



Franz Essl · Wolfgang Rabitsch *Hrsg.*

Biodiversität und Klimawandel

Auswirkungen und Handlungsoptionen
für den Naturschutz in Mitteleuropa

 Springer Spektrum

Biodiversität und Klimawandel

Franz Essl • Wolfgang Rabitsch (Hrsg.)

Biodiversität und Klimawandel

Auswirkungen und Handlungsoptionen für
den Naturschutz in Mitteleuropa

 Springer Spektrum

Herausgeber
Franz Essl
Wolfgang Rabitsch

Biologische Vielfalt und Naturschutz
Umweltbundesamt GmbH
Wien, Österreich

ISBN 978-3-642-29691-8
DOI 10.1007/978-3-642-29692-5

ISBN 978-3-642-29692-5 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum
© Springer Berlin Heidelberg 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Grafiken: G2 Grafik Gschwind, A-9020 Klagenfurt, Sponheimerstraße 10, Österreich, +43(0)660 7627347, saskia.g@aon.at

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-spektrum.de



Stefan Rahmstorf
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung

Die Reise ins Anthropozän – und ihre Folgen

Seit Beginn der Industrialisierung ist der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre auf den bei weitem höchsten Wert seit rund einer Million Jahre angestiegen. Gleichzeitig stieg die mittlere Oberflächentemperatur der Erde um 0,8 Grad Celsius. Die Erwärmung schreitet bislang ungebremst fort: 2010 war gleichauf mit 2005 das global wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen vor mehr als 130 Jahren.

Die Eisdecke auf dem arktischen Ozean schwindet immer weiter und hat im September 2012 ein neues Rekordminimum erreicht. Die beiden großen Eisschilde in Grönland und der Antarktis verlieren nach Satellitenmessungen zunehmend an Masse. Nicht zuletzt deshalb steigt der Meeresspiegel immer rascher an: zu Anfang des 20. Jahrhunderts um rund einen Zentimeter pro Jahrzehnt, in den letzten zwanzig Jahren schon um mehr als drei Zentimeter pro Jahrzehnt.

Die letzte Dekade hat eine Häufung nie dagewesener Wetterextreme erlebt, wie die Hitzewelle 2010 im östlichen Europa oder die Überflutungen im gleichen Jahr in Pakistan, sowie die Hitzewelle im Sommer 2012 in den USA. Datenanalysen zeigen, dass der von extremer Hitze betroffene Teil der Landflächen in den letzten Jahren massiv angestiegen ist, von lediglich ein bis zwei Promille in den 1950er- bis 1970er-Jahren auf rund zehn Prozent in den letzten Jahren.

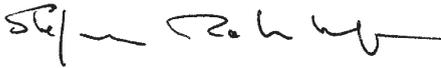
Durch diese Entwicklungen gelangen wir in eine neue geologische Epoche: das Anthropozän. Wir erzeugen Klimaverhältnisse auf unserem Planeten, wie es sie seit mehreren Jahrmillionen nicht gegeben hat, und an die das Leben daher schlecht angepasst ist. Wir verlassen den Erfahrungsraum des Menschen seit er den aufrechten Gang erlernt hat. Wir manövrieren die Erde in unkartierte Gewässer.

Noch dazu tun wir dies in einem atemberaubenden Tempo. Im Auf und Ab der Klimageschichte unseres Planeten galt bislang das große Schmelzen am Ende der Eiszeiten als besonders rasche globale Klimaveränderung. Nehmen wir das Ende der letzten Eiszeit, das vor rund 18.000 Jahren eingeläutet wurde. Damals stieg die globale Mitteltemperatur um 4 bis 7 °C an, über einen Zeitraum von 5000 Jahren. Das sind rund 0,1 °C globale Erwärmung pro Jahrhundert. Im 21. Jahrhundert werden im günstigen Falle 2, im ungünstigen Falle aber auch 5 oder 6 Grad hinzukommen. Das wäre dann eine Erwärmung, die fünfzigmal schneller abläuft als das Ende der letzten Eiszeit.

