

Gierloff-Emden · Das Eis des Meeres

H.-G. Gierloff-Emden

Das Eis des Meeres



Walter de Gruyter · Berlin · New York 1982

Autor

Prof. Dr. rer. nat. Hans-Günter GIERLOFF-EMDEN
Lehrstuhl für Geographie und
Geographische Fernerkundung
Institut für Geographie der
Ludwig-Maximilians-Universität München
Luisenstraße 37
8000 München 2

Titel

Das Eis des Meeres

Nachdruck aus: Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, Band 5, Teil 2:
Geographie des Meeres · Ozeane und Küsten, Kapitel 8
„Meereis“
ergänzt durch einen Nachtrag, Abbildungen, Literatur

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

| |
|---|
| <p>Gierloff-Emden, Hans-Günter: Das Eis des Meeres : Phänomene, Genese, Morphologie / H.-G. Gierloff-Emden. - Nachdr. - Berlin ; New York : de Gruyter, 1982. ISBN 3-11-007281-5</p> |
|---|

Copyright © 1982 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung, J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung, Georg Reimer, Karl J. Trübner, Veit & Comp., Berlin 30. Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Photokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Printed in Germany.
Satz und Druck: Kupijai & Prochnow, Berlin. - Bindearbeiten: Mikolaj, Berlin.

Vorwort

Das Buch *Das Eis des Meeres* soll dem aktuellen Informationsbedarf zu diesem Thema begegnen. Im Zusammenhang mit der wiederaufgenommenen Aktivität der deutschen Polarforschung wurde auch in der Meeresforschung der Schritt zum Anschluß an internationale Arbeit und Programme für polare Regionen aufgenommen.

Die Bundesrepublik Deutschland trat 1978 dem internationalen „Scientific Committee on Antarctic Research“ (SCAR) bei. Forschungsreisen wurden seit 1975/76 von verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen, vornehmlich in antarktischen Gewässern, unternommen. Seit 1979/80 ist der Aufbau von zwei festen Stationen in der Antarktis im Gange: Auf dem Ronne-Eisschelf (Alfred-Wegener-Station) und an der Atka-Bucht (Georg-von-Neumayer-Station). Ein eigenes großes Forschungs- und Versorgungsschiff für Polargewässer befindet sich im Bau. Die Forschungsarbeiten werden u. a. gefördert vom Bundesministerium für Forschung und Technologie und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Die Gründung des „Alfred-Wegener-Institutes für Polarforschung“ erfolgte 1980 (Standort Bremerhaven).

Alle Forschungen, ob zur Geophysik, Geologie, Geographie, Meteorologie, Ozeanographie, Biologie u. a., haben es auch mit dem Eis des Meeres zu tun, sei es als Forschungsgegenstand oder als Phänomen, dem man auf der Reise zum Forschungsgebiet begegnet. Die Passagen durch das Nordpolarmeer für diverse Frachten (Sektor UdSSR) und Öl (Sektoren Kanada und USA) werden in steigendem Maße befahren. Die Eislage der Polarmeere wird durch Satelliten global überwacht. Die Polarmeere sind sogar Ziele des Ferntourismus geworden. Da in deutscher Sprache bisher kein spezielles Buch zum Thema *Eis des Meeres* vorliegt, soll diese Zusammenfassung ein erster Schritt zur Vorstellung und Verbreitung der Kenntnisse vom Eis des Meeres sein. Es soll besonders der Vermittlung von Kenntnissen in geographischen und anderen geowissenschaftlichen Lehrveranstaltungen, Vorlesungen und Seminaren dienen.

Der Verfasser studierte in Hamburg Geographie und Ozeanographie. Seine Lehrer zum Thema Meere waren in Hamburg die Professoren L. Mecking und F. Nusser. Eigene Erfahrungen konnte er als Marineoffizier und mit Hilfe von Flügen mit der NASA in der Polarregion gewinnen.

Der Inhalt des Buches wurde dem Band *Geographie des Meeres**, Kapitel 8, *Meereis*, entnommen und durch Nachträge ergänzt. Für zugehörige Probleme zu diesem Thema sei auf andere Kapitel dieses Werkes verwiesen.

H. G. Gierloff-Emden

München, April 1982

* Lehrbuch der Allgemeinen Geographie, Band 5

H. G. Gierloff-Emden

Geographie des Meeres

Ozeane und Küsten

Walter de Gruyter, Berlin · New York 1980

Inhalt

| | |
|---|-----|
| 8. Meereis | 767 |
| Phänomene, Genese und Morphologie | 767 |
| Zur Erforschung des Meereises | 769 |
| Das Meereis als komplexe Erscheinung | 771 |
| Das Meereis als Substrat | 773 |
| Eisbildung und Gefriervorgänge | 774 |
| Eisbildung auf dem Meere und Struktur der Meereisdecke | 778 |
| Eisnomenklatur | 788 |
| Formen des Meereises und Definitionen (Klassifikation) | 790 |
| Eisbildungsphänomene an der oberen Grenzschicht des Meeres | 794 |
| Schiffsvereisung, eine Erscheinung der Grenzschicht Hydrosphäre – Atmosphäre (Ozean – Luft) | 795 |
| Meereis an Küsten | 798 |
| Eisbildung am Strand | 800 |
| Eis und Eisbildung auf Watten | 802 |
| Eisbildung an Steilküsten | 805 |
| Das Meereis des Nordpolarmeeres und seiner Randmeere | 807 |
| Zur Erforschung des Nordpolarmeeres und des polaren Meereises | 811 |
| Nansen's Drift mit der „Fram“ im Nordpolarmeer | 813 |
| Die Driftbewegungen des arktischen Meereises des Nordpolarmeeres mit seinen Randmeeren | 819 |
| Die Dynamik des Meereises im Nordpolarmeer nach Drifteis-Stationen | 823 |
| Die jahreszeitliche Schwankung der Eisbedeckung des Nordpolarmeeres | 828 |
| Form des Meeresbodens des Nordpolarmeeres | 830 |
| Bilanz und Wassermassenaustausch des Nordpolarmeeres mit dem Atlantischen und Pazifischen Ozean | 832 |
| Die Vereisung des Nordpolarmeeres und seiner Randmeere in ihrem Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt | 833 |
| Anthropogene Eingriffe und Projekte zur Veränderung der polaren Umwelt | 835 |
| Eis des Meeres als Hindernis für den Seeverkehr | 836 |
| Das Eis als besondere Grenzschicht des Meeres für die Schifffahrt | 837 |
| Die Nordostpassage, arktischer Seeweg zwischen Atlantischem und Pazifischem Ozean innerhalb des eurasischen Kontinents: der sibirische Seeweg | 842 |
| Der sibirische Seeweg | 843 |
| Die Nordwestpassage – arktische Seeverbindung zwischen Atlantischem und Pazifischem Ozean um den nordamerikanischen Kontinent | 851 |

