

Was ist wirklich dran am „steigenden Meeresspiegel“?

von

Prof. Dr.-Ing. Peter Ribler

Zusammenfassung

In der Öffentlichkeit herrscht große Unsicherheit über die künftige Höhe des Meeresspiegels.

Ein zuverlässiges Urteil wird dadurch erschwert, dass die meisten einschlägigen Veröffentlichungen in englischer Sprache erschienen oder aus sonstigen Gründen dem Großteil der Interessierten nicht zugänglich sind. Es erschien daher geboten, aus der seriösen Literatur die derzeit (März 2011) zugänglichen Fakten und Erkenntnisse einmal zusammenzutragen, um der Verwirrung etwas entgegenzuwirken.

Die Auswertung ergab in der Summe, dass sich der globale Meeresspiegel bis 2100 um kaum mehr als einen halben Meter heben wird. Dabei werden die Anteile voraussichtlich mit folgenden Prozentsätzen beteiligt sein:

<i>Wärmeausdehnung des Wassers</i>	<i>59%</i>
<i>Abschmelzen der Gletscher</i>	<i>21%</i>
<i>Abschmelzen des Meereises in der Arktis</i>	<i>0%</i>
<i>Abschmelzen des grönländischen Eispanzers</i>	<i>6%</i>
<i>Abschmelzen des antarktischen Eispanzers</i>	<i>14%</i>

Selbst wenn davon ausgegangen wird, dass die Messwerte mit Unsicherheiten behaftet sind und selbst wenn die globale Temperatur bis 2100 um mehr als zwei Grad ansteigen sollte, dürfte der Anstieg des weltweiten Meeresspiegels einen Meter kaum übersteigen.

Es ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass diese Zahlen auch den Einfluss schmelzenden Eises (Gebirge, grönländische und antarktische Eispanzer) beinhalten.

Einleitung

Je weniger man über ein Ereignis weiß, desto mehr ist die Phantasie gefordert. Bei in der Zukunft liegenden Dingen – insbesondere wenn sie als Gefährdung eingeschätzt werden – wird die Phantasie nur selten durch die Vernunft ausreichend kontrolliert.

Der Engländer Andrew Tingle hat vor Jahren eine Software geschrieben und ins Internet gestellt¹, welche es jedem Besucher erlaubt, die Ausdehnung potentieller Überflutungsbereiche infolge eines steigenden Meeresspiegels grafisch darzustellen. Steigender Meeresspiegel um bis zu 60 m ist einstellbar.

Was als intellektuelle Spielerei nicht zu kritisieren ist, wird hochbrisant, wenn sich Berufspessimisten (z.B.²) dieses Werkzeugs bemächtigen, um den Weltuntergang u.a. für die deutsche Nordseeküste vorherzusagen. Dann dehnt sich die Nordsee schon einmal bis nach

¹ <http://flood.firetree.net/>

² <http://juwiswelt.blogspot.com/2009/06/tag-der-Ozeane.html>

Arnheim aus, ohne dass nach den physikalischen Ursachen gefragt wird. Medien greifen diese Scheinprognosen gerne auf.

Deshalb die Frage: Was ist eigentlich dran am steigenden Meeresspiegel für das 21. Jahrhundert?

Bei der Suche nach einer Antwort stößt man auf die Schwierigkeit, zwischen den Meinungen der „Alarmisten“ und der „Skeptiker“ die Wahrheit, oder zumindest die wahrscheinliche Wahrheit zu finden. Die Frage der Klimaänderung hat bereits seit Jahrzehnten einen Glaubenskrieg zwischen beiden Richtungen ausgelöst, der teilweise sehr persönliche Züge angenommen hat. „Alarmist“ und „Skeptiker“ bezeichnen herabwürdigend die Vertreter der jeweils anderen Meinung. Alarmisten werfen den Skeptikern vor, von der Energie- und Autolobby gesponsert zu werden. Skeptiker dagegen weisen darauf hin, dass die andere Seite mit hohen finanziellen Mitteln der Regierungen ausgestattet wird, sofern diesen alarmierende Ergebnisse zupass kommen.

Das Ziel der folgenden Betrachtungen ist, aus dem Wust der zugänglichen Informationen solche herauszufiltern, welche einigermaßen gesichert sind. Wie zu erwarten, hat sich dabei gezeigt, dass die Informationen umso eher geeignet sind, je näher die Quelle bei der Datenerhebung liegt und je weniger sie Wertungen beinhaltet.

Retrospektive

Es ist unbestritten, dass der Meeresspiegel während der letzten Eiszeit um ca. 120 bis 140 m tiefer lag als gegenwärtig. Das Wasser bedeckte als Eis, aber eben als Eis - weite Teile des Festlands. Der grönländische Eispanzer ist noch ein Relikt aus der letzten Eiszeit. Er schmilzt daher logischerweise seit deren Ende langsam vor sich hin. Seine Schmelzraten sind abhängig von den augenblicklichen Minischwankungen der Temperaturen.

Mit dem allmählichen Schmelzen des Eises stieg der Meeresspiegel an. Auf die Entwicklung des Meereswasserspiegels im Bereich der deutschen Nordseeküste seit 1000 v.Chr. weist die von der Bundesanstalt für Wasserbau stammende Grafik in Abb. 1 hin.

Danach lag der Spiegel zur Zeit des Klimaoptimums im Hochmittelalter (der „Warmzeit“, 1200 bis 1450) nur wenige Zentimeter unter dem derzeitigen Stand, sank dann in der kleinen Eiszeit um ca. einen Meter ab, um ab ca. 1600 n. Chr. bis zur derzeitigen Höhe anzusteigen. Insgesamt hat sich der Meeresspiegel im Verlauf der letzten 3000 Jahre um ca. 3 m erhöht.

Für das 20. Jahrhundert berichtet die Literatur über Anstiege zwischen zwei und drei Dezimetern. Von Storch³ nennt 2 dm, wobei er darauf hinweist, dass der Anstieg in den letzten Jahrzehnten etwa doppelt so groß war wie zu Anfang des Jahrhunderts. Andere Autoren stimmen mit diesen Angaben in etwa überein (s. z.B. Hofstede⁴). Das Alfred-Wegener-Institut geht aufgrund eigener Rückrechnungen und nach Auswertung der Angaben

³ Von Storch: Was wissen wir über den regionalen Klimawandel?, IWASA, 2009, S. A/1 ff.

⁴ Hofstede J.: Entwicklung des Meeresspiegels und der Sturmflutwasserstände an den deutschen Küsten: Rückblick und Ausblick, IWASA, 2009, S. C/1 ff.

anderer Autoren von einer Erhöhung des globalen Meeresspiegels zwischen 1900 und 2000 um 15 cm aus⁵.

