

Geowiss.Mitt.  
21, 1982/ S. 15 - 31

EISMASSENÄNDERUNGEN UND EUSTATISCHES MEERESNIVEAU

von  
Kurt Bretterbauer

Prof. Dr. phil. habil. Wolfgang Pillewizer  
zum 70. Geburtstag

O.Univ.Prof.Dipl.Ing.Dr.techn. Kurt Bretterbauer  
Institut für Theoretische Geodäsie und Geophysik der TU Wien,  
Abt.f. Theoretische Geodäsie, Gußhausstr. 25-29, A-1040 Wien

And ice, mast-high,  
Came floating by,  
As green as emerald.

S.T. Coleridge  
"Ancient Mariner"

## EISMASSENÄNDERUNGEN UND EUSTATISCHES MEERESNIVEAU

von Kurt Bretterbauer, Wien

Widmung: Diese Arbeit widme ich Herrn em. Univ. Prof.  
Dr. W. PILLEWIZER, dem Geographen, Kartographen  
und Forschungsreisenden alter Schule, der den  
Problemen des Eises immer größtes Interesse  
entgegengebracht hat.

Zusammenfassung: In Untersuchungen von Geologen zum  
Problem der Meeresspiegelschwankungen infolge Eismassenän-  
derungen werden meist die Gravitationswirkung der verlager-  
ten Massen und die Schwerpunktsverschiebung übersehen. Es  
wird eine genäherte Lösung des Problems gegeben und das fik-  
tive Beispiel der totalen Abschmelzung der gegenwärtigen Eis-  
massen ohne isostatischen Ausgleich numerisch berechnet.  
Die Folgen des Abschmelzens werden diskutiert.

Abstract: In investigations by geologists on the prob-  
lem of changes of terrestrial ice masses and variations of  
eustatic sea level usually the gravitational effect of the  
shifted masses and the displacement of the center of gravity  
are neglected. An approximate solution of the problem is  
given, and the fictitious example of the total melting of  
the existing ice masses is numerically computed without  
isostatic compensation. The consequences of the deglaciation  
are discussed.

### A) EINFÜHRUNG

Perioden von Kalt- und Warmzeiten, die mit dem Aufbau  
bzw. dem Abschmelzen großer Eismassen verbunden sind, müs-  
sen beträchtliche Schwankungen des Meeresspiegels zur Folge  
haben. Denn die in Form von Eis gebundenen Wassermassen kön-

nen nur den Weltmeeren entnommen worden sein. Diese Erkenntnis ist gerade 140 Jahre alt. Sie wurde von dem Amerikaner Ch. MACLAREN gewonnen (siehe dazu WOLDSTEDT, 1954), hat sich aber erst in unserem Jahrhundert durchgesetzt. Nach E.SUESS werden solche Schwankungen, die mit der Zu- oder Abnahme der Wassermenge, oder mit einer Änderung des Fassungsvermögens der Meeresbecken zusammenhängen, "eustatische" Schwankungen genannt. Davon zu unterscheiden sind die isostatischen Schwankungen, die ihre Ursache in dem Streben nach einer Gleichgewichtslage der kontinentalen und maritimen Massen hat. Der Versuch, aus bestimmten in der Natur zu beobachtenden Merkmalen auf Schwankungen des Meeresspiegels und in weiterer Folge daraus auf Eismassenveränderungen zu schließen, ist ein sehr komplexes Unternehmen. Auf die vielfältigen, rein geologischen Fragen die dabei auftreten, kann hier nicht eingegangen werden. Für das vorliegende Thema wesentlich ist nur, daß bei solchen Untersuchungen die Analyse alter Strandterrassen ein wichtiges Hilfsmittel darstellt.

Am klarsten liegen die Verhältnisse für die letzte Vereisung (Würmeiszeit), deren Ende ja nur 10 000 Jahre - manche Forscher meinen sogar nur 6 000 Jahre - zurückliegt. Aus Untersuchungen vor allem im Mittelmeergebiet schließen Geologen auf eine Absenkung des Meeresspiegels in der Würmeiszeit von 90 - 100 m. Umgekehrt kann man auch von Schätzungen der Eismassen ausgehen, die Absenkung des Meeresspiegels aus theoretischen Berechnungen ableiten, und dann in der Natur nach entsprechenden Merkmalen suchen. Schätzungen vergangener Eismassen schwanken allerdings sehr stark.

