

In Kooperation mit

GEO

**Verlag
Wissenschaftliche Auswertungen**

Eisschild mit Schmelzwasser



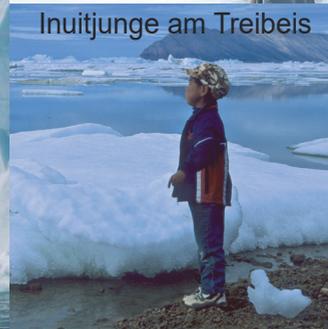
Eisbär im Treibeis mit Spiegelung



Auswirkung des tauenden Permafrosts



Inuitjunge am Treibeis

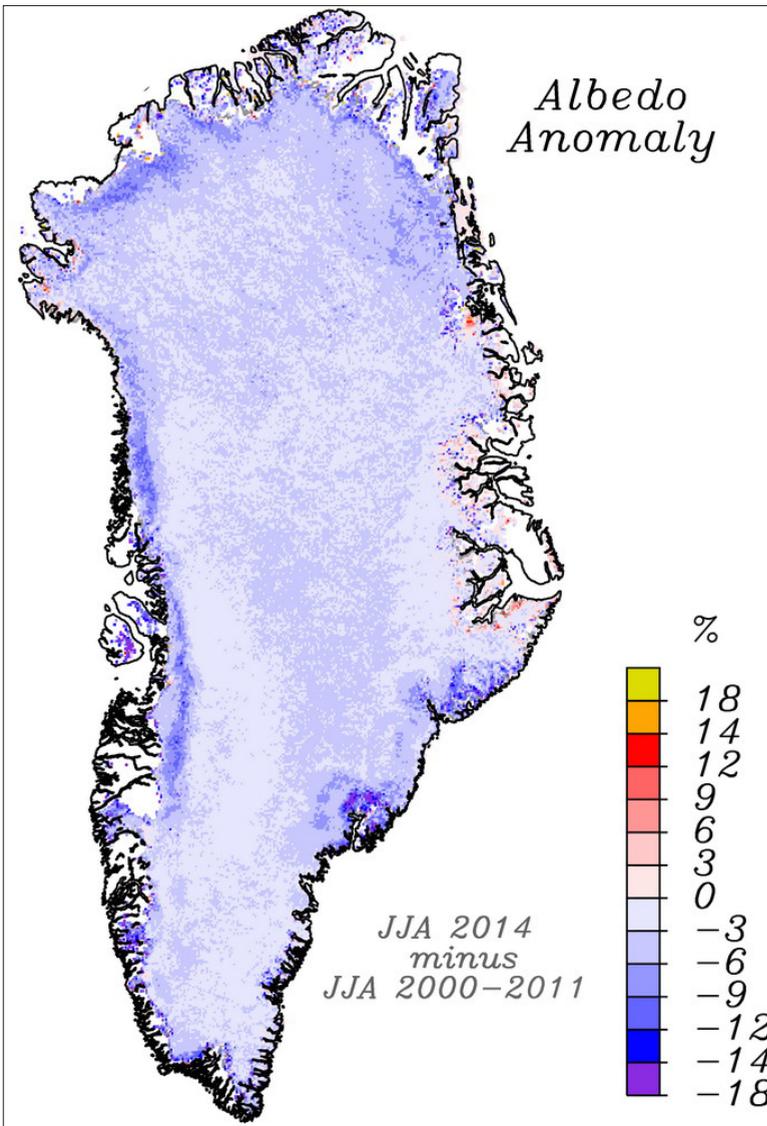


WARNSIGNAL KLIMA

Das Eis der Erde

Herausgeber:

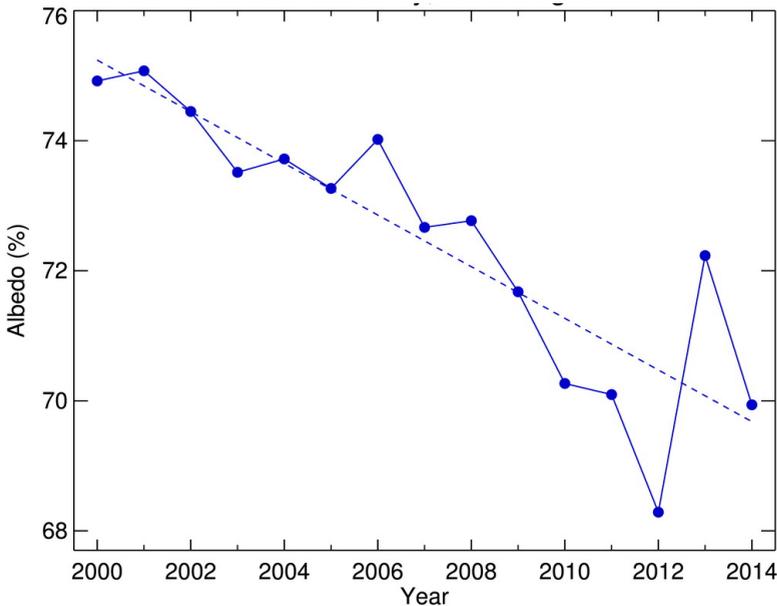
José L. Lozán - Hartmut Graßl - Dieter Kasang - Dirk Notz - Heidi Escher-Vetter

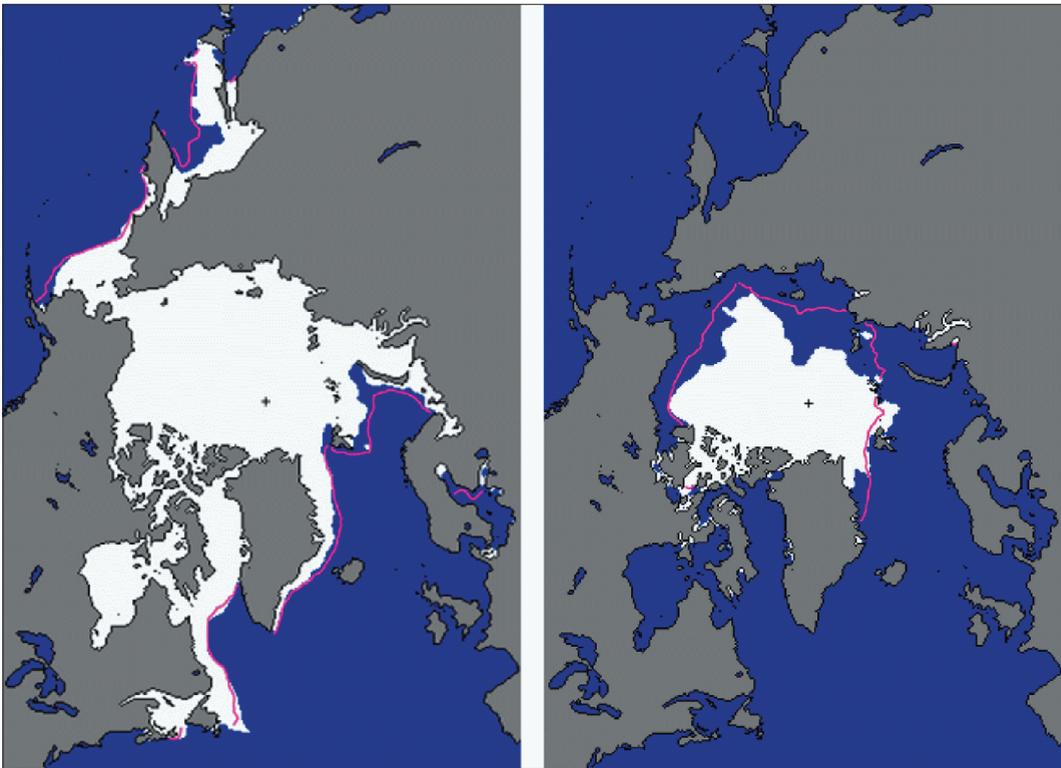


Tafel 1: Änderung der Rückstreuung für Sonnenstrahlung des Inlandeises in Grönland während der Sommermonate (JJA = Juni, Juli, August) 2014 im Vergleich zum Mittelwert von 2000 bis 2011. Je intensiver das Blau, umso stärker war die Abnahme. Man beachte auch die erhöhte Rückstreuung für einige wenige Auslassgletscher.

Tafel 2: Rückgang der Helligkeit des Inlandeises in Grönland seit 2000. Dargestellt ist die sogenannte Albedo, das Verhältnis zwischen zurückgestreutem und an der Oberfläche einfallendem Strahlungsfluss der Sonne in Prozent. So besitzt frisch gefallener Pulverschnee eine Albedo bis zu 90%, so dass nur 10% der Sonnenenergie absorbiert werden. Durch Veränderung der Kristallstruktur des Schnees infolge der Alterung, aber insbesondere durch das Antauen der Schneeoberfläche sowie durch Ablagerung von Schwebeteilchen aus der Luft (z.B. Rußpartikel) sinkt die Albedo ab. Die mittlere sommerliche Albedo ist von ca. 75% im Jahre 2000 auf jetzt etwa 70% abgesunken. Ein Minimum trat mit 68% im Jahr 2012 auf.

