

Klimawandel im Norden

Das Waldgrenzökoton im Fokus der Wissenschaft

Globale Klimafragen stehen seit einigen Jahren im Brennpunkt des wissenschaftlichen und medialen Zeitgeschehens und richten den Blick zunehmend in den hohen Norden der Nadelwälder, Moore und des ewigen Eises. Die dortigen Ökosysteme erfordern eine hohe Anpassungsfähigkeit an harsche Umweltbedingungen und resultieren gleichzeitig in umfassenden Kohlenstoffreservoirs, deren Degradation ungeahnte Folgen haben kann. Der boreale Wald steht daher als Gegenspieler zu Klimaerwärmung und Treibhausgasemissionen immer mehr im Fokus derzeitiger Klimafolgenforschung.

1 Lösungsansatz Wald

Dass sich die Umwelt anthropogen bedingt im Wandel befindet und Maßnahmen zur Reduzierung der Kohlendioxidemissionen ergriffen werden müssen, ist kaum noch abzustreiten. Während der UN-Klimakonferenz in Warschau wurden daher Verhandlungen bezüglich eines neuen Klimaabkommens sowie der Finanzierung von Klimaschutzmaßnahmen geführt und im Rahmen der REDD¹-Initiative explizit das Thema Waldschutz diskutiert. Eine Verringerung von Rodungsflächen sowie die aktive Pflanzung und damit verbundene Ausweitung von Waldflächen sollen zum einen Klimagasemissionen durch Abholzung entgegenwirken, aber auch als natürlicher und kostengünstiger Weg fungieren, Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu binden (BMU 2013). In den letzten Jahren ist die boreale Zone aufgrund ihrer weitläufigen Wälder und großflächigen Permafrostvorkommen daher zunehmend ins Zentrum klimaorientierter Betrachtungen gerückt. Sie repräsentiert im Gehölzanteil der Biomasse einen potentiellen Kompensator erhöhten atmosphärischen Kohlenstoffes (IPCC (1) 2014; IPCC (2) 2014; Bonan et al. 1992) und kann gleichzeitig die Treibhausgasbilanz im Falle einer Permafrostdegradation und Ausweitung der Moorflächen nachhaltig belasten (Alm

1997; Jorgenson et al. 2001; Lawrence/Slater 2005). Bisher ist in diesem Zusammenhang jedoch noch relativ unerforscht, inwieweit die Ökozone auf klimatische Änderungen reagiert und welches Resultat daraus für die globale Kohlenstoffbilanz entstehen wird. Es ist beispielsweise möglich, dass sich die Waldgrenze nordwärts verschiebt und einer Vermoorung des Untergrundes entgegenwirkt (Callaghan et al. 2002; Alm 1997; Grace et al. 2002). Hier setzt die derzeitige Forschung an und versucht fundierte Kenntnisse über das komplexe Wirkungsgefüge zu erhalten und eventuelle Reaktionen des borealen Waldes auf klimatische und ökosystemare Änderungen abzuschätzen.

2 Das Wald- und Baumgrenzökoton

Die boreale Nadelwaldzone ist ein zirkumpolarer Landschaftsgürtel auf der nördlichen Hemisphäre (Venzke 2008), der mit 19,5 Mio. km² Fläche ca. 13 % der Festlandfläche und 25 % der Waldfläche der Erde umfasst (Treter 1993) und sich primär auf die USA, Kanada, Skandinavien und Russland konzentriert (Venzke 2008). Der Übergangsbereich zwischen dem borealen Wald und der nördlich angrenzenden Tundra kann bei einem Verlauf von 13.400 km Länge und bis zu mehreren hundert Metern Breite als größter Zonenübergang der Erde bezeichnet werden (Callaghan et al. 2002). Die *Waldgrenze* separiert dabei geschlossenes Waldland von der sogenannten Waldtundra, die durch lockeren Baumbestand und geringe Wuchshöhen gekennzeichnet ist. Die polare *nördliche Baumgrenze* und *obere Baumgrenze* repräsentieren die nördlichsten und in der vertikalen Höhenzonierung höchstgelegenen Vorkommen baumartiger Vegetation (Heikkinen et al. 2002). Hauptbaumarten des Wald- und Baumgrenzökotons Finnisch-Laplands sind die Moor-Birke (*Betula pubescens* Ehrh.), die Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.) und die Gemeine Fichte (*Picea Abies* (L.) H. Karst.) (Kultti et al. 2006), die häufig aus

1: Reducing Emissions from Deforestations and Degradation



Abb. 1a u. b: Mosaik aus Wald und Wasser auf der Finnischen Seenplatte, das Richtung Norden zunehmend durch Moorflächen unterbrochen wird (Quelle: Eigene Aufnahme)

