

Literatur und Informationen zum Klimawandel

einschließlich für den alpinen Bereich und insbesondere für Bergsteigerinnen, Bergsteiger, Bergfreunde und Mitglieder in der Sektion Schwaben im DAV
(Stand 01.12.2008)

Internet-Surfer kennen die Flut von umfangreichen und z. T. guten Informationen zu den Suchworten Klima, Klimawandel, Klima-Report, Klimaschutz, Treibhausgase etc. Auch der Buchmarkt quillt über mit Neuerscheinungen zu diesem Themen-Komplex. Grundsätzlich besteht kein Mangel an Informationsmöglichkeiten, eher ein Problem der Auswahl, der Gewichtung und der Bewertung der Informationsflut. „Unverbindlich“ werden nachfolgend einige Informationsquellen zusammengestellt und einige Themen und Begriffe erläutert.

- **die klima-allianz.** Der DAV ist zusammen mit zahlreichen Umweltverbänden Mitglied in der Klima-Allianz, Am Michaelshof 8-10, 53177 Bonn; www.die-klima-allianz.de; zahlreiche Informationen, Termine und Angaben zu den Mitgliedern; E-Mail: info@forumue.de; Tel.: 0228 359704, Fax: 0228 92399356.
- **Umweltbundesamt (UBA);** zahlreiche Informationen, downloads und (kostenlose) Broschüren zum Klimaschutz unter www.umweltbundesamt.de. Die Internetseite www.klimaschuetzen.de enthält sehr ansprechend aufbereitete Klimaschutz-Informationen, Erläuterungen der fachlichen Zusammenhänge und Hintergründe, zur Klimapolitik, Handlungsempfehlungen und weiterführende Links.
- **Herausforderung Klimawandel,** Herausgeber Bundesministerium für Bildung und Forschung, Berlin 2003, 59 S.; wird vom BMBF nicht mehr vertrieben, im Internet unter <http://www.bmbf.de/pub/klimawandel.pdf> zu finden. Entsprechend dem Erscheinungsjahr nicht mehr in allen Punkten aktuell, aber informativ und lesenswert.
- **Klimaschutz-Informationen,** insbesondere zum Regenwald, und ein **CO2-Rechner** zur Ermittlung der persönlichen Emissionsbilanz sind bei der Umweltstiftung WWF (World Wide Fund For Nature) erhältlich, im Internet unter www.WWF.de.
- **Klimawandel in den Alpen – Fakten – Folgen – Anpassung. –** Schrift des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2. Aufl. Okt. 2007, 91 S.; kostenlos zu beziehen über www.bmu.de oder E-Mail: bmu@broschuerenversand.de; Tel.: 0228 993053355, Fax: 0228 993053356. Thematisch breit angelegte aber kurz gefasste, informative, gut illustrierte Schrift mit umfassenden weiteren Informationsquellen.
- **CIPRA,** Commission International pour la Protection des Alpes, Internationale Alpenschutzkommission; CIPRA international und nationale Organisationen, u. a. CIPRA Deutschland. www.cipra.org, www.cipra.de; E-Mail: info@cipra.de; die CIPRA gibt folgende Schriften heraus:
 - alpMedia Newsletter, ein Informationsdienst der Cipra (www.cipra.org/alpmedia),
 - CIPRAINFO, Zeitschrift (deutsche Ausgabe), vierteljährlich, ISSN 1016-9964, beide häufig mit Informationen und Beiträgen zum Klimawandel in den Alpen; außerdem gibt es Tagungsbände, z. B.: **Klima – Wandel – Alpen**, Tourismus und Raumplanung im Wetterstress. – CIPRA Jahresfachtagung 2006 in Bad Hindelang; CIPRA 2006/23; oekom verlag München, ISBN: 978-3-86581-069-4 (24,90 €).

- **ClimchAlp**, das Projekt Climate Change Impacts and Adaptionstrategies in Alpine Space zum Klimawandel in den Alpen und zu Reaktionsmöglichkeiten wurde mit 22 Projektpartnern in den Alpen durchgeführt und im Frühjahr 2008 abgeschlossen; Informationen siehe www.climchalp.org (auf Englisch).
- **Gletscher im Klimawandel**, vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG)Wien; Autoren: R. Böhm, W. Schönauer, I. Auer, B. Hynek, C. Kroisleitner u. G. Weyss; 2007, 111 S., zahlr. Abb.; Eigenverlag; ISBN: 978-3-200-01013-0 (14,90 €). Mit Beschreibung des Gletscherlehrpfads Goldbergkees. Sehr informativ und zu empfehlen.
- **Gletscher im Treibhaus**, eine fotografische Zeitreise in die alpine Eiswelt. – W. Zängl & S. Hamberger, mit Beiträgen weiterer Autoren; 1. Auflage 2004, Tecklenborg Verlag; 271 S., zahlreiche, meist farbige Abb.; ISBN: 3-934427-419 (39,80 €). Umfassende Bildvergleiche über etwa 60 bis 100 Jahre für zahlreiche Gletscher aus den Ost- und Westalpen, mit Fachbeiträgen zum Thema Gletscher und Gletscherrückgang durch die Klimaerwärmung.
- **Permos**, Permafrost Monitoring Switzerland, im Internet www.permos.ch, eine ausgezeichnete Informationsquelle zum Permafrost und zu Blockgletschern in den Schweizer Alpen, in Englisch, einzelne Berichte in deutscher und französischer Sprache.
- **Der Drache regt sich wieder.** – Aufsatz von J. Meyer in „bergundsteigen, zeitschrift für risikomanagement im bergsport“, Heft 3/07, S. 22-33, Innsbruck, 2007; ein Bericht über die aktuellen Auswirkungen des Gletscherschwundes und des Auftauens von Permafrost in den Schweizer Alpen im Hinblick auf Gefahren für den Bergsport.
- **Der Klimawandel**, Diagnose, Prognose, Therapie. – S. Rahmstorf, H.J. Schellnhuber; 5. Auflage 2007, 144 S.; Verlag C.H. Beck, ISBN: 978 3 406 50866 0 (7,90 €). Sehr informative, gut verständliche (und preiswerte) Darstellung der Grundlagen, der gesicherten Ergebnisse sowie der öffentlichen und politischen Diskussion des Themas.
- **Klima.** – M. Latif; 2. Auflage 2006, 130 S.; Fischer Taschenbuchverlag (Fischer Kompakt), ISBN: 978-3-596-16125-6 (8,95 €). Übersichtlich gegliederte, populärwissenschaftliche Darstellung der Grundlagen (mit einigen mathematischen Ansätzen, die dem Laien vermutlich nicht immer besonders hilfreich sind); empfehlenswert.
- **Klimafakten.** – Herausgeber U. Berner, H. Streif; 4. vollständig überarbeitete Auflage 2004, 259 S., 286 farb. Abb.; Verlag Schweizerbart, ISBN 978-3-510-95913-6 (39,90 €). Ein umfassendes Werk, das sich insbesondere aus geowissenschaftlicher Sicht mit der Klimaentwicklung der Erde auseinandersetzt und eine z. T. eigene Position zum aktuellen Klimawandel vertritt.
- **Klimageschichte Mitteleuropas**, 1200 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen. – K. Glaser; 2. aktualisierte Auflage 2008; ISBN: 978-3-89678-604-3 (39,40 €). Der Band belegt für die Zeit seit dem Mittelalter: Extreme Wetterereignisse und Änderungen des Klimas gab es schon immer, aber seit Menschengedenken nicht in den nun für die Zukunft befürchteten Szenarien, Häufigkeiten und Stärken.
- **Wir Wettermacher**, wie die Menschen das Klima verändern und was das für unser

