

# Ilmaston lämpenemisen aiheuttama puurajan siirtyminen pohjoisemmaksi arktisella vyöhykkeellä

Anniina Tuomela

790351A

LuK-tutkielma

Maantieteen laitos

Oulun yliopisto

24.11.2016

# Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	3
2. Teoria.....	4
2.1 Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsiin.....	4
2.2 Puuraja ja ilmastonmuutos.....	5
3. Tapaustutkimukset.....	8
3.1 Pohjois-Norja.....	8
3.2 Pohjois-Ruotsi.....	9
3.3 Labradorin niemimaa.....	11
3.4 Pohjois-Ural.....	12
4. Tulokset ja tulosten tarkastelu.....	14
4.1 Eroavuudet tapaustutkimusten välillä.....	14
4.2 Meta-analyysi puurajatutkimuksesta.....	15
4.3 Mittakaavan ja ihmistoiminnan vaikutus puurajojen responssiin.....	18
5. Pohdinta.....	19
Kirjallisuus.....	22

## 1. Johdanto

Ilmasto on kenties merkittävin kasvilajien levinneisyyttä rajoittava tekijä (Pearson & Dawson 2003). Kun ilmasto muuttuu, lajien on joko sopeuduttava muuttuviin olosuhteisiin tai löydettävä uusia suotuisia elinympäristöjä. Tällä hetkellä käynnissä oleva ilmaston lämpeneminen on jo muuttanut maapallon sääoloja (Climate Change 2014 Synthesis... 2014; Climate change and plants, 2016).

Puurajoista on ilmaston lämpenemisen seurauksena tullut suosittu ekologien ja maantieteilijöiden tutkimuskohde. Kun ilmasto lämpenee, kylmään ilmastoon sopeutuneiden kasvilajien on siirryttävä kohti uusia suotuisia ympäristöoloja, mikä tarkoittaa näiden kasvien globaalia siirtymistä kohti napoja. Tämä koskee myös puita, joita ei kasva pohjoisessa ns. puurajan yläpuolella (Grace ym. 2002; Gamache & Payette 2005; Trant & Hermanutz 2014).

*Boreaalinen vyöhyke* on ympäri maapallon jatkuva havumetsävyöhyke, joka kulkee Euroopan, Aasian ja Pohjois-Amerikan pohjoisosia myöten 45° ja 65° leveyspiirien välillä. Kuusi ja mänty dominoivat metsiä, ja lehtipuista yleisimpiä ovat koivu ja haapa (Simmon 1999). Boreaalisen vyöhykkeen pohjoispuolella sijaitsee *arktinen vyöhyke*, jonka vuoden keskilämpötila on -12 ja -6 celsiusasteen välillä. Arktisen vyöhykkeen kasvillisuustyyppi on puuton *tundra*, jolla kasvaa matalia mätäskasveja. Tundraa esiintyy arktisen vyöhykkeen lisäksi korkeilla vuorenhuipuilla, missä ilmasto on liian kylmä ja kuiva puiden kasvuille. (Tundra, dry, cold, and windy 2016). Boreaalisen ja arktisen vyöhykkeen väliin muodostuu leveyspiirinen puuraja.

Luon tutkielmassani katsauksen 2000-luvulla tehtyyn puurajatutkimukseen. Tutkimusta on tehty runsaasti niissä maissa, joissa puurajoja esiintyy: pohjoisen puurajan vyöhykkeellä ja vuoristoisilla alueilla (esim. Shiyatov ym., 2004; Gamache & Payette 2005; Van Bogaert ym. 2011; Hofgaard ym. 2013; Trant & Hermanutz 2014). Olen kiinnostunut puurajan siirtymisestä pohjoiseen päin, joten määrittelen erikseen *leveyspiirisen* ja *alpiinisen* puurajan. Monissa artikkeleissa tätä jaottelua ei ole tehty, vaan puurajaa käsitellään samana ilmiönä riippumatta siitä, esiintyykö se

vuorenrinteellä vai boreaalisen vyöhykkeen ja tundran rajalla. Näin ollen oli vaikeaa löytää kokoelma esimerkkitutkimuksia, jotka käsittelevät nimenomaan leveyspiiristä puurajaa. Esittelemieni tutkimusten joukossa on siis sellaisiakin, jotka tutkivat puurajan liikkeitä vuorenrinteillä, mutta nämäkin olen valinnut siten, että tutkimusalue sijaitsee boreaalisen vyöhykkeen ja tundran rajalla. Tällainen asetelma toivoakseni indikoi puurajan liikehtimistä myös pohjois–etelä -suunnassa.

Tapaustutkimusten ja meta-analyysin avulla pyrin vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin: Ovatko arktisen vyöhykkeen puurajat edenneet 1900-luvun alusta; jos näin on, kuinka merkittävää ja säännönmukaista eteneminen on ollut; ja mitkä muut tekijät kuin lämmennyt ilmasto selittävät puurajan siirtymistä.

## 2. Teoria

### 2.1 Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsiin

Ihmisen aiheuttamat kasvihuonepäästöt ovat lisääntyneet teollistumisesta lähtien. Teollisuudesta ja fossiilisen polttoaineiden käytöstä on vapautunut ilmakehään hiilidioksidia, metaania ja dityppioksidia, jotka toimivat kasvihuonekaasuina ja lämmittävät ilmastoa. Maan ja meren globaali keskilämpötila on noussut vuosien 1880 ja 2012 välillä 0,85 °C. Pohjoisella pallonpuoliskolla sadanta on kasvanut 1900-luvun alusta, muilla alueilla aineistoa on liian vähän luotettavien tulosten saamiseksi. Jäätiköt ovat pienentyneet kaikkialla maapallolla, merien pH laskenut ja merenpinta noussut (Climate Change 2014 Synthesis... 2014).

Metsillä on tärkeä rooli globaalissa hiilikierrossa: ne toimivat hiilinieluinä, jotka säilövät huomattavia määriä ilmakehän hiilidioksidia (Pan ym. 2011). Tämä on tärkeää ilmastonmuutoksen hillitsemisen kannalta. Koska lähes kaikki maailman metsät ovat hiilinielujä, voidaan olettaa, että ne hyötyvät kasvaneesta hiilidioksidin määrästä. Ilmaston lämmitessä puurajan metsien odotetaan tihenevän ja etenevän tundran kustannuksella. Tämä kiihdyttää ilmaston lämpenemistä entisestään, koska metsä imee auringon lämpösäteilyä huomattavasti enemmän kuin tundra (Ruckstuhl ym. 2008).

Ilmastonmuutos muuttaa puiden kasvuoloja monella tavalla. Lenton ym. (2008:1791) toteavat, että maaperän kasvanut sulan syvyys ja lisääntyneen hiilidioksidin määrän aiheuttama vedenkäytön tehostuminen saattavat lisätä maaperän saatavilla olevaa kosteutta, mikä vähentäisi metsäpaloja ja lisäisi puiden biomassaa. Toisaalta ilmastonmuutoksen mukanaan tuomat kuivat jaksot ja kesien entistä lämpimämmät hellehuiput voivat lisätä puiden kuolleisuutta. Kun samalla puut ovat entistä alttiimpia taudeille ja niiden lisääntymistehokkuus laskee, suuret alat boreaalista metsää saattavat jopa kuolla pystyyn. Onkin epävarmaa, mikä vaikutus ilmastonmuutoksella boreaalisiin metsiin on: parantaako vai heikentääkö se metsien kasvua. Tämä riippuu myös siitä, miten paljon ilmasto lämpenee. Lievä lämpeneminen sekä hiilidioksidin määrän kasvu ovat metsille luultavasti positiivinen muutos, mutta liian suuri muutos aiheuttaisi niiden massakuoleman.

