

Dietrich Spänkuch

Fernerkundung der Erde – Hiobsbotschaften aus dem All

1. Einleitung

Der Anblick unseres Planeten aus dem Weltraum ist, so berichten Kosmo- und Astronauten ohne Ausnahme, von atemberaubender Schönheit. Dennoch können diese Momentaufnahmen der Erde nicht darüber hinwegtäuschen, dass unser Planet ernsthafte und schwerwiegende Probleme hat. Die Fernerkundung der Erde ist noch nicht einmal 50 Jahre alt, systematisch begann sie eigentlich erst 1972 mit dem Earth Resources Technology Satellite-1 (ERST-1), der später, 1975, in Landsat-1 umbenannt wurde. Und doch reicht diese kurze Zeitspanne bereits für einige unerfreuliche und z.T. beängstigende Nachrichten. Nun kann man natürlich geteilter Meinung sein, was eine Hiobsbotschaft ist. Es gibt zahlreiche negative Umweltveränderungen, wie Abholzung tropischer Regenwälder, Wüstenausdehnung u.a., deren globale Ausmaße erst durch die Fernerkundung mittels Satelliten in erschreckender Weise sichtbar werden. In ihrer Gesamtheit kann man sie sicher als Hiobsbotschaft bezeichnen. Zwei singuläre Fälle, die hier diskutiert werden, waren oder sind für sich allein aber schon eine Hiobsbotschaft. Die Entdeckung des antarktischen Ozonlochs (Beispiel 1) geschah gerade noch rechtzeitig, um wirksame Maßnahmen zur Eindämmung negativer Einwirkungen auf die Umwelt einzuleiten. Ob dies auch beim beobachteten Anstieg des Meeresspiegels gelingen wird, wird die Zukunft zeigen.

2. Das antarktische Ozonloch

Das antarktische Ozonloch – Werte des Gesamtozongehalts unter 200 Dobsonseinheiten (DU)¹ – wurde zuerst nicht von Satelliten festgestellt. Es waren

1 Zu Ehren des Pioniers der atmosphärischen Ozonforschung, des Briten Sir G.M.B. Dobson (1889–1976) benannte Maßeinheit des Gesamtozongehalts, der sich in einer senkrechten Säule über einen Ort bei Normalbedingungen (1024 hPa und 273 °K) befindet. 1 DU entspricht 0,01mm Schichtdicke Ozon.

Wissenschaftler des British Antarctic Survey (Farman u.a. 1985), die aus ihren Messungen an der antarktischen Station Halley Bay (75°35'S, 29°39'W) auf dieses Phänomen hinwiesen, das seit Ende der 70er Jahre regelmäßig im antarktischen Frühjahr auftritt². Werte unter 200 DU waren nie zuvor nur annähernd gemessen worden³. Die NASA hatte deshalb in ihrer Datenbearbeitung Werte unter 180 DU, weil höchst unwahrscheinlich, als fehlerhafte Daten gekennzeichnet und deshalb nicht weiter bearbeitet (Roan 1989, S. 128). Diese Entscheidung ist durchaus nachvollziehbar, basierten die Satellitenmessungen des Gesamtzongehalts, die seit 1978 mit dem Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) von Nimbus-7, dem ersten Satelliten der NASA zur globalen Umweltüberwachung, vorgenommen wurden, auf Messungen des von der Atmosphäre zurück gestreuten Sonnenlichts im UV-Bereich⁴. In der Polarnacht fielen somit keine Messungen an und zu Beginn des Frühjahrs sind die zu messenden Intensitäten in hohen Breiten gering und wegen der schräg stehenden Sonne auch mit größeren Unsicherheiten behaftet. Auch Farman zögerte mit seiner Veröffentlichung ungewöhnlich lange, war doch die Abnahme des Ozongehalts in den Daten mindestens seit 1978 nicht zu übersehen. Auch er zweifelte zunächst an der Richtigkeit seiner Messungen⁵, – die Bodenmessungen beruhen ebenfalls auf Messungen im UV⁶ –, und vielleicht war es erst der Vortrag des Japaners Chubachi (1985), der auf