Leben auf der Erde bedeutet. – T. Flannery, 2006, 397 S., Fischer Taschenbuch Verlag, ISBN 978-3-596-17221-4 (9,95 €). Eine umfangreiche, gut lesbare Fachreportage eines australischen Autors über die neuesten Ergebnisse der Klimageschichte und die Zusammenhänge der aktuellen Klimaentwicklung, die in einen engagierten Aufruf zur Realisierung umfassender Klimaschutzmaßnahmen mündet.

- **Eine unbequeme Wahrheit.** – DVD des bekannten Kinofilms des Friedens-Nobelpreisträgers und früheren US-Vizepräsidenten Al Gore über den Klimawandel (Dauer etwa 1,5 Stunden); verschiedene Bezugsquellen unter dem Filmtitel im Internet (rd. 10,- €). Als Buch: 196 S., mit zahlr. Abb.; RiemannVerlag, ISBN: 978-3-570-50078-1 (19,95 €). Einige Aussagen werden von Experten inzwischen aber kritisch gesehen.
- **Gaias Rache**, warum die Erde sich wehrt. – J. Lovelock, 2007, 254 S., Ullstein-Verlag, ISBN 978-3-548-37210-5 (8,95 €). Der Autor hat in den 1970er Jahren die Vorstellung von der Erde als sich selbst regulierendes und Leben ermöglichendes Gesamtsystem (Gaia) entwickelt. Dieses sieht er durch die anthropogene Klimaveränderung als schwer geschädigt an und prognostiziert katastrophale Folgen. Die oft überraschende Darstellung von Zusammenhängen und viele der Urteile in seinem Spätwerk, z. B. für einen intensiven Einsatz der Kernenergie, über die Angst der Menschen vor Krebs, über die künstliche Produktion von Nahrungsmitteln oder über großtechnische Abwehrmaßnahmen gegen die Klimaerwärmung der Erde, haben in der Umweltbewegung, die er ursprünglich selbst wesentlich beeinflusst hat, z. T. heftige Kritik ausgelöst. Aufgrund des breiten Wissens über die Erde und vieler interessanter Fakten lohnt sich die Lektüre aber in jedem Fall, zum mit- oder auch mal zum dagegen denken.
- **Der UN-Weltklimareport**, Bericht über eine aufhaltsame Katastrophe. – Herausgeber: M. Müller, U. Fuentes & H. Kohl; 2007, 429 S., VI Abb.; Verlag Kiepenheuer & Witsch, (KiWi Paperback), ISBN: 978-3-462-03960-3 (12,95 €). Enthält Texte aus dem 4. Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Changes) und Kommentare zahlreicher Autoren, einschließlich der politischen Zielvorstellungen Deutschlands und der EU.
- Unter dem Suchbegriff **IPCC** finden sich im Internet zahlreiche Informationen und die Texte zum 4. Sachstandsbericht der Arbeitsgruppe I (Wissenschaftliche Grundlagen), II (Auswirkungen, Anpassungsstrategien und Anfälligkeiten) und III (Möglichkeiten zur Bekämpfung des Klimawandels); zum Originaltext (in Englisch) siehe: www.ipcc.ch; besonders lesenswert: „Zusammenfassung für Entscheidungsträger“ zum 4. Sachstandsbericht IPCC, 2007: 1. des Gesamtberichts (25 S.) und 2. des Beitrags der Arbeitsgruppe I, Wissenschaftliche Grundlagen (18 S.), jeweils in deutscher Übersetzung, z. B. unter DE-IPCC bzw. unter www.de-ipcc.de.

Speziell Baden-Württemberg/Südwestdeutschland:

- **Umweltministerium Baden-Württemberg:** www.um.baden-wuerttemberg.de, Stichwort Klimaschutz: Klimaschutz 2010 – Konzept für Baden-Württemberg (in Kurz- und Langfassung; bereits aus 2005, download oder kostenlose Schrift, erhältlich unter Tel. 0711-126-0/ Schriftenversand, E-Mail: poststelle@um.bwl.de oder www.um.baden-wuerttemberg.de; Themen: Klimaschutz, Publikationen).

