Der durch das Abschmelzen der Polkappen sowie des Inlandeises verursachte Anstieg des Meeresspiegels als Folge zunehmender Erderwärmung

1 Einleitung

Als vor rund 10000 Jahren die letzte Eiszeit endete, vollzogen sich damit verbunden globale Veränderungen größten Ausmaßes. Nicht nur, daß weite Gebiete allmählich eisfrei wurden und sich mit einer Vegetation überzogen, es hob sich durch das Abschmelzen der gewaltigen Eismassen auch der Meeresspiegel auf sein heutiges Niveau. Die Beringstraße, die vormals eine Landbrücke zwischen Asien und Amerika bildete, schnitt die nach dort eingewanderten Indianer vom Rest der Welt ab, Amerika nahm von da an eine eigenständige Entwicklung. Die Aborigines, die Ureinwohner Australiens, konnten diesen zuvor unbewohnten Kontinent nur deshalb besiedeln, weil gleichfalls eine Landbrücke zum benachbarten Indonesien bestand. Stets schoben sich während einer Kälteperiode die Eismassen aus den kälteren Regionen, die naturgemäß in den höheren Breiten liegen, in die niedrigeren Breiten vor. So endeten damals die Gletscher Norwegens unmittelbar vor der Haustüre Hamburgs, und die Moränen des Voralpenlandes lassen erahnen, wie weit sich das Eis aus den Alpen in Richtung Donauniederungen erstreckte. Damit verbunden änderte sich jeweils auch das Verbreitungsgebiet ganzer Pflanzenarten. So konnte beispielsweise die höhere Niederschläge liebende Buche sich nach der Eiszeit in die nördlicheren Zonen ausbreiten, während sich die reinen Nadelwälder in größere Höhen zurückziehen mußten.

Ein Teil des auf der Erde vorkommenden Wassers ist an den Polkappen in Form von Eis gebunden. Weil Eis eine geringere Dichte als Wasser hat, schwimmt es oben auf. Eine anschauliche Vorstellung davon liefert das berühmte Bild des treibenden Eisbergs, bei dem nur 1/10 aus dem Wasser herausragt, während 9/10 seines Volumens eingetaucht sind. Wenn sogenanntes Schelfeis abschmilzt, Eis also, welches sich nicht über Land gebildet hat, sondern über der Wasseroberfläche, füllt der über die Wasserfläche hinausragende Teil genau das Volumen auf, welches noch fehlt, um den Wasserspiegel wieder auszugleichen, und zwar, weil das verdrängte Wasservolumen sich zum Volumen des schwimmenden Eises umgekehrt gleich verhält wie die Dichte von Wasser zu der von Eis. Wenn also durch das Gefrieren von Wasser dessen Dichte geringer wird, muß zugleich sein Volumen größer werden. Eis also, welches sich über Wassermassen gebildet hat, trägt bei seinem Abschmelzen nichts zu einem Ansteigen des Meeresspiegels bei, wohingegen Eis, das auf Landflächen aufsitzt, den Wasserspiegel der Ozeane erhöht, da bekanntlich alles Wasser ins Meer abfließt. Somit dürfen in einer Berechnung des Ansteigens des Meeresspiegels, die wir im folgenden vornehmen wollen, nur diejenigen Eisflächen zugrunde gelegt werden, die tatsächliche Landflächen sind.

Die Erdoberfläche hat eine Größe von 500 Mill. km^2. Davon sind 71 % mit Wasser bedeckt. Die größten Eismassen, die sich über Landflächen befinden, liegen in der Antarktis, in Grönland und in Island, wobei nicht nennenswerte Teile noch auf das Patagonische Inlandeis und die Gletscher der Gebirge entfallen. In der Antarktis sind rund 90 % der Süßwasservorkommen der Erde gebunden. Bei einer Fläche von 11,9 Mill. km^2 beträgt die mittlere Dicke der antarktischen Eismassen etwa 2200 m. Die zweitgrößten eisbedeckten Landmassen besitzt Grönland, mit einer Fläche von knapp 2,2 Mill. km^2 und einer mittleren Dicke des Inlandeises, bezogen auf die eisbedeckte Fläche, von 1965 m. Dort sind etwa 10 % der Süßwasservorräte der Erde gebunden. Einen kaum mehr nennenswerten Beitrag hinsichtlich Fläche (103000 km^2) und mittlerer Eisdicke (225 m) liefert Island. Wir möchten nun wissen, um wie viele Meter der Meeresspiegel ansteigen würde, wenn alle diese Eismassen teilweise oder vollständig abschmelzen, und zweitens, wie schnell das geschehen wird. Verschiedene Prognosen sagen nämlich ein Ansteigen der mittleren Erdtemperatur voraus.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Allgemeines

