

## Veränderungen der großen Eisschilde

PHILIPPE HUYBRECHTS

*CHANGES IN THE ICE SHEETS: An overview is given of the basic response mechanisms of the Greenland and Antarctic ice sheets to global warming. It is explained how mass-balance changes are likely to dominate the response, though it is stressed that important uncertainties remain concerning the present evolution of the ice sheets, the relation between climatic changes and the mass balance terms of snow accumulation and meltwater runoff, and the possible instability of the West Antarctic ice sheet. According to the mid-range of the IPCC climatic projections, melting would be most important on the Greenland ice sheet, which would contribute about 10 cm to global sea levels by the year 2100. The Antarctic ice sheet, on the other hand, would grow slightly, because increased precipitation rates would dominate over increased melting rates and dynamic effects in West Antarctica remain small. A likely estimate for the Antarctic contribution to global sea-level lowering is around 10 cm by the year 2100, which would largely balance the Greenland contribution.*

Die zwei großen Eisschilde, die Grönland und den antarktischen Kontinent bedecken, stellen 99% des globalen Eisvolumens und mehr als 90% der Süßwasservorkommen der Erde dar. Obwohl von diesen Eisschilden wegen ihrer abgelegenen Lage nur eine geringe direkte Gefahr für den menschlichen Lebensraum ausgeht, üben sie einen erheblichen Einfluß auf die globalen Umweltbedingungen aus. Unter anderem wird dies deutlich durch das Zusammenspiel der Kryosphäre mit globalen atmosphärischen und ozeanischen Prozessen. Die wichtigste Kopplung ist jedoch die direkte Beeinflussung des globalen Meeresspiegels durch Volumenschwankungen der Eisschilde. Ein totales Abschmelzen der Eisschilde würde einen weltweiten Anstieg des Meeresspiegels um 70 m bewirken, wobei Grönland immerhin etwa 10% beitragen würde (Tab. 3.13-1). Dies macht deutlich, daß schon der Verlust eines geringen Volumenanteils zu einem signifikanten Anstieg des Meeresspiegel führt. Eine entscheidende Frage ist, ob eine Klimaerwärmung dynamische Prozesse in den Eisschilden innerhalb eines Jahrhunderts induzieren kann.

### Eisschilde und Klima

Ein zentraler Punkt im Verständnis der Reaktion von Eisschilden auf klimatische Veränderungen ist ihre

Massenbilanz, welche durch die Differenz zwischen Schneeakkumulation und Ablation bestimmt ist. Dabei setzt sich die Ablation aus dem Schmelzwasserabfluß, der Verdunstung und dem Kalben von Eisbergen zusammen. Vereinfacht dargestellt kann ein Eisschild nur existieren, wenn die Fläche positiver Massenbilanz an seiner Oberfläche groß genug ist, um den Massenverlust am Rand des Eisschildes auszugleichen. Eine positive Gesamtmassenbilanz würde zu einem Anwachsen des Eisschildes führen, während eine negative Bilanz ein Schrumpfen impliziert. Die Massenbilanz hängt dabei sehr von den vorherrschenden klimatischen Bedingungen über dem Eisschild ab. Die wichtigsten meteorologischen Parameter sind die Lufttemperatur, die Einstrahlung und die Niederschlagsrate, die ihrerseits auch von der Temperatur abhängt. Wegen der Beziehung zwischen Temperatur und Massenbilanz reagieren die Eisschilde der Antarktis und Grönlands grundlegend unterschiedlich auf einen Klimawandel.

Der antarktische Eisschild befindet sich in einem Gebiet sehr kalten Klimas, wo so gut wie kein Schmelzen auftritt und der Niederschlag durch die niedrigen Lufttemperaturen in seiner Menge begrenzt wird. Daher wird das gesamte antarktische Eis in Richtung Meer transportiert und fließt über schwimmende Schelfeise ab, die durch Kalbung in den Ozean Eisberge produ-

Tab. 3.13-1: Physikalische Eigenschaften der polaren Eisschilde (nach IPCC 1990, 1996a, und neueren Quellen)

	Antarktischer Eisschild (ohne Schelfeis)	Grönländischer Eisschild
Fläche (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	12,1	1,71
Eisvolumen (km <sup>3</sup> )	25	2,95
Entsprechender Meeresspiegelanstieg (m)	60	7,4
Akkumulation (10 <sup>12</sup> kg/Jahr)	1 660	553
Schmelzwasserabfluß (10 <sup>12</sup> kg/Jahr)	<10	237
Eisbergproduktion (10 <sup>12</sup> kg/Jahr)	2 016	316
Massenumsatz (Meeresspiegel äquivalent, mm/Jahr)	4,6	1,5
Massenverweilzeit (Jahr)	≅15 000	≅5 000

in: J.L. Lozin, H. Graßl, P. Hupfer (eds.): Warnsignal  
 222 Klima - Wissenschaftliche Fakten, Wissenschaftliche Auswertungen  
 (Geo - Hamburg), 1998