Schneebruch, Wind und Beweidung resultierenden Krüppelwuchs aufweisen (Holtmeier/Broll 2011). Nördlich und oberhalb der Baumgrenze geht der Bewuchs in Heide- und Gebüschvegetation mit einer Dominanz aus Zwergsträuchern, Moosen und Flechten über (Kultti et al. 2006). Aufgrund widriger klimatischer und pedogener Bedingungen erfordert das Wald- und Baumgrenzökoton eine hohe Adaption der rezenten Vegetation, um dauerhaft bestehen und sich reproduzieren zu können (Kallio 1986; Heikkinen et al. 2002; Susiluoto 2010). Die Baumarten der Waldtundra sind zwar in der Lage, lange Kälteperioden zu überdauern, benötigen für die Verjüngung und damit Ausweitung des Bestandes jedoch ein günstiges Zusammenspiel abiotischer Faktoren (Tuhkanen 1986). Je nach regionaler Verortung spielen hier unter anderem die Länge der Vegetations- und Frostperiode, die Temperatursumme, der Wasserhaushalt oder das Licht- und Nährstoffangebot eine Rolle (Heikkinen et al. 2002). In Finnisch-Lappland sind beispielsweise die Wärmesumme (Summe aller Tagesmittel $\geq 0^{\circ}\text{C}$) und Tagesmitteltemperaturen während der Vegetationsperiode als limitierende Parameter zu nennen (Juntunen et al. 2002; Seppä 1996; Heikkinen et al. 2002; Pensa et al. 2005). Die Baumvegetation passt ihre Stoffwechselforgänge dem Jahresgang der Temperatur an und ist damit in der Lage, diese rascher von der Ausbildung neuer Triebe bis zur Ansamung zu vollziehen als südlichere

Vertreter ihrer Art (Partanen et al. 1998; Pensa et al. 2006; Leinonen et al. 1996). Die Vegetationsperiode beträgt daher nördlich des Polarkreises im Durchschnitt lediglich 87 Tage (Seo et al. 2010). Sowohl die ökologische Toleranz, Vitalität als auch das Reproduktionspotential nehmen jedoch mit Annäherung an das nördliche Verbreitungslimit stetig ab (Kavanagh/Kellmann 1986), sodass bei einer Reproduktionswahrscheinlichkeit von nahezu 0 % an der Baumgrenze alle Bäume wenigen Jahrgängen angehören und in ihrer Entstehung auf Jahre überdurchschnittlich hoher Temperaturen hinweisen (Schultz 2000). Dies ist für die Untersuchung klimatischer Veränderungen im Raum ein wichtiges Kriterium (Karlsen et al. 2005, Holtmeier/Broll 2005). Die Gehölzvegetation ist bereits gut an widrige Wachstumsbedingungen angepasst, befindet sich jedoch nach wie vor in einer Nische mit geringem Toleranzbereich, in dem bereits die kleinste Veränderung Reaktionen in Verjüngungsdynamik und Artenzusammensetzung hervorrufen kann (Autio/Heikkinen 2002; Kallio 1986; Varmola et al. 2004; Grace et al. 2002). Ein wärmerer Jahresverlauf infolge klimatischer Erwärmung wird vermutlich dazu führen, dass sich auch nördlich der aktuellen Baumgrenze Baumvegetation ansiedeln und die boreale Zone demnach bis zu einem bestimmten Grad nach Norden ausdehnen kann (Kallio et al. 1985). Bisher wird noch kontrovers diskutiert, ob zyklische und damit regel-

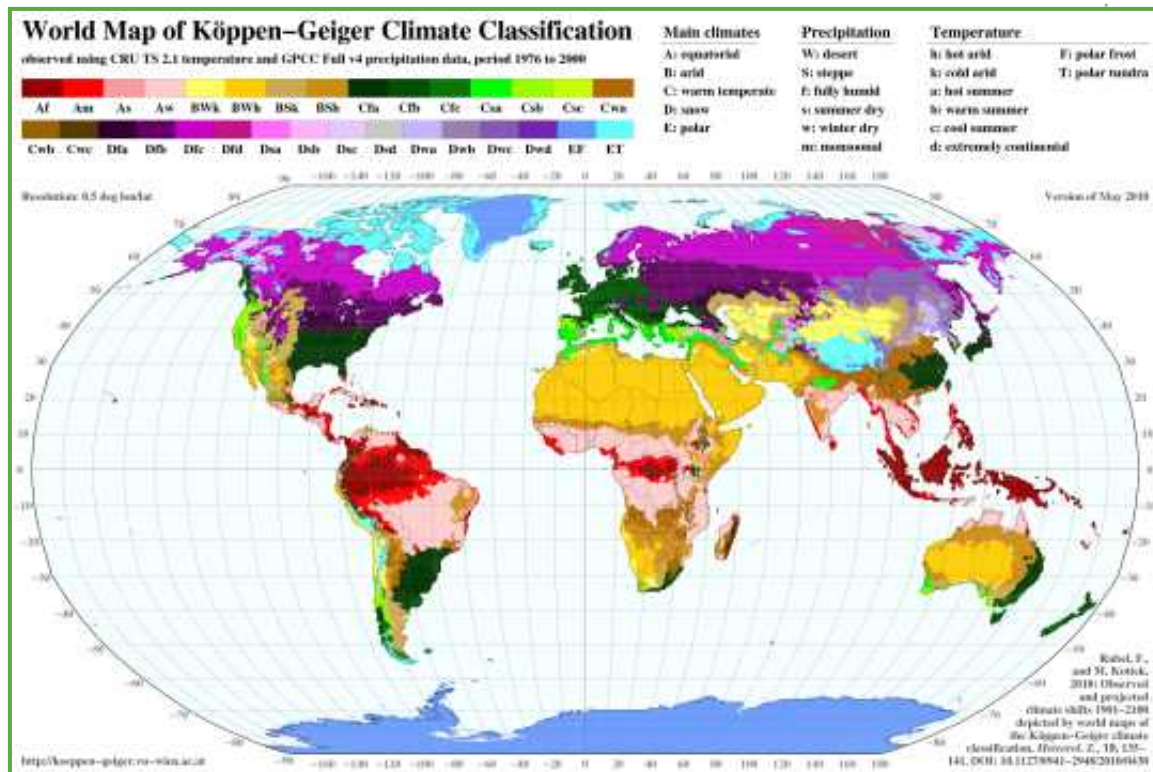


Abb. 2: Verteilung der Klimazonen nach Köppen/Geiger im Jahr 2010 – Die Borealis wird primär durch das Dfc-Klima repräsentiert (Quelle: Kottek/Rubel 2010)