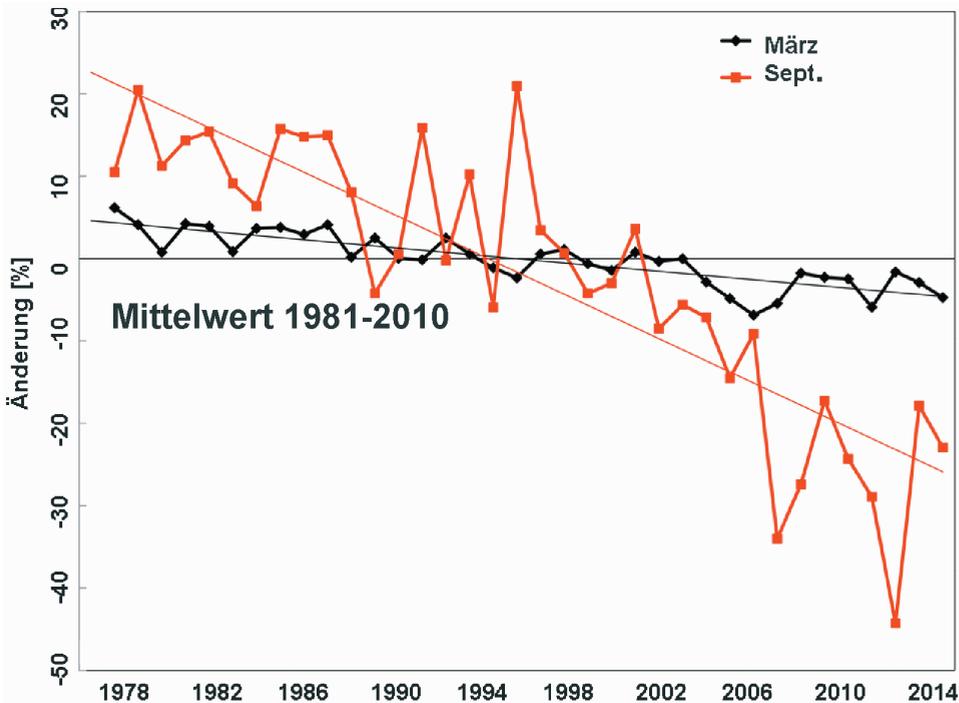
Quelle: Tedesco, M, J. E. Box, J. Cappelen, X. Fettweis, T. Mote, R. S. W. van de Wal, C. J. P. P. Smeets & J. Wahr (2014): Greenland Ice Sheet. In: Arctic Report Card. Update for 2014. http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/greenland_ice_sheet.html.





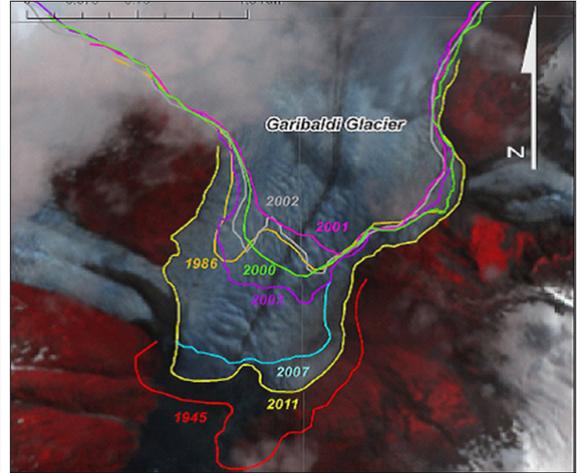
Tafel 3: Monatsmittel der Meereisausdehnung in der Arktis im März 2014 (links) und im September 2014 (rechts) zum Zeitpunkt maximaler und minimaler Ausdehnung. Die Kurve in Magenta zeigt den Mittelwert (Median) der Jahre 1981 bis 2010. Quelle: www.nsidc.org/data/seaice_index

Tafel 4: Trend der arktischen Meereisausdehnung von 1978-2014. Nach dem National Snow and Ice Data Center der USA waren am 17. September 2014 nur noch 5,02 Mio. km² mit Meereis bedeckt um damit 80.000 km² weniger als die geringste Fläche im Jahr 2013, aber deutlich mehr (1,61 Mio. km²) als beim Rekordminimum von 3.410.000 km² im September 2012. Pro Jahrzehnt ist das Meereis im März um -2,6% geschrumpft und im September sogar um -13,3%. Neben der Fläche sind auch die Eisdicke und das Alter des Eises von großer Bedeutung (für Details dazu siehe Kap.5 in diesem Band).