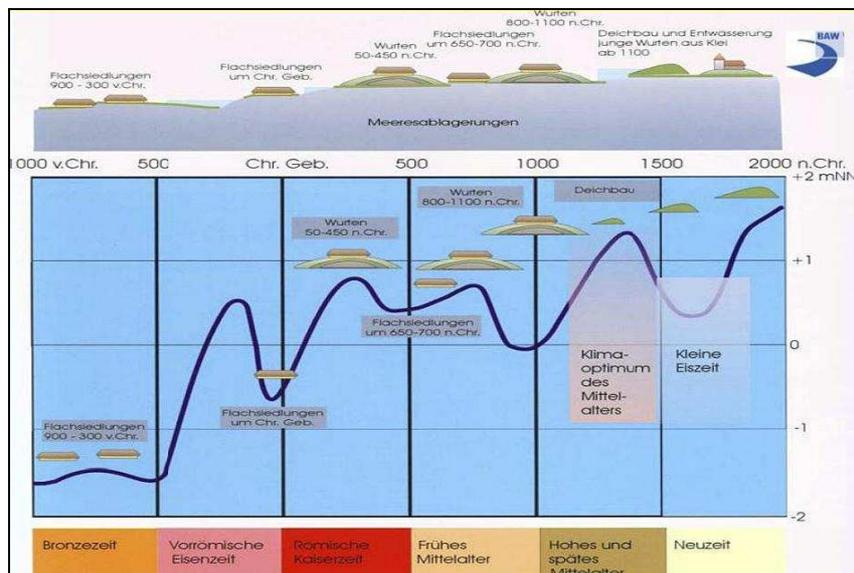


Abb. 1 Zeitlicher Verlauf des Meeresspiegels an der deutschen Nordseeküste nach Angabe der Bundesanstalt für Wasserbau

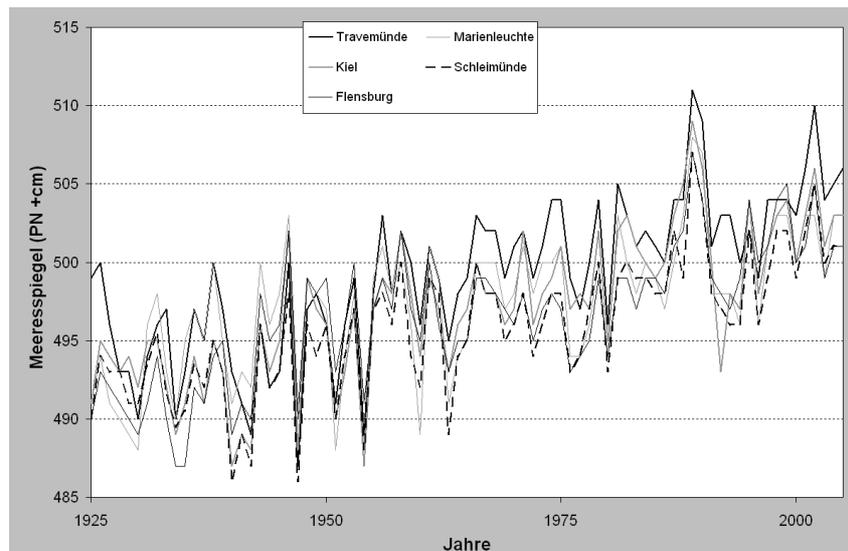


Abb. 2 Gemessener Verlauf des Meeresspiegels an fünf Pegeln in der Ostsee von 1925 bis zur Gegenwart (nach Hofstede)

Temperaturprognosen für das 21. Jahrhundert

Es ist unbestritten, dass sich die Oberflächentemperatur global zwischen 1860 und 2000 um ca. 0,8 Grad erhöht hat. Dies belegen Messungen. Dabei sind vier Phasen zu unterscheiden (Abb. 3)

⁵ Die polare Perspektive – Klimaforschung am Alfred-Wegener-Instituts, 2010

- eine relativ konstante Phase zwischen 1860 und 1910,
- eine Temperatursteigerung zwischen 1910 und 1940 um 0,4 Grad (0,013 Grad je Jahr),
- eine relativ konstante Phase zwischen 1940 und 1980 und
- eine Temperatursteigerung zwischen 1980 und 2000 um 0,4 Grad (0,014 Grad je Jahr)

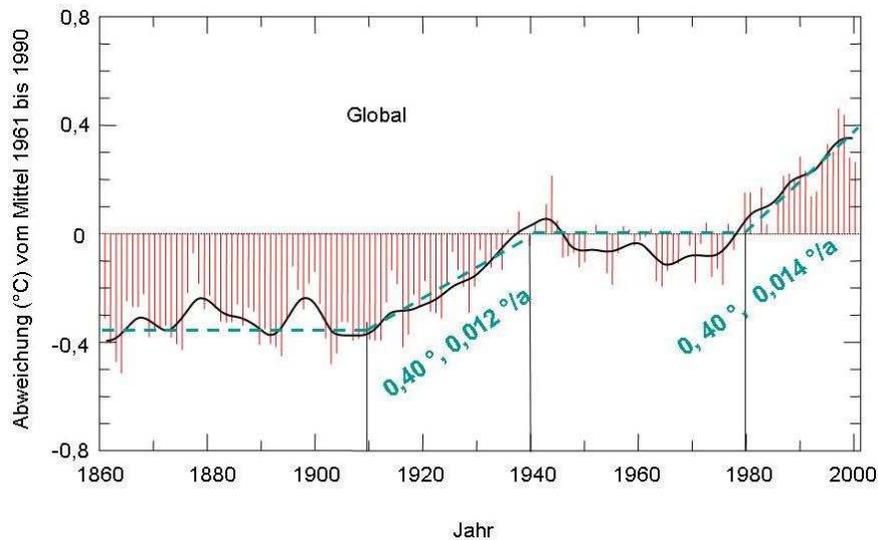


Abb. 3 Gemessene Temperaturen zwischen 1860 und 2000 (Einzelergebnisse: IPCC 2001⁶, ausgleichende Linien: Autor)

Die zwischen 1980 und 2000 beobachtete globale Steigerung der Oberflächentemperatur nimmt sich daher, z.B. verglichen mit der Zeitspanne 1910 bis 1940, nicht als so ungewöhnlich aus.

