisen lajin populaatio saattaa muuttua huomattavasti kymmenessä vuodessa, luontotyypin rakenne tai pinta-ala muutamassa kymmenessä vuodessa ja kokonaiset kasvillisuusvyöhykkeet siirtyvät luontotyyppiineen ja lajistoineen ehkä viidenkymmenen-sadan vuoden aikajänteellä. Eri tutkimuksissa on tehty lukuisia mallinnuksia ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Tulosten mukaan muutosten aikataulu ja voimakkuus vaihtelevat, mutta Lapissa ne ennustavat hyvin samansuuntaisesti kasvillisuusvyöhykkeiden siirtymistä pohjoiseen.

Ilmastonmuutos vaikuttaa myös luonnon hyödyntämiseen. Ensimmäiseksi muutos kohtaa alueiden perinteisintä, arktiseen ilmastoon sopeutunutta kulttuuria: eränkävintä ja luontaiselinkeinoja. Jossain määrin muutos voi olla positiivinen, kun alueiden tuotoskyky esimerkiksi riistan ja poron ravinnon suhteen kasvaa. Joka tapauksessa perinteiset menetelmät vaihtuvat olosuhteitten

muuttuessa. Porotalous on todennäköisesti ilmaston muutokselle herkin elinkeino. Sillä voi olla vaikutusta myös toiseen suuntaan: porojen laiduntaminen voi joko hidastaa tai nopeuttaa ilmaston muutoksen vaikutusta luontoon. Luonnonsuojelualueiden matkailukäyttö on runsasta, ja erityisesti niillä on merkitystä luontomatkailun kohdealueina. Lapin elinkeinoelämälle ja työllisyydelle tärkeän matkailun kannalta sään ja lumipeitteen muutokset vaikuttavat varmasti palvelujen kysyntään ja sesonkien ajoittumiseen. Jo nyt kevätsezonki näyttäisi lyhentyneen, ja joulusezongin alkua rajoittaa usein lumen puute (Carter ja Kankaanpää 2003).

### 3 Tavoitteet ja toimenpiteet luonnonsuojelualueilla

Ilmaston muutos on yleisen käsityksen mukaan pääosin ihmisen toiminnan seurausta. Sen takia voidaan pitää ihmisen moraalisen velvollisuutena edesauttaa aktiivisilla toimenpiteillä alkuperäisen lajiston sopeutumista muutokseen, koska sen vaikutuksia ei voida estää. Ja vaikka muutos voitaisiin osoittaa täysin ilmaston luontaisesta vaihtelusta johtuvaksi tai luonteeltaan sitä vastaavaksi, ihminen on muilla elinympäristöä muuttavilla toimenpiteillä joka tapauksessa vaikuttanut suuresti monien lajien edellytyksiin sopeutua sen aiheuttamiin muutoksiin.

Luonnonsuojelualueiden tärkein tavoite on säilyttää niiden alkuperäinen lajisto ja luontotyytit. Perinteisesti luonnonsuojelualueita on pidetty pysyvyyden symboleina ja niiden hoitoa hyvin pitkäjänteisenä ja perusteellisesti suunniteltavana toimintana. Tämä tilanne on selvästi muuttumassa. Jotta luonnonsuojelun tavoitteet voidaan ilmaston muuttuessakin saavuttaa, luonnonsuojelualueiden hoidossa on otettava muutoksen vaikutukset huomioon ja varauduttava niihin jo ennakolta. Toistaiseksi tällaisia suunnitelmia ei ole Suomessa tehty.

