

5.6 Globale Gefahr durch intensive Nutzung der Taiga-Wälder

JÖRG-FRIEDHELM VENZKE & MARCO LANGER

Global danger by intensive exploitation of subarctic and boreal forests: The »Taiga«, which describes the forests of the boreal eco-zone, is defined by climatic and vegetation criteria. These forests are the largest woodland ecosystem of the world. It is heavily endangered by global climatic change which is amplifies by anthropogenic impacts like clearcuttings, increasing of forest fires and insect outbreaks and exogenic emissions. On the other hand boreal forests play a – however often overestimated – role in global CO₂ budgets.

Der Begriff »Taiga« stammt aus der jakutischen Sprache (»Wald«) und beschreibt die nördlichen Nadelwälder der nördlichen Hemisphäre (bzw. im engeren Sinne nur Sibiriens). Sie liegen in der sog. borealen Landschaftszone, die sich südlich der Arktis anschließt und sich – je nach konkreter Definition – in Alaska, Kanada, Island, Norwegen, Schweden, Finnland, Russland, Mongolei und China befindet (vgl. Abb. 5.6-1). Sie stellen mit ca. 13,7 Mio. km² das flächenmäßig größte globale Waldökosystem dar. Der Begriff »boreal« leitet sich von »Boreas«, dem Gott des kalten Nordwindes in der griechischen Mythologie, ab. Die boreale Landschaftszone, die neben den Wäldern auch noch ausgedehnte Moorgebiete umfasst, wird nach klima- und vegetationsgeographischen Gesichtspunkten wie folgt definiert:

Die boreale Landschaftszone - Eine kurze Definition

Die boreale Landschaftszone befindet sich zwischen dem nördlichen Waldgrenzökoton (s. Kap. 1.1 - VENZKE, vgl. auch VENZKE 1998) und dem Übergang von borealen Nadelwäldern (»Taiga«) als der zonalen Vegetationsformation zu den i.W. durch Laubbäume aufgebauten nemoralen Wäldern der kühlgemäßigten Zone bzw. zu den baumlosen Steppengebieten der semiariden kontinentalen Regionen z.B. Südsibiriens oder der Mongolei. Die nach wie vor umfangreichste und kompetenteste Darstellung und Diskussion einer klima- und vegetationsgeographischen Definition der Borealis liegt von TUKANEN (1984) (s. a. VENZKE 2008 und WUNDRAM 2011) vor.

Bei einem jährlichen, jedoch saisonal sehr unterschiedlichen Strahlungsgenuss von 350 bis 450 × 10⁸ kJ/ha liegen in der borealen Landschaftszone die mittleren Temperaturen des wärmsten Monats – je nach geographischer Breite und Entfernung vom Ozean – zwischen +10 und +18 °C, während es im Winter im Monatsmittel zwischen 0 und unter -40 °C kalt werden kann. Als polwärtige klimageographische Begrenzung der Borealis gilt die sog. 10°-C-Juli-Isotherme als Wärmemangelgrenze für Baumwuchs. In den kontinentalsten Gebieten der Borealis in Ostsibirien liegt bei Werchojansk und Oimjakon der Kältepol der nördlichen Hemisphäre mit -71,1 °C und einer absoluten Jahrestemperaturamp-

litude von 107 K! Die extrem niedrigen Wintertemperaturen sind verbunden mit hohen Luftdrücken und lang andauernden Inversionswetterlagen. Die Vegetationsperiode – definiert durch Tagesmitteltemperaturen von über +5 °C und im Norden zum Teil unter Langtagbedingungen – dauert mit einem Strahlungsgenuss von 150 bis 300 × 10⁸ kJ/ha zwischen drei und sechs Monaten. In den ozeanischen Gebieten der Kontinentwestseiten, z.B. in Norwegen oder Südalaska, können im Jahr 2.000–3.000 mm Niederschlag fallen; in den hochkontinentalen Regionen z.B. Nordostasiens oder Kanadas liegen die Jahresniederschläge dagegen bei ca. 300 mm. Hier übersteigen i. Allg. die Werte der sommerlichen Verdunstung die der Niederschläge; es herrscht also ein sommerliches klimatologisches Wasserdefizit, das nur zum Teil durch das Abschmelzen der winterlichen Schneedecke, die zwischen 130 Tagen in Nordeuropa und 240 Tagen in Nordostsibirien anhält, landschaftswasserhaushaltlich ausgeglichen werden kann.