Wenn Eis, das ja nichts anderes ist als gefrorenes Wasser, zu schmelzen beginnt, ändert es seine Dichte, sein Volumen nimmt ab, denn bekanntlich ist die Dichte von Wasser größer als die von Eis; daher schwimmt freies Eis auf Wasser. Die Masse des Eises bleibt bei dieser Phasenumwandlung jedoch konstant. Unterteilen wir die Erde in j einfach zusammenhängende Eisgebiete, so gilt nach dem Satz von der Erhaltung der Masse:

$$\sum_j \rho \cdot f_j A_j d_j = \text{const}$$

wobei über alle Eisgebiete zu summieren ist. Die darin vorkommenden Größen haben folgende Bedeutung:

ρ	Dichte von Eis
f_j	Prozentuale Eisbedeckung
A_j	Landfläche mit prozentualer Eisbedeckung
d_j	Mittlere Dicke des Eises

Das einfachste Modell, den Anstieg des Meeresspiegels d_w zu berechnen, bezogen auf das Normalnull von heute, benötigt lediglich die mit Wasser bedeckte Erdoberfläche f_eA_e und die gesamten, mit Eis bedeckten Landflächen f_jA_j sowie deren mittlere Eisdicken d_j und die Dichten von Wasser und Eis, ρ_w bzw. ρ_i. Dabei stellen A_e und A_j die tatsächlichen Landflächen der bezeichneten Gebiete dar und f_j die jeweiligen mit Wasser bzw. Eis bedeckten Anteile. So ist etwa der Anteil f_e der mit Wasser bedeckten Erdoberfläche gleich f_eA_e. Eis, welches auf Wasser schwimmt, trägt zum Anstieg des Meeresspiegels nach dem eingangs Gesagten nichts bei, da es nach dem Abschmelzen genau das Volumen ausfüllt, welches im gefrorenen Zustand ins Wasser eintaucht.

Seien A_i, A_g und A_a die Landflächen von Island, Grönland und der Antarktis und f_i, f_g und f_a die entsprechenden, mit Eis bedeckten Anteile in Prozent, so ergibt sich die gesamte eisbedeckte Erdoberfläche aus der Summe der gewichteten Einzelflächen. Nach dem Satz von der Erhaltung der Masse gilt für den Übergang vom festen in den flüssigen Zustand, gesetzt den Fall, daß alles Eis abgeschmolzen ist, die Relation:

$$\rho_w f_e A_e d_w = \rho_i f_i A_i d_i + \rho_i f_g A_g d_g + \rho_i f_a A_a d_a \qquad (1)$$

Dabei sind d_i, d_g und d_a die mittleren Eismächtigkeiten für Island, Grönland und die Antarktis, die, da sie ja unterschiedlich stark sind, jeweils ein anderes Symbol erhalten.

Die von Gletschern bedeckten Landoberflächen des Inlandeises haben wir der Einfachheit halber vernachlässigt, da sie keinen nennenswerten Beitrag liefern. Die Temperaturabhängigkeit von Längenausdehnung und Dichte vernachlässigen wir in erster Näherung ebenso wie den erhöhten Wassergehalt der Atmosphäre bei steigender Temperatur. Aufgelöst nach der Anstiegsvariablen erhalten wir:

$$d_w = \frac{\rho_i \left(f_i A_i d_i + f_g A_g d_g + f_a A_a d_a \right)}{\rho_w f_e A_e}. \qquad (2)$$

2.2 Parameter

Den in Gleichung (2) angegebenen Größen liegen folgende Parameterwerte zugrunde:

A_i	103000 km^2	Fläche Islands
A_g	2176086 km^2	Fläche Grönlands
A_a	11900000 km^2	Fläche der Antarktis
A_e	500000000 km^2	Gesamte Erdoberfläche
f_i	11 %	Prozentualer Eisanteil Islands
f_g	84 %	Prozentualer Eisanteil Grönlands
f_a	98 %	Prozentualer Eisanteil der Antarktis
f_e	71 %	Anteil der wasserbedeckten Erdoberfläche
d_i	225 m	Mittlere Eisdicke Islands
d_g	1965 m	Mittlere Eisdicke Grönlands
d_a	2200 m	Mittlere Eisdicke der Antarktis
ρ_w	0.999868 kg/l	Dichte von Wasser bei 0 °C
ρ_i	0.9168 kg/l	Dichte von Eis bei 0 °C

Mit diesen Zahlenwerten ergibt sich, wenn alles Eis der Erde abgeschmolzen ist, ein Anstieg des Meeresspiegels um 76 m. Dem Höhenrelief der Erde, d.h. einer Vergrößerung der gesamten Wasseroberfläche aufgrund von Überflutung tiefliegender Gebiete, die nur knapp über dem Meeresspiegel liegen, wurde dabei nicht Rechnung getragen.

3 Verschiedene Modelle des Abschmelzvorgangs

Entscheidend für das Weitere ist nun die Art und Weise, wie das Abschmelzen modelliert wird, denn die uns interessierende Frage ist nicht nur der absolute Anstieg, sondern auch in welchem Ausmaß und wie schnell sich der Schmelzprozeß vollzieht.

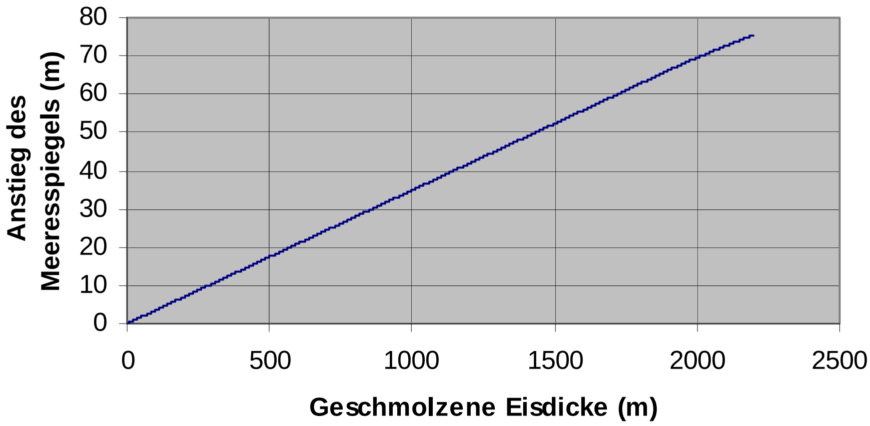
3.1 Modell 1 - Eindimensionales Schmelzen

Das einfachste Modell macht Gebrauch von einem gleichmäßigen Schmelzen in der Dicke, wobei das seitliche Abschmelzen, da die Eisdicken weitaus geringer sind als die Ausdehnungen, demgegenüber vernachlässigt wird. Auch dürfte aufgrund der geographischen Breite klar sein, daß bei gleichmäßigem Abschmelzen zuerst Island eisfrei sein wird, ehe Grönland folgt und zuletzt die Antarktis. Führen wir also in Gl. (2) eine variable Größe d für die Schmelzdicke ein, so ergibt sich die folgende abschnittsweise definierte Gleichung:

$$d_w = \begin{cases} \dfrac{\rho_i\left(f_iA_i + f_gA_g + f_aA_a\right)\cdot d}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } d \le d_i \\ \dfrac{\rho_i\left(f_iA_id_i + (f_gA_g + f_aA_a)\cdot d\right)}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } d_i \le d \le d_g \\ \dfrac{\rho_i\left(f_iA_id_i + f_gA_gd_g + f_aA_a\cdot d\right)}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } d_g \le d \le d_a \end{cases} \tag{3}$$

Für $d = d_a$ erhalten wir am Ende wieder Gl. (2).

Abb. 1



Die Berechnung ergibt, daß der Meeresspiegel um 7,8 m ansteigt, nachdem weltweit Eis bis zur Eismächtigkeit Islands abgetaut ist, d.h. ganz Island eisfrei ist, um 68,5 m für den Fall, daß alles Eis bis zur Eismächtigkeit Grönlands völlig verschwunden ist, d.h. auch ganz Grönland eisfrei geworden ist, und, wie wir schon oben gesehen haben, um 75,5 m, wenn alles Eis der Welt zur Gänze abgeschmolzen ist. Die Ergebnisse sind anschaulich in Abb. 1 dargestellt.

