

Zur Entwicklung der Vegetationsperiode in Nordostsibirien in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts

von Marco Langer¹ und Jörg-Friedhelm Venzke¹

Zusammenfassung: Auf der Grundlage von Tagestemperaturdaten von 13 Klimastationen wird die Veränderung der Vegetationsperiode im boreal-subarktischen Nordostsibirien während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts dargestellt und diskutiert. Dabei wird nicht nur deutlich, dass sich zwar auch in der Länge und Intensität der Vegetationsperiode die Tendenz zur allgemeinen Klimaerwärmung wieder findet, dass aber die Analyse auf der Basis von Tageswerten wesentlich mehr vegetationsökologische Detailinformationen bereitstellt als die auf stark generalisierenden Jahresmittel- oder Jahreszeitentemperaturen beruhende, übliche Darstellung. Darüber hinaus ist eine relativ geringe Korrelation der zur Definition der Vegetationsperiode herangezogenen klimatischen Kennwerte mit den Jahres- und Jahreszeitenmitteltemperaturen auffällig.

Abstract: By examples of daily temperatures of 13 meteorological stations the variation of the growing season in the boreal-subarctic northeast of Siberia during the second half of the 20th century is presented and discussed. It is obvious that the general climatic warming can be found also in duration and intensity of the growing season, but that an analysis by means of daily data meets the vegetation ecological interpretation much more than annual and seasonal mean temperature data, as it is usual. Furthermore a relatively low correlation between the climatic parameter of growing season definition and the annual and seasonal mean temperature data is remarkable.

PROBLEMSTELLUNG

Der weltweite Anstieg der Lufttemperaturen seit dem Spätglazial und während des Holozäns ist durch Proxydaten und seit Beginn der Instrumentenbeobachtungen auch messtechnisch exakt umfangreich dokumentiert (zusammenfassend z.B. McBean 2005), und auch die zukünftige Erwärmung der Atmosphäre ist mittlerweile durch tragfähige Modelle (u.a. CGCM2, CSM_1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL-R30_c, HadCM3) belegt (zusammenfassend z.B. KÄLLÉN & KATSOV 2005 und LECKEBUSCH et al. 2006). Die genannten Modelle gehen zum einen von (optimistischen) so genannten B2-Emissions-Szenarien aus, bei denen die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2100 auf 10,4 Milliarden Menschen angewachsen ist, Kohle zu 22 % die Primärenergie liefert, 49 % des Weltenergieverbrauchs durch Quellen gewonnen wird, die kein CO₂ freisetzen, und auf lokaler und regionaler Ebene Lösungen zum Umweltschutz und zur sozialen Gerechtigkeit umgesetzt werden (KÄLLÉN & KATSOV 2005). In diesen Modellrechnungen wird deutlich, dass die höheren Breitengrade vom „Global Warming“ stärker betroffen sein werden als der Rest der Erde: Während die Prognosen für die gesamte Erde bei einem Anstieg zwischen 3-5 K liegen, sagen sie für Gebiete nördlich von 60 °N einen Anstieg von 4-7 K bis zum Jahr 2100 voraus. Für Zentraljakutien werden mittlere jährliche Anstiege der Jahresmitteltemperatur von 0,063 bis 0,066 K angenommen, was für Jakutsk bedeuten würde, dass die auf der

Basis des Trends (1960-1995) hochgerechnete Jahresmitteltemperatur von -8,39 °C im Jahr 2010 bis 2056 um 1,61 K auf -6,83 °C ansteigt (PERK et al. 2004). Im Vergleich dazu werden für die ozeanisch geprägte nordeuropäische Subarktis und Borealis Temperaturanstiege von 0,3 K (Island) bis 0,45 K (Nordostfinland) pro Dekade angenommen (JÓHANNESON et al. 1995). Werden bezüglich des Bevölkerungswachstums und der CO₂-Produktion bei der Energiebereitstellung pessimistischere Annahmen zugrunde gelegt (sog. A2-Szenarien), liegt der prognostizierte Temperaturanstieg in nördlichen Breiten bis zum Jahr 2100 noch um ca. 2 K höher!

Zur Abschätzung der landschaftsökologischen Konsequenzen einer Temperaturerhöhung sollten jedoch detailliertere Analysen der Temperaturverhältnisse als „nur“ die Betrachtung der Jahres- oder Jahreszeitenmitteltemperaturen herangezogen werden, wie dies im Allgemeinen bei den globalen Modellierungen geschieht.

Bei der Beschäftigung mit vegetations- (und auch agrar-)ökologischen Fragestellungen ist die Frage nach der Entwicklung der Vegetationsperiode, also der Zeit im Jahr, in der die Pflanzen durch Photosynthese zur Nettoprimärproduktion fähig sind, von großem Interesse. Ökophysiologische Experimente am Jungwuchs westsibirischer Baumarten haben beispielsweise eine Steigerung der Nettoprimärproduktion um 19,6 % (*Pinus sibirica*) bzw. 12,7 % (*Larix sibirica*) bei einer – allerdings massiven – Temperaturerhöhung um 5 K während der Wachstumsperiode erbracht; beträchtlich höher (um 100 %) war sie, wenn zur Temperaturerhöhung auch noch eine Verdopplung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes kam (MUDRIK & VIL'CHEK 2001, JUDAY 2005)! Außerdem ist bekannt, dass die Wärmesumme in der ersten Phase der Vegetationsperiode entscheidend ist für den Beginn der Pollenproduktion; in der finnischen Borealis sind beispielsweise im Süden ca. 10 % (für *Picea abies*) und ca. 17 % (für *Pinus silvestris*) und im Norden 22 % (für *P. silvestris*) der Gesamtwärmesumme der Vegetationsperiode für den Beginn der Pollenproduktion nötig (SARVAS 1966). Bei der genauen klimatologischen Bestimmung der Vegetationsperiode mit ihrer thermischen Intensität und Variabilität ist also eine Analyse der Klimastatistiken auf Tagesdatenbasis notwendig.

Für die hochkontinental-boreale Region des nordöstlichen Sibiriens (Abb. 1) soll hiermit die Veränderung der Vegetationsperiode während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, in der sich die allgemeine globale Erwärmung deutlich durchsetzte, regional differenziert dargestellt werden und damit ein Beitrag zur besseren Kenntnis der klimaökologischen Relevanz der allgemeinen Atmosphärenenerwärmung geleistet werden.

¹ Universität Bremen, Institut für Geographie & Zentrum für Umweltforschung und Umwelttechnologie, Postfach 33 04 40, D-28334 Bremen; <mlanger@uni-bremen.de>, <jfvenzke@uni-bremen.de>

