

3 FLORA, FAUNA UND ÖKOSYSTEM

Die nord- und südpolaren Regionen beherbergen – trotz der extremen klimatischen Bedingungen, die ihre Ökologie tiefgreifend prägen – eine zum Teil erstaunlich reiche Fauna und Flora. Die Produktivität der Lebensgemeinschaften kann so hoch sein, dass ihre Nutzung als natürliche Ressource für den Menschen von erheblicher Bedeutung ist, vor allem für die indigene Bevölkerung der Arktis. In diesem Teil des Buches wird die Ökologie wichtiger Lebensräume und -gemeinschaften der Polargebiete beschrieben. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Darstellung der eindrucksvollen Anpassungen der Organismen an die extremen Bedingungen, die es ihnen erlaubt, die Arktis oder Antarktis zu besiedeln. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Darstellung der Auswirkungen natürlicher und anthropogener Einflüsse, vor allem der ökologischen Effekte des Klimawandels, der sich in der arktischen Region besonders rasch vollzieht und drastische Umweltveränderungen zur Folge hat. Dazu gehören u.a. fortschreitende Erwärmung, rapider Rückgang von Permafrost und Meereis, gravierende Verschiebungen in den Verbreitungsmustern der Pflanzen und Tiere sowie bedeutende Veränderungen des Produktionsregimes und der Struktur der Nahrungsnetze. Die Kap. 3.1 - DANIEL et al. und 3.2 - ZIMMERMANN et al. beschreiben die landlebende Flora der arktischen Polarregion. Die weiteren Kapitel beschäftigen sich mit dem Leben in den polaren Meeren. Das Meereis als spezifisch polarer – und durch die Ozeanerwärmung besonders gefährdeter – Lebensraum steht im Zentrum vom Kap. 3.3 - WERNER; das Benthos, die Lebensgemeinschaft des Meeresbodens, ist Thema eines weiteren Beitrags (Kap. 3.5 - PIEPENBURG & GUTT). Dem Krill, einem Schlüsselorganismus des Südozeans, ist Kap. 3.4 - SIEGEL gewidmet. Die oberen Glieder der polaren Nahrungsnetze – Fische (Kap. 3.6 - KOCH & VON DORRIEN), Vögel (Kap. 3.7 - PETER), Robben und Eisbär (Kap. 3.8 - PLÖTZ et al. und 3.9 - BLANCHET et al.) sowie Wale (Kap. 3.10 - DEIMER-SCHÜTTE) – werden hinsichtlich ihrer Biologie, Nutzung und Gefährdung jeweils gesondert behandelt. Abgerundet wird dieser Abschnitt des Buches mit einer Betrachtung der Biodiversität in arktischen und antarktischen Meeren (Kap. 3.11 - BRANDT). Zwei Artikel über die möglichen ökologischen Folgen der »Ozeanversauerung« sind im Band Warnsignal Klima: Die Meere enthalten. Die Funktion der marinen Lebensgemeinschaften im globalen Kohlenstoffkreislauf, der wegen seines Einflusses auf den atmosphärischen CO₂-Gehalt von Bedeutung ist, wurde im Kap. 3.4 vom Band Warnsignale aus den Polarregionen (2006) beleuchtet.

3.1 Flora und Vegetation des terrestrischen Bereichs

FRED J. A. DANIELS, DIETBERT THANNHEISER & CHRISTOPH WÜTHRICH

The flora and vegetation in the terrestrial polar regions - The young post-glacial flora and vegetation of the Arctic are adapted to the ambient harsh and variable environmental conditions. The plant growth season in summer is short; soils are young, poor in nutrients, instable, and characterized by active layers and permafrost. Plant adaptations include low above-ground biomass production, low stature, long life spans, vegetative reproduction, asexual seed production and high polyploidy levels. Plant cover is dense in low-Arctic tundra's and more open in high-Arctic barrens. Species richness is moderate with a total of 2.218 vascular plants (including 106 endemics), 900 bryophytes and 1.750 lichens, and it decreases strongly from south to north. Floristic differences are obvious between Beringia (East Siberia and Alaska) and North Atlantic-West Siberia due to different glaciation histories. Nevertheless, most species have a circumpolar Arctic-alpine distribution. Since three decades global change related changes are affecting the Arctic. Furthermore, the number of boreal species increases in the Arctic and above-ground vegetation biomass and shrub expansion (greening) is observed across the Arctic. Snow beds will decline by substrate drying related to warming, whereas mires and shallow ponds will increase by the thawing of permafrost. In the near future, a warmer climate will strongly affect permafrost and ice-cover conditions resulting into new landscapes accessible for competitive southern species. The number of non-native species increases by tourism, traffic, town expansion, mining, industrial activities and sheep farming.

Herkunft und Verbreitung der polaren Flora und Vegetation

Flora und Vegetation der Arktis

Im Pleistozän waren große Gebiete, wie die heutige europäische Arktis, Grönland und Nord-Kanada, von Eis bedeckt und wurden somit nach gängiger Vorstellung, die auf Ergebnissen molekulargenetischer Untersuchungen basiert, erst nach der letzten Eiszeit im

Postglazial, ähnlich wie die ehemaligen Kältewüsten in Sibirien und Nord-Alaska, von Pflanzen aus südlicheren Regionen besiedelt. Biogeographen vermuteten, dass besonders kalteadaptierte Sippen in der Arktis in eisfreien Regionen überlebten. Nach dieser Überwinterungs-Theorie hat sich zumindest ein Teil dieser Arten aus solchen Refugien weiter ausgebreitet. Auf der nordwestlichen Seite der Baffin-Insel konnten beispielsweise Seggen-Torfe datiert werden, die ca.