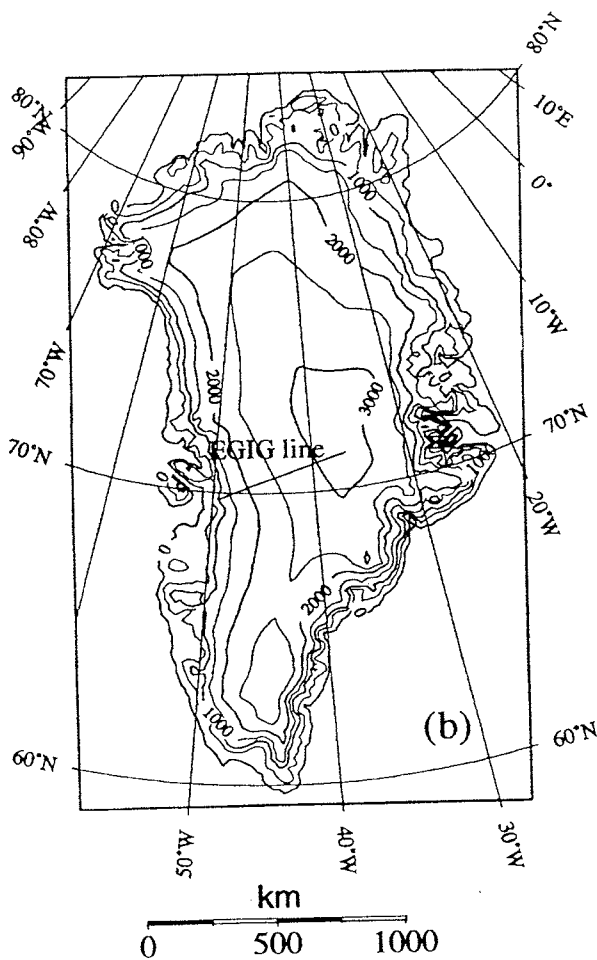
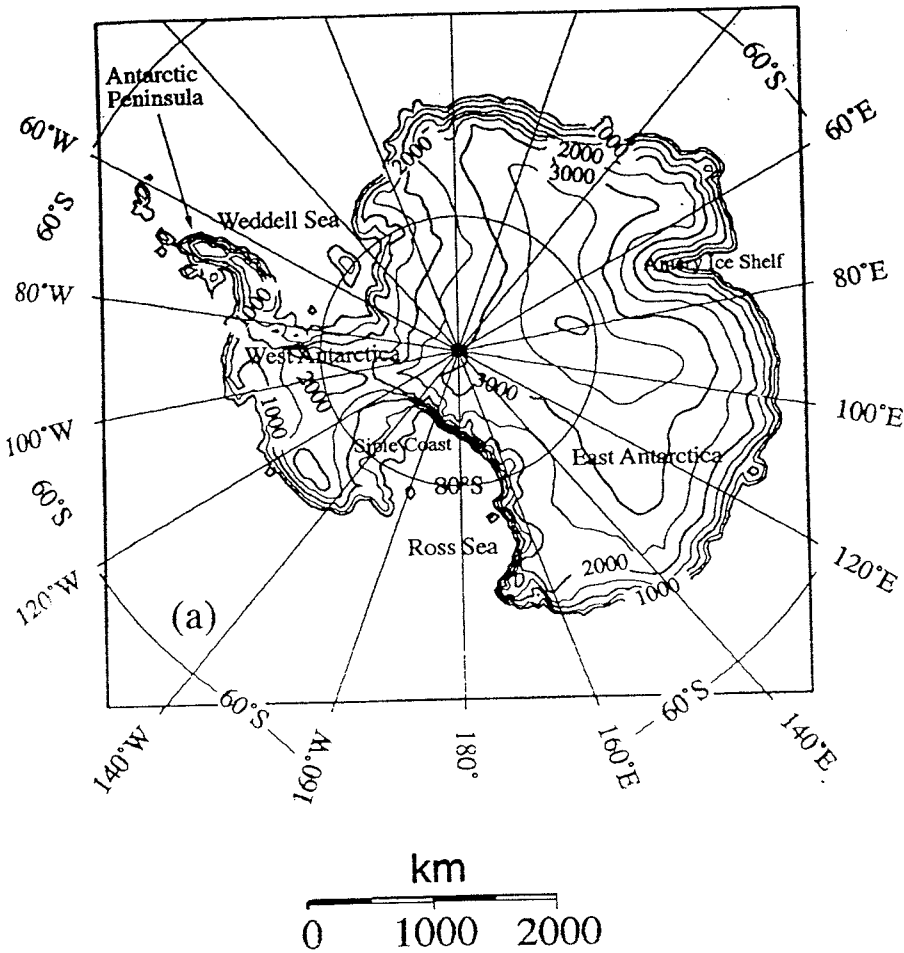


Abb. 3.13-1: Geographische Lage und Isolinien der Eisoberflächenhöhen [m] des antarktischen Eisschildes (a) und des grönländischen Eisschildes (b). Die EGIG-Linie (Expedition Glaciologique Internationale au Groenland) stellt die Lage des Nivellementsprofils in Zentral-Westgrönlands dar

