

Schlussbericht nach Anlage 2 BNBest-BMBF 98 Punkt 3.2

Zuwendungsempfänger: Stiftung Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (Stiftung AWI)	Förderkennzeichen: 03PL 027A
--	-------------------------------------

Vorhabenbezeichnung: Eiskernbohrung Severnaya Semlya

Laufzeit des Vorhabens: 01.02.1999 bis 30.6.2002

Projektleitung: Prof. Dr. Heinz Miller

Berichtszeitraum: 01.02.1999 bis 28.02.2003

Schlussbericht zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Vorhabens war ein Eiskern bis zur Grundmoräne der Eiskuppel „Akademie der Wissenschaften“ (Akademii Nauk) auf der Insel Komsomolets, Severnaya Semlya (russische Arktis, vgl. Abb.1) zu erbohren und zu analysieren.

Mit Hilfe von physikalischen, chemischen und isotopengeochemischen Methoden sollten damit hoch aufgelöste Klimainformationen über das Holozän gewonnen werden. Die Daten waren mit denen aus anderen arktischen Gletschern zu vergleichen und daraus klimatische Besonderheiten der russischen Hocharktis abzuleiten. Durch das Projekt soll das Archiv weltweiter hochaufgelöster Eiskernproxies um die russische Arktis erweitert werden. Die weitere räumliche Verdichtung hoch aufgelöster Paläoklimadaten in Polargebieten ist die Basis für verbesserte regionale und globale Klimamodelle.

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Der Zuwendungsempfänger (Alfred-Wegener-Institut, Stiftung für Polar- und Meeresforschung) beschäftigt sich seit vielen Jahren mit Eiskernbohrungen und der Untersuchung von Eiskernmaterial auf eine Vielzahl von chemischen und physikalischen Parametern. Das Institut verfügt über gut ausgerüstete Eislabore, die beste Voraussetzungen der Bearbeitung von Eiskernen bieten. An analytischen Methoden stehen u.a. die Ionenchromatographie zur Bestimmung von Hauptionen, die Massenspektroskopie zur Analyse stabiler Wasserisotope, Verfahren zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit und der Kerndichte sowie optische Methoden zur textuellen Analyse zur Verfügung. Seit mehreren Jahren entsendet das Institut Expeditionen nach Sibirien und hat Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Einrichtungen in Russland. Mehrere Mitarbeiter der Sektion Geophysik/Glaziologie des AWI sind in internationale Projekte zur Tiefbohrung von Eiskernen integriert und wirken dort zum Teil federführend mit (EPICA-DML, NGRIP). Für das Eiskern-Bohrprojekt auf Severnaya Semlya lag dem Zuwendungsempfänger zu Beginn

des Vorhabens eine Projektskizze des russischen Partnerinstitutes (AARI) mit entsprechendem Kostenvoranschlag vor.

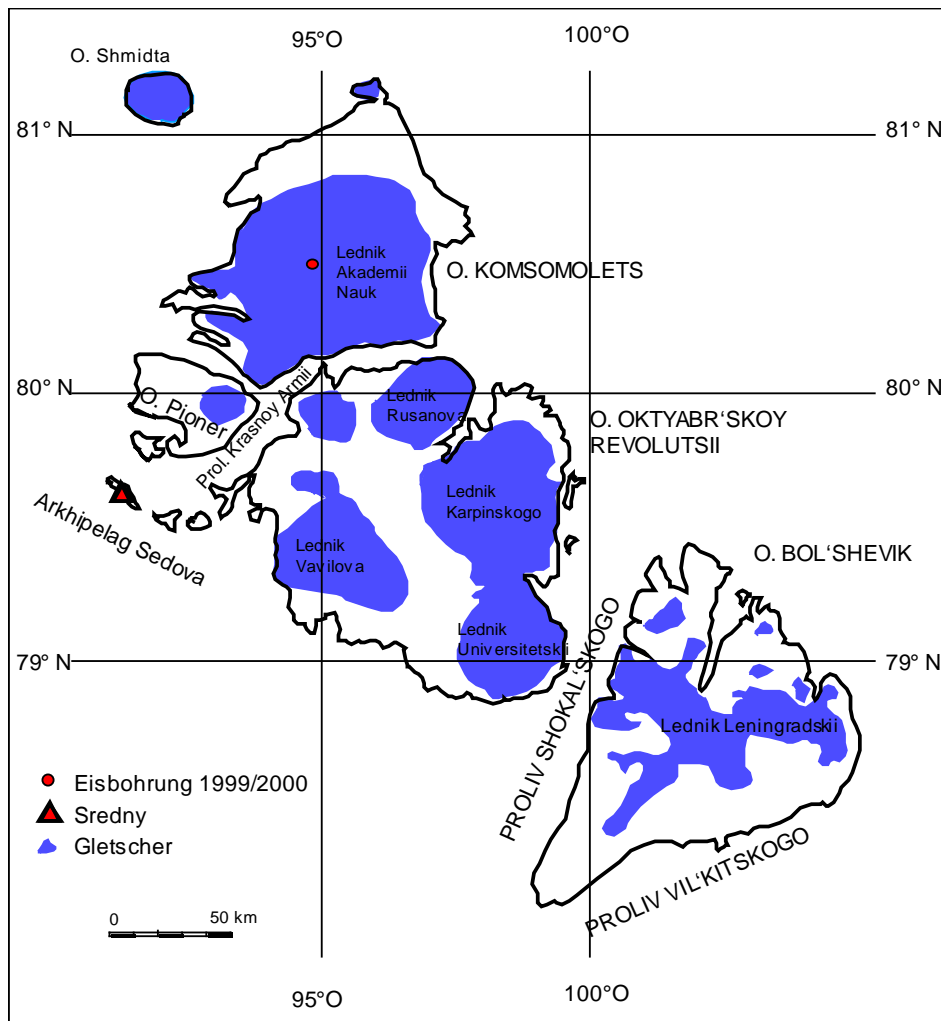


Abb.1: Der Archipel Severnaya Semlya und seine Vergletscherung

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Bohrvorhaben wurde auf der Grundlage einer Vertrags-Vereinbarung mit dem Arktischen- und Antarktischen Forschungsinstitut (AARI) in St. Petersburg durchgeführt. Das russische Partnerinstitut übernahm die Detailplanung des Expeditionsablaufes und die Einholung der in Russland erforderlichen Forschungsgenehmigungen bei staatlichen Behörden. Die Bohrung selbst wurde von Experten des Bergbauinstituts St. Petersburg ausgeführt, die teilweise jahrzehntelange Eisbohrerfahrung in der Arktis und Antarktis besitzen.

Zur Vorbereitung der Eiskernbohrung ist auf Kosten des Zuwendungsempfängers ein an die logistischen Bedingungen von Severnaya Semlya angepasster Eiskernbohrer am Bergbauinstitut St. Petersburg angefertigt worden. Eine geeignete Bohrlokalität wurde mit Methoden der Fernerkundung gefunden (Abb. 2). Hierbei sind Ergebnisse einer 1997 erfolgten und vom AWI finanziell unterstützten Expedition nach Severnaya Semlya zur

Eisdickenmessung mittels Luftradar genutzt worden (Dowdeswell et al., 2002). Die Bohrstelle befindet sich im Zentrum des Gletschers in einem Gebiet mit ebener Subglazialtopografie und geringer horizontaler Eisfließgeschwindigkeit (Fritzsche et al., 2002).

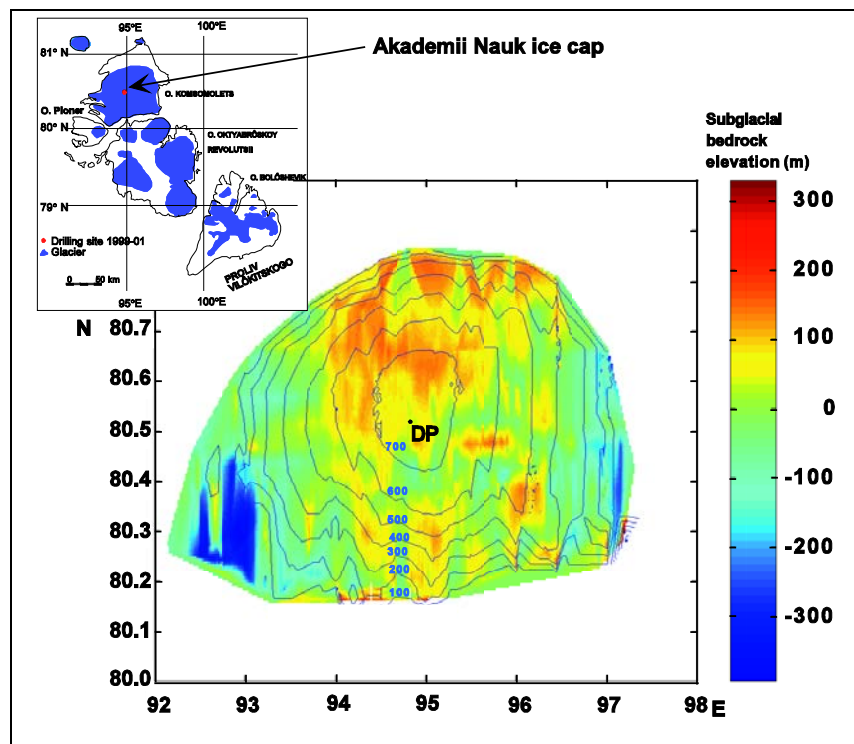


Abb. 2: Oberfläche und subglaziale Topographie von Akademii Nauk. DP bezeichnet den Bohrpunkt von 1999/2001 (aus Fritzsche et al., 2002)

Bei der Planung war davon ausgegangen worden, dass die Bohrung innerhalb einer Saison zum Abschluss gebracht werden könnte. Im Verlauf der ersten Bohrsaison (10.4.-25.5.1999) erwies sich dieser Ansatz als zu optimistisch. Aufgrund einer Reihe von uns vorher unbekanntem Problemen auf russischer Seite war eine Verlängerung des Bohrvorhabens um weitere Bohrkampagnen erforderlich. Eines der Hauptprobleme bestand darin, dass vor Anfang April die Temperaturen auf dem Gletscher zu niedrig sind, um das überwiegend aus Zelten bestehende Bohrcamp betreiben zu können. Andererseits ist der einzige Flugplatz der Region in Sredny (vgl. Abb. 1) nur bis Mitte Mai nutzbar, da danach die unbefestigte Rollbahn auftaut. Somit waren die Bohrkampagnen auf den Zeitraum 1.4.-20.5. beschränkt. Vom Zuwendungsempfänger wurden 2000 und 2001 Aufstockungsanträge gestellt, um das Ziel des Projektes trotz dieser Einschränkungen erreichen zu können. Dank der nachträglichen Bewilligung zusätzlicher finanzieller Mittel durch den Zuwendungsgeber konnten 2 weitere Expeditionen nach Severnaya Semlya (30.3.-25.5.2000 und 1.4.-26.5.2001) durchgeführt werden. Die Eisbohrung wurde erfolgreich mit Erreichen der Grundmoräne in 723,91 m Tiefe am 13.5.2001 beendet. Der Kühltransport der Eiskerne nach Bremerhaven funktionierte in jedem Jahr störungsfrei.

Die Analyse des Bohrkerns erfolgte im Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven. Hierfür wurden 1 promovierter Physiker und 1 Ingenieur eingestellt und aus Mitteln des Vorhabens bis zum 30.6.2002 finanziert. An den Analysen waren ein russischer Gastwissenschaftler aus dem AARI St. Petersburg sowie mehrere Mitarbeiter, Studenten und Doktoranden des AWI beteiligt. Messungen zur Bestimmung der spezifischen Aktivität von Radioisotopen sowie zur

He Konzentration im Eis erfolgten in dafür spezialisierten Labors in Frankreich und an der Universität Heidelberg.

4. wissenschaftlicher und technischer Stand an dem angeknüpft wurde

Die Kenntnis der natürlichen Klimavariabilität ist die Voraussetzung für das Verständnis klimarelevanter Prozesse. Eisbohrkerne aus polaren Eisschilden gehören zu den besten Klimaarchiven und tragen seit Jahrzehnten wesentlich zum Verständnis der Wechselwirkungen von Atmosphäre, Ozean und Eis bei. Eiskernbohrungen werden insbesondere auf den großen Eisschilden von Grönland und der Antarktis abgeteuft. Dort treten keine sommerlichen Schmelzereignisse auf. Diese Eisschilde liefern Informationen, global zur Zusammensetzung der Gase und Aerosole der Atmosphäre und über Vulkanausbrüche, großräumig zur atmosphärischen Zirkulation und lokal zur langfristigen Entwicklung von Temperatur und Niederschlag. Klimainformationen über mehrere glaziale Zyklen hinweg können im Zentrum des ostantarktischen Eisschildes auf Grund seiner Dicke und der geringen Niederschlagsakkumulation gewonnen werden (Petit et al., 1999). Die Eiskerne aus dem Zentrum Grönlands enthalten Klimainformationen des Holozäns und des vorangegangenen Kalt-Warmzeit-Zyklus (Weichselkaltzeit, Eem - Interglazial) (Dansgaard et al., 1993).

Vom Plateau des grönländischen Eisschildes sind Klimaproxies aus mehreren Eiskernen gewonnen worden, die aber aufgrund der Höhenlage nicht repräsentativ für die gesamte Arktis sein können. Für das Holozän können auch kleinere Eiskappen außerhalb von Grönland Klimadaten liefern. Deren Information ist aber meist überprägt von sommerlichen Schmelzwässern, die in den Firnkörper des Gletscher infiltrieren. Es liegen hoch auflösende Eiskerndaten aus Kanada, Grönland, Spitzbergen und Franz-Josef-Land vor, nicht aber aus der zentralen russischen Arktis. Niedrig aufgelöste Klimaproxies aus Eiskernen wurden von russischer Seite von den Gletschern Vavilova und Akademii Nauk (Severnaya Semlya) publiziert (Klement'ev et al., 1991). Welche zeitliche Auflösung durch Analyse von Eiskernen dieser Region mit modernen Verfahren erzielbar ist, war unbekannt. Eiskern-Material aus alten russischen Bohrungen ist nicht mehr vorhanden.