Wegen der relativen (klima-)ökologischen Ungunst der hohen Breitenlage mit kurzer Vegetationsperiode, extrem niedrigen Wintertemperaturen, Frosttrocknisstress im Spätwinter und Frühjahr, geringer Nährstoffverfügbarkeit und langen Stoffumsatz- und Regenerationsraten ist die Biodiversität und Produktivität der borealen Waldvegetation im weltweiten Vergleich niedrig. Lediglich vier Koniferengattungen (*Picea*, *Pinus*, *Larix* und *Abies*) im jeweiligen potenziellen Endzustand der Sukzessionen (deshalb auch der oft gebräuchliche Begriff des »borealen Nadelwaldes«) sind zusammen mit wenigen Laubbaumgattungen (*Betula*, *Populus*, *Sorbus*, *Salix* und *Alnus*) der frühen Sukzessionsstadien am Aufbau der Strukturen der Wälder beteiligt. Trotz der geringen Artenvielfalt existiert allerdings eine nicht unbedeutende intraspezifische Diversität mit zahlreichen Varietäten und Standortstrassen. Die immergrünen Koniferen haben aufgrund ihrer morphologischen und physiologischen Eigenschaften wie ständiger Präsenz des Assimilationsapparates, hoher Kälteresistenz sowie Xeromorphie der Nadeln die entscheidenden Konkurrenzvorteile auf den zonalen Standorten, lediglich in den extrem winterkalten und sommerlich semiariden Regionen Ostsibiriens sind nadelabwerfende, sommergrüne Lärchen im Vorteil. Wichtige ökologische

Faktoren für die Vegetationsdynamik und Strukturvielfalt sind die regelmäßig auftretenden, oft großflächigen Waldbrände (s.u.) und Insektenkalamitäten.

Im Rahmen dieses Bandes kann auf »Warnsignale« aus der Borealis, einer doch im Vergleich mit der Arktis recht unterschiedlich strukturierten Ökozone, nur mit einem sehr knappen Überblick, thematisch ausgewählt und z.T. exemplarisch, eingegangen werden.

Ressource Taiga-Holz

Mit über 110 Mrd. m³ macht der Holzvorrat borealer Wälder etwa ein Drittel dieser Ressource weltweit und 80% des gesamten Nadelholzvorkommens aus. Neben der Schnittholzproduktion ist vor allem die Zellstoff- und Papierfabrikation die wichtigste Nutzungsform; z.B. wird über die Hälfte des Zeitungspapiers weltweit in borealen Regionen hergestellt. Wegen dieser schein-

