



Wie bedrohlich ist der Anstieg des Meeresspiegels?

Kurt Bretterbauer ¹

¹ *Institut für Geodäsie und Geophysik, TU Wien, Gusshausstraße 27-29, A-1040 Wien*

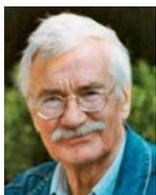
VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **92** (3–4), S. 118–125

2004

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Bretterbauer_VGI_200410,  
Title = {Wie bedrohlich ist der Anstieg des Meeresspiegels?},  
Author = {Bretterbauer, Kurt},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {118--125},  
Number = {3--4},  
Year = {2004},  
Volume = {92}  
}
```





Wie bedrohlich ist der Anstieg des Meeresspiegels?

Kurt Bretterbauer, Wien

Zusammenfassung

Die globale Erwärmung und der Anstieg des Meeresspiegels sind Herausforderungen für Politiker, Wissenschaftler und Journalisten. Nicht immer wird seriös darüber berichtet. Die Aussagen der Fachleute sind oft widersprüchlich. Die folgende Abhandlung stellt das Problem allgemein dar, erläutert die Bedeutung vom geodätischen Standpunkt aus und diskutiert die Prognosen für den Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100. Der Anstieg des Meeresspiegels aber ist nicht die schlimmste Bedrohung der Menschheit.

Abstract

Global warming and sea level rise pose challenges for politicians, scientists, and journalists as well. Reports are not always quite serious. Statements of experts often are contradictory. The following paper presents the problem in a general way, discusses the geodetic aspects, and gives the predictions of global sea level rise up to the year 2100. However, sea level rise is not the worst menace for mankind.

1. Einführung

Seit Jahrzehnten beschäftigt ein Thema Politiker, Wissenschaftler, Umweltschützer und Journalisten: Die globale Erwärmung und der damit verbundene Anstieg der Weltmeere. In Klimakonferenzen werden Kontroversen zwischen Staaten, Experten und NGOs (Non Governmental Organizations) ausgetragen und die Journalisten erhalten Stoff für Schlagzeilen. Die Berichte der Nachrichtenmedien sind nicht immer gut recherchiert, oft sogar falsch. Prognosen des Club of Rome von 1972 führten zu hysterischen Reaktionen von Umweltschützern. Im Vergleich zu den damals vermittelten Horrorszenarien sind die Berichte jetzt im allgemeinen vorsichtiger geworden. Die folgenden Ausführungen sind der Versuch, eine allgemeine Darstellung des Gesamtproblems zu geben und über den Stand der Erkenntnisse zu informieren.

Die prophezeiten, zum Glück nicht eingetretenen Katastrophen sowie widersprüchliche Aussagen von Fachleuten verunsichern die Bürger und fördern deren Zynismus. Seinerzeit wurde das Absterben der Wälder in Europa voraus gesagt, heute wird vor einer drohenden „Verwaldung“ gewarnt. Auch wird behauptet, Anzahl und Stärke von Naturkatastrophen würden zunehmen. Mag sein, dass dies zutrifft. Ich meine aber, die Wahrnehmung wird durch den Umstand geschärft, dass Satellitenaufklärung und elektronische Medien nahezu die ganze Weltbevölkerung fast gleichzeitig an Naturkatastrophen teilnehmen lassen. Ein Beispiel: 2002 war das

3250 km² große Larsen-Eisschelf von der antarktischen Halbinsel abgebrochen (Abb. 1). Schelfeis nennt man den schwimmenden Rand des Inlandeises. Dieses Naturereignis wurde als außergewöhnlich dargestellt, es ist jedoch ein immer wieder auftretendes Phänomen, verursacht durch das Nachdrängen des Inlandeises. Ohne die Satellitenaufklärung und die elektronischen Medien wäre dieses Ereignis gar nicht bemerkt worden.

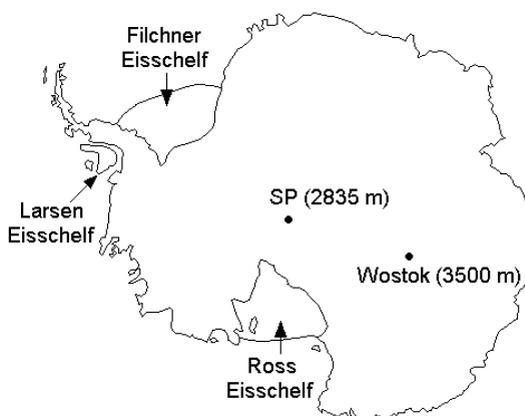


Abb. 1: Der antarktische Kontinent mit Station Wostok und Larsen-Eisschelf

In allen überlieferten Mythen der Menschheit wird von einer großen Flut berichtet. Vielleicht ist das der Ausdruck der kollektiven Erinnerung einer Weltseele an das jähe Ende der letzten Eiszeit vor weniger als 10000 Jahren. Die Worte der Bibel

„Ich werde eine Wasserflut über die Erde kommen lassen, ...“ (Genesis 5, 17) sind allgemein bekannt. Ähnliche Worte findet man bei Platon [1]: „Wenn aber wiederum die Götter die Erde, um sie zu reinigen, mit Wasser überschwemmen, dann bleiben die, so auf den Bergen wohnen, Rinder- und Schafhirten, erhalten“. Sie haben durch das Seebeben im Indischen Ozean schreckliche Aktualität erhalten. Wir Alpenbewohner können beruhigt sein, viele Küstenbewohner aber müssen sich um die Bedrohung ihres Lebensraumes sorgen. Man denke an die Niederlande oder an bewohnte Südseeinseln, deren Oberflächen nur zehn Zentimeter über den Meeresspiegel ragen (z. B. Tuvalu, $\varphi = -8^\circ$, $\lambda = 178^\circ$ ö. Gr.). Nach den seinerzeit erstellten, übertriebenen Prognosen müssten diese Inseln längst versunken sein. Das Problem wird von einzelnen Forschern und international besetzten Expertengremien vielfältig diskutiert, aber nicht immer von allen Seiten betrachtet. Nur selten werden alle Teilaspekte genannt, die zu einer Änderung des Meeresspiegels beitragen können. Prognosen für die nächsten hundert Jahre stützen sich auf Klimamodelle, ohne dass die Wirkung mancher Phänomene auf das Klima schon geklärt wäre.

