

Warming the Arctic Ocean

Ursula Schauer, Eberhard Fahrbach, Gerd Rohardt

Wärme für das Nordpolarmeer

Ursula Schauer, Eberhard Fahrbach, Gerd Rohardt

Die arktische Atmosphäre ist erheblich wärmer als die antarktische, da sie durch den Ozean erwärmt wird. Der größte Anteil der Wärmezufuhr für das Nordpolarmeer kommt zwar durch die Sonneneinstrahlung im Sommer, er betrifft aber nur die obersten 20 Meter. Mehr als dieser sommerliche Gewinn geht im Winter wieder verloren. Die kleine Differenz zwischen Wärmegewinn und Verlust an die Atmosphäre muss dem Ozean also ständig nachgeführt werden. Der größte Einstrom an warmem Wasser führt durch die Framstraße, die über den Nordatlantik die einzige tiefe (2600 Meter) Verbindung zwischen Nordpolarmeer und dem Weltozean bildet.

Änderungen des ozeanischen Wärmeeintrags durch die Framstraße beeinflussen nicht nur, wie viel Wärme das Nordpolarmeer an die Atmosphäre abgeben kann, sondern auch, wie viel und wo Eis gebildet bzw. wieder geschmolzen wird. Eisbildung lässt einen Großteil des Salzes im Meerwasser zurück. Dadurch beeinflusst die ozeanische Wärme über die Eisbildung auch den Transport von Süßwasser, das als Eis andere Verfrachtungen erfährt als im flüssigen Zustand. Das im Meerwasser angereicherte Salz führt zum Absinken des Wassers, das sich daraufhin im tiefen Atlantik bis in die Südhemisphäre ausbreitet. Der Austausch durch die Framstraße ist also nicht nur für das arktische Klima wichtig, sondern auch für den globalen Tiefenwasseraustausch.

In der Vergangenheit wurde der ozeanische Wärmeeintrag durch die Framstraße meist indirekt aus Temperaturaufnahmen während einzelner Expeditionen abgeschätzt, die im Sommer stattfanden. Seit

The Arctic atmosphere is considerably warmer than the Antarctic atmosphere since it is heated from the underlying ocean. While the Arctic Ocean itself is mostly heated by summer solar insolation the radiation affects only the uppermost 20 m and more than this gain in summer is lost in winter. The difference between the two is only small – but in order to maintain the present state it must be continuously supplied by ocean currents. The largest inflow of warm water takes place through Fram Strait which, via the North Atlantic, constitutes the only deep connection between the Arctic and the world ocean.

Variation of the oceanic heat flow through Fram Strait does not only determine how much heat the Arctic Ocean might release to the atmosphere but also how much and at which location ice will be formed or melted. When ice forms the bulk of salt remains in the sea water. Hence, by affecting ice formation the oceanic heat also affects the fate of fresh water which takes different pathways as ice than as liquid. The salt accumulation leads to sinking of the respective sea water which spreads in the deep Atlantic to the southern hemisphere. Thus the exchange through Fram Strait is not only important for the Arctic climate but also for the global deep water exchange.

In the past, the oceanic heat flux through Fram Strait was estimated primarily by indirect methods using temperature distributions measured during individual cruises – thus providing typically a snapshot of a summer situation. To provide year-round observations, since 1997, a line of 14 moorings was

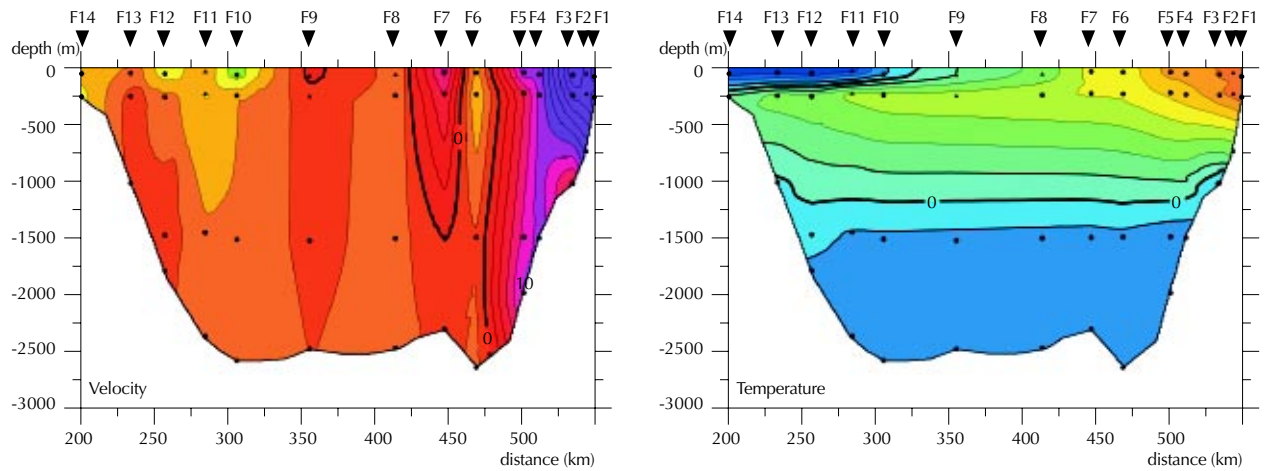
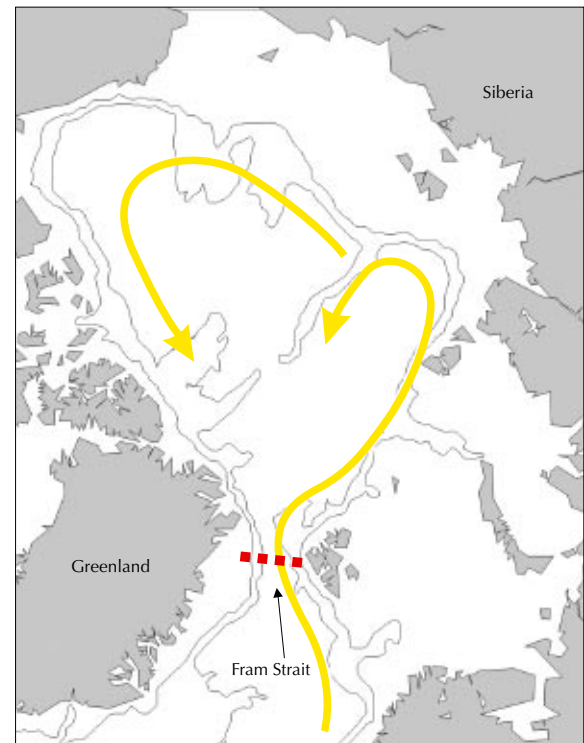