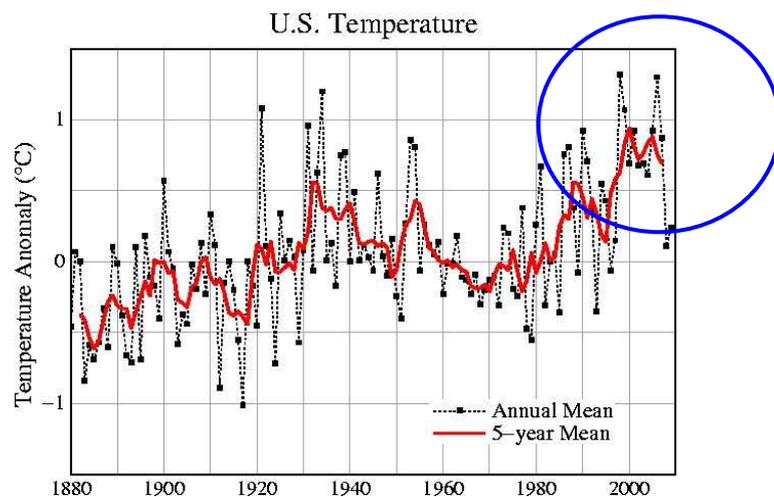


Abb. 4 Temperaturentwicklung in den USA, auch zwischen 2000 und 2009

⁶ IPCC: International Panel of Climate Change, IPCC 2001: Third Assessment Report of the International Panel of Climate Change, 2001

Globale Temperaturdaten für das letzte Jahrzehnt (zwischen 2000 und 2010) sind relativ schwer zu finden. Eine kürzlich veröffentlichte Grafik der NASA ⁷ zeigt jedoch die Entwicklung der Temperaturen für die USA auch nach der Jahrtausendwende (Fig. 4). Daraus geht hervor, dass sich die Temperaturen zumindest in den USA in den Jahren nach der Jahrtausendwende im Mittel nicht verändert haben. Dies spricht nicht so sehr für eine dramatische Temperaturentwicklung, wie sie von IPCC in einem Teil der Szenarien (s. Tabelle 1) unterstellt worden ist.

Im letzten Jahrzehnt ist viel geschrieben worden über Prognosen zur globalen Temperaturerhöhung bis zum Jahr 2100 n.Chr.. Die bekannteste stammt vom IPCC. Sie kommt zur Auffassung, dass die globale Temperatur bis zum Jahr 2100 um 1,8 bis 6,4 K steigen wird, je nach dem unterstellten Szenario (Tabelle 1).

Tabelle 1 Mittlere globale Erwärmung und Anstieg des Meeresspiegels zwischen 1988-1999 und 2090-2099 nach dem IPCC-Bericht 2007

Szenario	Temperaturänderung		Meeresspiegelanstieg (m)
	Beste Schätzung (°K)	Wahrscheinliche Bandbreite (°K)	
Jahr 2000 Konzentration der Emission konstant	0,6	0,3-0,9	keine Angabe
B1-Szenario	1,8	1,1-2,9	0,18-0,38
A1T-Szenario	2,4	1,4-3,8	0,20-0,45
B2-Szenario	2,4	1,4-3,8	0,20-0,43
A1B-Szenario	2,8	1,7-4,4	0,21-0,48
A2-Szenario	3,4	2,0-5,4	0,23-0,51
A1F1-Szenario	4,0	2,4-6,4	0,26-0,59

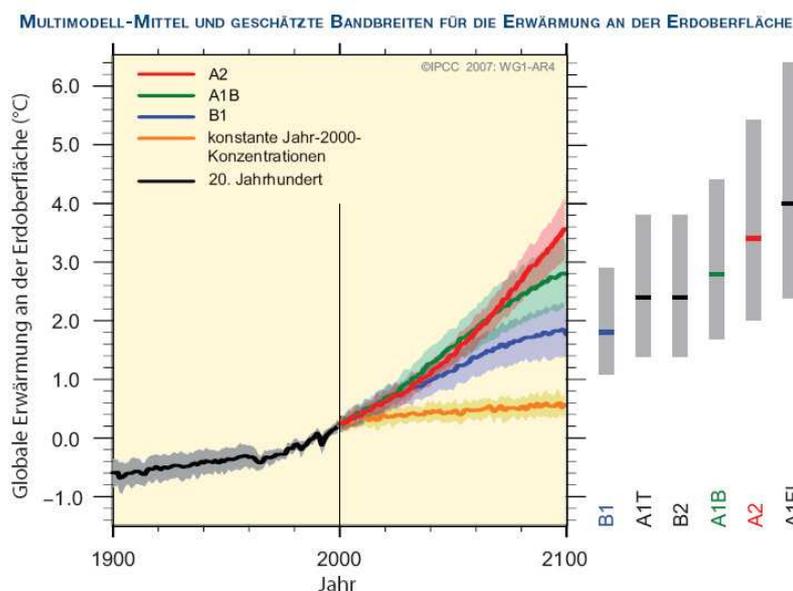


Abb. 5 Mittlere globale Erwärmung gemäß IPCC Bericht 2007 (Daten in Tabelle 1)

⁷ <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>

Zukünftiger Anstieg des Meeresspiegels (bis 2100 n.Chr.)

IPCC-Prognose von 2007

Parallel zur möglichen globalen Temperaturentwicklung veröffentlichte IPCC in seinen Berichten, z.B. im 2007er-Bericht, auch Zahlen für die Erhöhung des Meeresspiegels bis zum Jahr 2100. Sie sind aus dem 2007er Bericht ebenfalls der Tabelle 1 zu entnehmen. Danach erwartet IPCC gegenwärtig einen Anstieg zwischen 18 und 59 cm.

Es ist anzumerken, dass IPCC in früheren Berichten bis 2100 wesentlich dramatischere Spiegelanstiege prognostiziert hat, so 3,67 m im ersten Bericht von 1990 (Abb. 6). Nach und nach passte sich IPCC der Realität an, so wie sie sich inzwischen nach den Messungen herausstellt hat und auch für die Zukunft wahrscheinlicher wird⁸.

