

Die Arktis IST ein Ökosystem!

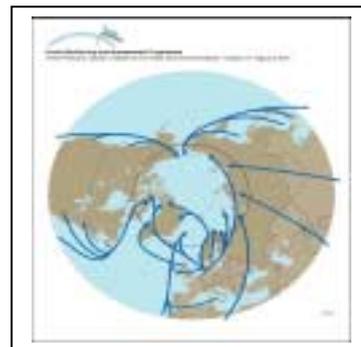
Wenn man aus dem Weltraum herunterschaut auf die Erde, durch den von Protuberanzen der Sonne erzeugten und mit 200 Kilometern in der Minute dahinrasenden Solarwind, durch die -200°C kalte, ozonausgedünnte Stratosphäre und durch die in etwa 3 km Höhe liegende Grenzschicht zwischen der oberen und unteren Atmosphäre, dann sieht man die Arktis mit ihrem dominierendem Zentrum, dem arktischen Ozean mit seiner Packeisdecke, in der winterlichen Dunkelheit daliegen. Das Eis bedeckt im Winter etwa 15 Millionen km^2 , im Sommer wird es bis auf etwa 8 Millionen km^2 reduziert. Es kann nach Süden bis zum schmalen Zugang zum Atlantischen Ozean westlich von Grönland reichen, sowie bis der etwa 500 km breiten Fram-Straße zwischen Grönland und Svalbard, im deutsche Sprachgebrauch auch als Spitzbergen bekannt, und der 72 km breiten Beringstraße zwischen dem autonomen Bezirk der Tschuktschen und Alaska. Das Eis bedeckt auch teilweise das den Arktischen Ozean umgebende Land, besonders zu erwähnen sind die 1,7 Millionen km^2 des grönländischen Eisschildes, der bis zu 3200 m Eisdicke und ein Volumen von 2,8 Millionen km^3 aufweist. Lange Gletscherzungen füllen die Täler der Gebirge Norwegens, des Ural, des Kolyma-Gebirgszuges in Sibirien, in Alaska, am Yukon und der Baffininsel, und reichen weit über den Polarkreis hinaus nach Süden.

Viel Schnee fällt in den küstennahen Gebieten, kaum Niederschläge gibt es dagegen in den polaren Wüsten und Halbwüsten der kontinentalen Landmassen mit ihren gemusterten Böden, auf denen Moschusochsen und Rentiere nach Nahrung scharren, Wölfe und Füchse nach Aas suchen und Eisbärinnen in Schneehöhlen ihre Jungen zur Welt bringen. Unter der gefrorenen Oberfläche herrscht Permafrost, tiefreichend und durchgehend in der Arktis, unterbrochen von frostfreien Zonen in der Subarktis. Unter dem die tieferen Seen, Flüsse und Meeresregionen bedeckenden Eis liegt die Wassertemperatur über dem Gefrierpunkt, während die Lufttemperaturen bei -50°C oder darunter liegen können.



Im jahreszeitlichen Rhythmus wird das Meereis dünner und beginnt sich zurückzuziehen, wenn die Sonne über den Horizont steigt und die Luft erwärmt. Auf dem Festland schmelzen Schnee und Eis, die Flüsse füllen sich mit Schmelzwasser, welches in großen Mengen in die küstennahen Meeresteile fließt und dort sowohl die Wassertemperatur und als auch den Salzgehalt verringert. Das Flußwasser zirkuliert im Arktischen Ozean, in tieferen

Bereichen, da es unter die wärmeren Wasserschichten sinkt, und gelangt durch die Öffnungen an der Beringstraße und zwischen Grönland und den Inseln um Spitzbergen in Pazifik und Atlantik. Wale und Seehunde wandern nach Norden, wo sie den Eisbären Nahrung bieten. Auf dem Land erwärmen die Sonnenstrahlen die Bodenoberfläche und die darauf



wachsende Vegetation, wobei die Temperatur höher ansteigt als in der Luft. Das Land explodiert buchstäblich über Nacht in Farben – zum Teil weil es keine Nacht mehr gibt. Die nomadisierenden Rentiere und Zugvögel, Gänse, Enten und Watvögel leben von der aufblühenden Flora und den neu ausgeschlüpften Insektenschwärmen. Lachse wandern die Flüsse hoch, wo Bären schon darauf warten, sie zu verschlingen. Unter der Oberfläche steigen die Temperaturen langsamer an, der Boden taut auf und bildet eine aktive Zone, in der Mikroorganismen ihre Tätigkeit wieder aufnehmen und Insektenlarven ausschlüpfen. Organische Bodenbestandteile können ebenfalls wieder über der Permafrostschicht verrotten.

Es handelt sich hier um das Ökosystem der Arktis – die Kryosphäre (cryos = griech. Eis). Dieses System ist relativ selbsterhaltend (eine Art arktischer Mittelmeerraum), Atmosphäre, Festland, Süßwasser und Ozean sind eng miteinander verwoben, vertikal wie lateral. Stoffe zirkulieren, von der Luft auf das Land und zurück, vom Süßwasser ins Meer und von diesem wieder zurück auf das Land in Boden und Gewässer. Meeresströmungen transportieren große Mengen an Wasser hin und her und sorgen für die Drift von Eis, chemische Stoffe, Tiere und Pflanzen breiten sich aus, auch Menschen sind davon betroffen, überall in der Arktis und in ihren Randbereichen.

Wird auf dieses System Druck ausgeübt, dann macht sich das auch in anderen Teilen des Systems bemerkbar. Bei Klimaänderungen, die es schon immer gegeben hat, kommt es zu erhöhten Schmelzwasserzirkulationen; wenn die Loddenpopulation im Meer stark abnimmt, ist das auf dem Festland in der Nahrungskette fühlbar. Schadstoffe, die an einem Ort in die Atmosphäre oder ins Wasser gelangen, werden in andere Bereiche der Region transportiert.

Hier haben wir es mit einem integrierten, dynamischen Ökosystem zu tun, welches von der Energie der Sonne angetrieben wird.



Dieses System ist jedoch nicht vom Rest der Erde isoliert – kein Ökosystem dieser Welt ist vollständig auf sich gestellt. Das arktische System geht über in Systeme wärmerer Regionen, zwischen denen es zu Interaktionen kommt. Die arktischen Luftmassen geraten als kalte Luftmassen im Winter in den Süden, während die Winde aus dem Süden warme Luft – und Schadstoffe – nach Norden bringen. Säugetiere, Vögel und Fische wandern im Sommer zu den nahrungsreichen Eisrändern, Küstenzonen, Ästuaren und Feuchtgebieten, um dann im Winter wieder nach Süden zu ziehen. Ozeanwasser kühlt sich ab, wenn es in die nördlichen Bereiche gelangt, während das kalte Süßwasser Teil des großen „Förderbandsystems“ der Ozeane wird – die sogenannte thermohaline Zirkulation – die signifikant das Klima auch auf dem Festland bestimmt und Einfluß auf die Bedingungen im Meer hat.

Das sich verändernde arktische Ökosystem

Beim Studium des Systems über Jahrzehnte oder über Jahrhunderte hinweg erkennt man Perioden wärmeren und kühleren Klimas, die natürlichen Ursprungs sind. Kurze Kälteperioden können durch die Eruption von vulkanischen Aschen verursacht werden, die in Atmosphäre und Stratosphäre zirkulieren und kurzfristig für ein paar Jahre die Sonneneinstrahlung reduzieren. Dies geschah z.B. nach den Eruptionen der Vulkane Tambora im Jahre 1815, Krakatau im Jahre 1883, beide in Indonesien, und des Vulkans Pinatubo in den Philippinen im Jahre 1991. Längere Perioden der Klimaänderung können z.B. Verlagerungen der Nordatlantikzirkulation verursachen, oder eine Art kleiner Eiszeit auslösen, wie z.B. diejenige des 16. und 17. Jahrhunderts. Das Ökosystem reagiert darauf genauso wie auf die jahreszeitlichen Änderungen.

Eiskappen und Schneedecken dehnen sich aus und gehen wieder zurück, Gletscher bewegen sich vor und zurück und schaffen die typischen U-Täler in Gebirgsregionen, hinterlassen Moränen und verändern so das Bild der Landschaft. Reißende Flüsse graben neue Flußbetten aus und vergrößern Überflutungsflächen. Sedimentationsgebiete entstehen hingegen bei abnehmender Fließgeschwindigkeit des Wassers in küstennahen Bereichen der Flüsse, sodaß alte Überflutungsflächen austrocknen können. Die Landoberfläche wird regelmäßig durch Auftauen und Gefrieren des Bodens durchbewegt, mit wechselndem Klima wandern Permafrost und Eiskeile im Boden hoch und runter, und schaffen regelmäßige Muster, sogenannten Polygone, auf flachen oder leicht geneigtem Grund. Beim Rückzug von Gletschern und Eisfeldern erobert die Vegetation neues Land, organische Stoffe akkumulieren sich langsam bei der Reifung des Bodens, bei feuchtem Untergrund kommt es zur Bildung von Torf. Auf dem Festland und im Meer folgen Flora und Fauna in ihren äußersten geographischen Verbreitungsgebieten im Norden (und Süden) Klimaschwankungen. Auf Inseln und den Gipfeln der Gebirgsregionen können daher Arten, die sich in der Randzone ihres Habitats befinden, lokal aussterben, weil sie kein Rückzugsgebiet mehr haben.