mäßig wiederkehrende Klimaänderungen oder vielmehr anthropogen bedingte anormale Verschiebungen im klimatischen Gleichgewicht der Erde ursächlich für diese Entwicklung sind. Inwiefern betrifft eine Waldgrenzverschiebung jedoch nicht nur das Ökosystem der Borealis selbst, sondern ist auch in internationalem Kontext relevant?

3 Das Kohlenstoffdepot des Nordens

Aufgrund der geringen Jahresmitteltemperaturen, weitläufiger Permafrostvorkommen und geringer Mineralisierungsraten wird die boreale Zone als größter terrestrischer Kohlenstoffspeicher bewertet (Strömgren 2001). Insgesamt beträgt die Kohlenstoffbindung hier 559 Gigatonnen (= Gt), was im Vergleich mit einem globalen Gesamtspeicher von 2477 Gt einen beträchtlichen Anteil am weltweiten Klimasystem ausmacht. Die Tropen binden mit 212 Gt die größten Kohlenstoffmengen in der Biomasse und übertreffen damit die Borealis mit nur 88 Gt um nahezu das Doppelte. Dieser C-Speicher unterliegt jedoch aufgrund ökosystemarer Prozesse ständigen Fluktuationen, sodass die Biomasse als kurzfristiger Kohlenstoffspeicher behandelt wird. Sehr viel rele-

vanter für die globale Kohlenstoffbilanz sind jedoch langfristige Speicher in Boden und Eis. Hier lagern die Tropenböden nur etwa 216 Gt Kohlenstoff dauerhaft im Boden ein, etwa die Hälfte des Gesamtspeichers der borealen Zone von 471 Gt C (Newell 2004). Worin ist dies begründet? Limitierende Faktoren, wie periodische Bodengefrorenis oder schwer zersetzbar Nadelstreu durch große Mengen an Lignin, Harzen und Gerbstoffen hemmen den Umsatz der Streuauflage, welche verglichen mit der Baumschicht etwa fünfmal so viel organische Substanz (Venzke 2008) und Umsatzraten von 50-500 Jahren in der nördlichen Taiga aufweist (Treter 1993). Zum anderen gelangen im borealen Waldbestand nur etwa 5 % der eingehenden Strahlung zum Waldboden und reduzieren den Bodenwärmestrom verglichen mit Standorten ohne dichte Vegetationsdecke um etwa 2°C. Die Bodengefrorenis reicht hier 20–30 cm tiefer als unter Offenlandbedingungen (Walter/Breckle 1999) und begünstigt die Ausbildung oder den Erhalt des Permafrostbodens, der große Mengen Kohlenstoff speichert. Bei Änderungen der Lufttemperaturen, Waldbränden oder veränderten Einstrahlungsbedingungen entwickelt sich jedoch eine Auftauschicht im oberen Bereich

des Permafrostes von wenigen Zentimetern bis zu einigen Metern (Treter 1993), deren Stauwasser und anaerobe Bedingungen prädestiniert für die Akkumulation organischer Substanz bis zur Torfbildung sind (Treter 2000).

Die Böden der Borealis sind auf 259 Mio. ha Fläche durch Feuchtgebiete überdeckt und vereinen 90 % der weltweiten Moorflächen (Abb. 3) (Treter 2000). Ein natürliches boreales Moor, welches sich noch im Wachstum befindet, fungiert in der Regel als CO₂-Senke und Methan-Quelle (Bork/Hagedorn 2006). Laut Gorham (1991) werden 455 Mrd. t C in den borealen Hoch- und Niedermooren gespeichert, etwa ¼ des gesamten in lebender organischer Substanz gespeicherten Kohlenstoffs (Venzke 2008). Auf der anderen Seite stammen etwa 10 % des jährlichen atmosphärischen Methangehaltes aus borealen und subarktischen Feuchtgebieten, was in der globalen Klimabilanz nicht zu unterschätzen ist (Bartlett/Harris 1993). Das flächenmäßige Gleichgewicht zwischen Permafrostboden und Feuchtgebieten ist daher entscheidend für die Treibhausgasbilanz der borealen Zone.