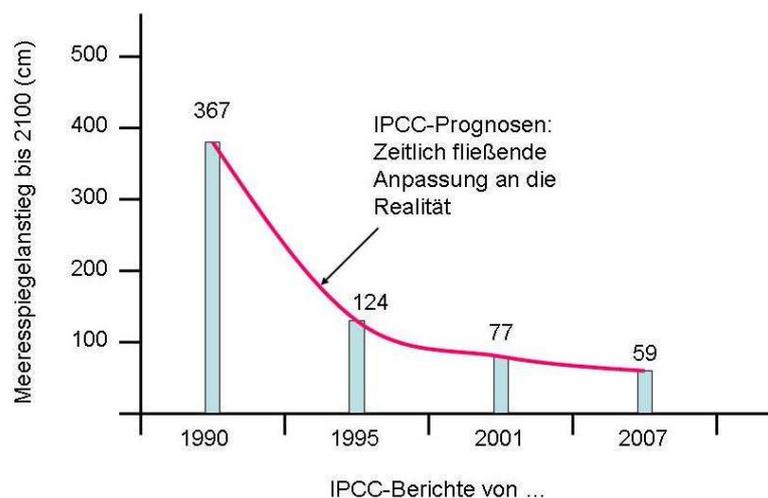


Abb. 6 Prognosen des IPCC zum Meeresspiegelanstieg im 21. Jahrhundert (nach K.-E. Puls, s. Fußnote 8)

Meinungen Anderer

Wissenschaftler des Helmholtz-Zentrums Geesthacht schätzten in einer Anhörung des Schleswig-Holsteinischen Landtags am 20. Mai 2009⁹ und in anderen Vorträgen (z.B.¹⁰), allerdings bezogen auf Sturmfluten, die Zukunft folgendermaßen ein:

⁸ http://solarresearch.org/sk2010/INFO/Puls_Meeresspiegelanstieg_Klima_2008_11.pdf und Puls K-E.: „Anthropogener“ Meeresspiegelanstieg – Vom Konstrukt zur Panik? Naturwissenschaftliche Rundschau, 61. Jahrgang, Heft 11, 2008

⁹ http://www.klimacampus.de/fileadmin/user_upload/klimacampus/4_Publikationen/Sturmflut_Statement_GKSS.pdf

¹⁰ Von Storch: Was wissen wir über den regionalen Klimawandel? <http://www.iww.rwth-aachen.de/de/menue/iwasa/iwasa2009/talks.html>

Bisher hat sich der von Menschen verursachte Klimawandel kaum auf die Nordseesturmfluten ausgewirkt. Künftig können sie jedoch höher auflaufen. Bis 2030 ist der derzeitige Küstenschutz an der Nordsee fast genauso wirksam wie heute. Bis Ende des Jahrhunderts kann jedoch Handlungsbedarf entstehen, denn bis dahin können Sturmfluten drei bis elf Dezimeter höher auflaufen als heute.

Klima-Media¹¹ veröffentlichte am 8. Dezember 2009 unter dem Titel *Ohne Schutz wird zum Jahrhundertende die heutige Nordseeküste verschwunden sein* eine Zusammenfassung und Bewertung einer Studie von Martin Vermeer, Helsinki University of Technology, und Stefan Rahmsdorf vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, nach welcher ein Anstieg des Meeresspiegels von bis zu 2 m bis 2100 errechnet worden ist. Zur Illustration ist gleichzeitig eine Grafik veröffentlicht worden, welche die Gebiete an der deutschen Nordseeküste markiert, die niedriger als 2 m über dem mittleren Meeresspiegel liegen (Abb. 6). Wenngleich der zugehörige Text darauf hinweist, dass vorhandene Küstenschutzmaßnahmen dabei nicht berücksichtigt sind, so erwecken Grafik und Text

Der projizierte Anstieg ist etwa dreimal so hoch wie die Abschätzung aus dem vierten Sachstandsbericht des Weltklimarates IPCC von 2007, die den Eisverlust in Grönland und der Antarktis nicht vollständig berücksichtigt. Ein so starker Anstieg wäre eine existentielle Bedrohung vieler Küstenstädte und einer Reihe kleiner Inselstaaten. Sie wird nur zu vermeiden sein, wenn der Ausstoß von Treibhausgasen drastisch und schnell sinkt.

doch den Eindruck, dass sich die deutsche Nordseeküste (und andere Küsten) in höchster Gefahr befinden.

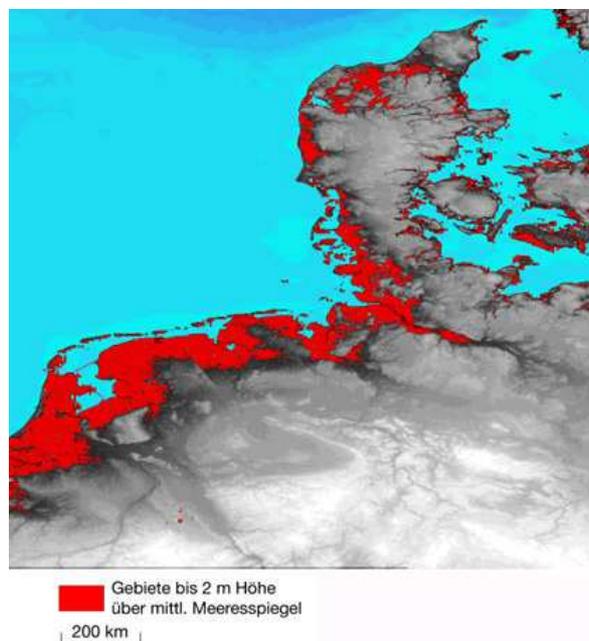


Abb. 6 Gebiete bis 2 m über dem Meeresspiegel aus Klima-Media

Vergleichbare pessimistischen Statements sind im Internet, jedoch auch in anderen Medien *en masse* zu finden. Oftmals lässt sich ihre mangelnde Seriosität bereits aus dem Text erkennen, manchmal auch nach dem Herausgeber bzw. Autor vermuten. Häufig allerdings geben sie

¹¹ <http://klima-media.de/tag/ipcc/page/3/>

sich erfolgreich den Anschein der Glaubwürdigkeit, so dass der flüchtige Besucher geneigt ist, die Statements als bare Münze zu nehmen.

In der Folge wird daher der Frage nachgegangen, was tatsächlich glaubhaft und was Scharlatanerie oder Ausfluss von unnötigem Pessimismus ist.

Einflüsse auf den Meerwasserspiegel

Alle Hypothesen über den Anstieg des Meeresspiegels bis zum Ende des 21. Jahrhunderts gehen von fünf Wirkungen der Klimaerwärmung aus,

- von steigender Wassertemperatur in den Weltmeeren,
- vom Schmelzen der Gletscher in den polfernen Gebirgen,
- vom Schmelzen des Eises im Nordpolarmeer
- vom Schmelzen des grönländischen Eispanzers
- vom Schmelzen des antarktischen Eispanzers.

Steigende Wassertemperatur in den Weltmeeren

Die seriösen Berichte gehen generell davon aus, dass der bisher zu beobachtende Anstieg des Meeresspiegels, ob seit der kleinen Eiszeit (Abb. 1) oder im letzten Jahrhundert, überwiegend auf die Wärmeausdehnung des Ozeanwassers zurückzuführen ist.