Solche Probleme haben auch stärksten Bezug zur Geodäsie. Große Massenverlagerungen haben einen Einfluß auf die Erdfigur. So ist z.B. nach meiner Meinung die gegenwärtige globale Form des Geoides ("Birnenform") eine unmittelbare Folge der letzten Vereisung (BRETTERBAUER, 1975). Bei der Lektüre einschlägiger geologischer Publikationen oder Lehrbücher fällt jedoch dem Geodäten auf, daß obiges Problem

nur sehr oberflächlich formuliert wird. Meist wird nur das der Eismenge entsprechende Wasservolumen durch die Fläche der Weltmeere dividiert und das Ergebnis als mittlere Hebung - oder Senkung - ausgewiesen. In einem bekannten Lehrbuch der Geologie steht sogar zu lesen: "Eustatic changes of sea-level which, being uniform all over the world,.....". Das ist natürlich falsch. Die infolge der Massenverlagerung auftretenden Deformationen der Äquipotentialflächen und die Verschiebung des Schwerpunkts der Erde finden nirgends Erwähnung.

Die korrekte Lösung des Problems wurde seit etwa 100 Jahren mehrfach von Geodäten und Geophysikern versucht. Es wird auf den ausgezeichneten Übersichtsartikel von W.KICK, 1971, verwiesen. Eine darin leider nicht berücksichtigte Arbeit stammt von L.A.KIVIOJA, 1967.

Da m.W. keiner der Autoren die geographische Verteilung der Kontinente berücksichtigt, wird das Problem hier neu aufgegriffen und näherungsweise gelöst. Eine strengere numerische Untersuchung soll einer umfangreicheren Arbeit vorbehalten bleiben.

## B) PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSWEG

Gegeben seien genau lokalisierte und quantifizierte Eismassen. Gesucht sind die Änderungen des Meeresniveau unter Berücksichtigung der geographischen Verteilung der Kontinente. Als Demonstrationsbeispiel wurde das totale Abschmelzen aller gegenwärtigen Eismassen der Erde angenommen. Nicht berücksichtigt wird dabei die ausgleichende Wirkung der Isostasie. Sie setzt mit großer Zeitverzögerung ein. Es sei hier vereinfachend angenommen, daß sie nach dem Abschmelzen noch nicht merklich wirksam werden konnte. In die geplanten vertieften Berechnungen soll sie dagegen aufgenommen werden. Weiters wird hier die Vergrößerung der Meeresfläche durch Überflutung vernachlässigt. Auch wurde die Tatsache außer acht gelassen, daß Teile des antarktischen Eises unter dem Meeresniveau

liegen.

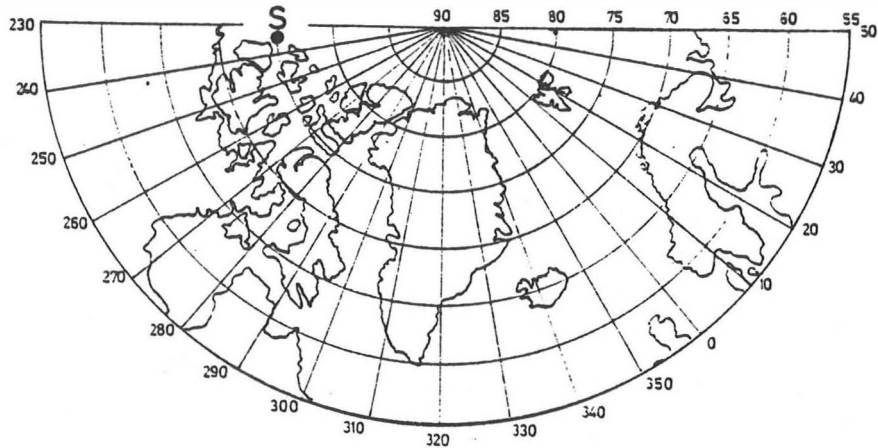
Die Ausgangswerte der Berechnung wurden der Tabelle in BRETTERBAUER, 1975, entnommen.