Dieses Modell hat die Schwäche, daß die Annahme, daß das Abschmelzen trotz unterschiedlicher geographischer Breite mit der gleichen Rate erfolgt, nicht zutrifft, und ist daher ungenau und nur eine erste Näherung. Es würde zutreffende Ergebnisse liefern, wenn die jahreszeitliche Temperaturverteilung der Erde räumlich konstant wäre, d.h. wenn auf Island und Grönland im Mittel ganzjährig die gleiche Temperatur herrschen würde wie auf der Antarktis. Die wahre Temperaturverteilung der Erde folgt jedoch einer mit der Jahreszeit sich ändernden und jährlich sich wiederholenden Abhängigkeit von der geographischen Breite. Die Änderungsgeschwindigkeit des Anstiegs ist hier proportional zur noch nicht geschmolzenen Eisfläche, daher ist zwischen Island und Grönland ein etwas steilerer Anstieg feststellbar als zwischen Grönland und Antarktica.

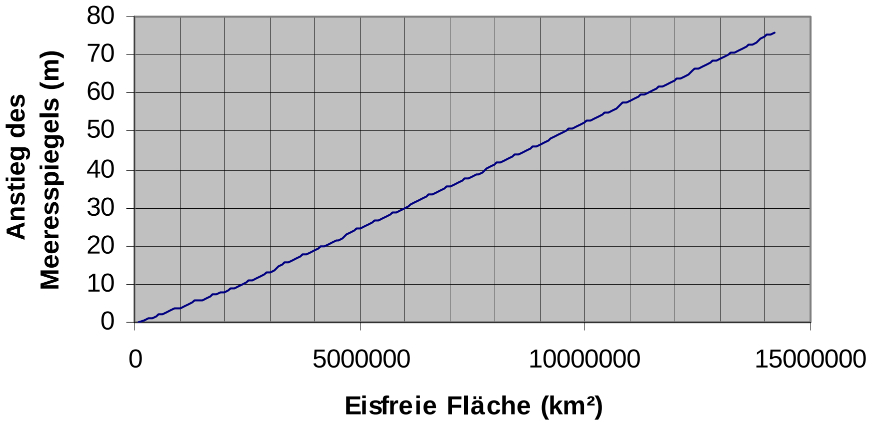
3.2 Modell 2 - Zweidimensionales Schmelzen

Eine realistischeres Modell, das die Temperaturabhängigkeit stärker berücksichtigt, erhält man, wenn man ein flächenhaftes Schmelzen annimmt und die Eisdicke dabei gänzlich unberücksichtigt läßt, wie es in folgenden abschnittsweise definierten Gleichungen zum Ausdruck kommt.

$$d_w(A) = \begin{cases} \dfrac{\rho_i f_i d_i \cdot A}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } A \le A_i \\[2ex] d_w(A_i) + \dfrac{\rho_i f_g d_g \cdot (A - A_i)}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } A_i \le A \le A_i + A_g \\[2ex] d_w(A_i + A_g) + \dfrac{\rho_i f_a d_a \cdot (A - A_i - A_g)}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } A_i + A_g \le A \le A_i + A_g + A_a \end{cases} \tag{4}$$

Für $A = A_i + A_g + A_a$ erhalten wir am Ende wieder Gl. (2). Die Berechnung ergibt, daß nach

Abb. 2



dem Abschmelzen Islands sich der Meeresspiegel nur um 6 mm hebt, nach dem anschließenden Abschmelzen Grönlands um 9,4 m und nachdem alles Eis abgeschmolzen ist um 75,8 m, wie auch (bis auf Diskrepanzen durch Rundungsfehler) vom ersten Modell angegeben. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