Tafeln 5 und 6: Rhonegletscher. Talgletscher im Quellgebiet der Rhone im äußersten Nordosten des Kantons Wallis in den Schweizer Zentralalpen. **Links:** 1900. **Rechts:** 2005. **Quelle für 5:** Photoglob AG, Zürich, Switzerland or Detroit Publishing Company, Detroit, Michigan. Lizenz: Photographs in this collection were published before 1923 and are therefore in the public domain. **Quelle für 6:** »Rhonegletscher 2005« Quelle: German Wikipedia, original upload 30. Mai 2005 by Oliver S. (selfmade 28.5.05). Lizenz: This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.



Tafel 7: Moschusochsen (*Ovibos moschatus*), auch Bisamochsen genannt, sind Bewohner der arktischen Tundren. Sie leben fast nur noch in Grönland, Kanada und Alaskas. Seit 1974 auch in Nordsibirien (Foto: H. Bäsemann. www.polarfoto.com).

Tafel 8: Änderungen der Gletscherzunge des Garibaldi-Gletschers (Südamerika, Feuerland). Quelle: Melkonian et al. (2013), © Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License (Details dazu in Kap. 4.10 in diesem Band).



Tafeln 9 und 10: Beobachtungen von Gletschern und ihren Veränderungen aus dem Weltraum mit Satellitensensoren. **Links:** Stark schuttbedeckte Gletscher im westlichen Himalaya in der Region des Bagra Shigri Gletschers. **Rechts:** Nahezu schutfreie Gletscher und Eiskappen in Norwegen (Jostedalbreen) (für weitere Details siehe Kap. 4.1 in diesem Band).

Das Eis der Erde - die Kryosphäre - hat mit den Eisschilden, dem Meereis, den Gebirgsgletschern und der Schneedecke einen bedeutenden Einfluss auf das Klima der Erde. Die Atmosphäre, die Ozeane, die Biosphäre und Kryosphäre stellen die wichtigsten Komponenten des Klimasystems dar, wobei alle vier Komponenten durch Kopplungsprozesse in enger Wechselbeziehung stehen. Die Reflexion der Sonnenstrahlung durch die Schnee- und Eisoberflächen, d.h. die Albedo, ist ein wichtiger Einflussfaktor für die Energiebilanz der Erde. Beispielsweise reflektiert frisch gefallener Schnee bis zu 90% des Sonnenlichts in Richtung Weltraum; bei altem Schnee sinkt dieser Wert auf 40-70%. Insgesamt beträgt die planetarische Albedo der Erde inklusive dem Einfluss der Wolken 30,6%. Wenn dieser Wert infolge einer Änderung in der Eisbedeckung der Erdoberfläche um 1% steigen würde, hätte dies nach Berechnungen mit Energiebilanzmodellen eine drastische Senkung der mittleren globalen Temperatur zur Folge. Dadurch würde sich mehr Eis bilden, wodurch die Temperatur weiter sinken würde. Dieser Effekt wird positive Eis-Albedo-Rückkopplung genannt.

Auch die enge Beziehung zwischen Eisvolumen und Meerwasservolumen muss in Betracht gezogen werden. Da alles im Eis gebundene Wasser letztlich aus dem Weltmeer stammt, sinkt der Meeresspiegel mit der Zunahme des terrestrischen Eisvolumens und umgekehrt. Ökologisch wichtig ist bei diesem Prozess die Dichte des Eises, die mit $916,7 \text{ kg/m}^3$ niedriger ist als diejenige des Wassers ($999,8 \text{ kg/m}^3$). Dadurch schwimmt das Eis auf dem Wasser und verhindert durch seine geringe Wärmeleitfähigkeit eine rasche Kühlung des Wassers unterhalb des Eises. Wäre das nicht der Fall, würde z.B. ein See bis zum Grund zufrieren. Nur dadurch können Pflanzen und Tiere in Süßwasserseen bei strengen Wintern überleben.