Nach russischen Angaben (Klement'ev et al., 1988) reicht der 1986/87 auf Akademii Nauk gebohrte Eiskern bis ins späte Pleistozän zurück. Die Datierung des Kerns erfolgte durch Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte von Akademii Nauk und GRIP (Grönland), wobei eine markante Abnahme dieser Werte ca. 30 m über dem Untergrund von Akademii Nauk als Übergang Holozän-Pleistozän (10 700 Jahre vor heute) interpretiert und ein eindimensionales Fließmodell zur Interpolation der Alter verwendet wurde (Abb. 3). Dieses Modell stützt sich auf optisch bestimmte Jahresschichtdicken (Kotlyakov et al., 1990). Die so datierte $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve von Akademii Nauk wird seit mehr als 10 Jahren als eine der wichtigsten Referenzen für Klimaproxies aus Zentral- und Nordsibirien benutzt.

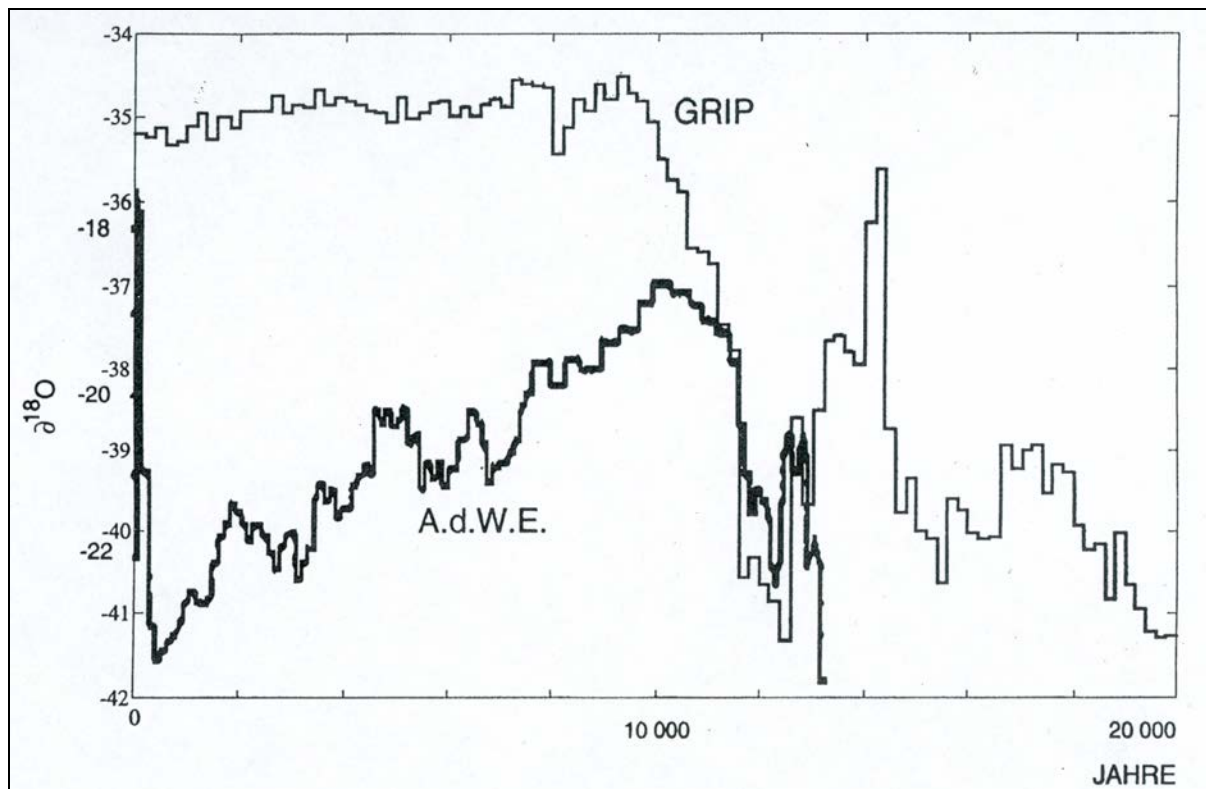


Abb.3: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte des 1986/87 gebohrten, 761 m langen Eiskerns von Akademii Nauk (A.d.W.E.) mit denen von GRIP (Grönland). Das in der Darstellung verwendete Altersmodell interpretiert den charakteristischen Abfall der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte im unteren Kernbereich als Übergang vom Holozän ins Pleistozän (nach Klement'ev et al., 1991)

• **Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Verfahrens benutzt wurden**

Die geplante Eiskernbohrung sollte mit einem elektro-mechanischen Bohrer erfolgen. Dabei dient ein mechanisch angetriebener Bohrkopf an einem Stahlkabel mit integrierten Versorgungsleitungen zur Bohrung. Ein Kernrohr zur Aufnahme des gewonnenen Eiskerns, sowie eine Kammer, in die das anfallende Bohrklein (chips) mit einem Pumpsystem befördert wird, sind in diese Bohrsonde integriert. Mit dem Gerät kann die Bohrung ohne Bohrgestänge erfolgen, wobei die Länge des in einem Bohrgang gewinnbaren Kernstücks von der Länge des Kernrohres und der Größe der Chip-Kammer abhängt. Bei Bohrtiefen über ca. 200 m muss das Bohrloch mit einer Flüssigkeit geeigneter Dichte zur Kompensation des mit der Tiefe zunehmenden Eisdrucks gefüllt werden (Talalay & Gundestrup, 2002).

Als Alternative hätte sich ein Thermobohrverfahren angeboten. Bei diesem Verfahren wird der Eiskern durch einen elektrisch beheizten Bohrkopf gewonnen. Das Gewicht von Thermobohranlagen ist deutlich geringer als das der elektromechanischen Bohrer, was insbesondere ihren Transport erleichtert. Ihre Nachteile sind jedoch:

- Bohrflüssigkeit: verwendet wird eine Alkohol-Wasser Mischung. Das Mischungsverhältnis wird bei Tiefeisbohrungen oft unkontrollierbar, was zum Festfrieren des Bohrkabels und damit meist zum Totalverlust des Bohrers führt. Weiterhin besteht die Gefahr verfälschter Isotopensignale im Eiskern durch

Isotopenaustausch zwischen Alkohol und Eis. Der Eiskern der russischen Thermobohrung von 1986/87 zeigt gleiche Isotopenmuster wie der im Rahmen dieses Projektes auf Akademii Nauk erbohrte Kern (Abb. 12 und 15), so dass der Isotopenaustausch als unerheblich betrachtet werden kann.

- **Inklination:** bei Thermobohrungen treten unkontrollierbare Abweichungen des Bohrloches von der Lotrechten bis zu 30° auf. Bei elektromechanischen Verfahren ist diese geringer als 2°.

Das elektro-mechanische Eisbohrverfahren hat sich inzwischen in der Tiefeisbohrtechnik gegenüber der Thermobohrung durchgesetzt. Die EU geförderten Eisbohrprojekte auf Grönland (GRIP und NGRIP) und in der Antarktis (EPICA Dome C und DML) sowie US-amerikanische (GISP2, Grönland) und japanische (Dome Fuji, Antarktis) Projekte wenden alle elektro-mechanische Bohrverfahren an.

Für die Bohrung auf Severnaya Semlya wurde ein Kernbohrer des Typs KEMS vorgesehen. Dieses Bohrgerät ist vom Bergbauinstitut St. Petersburg konstruiert und erfolgreich auf dem Vavilov Gletscher (Severnaya Semlya) und bei der weltweit tiefsten Eisbohrung an der Station Vostok (Antarktis) eingesetzt worden (Kudryashov et al., 1994; Vasiliev et al., 1995). Vom Entwickler wurde die Konstruktion dieses bewährten Eiskernbohrers an die speziellen Bedingungen der geplanten Expedition derart angepasst, dass ein Transport der Bohranlage in einem Hubschrauber vom Typ MI 8 möglich ist. Die dieser Neukonstruktion entsprechende Bohreinrichtung (KEMS 127/KOBRA) wurde im Vorfeld der Expedition am Bergbauinstitut St. Petersburg auf Kosten des AWI angefertigt und an das Alfred-Wegener-Institut ausgeliefert (Abb. 4). Damit können pro Bohrgang (run) bis zu 1,55 m Eiskern mit einem Durchmesser von 106 ± 1 mm gewonnen werden. Eventuell beantragte oder erteilte russische **Schutzrechte**, diesen Bohrer oder seinen Betrieb betreffend, werden durch das Projekt nicht verletzt. Der verwendete Bohrer wurde vom Entwickler gebaut, dem AWI verkauft und vom Entwickler selbst für die Bohrarbeiten genutzt.

Als Bohrflüssigkeit wurde ein Dieselöl benutzt. Diesem wurde 2001 im tiefsten Bohrabschnitt ein chemischer Zusatz (HCFC 141b) zur Vergrößerung der Dichte zugesetzt. Die gleiche Mischung wird gegenwärtig bei den Bohrprojekten NGRIP (Grönland) und EPICA (Antarktis) verwendet.

• Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

An **Fachliteratur** wurden verwendet:

a) allgemeine naturwissenschaftliche Fachzeitschriften, darunter

Nature
Science

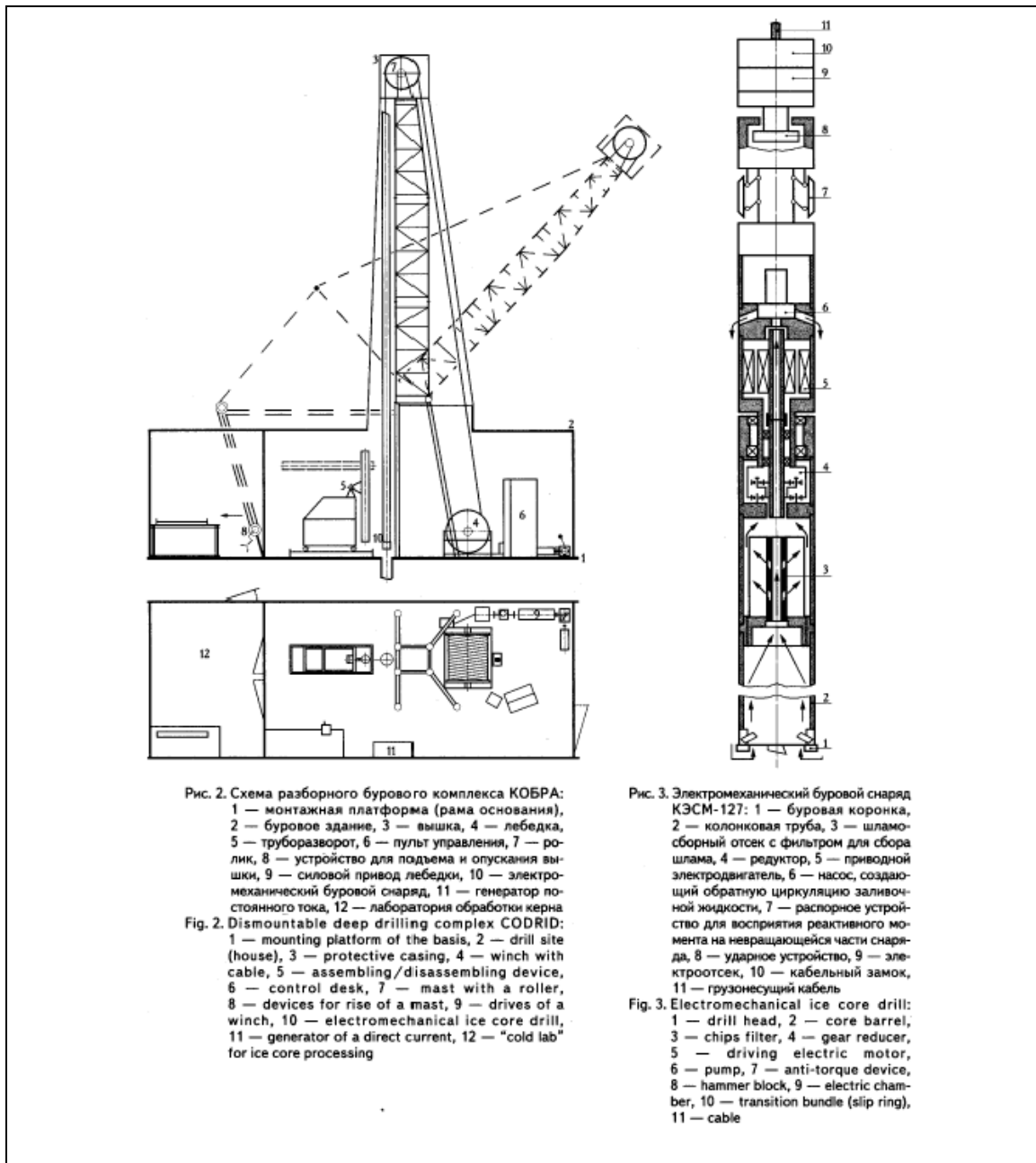


Abb. 4: Die zerlegbare Bohreinrichtung KOBRA mit dem elektromechanischen Bohrgerät KEMS-127. Mit dieser Anlage wurde der Eiskern auf Severnaya Semlya gebohrt (aus Savatyugin et al., 2001).

b) Glaziologische und polarwissenschaftliche Fachzeitschriften, u.a.

Journal of Glaciology

Annals of Glaciology

Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy (russische Fachzeitschrift mit zahlreichen
 Erstveröffentlichungen über die Gletscher auf Severnaya Semlya)

Polarforschung

Meddelelser om Grønland

c) Geophysikalische und klimatologische Fachzeitschriften

Journal of Geophysical Research
Quaternary Science Reviews
PALAEO

d) Institutsberichte und Monografien, darunter

Trudy AANII (Berichte des Arktischen- und Antarktischen Forschungsinstituts St. Petersburg)
Problemy Arktiki i Antarktiki (Russland)
Memoirs of National Institute of Polar Research, Tokyo (Japan)

An Informations- und Dokumentationsdiensten wurden u.a. genutzt:

Literaturrecherchedienst des Scott Polar Research Institute Cambridge (UK)
<http://www.spri.cam.ac.uk/resources/sprilib/>

Die Datenbanken

Pangea <http://www.pangea.de>
World Data Center for Paleoclimatology, Boulder (USA) <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/>
Das US National Climatic Data Center <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc.html>

Ausführliche Darstellungen des internationalen Standes der Eisbohrtechnologie finden sich in den Konferenzberichten „Ice Drilling Technology“ des National Institute of Polar Research, Tokyo (Watanabe, 1994; Azuma & Fujii, 2002).