VIII Inhalt

| | |
|---|-----|
| Erdöl in den Randmeeren des Nordpolarmeeres: Transportproblem und Ausbeute | 854 |
| Umweltbedingungen und Nutzung der arktischen Region | 856 |
| Meereis im Nordatlantischen Ozean und Nebenmeeren | 859 |
| Eisberge im Nordatlantischen Ozean und Eis um Grönland | 859 |
| Eiserkundung mit Luft- und Satellitenbildern | 871 |
| Die Vereisung der Ostsee | 872 |
| Zur Vereisung von Nebenmeeren in Nordamerika | 882 |
| Das Meereis im Jahreshaushalt | 884 |
| Wirkung und Mechanismus von Flußsystemen auf Wasser und Eis des Nordpolarmeeres | 886 |
| Eisbedeckung des Nordpolarmeeres und Klimaschwankungen | 891 |
| Das Meereis der Antarktis | 895 |
| Zur Erforschung des Meereises um die Antarktis | 897 |
| Die Eisschelfe: Größe, Form, Entstehung, Haushalt | 899 |
| Eisberge der Antarktis | 902 |
| Packeis der antarktischen Meeresregionen | 904 |
| Eisgrenzen und Wassermassen des Südpolarmeeres | 906 |
| Das Meereis, besonders der Antarktis, als klimatischer Faktor | 908 |
| Die Polkappen der Erde im Satellitenbild | 909 |

Nachtrag (Ergänzung)

| | |
|---|-----|
| Mehrjährige Variation der antarktischen Meereisbedeckung (Südpolarregion) | 911 |
| Antarktischer Meereisaufbruch im Satellitenbild | 912 |
| Die Eiskappe der Antarktis | 913 |
| Der Meeresboden des Südpolarmeeres in bathymetrischen Profilen | 914 |
| Rechtsverhältnisse der Antarktis und des südlichen Polarmeeres | 917 |
| Zur gegenwärtigen Polarforschung der BRD | 918 |
| Polarexpeditionen der BRD | 918 |
| Zu den Rechtsverhältnissen im Nordpolarmeer | 920 |
| Das Polarmeer in morphographischer Darstellung | 921 |
| Dynamik von Packeisfeldern (Ergänzung) | 922 |
| Literatur | 923 |
| Institutionen zur Polarforschung | 933 |
| Eisschlüssel und Eissymbole | 934 |
| Sachregister | 937 |

8. Meereis

Phänomene, Genese und Morphologie

Meereis ist eine Erscheinung der oberen Grenzfläche des Meeres bzw. der Grenzschicht zwischen Hydrosphäre und Atmosphäre. Es entsteht durch Wechselwirkung der Medien Luft und Wasser. Es sind bis zu 7 % des Weltmeeres von Meereis bedeckt. Zur Hydrosphäre des Meeres gehört ein Teil der Kryosphäre (Eis-Sphäre).

In der praktischen Bedeutung standen die Belange der Schifffahrt und Fischerei an erster Stelle der Meereisforschung. In der ozeanographischen und geographischen Wissenschaft waren regionale Aspekte vorhanden und zwar in besonderem Zusammenhang mit der Entdeckung und Erforschung der großen Eisregionen der Erde, den Polargebieten. Seit Mitte des 20. Jh. ist das Meereis in besonderem Maße Gegenstand der Forschung der geophysikalischen Disziplin geworden, sowohl in hydrographischer als in meteorologisch-klimatologischer Betrachtung (das erste Internationale Polarjahr fand 1882–83 statt). Im Jahre 1957–58 wurde das Internationale Geophysikalische Jahr, anschließend „Dekade“ veranstaltet.

Seit der Mitte des 20. Jh. sind außerdem einige Ereignisse und technische Innovationen hinzugekommen, durch welche die Meereisforschung sehr intensiviert wurde, z. B. die Entwicklung der Flugzeuge zur Überquerung der Polarroute (seit 1955) zwischen Europa, Nordamerika und Japan, die Entwicklung moderner Waffensysteme wie Atom-U-Boote, die unter dem Eis des Nordpolarmeeres fahren, die Entwicklung von Raketen, deren Reichweite die Überquerung des Nordpolarmeeres, das zentral zwischen Asien und Nordamerika liegt, ermöglichen, die Intensivierung von Schifffahrtsrouten im Nordpolarmeer, des sibirischen und amerikanischen Seeweges, die Intensivierung von Schifffahrtsrouten in winterlich vereisten Nebenmeeren wie Ostsee und St.-Lorenz-Golf, die allgemeine Nahrungssuche und Ausweitung der Fischerei am Rande vereister Seegebiete, die Suche nach Rohstoffen auf den Kontinentalschelfen mit der Entwicklung der Offshore-Bohrtechnik, die Intensivierung der Meteorologischen Dienste zur Wettervorhersage mit der Entwicklung von Satelliten, mit deren Hilfe großräumige Wetterkarten der Polarregion hergestellt werden, und schließlich die Entwicklung der Grundlagenforschung zu Meereis. Das Nordpolarmeer ist mit der technischen Innovation überschaubarer, „kleiner“ geworden. Die Entfernungen zwischen den Küsten Nordamerikas und Asiens betragen über den Pol nur um 3000 bis 4000 km.

Die hydrographischen Institute der Nationen hatten Eisdienste für die für ihre Schifffahrt und Fischerei interessanten Meeresareale eingerichtet. Der erste dänische Eisjahresbericht erschien 1897. Nach der Schiffskatastrophe der „Titanic“ wurde ein regelmäßiger Eiswarndienst für die Nordatlantikschiifffahrt eingerichtet. Vgl. Kap. Eisberge.