16.000 Jahre alt sind (SHORT & ANDREWS 1988). Doch auch für die Wiederbesiedlung aus nicht vergletscherten Refugien gibt es inzwischen molekulare Evidenz, zumindest für zwei Arten (*Sagina caespitosa* und *Arenaria humifusa*, vgl. WESTERGAARD et al. 2011).

Der größte Teil der Pflanzen in der heutigen Arktis ist aber in den letzten 8.000-10.000 Jahren eingewandert. Dies könnte mit Hilfe großer Tiere (auch Zugvögel) oder durch die von Süden kommenden Meeresströmungen geschehen sein.

Während der Kaltzeiten mischte sich die nach Süden verdrängte arktische Flora mit den aus den vergletscherten Gebirgen in die Flachländer hinab gedrängten alpinen Florenelementen. Es entstand das »arktisch-alpine Florenelement«. Darauf beruht die auffallende heutige Gemeinsamkeit der Arktis mit den alpinen Stufen der nördlichen Gebirge der Nordhemisphäre. Die unterschiedliche Vergletscherungsgeschichte von Beringia (Ost-Sibirien und Alaska) und dem nordatlantisch-westsibirischen Raum führten zu einer stark differenzierten Flora. Trotzdem sind viele Arten in der Arktis zirkumpolar verbreitet oder zirkumpolar durch nahe verwandte Arten vertreten, z.B. *Betula nana* (Zwergbirke) in Grönland, Europa und West-Sibirien, *B. exilis* in Zentralsibirien, *B. middendorffii* in Ost-Sibirien und *B. glandulosa* in Kanada und SW-Grönland.

Die Arktis gehört zum holarktischen Florenreich. Der Artenreichtum der Gefäßpflanzen-Flora ist mit 2.218 anerkannten Arten mittelmäßig (DANIÉLS et al. 2013). Sie umfasst 430 Gattungen und 91 Familien. Artenreiche Familien sind Asteraceae (254 Arten), Poaceae (224), Cyperaceae (190), Brassicaceae (133), Rosaceae (128), Fabaceae (109), Ranunculaceae (102) und Caryophyllaceae (100). Bei den artenreichen Gattungen sind zu nennen *Carex* (152 Arten), *Salix* (72), *Oxytropis* (58), *Potentilla* (50), *Draba* (41), *Ranunculus* (40), *Papaver* (39), *Poa* (36) und *Saxifraga* (35). Es gibt 106 endemische Arten, wovon die Hälfte zu den Gattungen *Papaver*, *Puccinellia*, *Oxytropis*, *Potentilla* und *Draba* gehören. Die heutige Gefäßpflanzen-Flora besteht aus heimischen und eingebürgerten Arten. Darüber hinaus gibt es in der gesamten Arktis schätzungsweise mindestens 205 nicht-heimische Arten, die als nicht eingebürgert bekannt sind (ELVEN 2007 und 2011). Bei vielen nicht-heimischen aber eingebürgerten Arten handelt es sich um Gräser (Poaceae) und Korbblütler (Asteraceae), die Vertreter der mitteleuropäischen Wiesen, Weiden und Ruderal-Standorte darstellen. Ihre Verbreitung ist an klimatisch günstigere Regionen Grönlands und der eurosibirischen Arktis gebunden. Die verbreitetsten eingebürgerten Arten in der gesamten Arktis sind *Lepidotheca suaveolens*, *Plantago major* subsp. *major* und *Trifolium pratense*. Nicht eingebürgerte Arten, die als sporadisch

(ephemer) zu bezeichnen sind, kommen hauptsächlich in Westgrönland, Svalbard und Franz Joseph Land vor.

Der Artenreichtum der Gefäßpflanzen-Flora nimmt von Süd nach Nord stark ab. Die Artenzahl der südlichsten Subzone der Nieder-Arktis beträgt ca. 2.180, in der nördlichsten Subzone der Hoch-Arktis kommen nur etwa 102 Arten vor (DANIÉLS et al. 2013). Der Artenreichtum der Kryptogamen-Flora umfasst 900 Moose und 1.750 Flechten. Die Biodiversität der ökologisch wichtigen Algen ist ungenügend bekannt.

In den obersten fünf cm des Bodens ist in der Arktis eine Samenbank mit ca. 500–1.800 Samen pro m² vorhanden (Fox 1983). Bekanntlich ist die jährliche Produktion der Phytomasse der arktischen Pflanzengesellschaften niedrig. Dabei ist zu beachten, dass von der gesamten Phytomasse oft mehr als die Hälfte als Wurzelmasse vorhanden ist (MÖLLER 2000). Ansiedlung neuer Individuen erfolgt in der Arktis wegen der schwierigen Umweltbedingungen (mangelnde Wärme, Feuchtigkeit und Nährstoffversorgung) oft nur episodisch nach Jahren. Die Samen reifen nicht jedes Jahr aus, sondern nur in günstigen Jahren. Dies kann man besonders bei nicht-heimischen Arten beobachten, die durch den Menschen direkt oder indirekt eingeschleppt wurden und auf gestörten Standorten gedeihen, da sie in der natürlichen Vegetation aus Konkurrenzgründen nicht Fuß fassen können.