- **KLIWA**, Klimaveränderungen und Wasserwirtschaft, ein Kooperationsprojekt von Deutschem Wetterdienst (DWD), den zuständigen Ministerien aus BW (UM BW), BAY (BayStmUGV) und RLP (MUFV RLP) und nachgeordneten Umweltbehörden; www.kliwa.de. Im Projekt werden Fakten, Prognosen und Anpassungsstrategien zur Klimaänderung speziell für unseren Raum erarbeitet, die Internetseite enthält downloads und Tagungsberichte; sie ist auch über LUBW, Landesanstalt für Umwelt und Messen Baden-Württemberg, erreichbar.
- Auf Tagungen, in Fachzeitschriften und in der Öffentlichkeit werden vermehrt die **Auswirkungen des Klimawandels auf die biologische Vielfalt, die Biodiversität und auf den Naturschutz** diskutiert, z. B. als Generalthema des Deutschen Naturschutztages 15.-20.09.2008 in Karlsruhe, Tagungsband angekündigt, oder Naturschutz Info 2/2008 der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz BW, 78 S., ISSN 1434-8764 (3,- €).

Einige Grundbegriffe und grundlegende Informationen

(die eine eigene Lektüre von Originalveröffentlichungen zum Thema nicht ersetzen sondern lediglich erleichtern sollen)

Dem Text folgen 28 Abbildungen als Auswahl aus einem Vortrag des Verfassers über „Klimaerwärmung, insbesondere in den Alpen“. Durch die laufende Nummerierung sind die Abbildungen dem alphabetisch nach Stichworten zusammengestellten Text zugeordnet.

Klima (Abb.1); Sphären der Erde (Abb. 2).

Aerosole: Ansammlung fester oder flüssiger Partikel als Schwebstoffe in der Atmosphäre aus natürlicher oder anthropogener Herkunft (Luftverschmutzung). Die Aerosole verstärken die Streuung und Reflexion der Sonneneinstrahlung in der Atmosphäre und wirken dadurch abkühlend, dämpfen also den Treibhauseffekt. Es gibt deshalb eine spezielle Fachdiskussion, ob die Luftreinhaltung (insbesondere für die menschliche Gesundheit zwingend erforderlich) bezüglich der Klimaerwärmung nicht kontraproduktiv sei. Die gezielte Ausbringung von Aerosolen in die Atmosphäre wird auch als globale Abwehrstrategie gegen die Klimaerwärmung diskutiert. Rußpartikel dagegen absorbieren Wärmestrahlung, führen dadurch zu einer Erwärmung der unteren Atmosphäre und tragen folglich zur Klimaerwärmung bei.

Aerosole beeinflussen auch das Wetter als Kondensationskerne für die Wolkenbildung. Bei Vulkanausbrüchen werden große Massen an Partikeln, schwefelhaltige Aerosole und gasförmiges Kohlendioxid (CO₂) bis in die Stratosphäre geschleudert. Die Aerosole und die Verdunkelungswirkung der Partikel wirken abkühlend, z. B. global je -0,3 °C über allerdings „nur“ 1 bis 2 Jahre bei den explosionsartigen Ausbrüchen von Krakatau (1883) und Pinatubo (1991). In der Erdgeschichte gab es aber auch längere Zeiträume anhaltend sehr hoher vulkanischer Aktivität, z. B. Ende der Kreidezeit in Indien, die sich wesentlich länger und stärker auf das Erdklima ausgewirkt haben müssen. Auch große Meteoriten-Einschläge auf die Erde, bei uns das Nördlinger Ries und das Steinheimer Becken vor rund 15 Mio. Jahren, haben sicher das Klima vorübergehend stark beeinflusst.

Albedo: Das Vermögen von Materie bzw. von Land-, Wasser-, Wolken-, Schnee- und Eisoberflächen, die einfallende Sonnenstrahlung diffus zurück zu streuen (von albus = weiß, lateinisch). Die Albedo wird in Prozent des reflektierten Anteils der Einstrahlung angegeben. Helle Flächen (z. B. Schnee) haben eine hohe, dunkle Flächen, z. B. vegetationsbedeckte oder auch Meerwasser-Flächen eine niedrige Albedo. Materie mit niedriger Albedo erwärmt sich bei Sonneneinstrahlung stärker (was bei aperen Gletschern, noch erhöht bei dünner Staub-, Schmutz- oder Gesteinsschutt-Auflage, zu verstärktem Abschmelzen führt). Einige Werte: Trockener Schnee: 80-97 %, Schnee schmelzend: 66-88 %, Firn: 43-69 %, reines Eis: 34-51 %, stark verschmutztes Eis: 15-25 %, eisfreier Ozean: 3-14 %, Landoberflächen: 5-30 % (aus „Gletscher im Klimawandel“, 2007, siehe Literaturliste). (Abb. 20).

Alpen im Klimawandel: In der gleichnamigen Schrift aus 2007 (siehe Literaturliste oben) werden folgende Auswirkungen des aktuellen Klimawandels auf die Verhältnisse in den Alpen genannt und beschrieben: Zunahme der Wahrscheinlichkeit von Hitzewellen wie 2003, ansteigende Tendenz von Starkniederschlägen und Hochwassergefahr (bei insgesamt abnehmenden Sommerniederschlägen mit der Gefahr von Dürreperioden), Aufwärtsverschiebung der biologischen Zonen mit Gefährdung vieler alpiner Pflanzenarten, enormer Rückgang der Gletscher (siehe unter Gletscherrückgang), veränderte bzw. erhöhte Gefahrenpotenziale von Naturgefahren wie Steinschlag, Muren, Fels- und Bergstürze durch Starkniederschläge und insbesondere durch Ansteigen der Permafrostgrenze, starker Rückgang der Schneesicherheit für Wintersportgebiete (insbesondere für tief gelegene Gebiet, durch Anstieg der winterlichen Schneefallgrenze infolge Klimaerwärmung). (Abb. 17, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 27).