	Fläche	Volumen	Masse	%
Antarktis	$13,9 \cdot 10^6 \text{ km}^2$	$29,0 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	$26,7 \cdot 10^{18} \text{ kg}$	90
Grönland	1,8	2,66	2,45	9
Rest	0,5	0,24	0,22	1
<hr/>				
Summe	$16,2 \cdot 10^6 \text{ km}^2$	$31,9 \cdot 10^6 \text{ km}^3$	$29,4 \cdot 10^{18} \text{ kg}$	100

Die Werte sind etwas höher als bei den meisten anderen Autoren, stimmen aber mit den Werten von KICK, 1970, überein. Es ist interessant festzustellen, daß mit zunehmender Erforschung des Eises die Zahlen wachsende Tendenz zeigen. Zum Eis der Gebirgsgletscher, in der Tabelle unter "Rest" ausgewiesen, wäre zu sagen, daß der einzelne Gletscher zu klein ist, um eine merkbare Deformation der Niveaufläche bzw. Verschiebung des Erdschwerpunkts zu bewirken. Daher wurde die Lage der Inlandgletscher nicht berücksichtigt, wohl aber ihre Gesamtmasse, die immerhin 1 % des irdischen Eises ausmacht. Allerdings kann man einwenden, daß sicherlich nicht alles Wasser der abgeschmolzenen Gletscher das Meer erreicht.

Nun wurden alle Gebiete der Erde, wo eine Massenänderung eintritt (positiv auf den Meeren, negativ in Grönland und Antarktika) in 504 annähernd quadratische Teilstücke zerlegt, deren Ausdehnung in Äquatornähe  $10^0 \times 10^0$ , in Polnähe  $40^0 \times 5^0$  betrug. Die Art der Zerlegung von Grönland und Antarktis ist den Abbildungen 1, 1a, 2 und 2a zu entnehmen. Die Flächen der schematisierten Ersatzgebiete für Grönland und Antarktis entsprechen genau den tatsächlichen Werten. Die Mächtigkeiten der Eisdecken wurden so angenommen, daß das Gesamtvolumen den Werten der Tabelle entspricht. In Grönland ist das einheitlich 1300 m Eis = 1196 m Wasser (bei einer Eisdichte von  $0,92 \text{ g cm}^{-3}$ ); in Antarktis zum größten Teil 2000 m = 1840 m Wasser, in einem kleineren Teil 3000 m =

Abbildung 1



Die Abbildung 1 zeigt Grönland in stereographischer Polarprojektion. Punkt S ist jener Punkt, auf den der Vektor der Schwerpunktsverschiebung zeigt. Er liegt unweit des magnetischen Südpols.

Abbildung 1a

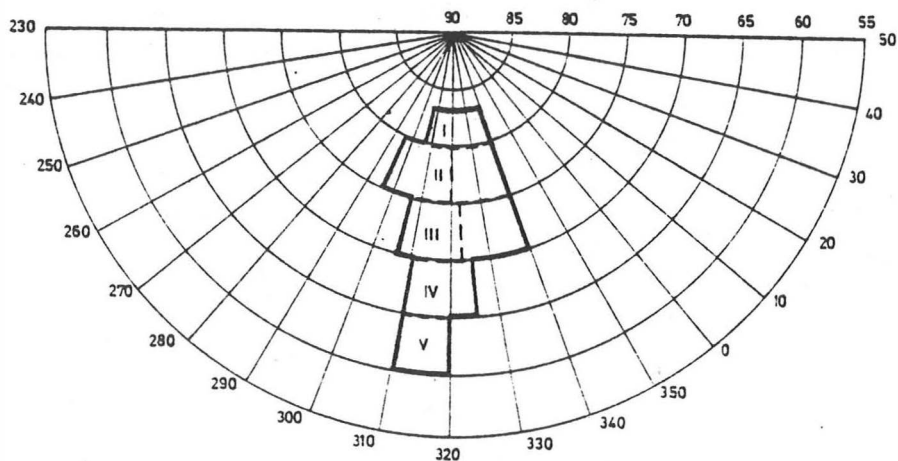
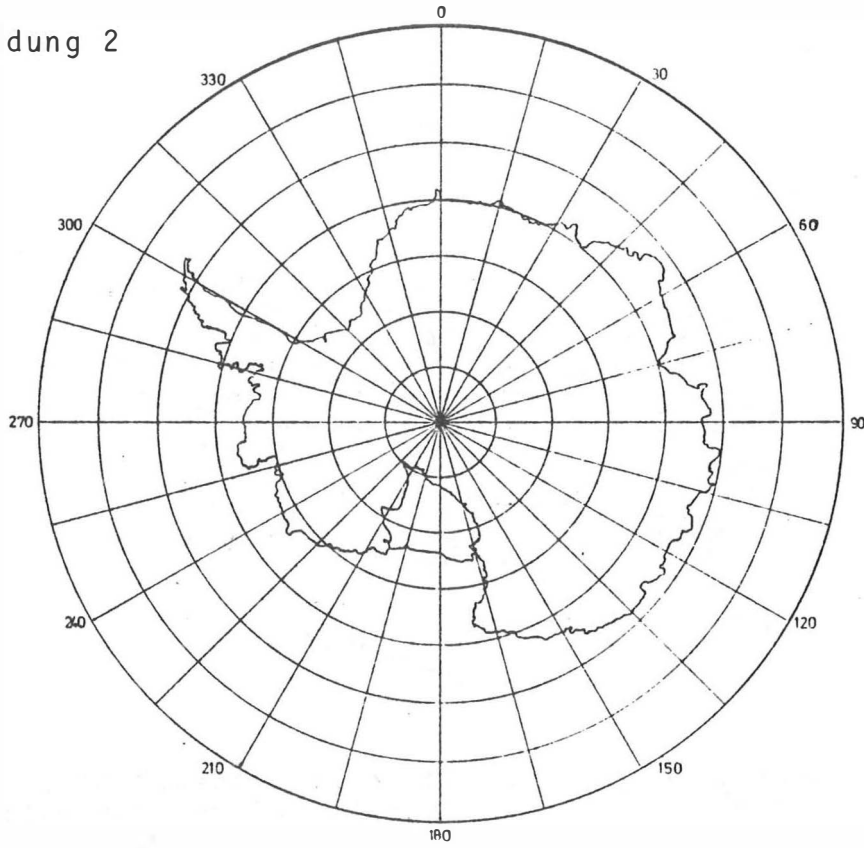