Das ist eine Reihe von Aspekten, die auch geographische Probleme betreffen wie sie u. a. in übergreifenden Themen zum Ausdruck kommen, z. B. im Rahmen der Tagung der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung, 4. Internationale Polartagung in München, 1973, „Die Eisgebiete der Erde in ihrer klimatischen und ökologischen Bedeutung“. In einigen modernen Büchern zur Ozeanographie ist diese Problematik meist nur sehr kurz behandelt, z. B. in der „Allgemeinen Meereskunde“, 3. Aufl., Dietrich, Kalle, Krauss, Siedler [1975] als kleineres Kapitel: „Eis im Weltmeer“ auf nur neun Seiten. (Bei Krümmel gab es ein größeres Kapitel, bei Bruns ein umfangreiches unter Betonung von Eisklassifikation und Meßmethoden, bei Scharnow eines unter Betonung der Belange der Ostsee-Schiffahrt.) Diese Feststellung soll keine Kritik bedeuten, jedoch die Notwendigkeit einer ausführlicheren Behandlung stützen. Für die polaren Räume mit ihren Ozeanen gelten besondere Rechtsverhältnisse. Sowohl im Nordpolarmeer als auch auf dem antarktischen Kontinent mit seinen Küsten wurde das „Sektorenprinzip“ eingeführt, wonach Anliegernationalen (Antarktis auch andere) von ihren Küsten aus den Sektor bis zum Pol als Hoheitsgebiet beanspruchen. Da der kanadische Arktische Archipel 1930 noch nicht völlig bekannt und kartiert war, gab es vor dieser Zeit noch Auseinandersetzungen um einzelne Inseln mit den USA.

H. P. Kosack [1967]: Die Polarforschung. P. D. Baird [1964]: The Polar World. A. G. Shalowitz [1962]: Shore and Sea Boundaries. L. Breitfuß [1939]: Arktis. L. Breitfuß [1950]: Erforschung der Polargebiete 1932 bis 1947. R. V. A. Thorén [1964]. D. Mountfield [1974]: A History of Polar Exploration.

Das Meereis kommt permanent in den polaren Regionen des Weltmeeres vor. Die polaren Regionen des Weltmeeres sind den drei großen Ozeanen zugehörig. Die Umgrenzung und Namengebung der einzelnen Meere und Seen wird auf speziellen Karten dargestellt. In der deutschen Sprache sind die übergreifenden Bezeichnungen: „Nordpolarmeer“ und, mit den Zusätzen vorangestellt: Atlantisches, Indisches, Pazifisches „Südpolarmeer“ geläufig. Die Bezeichnungen Arktischer und Antarktischer Ozean sind häufig im Sprachgebrauch, jedoch nicht im Sinne der ozeanographischen-geographischen eindeutigen Benennung benutzt.

„1845 wurde in London von einer Kommission der Royal Geographical Society beschlossen (veröffentlicht 1893, Geogr. J. 1, 535 ‚Nomenclature of the Oceans‘), einen selbständigen antarktischen und arktischen Ozean anzunehmen, jeweils durch die Polarkreise zum Äquator hin begrenzt. Während das Nordpolarmeer bald allgemein als Nebenmeer des Atlantischen Ozeans bezeichnet wurde, kam man nur in der deutschen Literatur aus Gründen, die von A. Penck [1894] und O. Krümmel [1907] dargelegt worden sind, dazu, den antarktischen Ozean als Teilgebiete den drei Ozeanen anzugliedern (u. a. Wüst [1936]). Auch weist G. Wüst [1939] darauf hin, daß der Auffassung des Internationalen Hydrographischen Bureaus [1937] eines selbständigen vierten Ozeans nicht beigeplichtet werden kann. 1950 hat das Internationale Hydrographische Bureau sich dieser Auffassung angeschlossen.“

G. Koopmann [1953] Entstehung und Verbreitung von Divergenzen in der oberflächennahen Wasserbewegung der antarktischen Gewässer, DHZ ErgH. 2 S. 6.

Zur Erforschung des Meereises

Die analytische Erforschung des Meereises kann mit der Arbeit von J. Stefan [1891] angesetzt werden: „Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere“. Wegweisend waren die Arbeiten von F. Nansen [1893–96] mit der Drift der „Fram“. An der Forschung zum Meereis waren zahlreiche deutsche Geographen beteiligt, eine Entwicklung, die seit E. v. Drygalski verstärkt einsetzte. E. v. Drygalski [1898]: Die Aufgaben der Forschung am Nordpol und Südpol. Ders. [1904]: Zum Kontinent des eisigen Südens. Deutsche Südpolarexpedition 1901–1903. Vgl. Kap. Meeresforschung. F. Malmgren [1927] brachte nach seiner Teilnahme an der norwegischen Expedition mit der „Maud“, 1918–1925, eine bedeutende Arbeit heraus: „On the Properties of Sea-Ice“, in der er Thermodynamik (Wärmeleitung und Eisbildung), Mechanik (Dichte) und Chemie (Salzgehalt) des Meereises behandelte. Über geophysikalische Messungen zum Meereis und Eisbeobachtungen gibt es ein Kapitel von Seite 281–343, bei E. Bruns [1962]: „Ozeanologie“, Bd. 2. Eine übersichtliche Zusammenfassung zur Geophysik des Eises ist von E. R. Ponder 1965 erschienen: „The Physics of Ice“. Und: A. Defant [1961]: Physical Oceanography, Bd. II. Der enorme Ausbau moderner Forschung zu Meereis und zu glaziologischen Problemen wird z. B. durch die zahlreichen Bände der International Association of Scientific Hydrology dokumentiert.

Zu den klassischen Forschungsarbeiten zu Meereis mit Expeditionen über das Eis zu Fuß und mit Schiffen in die eisbedeckten Gebiete der Meere und Ballonaufstiegen und Luftschiffen kamen die modernen Methoden mit Unterseebootfahrten unter dem Eis und mit Flugzeug und vor allem Satelliten, die mit den verschiedenen Meßgeräten der Fernerkundung (Remote Sensing) ausgerüstet sind. Vor allem hat zur Verbreitung des Meereises in der Arktis und Antarktis und auch in Nebenmeeren der Einsatz von Satelliten mit den verschiedenen optischen und elektrischen Aufnahmesystemen grundlegende neue Erkenntnisse über das Meereis erbracht. Während vor Beginn des „Geophysikalischen Jahrzehnts“ im Jahre 1957 immer noch relativ wenig über die Verbreitung der großen Meereisareale und ihre Dynamik bekannt war, ist erst mit der Nutzbarkeit von synoptischen Aufnahmen, die mit Aufnahmesystemen der Satelliten seit den 60er Jahren gewonnen werden konnten, eine entscheidende neue Phase in der Meereisforschung erreicht worden. Bis dahin war über das Meereis im Vergleich zu dem Festeis auf den Kontinenten relativ wenig bekannt.