Hier sollen Fragen gestellt und die Schwierigkeiten der Messung und Berechnung des Anstiegs der Ozeane aufgezeigt werden. Für die Geodäsie ist das Problem von besonderer Bedeutung. Nicht nur die Definition der Höhensysteme ist betroffen, sondern alle physikalischen und geometrischen Parameter der Erde hängen vom Stand des Meeresspiegels ab.

Es gibt zwei Arten von Änderungen des Meeresspiegels:

- Lokale und regionale Änderungen, auch „steric changes“ genannt. Dieser, im Deutschen kaum gebrauchte Ausdruck, bezeichnet Schwankungen durch Änderungen von Salzgehalt, Luftdruck, Wassertemperatur oder Meeresströmung. Die relativ großen Schwankungen bedeuten noch keine Massenänderung der Ozeane. Sie können durch Satellitenaltimetrie und Pegelregistrierungen gut erfasst werden. Die wirkliche Ursache bleibt oft unklar.
- Eustatische Änderungen. Darunter versteht man globale, echte Massenänderungen des Meerwassers, wie sie beim Auf- oder Abbau von Eisdecken auftreten. Der Nachweis ist schwierig und noch unsicher.

2. Ein Blick in die Vergangenheit

Klimaforschung baut auf dem Verständnis der Vergangenheit auf. Starke Schwankungen des Klimas und des Meeresspiegels hat es immer gegeben. Geologen konnten aus der Untersuchung alter Strandterrassen diese Schwankungen weit in die Vergangenheit zurück verfolgen (Abb. 2).

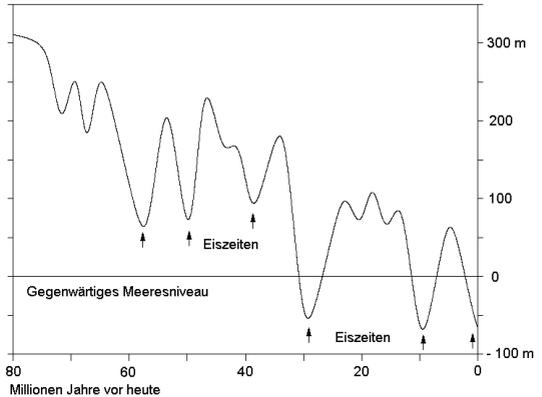


Abb. 2: Meeresspiegel in der geologischen Vergangenheit bis 80 Mill. Jahre vor heute

Man beachte die besonders niedrigen Niveaus in den Eiszeiten. Merkwürdig ist die Tatsache, dass nach jeder Eiszeit das Meeresspiegel nie mehr den vorigen Stand erreicht hat. Eine einfache Erklärung wäre die von einer kleinen Gruppe von Fachleuten, hauptsächlich aber von fanatischen Laien vertretene, von den allermeisten Geowissenschaftlern aber abgelehnte Hypothese von der Expansion der Erde. Die bisher postulierten, großen Expansionsraten müssten heute geodätisch durch Interferometrie über lange Basen (VLBI) und Gravimetrie nachweisbar sein. Jedoch, nichts deutet auf eine Expansion hin. Gerade jetzt aber hat Prof. Schmutzer (Univ. Jena) eine Theorie formuliert, die erstmals eine mathematisch-physikalisch fundierte Erklärung für die Expansion aller Himmelskörper liefert [2]. Auf die Erde angewendet, folgt eine (zeitabhängige) Radiuszunahme von gegenwärtig 0.72 mm/Jahr. Das ist nicht nachweisbar, würde aber einem Anstieg des Wassers entgegenwirken, so dass dieser noch größer sein müsste als beobachtet.

Die Klimageschichte der Vergangenheit kann aus der Untersuchung von Eisbohrkernen und Sedimenten entschlüsselt werden. Im Zuge des Projektes EPICA (European Project for Ice-Coring in Antarctica) wurden Eisbohrkerne bis zu 3200 m Tiefe von deutschen Forschern gewonnen [3]. In

dieser Tiefe ist das Eis etwa 800 000 Jahre alt. Russische Glaziologen der Station Wostok (Abb. 1) konnten schon 1980 mit einem 2083 m langen Kern 150 000 Jahre Klimageschichte rekonstruieren. Dabei werden die im Kern eingeschlossenen Luftbläschen untersucht. Der Sauerstoffisotopen-Gehalt liefert die Temperaturen der Vergangenheit, die Gasanalyse den Gehalt an den Treibhausgasen Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Stickoxid (N_2O). Es wurde eine enge Korrelation zwischen Temperatur und Kohlendioxid festgestellt. Stieg die Temperatur, stieg auch der Anteil an CO_2 . Die Frage ist: Steigt der CO_2 -Gehalt weil die Temperatur steigt, oder umgekehrt? Das entfacht erneut den Streit, ob die gegenwärtige anthropogene Zunahme des CO_2 zwangsläufig zu einem Temperaturanstieg führen muss. Auffällig ist eine sprunghafte starke Zunahme von CO_2 von 280 auf 360 ppm seit 1750, während die globale Temperatur in diesem Zeitraum nur um 0.5°C gestiegen ist. Eine Erklärung könnte die einsetzende Industrialisierung geben und ab 1850 der forcierte Kohleberg- und Eisenbahnbau, wofür große Waldbestände abgeholzt werden mussten.