Über die Folgen einer derart großen Klimaveränderung lehrt uns das Ende der letzten Eiszeit etwas, wenn auch in einer Zeitlupenversion. Die Erde verlor zwei Drittel ihres Kontinentaleises, daher stieg der Meeresspiegel um 120 Meter. Ein Drittel der Eismassen ist heute noch da – genug, um den Meeresspiegel um mehr als 60 Meter ansteigen zu lassen.

Auch die Biosphäre der Erde wurde am Ende der letzten Eiszeit radikal umgekrempelt. In Europa breiteten sich Wälder aus und ersetzten die eiszeitliche Tundra, wo unsere Vorfahren Jagd auf Wollhaarmammuts gemacht hatten.

Wie werden unsere Erde, der Zustand der biologischen Vielfalt und damit unsere Lebensgrundlagen in fünfzig oder hundert Jahren aussehen? Die Verantwortung dafür liegt in unserer Hand.



Georg Rebernik
Geschäftsführer,
Umweltbundesamt



Beate Jessel
Präsidentin,
Bundesamt für
Naturschutz



Christine Hofmann
stellv. Direktorin,
Bundesamt für
Umwelt



Rudi Anschober
Landesrat für Umwelt,
Energie, Wasser und
Konsumentenschutz



Karlheinz Töchterle
Bundesminister für
Wissenschaft und
Forschung

Klimawandel und Biodiversitätsschutz – die Herausforderung des 21. Jahrhunderts

Der Klimawandel stellt fraglos eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Die Breite und Komplexität der damit verbundenen Fragestellungen und die rasanten Wissensfortschritte machen es immer schwieriger, das Themenfeld einigermaßen zu überblicken. Mit diesem Buch liegt nun erstmals eine umfassende Darstellung und Bewertung des Klimawandels und seiner Auswirkungen auf die Biodiversität in Mitteleuropa vor: Welche Folgen hat der Klimawandel auf Arten und Lebensräume? Wie werden sich die zukünftigen Folgen des Klimawandels darstellen, welche Arten, Lebensräume und Regionen werden am stärksten betroffen sein? Inwieweit beeinflussen die Auswirkungen des Klimawandels auf die Tier- und Pflanzenwelt die Landnutzung und in weiterer Folge die Gesellschaft? Was kann, was muss getan werden, um die Probleme, die der Klimawandel mit sich bringt, zu reduzieren? Wie groß sind die verbleibenden Risiken?

Diesen Fragen geht dieses Buch nach. Es legt als Gemeinschaftswerk des österreichischen Umweltbundesamtes, des deutschen Bundesamtes für Naturschutz, des Schweizer Bundesamtes für Umwelt, des österreichischen Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung und des oberösterreichischen Umweltressorts in Zusammenarbeit mit 74 Autorinnen und Autoren den in den letzten Jahren rapide angewachsenen Status quo des Wissens dar und lädt auch weniger Versierte zum Einstieg in das Thema ein.

Dieses Buch zeigt: Wir wissen zwar lange noch nicht alles über den Klimawandel und seine Folgen, aber wir wissen genug um zu handeln. Die Zeit drängt! Viel mehr als bisher muss getan werden, um den negativen Folgen des Klimawandels auf Arten und Lebensräu-

me zu begegnen oder diese zu verhindern. Die in diesem Buch beschriebenen Maßnahmen bergen vielfach Synergien mit anderen Bereichen, wie der Landnutzung und dem Schutz vor Naturgefahren. Sehr häufig tragen sie zum Klimaschutz bei, wie die Renaturierung von Feuchtgebieten. Und noch ein Zusammenhang wird deutlich: Künftig muss die Bewahrung der biologischen Vielfalt viel stärker als bisher als Grundlage einer erfolgreichen Anpassungspolitik an den Klimawandel verstanden werden.

Die Fakten zeigen eines unmissverständlich: Rasches und umfassendes Handeln ist ungleich günstiger als die langfristigen Kosten des Nichthandelns. Wir wünschen uns, dass das Buch „Biodiversität und Klimawandel“ zu konsequentem und frühzeitigem Handeln beiträgt.