Die Arktis wird physiognomisch gegliedert in den Gletscherbereich, die Frostschuttzone und die Tundra, die alle von Permafrost unterlagert sind. Die Frostschuttzone wird von einer sehr schütterten Vegetation und einzelnen Polsterpflanzen eingenommen. Die Struktur und Zusammensetzung der Vegetation ändert sich mit dem Klimagefälle von Nord nach Süd sowie von maritim beeinflussten bis zu kontinental getönten Regionen. Die Vegetation bedeckt in den nieder-arktischen Bereichen mehr als 80% der Bodenoberfläche, gegen Norden hin nimmt die Vegetationsbedeckung langsam ab. In der Tundra (der Name bedeutet »baumloses Hügelland« und stammt von den Saami, die ihr Land als »tunduri« bezeichnen) variiert die Bedeckung der Vegetation von einer fast zusammenhängenden, niedrigwüchsigen Vegetationsdecke bis zu einzelnen Vegetationsflecken. Die Frostschuttzone wird nur noch von einer sehr schütterten Pflanzendecke einzelner Polsterpflanzen eingenommen. Die Aufeinanderfolge von Tundrazone und Frostschuttzone ist sowohl in der vertikalen Anordnung im Gebirge als auch in der zonalen Ausbreitung von Süd nach Nord anzutreffen.

Eine vereinfachte Karte der Vegetationszonen der Arktis wurde von MELTOFTÉ (2013) publiziert, die auf der »Circumpolar Arctic Vegetation Map« (Abb. 3.1-1) fußt. Für diese Karte wurden nur zwei arktische

Vegetationszonen ausgewiesen, die auf bioklimatischen Grundlagen basieren (CAVM TEAM 2003, WALKER et al. 2005).

Die Vegetationszone der Hoch-Arktis (high-Arctic) liegt innerhalb der Frostschuttzone. Die Pflanzenbedeckung variiert nur zwischen 5 und 50%, jedoch sind viele Gebiete nahezu vegetationslos. Die niedrigwachsenden Pflanzen bestehen aus Polsterpflanzen, Gräsern und sehr wenigen Zwergsträuchern. Stärker verbreitet sind Kryptogamen (Moose und Flechten). Der nördliche Teil der Hoch-Arktis ist wüstenhaft. Die Vegetationsbedeckung bleibt unter 5%, und es gedeihen nur noch rund 100 Arten von Gefäßpflanzen (keine Holzpflanzen). Dieser Bereich wird von klimatischen Ungünstfaktoren geprägt. Die mittleren Julitemperaturen liegen unter 2-3 °C, da der größte Teil der Luftmassen vom polaren Packeis beeinflusst wird.

Die Vegetationszone der Nieder-Arktis (low-Arctic) nimmt auf der Nordhemisphäre einen sehr breiten Raum ein. Hier ist die Tundra vorherrschend. Die

Vegetationsbedeckung variiert dank der günstigeren ökologischen Bedingungen zwischen 50 und 100%. Die Zone ist geprägt von Sträuchern (*Betula*, *Salix*), die 80 bis 100 cm hoch werden. Zwergsträucher (*Cassiope*, *Empetrum*, *Vaccinium*) und Seggen (*Carex*) bedecken einen Großteil der Oberfläche. Daneben dominieren in den vernässen Bereichen der Niederungen Wollgräser, Seggen und Moose, u.a. auch Torfmoose (*Sphagnum*), sowie die Gräser *Dupontia* und *Arctophila*. Die südlichen Teile dieses Vegetationsgürtels gehen fließend in die anschließende Sub-Arktis über, die durch die Baum- und Waldgrenze gekennzeichnet ist und bereits einen Teil der borealen Waldzone darstellt.

In der Vegetation der Arktis treten charakteristische Muster von Pflanzenbeständen auf, die nach floristisch-soziologischen Merkmalen zu Pflanzengesellschaften zusammengefasst werden (NILSEN & THANNHEISER 2013; DANIËLS & THANNHEISER 2013). Kleinräumig hängen der Grad der Vegetationsbedeckung und die Zusammensetzung der Pflanzengesellschaften stark



Abb. 3.1-1: Karte der nördlichen Hemisphäre mit der Hoch-Arktis (high-Arctic) und Nieder-Arktis (low-Arctic) (aus MELTOFTE 2013). Mit Dank an »Conservation of Arctic Flora and Fauna, Akureyri«.

von den Relief- und Bodenverhältnissen ab. Für die Verteilung der Vegetationseinheiten sind in der Tundra die Schnee- und Windverhältnisse ausschlaggebend, die Feuchtigkeitsverhältnisse prägen besonders das Gedeihen der Pflanzenbestände. Eine schütterere Vegetation ist auf Bergrücken und im Bereich der Strände anzutreffen. Dies hat zur Folge, dass sich nur wenige und artenarme Vegetationseinheiten ausbilden. Artenreiche und viele unterschiedliche Vegetationseinheiten sind auf Hängen und Terrassen anzutreffen. In Vertiefungen und in der Umgebung von Seen und Wasserläufen übersteigt die Vegetationsbedeckung 80% und ist durch vielfältige, unterschiedliche Vegetationseinheiten geprägt.