Aus historischen Aufzeichnungen weiß man, dass im Hochmittelalter die Temperaturen höher waren als heute. Das Klima in Europa war so günstig, dass es bisweilen zwei Ernten pro Jahr gab. Die jetzt zurückweichenden Alpengletscher geben Baumstrünke frei (Prof. Patzelt, Univ. Innsbruck, in einem Vortrag in Obergurgl). Im Hochmittelalter wuchsen Bäume hoch über der heutigen Baumgrenze. Ab etwa 1300 kam es zu einem Klimasturz, der die sogenannte „Kleine Eiszeit“ einleitete. Nun kam es verbreitet zu Missernten und Hungersnöten. Seit 1850 wird es wieder wärmer, das Klima scheint sich zu „erholen“. Solange die Forschung diesen Klimasturz nicht plausibel erklären kann, sind alle Prognosen skeptisch zu betrachten.

3. Weitere Aspekte der Änderung von Klima und Meeresspiegel

Die (zu) einfache, jedermann einsichtige Argumentationskette zur Erklärung des Anstiegs des Meeresspiegels lautet: Die globale Temperatur steigt \rightarrow die Eismassen schmelzen \rightarrow der Meeresspiegel steigt. Dabei werden einige Fragen stillschweigend übergangen.

■ Ist die Menge freien Wassers auf der Erde konstant? Seltsamer Weise wird diese Frage kaum je gestellt. Es wäre erstaunlich, könnte sie eindeutig mit „Ja“ beantwortet werden. Die

Menge freien Wassers beträgt rund $1.4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$. Im Erdmantel ist ein Vielfaches dieser Menge gebunden [4]. In den zahllosen Thermalquellen der Tiefsee und auf den Kontinenten wird ständig juveniles Wasser freigesetzt. Andererseits, wenn Wasserdampf in die hohen Schichten der Atmosphäre gelangt, wird H_2O durch die harte Strahlung der Sonne und die kosmische Strahlung in H und O aufgespalten und der leichte Wasserstoff diffundiert in den Weltraum. Die obige Frage bleibt ungeklärt, darf aber nicht ignoriert werden.

- Hat der Klimawandel natürliche oder anthropogene Ursachen? Zweifellos haben Verkehr, Industrie und der massive Eingriff in die Natur Anteil am Klimawandel. Der Einfluss der Sonnenaktivität aber könnte doch größer sein, als bisher angenommen. Denn wie anders wären die Ereignisse im Mittelalter zu erklären? Zur genaueren Erforschung des Sonneneinflusses plant die ESA spezielle Satellitenmissionen.
- Könnten höhere Temperaturen den Meeresspiegel sogar sinken lassen? Das ist durchaus möglich. Steigende Temperaturen werden sich nach Meinung der Klimaforscher vor allem in den höheren nördlichen und südlichen Breiten auswirken. Damit steigen auch Verdunstung und Niederschläge. Das würde die Gletscherbildung begünstigen. Denn, nicht die Kälte erzeugt die Gletscher, sondern der Schnee. Zu dessen massenhafter Erzeugung bedarf es nur geringer Kälte, aber hoher Feuchtigkeit. Die mittlere Jahrestemperatur liegt in Grönland unter -15°C , in der ganzen Antarktis unter -30°C , auf der Station Wostok (Abb. 1) unter -50° . Die Niederschläge sind extrem gering, in der Antarktis nur 25 mm/Jahr Wasseräquivalent. Zur Klärung der Massenbilanz der beiden großen Eismassen wurde 2002 der Satellit ICESAT gestartet, der mittels Laser-Altimeter die Eisoberfläche abtastet [5].
- Wie wirken Wolken und Aerosole auf die Energiebilanz der Erde? Vulkanausbrüche bringen riesige Mengen an Asche, Staub und Gasen in die Atmosphäre. Der Ausbruch des Vulkans Krakatau (zwischen Java und Sumatra) im August 1883 und erneut 1928–32 reduzierte die Intensität der Sonnenstrahlung in Europa durch viele Monate um 20%. Der Ausbruch des Pinatubo (Philippinen) verbreitete Schwefeldämpfe entlang eines tropischen Gürtels, der 40% der Erdoberfläche überdeckte [6]. Berichte über lang währende Trübungen der Atmosphäre findet man in historischen Auf-

zeichnungen. Die Klimaforschung kann nicht schlüssig sagen, ob Wolken, vulkanische Gase und Aerosole die Wärmestrahlung in den Weltraum abschirmen und die Erde aufheizen, oder die Sonneneinstrahlung mindern und zu Abkühlung führen.