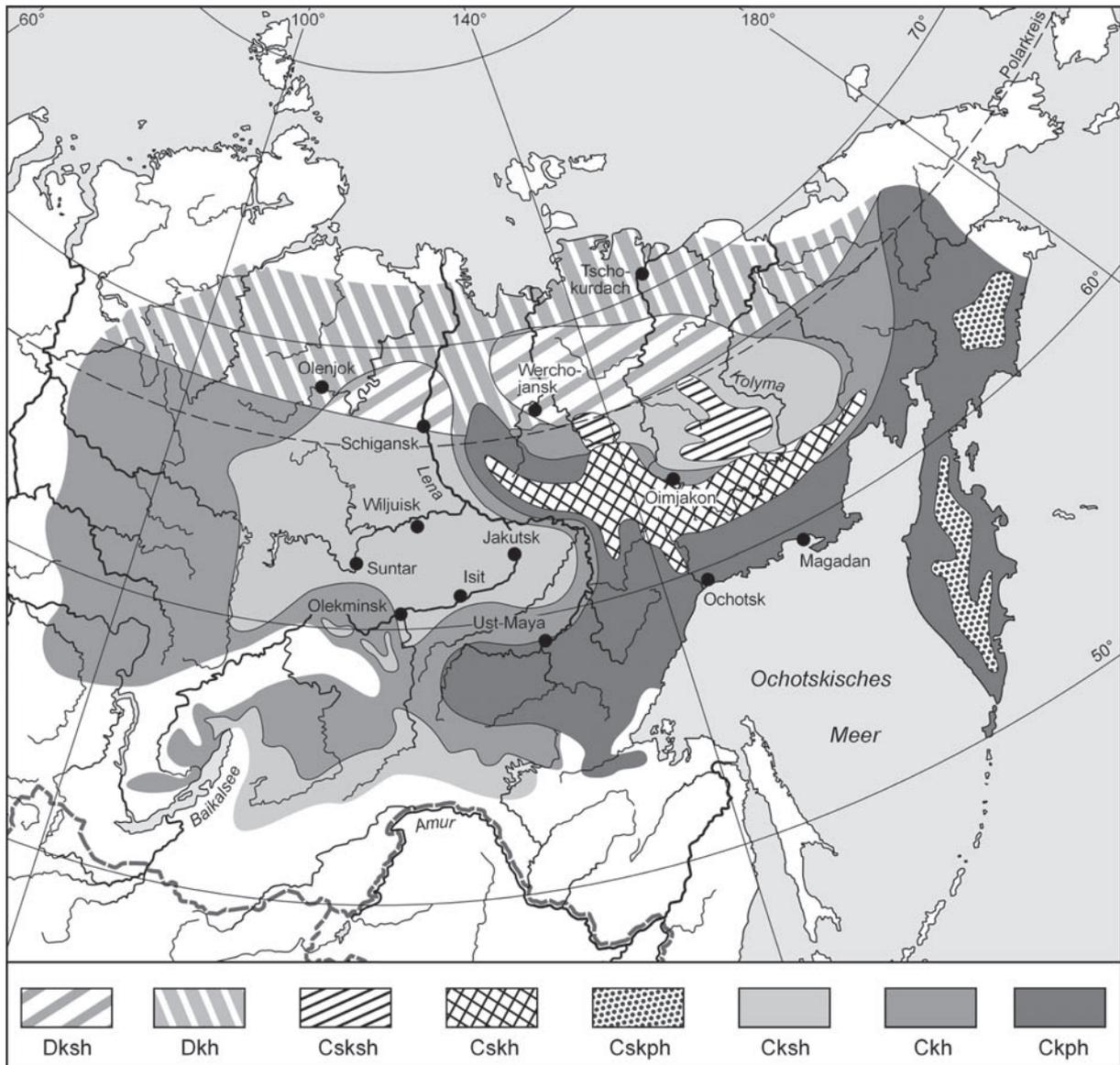


Abb. 1: Karte von Nordostsibirien mit Lage den untersuchten Klimastationen; klimageographische Gliederung nach LAUER & RAFIQPOOR (2002). Darin bedeuten: Dksh = Polarregion mit mikrothermer Vegetationsperiode (VP), subhumid; Dkh = Polarregion mit mikrothermer VP, humid; Csksh = kalte Mittelbreiten mit oligothermer VP, subhumid; Cskh = kalte Mittelbreiten mit oligothermer VP, humid; Cskph = kalte Mittelbreiten mit mikrothermer VP, subhumid; Ckh = kalte Mittelbreiten mit mikrothermer VP, humid; Ckph = kalte Mittelbreiten mit mikrothermer VP, perhumid.

Fig. 1: Map of northeastern Siberia with selected climate stations; climatic geographical differentiation follows LAUER & RAFIQPOOR (2002): Dksh = polar region with short growing season (gs), subhumid; Dkh = polar region with short gs, humid; Csksh = cold mid latitudes with very short gs, subhumid; Cskh = cold mid latitudes with very short gs, humid; Cskph = cold mid latitudes with very short gs, perhumid; Cksh = cold mid latitudes with short gs, subhumid; Ckh = cold mid latitudes with short gs, humid; Ckph = cold mid latitudes with short gs, perhumid.

KLIMA- UND VEGETATIONSGEOGRAPHISCHE CHARAKTERISTIK NORDOSTSIBIRIENS

Die naturgeographischen Gegebenheiten Nordostsibiriens werden bei einer Lage zwischen ca. 72-59 °N sowie ca. 110-150 °E durch den planetarischen, durch einen beträchtlichen kontinental-ozeanischen sowie einen hypsometrischen Gradienten bzw. Wandel bestimmt. Daraus ergeben sich für den zu betrachtenden Raum Jahresmitteltemperaturen zwischen ca. -15 und -3 °C bei extremen Jahrestemperaturamplituden, die auf der Basis von Monatsmitteln bei 65 K, auf der Basis von Tagesmaxima und -minima sogar im dreistelligen Bereich liegen können (Tab. 1).

Die spezifischen klimageographischen und geökologischen Verhältnisse haben eine boreale Vegetation zur Folge, die überwiegend durch artenarme *Larix dahurica*-Wälder bestimmt wird (ERMAKOV et al. 2002; zu den allgemein-geökologischen Verhältnissen Zentraljakutiens vgl. auch VENZKE 1994). Zu den ozeanischer getönten Küstenregionen des Ochotskischen Meeres hin nimmt die Biodiversität der Waldvegetation zu (GRISHIN 1995). In den ostsibirischen Gebirgen liegt die obere Waldgrenze, die meist von *Pinus pumila* gebildet wird, zwischen 500-700 m ü.M. (Putorana-Berge, nördliches Mittelsibirisches Bergland) und 1300-1400 m ü.M. (transbaikalische Olekminsky-Bergketten) (GORCHAKOVSKY & SHIYATOV 1978). Zur allgemeinen geökologischen Charakteristik sowie aktuellen und zukünftigen Nutzungsproblematik

Station	Höhe über Meer (m)	Jahresmitteltemperatur 1961-90 (°C)	kältestes Monatsmittel 1961-90 (°C)	Abweichung 1991-2000 gegenüber 1961-90 (K)	wärmstes Monatsmittel 1961-90 (°C)	Abweichung 1991-2000 gegenüber 1961-90 (K)	absolutes Tagestemperaturmaximum 1951-2000 (°C)	absolutes Tagestemperaturminimum 1951-2000 (°C)
Tschorkurdach	48	-14,0	-36,2	+0,2	9,7	+0,8	31,6 (1952)	-54,4 (1964)
Olenjok	127	-12,5	-40,0	+2,1	14,6	+0,2	34,4 (1984)	-62,9 (1959)
Werchojansk	137	-15,2	-47,5	+1,0	15,5	+1,2	35,8 (1973)	-63,0 (1983)
Schigansk	58	-11,7	-40,4	+1,6	16,0	+0,6	33,9 (1954)	-59,6 (1982)
Wiljuisk	189	-9,1	-38,9	+1,5	18,2	+0,5	37,4 (1980)	-58,7 (1979)
Oimjakon	726	-16,4	-48,4	+0,2	13,9	+0,2	32,4 (2000)	-65,4 (1973)
Suntar	124	-7,6	-35,3	+1,0	18,1	-0,3	36,9 (1988)	-59,5 (1988)
Jakutsk	103	-10,0	-41,9	+2,6	18,8	+0,5	36,8 (1963)	-60,3 (1951)
Olekminsk	226	-6,2	-33,3	+1,1	18,0	+0,7	37,7 (1986)	-56,9 (1966)
Isit	118	-8,2	-37,2	+1,6	17,4	+0,8	36,3 (1952)	-54,9 (1993)
Ust-Maja	175	-9,8	-42,3	+2,5	17,8	+0,5	35,3 (1970)	-59,7 (1970)
Magadan	118	-3,3	-18,9	-0,2	11,9	+0,7	33,4 (2001)	-48,0 (2002)
Ochotsk	6	-4,5	-22,9	+0,8	13,2	0,0	30,7 (1955)	-39,1 (1971)

Tab. 1: Klimatische Kennwerte der untersuchten Klimastationen in Nordostsibirien.

Tab. 1: Climate characteristics of the investigated climate stations in Northeast Siberia.

in der Borealis, die auch klimarelevant sein kann, vgl. VENZKE & LANGER (2006).