Über Jahrtausende hinweg folgt sogar die Erdoberfläche den Klimaschwankungen, sich hebend und senkend durch das veränderliche Gewicht der auf ihr lastenden Eismassen. So entstehen, gehobene (oder abgesunkene) Strand- und Flußterassen, die Richtungsänderungen der Flüsse verursachen. Der Anstieg oder das Absinken wird erst richtig deutlich über lange Zeiträume, ist aber auch schon in kürzeren Zeiträumen meßbar, z.B. der gegenwärtige globale Anstieg des Meeresniveaus um 2-3 mm pro Jahrzehnt, einer der vielen langsamen, aber kontinuierlichen Prozesse, der auch im arktischen Ökosystem wirksam ist.

Klimaschwankungen haben die Arktis geformt und so das Leben dort schon seit Jahrtausenden beeinflußt. Das Klima schwankt nicht nur temporär, sondern auch auf verschiedene Weise in verschiedenen Regionen der Arktis. Pflanzen und Tiere, die sich den vorherrschenden Bedingungen am besten angepaßt haben, haben die besten Überlebenschancen. Lokale Habitats können sehr verschieden sein, besonders auf dem Festland, wo das Klima am rauhesten ist und Klimawechsel am stärksten fühlbar sind. In geschützten, nach Süden ausgerichteten, und daher wärmeren Lagen sind Arten vorherrschend, die nur wenig Kälte vertragen. Feuchte Niederungen und Tümpel sind Zufluchtorte für Arten in Zeiten geringer Niederschläge. Frost- und Auftauzonen bieten Arten, die gute Kolonisatoren sind, aber nicht so geeignet für Konkurrenzkampf, Überlebenschancen. So haben die physischen Unterschiede der Landschaft und die

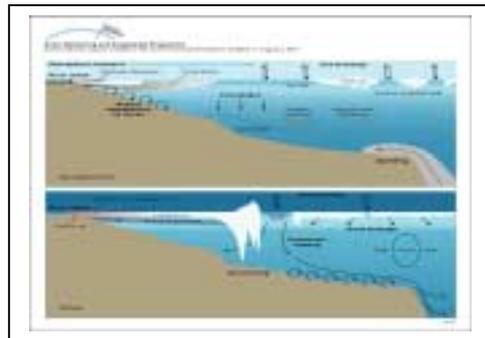
Klimaschwankungen der Vergangenheit eine Flora und Fauna begünstigt, die sozusagen „vor-angepaßt“ für den ökologischen Druck kommender Klimawechsel ist.

Die arktischen Gradienten

Das Arktische Ökosystem ist wie ein Puzzle, das aus vielen Teilen besteht. Die Ökosysteme, die wir normalerweise betrachten, die verschiedenen Habitats, sind einzelne Systeme mit untereinander verbundenen Teilen und Prozessen, welche, wir wir schon gesehen haben, jedoch nicht in sich selbst ruhen und isoliert voneinander sind. Sie verändern sich schrittweise im Hinblick auf bestimmte Umweltgradienten. Diese physikalischen Gradienten bestimmen die Struktur und die Funktion der Ökosysteme, deren Dynamik und Reaktionen auf die sich ständig verändernde Umwelt.

Welches sind diese Gradienten? Auf dem Festland, in Süß- und Meerwasser ist es der Anstieg der Temperatur von Norden nach Süden, weitere, großräumig wirkende physikalische Gradienten haben ebenfalls bedeutenden Einfluß auf die Struktur und Funktion der Ökosysteme.

- Auf dem Festland, bewirkt der klimatische Gradient eine Zunahme der jahreszeitlichen Temperaturschwankungen, wenn man sich von der Küste mit ozeanischem Einfluß in Richtung Inland mit kontinentaler Betonung des Klimas bewegt. Dieser Gradient ist auch für die Abnahme der Niederschläge in Form von Regen oder Schnee von der Küste ins Inland verantwortlich. Küstennahe Gebirge wirken als Wolkenstauer und verstärken die örtlichen, als Regen oder Schnee auftretenden Niederschläge. In Gebirgen treten auch scharf ausgeprägte vertikale Temperaturgradienten auf.
- Süßwassersysteme werden von der Topographie (Hangneigung) gesteuert, die wiederum von der Geologie des jeweiligen Gebietes abhängt. Flüsse oder Gletscher folgen entweder engen Tälern oder verteilen sich über die weitausgedehnten, flachen Tundraebenen.
- Marine Systeme reichen von der Küsten mit ihren Gezeitenzonen, über die weiten Kontinentalschelfe bis zum tiefgelegenen Ozeanboden mit seinen Tälern, Trögen und Gebirgszügen, ein Spiegelbild der kontinentalen Landoberfläche.



Wie reagieren diese Systeme auf die Umweltgradienten? Wie verändern sich die Strukturen und Prozesse? Was geschieht mit den Teilen des Puzzles? Sehen wir uns die Dynamik genauer an, indem wir uns an den Gradienten der drei Subsysteme Festland, Süßwasser und Ozean entlangbewegen

Das terrestrische Ökosystem – oder besser gesagt, die verschiedenen Ökosysteme

Aus dem Weltraum kann man die Polarwüsten oder auch Frostschuttwüsten der Arktis, die kalten Wüsten der Erde, gut erkennen. Zwischen Gesteinstrümmern wachsen nur hier und da kleine Teppiche von Steinbrech, Mohn oder Zwergweide und Moose. Flechten bedecken die nach Süden gerichteten Steinflächen. Das Land ist jedoch nicht überall öde. Auf der Devon-Insel im nördlichen Kanada gibt es z.B. eine kleine, nach Süden gerichtete Bucht, die in das Kalksteinplateau eingeschnitten ist. Das Truelove-Flachland weist eine Serie von Strandterrassen aus, die durch das Herausheben des Festlandes aus dem Meer entstanden sind. Diese Terrassen stauen Schmelzwasser, und hier können Pflanzen gedeihen, die eher von den Sonnenstrahlen als der Lufttemperatur aufgewärmt werden. Auf ähnliche Weise wachsen relativ üppige Moose und Flechten während der wenigen „Sommermonate“, dort, wo Wasser aus Schneefeldern abfließt. Die lokale Topographie kann also die alles bestimmende regionale Kälte etwa abmildern. Das Vorhandensein von Wasser ist jedoch von entscheidender Bedeutung. Die riesigen steinigen Bodenflächen haben noch nicht genug organische Substanz akkumuliert, wodurch Wasser ungehindert abfließt und der Boden im Sommer austrocknet.

Weiter im Süden oder näher an den Küsten wird die Flora allmählich vielfältiger und bedeckt bis über die Hälfte des Bodens. Wir befinden uns jetzt in den polaren Halbwüsten. Noch üppigere Vegetation tritt in geschützten und feuchten Gebieten auf, wie z.B. Gräser, Seggen, Sträucher, Zwergweiden, Birken und Lärchen. Hier können die Samen besser überleben als in den Gebieten des ungehinderten Abflusses und Bodenaustrocknens im Sommer.

Der Unterschied zwischen Wüste und Halbwüste kann nicht exakt bestimmt werden, es handelt sich um einen allmählichen Übergang, kleine Zonen und Flecken des einen Systems können in das andere hineinreichen. Drei Landschaftsbildner, zwei offensichtliche und ein verborgener spielen die Hauptrollen in der Dynamik dieser Landschaften:

- **Schnee.** Schneetiefe, -zusammensetzung und Fallzeit sind die bestimmenden Faktoren. Neuschnee ist ein ausgezeichneter Isolierstoff, Verdichtung und durch wechselndes Auftauen und Einfrieren entstandene Eiskrusten erhöhen die Wärmeleitfähigkeit um das hundertfache. Durch diese Isolierfähigkeit bleiben Böden, oder deren aktive Schicht, trotz der enormen Kälte nach frühem Tiefschnee bis weit in den Winter ungefroren. Lemminge und Maulwürfe graben sich ein und bringen unter der Schneedecke ihre Jungen zur Welt. Schneehühner graben sich ein, um nicht den Polarfüchsen zum Opfer zu fallen. Nur Rentiere und Moschusochsen haben Schwierigkeiten, pflanzliche Nahrung freizulegen. Im Frühling verhindern späte Schneefelder den Nestbau von Vögeln und das Ausschlüpfen von Insekten. Geringe Schneetiefe exponiert die Pflanzen, Frost und Tierbiß verringern die Bestände, Eiskrusten schützen dagegen vor den Hufen der Rentiere. Frühe Schneeschmelze vor dem Bodenauftauen überflutet die Höhlen der kleinen Säugetiere, die entweder ertrinken oder Raubtieren zum Opfer fallen. Wasser in flüssiger oder fester Form ist also ein entscheidender Faktor.

- **Kryo- oder Congeliperturbation.** Bodendurchbewegung durch tägliches oder jahreszeitliches Auftauen und Wiedereinfrieren führt zum allmählichen Transport von Bodenpartikeln, Steinen und größeren Blöcken, die dadurch in verschiedene Muster (Polygone) sortiert werden. Diese Polygone stören den Pflanzenwuchs, ermöglichen andererseits die Bildung feineren, feuchten Bodens, der für eine wenn auch nur kurze Rekolonisation geeignet ist. Die durch die ständige Frostbewegungen verursachten Bodenrisse stellen zusätzliche Kolonisationsräume dar. Die Kraft des Wasser, welches seine Phasen zwischen flüssig und fest wechselt, formt die Landoberfläche.
- **Dauerfrost (Permafrost).** Die oberste Bodenschicht kann bis zu 20 cm Tiefe in feuchten oder aus feinen Partikel bestehenden Böden auftauen, etwas tiefer in trockenen Böden aus größeren Partikeln. Die Schichten darunter bleiben gefroren, auch wenn die Temperatur vielleicht nur knapp unter dem Gefrierpunkt liegt (-1°C bis -3°C). Im Sommer können die täglichen Lufttemperaturschwankung durch die Sonneneinstrahlung bis zu 50°C betragen, doch die geringe Wärmeleitung und Kühlung durch den Permafrost dämpft diese täglichen oder jahreszeitlichen Schwankungen im Boden erheblich. Der undurchdringliche Dauerfrost verhindert das Abfließen von Oberflächenwasser ins Grundwasser, wodurch Wasser in der obersten Bodenschicht verbleibt und das Fließen der Landoberfläche an Hängen bewirkt (Solifluktion). Dauerfrost ist das verborgene Element der Landschaft.