S. Schneider [1975]: Luftbild und Luftbilddauswertung, LAG, Walter de Gruyter & Co.
 H. G. Gierloff-Emden u. H. Schroeder-Lanz [1970/71]: Luftbilddauswertung, Bd. 1–3. J. Bodechtel u. H. G. Gierloff-Emden [1975]: Weltraumbilder, die dritte Entdeckung der Erde.
 H. G. Gierloff-Emden [1961]: Luftbild und Küste im deutschen Nordseeraum. W. J. Campbell, W. F. Weeks, R. O. Ramseier u. P. Gloersen [1975]: Geophysical Studies of Floating Ice by Remote Sensing. P. Gloersen u. V. V. Salomonson [1975]: Satellites — New Global Observing Techniques for Ice and Snow.

Die Anwendbarkeit von Satellitenaufnahmen erwies sich in der Ozeanographie für das Meereis als optimal, da es sich um ein flächenhaftes Objekt großer Ausdehnung handelt. Der Einsatz erfolgte vom Stadium der Forschung zum operationellen Stadium rasch: schon wenige Jahre nach ersten Versuchen gab es Meereiskarten nach Satellitenaufnahmen, von den Eisdiensten herausgegeben. Entsprechend den Anforderungen der Schifffahrt waren bis zu den 60er Jahren des 20. Jh. die Erkundung der kurzfristigen (täglichen) Eisränder und der längerfristigen jahreszeitlich wechselnden Ränder vereister Meeresareale (der Eisgrenzen) und die Art des Meereises in Arealen dichter Schifffahrt (Nebenmeere wie Ostsee und St. Lorenz-Bucht) sowie Gefährdung von Schifffahrtswegen durch treibende Eisberge im Vordergrund des Interesses.

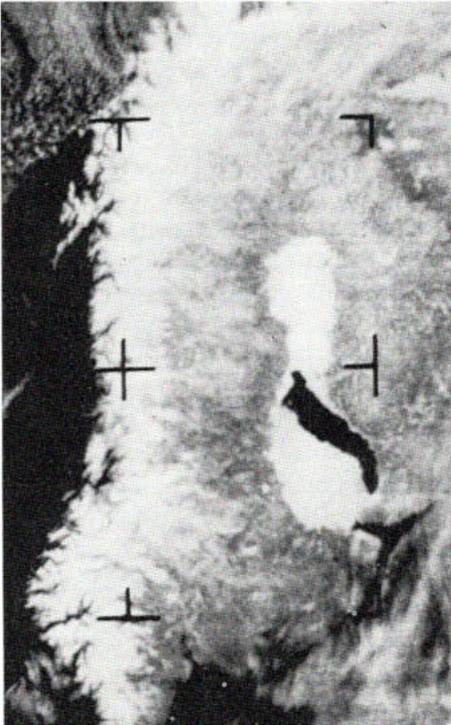


Abb. 8.1

Erforschung des Eises, hier der Eisausbreitung, mit Hilfe von Satellitenbildern

Satellitenbild von ESSA-2 (Environmental Survey Satellite) mit Fernsehzeilenbildaufnahme. Aufnahmehöhe: 1450 km, Datum: 12. 4. 1966, Zeit: 09.17 Uhr. Empfang und Übertragung als Photo: H. Kaminski, Sternwarte der Stadt Bochum. Originalmaßstab etwa 1 : 20 Mill., vorliegende Abb. annähernd in diesem Maßstab.

Region: Skandinavien mit Norwegischer See und Ostsee.

Interpretationsobjekt: Ostsee, Bottnischer Meerbusen, Eislage.

Vereiste Fläche: weiß, offenes Wasser: schwarz. Der Umriss der freien Wasseroberfläche ist sehr ähnlich von solchen anderer Jahre, z. B. Aufnahme Nimbus IV Satellit vom 13. August 1970

Die Aufnahmen von Landsat haben eine wesentlich bessere Auflösung, ihre Reptitionsrate ist jedoch größer

Die Suche nach Erdöl und anderen Bodenschätzen in den Schelfgebieten des Nordpolarmeeres führte zur Intensivierung der Meereisforschung gerade zu der Zeit, als die Innovation der Satellitenbildaufnahmen eintrat.

K. Strübing [1970]: Satellitenbild und Meereiserkundung. M. Ostheider [1975]: Möglichkeiten der Erkennung und Erfassung von Meereis mit Hilfe von Satellitenbildern (NOAA-2 VHRR). Seit 1978 werden mit dem SAR (Synthetic Apertur Radar) vom Satelliten Seasat vom Tageslicht unabhängige Aufnahmen des Meereises genommen. Seasat hat eine Reptitionsrate von 14 Tagen.

Wissenschaftliches Arktis-Forschungsinstitut der UdSSR [1955]: Über neue sowjetische Forschungen und Entdeckungen in der Zentralarktis. A. F. Treshnikow (Ed.) [1973]: Problems of the Arctic and Antarctic.

Das Meereis als komplexe Erscheinung

Eine wissenschaftliche Behandlung des Meereises kann nach den verschiedenen Kategorien der Phänomene und Prozesse mit ihren meßbaren Parametern, welche das Meereis als Merkmale aufweist, erfolgen:

Eigenschaften des Substrates Meereis

physikalische und chemische mit meßbaren Parametern wie Temperatur, Salzgehalt, Dichte, Festigkeit, Farbe,

morphologische mit meßbaren Parametern wie vertikale Ausdehnung, Dicke (Mächtigkeit), Oberflächenform, z. B. einer Eisscholle oder eines Eisberges,

genetische, erkennbar an Schichtung mit meßbaren Parametern Salzgehalt, Temperatur, Kristallstruktur, Farbe, und erkennbar an Form und Größe von Eisschollen, mit meßbaren Parametern Dicke und Salzgehalt,

nautische wie räumliche Verteilung der Eisarten (nach Parametern der Passierbarkeit des Eises durch Schiffe bestimmter Größe und Bauart),

dynamische, Bewegung des Eises, nach meßbaren Parametern Richtung und Geschwindigkeit, unter Berücksichtigung der Maßstabskategorien z. B. Rotation einer Scholle: kleiner und mittlerer Maßstab, Drift von Packeisfeldern: großer Maßstab,

geographische, besondere Form und Bewegung des Eises, regional zu unterscheiden nach Ozeanen und Meeren.