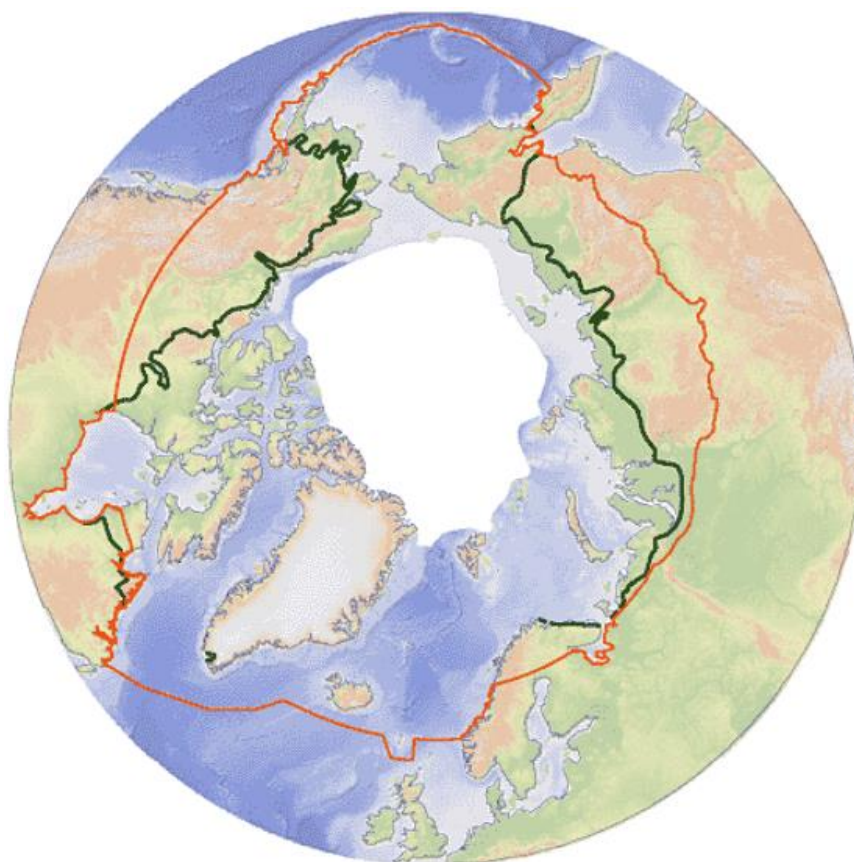
Trant ja Hermanutz (2014) esittävät, että eri puulajit reagoivat ilmastonmuutokseen eri tavoin. Labradorin niemimaalla tehty tutkimus antoi näyttöä siitä, että lehtikuusen ja mustakuusen tiheydet tulevat kasvamaan ja niiden puurajat etenemään, mutta palsamipihdan ja valkokuusen eivät. Tämä saattaa tulevaisuudessa synnyttää uudenlaisia metsäyhteisöjä puurajalle.

Chenin ym. (2016) mukaan ilmakehän noussut hiilidioksidipitoisuus on nopeuttanut erityisesti nuorten metsien kasvua parantamalla hiilen saatavuutta ja tehostamalla resurssienkäyttöä. Vanhojen metsien kasvu ei ole nopeutunut yhtä paljon, koska ne ovat herkempiä samaan aikaan tapahtuneelle ilman kosteuden vähenemiselle. Vaikka lisääntynyt hiilidioksidin määrä tehostaa puiden kasvua, kaikenikäisten metsien kuolleisuus on kasvanut ilmaston lämpenemisen takia.

## 2.2 Puuraja ja ilmastonmuutos

Puurajan käsitteelle on monia määritelmiä ja sen tarkka määrittäminen kartalla on vaikeaa: eri määritelmät antavat erinäköisiä lopputuloksia, koko arktisen vyöhykkeen kartoittaminen on sinänsä haastavaa ja lisäksi tilanne muuttuu koko ajan. Kuvassa 1 on eräs tulkinta arktisesta puurajasta. Ahleniuksen (2005) mukaan lähes koko

Fennoskandia lukeutuu boreaaliseen vyöhykkeeseen, ja puurajalle päästään vasta Norjan äärimmäisellä koillisrannikolla ja Kuolan niemimaalla. Näin pienimittakaavainen kartta ei näytä Lapin tuntureiden paikallisia puurajoja tai muita yksityiskohtia, vaan antaa yleiskuvan arktisesta puurajasta. Kartan perusteella puurajassa näyttää esiintyvän huomattavaa spatiaalista vaihtelua: paikoitellen se nousee huomattavan korkealle pohjoiseen (Siperia, Luoteis-Alaska), ja paikoitellen vetäytyy selvästi etelämmäksi (Grönlanti). Puuraja ei noudata arktisen vyöhykkeen rajaa, joten nähtävästi puurajan muodostumiseen vaikuttaa muukin kuin lämpötila.



*Kuva 1: Arktinen puuraja (tummanvihreä raja) ja arktinen vyöhyke (oranssi raja) (Ahlenius 2005).*

Grace ym. kokosivat vuonna 2002 julkaistussa artikkelissaan yhteen puuraja-tutkimuksen teoriaa ja käsitteistöä. Seuraavassa esittelen puurajojen peruskäsitteistöä kyseisen artikkelin pohjalta, ellei toisin mainita.

Maapallon kylmimmillä alueilla ei kasva puita: lähellä napoja ja ylängöillä ne aina antavat tilaa kääpiöpensaille. Metsän rajalinja tunnetaan puurajana, vaikkakaan se ei yleensä ole selväpiirteinen raja. Yleensä 'rajan' yläpuolella kasvaa sekä epäkypsiä puita että vanhoja kääpiöpuita.

Vaikka puurajoja on tutkittu 1900-luvun alkupuoliskolta asti, vieläkään ei ole selvää, millä tavoin ympäristömuuttujat määrittävät puurajan. Yleisesti oletetaan, että lämpötila rajoittaa fotosynteesiä ja fotosynteesin tuotteiden hyväksikäyttöä, ja sitä kautta puiden kasvua. Kääpiökasvit menestyvät täysikasvuisia puita paremmin kylmässä, koska ne pystyvät luomaan lämpimiä mikroilmastoja ja siten ylläpitämään 5–10 °C ympäröivää ilmaa lämpimämpiä kasvusolukkoja. Toinen syy kääpiökasvien menestykseen kylmässä voisi olla se, että niiden elävästä biomassasta suurempi osa on juuria ja lehtiä eli ns. tuottavaa solukkoa, kun taas puilla suuri osa solukosta on kasvin tukirakenteissa. Kääpiökasvit pystyvät käyttämään suuremman osan resursseista elintärkeisiin fotosynteesiin ja sokerin tuottamiseen.

Ihmisen aiheuttama ympäristönmuutos voi vaikuttaa puurajan siirtymiseen ilmaston lämpenemisen lisäksi kahdella muulla tavalla: hiilidioksidin määrän kasvun ja typen kasvaneen kerrostumisen kautta. Kaikki nämä prosessit edesauttavat puurajan etenemistä pohjoisemmaksi. Nykyisen tutkimuksen valossa näyttää siltä, että ilmaston lämpeneminen vaikuttaa puurajan etenemiseen voimakkaimmin, joten tutkielmani keskittyy siihen.

Arktisen vyöhykkeen ilmasto on lämmennyt 1900-luvun alusta lähtien alueesta riippuen noin 1–2,5 °C (Van Bogaert ym. 2011: 907, Hofgaard ym. 2013: 938), ja puurajassa on ehtinyt tapahtua muutoksia.