Die riesigen Flächen der Wüsten und Halbwüsten in der Arktis, welche besonders in Rußland und Kanada auftreten, sind also nur spärlich von Vegetation bedeckt. Die Vegetationsmuster sind winzig im Vergleich zur gewaltigen Ausdehnung der öden Flächen. Alle landschaftsbildenden Formen sind kleinmaßstäblich im Vergleich zu der gewaltigen Ausdehnung dieser Gebiete. Ein Ökosystem kann mehrere Landschaftsbildner umfassen, z.B. aus mehreren Vegetationsinseln bestehen, welches ein paar hundert Quadratmeter bis zu wenigen Quadratkilometern einnimmt. Im kleinen Maßstab bildet eine Vegetationsinsel ein Ökosystem. In jedem dieser Ökosysteme kann man eine Grundstruktur erkennen, die normalerweise durch die Vegetation oder die Morphologie der Oberfläche bestimmt ist. Die Ökosysteme werden durch die Prozesse der Primärproduktion, der Stoffzersetzung und -zirkulation definiert, mit den dazugehörigen Stoffzu- und abflüssen. Ein Ökosystem ist niemals vollständig geschlossen. In den arktischen Wüsten und Halbwüsten werden die Verbindungen zwischen kleinmaßstäblichen Ökosystemen oft durch Oberflächenwasser und durch Tiere hergestellt, die große Entfernungen zurücklegen und sich die kleinen Inseln üppiger Vegetation in geschützten Flußtäälern zunutze machen.

Zwischen diesen Wüsten und der Tundra gibt es keine scharfe Grenze. Kleine Bereiche der typischen Tundravegetation, Zwergsträucher, Heidekraut, Wollgrasbüschel oder Feuchtmoores treten bereits hoch im Norden auf, werden aber erst weiter südlich bestimmend, veränderlich je nach Klima, der Geologie des Untergrundes, Bodenbedingungen und Hangneigung.

Zwergstrauchtundra. Sie bildet eine 50-80 cm dichte Vegetationsdecke aus Zwergbirken, Weiden und Erlen, Krähenbeeren, Blaubeeren, Heidekraut, Rhododendron, Seggen und Steinbrech, über einer durchgehenden Flechten- und Mooschicht. In geschützten Lagen kann diese Decke sogar bis zu 2 Meter mächtig

werden. Die Strauchtundra tritt vornehmlich auf trockeneren Böden auf, ihre Ausdehnung spielt die jeweiligen klimatischen Bedingungen wieder. So findet man sie bis zum 74. Breitengrad an der Westküste Grönlands, aber nur bis zum 62. an der Ostküste, die nicht in den wärmenden Einfluß des Labrador-Stroms kommt. Die Pflanzen reagieren auf geringe Änderungen der physikalischen Umweltbedingungen. Die Seggen- und Zwergstrauchtundra dehnt sich über große Bereiche Rußlands aus, und geht über in die Wollgras- und Zwergstrauchtundra, in der Wollgrasbüschel oder Seggen auf eher feuchten und ärmeren, leicht sauren Böden wachsen. Wo der Abfluß von Schmelzwasser durch Dauerfrost, Lehmböden oder ebener Landoberfläche gehemmt ist, dominieren in weiten Arealen Sümpfe. In diesen Sümpfen sind Seggen die am häufigsten auftretenden Pflanzen, daneben gibt es zahlreiche andere Arten, sowie mächtige Moos- und Torfmooschichten. Die Oberfläche wird oft von kleinen Hügeln und dazwischen liegenden Tümpeln gebildet, eine Landschaft, die hauptsächlich durch den Wechseln von Auftauen und Frost zustande gekommen ist. Frostaufbrüche, Polygone, Risse und andere Muster unterbrechen die Vegetationsdecke. Diese morphologischen Erscheinungen werden seltener, wenn eine an Dichte zunehmende Vegetationsdecke den Boden weitgehend isoliert. Doch die Kraft von Eis und Permafrost kann die Landschaft immer noch erheblich gestalten, was z.B. an durch Frosteinwirkung aufgewölbten Kuppen und den oft mehrere Zehner von Meter hohen Palsen oder Pingos deutlich wird.

Weiter in Richtung Süden werden durch Klimaverbesserung Birken häufiger, Fichten, Tanne und Lärchen formen die Baumtundra. Die bodennahe Vegetation ist der nördlicheren noch ähnlich, verschwindet aber allmählich durch den wachsenden Baumbestand, der den Beginn der eigentlichen Taiga (borealer Nadelwald) markiert. Hier verschwindet die bodennahe Vegetation durch den dichten Bestand von Fichten und Tannen nahezu völlig, wodurch der Boden zum Austrocknen neigt. Er wird auch kühl gehalten, sodaß trotz wärmeren Klimas im Wald Permafrostbedingungen herrschen, während der Dauerfrost in Lichtungen nicht mehr auftritt und daher nicht mehr von einem zusammenhängenden Permafrostbereich geredet werden kann.

Dieser Gradient von der Polarwüste bis zur Taiga mit seinen vielen Variationen und Mustern ist die Landschaft des Nordens. Darüber ist bereits viel publiziert worden, und heftige Debatten werden über die Definition verschiedener Pflanzengesellschaften, der bewundernswerten Anpassung von Tieren und Pflanzen und ihre Naturgeschichte geführt. Was läßt sich über das Gesamtsystem sagen? Welches ist die Dynamik dieser Landschaft? Wie funktioniert sie als integriertes Ökosystem oder eine Serie von Ökosystemen? Diese Fragen gewinnen an Bedeutung, da sich die Umwelt durch das Klima, die Landnutzung, die industrielle Entwicklung und die Umweltverschmutzung ändert. Betrachten wir im folgenden einige der sogenannten Ökosystemdynamiken und -funktionen – die Änderungen über Zeiträume, Nahrungsketten, Kohlenstoff- und Nährstoffzirkulation und Artenvielfalt.

Zeitliche Systemänderungen

Als vor 10- bis 20.000 Jahren die Gletscher und Eiskappen zurückgingen, blieb der nackte Erdboden zurück, bedeckt vom Abrieb des Eises in Form von Gesteinspartikeln aller Größen, vom Schutt bis zum Ton. Dieser Abrieb bildete den ersten „Boden“. Auf granitischen Gesteinen geschah die Verwitterung langsam, es bildeten sich nur wenig gröbere Partikel und kaum lösliche Nährstoffe. Kalk verwitterten wesentlich schneller, es bildeten sich alkalireiche Böden. Die Bodenpartikel lösten sich jedoch schnell auf, es kam zur Bildung von Lösungskanälen, Nährstoffe verschwanden daher ziemlich schnell aus

dem System. Auf anderen Sedimentgesteinen verblieben Sand- und Tonpartikel, wichtige Nährstoffminerale wie Kalium von Phosphor gingen nicht verloren. Die Geologie des Untergrundes bestimmte also den Lauf der Entwicklung des Ökosystems. Zum Beginn einer Vegetationsfolge fehlte notwendiger Stickstoff. Niederschläge waren minimal, doch dort, wo Wasser verfügbar war, bildeten sich Kolonien von Algen, die atmosphärischen Stickstoff binden konnten. Algen konnten sogar unter Schuttbrocken wachsen, indem sie reflektiertes Licht benutzten, da Steine die von der Sonne eingestrahlte Wärme effektiv speichern. Flechten wuchsen langsam auf Steinen heran. Zusammengesetzt aus Algen und Pilzen, können Flechten produzieren, sich zersetzen und wiederaufbereiten – ein selbstgenügendes Ökosystem.

Es sind diese ersten Pioniere mit der Fähigkeit, den wichtigen Stickstoff und andere Nährstoffe primär zu binden, die die Abfolge von Pflanzengemeinschaften schufen, an Stellen, wo kein organisches Material aus vorherigen Systemen verfügbar war, denn die Akkumulation von Nährstoffkapital ist von entscheidender Bedeutung. Bakterien (Chemolithotrophen) mit der Fähigkeit, elementare Stoffe aus den Gesteinen zu extrahieren, stützten den Kolonisationsprozeß. Wenn sich kleine Mengen organischen Materials angesammelt haben, beginnt der Kolonisationsprozeß anderer Pflanzen durch Samen. In anderen Bereichen, wo organische Stoffe aus der die Eisbedeckung vorangehenden Vegetationsdecke verblieben waren, oder durch Flüsse umverteilt wurden, geschah die Kolonisation rascher, jedoch nicht ohne die Unterstützung durch stickstoffbindende Bakterien.