METHODIK

Für die Analyse (LANGER 2004) wurden Tagestemperaturdaten (Tagesminimum, Tagesmaximum, Tagesmittelwert, d.h. arithmetisches Mittel der in verschiedenen Zeitabschnitten gemessenen täglichen Temperaturwerte) benutzt, wie sie vom Research Institute of Hydrometeorological Information, Obninsk, Russland und seit 1972 in Zusammenarbeit mit dem National Climate Data Center, Asheville, North Carolina, USA, verwaltet werden (ROMANOVSKY 2003). Für eine räumlich differenzierte Betrachtung wurden die Teilregionen:

- (1) Nordjakutien, d.h. D-Klimate nach LAUER & RAFIQPOOR 2002 mit den Stationen Tschokurdach, Olenjok, Werchojansk und Schigansk,
- (2) Zentraljakutien, d.h. nördliches Jakutisches Becken mit den Stationen Suntar, Wiljuisk und Jakutsk sowie die Station Oimjakon am Oberlauf der Indigirka,
- (3) Südjakutien, d.h. südliches Jakutisches Becken mit den Stationen Olekminsk, Isit und Ust-Maja sowie
- (4) Ochotskisches Meer, d.h. nördliche Küstenregion des Ochotskischen Meeres mit den Stationen Ochotsk und Magadan gebildet.

In dieser Untersuchung wird die Vegetationsperiode definiert als die Summe der Tage mit einer Tagesmitteltemperatur von $\geq +5$ °C, die Wärmesumme während der Vegetationsperiode wird als die Summe aller Tagesmitteltemperaturen über diesem Schwellenwert berechnet (LAUER & RAFIQPOOR 2002). Sommertage werden durch eine Tageshöchsttemperatur von $\geq +25$ °C und Hitzetage durch eine Tageshöchsttemperatur von $\geq +30$ °C bestimmt.

Winterliche Tiefsttemperaturen haben zwar nichts mit der Vegetationsperiode zu tun, sind allerdings im Betrachtungsraum vegetationsökologisch durchaus bedeutsam. Im Allgemeinen wird die Grenze der Frosthärte von immergrünen Koniferen (vor allem bei den Gattungen *Picea* und *Pinus*) bei

-40 °C angesetzt; jenseits, also unterhalb dieses Wertes, erlangen nadelabwerfende Lärchen (*Larix*) Konkurrenzvorteile. Außerdem leiden sie in der frühjährlichen Auftau- und Schneeschmelzperiode mit schon beträchtlichem Verdunstungspotenzial nicht so sehr unter Frosttrocknis. Deshalb ist das klimastatistische Material auch bezüglich der Veränderung der extremen Winterhärte unter Berücksichtigung dieses Schwellenwertes untersucht worden.

ERGEBNISSE

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts stiegen die Jahresmitteltemperaturen in allen betrachteten Teilregionen Nordostsibiriens tendenziell an. Dabei sind die erkennbaren Trends in Nordjakutien deutlich unterschiedlicher (zwischen +0,09 bis +0,54 K in 10 Jahren) als in den anderen Regionen. Auffällig sind in den Kurvenverläufen die Maxima in den 1960er- und frühen 1970er-Jahren sowie Mitte der 1990er-Jahre. Dabei fand im Betrachtungszeitraum der erste Anstieg der Jahresmitteltemperaturen in Südjakutien und in der ozeanischer getönten Region am Ochotskischen Meer früher statt, Nordjakutien zog erst mit einer Verzögerung von einigen Jahren – dann allerdings mit größeren Steigerungsraten – nach. Bemerkenswert ist die Abkühlungstendenz während der letzten Jahre an mehreren Stationen, besonders in Werchojansk, Magadan und Ochotsk, zwischen denen kein offensichtlich klimageographischer Zusammenhang besteht (Abb. 2).

Dieser Anstieg der Jahresmitteltemperaturen beruht im Wesentlichen auf dem Anstieg der Wintertemperaturen. Hierbei können positive Abweichungen während des Bezugszeitraumes 1991-2000 gegenüber dem Mittelwert von 1951-1960 von z.T. über 10 K festgestellt werden, während die Sommermitteltemperaturen im Allgemeinen nur um bis zu 2 K angestiegen sind. Exemplarisch sind die Gänge der Sommer- und Wintertemperaturen für die Stationen Ust-Maja, Jakutsk und Werchojansk in Abbildung 3 dargestellt, wo diese Tendenz deutlich wird, allerdings auch der Umstand, dass an diesen Stationen die Wintertemperaturen in den letzten Jahren allerdings wieder abzunehmen scheinen. Gegenüber dem Mittel-

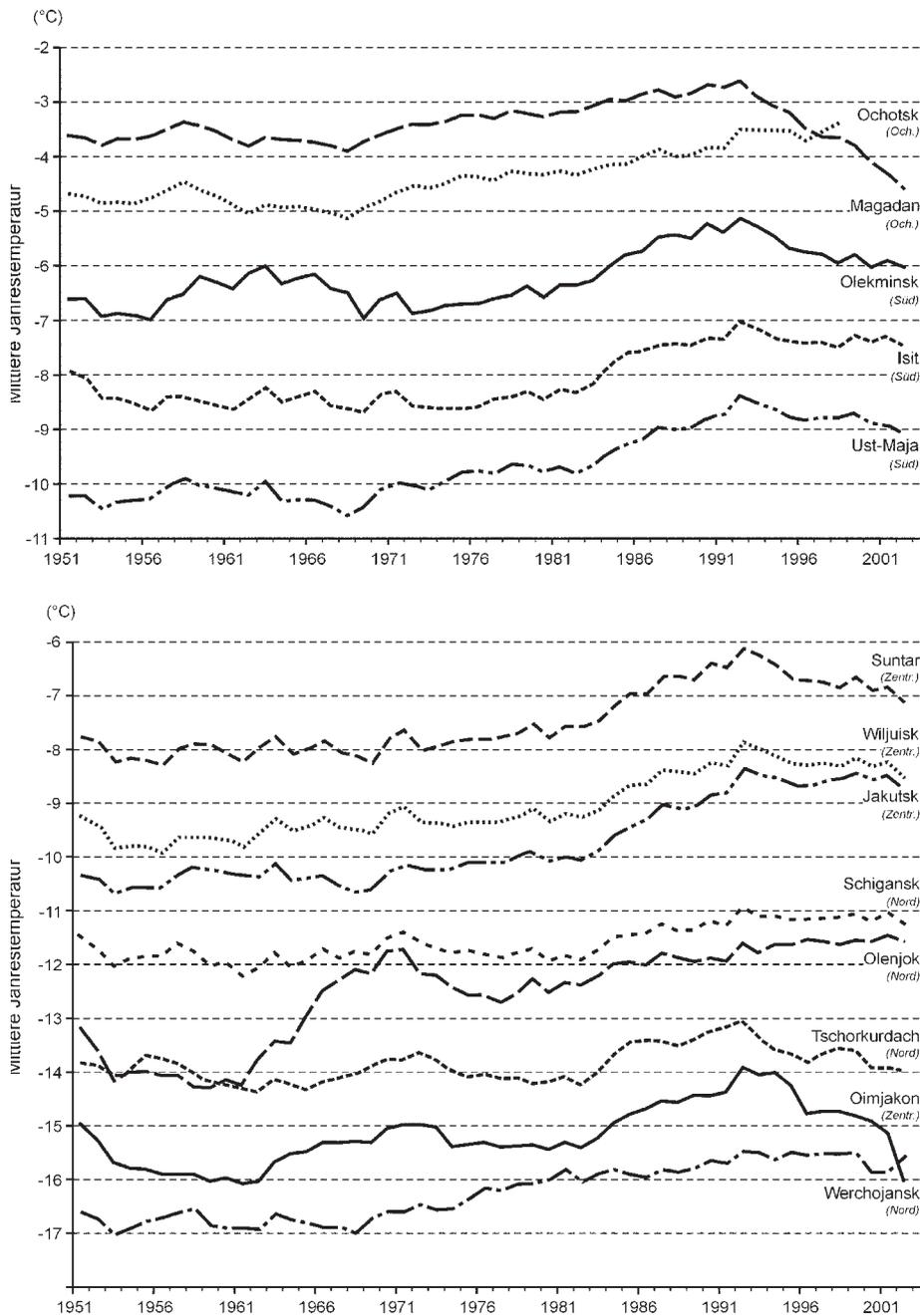


Abb. 2: Gang der mittleren Jahrestemperaturen (neun Jahre übergreifendes Mittel) von 13 ausgewählten Klimastationen, differenziert nach Nord-, Zentral- und Südjakutien sowie am Ochotskischen Meer gelegen.