Flora und Vegetation der Antarktis

Die Situation in der Antarktis ist mit jener in der Arktis nicht vergleichbar, weil die Verbreitung von Land und Meer sowie von Gletschereis und Tiefland eine völlig andere ist. Deswegen sei hier ein kurzer Blick auf die Situation im Bereich der Südkalotte erlaubt: Auf dem antarktischen Kontinent selbst sind 99% der Fläche vom Gletschereis bedeckt, und es gibt nur kleinflächige eisfreie Gebiete (Kältewüsten) und einige eisfreie Bergspitzen. Diese Region wird als Zone der kontinentalen Antarktis bezeichnet. Eine kleine Zahl von 40–50 Arten von Flechten und Moosen gedeiht hier in Felsspalten und Vertiefungen zwischen Steinen. Nur vereinzelt treten Gesellschaften aus Moosen, Flechten und Algen auf. Die extremsten Standorte an nordexponierten Hängen werden nur von kryptoendolithischen Flechten eingenommen (KAPPEN & FRIEDMANN 1983). Viele Flechten gelten als extreme Überlebenskünstler, denn sie können trotz starker, lang anhaltender Austrocknung und tiefen Temperaturen existieren. Solche Flechten können noch bei -10 °C Kohlendioxid assimilieren.

Die etwas lebensfreundlichere Zone der maritimen Antarktis umfasst die antarktischen Inseln sowie einen Teil der arktischen Halbinsel. Sie zeichnet sich durch ein verstärktes Pflanzenvorkommen aus. In dieser Zone kommen zwei einheimische Gefäßpflanzen (*Deschampsia antarctica* und *Colobanthus quitensis*) vor. Nur adventiv sich vermehrend wurden *Poa pratensis*, *P. annua* und eine *Stellaria*-Art beobachtet. In der nördlich der antarktischen Konvergenz gelegenen und deswegen etwas wärmeren und länger besonnten Zone der subantarktischen Inseln gedeihen große Polsterpflanzen und Tussockgräser. Süd-Georgien wird von 56 Gefäßpflanzen besiedelt, von denen 25 Arten als einheimisch, acht Arten als eingebürgert und 24 Arten als Neophyten (transient aliens) gelten (GREEN 1964, LONGTON 1988, LAMB 1970).

Anpassungen der polaren Vegetation

Alle Gefäßpflanzen stehen in den Polargebieten in einem harten Überlebenskampf. Die arktischen Ökosysteme sind in den letzten 10.000 Jahren – nach dem Rückzug der pleistozänen Gletscher und Inlandeise – recht nahe bei ihrem Minimum verblieben. Dies gilt bezüglich Artenzahl, Verbreitung und Aktivität (CALLAGHAN et al. 2004, WÜTHRICH 2010). Die physischen Faktoren, allen voran Kälte, kurze Wachstumsperioden und sommerliche Trockenheit, sind letztlich entscheidend für das Überleben von Pflanzen in Polargebieten. Weitere typische Stressfaktoren sind Windabration, stauender und nicht durchwurzelbarer Permafrost im tieferen Boden sowie Solifluktion und Frostbewegungen in der Auftauschicht. Da sowohl Stickstoff wie auch Phosphate in den Böden meist nur spärlich vorhanden sind, herrscht in dichteren Beständen eine starke Konkurrenz um die vorhandenen Bodennährstoffe, sowohl zwischen den Individuen einer Art wie auch zwischen unterschiedlichen Pflanzenarten und sogar mit Mikroorganismen (WÜTHRICH & THANNHEISER 2002, CRAWFORD 2008, KUZJAKOV & XU 2013, KAP. 3.2 - ZIMMERMANN et al.).

Mit »Anpassungen« können zwei sehr unterschiedliche Mechanismen behandelt werden: Akklimatisation und Adaptation. Akklimatisation bezeichnet die nicht-erbliche Veränderung gewisser Eigenschaften eines Individuums als Antwort auf Veränderungen der Umweltbedingungen. Akklimatisation kann mehrmals innerhalb einer Generation auftreten und wieder verschwinden. Pflanzen zeigen schnell irreversible Schäden, wenn sie ohne Akklimatisation tiefen Temperaturen ausgesetzt werden. Akklimatisiert man die Pflanzen jedoch nur ein paar Stunden unter Belichtung und bei einer nicht-letalen Temperatur, dann vermögen viele ihre Kälteresistenz deutlich zu steigern. Dieser Prozess findet im Herbst statt, wenn Pflanzen Kälteresistenz, oft gar Frosttoleranz erwerben. Winterliche Wärmephasen können diese Akklimatisation allerdings rückgängig machen. Wenn anschliessend eine Pflanze ohne Schneedecke der Kälte ausgesetzt ist, kommt es auch bei arktischen Pflanzen zu Schäden (z.B. BJERKE et al. 2011), welche sich letztlich auf die Verbreitung einer Art im Grenzbereich der ökologischen Bandbreite auswirken werden.

Der Suche nach den physiologischen und molekularen Mechanismen dieser Akklimatisation wird viel Aufmerksamkeit geschenkt, und man weiß bereits, dass bei akklimatisierten Pflanzen ein höherer Gehalt an löslichen Zuckern und Proteinen vorhanden ist und eine vermehrte Bildung des Pflanzenhormons Abszissinsäure stattfindet. Außerdem verändert sich

die Lipidzusammensetzung der Zellmembran. Jüngst wurden bestimmte universelle Gene erkannt, die für Proteine codieren (z.B. Dehydrin und Defensin), welche in kältetoleranten Arten vermehrt »eingeschaltet« werden (ARCHAMBAULT & STROEMVIK 2011). In Labor- und Feldexperimenten, in denen die Kälteresistenz von Pflanzen genetisch und physiologisch untersucht wird, spielt deswegen die Vorbehandlung der Proben (mit oder ohne Akklimatisation sowohl an tiefe Temperaturen wie auch an Trockenheit) eine entscheidende Rolle für die beobachteten Limitierungen (z.B. GUSTA et al. 2009), ebenso das Auftreten von Temperaturextremen insgesamt (MARCHAND et al. 2006).