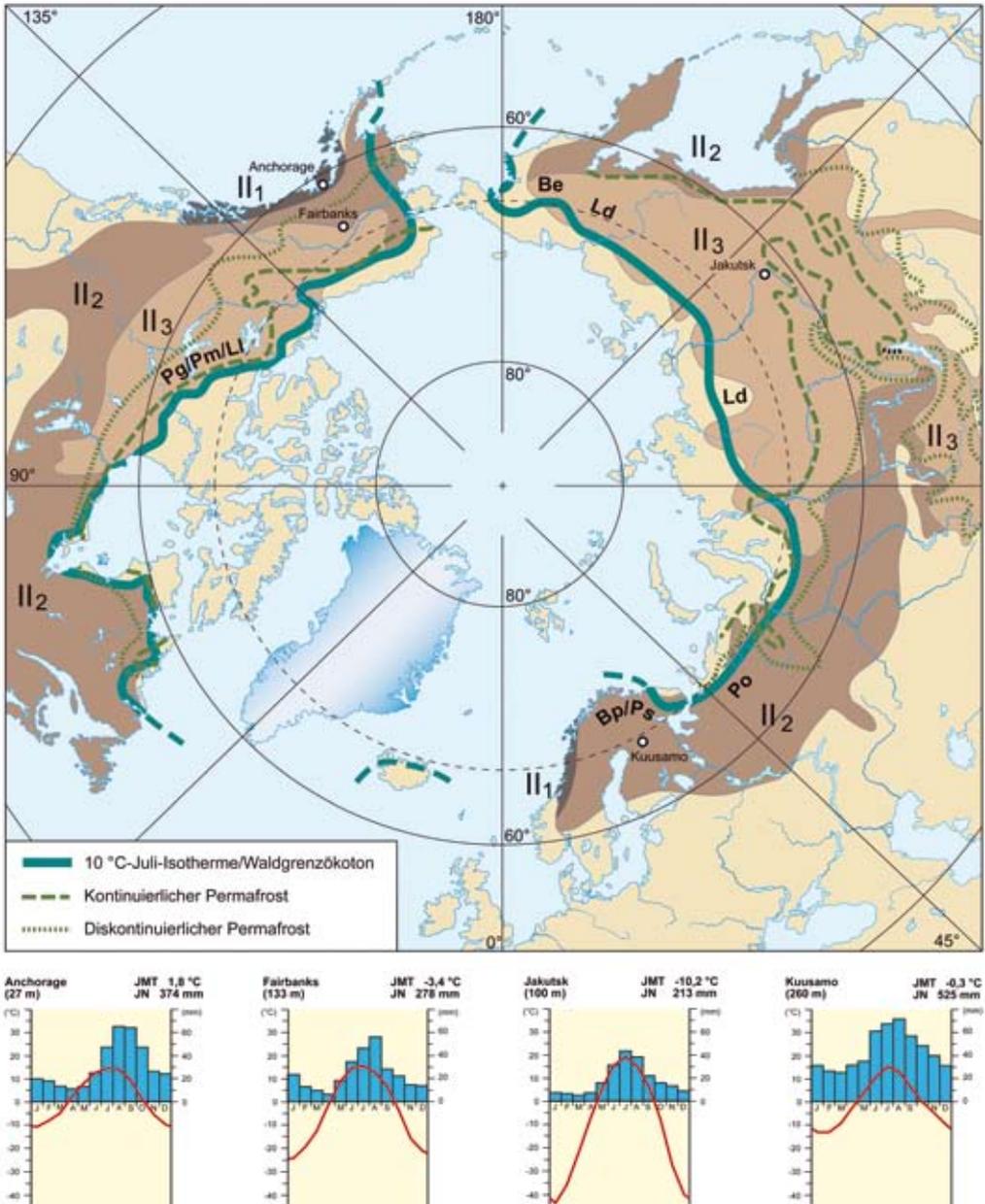


Abb. 5.6-1: Karte der Borealis mit Grenzen und Binnendifferenzierung i.W. nach TROLL (1994) sowie vier Klimadiagrammen.