-
- 2 Die Station Halley Bay wurde im Rahmen des Internationalen Geophysikalischen Jahres 1957 eingerichtet. Seit dieser Zeit werden an dieser Station fortlaufend Ozonmessungen durchgeführt.
 - 3 An der japanischen Station Kagoshima (32°N, 131°E) wurden im Dezember/Januar 1960/61 an 9 Tagen Werte unter 200 DU gemessen. Zweifel an einer adäquaten Eichung des Geräts (es wurde 1963 ersetzt) lassen diese Messungen als fraglich erscheinen (Rood 1986). Weltweit wurden in den frühen 60er Jahren relativ niedrige Gesamtzonzonwerte als Folge einer außerordentlich starken Quasiannual Oscillation (QBO: annähernd zweijährige Schwingung des zonalen Windes in der unteren und mittleren Atmosphäre der Tropen) registriert (Angell und Korshover 1973).
In der älteren Literatur, so in der ersten geographischen Isoplethendarstellung des atmosphärischen Gesamtzongehalts (Götz 1949) werden Werte von 150 DU in den Tropen und im Jahresgang von Tromsö im Dezember/Januar ebensolche niedrigen Werte angegeben. Sie finden sich verbreitet bis weit in die 70er Jahre in Textbüchern und Monographien, basieren aber auf veralteten Ozonabsorptionskoeffizienten.
 - 4 TOMS ist ein Fastie-Ebert-Spektrometer mit sechs Spektralkanälen im UV-Bereich von 312,5 bis 380 nm, das senkrecht zur Bahnrichtung des Satelliten gescannt wird und tägliche Messungen des Gesamtzongehalts der von der Sonne beschienenen Atmosphäre bis zu Zenitdistanzen der Sonne von 88° bei einer horizontalen Auflösung von 50 km in Nadirrichtung bis 250 km bei maximalem Scanwinkel liefert.
 - 5 Roan (S. 124) berichtet, dass Farman noch 1982 einen Fehler des Messgeräts vermutete.
 - 6 In der Polarnacht kann nur das Mondlicht an geeigneten Tagen zur Messung des Gesamtzongehalts benutzt werden.

dem Internationalen Ozonsymposium im September 1984 in Halkidiki, Griechenland, über niedrige Ozonwerte um 210 DU an der japanischen Antarktistation Syowa Station (69° S, 39°35' E)⁷ im antarktischen Frühjahr berichtete, der den letzten Anstoß zu Farman's Veröffentlichung gab. Die Nachbereitung der Satellitenmessungen (Stolarski u.a. 1986) zeigte deutlich, dass die niedrigen Ozonwerte keineswegs ein lokales Phänomen waren und sind sondern im antarktischen Frühjahr kontinentales Ausmaß einnehmen. Es war dieser Befund – von keiner Modellrechnung vorhergesagte extrem niedrige Gesamt Ozonwerte kontinentalen Ausmaßes in einer entfernten Region –, der die bis dato eher schleppend laufenden internationalen Bemühungen zum Schutze der Ozonschicht in wirksame, konkrete, abrechenbare Schritte vorantrieb. Zwar war im März 1985 einige Wochen vor Farman's Veröffentlichung die Wiener Konvention zum Schutz der Ozonschicht als politische Willenskundgebung verabschiedet worden, das Problem der Gefährdung der Ozonschicht weiter zu verfolgen, bindende Zusagen zur Reduzierung Ozon zerstörender Substanzen gab es aber nicht. Die Wiener Konvention war eine Absichtserklärung der 21 Teilnehmerstaaten, die sich lediglich zu Forschung, systematischer Beobachtung und Informationsaustausch verpflichteten. Die potentiellen Substanzen für eine Gefährdung der Ozonschicht, darunter auch die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), waren nur in einem Anhang aufgeführt (Benedick 1998, S. 45). Dieser ernüchternde Output der Wiener Konvention veranlasste die US Environmental Protection Agency (EPA) gerade wegen der neuen Erkenntnisse des antarktischen Ozonlochs im Januar 1986 zu ihrem Stratospheric Ozone Protection Plan⁸, da die Wiener Konvention „*had failed to agree on any appropriate global control measures*“ (Roan S. 141ff). Sicher hat das Auffinden des antarktischen Ozonlochs zu einer Beschleunigung der entsprechenden internationalen Verträge zum Schutze der Ozonschicht geführt⁹, es dauerte aber immerhin noch 7 Jahre, bis 1992, dem Kopenhagen Amendment zum Montreal Protokoll, das zu einer wirksamen Reduzierung der atmosphärischen Chlorkonzentration führte¹⁰.