Entsprechend der komplexen Erscheinung des Meereises gibt es zahlreiche Klassifikationsschemata und Terminologien. Die Klassifikationen und Terminologien der Eisdienste verschiedener Nationen sind, zweckentsprechend wie sie auf den verschiedenen regionalen Eiskarten erscheinen, unterschiedlich. Als umfangreichste Terminologie und Klassifikation sei hier genannt:

W.M.O. Classification (World Meteorological Organization), W.M.O. Sea-Ice Nomenclature, Terminology, Codes and illustrated Glossary, Ed. 1970, Geneva, W.M.O. No 259. PP. 145. Für den Eisdienst in der Ostsee sei auf die Klassifikation zur Karte „Eisbericht“ des DHI hingewiesen.

Oceanographic Atlas of the Polar Seas, Teil I u. II [1958], US Hydrographic Office, Washington.

Größenskalen von Phänomenen des Meereises in zeitlicher und räumlicher Dimension

| ① | MIKROSKALA | | Über-gangsbereich | MESOSKALA | | Über-gangsbereich | MAKROSKALA | | |
|--|--|------|-------------------|--|------|-------------------|------------|--|---------|
| Größenordnung | 10 ⁻⁴ m | 10 m | | 100 m | 5 km | 50 km | | 100 km | 1000 km |
| wichtigstes Merkmal | individuelle innere Eisstruktur | | | Zusammenspiel von Schollen, Rinnen, Preßeisrücken, | | | | Verhalten des Treibeises als Ganzes | |
| EIS-PARAMETER | chemische Zusammensetzung, Salzkristallbildung, Zerfallmechanismus, Eisrisse | | | Oberflächen- Topographie, ausgedehnte Schmelzwässer, Ausdehnung der Schneedecke, kleinere Öffnungen im Eis, Treibeis, Konz., Festeis, Eiseinseln, Flächenverteilung von Eisdicke / -alter, Anordnung, Eisrand, | | | | große Öffnungen im Eis, Eisrand, Anordnung, großräumige Zirkulation, | |
| BEOBACHTUNGS-ORT | Boden | | | Flugzeug | | | | Satellit | |
| ERFORDERLICHE BODEN-AUFLÖSUNG | 2 m | | | 20 m | | 10 km | | 20 km | 200 km |
| <p style="text-align: center;">----- Luftbild ----- ERTS ----- 180 km ----- VHRR -----</p> | | | | | | | | | |

| ② | MIKROSKALA | | Über-gangsbereich | MESOSKALA | | Über-gangsbereich | MAKROSKALA | | |
|--|---|------|-------------------|---|--|-------------------|-------------|---|------|
| Zeitablauf | kurzfristig | | | mittelfristig | | | langfristig | | |
| Zeitintervall (erforderliche Zeit-Auflösung) | Sek., Min. | Std. | | Tag | | Woche | | Monat | Jahr |
| zeitvariable EISPARAMETER | Bildung von Rissen, Überoinanderschieben des Eises, Schneedecke | | | Änderung der Konzentration, Anordnung, größere Öffnungen im Eis, Topographie, Schmelzwässer | | | | Entstehung und Abbau von Eis, mittlere Eisrandlage, Festeis- Landlösung, Grenze für extreme Ausdehnung, | |
| <p style="text-align: center;">----- ERTS (bedingt) ----- VHRR ----- ERTS -----</p> <p style="text-align: center;">(Flugzeug nur bedingt verwendbar)</p> | | | | | | | | | |

① Größenskalenklassifikation der Meereisparameter ② Zeit- Skalenklassifikation der Meereisparameter

Abb. 8.2

Klassifikation von Meereis nach der Größenskala und seiner Dynamik nach der Zeitskala in bezug auf Fernerkundungssysteme (Remote Sensing)

Gez. nach: M. Ostheider [1975] Möglichkeiten der Erkennung und Erfassung von Meereis mit Hilfe von Satellitenbildern (NOAA-2 VHRR), in: Münchener Geographische Abhandlungen, Bd. 18, Dissertation, ausgeführt beim Lehrstuhl Gierloff-Emden, Abteilung Fernerkundung. Skalen unter Benutzung der Quellen von W. F. Weeks, W. D. Hibler, S. F. Ackley [1973] Sea Ice, Scales, Problems and Requirements.

In der Natur kommen Phänomene des Meereises in verschiedenen Ausmaßen metrischer Dimension und Prozesse der Eisdynamik in verschiedenen Intervallen zeitlicher Dimension vor. Die Klassifikation solcher Größenskalen kann erfolgen entsprechend festgelegter Maschennetze von Gitterpunktabständen nach:

- Entfernungen von Beobachtungsstationen in einer Region,
- natürlichen Phänomenen, entsprechend gewählte Stufen,
- abstrakt gewählten Stufen nach Meßsystemen,
- Erkennbarkeitsgrenzen von Objekten mit Fernerkundungssystemen, Bodenauflösung von Luft- und Satellitenbildern.

Das Meereis als Substrat

Als Eis wird der feste Aggregatzustand des Wassers bezeichnet, d. h. seine Erstarrungsphase, die durch Gefrieren aus der flüssigen Phase entsteht. Als Meereis wird Eis bezeichnet, das aus dem Meerwasser durch Gefriervorgänge entstanden ist. Die Eisarten ergeben sich aus den chemischen Beimengungen des Wassers: Man unterscheidet reines Eis, Frischwasser-Eis, Brackwasser-Eis und Meereis nach dem Salzgehalt. Ab 24,7 ‰ Salzgehalt wird salziges Wasser als Meerwasser bezeichnet und das daraus gebildete Eis als Meereis. Dieser Wert stellt den Kreuzungspunkt der Funktion von Temperatur des Dichtemaximums und Temperatur des Gefrierpunktes dar. Jedoch wird auch das Eis nicht sehr salzhaltiger Meere wie das der Ostsee als Meereis bezeichnet, also nach der Entstehung in einem Meeresraum.