Eine weitere wichtige Eigenschaft für die ozeanische Zirkulation ist die Beeinflussung des Salzgehalts des Meerwassers durch die Bildung von Meereis, da hierbei nur das Süßwasser gefriert, das Salz zurückbleibt und damit den Salzgehalt des ungefrorenen Meerwassers erhöht. Schon eine Veränderung um 0,1‰ kann einen wesentlichen Einfluss auf die Tiefenzirkulation haben. Auch die atmosphärische Zirkulation wird beeinflusst, z.B. durch die Dicke des Eises. Auf dem antarktischen und grönländischen Eisschild - mit einer Eisdicke von mehreren Tausend Metern - herrschen über den höher gelegenen Bereichen des Eises viel niedrigere Temperaturen als am Rande des Eisschildes. Eine Folge davon ist, dass die spezifisch schwerere kältere Luft abfließt und dabei teilweise heftige Luftströmungen erzeugt, die sogenannten katabatischen Winde, welche zu ei-

ner starken Abkühlung der Umgebung führen. Dabei kommt es auch zu einer wichtigen Wechselwirkung zwischen den katabatischen Winden und dem Meereis.

Eine weitere Bedeutung des Eises ist seine Funktion als Klimaarchiv. In Regionen, in denen ganzjähriges Eis auftritt, ist der Eiskörper in Schichten aufgebaut, da jedes Jahr eine neue Schneeschicht hinzukommt und im Lauf der Jahrzehnte/Jahrhunderte zu Eis wird. Dabei werden Luftblasen eingeschlossen, in denen Informationen aus der Atmosphäre wie CO_2 -Gehalt, Sauerstoffisotope, Staubpartikel, Spurenstoffe etc. gespeichert sind. Die bis über drei bzw. über vier Kilometer mächtigen Eisschilde in Grönland und in der Antarktis stellen damit ein Hunderttausende von Jahren zurückreichendes Archiv dar, was für die Rekonstruktion des Weltklimas von herausragender Bedeutung ist.

Eis, d.h. gefrorenes Süßwasser, kommt in verschiedenen Varianten vor. Neben den o.g. Formen gibt es Eis als Gletschereis, Schelfeis, Permafrost oder in Form von Eiswolken, ja sogar in Eishöhlen. Da Eis der feste Aggregatzustand des Wassers ist, stellt die Kryosphäre einen Bestandteil der Hydrosphäre dar. Etwa 30 Mio. km^3 Eis gibt es zurzeit weltweit. Über 95% davon machen die Eisschilde aus. Etwa 2% des im globalen hydrologischen Kreislauf befindlichen Wassers ist Eis.

Die Erde ist der einzige Planet im Sonnensystem, auf dem Wasser in genügender Menge und in seinen drei Zuständen - flüssig, gasförmig und fest - vorkommt. Auf unserem benachbarten Planet Venus findet man Wasser aufgrund der hohen Temperatur (ca. 400°C) nur als Dampf und in kleiner Menge. Eisvorkommen auf dem Merkur und auf dem Erdmond wurden in der Nähe der Pole nachgewiesen. Auf dem Mars und auf vielen Monden sowie Kometen und Asteroiden kommt Eis sogar in relativ großer Menge vor. Das bedeutet, dass die chemische Verbindung ‚Wasser‘ innerhalb des Sonnensystems - und vermutlich auch außerhalb - weit verbreitet ist.

Im Vergleich zum globalen Wasservolumen oder der Masse der Erdatmosphäre ist die Eismenge auf unserem Planeten eine sehr variable Größe, da sie in hohem Maße vom Klima abhängig ist. So dürfte die Eismenge heute deutlich größer sein als in vielen Phasen der Erdgeschichte. Vermutlich gab es während der Kreidezeit (vor 145-66 Mio. Jahren) aufgrund der hohen Temperaturen zumindest phasenweise kein Eis. In den 1960er Jahren wurde erstmals die Vermutung geäußert, dass eine oder mehrere Vergletscherungen die gesamte Erde betrafen. Betrachtet man heute auch die ökonomischen Aspekte, dann spielen Schnee und Eis z.B. für Tourismus und Erholung eine wichtige Rolle. Während der trockenen Periode dient das Schmelzwass-

ser aus den Gebirgsgletschern der Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser. Das ist vor allem in ariden und semi-ariden Gebieten überlebenswichtig. Ohne genügend Wasser gibt es keine nachhaltige industrielle und landwirtschaftliche Entwicklung. Das gilt insbesondere für die Flussschifffahrt.