Das Volumen von Wasser nimmt bei Erwärmung um 1 K um 0,21 Promille zu. Bei der Erwärmung einer Wassersäule im Ozean kann die Ausdehnung nur nach oben gerichtet sein. Erwärmt sich das Wasser um 1 Grad, so dehnt sich eine Wassersäule also um 0,21 mm pro Meter nach oben aus.

Um den Anstieg des Meeresspiegels infolge der Erwärmung der Atmosphäre exakt berechnen zu können, müsste bekannt sein, wie tief die Erwärmung in den Wasserkörper hinab reicht und wie die Verteilung der Temperaturzunahme in der Tiefe aussieht.

Abb. 7 zeigt ein schematisches Temperaturtiefenprofil, ähnlich dem, wie es z.B. nach¹² am 31. Mai 1999 im südlichen Atlantik bei 20° westl. Länge und 30° südl. Breite gemessen worden ist. Danach ist das Tiefenwasser unterhalb von 1000 m durchgängig nahezu 4° C warm. Der Energieeintrag von der Oberfläche her manifestiert sich im Wesentlichen oberhalb. Geht man davon aus, dass sich eine Temperaturerhöhung infolge zunehmender atmosphärischer Wärme proportional zu diesem Temperaturprofil entwickelt, so lässt sich die Wärmeausdehnung bzw. die Anhebung des Wasserspiegels bei z.B. 1 K Erhöhung der Lufttemperatur überschlägig ermitteln. Für die Temperaturverteilung nach Abb. 7 und für eine Erwärmung um 1K (was der im letzten Jahrhundert beobachteten Temperaturerhöhung in etwa entspricht) ergibt eine Zahlenrechnung ca. 11,5 cm Hebung des Meeresspiegels.

¹² J. Osborne und J.H. Swift. 2008. Java Ocean Atlas. Eine Java Anwendung zur graphischen Darstellung und Untersuchung von ozeanographischen vertikalen Profildaten. <http://odf.ucsd.edu/joa/>

Mit einem solchen, zugegebenermaßen äußerst groben Modell lässt sich zwar nicht die Gesamtheit der von v. Storch oder vom Alfred-Wegener-Institut genannten (siehe oben) genannten 2 dm bzw. 15 cm erklären, wohl aber zwanglos ca. 60 bis 80% davon. Dies ist nicht unplausibel, berücksichtigen die Literaturangaben doch auch den Einfluss des schmelzenden Eises.

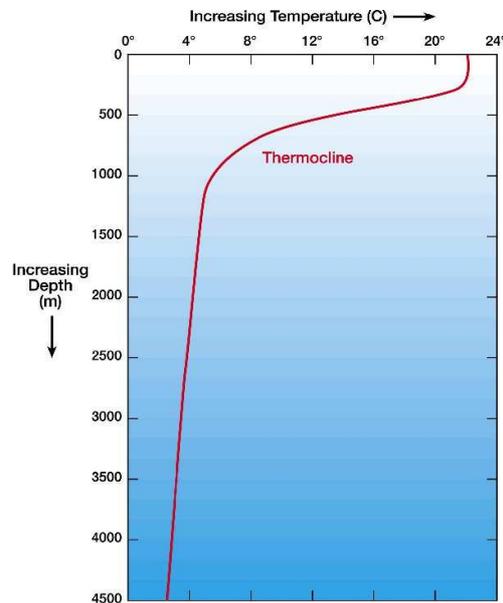


Abb. 7 schematisches Temperaturtiefenprofil

Würde die globale Lufttemperatur bis zum Jahr 2100 um ein bzw. zwei Grad zunehmen, so wäre demnach aufgrund der Wärmeausdehnung des Wassers ein Anstieg des Meeresspiegels um 11,5 bzw. 23 cm zu erwarten.

Schmelzen der Gletscher in den polfernen Gebirgen

In IPCC 2007¹³ sind die Eckpunkte zum globalen Inventar der Gletscher (außerhalb der Eisschilde in Grönland und in der Antarktis) zusammengestellt. Danach wird deren Gesamtfläche auf 512 bis 546 * 10³ km² geschätzt bei einem Gesamtvolumen von 51 bis 133 * 10³ km³. Ihr Sea Level Equivalent (SLE), also das Maß, um welches der Meeresspiegel bei völligem Schmelzen angehoben werden würde, liegt zwischen 15 und 37 cm.

Berichte über die Längen von Gletschern reichen bis weit ins 17. Jahrhundert zurück. Sie sind generell genauer und zuverlässiger als Volumenabschätzungen. Oerlemans¹⁴ hat dies genutzt und 2005 eine regionale Aufstellung über das Verhalten von 169 großen, weltweit verteilten Gletschern während der letzten 300 Jahre erarbeitet. Er unterscheidet verschiedene Regionen (s. Abb. 8):

- Südliche Hemisphäre (Tropen, Patagonien, Neuseeland)

¹³ IPCC Fourth Assessment Report – Climate Change 2007: The Physical Science Basis, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm

¹⁴ Oerlemans, J.: Extracting a climate signal from 169 glacier records. Science, 308, 675-677

- Nordwest- Nordamerika (zumeist kanadische Rocky Mountains)
- Atlantik (Südgrönland, Island, Jan Mayen, Spitzbergen, Skandinavien)
- Europa (Alpen und Skandinavien)
- Asien (Kaukasus und Zentralasien)

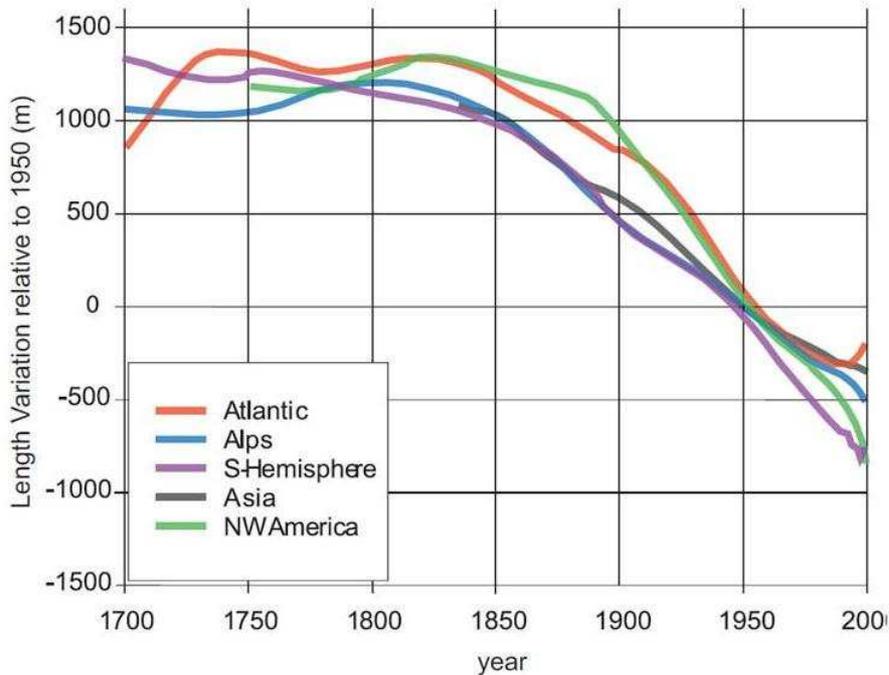


Abb. 8 Mittlere Längenänderungen von 169 Gletschern zwischen 1700 und 2000 (nach Oerlemans, 2005)