Ilmaston muutosta, sen vaikutuksia ja niihin sopeutumista on Suomessa tutkittu viime vuosina runsaasti, esimerkkinä SILMU- ja FINADAPT –tutkimusohjelmat. Vuonna 2005 laadittiin maa- ja metsätalousministeriön johdolla Ilmastonmuutoksen kansallinen sopeutumisstrategia, jossa esitetään toimenpiteitä myös luonnon monimuotoisuuden suojelemiseksi (Ilmastonmuutoksen kansallinen sopeutumisstrategia 2005). Luonnonsuojelu tarvitsisi kuitenkin oman sopeutumisstrategiansa, mitä suositteli myös Metsähallituksen luonnonsuojelualueiden hoitoa arvioinut kansainvälinen evaluointiryhmä (Gilligan ym. 2005). Tämän strategian pohjaksi pitäisi laatia selvitys nykyisen luonnonsuojelualueverkon riittävydestä ja tarpeellisista toimenpiteistä suhteessa ilmastonmuutokseen. Toistaiseksi myös tieto eri lajien reagoinnista muutokseen on riittämätöntä, ja tällaista tutkimusta ja seurantaä olisi pikaisesti lisättävä. Ilmaston muutoksen vaikutuksiin pitäisi varautua myös luonnonsuojelualueiden hoito- ja käyttösuunnitelmissa. Koska näitä muutoksia ei tunneta tarpeeksi tai niitä on vaikea ennustaa, luonnonsuojelualueilla pitäisi panostaa entistä enemmän luonnon seurantaan ja varautua reagoimaan myös yllättäviin muutoksiin. Tämä edellyttää hoito- ja käyttösuunnittelun kehittämistä sopeutuvan suunnittelun (adaptive management) suuntaan.

Keskeinen ongelma kuitenkin on, pitäisikö lajiston muuttumista luonnonsuojelualueilla edistää vai hidastaa? Ilmeisesti tarvitaan molempia tavoitteita tukevia toimenpiteitä. Koska muutos on väistämätön, luonnonsuojelualueverkon pitäisi tarjota mahdollisuudet lajien siirtymiselle uusille alueille. Suojelualueverkko onkin Lapin tunturialueilla varsin kattava. Alueet ovat myös laajoja, ja niihin sisältyy suuria korkeusvaihteluita, mikä helpottaa kokonaisten kasvillisuusvyöhykkeiden siirtymistä alueen sisällä. Etelä- ja Keski-Lapin metsäalueilla suojelualueverkkoa olisi vielä täydennettävä vähintään ekologisista yhteyksistä ja talousmetsien luonnonmukaisella käsittelyllä. Ennallistamistoimenpiteillä voidaan lisätä alkuperäistä elinympäristöä palauttamalla hakkuin ja

ojituksin käsiteltyjä alueita lähemmäksi luonnontilaa. Niitäkin tarvitaan lähinnä Etelä-Lapissa. Toisaalta nopeita muutoksia, erityisesti vieraiden lajien leviämistä, olisi alkuperäisen lajiston suojelemiseksi syytä torjua. Esimerkki vieraasta lajista on supikoira, mutta monien muiden lajien kuten hyönteisten leviämistä tuskin voidaan millään keinoilla estää. Ennalta arvaamattomiin muutoksiin on pystyttävä reagoimaan tarvittaessa nopeastikin. Laajoja metsätuhoja olisi rajoitettava, mahdollisesti myös luonnonsuojelualueilla.

## 4 Yhteenveto

Ilmastonmuutos on silmännähtävä tosiasia. Muutos ja sen vaikutukset luontoon tulevat olemaan voimakkaimpia pohjoisilla metsä- ja tunturialueilla. Lapissa se merkitsee ennen kaikkea arktisten lajien joutumista Jäämeren ja etenevän metsänrajan puristuksiin. Luonnonsuojelualueiden tärkein tehtävä on alkuperäisen luonnon säilyttäminen. Erämaa-alueilla suojelun kohteena on erämaisen luonnon merkitys luontaiselinkeinoille ja eränkävynille. Molemmille tavoitteille ilmaston muutos on uhka. Sitä ei voida kokonaan torjua, mutta Lapin luonnon ja ihmisen sopeutumista voidaan edesauttaa tai ainakin varautua muutokseen edes jossain määrin seuraavilla toimenpiteillä:

- ilmastonmuutoksen vaikutusten tutkimuksen ja seurannan lisääminen
- suojelualueverkon yhtenäisyyden lisääminen
- ilmastonmuutoksen ottaminen huomioon suojelualueiden suunnittelussa
- suojelualueiden laadun parantaminen luonnontilaisuutta edistämällä
- ilmastonmuutoksen vaikutuksia edistävän käytön rajoittaminen
- vieraiden lajien leviämisen estäminen
- ilmastonmuutoksesta aiheutuvien laajojen tuhojen rajoittaminen

On syytä huomata, että edes Lapin laajoja luonnonsuojelu- ja erämaa-alueita ei voi erottaa ympäristöstään, kun on kysymys ilmastonmuutoksen vaikutuksista ja niiden torjunnasta. Muiden alueiden käyttö vaikuttaa luonnon muutosta edistävästi tai hidastavasti ja vaikutus ulottuu myös suojelualueille. Tämä koskee niin vieraiden lajien torjumista kuin talousmetsien käsittelyä. Sopeutuminen ilmastonmuutokseen koskettaa mitä suurimmassa määrin kaikkia Lapin ihmisiä.

