

# Das North Water-Projekt (kanadisch-grönländische Hocharktis)

F. Müller, A. Ohmura und R. Braithwaite

## Einleitung

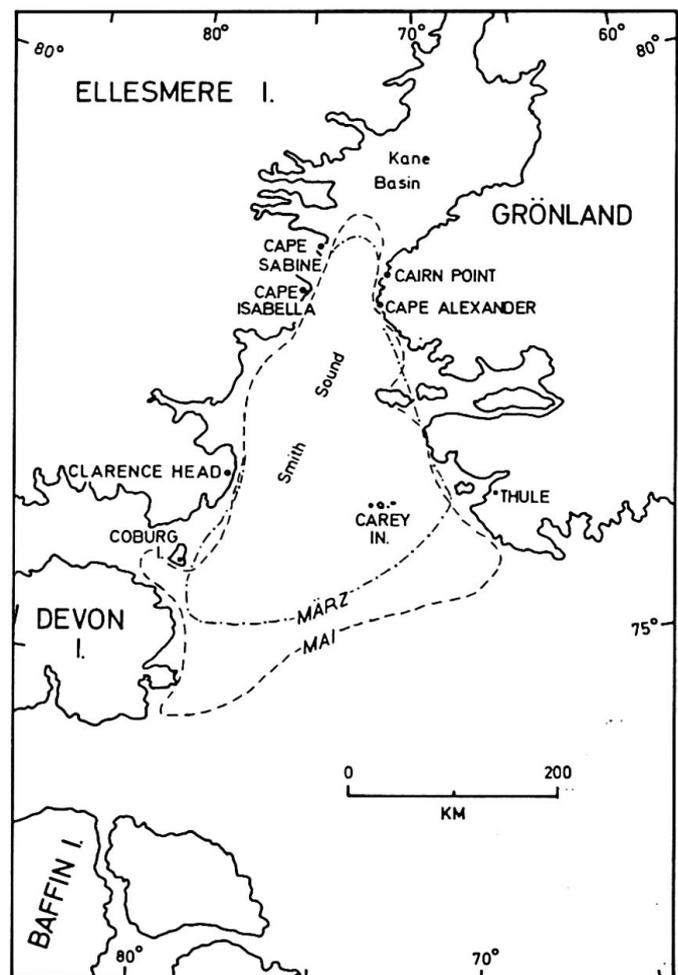
Die North Water Polynia, ein semi-permanent eisfreier Meeresraum in der nördlichen Baffin-Bay (Fig. 1) von der Fläche der Schweiz (!) wird zurzeit von einer internationalen, interdisziplinären Arbeitsgruppe untersucht. Kanadische, amerikanische, dänische und schweizerische Meteorologen, Klimatologen, Glaziologen, Ozeanographen und Biologen versuchen Ursache und Auswirkungen dieser auch im Winter offenen Wasserfläche quantitativ zu erfassen.

Die Schweizer Equipe, deren vorläufiger Bericht hier vorliegt, befaßt sich vorwiegend mit den *klimatischen und glaziologischen Auswirkungen* der North-Water-Umweltanomalie, die ganz besonders darum interessant sind, weil sie einen gut erfaßbaren Extremfall für das wichtige Phänomen der Luftmassen- und Klimamodifikation darstellen. Im North-Water-Gebiet beträgt der Temperaturunterschied zwischen den bodennahen Luftschichten und der Wasseroberfläche oft monatelang 30 bis 40° C und mehr. Die Austauschprozesse für Energie und Feuchte sind daher sehr aktiv. Es dürfte nicht zufällig sein, daß die Umgebung des North Water als das stärkst vergletscherte Gebiet der nördlichen Hemisphäre gilt und daher ein Großteil der «nördlichen» Eisberge in dieser Gegend gekalbt wird.