Abb. 12: Die Verteilung der Geschwindigkeiten (links) und Temperaturen (rechts) in der Framstraße im Winter aus verankerten Messgeräten (rote Linie in der Karte).

Fig. 12: The distribution of the cross-section velocities (left panel) and temperatures (right panel) in the Fram Strait in winter (December 1998) from moored instruments (see the red line in the map for location).



1997 wurde eine Verankerungslinie installiert, mit dem ganzjährig an 14 Positionen mit fast 50 Geräten die Strömung und die Temperatur gemessen wird (Abb. 12). Die Jahregänge zeigen, dass die Wärme-flüsse bemerkenswerter Weise im Winter höher sind als im Sommer, obwohl dann die Temperaturen höher sind. Der Grund sind die im Winter höheren Strömungsgeschwindigkeiten. Mehrere Messungen an verschiedenen Positionen vom Schiff aus bieten zwar eine höhere räumliche Auflösung als Verankerungen, umfassen aber nur einen kurzen Zeitraum. Deshalb können Aufnahmen der Temperatur und Strömung, vom Schiff aus im Sommer durchgeführt, das Bild verfälschen.

Die Jahresmittelwerte von 1997 bis 2000 zeigen einen drastischen Anstieg des Wärmeeinstroms. Wie ist dieser Anstieg zu bewerten? In der vergangenen Dekade sind in der Arktis erhebliche Veränderungen beobachtet worden: Neben dem Anstieg der Lufttemperaturen, der Reduzierung der Meereisdecke und einer veränderten Meeresströmung war Anfang der Neunzigerjahre auch eine starke Erwärmung der atlantischen Schicht im eurasischen Teil des Nordpolarmeers zu verzeichnen (Abb. 13). Unsere Messungen Ende der Neunziger Jahre belegen eine Erhöhung der Wärmezufuhr ähnlich der, die für die Erwärmung am Anfang der Neunziger Jahre notwendig war, so dass weiterhin mit sehr warmem Zwischenwasser in der Arktis zu rechnen ist. An den jährlichen Änderungen des Wärmetransports trägt die Verstärkung des Einstroms den gleichen Anteil wie die Erhöhung der Temperatur.

maintained with about 50 instruments measuring current and temperature continuously (Fig. 12).

It turned out that the temperature of the northward flow of Atlantic Water had a strong seasonality with a minimum in winter. Nevertheless, the northward heat transport was highest in winter caused by a winter maximum in northward velocity. Between 1997 and 2000 the northward heat flow increased considerably (Fig. 13). We can relate this increase to changes observed in the interior Arctic in the past decade: besides the rise of air temperature, the reduction of ice cover and a change in the ocean circulation, an extraordinary warming of the Atlantic layer in the interior Arctic Ocean was observed in the early nineties (Fig. 13). Our heat inflow observation 5 years later documents a similar input of heat as was necessary to have caused the earlier warming. Consequently, we can expect a continuing rise of the heat content available in the Arctic Ocean.

Our measurements show that the inflowing water became warmer in the late nineties but that the increase of the flow strength (i. e. more warm Atlantic water enters the Arctic) was of equal importance for the increased heat input.