Eine Zunahme der Vegetationsbedeckung durch Verschiebung der Waldgrenze nach Norden und eine höhere Individuendichte am Standort könnte der Vermoorung durch De-

gradierung des Permafrostbodens entgegenwirken. Gleichzeitig kann ein Zuwachs an Biomasse, Streuanfall und Feinwurzelproduktion den Kohlenstoffspeicher vergrößern (Alm 1997). Auf der anderen Seite verändert sich die Albedo, die Rückstrahlung der Erdoberfläche bei veränderter Vegetationsbedeckung und zeitlich versetzter Schneeschmelze, was wiederum eine positive Rückkopplung für das Klimasystem bedeuten würde (Zhang et al. 2013; Wramneby et al. 2010; Grace et al. 2002; Miller/Smith 2012). Sowohl die Komplexität des Wirkungsgefüges der Waldtundra als auch die Großräumigkeit der Zone erschweren eine verlässliche Bewertung der derzeitigen Situation und zukünftiger Szenarien, wie im Verlauf der Darstellung noch zu erläutern sein wird. Wichtig sind daher ein fundiertes Verständnis aller ökosystemarer Prozessvorgänge sowie eine Präzisierung und Ausweitung der Erfassungsmethodik, um von der Mikroskala des Individuums auf die Makroskala des globalen Klimasystems schließen zu können. Ein regionaler Forschungsschwerpunkt liegt dabei nördlich des Polarkreises im Wald- und Baumgrenzökoton der Waldschutzzone Finnisch-Lapplands, welcher die derzeitige Reaktion des Waldes auf Klimaänderungen anhand der Verjüngungs- und Verlagerungs-



Abb. 3: Vermoorung durch Degradation des Permafrostbodens im südlichen Alaska (Quelle: Eigene Aufnahme)

dynamiken der Waldkiefer untersucht und einmal exemplarisch vorgestellt werden soll.

4 Waldgrenzforschung in Finnland

Bereits seit 1980 unterhält das finnische Waldforschungsinstitut METLA (MEtsänTutkimusLaitos = finn. Waldforschungsinstitut) in Kooperation mit den Universitäten Helsinki, Oulu und Turku ein langfristiges Forschungsprojekt, welches sich unter anderem mit Verjüngungsdynamiken und Nordwärtstrends im Bereich der polaren Wald- und Baumgrenze Finnisch-Lapplands beschäftigt. Untersucht werden die Verjüngungs- und Regenerationspotentiale der Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.), der Gemeinen Fichte (*Picea abies* (L.) H. Karst) sowie der Fjell-Birke (*Betula pubescens* Ehrh. ssp. *czerepanovii* (Orlova) Hämet-Ahti) unter vergangenen und gegenwärtigen klimatischen Bedingungen. Ziel ist auch hier eine verlässliche Prognose der zukünftigen Waldflächenentwicklung und Baumartenverteilung (Hyppönen 2013).

Für die Etablierung neuer Individuen nördlich der derzeitigen Baumgrenze sind die klimatischen Gegebenheiten das Schlüsselement. Bisherigen Untersuchungen zufolge wird für den finnischen Raum ein insgesamt wärmeres und feuchteres Klima insbesondere in den Wintermonaten erwartet (Tuomenvirta 2010), wie eine Auswertung langfristiger Datenreihen bereits bestätigen konnte. Alle Untersuchungsregionen in Finnisch-Lapland wiesen eine Zunahme der Jahresmitteltemperaturen mit verstärkter Tendenz im Spätsommer sowie den Wintermonaten auf (vgl. Tab.1). Signifikant waren hierbei sowohl der Monat Juli mit einer Zunahme von 2,1°C als auch der August mit 2,7°C (Langer 2010). Basierend auf der bisherigen Temperaturentwicklung wird vermutet, dass die jährliche Wärmesumme bis zum Jahr 2100 um mehr als

500 Gradtage ansteigen und die Vegetationsperiode damit um 30–50 Tage verlängern wird (Juntunen/Neuvonen 2006). Betrachtet wird hierbei jedoch nur ein kleines Zeitfenster der Erdgeschichte, deren klimatischer Zyklus bereits früher entsprechende Tendenzen erkennen ließ, sodass bisher noch unklar ist, ob der derzeitige messbare Trend fortgeführt werden oder in einigen Jahrzehnten wieder rückläufig sein wird. Die mittleren Jahresniederschläge verzeichneten im Vergleich mit den Vorjahren landesweit eine Zunahme, wobei wiederum die Wintermonate den deutlichsten positiven Trend erkennen ließen. Die Sommerniederschläge gestalteten sich hingegen insbesondere in Polarkreisnähe als sehr unregelmäßig und ließen zunehmend Niederschlagsereignisse mit geringen Niederschlagsmengen erkennen. Dies führt aufgrund höherer Temperaturen und damit einhergehenden Evaporationsraten zu einem insgesamt ungünstigeren Wasserhaushalt in der Vegetationsperiode. Eine hohe Interzeption in Baum- und Strauchschicht reduziert vor allem bei gemäßigteren Niederschlägen die Sickerrate und damit Grundwasserneubildung (Langer 2010), sodass eine Absenkung des sommerlichen Grundwasserspiegels bereits jetzt erkennbar trockenere Böden während der Vegetationsperiode zur Folge hat (Tuomenvirta 2010).

Dennoch ist in Finnisch-Lapland derzeit eine Ausweitung der Waldfläche zu beobachten, was auf eine Dominanz thermischer Gunstbedingungen gegenüber potentiell trockenem Stress hindeutet (Juntunen et al. 2002). Die Kiefer ist hierbei eine Nadelbaumart, deren Wachstums- und Verjüngungsverhalten rasch und deutlich auf klimatische Veränderungen reagiert, sodass sie in der Klimafolgenforschung häufig als Referenzbaumart verwendet wird.

| Ort | Linearer Trend der Temperatur | Signifikanz | Mittlerer Jahresniederschlag | Signifikanz |
|-------------|-------------------------------|-------------|------------------------------|-------------|
| Kilpisjärvi | + 2,1°C | sehr stark | + 14,2 % | nicht |
| Muonio | + 2,7°C | höchst | + 19,9 % | schwach |
| Ivalo | + 2,4°C | sehr stark | k.A. | |
| Kevo | + 2,1°C | stark | + 29,0 % | signifikant |

Tab. 1: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur sowie des mittleren Jahresniederschlages von 1978-2007 für ausgewählte Regionen in Finnisch-Lapland (Datenquelle: Langer 2010; S. 80 f.)