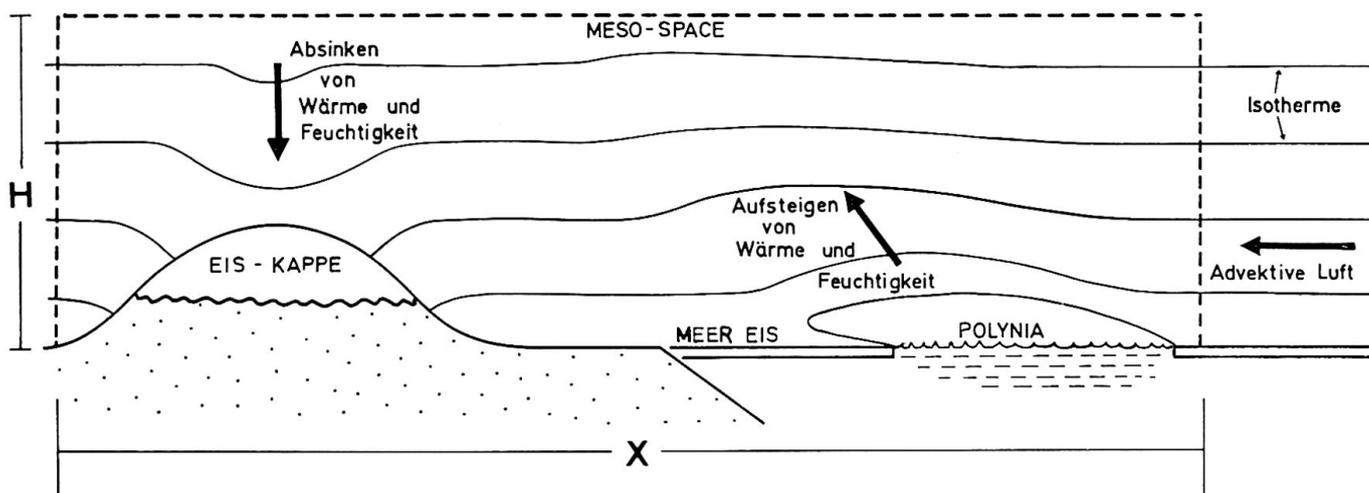
Um den Energie- und Massenaustausch zwischen Ozean, Luft und umgebenden Eismassen im mesoklimatischen Sinne (Fig. 2) zu erfassen, wird ein Netz von Beobachtungsstationen mit elf automatischen, digitalen Wetterstationen und drei Überwinterungsmannschaften eingerichtet (Fig. 1). Für die im Sommer, respektive Spätherbst 1972 eingerichteten bemannten Stationen Coburg und Carey mit je einer automatischen Anlage auf Meeresspiegel und einer auf dem nächstgelegenen freistehenden Berg beträgt die Beobachtungsdauer zweieinhalb Jahre bei einem Beobachtungsintervall von drei Stunden, während für die dritte bemannte Station (Cairn Point) nur *eine* Überwinterung und zwei Sommerbeobachtungsperioden in Aussicht genommen sind. Die fünf unbemannten automatischen Wetterstationen (Clarence Head, Cape Isabelle, Cape Alexander, Cape Sabine und an einer noch zu bestimmenden Stelle) werden auch im Winter periodisch besucht. Auf den bemannten Stationen wird während der letzten fünfzehn Monate täg-

lich je ein Vaisala-Radiosonden-Aufstieg durchgeführt.

Die drei Überwinterungsmannschaften führen zusätzlich zum klimatologischen Programm regelmäßig Beobachtungen über die Meereisdicke und die Schneevertelung in der Umgebung ihrer Stationen aus. Nach jedem Niederschlagsereignis werden auf mehreren Profilen die Schneemengen bestimmt und Proben für die Isotopenuntersuchungen gesammelt. In Firnschächten in den Akkumulationsgebieten der umliegenden Gletscher werden ferner die Niederschläge vergangener Jahrzehnte mit Hilfe von Schneestratigraphie und Isotopenstudien un-



Figur 1. Ungefähre Ausdehnung der North Water Polynia nach Dunbar (1) und Lage der Meßstationen (\*) des North Water Forschungsprojektes



Figur 2. Schematische Darstellung der thermischen und hydrologischen Wechselwirkung zwischen Polynia und Eiskappe. ( $X \sim 10^3$  km,  $H \approx 1 - 2 \times 10^3$  m)

tersucht. Nur durch solch vielschichtige Arbeitsweise wird es möglich, die Auswirkungen der North Water Polynia abzuschätzen und – vielleicht – Veränderungen verschiedener zeitlicher Größenordnung (von Jahr zu Jahr oder über Jahrzehnte und Jahrhunderte) in diesem System vorherzusagen.

*Luftmassenmodifikation: ein numerisches Modell*

Der Kontakt der arktischen Luftmassen mit der darunterliegenden Wasserfläche des North Water bewirkt – besonders im Winter – eine beträchtliche Veränderung der Temperatur- und Feuchtecharakteristiken dieser Luft (2). Diese Veränderungen werden im Bereich des North Water direkt beobachtet und gemessen.