## Kirjallisuutta

- Carter T. R. & Kankaanpää S. 2003. Esiselvitys ilmastonmuutokseen sopeutumisesta Suomessa. A preliminary examination of adaptation to climate change in Finland. Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 640, ympäristönsuojelu. 66 s.
- Gilligan, B., Dudley, N., de Tejada, A. F. & Toivonen, H. 2005. Management Effectiveness Evaluation of Finland's Protected Areas. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja A 147. 175 s.
- Hassol, S. J. 2004 Impacts of a Warming Arctic. Arctic Climate Impact Assessment (ACIA). Cambridge University Press 2004. 144 s.
- Ilmastonmuutoksen kansallinen sopeutumisstrategia. MMM:n julkaisuja 1/2005. Maa- ja metsätalousministeriö. 272 s.
- Natura 2000 -alueiden hoito ja käyttö. 2002. Työryhmän mietintö. Ympäristöministeriö. Suomen ympäristö 597, luonto ja luonnonvarat. 88 s.
- Pöyry, J. & Toivonen, H. 2005. Climate change adaptation and biological diversity. FINADAPT Working Paper 3, Finnish Environment Institute Mimeographs 333. Helsinki, 46 s.
- Suomen lajisto muuttuvassa ilmastossa. 2002. Suomen WWF:n raportti n:o 16. 28 s.

Metlan työraportteja 25: 54–57

## Miten ilmastonmuutos tulisi ottaa huomioon metsien hoidossa?

Kari Mielikäinen

### 1 Johdanto

Suomen nykyiset puulajit aloittivat leviämisensä maahamme viime jääkauden jälkeen noin 8000 vuotta sitten. Ensimmäisinä puulajeina saapuivat koivu ja mänty; kuusi tuli maahamme vuosituhsia myöhemmin. Lapin lampien pohjamudista löytyvien subfossiilisten mäntyjen vuosirenkaat ovat tallentaneet vuosituhsien mittaisen ilmastohistoriamme vuodentarkasti. Puut ja vanhat maakerrokset paljastavat ilmaston vaihdelleen voimakkaasti jopa vuosisatoja kestävinä sykleinä. Ne kertovat ilmaston olleen nykyistä huomattavasti lämpimämpi Atlanttisella kaudella noin 5000 vuotta sitten. Myös keskiajan lämpökausi (700–1300) ja Pikkujääkausi (1560–1850) ovat jättäneet jälkensä edellä mainittuihin proksitietoihin.

### 2 Suomen metsien kehitys 1900-luvulla

Suomen metsien pääasialliset käyttömuodot olivat keskiajalta lähtien vuosisatojen ajan kaskeaminen, metsästys ja tervan poltto. Kaski ja terva hävittivät metsiä tavalla, joka kauhistutti maassamme vierailleita asiantuntijoita ulkomaita myöten. Metsien teollinen käyttö alkoi vasta ilmastollisesti epäedullisen Pikkujääkauden jälkeen 1800-luvulla. Viime vuosisadan alkuvuosikymmeninä lämmennyt ilmasto sekä neuvonnalla ja ”lain kouralla” tehostettu metsien hoito lisäsivät metsien käyttöpuun kasvua ja kestäväää hakkuumäärää vähitellen vuoteen 1960 saakka. Sen jälkeen tehdyt investoinnit vajaatuottoisten metsien uudistamiseen, soiden ojittamiseen ja nuorten metsien harvennuksiin kohottivat metsien kasvun muutamassa vuosikymmenessä lähes puolitoistakertaiseksi (55 milj. m<sup>3</sup> => yli 80 milj. m<sup>3</sup>). Kaksi vuosikymmentä sitten metsien uhkana pidetyt ilman epäpuhtaudet eivät vaikuttaneet puiden kasvuun ainakaan sitä alentavasti.