Franz Essl/Wolfgang Rabitsch
Umweltbundesamt Wien

Horst Korn/Jutta Stadler
Bundesamt für Naturschutz Insel Vilm

Roland Hohmann/ Christian Schlatter
Bundesamt für Umwelt Bern

Vorsorgen ist besser als Heilen – die Zeit drängt!

The important action is therefore not the quantification of the risk [of climate change to biodiversity], but it´s reduction

L. Hannah (2012, Saving a Million Species: Extinction Risk from Climate Change)

Der vom Menschen gemachte Klimawandel ist ein Paradebeispiel dafür, dass Ursache und Wirkung zeitlich und räumlich weit auseinander fallen können und deshalb schwierig zu vermitteln sind. Auch wenn Inselstaaten wie die Malediven durch den Anstieg des Meeresspiegels bedroht sind, wer möchte deswegen auf seine jährliche Urlaubsflugreise verzichten? Ist die Wahrnehmung generationenübergreifender Verantwortung und langfristig angelegtes Handeln eine zu große Herausforderung?

Einzelereignisse, wie Stürme, Überflutungen, schmelzende Gletscher und das Auftreten südlicher Pflanzen und Tiere in Mitteleuropa, sind für den Einzelnen noch begreifbar

und überschaubar. Schwieriger zu verstehen, für die Allgemeinheit genauso wie für Wissenschaftler, sind die Wirkungszusammenhänge. Hier setzt dieses Werk an, indem es einen umfassenden Überblick zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität in Mitteleuropa gibt. Es dokumentiert das Ausmaß der drohenden Gefährdung von Arten und Lebensräumen durch den Klimawandel. Gerade weil manche der durch den Klimawandel ausgelösten Vorgänge kaum mehr aufzuhalten sind, ist es umso wichtiger vorausschauend und vorsorgend zu handeln: der Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen ist Klimaschutz, und umgekehrt ist die Bewahrung der Biodiversität in all ihren Ausprägungen nur bei einer Begrenzung des Klimawandels aussichtsreich!

Dieses Buch zu erarbeiten war eine spannende Aufgabe. Wir danken den Autoren und Autorinnen für ihre Beiträge und die Diskussionen während der Entstehung der Texte. Das Buch ist nicht als Roman konzipiert und kann „quer“ gelesen werden.

Die Texte haben 74 Autorinnen und Autoren geschrieben, wodurch sich Unterschiede in der Darstellung und manchmal auch in der inhaltlichen Positionierung ergeben. Die Leserin und der Leser werden daher an manchen Stellen verschieden gefärbte Aussagen finden, dies sollte als ein Abbild der Vielfalt der Zugänge im Naturschutz verstanden werden. Wir hoffen dennoch einen „Ariadnefaden“ durch das Buch gelegt zu haben, der sicher zu den Handlungsempfehlungen und Schlussfolgerungen führt.

Wir danken dem Umweltbundesamt, dem Bundesamt für Naturschutz und dem Bundesamt für Umwelt für die Möglichkeit, dieses trinationale Projekt zu realisieren, den Geldgebern für die Unterstützung und Finanzierung und dem Springer-Verlag für die Veröffentlichung.