Fig. 2: Course of mean annual temperature (nine years shifting means) of 13 selected climate stations, differentiated in north, central, and south Yakutia and the coastal region of the Sea of Okhotsk.

wert des gesamten Betrachtungszeitraumes (1951-2002) liegt die positive Abweichung der Wintertemperaturen zwischen ca. 1-4,5 K. Auch die Frühjahrstemperaturen weisen besonders in Zentral- und Südjakutien relativ hohe Abweichungen auf. Die Sommertemperaturen zeigen dagegen – mit Ausnahme der „Kältepol-Stationen“ Werchojansk und Oimjaton – Abweichungen gegenüber dem Mittel von nur unter +0,5 K (Abb. 4). PERK et al. (2004) teilen für die Zeitspanne 1960 bis 1995 für Zentraljakutien bei einem mittleren jährlichen Anstieg der Jahresmitteltemperatur von 0,06 K einen entsprechenden Anstieg der Sommertemperatur um 0,1 und den der Wintertemperatur um 0,10 K mit.

Bei einer Betrachtung der Veränderungen der Temperaturen während der Vegetationsperiode auf der Basis von Monatsmittelwerten zwischen den Bezugszeiträumen 1951-1960 und 1991-2000 wird u.a. deutlich, dass bei den zentral- und süd-

jakutischen Stationen die Zunahme der sommerlichen Temperaturen vornehmlich durch höhere Monatsmittel im Mai (+1 bis 1,7 K) zustande gekommen sind, während der September meist sogar geringfügig negative Abweichungen aufweist. An den nordjakutischen Stationen sind besonders die hoch- bis spätsommerlichen Monate wärmer geworden (Abb. 5).

An den süd- und zentraljakutischen Stationen dauert die Vegetationsperiode etwa 130 Tage und weist eine geringe Verlängerung während des Beobachtungszeitraumes – mit einem Maximum in den 1980er-Jahren – auf (Abb. 6). Der Trend des Anstiegs der Anzahl der Tage mit Tagesmitteltemperaturen von $\geq +5$ °C liegt hier wie auch am Ochotskischen Meer zwischen +0,4 bis +0,6 Tage je 10 a. Interessanterweise gilt dies trotz des ebenfalls feststellbaren früheren Einsetzens der Vegetationsperiode nicht für die nordjakutische Taiga und im Waldgrenzökoton mit einer mittleren Vegetationsperiode von

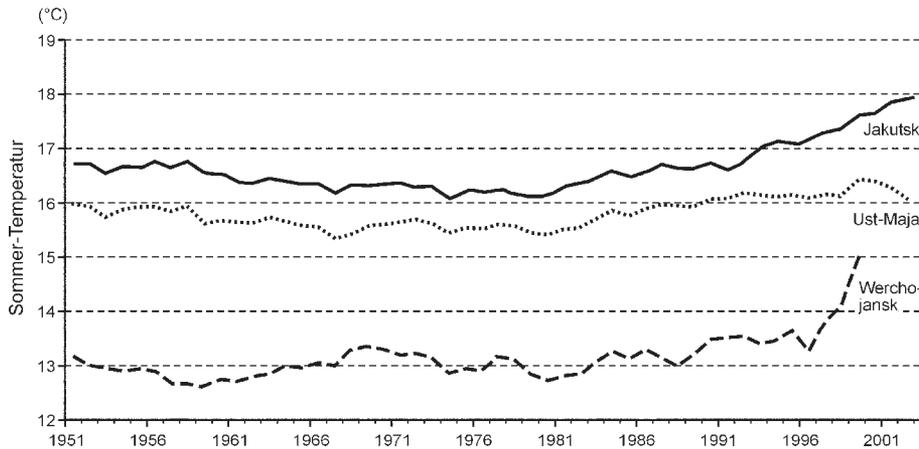


Abb. 3: Gang der Winter- (Dezember, Januar, Februar) und Sommertemperaturen (Juni, Juli, August) für Ust-Maja, Jakutsk und Werchojansk.

Fig. 3: Course of winter (December, January, February) and summer temperatures (June, July, August) of Ust-Maja, Yakutsk and Verkhoyansk.

ca. 70-110 Tagen, wo ein negativer Trend (-0,8 Tagen je 10 a) ermittelt werden konnte. Dies lässt sich jedoch dadurch erklären, dass bei einer Verlängerung der Vegetationsperiode hier zwischen dem ersten und dem letzten Tag, bei dem die Schwellenwerttemperatur überschritten wird, durchaus mehr Tage mit Tagesmitteltemperaturen von unter +5 °C liegen können.

Gemäß dem allgemeinen Trend zur Erhöhung der Sommertemperaturen und Verlängerung der Vegetationsperiode stieg auch die während der Vegetationsperiode einkommende Wärmesumme (Abb. 7). Dabei ist es interessant, dass die süd- und zentraljakutischen Gebiete und die Küstenregion am Ochotskischen Meer einen deutlich höheren Trend mit Werten zwischen +19 und +28,8 K je 10 a aufweisen als Nordjakutien (+4,3 K je 10 a). Es existiert auch ein erkennbarer Gradient beim Sommermonatsanteil an der Wärmesumme während der Vegetationsperiode: Während er in Nordjakutien bei ca. 90 % liegt, sinkt er in Zentraljakutien auf ca. 84 % und in Südjakutien auf ca. 81 %; am ozeanisch getönten Ochotskischen Meer liegt der Wert bei nur ca. 79 %.

Die hochkontinentale Klimasituation in Zentral- und Südjaku-

tien kommt u. a. durch die relativ hohe Anzahl von Sommer- (ca. 31) und auch Hitzetagen (ca. 8) zum Ausdruck gegenüber der Küstenregion des Ochotskischen Meeres, wo lediglich Ochotsk zwei Sommertage im Mittel aufweist. In Nordjakutien erreicht Werchojansk mit etwa 22 Sommertagen höhere Werte als das viel höher gelegene zentraljakutische Oimjakon (ca. 13 Sommertage); beides sind ja bekanntlich die weltweit kältesten außerpolearen Stationen. In Zentraljakutien – mit Ausnahme von Oimjakon – und besonders in Südjakutien lässt sich erkennen, dass zum Ende des Betrachtungszeitraumes die jährliche Anzahl der Sommertage meist die Werte der Dekade 1951-1960 wieder erreicht oder sogar übertrifft (Abb. 8).

Der dokumentierten Entwicklung von zunehmenden Jahresmittel- und in besonderem Maße Wintermitteltemperaturen (Abb. 4) entspricht die – im Allgemeinen recht kontinuierlich erfolgte – Abnahme der Anzahl von Tagen mit mittleren Tagestemperaturen von ≤ -40 °C (Abb. 9). Dabei ist die Abnahme – vergleicht man die Werte der Dekade 1951-1960 mit denen der Dekade 1991-2000 – in den winterkältesten Regionen mit 12-14 % (Oimjakon bzw. Werchojansk) am geringsten und im zentraljakutischen Becken (50 % in Jakutsk) am größten.