bar unermesslichen Ressourcen an Wald und Holz existiert – mit einer gewissen Ausnahme in Skandinavien – oft keine nachhaltige Forst- und Holzwirtschaft. Eine bis heute häufig angewandte Wirtschaftsweise in Nordamerika und Russland ist die des großflächigen Einschlags ohne nachfolgende Wiederaufforstung. Allerdings muss konstatiert werden, dass sich in Russland von 1988 bis 2003 das Einschlagvolumen zwar um über zwei Drittel vermindert, sich die Aufforstungsleistung jedoch gleichzeitig »nur« um die Hälfte reduziert hat. Bei diesen Angaben, die dem offiziellen Statistischen Jahrbuch der Russischen Föderation entstammen, ist jedoch zu bedenken, dass die Forstgesetzgebung, die die Aufforstung von großflächigen Kahlschlägen durch den Nutzer vorschreibt, und die Durchsetzung und Kontrolle in der Realität nicht immer und überall übereinstimmen. Lediglich in Nordeuropa werden seit Beginn des 20. Jahrhunderts und in Alaska und Kanada, seit einigen Jahren gemäß gesetzlichen Vorgaben, nach Einschlag wieder Jungbäume angepflanzt, was zwar eine ökonomisch, jedoch nicht notwendigerweise eine ökologisch nachhaltige Bewirtschaftungsweise darstellt. Allerdings ergeben sich regional z.T. bedeutsame Nutzungseinschränkungen durch mangelnde Verfügbarkeit, Zugänglichkeit und Verwertbarkeit der Wälder und ihres Holzes (TRETTER 1993).

Die Gebiete mit den gegenwärtig größten Gefahren für boreales Waldland, die durch die Holzgewinnung ausgehen, liegen im südlichen, durch Eisenbahnen erschlossenen Ostsibirien, wo Russland diese Ressource ausländischen Konzernen zwecks rascher Devisenbeschaffung vergleichsweise preisgünstig und ohne bedeutende Umweltschutzaufgaben offeriert. In Russland finden sich ca. 7 Mio. km² Wälder, über ein Drittel davon im so genannten Fernen Osten. Hier stocken auf ca. 2,7 Mio. km² etwa 20,4 Mrd. m³ Holz, davon ca. 84% Holz in borealen Wäldern. Heute wird mit etwa 70% der größte Teil des dort eingeschlagenen Holzes in die benachbarten ostasiatischen Staaten exportiert und nur noch 5% vor Ort verarbeitet. Die Nachfrage nach Holz hat sich besonders in China durch die dortige Bevölkerungs- und industrielle Entwicklung enorm vergrößert. Von 1999 bis 2002 hat sich der chinesische Holzimport aus Russland verdreifacht; 2025 wird China über 200 Mio. m² im Jahr Holz benötigen – das 15-fache des gesamten heutigen Einschlags im russischen Fernen Osten (NEWELL 2004, vgl. auch FLITNER et al. 2011). Die Kahlschlagpolitik besonders finnischer Konzerne im europahanen Karelien der frühen 1990er-Jahre scheint nicht zuletzt durch die scharfe Observierung nationaler und internationaler Umweltschutzorganisationen stark eingeschränkt worden zu sein. Deren Aktivitäten werden allerdings gegenwärtig durch russische Restriktionen erheblich beeinträchtigt.

Die ökologischen Konsequenzen von großflächigen Kahlschlägen sind vielfältig: In geneigtem bis steilem Gelände und bei hohen Niederschlägen ist – wie z.B. in den nordwestkanadischen und südalaskischen Gebirgen – mit beträchtlicher Bodenerosion und damit nachhaltiger Standortdegradation zu rechnen. Die Kahlschlagflächen weisen extremere geländeklimatologische Verhältnisse als die Waldareale auf; so sind sie z.B. stärker spät- und frühfrostgefährdet, was oft – wie man in Nordschweden gefunden hat – Jungfichten in Aufforstungen schädigt. Ältere Bestände sind dagegen durch die Zunahme von Frequenz und Intensität von Sturmereignissen gefährdet. Darüber hinaus werden bei den großflächigen Einschlägen und auch den großflächigen Aufforstungen z.B. in Skandinavien durch das Ausschalten der natürlichen Sukzessionen, das intensive Nutzen der Wälder bestimmter Biotoptypen und die Verinselung naturnaher Bestände nachhaltig und in z.T. problematischer Weise die Strukturvielfalt und Biodiversität gefährdet.