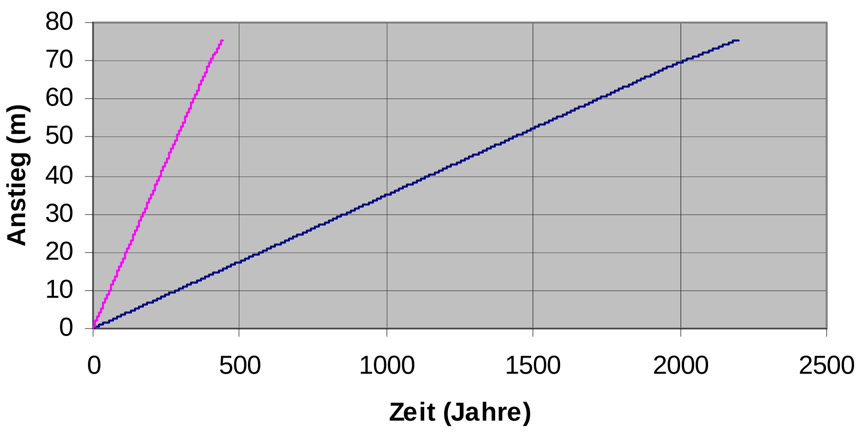
Modell 2 gibt die Verhältnisse wesentlich realistischer wieder. Der Beitrag Islands zum Anstieg ist nahezu vernachlässigbar, auch das Abschmelzen Grönlands liefert aufgrund seiner 6mal kleineren Fläche und seiner 15 Prozent geringeren Eisbedeckung im Vergleich zur Antarktis noch keinen nennenswerten Beitrag (wenngleich 9 m und mehr bereits eine gewaltige Veränderung auf der Erde bewirken würden), erst mit dem anschließenden Abschmelzen der Antarktis ergibt sich ein signifikanter Hub.

3.2 Modell 3 - Zeitabhängiger eindimensionaler Schmelzvorgang

Nimmt man nun an, daß das Eis unterschiedlich schnell abschmilzt, setzt man also in Gl. (2) $d_i = \gamma_i \cdot t$, $d_g = \gamma_g \cdot t$ und $d_a = \gamma_a \cdot t$, so erhält man die abschnittsweise definierte Funktion

$$d_w(t) = \begin{cases} \dfrac{\rho_i\left(f_i A_i \gamma_i + f_g A_g \gamma_g + f_a A_a \gamma_a\right)\cdot t}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } t \le t_i \\ d_w(t_i) + \dfrac{\rho_i (f_g A_g \gamma_g + f_a A_a \gamma_a)(t - t_i)}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } t_i \le t \le t_g \\ d_w(t_g) + \dfrac{\rho_i f_a A_a \gamma_a (t - t_g)}{\rho_w f_e A_e} & \text{falls } t_g \le t \le t_a \end{cases} \tag{5}$$

Abb. 3



Die Koeffizienten γ_i, γ_g und γ_a geben die unterschiedlichen Schmelzraten an. Dabei werde angenommen, daß letztere von der geographischen Breite abhängen und mit zunehmender Breite abnehmen (je nördlicher, desto kälter ist es auf der Nordhalbkugel und umgekehrt), daß Island und Grönland schnellerer abschmelzen als die Antarktis. t_i ist entsprechend die Zeit, nach der die Gletscher Islands vollständig abgeschmolzen sein werden, t_g die Zeit, nach der die Grönlandgletscher sich vollständig zu Wasser verwandelt haben und t_a die Zeit, nach der auch die Antarktis vollständig eisfrei ist und somit das größte Süßwasserreservoir der Erde zu Salzwasser geworden ist.

Zur Vereinfachung werde nun angenommen, daß alle Schmelzraten den gleichen Betrag haben und aus Gründen der Größenverhältnisses dem Wert, der für die Antarktis gilt, entsprechen, d.h. $\gamma_i = \gamma_g = \gamma_a$. Damit werden Island und Grönland langsamer abschmelzen, als dies in der Realität der Fall sein dürfte. Mit $\gamma_a = 5$ m pro Jahr ergibt sich die violett eingezeichnete Kurve, die einem Anstieg des Meeresspiegels um 17,4 m in 100 Jahren bzw. 5,2 m in 30 Jahren entspricht. Die blaue Linie gibt die Verhältnisse für eine Schmelzrate von 1 m/Jahr wieder, was einem Anstieg um 3,5 m in 100 Jahren bzw. 1 m in 30 Jahren entspricht. Mit sonst unveränderten Parametern sind die Ergebnisse in Abbildung 3 dargestellt.

Bisher wurde angenommen, daß die Eisdecken von oben nach unten abschmelzen. Eis schmilzt jedoch nicht ein- oder zweidimensional, sondern es schmilzt rundherum gleichmäßig, wenn sich Luft- und Bodentemperatur in einem stationären Zustand befinden. Damit beschäftigt sich das folgende Modell.