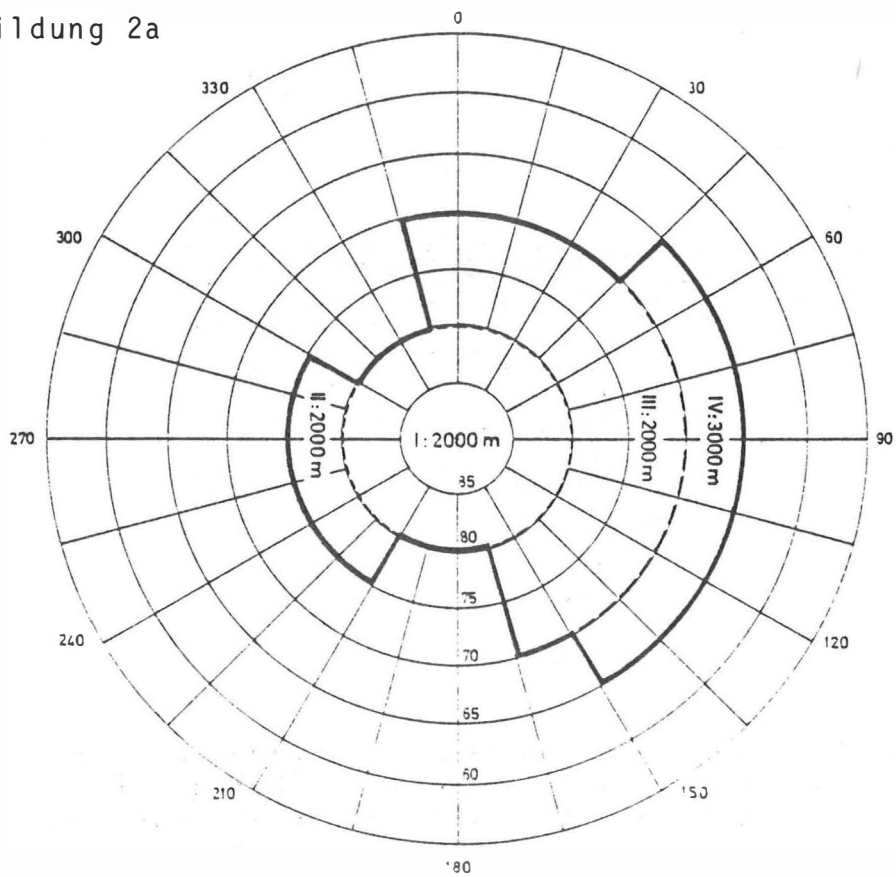
Abbildung 1a zeigt die Schematisierung von Grönland und die Einteilung in 5 Kompartments. Auf Flächengleichheit des schematisierten und tatsächlichen Kontinents wurde geachtet.

Abbildung 2



Die Abbildung 2 zeigt die Antarktis in stereographischer Polarprojektion

Abbildung 2a



2760 m Wasser. Die Schematisierung der Kontinente erfolgte in ganz ähnlicher Weise.