Waldbrände

Waldbrände gehören zu den natürlichen Faktoren borealer Waldökosysteme. Jährlich sind in der nordamerikanischen Borealis 3–5 Mio. ha und in der eurasischen Borealis (v.a. Sibirien) bis zu 10 Mio. ha von Feuer betroffen. Die Brände sind heute allerdings nur noch zu ca. 15% natürlicherweise durch Blitzschlag ausgelöst; sehr viel häufiger sind anthropogen induzierte Feuer (GOLDAMMER 1995).

Die Wirkung von natürlich auftretenden Waldbränden ist keineswegs – wie es gelegentlich getan wird – mit der Wirkung von Kahlschlägen gleichzusetzen: Nach Waldbränden verbleibt ein großer Teil der Nährstoffe in Form von Asche in denselben oder benachbarten Biotopen, die angekohlten stehenden und liegenden Stämme wirken erosionshemmend, und es wird eine langfristige Sukzession eingeleitet, die in ihrem Verlauf einer größeren Fülle von Pflanzen- und Tierarten Lebensraum bietet. Darüber hinaus existieren auch in überalterten und sterbenden natürlichen Beständen – so genannten »Old Growth Forests« – Biotope für zahlreiche Lebensformen, die durch die Forstwirtschaft, die den Wald in seiner forstökonomischen Optimalphase einschlägt, nicht zugelassen werden. Die überaus wichtige Bedeutung von Waldbränden für boreale Ökosysteme drückt TRETTER (1993) in dem Satz »Die borealen Nadelwälder existieren nicht trotz, sondern wegen des Feuers« aus. Als ein besonderes Problem benennt GOLDAMMER (1995) im Zusammenhang mit Bränden in borealen Wäldern auf russischem Staatsgebiet die Freisetzung von in der Vegetation enthaltenen Radionukliden (bes. Strontium und Caesium); immerhin sollen ca. 7 Mio. ha Taiga radioaktiv verseucht sein.

Auswirkungen von Global Warming auf die Taiga

Die Interaktion zwischen dem flächengrößten Waldökosystem der Erde und Veränderungen in der Atmosphäre («Global Warming») sind vielfältig und nur schwierig zu prognostizieren. Hierzu zunächst einige Statements, die die Auswirkungen einer globalen Erwärmung auf die Taiga skizzieren (z. T. nach IASC [1999] und JUDAY et al. [2004]):

- Wärmeres und trockeneres Klima wird eine Zunahme von Waldbränden zur Folge haben. Die in den 1990er Jahren in russischen Wäldern aufgetretenen Brände (s.o.) haben mehr als doppelt so viele Flächen betroffen wie in den vorangegangenen Jahrzehnten (ACIA 2004).
- Auch Insektenkalamitäten werden durch zunehmende Winter- und Sommertemperaturen häufiger und schwerwiegender auftreten. In den 1990er und frühen 2000er Jahren wurde z.B. ein massiver Befall süd-alaskischer und nordwestkanadischer borealer Wälder von Fichtenborkenkäfer registriert, der durch zu milde Winter (die die Überlebensquote regulieren), zu warme Sommer (die den normalerweise zweijährigen Lebenszyklus schon in einem Jahr beenden und damit die Populationen dramatisch ansteigen lassen) und eine temperatur- und dürrebedingt geringere Harzproduktion von *Picea glauca* als Schutzmechanismus verursacht wurde (ACIA 2004).
- Längere und wärmere Vegetationsperioden fördern die Produktivität und Regenerationsfähigkeit borealer Vegetation in ausreichend feuchten und nährstoffreichen Regionen. In Alaska beispielsweise hat sich die Vegetationsperiode um 20% verlängert. Die nördliche Wald- und Baumgrenze wird folglich mit einer geschätzten Geschwindigkeit von ca. 100 km pro 1 K Erwärmung polwärts wandern.
- Andererseits kann zunehmende Trockenheit zu einer Reduktion der Vitalität kontinentaler Taiga-Wälder besonders an der Baumgrenze (z.B. bei *Picea glauca* in der westlichen nordamerikanischen Borealis) führen.
- Höhere Sommertemperaturen führen zu einer langsamen Degradation des Dauerfrostbodens. Eine Zunahme der Mächtigkeit der sommerlichen Auftauschicht findet besonders dort statt, wo Waldbrände oder großflächige Kahlschläge die Waldvegetation, die die Erdoberfläche im Sommer vor Einstrahlung schützt, vernichtet haben. Ist der auftauende Permafrost besonders eisreich, kommt es zu verstärkter Vernässung und Thermokarsterscheinungen, die wiederum die Wiederbesiedlung der Fläche behindern. Dieses Problemfeld könnte besonders an der polaren Waldgrenze eine wichtige Rolle spielen: Taut bei Erwärmung der Permafrost eher und schneller auf und führt damit zur verstärkten Versumpfung oder wandert die beschattende Taiga schneller nordwärts und schützt den Dauerfrostboden vor verstärkter sommerlicher Erwärmung?