5 Die Kiefer im Nordwärtstrend

Das Gebiet kieferndominierter Waldbestände hat in Nordfinnland in den letzten 40 Jahren um 2 Mio. ha zugenommen (Mälkönen 2010) und konnte auch im Bereich der nördlichen und oberen Baumgrenze neue Individuen verzeichnen. Auf ehemals baumfreien Tundralandschaften etablieren sich zunehmend relativ erfolgreich neue Koniferen-Sämlinge und belegen eine Ausbreitung der Nadelgehölze nach Norden (Harsch et al. 2009; Holtmeier 2005; Holtmeier/Broll 2005; Juntunen/Neuvonen 2006). Jene Entwicklung deutet eine Annäherung der Kiefer an das ursprüngliche Verbreitungsareal an, deren obere Waldgrenze in der vertikalen Zonierung auf 600 m.a.s.l. deutlich höher lag als heute (Seppä 1996). Ein Temperatureinbruch vor etwa 5.000 Jahren verursachte einen Rückzug der Birken- und Kiefernwaldgesellschaften nach Süden bis zum heutigen Verbreitungsraum. Seitdem fanden aufgrund anthropogener Eingriffe oder ökosystemarer Änderungen periodische Verlagerungen der Wald- und Baumgrenze statt, sodass bei einer langfristigen Klimaänderung davon ausgegangen werden kann, dass sich die Position der Nadelwaldbestände wieder weiter an ihr ursprüngliches Verbreitungsareal annähern könnte (Kallio et al. 1985).

In diesem Rahmen waren bislang die Länge der Vegetationsperiode sowie die Ausprägung der Juli-Temperatur für das Wachstum der Kiefer ausschlaggebend (Ritchie 1987; Helama et al. 2008) und bestimmen auch nach wie vor das Ausmaß der Nadelproduktion, der Triebausbildung und des Höhenzuwachses (Pensa et al. 2006). Das Dickenwachstum beziehungsweise die Jahrringbreite korrelieren hingegen gemäß aktueller dendroökologischer Untersuchungen inzwischen signifikanter mit der Höhe des Niederschlages zu Beginn der Vegetationsperiode (Mielikäinen 2010; Helama et al. 2008). Dies deutet darauf hin, dass die Wasserverfügbarkeit zunehmend zum limitierenden Parameter werden wird (Mielikäinen 2010; Zhang et al. 2013).

Insgesamt ist das Verjüngungspotential bei Klimaerwärmung flächendeckend vor allem auf Offenlandflächen im Norden enorm (Juntunen et al. 2002) und ließe unter günstigen Bedingungen theoretisch Wachstumshöhen von 12–14 m in 100 Jahren sowie einen durchschnittlichen Bestandszuwachs von 1,0–1,5 m³/Jahr/ha zu (Varmola et al. 2004). Die

tatsächliche Reproduktionsrate unterschreitet dieses Potential jedoch deutlich, da trotz der guten Adaption der Gehölzvegetation an widrige Bedingungen zusätzlich klimatische Faktoren und externe Störgrößen ausschlaggebend für den Verjüngungserfolg sind. In den geschlossenen Waldbeständen Südfinnlands reduzieren zu milde Winter und wärmere Sommer den eigentlich zweijährigen Lebenszyklus von Fraßgesellschaften auf ein Jahr und lassen die Populationen drastisch ansteigen (Juday et al. 2004). In Finnisch-Lappland sind hinsichtlich der abiotischen Faktoren Infektionen durch den Weißen Schneeschimmel (*Phacidium infestans* Karst.) oder das Triebsterben (*Gremmeniella abietina* (LAGERBERG) M. MORELET) in der Verjüngungsdynamik problematisch, da eine mächtigere Schneedecke durch höhere Niederschläge den Befall von Jungpflanzen unter 80 cm Wuchshöhe begünstigt (Juntunen/Neuvonen 2006; Holtmeier/Broll 2011; Varmola et al. 2004; Jalkanen 2003). Zudem ist die Krautschicht fichtendominierter Bestände häufig durch das flächendeckende Auftreten der Rentierflechte (*Cladonia rangiferina* (L.) Weber ex F. H. Wigg.) gekennzeichnet, die einen hohen Beweidungsdruck der Areale durch das Rentier (*Rangifer tarandus* L.) nach sich ziehen. Bei der Beweidung der Flechte schädigt das Rentier vor allem junge Kiefern nachhaltig (Holtmeier/Broll 2011; Heikkinen et al. 2002; Holtmeier 2005; Vajda/Venäläinen 2005) und ist durch den enormen Populationszuwachs vom Beginn des 20. Jahrhunderts bis heute um mehr als das Doppelte (Väre et al. 1996) eine nicht zu unterschätzende Komponente geworden. Zu den biotischen Stressfaktoren an der polaren Baumgrenze zählen Wind, Schneebruch und Frostschäden durch Frühjahrsfröste, deren Frequenz insbesondere bei einer zeitiger einsetzenden Vegetationsperiode steigen wird (Kellomäki et al. 1995). Entsprechende Frostschäden treten verstärkt in ungeschützten Waldrandbereichen oder Heidelandschaften ohne Birkenwaldgesellschaften auf, auf denen die Kiefer im Jungstadium ungeschützt klimatische Extreme überdauern muss (Juntunen et al. 2002; Holtmeier/Broll 2011; Holtmeier 2005; Kullmann 2007). Gemessen an der Vielzahl regulierender Faktoren reichte die bisherige Klimaerwärmung laut Holtmeier/Broll (2011) nicht aus, die widrigen Wachstumsbedingungen im Baumgrenzökoton zu kompensieren und zur erfolgreichen Reproduktion