Puurajat voidaan jakaa kahteen luokkaan: *alpiiniseen* ja *leveyspiiriseen (latitudinal)* puurajaan. Alpiininen puuraja esiintyy vuoristoissa, missä puiden kasvu lakkaa korkeammalle mentäessä, koska ilmasto viilenee. Leveyspiirinen puuraja syntyy sinne, missä ilmasto on kyllin viileä sen vuoksi, että ollaan lähellä napoja. Tässä tutkielmassa tarkoitan puurajalla Trantin ja Hermanutzin (2014: 1115) määritelmän mukaista puurajaa: subarktisen metsä–tundra -rajavyöhykkeen ekotonia.

### 3. Tapaustutkimukset

#### 3.1 Pohjois-Norja

Hofgaard ym. (2013) selvittivät tutkimuksessaan Finnmarkin läänin puurajassa tapahtuneita muutoksia. Siellä ilmasto on lämmennyt 1900-luvun alun jälkeen 1–2 °C. Tutkimusryhmä laski myös pohjoiseen suuntautuvan liikkeen nopeuksia ja analysoi, miten liikenopeus vaihtelee kahden yleisen lajin, hieskoivun (*Betula pubescens*) ja männyn (*Pinus sylvestris*) välillä.

Puurajan liikkeiden selvittämiseksi tutkimusryhmä tutki historiallisia metsäkartoja ja digitoi niiden perusteella 1900-luvun alun puurajakartan (Hofgaard ym. 2013: 939–940). Saatu kartta mukautettiin vastaamaan vuoden 2009 kansallista topografista vektoritietokantaa. 1900-luvun jälkipuoliskon puuraja määritettiin ilmakuvien perusteella tehtyjen topografisten karttojen perusteella, ja satelliittikuvien pohjalta tehdyt kasvillisuuskartat kertoivat vuosien 1998–2002 välisen tilanteen.

Puurajan liikkeitä laskettiin kahdella geometrisella metodilla, jotka antoivat hyvin samankaltaiset tulokset (Hofgaard ym. 2013: 942). Puurajan keskimääräinen etenemismatka vuodesta 1914 vuoteen 2009 oli 14,8 kilometriä ja keskimääräinen siirtymisnopeus 156 metriä vuodessa. Metsänrajan etenemisessä esiintyi huomattavaa spatiaalista vaihtelua tutkimusalueen eri osissa sekä myös ajallisesti; esimerkiksi koivun puuraja pääasiassa vetäytyi 1980-luvulle asti ja alkoi sen jälkeen voimakkaasti edetä (Hofgaard ym. 2013: 943). Analyysit paljastivat koivun ja männyn keskimääräiset etenemismatkat pohjoiseen 156 ja 71 metriä vuodessa. Koivun puuraja osoitti nopeampaa etenemistä (keskimäärin 340 metriä vuodessa), kun taas mänty oli edennyt hyvin hitaasti (keskimäärin 10 metriä vuodessa).

Historiallisen ja nykyisen puurajan analyysi osoitti hyvin rajallista etenemistä verrattuna dynaamisten globaalien kasvillisuusmallien ennusteisiin. Jos nämä tulokset ennustavat koko arktisen alueen metsä-tundra -rajan liikettä tällä vuosisadalla, ne antavat ymmärtää, että arvioitu tundran pieneneminen 40 prosentilla on vakava yliarvio.



## 3.2 Pohjois-Ruotsi

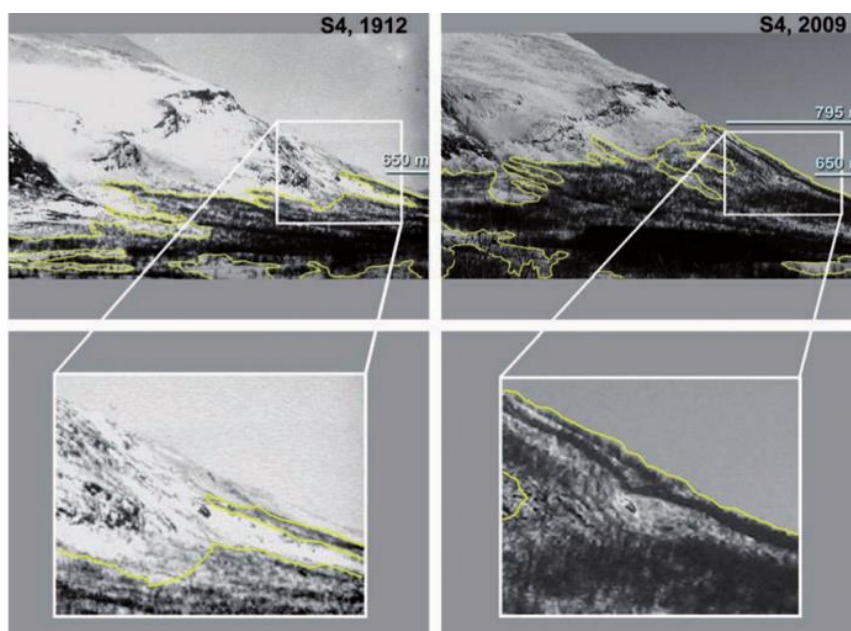
Kansainvälinen tutkimusryhmä selvitti puurajan liikkeitä Ruotsin Skandeilla subarktisella vyöhykkeellä Torniojärven järven alueella (Van Bogaert ym. 2011). Alueen keskilämpötila on noussut -1,2 celsiusasteesta 0,6 asteeseen jaksolta 1913–22 jaksoon 2000–09 (Bogaert ym. mukaan Abisko Scientific Research Station). Myös sadanta on kasvanut. Puurajalla kasvaa tunturikoivua (*Betula pubescens ssp. czerepanovii*), joka yleensä ottaen hallitsee Torniojärveä ympäröivien vuorten metsiä. Tunturikoivulle aiheuttavat disturbansseja (häiriöitä) tunturimittarin (*Epirrita autumnata*) ja hallamittarin (*Operophtera brumata*) säännölliset massaesiintymät sekä puurajalla porolaidunnus.

Artikkeli määrittelee puurajan suljetun subalpiinisen metsän ja korkeimmalla sijaitsevan tunturikoivun väliseksi maastoksi. Metodina käytettiin toistokuvausta, joissa historiallisia valokuvia verrattiin vastaavilta paikoilta otettuihin uusiin valokuviin. Käytössä oli sekä ilma- että maakuviä. Toistokuvaamisen metodissa puurajana käytettiin 30 prosentin maanpeittoasteen metsää (Van Bogaert ym. 2011: 910). Tutkijat vierailivat maastossa niillä kohdilla, joilla kyseinen isoliini leikkasi jonkin helposti tunnistettavan objektin, kuten suuren kiven.

Kaksi aluetta valittiin tarkemman tarkastelun kohteeksi: eräs rinne, jolla puuraja oli noussut huomattavasti tutkimusperiodin aikana, ja toinen, jolla nousua ei ollut tapahtunut. Tutkimusryhmä ajoitti puita poikkileikkausten avulla, mittasi näytepuiden pitoudet ja rungon paksuuden rinnan korkeudella sekä määritteli lukuisia disturbanssin merkkejä ja muotoja. Lisäksi tutkittiin yli kaksimetristen puiden vakiintumista (*vakiintumisella* [establishment] tarkoitetaan niiden puiden lukumäärää, joiden korkeus vuodessa ylittää kaksi metriä) ja historiallista ihmisvaikutusta (lähinnä porolaidunnusta) alueella.