- Insgesamt ansteigende Temperaturverhältnisse auch in den sog. Übergangsjahreszeiten (Frühjahr, Herbst) haben die Zunahme von Frostwechsel- zuungunsten von Eistagen mit einer möglicherweise verstärkten, flächenhaft ausgeprägten periglaziären Morphodynamik und Beanspruchung von Bauwerken zur Folge.
- Wegen eines vermutlich stärkeren Temperaturanstieges in südborealen Regionen und der dortige Zunahme von kontinentalen Steppenverhältnissen gegenüber der Erwärmung im polwärtigen Waldgrenzökoton dürfte die boreale Landschaftszone nicht nur allmählich nordwärts wandern, sondern auch flächenmäßig schrumpfen.

Möglicher Einfluss der Taiga auf global-klimatische Verhältnisse

Mit ca. 559 Gigatonnen (1 Gt = 1 Milliarde Tonne) gespeichertem Kohlenstoff (88 Gt in der lebenden Vegetation, 471 Gt in der akkumulierten toten organischen Substanz) (NEWELL 2004) sind boreale Wälder und Moore die weltweit mit Abstand bedeutendsten Kohlenstoffspeicher. Besonders die großflächigen Moore stellen Senken im globalen CO₂-Haushalt dar. Während frühere Kalkulationen z.B. für die russische Borealis bei Erwärmung noch von einer Steigerung der CO₂-Bindung 160 Mt C/J im Jahr 1993 auf 200–240 Mt C/J im Jahr 2010 ausgingen (LELYAKIN et al. 1997), wird zurzeit durch verstärkte Waldbrandaktivität insgesamt in der Borealis mehr CO₂ freigesetzt als gebunden (TRETER 2000). In den letzten Jahren gelaufene Forschungsprojekte (SIBERIA I und II sowie TCOS-Siberia-Projekt; www.siberia2.uni-jena.de, www.bgc-jena.mpg.de) zeigen auf, dass offensichtlich sibirische (und wahrscheinlich auch andere) Taiga-Regionen deutlich weniger CO₂ speichern als bislang angenommen (nämlich weniger als 20% der fossilen CO₂-Emissionen in Russland), weil die bei Erwärmung verstärkte Zersetzung der im und am Boden reifer und erst recht überalterter Bestände festgelegten organischen Substanz mehr CO₂ an die Atmosphäre liefert als durch die Verlängerung der Vegetationsperiode durch die lebende Vegetation gebunden wird. Eine weitere große Schwierigkeit bei der korrekten Modellierung liegt neben der Berücksichtigung der z. T. großen regionalen Unterschiede in der prinzipiellen Abschätzung, ob die durch Waldbrand oder Einschlag kurzfristig verursachte Freisetzung von CO₂ mittelfristig durch die verstärkte CO₂-Bindung nachfolgender jüngerer Sukzessionsstadien kompensiert wird. Bei verstärkter Auflösung von Permafrost in Mooregebieten kommt es neben der Freisetzung von CO₂ durch Zersetzung von organischer Substanz auch verstärkt zur Freisetzung von unter Luftabschluss anaerob entstandenen, ebenfalls klimawirksamen Methan. Schon vor 20 Jahren stammten aus borealen und subarktischen Feuchtgebieten 30–40 Tg CH₄/Jahr – und