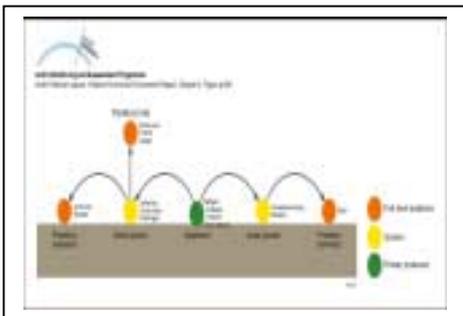
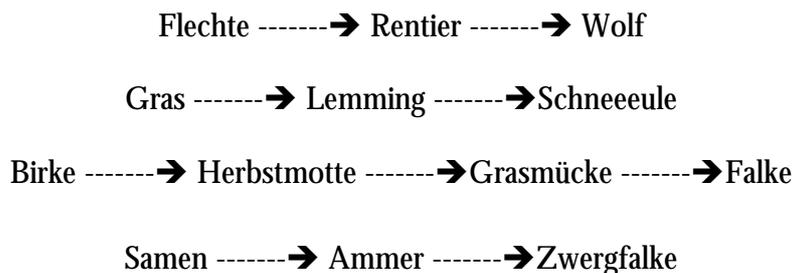
Die frühen Kolonisatoren tendieren zu einer Strategie des raschen Wachstums und Reproduzierens, um die besetzten Stellen voll auszunutzen. Nach und nach gesellen sich andere Arten dazu, indem sie sich den Schutz durch die bereits vorhandenen Arten und das Vorhandensein organischen Materials zunutze machen. Allmählich wird die Vegetation dichter, die Moosdecke nimmt zu und der Erdboden wird vor den tiefen Temperaturen isoliert. Ironischerweise wird dadurch die Schmelze des Permafrostbodens behindert, wodurch die aktive Bodenschicht dünner wird und die Wurzelung erschwert. Wasser fließt nicht ab, Recycling von Nährstoffen geht zurück. Diejenigen Pflanzen, die ihre Ressourcen konservieren und intern wiederaufarbeiten, um für den notwendigen Wachstumsschub zum Sommerbeginn gerüstet zu sein, haben jetzt den Vorteil. Sie sind im Vorteil gegenüber der Konkurrenz; was sie einmal erworben haben, behalten sie. Die Tierwelt folgt den graduellen Veränderungen der Pflanzenwelt und des Bodens. Die frühen floralen Kolonisationskerne ziehen grasende Tiere an. Kleine Insekten werden durch den Wind verweht, die Glücklichen unter ihnen landen auf den Vegetationsinseln. In späteren Phasen werden viele Pflanzen langlebig und holzig, oft produzieren sie Abwehrstoffe gegen Tiere. Die Tierwelt reagiert darauf mit Spezialisierung, grasende Arten greifen nur auf diese Pflanzen zurück, wenn leichter kaubare und verdauliche Nahrung nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Zeitskala dieser Entwicklung, der Primärsukzession, bemißt sich in Jahrhunderten, wobei die Abfolge im Einzelnen zwischen verschiedenen Orten sehr unterschiedlich sein kann, so wie auch die Initialbedingungen, die eine Pflanzenabfolge ermöglichen, sehr verschieden sind. Bodenstörungen durch Frosteinwirkungen, Erosion, Seeabflüsse, Waldbrände und menschliche Aktivitäten wie z.B. industrielle Entwicklung, können einen Neubeginn einer Abfolge auslösen. Diese sekundären Abfolgen können oft schon in Dekaden ablaufen.

Grundsätzlich ist die Region der Arktis Änderungen des Klimas, welches zu Zeiten wärmer oder kälter war, über Tausenden von Jahren unterworfen gewesen. Fauna und Flora ist diesen veränderlichen, jedoch immer schroffen Bedingungen angepaßt worden. Besonders raffinierte Anpassungsmethoden wie z.B. der Einsatz von Antifrierstoffen, wird es dem Leben ermöglichen, entsprechend auf die prognostizierten Klimaänderungen aufgrund der von Menschen verursachten Eintragung von Kohlenstoff in die Atmosphäre zu reagieren und zu überleben. Die Artenverteilung wird sich verändern; einige Arten werden in andere Regionen abwandern, andere ziehen sich zurück; alles ändert sich - so wie es schon immer gewesen ist. Das Auf und Ab der verschiedenen Rentierunterarten in Grönland während der letzten 10.000 Jahre verdeutlicht diese langzeitlichen, dynamischen Entwicklungen, die in diesem Fall durch Änderungen der Oberfläche, Eis- und Gletscherbarrieren, Klimaänderungen, Überweidung und Nachstellung durch Mensch und Wolf verursacht worden sind.

Das Netz des Lebens – und Sterbens

Aus der Entfernung gesehen, scheint es eindeutig, wer wen auffrißt, wenn man sich das in einer Momentaufnahme ansieht:



Die Wirklichkeit ist jedoch eher eine komplexe Nahrungskette, in der der Unterschied zwischen Fleischfressern und Raubtieren undeutlich ist; die meisten Arten müssen sich auf einen weiten Nahrungsbereich verlassen, jeweils abhängig davon, was verfügbar ist. Die sogenannten Top-Raubtierarten, die großen Räuber, leben von diversen Opfern, und ziehen sich auf Insekten und Pflanzen zurück, wenn ihre Hauptnahrungsquelle versiegt ist.

Große Tiere können nicht von kleinen gefressen werden – das stellt sich aber als unwahr heraus, wenn man sieht, wie Füchse sich von Rentierkadavern ernähren, weil die Rentiere aus Hunger zugrunde gegangen sind, oder wenn es sich um von der Herde im Stich gelassene Kälber handelt.

Lemminge und andere kleine Säugetierarten stellen die wichtigste Nahrung für viele Raubtiere dar. Die großen Fluktuationen der Lemmingpopulationen können für die Raubtiere problematisch werden, weil sie als Nahrung für die Jungen während der Jungtieraufzugssaison zur Verfügung stehen müssen. Eine besondere Anpassung an die Lemming-Zyklen besteht in der entsprechenden Regulierung der Anzahl von Jungtieren, die zu ernähren sind. Wenn eine Lemming-Population nach der Winteraufzucht unter

der schützenden Schneedecke besonders zahlreich ist, dann werden von Schneeeulen, Raubmöven und Wieseln große Bruten oder Gelege hervorgebracht. Manche dieser Arten suchen sogar zielgerichtet die Areale von hohen Lemming-Populationen auf. Auch Rentiere fressen Lemming unter diesen Umständen. So kommt es dazu, daß die Lemmingbestände durch Krankheiten, als Opfer von Raubtieren und Überweidung drastisch verringert werden. Im folgenden Jahr oder Jahren bringen die Lemmingräuber keine oder nur wenige Junge zur Welt, oder verlassen die Region. Dadurch können sich die Lemmingbestände wieder erholen. Hier haben wir es mit dem Lemming-Zyklus zu tun, der eine klassische Raubtier-Opfer-Dynamik darstellt – die Bestände an Opfertieren nehmen zu, dadurch erhöht sich die Jagd auf diese Tiere, was wiederum deren Bestände verringert, und schließlich nehmen die Bestände der Räuber ab, die Opfertiere können sich wieder erholen, der Zyklus beginnt von neuem. Die Wirklichkeit ist selten so einfach, erleuchtet aber die Prinzipien der Nahrungskettendynamik und die Schlüsselstellung der Lemminge in der Arktis. Verborgenen in dieser Dynamik ist eine andere Dimension des Systems – der Zyklus der Zersetzung.

Die Lemminge ernähren sich von den unteren Teilen der Gras- und Seggenstengel. Während eines Lemming-„Hochs“ sieht eine Tundrawiese aus wie eine Heuwiese nach der Mahd, aber vor dem Einbringen des Heus. Frische Blätter und Lemmingkot werden von Bakterien, Pilzen, Invertebraten im Boden und Insektenlarven verarbeitet, die dann wiederum anderen Invertebraten als Nahrung dienen. Im Abbauzyklus bedeutet das eine riesige Menge von ausschlüpfenden Insekten, die von Käfern und Spinnen an der Bodenoberfläche gefressen werden. Der frühsummerliche Schwall von Schnaken (Tipuliden), Mücken und Moskitos ist die Hauptnahrungsquelle für eine andere Gruppe von größeren, mehr in Erscheinung tretenden Räubern – den Insektenfressern (Insektivoren), wie z.B. Lerchen, Piepern, Ammern und Watvögeln, die letzteren besonders in feuchteren Gebieten. Diese Vögel sind Teil der oberhalb des Erdbodens auftretenden Nahrungskette und fallen wieder anderen Räubern, den Schneeeulen, Falken und Raubmöven zum Opfer. Auf diese Art und Weise verknüpfen sich die verschiedenen Teile des Ökosystems.

Materialtransport: Der Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf(zyklus)

Die Nahrungskette ist ein Indiz dafür, auf welche Art und Weise der Stoffwechsel in Ökosystemen vor sich geht. Beim ersten Blick sieht alles sehr effektiv aus – in Bezug auf die Produktivität ist jedoch das Gegenteil der Fall. Der Transfer von der Pflanzen über Pflanzenfressern zu verschiedenen Stufen von Fleischfressern resultiert in einem Produktionsabfall von mehr als 95% - von Stufe zu Stufe! Zum Beispiel wird die jährliche Pflanzenmasse nur zu 10-20% von Pflanzenfressern konsumiert, wovon nur die Hälfte verdaut wird. Der größte Teil der verdauten Masse wird für die Aufrechterhaltung der Körperfunktionen gebraucht, besonders in Warmblütern, nur ein geringer Teil geht in die Neuproduktion. Die Raubtiere scheinen etwas effizienter in der Verwertung zu sein, weil deren Nahrung etwas verdaulicher ist. Die Wirbellosen verwandeln einen höheren Anteil der verdauten Nahrung in neues Gewebe, weil sie keine besondere Energien für die Aufrechterhaltung der Körpertemperatur brauchen.

Trotz einiger Variationen geschieht in jedem Glied Nahrungskette in etwa das gleiche – es trägt nur einen kleinen Teil der Biomasse im nächsthöheren Glied. Um genug Nahrung zu finden, brauchen Pflanzenfresser daher ein großes Areal, Fleischfresser ein noch größeres. Diese greifen auch auf diverse Nahrungsstoffe zurück – sie sind viel eher

Generalisten als auf bestimmte Nahrung spezialisiert. Sie sind gut angepaßt um so viel Energie wie möglich zu konservieren, durch Überwinterung und Wärmespeicherung, da die Pflanzenproduktion der Arktis nur gering ist. Arktische Ökosysteme können daher genauso wirksam sein wie Ökosysteme in südlicheren Bereichen, weil sie auf verschiedene Weise den klimatischen Bedingungen der Arktis und der beschränkten Nahrungszufuhr angepaßt sind.