Toistokuvaamisen ja dendrokronologisen analyysin (mm. puun ikä voidaan määrittää leikkaamalla sen varresta ohut rengas, joka kuivataan ja josta mikroskoopin avulla tutkitaan vuosirenkaita; Gamache & Payette 2005: 853) perusteella nähtiin, että suljetun metsän rajalinja oli noussut keskimäärin 24 metriä korkeammalle periodilla 1912–2009 (kuva 2). Spatiaalinen vaihtelu oli suurta: neljällä alueella puuraja oli noussut, kolmella

pysynyt paikallaan ja yhdellä vetäytynyt merkittävästi. Ihmisvaikutuksella ja puurajan nousulla havaittiin merkittävä negatiivinen korrelaatio (Van Bogaert ym. 2011: 915). Puuraja oli siis edennyt siellä, missä ihmisvaikutus oli vähentynyt. Varhaisempi antropogeeninen vaikutus selitti 35 % puurajan liikkeiden varianssista vuodesta 1912 lähtien.



*Kuva 2. Torniojärven eteläpuolella sijaitseva puuraja-alue vuosina 1912 ja 2009. Keltaiset viivat osoittavat 30 % puunpeittoisoliinin. Tällä alueella puuraja on noussut silmännähdän (Van Bogaert ym. 2009).*

Erittäin viileät kesät hidastivat koivujen kasvua. Kuitenkaan keskimääräistä lämpimämmät kesät tai talvet eivät korreloineet puiden vakiintumisen kanssa (Van Bogaert ym. 2011: 916). Päinvastoin tutkijat löysivät esimerkkejä tilanteista, joissa lämpiminä ajanjaksoina vakiintuminen oli heikkoa ja viileinä jaksoina voimakasta. Selittäjäksi tutkijat ehdottavat porojen määrää, joka oli lämpiminä jaksoina suuri ja viileinä pieni. Suurimmat koivujen kasvuun vaikuttavat tekijät olivatkin porolaidunnus ja kehrääjien kasvinsyönte.

### 3.3 Labradorin niemimaa

Gamache ja Payette (2005) tutkivat Québecin–Labradorin niemimaan tundraa, missä mustakuusi (*Picea mariana*) merkitsee puuttoman tundran rajaa. Alue sijaitsee prekambrisella graniitti- ja gneissikilvellä, joka on pääosin alavaa tasankoa. Niemimaalta valittiin viisi erillistä esimerkkialuetta, joista kaksi edusti eteläistä metsätundraa, kaksi pohjoista metsätundraa ja yksi kitukasvuista kuusikkoa pensaikkotundralla. Koska metsäpalot vaikuttavat merkittävästi mustakuusen lisääntymiseen edistämällä siementen leviämistä, ne täytyi ehkäistä tutkimusalueilla. Yksi alueista paloi miltei täysin tutkimuksen aikana, joten sitä piti rajata huomattavasti palamattomalle alueelle.

Jokaiselta tutkimusalueelta valittiin yksi näytepalsta, joka oli tyypillinen tunturi: laella kasvaa tundraa, rinteillä jäkäläistä metsää. Näin saatiin vertailuun viisi paikallista subarktista puurajaa (Gamache & Payette 2005: 852–853). Tuntureille asetettiin satunnaisesti korkeuslinja, jonka varrella sijaitsevilta kuusilta mitattiin sijainti, korkeus ja alkuperä (siemen tai verso). Viimeaikaisen puurajan edistymisen selvittämiseksi jokaiselta yli 2,5-metriseltä puulta otettiin poikkileikkaus 2,5 metrin korkeudelta ja määritettiin dendrokronologisesti puun ikä. Nuorien kuusten ikärakenteita verrattiin alueittain. Läheisellä Inukjuakin säähavaintoasemalla talletettujen säätietojen avulla määritettiin alle 2,5 metrin pituisten siemensyntyisten kuusien synnyn ja alueellisen ilmaston välinen suhde. Viidestä kahteenkymmeneen vuoteen lämpösummat ja sadannan vaihtelut laskettiin ilmastodatasta, ja niitä verrattiin siementaimien rekrytoinnin aineistoon (*rekrytoinnilla* tarkoitetaan uusien siementaimien syntymistä). Puurajan siirtymismatka saatiin vähentämällä vanhimman puurajan korkeudesta nykyisen puurajan korkeus. Vanhimman puurajan sijaintia edusti korkeuslinjalla sijaitseva siemenkuusi, jonka 2,5 metrin korkeudelta saatu poikkileikkaus oli vanhin.

Eteläisen metsätundran tutkimusalueilla puuraja näytti nousseen uusien siementaimien ansioista, kun taas pohjoisessa puuraja oli joillakin alueilla noussut vanhojen kitukasvuisten kuusien viimeaikaisen kasvun ansiosta. Kuusien ikä yleisesti pieneni ylöspäin mentäessä, mikä indikoi puuttoman tundran viimeaikaista kolonisointia. 1900-

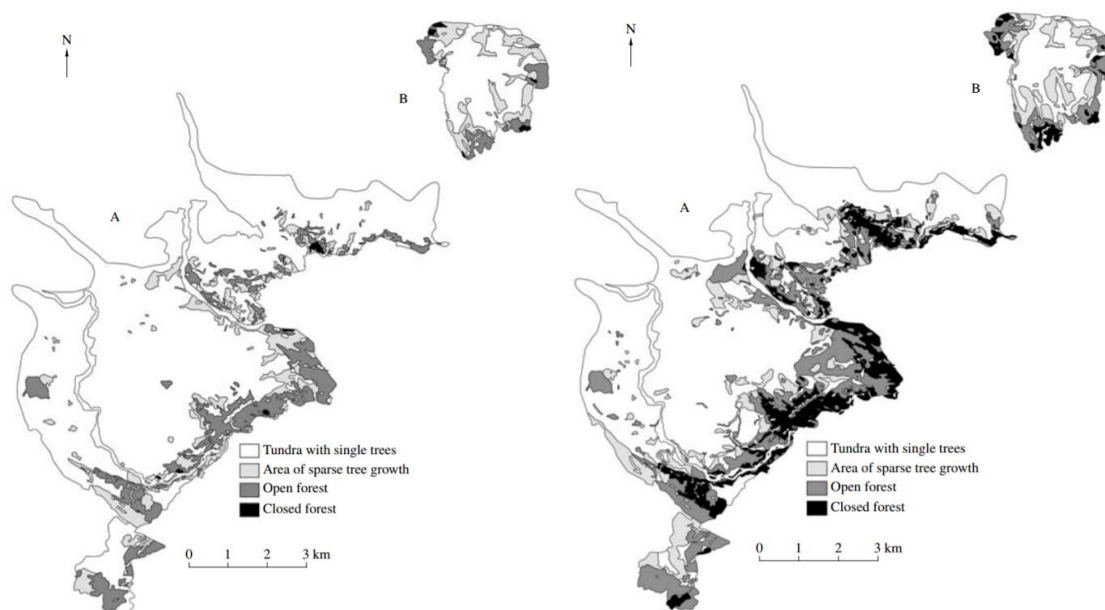
luvun leudompien sääolosuhteiden lisäksi paikalliset topografiset tekijät näyttivät vaikuttaneen puurajojen nousuun ja siementaimien lisääntymiseen.