Was aber wäre ohne wirksame internationale Übereinkommen geschehen? Eine weitere Verzögerung um nur 10 Jahre hätte zu einem permanenten

7 Auch die japanische Station Syowa wurde zum Internationalen Geophysikalischen Jahr 1957 eingerichtet.

8 In einer Serie internationaler Workshops sollten weiterführende Entscheidungen zu FCKW-Emissionen gefunden werden.

9 Siehe hierzu Benedick (1998), Spänkuch (2008)

10 Die kritische Chlorkonzentration für das Auftreten des antarktischen Ozonlochs beträgt 2 ppbv (Prather u.a. 1996, Solomon 1999)

antarktischem Ozonloch im ganzen 21. Jahrhundert und bereits im Jahr 2000 zu einer globalen Ozonabnahme von etwa 10% gegenüber den aufgetretenen 4% im Jahresdurchschnitt geführt (Prather et al. 1996). Nach starken Vulkanausbrüchen wäre es zudem vor allem in mittleren und niederen Breiten zu erheblichen Ozonreduzierungen gekommen (Brasseur et al. 1990, Prather 1992, Tie und Brasseur 1995), die die nach den Eruptionen von Agung 1963, El Chichon 1982 und Pinatubo 1992 über Europa beobachteten Ozonreduktionen von 5% nach Agung und El Chichon und von 8% nach dem Ausbruch des Pinatubo wegen der dann noch höheren atmosphärischen Chlorkonzentration bei ähnlich starken Vulkaneruptionen übertroffen hätten¹¹ (Angell 1997). Das Alarmsignal des British Antarctic Service, mannigfach verstärkt durch die Nimbus-Satellitenmessungen, schrillte gerade noch fünf vor zwölf (Tab. 1).

- permanentes Ozonloch im antarktischen Frühjahr
- verstärktes Auftreten von Ozonlöchern im arktischen Frühjahr
- globale Ozonabnahme > 10%
- weitere Ozonabnahme > 10% nach starken Vulkaneruptionen für mehrere Jahre

Tab. 1: Ozonentwicklung im 21. Jahrhundert bei Verzögerung um 10 Jahre

3. Anstieg des Meeresspiegels

Aussagen über Meeresspiegeländerungen basierten vor dem Satellitenzeitalter auf geologischen Befunden und seit etwa einhundert Jahren auf Pegelmessungen längs der Küsten. Erst mit dem Raumzeitalter ergab sich die Möglichkeit der globalen Messung des Meeresspiegels und seiner Änderung. Präzise Messungen des Meeresspiegels liegen aber erst seit 1992 vor, als mit dem Start von TOPEX/POSEIDON, einem Gemeinschaftsprojekt der NASA und CNES, das Zeitalter der Satellitenaltimetrie hoher Präzision begann, das mit dem Start von Jason-1 im Jahre 2001 fortgesetzt wurde (Cazenave und Nerem 2004). Nach diesen Messungen stieg der Meeresspiegel im Zeitraum

11 Bei natürlicher Chlorkonzentration nimmt das stratosphärische Ozon nach Vulkaneruptionen nicht ab sondern zu, da die Ozon zerstörenden Stickoxide (insbesondere N_2O_5) durch heterogene Prozesse an den stratosphärischen Sulfatpartikeln in inaktives HNO_3 überführt werden (Tie und Brasseur). Im Gegensatz hierzu wird bei hohen Chlorkonzentrationen inaktives $ClONO_2$ an den Aerosolpartikeln in $HOCl$ überführt, das bei Sonneneinstrahlung durch Fotolyse Cl -Radikale erzeugt.

von 1993 bis 2003 im globalen Mittel um 3,1 cm und war damit deutlich höher als aus den Pegelmessungen mit 1 bis 2 cm/Dekade abgeleitet worden war und auch deutlich höher als in den letzten 6000 Jahren (siehe Tab. 2, Abdalati 2007). Neuere Ergebnisse zeigen eine weitere Verstärkung des Anstiegs, der den durch Modelle vorhergesagten Anstieg wesentlich übertrifft (Rahmstorf et al. 2007).