INHALTSVERZEICHNIS

01	Klimatologische Grundlagen	
	Klimawandel, Beobachtungen, Szenarien	4
	M. Croci-Maspoli, F. Essl	
	1.1 Klima – Was ist das?	4
	1.2 Der beobachtete Klimawandel	10
	1.3 Die Zukunft des Klimas	19
02	Klima als Umwelt- und Überlebensfaktor	32
	W. Rabitsch, F. Essl	
	2.1 Bedeutung von Klimafaktoren für das Überleben und die Verbreitung von Organismen	32
	C. Beierkuhnlein, A. Jentsch	
	2.2 Ökologische Auswirkungen klimatischer Extremereignisse	40
03	Klimawandeleffekte heute:	
	Welche Änderungen finden bereits statt?	52
	W. Rabitsch, T. Herren	
	3.1 Phänologie	52
	W. Rabitsch, F. Essl, I. Kühn, S. Nehring, A. Zangger, C. Bühler	
	3.2 Arealänderungen	59
	W. Rabitsch, F. Essl, A. Kruess, S. Nehring, C. Nowack, G.-R. Walther	
	3.3 Biologische Invasionen und Klimawandel	66
	O. Schweiger, F. Essl, A. Kruess, W. Rabitsch, M. Winter	
	3.4 Erste Änderungen in ökologischen Beziehungen	75
04	Klimawandeleffekte morgen: Was könnte noch kommen?	86
	I. Kühn, S. Pompe, S. Trautmann, K. Boehning-Gaese, F. Essl, W. Rabitsch	
	4.1. Arealänderungen in der Zukunft	86
	F. Essl, M. Reich, K. Ullrich	
	4.2 Mobilität und Ausbreitungsdynamik: Können Arten rasch genug wandern – und was brauchen sie dafür?	101
	O. Schweiger, F. Essl, A. Kruess, W. Rabitsch, A. Ssymanik	
	4.3 Zukünftige Änderungen ökologischer Beziehungen	108
	W. Rabitsch, F. Essl	
	4.4 Schwellenwerte und Kipppunkte von Ökosystemen	118
	F. Essl, W. Rabitsch, G.-R. Walther	
	4.5 Neuartige Ökosysteme	124
	W. Durka, S.G. Michalski	
	4.6 Genetische Vielfalt und Klimawandel	132
	F. Essl, D. Moser	
	4.7 Indirekte Auswirkungen des Klimawandels auf die Biodiversität	136

T. Dirnböck, R. Psenner
 4.8 Einfluss des Klimawandels auf Nährstoffkreisläufe
 in Böden und Gewässern 141

W. Rabitsch, F. Essl
 4.9 Änderungen im globalen Klimasystem
 mit Auswirkungen auf Mitteleuropa 147

H. Aspöck, J. Walochnik
 4.10 Klimawandel, Globalisierung und Infektionskrankheiten
 des Menschen 153

**05 Wie könnten unsere Lebensräume und Landschaften
 zukünftig aussehen? Eine Gesamtschau 162**

W. Rabitsch, F. Essl
 5.1 Gewässer: Steigende Temperatur und geändertes
 Abflussverhalten 162

F. Essl
 5.2 Moore und Feuchtgebiete – die Gefahr der Austrocknung 172

F. Essl, M.J. Lexer, R. Seidl
 5.3 Wälder: Anbaugrenzen, Klimaextreme, Parasiten und Störungen 179

T. Dirnböck, S. Dullinger, F. Essl, W. Rabitsch
 5.4 Die Alpen im Klimawandel 192

F. Essl
 5.5 Landwirtschaft, Biodiversität und Klimawandel: Änderungen
 von Anbaugrenzen und Nutzungsintensität 202

F. Essl
 5.6 Grünland – im Spannungsfeld von Klima- und Nutzungswandel 212

K.H. Wiltshire, A. Kraberg
 5.7 Meere und Küsten: Klimawandel und Biodiversität 217

F. Essl
 5.8 Landschaft im Klimawandel 223

**06 Was leistet die Biodiversität für die Anpassung der vom
 Klimawandel betroffenen menschlichen Gesellschaft? 232**

M. Götzl, A. Kruess, F. Essl
 6.1 Klimawandel, Biodiversität und Ökosystemleistungen 232

F. Essl, D. Moser
 6.2 Klimawandel und Landnutzung – welche Rolle spielt der Naturschutz
 bei der Anpassung? 241

F. Essl, C. Beierkuhnlein
 6.3 Natürlicher Schutz vor Naturgefahren 247

A. Herberg, A. Kube
 6.4 Klimawandel und Städte: Naturschutz und Lebensqualität 254

07 Naturschutz als Beitrag zum Klimaschutz 264

F. Essl, H.D. Knapp, M.J. Lexer, R. Seidl, U. Riecken
 7.1 Vegetation und Boden als Kohlenstoffspeicher und -speicher 264