### 3.4 Pohjois-Ural

Shiyatov ym. (2004) tutkivat puurajan siirtymistä Ural-vuoriston pohjoisosan itäisellä rinteellä (noin Rovaniemen korkeudella, kirj. huom.). Aluetta hallitsee Rai-Izin massiivi, jonka korkein kohta on ylänkö 800–1100 metriä merenpinnan yläpuolella. Ylängön pohjoispuolella on myös useita tätä korkeampia vuorenhuippuja. Tutkimusalue sijaitsee tundra–metsä -vyöhykkeen eteläosassa (Shiyatov ym. 2004: 69–70). Puurajalla kasvaa puhtaita lehtikuusimetsiä (*Larix sibirica*). Alueen keskilämpötilat ovat nousseet 1910-luvulta seuraavasti: kesälämpötilat (kesä–elokuu) 0,7 °C ja talvilämpötilat (marras–maaliskuu) 1,1 °C. Vastaavalla periodilla kesäsadanta on kasvanut 32 millimetriä ja talvisadanta 46 millimetriä (Shiyatov ym. 2004: 75).

Tutkimusalueelta valittiin yli 900 kartoitettavaa palstaa, joiden maaperä, kasvillisuuden koostumus ja rakenne sekä pienilmasto tutkittiin vuosina 2000–2004. Puiden arvioidun keskitiheyden perusteella jokainen tutkimuspalsta sijoitettiin yhteen seuraavista luokista: tundra, jolla yksittäisiä puita; harvakseltaan kasvavia puita; avoin metsä ja suljettu metsä. Puiden morfometriset suureet, kuten keskipituus ja -läpimitta, eri kasvumuotojen prosenttiosuudet, latvuston tiheys ja kääpiökasvuisuuden aste määritettiin kaikille palstoille. Kasvillisuuden rakenne ja koostumus 1910- ja 1960-lukujen alussa rekonstruoitiin puiden morfologisten ominaisuuksien ja ikärakenteen perusteella. Apuna käytettiin myös 1900-luvun alussa perustetuista tutkimuslaukuista laadittuja kuvauksia ja laskelmia sekä vanhoja valokuvia (Shiyatov ym. 2004: 71).

Aineiston perusteella laadittiin kolme karttaa (kuvassa 3 niistä kaksi) kuvastamaan kasvillisuustilannetta kolmena eri ajankohtana: 1910-luvulla, 1960-luvulla ja 2000-luvun alussa. Kartat näyttävät, että metsäiset alueet kasvoivat 90 vuoden aikana merkittävästi samalla kun tundran osuus pieneni (Shiyatov ym. 2004: 73). Harvan puunkasvun, avoimen metsän ja suljetun metsän alueet nousivat rinteitä ylöspäin enimmillään jopa 80 metrin matkan.



*Kuva 3. Tutkimusalueen kasvillisuustilanne tutkimusperiodin alussa (vasemmanpuoleinen kartta: 1910-luku) ja lopussa (oikeanpuoleinen kartta: 2000-luku). Mustalla merkityn suljetun metsän osuuden kasvu on silmiinpistävä, samoin valkoisella merkityn tundran alueen kutistuminen (Shiyatov ym. 2005).*

Eri yhteisötyyppien (puiden tiheyskasvun neljä eri luokkaa) absoluuttisia ja suhteellisia arvoja vertailtaessa huomataan, että esimerkiksi tundran kokonaispinta-ala pieneni lähes 1000 hehtaaria ja sen osuus pieneni 76 prosentista 59 prosenttiin (Shiyatov ym. 2004: 74). Tämä siitä huolimatta, että suuret osat tundran ekotonista ovat puiden kasvulle epäsuotuisia ja sen luonnollinen metsittyminen on vähäisen siementuoton takia hidasta. Muut yhteisötyypit osoittavat selkeää liikettä ylöspäin. Erityisesti suljettujen metsien osuus on kasvanut: 1910-luvun 22 hehtaarista 2000-luvun alun 534 hehtaariin. Koko tutkimusalueen metsäisten alueiden (harvasta suljettuun metsään) osuus pinta-alasta oli 1910-luvulla 24 prosenttia ja 2000-luvun alussa jo 41 prosenttia.

## 4. Tulokset ja tulosten tarkastelu

### 4.1 Eroavuudet tapaustutkimusten välillä

Pohjois-Ruotsin puurajaa tutkinut tutkimusryhmä totesi, että Torniojärven alueen puurajat osoittivat erittäin vaihtelevaa dynamiikkaa (Van Bogaert ym. 2011, 916). Eri skaaloilla – yksittäisestä vuoresta maisematasolle ja kolmesta vuosikymmenestä yli vuosisataan – saatiin vastakkaisia tuloksia. Tämä on yllättävää sikäli, että alueen lämpötila ja sadanta ovat kasvaneet huomattavasti tutkimusperiodin alusta. Tutkimusryhmä tuli siihen tulokseen, että porolaidunnus vaikutti puurajan liikkumiseen voimakkaammin kuin lämmennyt ilmasto: tämän takia puuraja eteni voimakkaimmin kylminä jaksoina, jolloin porojen määrä oli pieni (Van Bogaert ym. 916–918). Lisäksi tunturi- ja hallamittarien sykliset esiintymät, usein yhteistoiminnassa porolaidunnuksen kanssa, saattavat tuhota suuria metsäalueita puurajalla sekä estää niitä toipumasta.

Hofgaard ym. (2013) tutkivat puurajaa Pohjois-Norjassa. He väittävät tutkimuksensa perusteella, että globaalien kasvillisuusmallien ennuste tundran pienenemisestä 40 prosentilla vuosisadan loppuun mennessä on vakava yliarvio: heidän tutkimuksensa perusteella tundran menetys olisi 2–4 %. He väittävät jopa seuraavaa (Hofgaard ym. 2013: 946): ”models of vegetation response to climate change that assume the vegetation to be in equilibrium with the climate are almost certainly wrong” (kasvillisuusmallit, jotka olettavat kasvillisuuden olevan tasapainotilanteessa ilmaston kanssa, ovat lähes varmasti väärässä). Tutkijat peräävätkin lisätutkimusta niistä tekijöistä, jotka rajoittavat puurajan responssia ilmastonmuutokseen.

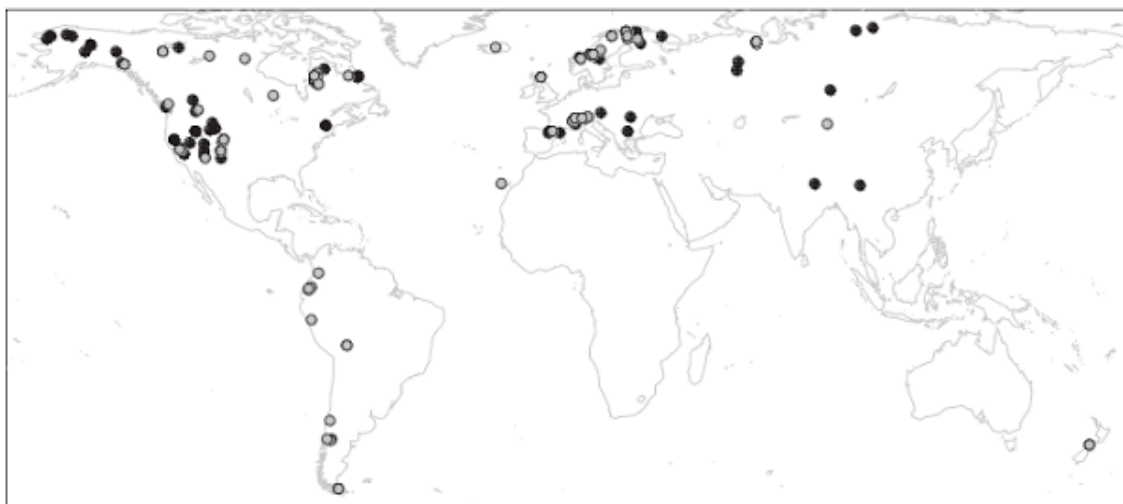
Pohjois-Québecin puurajaa tutkineet Gamache ja Payette (2005) totesivat paikallisten topografisten muuttujien vaikuttavan puurajaan ilmaston lisäksi. Esimerkiksi mustakuusen ikääntyneiden käpyjen muodostama siementen loukku ja paljaan, kuivuuden vaivaaman tundran kolonisoinnin vaikeus selittävät sen, miksi puiden rekrytoinnin ja lyhyen aikavälin ilmaston muutoksen välillä on heikko korrelaatio (Gamache & Payette 2005: 850).