Das Meereis ist ein aus drei Komponenten bestehendes komplexes Gebilde aus 1. der festen Komponente, harten Kristallen des Salz- und Süßwassereises, 2. der flüssigen Komponente, Salzlake und 3. gasförmiger Komponente, sehr kleinen Luftbläschen. Die harte Komponente wird durch poröse Skelette aus Eiskristallen gebildet, deren Zwischenräume voneinander mit Salzlake und Luftbläschen gefüllt sind. Zu den physikalischen und chemischen Eigenschaften des Meereises zählen u. a.: Dichte, Temperatur, thermale Ausdehnung, Salzgehalt, insgesamt eine Vielzahl von Merkmalen, die in komplexer Weise miteinander verknüpft sind und funktional voneinander abhängig sind. Die mechanischen Eigenschaften des Meereises sind durch die physikalisch-chemischen bestimmt und bedingen sein Verhalten bei Verformungen wie Stauchung, Biegung, Scherung, Dehnung. Das sind Eigenschaften, die von Bedeutung für Schiffbau und Eisbrecher sind, z. B. herrscht bei niedrigen Temperaturen größere Festigkeit des Eises als bei höheren; bei Verminderung des Salzgehaltes wächst sie.

Schwimmendes Eis auf dem Meere ist in der klassischen Literatur erwähnt von Pytheas von Massilia (330 v. Chr.). Pytheas schrieb, auf seiner Reise nach Thule (Seegebiet um Island) sei er in eine dickflüssige und zähgeronnene See geraten; wahrscheinlich handelte es sich um Treibeis.

Das Meereis als Substrat ist Forschungsgegenstand der Geophysik und Kristallographie geworden. Von praktischer Bedeutung sind u. a. das Eis in seinem Verhalten als Radar- und Sonarreflektor (Eisbergortung) und hinsichtlich seiner Durchlässigkeit von Längstwellen (Funkempfang auf U-Booten unter dem Eis). Das Meereis als Substrat wurde im „Handbuch für Ozeanographie“ von O. Krümmel, Bd. 1, für den derzeit vorhandenen Stand der Erkenntnisse verhältnismäßig detailliert behandelt; für den neueren Stand der Wissenschaft kann das Buch „The Physics of Ice“ von E. R. Ponder [1965], mit 150 Seiten als Zusammenfassung gelten.

Eisbildung und Gefriervorgänge

Eisbildung tritt ein, wenn das Wasser bis zum Gefrierpunkt abgekühlt wird. Der Gefrierpunkt von reinem Wasser liegt bei 0°C , von Wasser mit Salzgehalt tiefer. (Auf den Zusammenhang mit dem atmosphärischen Druck wird hier nicht eingegangen.) Die Gefriertemperatur fällt linear von 0°C bei einem Salzgehalt von 0‰ auf $-1,332^{\circ}\text{C}$ bei einem Salzgehalt von $24,7\text{‰}$ und auf $-1,85^{\circ}\text{C}$ bei einem Salzgehalt von $32,5\text{‰}$ und weiter ab. Der Zusammenhang zwischen Eis, Salzen und Temperatur wird von Assur [1958] in einem Phasendiagramm dargestellt, das die sogenannten eutektischen Temperaturen $-8,2^{\circ}\text{C}$, $-22,9^{\circ}\text{C}$ – $43,2^{\circ}\text{C}$ und -54°C als Ausfällungstemperaturen von speziellen Salzen des fein kristallinen Gemenges bzw. der Lösung aufweist. Bei $-8,2^{\circ}\text{C}$ kristallisiert Natriumsulfat (Na_2SO_4), bei -23°C kristallisiert Natriumchlorid (NaCl), (bei -36°C KCl , bei -54°C CaCl).

Von großer Bedeutung für die Eisbildung auf dem Meere ist der Zusammenhang zwischen Gefrierpunkt und Dichtemaximum bei jeweils verschiedenem Salzgehalt.

Das Wärmeverhalten des Seewassers ist insofern anormal, weil sein spezifisches Volumen (unter spezifischem Volumen versteht man den Kehrwert der Dichte (cm^3/g), bei Abkühlung (bei chemisch reinem Wasser) bis $+4^{\circ}\text{C}$ abnimmt; hier ist also sein Dichtemaximum erreicht. Bei weiterer Abkühlung nimmt sein spezifisches Volumen wieder zu, bis es beim Gefrieren bei 0°C sprunghaft um ca. 97‰ zunimmt, d. h. das Eis schwimmt. Diese Verhältnisse bleiben grundsätzlich auch im Meerwasser erhalten, lediglich die Werte für das Dichtemaximum und den Gefrierpunkt werden verschoben. G. Haux: Tauchtechnik.

Auftragungen der Dichte von Eis über die Temperatur, abhängig vom Salzgehalt, zeigen, daß auch Meereis zwischen -10°C und -25°C und unterhalb -30°C , je nach Salzgehalt, sich so verhält, wie reines Eis, nämlich sich zusammenzieht und bei Behinderung der Dehnung rissig wird. Nur im Bereich 0°C bis etwa -10°C und zwischen -25°C und -30°C dehnt sich Meereis bei Temperaturabfall aus.

Als wichtigste Eigenschaft des Meereises ist also hervorzuheben: Meereis schwimmt auf dem Wasser; die Ozeane vereisen nicht vom Boden her, d. h. bei Vereisung entsteht auf den entsprechenden Meeresgebieten eine Isolierschicht, die die Wassermassen vor weiterer Auskühlung gegen die Atmosphäre schützt. Das Eis auf dem Meere stellt eine Trennschicht dar mit scharfen Temperaturgradienten zur oberen und unteren Grenzfläche. Die thermischen Eigenschaften und Prozesse sind sehr unterschiedlich von denen der Grenzfläche Land gegen Luft. Im Meere gibt es keine Phänomene des Dauerfrostbodens.