A. Höltermann, C. Großheim	
7.2 REDD+ – eine Chance für den internationalen Waldnaturschutz?	278

**08 Bewertung des Klimawandels für den Naturschutz:
Probleme, Prioritäten 284**

H. Gruttke, W. Rabitsch, F. Essl, S. Balzer	
8.1 Bedrohung und Schutzprioritäten für Arten und Lebensräume	284
K. Vohland, F. Essl, G. Ellwanger, J. Hanspach, I. Kühn, A. Ssymank, E. Schröder†	
8.2 Können Schutzgebiete ihre Schutzgüter verlieren?	295
B. Jessel	
8.3 Was ist neu an der Situation des Naturschutzes im Klimawandel?	304
T. Potthast	
8.4 Bewertungsmaßstäbe des Naturschutzes im Klimawandel	311
H. Korn, K. Kraus, J. Stadler	
8.5 Politische Dimension: national und international	317

09 Handlungsoptionen und -erfordernisse 326

F. Essl, C. Schlatter, S. Balzer, G. Ellwanger, H. Gruttke, S. Nehring	
9.1 Strategien, Möglichkeiten und Grenzen der Anpassung an den Klimawandel	326
G. Ellwanger, A. Ssymank, F. Essl, W. Rabitsch	
9.2 Bedeutung der Schutzgebietsnetze im Klimawandel	342
J. Fuhrer, F. Essl, F. Herzog, A. Holzkämper, B. Schuster, B. Schweppe-Kraft	
9.3 Förderung zukunftsfähiger Landnutzung im Klimawandel	352
B. Jessel, M. Butterling	
9.4 Beitrag der räumlichen Planung zur Anpassung an den Klimawandel	367
K. Ammermann, K.P. Zulka	
9.5 Erneuerbare Energien und Naturschutz	374

10 Danksagung 383

11 Literatur 384

12 Autoren 437

13 Glossar 443

14 Sachindex 454

VERZEICHNIS DER TEXTBOXEN

→ BOX 1-1 M. Croci-Maspoli, F. Essl
Die mittelalterliche Wärmeperiode und die kleine Eiszeit 16

→ BOX 1-2 U. Eser
Handeln unter Unsicherheit: Das Vorsorgeprinzip 23

→ BOX 1-3 M. Croci-Maspoli, F. Essl
Das 2 °C-Ziel 26

→ BOX 2-1 W. Rabitsch, F. Essl
Freiland CO₂-Anreicherungssysteme 38

→ BOX 3-1 W. Rabitsch, T. Herren
Phänologische Beobachtungsreihen 55

→ BOX 3-2 W. Rabitsch, F. Essl, I. Kühn, S. Nehring, A. Zangger, C. Bühler
Der Arealrand – ökologisch wertvoll und naturschutzrelevant! 61

→ BOX 3-3 W. Rabitsch, F. Essl, I. Kühn, S. Nehring, A. Zangger, C. Bühler
Aussterbeschuld durch Klimawandel 64

→ BOX 3-4 W. Rabitsch, F. Essl, A. Kruess, S. Nehring, C. Nowack, G.R. Walther
Biologische Homogenisierung 68

→ BOX 3-5 S. Nehring
***Crassostrea gigas* – eine invasive Auster verändert die Welt** 71

→ BOX 3-6 W. Rabitsch, F. Essl, A. Kruess, S. Nehring, C. Nowack, G.R. Walther
Invasive Arten als Energiepflanzen? 72

→ BOX 3-7 O. Schweiger, F. Essl, A. Kruess, W. Rabitsch, M. Winter
Wie kann der Klimawandel ökologische Beziehungen verändern? 76

→ BOX 3-8 O. Schweiger, F. Essl, A. Kruess, W. Rabitsch, M. Winter
Mögliche zeitliche Entkopplung der Phänologie von Herbivoren und deren Nahrungspflanzen und die Auswirkungen auf die Fitness der Herbivoren 78

→ BOX 3-9 O. Schweiger, F. Essl, A. Kruess, W. Rabitsch, M. Winter
Vielfalt der möglichen Einflussnahme des Klimawandels auf ökologische Beziehungen am Beispiel der Bestäubung 81

→ BOX 4-1 I. Kühn, S. Pompe, S. Trautmann, K. Böhning-Gaese, F. Essl, W. Rabitsch
Szenarien aus dem EU-Projekt ALARM 88