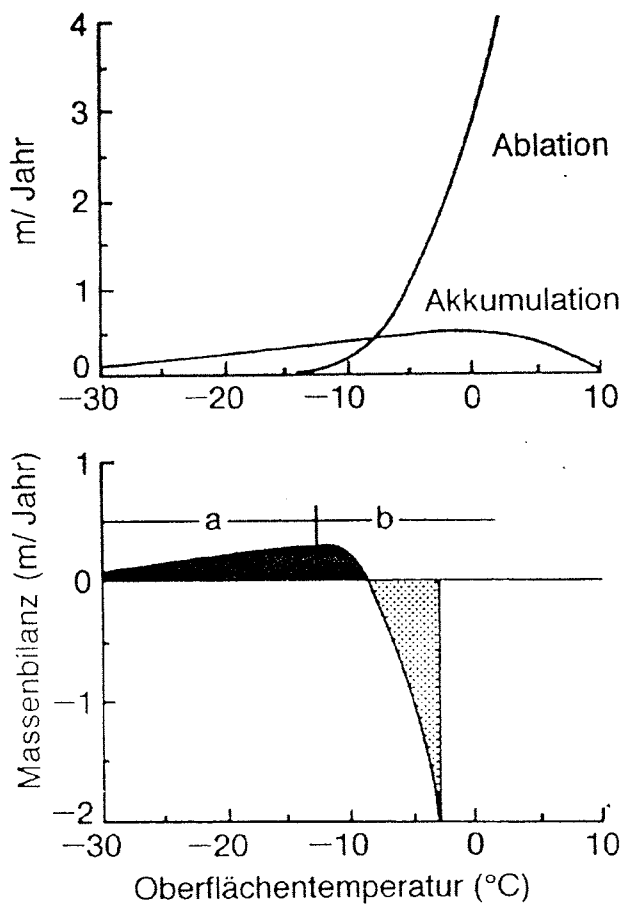


Abb. 3.13-2: Schematische Abhängigkeit der Ablation (Verdunstung und Schmelzwasserabfluß) und der Akkumulation von der mittleren Oberflächentemperatur. Die Abhängigkeit des Vorzeichens der jährlichen Massenbilanz kompliziert die Reaktion der Eisschilde auf den Klimawandel

zieren. Es wird allgemein angenommen, daß in diesem kalten Klima eine Erhöhung der Temperatur zu einem Anwachsen der Massenbilanz führt, da die erhöhte Feuchtigkeitskapazität der Luftmassen zu einer Niederschlagszunahme als Schnee führt. Gleichzeitig verhindern die niederen Temperaturen einen signifikanten Schmelzwasserabfluß.

Das Klima Grönlands unterscheidet sich sehr von dem der Antarktis. Allein die Jahresmitteltemperatur Grönlands ist 10–15 °C höher als in der Antarktis. Im Gegensatz zum antarktischen Eisschild befindet sich der grönländische Eisschild in einer Region, in der die Temperaturen hoch genug sind, um während des Sommers ausgedehntes Schmelzen an der Oberfläche zu erlauben. Daher übersteigt für Höhen unter 1 000 m im Norden und 1 600–1 800 m im Süden die jährliche Ablation die Akkumulation, was dort zu einer negativen Massenbilanz führt. Abschätzungen gehen von einem ausgeglichenen Verhältnis des Massenverlustes durch Schmelzwasserabfluß und Kalben aus. Bei einer Erwärmung des Klimas in Grönland ist es wahrscheinlich,

daß die Zunahme des Schmelzens gegenüber der Erhöhung der Schneefallrate überwiegt und daraus eine Verringerung der Massenbilanz zu negativen Werten resultiert.

Dieses unterschiedliche Verhalten ist in einer generalisierten Massenbilanzkurve in Abb. 3.13-2 deutlich ersichtlich. Der grönländische Eisschild befindet sich hauptsächlich in der Region (b), während der antarktische Eisschild mit seinem viel kälteren Klima die Region (a) einnimmt. Leider stehen nur wenige Massenbilanzmessungen und eine begrenzte Anzahl von (kurzen) meteorologischen Zeitreihen zur Verfügung, um theoretische Massenbilanz-Modelle in der Realität überprüfen zu können. Daher muß sehr viel unseres Verständnisses über das Zusammenspiel der großen polaren Eisschilde mit Klimaänderungen aus theoretischen Modellen abgeleitet werden, die auf den grundlegenden physikalischen Beziehungen basieren, wobei soviel relevante Information wie möglich im Modell berücksichtigt wird. Speziell die Ergebnisse aus Eiskernbohrungen in den großen Eisschilden zeigten sich als wertvolle Informationsquellen. Damit bilden Daten aus der Vergangenheit die Richtschnur für Hochrechnungen in die Zukunft. Allerdings ist es nicht selbstverständlich, daß Beziehungen die für glazial-interglaziale Zeitskalen ( $10^4$ – $10^5$  Jahre) gelten, einfach auf Problemstellungen einer kurzzeitigen klimatischen Erwärmung innerhalb der nächsten 100 Jahre angewandt werden können. Trotzdem scheinen ähnliche Beziehungen zwischen Massenbilanzparametern und klimatischen Bedingungen, wie sie in Abb. 3.13-2 dargestellt sind, durch Regressionsanalysen gemessener Akkumulations- und Ablationsdaten, sowie durch numerische Experimente mit globalen atmosphärischen Modellen bestätigt zu werden. Typische Abschätzungen der Sensitivität der Eisschilde von Grönland und der Antarktis auf eine globale Erwärmung um 1°C sind äquivalente Meeresspiegelschwankungen von +0,3 und -0,3 mm/Jahr, wobei die Schwankungsbreite groß ist (IPCC 1996a).