### 3 Puiden kasvun vaihtelu ja kasvutrendit Euroopassa

Tuhansiin pitkäaikaiskokeisiin perustuvat havaintosarjat useissa Euroopan maissa viittasivat 1980-luvun lopun kuumimman metsätuhokeskustelun keskellä siihen, että metsien kasvu oli lisääntynyt kiihtyvästi koko 1900-luvun. Ilmiön tutkimiseksi Metla ja Freiburgin yliopisto aloittivat vuonna 1992 Euroopan Metsäinstituutin tuella laajan tutkimuksen asiasta. Neljän vuoden

intensiivisen projektin jälkeen kokonaiskuva oli selvä. Etelä- ja Keski-Euroopassa puiden ja metsien kasvu oli lisääntynyt tavalla, jota ei voitu selittää metsien hoidolla eikä puuston ikärakenteella (Spiecker ym. 1996). Todennäköisimpänä syynä kasvun lisääntymiseen pidettiin liikenteestä ja maataloudesta peräisin olevaa typpilaskeumaa, joka oli ollut vuosikymmeniä 25–40 kg hehtaarilla vuodessa. Määrä vastaa käytännön metsänlannoituksessa käytettävää annostusta.

Suomessa, Venäjän Karjalassa ja Pohjois-Ruotsissa ei havaittu minkäänsuuntaista kasvutrendiä. Puut kasvoivat toisin sanoen samalla tavoin kuin vastaavanlaisissa metsissä kasvaneet, samankäiset puut olivat kasvaneet aiemmin. Suomessa maahan satava typpilaskeuma on ollut 3–10 kg hehtaarilla vuodessa. Metsiemme kokonaiskasvun 1960-luvulla alkanut jyrkkä lisääntyminen yli 40 prosentilla on näin ollen tehostuneen metsänhoidon tulosta.

## 4 Ilmaston lämpenemisen metsävaikutukset

Uusimmat ilmastokenaariot ennakoivat vuoden keskilämpötilan kohoavan Suomessa vuoteen 2080 mennessä 3–7 astetta ja sademäärän 5–40 prosenttia. Lämpötilan arvioidaan kohoavan eniten talvella ja keväiden aikaistuvan nykyisestä.

Männyn ja kuusen sopeutumista lämpenemiseen on mahdollista tarkastella professori Olli Heikinheimon 1920-luvulla perustamien puulajikokeiden perusteella. Heikinheimo ei istuttanut koikeita ilmastonmuutoksen tutkimiseksi. Hän halusi ainoastaan tutkia sitä, voidaanko siementä siirtää maantieteellisesti uusille alueille (Etelä-Suomen siementä Lappiin). Eri puolilta Eurooppaa tuotujen puualkuperien testaaminen kokeissa ympäri Suomea paljasti vahingossa myös puiden sopeutumisen ilmaston lämpenemiseen.

Lapista noin neljä astetta lämpimämpään Etelä-Suomeen siirretyt havupuut ovat menestyneet yli 80 vuotta ongelmitta ja tuottaneet etelässä kaksin verroin enemmän puuta kuin Lapissa (Beuker 1996). Pohjoisen puut eivät kuitenkaan etelässä pärjää paikallisille puuroduille, koska ne geneettisen muistinsa vuoksi painuvat talvilepoon syksyllä liian aikaisin. Näin varman päälle toimivat pohjoisen puut eivät ole alttiita syyshalloille.

Professori Seppo Kellomäki on arvioinut puiden sopeutumista ilmastonmuutokseen ”lämpökäsittelyistä” puista tehtyihin mittauksiin perustuvilla kasvumalleilla. Hänen mukaansa yllä mainitun suuruisen lämpötilan nousu lisää puuston kasvua suuralueilla etelässä 20–30 %; pohjoisessa jopa 50 %. Simuloinnit viittaavat myös siihen, että lehtipuut hyötyvät lämpenemisestä eniten. Tämä ei kuitenkaan muuta metsiämme oikopäätä koivikoiksi. Metsikön pääpuulajin valinta on edelleen metsän uudistamisen tai harvennuksen yhteydessä ihmisen määrättävissä.