→ BOX 4-2 W. Rabitsch, F. Essl, S. Nehring, I. Kühn
Neobiota und Klimawandel 91

→ BOX 4-3 W. Rabitsch, F. Essl
***Ambrosia artemisiifolia* – ein allergener Neophyt breitet sich aus** 92

→ BOX 4-4 W. Rabitsch
***Assisted Migration* als Anpassung an den Klimawandel?** 100

→ BOX 4-5 O. Schweiger, F. Essl, A. Kruess, W. Rabitsch, A. Ssymank Klimawandel, biotische Interaktionen und Ausbreitungsvermögen	109
→ BOX 4-6 F. Essl, W. Rabitsch, G.-R. Walther Die Hierarchie der Reaktion von Arten auf den Klimawandel	126
→ BOX 4-7 W. Durka, S.G. Michalski Beispiele für schnelle, klimabedingte Evolution	135
→ BOX 4-8 K. Ammermann, M. Thommen, K. P. Zulka Erneuerbare Energien und Naturschutz	138
→ BOX 4-9 T. Dirnböck, R. Psenner Bodenrespiration in Bergwäldern bei Erwärmung	145
→ BOX 5-1 F. Essl, M.J. Lexer, R. Seidl Fichte, Borkenkäfer und Klimawandel	183
→ BOX 5-2 E. Weigand, F. Essl Sukzession auf Waldbrandflächen in den Alpen	184
→ BOX 5-3 T. Dirnböck, S. Dullinger, F. Essl, W. Rabitsch Endemiten der Gebirge – bei Klimawandel besonders gefährdet	194
→ BOX 5-4 H. Pauli, M. Gottfried, F. Essl, G. Grabherr GLORIA – globales Klimawandelmonitoring an der Kältengrenze des Lebens	197
→ BOX 5-5 F. Essl Vision Feuchtgrünland in Norddeutschland	214
→ BOX 6-1 B. Hansjürgens Methoden zur Monetarisierung von Ökosystemleistungen	238
→ BOX 6-2 F. Essl, C. Beierkuhnlein Deichrückverlegung an der Elbe	250
→ BOX 6-3 F. Essl, C. Beierkuhnlein Schutzwald versus Lawinenverbauung	253
→ BOX 6-4 A. Herberg, A. Kube Urbane Wälder	261
→ BOX 8-1 H. Gruttke, W. Rabitsch, F. Essl, S. Balzer Endemiten und Klimawandel	288
→ BOX 8-2 H. Korn, K. Kraus, J. Stadler CBD und UNFCCC	318
→ BOX 8-3 H. Korn, K. Kraus, J. Stadler Kyoto-Protokoll	319
→ BOX 8-4 H. Korn, K. Kraus, J. Stadler Die Bedeutung und Rolle des Welt-Klimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC)	320
→ BOX 9-1 T. Potthast Bewertungsgrundlagen und Entwicklung konkreter Ziele	326

→ BOX 9-2 H. Korn, J. Stadler, F. Essl Nationale Anpassungsstrategien	330
→ BOX 9-3 R. Dröschmeister, M. Küttel Die Bedeutung von Klimafolgen-Monitoring	334
→ BOX 9-4 K. Zaunberger, C. Schlatter Mit der Natur arbeiten – Ökosystembasierte Ansätze	340
→ BOX 9-5 B. Hedden-Dunkhorst Ökologische Netzwerke in den Alpen – ein Beitrag zur Anpassung an den Klimawandel	348
→ BOX 9-6 U. Riecken, B. Jessel Wildnisgebiete als Referenzgebiete für Anpassungsstrategien des Naturschutzes	350
→ BOX 9-7 J. Fuhrer, Essl, F. Herzog, A. Holzkämper, B. Schuster, B. Schweppe-Kraft Agroforstsysteme	359
→ BOX 9-8 J. Fuhrer, F. Essl, F. Herzog, A. Holzkämper, B. Schuster, B. Schweppe-Kraft Paludikultur	361
→ BOX 9-9 J. Fuhrer, F. Essl, F. Herzog, A. Holzkämper, B. Schuster, B. Schweppe-Kraft Mooraktien oder MoorFutures	365
→ BOX 9-10 D. Keller, A. Kube, M. Ruckstuhl, A. Wymann Stadtklima im Kontext der Stadtplanung	372
→ BOX 9-11 B. Jessel, M. Butterling Instrumente für eine Klimawandelangepasste räumliche Planung	373
→ BOX 9-12 K. Ammermann, KP. Zulka Indirekte Landnutzungsänderungen	380