Die vorliegende Veröffentlichung erscheint als 15. Band in der Buchreihe »WARNSIGNALE«. Das Eis der Erde ist ein wichtiger Indikator für den laufenden Klimawandel. Besonders das Eis der Gebirgsgletscher und das Meereis reagieren sensibel auf die Erderwärmung. Fast alle Gletscher der Welt ziehen sich derzeit mit zunehmender Geschwindigkeit zurück. Auch Europa ist bedroht. Die Alpengletscher verloren zwischen 1850 und 1975 fast die Hälfte ihres Volumens. Seit 2000 betragen die jährlichen Verluste 2-3% des verbliebenen Eisvolumens. Die Alpengletscher dürften innerhalb weniger Jahrzehnte bis auf Reste verschwunden sein. Die Meereisausdehnung in der Arktis zeigt ebenfalls eine starke Abnahme. Verglichen mit der Ausdehnung der 1950er Jahre hat sich die Fläche praktisch halbiert. Der niedrigste gemessene Wert war 3,4 Mio. km² im September 2012.

70 Autoren und Gutachter aus 40 verschiedenen Institutionen der Bundesrepublik, Österreich, Schweden und der Schweiz sowie Südamerika beteiligten sich mit 42 Beiträgen an diesem Buch. Entsprechend werden die Auswirkungen des Klimawandels auf das Eis der Erde aus der Sicht verschiedenster Fachdisziplinen behandelt. In den ersten beiden Abschnitten des Buches werden zunächst die Bedeutung, Variabilität und Eigenschaften des Eises sowie die Vereisungen in der Erdgeschichte ausführlich beschrieben. Der dritte Abschnitt beschäftigt sich mit dem Schnee und dem Permafrost. Im Mittelpunkt des vierten Abschnitts des

Buches stehen die Gebirgsgletscher aus unterschiedlichen Regionen, im fünften Abschnitt geht es um das Meereis der Polarregionen sowie der Nord- und Ostsee, im sechsten Abschnitt um die Eisschilde. Im letzten Abschnitt des Buches wird auf ökonomische Aspekte sowie auf Gefahren und Maßnahmen eingegangen.

Der Leser findet auch in diesem Band aktuelle und fundierte Informationen aus erster Hand. Dies gibt ihm die Möglichkeit, sich selbst ein Bild darüber zu machen, wie wichtig das Eis für das Klima der Erde ist und wie die Prognosen für die nächsten Jahrzehnte aussehen.

Das vorliegende Buch richtet sich nicht nur an Studenten und Studentinnen sowie Wissenschaftler aller Fachrichtungen, sondern besonders auch an interessierte Laien sowie Akteure aus Politik und Wirtschaft. Wir danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, das die Veröffentlichung dieses und voriger Bände dieser Buchreihe auf der Webseite www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de ermöglicht hat. Durch einen Druckkostenzuschuss unterstützte das Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung den Druck des vorliegenden Bands.

Für die Unterstützung bei der Herausgabe und Verbreitung dieses Werkes danken wir dem GEO Magazin, und nicht zuletzt danken wir all den Autoren und Autorinnen für die Lieferung der Manuskripte sowie den Gutachtern für die kritische Durchsicht der Kapitel und ihre sehr hilfreichen Anregungen, Ilse Hamann und Susan Beddig für die Überprüfung der Zusammenfassung in englischer Sprache, Zdenka Hajkova für die technische Überprüfung des gesamten Werks vor dem Druck sowie Hinrich Bäsemann für die zur Verfügung gestellten Fotos.