Bei reinem Wasser liegen das Dichtemaximum bei $+4^{\circ}\text{C}$ und der Gefrierpunkt bei 0°C , bei Wasser mit Salzgehalt von $24,7\text{‰}$ liegen Dichtemaximum und Gefrierpunkt bei $-1,33^{\circ}\text{C}$. Bei Wasser mit größerem Salzgehalt liegt das Dichtemaximum bei tieferen Temperaturen als der Gefrierpunkt. Bei Meerwasser von 35‰ Salzgehalt liegt der Gefrierpunkt bei $-1,9^{\circ}\text{C}$ und das Dichtemaximum bei $-3,5^{\circ}\text{C}$.

Bei Abschätzung von Berechnungen zum Wärmehaushalt sind Überlegungen physikalischer Zusammenhänge notwendig. Wasser kommt in drei Phasen vor: gasförmig (Wasserdampf), flüssig (Wasser), fest (Eis). Mit dem Übergang von einer Phase in die andere ereignen sich besondere energetische Prozesse (latente Wärme ist notwendig).

Um 1 g Eis in Wasserdampf zu überführen, sind bei 1 Atm Luftdruck 720 cal/g nötig

Um 1 g Eis in Wasser (flüssig) zu überführen, sind 80 cal/g nötig

Um 1 g Wasser in Wasserdampf zu überführen, sind 540 cal/g nötig

Zu den thermodynamischen Eigenschaften des Eises sind die Begriffe der spezifischen Wärme und der latenten Wärme zu behandeln. Beide sind Funktionen von Salzgehalt und Temperatur. Die physikalischen Erscheinungen von Schmelz- und Gefrierprozessen werden in geophysikalischen Werken behandelt. Dampfspannung und Verzögerung im Gefrierpunkt von Salzlösung wurden um 1875 untersucht.

A. Defant [1928, 1961]: Physical Oceanography. Tabellen siehe Handbook of Marine Science [1974].

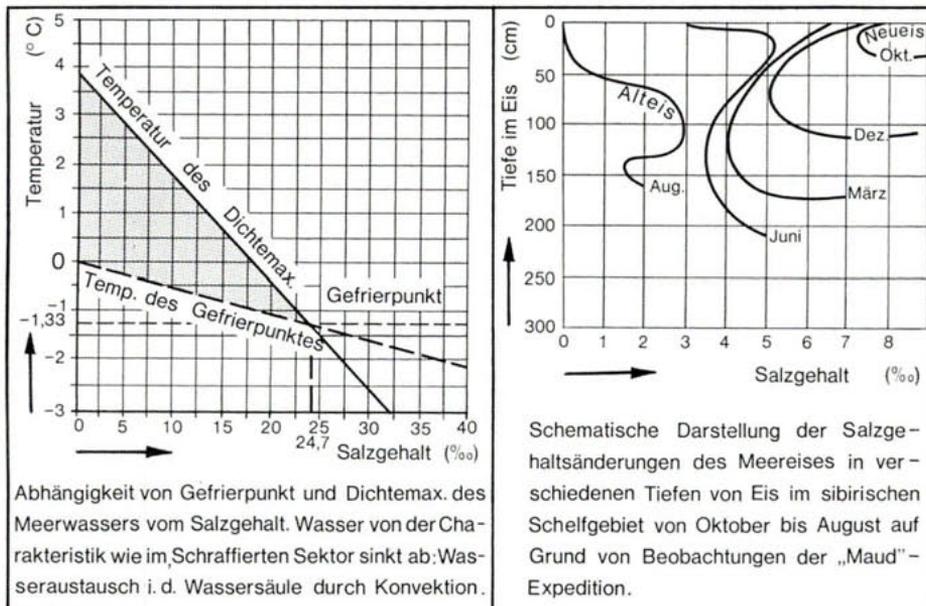


Abb. 8.3 Gefriervorgänge und Salzgehalt des Meerwassers

links

Beziehung zwischen Temperatur des Gefrierpunktes und des Dichtemaximums und Salzgehalt

Bei einem Salzgehalt von 24,7‰ kreuzen sich die Funktionskurven. Wasser von der Charakteristik des rechten unteren Dreiecks zwischen den Funktionen gefriert an der Oberfläche, bevor es absinken kann; als Eis schwimmt es: Die Wassersäule kühlt bis zum Boden nicht weiter aus. Wasser mit größerem Salzgehalt als 24,7‰ gilt als Meerwasser.

Nach: American Practical Navigator, US Naval H. O. Washington, Publ. Nr. 9, Grundlage

H. U. Sverdrup et al. [1942] The Ocean

rechts

Beispiel der Änderung des Salzgehaltes in verschiedenen Tiefenlagen des Meereises

Nach: „Maud“ Expeditionsberichten, 1922—24, Eis der ostsibirischen Drift. F. Malmgren

[1927]: On the Properties of Sea Ice, the Norwegian North Polar Expedition with the

„Maud“, 1918—1925, Scientific Results, Bd. I, Nr. 5

Abkühlung und Konvektion des Meerwassers bis zur Eisbildung.

Als einfachstes Modell sind die Vorgänge der Eisbildung folgendermaßen zu beschreiben: Im Sommer schmilzt die Eisdecke oben ab. Im Winter friert die Eisdecke von unten an. Diese Vorgänge spielen sich in einer Schicht ab, die etwa 0,5 m Eis pro Jahr betrifft.

Die genannten Beziehungen zwischen Dichtemaximum, Gefrierpunkt und Salzgehalt sind für die Eisbildung und die Erscheinung der Eisbildung auf den Meeren von größter klimatischer Bedeutung in Bezug auf Hydrosphäre und Atmosphäre.

Die Abkühlung des Meerwassers erfolgt an der Grenzfläche durch eine kalte Atmosphäre (spezielle Phänomene wie Grundeisbildung und unterkühlte Wassermassen sind hier nicht diskutiert). Bei Abkühlung einer Wassermasse durch die Atmosphäre kann der Gefriervorgang beginnen, wenn die Wassermasse auf den Gefrierpunkt abgekühlt ist. Solange die Temperatur des Dichtemaximums des Wassers über der Temperatur des Gefrierpunktes liegt, wird es durch Abkühlung zu seiner gegenüber der Umgebung größer gewordenen Dichte absinken und nicht gefrieren: Es entsteht die Konvektion.