Das physikalische Verständnis der beteiligten Prozesse kann am besten durch ein numerisches Modell, das auf den Diffusionsgleichungen der Wärme und des Wasserdampfes beruht, gefördert werden. Diese Gleichungen können unter gewissen Annahmen und unter Beschränkung des Lösungsbereiches gelöst werden. Das Modell berücksichtigt die untersten 500 m der Atmosphäre. Die unteren 40 m werden als die *bodennahe Luftschicht* und die darüberliegende Luft bis auf eine Höhe von mindestens 500 m als die *Ekmansche Spiralschicht* bezeichnet. Im Modell beträgt der vertikale Netzabstand für die bodennahe Schicht 1 m und für die Spiralschicht 10 m. Der horizontale Netzabstand ist 1 km (3). Die grundlegenden Annahmen für den

Ansatz der Gleichungen sind: 1) stationärer Zustand im zweidimensionalen Bereich, 2) keine Divergenz der Strahlungsenergie, 3) logarithmisches Windprofil mit linear wachsenden turbulenten Transportkoeffizienten in der bodennahen Luftschicht und 4) Taylorsche Verteilung des Windes sowie konstante Koeffizienten in der Spiralschicht (4). Die seitlichen Grenzwerte für Temperatur und Feuchtigkeit der Advektionsluft werden den Radiosondendaten der windwärtigen Stationen entnommen, z. B. aus den Radiosondierungen in Thule. Die oberen Grenzwerte werden durch Interpolation aus den Radiosondendaten der umliegenden Stationen gewonnen. Mathematisch kann dieses Modell wie folgt dargestellt werden:

Diffusionsgleichung für Wärme:

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H [\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} + \rho])$$

Windprofil und turbulente Transportkoeffizienten bis 40 m:

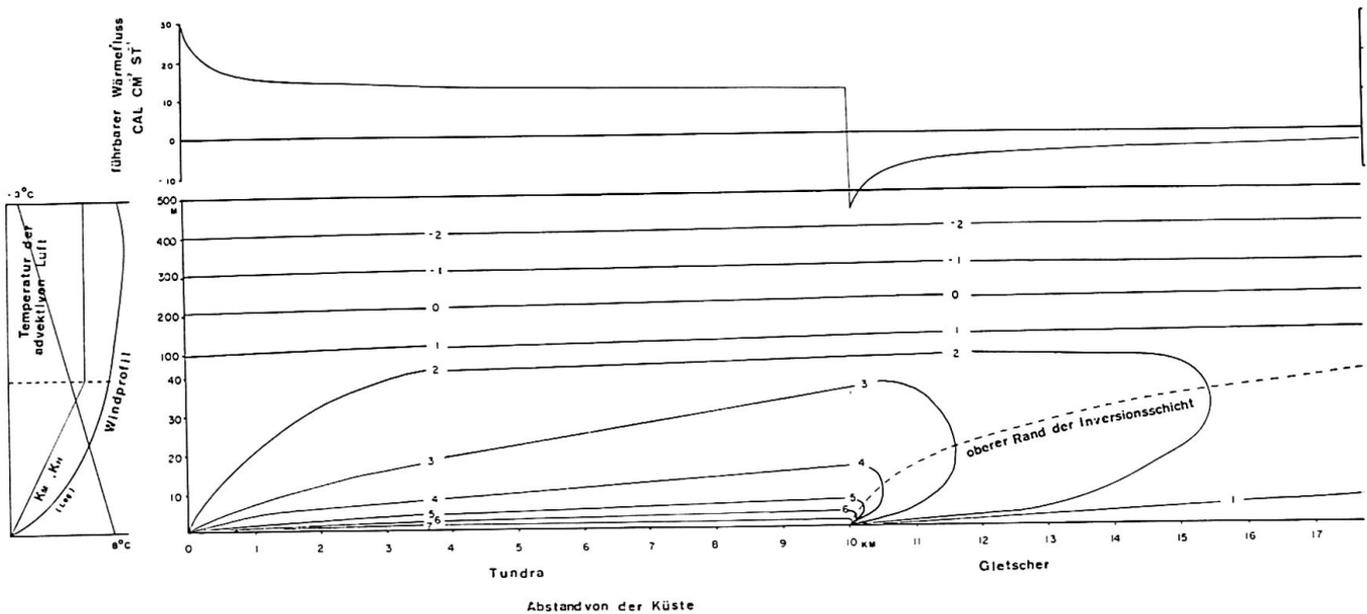
$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad K_H = K_M = k u_* z$$

Windprofil und Turbulenztransportkoeffizienten für die Spiralschicht:

Für die mittlere Windgeschwindigkeit  $\bar{u}$  wird die Taylorsche Lösung für die Ekmanschicht verwendet.

$$K_H = K_M = \text{konstant}$$

BERECHNETE TEMPERATURVERTEILUNG FÜR 16. - 30. JUNI 1969  
WESTKÜSTE DER AXEL HEIBERG INSEL, N.W.T., KANADA



Figur 3. Berechnete Temperaturverteilung für 1.-30. Juni 1969, Westküste der Axel-Heiberg-Insel, N.W.T., Kanada

wobei  $x$  = Koordinatenachse in Richtung des mittleren Windes.