Aufbau der Atmosphäre der Erde: Die gasförmige Hülle des Planeten ist durch die Schwerkraft an diesen gebunden. Sie ist in mehrere sphärische Schichten gegliedert: Bis etwa 12 km: Troposphäre (bis -50 °C, Wettergeschehen), Obergrenze: Tropopause; bis 50 km: Stratosphäre (bis +50 °C, darin die Ozonschicht), Obergrenze: Stratopause; bis 85 km: Mesosphäre (bis -80 °C, sichtbare Meteorite), Obergrenze: Mesopause; bis über 500 km: Thermosphäre (bis >1000 °C, Polarlicht); Übergang zur Exosphäre. Das Gasgemisch der Erdatmosphäre setzt sich zusammen aus (in Volumenprozent): 78,084 % Stickstoff, N₂, 20,946 % Sauerstoff, O₂, 0,93 % Argon, Ar, 0,03 (derzeit 0,0383) % Kohlendioxid, CO₂, weiteren Spurengasen und unterschiedlich bis zu 4 % Wasserdampf. (Abb. 3).

Auswirkungen des Klimawandels: Das System Atmosphäre und Klima, mit insbesondere der oberflächennahen Erdkruste bzw. Geosphäre, mit dem Boden, der Pedosphäre, dem aquatischen Bereich mit den Ozeanen und den Süßwasservorkommen, der gesamten Biosphäre, dem Wasser- und dem Kohlenstoffkreislauf und mit allen darin auftretenden Prozessen und den zwischen den Bereichen bestehenden Zusammenhängen und Wechselwirkungen ist bis heute nicht vollständig bekannt. Daraus ergibt sich die Schwierigkeit, abgesehen von der Unsicherheit über das zukünftige Verhalten der Menschheit, die längerfristige Entwicklung des Klimawandels und dessen Auswirkungen sicher zu prognostizieren. Zahlreiche Phänomene können inzwischen aber beobachtet und/oder wissenschaftlich relativ sicher beurteilt werden. Die wichtigsten Stichworte sind: Globaler Temperaturanstieg der Luft, der Erdoberfläche und der Ozeane, Zunahme extremer Wetterereignisse (Hitze- und Dürreperioden, Stürme/Hurrikane/Tornados, Starkniederschläge mit Hochwässern und Erosion, räumliche und zeitliche Änderung der Niederschlagsverteilung), Meeresspiegelanstieg mit an den Küsten riesigen Verlusten von Landflächen, Schmelzen von Meer- und Gletschereis und Auftauen von Permafrost in den Polarregionen und in den Hochgebirgen mit vielfältigen Konsequenzen, Verlust von Süßwasservorräten, Änderung der Ozeanströmungen (?), Verminderung der natürlichen und der landwirtschaftlichen Lebensmittelproduktion, Gesundheitsgefahren vielfältiger Art

für den Menschen, extreme Auswirkungen auf die marinen und festländischen Ökosysteme, Verlust an Biodiversität durch Aussterben von bis zu 30 % der Arten. Hinzu kommen die Gefahren wirtschaftlicher Zusammenbrüche und politischer Destabilisierungen.

Die Zeitskalen der Reaktionen sind sehr verschieden und können sehr langsam oder lange anhaltend sein. Nicht alle Änderungen sind ausschließlich und an jedem Ort negativ. Das Anpassungspotenzial von Natur und Mensch ist jedoch (relativ eng) begrenzt und abhängig von der Änderungsgeschwindigkeit. (Abb. 15, 16).

Gletscherrückgang: Mit Ausnahme der Inlandeisgletscher der Antarktis zeigen nahezu alle Gletscher der Erde seit einigen Jahrzehnten einen markanten Rückgang der Gletscherlänge und meist auch der Gletscherdicke bzw. der Eismächtigkeit.

Nach einer wärmeren Epoche im Mittelalter haben die Gletscher der Alpen während der „Kleinen Eiszeit“ um 1850 ihre maximale Ausdehnung in geschichtlicher Zeit erreicht. Die 1850er-Moräne ist morphologisch meist sehr markant entwickelt, nur schwach bewachsen und dadurch gut zu erkennen. Seitdem sind die Gletscher nahezu ständig, z. T. mit geringfügigen Vorstößen etwa zwischen 1910 und 1940, zurückgegangen, verstärkt in den letzten 2 bis 3 Jahrzehnten und eindeutig nochmals beschleunigt in den letzten Jahren. Im groben Mittel hat der Schwund bei zahlreichen Gletschern ein Drittel der Länge und bis über die Hälfte der Dicke erreicht, mit erheblichen Unterschieden im Einzelfall je nach Höhe, Steilheit und Exposition. Für eine Reihe von Gletschern liegen dazu detaillierte regelmäßige Messungen von Länge, Dicke, Eis- und Schneehaushalt sowie Schmelzwasserabfluss und Temperatur vor (z. B. Goldbergkees in den Hohen Tauern, siehe „Gletscher im Klimawandel, ZAMG, 2007, oder Pasterze: Abnahme der Eisdicke im Zehrgebiet um 200 m auf knapp 140 m, Längenabnahme um 1800 m, siehe „Gletscher im Treibhaus“, W. Zängl, S. Hamberger, 2004, jeweils in der Literaturliste oben). Durch die Klimaerwärmung wandert die Gleichgewichts- bzw. die Grenzlinie zwischen Nähr- und Zehrbereich aufwärts. Manche tief gelegenen Gletscher haben dadurch inzwischen ihr Nährgebiet vollständig verloren. Die stark verminderte Albedo der im Sommer schneefreien Gletschereisflächen der Zehrgebiete und die daraus folgende verstärkte Abschmelzung wurde bereits oben beschrieben (siehe Stichwort Albedo). Durch die Temperaturzunahme verlieren die Gletscher nicht nur an Dicke sondern nehmen auch die Schmelzwasserabflüsse in und unter dem Gletscher zu. Die erweiterten Fließkanäle und -schächte führen zu Instabilitäten, die gefährlicher und unberechenbarer sein können als die Spaltengefahr.