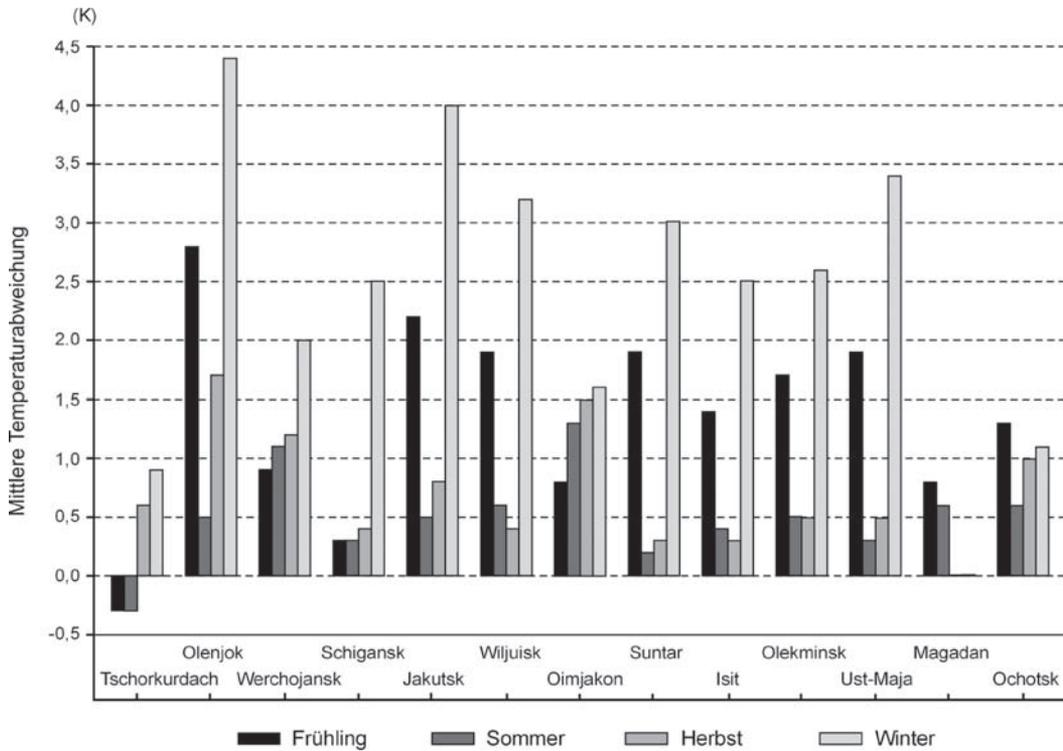


Abb. 4: Mittlere Abweichung der Jahreszeitentemperatur vom Mittelwert (1951-2002).

Fig. 4: Mean deviation of seasonal temperatures from the mean value (1951-2002).

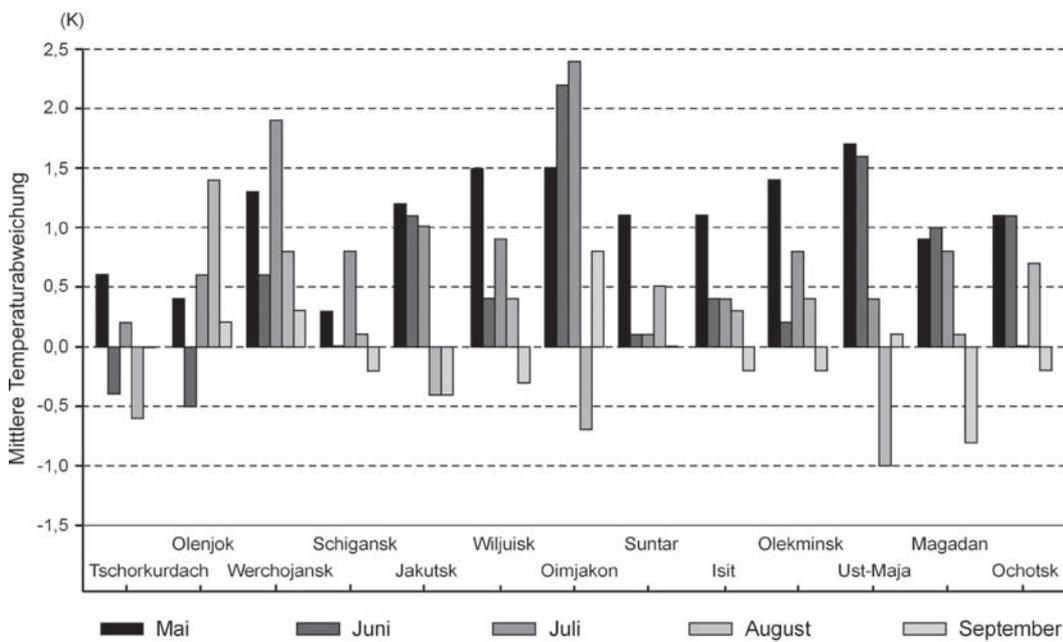


Abb. 5: Mittlere Abweichung der Monatsmitteltemperaturen für Mai, Juni, Juli, August und September vom Durchschnittswert 1951-1960 während des Beobachtungszeitraumes 1991-2000.

Fig. 5: Mean deviation of monthly mean temperatures (May, June, July, August and September) from the mean value (1951-1960) during the period of 1991-2000.

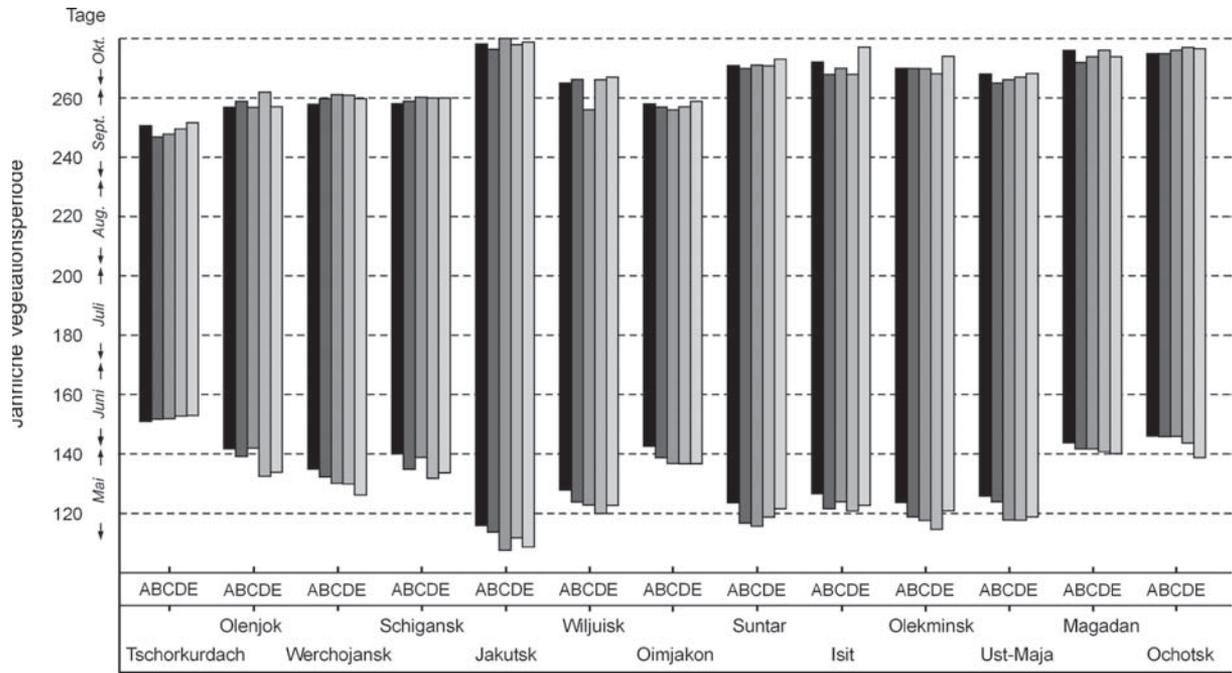


Abb. 6: Veränderung der Dauer der Vegetationsperiode in fünf Dekaden (in absoluten Tagen) (A = 1951-1960, B = 1961-1970, C = 1971-1980, D = 1981-1990, E = 1991-2000).

Fig. 6: Changes in the duration of the growing season (in absolute days) (A = 1951-1960, B = 1961-1970, C = 1971-1980, D = 1981-1990, E = 1991-2000).