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in den unten angeführten Aufgabenbereichen durch Mitwirkung folgender Stellen realisiert:

In Russland:

Arktisches und Antarktisches Forschungsinstitut, St. Petersburg (AARI)

- Organisation und Leitung der Expedition
- Beschaffung von Genehmigungen
- Aufbau des Expeditions camps auf Akademii Nauk
- Nutzung der Basis des AARI in Sredny
- Allgemeine Expeditionslogistik
- Teilnahme von Arzt, Koch, Mechaniker, die vom AARI eingestellt wurden
- Beteiligung eines Glaziologen an der visuell-stratigrafischen Kernbeschreibung in Bremerhaven

Bergbauinstitut, St. Petersburg

- Konstruktion und Bau des Eiskernbohrers KEMS und der Bohreinrichtung KOBRA

- Ausführung der Bohrarbeiten
- Geophysikalische Bohrlochmessung

Institut für Geografie, Russische Akademie der Wissenschaften, Moskau

- Teilnahme eines Glaziologen an der Expedition (2000 und 2001)

Firma ECOSHELF, St. Petersburg

- Abwicklung von Transport- und Zoll- Angelegenheiten von und nach Russland
- Kommerzielle Vertragsabwicklung mit allen beteiligten Instituten und russischen Firmen

Firma „Polyarnye Trassy“, St. Petersburg

- Koordinierung der Fluglogistik in Sibirien

In Deutschland:

Universität Heidelberg, Institut für Umweltphysik

- Analysen zur He Diffusion
- Teilnahme eines Doktoranden an der Expedition 1999

Geo Forschungszentrum Potsdam

- Analyse von Mineralbestandteilen aus dem untersten Kernabschnitt

Humboldt Universität Berlin, Sektion Geografie

- Beteiligung eines Studenten an Labormessungen am Eiskern. Die Fortsetzung dieser Arbeiten im Rahmen einer Diplomarbeit zu Vergleichen von Klimaproxies der „Kleinen Eiszeit“ ist vorgesehen.

Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Physik der Atmosphäre

- Diplomarbeit zum Thema: Eignung eines Eiskerns aus der sibirischen Arktis (Akademii Nauk Eiskappe, Severnaya Semlya) als atmosphärisches Aerosolarchiv (gemeinsame Betreuung durch Universität Mainz und AWI)

In weiteren europäischen Ländern:

Laboratoire de Glaciologie et Gèophysique de l'Environnement du CNRS, Saint Martin d'Hères Cedex, Frankreich

- Messung der spezifischen Radioaktivität von ^{137}Cs und ^{210}Pb am Bohrklein der Hauptbohrung und an einem Satellitenkern zur Bestimmung von Referenzhorizonten

University of Bristol, Bristol Glaciology Centre, Großbritannien

- Bestimmung der horizontalen Eisfließgeschwindigkeit auf Akademii Nauk mittels SAR-Interferometrie
- Bereitstellung von Radar-Eisdicken-Messdaten von Severnaya Semlya

Universität Innsbruck, Abteilung Meteorologie und Geophysik, Österreich

- Bereitstellung einer automatischen meteorologischen Station für den Expeditionszeitraum

- Auswertung der 1999-2001 an der Bohrstelle auf der Eiskuppel Akademii Nauk gewonnen meteorologischen Messdaten (Kuhn, 2001)

University of Copenhagen, Dänemark

- Bereitstellung von $\delta^{18}\text{O}$ Vergleichsdaten von der Eiskappe Hans Tausen (Nordgrönland)

II. Eingehende Darstellung

1. erzieltes Ergebnis

Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Akademii Nauk ist ein kalter Gletscher. Das Bohrloch-Temperaturprofil gibt keine Hinweise auf basales Schmelzen.

Am Eiskern wurden physikalische, chemische und isotopengeochemische Untersuchungen durchgeführt. Diese Daten führten zu folgenden Ergebnissen:

- Bestimmung der Jahresakkumulation und von Jahresschichtdicken,
- vorläufige Datierung der oberen 400 Kernmeter,
- die Abschätzung des Maximalalters für den tieferen Kern,
- Ableitung von Trends der klimatischen Entwicklung von Severnaya Semlya.

Die publizierte russische $\delta^{18}\text{O}$ -Kurve wurde für Akademii Nauk bestätigt, das von Kotlyakov et al. (1990) vorgeschlagene und von Klement'ev et al. (1991) benutzte Altersmodell stimmt jedoch nicht mit den im Kern von uns beobachteten tatsächlichen Jahresschichtdicken überein. Die Gletscherkuppel Akademii Nauk erwies sich, zumindest in ihren oberen 680 m, als wesentlich jünger als bisher angenommen. Die Voraussetzung der Gleichgewichtsbedingung, die herkömmliche Fließmodelle für eine Altersdatierung benötigen, war für diese Kuppel in der Vergangenheit nicht erfüllt. Der Gletscher hat offenbar in den vergangenen 2-3000 Jahren an Masse zugenommen. Seine Basisschicht scheint aber älter zu sein. Die Klärung dieser Frage, die Verbesserung des Altersmodells sowie die Verdichtung hoch aufgelöster Messdaten sind Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Sommerliche Schmelzprozesse an der Gletscheroberfläche führen zum Eindringen von Schmelzwasser in die darunter liegende Firnschicht. Diese für die meisten arktischen Eiskuppeln außerhalb von Grönland typische Erscheinung führt zu Veränderungen ursprünglicher chemischer Signaturen und der Verhältnisse der stabilen Wasserisotope. Trotz dieser Erscheinung sind Horizonte erhöhter elektrischer Leitfähigkeit oder Radioaktivität klar erkennbar und es sind Klimaproxymaten mit Jahresauflösung, zumindest im oberen Teil des untersuchten Eiskerns, zu erhalten. Die Menge des aus Schmelzwasser gebildeten Eises lässt Rückschlüsse auf sommerliche Temperaturen zu.

Chemische Untersuchungen ausgewählter Kernabschnitte zeigen, dass hohe elektrische Leitfähigkeit ihre Ursachen in erhöhten Konzentrationen an Hauptionen im Eis haben. Ein

Zusammenhang zwischen der anthropogenen Quellstärke von SO_2 und NO_x und der Deposition von Sulfat und Nitrat auf Akademii Nauk konnte nachgewiesen werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Detail vorgestellt und diskutiert.

1.1. Ergebnisse physikalischer Bohrlochmessungen

In dem mit Flüssigkeit gefüllten Bohrlochbereich unterhalb von 100 m Tiefe wurden Druck (als Tiefenreferenz), Temperatur, Inklination und Bohrlochdurchmesser mit einer Bohrloch-Messsonde bestimmt.

Abb. 5 stellt Druck und Temperaturverlauf im Bohrloch dar. Die Temperatur am Gletscheruntergrund beträgt $-7,49^\circ\text{C}$ und ist damit weit vom Druckschmelzpunkt entfernt. Akademii Nauk ist eine Gletscherkuppel, bei der basale Schmelzvorgänge gegenwärtig mit Sicherheit auszuschließen sind. Das charakteristische Temperaturminimum von $-14,33^\circ\text{C}$ in 198 m Tiefe weist auf eine Klimaperiode hin, in der die Oberflächentemperatur der Eiskuppel deutlich niedriger als heute war („Kleine Eiszeit“, vgl. auch Abb. 12, 14 und 15). Das Ansteigen der Temperatur oberhalb 200 m Bohrlochtiefe ist Folge einer Klimaerwärmung und nicht von saisonalen Temperaturschwankungen; letztere reichen lediglich bis in eine Tiefe von maximal 15 m. Das bezeichnete Temperaturminimum ist in vielen arktischen Gletschern beobachtet worden. Für den Temperaturverlauf im Austfonna Gletscher (Spitzbergen), der dem von Akademii Nauk sehr ähnlich ist, wurde durch numerische Modellierung abgeschätzt, dass eine deutliche Erwärmung vor 130-150 Jahren eingesetzt haben muss (Kotlyakov et al., 1990). Dies stimmt mit den Ergebnissen unseres Projektes überein (siehe Abb. 12, 14 und 15).

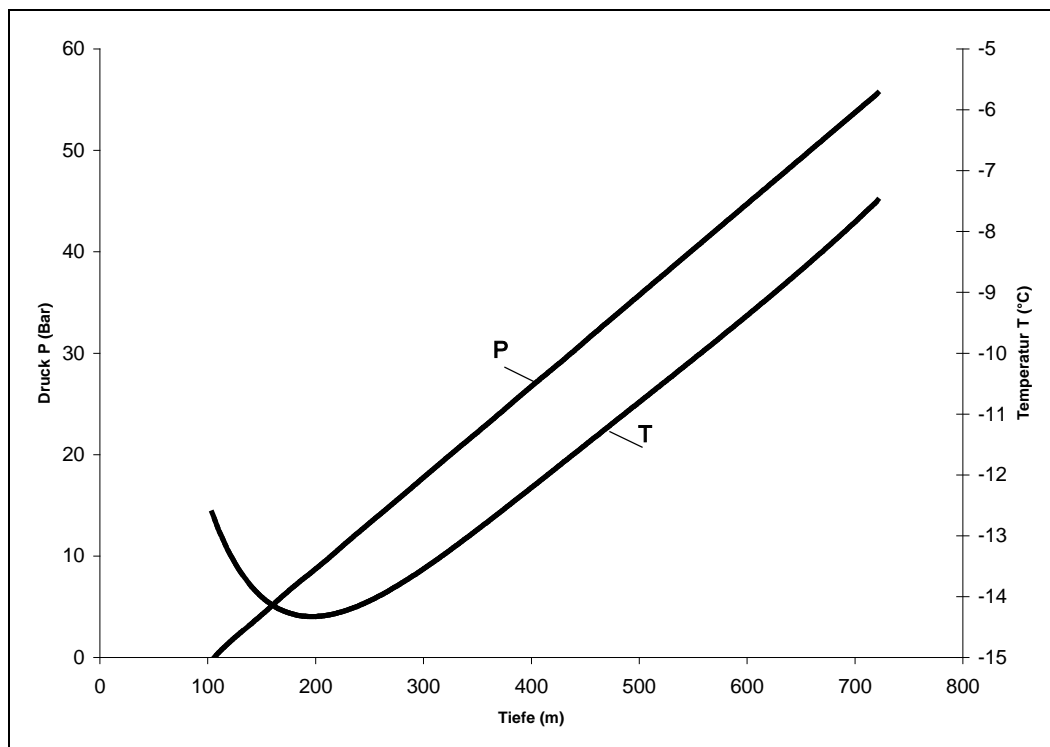


Abb. 5: Druck und Temperaturverlauf im Bohrloch auf Akademii Nauk

Die Abweichung des Bohrloches von der Lotrechten (Inklination) war stets kleiner als 55° und ist damit geringer als in vergleichbaren Tiefeisbohrungen auf Grönland oder in der Antarktis (NGRIP, EPICA/DML).

1.2. Bestimmung von Jahresschichtdicken und Ableitung der Alters-Tiefen-Beziehung

Die Bestimmung der Jahresakkumulation eines Gletschers ist zur Berechnung seiner Massenbilanz erforderlich und zugleich die Voraussetzung für die Entwicklung eines Altersmodells. Zur Abschätzung der Jahresschichtdicke in Abhängigkeit von der Tiefe verwendet man meist eindimensionale Fließmodelle (Nye, 1963; Dansgaard & Johnsen, 1969). Vorausgesetzt wird dabei, dass

- a) die Massenbilanz des Gletschers ausgeglichen ist und sich der Gletscher auch in der Vergangenheit im Gleichgewicht befunden hat, d.h. seine Oberfläche stets im gleichen Höhengniveau war,
- b) die jährliche Akkumulation im Mittel gleichbleibend ist,
- c) keine basalen Schmelzvorgänge auftreten.

Literaturangaben zur Akkumulationsrate im Gipfelbereich der Eiskuppel Akademii Nauk sind widersprüchlich. Zagorodnov et al. (1990) finden durch glaziologische Untersuchungen in Firnschächten für die Umgebung des russischen Bohrpunkts von 1986/87 eine mittlere Jahresakkumulation von 430-440 kgm⁻². Ungenauer sind die Angaben von Savatyugin und Zagorodnov (1988) von 300-400 kgm⁻² für die gleiche Lokalität. Kotlyakov et al. (1990) finden mit visuell-stratigrafischen Methoden im 1986/87 gebohrten russischen Eiskern von Akademii Nauk Jahresschichtdicken, die mit der Tiefe linear abnehmen und einer aktuellen Akkumulationsrate von etwa 290 kgm⁻² entsprechen. Diese Angabe steht im Widerspruch zur mittleren Jahresakkumulation von 350 kgm⁻², die aus der Zerfallskurve von ²¹⁰Pb bestimmt wurde (Kotlyakov et al., 1990). Für den russischen Kern ist aus den ermittelten Jahresschichtdicken ein Altersmodell unter Benutzung eines eindimensionalen Fließmodells nach Nye entwickelt worden (vgl. PANGAEA-DataSet ID: 57257 <http://www.pangea.de>). Dieses Altersmodell wird durch unsere Untersuchungen nicht bestätigt.

Nach unseren Erfahrungen ist eine Erfassung von Jahresschichten allein mit visuellen Methoden für Akademii Nauk schon in Firngruben sehr schwierig. Infiltrierendes Schmelzwasser durchdringt den winterlichen Firn unterschiedlich stark und liefert ein schwer zu entschlüsselndes Bild heterogener Eislinien und -schichten. Zur Bestimmung von Jahresschichten aus Eiskernen müssen daher optische Verfahren durch andere Bestimmungsmethoden - zumindest - ergänzt werden.