Adaptation bezeichnet hingegen eine langfristige erworbene Anpassung im engeren Sinn, die erblich ist und über mehrere Generationen zu einer Optimierung der Erbanlagen geführt hat. Wohlbekannte erbliche Anpassungen vieler arktischer Pflanzen sind etwa geringe Größe, geringe Biomasseproduktion, Behaarung der Blätter und der Stängel, kleine und meist derbe Blätter, üppige Isolation wichtiger Pflanzenteile (u.a. der Knospen) durch wollartige Substanzen sowie polsterförmige Wuchsform und Langlebigkeit, welche es den Pflanzen erlaubt, relativ große Flächen von Photosynthese betreibendem Blattmaterial in der wärmeren, feuchteren und windgeschützteren Grenzschicht zum erwärmten Boden ausbreiten zu können (WÜTHRICH & THANNHEISER 2002). Viele arktische Pflanzen zeichnen sich außerdem durch vegetative Vermehrung, asexuelle Samenbildung (Agamospermie) und Polyploidie aus.

Moose und Flechten hatten durch das Fehlen eines leistungsfähigen Leitungssystems für den Transport von Wasser und Nährstoffen innerhalb des Körpers einen Selektionsvorteil im Sinne einer Präadaptation: ihre geringe Körpergröße. Die hohe Präsenz von Moosen und Flechten in der Hoch-Arktis ist auch auf ihre hohe Ausbreitungsfähigkeit mit Hilfe von Sporen und Thaluss-Fragmentierung zurückzuführen. Außerdem ist das Eingehen der mutualistischen Lebensgemeinschaft bei Flechten bekanntermaßen sowohl für den Phycobiont wie auch für den Mycobiont von Vorteil (DAHLBERG & BÜLTMANN 2013), so dass sich selbst die Bedingungen in Extremlebensräumen mit monatelanger Dunkelheit oder ausgedehnten Frostperioden kaum auf das Vorkommen von Flechtenarten auswirken.

Die Evolutionsmechanismen, welche hinter der für viele Gattungen gemeinsamen Ausprägung der genannten erblichen Eigenschaften stehen, sind physikalisch und gleichzeitig physiologisch begründet. Die Selektion schafft jenen Pflanzen einen Vorteil, welche mit der multifaktoriellen Mixtur ihres aktuellen Standortes am besten zurechtkommen. Auch in den Übergangsbereichen zwischen den genannten Vegetationszonen

der Polargebiete gilt: Wer nicht wächst und sich nicht sexuell oder vegetativ ausbreitet, wird bald stagnieren und aus dem betrachteten Habitat verschwinden.

In den vergangenen Jahren fokussierte sich die Forschung der Anpassungen arktischer Arten wegen des Klimawandels immer stärker auf die Grenztemperaturen und molekulare Aspekte der Kältetoleranz (z.B. LARCHER et al. 2008, ARCHAMBAULT & STROEMVIK 2011) wie auch auf die Langlebigkeit und Diversität in arktischen Populationen (z.B. DE WITTE et al. 2012). Dazu kommt noch das steigende Bewusstsein über zeitlich versetzte Witterungs-Effekte, welche die Pflanzen noch Monate später in ihrem Wachstum negativ beeinflussen können. Beispielsweise werden Wärmephasen während des Winters von manchen Arten gut verkräftet, während andere Arten im Folgesommer eine deutliche Reduktion der Aktivität zeigen (BJERKE et al. 2011).

Der Klimawandel in der Arktis wird sich für manche Pflanzen nicht so markant auswirken, wie in Teilen der Öffentlichkeit befürchtet wird. Langlebige Polsterpflanzen lieferten den Beweis dafür, dass bereits mehrere starke Klimaschwankungen in den letzten 4.500 Jahren überstanden wurden, ohne dass die Pflanzen aus ihrem angestammten Lebensraum verschwunden wären (DE WITTE et al. 2012). Die Einführung landwirtschaftlicher Kulturen auf Grönland durch die Wikinger und die Beweidung/Düngung der Wiesen im Rahmen der landwirtschaftlichen Nutzung haben umgekehrt in Südgrönland mindestens ebenso tiefgreifende Effekte auf den Landschaftshaushalt nach sich gezogen wie die in dieser Zeit markant schwankenden Klimaverhältnisse (ADDERLEY & SIMPSON 2006, MASSA et al. 2012).

Lokale und globale Veränderungen in Flora und Vegetation am Beispiel Grönlands

Lokale anthropogene Einflüsse

Heute beheimatet die Arktis rund 220.000 Einwohner (MELTOFTE 2013) in den fünf Anliegerstaaten (Kanada, Russland, USA, Dänemark, Norwegen). Grönland registriert davon nur 56.000 Einwohner, welche vor allem in größeren Siedlungen der Westküste wohnen. Der Norden und Osten Grönlands blieb größtenteils unbevölkert. Die erste Besiedlung des Landes durch wenige Paläo-Eskimos kann auf ca. 2.500 Jahre v. Chr. zurückdatiert werden. Bis zur Ansiedlung der Nordmänner (Wikinger) im Süden Ende des 10. Jahrhunderts (KROGH 1967) blieb der menschliche Einfluss auf die postglaziale Flora und Vegetation gering. Zudem verschwanden die Nordmänner im 15. Jahrhundert wieder. Der Einfluss ihrer landwirtschaftlichen Aktivitäten auf Flora, Vegetation und Landschaft konnte

durch Pollendiagramme belegt werden (FREDSKILD 1988). Dennoch bleibt bislang unklar, ob es Arten anthropogener Herkunft gibt. Palynologische Studien deuten auf einen engen Zusammenhang zwischen der Etablierung der Landwirtschaft mit Nutztierhaltung und dem Vorkommen von *Achillea millefolium*, *Polygonum aviculare* und *Rumex acetosella* hin (SCHOFIELD et al. 2012). Die extensive Landwirtschaft hinterließ aus dieser Zeit allerdings nur temporäre Spuren in der ursprünglichen Flora und Vegetation.