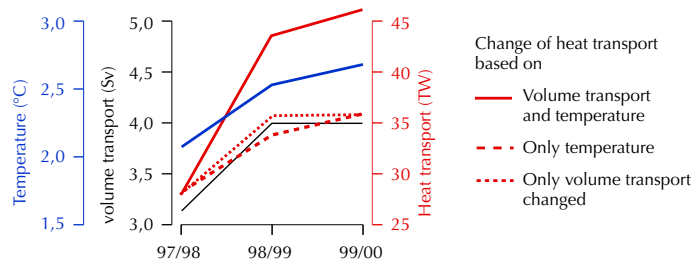
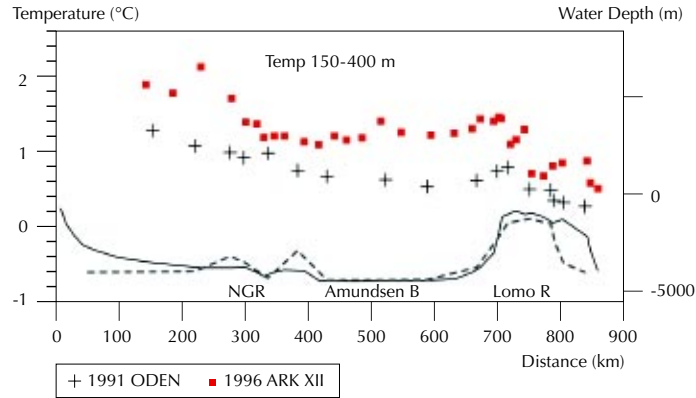


Abb. 13: Die Temperatur der atlantischen Schicht im Nordpolarmeer war 1996 ein halbes Grad höher als 1991 (oben). Der starke Anstieg des Wärmeeinstroms durch die Framstraße zwischen 1997 und 2000 (unten), verursacht sowohl durch höhere Temperatur als auch durch einen stärkeren Einstrom, könnte eine vergleichbare Erwärmung im Nordpolarmeer nach 2000 bewirken.

Fig. 13: The temperature of the Atlantic layer in the Arctic Ocean rose by half a degree from 1991 to 1996 (upper panel). The increase of northward heat transport through Fram Strait observed between 1997 and 2000 (lower panel) was of a corresponding magnitude.

Stratospheric ozone destruction: the ups and downs in the Arctic

Markus Rex, Peter von der Gathen

Stratosphärischer Ozonabbau: Das Auf und Ab in der Arktis

Markus Rex, Peter von der Gathen

Seit der Entdeckung des antarktischen Ozonlochs stehen die Polarregionen im Zentrum der Ozonforschung. Die wesentlichen Prozesse, die zum Ozonabbau führen, konnten aufgeklärt werden. In einer beispiellosen internationalen Zusammenarbeit im Bereich der Umweltpolitik wurden verpflichtende Verträge zur Begrenzung der Emission ozonschädigender Verbindungen geschlossen – mit dem beeindruckenden Erfolg, dass diese heutzutage weltweit kaum noch produziert werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Belastung der Stratosphäre ihren Höhepunkt überschritten hat und über die kommenden 50 Jahre wieder auf unkritische Werte zurückgehen wird – so lange ist die Lebensdauer der Stoffe in der Atmosphäre. Ist damit auch der Höhepunkt des arktischen Ozonabbaus überschritten?

Das auffälligste Merkmal der arktischen Ozonverluste während der vergangenen 12 Jahre ist die enorme Variabilität von Jahr zu Jahr (Abb. 14a). Während es in einigen Jahren keinen Ozonverlust gab, wurden in anderen Jahren lokal bis zu 70 % des Ozons zerstört, die Ozonschichtdicke um bis zu 30 % verringert. Diese Variabilität erfolgt scheinbar willkürlich und steht nicht in Zusammenhang mit der langsamen Schwankung der Halogenbelastung. Sie wird ganz wesentlich von einem meteorologischen Parameter getrieben, den wir mit V_{PSC} bezeichnen (Abb. 14b). In der polaren Stratosphäre kann bei extrem tiefen Temperaturen im Winter eine Mischung aus Schwefelsäure und Salpetersäure ausfrieren – eine Art „Schnee“, der den Ozonverlust erst ermöglicht. V_{PSC} bezeichnet die

Stratospheric ozone research focussed on the Polar Regions since the discovery of the Antarctic ozone hole in the 1980ies. Today we have a general understanding of the key processes that result in chemical ozone destruction. Unprecedented intergovernmental cooperation quickly led to a series of international treaties to limit the emission of substances that harm the ozone layer. It is a dramatic success of this international cooperation that the global production of these substances has nearly completely ceased over the past decade. It is generally assumed that the concentration of ozone depleting substances in the stratosphere has already peaked and will slowly decline over the next decades to fall below harmful levels in about 50 years – the lifetime of the substances in the atmosphere. Does that mean that Arctic ozone destruction has already peaked?