Pohjois-Uralilla sen sijaan havaittiin puurajan nousseen selvästi 1910-luvun jälkeen (Shiyatov ym. 2005). Metsittymisen lisäksi alueen puiden kasvu parani, latvusto tiheni ja siemenpuiden tuotto kasvoi. Lämpötilan määrittelemä puille sopivan alueen rajalinja on noussut jopa noin 100 metriä, mutta puuraja ei ole noussut vastaavaa matkaa, koska lehtikuusen siemenlevitys on suhteellisen tehotonta.

Referoimistani artikkeleista Pohjois-Uralia käsittelevä tutkimus osoitti selvintä etenemistä puurajassa. Kyseessä on alue, jonka ilmasto on lämmennyt poikkeuksellisen paljon ja jolta ihmisvaikutus puuttuu. Siellä kasvillisuus on siis reagoinut ilmasto-olojen muutokseen ilman ihmisen aiheuttamaa disturbanssia kuten porolaidunnusta, ja responssi on selvemmin nähtävissä. Kehrääjistä tai muista tuholaisista ei tässä tutkimuksessa puhuttu, mutta ilmeisesti niiden vaikutus ei ilman porolaidunnusta riitä estämään metsien responssia ilmastonmuutokseen.

## 4.2 Meta-analyysi puurajatutkimuksesta

Otan esimerkkitutkimusten rinnalle vertailuun meta-analyysin, jossa Harsch ym. (2009) vetävät yhteen 103 eri puolilla maailmaa tehdystä puurajatutkimuksesta saadut tulokset (kuva 4). Näissä tutkimuksissa raportoitiin 166 alueen responssit vuoden 1900 jälkeen lämmenneeseen ilmastoon (Harsch ym. 2009: 1041). Tutkimusalueisiin lukeutui 126 alpiinista ja 40 leveyspiiristä aluetta, joista suurin osa sijaitsi Pohjois-Amerikassa tai Euroopassa.



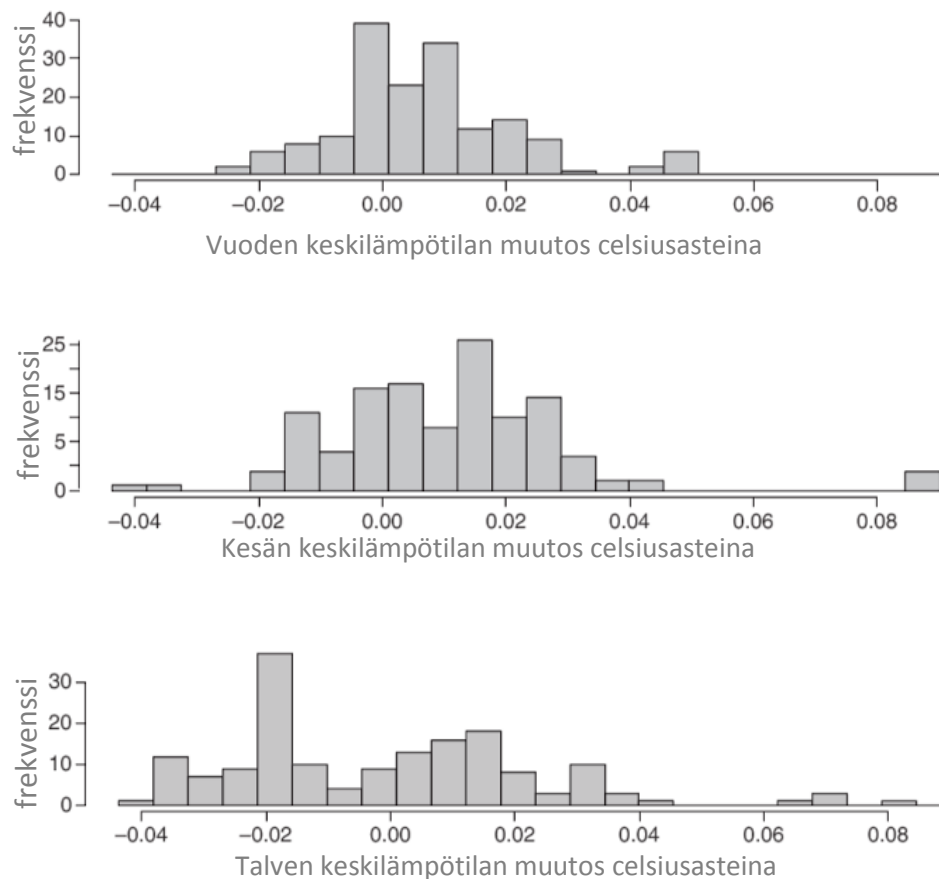
Kuva 4. Meta-analyysissä käytettyjen tutkimusten sijaintipaikat. Mustilla pisteillä merkityissä paikoissa puuraja on edennyt, harmailla merkityissä ei (Harsch ym. 2009).

Puurajoissa tapahtuneet muutokset suhteutettiin ilmaston lämpenemiseen käyttämällä Petersonin ja Vosen (1997) tietokantaa globaaleista historiallista maan pintalämpötiloista. Jokaisen tutkimusalueen kohdalla huomioitiin myös mahdolliset muut muuttujat, jotka saattavat vaikuttaa puurajaan. Puurajan muotoa (*selvärajainen*, *diffuusi* tai *krummholz*, jossa osa puista on kitukasvuisia tai epämuodostuneita), korkeutta, leveysastetta, etäisyyttä merestä, aspektia (rinteen suuntaa) ja puurajan tyyppiä käytettiin arvioina puurajaan kohdistuvasta ympäristön stressistä. Analyysissä huomioitiin myös tekijät, jotka saattavat estää tutkijoita huomaamasta responsia: tutkimusperiodi, alkamispäivämäärä, mittakaava, häiriötekijät sekä puurajan lajien taksonominen luokka. Disturbanssin tasot jaettiin luokkiin *tuntematon*, *ei disturbanssia*, *luonnollinen disturbanssi* ja *antropogeeninen disturbanssi*.

Vuoden keskilämpötila oli noussut 111 alueella 166:sta (taulukko 1). Keskimääräinen nousu oli 0,013 °C vuodessa. Kesät olivat lämmenneet useammassa paikassa kuin talvet. Puurajat olivat edenneet 87 alueella 166:sta vuodesta 1900, pysyneet paikoillaan 77 alueella ja vetäytyneet kahdella alueella. Puurajan etenemisellä ja vuoden keskilämpötilan nousulla ei näyttänyt olevan selvää yhteyttä, sillä kun ne sijoitettiin malliin yksin, niiden luottamusvälille lukeutui nolla; sen sijaan talvien lämpeneminen näytti korreloivan puurajan etenemisen kanssa (Harsch ym. 2009: 1045). Muista selittävästä muuttujista korkeudella, etäisyydellä merestä ja puurajan tyyppillä näytti



olevan yhteyttä puurajan etenemiseen. Kun nämä tekijät sijoitettiin monimuuttujamalliin (puulajin suku huomioitiin satunnaismuuttujana), tulos oli, että ainoastaan talvilämpötilojen nousulla ja puurajan tyypillä oli vaikutusta puurajaan siirtymiseen. Diffuusit puurajat olivat edenneet suurimmalla todennäköisyydellä.