Prognosen besagen, dass bis 2100 zahlreiche Alpengletscher verschwunden oder extrem geschrumpft sein werden. Nur die Gletscher mit großen und hoch liegenden Nährgebieten werden, ebenfalls stark verkleinert, bis in das nächste Jahrhundert hinein bestehen.

In anderen Hochgebirgen sind z. T. auch abweichende Verhältnisse wirksam. Das rasche Abschmelzen der Gipfelvergletscherung des Kilimanjaro in Afrika wird neuerdings mehr auf abnehmenden Niederschlag bzw. Schneefall und damit auf die ausbleibende Neubildung von Gletschereis als alleine auf verstärktes Abschmelzen infolge der Klimaerwärmung zurückgeführt. Aus dem Karakorum wurde kürzlich bekannt, dass z. B. der große Baltorogletscher trotz der auch dort bestehenden Zunahme der Jahrestemperatur nur sehr schwach (nur 65 m) zurückgegangen ist. Der Gletscher ist stark von Gesteinsschutt bedeckt und die Schuttdecke bewirkt nicht nur eine Abnahme der Albedo gegenüber Schnee und Eis (dominant wirksam bei sehr dünner und lückiger Staub- und Schuttauflage) sondern durch größere und geschlossene Mächtigkeit der Schuttdecke (ab wenigen Zentimetern) hier vorherrschend, einen Schutz bzw. eine Isolation des Gletschereises gegenüber der verstärkten Einstrahlung und erhöhten Lufttemperatur. Dadurch haben der Baltoro- und benachbarte Gletscher unter dem Schutz der Schuttmassen ihre Ausdehnung nahezu konstant gehalten. Wenn allerdings im Nährgebiet zusätzlich zur Erwärmung auch die Niederschläge stark zurückgehen, wird die Gletscher-

zunge unter dem Gesteinsschutt zunehmend zum Toteis (z. B. an der Khumbu-Gletscherzunge im Everest-Gebiet). (Abb. 19, 21, 22, 26).

Globale Temperaturzunahme: Die globale mittlere Temperaturzunahme bis 2001-2005 gegenüber dem Zeitraum 1850-1899 beträgt aufgrund von Messwerten 0,76 (0,57 bis 0,96) °C mit großräumig auf der Erde, auch zwischen Festlandsflächen und Ozeanen, erheblichen Unterschieden (IPCC 2007).

Für Deutschland beträgt der mittlere Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert (also etwa dem Zeitraum wie zuvor) 1 °C, für die Alpen 2 °C, d. h. in Teilgebieten jeweils auch höher. Hochgebirge und die arktischen Polargebiete sind von der Klimaerwärmung überproportional betroffen, weil in diesen Regionen mit der Erwärmung auch die Albedo abnimmt und insbesondere dadurch die Temperaturzunahme verstärkt wird (Abnahme der weißen Flächen mit hoher Albedo: Meer- oder Packeis im Polargebiet, Schnee, Firn und Gletscher im Gebirge, und dadurch Zunahme von Flächen mit niedriger Albedo: Meerwasser, Gesteinsoberflächen, die sich durch die Solarstrahlung stärker erwärmen). Obwohl die Erwärmung im Bereich der Landflächen deutlich größer ist als über den Ozeanen, kann inzwischen auch die Erwärmung des Ozeanwassers bereits bis in große Tiefen nachgewiesen werden.

Die mit sehr aufwändigen mathematischen Klimamodellen errechnete zukünftige Erwärmung an der Erdoberfläche beträgt für 2090-2099 gegenüber 1980-1999 1,8 bis 4,0 °C (mit Bandbreiten von 1,1 bis 6,4 °C). Die Spanne der Prognosen beruht auf unterschiedlichen Annahmen der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung mit daraus folgenden unterschiedlichen Treibhausgas-Emissionen (IPCC 2007). (Abb. 7, 8, 14).

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, von der Umweltorganisation der Vereinten Nationen (UNEP) und der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) 1988 gegründeter Ausschuss zur Beschreibung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes über den globalen Klimawandel und zur Beratung der Internationalen Politik. Seine Berichte erscheinen alle 5 bis 6 Jahre (1990, 1995, 2001, 2007). Der letzte, 4. IPCC-Sachstandsbericht besteht aus den Teilberichten der Arbeitsgruppe I: „Wissenschaftliche Grundlagen“, der Arbeitsgruppe II: „Auswirkungen, Anpassungsstrategien und Anfälligkeiten“ und der Arbeitsgruppe III: „Möglichkeiten zur Bekämpfung des Klimawandels“ sowie einer Zusammenfassung (s. Internet). (Abb. 28).

Kohlenstoffkreislauf und CO₂-Gehalt der Atmosphäre: Das System Erde weist mehrere Stoffkreisläufe auf. Neben dem Wasserkreislauf ist der Kohlenstoffkreislauf von entscheidender Bedeutung für das Leben und das Klima auf der Erde. Am Kohlenstofffluss sind die Atmosphäre mit ihrem Gehalt an Kohlenstoffdioxid (CO₂), die Ozeane mit ihrem biogenen Inhalt, mit gelöstem CO₂ und mit dem Gehalt an Methan (CH₄), die terrestrische Biosphäre, insbesondere mit der Vegetation, sowie die Pedo- und Lithosphäre mit organischen Sedimenten (Humus, Torf, Braun- und Steinkohle, Erdöl, Erdgas) und Karbonatgesteinen (Mergel, Kalkstein und Dolomit) beteiligt. Die Festlegung großer Massen von Kohlenstoff während der Erdgeschichte in der Biosphäre und in organischen oder karbonatischen Gesteinen hat immer auch den CO₂-Gehalt der Atmosphäre beeinflusst. Da die mittlere Aufenthaltszeit von CO₂ in der Atmosphäre etwa 100 (5-200) Jahre beträgt, ist es plausibel, dass auch die seit Beginn des Industriezeitalters betriebene Verbrennung sehr großer Massen fossiler Energierohstoffe bzw. Kohlenstoffträger zu CO₂, dessen Konzentration in der Atmosphäre ansteigen lässt. Angeblich werden derzeit in einem Jahr so viele fossile Brennstoffe verbraucht, wie etwa in einer Million Jahre entstehen. Hinzu kommen großflächige Änderungen der Landnutzung mit nachteiliger Kohlenstoff-Bilanz. Auch wenn dies hauptsächlich in regionalen Schwerpunktsbereichen geschieht, erfolgt die weitgehend gleichmäßige CO₂-Verteilung in der Atmosphäre aufgrund der starken Luftströmungen sehr rasch. Der CO₂-Gehalt der Atmosphäre betrug im