- $z$  = Koordinatenachse in Richtung des Zenits
- $\bar{u}$  = mittlere Windgeschwindigkeit in  $x$ -Richtung
- $\bar{T}$  = mittlere Temperatur
- $u^*$  = Schubspannungsgeschwindigkeit
- $k$  = von Karmansche Konstante
- $z_0$  = Rauigkeitsparameter
- $K_H, K_M$  = Turbulenztransportkoeffizienten für Wärme resp. Impuls
- $\rho$  = trocken-adiabatischer Temperaturgradient

Das Modell wurde ursprünglich für die Westküste von Axel Heiberg Island, N. W. T., Kanada, entwickelt, um die Luftmassenmodifikation im Bereich des Beziehungssystems arktischer Ozeane – Tundra – benachbarte Gletscher zu studieren. Die mittlere Temperaturverteilung für die Zeit vom 16. bis 30. Juni 1969 (Fig. 3) wurde aus Grenzwerten errechnet, die über dieselbe Zeitspanne gemittelt wurden. Der Temperaturgradient, der sich aus der berechneten Temperaturverteilung ergab, wurde benützt, um den fühlbaren Wärmestrom an der Oberfläche zu errechnen. Am Basislager, das einem etwa 9–10 km von der Küste entfernten Punkt entspricht, wurde die Energiebilanz während des Sommers gemessen. Der Vergleich zwischen dem berechneten und dem gemessenen fühlbaren Wärmefluß ergab eine gute Übereinstimmung.

Tabelle 1. Vergleich des berechneten und des gemessenen fühlbaren Wärmeflusses

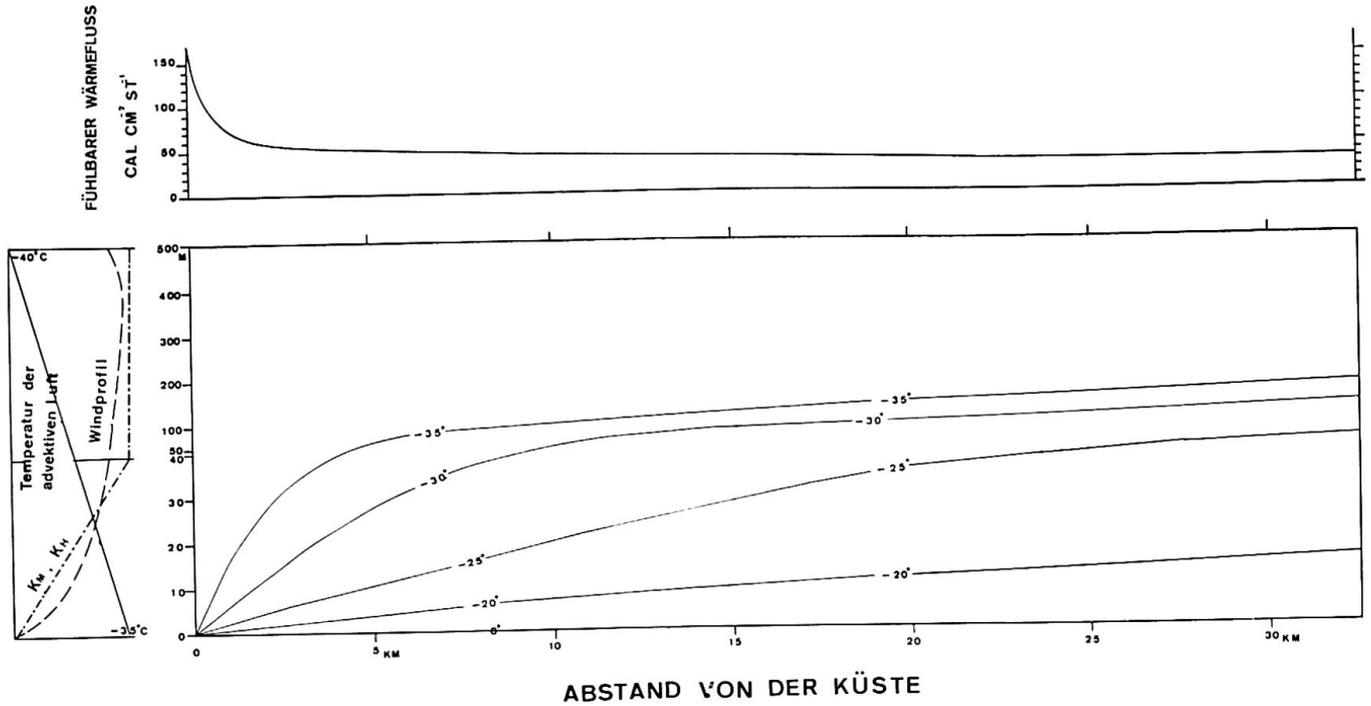
Base Camp, Axel Heiberg Island, N. W. T., Kanada 1969