### Die heutige Massenbilanz der Eisschilde

Für die Diskussion über zukünftige Schwankungen des Volumens der polaren Eisschilde ist es wichtig, zwischen dem langfristigen Hintergrundsignal (den natürlichen Variationen) und dem zukünftigen klimatisch induzierten Signal (dem anthropogenen Effekt) zu unterscheiden. Wegen der langen Reaktionszeiten der Eisschilde (in der Größenordnung von  $10^3$ – $10^4$  Jahren), die durch Prozesse wie Isostasie (vertikale Bewegung der Erdkruste bedingt durch Massenänderungen), thermomechanische Kopplung und die Akkumulationsrate bestimmt sind, ist es unwahrscheinlich, daß sich der

antarktische oder der grönländische Eisschild vollständig an ihre vergangene Klimageschichte angepaßt haben. Selbst ohne jegliche heutige klimatische Störungen wird erwartet, daß die Eisschilde auf schon vergangene Änderungen ihrer Oberflächenrandbedingungen noch eine geraume Zeit reagieren, unabhängig von zukünftigen klimatischen Beeinflussungen.

Ein Versuch, die Massenbilanz zu beschreiben ist der Vergleich aller Zutragsterme (im wesentlichen die Schneeakkumulation) mit dem Eisverlust am Rand (Schmelzwasserabfluß und Eisbergproduktion von Schelfeisgebieten oder Auslaßgletschern). Mit den derzeit verfügbaren Daten ist es mit diesem Vergleich nicht möglich, die Abweichung vom Gleichgewicht besser als  $\pm 25\%$  zu bestimmen (IPCC 1996a). Dies entspricht einer Gesamtänderung des Meeresspiegels von  $\pm 1.5$  mm/Jahr oder  $\pm 15$  cm/Jh. Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Massenbilanz besteht in der präzisen Messung der Oberflächenhöhe der Eisschilde. Unter der Annahme, daß Änderungen in der Eisdicke und der Bodentopographie genügend klein sind, oder anderweitig bestimmt werden können, kann damit ein Trend im Volumen der aufliegenden Eismasse bestimmt werden. Allerdings sind nur wenige Wiederholungsmessungen von ausgedehnten Nivellementprofilen detailliert untersucht worden. Entlang der EGIG-Linie in Grönland (*Abb. 3.13-1*) scheint die Eisdicke zwischen 1959 und 1968 zugenommen und danach bis 1992 wieder abgenommen zu haben. Es ist allerdings nicht bekannt, wie repräsentativ dieses Ergebnis für das gesamte grönländische Eisschild ist. In jüngerer Zeit wurde versucht, die Oberflächenhöhe mittels satellitengestützter Radaraltimetrie zu bestimmen, wobei die Resultate sehr widersprüchlich sind. ZWALLY et al. (1989) ermittelten eine Verdickung des Eisschildes um  $0.23 \pm 0.04$  m/Jahr südlich von  $72^\circ\text{N}$  zwischen 1978 und 1985. Dies entspricht einer positiven Bilanz von 25–45% für diesen Zeitraum. Andererseits zeigen die Auslaßgletscher in Südwestgrönland einen allgemeinen Rückgang seit dem Ende des 19. Jh. Daher ist es nicht klar, wie solche Fluktuationen mit den anderen Befunden in Beziehung gesetzt und wie diese auf die Gesamtvolumenänderung des grönländischen Eisschildes übertragen werden können.

Vergleichbare Beobachtungen in der Antarktis sind ebenfalls sehr selten. Aus Daten des GEOSAT-Satelliten konnten in Höhenschichten zwischen 2 000 m und 3 300 m im Abflußbecken des Lambertgletschers bzw. des Amery Schelfeises sehr komplizierte Höhenänderungen bestimmt werden. Ein klarer Trend konnte jedoch nicht festgestellt werden. Französische und britische Wissenschaftler haben in Teilen der zentralen

Ostantarktis und auf der antarktischen Halbinsel Anzeichen für eine lokale Erhöhung der Akkumulation von bis zu 20–30% während der letzten Jahrzehnte gefunden. Aber auch diese Daten erlauben keine Verallgemeinerung für den gesamten Eisschild oder eine Aussage darüber, ob es sich nur um kurzzeitige Effekte handelt, geschweige denn ob ein Zusammenhang zu einer globalen Erwärmung besteht.

Ein anderer Ansatz für die Beurteilung des Massenbilanzproblems ist die Simulation der Eisschilde über mindestens einen glazialen Zyklus. Damit werden kurzzeitige vorübergehende Effekte eliminiert und die Abweichung vom Gleichgewicht unter heutigen Bedingungen kann analysiert werden. Die Qualität einer solchen Simulation hängt davon ab, wie gut vergangene klimatische Verhältnisse beschrieben werden können und wie gut das Eisschildmodell die dynamischen Aspekte behandelt (etwa Eistemperaturentwicklung, Fließgesetz, usw.). Solche Berechnungen wurden sowohl für die Antarktis (HUYBRECHTS 1990) als auch für Grönland (HUYBRECHTS 1994) durchgeführt.