Meist wird auch übergangen, dass ein, wenn auch geringer Massenzuwachs der Ozeane noch andere Quellen hat. Neben der Bildung juvenilen Wassers sind zu nennen:

- Erosion, Denudation und Sedimentation. Erosion und Denudation der Kontinente betragen in $t/m^2/Jahr$ in Europa 0.1, in Afrika 0.12, Nordamerika 0.29, Südamerika 0.13, Asien 1.10 und in Australien 0.10. Ohne Isostasie und Tektonik wären alle Kontinente schon längst abgetragen. Auch die Sedimentation der anorganischen Reste von Meerestieren (Kalziumkarbonat) liefert einen kleinen Beitrag. Nebenbei, die Ozeane sind das größte Reservoir für Kohlendioxid und in den Kalkschalen von Meerestieren wird es dauerhaft gebunden [7].
- Geschiebetransport der Flüsse. Alle Flüsse der Erde führen große Geschiebemengen mit sich und deponieren diese in den Mündungen.
- Weltweites Sinken des Grundwasserspiegels durch exzessive Entnahme für Industrie und Landwirtschaft. Der Vorrat wird auf 64 Millionen km^3 geschätzt. Eine Verminderung von 1‰ ergäbe, umgelegt auf die Fläche der Ozeane, eine Wasserschicht von 12 cm.

Die genannten Beiträge sind schwer zu quantifizieren, dürfen aber nicht außer Acht gelassen werden. 1982 hat der russische Forscher R. K. Klige in einer Studie einen Volumszuwachs der Ozeane in der Zeit von 1894 bis 1975 von $\sim 26\,000\ km^3$ errechnet. Das ergibt einen Zuwachs von 7 cm, oder $+0.9\ mm/Jahr$.

4. Die Überwachung des Meeresniveaus

Die Überwachung des Meeresniveaus erfolgt seit langem durch Pegelregistrierungen und seit zwei Jahrzehnten durch die Satelliten-Altimetrie. Die meisten Analysen des Meeresniveaus stützen sich auf die Pegelmessungen.

4.1 Pegelmessungen

Die ersten Pegel wurde vor 200 Jahren zum Zwecke der Beobachtung der Gezeiten und zur Unterstützung der Küstenschifffahrt installiert. Deshalb liegen diese Pegel immer in der Nähe von Hafeneinfahrten. Erst seit wenigen Jahren werden Pegel zu rein wissenschaftlichen

Zwecken eingesetzt. Die Registrierung erfolgte früher durch Schwimmkörper, heute geschieht sie durch Abstandsmessung zur Wasseroberfläche mittels Ultraschall. Seit 1930 werden alle Pegelmessungen im Bidstone Observatory (GB) gesammelt und vom Permanent Service of Mean Sea Level (PSMSL) bearbeitet. Monatliche und jährliche Mittelwerte aller Pegel können unter www.nbi.ac.uk/psmsl abgerufen werden. Erst in den letzten Jahren ist es durch das GPS gelungen, alle Pegel in ein einheitliches Koordinatensystem zu bringen. In einer groß angelegten, sehr kritischen Studie haben Emery und Aubrey [8] 636 der best-dokumentierten Pegel analysiert. Die Autoren halten einen jährlichen Anstieg von 1 – 2 mm für wahrscheinlich, aber nicht gesichert. Ich selbst habe diese und viele andere Daten aus dem PSMSL nach verschiedenen Gesichtspunkten untersucht. Einige interessante Details seien hier gezeigt. Die Pegel sind geographisch schlecht verteilt. Von den 636 Pegel in [8] sind 568 auf der Nord-, 68 auf der Südhalbkugel gelegen. Sechs Pegel bestehen seit mehr als 100 Jahren, 80 seit mehr als 60, 200 seit mehr als 35, und der Rest seit weniger als 35 Jahren. Graphisch ist dies in *Abb. 3* dargestellt. Für Aussagen über das eustatische Meeresspiegel müssen die Pegelstände erst durch Mittelbildung über längere Zeit von den Gezeiten befreit werden. Die Gezeiten werden zu 2/3 vom Mond verursacht und sind erst nach 18.6 Jahren restlos eliminiert, dann nämlich, wenn die Schnittpunkte der Mondbahn mit der Ekliptik (Knoten) ihren Umlauf vollendet haben.

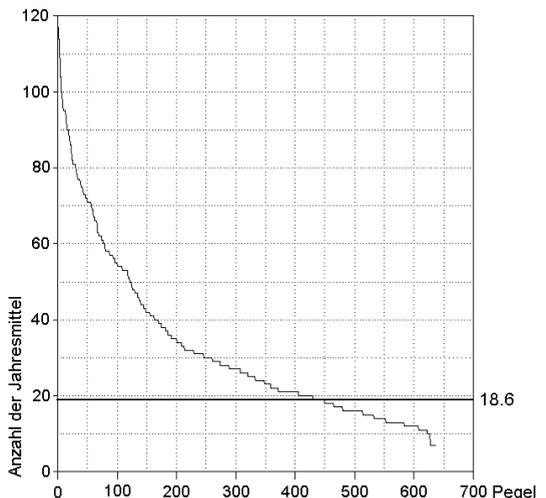


Abb. 3: Diagramm Anzahl der Jahresmittelwerte gegen Anzahl der Pegel

Interessant ist auch die *Abb. 4*. Sie zeigt die großen Lücken in den Registrierungen auf. Als Beispiel sei die Station Brest (F) gewählt. Dieser älteste Pegel wurde 1810 installiert, die Zahl der beobachteten Jahresmittelwerte bis 1990 beträgt aber nur 120. Ähnlich bei den meisten der anderen Pegel. Wäre die Zahl der Jahresmittel gleich der Anzahl von Jahren seit der Installation der Pegel, müssten alle Punkte im Diagramm entlang der eingezeichneten Diagonalen liegen.