3.4 Modell 4 - Dreidimensionales Schmelzen

Wie üblich gehen wir dabei vom Massenerhaltungssatz aus:

$$
\begin{aligned}
&\rho_i \sum_{j=1}^{3} \Delta V_j = \rho_w f_e A_e d_w(d) && \text{falls } d \le d_i^m \\
&\rho_i \left(\Delta V_i + \sum_{j=2}^{3} \Delta V_j \right) = \rho_w f_e A_e d_w(d) && \text{falls } d_i^m \le d \le d_g^m \qquad (6)\\
&\rho_i \left(\Delta V_i + \Delta V_g + \sum_{j=3}^{3} \Delta V_j \right) = \rho_w f_e A_e d_w(d) && \text{falls } d_g^m \le d \le d_a^m
\end{aligned}
$$

Index $j = 1$ bzw. i steht hierbei für Island, Index $j = 2$ bzw. g für Grönland und Index $j = 3$ bzw. a für Antarktis. Die Eismassen mögen nun von jeder Seite von außen nach innen gleichmäßig abschmelzen, wie dies in anschaulichster Form am besten an einem Schneeball zu beobachten ist. Für die Schmelzvolumina in Gl. (6) verwenden wir die Formel des schmelzenden Eisquaders,

$$
\Delta V_j = \left(2 f_j A_j + 4\sqrt{f_j A_j}\, h_j - 4(2\sqrt{f_j A_j} + h_j) \cdot d \right) \cdot d\,, \quad j \in \{1,2,3\}
$$

die im Anhang kurz hergeleitet wird, so daß die Wasserhöhe d_w in Abhängigkeit von der Schmelzdicke d gegeben ist durch:

$$
d_w(d) = \begin{cases}
\dfrac{\rho_i}{\rho_w f_e A_e} \displaystyle\sum_{j=1}^{3} \left(2 f_j A_j + 4\sqrt{f_j A_j}\, h_j - 4\left(2\sqrt{f_j A_j} + h_j\right) \cdot d \right) \cdot d & \text{falls } d \le d_i^m \\
\dfrac{\rho_i}{\rho_w f_e A_e} \left\{ \Delta V_i + \displaystyle\sum_{j=2}^{3} \left(2 f_j A_j + 4\sqrt{f_j A_j}\, h_j - 4\left(2\sqrt{f_j A_j} + h_j\right) \cdot d \right) \cdot d \right\} & \text{falls } d_i^m \le d \le d_g^m \\
\dfrac{\rho_i}{\rho_w f_e A_e} \left\{ \Delta V_i + \Delta V_g + \left(2 f_3 A_3 + 4\sqrt{f_3 A_3}\, h_3 - 4\left(2\sqrt{f_3 A_3} + h_3\right) \cdot d \right) \cdot d \right\} & \text{falls } d_g^m \le d \le d_a^m
\end{cases} \qquad (7)
$$

wobei wir noch die Abkürzungen

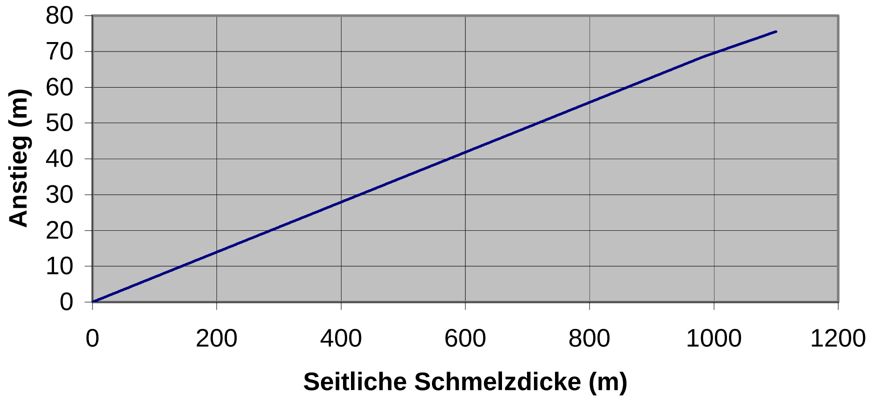
$$\Delta V_i = \left(2f_iA_i + 4\sqrt{f_iA_i}h_i - 4(2\sqrt{f_iA_i} + h_i)d_i^m\right)\cdot d_i^m$$

$$\Delta V_g = \left(2f_gA_g + 4\sqrt{f_gA_g}h_g - 4(2\sqrt{f_gA_g} + h_g)d_g^m\right)\cdot d_g^m \qquad (8)$$

$$\Delta V_a = \left(2f_aA_a + 4\sqrt{f_aA_a}h_a - 4(2\sqrt{f_aA_a} + h_a)d_a^m\right)\cdot d_a^m$$

eingeführt haben. Die Eckwerte d_i^m, d_g^m und d_a^m der abschnittsweise definierten Funktion Gleichung (7) sind dabei die negativen Lösungen