Die Resultate solch einer Simulationen sind in *Abb. 3.13-3* gezeigt. Das dafür verwendete Eisschildmodell löst die gekoppelten mechanischen und thermodynamischen Modell-Gleichungen in drei Dimensionen auf einem feinen Gitter (40 km) und bezieht dabei Schelfeis mit ein. Die als Randbedingungen verwendeten klimatischen Zeitreihen wurden aus den Eiskernen von GRIP und Vostok und aus den SPECMAP Meeresspiegeldaten bestimmt. Das Modell zeigt eine starke Reaktion auf den glazial-interglazialen Zyklus, wobei beide Eisschilde während der letzten 10 000–15 000 Jahre stark schrumpfen. Relevant für ihre weitere Entwicklung ist das Verhalten beider Eisschilde in einem Zeitraum rund um die Gegenwart (*Abb. 3.13-3*). Die Modellrechnung zeigt, daß der antarktische Eisschild sich weiterhin entsprechend einem Meeresspiegelanstieg von  $+0.39$  mm/Jahr verkleinert. Der wesentliche Grund dafür ist der noch nicht abgeschlossene Rückzug der Aufsetzlinie in der Westantarktis als Reaktion auf veränderte Umweltbedingungen beim Wechsel von glazialen zu interglazialen Verhältnissen vor etwa 10 000 Jahren. Der grönländische Eisschild würde nach diesen Berechnungen dagegen nahe einem Gleichgewichtszustand sein, oder allenfalls geringfügig wachsen. Aufgrund dieser Modellsimulationen scheint allein der antarktische Eisschild für den entsprechenden, unerklärten Teil (ungefähr 25%) des Anstiegs des Meeresspiegels von etwa 1.8 mm/Jahr in den letzten hundert Jahren (TUSHINGHAM & PELTIER 1991) verantwortlich zu sein, wobei jedoch die Unsicherheiten nach wie vor groß sind. Dies gilt speziell für den antarktischen Eisschild, da dort

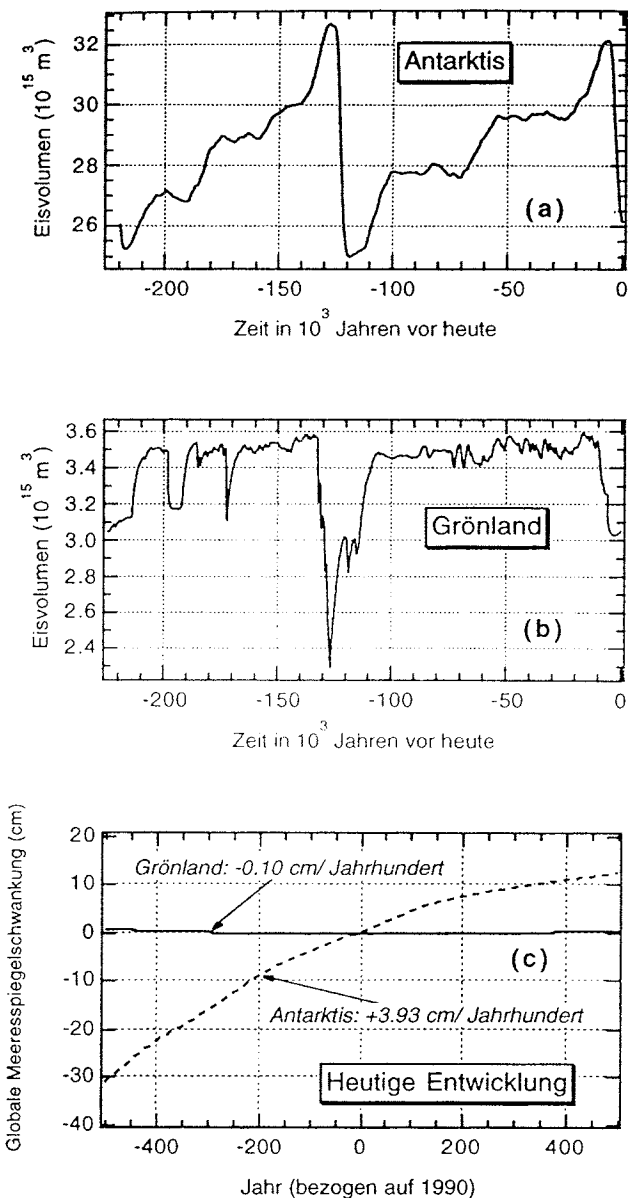


Abb. 3.13-3: Modellierte Entwicklung des Eisvolumens der Antarktis (a) und Grönlands (b) über die letzten zwei Glazialzyklen. (c) zeigt den Hintergrundtrend der daraus für die Gegenwart resultiert. Zum Vergleich: ein Eisvolumen von  $10^{15} \text{ m}^3$  entspricht einer weltweiten Meeresspiegelschwankung von 2.5 m

schon kleine Phasenverschiebungen in den Antriebsdaten die Modellergebnisse stark verändern. Es scheint daher berechtigt festzustellen, daß unser heutiges Wissen noch nicht ausreicht um die grundlegende Frage mit Sicherheit zu beantworten, oder realistisch zu beurteilen, ob die Eisschilde der Antarktis und Grönlands zur Zeit wachsen, schrumpfen oder sich in einem Gleichgewichtszustand befinden.