Wird also ein Großteil der primären oder auch Pflanzenproduktion verschwendet? Keinesfalls, denn Pflanzen transferieren einen bedeutenden Anteil ihrer Produktion in unterirdische Speicherorgane am Ende der Wachstumsperiode. Das ist ein Teil der Konservierungsstrategie, welche es ihnen ermöglicht, im Frühjahr rasch zu wachsen. Die Masse der Pflanzen in Form von Wurzeln, Rhizomen, etc. ist weitaus größer als der Anteil, der oberirdisch zu sehen ist – eine generelle Erscheinungsform in der Arktis. Diese unterirdische Pflanzenmasse wird sowohl von einigen großen Pflanzenfressern ausgegraben, als auch von im Erdboden lebenden Spezies wie Würmern, Spinnen und Insekten als Nahrung benutzt. Die Nahrungskette setzt sich daher im Boden fort, wobei verrottendes Pflanzenmaterial und Exkremete als wichtige Nahrungsalternative dienen. In einer oder der anderen Form endet der Großteil der Pflanzenproduktion im Erdboden. Dort sorgt sie für eine weitaus größere Artenvielfalt von Mikroorganismen und Wirbellosen, und eine höhere Produktion, als es an der Oberfläche den Anschein hat.

Abgestorbenes pflanzliches Material spielt eine Schlüsselrolle in der Entwicklung von Ökosystemen, da es den Hauptanteil der kleinen Nährstoffmengen enthält, die neue Pflanzen absorbiert haben. Bei der Zersetzung durch Bakterien und Pilze und dem Transport durch die Nahrungskette im Erdboden werden die Nährstoffe der Pflanzenreste von Organismus zu Organismus transferiert, freigesetzt und wieder von Wurzeln aufgenommen. Zugleich wird auch der Kohlenstoff wiederverarbeitet, allmählich jedoch durch Atmung freigesetzt und die Atmosphäre entlassen. Der Zersetzungsprozeß in der Arktis geht sehr langsam vor sich, z.T. wegen der niedrigen Temperaturen und aufgrund des Kühleffektes des Permafrostbodens. Sowohl der Mangel an Feuchtigkeit in gut durchlüfteten Böden als auch der Überschuß an Wasser, dort wo die Entwässerung nicht stattfindet, verringern die Zersetzungsrate. Pflanzenreste verlieren nur etwa 5-10% ihres Gewichtes im ersten Jahr. Diese Rate verringert sich noch, da auf längere Sicht nur die widerstandsfähigeren Reste beim Übergang in kältere Bodenlagen übrigbleiben. Die organischen Bodenbestandteile von Generationen von Pflanzen akkumulieren sich allmählich zu reiferen Böden. In Sümpfen kommt es durch Sauerstoffabschluß und sehr niedrige Temperaturen durch Wasseransammlung zur umfangreichen Torfbildung.

Die Zirkulation von Kohlenstoff und Nährstoffen durch das Ökosystem geschieht entlang vieler verschiedener Wege und folgt diversen Prozessen. Das Ökosystem bildet keinen geschlossenen Kreislauf. Sowohl Kohlenstoff als auch die Nährstoffe gelangen aus der Atmosphäre in das System und zirkulieren darin. Einiges davon wird aus dem System ausgelaugt und gelangt so in Bäche und Flüsse. Der Großteil des Kohlenstoffes kehrt schließlich wieder in die Atmosphäre zurück. Das empfindliche Gleichgewicht zwischen Eintrag von Kohlenstoff in das Ökosystem und der Rückfluß in die Atmosphäre ist zum Mittelpunkt der Frage geworden, welche Rolle die nördlichen Regionen in der Frage des Klimawechsels spielen.

Auch wenn die Pflanzenproduktion im Norden sehr gering ist, ist die Rate der Zersetzung äußerst niedrig. Als Ergebnis der allmählichen Akkumulation von Bodenmaterial enthalten die Böden des Nordens fast 25% des Kohlenstoffs auf der Erde, in Form von Sümpfen, Mooren und Torfmooren. Da die Böden der Arktis relativ jung sind, d.h. erst etwa 10.000 Jahre, haben sie allmählich Kohlenstoff als Pflanzendecke und organisches Bodenmaterial akkumuliert. Trotz der Rückkehr von Kohlenstoff in die Atmosphäre aufgrund der Respiration von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen, hat das Ökosystem eine Nettobalance an Kohlenstoff, d.h. es hält mehr zurück als einfließt. Die Organismen dort haben also dazu beigetragen, den Anstieg von Kohlenstoff in der Atmosphäre, der für den Klimawechsel verantwortlich ist, zu verringern. Ironischerweise wird die gegenwärtige und vorausgesagte Erwärmung vermutlich die Zersetzungsrate in der Arktis erhöhen, wodurch mehr im Boden gespeicherter Kohlenstoff freigesetzt wird. Das Gleichgewicht zwischen Speicherung durch Photosynthese und Freisetzung durch die Verrottung oder Zersetzung wird anfangen zu schwanken. Die Ökosysteme der Tundra werden so wahrscheinlich in Zukunft zu Nettolieferanten von Kohlenstoff anstelle von Nettospeichern. Es gibt bereits Hinweise darauf, daß dies in Alaska schon heute geschieht.

Was geschieht in Zukunft in terrestrischen Ökosystemen?

Die Prognose von Veränderungen in den nächsten 50-100 Jahren wird sehr schwierig. Es müssen ja nicht nur die Änderungen im Gleichgewicht zwischen Produktion und Zersetzung im System berücksichtigt werden, sondern auch der Grad der Vegetationsausbreitung, der einem Klimawechsel folgt. Hier können Computermodelle behilflich sein. Das jüngste Modell faßt die verschiedenen Klimafaktoren zusammen, die den Klimawechsel vorantreiben, und die daraus resultierenden Reaktion im Wachstum der Pflanzen und der organischen Bodenbestandteile. Man erwartet, daß die mittleren Jahrestemperaturen der Region um etwa 4°C ansteigen, mehr in den nördlichsten Bereichen der Arktis, weniger in der Subarktis und den borealen Nadelwaldzonen. Schnee- und Regenfälle werden sich kaum ändern, möglicherweise wird ein leichter Anstieg um wenige cm pro Jahrzehnt zu verzeichnen sein. Basierend auf diesen Prämissen wurde ein Modell für den Zeitraum von 1050 bis zum Jahre 2100 berechnet, für die zirkumpolaren Regionen nördlich des 50. Breitengrades. Das Modell prophezeit, daß

- der Nadelwald sich auf Kosten der Tundra ausbreiten wird.
- die gegenwärtige Fläche der Tundra bis zum Jahre 2100 halbiert wird.
- die Zunahme an Wald die gestiegene Zersetzung annullieren wird, sodaß die Region in diesem Jahrhundert weiterhin ein Nettospeicher von Kohlenstoff sein wird.

Viele Faktoren sind zu berücksichtigen, solche Modelle können daher nur vorläufige Resulte zeitigen. Veränderungen sind nicht gleich- und regelmäßig. Es wird Zeiträume und Regionen geben, in denen sich Prozesse kurzfristig (für Jahrzehnte) aufgrund lokaler Bedingungen und Klimaänderungen umkehren. Kurzfristige Veränderungen werden schwer zu erfassen sein, z. T. weil die biologischen Reaktionen hinter dem Klimatrend zurückbleiben. Das System wird sich jedoch ohne Zweifel ändern.

Terrestrische Ökosysteme: Gesamtaussichten

- Terrestrische Ökosysteme haben sich in der Vergangenheit verändert, ändern sich heute und werden sich auch in Zukunft ändern.
- Die Systeme reagieren auf Klimawechsel mit Änderungen in Raum und Zeit, vom kleinmaßstäblichen Polygon in der Tundra bis zu zirkumpolaren Floren- und Faunenbewegungen.
- Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen sind einander innig verbunden, ober- und unterirdisch, und über Räume hinweg.
- Energie in Form von Wärme, Wasser, Kohlenstoff und Nährstoffe werden durch physikalische und biologische Prozesse in das System transportiert, zirkulieren in ihm und verlassen es wieder.
- Veränderungen in der Atmosphäre haben Einfluß auf das Festland, Änderungen auf dem Festland schlagen aber durch Feedback-Effekte in der Atmosphäre zurück..

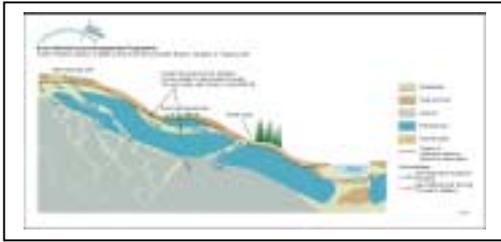
Man kann verschiedene Vegetationstypen erkennen (Wissenschaftler verbringen viel Zeit damit, über Klassifizierungen zu streiten) und dabei denken, daß es sich um die terrestrischen Ökosysteme handelt. Diese verschiedenen Typen haben gewiß besondere Eigenschaften und sind auf vielfältige Weise miteinander verbunden. In diesem Sinne handelt es sich um Ökosysteme. Sicher ist jedoch, daß es dynamische Systeme sind, die sich Änderungen unterziehen; sie sind eng miteinander und dynamisch mit der weiteren physischen Umwelt verbunden. Der Verständnis dieser weiteren Beziehungen ist von entscheidender Bedeutung, wenn es um den Arten- und Habitatschutz und die Ressourcennutzung geht. Veränderungen an einer Stelle wirken sich auf andere Gebiete aus, was im Süden geschieht, bleibt nicht ohne Wirkung im Norden und umgekehrt. Die Welt als ganzes ist ebenfalls ein Ökosystem!