Vaikka ilmaston mahdollisen muutoksen vaikutukset Suomen metsiin ovat ennusteiden perusteella pääosin myönteisiä, lämpenemisellä voi olla myös negatiivisia vaikutuksia puustoon. Lämpö voi tuoda maahamme tuhohyönteisiä eteläisemmistä maista. Pelottavimpia hyönteisiä on havunna, joka on jo tuhonnut Puolassa männiköitä. Mikäli lämpötila kohoaa talvella, lisää maan pölyminen sulana koneiden aiheuttamia maaperävaurioita ja sienitautien riskiä. Kuusen tyvilaho on jo nykyisin taloudellisesti maamme merkittävin metsien tuhonaiheuttaja. Soilla puunkorjuu voi käydä nykyisillä koneilla mahdottomaksi. Poikkeuksellisen lämpiminä talvina puiden lisääntyvä hengitys voi heikentää erityisesti kuusikoiden kuntoa Etelä-Suomessa.

## 5 Päätelmät

Ilmasto ja ilmaston muutosta säätelevistä fysikaalisista prosesseista vallitsee maailmassa suuri yksimielisyys. Prosessien moninaisuus ja osin kaoottisuus tekee ilmiöiden mallinnuksen ja malleilla tehtävät päätelmät muutosten nopeudesta ja niiden havaitsemisesta huomattavasti epävarmemmiksi. Mallit ovat parhaimmillaankin erittäin karkeita yleistyksiä monimutkaisista, interaktiivisista fysikaalisista, kemiallisista ja ekologisista prosesseista. Keskiajan lämpökausi (700–1300) ja Pikku jääkautena tunnettu kylmä ajanjakso (1560–1850) ovat esimerkkejä ilmaston pitkäaikaisista vaihteluista, joiden tarkkaa syytä ei tunneta.

Pohjois-Atlantin säitä säätelevän jaksoittaisen NAO-ilmiön (North Arctic Oscillation) tuomat länsivirtaukset ovat lämmittäneet 1990-luvun talviamme kuten niin monet kerrat aiemminkin. Pitkän aikavälin tulevaisuuden ennustamista vaikeuttavat myös epävarmuus Golf -virran toiminnasta ja parin tuhannen vuoden päästä odottava seuraava jääkausi.

Lapin vanhat männyt ja niistä rakennetut vuosilustokalenterit antavat tutkijan ajatuksille mittakaavaa. Kahdeksan vuosituhannen mittainen vuodentarkka kalenteri paljastaa lukuisia ajanjaksoja, jolloin puiden kasvu ja oletettavasti myös ilmasto ovat vaihdelleet dramaattisesti. Toistaiseksi tuntemattomista syistä ilmasto on joskus syöksynyt nopeasti vuosisatoja kestävään, jääkautta muistuttavaan aikakauteen. Näiden vaihtelujen rinnalla viime vuosisatojen ilmasto ja nyt ennakoitu ilmaston muutos ovat olleet varsin rauhallisia.

Puiden vuosilustot ja tunnintarkat kasvupantamittaukset eri puolilla Suomea eivät toistaiseksi viittaa siihen, että ilmaston muutos näkyisi metsien tuotoskyvyssä. Analyysien yhteydessä tarkastellut säätilastot eivät myöskään osoita trendinomaista muutosta keväiden aikaistumisesta lukuunottamatta. Trendien tulkintaa vaikeuttaa kylmän Pikku jääkauden päättyminen noin 150 vuotta sitten. Viime vuosien kesät ovat olleet lämpimyydeltään 1930-luvun tasolla. Lapin lämpimät talvet puolestaan näyttävät olevan ohi Pohjois-Atlantilta länsituulia tuovan NAO-ilmiön heikennyttyä.

Ilmaston muuttuminen tulee vaikuttamaan toteutuessaan metsien hoitoon ja puunkorjuuseen. Eteläisempien puualkuperien käyttö viljelyssä ja jalojen lehtipuiden nykyistä laajempi kasvatus tulevat yleistymään, jos ilmasto lämpenee. Kohoava kasvu mahdollistaa puolestaan puunkäytön lisäämisen, jota tosin varjostaa tuhoriskin kasvaminen. Myrskytuhojen vähentäminen saattaa edellyttää muutoksia harvennusmenetelmiin. Maaperän kantavuuden heikkeneminen lämpiminä talvina tuottaa vaikeuksia puunkorjuulle. Heikosti kantavien maiden harvennuksia voidaan joutua harkitsemaan uudelleen tai kehittämään uusia korjuukoneita. Ilmaston muutos on ihmisen mittakaavassa hidas prosessi, johon voidaan sopeutua vain sitä mukaa kun prosessi etenee. Toistaiseksi metsien hoidossa ei ole ollut tarvetta tai edes mahdollisuutta suuriin muutoksiin.