*Taulukko 1 kirjoittajan suomentamana (Harsch ym. 2009).*

Harschin ym. (2009:1046) meta-analyysin lopputulema oli, että puurajat ovat globaalisti joko edenneet tai pysyneet paikallaan. Yllättävää oli, että puurajoihin näytti vaikuttavan enemmän talvi- kuin kesälämpötilojen nousu, vaikka yleisen käsityksen mukaan puurajoihin vaikuttaa ennen kaikkea kasvukauden pituus (Körner & Paulsen 2004; Ruckstuhl ym. 2008; Kinnunen ym. 2013; Climate change and plants 2016).

Diffuuseihin puurajoihin näytti vaikuttavan lämpeneminen yleensä, krummholzeihin ja selvärajaisiin puurajoihin oli vaikutusta ainoastaan talvilämpötilojen nousulla.

#### 4.3 Mittakaavan ja ihmistoiminnan vaikutus puurajojen responssiin

Harschin ym. (2009) meta-analyysin perusteella voisi päätellä, että puuraja siirtyy tasaisesti napoja kohti ja vuorenrinteitä ylöspäin. Referoimissani tutkimuksissa saatiin kuitenkin monenlaisia tuloksia. Meta-analyysin ja tapaustutkimusten välistä ristiriitaa saattaa selittää mittakaavaero. Tapaustutkimuksissa oli seurannassa suhteellisen pieni alue, kun taas meta-analyysin skaalana oli koko maapallo. Alueelliset erot ja puurajan etenemistä rajoittavat tekijät nousevat esiin tutkittaessa pieniä alueita, mutta suuremmassa kuvassa ne häipyvät taka-alalle.

Holtmeier ja Broll (2005) korostavat maantieteellisen mittakaavan (paikallisesta globaaliin) ja aikaskaalan (lyhyestä pitkäkestoiseen tutkimukseen) merkitystä puurajojen liikkumista tutkittaessa. He nostavat esille myös puurajan tyypin: orografisten muuttujien kontrolloimat puurajat eivät reagoi ilmaston lämpenemiseen kovin herkästi, kun taas puuraja, jolta ihmisvaikutus on vetäytynyt, etenee huomattavasti todennäköisemmin. Mikroilmasto ja maaperän laatu vaikuttavat merkittävästi siihen, miten herkkä puuraja on reagoimaan ilmaston muutokseen.

Cieraad ym. (2014) tutkivat alpiinisia puurajoja Uudessa-Seelannissa. Tutkimuksen mukaan lauhkean vyöhykkeen alpiiniset puurajat Uudessa-Seelannissa ja Chilessä muodostuvat pääpiirteissään saman säännön mukaan kuin maailmanlaajuisestikin: n. 10 celsiusasteen lämpimimmän kuukauden keskilämpötilan ja 7–8 celsiusasteen kasvukauden keskilämpötilan alueelle. Alueellisesti ja paikallisesti puurajoihin vaikuttavat merkittävästi myös muut tekijät, kuten kuivuus, kasvupaikan suojaisuus ja pinnanmuodot.

Mittakaavan lisäksi toinen erottava tekijä meta-analyysin ja tapaustutkimusten välillä on se, että meta-analyysissä oli mukana kaikkien eri kasvillisuusvyöhykkeiden puurajoja, kun taas tapaustutkimuksissa pysyttiin arktisella puurajalla. Voisi olettaa, että lämpimämpien seutujen alpiiniset puurajat reagoivat ilmaston lämpenemiseen

suoraviivaisemmin. Kuvan 4 kartan perusteella näin ei kuitenkaan ole, sillä harmaalla merkityjä kohteita (joissa puuraja ei ole edennyt) on runsaasti muuallakin kuin arktisen vyöhykkeen tuntumassa.

Equadorin Andien puurajoja tutkineet Maaike ja Ruijten (2008) painottavat, että usein on vaikea tietää, onko ihmistoiminnalla ollut vaikutusta alueen puurajaan. Erityisesti trooppisilla alueilla voi olla vaikea löytää sellaista puurajaa, johon ihmistoiminta ei ole vaikuttanut. Vaikka Harschin ym. (2009) meta-analyysissä pyrittiin huomioimaan kunkin tutkimusalueen antropogeenisen häiriön aste, sen määrittäminen on voinut alun perinkin olla hataralla pohjalla.

Esittelemistäni tapaustutkimuksista ainakin kahdella tutkimusalueella on selvää ihmisvaikutusta. Pohjois-Norjan tutkimusalueella on käsitykseni mukaan vähän asutusta, mutta Hofgaardin ym. (2013: 939) mukaan siellä laiduntaa poroja ja lampaita, jotka todennäköisesti ovat ihmisomistuksessa. Myös Ruotsin tutkimusalueella ihmisvaikutus liittyy pääasiassa porolaidunnukseen, ja tutkimusryhmä toteaa, että porojen aiheuttama disturbanssi on merkittävää puurajalla (Van Boagert ym. 2011). Gamache ja Payette (2005: 851) luonnehtivat Quepecissa sijaitsevan tutkimuskohteensa ”koskemattomaksi” (pristine) alueeksi, koska siellä ei ole pysyvää asutusta. Se on kuitenkin kevyt peruste olettaa, ettei alueella ole ollut ihmisvaikutusta. Uralin tutkimusalueen kerrotaan säästyneen kokonaan ihmisvaikutukselta (Shiyatov ym. 2005: 69). Ei liene sattumaa, että juuri siellä puuraja on siirtynyt voimakkaimmin.

## 5. Pohdinta

Selvältä näyttää, ettei ilmaston lämpenemisen suhde puurajaan ole yksinkertainen. Globaalilla tasolla vaikuttaa siltä, että arktiset puurajat ovat joko edenneet tai pysyneet paikallaan 1900-luvulta lähtien. Siirtyminen ei kuitenkaan ole ollut täysin säännönmukaista (ks. tapaustutkimukset) eikä yhtä merkittävää kuin ilmaston lämpeneminen. Puurajan sijaintiin vaikuttavat ilmaston keskilämpötilan lisäksi ihmistoiminta, maaston topografia ja muut eliölajit. Tutkimuksen mittakaava vaikuttaa siihen, millainen responssi puurajassa havaitaan.

Kohonnut keskilämpötila toisaalta parantaa kasvuoloja tundran ekotonissa, mutta samalla se vaikuttaa muihin tekijöihin: esimerkiksi porojen lisääntymismenestys ja talvesta selviytyminen voivat lämmenneen ilmaston takia kohentua niin, että niiden laidunnus tuhoaa taimikkoa pahemmin kuin kylmä ilmasto. Samoin tunturi- ja hallamittarin menestys saattaa ilmaston lämmetessä parantua, mikä on puurajan metsien kannalta tuhoisaa. Muita puurajan etenemistä hidastavia tekijöitä ovat esimerkiksi Lentonin (2008) mainitsevat kasvitaudit, jotka lisääntyvät ilmaston lämmetessä, kuivien jaksojen aiheuttamat metsäpalot sekä lämmenneiden kesien hellehuiput ja heikentynyt lisääntymismenestys.