geologischer Zeitraum	~ 50 mm/Jahr
letzte 6000 Jahre	~ 0,5 mm/Jahr
letztes Jahrhundert	~ 1,8 mm/Jahr
letzte 14 Jahre (1993–2007)	3,4 ± 0,1 mm/Jahr
letzte 7 Jahre (1999–2007)	4,0 ± 0,2 mm/Jahr
Leitplanke des WBGU	stets < 5 mm/Jahr und absoluter Anstieg < 1 m

Tab. 2: Globale Meeresspiegeländerungen in verschiedenen Zeit-räumen (nach Abdalati 2007, ergänzt)

Die Meeresspiegelvariationen sind aber keineswegs einheitlich (Cazenave und Nerem). Es gibt wesentlich größere Anstiege, so im westlichen Pazifik und östlichem Indischen Ozean mit Maximalwerten größer als 10 mm/Jahr an der West- und Nordküste Australiens und bei Indonesien, während im östlichen Pazifik und westlichem Indischen Ozean der Meeresspiegel im Zeitraum von 1993 bis 2003 um 5 mm/Jahr gefallen war.

Nun ist es angesichts der kurzen Zeitreihe und in Anbetracht der großen thermischen Trägheit des Ozeans zum gegenwärtigen Zeitpunkt natürlich verfrüht von einer Hiobsbotschaft zu sprechen, zumal die Meeresspiegeländerungen von Jahrzehnt zu Jahrzehnt starken Schwankungen unterliegen können (Cazenave und Nerem). Es kann aber als gesichert angenommen werden, dass der Meeresspiegel in diesem Jahrhundert auf Grund der steigenden Erderwärmung und wegen der bereits erwähnten thermischen Trägheit des Ozeans weiter ansteigen wird. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesrepublik Globale Umweltveränderungen (WBGU) hat bei Abwägung der Konsequenzen eines Meeresspiegelanstiegs (verstärkte Küstenerosion, höheres Auflaufen von Sturmfluten, Versalzen von Grundwasser in meeresnahen Gebieten, u.a.) eine Leitplanke definiert, die, will man unvertretbar hohe Schäden für Mensch und Natur vermeiden, nicht überschritten werden sollte. Danach sollte der Meeresspiegelanstieg ständig unter 5 mm/Jahr liegen und ein Anstieg um mehr als 1 m generell vermieden werden (WBGU 2006). Aber bereits bei einem Anstieg um 1 m sind die Mündungsgebiete vieler großer Ströme (Mississippi, Po, Nil, Ganges-Brahmaputra, Mekong, u.a.) mit

z.T. hoher Bevölkerungsdichte von Überflutung bedroht¹², zumal in den Delatagebieten dieser Effekt durch natürliche Landsenkung mit Absenkungen bis zu 10mm/Jahr noch weiter verstärkt wird (Ericson et al. 2006). Bei einem Anstieg um 1 m wären mehr als 100 Millionen Menschen unmittelbar betroffen (Douglas und Peltier 2002, Nicholls et al. 2006), in Europa etwa 8 Millionen und in Deutschland etwa 1,5 Millionen¹³ (siehe Tab. 3). Der zweite Parameter der WBGU-Leitplanke (Anstieg >5 mm/Jahr) wurde bereits in einigen Gebieten des Weltmeeres überschritten.

Land	gefährdete Bevölkerung	
	bei 1 m	bei 5 m
Dänemark	155 000	501 000
Deutschland	1 565 000	2 866 000
Niederlande	5 139 000	7 717 000
Polen	345 000	556 000
Belgien	262 000	1 071 000
Frankreich	80 000	276 000
Russland	91 000	156 000
Norwegen	1 000	8 000
Schweden	33 000	177 000
Großbritannien	372 000	1 562 000
Total	8 043 000	14 890 000

Tab. 3: Gefährdete Küsten Europas bei Meeresspiegelanstieg (nach Nicholls u.a. 2006)

Etwa die Hälfte des Anstiegs wird für den Zeitraum 1993 bis 2003 der thermischen Ausdehnung des Meerwassers durch steigende Temperatur zugeschrieben (thermischer Effekt) (Antonov u.a. 2005). Dieser Anstieg, der gegenwärtig nur durch direkte hydrographische Messungen bestimmt werden kann, schwankt sowohl beträchtlich von Jahrzehnt zu Jahrzehnt mit Perioden stärkeren Anstiegs in den frühen 70er und Mitte der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts als auch regional. Potenziell kann der Meeresspiegel durch thermische Ausdehnung nur um 1 bis 2 m steigen (Tab. 4), bis 2300 wird nach den Klimaszenarien allein durch die thermische Ausdehnung ein Anstieg zwischen 0,4 und 0,9 m erwartet (WBGU 2006, S. 38).