somit ca. 10% des jährlichen atmosphärischen Methan- gehaltes (BARTLETT & HARRISS 1993).

Weitere großflächige Gefährdungen der Taiga

Es kann an dieser Stelle nur kurz auf weitere großflächige Gefährdungen der borealen Waldregionen hingewiesen werden. Dazu gehören u.a.:

- allochthoner Schadstoffeintrag aus Zentraleuropa, dem Nordosten Kanadas und der USA sowie aus Nordostchina in die südborealen Regionen (wo in Südkandinavien die anthropogene Ökosystemversauerung erstmalig festgestellt worden ist), der jedoch in den letzten Jahren geringer geworden ist,
- Tagebergbau von Erzen, nichtmetallischen Rohstoffen, Kohle und anderen fossilen Energieträgern mit Flächenansprüchen, ggfs. Staubbelastungen und häufig anfallenden toxischen Abwässern aus der Erzaufbereitung,
- extrem starke Schädigungen bis hin zur totalen Vernichtung von Wald durch Schwefelemissionen und Schwermetalleinträge – russische Autoren sprechen von »technogener Wüste« (KRYUCHKOV 1992) – in der Umgebung von Verhüttungsbetrieben (z.B. in Nickel, Montchegorsk und Apatity oder Norilsk) in der Borealis selbst (Allerdings ist – fast zynischerweise – festzustellen, dass durch den Einbau von Staubfiltern mit westlicher Unterstützung mittlerweile die Staubemission meist stark reduziert werden können. Diese hatte jedoch in den belasteten Ökosystemen eine Pufferungsfunktion und reduzierte die schädigende Wirkung der Säureinträge. Somit können derzeit die Schwefelmissionen ökologisch stärker negativ wirksam werden),
- Leckagen bei der Förderung und dem Transport von Erdöl und Erdgas mit massiven Methan-Verlusten an die Atmosphäre besonders im nordwestsibirischen Bereich und sporadische Erdölaustritte in die Ökosphäre durch Unfälle wie z.B. die Leckage der »Exxon Valdez« in Südalaska oder die der Pipeline bei Wokuta,
- lokal die Zunahme von monostrukturierten und nur für wenige Jahrzehnte angelegten städtischen Siedlungen mit unzureichender Wasserver- und Abwasserentsorgung und Müllbeseitigung und entsprechenden umwelthygienischen Folgeproblemen besonders in borealen Permafrostgebieten sowie
- Großprojekte zur Hydroenergiegewinnung durch großflächige Überstauungen mit regionalklimatischen Auswirkungen und ggfs. verstärkter Permafrostauflösung.

Schlussbetrachtung

Die Taiga, also die nördlichen Wälder in der borealen Landschaftszone, stellen das flächenmäßig größte zonale Waldökosystem weltweit dar. Trotz oder vielleicht sogar wegen ihrer zu den Bevölkerungs- und ökonomischen Zentren der Erde peripheren Lage ist sie durch Ressourcenextraktion geprägt, zu denen in großem

Maße die Produktion von Holz, Zellstoff und Papier gehören. Dadurch sind massiv die Strukturvielfalt und Biodiversität bedroht. Global Warming wird ebenfalls in verschiedener Weise dieses globale Ökosystem verändern, wie auch die Taiga ihrerseits als CO₂-Senke oder – neuerdings wahrscheinlicher – bei globaler Erwärmung als CO₂-Quelle wirkt.