The most prominent feature of Arctic ozone loss over the past 12 years is its enormous interannual variability (Fig. 14a). In some years loss did not occur at all, in others it reached 70 % loss locally and 30 % in the total column. The variability appears to be quite random and is not related to the slow variation of the stratospheric loading of ozone depleting substances. On these time scales the variability is entirely driven by a meteorological parameter termed V_{PSC} (Fig. 14b). If temperatures in the stratosphere drop to extremely low values a mixture of nitric acid and sulphuric acid condensates form a kind of 'snow', that plays a key role in the ozone destruction process. V_{PSC} is a measure of the extent of conditions

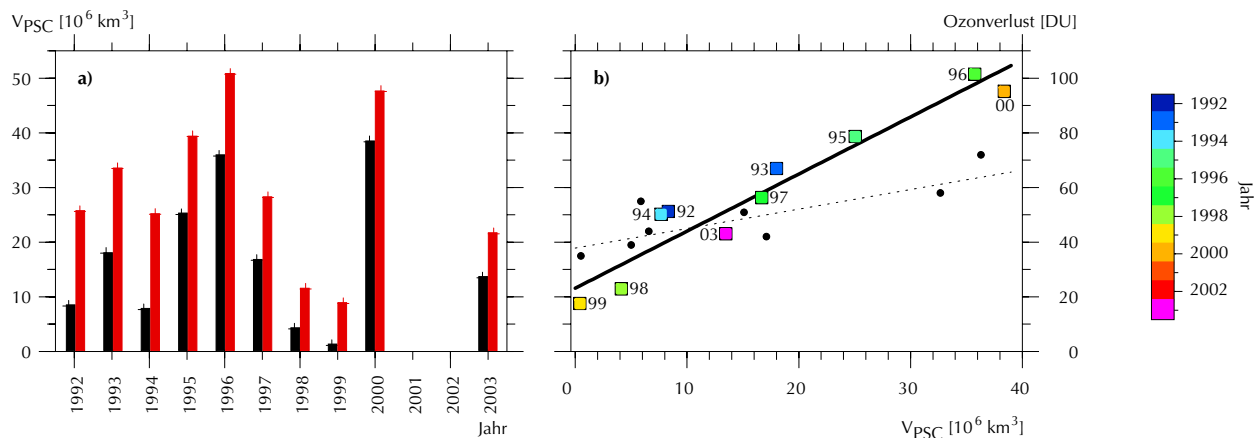


Abb. 14: (a) Ozonverlust (rote Balken) und Potenzial zur Bildung stratosphärischer Wolken (V_{pSC} , schwarze Balken) in der Arktis während der letzten 12 Jahre. (b) Auftragung von Ozonverlust über V_{pSC} . Die farbigen Quadrate sind Messergebnisse, die schwarzen Punkte stellen Ergebnisse aus Modellrechnungen dar. Die Steigung der jeweils durch die Punkte verlaufenden Geraden gibt die Empfindlichkeit des Ozonverlusts auf Klimaveränderungen an. Die Messungen zeigen, dass diese dreimal größer ist, als derzeitige Modellrechnungen vermuten lassen würden.

Fig. 14: (a) Ozone loss (red bars) and potential for the formation of PSCs (V_{pSC} , black bars), over the Arctic during the past 12 years. (b) Ozone loss versus V_{pSC} . Coloured boxes represent measurements, black points model results. The slope of the linear through the points is a measure for the sensitivity of ozone loss on climate change. It is underestimated by the model by a factor of three.

cold enough for the formation of this 'snow'. The 'snow' is only present in some winters – in others it is too warm and ozone loss cannot occur. Increasing levels of greenhouse gases tend to cool the stratosphere – in contrast to climate warming in lower levels of the atmosphere. The empirical results show that the additional ozone loss caused by this cooling is about three times larger than current models predict.

The stratospheric sulphuric acid and nitric acid particles form iridescent Polar Stratospheric Clouds (PSCs). Their maximum extent in cold Arctic winters increased by about a factor of three over the past 40 years (Fig. 16). Had the climate conditions remained unchanged since the 1960ies, ozone loss in the Arctic would not be of much concern nowadays. Hence, the extensive destruction of stratospheric ozone as observed during some winters over the Arctic during the past decade, was also the result of long-term climate change. Should the cooling trend continue in future, even larger ozone loss can be



Abb. 15: Aufnahme einer Polaren Stratosphärischen Wolke (PSC) Ende Januar 2000 über Kiruna (Nordschweden). Das Auftreten dieser wegen ihres Aussehens auch Perlmutterwolken genannten Gebilde leitet den Ozonabbau in der arktischen Stratosphäre ein.

*Fig. 15: Picture of a Polar Stratospheric Cloud (PSC) taken at Kiruna, Sweden, end of January 2000. Based on their appearance these clouds are sometimes termed "mother of pearl clouds". They trigger the ozone loss process.
(Photo: M. Rex)*

Bedingungen, die kalt genug für die Bildung dieses stratosphärischen Schnees sind. Nur in einigen Wintern bildet sich der „Schnee“ - in anderen Wintern ist es zu warm, der Ozonverlust bleibt aus. Im Gegensatz zur Klimaerwärmung in den bodennahen Schichten ist in der Stratosphäre bei zunehmender Treibhausgaskonzentration mit einer Abkühlung zu rechnen. Die Analyse der Messdaten zeigt, dass pro Grad Abkühlung der arktischen Stratosphäre mit einem dreimal höheren Ozonverlust gerechnet werden muss, als in derzeitigen Modellrechnungen gefunden wird.