Ilmakehän hiilidioksidin lisääntyminen voi olla metsien mittakaavassa parhaimmillaan ohimenevä, yhtä puusukupolvea koskettava ilmiö. Kasvihuonekaasujen voimakas lisääntyminen ja kääntyminen laskuun ennen vuotta 2100 fossiilisten polttoaineiden loppuessa saattaa näkyä tulevien vuosisatojen dendrokronologisissa tutkimuksissa Keskiajan lämpökautta lyhyempänä episodina, jolloin puiden vuosilustot olivat tavanomaista leveämpiä. Jotta näin onnellisesti kävisi, meidän on jatkettava tutkimusta ja sen antamiin tuloksiin perustuvaa työtä puhtaan ilmakehän puolesta.



## Kirjallisuus

- Beuker, E. 1996. Implications of climate adaptability in provenances trials with Scots pine and Norway spruce in Finland for the possible effects of climate warming. Joensuun yliopiston metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 42. 33 s. + 5 osajulkaisua.
- Kellomäki, S. 2000. Ilmastonmuutoksen vaikutus Suomen metsien kasvuun. Tietoyhteys - tieteen tietotekniikka 3/2000.
- Mielikäinen, K., Nöjd, P., Pesonen, E. & Timonen, M. 1998. Puun muisti. Metsäntutkimuslaitoksen Tiedonantoja 703. 71 s.
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Köhl, M. & Skovsgaard, J.P. (toim.) 1996. **Growth Trends in European Forests. Studies from 12 Countries.** European Forest Institute, Research Report No. 5. Springer Verlag, 372 s.

## Kirjoittajien yhteystiedot

Achim Drebs, Ilmatieteen laitos, Ilmasto ja globaalimuutos, PL 503, 00101 Helsinki  
achim.drebs@fmi.fi

Timo Helle  
Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemen toimintayksikkö, PL 16, 96301 Rovaniemi  
timo.helle@metla.fi

Pertti Itkonen,  
Metsähallitus, Pyhä-Luoston kansallispuisto, Kerontie 22, 98530 Pyhätunturi  
pertti.itkonen@metsa.fi

Vesa Juntunen  
Metsäntutkimuslaitos, Kolarin toimintayksikkö, Muoniontie 21 A, 95900 Kolari  
vesa.juntunen@metla.fi

Heikki Kauhanen  
Metsäntutkimuslaitos, Kolarin toimintayksikkö, Muoniontie 21 A, 95900 Kolari  
heikki.kauhanen@metla.fi

Kari Mielikäinen  
Metsäntutkimuslaitos, Vantaan toimintayksikkö, PL 18, 01301 Vantaa  
kari.mielikainen@metla.fi

Kari Mikkola  
Metsäntutkimuslaitos, Rovaniemen toimintayksikkö, PL 16, 96301 Rovaniemi  
kari.mikkola@metla.fi

Seppo Neuvonen  
Metsäntutkimuslaitos, Joensuun toimintayksikkö, PL 68, 80101 Joensuu  
seppo.neuvonen@metla.fi

Katja Pekkanen  
Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Helsingin yliopisto, PL 56 (Viikinkaari 9),  
00014 Helsingin yliopisto  
katja.pekkänen@helsinki.fi

Raimo Sutinen  
Geologian tutkimuskeskus, Rovaniemen yksikkö, PL 77, 96101 Rovaniemi  
raimo.sutinen@gtk.fi

Heikki Tuomenvirta  
Ilmatieteen laitos, Ilmasto ja globaalimuutos, PL 503, 00101 Helsinki  
heikki.tuomenvirta@fmi.fi

Tarmo Virtanen  
Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Helsingin yliopisto PL 56 (Viikinkaari 9),  
00014 Helsingin yliopisto  
tarmo.virtanen@helsinki.fi