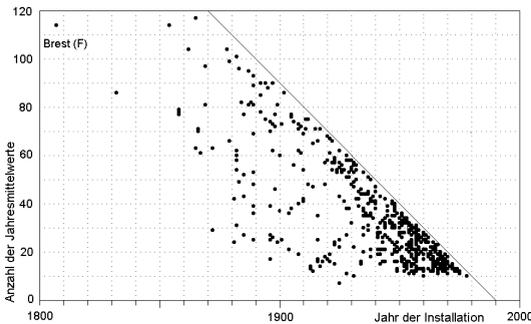


Abb. 4: Diagramm Jahr der Installation gegen Anzahl der Jahresmittelwerte von 636 Pegel aus [8]

Ein Histogramm der Trends der Pegelmessungen (*Abb. 5*) gibt Aufschluss über die Verteilung. Sie ist im Vergleich zur Normalverteilung überhöht (Exzess 0.85) und leicht linkssteil (Asymmetrie = 0.15). Verschiedene Mittelbildungen ergeben: Arithmetisches Mittel = +0.51 mm/J mit Standardabweichung ± 3.69 mm/J, Median = +0.7 mm/J, Mode = +1.1 mm/J, Exzess = 0.85, Asymmetrie = -0.15.

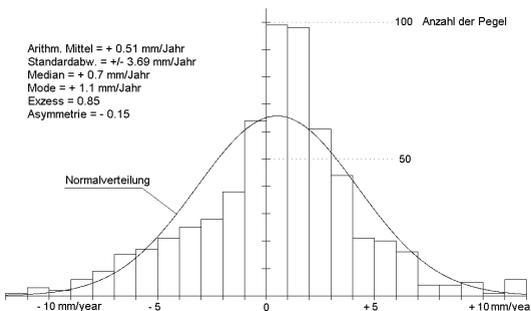


Abb. 5: Histogramm der Trends von 636 Pegel

Auffällig ist die Tatsache, dass viele relativ benachbarte Pegel entgegengesetzte Trends zeigen, besonders so in Europa, Japan und an der Ostküste Nordamerikas. Das ist nicht weiter verwunderlich. Pegel messen nur die Höhendifferenz zwischen der Wasseroberfläche und einer Landmarke und sind mehr oder minder stark

durch lokale Einflüsse gestört. Die Ursachen solcher Störungen können sein: Lokale Krustenbewegungen, Isostasie, Vulkanismus, Erdbeben, Entnahme von Erdöl, Gas (Off-shore Bohrungen) und Grundwasser, Änderungen von Meeresströmungen oder Windrichtung u.a.

Individuelle Pegelregistrierungen zeigen sehr unterschiedliche Trends mit großen periodischen Schwankungen der Jahresmittelwerte. Zwei typische Beispiele geben *Abb. 6* und *Abb. 7*.

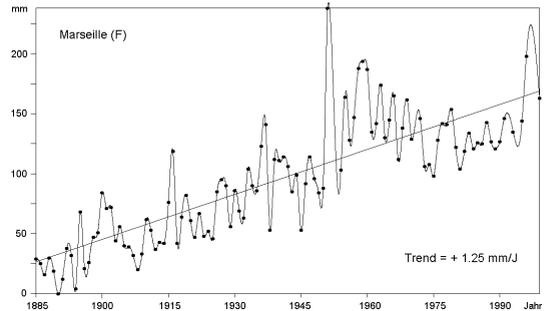


Abb. 6: Pegel Marseille, Diagramm Jahr gegen Jahresmittelwert (relatives Niveau)

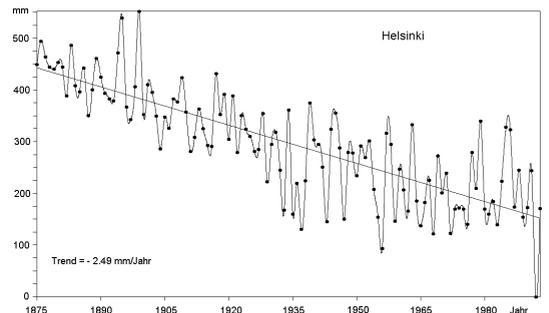


Abb. 7: Pegel Helsinki, Diagramm Jahr gegen Jahresmittelwert (relatives Niveau)

Helsinki zählt zu jenen nicht-repräsentativen Pegeln, aus deren Registrierungen keine eustatische Veränderung abgeleitet werden kann. Denn hier sinkt nicht das Meeresniveau, sondern die Landmarke hebt sich isostatisch als Folge der nacheiszeitlichen Entlastung der Erdkruste. Auffällig sind die periodischen Schwankungen. Bei den zahlreichen Pegeln, die ich in dieser Weise analysiert habe, fand ich sehr unterschiedliche Perioden der Jahresmittelwerte (von 300 bis 600 Tagen) und sehr große Amplituden (bis zu 250 mm und mehr). Die Ursache dafür ist unklar. Tendenziell aber weist die Gesamtheit der Pegelmessungen auf ein Steigen des Meeresspiegels von 1 – 2 mm/J hin.