Jahr 2007: 383 ppm oder 0,0383 %, vor dem Industriezeitalter: 280 ppm. Der aktuelle Wert übertrifft damit die CO₂-Konzentrationschwankungen der letzten 650.000 Jahre Erdgeschichte (IPCC 2007, nach neuesten Untersuchungen antarktischer Eis-Bohrkerne erweitert auf die letzten 800.000 Jahre). Unabhängig davon war der CO₂-Gehalt der Atmosphäre in früheren geologischen Zeiten schon bis zu etwa 20fach höher als derzeit. Generell kann die Abhängigkeit hohe CO₂-Werte und hohe Temperaturen in der Atmosphäre in der Erdgeschichte weit zurückverfolgt werden. Außerdem tritt aus der Erdkruste auch vulkanisches CO₂ aus. Dessen Anteil am CO₂-Gehalt der Atmosphäre beträgt derzeit aber nur etwa 1 % der anthropogenen Emissionen (z. T. nach „Klima“, von M. Latif, 2006, siehe Literaturliste). (Abb. 4, 5).

Kryosphäre: Die Eismassen der Erde: Meereis (Treibeis), Schelfeis (auf Meerwasser schwimmendes Gletschereis), Inlandeis (Grönland und Antarktis), Gebirgseis und mit Schnee bedeckte Landflächen nehmen heute etwa 10 % der Landoberfläche (14,8 Mio. km²) und im Jahresmittel 6,5 % der Ozeane (22,5 Mio. km²) ein. Das vorwiegend antarktische Schelfeis bedeckt 1,5 Mio. km², sein Volumen ist mit 0,66 Mio. km³ über zehnfach größer als jenes des Meereises. Alle Gebirgsgletscher und kleineren Eiskappen erreichen zusammen ein Volumen von 0,18 Mio. km³ („Klima“, von M. Latif, 2006, siehe Literaturliste oben). Diese Gebirgsgletscher und kleineren Eiskappen stellen zusammen nur 0,2 % der Eismassen der Erde dar.

Meeresspiegel-Anstieg: In geologischen Zeiträumen der Erdgeschichte sind Schwankungen des Meeresspiegels um weit über 100 m belegt. Ursachen sind insbesondere: 1. Wasser-Verdrängungsvorgänge: Hebungen und Senkungen von Teilen der Erdkruste sowie untermeerische Gesteinsbildungen einschließlich durch vulkanische Aktivitäten auf den Ozeanböden, 2. Volumenänderungen der Kryosphäre (siehe dort), insbesondere in den Polarregionen, zu Gunsten oder zu Lasten des Meerwasservolumens und 3. Volumenänderungen des Meerwassers durch Änderung der Wassertemperatur (Ausdehnung mit zunehmender Temperatur oberhalb 4 °C). Vor 25.000 Jahren, Höhepunkt der letzten Vereisungsphase der quartären Eiszeit, war das Eisvolumen auf der Erde nahezu dreifach größer als heute und der Meeresspiegel um 120 m tiefer. In der letzten großen Zwischeneiszeit (Eem-Warmzeit) vor 125.000 Jahren, war das Klima einige Grade wärmer als heute und der Meeresspiegel durch das Abschmelzen in den Polargebieten und durch Temperaturzunahme bzw. dadurch bedingte Ausdehnung des Ozeanwassers 4 bis 6 m höher als heute.

Messwerte ergeben einen mittleren globalen Meeresspiegel-Anstieg von 1961 bis 2003 von 7,56 cm (1,8 mm/Jahr, davon 0,42 mm/a thermische Meerwasser-Ausdehnung, 0,50 mm/a Abschmelzen der Gletscher und Eiskappen, 0,05 mm/a grönländische und 0,14 mm/a antarktische Eisschild-Abschmelzung sowie weitere Beiträge durch Abschmelzen der Hochgebirgsgletscher, insbesondere im Himalaya (IPCC 2007). Das Schmelzen von (bereits auf dem Meer schwimmendem) Meer- und Schelfeis führt zu keinem Spiegelanstieg, durch die veränderte Albedo aber zu einem zusätzlichen Temperaturanstieg des Ozeanwassers und zu weitgehenden ökologischen Auswirkungen.

Die mit unterschiedlichen mathematischen Klimamodellen errechneten Szenarien ergeben globale Anstiege des Meeresspiegels zwischen 0,18 und 0,59 m für den Zeitraum bis 2090-2099 im Vergleich zu 1980-1999 (IPCC 2007). Im Oktober 2008 wurde von WWF diese Prognose auf möglicherweise „bis mehr als 1,2 m Anstieg bis 2040“ „korrigiert“.

Am Ende der letzten Eiszeit haben Ausbrüche ungeheuer großer Schmelzwasserseen am Rande der nördlichen Inlandvereisung auch zu spontanen Anstiegen des Meeresspiegels und zu Unterbrechungen des Golfstroms durch den Zufluss von leichterem Süßwasser geführt (z. B. beschrieben in „Wir Wettermacher“, siehe Literaturliste).