überzugehen. Trotz der Etablierung neuer Jungpflanzen kann aufgrund des schlechten Zustandes der Individuen oft keine erfolgreiche Zapfenproduktion gewährleistet werden, sodass der ursprünglich prognostizierte rasche Nordwärtstrend der Kiefer nach derzeitigem Kenntnisstand in dieser Geschwindigkeit nicht eintreten wird. Am METLA wird entsprechenden aktuellen Fragestellungen derzeit nachgegangen. Bleibt die boreale Zone also zunächst unverändert und was bedeutet dies für die Treibhausgasbilanz?

6 Wohin soll die Reise gehen?

Die bisherigen Erkenntnisse ermöglichen zumindest im Rahmen der Kohlenstoffkompensation eine unterstützende Forstwirtschaft, um dem Maßnahmenkatalog der REDD+ -Initiative gerecht zu werden. Die Herkunft des Saatgutes und damit die genetische Beschaffenheit der Jungpflanzen ist relevant für die Resistenz gegenüber widrigen Wachstumsbedingungen sowie die optimale Ausnutzung der Vegetationsperiode (Helama et al. 2008). Entsprechende Pflanzungen könnten daher im Sinne des Wald- und Emissionsschutzes vorgenommen werden. Fraglich ist bisher allerdings, in welcher Relation sich die südliche und nördliche Grenze der borealen Zone zueinander verschieben werden, da die immergrüne Nadelwaldvegetation im Süden Finnlands vermutlich zunehmend durch laubabwerfende Arten verdrängt und die boreale Nadelwaldzone damit in ihrer Fläche reduziert werden wird. Sommergrüne Vegetation bindet aufgrund zeitlich begrenzter Assimilation weniger CO₂ und liefert leichter zersetzbare Streu, sodass der Kohlenstoffspeicher in toter organischer Masse damit abnehme (Kellomäki/Kolström 1992). Interessant ist weiterhin die Frage, wie sich eine veränderte Vegetationsbedeckung und Artenzusammensetzung auf die Rück-

strahlung der solaren Wärmestrahlung auswirkt und welche Rückkopplungseffekte daraus für das globale Klimasystem entstehen. Ein *Greening* der Tundra aufgrund polwärts migrierender Nadelwaldvegetation würde in einer verringerten Albedo und damit einer Erwärmung der entsprechenden Gebiete resultieren, wie bisherige Trends für die Region Finnisch-Lapplands sowohl hinsichtlich der Winter- als auch der Sommermonate vermuten lassen (vgl. Abb. 4) (Zhang et al. 2013).

Bisher liegen demnach zu viele Komponenten des komplexen Wirkungsgefüges im Ungewissen, um eine sichere Aussage über die Reaktion der Vegetation auf klimatische Änderungen und etwaige Folgen treffen zu können. Es besteht daher weiterhin Forschungsbedarf, um in der Zukunft zum einen trotz großer standörtlicher Differenzen einen Rückschluss auf die großräumige Bewertung des borealen Raumes ziehen, zum anderen jedoch auch die Folgen für den Mineralstoffkreislauf und die Kohlenstoffbindung in Bio- und Pedosphäre abschätzen zu können. Langfristiges Ziel wird es sein, bisher separate Ergebnisse und Methoden zusammenzuführen und ein weitreichendes Verständnis der Verjüngungsdynamiken sowie der Adaption der Gehölzvegetation an klimatische Änderungen erlangen zu können. Die weitere Forschung im nördlichen Raum wird zeigen, ob wir uns in Zukunft nicht mehr um die monokulturell anmutenden Nadelwälder des Nordens sorgen müssen als um die exotische Vielfalt des Regenwaldes. 

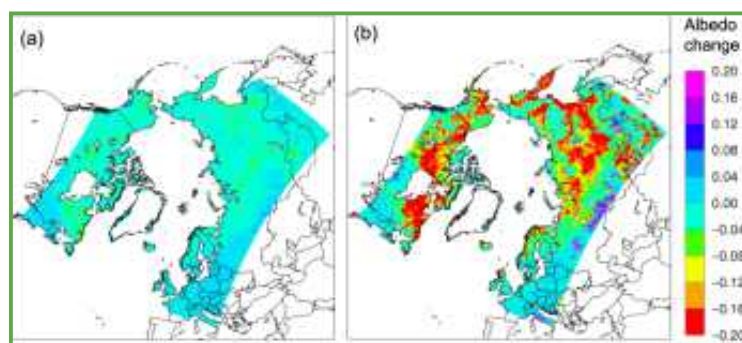


Abb. 4: Simulation der Differenz zwischen aktueller und zukünftiger Albedo für Sommer (a) und Winter (b) basierend auf bisherigen Trends vegetationspezifischer Änderungen (Zhang et al. 2013, S. 7)