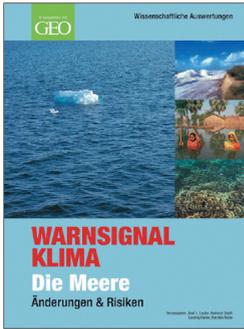
Die Herausgeber

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
<i>Liste der Autoren und Gutachter</i>	9
Klimawandel und das Eis der Erde: Ein Überblick (JOSÉ L. LOZÁN, HARTMUT GRASSL, DIETER KASANG, DIRK NOTZ & HEIDI ESCHER-VETTER)	11
1 Das Eis: Bedeutung, Variabilität und Eigenschaften	19
1.1 Physikalische und chemische Eigenschaften des Eises und seine Bedeutung (DIETMAR PASCHEK)	19
1.2 Kryosphäre – Gegenwart und Zukunft (SASCHA WILLMES, GÜNTHER HEINEMANN & ALFRED HELBIG)	25
2 Vereisungen in der Erdgeschichte	31
2.1 Vereiste und eisfreie Erde – Ein Überblick (MARTIN MESCHEDÉ)	31
2.2 Schneeball-Erde – die größte Vereisung der Erdgeschichte (HENRIK ROTHER & MARTIN MESCHEDÉ)	37
2.3 Der Beginn des gegenwärtigen Eiszeitalters (MARGOT BÖSE)	43
2.4 Klimaschwankungen während der letzten Eiszeit (DIERK HEBBELN)	51
2.5 Anthropozän – das Ende des Eiszeitalters ? (HENRIK ROTHER)	57
3 Schnee und Permafrost	63
3.1 Änderungen in der globalen Schneebedeckung (ACHIM HEILIG)	63
3.2 Schnee im Klimasystem: Wechselwirkungen und aktuelle Veränderungen (MONIKA PRASCH)	68
3.3 Terrestrischer und submariner Permafrost in der Arktis (LARS KUTZBACH, PAUL OVERDUIN, EVA-MARIA PFEIFFER, SEBASTIAN WETTERICH & SEBASTIAN ZUBRZYCKI)	78
3.4 Bedeutende Permafrostgebiete in den Gebirgen (CHRISTIAN HAUCK)	87
3.5 Pingos, besondere Bildungen in Permafrostgebieten und ihre Spuren in Norddeutschland (EIKE RACHOR)	94
3.6 Anmerkungen über die Eiswolken und ihre Bedeutung (MARKUS QUANTE)	99
4 Gebirgsgletscher	104
4.1 Kartierung von Gletschern mit Satellitendaten und das globale Gletscherinventar (FRANK PAUL)	104
4.2 Gletscherbewegung und Landschaftsformung (WILFRIED HAGG)	112
4.3 Holozäne und aktuelle Gletscherdynamik im subarktischen und vulkanischen Milieu Islands (JÖRG FRIEDHELM VENZKE)	119
4.4 Die gegenwärtige Situation der Gletscher auf Neuseeland (STEFAN WINKLER)	123
4.5 Die Gletscher der Hindukusch-Himalaya Region (CHRISTOPH MAYER & ASTRID LAMBRECHT)	130
4.6 Bestandsaufnahme der österreichischen Gletscher (MICHAEL KUHN, ASTRID LAMBRECHT & JAKOB ABERMANN)	138
4.7 400 Jahre Feldforschung am Vernagtferner (Ötztal, Österreich) (HEIDI ESCHER-VETTER)	146
4.8 Veränderungen der Schweizer Gletscher (HEIDI ESCHER-VETTER & JOSÉ L. LOZÁN)	155

4.9	Tropische Gletscher mit Fokus auf Ostafrika (THOMAS MÖLG)	160
4.10	Gletscher Südamerikas (JOSÉ L. LOZÁN & DIETER KASANG)	165
4.11	Die Auswirkungen des Klimawandels auf die tropischen Gletscher Boliviens (DIRK HOFFMANN)	176
4.12	Zukünftige Gletscher-Entwicklung (MATTHIAS HUSS)	184
5	<i>Meereis</i>	190
5.1	Bedeutung des Meereises für das Weltklima (DIRK NOTZ)	190
5.2	Historische und zukünftige Entwicklung des Arktischen Meereises (DIRK NOTZ)	195
5.3	Das aktuelle Abschmelzen des arktischen Meereises (DIRK NOTZ)	200
5.4	Das Meereis in der Antarktis (DIRK NOTZ)	205
5.5	Das Eis in der Nord- und Ostsee (NATALIJA SCHMELZER & JÜRGEN HOLFORT)	211
6	<i>Eisschilde</i>	219
6.1	Bedeutung des Eises als Archiv für Klima- und Umweltveränderung der Vergangenheit (Hans Oerter, SEPP KIPFSTUHL & JOSÉ L. LOZÁN)	219
6.2	Geschichtliche und aktuelle Veränderungen des Grönländischen Eisschildes (FRANK WILHELMS)	224
6.3	Frühere und heutige Änderungen des Antarktischen Eisschildes (WOLFGANG RACK)	231
6.4	Der Westantarktische Eisschild im Klimawandel (KLAUS GROSFELD, MALTE THOMA, SEBASTIAN GÖLLER & HARTMUT H. HELLMER)	238
6.5	Eisschilde und Meeresspiegel (MARK CARSON & ARMIN KÖHL)	245
7	<i>Ökonomische Aspekte, Gefahren und Massnahmen</i>	251
7.1	Erdrutsche, Lawinen und andere Gefahren (OLIVER KORUP)	251
7.2	Eis und Vulkane (BIRGER-G. LÜHR)	257
7.3	Permafrostdegradation in Sibirien - Sozio-ökonomische Aspekte (THOMAS OPEL & MATHIAS ULRICH)	262
7.4	Die Bedeutung der Kryosphäre im Tien Shan als »Wasserturm« für Zentralasien (KATY UNGER-SHAYESTEH, DORIS DÜTHMANN, ABROR GAFUROV, LARS GERLITZ & SERGIY VOROGUSHYN)	271
7.5	Rückgang der Gletscher und die Wasserversorgung in den tropischen Anden (DIETER KASANG & MANUEL LINSENMEIER)	279
7.6	Gletscher und Skitourismus: Eine Beziehung vor dem Aus? (JÜRGEN SCHMUDE & ANJA BERGHAMMER)	289
8	<i>Sachregister</i>	294