Abb. 4



$$d_j^m = \frac{\sqrt{f_jA_j}h_j + (f_jA_j)/2 - \sqrt{\left(\sqrt{f_jA_j}h_j + (f_jA_j)/2\right)^2 - (2\sqrt{f_jA_j} + h_j)f_jA_jh_j}}{2\left(2\sqrt{f_jA_j} + h_j\right)} \approx \frac{h_j}{2},$$

der im Anhang hergeleiteten quadratischen Gleichung

$$\left(2\sqrt{f_jA_j} + h_j\right)\cdot d^2 + \left(\sqrt{f_jA_j}h_j + \frac{f_jA_j}{2}\right)\cdot d - \frac{f_jA_jh_j}{4} = 0, \qquad \text{für } j \in \{i, g, a\},$$

die den gleichmäßig schmelzenden Eisquader beschreibt. Für die Koeffizienten d_j^m in Gl. (7), $j \in \{i, g, a\}$, d.h. d_i^m, d_g^m und d_a^m, erhalten wir somit näherungsweise die halben Eismächtigkeiten

$$d_i^m \approx \frac{h_i}{2}; \qquad d_g^m \approx \frac{h_g}{2}; \qquad d_a^m \approx \frac{h_a}{2}, \qquad (9)$$

wie man es auch erwarten würde. Die Ergebnisse überraschen nicht. Wenn sich die Gletscher der Antarktis nur um die halbe Höhe des Inlandeises, d.h. um 1,1 km zurückziehen, ist es dort mit der Eisherrlichkeit vorbei. Nach dem Abschmelzen Islands, d.h. wenn die Gletscher dort sich im Durchschnitt um 110 m zurückgezogen haben, beträgt der Anstieg 7,9 m, nach dem

Abschmelzen Grönlands, d.h. wenn das grönländische Inlandeis sich um 982 m zurückgezogen hat, 68,5 m und nachdem alles Eis der Welt abgeschmolzen ist 75,6 m. d_w ist mit den Parametern aus Abschnitt 2.2 als Funktion der seitlichen Schmelzdicke d in Abb. 4 dargestellt.

Die Resultate entsprechen bis auf den Faktor 2 hinsichtlich der Dicke des abgeschmolzenen Eises exakt denen aus Modell 1. Da Schmelzraten in vertikaler Richtung gemessen werden, und nicht in horizontaler, liefert dieses Modell, obwohl es das seitliche Abschmelzen, d.h. den Rückzug der Gletscher, als Maß nimmt, zugleich eine glänzende Bestätigung für die Richtigkeit des eindimensionalen Ansatzes.

4 Schlußfolgerung

Alle Modelle ergeben am Ende den gleichen Wert von 74 m, um den sich der Meeresspiegel hebt, wenn alle Eisflächen der Erde vollständig abschmelzen. Die völlige Eisfreiheit Islands würde bereits einen nennenswerten Beitrag von bis zu 7,9 m liefern; wenn aber Grönland vollständig eisfrei sein sollte, würde sich der Meeresspiegel um Werte zwischen 9,4 m und 68,5 m heben. Sollte indes das ganze Eis des Planeten abschmelzen, steht uns ein Anstieg von 74 m bevor.

Nicht berücksichtigt werden konnte in diesen einfachen Näherungen das Höhenprofil der Erde; das Küstenrelief wurde daher höher als der höchstmögliche Wert von 75 m angenommen, was heißt, daß der Anstieg weniger dramatisch ausfallen wird, weil sich die überschwemmte Landfläche dabei vergrößert, d.h. der Anteil der Ozeane an der Land-/Wasserverteilung sich zugunsten der Wasserfläche verschiebt. In allen Modellen ist auch das "Nachwachsen" der Gletscher bereits implizit enthalten.