	16.-30. Juni	1.-15. Juli	16.-31. Juli	1.-15. Aug.	16.-23. Aug.
Gemessene Werte	10,0	6,1	3,0	3,1	2,8
Berechnete Werte	11,1	6,2	2,7	2,2	1,6

Einheit:  $\text{cal cm}^{-2} \text{Std}^{-1}$

Darnach wurde dasselbe Modell unter Verwendung von approximativen Daten für die North Water Situation (Wasseroberflächentemperatur =  $0^\circ \text{C}$ , advective Lufttemperatur =  $-35^\circ \text{C}$  an der Oberfläche und  $-40^\circ \text{C}$  auf 500 m Höhe, geostrophische Windgeschwindigkeit = 5 m/s) gerechnet.

Die Resultate (Fig. 4) zeigen die Verteilung der Temperatur und des fühlbaren Wärmeflusses. Der große Wärmeverlust an der Wasseroberfläche (rund zwei Drittel der Solarkonstanten in Küstennähe und etwa die Hälfte derselben im übrigen Bereich) muß durch die Konvektion im Meerwasser



Figur 4. Zweidimensionales stationäres Modell für North Water

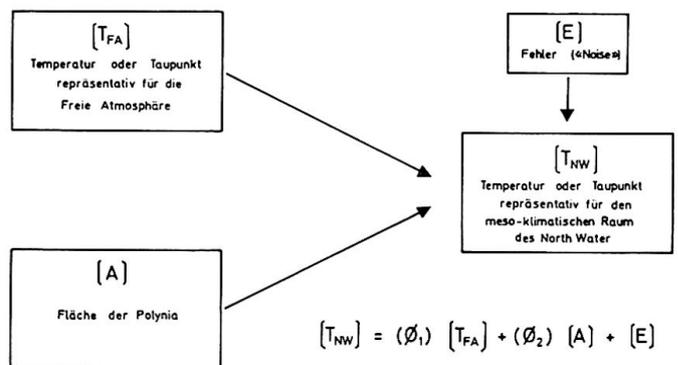
nachgeliefert werden. Die Oberfläche würde sehr bald zufrieren, wenn sich der marine Austauschmechanismus abschwächen würde.

Ähnliche Betrachtungen können in bezug auf die Verdunstung angestellt werden, indem die Temperatur durch die spezifische Feuchtigkeit ersetzt wird. Die Lösung der Diffusionsgleichungen für Temperatur und Feuchtigkeit gibt Auskunft über die Wolkenentwicklung (5). Daraus kann der Einfluß des North Water auf die Verteilung der Niederschläge in der Umgebung abgeschätzt werden. Exaktes Studium der Wolken- und Niederschlagsbildung im Bereich der Expeditionsstationen ist wichtig, um das Modell zu verbessern. Verbesserungen des Modells sind vor allem möglich durch 1. Modifikation der turbulenten Transportkoeffizienten und des Windprofils im nichtneutralen Zustand, 2. Berücksichtigung der vertikalen Windkomponente, 3. Abschätzung der Wärmemenge, die durch die Wolken transportiert wird, und 4. Neuformulierung der Gleichungen unter Berücksichtigung von zeitlichen Veränderungen. Die zuletzt erwähnte Verbesserung dürfte aus rechen-technischen Gründen schwierig sein, während die drei erstgenannten sicher ausgeführt werden können.