12 Sehr gutes Bildmaterial siehe unter

<http://hamburger-bidungsserver.de/klima/klimafolgen/meeresspiegel/> (gelesen am 16.8.2007)

13 Vielfach mehr Menschen werden als Folge globaler Erwärmung durch Wasserknappheit und Malaria betroffen sein (Parry et al. 2001).

Die halosterische Ausdehnung¹⁴ – Volumenänderung des Meerwassers durch Verringerung des Salzgehalts –, induziert z.B. durch Schmelzen von Meereis, wird mit etwa 10% des thermosterischen Effekts im Allgemeinen. als vernachlässigbar angesehen (Abdalati). So trug das spektakuläre Abbrechen des Jahrtausende alten Larsen-B-Eisschelfs vor der antarktischen Halbinsel (WBGU S.35) nur zu einem Anstieg von 0,07 mm/Jahr bei. Bedenklicher ist da schon der nach dem Abbrechen des Eisschelfs bis um das Achtfache beschleunigte Abfluss des Kontinentaleises (Rignot u.a. 2004, Scambos u.a.2004).

Beitrag	Meeresspiegelanstieg (mm/Jahr)		
	1961–2003	1993–2003	potentiell (m)
Thermische Ausdehnung ¹	0,42 ± 0,12	1,6 ± 0,5	1–2
Gletscher und Eiskappen	0,50 ± 0,18	0,77 ± 0,22	~ 0,5
Grönland	0,05 ± 0,12	0,21 ± 0,07	7
Antarktis	0,14 ± 0,41	0,21 ± 0,35	65
Summe alle Beiträge	1,1 ± 0,5	2,8 ± 0,7	~73,5
Beobachtet	1,8 ± 0,5	3,1 ± 0,7	
Differenz (beob. – Summe)	0,7 ± 0,7	0,3 ± 1,0	

¹ bezogen auf die Schicht 0 bis 3000 m

Tab. 4: Geschätzte Beiträge zum Meeresspiegelanstieg für 1961 bis 2003 und 1993 bis 2003 (nach Bindoff u.a. 2007) und potentielle Beiträge (nach Abdalati 2007, ergänzt)

Tabelle 4 enthält auch die weiteren wesentlichen Beiträge für 1961 bis 2003 und 1993 bis 2003 aus der letzten Einschätzung des IPCC (Bindoff u.a. 2007). Im Zeitraum 1961 bis 2003 war der durch kontinentale Gletscher und Eiskappen bedingte Anstieg mit etwa 5 mm/Jahrzehnt von gleicher Größenordnung wie der durch thermische Expansion bedingte. Beide Anteile haben im letzten Jahrzehnt deutlich zugenommen, der thermosterische Anstieg um mehr als das Dreifache, der durch die kontinentalen Gletscher bedingte um mehr als 50%. Der Beitrag der polaren Eisschilde, obwohl im letzten Jahrzehnt insbesondere in Grönland (um das Vierfache) beträchtlich angewachsen, ist mit gegenwärtig etwa 10 bis 15% nur mäßig. Auch für die nächsten einhundert Jahre wird mit keinem wesentlichen Beitrag der polaren Eisschilde gerechnet (Alley u.a. 2005).

14 Auch die halosterische Ausdehnung ist räumlich und zeitlich sehr inhomogen.

Allerdings berücksichtigen diese Untersuchungen nicht die eisdynamischen Effekte, die sich gerade in den letzten Jahren in dramatischer Weise verstärkt haben. Die diesbezüglichen Vorhersagen sind daher nur von begrenzter Aussagekraft (Shepherd und Wingham 2007). Die Gefahr eines ständig schrumpfenden und schließlich gänzlich verschwindenden grönländischen Eisschildes ist bei weiterer steigender Erderwärmung durchaus gegeben (Alley u.a.).