Permafrost: Als Permafrost werden Verhältnisse, Gebiete oder Bereiche bezeichnet, in denen das Wasser im Boden oder Gestein ständig gefroren ist (Bodentemperatur ganz- und mehr-

jährig unter 0 °C). Im Hochgebirge ist die Verteilung von Permafrost, außer von der mittleren Jahrestemperatur der bodennahen Luft, auch von der Exposition und eventueller Schnee-, Eis- oder Gletscherbedeckung abhängig. Ein zeitweises Auftauen in der Nivalen Höhenstufe bleibt meist oberflächennah auf wenige Meter begrenzt. In den letzten 100 Jahren ist die Permafrostgrenze in den Alpen um etwa 100 bis 300 m und mehr angestiegen. In den Alpen liegt die Permafrostgrenze nordseitig auf etwa 2400 m NN, südseitig einige hundert Meter höher. Die Reichweite im Gestein und in die Tiefe beträgt einige zehner bis einige hundert Meter (z. T. nach Permos, siehe Literaturliste oben). In der Schweiz ist die Permafrostfläche etwa doppelt so groß wie die Gletscherfläche.

Beim Auftauen von Permafrost kommt es zu einer weit reichenden Entfestigung bereits zuvor aufgelockerter oder durch den Frost gesprengter, bisher aber durch das Eis zusammengehaltener Gesteinsbereiche und infolge dieser Entfestigung zu Rutschungen und Gleitungen, Steinschlag, Fels- und Bergstürzen. In den Alpen erfolgte in den letzten zwei Jahrzehnten eine deutliche Zunahme großer Bergstürze, die mit weitgehender Sicherheit auf abnehmenden Permafrost zurückgeführt werden konnten (vgl. z. B. Darstellung in „der Drachen regt sich wieder“ siehe Literaturliste oben).

Eine Zunahme der mittleren Jahrestemperatur, wie sie aktuell besteht, verursacht im Gebirge einen stetigen Anstieg der Permafrostgrenze (100 bis 200 m je 1 °C). Beobachtungen lassen vermuten, dass die einsetzende Wasserströmung in den Hohlraumstrukturen der Gesteinsmassen (an Stelle des bisherigen Eises) den Auftauvorgang stark beschleunigt.

Da ihm die aufsteigende Erdwärme entgegenkommt, reicht der Permafrost nur begrenzt bis in unterschiedliche Tiefe, z. B. im nördlichen Sibirien mit sehr niedrigen Jahrestemperaturen bis zu 1000 m. Es wird befürchtet, dass ein Auftauen der weit ausgedehnten Permafrost-Böden Sibiriens zur Emission großer Mengen an Methan, CH₄, einem starken Treibhausgas, führt. (Abb. 23),

Rückkoppelung und Selbstregulierung: Als Rückkoppelung werden Folgeentwicklungen bezeichnet, die die Auswirkungen eines Prozesses verstärken (positive R.) oder abschwächen (negative R.). Im Zusammenhang mit dem Klimawandel sind zahlreiche solcher Rückkopplungen bekannt, z. B.: Höhere Lufttemperaturen führen zu verstärktem Schmelzen von Gletschereis und von Schnee auf dem Gletscher. Dadurch wird die Gletscheroberfläche grau bzw. dunkler, die Albedo (siehe dort) nimmt erheblich ab, die Gletscheroberfläche wird dadurch noch stärker erwärmt und schmilzt noch stärker ab als alleine aufgrund des Temperaturanstieges; steigende CO₂-Werte bedeuten steigende Temperaturen und ein erhöhtes Kohlenstoff-Angebot für die Vegetation. Im heißen Sommer 2003 kam es in unserer Region aber zu einem geringeren Baumwachstum und damit geringerer CO₂-Fixierung, weil unsere Bäume nicht an die erhöhten Temperaturen und die damit verbundene Trockenheit angepasst sind. Oder: Das Auftauen großer Permafrostgebiete und die Erwärmung des Ozeanwassers können zu starken Austritten von Methan, CH₄, d. h. zu zusätzlichem Treibhausgas, führen.

Von J. Lovelock und L. Margulis stammt die Gaia-Hypothese, die inzwischen weiter zur Gaia-Theorie erweitert wurde (siehe Literaturliste: Gaias Rache von J. Lovelock). Dabei wird die Erde als ein sich selbst regulierendes System betrachtet, das aus der Gesamtheit der Organismen, der Gesteinsoberfläche, der Meere und der Atmosphäre besteht, die eng in einem sich entwickelnden System gekoppelt sind. Die Theorie unterstellt, dass das System sich selbst so reguliert, dass die Verhältnisse für die gegenwärtigen Lebensformen möglichst günstig sind. Nach J. Lovelock ist dieses System durch die anthropogenen Emissionen massiv gefährdet.

Solarstrahlung: Die Sonneneinstrahlung auf die Erde (sehr langfristig zunehmend, bei Entstehung der Erde noch 25-30 % schwächer als heute) beträgt am äußeren Rand der Atmosphäre 1367 W m⁻² (Solarkonstante) und unterliegt einer 11jährigen sowie einer etwa 80jährigen und längerfristigen zyklischen Schwankung (Schwalbe-Zyklus mit 0,1 % und

Gleissberg-Zyklus mit etwa 0,2-0,3 % Einstrahlungsamplitude) durch die Sonnenfleckenaktivität. Davon erreichen 236 W m^{-2} die Tropopause (Grenze Troposphäre/Stratosphäre in etwa 12 km Höhe). Sehr langperiodische, global, großregional oder bezüglich der Winter/Sommer-Differenz wirksame Schwankungen der Sonneneinstrahlung und dadurch der Erdoberflächen-Temperatur beruhen auf der Änderung der Erdumlaufbahn um die Sonne (maximal kreisförmig bis stärker elliptisch, so genannte Exzentrizität, Periode 100.000 Jahre), der Kreiselbewegung der Rotationsachse (Präzession, Periode etwa 23.000 Jahre) und der Änderung der Neigung (22 bis $24,5^\circ$, derzeit $23,5^\circ$) der Erdachse zur Umlaufbahn (Nutation, Periode 41.000 Jahre). Die Summenkurve dieser Zyklen ist nach Milankovitch benannt. Sie bewirken zwar erhebliche Temperatur- und Klimaschwankungen auf der Erde, haben wahrscheinlich aber erst in Verbindung mit der Änderung von Treibhausgas-Konzentrationen die Kalt- und Warmzeiten bzw. die Eiszeiten der Erdgeschichte ausgelöst. In geologischen Zeiträumen hat auch die Verteilung der Landmassen bzw. deren Änderung auf der Erde (durch Kontinentaldrift und weitere Vorgänge der Plattentektonik) Auswirkungen auf das Klima. (Abb. 6).