Die in der Stratosphäre entstehenden Schwefel- und Salpetersäurepartikel bilden die in allen Farben schillernden Polaren Stratosphärischen Wolken (Polar Stratospheric Clouds, PSC, Abb. 15), deren maximale Ausdehnung in den kalten stratosphärischen Wintern der letzten 40 Jahre etwa um einen Faktor drei angestiegen ist (Abb. 16). Würden heutzutage in der Stratosphäre Klimabedingungen wie in den 1960er Jahren herrschen, würde es heute nur zu wenig Ozonverlust über der Arktis kommen. Die erhebliche Ozonzerstörung des vergangenen Jahrzehnts war also auch das Resultat langfristiger Klimaveränderungen. Sollte diese Abkühlung sich fortsetzen, könnte es in den nächsten Jahrzehnten noch zu einem erheblich stärkeren Ozonverlust über der Arktis kommen. Die nähere Zukunft der arktischen Ozonschicht hängt also wesentlich davon ab, ob die beobachteten Klimaveränderungen Teil einer natürlichen Variabilität sind oder den Beginn eines vom Menschen verursachten Trends darstellen.

expected over the Arctic during the next couple of decades. For the near future of the Arctic ozone layer it is crucially important, whether the observed changes in climate are due to natural long-term variability or represent the start of an anthropogenic trend.

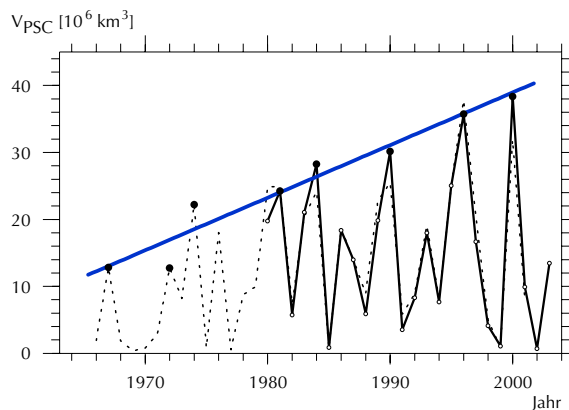


Abb. 16: Langzeitentwicklung der für PSC-Bildung ausreichend kalten Bedingungen in der arktischen Stratosphäre. Besonders die maximale Ausdehnung dieser Bereiche in den kalten Wintern hat während der letzten 40 Jahre um einen Faktor drei zugenommen, was die schweren Ozonverluste in den neunziger Jahren mit verursacht hat.

Fig. 16: Long term evolution of the extent of PSC conditions in the Arctic stratosphere. The maximum extent reached during the cold winters has increased by a factor of three over the past 40 years. This change contributed to the severe ozone losses in the Arctic in some winters during the 1990ies.

Permafrost coasts of the Arctic – frozen land drowns in the Sea

Volker Rachold, Hans-Wolfgang Hubberten

Permafrost-Küsten der Arktis – Gefrorenes Land versinkt im Meer

Volker Rachold, Hans-Wolfgang Hubberten

Die Küstenzone ist die Region der Arktis, in der sich Wechselwirkungen zwischen Land und Meer offenbaren. Arktische Küsten sind extrem variabel, sie können stabil, aber auch sehr dynamisch sein. Ihre Veränderlichkeit ist eine Funktion von Umwelteinflüssen (Wind, Wellen, Meeresspiegeländerungen, Meereis etc.) auf der einen Seite und Gestalt und geologischem Aufbau der Küste auf der anderen Seite (Abb. 17).

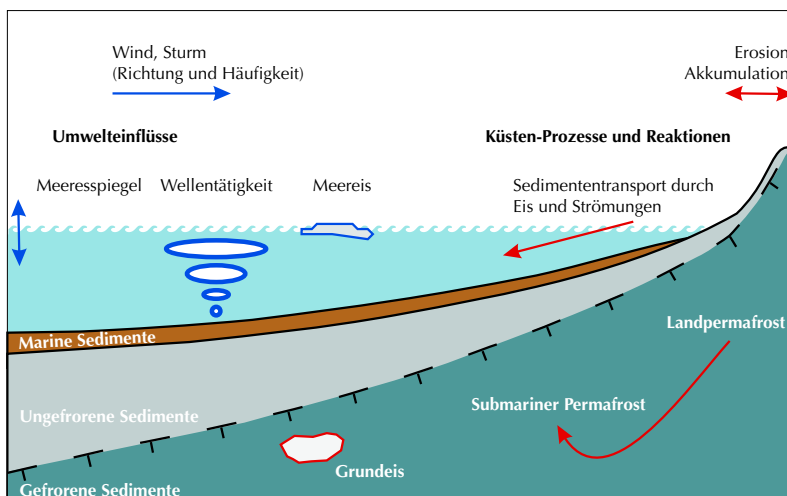
Die Küstendynamik in der Arktis wird insbesondere durch Arktis-spezifische Phänomene kontrolliert. Während des arktischen Winters (7-8 Monate im Jahr) wird die Küste durch eine mächtige und ausgedehnte Meereisdecke von hydrodynamischen Einflüssen abgeschirmt. Im Sommer dagegen, insbesondere

The coastal zone is the interface through which land ocean exchanges in the Arctic are mediated. Arctic coasts are highly variable, can be stable or extremely dynamic, and their dynamics are a function of environmental forcing (wind, waves, sea-level changes, sea-ice etc.) on the one hand and coastal morphology and geology on the other hand (Fig. 17).