Im 18. Jahrhundert erfolgte eine erneute Kolonisierung Grönlands. Seine Bevölkerung wuchs von 12.000 Einwohnern im Jahre 1900 auf 56.000 im Jahre 2012. Die Folgen von lokaler Eutrophierung durch Mensch und Tier (u.a. Hunde) bewirkten starkes Wachstum von heimischen Pflanzenarten wie *Oxyria digyna*, *Polygonum viviparum*, *Cerastium alpinum*, *Saxifraga cernua*, *Taraxacum croceum*, *Rhodiola rosea*, *Eriophorum scheuchzeri* sowie Gräserarten wie *Poa alpina*, *Alopecurus alpinus* und *Phippisia algida*.

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde im Süden und Südwesten Grönlands moderne Schafhaltung eingeführt (FREDSKILD 1988). Heute erstrecken sich die dafür genutzten Flächen über rund 1% des eisfreien Landes. Durch Überbeweidung kam es auch zur Bodenerosion, und Gebüsche und Zwergsträucher wurden durch Gräser und Graminoiden abgelöst (FREDSKILD 1988, FEILBERG & HØEGH 2008).

Globale Veränderungen seit 1980

Die globale Erwärmung zeigt sich in der Arktis intensiver als in der gemäßigten Zone. Sowohl Winter- wie auch Sommertemperaturen waren in den letzten Dekaden gegenüber den zurückliegenden 2.000 Jahren erheblich höher (MELTOFTE 2013). Im 21. Jahrhundert werden weitere Temperaturanstiege erwartet. Die Erwärmung wird sich in der Beschleunigung von Stoffkreisläufen und Veränderungsprozessen (z.B. Thermokarst) widerspiegeln, welche erhebliche Auswirkung auf die Ökosysteme der Arktis haben werden (WÜTHRICH & THANNHEISER 2002).

Veränderungen in der Artenzusammensetzung verschiedener Pflanzengesellschaften der Arktis konnten bereits für mehrere zurückliegende Jahrzehnte durch Studien belegt werden. Diese lassen sich vor allem in feuchten bzw. nassen Habitaten wie Schneetälchen, Mooren, Sümpfen und Flachseen beobachten. Für Grönland konnten solche Veränderungen von DANIÉLS et al. (2011), DANIÉLS & DE MOLENAAR (2011), CALLAGHAN et al. (2011) und SCHMIDT et al. (2012) belegt werden. Insgesamt wird die Arktis schon jetzt »grüner« durch Phytomasse-Zunahme. Sträucher und kleine Bäume können sich grundsätzlich immer weiter in die

Tundra ausbreiten (KLEIN et al. 2008, HENRY et al. 2012, NORMAND et al. 2013, SCHICKHOFF 2012).

DANIÉLS & DE MOLENAAR (2011) stellten einen zunehmenden Einfluss von subarktischen Arten (»subarctification«) in der Gefäßpflanzen-Flora von Ammassalik (Südostgrönland) in den letzten 100 Jahre fest. In der Vegetation ist in den letzten Dekaden eine deutliche Zunahme der borealen Arten *Pyrola minor*, *Hieracium hyparcticum* und *Thymus praecox* ssp. *arcticus* zu verzeichnen. In der nächsten Zukunft wird ein wärmeres Klima die Permafrostböden und die Gletscher-Vorfelder Grönlands und der gesamten Arktis beeinflussen. Dadurch wird sich die Landschaft verändern und Wassertümpel bzw. große Niedermoore werden sich verstärkt ausbilden.

Über invasive Arten in der Arktis ist allgemein wenig bekannt. Die meisten eingeschleppten Arten scheinen jedoch bisher nicht invasiv zu sein und werden somit nicht als Bedrohung für die einheimische Vegetation eingestuft. Auch in Grönland (DANIÉLS & DE MOLENAAR 2011) und in der kanadischen Arktis wurden bisher kaum invasive Arten nachgewiesen. Der Klimawandel und andere Globalisierungsphänomene, wie z.B. intensivierter Tourismus, zunehmende Erschließung und industrielle Entwicklung, erhöhen allerdings die Wahrscheinlichkeit der Einschleppung nicht-heimischer und möglicherweise invasiver Arten in die Arktis immer mehr, wie WARE et al. (2012) für Svalbard durch den Nachweis der Sameneinschleppung durch Touristen nachgewiesen hat. Zusätzlich erweitert der Klimawandel die Möglichkeiten für eine Ausweitung der Schaf- und Viehhaltung, Agrarwirtschaft und sogar Forstwirtschaft (privat und kommerziell) im Süden Grönlands wie auch in der gesamten südlichen Arktis. Schließlich werden in Zukunft auch weitere Zier- und Nutzpflanzen in der Arktis zum Einsatz kommen und könnten unter wärmeren Bedingungen auswildern. Schon PEDERSEN (1972) erwähnte über 70 kultivierte Arten (von Futterpflanzen über Beeren- und Ziersträucher bis hin zu »exotischen« Waldbäumen), die in Grönland gepflanzt wurden. Trotzdem kann bis heute kein Verlust einheimischer Arten und Vegetationstypen in Grönland wie auch in der gesamten Arktis beobachtet werden.