Da die Fläche der Meere  $362 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  beträgt, ergibt die Verteilung der gesamten Eismasse von  $29,4 \cdot 10^{18} \text{ kg}$  eine Belegung mit einer Wasserschicht von 81 m. Das ist der Mittelwert der Meeresspiegeländerung über das ganze Weltmeer. Er sagt nichts aus über die Hebung - oder Senkung - des Meeresspiegels an einer bestimmten Küste. Vielfach wird sofort an diesen Mittelwert die Betrachtung geknüpft, wie viel Land dadurch überflutet wird. Einer von KOSSINNA erarbeiteten Tabelle über die Häufigkeitsverteilung der Höhen und Tiefen der Erdoberfläche (siehe EGYED, 1969) entnimmt man, daß  $37 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  eine Höhe zwischen 0 und 200 m haben. Also schließt man daraus, daß eine Meeresspiegelhebung von 81 m  $15 \cdot 10^6 \text{ km}^2$  Land überschwemmen würde. Auch diese Überlegung ist zu einfach; sie berücksichtigt nämlich nicht die geographische Lage der abgeschmolzenen Eismasse.

Die Berechnung der Meeresspiegeländerung erfolgt nun in 3 Schritten.

a) Berechnung der Niveauflächendeformation

Die sich anbietende Berechnungsmethode wäre eine Entwicklung nach harmonischen Polynomen. Diese soll jedoch der vertieften Untersuchung vorbehalten bleiben. Hier wurde ein vereinfachtes Verfahren gewählt, das für den beabsichtigten Zweck genügend genau ist. Von jedem der früher genannten 504 von Meridianen und Parallelkreisen begrenzten Teilstücke wird die Fläche

$$(1) \quad F = R^2 (\sin \phi_2 - \sin \phi_1) \cdot \Delta \lambda \quad , \quad R = \text{Erdradius}$$

und die Masse der (positiven oder negativen) Belegung berechnet:

$$(2) \quad m = F \cdot D \quad ,$$

worin D die Dicke der Belegung ist (auf dem Meer ist  $D = + 81 \text{ m}$ , auf Grönland bzw. Antarktis  $- 1196 \text{ m}$  bzw.  $- 1840$  und  $- 2760 \text{ m}$ ).



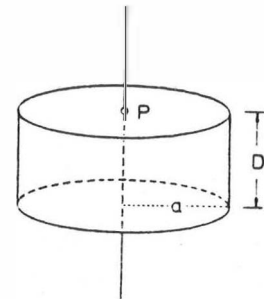
Das Kompartiment wird durch eine Kreisscheibe gleicher Fläche ersetzt mit dem Radius

$$(3) \quad a = \sqrt{\frac{F}{\pi}} .$$

Das Potential eines solchen Kreiszyinders auf den Punkt seiner Achse in der Oberfläche ist

$$(4) \quad v = 2\pi G \rho a D,$$

mit  $G$  = Gravitationskonstante  
 $\rho$  = Dichte.



Damit folgt die Hebung der Niveauläche in  $P$  zu

$$(5) \quad h = \frac{v}{g} , \quad g = \text{Erdschwerebeschleunigung.}$$

$g$  darf man hier durch  $g = \frac{4}{3} \pi G R \rho_m$  ersetzen.

Da die mittlere Dichte der Erde  $\rho_m = 5,52$  und  $\rho = 1$  ist, folgt endgültig:

$$(6) \quad h = 0,272 \cdot \frac{a}{R} \cdot D , \quad R = 6371 \text{ km.}$$

Das ist die Wirkung eines Kompartments auf sich selbst. Nun muß noch die Wirkung eines jeden Kompartments auf jedes andere berechnet werden. Das darf nun schon genügend genau so erfolgen, als wären die zylindrischen Scheiben Punktmassen. Das Potential einer Punktmasse ist

$$(7) \quad v' = \frac{Gm}{d}$$

wenn  $m$  die Punktmasse,  $d$  den Abstand der Masse bedeutet.  $d$  wird aus den sphärischen Koordinaten  $(R, \phi, \lambda)$  der Punkte berechnet. Die Höhenänderung der Niveauläche folgt wie in (5), nun aber drückt man besser  $g$  durch

$$(8) \quad g = \frac{GM}{R^2}$$

aus;  $M$  = Gesamtmasse der Erde =  $5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ .

Also

$$(9) \quad h' = \frac{m}{M} \cdot \frac{R^2}{d} .$$

Für jedes Kompartiment ist dann die Summe aller  $h'$  zu  $h$  aus (6) hinzuzufügen.

b) Berechnung der Verschiebung des Erdschwerpunktes

Beim Abschmelzen des Eises werden gigantische Massen vom Südpol weg über 70 % der Erde verteilt. Dies bewirkt eine Verschiebung des Schwerpunkts, der die Weltmeere folgen; das Festland aber, in bezug auf dessen Küsten ja die Meeresspiegeländerungen gemessen werden sollen, bleibt von der Schwerpunktsverlagerung unberührt! Wollte man das neue Meeresspiegelniveau auf den neuen Schwerpunkt beziehen, so hätte die Anbringung der Schwerpunktsverschiebung zu unterbleiben. Gesucht ist aber das neue Meeresspiegelniveau in bezug auf den alten Schwerpunkt, der gewissermaßen durch die Kontinente repräsentiert wird. Auch hier haben besondere Überlegungen gezeigt, daß im Rahmen der angestrebten Genauigkeit die einzelnen Kompartiments durch Punktmassen ersetzt werden dürfen.

Die Komponenten des Verschiebungsvektors eines einzelnen Kompartiments sind:

$$\begin{aligned} \Delta \xi &= \frac{m}{M} \cdot R \cos \phi \cos \lambda \\ (10) \quad \Delta \eta &= \frac{m}{M} \cdot R \cos \phi \sin \lambda \\ \Delta \zeta &= \frac{m}{M} \cdot R \sin \phi \end{aligned}$$

Die Addition aller einzelnen Verschiebungsvektoren gibt schließlich den Vektor der Gesamtverschiebung. Die Berechnung ergab

$$(11) \quad \vec{s} = \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} - 3,5 \text{ m} \\ - 5,0 \text{ m} \\ + 22,1 \text{ m} \end{pmatrix}$$

Der Betrag der Verschiebung ist  $s = 22,94 \text{ m}$  in Richtung auf den Punkt  $S(\phi = 74,5^\circ; \lambda = 235^\circ)$ . Er ist in der Abbildung 1 markiert.

Aus Vektor (11) ist nun für jedes Kompartiment die Komponente  $t$  des Verschiebungsvektors senkrecht zum jeweiligen Kompartiment zu berechnen. Das geschieht durch Projektion des Verschiebungsvektors  $\vec{s}$  auf die Normale des Kompartiments; ist  $\theta$  der Winkel den Verschiebungsvektor und Ortsvektor eines Kompartiments einschließen, dann gilt:

$$(12) \quad t = s \cdot \cos \theta \quad \text{mit} \\ \cos \theta = \sin \phi \sin \phi_0 + \cos \phi \cos \phi_0 \cos(\lambda - \lambda_0).$$

Es ist sofort einleuchtend, daß entlang eines Großkreises der normal auf  $\vec{s}$  steht die Meeresspiegeländerung wegen Schwerpunktsverschiebung gleich Null ist.

### c) Herstellung der Volumsgleichheit

Die aus a) und b) folgende Gesamthöhenänderung eines Meereskompartiments ist

$$(13) \quad H_i' = (h + \sum_{503} h' + t)_i .$$

(Die Höhenänderung der Niveaufläche in Grönland und Antarktis interessiert in diesem Zusammenhang nun nicht mehr).

In dem  $H_i'$  eines Meereskompartiments ist aber der 81 m hohe Wasserzuwachs noch nicht enthalten! Um das einzusehen, denke man sich in den Abschnitten a) und b) die 81 m-Schicht durch eine unendlich dünne Flächenbelegung entsprechender Flächendichte ersetzt. Nun ist keine materielle Wasserschicht den einzelnen Kompartiments hinzugefügt worden, die Potentialwirkung und die Wirkung der Schwerpunktsverschiebung ist aber gegeben. Die Volumsänderung des Meeres bei einer Flächenbelegung (Kondensation) ist gleich Null, d.h. es muß gelten:

$$(14) \quad \frac{\sum_{\text{Meer}} (H_i' \cdot F_i)}{\text{Meeresfläche}} = 0 .$$

Der tatsächlich aus der Berechnung sich ergebende Wert von (14) ist +0,4 m; dieser Betrag ist von allen Meereskompartiments zu subtrahieren, um Volumsgleichheit herzustellen.