Literaturverzeichnis

- Alm, J. (1997): CO₂ and CH₄ fluxes and carbon balance in the atmospheric interaction of boreal peatlands. Joensuu.
- Autio, J./Heikkinen, O.: The climate of northern Finland. IN: Fennia International Journal of Geography 2002 (180), S. 61–66.
- Bartlett, K. B./R. C. Harriss (1993): Review and assessment of methane emissions from wetlands. IN: Chemosphere 26 (1–4), S. 261–320.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (2013): Deutschland baut Engagement im Waldschutz aus. Berlin. [http://www.bmu.de/bmu/presse-reden/pressemitteilungen/pm/artikel/deutschland-baut-engagement-im-waldschutz-aus/?tx_ttnews\[backPid\]=2809](http://www.bmu.de/bmu/presse-reden/pressemitteilungen/pm/artikel/deutschland-baut-engagement-im-waldschutz-aus/?tx_ttnews[backPid]=2809)
- Bonan, G. B./Pollard, D./S. L. Thompson (1992): Effects of boreal forest vegetation on global climate. IN: Nature 359, S. 716–718.
- Callaghan, T.V./Crawford, R. M. M./Eronen, M./Hofgaard, A./Payette, S./Rees, W.G./Skre, O./Sveinbjörnsson, B./Vlassova, T.K./B. R. Werkman (2002): The Dynamics of the Tundra-Taiga Boundary: An Overview and Suggested Coordinated and Integrated Approach to Research. IN: Ambio, Special Report 12, S. 3–5.
- Gorham, Eville (1991): Northern Peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climate warming. Minnesota.
- Grace, J./Berninger, F./L. Nagy (2002): Impacts of climate change on the tree line. IN: Annals of Botany 90, S. 537–544.
- Harsch, M. A./Hulme, P. E./McGlone, M. S./R. P. Duncan (2009): Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. IN: Ecology Letters 12, S. 1040–1049.
- Heikkinen, O./Tuovinen, M./J. Autio (2002): What determines the timberline? IN: Fennia International Journal of Geography 180, S. 67–74.
- Helama, S./Salminen, H./Timonen, M./M. Varmola (2008): Dendroclimatological analysis of seeded and thinned Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands at the coniferous timberline. IN: New Forests 35 (3), S. 267–284.
- Holtmeier, F.-K. (2005): Change in the timberline ecotone in northern Finnish Lapland during the last thirty years. (in memory of Paavo Kallio, 1914–1992, who introduced me to Lapland). IN: Reports from the Kevo Subarctic Research Station (23), S. 97–113.
- Holtmeier, F.-K./G. Broll (2005): Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. IN: Global Ecological Biogeography 14, S. 395–410.
- Holtmeier, F.-K./G. Broll (2011): Response of Scots Pine (*Pinus sylvestris*) to Warming Climate at Its Altitudinal Limit in Northernmost Subarctic Finland. IN: Arctic 64(3), S. 269–280.
- Hyppönen, M. (2013): The changes of forest timberline in Northern Finland during 1983–2009. Präsentation vom 13.–15.03.2013 in Kilpisjärvi.
- IPCC(1) (2014): WGII AR5 Chapter 23. Europe.
- IPCC(2) (2014): WGII AR5 Chapter 4. Terrestrial and Inland Water Systems.
- Jalkanen, R. (2003): Havupuutaimikoiden tuhojen esiintyminen ja merkittävyys Suomessa. Metsätieteen aikakauskirja 1/2003, S. 59–68.
- Jorgenson, M. T./Racine, C. H./Walters, J. C./T. E. Osterkamp (2001): Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in Central Alaska. Climate Change 48, S. 551–579.
- Juday, G. P./Barber, V. A./Vaganov, E./Sparrow (2004): Boreal Forest and Agricultural Responses to Climate Warming. The ACIA International Scientific Symposium on Climate Change in the Arctic. AMAP Report. 4. Aufl.
- Juntunen, V./S. Neuvonen (2006): Natural Regeneration of Scots Pine and Norway Spruce Close to the Timberline in Northern Finland. In: Silva Fennica 40 (3), S. 443–458.
- Juntunen, V./Neuvonen, S./Norokorpi, Y./T. Tasanen (2002): Potential for Timberline Advance in Northern Finland, as Revealed by Monitoring during 1983–99. IN: Arctic 55(4), S. 348–361.
- Kallio, P./Hurme, H./Euroola, S./Norokorpi, Y./P. Sepponen (1985): Research Activities on the Forest Line in Northern Finland. IN: Arctic 39 (1), S. 52–58.
- Karjalainen, T./Kellomäki, S. (1995): Simulation of forest and wood product carbon budget under a changing climate in Finland. IN: Apps, M. J./Price, D. T./J. Wisniewski (Hg.) (1994): Boreal forests and global change. Peer reviewed manuscripts selected from the International Boreal Forest Research Association Conference, held in Saskatoon, Saskatchewan, Canada, September 25–30, 1994.
- Karlsen, S. R./Elvebakk, A./B. Johansen (2005): A vegetation-based method to map climatic variation in the arctic-boreal transition area of Finnmark, north-easternmost Norway. IN: Journal of Biogeography 2005, S. 1161–1186.
- Kavanagh, K./M. Kellman (1986): Performance of *Tsuga canadensis* (L.) Carr. at the centre and northern edge of its range: a comparison. IN: Journal of Biogeography 1986 (133), S. 145–157.
- Kellomäki, S./Hänninen, H./M. Kolström (1995): Computations on frost damage to Scots pine under climatic warming in boreal conditions. IN: Ecological Applications 1995 (5), S. 42–52.
- Kottek, M./Rubel, F. (2010): Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. Institute for Veterinary Public Health.
- Kullmann, L. (2007): Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973–2005: implications for tree line theory and climate change ecology. IN: Journal of Ecology 95, S. 41–52.
- Kultti, S./Mikkola, K./Virtanen, T./Timonen, M./M. Eronen (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. IN: Holocene 16 (3), S. 381–391.
- Langer, M. (2010): Klimawandel in Nordostfinland. Dynamik von Sommerniederschlägen sowie Bedeutung von stratusspezifischer Interzeption borealer Waldvegetation auf den Landschaftswasserhaushalt. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften.
- Lawrence, D.-M./A. G. Slater (2005): A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century. IN: Geophysical Research Letters 32, S. 1–5.
- Leinonen, I./Tapani, R./H. Hänninen (1996): Changing environmental effects on frost hardness of Scots pine during dehardening. IN: Annals of Botany 79, S. 133–138.
- Mälkönen, E. (2010): Forest condition in a changing environment – The Finnish case. Forestry Sciences 65. Springer, London.
- Mielikäinen, K. (2010): Dependence of tree annual diameter growth on weather factors. IN: Mälkönen, E.: Forest condition in a changing environment – The Finnish case. Forestry Sciences 65. Springer, London.
- Miller, P. A./B. Smith (2012): Modelling tundra vegetation response to recent arctic warming. IN: AMBIO 41, S. 281–291.
- Newell, J. (2004): The Russian Far East – A Reference Guide for Conservation and Development. California.
- Partanen, J./Koski, V./Hänninen, H. (1998): Effects of photoperiod and temperature on the timing of bud burst in Norway spruce (*Picea abies*). IN: Tree Physiology 18(12), S. 811–816.
- Pensa, M./Sepp, M./R. Jalkanen (2006): Connections between climatic variables and the growth and needle dynamics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Estonia and Lapland. IN: International Journal of Biometeorology 50 (4), S. 205–214.
- Rinn, F. (2003): TSAP-Win – Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and related Applications – Version 0.53 User Reference. Heidelberg.
- Ritchie, J. C. (2008): Postglacial Vegetation of Canada. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schultz, J. (2000): Handbuch der Ökozonen. Stuttgart.
- Seo, J.-W./Salminen, H./Jalkanen, R./D. Eckstein (2010): Chronological Coherence between Intra-Annual Height and Radial Growth of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Northern Boreal Zone of Finland. IN: Baltic Forestry 16(1), S. 57–65.
- Seppä, H. (1996): Post-glacial dynamics of vegetation and tree lines in the far north of Fennoscandia. IN: Fennia 1996 (174:2).
- Strömberg, M. (2001): Soil-Surface CO₂ Flux and Growth in a Boreal Norway Spruce Stand – Effects of soil warming and nutrition. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae.