Seine Ergebnisse sind überraschend. Nach Oerlemans beginnt der Rückzug der Gletscher weltweit bereits um 1850 und setzt sich über die folgenden 1 ½ Jahrhunderte etwa linear fort. Oerlemans Ergebnisse stützen die von J. Reichholf¹⁵ vertretene These, dass die derzeitige beobachtende Temperaturerhöhung nicht in erster Linie auf das CO₂ als Klimagas zurückzuführen ist, sondern als Ende der kleinen Eiszeit zu betrachten ist. Sie stehen jedoch im Widerspruch der Grafik aus IPCC 2001, welche hier als Abb. 3 wiedergegeben worden ist, und zur Hockeystickkurve (IPCC 2007), nach der die Klimaerwärmung erst um 1910 eingesetzt haben soll. Es ist zu fragen, warum IPCC zwar Oerlemans Ergebnisse 2007 in ihren Materialienband erwähnt, jedoch nicht als Grundlage in die weiteren Überlegungen zu den Prognosen einbezogen hat.

Aufzeichnungen über direkt gemessene Gletschervolumina sind rar, einfach wegen der topografischen Schwierigkeiten, welche den Messungen entgegen stehen. Sie sind erheblich schwieriger als die bloße Bestimmung der Längen von Gletschern. IPCC ist sich dessen bewusst. Dennoch werden Bilanzen sowohl für die globale Situation als auch für einzelne Regionen veröffentlicht. Danach werden folgende Abschätzungen für das relative SLE (in mm/a) bei Betrachtung weltweit aller Gletscher (ohne grönländische und antarktische Eispanzer) für richtig gehalten:

1960/61 bis 2003/04	0,43 ± 0,15 mm/a
1960/61 bis 1989/90	0,33 ± 0,14 mm/a

¹⁵ J. Reichholf: Eine kurze Naturgeschichte des letzten Jahrtausends, S. Fischer Verlag, Frankfurt am Main, 2007, 336 Seiten

1990/91 bis 2003/04

$0,63 \pm 0,18$ mm/a

Da die zweite Zahl jeweils die Unsicherheit beschreibt, könnte sich also in der Realität der Meeresspiegel z.B. in den Jahren 1960/61 bis 2003/04 um jährlich mindestens $0,43 - 0,15 = 0,28$ mm oder um maximal $0,43 + 0,15 = 0,58$ mm gehoben haben.

Unterstellt, der Anstieg würde sich so verhalten, wie zwischen 1990/91 und 2003/04, so wären in 100 Jahren, also bis rund 2100, zwischen 45 mm und 81 mm zu erwarten.

Schmelzen des Eises im Nordpolarmeer

Wenn das Eis im Nordpolarmeer schmelzen würde, hätte dies keinen Einfluss auf den globalen Meeresspiegel. Dies folgt aus der Tatsache, dass es sich dort ausschließlich um Schwimteis handelt. Das spezifische Gewicht von Eis ist etwa $0,9 \text{ t/m}^3$, von Wasser $1,0 \text{ t/m}^3$. 1 Kubikmeter Eis verdrängt, im Wasser schwimmend, 0,9 Kubikmeter Wasser. Der Rest ragt oben heraus (Prinzip Eisberg). Schmilzt das Eis, so bleiben 0,9 Kubikmeter Wasser zurück. An der Höhe des Wasserspiegels ändert sich nichts.

Schmelzen des grönländischen Eispanzers

Das Volumen des grönländischen Eispanzers beträgt etwa $3 \cdot 10^6 \text{ km}^3$, das entspricht etwa $2,7 \cdot 10^6$ Gt. IPCC hat in dem vorstehend erwähnten Bericht u.a. sehr präzise das weltweite Wissen über die auf und im grönländischen Eisschild ablaufenden Prozesse, soweit sie das Volumen berühren, zusammengetragen. Das Problem dabei: Volumenbestimmungen (besser: fundierte Schätzungen) in solchen Dimensionen sind erst seit der Entwicklung der Satellitenmethoden halbwegs zuverlässig möglich. Frühere Versuche per Flugzeug führten stets zu nur mehr oder weniger glaubhaften Ergebnissen und waren auf Teilbereiche beschränkt.

Soweit mit unterschiedlichen Methoden gewonnene Ergebnisse verglichen werden, ergibt sich generell ein Problem. Es ist stets zu vermuten, dass sie unterschiedliche Genauigkeiten aufweisen. Dies wirkt sich besonders dann aus, wenn Resultate, die nur ganz wenig voneinander abweichen, von einander subtrahiert werden müssen. Dies macht die Aussagen oft fragwürdig.

Des Weiteren sind Vermessungen und Auswertungen sehr aufwendig, weshalb auch aus neuester Zeit nur wenige Daten vorhanden sind.

In Anhang 1 sind die von IPCC ausgewerteten Ergebnisse zusammengestellt. IPCC beschreibt Änderungen der Eismassen in Gt/a und nennt für jede Erhebung zwei Zahlen in der Form $x \pm y$. Dabei bezeichnet x den von den jeweiligen Forschern angegebenen Mittelwert und y die Unsicherheit der Auswertung. Jedes Ergebnis liegt also zwischen $x - y$ als minimaler und $x + y$ als maximaler Veränderung. Diese Darstellung entspricht genau derjenigen, welche für das Eisschmelzen bei den polfernen Gletschern (s. oben) verwendet worden ist.