Strahlungsantrieb: Als Strahlungsantrieb wird die Änderung der Einstrahlung an der Tropopause (der Grenzschicht zwischen Troposphäre und Stratosphäre in etwa 12 km Höhe) durch externe oder interne Änderungen im Klimasystem der Erde bezeichnet (in Watt pro Quadratmeter, W m^{-2}). Extern sind Änderungen der Sonneneinstrahlung, z. B. durch Änderung der Sonnenfleckenaktivität, intern sind z. B. Änderungen der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre. Der globale durchschnittliche Netto-Effekt der menschlichen Aktivität seit 1750 beträgt $+1,6 \text{ W m}^{-2}$ Strahlungsantrieb, derjenige durch Zunahme der Sonneneinstrahlung wird auf $+0,12 \text{ W m}^{-2}$ geschätzt (IPCC 2007). Durch die Angabe des Strahlungsantriebs wird die Treibhauswirkung unterschiedlicher Treibhausgase direkt vergleichbar. (Abb.13).

Treibhauseffekt und Treibhausgase: In einem Treibhaus erwärmt sich die Luft stärker als außerhalb, weil das Glas die (kurzwellige) Sonneneinstrahlung herein, die umgewandelte (langwellige) Wärmestrahlung aber nur in vermindertem Umfang wieder heraus lässt und die erwärmte Luft nicht entweichen kann. In der Atmosphäre absorbieren und emittieren die darin enthaltenen Treibhausgase, insbesondere Wasserdampf und zahlreiche Spurengase (davon am wirkungsvollsten der CO_2 -Gehalt), die Wärmestrahlung (elektromagnetische Strahlung im thermischen Spektralbereich). Unterschieden werden der natürliche Treibhauseffekt, dem wir eine Erhöhung der mittleren Lufttemperatur an der Erdoberfläche um 33°C von -19 auf 14°C verdanken (davon zu zwei Drittel durch Wasserdampf), und der anthropogene Treibhauseffekt, der durch die infolge menschlicher Aktivität emittierten Treibhaus- und Spurengase entsteht und damit ganz überwiegend die aktuelle Klimaerwärmung verursacht.

Die durch menschliche Aktivitäten entstandenen Spurengase (insgesamt weniger als 1 % des Gasvolumens der der Lufthülle) haben in der Atmosphäre stark zugenommen. Die wichtigsten Beispiele, jeweils seit etwa 1800 bis 2005 sind: CO_2 von 280 auf 379 ppm (inzwischen bis 2007 auf 383 ppm); Methan, CH_4 , von 750 auf 1732 ppb; Lachgas, N_2O , von 280 auf 319 ppb). Weitere Treibhausgase sind Perfluorierte Kohlenwasserstoffe, PFC, Halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe, HFC, (Konzentration seit der weitgehenden Produktionseinschränkung wieder abnehmend), Schwefelhexafluorid, SF_6 , und auch Ozon, O_3 .

Der gesamte zusätzliche Strahlungsantrieb während des Industriezeitalters beträgt 2,30 (2,07 bis 2,53) W m^{-2} . Dabei ist die Treibhauswirkung der einzelnen Gase sehr verschieden, z. B ist jene von Methan 21mal (bzw. 20- bis 30mal) stärker als die von CO_2 , das in der Atmosphäre aber rund 220mal häufiger ist als Methan (diverse Informationsquellen).

Auch die „atmosphärische Lebensdauer“ der Treibhausgase ist sehr verschieden, z. B. CO_2 : ca. 100 (5-200) Jahre, CH_4 : 12 Jahre, N_2O : 114 Jahre (nach Latif 2006, siehe Literaturliste).

Die Verläufe der CO₂-Konzentration der Atmosphäre und der Temperatur zeigen - soweit Messwerte vorliegen oder rekonstruiert werden können - ein weitgehend gleichsinniges Verhalten bzw. eine außerordentliche Ähnlichkeit, so dass an der Abhängigkeit steigender Temperatur mit steigendem CO₂-Gehalt in der Atmosphäre kein Zweifel besteht (IPCC 2007). (Abb. 9, 10, 11, 12).

(ppm = parts per million bzw. 1 Teil pro 1 Million (10^{-6}), ppb = 1 Teil pro 1 Milliarde, engl. billion (10^9) an der Zusammensetzung der Luft)

Zusammengestellt von Dr. Wilhelm Schloz, DAV-Sektion Schwaben, Mitglied der Gruppe Natur und Umwelt und des Vorstands; Korrekturen, Ergänzungen oder sonstige Hinweise bitte per E-Mail an: schloz.esslingen@web.de

Anmerkung: Die Zusammenstellung soll als Hilfestellung dienen, sich mit dem Klimawandel eingehender zu befassen und die Befriedigung des Wissens-Bedürfnisses zu diesem Thema erleichtern. Vorschläge, Anregungen und Möglichkeiten zu individuellen, gemeinschaftlichen oder politischen Maßnahmen, Aktionen und Anpassungsstrategien zum Klimaschutz bestehen in großer Zahl und sind für jeden Interessierten leicht zu finden. Ihre Anwendung ist der nächste Schritt.

Anhang: 28 Abbildungen, die über ihre Nummerierung mit dem Text verknüpft sind.