Im Rahmen des Projektes wurden Akkumulationen bzw. Jahresschichtdicken mit mehreren unabhängigen Verfahren bestimmt:

- a) ¹³⁷Cs Messung (Abb. 6) zur Identifizierung der Horizonte 1986 (Tschernobyl –Unfall) und 1963 (Deposition des Fall-outs der Kernwaffentests von 1961/62).

Ergebnis: mittlere Jahresakkumulation

1986-1999: $530 \pm 20 \text{ kgm}^{-2}$ (dieser Wert wird durch das $\delta^{18}\text{O}$ -Profil des Flachbohrkerns SZ99-2 bestätigt, vgl. Abb. 8)
 1963-1999: 450 kgm^{-2}

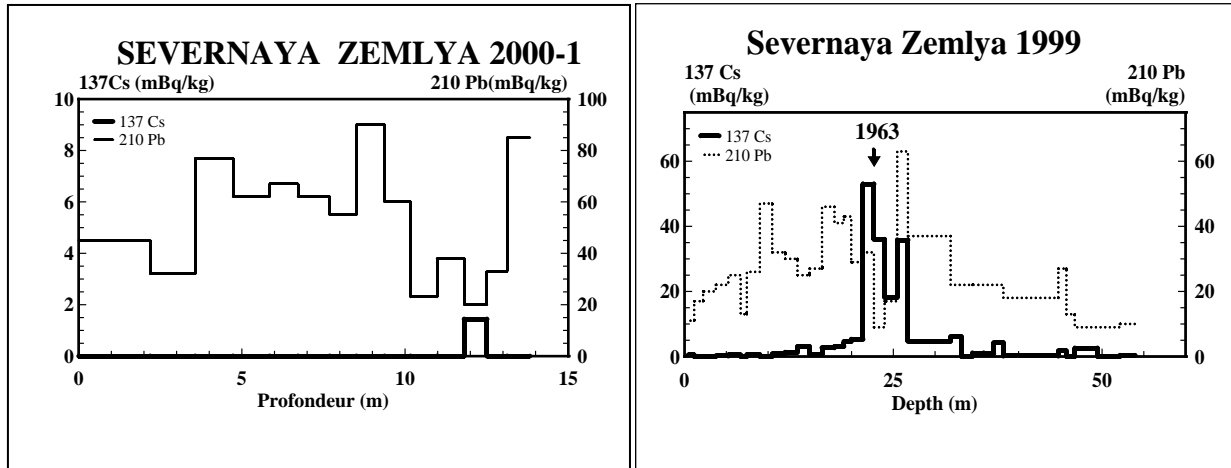


Abb. 6: Radioaktivitätsprofil von ^{210}Pb und ^{137}Cs gemessen an einem Flachbohrkern (links) und am Bohrklein der Hauptbohrung von 1999 (rechts). Im Flachbohrkern wurde nur in einer Probe ^{137}Cs nachgewiesen, dessen Quelle der Tschernobyl-Unfall von 1986 ist. Im Bohrklein ist das durch Kernwaffentests von 1961/62 verursachte ^{137}Cs - Maximum deutlich erkennbar (nach Pinglot et al., 2003)

- b) Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Eiskerns und Zuordnung von Leitfähigkeitspeaks zu historischen Vulkanausbrüchen (Abb. 7)

Hohe elektrische Leitfähigkeit im Eiskern kann unterschiedliche Ursachen haben. Neben Vulkanen kommen auch große Waldbrände oder Staubstürme dafür in Betracht. Die in Abb. 7 getroffene Zuordnung einzelner peaks zu Vulkanereignissen sollte daher durch eingehende chemische Analysen der entsprechenden Kernabschnitte überprüft werden. Eine Analyse der Hauptionen ist für 5 aus den oberen 54 m ausgewählte Kernsequenzen erfolgt. Das in 26 m Tiefe beobachtete Leitfähigkeitsmaximum entspricht einer überaus hohen Deposition von Sulfat (SO_4^{2-}) in diesem Kernabschnitt, was eindeutig auf eine vulkanische Ursache hindeutet (Weiler et al., 2003). Auch im Bereich des Leitfähigkeitspeaks um 44,3 m wurde ein auf das 35fache des Durchschnittes erhöhter Sulfatgehalt gefunden (vgl. Abb. 16).

Ergebnis: Die mittleren Jahresschichtdicken betragen in den angegebenen Zeitintervallen:

1956 - 1999: 450 kgm^{-2} (Marker: 1956 Bezymianny, Kamtschatka; dieser Wert stimmt mit dem für 1963 - 1999 aus ^{137}Cs -Messungen ermittelten überein)

1912 - 1956: 370 kgm^{-2} (Marker: 1912 Katmai, Alaska; dieser Zeitraum liegt in einer Periode starker Erwärmung; ein Massenverlust durch überdurchschnittliche Verdunstung oder vom Gletscher ablaufendes Schmelzwasser (runoff) ist nicht auszuschließen)

1783 - 1912: 430 kgm^{-2} (Marker: 1783 Laki, Island)

1586 - 1783: **411** kgm^{-2} (Marker: 1586 Kelut, Indonesien)
 1512 - 1586: **401** kgm^{-2} (Marker: 1512 Hekla, Island)

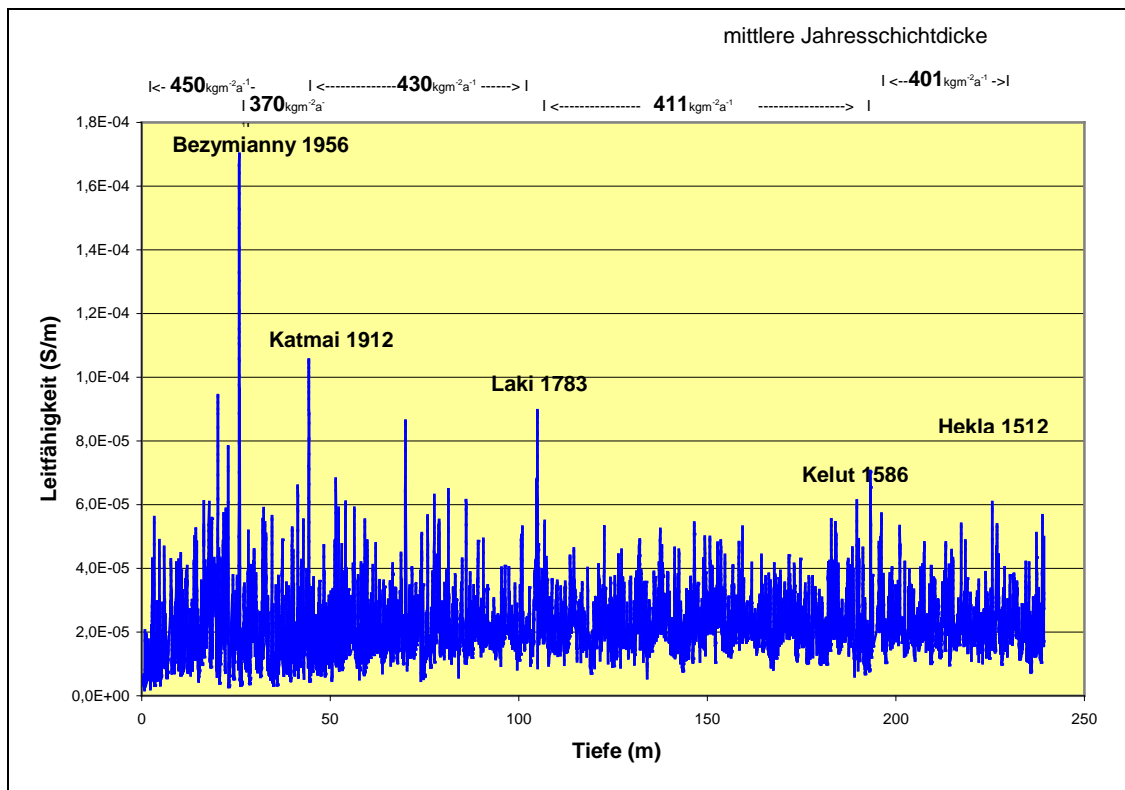


Abb. 7: Profil der elektrischen Leitfähigkeit der oberen 245 m des Eiskerns von Akademii Nauk mit Angabe der zugeordneten Vulkanereignisse und der daraus resultierenden mittleren Jahresschichtdicken (oben)

c) Auswertung saisonaler Schwankungen der Leitfähigkeit und des $\delta^{18}\text{O}$ -Signals

Die elektrische Leitfähigkeit von Eis unterliegt Schwankungen, die durch saisonal unterschiedlichen Eintrag von Aerosolen hervorgerufen werden. Diese sind im Eiskern von Akademii Nauk teilweise erhalten und können zur Bestimmung von Jahresschichtdicken in unterschiedlichen Tiefen herangezogen werden. Saisonale Schwankungen des $\delta^{18}\text{O}$ -Signals werden vom Jahresgang der Kondensationstemperatur bestimmt, bei der sich der deponierte Niederschlag gebildet hat. Das spiegelt sich entsprechend in den heute vorgefundenen $^2\text{H}/\text{H}$ - und $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ -Verhältnissen wider. Im oberen Kernbereich ließen sich jahreszeitliche Schwankungen nachweisen, die ein Abzählen von Jahresschichten und damit eine jahresgenaue Datierung des Eiskernes zwischen bekannten Horizonten möglich macht (Beispiel siehe Abb. 8). Auch in tieferen Gletscherschichten wurden solche saisonalen Isotopensignaturen beobachtet und zur Bestimmung der Jahresschichtdicke herangezogen (Beispiel siehe Abb. 9)

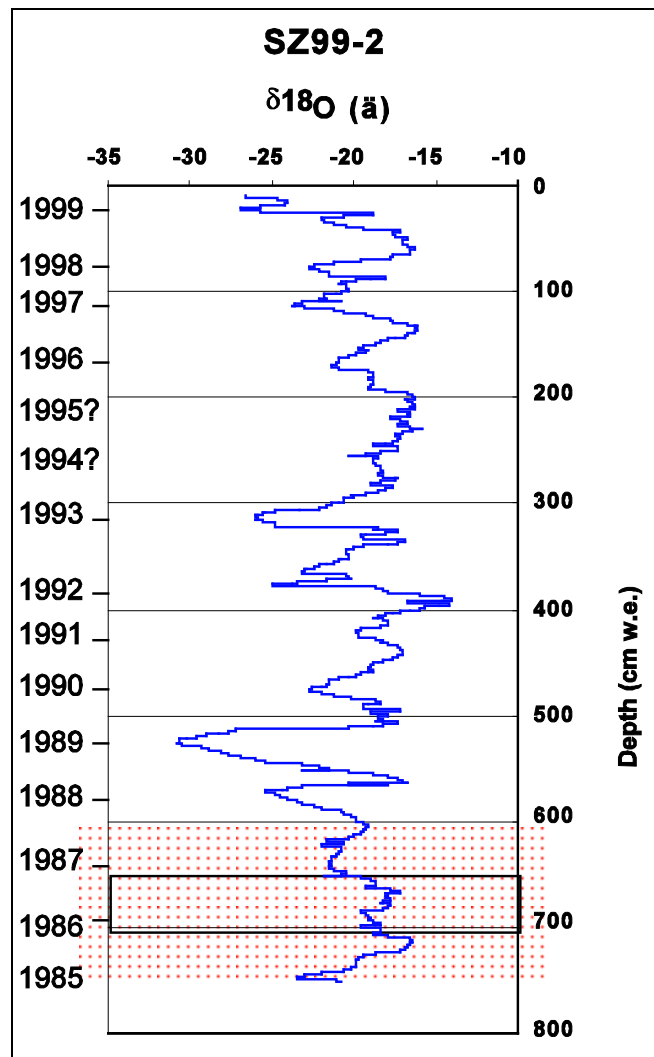


Abb. 8: $\delta^{18}\text{O}$ -Profil des Flachbohrkerns SZ99-2. Saisonale Schwankungen der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte sind auf Akademii Nauk trotz der Einwirkung sommerlicher Schmelzwässer weitgehend erhalten. In der hier gewählten Darstellung $\delta^{18}\text{O}$ gegen Tiefe in cm Wasseräquivalent (cm w.e.) kann die jeweilige Jahresschichtdicke zwischen 2 Minima direkt in g/cm^2 abgelesen werden. Werden einzelne Jahressignale vom Schmelzwasser erodiert (hier 1994/1995), dann ist die Anzahl der fehlenden Jahre noch leicht abschätzbar. Der schraffierte Bereich kennzeichnet den Horizont, in dem aus dem Tschernobyl-Ereignis stammendes ^{137}Cs gefunden wurde und dient als Referenz des Jahres 1986. Die im Firnbereich sinnvolle Umrechnung von Tiefen in m zu Tiefen in m w.e. erfolgte mit Hilfe der mittels Absorption von γ -Strahlung bestimmten Firndichte.