Schnee, Eis und Wasser

Die drei verschiedenen Phasen von H₂O sind die treibenden Kräfte, die die Oberfläche der Erde formen und so Leben und menschliche Beschäftigung bestimmen. Über Jahrtausende hinweg hat sich der gefallene Schnee akkumuliert, verdichtet und so die große Eiskappe Grönlands sowie die großen Gletscher gebildet. Die jährlichen Schneelagen stellen heute das „gefrorene Archiv“ dar, welches Wissenschaftler zum Zwecke der Erfassung der Klimageschichte erforschen, hauptsächlich auf der riesigen Masse des grönländischen Eisschildes. Diese Eismasse ist bis zu 3000 m mächtig und bildet das größte Süßwasserreservoir der Arktis dar.

Aus den Eisschilden treten mächtige Gletscherzungen hervor, die unter ihrem eigenen Druck talabwärts fließen, und dabei z.T. große Geschwindigkeiten erreichen, von mehreren Meter bis zu einigen Kilometern pro Jahr. Dabei schleifen sie die Gesteinsoberflächen ab (Detersion) Das so anfallende Lockermaterial wird zusammen mit dem Schutt, der von den Talflanken auf den Gletscher fällt, als Moränenmaterial weiter zur Gletscherzunge transportiert. Dort wird es z.T. als Grund- Seiten- oder Endmoräne abgelagert, z.T. mit Gletscherflüssen weitertransportiert. Das Schmelzwasser der Gletscher fließt in Bächen und Flüssen ab, reißend in engen und steilem Gelände, gemächlich im Flachland, wo es sich in Flußebenen auf zahlreiche Arme verteilt. Typisch

für die Arktis sind große Areale mit ihren aus Schmelz- und Gletscherwasser stammenden Tümpeln und Seen.



Permafrost – ein weiterer Wasserspeicher - verhindert jedoch das Abfließen von Wasser in tiefere Boden- und Gesteinsschichten. Daher wird die Landschaft, sogar in Gebieten mit geringen Niederschlägen (weniger als 300 mm in den innerkontinentalen Gebieten), im allgemeinen von Wasser dominiert.

Ausnahmen gibt es nur dort, wo Wasser auf steinigem Untergrund versickern und sich Vegetation daher wegen Trockenheit nicht ausbreiten kann, oder in den polaren Wüstengebieten. Ein Grund für die geringen Schneefälle ist die kalte Luft, die wesentlich weniger Feuchtigkeit aufnehmen kann als warme Luft. An der Küste erreicht relativ warme Luft das Festland, kühlt sich ab, besonders dort wo sie über Gebirgszüge hinweg ziehen muß. Dabei schlägt sich die in den Wolken gespeichert Feuchtigkeit als zumeist als Schnee nieder. Die Küstengebiete sind daher relativ wärmer und erheblich niederschlagsreicher, Niederschläge bis zu 3000 mm und mehr sind nicht selten. Eine Konsequenz der Klimaerwärmung kann daher aufgrund der wasserspeichernden Fähigkeit der Luft darin bestehen, daß in den Küstengebieten noch mehr Niederschläge zu verzeichnen sein werden.

Der König der Fische in der Arktis

In großen Teilen der Arktis sind die Gewässer oligotroph (wörtlich: wenig Nahrung enthaltend), weil es sich um Schmelzwässer handelt und die Gesteine wenig auslaugbare Nährstoffe enthalten. Trotz des Nährstoffmangels wachsen Algen sogar unter dem Eis zugefrorener Seen und stellen so die Grundlage für die Nahrungskette in der Arktis dar. Sie bieten einigen Krustentieren, Wasserflöhen und Krabben, sowie Insektenlarven, Nahrung. Diese wiederum bilden die Existenzgrundlage für den arktischen Saibling – dem König der Fische in der Arktis -, welcher der einzige natürlich vorkommende Süßwasserfisch in den Seen der Arktis. Der Saibling ist sehr erfolgreich, wird 25 Jahre alt und älter, erreicht ein Gewicht von 15-16 kg und ist über die gesamte zirkumpolare Region verbreitet. Diese eine Fischart illustriert einige der Schlüsselfaktoren der Süßwasserbiologie und Humanökologie im Norden.

Der Saibling ist genetisch angepaßt, in einer Umwelt niedriger Temperaturen zu leben, man trifft ihn daher auch auf den nördlichsten Inseln der Arktis an, z.B. in Svalbard. Er lebt den Großteil des Jahres in Seen und Flüssen und wandert nur im Sommer für 1-2 Monaten in die Küstengewässer, um sich dort an dem reichen Nahrungsangebot zu bedienen. Danach kehrt er zum Laichen in die Gewässer zurück. Seine Geschlechtsreife erreicht er in unterschiedlichem Alter, das Laichen kann jährlich, alle zwei Jahre oder seltener geschehen, und hängt hauptsächlich von den Umweltbedingungen ab. Einige Populationen leben aber auch in abflußlosen Seen und entwickeln besondere Charakteristika, die von denen in anderen Seen abweichen. Mitunter treten zwei an Größe deutlich verschiedene Populationen auf, wobei die kleinere von der Bodenfauna und Zooplankton lebt, während die größere sich von den kleineren ernährt – eine Form von Kannibalismus. Es handelt sich hier dann eigentlich um zwei verschiedene Arten. Daher weist der Saibling in der Arktis, am nördlichen Rand seiner Verbreitung, wo er die alleinige Fischart ist, hochflexible Lebensweisen auf.

Weiter im Süden gesellen sich weitere Fischarten zum Saibling, die die niedrigen Temperaturen des äußersten Nordens nicht ertragen können, in wärmeren Wasser aber zu Nahrungskonkurrenten werden. Wo der Saibling zusammen mit der braunen Forelle, z.B. in Nordschweden, existiert, lebt er vom Zooplankton des Oberflächenwasser, während die Forelle sich von der Bodenfauna ernährt. Im Winter ernährt sich der Saibling auch von am Gewässerboden lebender Fauna, während die Forelle die Nahrungsaufnahme einstellt, da sie weniger an die niedrigen Temperaturen angepaßt ist. Eine ähnliche Koexistenz mit aufgeteilten Nahrungsräumen gibt es zwischem dem arktischen Saibling und dem Bachsaibling (auch Bachforelle) in Ostkanada. Wenn die Fischarten in Gewässern zahlreicher werden, engt sich das dem arktischen Saibling verfügbare Nahrungsangebot weiter ein, bis es dazu kommt, daß er nicht mehr existieren kann.

Daher ist die ökologische Nische dieses Fisches, seine Variationen in Größe und anderen biologischen Merkmalen, ein großer Raum in der nördlichsten Zone seines Verbreitungsgebietes, der sich allmählich in Richtung Süden mit zunehmender Artenzahl anderer Fische einengt (ein weiter Umweltgradient!).

Diese ökologischen Merkmale des arktischen Saiblings sind ein gutes Beispiel für eine flexible Lebenshaltung, die vermutlich weit verbreitet ist, jedoch bei anderen arktischen Tier- und Pflanzenarten nicht so offen zutage tritt. Weiter im Süden kann er sich mit eng verwandten Arten, wie dem Bachsaibling kreuzen. Kreuzung ist ein Merkmale vieler Fischarten des Nordens, was nahelegt, daß die Evolution immer noch in dieser jungen Region im Gange ist.

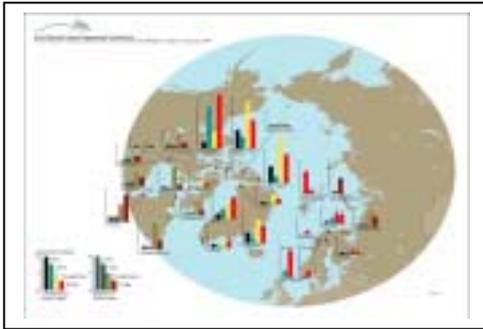
Die Humanökologie hat ebenfalls einen großen Einfluß auf die Ökologie des arktischen Saiblings gehabt. Die folgende Auflistung lokaler und genereller Einflüsse illustriert die allegemeine Rolle, welche die Menschen im Norden spielen:

Seit Jahrhunderten haben die **Inuit** in Grönland und Kanada ihre Plätze für Dauersiedlung so ausgesucht, daß sie vom Süßwasser ins Meerwasser wandernde Fische fangen können. Die Samit in Nordskandinavien haben traditionell Saiblinge in Bergbächen ausgesetzt und auf diese Weise Nahrungsreservoirs entlang der Rentierzugwege angelegt.

Die langzeitige, **selektive Fischerei** mit Netzen entfernt die größeren Fische, wobei die Alterszusammensetzung der Fischpopulation gestört wird und bestimmte Eigenschaften der Lebensentwicklung beeinflußt werden. Der Gebrauch von Giftstoffen und Dynamit hat ganze Fischpopulationen in Svalbard vernichtet. Der wiederholte, totale Fang wandernder Arten durch Steinwehre hat auch in Grönland lokale Fischpopulationen vernichtet.

Die weitverbreitete Errichtung von **Wasserreservoirs für Kraftwerke** hat Wasserstände verändert, ufernahes Laichen reduziert, die offene Wasserfläche vergrößert und die Nahrungsmöglichkeiten eingeschränkt.

Die **Überfischung** wichtiger Arten wie z.B. von Lodde und arktischem Kabeljau hat diese Fische als Nahrungsquelle für den arktischen Saibling während wichtiger Perioden im Meer reduziert.