Das bedeutet, daß eine Wassersäule zunächst durch Konvektion auf den jeweiligen Gefrierpunkt abkühlt bevor Eisbildung an der Oberfläche des Meeres durch weitere Abkühlung eintritt.

Konvektion und Gefrieren des Meerwassers infolge Abkühlung an der Oberfläche erfolgt: (bei einer Lufttemperatur von -10°C)

| | | |
|--------------------|------------------------------|--------------------------|
| bei Salzgehalt von | Konvektion bis zu Dichtemax. | Eisbildung an Oberfläche |
| 0 ‰ | + 4° C | bei 0° C |
| 20 ‰ | - 0,3° C | - 1,07° C |
| 25 ‰ | Eisbildung | - 1,9° C |

Das bedeutet, daß die Konvektion im Meerwasser von einem Salzgehalt von 24,7 ‰ an bei $-1,33^{\circ}\text{C}$ aufhört, d. h. daß damit Meerwasser an der Oberfläche zu Eis erstarrt, wenn weitere Abkühlung erfolgt und das Wasser nicht mehr absinkt, während darunter liegende Wassermengen bei der Temperatur des Dichtemaximums stagnieren.

Meerwasser von größerem Salzgehalt als 24,7 ‰, z. B. 35 ‰ hat seinen Gefrierpunkt erst bei $-1,9^{\circ}\text{C}$, aber seine größte Dichte erst bei $-3,5^{\circ}\text{C}$ erreicht. Das bedeutet, daß bei Wasser von solchem Salzgehalt die Konvektion bis $-1,9^{\circ}\text{C}$ anhält.

Die Meere sind jedoch z. gr. T. nicht von homogenen Wasserkörpern erfüllt, sondern mehrfach geschichtet. In vielen Meeresräumen befinden sich die Schichten außerdem in Bewegung. So gibt es Sprungschichten, an denen die thermische Konvektion von der Oberfläche her aufhört; d. h. es wird nicht die gesamte Wassersäule bis zum Meeresboden durch Konvektion auf den Gefrierpunkt abgekühlt.

Außer den genannten Bedingungen sind noch eine Reihe von Faktoren für die Eisbildung auf dem Meere maßgebend: die Wassertiefe der Gewässer

(flache Gewässer kühlen schnell aus, z. B. Hudson Bay, St. Lorenz Golf (südlicher Teil), Ostsee, Wassermassenaustausch der Strömungen, Modifikation der Grenzflächen durch Schneefall (beschleunigend wegen Schmelzerwärmung und Süßwasserzufuhr), Wellen retardierend, und die Zeitspanne, in der die Abkühlung erfolgt. So verläuft die Eisbildung auf dem Meere, durch solche Bedingungen modifiziert, regional sehr viel differenzierter als nach dem einfachen Modell (siehe oben).

Meerwasser mit 35 ‰ Salzgehalt würde erst nach Abkühlung der gesamten unterlagernden Wassersäule auf $-1,9^{\circ}\text{C}$ gefrieren. Das salzarme (30–32 ‰) arktische Oberflächenwasser des Nordpolarmeeres mit einem Gefrierpunkt von $-1,6^{\circ}\text{C}$ bis $-1,8^{\circ}\text{C}$ schafft aber günstige Voraussetzungen für die Eisbildung. Besonders im sibirischen Schelfbereich, wo der Salzgehalt mit 22 ‰ sehr niedrig ist, kommt es bei Abkühlung rasch zur Entwicklung einer mehrere 100 km breiten Festeisdecke, die mit dem Land verbunden ist.

„Diese Wasserschichten (Sprungschichten) werden auch als Eisträgerschichten bezeichnet, weil sie für die Eisbildung von entscheidender Bedeutung sind. Eine typische Eisträgerschicht finden wir bei bestimmten Wetterlagen in der Beltsee, den Gewässern zwischen Dänemark und Schweden.

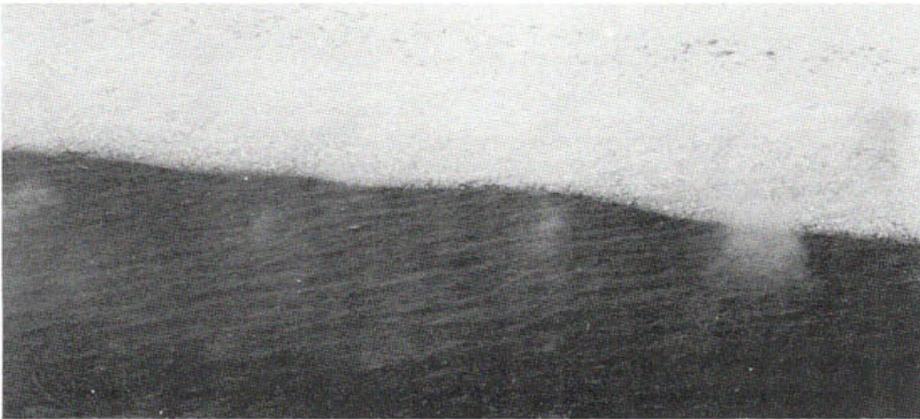


Abb. 8.4

Eisrand, augenblickliche Grenze des Neueises, „Ice Edge“, Tschuktschen-See

- I. Neubildung des Randes der polaren Eisdecke, vorrückend. Eisrand besteht aus kleinen Fragmenten ($< 2\text{ m}$), „Brush“, durch Wind und Strömung zusammengedrückt.
 - a) Eisbildung durch Gefrieren des Meerwassers (Veränderung in vertikaler Dimension).
 - b) Eisrand durch Gefrieren des Meerwassers und Zusammendriften (horizontal). Bogenförmiger Verlauf des Eisrandes, „Bights“.
- II. Atmosphärische Erscheinung an diesem dreifachen Grenzsaum Wasser-Eis-Atmosphäre, „Triple Interface“: Seerauch, „Frost Smoke“, verursacht durch warmes Wasser (3°C) und kalte Luft (-8°C); diese Nebelflocken (werden auch „Cumulus fractus“ genannt) mit Schattenbildung auf dem Eis.

Wellen: Seegang 3 bis 4.

Aufnahme: H. G. Gierloff-Emden [11. Okt. 1975] Tschuktschen-See, von NASA Convair Galileo II, Pilot F. Drinkwater, Flughöhe ca. 250 m, Leiter der Mission: E. Petersen