Literatur

- ACIA [Arctic Climate Impact Assessment] (Ed.) (2004): Impacts of a Warming Arctic. – Cambridge University Press, 139 S. (vgl. auch: ACIA [2004]: The ACIA International Scientific Symposium on Climate Change in the Arctic. AMAP [Arctic Monitoring and Assessment Programme] Report 2004:4 und ACIA [2005]: Der Arktis-Klima-Report. Die Auswirkungen der Erwärmung. – Convent Verlag GmbH, Hamburg, und Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 139 S.)
- BARTLETT, K. B. & R. C. HARRISS (1993): Review and assessment of methane emissions from wetlands. – *Chemosphere* 26: 261-320.
- FLITNER, M., SOYEZ, D. & J.-F. VENZKE (2011): Konflikte um die tropischen und borealen Wälder. – Die borealen Waldländer. – In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE, U. & REUBER, P. (Hrsg.): *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*, 2. Aufl., Spektrum/Elsevier, Heidelberg, 1259-1266.
- IASC [International Arctic Science Committee] (Ed.) (1999): Impacts of Global Climate Change in the Arctic Regions. – Report from a Workshop on the Impacts of Global Change, 25.-26. April 1999, Tromsø, 59 S.
- JUDAY, G. P., BARBER, V. A., VAGANOV, E. & S. SPARROW (2004): Boreal Forest and Agricultural Responses to Climate Warming. – In: The ACIA International Scientific Symposium on Climate Change in the Arctic. AMAP [Arctic Monitoring and Assessment Programme] Report 2004:4.
- GOLDAMMER, J. G. (1995): Vegetationsbrände: Auswirkungen auf Ökosysteme, Atmosphäre und Klima. – *Die Erde* 1995/1: 35-51.
- KRYUCHKOV, V. V. (1992): Maximal anthropogenic loading and condition of northern ecosystems. – *The Soviet Journal of Ecology* 1992, 155-166.
- LEYAKIN, A. L., KOKORIN, A. O. & I. M. NAZAROV (1997): Vulnerability of Russian forests to climate changes. Model estimation of CO₂ fluxes. – *Climatic Change* 36: 123-133.
- NEWELL, J. (2004): *The Russian Far East. A Reference Guide for Conservation and Development*. – 2nd edition, Daniel & Daniel Publ., McKinleyville, CA, 466 S.
- TRETER, U. (1993): Die borealen Waldländer. – Westermann, Das Geographische Seminar, Braunschweig, 210 S.
- TRETER, U. (2000): Rolle der borealen Waldländer im globalen CO₂-Haushalt. Eine ökosystemare Analyse. – *Geogr. Rdsch.* 52 (12): 4-11.
- TROLL, C. (1964): Karte der Jahreszeiten-Klimate der Erde. – *Erdkunde* 18, 5-28.
- TUHKANEN, S. (1984): A circumboreal system of climatic-phyto-geographical regions. – *Acta Botanica Fennica* 127: 50 S.
- VENZKE, J. F. (1998): Die Borealis: Gefährdete Waldzone im Norden. – In: »Globaler Wandel – Welterbe«, Heidelberg Geogr. Gesellsch. Journal 13, 88-102.
- VENZKE, J. F. (2008): *Die Borealis. Die Zukunft der nördlichen Wälder*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 180 S.
- WUNDRAM, D. (2011): Umweltveränderungen in der subpolaren und borealen Ökzone. – In: ANHUF, D., FICKERT, T. & GRÜNINGER, F. (Hrsg.): *Ökozonen im Wandel*, Passauer Kontaktstudium Geographie 11, Passau, 53-66.
- www.siberia2.uni-jena.de www.bgc-jena.mpg.de

Kontakt:

Prof. Dr. Jörg-Friedhelm Venzke

Dr. Marko Langer

Institut für Geographie - Universität Bremen

jfvenzke@uni-bremen.de