4.2 Satellitenaltimetrie

Die Altimetrie misst die Normalabstände der Wasseroberfläche von genau bekannten Satellitenbahnen mittels Radar oder Laser. Die zahlreichen Wiederholungen der Abtastspuren erlauben es, Wellen und Gezeiten zu eliminieren. Die Messungen verschiedener Satelliten an den Kreuzungspunkten ihrer Subsatellitenspuren geben Aufschluss über die erreichte Genauigkeit. Die eingesetzten Satelliten sind: SEASAT, ERS 1 & 2, TOPEX-POSEIDON, ENVISAT u.a. Die Analysen der Daten ergaben eine sichere Bestimmung lokaler und regionaler Änderungen des Meeresspiegels (steric changes) und einen noch unsicheren Trend einer eustatischen Hebung.

Die Bearbeitung der Daten von TOPEX-POSEIDON durch Bosch et al. [9] lieferte für den Zeitraum von 1992.6 bis 2001.2 regionale Änderungen von +10 cm und mehr im nördlichen und im äquatornahen, von -10 cm und mehr im südlichen Pazifik. Ähnlich im Indischen Ozean und in den anderen Weltmeeren. Der versuchte Nachweis einer eustatischen Änderung zwischen Oktober 1992 und Jänner 2000 ergab einen Trend von +1.1 mm/J. Wieder zeigen die Beobachtungen auffällige Variationen mit einer Periode von etwa 400 Tagen und der Amplitude von rund 20 mm. Ursache unklar. Die Periode ist nicht weit von der Chandler-Periode der Polbewegung von 430 Tagen. Die Übereinstimmung der Trends von Klige (Kap. 3), der Pegelanalysen und der Altimetrie ist erstaunlich gut.

Im September 2004 fand eine ENVISAT-Tagung in Salzburg statt. Dort wurde von Messungen berichtet, die auf einen Anstieg von +3 mm/J schließen lassen. Interessanter Weise wurde dies zum Grossteil als Effekt der Erwärmung der oberen Wasserschichten, also als „steric change“, gedeutet. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen von TOPEX-POSEIDON und ENVISAT ist beträchtlich und bedarf einer Erklärung.

5. Geodätische Konsequenzen

Eustatische Änderungen des Meeresspiegels beeinflussen alle geometrischen und physikalischen Parameter der Erde auf folgende Weise:

- Ein Anstieg des Meeresspiegels wird durch Massentransport von den Kontinenten in die Ozeane verursacht (Temperatureffekt ausge-

nommen). Jede Massenverlagerung führt zu einer

- Änderung des Potential- und Schwerefeldes und damit zu einer Deformation der Niveauflächen (Geoid).
- Änderung der Trägheitsmomente des Erdkörpers. Die Trägheitsmomente bestimmen auch die dynamische Abplattung J_2 . Die Auswertung der Beobachtungen geodätischer Satelliten über die letzten 25 Jahre ergab eine Abnahme von $-2.8 \cdot 10^{-11}$ /Jahr [5].
- Änderung der Tageslänge (LOD). Wenn Wasser aus Eis der polnahen Gebieten in die Ozeane fließt, werden Massen in Äquatornähe verfrachtet. Das vergrößert das Trägheitsmoment um die Rotationsachse und verkleinert die Winkelgeschwindigkeit der Rotation, wegen der notwendigen Konstanz des Drehimpulses ($C \cdot \omega = \text{const}$). Damit wird der Tag länger. Der Effekt ist für einen empirischen Nachweis noch zu klein, vor allem aber von anderen, die Rotation beeinflussenden Faktoren, schwer zu trennen.
- Verschiebung des Erdschwerpunktes. Massenverlagerungen ändern die Lage des Schwerpunktes eines Körpers, genauer, die Position der Massen in Bezug auf den Schwerpunkt. Die Lage des Schwerpunktes im inertialen Raum bleibt erhalten, denn diese kann durch rein interne Vorgänge auf der Erde nicht beeinflusst werden. Nimmt man an, dass der Hauptbeitrag einer Hebung des Meeresspiegels aus der Antarktis käme (was nicht erwiesen ist!), so zeigen meine Berechnungen, dass die Verschiebung etwa in Richtung Bank Island ($\varphi = 74^\circ$, $\lambda = 125^\circ$ w. Gr.) erfolgen würde. Dadurch und wegen der abnehmenden Attraktion der grossen Eismassen würde die gedachte Meeresoberfläche (Geoid) in der Antarktis sogar sinken, obwohl global gesehen eine Hebung eintritt.
- Änderung aller GPS-bestimmten Koordinaten x , y , z . Die Koordinaten sind auf das Geozentrum bezogen. Bei dessen Verlagerung werden auch die Koordinaten geändert.
- Langfristige Änderung der Satellitenbahnen. Eine Änderung der Massenverteilung beeinflusst die Satellitenbahnen. So gering die Änderungen derzeit noch sind, durch kumulative Wirkung werden sich die Bahnen von erdnahen Satelliten ändern. Kommunikationssatelliten sind zu hoch über der Erde ($\sim 36\,000$ km) um merklich gestört zu werden.

Besonders wichtig für die Berechnung eustatischer Hebungen sind die lokal unterschiedlichen

Deformationen der Niveaulflächen. Sie hängen von der geographischen Verteilung des Eises und der Kontinente und aller verlagerten Massen ab. Das macht die Berechnungen so kompliziert und zeigt auch, dass die gleichartige Auswirkung eines eustatischen Anstiegs des Meeresspiegels auf alle Pegel und auf alle Teile der Ozeane *ausgeschlossen* ist.