Bereits eine flüchtige Sichtung zeigt beachtliche Unterschiede. Insbesondere fällt auf, dass die zahlenmäßigen Unsicherheiten teilweise größer sind als die Mittelwerte, was im Grunde zum

Ausdruck bringt, dass sich der jeweilige Autor unsicher ist, ob er am Ende eine Verringerung der Eismasse oder eine Vergrößerung ermittelt hat. Dies zeigt, dass die Ergebnisse generell mit Vorbehalt zu bewerten sind. IPCC ist sich dieses Mangels bewusst. Denn die Bestandsaufnahme schließt mit dem Satz: *Lack of agreement between techniques and the small number of estimates preclude assignment of statistically rigorous error bounds.*

IPCC hat im gleichen Report auch eine Grafik veröffentlicht, welche das Ergebnis eines Vergleichs von ICESAT-Daten von 2005 mit per Flugzeug gemessenen Daten von 1998/99 beinhaltet (Abb. 8) Diese weist aus, dass die Eisoberfläche und damit das Eisvolumen sich im weitaus überwiegenden Teil des Eispanzers zwischen 1998/99 und 2003 nicht verändert hat, eher sogar geringfügig zugenommen hat. Lediglich in den Randbereichen wurden Verringerungen festgestellt.

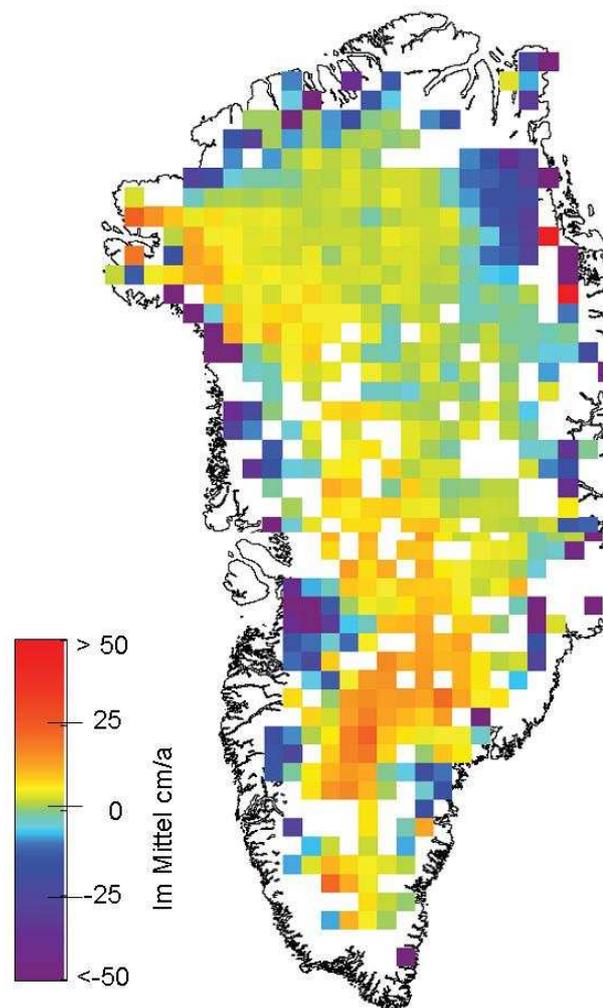


Abb. 8 Jährliche Höhenänderung der Oberfläche des grönländischen Eispanzers ermittelt aus vom Flugzeug aus durchgeführten Messungen in 1998/99 und aus ICESat-Daten aus 2005 (IPCC)

Mit der bekannten Gesamtfläche aller Ozeane und der mit diesen verbundenen Meeren von $3,63 \times 10^8 \text{ km}^3$ und der Tatsache, dass 1 Gt Eis einem km^3 Wasser entspricht, lässt sich der mittlere globale Spiegelanstieg beim Schmelzen von 1 Gt Eis bestimmen: 1 Gt Eis entspricht 0,00271 mm Spiegelanstieg.

Angewendet auf die Ergebnisse in Anhang 1 ergibt der Mittelwert der Mittelwerte, dass sich der Eispanzer in der Vergangenheit jährlich um 54 Gt verringert hat und dass sich der Meeresspiegel deshalb um 0,15 mm/a gehoben hat.

Sollten die Verhältnisse auch im 21. Jahrhundert so bleiben, so würde er sich bis zum Jahr 2100 aufgrund der Veränderung des grönländischen Eispanzers um insgesamt 15 mm heben.

Nun weist Anhang 1 aus, dass die Ergebnisse, welche das letzte Jahrzehnt betreffen (gelb markiert), etwas höhere Verringerungsraten aufweisen, doch ist der Unterschied nur marginal, insbesondere angesichts der in allen Erhebungen steckenden Unsicherheiten. Werden nur diese Ergebnisse einbezogen, so ergäben sich statt 0,15 mm/a nun 0,23 mm/a bzw. in 100 Jahren 23 mm Hebung des Meeresspiegels.

Zu ganz ähnliche Ergebnissen kommen Christoph Mayer und Hans Oerter in ¹⁶. Sie fassen zusammen: *Der Massenverlust des Grönländischen Eisschildes reicht aus für einen Meeresspiegelanstieg von 0,13-0,18 mm/Jahr.*

Also: Selbst wenn die Erwärmung noch stark zunehmen würde, bliebe der Einfluss des grönländischen Eispanzers im einstelligen Zentimeterbereich.

Schmelzen des antarktischen Eispanzers

Im Grunde könnte dieses Thema sehr kurz abgehandelt werden. Es genügt ein Hinweis auf Seite 31 einer Informationsschrift des Umweltbundesamtes von 2004¹⁷ zum Einwand der „Klimaskeptiker“ „Nicht überall schmelzen Gletscher, nicht überall steigt der Meeresspiegel“. Dort steht wörtlich:

Die Antarktis ist der kälteste Teil der Erde, die Temperaturen sind so niedrig, dass (von der antarktischen Halbinsel abgesehen) bis jetzt kein Tauprozess eingesetzt hat. Durch die Erwärmung der Ozeane ergibt sich eine höhere absolute Feuchte der Atmosphäre, so dass durch Niederschlag und Kondensation an dieser Kältefalle die Menge des Eises sogar zunehmen kann.

Diese Feststellung von 2004 hat nichts von ihrer Gültigkeit eingebüßt.

Zusätzlich kann auch hier auf IPCC 2007 zurückgegriffen werden. Dort sind die auf Beobachtungen beruhenden Schätzungen des jährlichen Verlustes an Eis von einem halben Dutzend Forschern ausgewertet worden. Auch hier sind die vorstehend im Zusammenhang mit Grönland genannten Probleme bei derartigen Messungen relevant. Deren Ergebnisse sind in Anhang 2 zusammengestellt.