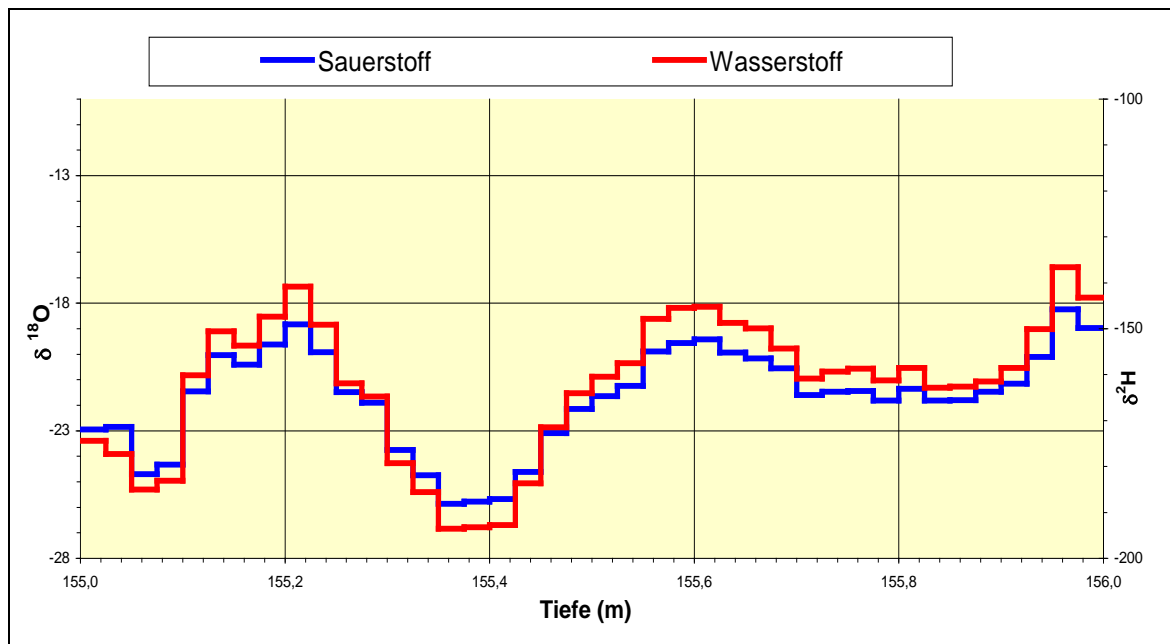


Abb. 9: $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ Profil im Kernstück 155-156 m. Die saisonale Variation der Isotopenverhältnisse ist erhalten und ermöglicht die Bestimmung der Dicke von Jahresschichten (hier ca. 35-40 cm Eisäquivalent)

Für den gesamten Kern wurden die Jahresschichtdicken aus dem Isotopenprofil und dem Signal der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt. Zum Vergleich sind die Jahresschichtdicken nach den Fliessmodellen von Nye (1963) und Dansgaard & Johnsen (1969) berechnet worden. Nye geht davon aus, dass die Jahresschichten mit zunehmender Tiefe durch den Druck des Gletschers ausgedünnt werden. Ein virtuelles Teilchen „versinkt“ also im Gletscher, mit einer Geschwindigkeit, die an der Oberfläche der Akkumulationsrate entsprechen soll. An der Gletscherbasis ist diese Geschwindigkeit gleich Null, dazwischen wird sie linear interpoliert. Somit entspricht die Jahresschichtdicke der entsprechenden Tiefe genau dem Absinken des Teilchens im betrachteten Jahr. Dieser Ansatz gilt nur bei ausgeglichener Massenbilanz des Gletschers, d.h. die Höhenlage seiner Oberfläche bleibt konstant. Dansgaard und Johnsen (1969) haben dieses Modell so verändert, dass es durch einen frei wählbaren Parameter h' an die im Gletscher vorgefundenen Jahresschichtdicken angepasst werden kann. Abb. 10 stellt die am Eiskern gemessenen Jahresschichtdicken denen gegenüber, die nach Nye und Dansgaard & Johnsen unter Annahme einer konstanten Akkumulation von 420 kgm^{-2} pro Jahr berechnet wurden. Beide Modelle unterschätzen die im Gletscher vorgefundene Jahresschichtdicke (Abb. 10). Damit sind die in Abb. 11 dargestellten Modelle der Alters-Tiefen-Beziehungen auf den Eiskern nicht anwendbar, da das Alter mit der Tiefe zunehmend überschätzt wird. Tatsächlich sind die entsprechenden Gletscherschichten deutlich jünger. Offensichtlich ist und war die Voraussetzung einer ausgeglichenen Massenbilanz für Akademii Nauk nicht erfüllt. Die Gletscherdicke muss in dem vom Eiskern erfassten Zeitraum zugenommen haben.

Zur zeitlichen Einordnung der Messdaten des Eiskerns (vgl. Abb. 14) wird für die oberen 400 Kernmeter ein Modell benutzt, das sich auf die Zuordnung von Maxima der elektrischen Leitfähigkeit des Kerns zu historischen Vulkanausbrüchen (nach Simkin & Siebert, 1994) stützt (vgl. Abb. 7). Dieses Altersmodell ist zurzeit auf die letzten 1000 Jahre beschränkt. Das älteste verwendete Vulkanereignis ist der Ausbruch des Baitoushan (Grenze China – Korea) im Jahr 1050 ± 10 (Volcanic Explosivity Index: VEI 7). In tieferen Bereichen gelang eine

solche Zuordnung bisher noch nicht, da hier die Vulkaneruptionen, insbesondere große auf Kamtschatka, unzureichend datiert sind.

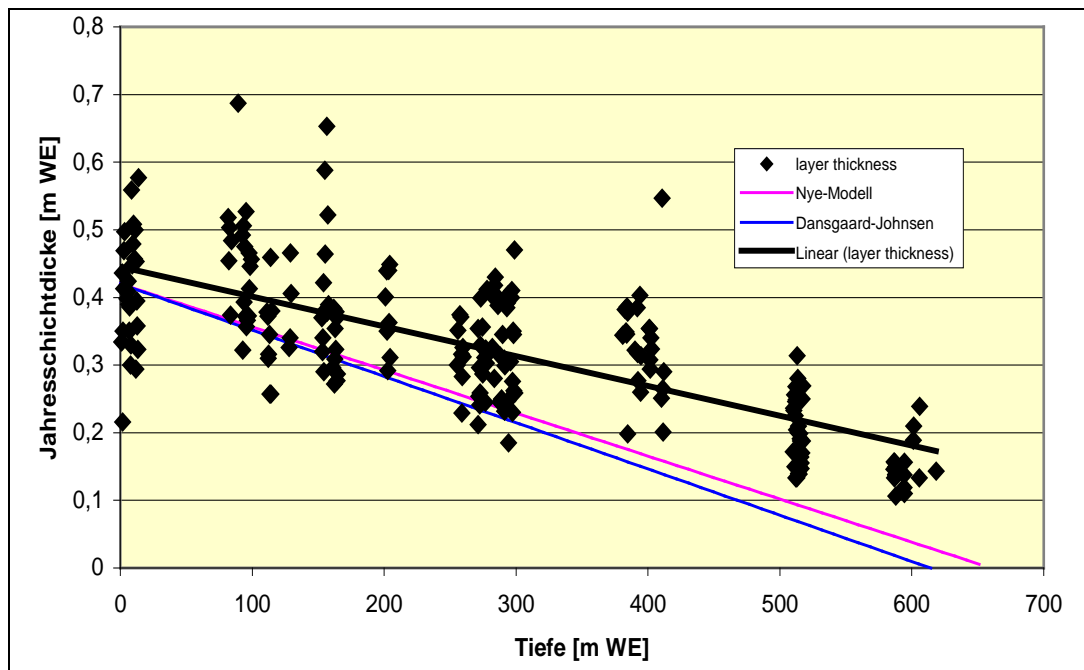


Abb. 10: Durch Auswertung der saisonalen Schwankungen der elektrischen Leitfähigkeit und der Isotopenverhältnisse wurden die Jahresschichtdicken (layer thickness) in verschiedenen Tiefen des Gletschers bestimmt. Zum Vergleich sind die theoretisch aus den Modellen von Nye und Dansgaard & Johnsen zu erwartenden Jahresschichtdicken angegeben, die mit wachsender Tiefe zunehmend die gemessenen Jahresschichten unterschätzen.

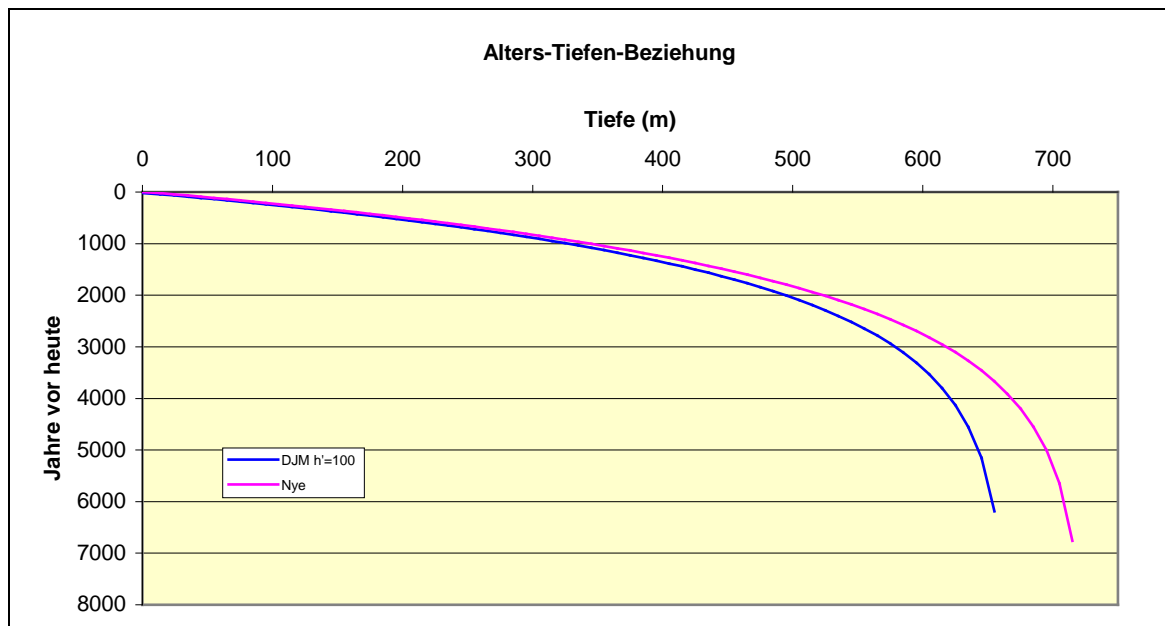


Abb. 11: Alters-Tiefenbeziehung nach den Modellen von Nye (1963) und Dansgaard & Johnsen (1969) DJM, hier mit dem Parameter $h'=100$ m berechnet. Beide Modelle unterschätzen die Jahresschichtdicken im Gletscher (vgl. Abb. 10), d.h. sie überschätzen sein Alter.

1.3. Das $\delta^{18}\text{O}$ Profil des Eiskerns von Akademii Nauk

Die Analyse von Verhältnissen der stabilen Wasserisotope $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ und $^2\text{H}/\text{H}$ ermöglicht den direkten Rückschluss auf die Lufttemperatur, bei der der deponierte Niederschlag kondensierte. Als Methode zur Bestimmung von Paläotemperaturen aus Eiskernen wird das Verfahren seit Jahrzehnten erfolgreich verwendet.

Im Rahmen des Projektes erfolgten Isotopenanalysen an dem Flachbohrkern SZ99-2 mit 2,5 cm Probenlänge (471 Proben, Abb. 8), sowie für einzelne Abschnitte des auf Akademii Nauk gebohrten Eiskerns SZ99 (Hauptkern) in der folgenden, abschnittsweise unterschiedlichen Auflösung, die sich u. a. auf die Streuung der in Abb. 12 dargestellten $\delta^{18}\text{O}$ -Daten auswirkt:

- 0-54 m: durchgehend mit Probenlängen von 2,5 cm (hoch aufgelöst, ca. 2200 Proben)
- 54-245 m: aller 5 bzw. 10 m mit Probenlängen von 2,5 cm (ca. 1000 Proben)
- 245-724 m: eine Oberflächenprobe je Kernstück (ca. 750 Bag-Kratzproben)

Sowohl das Verhältnis $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$) als auch $^2\text{H}/\text{H}$ ($\delta^2\text{H}$) wurde immer an gleichen Proben gemessen. Bisher ausgewertet sind die $\delta^{18}\text{O}$ Daten, die in Abb. 12 als Übersicht dargestellt sind. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der russischen Bohrung (ANK86/87) mit angegeben. Die Tiefenskala der russischen Daten wurde an die der neuen Kernbohrung angepasst, indem

- des Oberflächenniveau von 1986 in die Tiefe des Tschernobylhorizontes der neuen Bohrung verschoben wurde,
- diese lineare Verschiebung bis auf 250 m Tiefe beibehalten wurde
- die charakteristischen $\delta^{18}\text{O}$ –Maxima, die bei beiden Bohrungen ca. 30 m über dem Untergrund gefunden wurden auf gleiche Tiefe von 695 m gelegt wurde
- zwischen 250 und 695 m Tiefe die russische Tiefenskala durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor angepasst wurde.

Diskussion der Ergebnisse:

Die in diesem Projekt gemessenen $\delta^{18}\text{O}$ -Daten stimmen, nachdem die oben beschriebene Tiefenanpassung erfolgt ist, bemerkenswert gut mit denen der russischen Eisbohrung von 1986/87 überein. In beiden Profilen wird ca. 30 m über dem Untergrund das absolute Maximum von $-17,8\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$ gefunden. Ein derart hoher Wert wird als 5 m Mittelwert nochmals 30-35 m unter der heutigen Oberfläche erreicht. Letztgenannte Tiefe entspricht etwa der Deposition von 1934-1950, einem Zeitraum in dem der geringe Firneisanteil im Eiskern auf starke sommerliche Schmelzprozesse hinweist (vgl. Abb. 15).

Unter Benutzung eines linearen Ansatzes zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Jahresschichtdicke und Tiefe (vgl. Abb. 10) gelangt man zu einem Alter von knapp 2 500 Jahren für das in 694 m Tiefe gefundene $\delta^{18}\text{O}$ Maximum. Von etwa diesem Zeitpunkt an haben sich die Temperaturen auf der Eiskuppel Akademii Nauk bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts scheinbar abgekühlt, was eventuell auch teilweise durch einen stetigen Zuwachs, d.h. durch eine Höhenzunahme der Gletscheroberfläche erklärt werden kann. Daran anschließend ist dann bis etwa 1950 von einem tatsächlichen starken Temperaturanstieg auszugehen (siehe Abb. 12, 14 und 15).