IPPC (2007)	0,5–1,2 m, aber keine Berücksichtigung eisdynamischer Prozesse
Rahmstorf (2007)	0,5–1,4 m, halbempirischer Ansatz

Tab. 5: Projizierter Meeresspiegelanstieg bis 2100

Wie und mit welchem Betrag der Meeresspiegel zukünftig ansteigen wird, lässt sich nicht mit Sicherheit voraussagen. Dies hängt wesentlich von der zukünftigen Entwicklung der Emissionsraten der Treibhausgase ab, aber auch von der Reaktion der Eisschilde auf höhere Temperaturen. Rahmstorf (2007) leitete aus den im 20. Jahrhundert beobachteten Änderungen von globaler Temperatur in Erdbodennähe und Meeresspiegelanstieg eine Proportionalitätskonstante von 3,4 mm/Jahr und K ab. Für den geschätzten Temperaturanstieg ergibt sich daraus für das Jahr 2100 ein Wert von 0,5 bis 1,4 m (Tab. 5).

Mechanismus	Anstieg (m)
Thermosterische Ausdehnung	0,4–0,9
Gebirgsgletscher	0,2–0,4
Grönlandeis	0,9–1,8
Westantarktis	1–2
Insgesamt	2,5–5,1

Tab. 6: Geschätzter globaler Meeresspiegelanstieg bis 2300 bei Temperaturerhöhung um 3°C (WBGU 2006)

Die thermische Trägheit des Ozeans bedingt, dass auch bei gedrosselten oder sogar auf Null reduzierten Emissionsraten von Treibhausgasen der Meeresspiegel allein durch die thermische Ausdehnung noch über Jahrhunderte weiter ansteigen wird (Meehl u.a. 2005, Wigley 2005), also über die in Tabelle 5 angegebenen Richtwerte hinaus. Der WBGU (2006) schätzt den Anstieg bis zum Jahr 2300 auf 2,5 bis 5,1 m bei einem globalen Temperaturanstieg um 3°C (Tab. 6). Der Meeresspiegelanstieg wird so über Jahrhunderte eine ernste Bedrohung darstellen (Tab. 7).

Anstieg über Niveau 1961–1990 (cm)	Effekt	Betroffene Region
30	Erosion von 57% von Sandstränden	Asien
34	enormer Verlust von Zugvögelhabitaten	Ostsee Mittelmeer
40	5–22% Verlust küstennaher Feuchtgebiete	weltweit
45	Verlust der Mangrovenwälder	Asien
100	90% Verlust von Sandstränden	Asien
	25–55% Verlust küstennaher Feuchtgebiete	weltweit
300–500	Enormer Verlust von Küstenland und Deltagebieten	weltweit

Tab. 7: Auswirkungen von Meeresspiegelanstieg auf Ökosysteme (nach Warren 2006, gekürzt)

Die Fernerkundung kann die weitere Entwicklung nur verfolgen, die Alarmglocken läuten und damit Druck auf die Entscheidungsträger ausüben.

Literatur

- Alley, R., P.U. Clark, P. Huybrechts und I. Jochuin 2005: Ice-sheets and sea-level changes. *Science* 310, 456–460
- Abdalati, W. 2007: Ice sheets, glaciers, and rising seas. Internet: <http://www.lasea-grant.org/forum/docs/03-20-07/WaleedAbdalati.pdf> (gelesen am 16.8.2007)
- Angell, J.K. 1997: Estimated impact of Agung, El Chichon and Pinatubo volcanic eruptions on global and regional total ozone after adjustment for the QBO. *Geophys. Res. Lett.* 24, 647–650
- Angell, J.K. und J. Korshover 1973: Quasi-biennial and long-term fluctuations in total ozone. *Mon. Weath. Rev.* 101, 426–443
- Antonov, J.I., S. Levitus und T.B. Boyen 2005: Thermohaline sea level rise, 1955–2003. *Geophys. Res. Lett.* 32 (12), L12602, doi:10.1029/2005GL023112
- Benedick, R.E. 1998: Ozone diplomacy. Harvard Univ. Press, Cambridge, Mass., London, 2nd Ed.
- Bindoff, N.L. et al. 2007: Observations: Oceanic climate change and sea level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the 4th Assessment Report of IPCC* (Solomon, S u.a. (eds.)), Cambridge University Press
- Brasseur G.P., C. Granier und S. Walters 1990: Future changes in stratospheric ozone and the role of heterogeneous chemistry. *Nature* 348, 626–628
- Cazenave, A. und R.S. Nerem 2004: Present-day sea level change: Observations and causes. *Rev. Geophys.* 42, RG3001, doi:10.1029/2003RG000139