Die **Einführung** anderer Fischarten und Süßwasserkrabben, um die Fischerei zu verbessern, hat zur Verringerung der Saiblingpopulationen geführt, da Nahrungskonkurrenten eingeführt wurden. Außerdem ist es zur genetischen Änderungen durch Kreuzungen gekommen, was wiederum die Nahrungsketten beeinflußt hat. Andere, unerwartete Resultate des Einführens neuer Arten sind z.B. die Verringerung oder sogar das

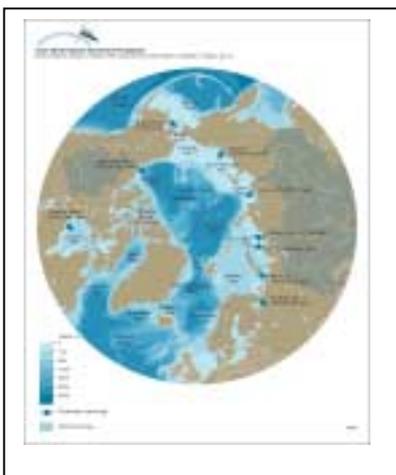
Verschwinden von Entenarten (z.B. Eisente), sowie Fischräubern (Seetauchern, Gänsesägern und Fischadlern).

Übersäuerung durch atmosphärischen Transport von Schadstoffen aus südlicheren Regionen, die im Schnee während des langen Winters akkumuliert werden. Diese Stoffe werden als Schwall saurer Substanzen im Frühling zur Schmelze in die Umwelt eingetragen. Dadurch sind viele skandinavische Seen fischfrei geworden, wodurch der Wuchs von Zooplankton zunahm und fischfressende Vogelarten zugunsten insektenfressender Arten verschwanden.

Persistente organische Schadstoffe (POP's), darunter Pestizide, werden in nördliche Regionen transportiert. Die Anreicherung dieser Stoffe im Fettgewebe führt zu wachsender Konzentration entlang der Nahrungskette. Der arktische Saibling ist ein mittleres Glied in dieser Kette, in vielen Populationen werden Schadstoffgehalte gemessen, die über den jeweiligen nationalen Richtwerten liegen.

Die **Erwärmung der Atmosphäre** wird es vielen Nahrungskonkurrenten ermöglichen, sich dort zu etablieren, wo sie am nördlichen Rand ihres Verbreitungsgebietes leben. Der bisherige Vorteil der Nahrungsaufnahme auch im Winter wird den arktischen Saibling betreffen, denn man rechnet mit relativ höheren Temperaturen gerade während des Winters. Dadurch wird der Saibling aus südlicheren Regionen in die nördlichsten

Eintrag in Seegebiete und Ozeane

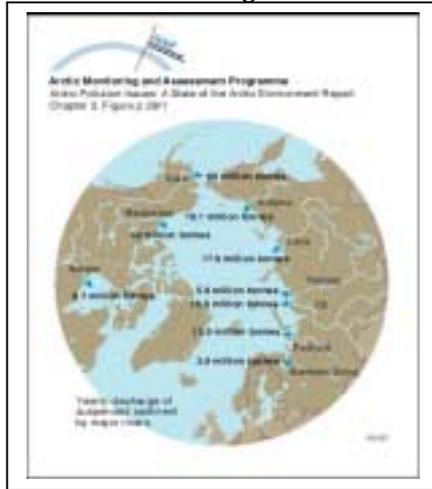


Der Abfluß des Schmelzwasser vom Festland im Frühling erzeugt einen Schwall kalten Wassers im arktischen Ozean. Jährlich fließen etwa 4000 km³ Wasser aus den Flüssen ins Meer. Das sind nur 2% des in das Nordpolarmeer einfließenden Wassers, welches hauptsächlich aus dem Atlantik und zu einem geringen Teil aus der Beringsee stammt, es ist jedoch ein hoher Anteil an Süßwasser, verglichen mit anderen Ozeanen. Dieses Süßwasser transportiert Nährstoffe und Sedimente aus dem Gletscherabrieb in den Ozean

Die größeren Sedimente lagern sich ab, sobald die Fließgeschwindigkeit in flachen Gebieten abnimmt, es werden aber gewaltige Mengen an Silt- und

Tonpartikeln in die Ästuar und ins Meer geschwemmt. Der Strom Yenisey führt etwa 6 Millionen Tonnen an Feinsedimenten in der gesamten Wassermenge von 600 km³ in die

flache Kara-See. Hingegen transportiert der Strom MacKenzie etwa 7 mal soviel an Sedimenten in nur etwa der Hälfte an Wasser, gemessen am Yenisey, in die Beaufort-See. Der Unterschied liegt im Lauf der beiden Ströme: während der Yenisey über flache,

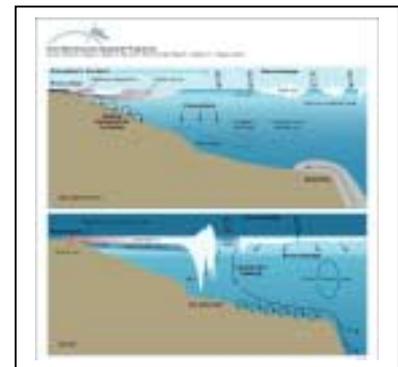


gefrorene Tundra fließt, liegt das kürzere und steilere Bett des Mackenzie zum großen Teil über ungefrorenen Boden- und Felsgrund..

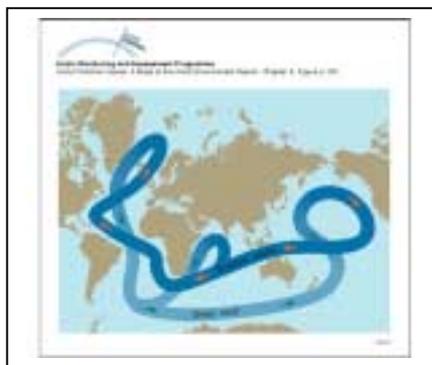
Die Ästuar- und Deltas wirken als Sedimentfallen, danach werden Sedimente hauptsächlich auf den kontinentalen Schelfgebieten abgelagert, die vor der Küste Sibiriens bis zu 900 km ins Meer reichen. Nur 10-20% der Sedimente gelangen über die Deltagebiete und den Schelf der Kara-See bis ins offene Meer. Im MacKenzie-Delta werden mehrere cm an Sedimenten pro Jahr abgelagert. Ein Teil der Sedimentmasse fließt im Frühjahr über das Meereis, sinkt dann als Sedimentwolke direkt ins Meer,

wobei Ausfällungen die Ablagerung bestimmen. Die Form des Meeresbodens, die Entfernung von der Küste und die Eisbedeckung bestimmen die physischen Bedingungen und Prozesse auf dem Kontinentalschelf. Süßwasser aus den Flüssen und Meereis kühlt das Meerwasser auf dem Schelfgebieten ab, doch während des Sommer wird das flache Meer durch Sonneneinstrahlung auf 4-5°C erwärmt.process.

Oberflächenwasser und Meereis zirkulieren generell in westlicher Richtung im Beaufortwirbel, von der östlichen Arktis in Richtung Fram-Straße, dem Zugang zum Nordatlantik. Meereis braucht im allgemeinen nur 5-6 Jahre von der Tschuktschen-See bis zur Fram-Straße, wobei die generelle Treibrichtung viele lokale Strömungen maskiert.



Das kalte und salzärmere arktische Oberflächenwasser (um 0°C) trifft südlich der Fram-Straße auf wärmeres Wasser (3.5-6°C) aus dem Atlantik und mischt sich mit ihm. Warmes Wasser aus den südlichen Ozeanen bringt Wärme nach Norden und ist verantwortlich für den Golfstrom. Der Golfstrom sorgt dafür, daß Island, Svalbard und Westeuropa ein wärmeres Klima haben als die vergleichbaren Breiten in Nordamerika und Rußland. Wenn das warme, relativ salzreichere Wasser auf das kalte, arktische Meerwasser trifft, kühlt es sich ab, wird dichter und sinkt ab. Das geschieht sehr langsam, doch jeden Winter sinken mehrere Millionen km³ an Wasser in tiefere Bereiche und fließen auf dem Boden des atlantischen Ozeans nach Süden ab. Das ist das „Ozeanische Förderband“ – die thermohaline Konvektionsströmung, die Wärme über den Globus verteilt.!

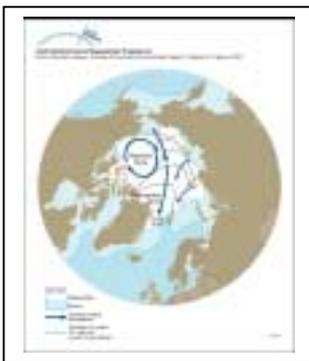


Der biologische Reichtum der Seegebiete und Ozeane

Die Kombination und Variation von physischen Faktoren (Eis, Gestein, Sand- und Schlammsubstrate, Temperatur, Salinität, Strömungen, Nährstoffe und Licht) sind bestimmend für die biologischen Gegebenheiten des System.