6. Die Prognosen bis 2100

Die Klimaforscher stimmen darin überein, dass die Erwärmung fortschreiten wird, Meinungsverschiedenheiten gibt es nur über das Ausmaß. Könnte man plötzlich den gesamten anthropogenen CO_2 -Ausstoß stoppen, würde dies den Temperaturanstieg nur um 0.1°C vermindern. Die auf der Basis von Klimamodellen erstellte jüngste Prognose für das Meeressniveau zeigt *Abb. 8* [5].

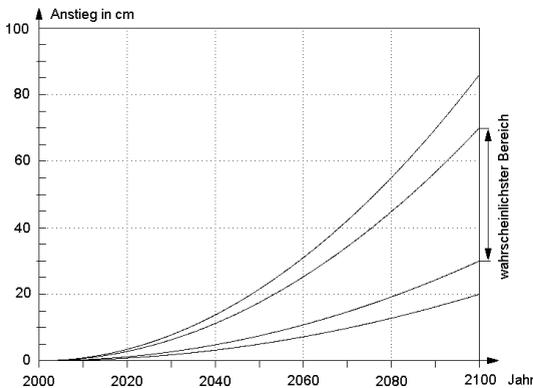


Abb. 8: Prognose für den Anstieg des Meeresspiegels bis 2100

Im günstigsten Fall wird der Meeresspiegel bis 2100 um 20 cm, im ungünstigsten um 86 cm steigen. Dazwischen liegt der wahrscheinlichste Bereich. Der Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) an die UNO 2001 kommt zum gleichen Schluss. Zuzufolge der Analyse aller Messungen, Pegel und Altimetrie, des vergangenen Jahrzehnts betrug der Anstieg in diesem Zeitraum $+2.8 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ mm pro Jahr}$ [5]. Berücksichtigt man die isostatische Landhebung, die das globale Niveau um -0.3 mm/J sinken lässt, betrug die Hebung sogar $+3.1 \text{ mm/J}$. Auch hier wird eine Grossteil des Anstiegs als „steric change“ (Temperatureffekt) gedeutet. In [5] findet man eine umfangreiche Literaturliste zu vielen Aspekten des Problems. Auch wird behauptet, die zahlreichen und immer größeren künstlichen Seen und Staubecken, wie zuletzt in China errichtet, wirkten einem Anstieg entgegen

(-0.3 mm/J). Abgesehen von dem fragwürdigen Betrag der Senkung, kann das wohl nur für die Aufstauphase gelten, denn sobald der Vollstau erreicht ist, muss das Wasser wieder abfließen.

Der Temperatureffekt bedarf noch einer näheren Untersuchung. Die Satellitenaufklärung ist nicht im Stande, die Wassertemperatur in 50 oder 100 m Tiefe zu messen. Zur Erfassung der Erwärmung der oberen Wasserschichten haben bisher Forschungs- und Handelsschiffe Messgeräte an Schlepplein nachgezogen. Um die Messreihen zeitlich und örtlich zu verdichten wurde das ARGO-Programm gestartet [5]. Durch mehrere Tausend frei treibende Messstationen sollen Temperatur und Salzgehalt besser erfasst werden.

Eine weitere Prognose betrifft die Ausdehnung des arktischen Packeises. Im November 2004 wurde in Reykjavik (Island) der Bericht des Arctic Climate Impact Assessments ACIA vorgestellt und eine Prognose für die Arktis erarbeitet. In *Abb. 9* ist die nördliche Polkappe mit der gegenwärtigen sommerlichen Packeisgrenze (Pfeile) und der für 2090 prognostizierten Grenze (schattierter Bereich) dargestellt.

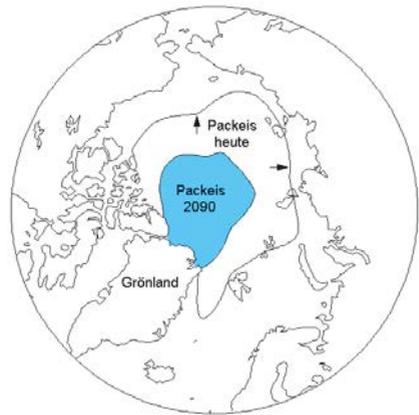


Abb. 9: Gegenwärtige Grenze des sommerlichen arktischen Packeises (Pfeile) und Prognose für 2090 (schattierter Bereich)

Auch diese Prognose steht im Widerspruch zu manchen Berichten von Tageszeitungen und Wochenmagazinen, denen zufolge das gesamte Packeis schon in wenigen Jahren verschwunden sein sollte und überdies den Meeresspiegel um mehrere Meter steigen liesse. Letztere Behauptung ist Unsinn, denn das Packeis schwimmt frei im arktischen Eismeer, sein Schmelzen würde, abgesehen von einem eventuellen Temperatureffekt, das Meeressniveau nicht beeinflussen.

In internationalen Klimakonferenzen werden die Folgen des Klimawandels für Politik, Wirtschaft und Gesellschaft diskutiert, zuletzt so in Buenos Aires im Dezember 2004. Die Meinungen der Experten sind sehr widersprüchlich. Manche befürchten nur negative Auswirkungen der Erwärmung, andere sehen auch positive Effekte. Wenn z.B. die ausgedehnten Permafrostböden Sibiriens auftauen, kann sich der Wald nach Norden ausbreiten, was günstig wäre. Andererseits würde der Permafrostboden große Mengen des Treibhausgases Methan freigegeben. Das zurückweichende arktische Packeis könnte den Zugriff auf vermutete große Öl- und Gasvorkommen ermöglichen. Es wird in jedem Fall Gewinner und Verlierer geben. Der Anstieg des Meeresspiegels ist dabei das geringere Übel. Selbst im schlimmsten Fall, bei 86 cm Anstieg bis 2100, können rechtzeitig Schutzmassnahmen eingeleitet werden, entweder durch Errichtung von Dämmen oder Umsiedelung gefährdeter Bevölkerungen. Die oben genannten Südseeinseln müssen allerdings aufgegeben werden.