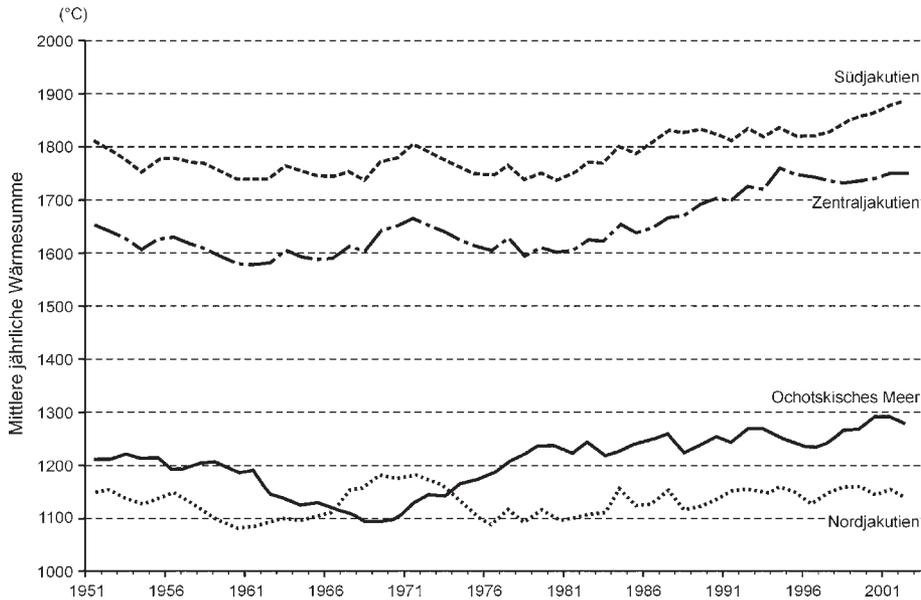


Abb. 7: Gang der mittleren Wärmesumme (über 5 °C-Tagesmitteltemperaturen; neun Jahre übergreifendes Mittel) in Nord-, Zentral- und Südjakutien sowie der Küstenregion am Ochotskischen Meer.

Fig. 7: Course of the mean temperature sum (threshold value 5 °C daily mean temperature; nine-years mean), differentiated in north, central, and south Yakutia and the coastal region of the Sea of Okhotsk.

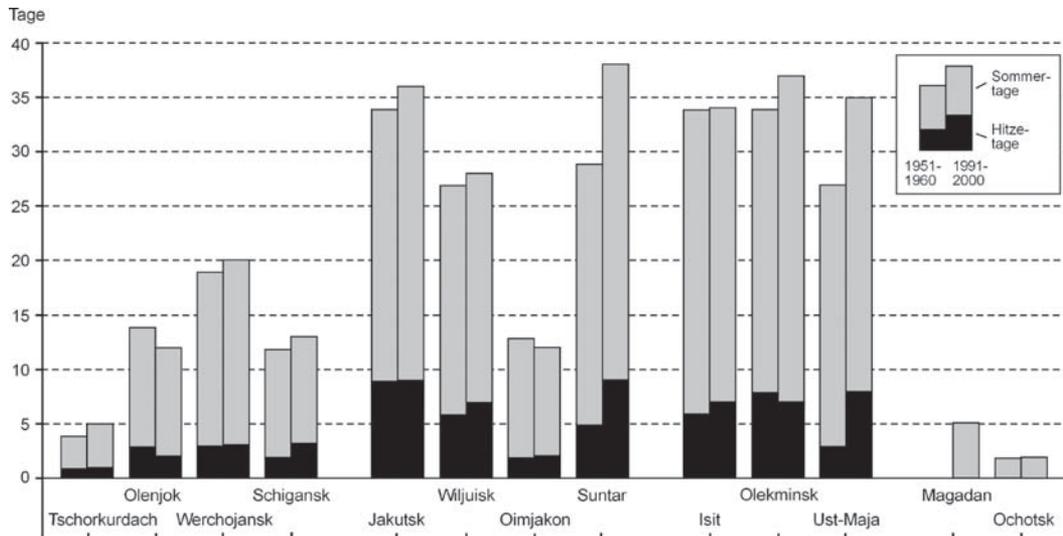


Abb. 8: Mittlere Anzahl von Sommer- und Hitzetagen in der Dekade 1951-1960 (links) und 1991-2000 (rechts).

Fig. 8: Mean number of summer and heat days during the decade 1951-1960 (left) and 1991-2000 (right).

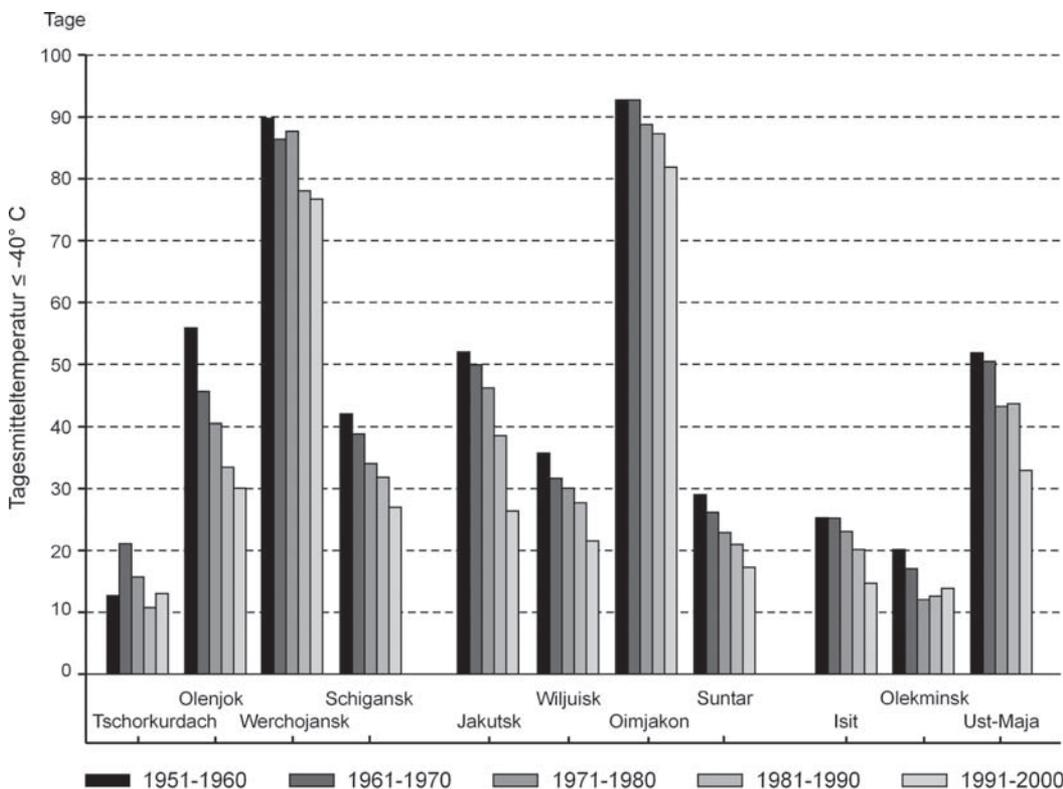


Abb. 9: Mittlere Anzahl von Tagen mit mittleren Tagesmitteltemperaturen von $\leq -40^\circ\text{C}$ während der fünf Dekaden der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts.

Fig. 9: Mean number of days with mean daily temperatures below -40°C during the five decades of the second half of the 20th century.