*Luftmassenmodifikation: ein black-box-Modell*

Die numerische Lösung der thermodynamischen Gleichungen für die advektiven Luftmassen über

der «North Water Polynia» erfordert einen großen Arbeitsaufwand. Es ist deshalb vorteilhafter, für die Lösung ein black-box-Modell zu verwenden, welches auf der Hypothese beruht, daß die thermischen und hydrologischen Prozesse der Luftmassen über dem offenen Wasser als einfaches Input-Output-System betrachtet werden können (Fig. 5). Man könnte es als mesoklimatischen Filter des North Water bezeichnen. Als *Inputgrößen* werden Daten über den Zustand der Polynia und deren unmittelbare Umgebung einerseits (A) und der freien Atmosphäre andererseits ( $T_{FA}$ ) verwendet. Angaben über die Polynia erhält man durch remote sensing, über die freie Atmosphäre durch Interpolation von



Figur 5. Schematische Darstellung eines black-box-Modells für die thermische und hydrologische Wechselwirkung zwischen Polynia und Atmosphäre

Tabelle 2. *Mittlere Fehler der Tagesmittel der Temperatur über Gletschern der Kanadischen Hocharktis*

Wetterstation	Jahr	Dauer	Anzahl Tage	Höhe ü. M. (m)	$E_m$	$E_1$	$E_2$	$E_F$
Base camp, Axel Heiberg I.	1961	19/5–25/8	99	190	2.1	2.0	1.9	1.4
Lower Ice Stn., Axel Heiberg I.	1960	29/5–28/8	89	208	1.8	1.4	1.3	1.4
Lower Ice Stn., Axel Heiberg I.	1961	19/5–25/8	99	208	1.8	1.7	1.5	1.1
Upper Ice 1, Axel Heiberg I.	1960	29/5–25/8	89	1530	1.8	1.5	1.1	1.4
Upper Ice 2, Axel Heiberg I.	1961	19/5–25/8	99	1920	2.7	2.1	1.4	1.7
Ice Cap Stn., Devon I.	1963	16/5–16/8	93	1320	2.0	2.0	1.8	1.1
Ice Cap Stn., Devon I.	1969	04/6–31/7	61	1320	2.4	2.0	1.6	1.0
Sverdrup Glacier, Devon I.	1963	23/5–16/8	86	300	2.3	2.0	1.6	1.4
Durchschnittlicher mittlerer Fehler					2.1	1.8	1.5	1.3

$T_F(t)$  = Interpolierte Temperatur ( $^{\circ}$  C) in der freien Atmosphäre zur Zeit t

$T_G(t)$  = Beobachtete Temperatur ( $^{\circ}$  C) über dem Gletscher zur Zeit t

$E_m$  = Mittlerer Fehler ( $^{\circ}$  C) im Markov-Modell:  $T_G(t) = a + b \cdot T_G(t-1)$

$E_1$  = Mittlerer Fehler ( $^{\circ}$  C) im Modell:  $T_G(t) = a + b \cdot T_F(t)$

$E_2$  = Mittlerer Fehler ( $^{\circ}$  C) im Modell:  $T_G(t) = a + b \cdot T_F(t) + c \cdot T_F(t)^2 + d \cdot SP(t) + e \cdot T_F(t-1) + f \cdot T_F(t-2)$

$E_F$  = Interpolationsfehler ( $^{\circ}$  C) für die freie Atmosphäre

Meßwerten bestehender Wetterstationen in dieser Region. *Outputgrößen* sind die klimatischen Beobachtungen der speziell für das North-Water-Projekt aufgestellten Wetterstationen ( $T_{NW}$ ).

Diese Daten ermöglichen es, die *Durchlaßfunktion* des Modells (Matrizen  $\phi_1$  und  $\phi_2$ ) empirisch zu bestimmen; die *zufälligen Einflüsse* (E) (random noise) werden dabei nach der Methode der kleinsten Quadrate minimalisiert.

Im jetzigen Zeitpunkt ist es nicht eindeutig, welche Inputgrößen ausgewählt werden sollen, da noch keine Beobachtungen von den Wetterstationen des North Water vorliegen. Ein weiteres Forschungsprojekt des Geographischen Institutes der ETHZ befaßt sich jedoch mit einem ähnlichen Problem: Modifikation der Luftmassen über vergletscherten Gebieten auf der Axel-Heiberg-Insel und der Devon-Insel in der kanadischen Hocharktis (6). Beobachtungen der Lufttemperatur über Gletschern während acht Sommern (je etwa neunzig Tage) wurden als Outputdaten verwendet, um lineare Modelle aufzustellen, wobei die interpolierten Temperaturwerte der freien Atmosphäre als Inputdaten dienten. Ein Computerprogramm ermöglichte es, für jeden Punkt der freien Atmosphäre die Temperatur zu berechnen, indem Meßwerte der freien Atmosphäre mit Hilfe von Polynomen oder der Methode von Gandin (7) interpoliert wurden.