Es drohen aber ganz andere Gefahren, gegen die es keinen vorstellbaren Schutz gibt: Die allmähliche oder auch plötzliche Richtungsänderung der großen Meeresströme, und die Bedrohung aus dem Weltall. Westeuropa verdankt sein Klima dem Golfstrom. Mit der Bedrohung aus dem Weltall ist nicht eine utopische Invasion fremder Wesen gemeint, sondern die mögliche Kollision mit einem herumirrenden Himmelskörper. Die Erde wird pausenlos von meist harmlosen Meteoriten bombardiert, die entweder in der Atmosphäre verglühen oder auf der Erde landen. In der Vergangenheit gab es viele Einschläge größerer Massen, von denen tiefe Krater noch heute Zeugnis geben, wie z.B. der Arizona-Krater (Tiefe 170 m, Durchmesser 1200 m). Der letzte große derartige Impact ereignete sich am 30. Juni 1908 im unbewohnten Gebiet der Tunguska (Sibirien). Impact ist nicht ganz korrekt gesagt, hier gibt es keinen Krater, weil der Meteorit vermutlich in mehreren Kilometern Höhe über der Erde explodiert ist und die Wälder in weitem Umkreis zerstört hat.

Verfeinerte Beobachtungsmethoden (CCD-Kameras) haben zur Entdeckung von so genannten „near misses“ geführt, Himmelskörper, die der Erde nahe kommen. Am 30. Oktober 1937 zog der Asteroid Hermes (geschätzte Masse 500 000 t) nahe an der Erde vorbei [6]. Am 19. Jänner 1991 näherte sich der Asteroid 1991 BA (geschätzte Masse zwischen 100 und 2000 t) der Erde auf 170 000 km, d.i. weniger als die Hälfte der

Mondentfernung [10]. Am 29. September 2004 passierte der Kleinplanet (4179) Toutatis in nur vierfachem Mondabstand (etwa 1.5 Millionen km) die Erde [11]. Seine Ausmasse betragen $4.6 \text{ km} \times 2.4 \text{ km} \times 1.9 \text{ km}$ (!). Der Asteroid befindet sich auf einem die Erdbahn kreuzenden Orbit. Die nächste Annäherung wird zwar erst im Jahre 2562 eintreten, aber in ferner Zukunft ist ein Aufschlag auf der Erde nicht völlig ausgeschlossen. Vor wenigen Jahren konnte die Weltöffentlichkeit den spektakulären Einschlag eines Kometen auf dem Planeten Jupiter mit verfolgen. Noch vor Jahrzehnten wäre dieses Ereignis wahrscheinlich unentdeckt geblieben. Warum sollte die Erde in Zukunft von solchen Katastrophen verschont bleiben? Inzwischen wurde ein weltweites Netz von Beobachtungsstationen aufgebaut, um sich nähernde Himmelskörper rechtzeitig aufspüren zu können. Zur Abwehr der Bedrohung wird die Zerstörung durch Atombomben oder die Ablenkung durch landende Raketen diskutiert.

Prognosen zu erstellen, ist immer problematisch, die Zukunft ist prinzipiell nicht vorhersehbar. Dennoch sind sie notwendig, andernfalls wäre jegliche Planung unmöglich. Sie sollten nur nicht als apodiktisch verkauft und nicht alle Naturkatastrophen zu Folgen des Klimawandels erklärt werden.

Literatur

- [1] *Platon*: Timaios. Sämtliche Werke. 3. Bd. S. 100. Verlag Jakob Hegner, Köln, 1967.
- [2] *Schmutzer, E.*: Projektive Einheitliche Feldtheorie mit Anwendungen in Kosmologie und Astrophysik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt a. M., 2004.
- [3] *Hoeppel, G.*: Projekt Epica. Sterne und Weltraum. 12/2004, S. 34 – 38.
- [4] *Israel, H.*: Einführung in die Geophysik. Springer, Berlin, 1969.
- [5] *Cazenave, A.; Nerem, R.S.*: Present-Day Sea Level Change: Observations and Causes. Review of Geophysics, 42/2004, RG3001, American Geophysical Union.
- [6] *Ager, D.*: The New Catastrophism. Cambridge, University Press, 1995.
- [7] *Roedel, W.*: Physik unserer Umwelt. Springer, Berlin, 1994.
- [8] *Emery, K.O.; Aubrey, D.G.*: Sea Levels, Land Levels, and Tide Gauges. Springer, New York, 1991.
- [9] Jahresbericht der Deutschen Geodätischen Kommission 2002, München 2003.
- [10] Sterne und Weltraum, 5/1991, S.284.
- [11] Sterne und Weltraum, 12/2004, S.51.

Anschrift des Autors

Dr. Kurt Bretterbauer: em. o. Univ. Prof. Institut für Geodäsie und Geophysik, TU Wien, Gusshausstrasse 27-29, A-1040 Wien. E-mail: kbretter@mars.hg.tuwien.ac.at