DISKUSSION

Es ist natürlich nicht verwunderlich, wenn die thermische Entwicklung der Vegetationsperiode in Nordostsibirien sowohl in ihrer Dauer als auch ihrer Intensität im Prinzip der allgemeinen Entwicklung der Jahresmittel- und Jahreszeitentemperatur folgt. Somit ist bis auf die Stationen am Ochotskischen Meer während der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts ein durchgängiger Anstieg der Wärmesummen, die während der Vegetationsperiode einkommen, festzustellen. Allerdings zeigen sich bei genauerer Betrachtung der Beziehungen zwischen jährlichen und sommersaisonalen Mitteltemperaturen einerseits und der Dauer und Intensität der Vegetationsperiode andererseits sowie auch zwischen Dauer und Intensität (definiert durch die Wärmesumme) der Vegetationsperiode erstaunlicherweise nur schwache Abhängigkeiten (Tab. 2). Die

Jahresmitteltemperaturen korrelieren mit den Wärmesummen während der Vegetationsperiode nur gering (Korrelationskoeffizienten von 0,54 für Nordjakutien, 0,62 für Zentraljakutien, 0,53 für Südjakutien und 0,62 für die Küstenregion des Ochotskischen Meeres bei Signifikanzniveaus von $\geq 95\%$). Eine nur leicht bessere Korrelation findet sich zwischen den Sommermitteltemperaturen (meteorologische Definition des Sommers durch die Monate Juni, Juli und August) und den Vegetationsperiode-Wärmesummen (Korrelationskoeffizienten von 0,72 für Nordjakutien, 0,78 für Zentraljakutien, 0,62 für Südjakutien und 0,87 für die Küstenregion des Ochotskischen Meeres). Wird durch diese relativ niedrigen Korrelationskoeffizienten schon deutlich, wie unzureichend es ist, die Jahres- und Sommermitteltemperaturen zur Einschätzung der vegetationsökologischen Bedeutung des Energieeintrages während der Wachstumsphase zu benutzen, so sind die Korre-

	Nordjakutien			Zentraljakutien			Südjakutien			Ochotskisches Meer		
	ST/WS	ST/VP	WS/VP	ST/WS	ST/VP	WS/VP	ST/WS	ST/VP	WS/VP	ST/WS	ST/VP	WS/VP
1951-1960	0,89	0,68	0,89	0,72	-0,11	0,55	0,83	0,00	0,35	0,81	0,35	0,82
1961-1970	0,95	0,67	0,85	0,61	-0,31	0,51	0,24	-0,36	0,58	0,89	0,54	0,81
1971-1980	0,96	0,70	0,86	0,89	0,47	0,80	0,67	-0,15	0,53	0,92	0,54	0,78
1981-1990	0,95	0,77	0,91	0,85	0,45	0,84	0,70	-0,37	0,88	0,86	0,37	0,70
1991-2000	0,76	0,69	0,72	0,65	-0,73	-0,10	0,63	-0,75	-0,16	0,81	0,21	0,55
1951-2002	0,72	0,61	0,46	0,78	0,00	0,56	0,62	-0,25	0,46	0,87	0,45	0,74

Tab. 2: Korrelationskoeffizienten zwischen Sommertemperatur (ST), Länge der Vegetationsperiode (VP) und Wärmesumme (WS) während der Vegetationsperiode (WS) für die einzelnen nordostsibirischen Teilregionen.

Tab. 2: Correlation coefficients between summer temperature (ST), duration of growing season (VP), and temperature sum (WS) during growing season (WS) for selected regions in Northeast Siberia.

lationen zwischen den Temperaturkennwerten und der Dauer der Vegetationsperiode dafür erst recht unzureichend. Die Länge der Vegetationsperiode korreliert nämlich mit der Jahresmitteltemperatur in Nordjakutien zwar noch relativ hoch ($r = 0,82$), die Korrelationskoeffizienten fallen allerdings in südlichen und ozeanischen Regionen des Betrachtungsraumes stark ab ($r = 0,52$ für die Küstenregion des Ochotskischen Meeres und $r = 0,29$ für Zentral- und Südjakutien). Überhaupt keine bzw. eine negative Korrelation ergibt sich zwischen der Dauer der Vegetationsperiode und den Sommermitteltemperaturen in Zentral- und Südjakutien; in Nordjakutien und am Ochotskischen Meer, wo Anfang und Ende der Vegetationsperiode meist im Wesentlichen in der meteorologischen Sommersaison liegen, sind schwache Beziehungen zu erkennen ($r = 0,61$ bzw. $0,45$).

Übrigens sind die Beziehungen zwischen der Intensität (Wärmesumme) und Dauer der Vegetationsperiode ebenfalls nur schwach (Korrelationskoeffizienten von $0,46$ für Nordjakutien, $0,56$ für Zentraljakutien, $0,46$ für Südjakutien und $0,74$ für die Küstenregion des Ochotskischen Meeres).

Es ist also aus den Jahresmittel- oder Jahreszeitentemperaturwerten die Anzahl der Tage für die Vegetationsperiode sowie deren Beginn und Ende nicht abzulesen. Besonders das frühere Einsetzen der Periode mit Tagesmitteltemperaturen $\geq +5$ °C ist jedoch vegetationsökologisch insofern von Bedeutung, als es bei immergrünen Koniferen zu einem früheren Abbau der Frostresistenz und damit bei den immer noch in der Frühphase der Vegetationsperiode möglichen Nachtfrostschäden kommen kann, zumal sich auch Blatt- / Nadelknospen früher entwickeln. Bei einer – hier allerdings nur geringfügig – nach hinten verlängerten Vegetationsperiode besteht darüber hinaus die Gefahr, dass vor Einsetzen der extrem tiefen Wintertemperaturen die Frostresistenz nicht rechtzeitig aufgebaut worden ist (SKRE et al. 2002). Das Problem der Spätfrostgefährdung in der Frühphase der Vegetationsperiode für Baumkeimlinge existiert übrigens nicht nur auf den offenen Flächen im Waldgrenzökoton, sondern auch in südlicheren borealen geschlossenen Waldregionen auf kahl geschlagenen potenziellen Aufforstungsflächen (OTTOSSON-LÖFVENIUS 1993, SCHWANTZ 2006). Gerade hier ist ja ein z.T. bis zu einer Woche früher einsetzender Beginn der Vegetationsperiode festzustellen.

Trotz dieses skizzierten Gefahrenpotenzials für die Regeneration borealer Waldvegetation ist natürlich bei höheren Wärmesummen während der Vegetationsperiode generell mit einem größeren Biomassezuwachs und einer größeren Samenproduktion zu rechnen. Eine bei Experimenten zugrunde gelegte

Temperaturerhöhung von 5 K in der Wachstumszeit (s.o.; MUDRIK & VIČEK 2001) liegt zwar deutlich über den in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts festgestellten sommerlichen Erwärmung (Abb. 3), allerdings deutet sich dadurch an, dass bei wärmeren Vegetationsperioden *Pinus sibirica* gegenüber *Larix sibirica* begünstigt sein könnte, zumal die Lärche bei zunehmenden Wintertemperaturen mit deutlich weniger Tagen mit Tagesmitteltemperaturen von ≤ -40 °C ihre Konkurrenzfähigkeit aufgrund ihrer größeren Frostresistenz gegenüber immergrünen Koniferen einbüßt.

Die Tendenz zu mehr Sommertagen in Zentral- und Südjakutien entspricht dem Trend zur generellen Erwärmung (auch der Sommermonate), der eine Zunahme der Waldbrandgefahr impliziert. Diese wird durch Sommertage, an denen wegen der lokalen, thermisch bedingten Luftmassenkonvektion die Gewitter- und damit die Blitzschlaggefährdung besonders hoch sind, verstärkt. Durch hohe Sommertemperaturen, die sich u.a. in der Zunahme an Sommertagen ausdrückt, wird auch die Reproduktionsrate von baumschädigenden Insekten begünstigt, deren Überwinterung darüber hinaus wegen der stärker angestiegenen Wintertemperaturen zusätzlich weniger gefährdet ist als früher.

Im Allgemeinen wird somit als Resultat der prognostizierten Erwärmung der Arktis und Borealis u.a. ein Nordwärtswandern der Vegetationszonen und damit auch der Wald- und Baumgrenze (CALLAGHAN et al. 2002, CALLAGHAN 2005, JUDAY 2005) sowie eine kontinuierliche Degradation des Permafrosts, der ja fast den gesamten hier betrachteten nordostsibirischen Raum unterlagert (SIEGERT & HUBBERTEN 1998, BLÜMEL & EBERLE 2001, HUBBERTEN & SCHIRRMESTER 2006), angenommen. Auch die hier dargestellte Entwicklung der thermischen Verhältnisse während der Vegetationsperiode in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts impliziert nicht nur eine höhere Nettoprimärproduktion der borealen Vegetation auch an der Waldgrenze, sondern auch eine höhere Samenproduktion sowie eine bessere Überlebenschance der Baumkeimlinge. Es gilt allerdings zu bedenken, dass es die landschaftsökologischen Verhältnisse in der topischen Raumdimension sind, die steuern, ob makroklimatische Erwärmung sich auch in eine Vegetationsveränderung umsetzt. So beschreibt ISAEV (2000) beispielsweise von nordjakutischen Standorten, dass trotz einer Erwärmung Lärchenkeimlinge an der polaren Waldgrenze wegen der extremen Dominanz von Moosen in der Feuchttundra keine Überlebenschancen haben und die existierenden Waldbestände überaltern und nicht expandieren. Dieser Prozess mag sich bei einer thermisch verursachten Permafrostdegradation mit Thermokarsterscheinungen und einer verstärkten Vernässung potenzieller zukünftiger

tiger Waldstandorte verstärken. Andererseits wird bei einer raschen Expansion der borealen Waldvegetation an trockeneren Tundrastandorten die Beschattung zunehmen, und die Permafrostverhältnisse können sich trotz makroklimatischer Erwärmung stabilisieren. Somit kann möglicherweise über die Frage nach der Nordwärtswanderung der polaren Waldgrenze entschieden, ob die beschattende Waldvegetation schneller expandiert als der Permafrost im Sommer oberflächennah tiefer als früher auftaut.