Die Küstengebiete. Geographische Erscheinungsformen als Übergangszonen vom Meer zum Festland sind Ästuare, Deltas, Salzmarschen, Wattgebiete, teils sandige, teils steinige Strände, Buchten, Fjorde und Steilküsten. Schmale Küstensäume und Flußdeltas bieten Nistplätze und Nahrungsquellen. Die Vögel stellen die sichtbaren und nach außen gerichteten Beweise für die Produktivität des Meeres dar. Sie ziehen für den kurzen Sommer nach Norden, wobei sie Tausende von Kilometern von den gemäßigten und tropischen Gebieten überwinden, die Küstenseeschwalbe macht sogar einen Rundflug zwischen den Polgebieten und fliegt dabei mehr als 32000 Kilometer. In den Wattengebieten und sandigen Küstenbereichen picken riesige Mengen an Watvögeln nach kleinen Krustentieren, Mollusken, Würmern und kleinen Fischen. Watvögel brüten fast ausschließlich in der Arktis mit Gesamtpopulationen einzelner Arten bis zu 3.5. Millionen Exemplaren, wobei manche Watvögel (Strand- und Wasserläufer, Knutte) auch die Feuchtgebiete der Tundra benutzen. Seeschwalben brüten in Kolonien und tauchen nach kleinen Fischen in den Küstengewässern. Riesige Kolonien, manchmal mehrere Hunderttausend Vögel umfassend, von Trottellummen, Tordalken, Basstölpeln, Kormoranen und Papageientauchern nisten in Steilküsten und graben sich in grasbewachsenen Boden ein. Sie tauchen und fischen nach Loddern, Sandaalen, Kabeljauen und anderen Fischen, und werden selber von Raub- und anderen Mövenarten gejagt. Ihre Ausscheidungen sind die Grundlage für leuchtend grüne Vegetationsflecken an den Steilküsten, die im Sommer von ihrem Geschrei widerhallen, im Winter dagegen verwaissen.

Kontinentalschelfe, Seegebiete und Ozean. Die flachen Küstengewässer unterhalten eine beträchtliche und artenreiche Fauna von Krustentieren, Mollusken, Schwämmen, Würmern, Seeanemonen, Seesternen und kleineren Fischarten. Ihre Lebensgrundlage sind Algen, Detritus oder Plankton, sie stellen die Nahrung für die größeren Fischarten, Vögel und Säugetiere (Robben und Seeelphanten) dar. Hier laichen Lode, Kabeljau und andere Fische im März und April. Jede einzelne Loddenschule kann viele Hundert Tonnen an Fisch enthalten. Sie suchen in tieferen Wasserbereichen nach Nahrung oder ziehen an den Meeresrand, um sich von Plankton zu ernähren – und werden Beute von Seevögeln, Kabeljau, Robben und Walen.



Das Meereis spielt im marinen Ökosystem eine wichtige Rolle. Im Winter reicht es weit nach Süden, die Maximalausdehnung wird im März erreicht. Es zieht sich im Sommer zurück, bedeckt aber den arktischen Ozean mit einer permanenten Schicht von etwa drei Meter dickem Packeis, welches von Sprüngen und Rissen durchzogen ist. Sogar im Packeis gibt es, auch im Winter, eisfreie, offene Stellen, sogenannte Polynyas, die durch Windbewegungen, Strömungen und den Auftrieb wärmeren Tiefenwassers entstehen. Im Sommer sind im Packeis etwa 10% der Gesamtfläche eisfreies, offenes Wasser.

Die von den Flüssen herantransportierten Nährstoffe, die auch aus aufsteigendem

wärmerem Wasser oder aus der Atmosphäre stammen können, bilden die chemische Grundlage für das Wachstum der Algen. Algen wachsen auf dem Festland, im und unter dem Eis, sowie im offenen Meer. Sie sind daran angepaßt, bei niedrigen Temperaturen zu leben, gedeihen aber auch dort, wo das globale Meerwassertransportsystem die Temperaturen erhöht. Sie können bei dem minimalen Lichteinfall unter dem Eis leben. Diese Algen – die primären Produzenten – sind der Schlüssel für die Nahrungsketten der arktischen Seegebiete und des Ozeans.

Der Eisrand, besonders in den Flachwasserbereich, ist eine besonders produktive Zone. Hier existiert eine komplexe Nahrungskette, die von Algen beweidenden Tieren über verschiedene Räuber bis zum Eisbären und Polarfuchs reicht, die sich in der Nahrungssuche weit aufs Eis hinauswagen. Im offenen Meerwasser bilden treibende Algenteppiche oder Phytoplankton die Nahrungsgrundlage für große und kleine Krustentieren (z.B. Krill), die wiederum dem Hering und der Lodde Nahrung bieten, sowie verschiedenen Arten von Bartenwalen.

König der Raubtiere?

Die bisher vorgestellten Nahrungsketten stellen eine große Vereinfachung der wirklichen Welt dar. Viele weitere Arten sind daran beteiligt. Sie können ihr Verhalten und ihre Umgebung während verschiedener Stufen ihres Lebens ändern, zu unterschiedlichen Jahreszeiten und in den verschiedensten Gegenden der Arktis. Ein wahrheitsgemäßerer Bild wird von den Inuit und Cree anhand der Hudsonbay-Nahrungskette aufgezeichnet. Hier verzahnen sich das marine, terrestrische und Süßwassersystem, von äußeren Ring der Vegetationsquelle über die Pflanzenfresser und anderen Räuber in sukzessiven, enger werdenden Kreisen bis zu den Inuit und Cree im Zentrum. Es gibt vielfältige und sich überlappende Verbindungen, die Nahrungsquellen wechseln sich jahreszeitlich ab.

Die Stellung des Menschen als Räuber am Ende der Nahrungskette hat unglückliche Konsequenzen, besonders für die indigenen Völker. Eine wichtiges physiologisches Merkmal vieler in der Arktis lebender Tiere ist die Speicherung von Fett als Isoliermaterial und als Nahrungsreserve. Das hat dazu geführt, daß die persistenten organischen Schadstoffe mit ihrer im allgemeinen guten Fettlöslichkeit sich entlang der Nahrungskette anreichern, auch wenn sie nur in geringen Mengen in der Umwelt vorkommen. Daher werden diese Stoffe in signifikanten Mengen in den Menschen der Arktis gemessen.

Die indigenen Völkern haben ihre Art der Ressourcenausbeutung auf nachhaltige Weise in Jahrtausenden bewahrt. In den letzten Jahrhunderten haben Walfänger, Jäger, Trapper und Fischer der südlicheren Breiten die Rohstoffe des Nordens in zunehmendem Maße ausgebeutet. Aus diesem Grunde sind starke Populationsabnahmen oder Fluktuationen zu verzeichnen, z.B. weil Fischbestände überfischt wurden, oder wenn Raubtiere sich neuen Opfern zuwenden, da ihre bisherige Nahrung durch den Menschen reduziert worden ist. Kabeljau, Hering und Lodde stellen bereits seit einigen Jahrhunderten den Hauptfischfang, die Ausbeutung des Kabeljau-Fanggründe hat das Schicksal und die Kulturen vieler Nationen beeinflußt. Aber sogar der sehr fruchtbare Kabeljau, einer der Hauptnährfische für große Meeressäugtiere und selber Raubfisch vieler kleiner Fischarten, ist in seinen Beständen so reduziert worden, daß er nur noch ein Schatten seiner selbst ist – reduziert vom mächtigsten aller Raubtiere – dem Menschen!

Der Mensch ist nicht nur der allergrößte Räuber. Er ist ein untrennbarer Bestandteil des arktischen Ökosystems, mit weitreichendstem Einfluß, direkt und indirekt, in einem Kontinuum, welches von den direkten Einwirkungen von Jagd und Fischerei bis zu den diffusen und undeutlichen Einwirkungen von Umweltverschmutzung, Einleitung von Treibhausgasen oder der Weltwirtschaft reicht. Viele der vom Menschen angenommenen Anpassungen entsprechen denen von Tieren, von der Wärmeisolation durch Kleidung bis zum Weiterzug in andere Gebiete, wenn die Bestände eines Jagdtieres erschöpft sind. Wir haben die Neigung, uns als etwas besonderes zu betrachten, dieser anthropozentrische Blickpunkt verstellt uns aber die Sicht auf unsere Einheit mit dem Rest der Natur. So wird auch künstlich unterschieden zwischen natürlichen und vom Menschen geschaffenen Ökosystemen, wo doch alle Ökosysteme vom Menschen beeinflußt werden. Es handelt sich höchstens um die Frage inwieweit und nach welchen Mechanismen dieser Einfluß abläuft. Wir sind daher alle ein Teil des arktischen Ökosystems. Oder kann es sein, daß die Arktis eigentlich ein Teil eines noch größeren Ökosystems ist – des globalen Ökosystems – Gaia – die von James Lovelock so postulierte, sich selbstregulierende Erde. Aber das ist schon wieder eine andere Geschichte.

Ausgewählte Literaturhinweise

AMAP (1998) AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues: Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo. 859 Seiten. Die wohl umfassendste Informationsquelle über Umweltverschmutzungsprobleme der Arktis, auch auf der AMAP -Webseite einsehbar: (<http://www.grida.no/amap>)

Nuttall, M & Callaghan, T.V. (Eds.) (2000) The Arctic. Environment, People, Policy. 647 Seiten, Harwood Academic Publishers, Amsterdam, Pittsburgh & Oxford.

Chapin et al. (1992) Arctic Ecosystems in a Changing Climate. 467 Seiten, Academic Press.

Chapin, F.S & Körner, C. (Eds.) (1995) Arctic and Alpine Biodiversity: Patterns, Causes and Ecosystem Consequences. Ecological Studies Vol.113. Springer-Verlag, Berlin, New York, London.

Chernov, Yu.I. (1980) Zhizn' tundry. Izdatel'stvo. Mysl. Übersetzung ins Englischen von D. Love (1985). **The living tundra.** 213 Seiten, Cambridge University Press.

Kurlansky, M (1997) Cod. A Biography of the Fish that Changed the World. 294 Seiten, Penguin Books.

Lovelock, J (2000) Gaia. A new Look at Life on Earth. 148 Seiten, Oxford University Press.

Fogg, G.E. (1998). The Biology of Polar Habitats. 263 Seiten, Oxford University Press.