Literatur

- ADDERLEY, W. P. & I. A. SIMPSON (2006): Soils and palaeo-climate based evidence for irrigation requirements in Norse Greenland. *Journal of Archaeological Science* 33 (12): 1666–1679.
- ARCHAMBAULT, A. & M. V. STROEMVIK (2011): PR-10, defensin and cold dehydrin genes are among those over expressed in *Oxytropis* (Fabaceae) species adapted to the Arctic. *Functional & Integrative Genomics* 11(3): 497–505.

- BJERKE, J. W., S. S. BOKHORST, M. ZIELKE, T. V. CALLAGHAN, F. M. BOWLES & G. K. PHOENIX (2011): Contrasting sensitivity to extreme winter warming events of dominant sub-Arctic heathland bryophyte and lichen species. *Journal of Ecology* 99(6): 1481-1488.
- CALLAGHAN, T. V., L. O. BJÖRN, T. CHERNOV, T. CHAPIN, T. R. CHRISTENSEN, B. HUNTLEY, R. A. IMS, M. JOHANSSON, D. JOLLY, S. JONASSON, N. MATVEYEVA, N. PANIKOV, W. OECHEL & G. SHAVER (2004): Past changes in Arctic terrestrial ecosystems, climate and UV radiation. *Ambio* 33 (7): 398-403.
- CALLAGHAN, T. V., T. R. CHRISTENSEN & E. J. JANTZ (2011): Plant and vegetation dynamics on Disko Island, West Greenland: Snapshots separated by over 40 years. *Ambio* 40: 624-637.
- CRAWFORD, R. M. M. (2008): *Plants at the Margin: Ecological Limits and Climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, Sao Paulo, 478 S.
- CAVM TEAM (2003): *Circumpolar Arctic Vegetation Map. Scale 1:7,500,000. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map. No 1. US Fish and Wildlife Service, Anchorage, Alaska.*
- DAHLBERG, A. & H. BÜLTMANN (2013): Fungi (Chapter 10). In: MELTOFTE, H. (ed.) *Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity. Conservation of Arctic Flora and Fauna, Akureyri, 354-371.*
- DANIËLS, F. J. A. & J. G. de MOLENAAR (2011): *Flora and Vegetation of Tasiilaq, Formerly Angmagssalik, Southeast Greenland: A Comparison of Data between Around 1900 and 2007. Ambio* 40: 650-659.
- DANIËLS, F. J. A., J. G. de MOLENAAR, M. CHYTRÝ & L. TICHÝ (2011): *Vegetation change in Southeast Greenland? Tasiilaq revisited after 40 years. Applied Vegetation Science*. 14: 230-241.
- DANIËLS, F. J. A. & D. THANNHEISER (2013): *Phytosociology of the Western Canadian Arctic. CAFF Proceeding Series Report 10: 33-39.*
- DANIËLS, F. J. A., L. J. GILLESPIE & M. POULIN (2013): *Plants (Chapter 09). In: MELTOFTE, H. (ed.) Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity. Conservation of Arctic Flora and Fauna, Akureyri, 310-353.*
- DE WITTE, L. C., G. F. J. ARMBRUSTER, L. GIELLY, P. TABERLET & J. STÖCKLIN (2012): *AFLP markers reveal high clonal diversity and extreme longevity in four key arctic-alpine species. Molecular Ecology* 21(5): 1081-1097.
- ELVEN, R. (2007): *Checklist of the panarctic flora (PAF): vascular plants: National Centre of Biosystematics, Natural History Museum, University of Oslo.*
- ELVEN, R. (2011) *Annotated checklist of the panarctic flora (PAF) vascular plants: National Centre of Biosystematics, Natural History Museum, University of Oslo, <http://nhm2.uio.no/paf>*
- FEILBERG, J. & K. HOEGH (2008): *Greenland. In: AUSTERHEIM et al. Sheep grazing in the North-Atlantic region – A long term perspective on management, resource economy and ecology. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Science Museum, Section of Natural History, 7491, Trondheim. Rapport zoologisk serie 2008-3: 44-53.*
- FOX, J. F. (1983): *Germinable seed banks of interior Alaskan tundra. Arctic and Alpine Research* 15(3): 405-411.
- FREDSKILD, B. (1988): *Agriculture in a Marginal Area-South Greenland from the Norse Landnam (985 A.D.) to the Present (1985 A.D.). In: BIRKS, H. H., H. J. BIRKS, P. E. KALAND & D. MOE (eds.). The Cultural Landscape-Past, Present and Future. Cambridge University Press, Cambridge, 381-393.*
- GREEN, S. W. (1964): *The Vascular Plant Flora of South Georgia. British Antarctic Survey Scientific Reports* 45: 1-58.
- GUSTA, L. V., K. K. TANINO & M. E. WISNIEWSKI (2009): *Plant cold hardiness from the laboratory to the field. Wallingford: CAB International, 317 S.*
- HENRY, G. H. R., K.A. HAPER, W. CHEN, J. R. DESLIPPE, R. F. GRANT, P. M. LAFLEUR, E. LEVESQUE, S. D. SICILIANO & S. W. SIMARD (2012): *Effects of observed and experimental climate change on terrestrial ecosystems in northern Canada: results from the Canadian IPY program. Climate Change* 111: 207-234.
- KAPPEN, L. & I. FRIEDMANN (1983): *Kryptoendolithische Flechten als Beispiel einer Anpassung an extrem trocken-kalte Klimabedingungen. Gesellschaft für Ökologie* 10: 517-519.
- KLEIN, D. R., H. H. BRUNN, R. LUNDGREN & M. PHILIPP (2008): *Climate change influences on species interrelations and distributions in High-Arctic Greenland. In: MELTOFTE, H., T. R. CHRISTENSEN, B. ELBERLING, M. C. FORCHHAMMER & M. RASCH (eds.). High-Arctic ecosystem dynamics in a changing climate. Advances in Ecological Research* 40: 81-100.
- KROGH, K. J. (1967): *Viking Greenland. The National Museum. Copenhagen, 187 S.*
- KUZYAKOV, Y. & X. XU (2013): *Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance. New Phytologist* 198 (3): 656-669.
- LAMB, I. M. (1970): *Antarctic Terrestrial Plants and Their Ecology. In: HOLGATE, M. W. (ed.) Antarctic Ecology, 733-751.*
- LARCHER, W., C. KAINMUELLER & J. WAGNER (2008): *Survival types of high mountain plants under extreme temperatures. Flora* 205(1): 3-18.
- LONGTON, R. E. (1988): *The biology of polar bryophytes and lichens. Cambridge University Press. Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, 391 S.*
- MARCHAND, F. L., F. KOCKELBERGH, B. VAN DE VIJVER, L. BEYERS & I. NIJS (2006): *Are heat and cold resistance of arctic species affected by successive extreme temperature events? New Phytologist* 170 (2): 291-300.