Coastal processes in the Arctic are strongly controlled by Arctic-specific phenomena. During the winter season, comprising 7-8 months, a thick and

Abb. 17: Die Veränderlichkeit arktischer Küsten ist eine Funktion von Umwelteinflüssen und Morphologie und Geologie der Küste. Arktis-spezifische Phänomene (Meereis und Permafrost) sind dabei von besonderer Bedeutung (siehe Text).

Fig. 17: Arctic coastal dynamics as a function of environmental forcing and coastal morphology and geology. Arctic phenomena, i. e. sea-ice and permafrost, are of specific importance (see text).



nach dem Aufbrechen der Eisdecke im Frühjahr, bildet das Meereis ein wichtiges Transportmedium für die von der Küste erodierten (= abgetragenen) Sedimente.

Die arktische Küstenregion ist der Bereich, in dem die in ausgedehnten Festlandsgebieten der Arktis auftretenden, bis in eine Tiefe von 1000 Metern dauerhaft gefrorenen Ablagerungen (Permafrost) mit dem relativ warmen und salzreichen Meerwasser im Kontakt stehen. Da in der geologischen Vergangenheit während Meeresspiegeltiefständen weite Schelfgebiete der Arktis trocken lagen, konnte sich auch unter den heutigen Schelfmeeren in vielen Gebieten der Arktis (insbesondere in Sibirien) Permafrost bilden, der auch heute noch nach der Überflutung dieser Gebiete als submariner Permafrost vorliegt. Die Küstenregion ist der Übergangsbereich zwischen Landpermafrost

Abb. 18: Küste der Insel Muostakh in der südöstlichen Laptev-See (Sibirische Arktis). Das ca. 15 Meter hohe, aus gefrorenen und sehr eisreichen Ablagerungen – dem für die Region typischen, sogenannten Eiskomplex – bestehende Küstenkliff wird stark erodiert. Die Erosionsraten betragen mehrere Meter pro Jahr, so dass die Insel voraussichtlich in ca. 50 Jahren komplett verschwunden sein wird.

Fig. 18: Coastal section of the island Muostakh in the SE Laptev Sea (Siberian Arctic). The coastal cliff, which is ca. 15 metres high and composed of frozen, ice-rich deposits (so-called Ice Complex), is rapidly eroded. The coastal retreat rates are several meters per year and most probably the island will be completely destroyed within the next 50 years. (Photo: V. Rachold)

extensive sea-ice cover protects the coastline from hydrodynamic forcing. During the open water season, mainly after break-up in spring, the sea-ice is an important transport agent for sediments originating from coastal erosion.

Vast areas of the Arctic mainland are characterised by the occurrence of frozen ground (permafrost). In the coastal region the permafrost deposits, which can be frozen down to a depths of 1000 metres, are in direct contact with relatively warm and saline sea-water. In the geological past, during periods of lower sea-level, the shallow Arctic shelf seas (mainly the Siberian shelf seas) have been dry and permafrost could be formed, which today, after flooding of the shelves, still exists as submarine permafrost. The coastal region is the transition zone between onshore and offshore (submarine) permafrost and the degradation of permafrost, which can be connected with the release of permafrost-bound greenhouse gases, is concentrated in this zone.



und submarinem Permafrost und das Auftauen von Permafrost, das mit einer Freisetzung von eingefrorenen Treibhausgasen verbunden sein kann, konzentriert sich auf diese Zone.

Während der eisfreien Sommermonate werden die unverfestigten Permafrost-Küsten der Arktis extrem stark erodiert, der Rückgang der Küstenlinie beträgt in vielen Gebieten etliche Meter pro Jahr. Abbildung 18 zeigt ein Beispiel aus der sibirischen Laptev-See. Mit dem Rückgang der Küstenlinie ist die Abtragung von Landgebieten verbunden, die als biologische Lebensräume dienen oder von Menschen besiedelt werden, so dass in einigen Regionen der Arktis Maßnahmen zum Küstenschutz erforderlich sind. Das von der Küste abgetragene Material (Sedimente und organischer Kohlenstoff) wird durch Strömungen und mit dem Meereis in den Arktischen Ozean eingetragen und liefert einen wesentlichen Beitrag zur Stoffbilanz – in einigen Schelfgebieten ist der Eintrag durch Küstenerosion größer als der Flusseintrag.

Im Rahmen des Projektes „Arctic Coastal Dynamics (ACD)“, das vom AWI geleitet wird, beschäftigt sich ein internationales Team mit der zirkumarktischen Klassifizierung und Kartierung der Küsten und der Untersuchung von Küstenprozessen. Gegenwärtig beteiligen sich etwa 25 Institutionen aus neun Nationen. Weitere Informationen sind der Internet-Seite des ACD-Projektes zu entnehmen: <http://www.awi-potsdam.de/www-pot/geo/acd.html>.