### Eisschilddynamik

Ein dritter Aspekt der Diskussion ist die dynamische Reaktion polarer Eisschilde. Ein Wechsel in der Massenbilanz impliziert eine Änderung der Eisdicke und des Fließverhaltens, was wiederum eine Rückkopplung

auf die Massenbilanzparameter bedeutet. Wegen seiner Schmelzzone im Randbereich könnte dies zu einer starken positiven Rückkopplung für den grönländischen Eisschild führen: bei negativer Massenbilanz verringert sich die Eisoberflächenhöhe verbunden mit einer Temperaturerhöhung, was zu verstärkten Schmelzen führen könnte. Numerische Modellierungen scheinen allerdings zu zeigen, daß dieser Effekt nur in Zeitskalen von Jahrtausenden und nicht Jahrhunderten eine wichtige Rolle spielt. Dagegen könnten kurzzeitige dynamische Mechanismen sogar dem statischen Massenbilanzeffekt entgegenwirken (HUYBRECHTS et al. 1991). Zum einen vergrößern sich die Oberflächenneigungen im Randbereich als Antwort auf die erhöhten Schmelzraten. Das bewirkt einen schnelleren Eistransport vom Akkumulations- in das Ablationsgebiet. Die daraus folgende Verdickung der oberen Bereiche des Ablationsgebietes würde dann die Gesamtschmelzmenge wieder verringern. Ein zweiter Mechanismus gründet sich auf den verminderten Abfluß aus Auslaßgletschern, die in das Meer kalben. Da die Fließraten von aufliegendem Eis im Randbereich proportional zur vierten Potenz der Eisdicke sind, führt eine Ausdünnung am Rand zu dem erstaunlichen Resultat, daß sich der Kalbungsfluß verringert. Damit wirkt die verringerte Fließrate dem verstärkten Massenverlust durch Schmelzen entgegen.

In der Antarktis gibt es den Effekt der Wanderung der Aufsetzlinie, die den aufliegenden Eisschild vom schwimmenden Schelfeis trennt. Dieser Mechanismus wird durch die Eisdicke und die Tiefe des Meeresbodens kontrolliert. Jeder Wechsel in der Position der Aufsetzlinie beeinflusst den Meeresspiegel durch die Menge gespeicherten Eises im aufliegenden Eisschild (Abb. 3.13-4). Die spezielle Dynamik der Aufsetzlinie wurde immer wieder als eine mögliche Ursache für ein instabiles Verhalten des westantarktischen Eisschildes genannt, dessen Bett weit unter dem Meeresspiegel liegt und Richtung Zentrum weiter absinkt. In den späten 1970er Jahren wurde debattiert, daß der westantarktische Eisschild so instabil sein könnte, daß jegliche Schwächung der Schelfeise oder ein Positionswechsel der Aufsetzlinie zu einer Situation führt, in der der Eisschild innerhalb weniger Jahrhunderte verschwindet (MERCER 1978). Allerdings hat sich die Einschätzung der Stabilität der Westantarktis in den letzten Jahren geändert (BENTLEY 1997). Ein Schwerpunkt der heutigen Diskussion dazu sind die Mechanismen der schnell fließenden Eisströme der Siple-Küste, die das meiste Eis in das Ross-Schelfeis transportieren und deren Reaktionszeiten auf Änderungen der Position der Aufsetzlinie sehr gering sind. Das Eis an der Unterseite dieser Eisströme befindet sich während der aktiven Phasen auf dem