Über die sozialen Folgen und die ökologischen Auswirkungen, die solch umwälzende Veränderungen auf der Erde hervorrufen, braucht an dieser Stelle nicht spekuliert werden, dafür ist hier nicht der Ort, doch würde es, wenn nämlich der denkbar ungünstigste Fall je eintreten sollte, das Ende allen Lebens auf Erden bedeuten, und zwar weniger weil die Menschen in den Fluten ertrinken würden, sondern weil parallel dazu die mittlere Erdtemperatur ebensoweit ansteigen würde, daß allein die Sekundärfolgen für eine weltweite Katastrophe sorgen würden. Weitergehende Analysen müssen folgen. Das Beste aber wäre, wenn die Menschheit erst gar nicht versuchen würde, an der Schraube einer Gleichgewichtsveränderung zu drehen. Natürliche Veränderungen laufen in der Regel mit dem Leben verträglich ab, so daß größere Einfluß- und Störfaktoren ausschließlich einer Folge der Einwirkung des Menschen zuzuschreiben sind. Daß dieser mittlerweile die Möglichkeit besitzt, alles Leben auf Erden zum Erlöschen zu bringen, ist unstreitig, er hat es im Lauf seiner Geschichte mehr als einmal bewiesen.

5 Hinweise zur Programmbeilage

Den Ausführungen der vorausgehenden Abschnitte ist eine als Grundlage der Berechnungen dienende ausführbare Datei beigegeben, welche obige Annahmen nicht nur nachvollziehen, sondern auch variieren läßt. Da der prognostizierte Anstieg eine Funktion der Zeit ist, kann der Leser bei Bekanntwerden aktuellerer Erkenntnisse, als sie hier verwendet wurden, z.B. hinsichtlich der Schmelzraten, mit dem beigefügten Programm durch Variation der Konstanten selbst herausfinden, welche Hebung des Meeresniveaus er nach welcher Zeit zu erwarten hat. Die Meßreihen können abgespeichert und mit jedem beliebigen ASCII-Editor visualisiert werden.

Zum Downloaden der Datei http://www.manfredhiebl.de/anstieg.exe rechte Maustaste klicken und "Ziel speichern unter ..." wählen.

6 Anhang - Der gleichmäßig schmelzende Eisquader

Ein Quader habe die Dimensionen l, b, h und das Volumen $V = lbh$. Der Quader schmelze rundum gleichmäßig in jeder Dimension um die Dicke d ab. Dann errechnet sich das abgeschmolzene Volumen des Hohlquaders zu

$$\Delta V = lbh - (l-2d)(b-2d)(h-2d) = 2(lb + bh + hl)d - 4(l + b + h)d^2 - 8d^3 .$$

Im Spezialfall einer quadratischen Grundfläche A, d.h. $l = b$, gilt $V = Ah$ und

$$\Delta V = 2(A + 2\sqrt{A}h)d - 4(2\sqrt{A} + h)d^2 - 8d^3 .$$

Der kubische Term kann wegen $d << l + \frac{h}{2}$ und $d << \frac{l}{2}\sqrt{1 + \frac{2h}{l}}$ vernachlässigt werden.

Gesucht ist die Dicke d, wenn alles Eis geschmolzen ist, d.h. wenn gilt $\Delta V = V$ bzw.

$$(2\sqrt{A} + h)d^2 + (\sqrt{A}h + \frac{A}{2})d + \frac{Ah}{4} = 0$$

Dies ist eine quadratische Gleichung in d mit den beiden Lösungen

$$d^{p,m} = \frac{\sqrt{A}h + A/2 \pm \sqrt{(\sqrt{A}h + A/2)^2 - (2\sqrt{A} + h)Ah}}{2(2\sqrt{A} + h)} = \frac{\sqrt{A}h + (A/2)\left(1 \pm \sqrt{1 - 4h/\sqrt{A}}\right)}{2(2\sqrt{A} + h)}$$

Physikalisch sinnvoll ist nur die Lösung mit dem negativen Vorzeichen, denn sie liefert in der Näherung $\sqrt{A} >> h$ das Ergebnis

$$d^m = \frac{\sqrt{A}h}{2\sqrt{A} + h} \approx \frac{h}{2},$$

welches man auch erwarten würde, denn das Eis ist in der Zeit von oben und unten insgesamt um den doppelten Betrag abgeschmolzen.