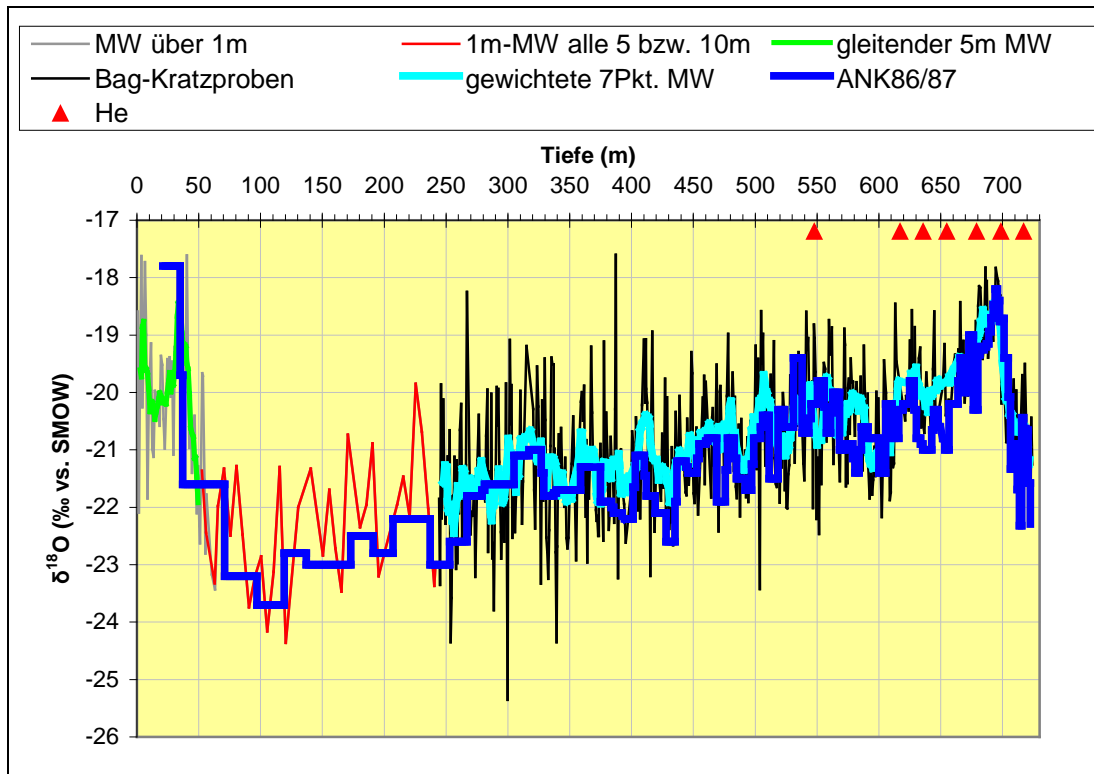


Abb. 12: $\delta^{18}\text{O}$ -Profil des Eisbohrkerns SZ99 von der Eiskuppel Akademii Nauk mit Angabe der Daten des russischen Kerns von 1986 (ANK86/87) in einer auf den neuen Kern bezogenen Tiefenskala. Im Kern erhalten sind Klimainformationen in weit höherer zeitlicher Auflösung, als dies in den russischen Daten zum Ausdruck kommt. He bezeichnet Tiefen, in denen Eisproben zur Bestimmung der He Konzentration entnommen wurden

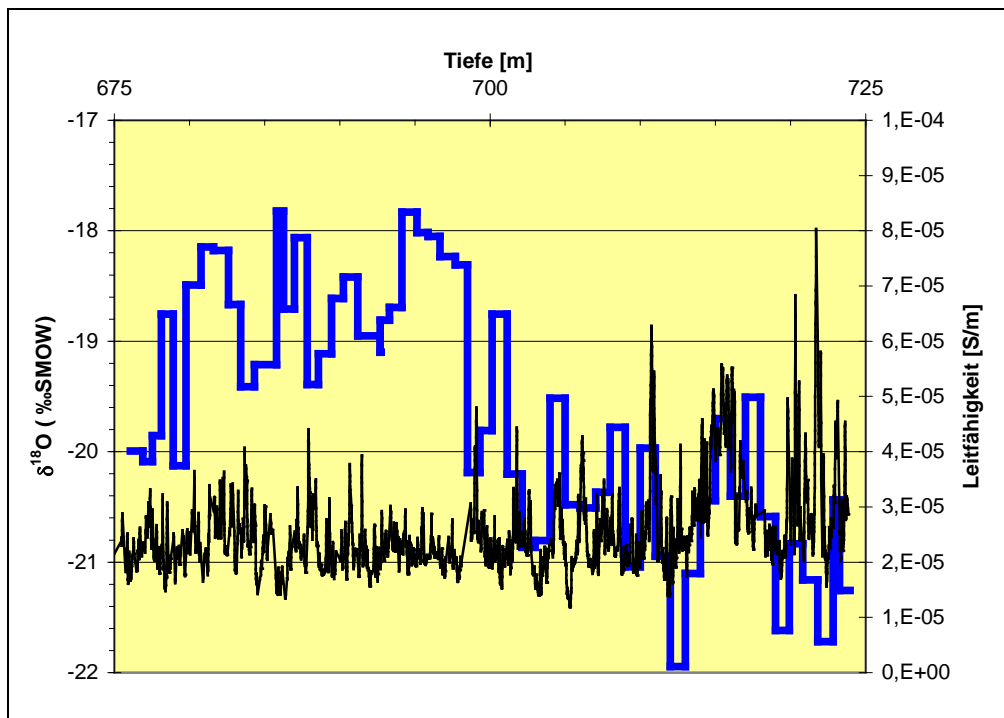


Abb.13: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ -Daten mit dem Profil der elektrischen Leitfähigkeit im untersten Teil des Eiskerns

Die Übereinstimmung der maximalen $\delta^{18}\text{O}$ Werte am Gletschergrund und in neuerer Zeit legt die Vermutung nahe, dass $\delta^{18}\text{O}$ Werte von -18‰ im Jahresmittel für Akademii Nauk eine Temperaturgrenze markieren, oberhalb derer die Massenbilanz des Gletschers negativ ist. Denkbar wäre, dass vor dem durch das $694\text{ m-}\delta^{18}\text{O}$ -Maximum bezeichneten Zeitpunkt die Temperaturen auf Akademii Nauk so hoch waren, dass frühere Gletscherschichten geschmolzen und somit nicht erhalten sind. Die unterhalb des bezeichneten Maximums liegenden 30 m Eisschicht würde dann ein höheres Alter, als durch Extrapolation der Schichtdicken-Tiefen-Beziehung berechnet, haben. Ein Hinweis auf ein solches Schmelzereignis könnte die im Bereich $710\text{-}720\text{ m}$ Tiefe beobachtete Anomalie der elektrischen Leitfähigkeit sein (Abb. 13). Eine Erhöhung in dieser Art wird im gesamten Kern nur hier beobachtet und könnte durch Anreicherung von Mineralstoffen verursacht sein, die aus aufgetauten Eisschichten stammen.

Die Frage des Alters des untersten Kernbereichs soll die He-Gehaltsanalyse von aus unterschiedlicher Tiefe entnommenen Eisproben lösen. Das He stammt aus dem Felsuntergrund und wird dort durch Zerfall radioaktiver Isotope der Uran- und Thoriumzerfallsreihen gebildet. Es gelangt durch Diffusion in den Gletscher, wobei die dort gemessene Konzentration von der Tiefe, d.h. dem Abstand zur Quelle Felsuntergrund und von der Zeit, in der Diffusion möglich war abhängt. Setzt man konstante Quellstärke voraus, lässt sich aus der He-Konzentration das Eisalter berechnen. Die zur He-Analyse beprobten Tiefen sind in Abb. 12 angegeben (He). Das Ergebnis der He-Konzentrationsmessungen liegt zurzeit noch nicht vor.

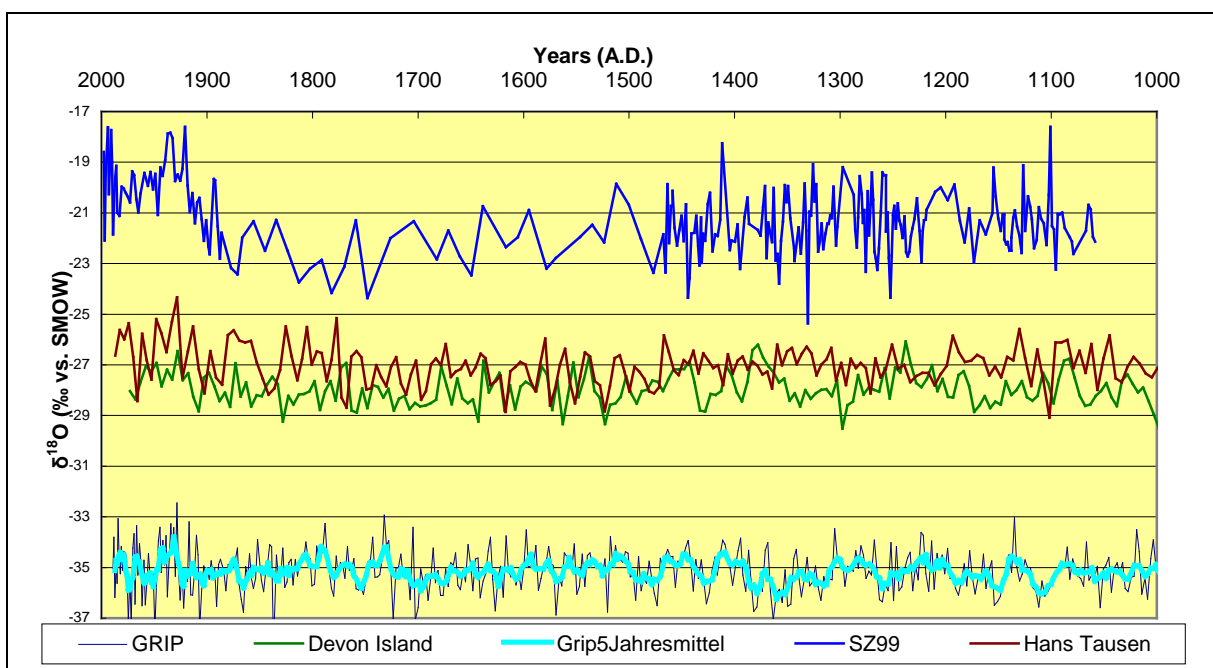


Abb. 14: Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ -Profile von Eiskernen der Kuppel Akademii Nauk (SZ99, Höhe ca. 800 m ü. NN, Daten dieses Projektes), Devon Island Eiskuppel (Nordkanada, Höhe ca. 1800 m ü. NN Datenquelle: <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/>), Hans Tausen (Nordgrönland, Höhe ca. 1200 m ü. NN Datenquelle: University of Copenhagen) und GRIP (Grönland, Höhe 3230 m ü. NN Datenquelle: <http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/>)

Die Abb. 14 zeigt den Vergleich der $\delta^{18}\text{O}$ Variation in den vergangenen 1000 Jahren für verschiedene arktische Gletscher. Akademii Nauk ist mit 800 m ü. NN die niedrigste der betrachteten Eiskuppeln, weshalb die $\delta^{18}\text{O}$ Werte absolut am höchsten liegen. Markant ist ein Mitte des 19. Jahrhunderts beginnender Anstieg der Werte um 3-4 ‰, der in allen Profilen zu finden, aber für Akademii Nauk am größten ist. Er markiert das Ende der „Kleinen Eiszeit“. Offenbar reagiert Akademii Nauk als ein Gletscher, der nahe an der klimatisch möglichen Grenze existiert, besonders stark auf Klimaänderungen.

1.4. Visuelle Bestimmung von Firneisschichten und deren klimatologische Interpretation

Auf der Eiskuppel Akademii Nauk treten sommerliche Schmelzprozesse auf. Dadurch entstandenes Wasser dringt in tiefere Firnschichten ein und gefriert in einer tieferen kalten Lage oder bleibt an der Oberfläche einer älteren Eisschicht stehen und kann dort erneut gefrieren. Dieser Prozess führt einerseits zur Abschwächung oder gar Zerstörung ursprünglicher Signaturen z. B. von Verhältnissen der stabilen Isotope (vgl. Abb. 8) oder von Verteilungsmustern der Hauptionen (Weiler, 2001), andererseits steht der Anteil des auf diese Art im Gletscher gebildeten Eises in Beziehung zur Wärmemenge $> 0^\circ\text{C}$ und ist damit ein Indikator für sommerliche Temperaturen (Koerner, 1977 & 1997).

Im Eiskern wechseln aus reinem Firn entstandene Schichten, die hier als Firneis bezeichnet werden, mit Lagen aus Infiltrationseis ab. Infiltrationseis entsteht aus mehr oder minder von Schmelzwasser gesättigtem Firn oder aus reinem Schmelzwasser, das bei Gefrieren ein blasenfreies Eis ergibt. Firn und Infiltrationseis sind visuell unterscheidbar. Ein hoher Anteil an Firneis in einem Kernabschnitt ist damit ein Hinweis auf eine entsprechende Periode von verhältnismäßig kühlen Sommern.