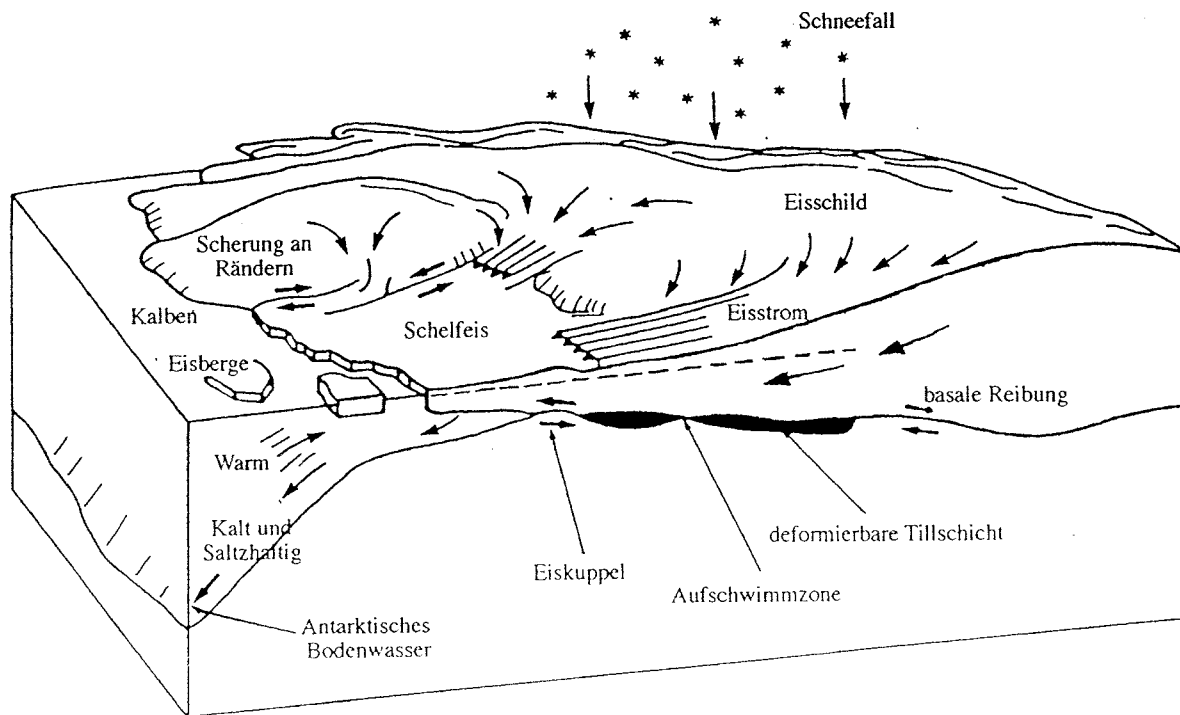


Abb. 3.13-4: Die prinzipiellen Charakteristiken eines Eisschild-Eisstrom-Schelfeis-Systems.

Druckschmelzpunkt, so daß unter dem Eisstrom ein Wasserfilm existieren kann. Neuerdings wird von manchen Autoren argumentiert, daß diese Eisströme den Eisschild sogar stabilisieren, da ihre kurzen Reaktionszeiten dazu führen, jede Massenflußvariation an der Aufsetzlinie zu kompensieren. Oszillationen im Fließverhalten dieser Eisströme, die in einer scheinbar zufälligen Art und Weise in Zeiträumen von Jahrhunderten zwischen aktiven und passiven Phasen hin- und herschalten, könnten diese Idee stützen. Beim gegenwärtigen Stand der Kenntnisse scheint es jedoch nicht möglich, die Wahrscheinlichkeit eines Kollapses in den nächsten hundert Jahren zu beurteilen (IPCC 1996a). Nach meiner persönlichen Ansicht spricht gegen solch ein dramatisches Szenarium die Tatsache, daß dazu ein Anwachsen des Abflusses um mehrere Größenordnungen erforderlich wäre, um soviel Eis in den Ozean zu transportieren, daß ein signifikanter Effekt auf den Meeresspiegel entstehen würde.

### Die IPCC Vorhersagen

Letztendlich stellen getestete numerische Modelle die einzige Möglichkeit dar, um die in der obigen Diskussion gewonnenen Vorhersagen und Hypothesen zu überprüfen. Im letzten IPCC Report (1996a) wurden zwei Reihen von Modellergebnissen vorgestellt, welche die mögliche Entwicklung des antarktischen und des grönländischen Eisschildes bis zum Ende des 21. Jh.

darstellen. Die erste Reihe von Vorhersagen basierte auf einem einfachen globalen Klimamodell. Dieses wurde mit einem globalen Gletschermodell gekoppelt, das durch vorgeschriebene statische Randwerte angetrieben wird. Es wurde angenommen, daß die Eisdynamik vernachlässigt werden kann. Die zweite Reihe basierte auf klimatischen Eingabeparametern aus einem zweidimensionalen, zonal gemittelten klimatischen Energiebilanzmodell (DE WOLDE et al. 1997), welche als Antrieb für das oben beschriebene 3-D thermomechanische Eisschildmodell benutzt wurde. Das Klimamodell wurde seinerseits durch Zeitreihen der Konzentrationen von Spurengasen und der Einstrahlung angetrieben. Das erste Strahlungsszenario nimmt an, daß die Konzentration der Aerosole (Sulfataerosole, Ruß, Aerosole aus der Verbrennung von Biomasse) auf ihrem Stand von 1990 verbleiben. Im zweiten Szenarium werden die durch Änderungen der Aerosol-Konzentrationen nach 1990 verursachten Effekte mit eingeschlossen. Aerosole verstärken die Reflexion der einfallenden Sonnenstrahlung, was im Verhältnis zum Strahlungsantrieb durch Treibhausgase allein die geschätzten Änderungen verkleinert. *Abb. 3.13-5* zeigt die modellierte Entwicklung des Meeresspiegels bis zum Jahr 2100 (vgl. Kap. 3.10). Für die Eismasse Grönlands ergibt sich ein Anstieg zwischen 4,5 und 7,3 cm, wenn die Änderung in den Konzentrationen der Aerosole mit berücksichtigt wird. Unter der Annahme, daß ihre Konzentration auf dem Stand von 1990 bleibt, ergibt