- Chubachi, S. 1985: A special ozone observation at Syowa Station, Antarctica from February 1982 to January 1983. In Zerefos, CS und Ghazi, A (Ed): Atmospheric ozone, D. Reidel Dordrecht, 285–288
- Douglas, B.C., und R.W. Peltier 2002: The puzzle of global sea-level rise. *Physics Today* 55(3), 35–40
- Ericson, J.P., C.J. Vörösmarty, S.C. Dingman, L.G. Ward und M. Meyback 2006: Effective Sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change* 50, 63–82
- Farman, J.C., B.G. Gardiner und J.D. Shanklin 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature* 315, 207–210
- Götz, F.W.P. 1949: Der Stand des Ozonproblems. *Ber. Dtsch. Wetterdienst in der US-Zone* 11, 7–13
- Meehl, G.A. et al. 2005: How much global warming and sea level rise? *Science* 307, 1769, doi: 10.1126/science.1106663
- Nicholls, R.J., S.E. Hanson, J.A. Lowe, D.A. Vaughan, Z. Lenton, A. Ganopolski, R.S.J. Tol und A.T. Vafeidis 2006: Metrics for assessing the economic benefits of climate change policies: Sea level rise. Report to the OECD. ENV/EPOC/GSP(2006)3/FINAL. <http://www.oecd.org/dataoecd/19/63/37320819.pdf> (gelesen am 5.10.2007)
- Parry, M. et al. 2001: Millions at risk: defining critical climate change threats and targets. *Global Environmental Change* 11, 181–183
- Prather, M. 1992: Catastrophic loss of stratospheric ozone in dense volcanic clouds. *J. Geophys. Res.* 97, D9, 10187–10191
- Prather, M., P. Midgley, F.S. Rowland und R. Stolarski 1996: The ozone layer: the road not taken. *Nature* 381, 551–554
- Rahmstorf, S. 2007: A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315, 368–370, doi:10.1126/science.1135456
- Rahmstorf, S., A. Cazenave, Ja. Church, J.E. Hansen, R.F. Keeling, D.E. Parker und R.C.J. Somerville 2007: Recent climate observations compared to projections. *Science* 316, 709, doi:10.1126/science.1136843
- Rignot, E., G. Casassa, P. Gogineni, W. Krabill, A. Rivera und R. Thomas 2004: Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18401, doi:10.1029/2004GL020697
- Roan, S.L. 1989: Ozone crisis. The 15-year evolution of a sudden global emergency. Wiley & sons, New York
- Rood, R.B. 1986: Global ozone minima in the historical record. *Geophys. Res. Lett.* 13, 1244–1247
- Scambos, T.A., J.A. Bohlander, C.A. Shuman und P. Skvarca 2004: Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18402, doi:10.1029/2004GL020670
- Shepherd, S. und D. Wingham 2007: Recent sea-level contributions of the Antarctic and Greenland ice sheets. *Science* 315, 1529, doi:10.1126/science.1136776

- Spänkuch, D. 2008: Vom Internationalen Geophysikalischen Jahr (IGY) zum Montreal Protokoll – Atmosphärische Ozonforschung nach dem Internationalen Geophysikalischen Jahr. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät (in Vorbereitung)
- Stolarski, R.S., A.J. Krueger, M.R. Schoeberl, R.D. McPeters, P.A. Newman und J.C. Alpert 1986: Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. *Nature* 322, 808–811
- Solomon, S. 1999: Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Rev. Geophys.* 37, 275–316
- Tie X. und G. Brasseur 1995: The reponse of stratospheric ozone to volcanic eruptions: Sensitivity to atmospheric chlorine loading. *Geophys. Res. Lett.* 22, 3035–3038
- Warren, R. 2006: Impacts of global climate change at different annual mean global temperature increases. In: Schellnhuber, H.J., W. Cramer, N. Nakicenovic, T. Wigley und G. Yohe (Hrsg.): *Avoiding dangerous climate change*. Cambridge University Press, 93–131
- WBGU - Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2006: *Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer*. Sondergutachten. Berlin: WBGU
- Wigley, T.M.L. 2005: The climate change commitment. *Science* 307, 1766, doi: 10.1126/science.1103934