- MASSA, C., B. B. PERREN, É. GAUTHIER, V. BICHET, C. PETIT & H. RICHARD (2012): A multiproxy evaluation of Holocene environmental change from Lake Igaliku, South Greenland. *Journal of Paleolimnology* 48 (1): 241–258.
- MELTOFTE, H. (ed.) (2013): Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity. Conservation of Arctic Flora and Fauna, Akureyri, 674 S.
- MÖLLER, I. (2000): Pflanzensoziologische und vegetationsökologische Studien in Nordwestspitzbergen. Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft in Hamburg 90:1-202.
- NILSEN, L. & D. THANNHEISER (2013): Phytosociology of the Svalbard Archipelago including Bjørnøya and Jan Mayen. *CAFF Proceeding Series Report* 10: 81-87.
- NORMAND, S., C. RANDIN, C. R. OHLEMÜLLER, C. BAY, T. T. HØYE, E. D. KJÆR, C. H. KÖRNER, H. LISCHKE, L. MAIORANO, J. PAULSEN, P. B. PEARMAN, A. PSOMAS, U. A. TREIER, N. E. ZIMMERMANN & J.-C. SVENNING (2013): A greener Greenland? Climatic potential and long-term constraints on future expansions of trees and shrubs. *Philosophical Transactions. The Royal Society. B* 368: 20120479. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0479>.
- PEDERSEN, A. (1972): Adventitious plants and cultivated plants in Greenland. *Meddelelser om Grønland* 178 (7): 1-99.
- SCHICKHOFF, U. (2012): Wie reagiert die Vegetation in der Arktis auf den Klimawandel? *Geographische Rundschau* 64(1): 52-57.
- SCHMIDT, N. M., D. K. KRISTENSEN, A. MICHELSEN & C. BAY (2012): High-Arctic plant community responses to a decade of ambient warming. *Biodiversity* 13: 191-199.
- SCHOFIELD, J. E., K. J. EDWARDS, E. ERLENDSSON & P. M. LEDGER (2012): Palynology supports 'Old Norse' introductions to the flora of Greenland. *Journal of Biogeography* 40(6):1119-1130.
- SHORT, S. K. & J. T. ANDREWS (1988): A sixteen thousand year old organic deposit, northern Baffin Island, NWT, Canada. *Géographie physique et Quaternaire* 42: 75-82.
- WALKER, D. A., M. K. RAYNOLDS, F. J. A. DANIËLS, S. E. EINARSSON, A. ELVEBAKK, W. A. GOULD, A. E. KATENIN, S. S. KHOLOD, C. J. MARKON, E. S. MELNIKOV, N. G. MOSCHALENKO, S. S. TALBOT, B. A. YURTSEV & the other members of the CAVM TEAM (2005): The circumpolar Arctic vegetation map. *Journal of Vegetation Science* 16: 267-282.
- WARE, C., D. M. BERGSTRÖM, E. MÜLLER & I. G. ALSOS (2012): Humans introduce viable seeds to the Arctic on footwear. *Biological Invasions* 14: 567-577.
- WESTERGAARD, K. B., I. G. ALSOS, M. POPP, T. ENGELSKJØN, K. FLATBERG & C. BROCHMANN (2011): Glacial survival may matter after all: nunatak signatures in the rare European populations of two west-arctic species. *Molecular Ecology* 20 (2): 376-393.
- WÜTHRICH, C. & D. THANNHEISER (2002): Die Polargebiete. Westermann, Braunschweig, 299 S.
- WÜTHRICH, C. (2010): Arktische Ökosysteme: Alt und stark spezialisiert oder jung und unfertig? *Festschrift zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. David Gaudenz Senn, Universität Basel*, 125-143.

Kontakt:

Prof. Dr. Fred J. A. Daniëls
Universität Münster
Institut für Biologie und Biotechnologie der Pflanzen
daniels@uni-muenster.de

Prof. Dr. Dietbert Thannheiser
Universität Hamburg
Institut für Geographie
d.thannheiser@gmx.de

Dr. Christoph Wüthrich
Universität Basel
Departement Umweltwissenschaften
Physische Geographie und Umweltwandel, Schweiz
christoph.wuethrich@unibas.ch