During the short, ice-free period the unlithified ice-rich, permafrost-dominated coastlines are rapidly eroded (at rates of several meters per year). Figure 18 shows an examples from the Siberian Laptev Sea. Coastal retreat results in land and habitat loss and, thus, affects biological and human systems. Therefore, in some regions geotechnical measures for coastal protection have to be taken. The material released through coastal erosion (sediment and organic carbon) is transported to the Arctic Ocean via currents and sea-ice and its contribution plays an important role in the matter budget of the Arctic Ocean – in some shelf seas input from coastal erosion is larger than from rivers.

In the framework of the project 'Arctic Coastal Dynamics (ACD)', which is headed by AWI, an international team concentrates on circum-Arctic classification and mapping of the coastal zone and on the study of Arctic coastal processes. Currently ca. 25 institutions from 9 countries are involved. Further information can be found at the ACD internet page: <http://www.awi-potsdam.de/www-pot/geo/acd.html>.

Umweltrekonstruktionen mit Bioindikatoren in den polaren Landgebieten

Andrei Andreev, Frank Kienast, Thomas Kumke

In den im Spätquartär (60 000 Jahre v. H.) eisfreien arktischen Landgebieten gelten Bioindikatoren aus Land- und Seeablagerungen als die wichtigsten Werkzeuge für die Rekonstruktion der Klima- und Umweltgeschichte. Solche Rekonstruktionen sind gerade in polaren Gebieten sehr bedeutend, da sich hier Klimaschwankungen sehr schnell und intensiv auf die Umwelt auswirken. Grundlage für die Untersuchungen sind fossile Reste von Lebewesen, die zeitgleich zu ihrer Ablagerung konserviert wurden und über die Jahrtausende sehr gut erhalten bleiben. Dazu gehören z. B. Pollen, Kieselalgen oder Chironomiden (Zuckmückenlarven) in Seeablagerungen sowie Insekten und fossile Samen im Dauerfrostboden.

Pflanzen und Kleinstlebewesen in Seen haben für die Rekonstruktion den Vorteil, dass sie sehr schnell auf Klima- oder Umweltänderungen reagieren. Darüber hinaus kann man mit Hilfe statistischer Methoden den einzelnen Arten die Umweltbedingungen, unter denen sie leben können, zuordnen. Das ermöglicht eine sehr genaue Rekonstruktion der Umweltbedingungen in der Vergangenheit.

Überreste von Gefäßpflanzen, vor allem Samen und Früchte, besitzen je nach Pflanzenart unverwechselbare Kennzeichen und ermöglichen daher die Identifizierung der jeweiligen Arten. Aus den ökologischen Ansprüchen der nachgewiesenen Pflanzenarten lassen sich die lokalen Umweltbedingungen im Untersuchungsgebiet rekonstruieren. Zudem können durch botanisch-klimatologische Transferfunktionen anhand der Klimawerte in ihren heutigen Verbrei-

Fossil remains indicate paleoenvironments in the terrestrial Arctic

Andrei Andreev, Frank Kienast, Thomas Kumke

Fossil remains (bioindicators), preserved in terrestrial and limnic deposits, are considered as the most important tools for the reconstruction of the climatic and environmental history of the terrestrial Arctic since the Late Pleistocene (at least during the last 60 000 years). Paleoenvironmental reconstructions are particularly important in polar regions, because climatic fluctuations affect the arctic environment especially quickly. Reconstructions are based upon fossil remains of organisms that are preserved very well over millennia after their deposition. Most suitable bioindicators are pollen, diatoms and chironomids in limnic sediments as well as pollen, insects and seeds in permafrost deposits.

Plants and microorganisms in lakes are suitable subjects due to their quick reaction to environmental changes. More over it is possible to attribute optimum and tolerances of environmental conditions to every single species by means of statistical methods, which make possible detailed reconstructions of paleoenvironments.

Radiocarbon dated permafrost sediments at the Laptev Sea coast are excellent archives for paleobotanical studies. Vascular plant remains (first of all seeds and fruits) can be identified to the species level. Local environmental conditions in the study area can be derived from the ecological requirements of these plant species. Climate conditions can be reconstructed by botanical-climatological transfer functions on the basis of climate parameters occurring in the distribution areas of these plants today.