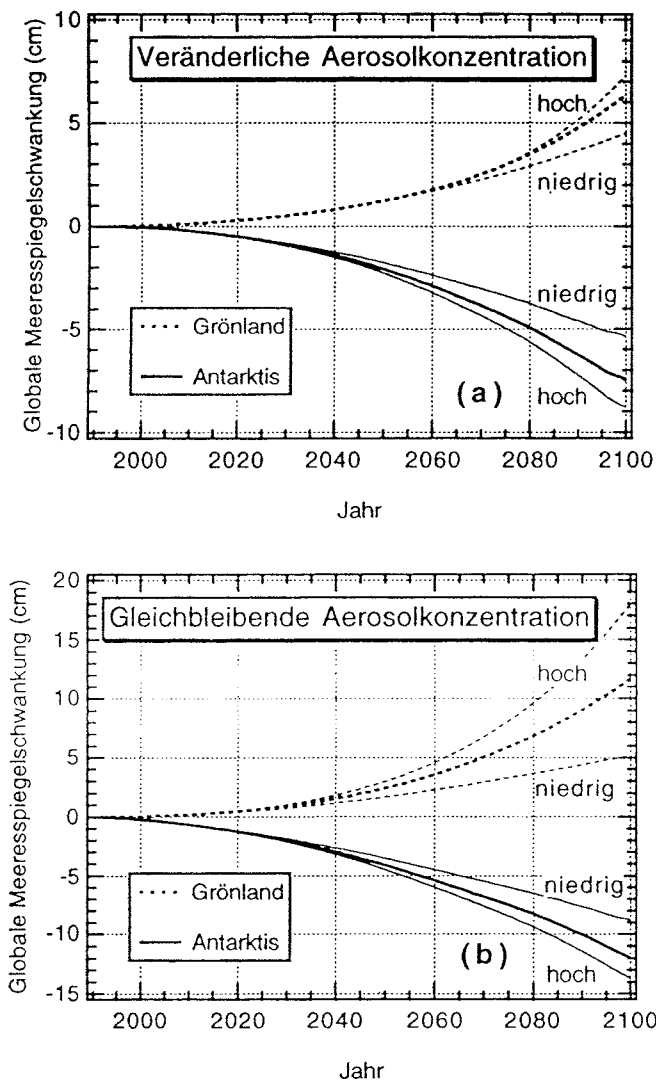


Abb. 3.13-5: Beiträge des grönländischen und antarktischen Eisschildes zur zukünftigen Meeresspiegelentwicklung. Die zugrundeliegenden Modellexperimente wurden mit den klimatischen Szenarien von IPCC (1996a) (hoch, mittel, niedrig) angetrieben, die auf Strahlungsberechnungen mit (a) oder ohne (b) Berücksichtigung einer Veränderung im Gehalt der atmosphärischen Aerosole basieren

sich eine Änderung zwischen 5,2 und 18 cm. Der antarktische Eisschild würde dagegen für alle Szenarien leicht anwachsen, da die erhöhte Niederschlagsrate über die erhöhte Schmelzrate dominieren würde und die dynamischen Reaktionen in der Westantarktis klein bleiben. Dabei würde sich die Position der Aufsatzlinie bis zum Jahr 2100 kaum ändern. Die entsprechenden Meeresspiegeländerungen betragen -5,3 cm (bei Änderung der Aerosol-Konzentrationen) und -13,7 (bei konstanten Aerosol-Konzentrationen von 1990). Bemer-

kenswert ist, daß die beiden Eisschilde fast exakt das entgegengesetzte Verhalten für die Mittelwerte der Vorhersagen zeigen. Das bedeutet, daß sich für eine Zeitspanne von einem Jahrhundert der Einfluß der Antarktis und Grönlands auf eine Meeresspiegelsänderung in etwa die Waage halten.

Trotzdem könnte sich dieses Bild angesichts der langen Reaktionszeiten und es großen Eisvolumens der Eisschilde dramatisch ändern, wenn die Bedingungen für eine Treibhaus-Erwärmung bis nach dem 21. Jh. anhalten. Modellstudien legen nahe, daß dann wahrscheinlich der Rückzug der Aufsatzlinie der dominierende Prozeß in der Antarktis wird und bis zum Jahr 2500 das grönländische Eisschild bis zu ein Drittel seines Volumens verlieren könnte. Das Resultat wäre ein Gesamtanstieg des Meeresspiegels um mehr als 5 m (HUYBRECHTS & OERLEMANS 1990, HUYBRECHTS et al. 1991).

### Schlußbetrachtung

Das gegenwärtige Verständnis der möglichen Änderung der Massenbilanz der polaren Eisschilde aufgrund einer Klimaerwärmung weist auf ein verstärktes Schmelzen des grönländischen Eisschildes und einen erhöhten Niederschlag (Schneefall) über dem antarktischen Eisschild hin. Diese Effekte würden über alle anderen Änderungen dominieren. Die durch die beiden Eisschilde resultierenden Veränderungen des Meeresspiegels in den nächsten 100 Jahren werden als relativ klein ( $\pm 10$  cm) vorhergesagt. Jedoch verbleiben große Unsicherheiten. Es gibt nicht nur einen Mangel im Verständnis ihrer gegenwärtigen Entwicklung, sondern es wird weiterhin stark über die mögliche dynamische Reaktion insbesondere des westantarktischen Eisschildes debattiert. Außerdem hängen alle Berechnungen entscheidend von den Klimavorhersagen und wie diese sich in Massenbilanzänderungen umsetzen, ab. Vorhergesagte Änderungen in der Temperatur- und Niederschlagsverteilung in den polaren Gebieten unterscheiden sich wesentlich zwischen den Klimamodellen und hängen sehr stark vom verwendeten Emissionsszenarium ab. Augenscheinlich werden viel mehr Felddaten und ebenso verbesserte Modellierungen benötigt, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen den Eisschilden und dem Klimasystem zu verstehen und zuverlässigere Vorhersagen in einer sich durch Treibhauseffekte erwärmenden Welt zu ermöglichen ♦