Auch für die Antarktis erweist sich, ebenso wie für Grönland, dass die Unsicherheiten der Schätzungen so groß sind, dass überhaupt nicht klar ist, ob das Volumen des Eispanzer in der

¹⁶ Christoph Meyer & Hans Oerter: Die Massenbilanzen des Antarktischen und Grönländischen Inlandeises und der Charakter ihrer Veränderungen. In José Lozan/ Helmut Graßl/ Hans-W. Hubberten/ Peter Hupfer/ Ludwig Karbe/ Dieter Piepenburg (Hrsg.): „Warnsignale aus den Polarregionen“, Wissenschaftliche Auswertungen, 2006, Hamburg, 92-96

¹⁷ Information des Bundesumweltamtes: Klimaänderung: Festhalten an der vorgefassten Meinung? Wie stichhaltig sind die Argumente der Skeptiker?, Mai 2004

Summe zu- oder abnimmt. So fasst IPCC die Ergebnisse dahingehend zusammen, dass die Veränderungen zwischen einer Zunahme von 100 Gt/a und einer Abnahme um 200 Gt/a liegen können.

Selbst wenn der Eispanzer jährlich um 200 Gt/a abnehmen würde, entspräche dies einer Erhöhung des Meeresspiegels um 0,5 mm/a bzw. um 55 mm in hundert Jahren. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist dies jedoch erheblich weniger.

Gesamtschau

Werden die einzelnen Hebungsbeiträge aus den vorhergehenden Abschnitten aufaddiert, so ergibt sich:

Anhebung des globalen Meeresspiegels

- infolge Wärmeausdehnung des Wassers (Temperaturzunahme 2 Grad unterstellt)	23 cm	(59%)
- infolge weiterem Abschmelzen der Gletscher, mit Raten wie im letzten Jahrzehnt (ohne grönländischem und antarktischem Eispanzer)	4,5 bis 8,1 cm	(21%)
- infolge Abschmelzen des Nordpolareises, mit Raten wie im letzten Jahrzehnt	0 cm	(0%)
- infolge Abschmelzen des grönländischen Eispanzers, mit Raten wie im letzten Jahrzehnt	2,3 cm	(6%)
- infolge Abschmelzens des antarktischen Eispanzers, mit Raten wie im letzten Jahrzehnt	5,5 cm	(14%)
<u>In der Summe rechnerisch</u>	<u>35 bis 39 cm</u>	<u>(100%)</u>

Selbst wenn davon ausgegangen wird, dass die Messwerte mit Unsicherheiten behaftet sind und selbst wenn die globale Temperatur bis 2100 um mehr als zwei Grad ansteigen sollte, dürfte der Anstieg des weltweiten Meeresspiegels einen Meter kaum übersteigen.

Auswertung der Schätzungen zur Erhöhung des globalen Meeresspiegels infolge Verringerung des Eispanzers in Grönland im IPCC Bericht 2007

Quelle: IPCC Forth Assessment Report: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, p.363 ff

Autor(en), Jahr	Ermittlung für das Zeitfenster	Verringerung in Gt/a (Mittelwert ± Unsicherheit)	Anstieg des Meeresspiegels (mm/100 a)
Velicogna/Wahr, 2005	April 2002-Juli 2004	75 ± 26	14 – 28
Ramillien et al., 2006	Juli 2002 – März 2005	129 ± 15	31 – 40
Box et al., 2006	1988 - 2004	> 100	> 28
Hanna et al., 2005	1961 - 1990	22 ± 51	0 – 20
	1993 - 1998	14 ± 55	0 – 19
	1998 - 2003	36 ± 59	0 – 26
Zwally et al., 2006	1992 - 2002	-(11 ± 3)	0
Krabill et al., 2004	1993/94 – 1998/99	45	12
	1997 - 2003	73 ± 11	17 – 23
Rignot/Kanagaratnam, 2006	1993/94 – 1998/99	27 ± 23	1 – 14
	1997 - 2003	55 ± 25	8 – 22
Thomas et al., 2006	1998/99 - 2004	81 ± 24	16 - 29
Zusammengefasst von IPCC	1961 – 2003 1993 – 2003 2003 - 2005	-25 bis 60 50 bis 100 > 100	

Angenommene Gesamtfläche aller Ozeane $3,63 \times 10^8 \text{ km}^2$.

Abschließende Anmerkung im IPCC-Bericht: *Lack of agreement between techniques and the small number of estimates preclude assignment of statistically rigorous error bounds.*

Auswertung der Schätzungen zur Erhöhung des globalen Meeresspiegels infolge Verringerung des Eispanzers in der Antarktis im IPCC Bericht 2007

Quelle: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, p.364 ff

Autor(en), Jahre ermittelt für Zeitfenster	Ermittlung für W Westantarktis O Ostantarktis G Gesamtantarktis	Verringerung in Gt/a (Mittelwert ± Unsicherheit)	Anstieg des Meeresspiegels (mm/100 a)
Rignot/ Thomas, 2002, keine Angabe zum Zeitfenster	O	-(20 ± 21)	
	W	44 ± 13	
	G	24 ± 25	0 - 14
Zwally et al., 2006	O	-(17 ± 11)	
	W	47 ± 4	
	G	30 ± 12 ^{*)} 13 ± 5	5 - 12 2 - 5
Davis et al., 2005	G	-(45 ± 8) ^{**)}	0
		-(105 ± 20)	0
Velicogna/Wahr, 2006 Apr. 2002-Juli 2005	G	139 ± 73	18 - 58
Ramillien et al., 2006 Juli 2002- März 2005	O	-(67 ± 28)	
	W	107 ± 23	
	G	40 ± 36	1 - 21
Zusammengefasst von IPCC	G	Zwischen 100 Gt/a Zunahme und 200 Gt/a Abnahme ^{***)}	0 - 55

^{*)} Abnahme 30 ± 12 Gt/a, falls die Oberfläche aus Eis besteht, 13 ± 5 Gt/a, falls die Oberfläche aus Firnschnee besteht (Unsicherheit, da die Satellitendaten darüber keine Auskunft gaben)

^{**)} Zunahme 45 ± 8 GT/a, falls die Oberfläche aus Firn besteht, 105 ± 20 Gt/a, falls die Oberfläche aus Eis besteht (Unsicherheit, da die Satellitendaten darüber keine Auskunft gaben)

^{***)} Zitat IPCC: *Acceleration of mass loss is likely to have occurred, but not so dramatically as in Greenland. Considering the lack of estimated strong trends in accumulation rate, assessment of the possible acceleration and the slow time scale affecting central regions of the ice sheets, it is reasonable to estimate that the behaviour from 1961 to 2003 falls between ice sheet growth of 100 Gt yr⁻¹ and shrinkage of 200 Gt yr⁻¹.*