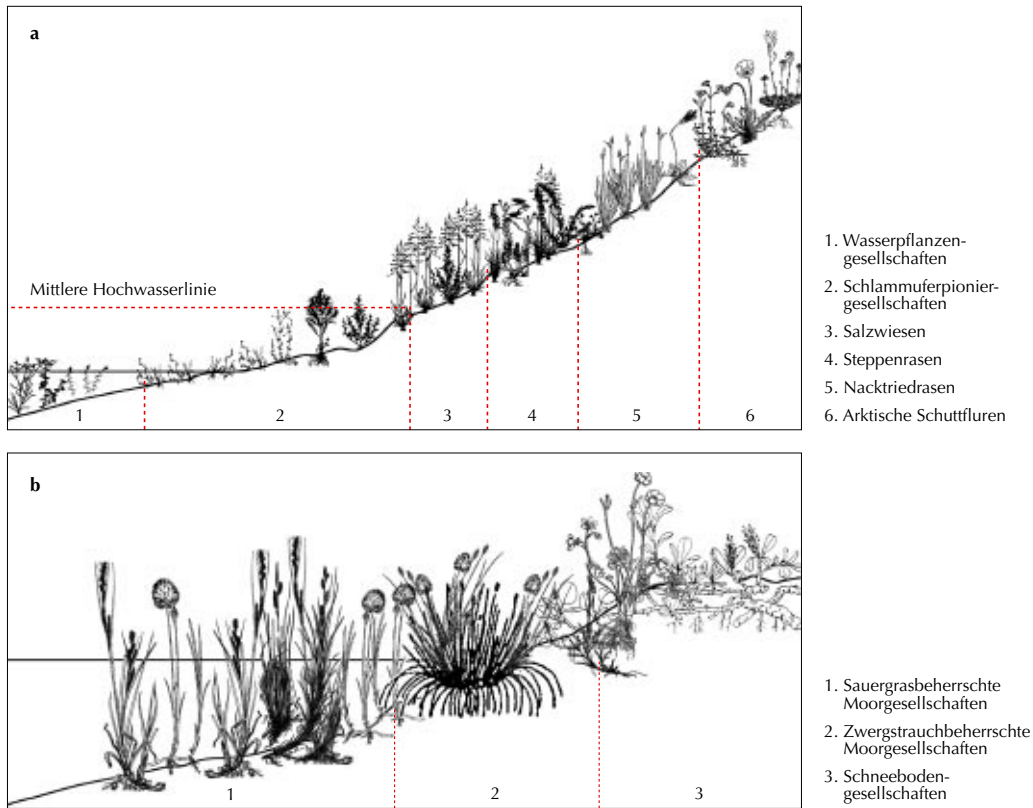


Abb. 19: Schematisches Profil des rekonstruierten Vegetationskomplexes a: im Spätpleistozän, b: im Holozän.

Fig. 19: A profile of reconstructed vegetation complexes a: Late Pleistocene, b: Holocene.

tungsgebieten Angaben zum Paläoklima gemacht werden.

Eine Gemeinsamkeit der meisten Proben aus dem Pleistozän (bis 10 000 Jahre vor heute) ist das Vorherrschen trockenheitsadaptierter Pflanzengesellschaften sowie das Vorkommen von salztoleranten Arten (Abb. 19). Beides belegt das Vorherrschen trockener Klimabedingungen. Erstmals konnte das zuvor heftig bestrit-

Both, the dominating dryness-tolerant plant communities and the occurrence of salt-tolerant species in most of the Pleistocene samples document prevailing dry climatic conditions (Fig. 19). The occurrence of steppe plants in the Arctic during the Late Pleistocene, previously strongly disputed, is paleobotanically proven. Steppe species and boreal aquatics, both no longer occurring in the Arctic today, indicate relatively warm summers during the late Pleistocene. Summer temperatures, significantly higher than

tene Vorkommen von Steppenpflanzen in der Arktis während des Pleistozäns paläobotanisch nachgewiesen werden. Steppenarten und boreale Wasserpflanzen, die in der Arktis heute nicht mehr vorkommen, weisen auf relativ warme Sommer hin. Auf der Basis ihrer heutigen Verbreitung konnten wesentlich höhere Sommertemperaturen als heute, z. B. während der warm-trockenen Interstadial-Periode zwischen den letzten beiden Kaltzeiten, rekonstruiert werden. Selbst während der letzten Kaltzeit waren die Sommer in der sibirischen Arktis wärmer als heute. Relativ günstige Phasen wurden aber immer wieder unterbrochen von kalten und trockenen Intervallen, in denen polarwüstenartige Vegetation vorherrschte. Das Phänomen relativ hoher Sommertemperaturen in der letzten Kaltzeit kann durch die stark erhöhte Kontinentalität erklärt werden. Wegen ihrer geringen Meerestiefe war die Küste der Laptev-See während des pleistozänen Meeresspiegelrückgangs etwa 500 Kilometer nordwärts verschoben, das Untersuchungsgebiet war somit durch ein ausgeprägtes Binnenklima gekennzeichnet. Die große Entfernung zum Meer führte neben der Abnahme der Niederschläge, zu starken jahreszeitlichen Temperaturschwankungen.

today during the warm and dry interstadial period between the last two cold stages, could be reconstructed based on the modern distribution areas of those plants. The mean summer temperatures rose above the modern level in the Siberian Arctic even during the last cold stage. Relatively favorable phases were, however, frequently interrupted by cold and dry intervals characterised by arctic-desert like vegetation. The phenomenon of relatively warm summers during the last cold stage can be explained by the extreme continentality. Due to the shallow bathymetry of the Laptev Sea, its coast was shifted ca 500 km northward during the Late Pleistocene marine regression. The study area was, consequently, characterised by a pronounced continental climate. The large distance to the temperature buffering sea resulted, beside a decrease of precipitation, in strong seasonal temperature fluctuations.