Wissenschaftler informieren direkt



Die Eisschilde (Inlandeise auf Grönland und Antarktis), das Meereis, die Gebirgsgletscher, der Schnee, der Permafrost und auch die Eishöhlen stellen das Eis der Erde (die Kryosphäre) dar. Da Eis festes Wasser ist, wird die Kryosphäre zur Hydrosphäre gezählt. Die größten Eismassen sind die Eisschilde, deren Abschmelzen den Meeresspiegel um fast 70 m steigen lassen würde. Das Eis der Erde konzentriert sich vor allem in den polaren und subpolaren Regionen sowie in den Hochgebirgen. Dies sind teilweise abgelegene Gebiete; dennoch ist ihre globale Bedeutung für das Klima, die Gesellschaft sowie Pflanzen und Tiere groß. Durch seine helle Oberfläche reflektiert das Eis einen großen Teil der Sonnenstrahlung; schmilzt das Eis, so absorbiert die Erdoberfläche mehr Energie. Daher ist die Erwärmung in den Polar- und Gebirgsregionen deutlich stärker als der globale Durchschnitt.



Mit der Erderwärmung schmilzt das Eis fast überall. Besonders stark schrumpfen die Gebirgsgletscher; sie verlieren fast weltweit an Masse. Auch Europa ist betroffen. Die Alpengletscher verloren zwischen 1850 und 1975 fast die Hälfte ihres Volumens. Seit 2000 betragen die jährlichen Verluste 2-3% des verbliebenen Eisvolumens. Die Alpengletscher dürften innerhalb weniger Jahrzehnte bis auf Reste hauptsächlich an den Viertausendern verschwunden sein. Die Gebirgsgletscher spielen in einigen Regionen der Erde eine wichtige Rolle für die Wasserversorgung in Städten, Industrie und Landwirtschaft. Auch für den Transport auf Flüssen und den Tourismus sind sie von Bedeutung.



Auch die Ausdehnung des Arktischen Meereises nimmt stark ab. Im September 2012 waren nur noch ca. 3,4 Mio. km² mit Meereis bedeckt; verglichen mit der mittleren Ausdehnung von 1950-1980 mit rund 8 Mio. km² hat sich seine Fläche praktisch halbiert. Der Klimawandel wird in den nächsten Jahrzehnten die Eisschmelze beschleunigen und zunehmend auch die großen Eisschilde einbeziehen. Die Folgen für den Meeresspiegel sind erheblich. Der mittlere globale Meeresspiegelanstieg ist von 1,7 mm/Jahr im 20. Jahrhundert auf im Mittel über 3 mm/Jahr seit 1992 angestiegen, wobei etwa die Hälfte durch das Schmelzen von Eis und die andere Hälfte durch die Wärmeausdehnung des Meerwassers verursacht worden ist.



Das vorliegende Buch ist die Fortsetzung der Buchreihe Warnsignal-Klima. An diesem populärwissenschaftlichen Buch beteiligen sich rund 70 Experten aus rund 40 Institutionen und wendet sich an Studenten, Junge Wissenschaftler, Politiker und interessierte Laien.

ISBN 39809668-87
EAN 978-39809668-7

Infos Tel./Fax 040-4304038
www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de
(siehe Impressum)



9783980966887



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Mit freundlicher Unterstützung von:

AWI ALFRED-WEGENER-INSTITUT
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-
UND MEERESFORSCHUNG