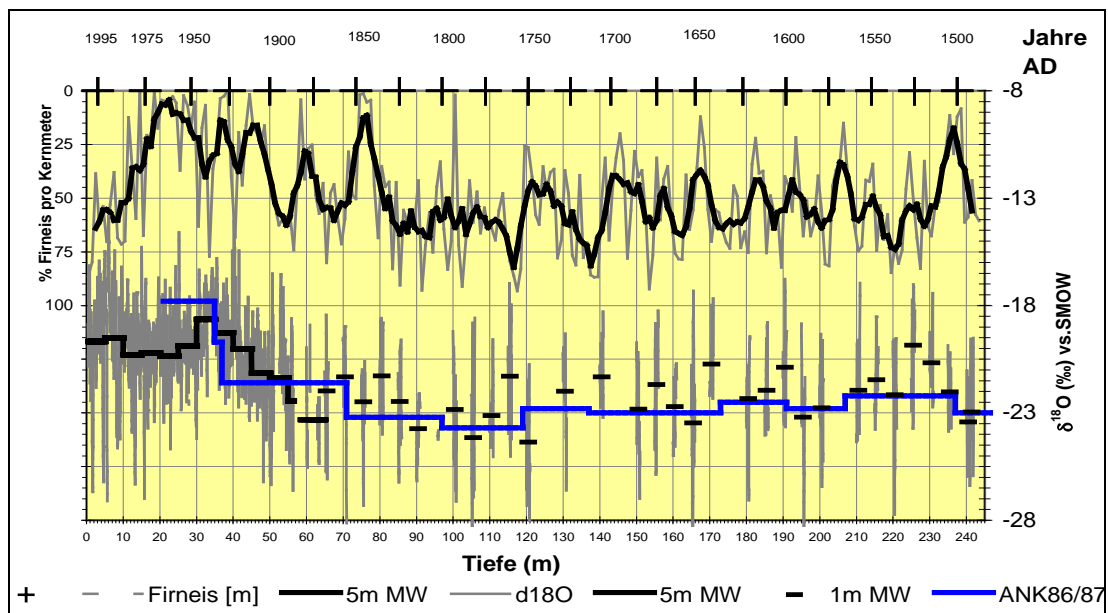


Abb. 15: Vergleich des Anteils von Firneis mit den $\delta^{18}\text{O}$ Daten der oberen 245 Kernmeter

Der Anteil von Firneis (in Gew. % pro Kernmeter) wurde für die oberen 245 m des Eiskerns aus Daten von optischen Kernaufnahmen (line-scan Aufnahmen) bestimmt. In Abb. 15 ist dieser Verlauf den $\delta^{18}\text{O}$ Daten gegenübergestellt. Von etwa 1480 an bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts liegt der Anteil von Firneis um 50 Gew.%. In diesem Zeitraum nimmt dieser

Anteil leicht zu (zunehmend kühlere Sommer), was in Übereinstimmung mit den abnehmenden Isotopenwerten steht, deren Messung in diesem Bereich aber noch lückenhaft ist. Anschließend nimmt der Firneisanteil bis etwa 1970 stark ab, was eine extreme Veränderung der sommerlichen Bedingungen erkennen lässt. Für dieses Zeitintervall fanden wir verringerte Akkumulationsraten; ein Massenverlust durch abfließendes Schmelzwasser (runoff) kann nicht ausgeschlossen werden (vgl. Abb. 7). Seit 1970 hat sich der Trend geändert, im Sommer sickert immer weniger Schmelzwasser in den Firn. Der Verlauf der $\delta^{18}\text{O}$ Kurve ist ähnlich aber nicht zeitlich übereinstimmend. Es ist nicht ausgeschlossen, dass dies der Effekte eines eventuellen Oberflächenabflusses von Schmelzwasser ist.

1.5. Bestimmung der Konzentration von Hauptionen in ausgewählten Kernbereichen

Zur Untersuchung der stofflichen Ursachen erhöhter elektrischer Leitfähigkeit wurden im Rahmen einer Diplomarbeit 5 Tiefenbereiche des Eiskerns auf ihre Gehalte an Anionen (MSA^- (Methansulfonat), Cl^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) und Kationen (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^+) mit Hilfe der Ionenchromatographie untersucht (Weiler, 2001). Dies betraf die Kern-Abschnitte 0-8 m, 11-16 m, 23-28 m, 30-35 m und 42-47 m, die mit jeweils etwa 5 cm Probenlänge analysiert worden sind.

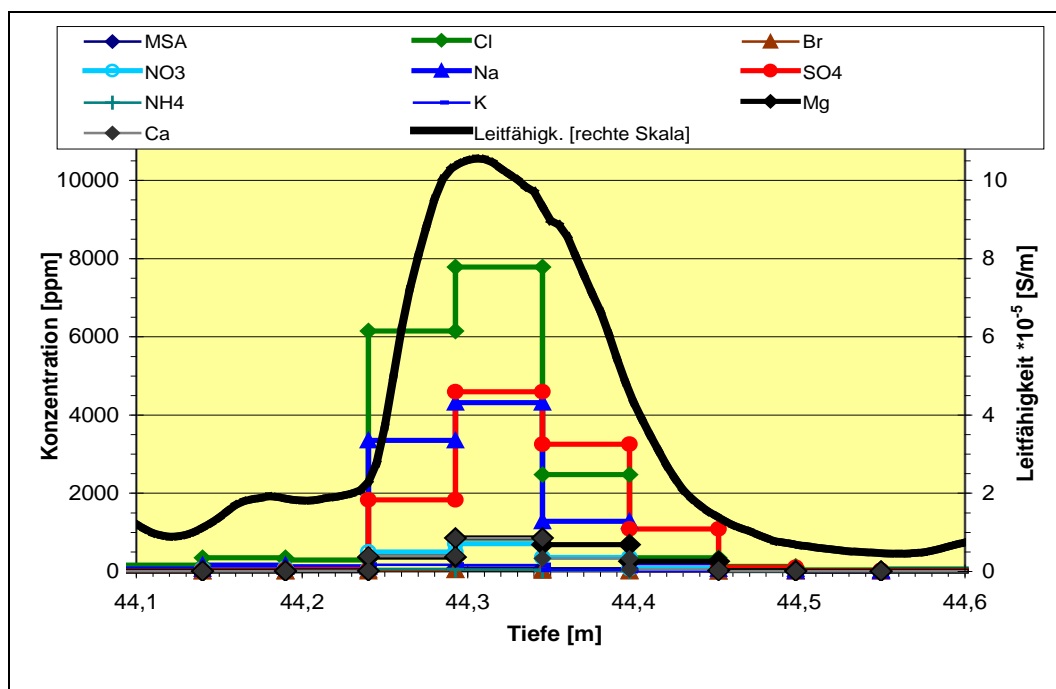


Abb. 16: Konzentration von Hauptionen und elektrische Leitfähigkeit im Tiefenabschnitt 44,1 bis 44,6 m. Die hohe Leitfähigkeit in 44,25 bis 44,45 m Tiefe wird durch erhöhte Gehalte aller untersuchten Hauptionen erklärt. Als deren Quelle wird der Ausbruch des Katmai von 1912 angenommen (vgl. auch Abb. 7).

Abb. 16 zeigt den Konzentrationsverlauf einiger der bestimmten Hauptionen. Am Beispiel des Tiefenabschnittes 44,1 bis 44,6 m. Die in diesem Abschnitt gemessene erhöhte elektrische Leitfähigkeit hat offensichtlich chemische Ursachen. Der hohe Sulfatanteil deutet auf ein Vulkanereignis als Quelle erhöhter Ionenkonzentration. Auch Cl^- und Na^+ sind erhöht, was

bei Vulkanausbrüchen vorkommt, wie in-situ Messungen von Aerosolen der Eruption des Hekla (Island) vom Februar 2000 zeigen (Pieri et al, 2002).

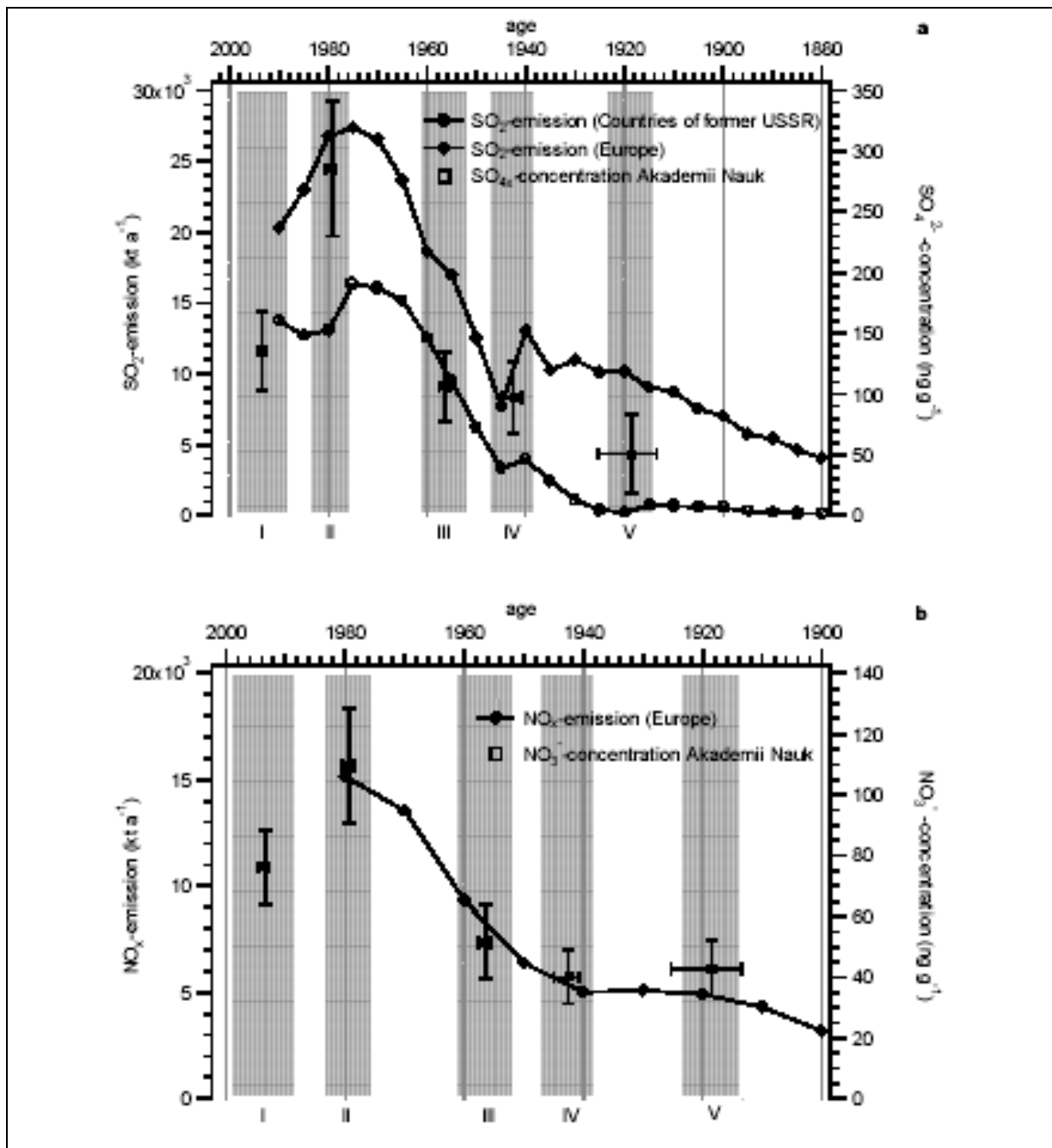


Abb. 17: Vergleich der auf Akademii Nauk deponierten Sulfat- (a) und Nitrat-Konzentrationen (b) mit der Emissionsstärke verschiedener Quellgebiete (aus Weiler et al., 2003)

Aus den Analysedaten von NO_3^- und SO_4^{2-} in den genannten Tiefenintervallen lassen sich langfristige Variationen feststellen, deren Ursachen offensichtlich anthropogen sind, da sie mit den entsprechenden Emissionsraten korrespondieren (Abb. 17).

2. voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der über das Projekt hinaus reichende Nutzen der für Akademii Nauk gewonnenen Ergebnisse besteht in:

- verlässlich datierten Klimaproxies ($\delta^{18}\text{O}$, sommerlicher Wärmeeintrag aus dem Firneis-Anteil) über ca. 1000 Jahre
- der Ableitung von Klimatrends und deren Vergleich mit anderen arktischen Regionen
- dem Nachweis von Vulkansignalen in einem arktischen Gletscher mit erheblichem Anteil an Perkolationsseis
- dem Nachweis der Erhaltung saisonaler Klima-Information, zumindest in Teilen des Eiskerns
- der Bestätigung russischer $\delta^{18}\text{O}$ Daten und ihrer Neudatierung mit einem neuen wesentlich besser gestützten Altersmodell und damit
- der Schaffung einer Klimareferenz des späten Holozäns für Nordsibirien.

Eine Schutzrechts-Verwertung der Ergebnisse des Projektes war nicht angestrebt und ist nicht zu erwarten.

3. während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Projektes wurden von der Universität Kopenhagen Ergebnisse aus einer Eiskernbohrung auf der Hans Tausen Kuppel (Nordgrönland) publiziert (Hammer, 2001). Dies ist für das Projekt von Bedeutung, da die Hans Tausen Eiskuppel, ähnlich wie Akademii Nauk, eine kleinere isolierte Eiskuppel darstellt und sich in der zweiten Hälfte des Holozäns gebildet hat. Die Daten bieten sich damit für den direkten Vergleich und die Herausarbeitung regionaler Unterschiede an.

4. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse nach Nr. 6 BNBest-BMBF 98

Fachlich interessierten Stellen in der Bundesrepublik und im Ausland wurden die Ergebnisse durch die unten aufgeführten Publikation in Fachzeitschriften und durch Vorträge auf Fachkongressen zugänglich gemacht.

Erfolgte begutachtete Publikationen

Savatyugin, L.M.; Arkhipov, S.M.; Vasiliev, N.I.; Vostretsov, R.N.; Fritzsche, D.; Miller, H. [2001]: Rossiysko-germanskie glyatsiologicheskie issledovaniya na Severnoy Zemle i prilegajutschuikh ostrovakh v 2000 g. (Russian-German glaciological studies on Severnaya Zemlya and adjacent islands in 2000) *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*, **91**, 150-162

Dowdeswell, J.A.; Bassford, R.P.; Gorman, M.R.; Williams, M.; Glazovsky, A.F.; Macheret, Y.Y.; Shepherd, A.P.; Vasilenko, Y.V.; Savatyugin, L.M.; Hubberten, H.-W.; Miller, H.

[2002]: Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic, *Journal of Geophysical Research* **107**, B4, doi: 10.1029/2000JB000129, 2002

Fritzsche, D.; Wilhelms, F.; Savatyugin, L. M.; Pinglot, J. F.; Meyer, H.; Hubberten, H.-W.; Miller, H. [2002]: A new deep ice core from Akademii Nauk ice cap, Severnaya Zemlya, Eurasian Arctic: first results. *Annals of Glaciology* **35**, 25-28

- Sonderdrucke dieser Arbeit gingen uns bisher noch nicht zu. Sie werden nach Erhalt nachgereicht.