Silvestria (220).

Susiluoto, S./Hilasvuori, E./F. Berninger (2010): Testing growth limitation hypothesis for subarctic Scots pine. IN: *Journal of Ecology* 98, S. 1186–1195.

Treter, U. (1993): Die borealen Waldländer. Das geographische Seminar. Braunschweig.

Treter, U. (2000): Rolle der borealen Waldländer im globalen CO₂-Haushalt – Eine ökosystemare Analyse. IN: *Geographische Rundschau* Heft 12. Braunschweig.

Tuhkanen, Sakari (1980): Climatic parameters and indices in plant geography. Stockholm. IN: Schultz, Jürgen (2000): *Handbuch der Ökozonen*. Stuttgart.

Tuomenvirta, H. (2010): Climatic and weather conditions. Climate change. IN: Mälkönen, E.: *Forest condition in a changing environment – The Finnish case*. *Forestry Sciences* 65. Springer, London.

Vajda, A./A. Venäläinen (2005): Feedback processes between climate, surface and vegetation at the northern climatological tree-line (Finnish Lapland). IN: *Boreal Environment Research* 2005 (10), S. 299–314.

Väre, H./Ohtonen, R./K. Mikkola (1996): The effect and extent of heavy grazing by reindeer in oligotrophic pine heaths in northeastern Fennoscandia. IN: *Ecography* 19, S. 245–253.

Varmola, M./Salminen, H./M. Timonen (2004): Thinning Response and Growth Trends of Seeded Scots Pine Stands at the Arctic Timberline. IN: *Silva Fennica* 2004 (38), S. 71–83.

Venzke, J.-F. (2008): *Die Borealis – Die Zukunft der nördlichen Wälder*. Darmstadt.

Walter, H./Breckle, S.-W. (1999): *Vegetation und Klimazonen*. Stuttgart.

Wramneby, A./Smith, B./P. Samuelsson (2010): Hot spots of vegetation-climate feedbacks under future greenhouse forcing in Europe. IN: *Journal of Geophysical Research* 115, S. 1–12.

Zhang, W./Miller, P. A./Smith, B./Wania, R./Koenigk, T./R. Döscher (2013): Tundra shrubification and tree-line advance amplify arctic climate warming: results from an individual-based dynamic vegetation model. IN: *Environmental Research Letters* 8 (3), S. 1–10.