Die acht verschiedenen Modelle (Tabelle 2) weisen einen durchschnittlichen mittleren Fehler von  $\pm 1,8^\circ \text{C}$  in der Voraussage von Temperaturwerten auf. Durch die Einführung von quadratischen Ausdrücken sowie einem Wassertypusparameter (SP) und der Auswirkung der Temperatur von zwei vorangegangenen Tagen konnte das Resultat verbessert werden (durchschnittlicher mittlerer Fehler von  $\pm 1,5^\circ \text{C}$ ). Der Fehler bei der Interpolation von Daten der freien Atmosphäre beträgt  $\pm 1,3^\circ \text{C}$ , und wir dürfen annehmen, daß es mit keiner Methode möglich sein wird, Temperaturwerte – unter Verwendung der genannten Daten – genauer vorauszusagen. Bei der Annahme eines einfachen Markov-Modells muß für die acht behandelten Fälle mit einem durchschnittlichen mittleren Fehler von  $\pm 2,1^\circ \text{C}$  gerechnet werden.

Die Resultate des Gletschermodells ermutigen uns, eine ähnliche Methode auch für das North-Water-Gebiet anzuwenden. Die Temperatur der freien Atmosphäre ( $T_{FA}$ ) bildet dabei einen Teil des Inputs. Im Gegensatz zum Gletscher ist bei einer Polynia die Ausdehnung zeitlich und räumlich nicht konstant und muß deshalb ebenfalls berücksichtigt werden (Input [A]).

Ähnliche black-box-Modelle sollen für die anderen klimatologischen Parameter verwendet werden (z. B. Taupunkttemperatur, Windgeschwindigkeit). Die Genauigkeit der Voraussage kann dabei in je-

dem Fall durch Berechnung des mittleren Fehlers abgeschätzt werden.

### *Remote sensing*

Regelmäßige Beobachtungen über die Ausdehnung und den physikalischen Zustand des offenen Wassers und dessen Umgebung sind für das North-Water-Projekt grundlegend wichtig. Sie werden durch «remote sensing» von Flugzeugen und Satelliten aus durchgeführt und durch geophysikalische Messungen auf den drei bemannten Bodenstationen ergänzt. Flüge, die durch das Kanadische Transport-Ministerium, die Defence Research Board, das Polar Continental Shelf Project, die U. S. Coast Guard und durch N. A. S. A. gemacht werden, erlauben auch während der kritischen Wintermonate, die Vereisung des North-Water-Gebietes abzuklären. Während der dunklen Jahreszeit werden vor allem Radar-Photographie, «infra-red imaging» und «laser profiling» angewandt; im Frühling und Sommer wird zudem die Tageslichtphotographie durch Flugzeuge und Satellit ERTS A benützt. Auch experimentelle Techniken wie «micro-wave imaging», «side looking radar» und «low light television» sollen im North-Water-Gebiet weiter geprüft und eingesetzt werden.

An bisherigen Vorarbeiten sind zu erwähnen die Photographien, die vom Wetter-Satelliten ESSA 8 APT bei Tageslicht vom März bis Juli 1969 und 1970 aufgenommen und mit gutem Erfolg analysiert wurden (8). Ferner lieferten Serien von Eis-Beobachtungsflügen während der Winter 1970/71 und 1971/72 mit einem kanadischen Defence-Research-Board-Flugzeug wertvolle Angaben über Eisbedingungen in den nördlichen Teilen des North Water (9). Dabei wurden Radarphotographie und visuelle Beobachtungen kombiniert. Ab Oktober 1972 wird das Personal der Expeditionsstationen (vorerst Coburg und Carey, später auch Cairn Point) regelmäßig Bodenbeobachtungen (ground truth information) liefern über Eisdicke, Oberflächenrauheit und -temperatur. Der Satellit ERTS B, der leider erst im Herbst 1974 gestartet werden soll, wird eine Infrarot-Ausrüstung besitzen, die es erlauben wird, regelmäßige Beobachtungen auch während der Polarnacht durchzuführen.

### *Luftmassenidentifikation und paleoklimatische Studien mit Hilfe von Isotopenmessungen*

Der Isotopengehalt von Luftfeuchte und Niederschlag vermag Hinweise auf deren Herkunft zu liefern. Pionierarbeit mit dieser Methode wurde auf

der Westseite von Grönland geleistet (10, 11). Die relativen Abweichungen  $\delta$  des Gehaltes an stabilen Isotopen *Deuterium* und *Sauerstoff 18* in Schnee, Regen, Eis und Luftfeuchte gegenüber Standard-Ozeanwasser sind mit gewissen physikalischen Prozessen des Wasserkreislaufes verknüpft. Es scheinen relativ einfache Beziehungen zwischen Isotopengehaltsänderungen und Änderungen der Kondensations- und Verdunstungstemperatur zu bestehen. Daher konnte Dansgaard (10, 12) die folgenden empirischen Beziehungen für Westgrönland formulieren:

$$\begin{aligned}\delta_{18} &= 0,69 T_a - 13,6\text{‰} \\ \delta_D &= 5,6 T_a - 100 \text{‰}\end{aligned}$$

wobei  $T_a$  die mittlere Jahrestemperatur der Station bedeutet. Die verschiedentlich beobachtete Beziehung zwischen Isotopengehalt und Höhenlage sowie die jahreszeitlichen Schwankungen im D- und  $O^{18}$ -Gehalt müssen auf diese Temperaturabhängigkeit zurückgeführt werden.

Die Untersuchungen von *Tritium* zeigten, daß auch dieses instabile Isotop in Grönland räumlich und zeitlich stark variiert, daher nicht – wie ursprünglich geplant – für detaillierte Akkumulationsstudien geeignet ist, aber Auskunft über die Herkunft des Niederschlages zu geben vermag. Das durch die H-Bomben besonders im Sommer 1953 zusätzlich in die Atmosphäre injizierte Tritium ergibt immerhin einen Leithorizont im Altschnee der Akkumulationsgebiete, der gestattet, Mittelwerte des Firnzuwachses rund um das North Water zu studieren. Dem gleichen Ziel dienen Untersuchungen von *Pb 210* und  $\beta$ -Aktivität in Firnprofilen (11, 12).

Im Rahmen des North-Water-Projektes wird in einer gemeinsamen Arbeit mit dem Physikalischen Institut der Universität Bern versucht, diese Methoden weiter zu evaluieren und anzuwenden, um erstens den Beitrag der North Water Polynia zum Niederschlag dieses Gebietes abzuschätzen und zweitens die klimatischen Veränderungen der letzten fünfzig bis hundert Jahre zu erfassen. Ein detailliertes Programm zur Probenentnahme über eine Zeitspanne von mehr als zwei Jahren ist im Gang: auf den drei Überwinterungsstationen werden täglich je eine Probe direkt aus der Luft entnommen, und nach jedem größeren Niederschlagsereignis werden Probenprofile vom offenen Wasser bis zu

den umliegenden Bergspitzen und vergletscherten Hochplateaus aufgenommen.

#### Literatur

- (1) Dunbar Moira, 1969: The geographical position of the North Water. *Arctic*, Vol. 22, Nr. 4, S. 438–441.
- (2) Hare F. K. and Montgomery M. R., 1949: Ice, open water and winter climate in the eastern Arctic of North America: Part I. *Arctic*, Vol. 2, Nr. 2, S. 79–89.
- (3) Douglas J. Jr., 1961: A survey of numerical methods for parabolic differential equations. *Advances in Computers*, Vol. 2, Academic Press, New York, S. 1–54.
- (4) Brunt D., 1952: Physical and dynamical meteorology, Cambridge, S. 251–255.
- (5) Asai, T., 1965: A numerical study of air-mass transformation over the Japan Sea in winter. *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol. 43, No. 1, S. 1–15.
- (6) Braithwaite R. J., 1972: Statistical modelling of the thermal interaction of ice masses with the atmosphere. In: Müller, F. (ed.): *International Geographical Union Field Tour Ea 2, Miscellaneous Papers*, Axel Heiberg Island Research Reports, Montreal, 58 S.
- (7) Gandin, L.S., 1965: Objective analysis of meteorological fields. *Israel Program for Scientific Translation*, Jerusalem, 252 S.
- (8) Aber, P. G. and Vowinckel E., 1971: The evaluation of North Water spring ice cover from satellite photographs. *Arctic Meteorology Research Group, Publication in Meteorology* Nr. 101, McGill University, 23 S.
- (9) Dunbar Moira, 1971: Winter ice reconnaissance in Nares Strait, 1970–71. *Defence Research Establishment Ottawa, Technical Note* Nr. 71–34, 29 S.
- (10) Dansgaard W., 1964: Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, Vol. 16, Nr. 4, S. 436–468.
- (11) Renaud A. et al., 1969: Etudes physiques et chimiques sur la glace de l'Inlandice du Groenland. *Meddelelser om Grønland*, Bd. 177, Nr. 2, 123 S.
- (12) Ambach W. und Dansgaard W., 1970: Fallout and climate studies on firn cores from Carrefour, Greenland. *Earth and Planetary Science Letters*, 8, North-Holland Publishing Co, S. 311–316.