Anders dürften die Veränderungen in den borealen Gebirgen an der oberen Waldgrenze sein: Hier ist eine Expansion der Waldvegetation wegen der im Allgemeinen besser drainierten Hangstandorte eher zu erwarten, eine Vermutung, die sowohl von ISAEV (2000) als auch durch Beobachtungen von CYFFKA & ZIERDT (2003) auf der nordrussischen Kola-Halbinsel – dort allerdings ohne Permafrost – gestützt wird.

Literatur

- Blümel, W.D. & Eberle, J. (2001): Global Warming in Permafrostgebieten.- Geogr. Rundsch. 53 (5): 48-53.
- Callaghan, T.V. (2005): Arctic tundra and polar desert ecosystems.- In: ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), Cambridge University Press, 243-352.
- Callaghan, T.V., Werkman, B.R. & Crawford, R.M.M. (2002): The tundra-taiga interface and its dynamics: concepts and applications.- *Ambio Spec. Rep.* 12: 6-14.
- Cyffka, B. & Zierdt, M. (2003): Die Auswirkungen klimaindizierter Veränderungen auf die Wald- und Bodentypengrenzen im Chibiny-Gebirge (Halbinsel Kola). Inventarisierung und erste Ergebnisse.- *NORDEN* 15: 67-82.
- Ermakov, N., Cherosov, M. & Gogoleva, P. (2002): Classification of ultracontinental boreal forests in Central Yakutia.- *Folia Geobotanica* 37: 419-440.
- Gorchakovskiy, P.L. & Shiyatov, S.G. (1978): The upper forest limit in the mountains of the boreal zone of the U.S.S.R.- *Arctic and Alpine Res.* 10 (2): 349-363.
- Grishin, S.Yu. (1995): The boreal forests of north-eastern Eurasia.- *Vegetatio* 121: 11-21.
- Hubberten, H.-W. & Schirrmeister, L. (2006): Rolle des Permafrosts bei der Landschaftsbildung in der Arktis und Subarktis.- In: J.L. Lozán, H. Grassl, H.-W. Hubberten, P. Hupfer, P. Karbe & D. Piepenburg (Hrsg): Warnsignale aus den Polargebieten. Wissenschaftliche Fakten, Wissenschaftliche Auswertungen.- Parey, Hamburg, 48-53.
- Isaev, A.P. (2001): Global climate change and dynamics of forest ecosystems in Yakutia.- In: B. Ivanov & T. Maximov (Hrsg): "The role of permafrost ecosystems in Global Change, Proc. Internat. Conf., Yakutsk 2000, 62-66.
- Jóhannesson, T., Jónsson, T., Källén, E. & Kass, E. (1995): Climate change scenarios for the Nordic countries.- *Climatic Res.* 5: 181-195.
- Juday, G.P. (2005): Forests, land management, and agriculture.- In: ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), Cambridge University Press, 781-862.
- Källén, E. & Kattsov, V.M. (2005): Future climate change: modeling and scenarios for the Arctic.- In: ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), Cambridge University Press, 99-150.
- Langer, M. (2004): Entwicklung von klimaökologischen Parametern seit Beginn der Instrumentenmessung in Nordost-Sibirien.- Unveröffentl. Diplomarbeit, Univ. Bremen, Institut für Geographie, 1-81.
- Lauer, W. & Rafiqpoor, M.D. (2002): Die Klimate der Erde. Eine Klassifikation auf der Grundlage der ökophysiologischen Merkmale der realen Vegetation.- *Erdwissenschaftliche Forschung*, Bd. XL, Stuttgart, 1-271.
- Leckebusch, G.C., Kaspar, F., Spangehl, T. & Cobasch, U. (2006): Die Erwärmung in den Polarregionen im Vergleich zu globalen Veränderungen.- In: J.L. Lozán, H. Grassl, H.-W. Hubberten, P. Hupfer, P. Karbe & D. Piepenburg (Hrsg): Warnsignale aus den Polargebieten. Wissenschaftliche Fakten, Wissenschaftliche Auswertungen, Parey, Hamburg, 191-195.
- McBean, G. (2005): Arctic climate: past and present.- In: ACIA (Arctic Climate Impact Assessment), Cambridge University Press, 21-60.
- Mudrik, V.A. & Vil'chek, G.E. (2001): Ecophysiological responses of Larix sibirica Ledeb. and Pinus sibirica Du Tour undergrowth to climate change.- *Russian J. Ecology* 32 (4): 243-248.
- Ottosson-Löfvenius, M. (1993): Temperature and radiation regimes in pine shelterwood and clear-cut area.- PhD-Thesis, Swedish Univ. Agricult. Sci., Dept. Forest Ecology, Umeå.
- Perk, A.A., Chevychelov, A.P. & Skrybykina, V.P. (2004): Climatic characteristics of growing season in central Yakutia over the last 65 years.- In: The International Semi-Open Workshop C/H₂O/Energy Balance and Climate over Boreal Regions with Special Emphasis on Eastern Eurasia Oct.25-27, 2004, Institute for Biological Problems of Cryolithozone, SD, RAS, Yakutsk, Russia, Extended Abstracts, 109-111.
- Romanovsky, V.E. (2003): East Siberian air, ground temperature, and snow depth measurements.- *Nat. Snow and Ice Data Center for Glaciology (NSIDC)*, Boulder, Digital Media.
- Sarvas, R. (1966): Temperature sum as a restricting factor in the development of forest in the Subarctic.- In: UNESCO (Hrsg): Ecology and Conservation. Ecology of Subarctic Regions", UNESCO-Symposium, Helsinki, 79-82.
- Schwartz, S. (2006): Studien zur geländeklimatologischen Relevanz von Abholzungen in borealen Wäldern im Bereich des Oulanka-Nationalparks, Nordfinland.- Diss., Univ. Bremen, Institut für Geographie, 1-171.
- Siegert, C. & Hubberten, H.-W. (1998): Klimaveränderung und ihre Folgen für den Permafrost.- In: J.L. Lozán, H. Grassl, H.-W. Hubberten, P. Hupfer, P. Karbe & D. Piepenburg (Hrsg): Warnsignale aus den Polargebieten. Wissenschaftliche Fakten", Wissenschaftliche Auswertungen, Parey, Hamburg, 229-233.
- Skre, O., Baxter, R., Crawford, R.M.M., Callaghan, T.V. & Fedorkov, A. (2002): How will the tundra-taiga interface respond to climate change?- *Ambio Spec. Rep.* 12: 37-46.
- Venzke, J.-F. (1994): Zur Geoökologie semiarid-borealer Landschaften in Zentral-Jakutien, Sibirien.- In: J.-F. Venzke (Hrsg): Zur Ökologie und Gefährdung der borealen Landschaftszone, Essener Geogr. Arb. 25, Paderborn, 79-98.
- Venzke, J.-F. & Langer, M. (2006): Globale Gefahren durch intensive Nutzung der Taiga-Wälder.- In: J.L. Lozán, H. Grassl, H.-W. Hubberten, P. Hupfer, P. Karbe & D. Piepenburg (Hrsg): Warnsignale aus den Polargebieten. Wissenschaftliche Fakten", Wissenschaftliche Auswertungen, Parey, Hamburg, 305-309.