Pinglot, J. F.; Vaikmäe, R.; Kamiyama, K.; Igarashi, M.; Fritzsche, D.; Wilhelms, F.; Koerner, R.; Henderson, L.; Isaksson, E.; Winther, J.-G.; van de Wal, R.S.W.; Fournier, M.; Bouisset, P.; Meijer, H.A.J. [2003]: Ice cores from Arctic subpolar glaciers: chronology and post depositional processes deduced from radioactivity measurements *Journal of Glaciology*, Paper No.: 02J028 (im Druck)

Weiler, K.; Fischer, H.; Fritzsche, D.; Wilhelms, F.; Miller, H. [2003]: Glaciochemical reconnaissance of a new ice core from Severnaya Zemlya *Journal of Glaciology* (eingereicht)

Diplomarbeit

Weiler, K. [2001]: Eignung eines Eiskerns aus der Sibirischen Arktis (Akademii Nauk-Eiskappe, Severnaya Zemlya) als atmosphärisches Aerosolarchiv. Diplomarbeit am Institut für Physik der Atmosphäre, Fachbereich Physik, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 110+XVII p.

Gehaltene und angemeldete Vorträge außerhalb des eigenen Institutes (chronologisch)

Ruth, U.; Fritzsche, D.; Miller, H.; Savatyugin, L.; Wagenbach, D. [1999]: First Results from Snow Pits and Shallow Ice Cores from the Deep Drilling Project Severnaya Zemlya European Science Foundation Conference 99-115: Polar Regions and Quaternary Climate. Giens, France, September, 17-22, 1999 (Poster).

Fritzsche, D. [1999]: Hochaufgelöste Klimasignale aus einer neuen Eistiefbohrung auf Sewernaja Semlja - Erwartungen und erste Ergebnisse. Eingeladener Vortrag am 3.11.1999 im Seminar der Abteilung Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck, Österreich

Fritzsche, D.; Savatyugin, L.M.; Ruth, U.; Wilhelms, F.; Miller, H.; Hubberten, H.-W. [1999]: A new ice core drilled on Academy of Sciences ice cap, Severnaya Zemlya - first results. Fifth Workshop on Russian-German Cooperation: Laptev Sea System, State Research Center - Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia, November, 25-29, 1999. Abstract in: *Terra Nostra, Alfred-Wegener-Stiftung*, 1999/11, 31

Fritzsche, D.; Savatyugin, L.M.; Wilhelms, F.; Hubberten, H. -W.; Meyer, H.; Miller, H. [2000]: A new Holocene ice core record from Academy of Sciences ice cap, Severnaya Zemlya? Quaternary Environment of the Eurasian North (QUEEN), 4th workshop. Lund, Sweden: European Science Foundation; Quaternary Environment of the Eurasian North

(QUEEN). Lund, Sweden, April, 7-10, 2000. (Poster) Abstract
<http://www.geomar.de/~hbauch/king/html/00abst.html>

Fritzsche, D.; Wilhelms, F.; Savatyugin, L.M.; Pinglot, J.F.; Meyer, H.; Hubberten, H.-W.; Miller, H. [2001]: A new deep ice core from Academy of Sciences ice cap, Severnaya Zemlya – first results. International Symposium on ice cores and climate, Kangerlussuaq, Greenland, August, 19-23, 2001. Abstract in: International Glaciological Society, Int. Symp. on ice cores and climate, 2001, Abstracts, 64

Fritzsche, D.; Wilhelms, F.; Pinglot, J.F.; Meyer, H.; Schütt, R.; Weiler, K.; Savatyugin, L.M.; Miller, H.; Hubberten, H.-W. [2002]: 724-meter deep ice core from Academy of Sciences ice cap (Severnaya Zemlya) – Accumulation rate, preliminary time scaling and data resolution. Climate drivers of the North, Kiel, Germany, May, 8-11, 2002. Abstract in: *Terra Nostra, Alfred-Wegener-Stiftung 2002/3, Climate Drivers of the North*, p. 43

Fritzsche, D.; Schütt, R.; Meyer, H.; Miller, H.; Wilhelms, F. [2003]: 724 m deep ice core from Akademii Nauk ice cap Severnaya Zemlya - electrical conductivity measurements and isotopic record. Workshop on Arctic Glaciology and the MAGICs Annual Meeting of the Working Group, International Arctic Science Committee, Zakopane, Poland, February, 22-26, 2003.

Fritzsche, D.; Schütt, R.; Wilhelms, F.; Meyer, H.; Weiler, K.; Hubberten, H.-W.; Miller, H. [2003]: Holozäne Klimainformationen aus einem Eiskern von Severnaya Zemlya (russische Arktis). 21. Internationale Polartagung, Kiel, 17.-22. März 2003 (als Vortrag angenommen).

Fritzsche, D.; Schütt, R.; Meyer, H.; Miller, H.: 724 m deep ice core from Akademii Nauk ice cap Severnaya Zemlya - electrical conductivity measurements and isotopic record. Recent Approaches in Polar Earth Science. 10th Seoul International Symposium on Polar Science, Seoul, Korea, May, 20-22, 2003 (als Vortrag angemeldet)

5. Weiterführung der mit dem BMBF-Projekt begonnenen Untersuchungen

Die im Rahmen des Projektes konnten Übersichtsdaten über den Eiskern gewonnen werden, aus denen die regionalen Klimatrends ersichtlich sind. Eine analytische Bearbeitung mit hoher zeitlicher Auflösung wurde in einzelnen Kernbereichen begonnen, ist aber noch nicht abgeschlossen. Weiterhin sollen Mineralstoffgehalte, insbesondere in Horizonten hoher elektrischer Leitfähigkeit und im Basalbereich des Kerns näher untersucht werden.

Zur Finanzierung der Fortsetzung der begonnenen Untersuchungen ist im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1158 „Antarktisforschung mit vergleichenden Untersuchungen in arktischen Eisgebieten“ ein Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe bei der DFG gestellt worden (Geschäftszeichen FR 885/2-1 und MI 199/11-1).

Im Bericht zitierte Literatur

- Azuma, N.; Fujii Y.(Eds.) [2002]: Ice Drilling Technology 2000, Proc. of the 5th International Workshop on Ice Drilling Technology, 30 Oct.-1 Nov. 2000, Nagoaka University of Technology, Nagoaka. *Memoirs of Nat. Inst. of Polar Research*, Spec. Iss. 56, 329 p.
- Dansgaard, W.; Johnsen, S.J. [1969]: A flow model and a time scale for the ice core from Camp Century, Greenland. *Journal of Glaciology* **8**, (53), 215-223
- Dansgaard, W.; Johnsen, S.J.; Clausen, H.B.; Dahl-Jensen, D.; Gundestrup, N.S.; Hammer, C.U.; Hvidberg, C.S.; Steffensen, J.P.; Sveinbjörnsdottir, A.E.; Jouzel, J.; Bond, G. [1993]: Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, **364**, 218-220
- Dowdeswell, J.A.; Bassford, R.P.; Gorman, M.R.; Williams, M.; Glazovsky, A.F.; Macheret, Y.Y.; Shepherd, A.P.; Vasilenko, Y.V.; Savatyugin, L.M.; Hubberten, H.-W.; Miller, H. [2002]: Form and flow of the Academy of Sciences Ice Cap, Severnaya Zemlya, Russian High Arctic. *Journal of Geophysical Research* **107**, B4, doi: 10.1029/2000JB000129, 2002
- Fritzsche, D.; Wilhelms, F.; Savatyugin, L.M.; Pinglot, J.F.; Meyer, H.; Hubberten, H.-W.; Miller, H. [2002]: A new deep ice core from Akademii Nauk ice cap, Severnaya Zemlya, Eurasian Arctic: first results. *Annals of Glaciology* **35**, 25-28
- Hammer, C.U. (Ed.) [2001]: The Hans Tausen Ice Cap – Glaciology and Glacial Geology. *Meddelelser om Grønland, Geoscience* **39**, 163 p.
- Klement'ev, O.L.; Korotkov, I.M.; Nikolaev, V.I. [1988]: Glyatsiologicheskiye issledovaniya v 1987-1988 gg. na lednikovakh Severnoy Zemli (Glaciological studies on the ice domes of Severnaya Zemlya in 1987-1988). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issled.*, **63**, 25-26
- Klement'ev, O.L., Potapenko, V. Yu., Savatyugin, L.M., Nikolaev, V.I. [1991]: Studies of internal structure and thermal-hydrodynamic state of the Vavilov Glacier, Archipelago Severnaya Zemlya. In: *Proc. Int. Symp. Glaciers-Ocean-Atmosphere Interactions*, St. Petersburg, September 1990. IAHS Publ., **208**, 49-59.
- Koerner, R.M. [1977]: Devon Island Ice Cap: Core Stratigraphy and Paleoclimate. *Science*, **196** (No.4285), 15-18.
- Koerner, R.M. [1997]: Some comments on climate reconstructions from ice cores drilled in areas of high melt. *Journal of Glaciology*, **43**, 90-97.
- Kotlyakov, V.M.; Zagorodnov, V.S.; Nikolaev, V.I. [1990]: Drilling on ice cap in the Soviet Arctic and on Svalbard and prospects of the ice core treatment. In: Arctic Research. Advances and Prospects. *Proceedings of the Conference of Arctic and Nordic Countries on Coordination of Research in the Arctic*, Leningrad, December 1988, 5-18 (vgl. auch PANGEA-DataSet ID: 57257)
- Kudryashov, B.B.; Vasiliev, N.I.; Talalay, P.G. [1994]: KEMS-112 electromechanical ice core drill. *Memoirs of Nat. Inst. of Polar Research*, Spec. Iss. 49, 138-152

- Kuhn, M. [2001]: Severnaya automatic weather station data (Severnaja Zemlja). Annual Report 2000, partner 07, University of Innsbruck. In: The Response of Arctic Ice Mass to Climate Change (ICEMASS). Modelling, Remote Sensing and Field Measurements. Third Year Report (January-December 2000). European Commission, Framework IV, Environment and Climate Research Programme (DG XII), contract ENV4-CT97-0490. *Department of Physical Geography, University of Oslo*, p7-8 to p7-14.
- Nye, J.F. [1963]: Correction factor for accumulation measured by the thickness of the annual layers in an ice sheet. *Journal of Glaciology*, **4**, 785-788.
- Petit, J.R.; Jouzel, J.; Raynaud, D.; Barkov, N.I.; Barnola, J.-M. and 14 other [1999]: Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, **399**, 429-436
- Pieri, D.; Ma, C.; Simpson, J.J.; Hufford, G.; Grindle, T.; Grove, C. [2002]: Analysis of in-situ airborne volcanic ash from the February 2000 eruption of Hekla Volcano, Iceland. *Geophysical Research Letters*, **29**, No. 16, doi: 10.1029/2000JB000129, 2002
- Pinglot, J. F.; Vaikmäe, R.; Kamiyama, K.; Igarashi, M.; Fritzsche, D.; Wilhelms, F.; Koerner, R.; Henderson, L.; Isaksson, E.; Winther, J.-G.; van de Wal, R.S.W.; Fournier, M.; Bouisset, P.; Meijer, H.A.J. [2003]: Ice cores from Arctic subpolar glaciers: chronology and post depositional processes deduced from radioactivity measurements. *Journal of Glaciology*, Paper No.: 02J028 (im Druck)
- Savatyugin, A.M.; Zagorodnov, V.S. [1988]: Glyatsiologicheskiye issledovaniya na lednikovom kupole Akademii Nauk (Glaciological studies on the Academy of Sciences ice cap). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*, **61**, 228.
- Savatyugin, L.M.; Arkhipov, S.M.; Vasiliev, N.I.; Vostretsov, R.N.; Fritzsche, D.; Miller, H. [2001]: Rossiysko-germanskije glyatsiologicheskie issledovaniya na Severnoy Zemle i priliegajuschikh ostrovakh v 2000 g. (Russian-German glaciological studies on Severnaya Zemlya and adjacent islands in 2000). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*, **91**, 150-162
- Simkin, T. ; Siebert, L. [1994]: Volcanoes of the world. 2. Ed.. Smithsonian Institution, Washington, 349 p.
- Talalay, P.G.; Gundestrup, N.S. [2002]: Hole fluids for deep ice core drilling. *Memoirs of Nat. Inst. of Polar Research*, Spec. Iss. 56, 148-170
- Vasiliev, N.I.; Kudryashov, B.B.; Talalay, P.G. [1995]: Rezul'taty ispytaniy elektromekhanicheskogo snaryada KEMS-112 na stantsii Vostok, Vostotschnaya Antarktida (Results of drilling performed by electro-mechanical drill KEMS-112 at Vostok station, East Antarctica). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*, **79**, 171-174
- Watanabe, O. (Ed.) [1994] : Ice Drilling Technology, Proc. of the 4th International Workshop on Ice Drilling Technology, Tokyo, April, 20-23 1993. *Memoirs of Nat. Inst. of Polar Research*, Spec. Iss. 49, 407 p.

Weiler, K. [2001]: Eignung eines Eiskerns aus der Sibirischen Arktis (Akademii Nauk-Eiskappe, Severnaya Zemlya) als atmosphärisches Aerosolarchiv. Diplomarbeit am Institut für Physik der Atmosphäre, Fachbereich Physik, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 110+XVII p.

Weiler, K.; Fischer, H.; Fritzsche, D.; Wilhelms, F.; Miller, H. [2003]: Glaciochemical reconnaissance of a new ice core from Severnaya Zemlya *Journal of Glaciology* (eingereicht)

Zagorodnov, V.S.; Klement'yev, O.L.; Nikiforov, N.N.; Nikolayev, V.I.; Savatyugin, L.M.; Sasunkevich, V.A. [1990]: Hidrotermicheskiy rezhim i l'doobrazovaniye v tsentral'noy chasti lednika Akademii Nauk na Severnoy Zemle. (Hydrothermal regime and ice formation in the central part of the Akademiya Nauk glacier, Severnaya Zemlya). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*, **70**, 36-43