Über dieser neuen Niveaufläche ist nun die Wassermasse von  $29 \cdot 10^{18}$  kg auszugießen, d.h. wegen der Dichte  $\rho = 1$  muß der Volumszuwachs der Weltmeere gleich  $29 \cdot 10^{15}$  m<sup>3</sup> sein, daher sind alle  $H_i'$  der Meereskompartments um 81 m zu vergrößern:

$$(15) \quad H_{i, \text{Meer}} = H_i' + 81 \text{ m} .$$

### C) DAS ERGEBNIS

Das Resultat wurde in Tabellenform von der Rechenanlage ausgedruckt, wird hier aber nur graphisch wiedergegeben. Die Abbildung 3 zeigt die Kontinente in quadratischer Plattkartenprojektion. Die Mittelpunkte der Meereskompartments sind durch Punkte gekennzeichnet, mit beigefügter Höhenänderung. Die Abb.3 wurde mit Hilfe eines Programms von Dipl.Ing.ANTES automatisch gezeichnet. Nur die Linien gleicher Höhenänderung wurden von Hand eingezeichnet. Herr ANTES hat mich auch bei den Berechnungen unterstützt, wofür ich ihm Dank sage.

### D) DIE KONSEQUENZEN

Wie man sofort sieht, ist die eustatische Meeresspiegeländerung keineswegs "uniform all over the world". Die wahren Verhältnisse zeigt Abbildung 3, in der Linien gleicher Meeresspiegeländerung im Abstand von 10 m eingezeichnet wurden. Eine Wiedergabe des Computer-Ausdrucks der Änderungen würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

Die Hebung des Meeresspiegels an den Küsten Nordeuropas und Sibiriens beträgt mehr als 100 m und würde gewaltige Gebiete überschwemmen. Das Mittelmeer steigt um 95 - 99 m. Überflutungen sind vor allem an den großen Flußmündungen zu erwarten. In Abb. 3 sind die überfluteten Gebiete nur ganz grob durch Schraffung angedeutet. Man beachte, daß an weiten Teilen der Küste der Antarktis der Meeresspiegel sinken würde, in der Gegend des Ross-Eisshelms um mehr als 23 m! Am Südpol erreicht die Depression der Niveaufläche in Höhe der ursprünglichen Meeresoberfläche gar - 154 m. Der Wert ist deshalb so besonders groß, weil auf dem Kontinent der Wasser-



zuwachs von + 81 m wegfällt. Am Nordpol dagegen wird der Meeresspiegel um 108 m gehoben. Es tritt also klar eine Aufwölbung der globalen Niveauflächen am Nordpol und eine Depression am Südpol auf. Macht man die hypothetische Annahme, die Erde sei vor dem Abschmelzen im hydrostatischen Gleichgewicht gewesen, es hätte also Symmetrie zur Äquator-ebene geherrscht, so zeigt sich nun nach dem Abschmelzen diese Symmetrie gestört und die Erde würde "Birnenform" annehmen, genauso wie dies in BRETTERBAUER, 1975, qualitativ abgeschätzt wurde. Die gegenwärtige, eindeutig nachgewiesene Birnenform der Erde ist eine Folge des Abschmelzens der pleistozänen Vereisung. Die Tatsache, daß diese weniger ausgeprägt ist als in dem hier berechneten Modell, ist eine Folge des isostatischen Massenausgleichs, der ja noch keineswegs abgeschlossen ist.

Für die Geodäsie und Astronomie mindestens ebenso interessant sind die im Gefolge von Massenverschiebungen auftretenden Änderungen der dynamischen Parameter der Erde. In erster Linie interessieren die Trägheitsmomente und mit ihnen verknüpfte Parameter. Bezüglich der Beziehungen zwischen den Parametern muß auf die Literatur verwiesen werden (z.B. LEDERSTEGGER, 1969). Für die Berechnung der Änderungen der Trägheitsmomente konnten die positiven und negativen Belegungen wieder als Punktmassen aufgefaßt werden. Sind  $x, y, z$  die Koordinaten dieser Punktmassen, dann folgen die Änderungen der Trägheitsmomente aus:

$$\begin{aligned} \Delta A &= \sum_1^{504} (y^2 + z^2) dm = - 0,436 \cdot 10^{40} \text{ g cm}^2 \\ (16) \quad \Delta B &= \sum (z^2 + x^2) dm = - 0,357 \cdot 10^{40} \\ \Delta C &= \sum (x^2 + y^2) dm = + 0,757 \cdot 10^{40} . \end{aligned}$$

Die ebenfalls wichtigen Deviationsmomente wurden in dieser Übersichtsarbeit nicht berechnet. Die folgende Tabelle gibt eine Zusammenstellung der gegenwärtig gültigen Werte

einiger dynamischer Parameter (nach MORITZ, 1980 und ABALAKIN, 1982) in Gegenüberstellung zu den Werten nach der Abschmelzung:

Parameter	derzeitiger Wert	veränderter Wert
Gravitationskonstante	$G = 66,72 \cdot 10^{-9} \text{ g}^{-1} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-2}$	---
Erdmasse	$M = 5,974 \cdot 10^{27} \text{ g}$	---
große Halbachse	$a = 6\,378\,137 \text{ m}$	6 378 220 ??
Winkelgeschw.	$\Omega = 7292115 \cdot 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$	$7292046 \cdot 10^{-11}$
Tageslänge	$T = 86\,164,10 \text{ s}$	86 164,91
Trägheitsmoment	$A = 80101,25 \cdot 10^{40} \text{ g cm}^2$	$80100,81 \cdot 10^{40}$
	$B = 80101,25 \cdot 10^{40}$	80100,89
	$C = 80364,355 \cdot 10^{40}$	80365,112
	$C - \frac{1}{2}(A + B) = 263,11 \cdot 10^{40}$	264,26
Formfaktor	$J_2 = 1082,637 \cdot 10^{-6}$	$1087,3730 \cdot 10^{-6}$
dynamische Abplattung	$H = 3273,952 \cdot 10^{-6} = 1/305,44$	1/304,11
Eulerperiode $T_E$	$T_E = 303,6 \text{ Tage}$	302,3

Der Leser möge sein Augenmerk weniger auf die absoluten Werte als vielmehr auf deren Veränderungen legen. Wie von vornherein zu erwarten war, wächst das Trägheitsmoment um die Rotationsachse C und daher muß wegen der Konstanz des Drehimpulses die Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  abnehmen und damit die Tageslänge zunehmen. Aus

$$(17) \quad \Omega \cdot C = \text{const.}, \quad \Omega = 2\pi/T \quad \text{folgt}$$

$$(18) \quad \Delta\Omega = -\frac{\Delta C}{C} \cdot \Omega, \quad \Delta T = -\frac{\Delta\Omega}{\Omega} \cdot T = \frac{\Delta C}{C} \cdot T.$$

Daraus errechnet sich die Tagesverlängerung zu  $\Delta T = + 0,81 \text{ s}$ .

Nimmt man (wie in der Tabelle stillschweigend geschehen) für die Erde vor der Abschmelzung Rotationssymmetrie an ( $A=B$ ), so bewirkt die Abschmelzung eine leichte Dreiachsigkeit. Diese kann durch

$$(19) \quad e = \frac{\frac{1}{B} - \frac{1}{A}}{\frac{2}{C} - \left[ \frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right]} = 1,519 \cdot 10^{-4} = 1/6585$$

charakterisiert werden. Der Wert stellt eine dynamische Abplattung der Äquatorellipse dar.

Damit sind aber noch lange nicht alle Konsequenzen gezogen. Die Änderung der Trägheits- und Deviationsmomente und die Tatsache, daß die Schwerpunktsverschiebung nicht in Richtung der Rotationsachse erfolgt, muß eine merkliche Polbewegung einleiten. Aussagen darüber erfordern jedoch wesentlich tieferschürfende Untersuchungen, die einer anderen Studie vorbehalten bleiben sollen. Als wichtigste Erkenntnis bleibt die Deutung der Birnenform der Erde als Folge des Abschmelzens der letzten großen Vereisung.

#### L I T E R A T U R :

- ABALAKIN, V.: Kinoshita's Theory of the Rotation of the Rigid Earth; Lecture Notes, Third International Summer School in the Mountains, Admont, 1982
- ANTES, E.: Erstellung kartographischer Netzentwürfe auf dem Plotter Coragraph DC-2; Diplomarbeit, TU Wien, 1982
- BRETTNERBAUER, K.: Aspekte einer Glazialgeodäsie; Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 7, Wien, 1975
- EGYED, L.: Physik der festen Erde, Budapest, 1969
- KICK, W.: Das Eis der Erde und die Geodäsie; ZfV.Nr.11,1971  
Present Knowledge on Glacial Eustasy; Report on the Symposium of Coastal Geodesy, TU München, 1970
- KIVIOJA, L.: Effects of Mass Transfers Between Land-Supported Ice Caps and Oceans on the Shape of the Earth and on the Observed Mean Sea Level; Bulletin Geodésique, Nr.85, 1967
- LEDERSTEGGER, K.: Astronomische und Physikalische Geodäsie; Handbuch der Vermessungskunde, Bd.V, Stuttgart, 1969
- MORITZ, H.: Geodetic Reference System 1980; Bulletin Geodésique, The Geodesists Handbook, 1980
- WOLDSTEDT, P.: Das Eiszeitalter, Stuttgart, 1954