Ihmisvaikutuksen asteen määrittäminen pohjoisilla alueilla on siinä mielessä hankalaa, että boreaalisella vyöhykkeellä varmasti laiduntaisi poroja, vaikka ihmiset eivät niitä omistaisikaan. Minkä verran niitä olisi ilman ihmisen toimintaa, on vaikea sanoa. Epäilemättä kuitenkin porotalous ylläpitää suurempia poromääriä kuin alueen luonnollinen kantokyky antaisi myöten.

Oma kysymyksensä on se, voiko alpiinisen puurajatutkimuksen tuloksista ylipäätään vetää johtopäätöksiä leveyspiirisen puurajan käyttäytymisestä. Gamache ja Payette (2005; Québecin tapaustutkimus) ainakin rinnastivat viisi tutkimusaluettaan viiteen paikalliseen subarktiseen puurajaan. Rinteillä esiintyvää puurajaa on ilmeisesti helpompi tutkia kuin tasamaan puurajaa, koska vain yhdessä referoimistani tutkimuksista pitäydyttiin puhtaasti leveyspiirisessä näkökulmassa (Hofgaard ym. 2013: Norjan tapaustutkimus). Kenties puuraja on selvärajaisempi rinteessä, minkä takia sen liikkeiden seuranta on siellä helpompaa; tai kenties on vaikea löytää laajoja tasankoja arktisen ja boreaalisen vyöhykkeen välillä. Arvelen, että puiden responssi viileämpään ilmastoon on samankaltainen riippumatta siitä, johtuuko ilmaston viileneminen leveyspiireistä vai korkeusasemasta – ainakin siinä tapauksessa, että vertailtavat puurajat sijaitsevat suunnilleen samalla ilmastovyöhykkeellä. Tämän vuoksi uskalsin rinnastaa keskenään alpiinisia ja leveyspiirisiä tutkimusasetelmia. Myös kirjallisuudessa nämä kaksi puurajatyyppiä rinnastettiin yleisesti.

Jos minulla olisi ollut enemmän aikaa, olisin mielelläni käynyt läpi vielä useampia tapaustutkimuksia ja meta-analyyseja. Näissä puitteissa pyrin referoimaan

maantieteellisesti ja tuloksiltaan suhteellisen monipuolisen kokoelman tutkimuksia. Lämpikäymieni tutkimusten valossa näyttää siltä, että puurajatutkimus on sekä suosittu että jokseenkin ristiriitainen tutkimusala: joskin näyttää siltä, että globaalisti puurajat joko edenneet tai pysyneet paikallaan, paikalliset erot ovat suuria. Puurajojen responsit muuttuviin olosuhteisiin ovat monimutkaisia ja vaativat lisätutkimusta.

Ilmaston odotetaan lämpenevän erityisen paljon arktisella vyöhykkeellä (Climate Change 2014 Synthesis... 2014). Vaikka puurajat reagoivatkin muuttuneisiin olosuhteisiin viiveellä, ilmastonmuutoksen seuraukset niin puurajoihin kuin muuhunkin arktisen alueen kasvillisuuteen tulevat olemaan merkittäviä. Jos arktinen alue pienenee, kasvanut metsäpinta-ala imee entistä enemmän lämpösäteilyä, mikä lämmittää ilmastoa edelleen. Toisaalta metsäalan kasvaminen lisää metsien hiilensidontakapasiteettia, mikä voisi hillitä ilmastonmuutosta. Katastrofaalisetkin muutokset metsien kasvussa, kuten boreaalisen metsän massoittainen kuoleminen pystyyn ovat mahdollisia. Puurajan ja metsien vasteet ilmastonmuutokseen ovat monimutkaisia ja vaikeasti ennustettavia.

## Kirjallisuus

- Ahlenius, H. (2005). Tree line in the Arctic. UNEP/GRID-Arendal.  
[http://www.grida.no/graphicslib/detail/tree-line-in-the-arctic\\_b2eb#](http://www.grida.no/graphicslib/detail/tree-line-in-the-arctic_b2eb#) 28.10.2016
- Bader, M. Y. & J. A. Ruijten (2008). A topography-based model of forest cover at the alpine tree line in the tropical Andes. *Journal of Biogeography* 35, 711–723.
- Chen, H. Y. H., Y. Luo, P. B. Reich, E. B. Searle & S. R. Biswas (2016). Climate change-associated trends in net biomass change are age dependent in western boreal forests of Canada. *Ecology Letters* 19, 1150–1158.
- Cieraad, E., McGlone, M. & Huntley, B. (2014). Southern Hemisphere temperate tree lines are not climatically depressed. *Journal of Biogeography* 41, 1456–1466.
- Climate change and plants (2016). Botanic Gardens Conservation International.  
<https://www.bgci.org/policy/climate-change-and-plants/> 20.11.2016
- Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers. (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf) 12.11.2016
- Gamache, I. & S. Payette (2005). Latitudinal response of subarctic tree lines to recent climate change in eastern Canada. *Journal of Biogeography* 32, 849–862.
- Grace, J., F. Berninger & L. Nagy (2002). Impacts of Climate Change on the Tree Line. *Annals of Botany* 90, 537–544.
- Harsch, M. A., P. E. Hulme, M. S. McGlone & R. P. Duncan (2009). Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters* 12, 1040–1049.
- Hofgaard, A., H. Tømmervik, G. Rees & F. Hanssen (2013). Latitudinal forest advance in northernmost Norway since the early 20th century. *Journal of Biogeography* 40, 938–949.
- Holtmeier, F.-K. & G. Broll (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.
- Kinnunen, R., I. Lehtonen, J. Kas, R. Järvelä, H. Poutamo, C. Wenzlaff, J. Latus (2013). Impact of Climate Change on the Boreal Forest in Finland and Sweden. HENVI Workshop 2013: Interdisciplinary approach to forests and climate change.  
[http://www.helsinki.fi/henvi/teaching/Reports\\_13/01\\_Biotic\\_and\\_Abiotic\\_stressor.pdf](http://www.helsinki.fi/henvi/teaching/Reports_13/01_Biotic_and_Abiotic_stressor.pdf) 21.11.2016
- Körner, C. & J. Paulsen (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography* 31, 713–732.
- Lenton, T. M., H. Hermann, E. Kriegler, J.W. Hall, W. Lucht, S. Rahmstorf & H. J. Schellnhuber (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 1786–1793.
- Pan, Y.D., R. A. Birdsey, J. Y. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz ym. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988–993.
- Pearson, R. G. & T. P. Dawson (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12, 361–371.
- Ruckstuhl, K. E., E. A. Johnson & K. Miyanishi (2008). Introduction. The boreal forest and global change. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 2245–2249.
- Shiyatov, S. G., M. M. Terent'ev, & V. V. Fomin (2005). Spatiotemporal Dynamics of Forest–Tundra Communities in the Polar Urals. *Russian Journal of Ecology* 36, no. 2, 69–75.

- Simmon, R. (1999). Introduction to Boreas, the boreal ecosystem-atmosphere study. <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/BOREASIntro/> 12.11.2016
- Trant, A. J. & L. Hermanutz (2014). Advancing towards novel tree lines? A multispecies approach to recent tree line dynamics in subarctic alpine Labrador, northern Canada. *Journal of Biogeography* 41, 1115–1125.
- Tundra, dry, cold, and windy (2016). National Geographic. <http://environment.nationalgeographic.com/environment/habitats/tundra-profile/> 12.11.2016
- Van Bogaert, R., K. Haneca, J. Hoogesteger, C. Jonasson, M. D. Dapper, T. & V. Callaghan (2011). A century of tree line changes in sub-Arctic Sweden shows local and regional variability and only a minor influence of 20th century climate warming. *Journal of Biogeography* 38, 907–921.