1 Klimatologische Grundlagen

Klimawandel, Beobachtungen, Szenarien

01



1 Klimatologische Grundlagen

Klimawandel, Beobachtungen, Szenarien

1.1 KLIMA – WAS IST DAS?

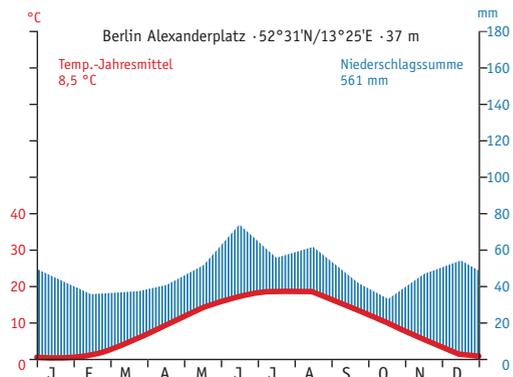
Das Klima beschreibt den Zustand der Atmosphäre über lange Zeiträume von Jahrzehnten bis hin zu Jahrtausenden. Die Beschreibung des langfristigen Zustandes des Klimasystems erfolgt über die Erfassung von Zustandsgrößen (Luftfeuchtigkeit, Bodenfeuchte, Temperatur, Luftdruck, Energie) sowie von Flussgrößen (Niederschlag, Verdunstung, Strahlung, Wind). Dabei ist nicht nur der Mittelwert, sondern auch der Schwankungsbereich (typische Abweichung vom Mittelwert), sowie Extremwerte oder aber auch mögliche quasiperiodische Schwingungen (z. B. 11-jähriger Sonnenfleckenzyklus, 7-jähriger El Niño-Südliche Oszillation (= ENSO-Zyklus), Eiszeiten) von entscheidendem Interesse.

Das Klimasystem besteht aus verschiedenen Komponenten (Atmosphäre, Lithosphäre, Biosphäre, Kryosphäre, Hydrosphäre). Zwischen diesen Komponenten besteht ein stetiger Austausch von Energie und Masse (Verdunstung, Strahlung, Niederschlag, Wind, Ozeanströmungen, chemische Umwandlungen, etc.), um stets ein energetisches Gleichgewicht der Subsysteme aufrechtzuerhalten. Der Antrieb für all diese Prozesse liegt im Energiefluss der Sonne sowie in der ungleichen Verteilung dieser Strahlungsenergie auf der Erde (Blüthgen 1966, Malberg 2007, Häckel 2008). Um Klimagrößen und -karten international vergleichen zu können, wurden sogenannte Klimanormalperioden festgelegt, die 30-jährige Zeiträume wie z. B. 1961–1990 umfassen (WMO 2007).

Das Klima eines Ortes lässt sich nach verschiedenen Parametern beschreiben. Zu den Wichtigsten gehören der monatliche Mittelwert der Temperatur und die monatliche Niederschlagssumme sowie die daraus abgeleitete Jahresmitteltemperatur und Jahresniederschlagssumme (Abb. 1-1). Diese bestimmen entscheidend mit, welche Ökosysteme und Organismen in einem Gebiet in klimatischer Hinsicht existieren können (Abb. 1-2) und welche Art der Landnutzung möglich ist.

Für biologische Systeme von großer Bedeutung sind klimatische Extremwerte, die nur selten und meist kurzfristig auftreten. Dies sind zum Beispiel winterliche Tempe-

Abb. 1-1: Klimadiagramme der Hauptstädte von Deutschland, Österreich und der Schweiz (vereinfacht nach Walter u. Lieth 1967). Klimadiagramme stellen die wichtigsten Klimaparameter und ihren zeitlichen Verlauf über das Jahr dar. Dies sind Mittelwerte des Niederschlags (in mm) und der Temperatur (in °C) der einzelnen Monate für die Periode 1961-1990.



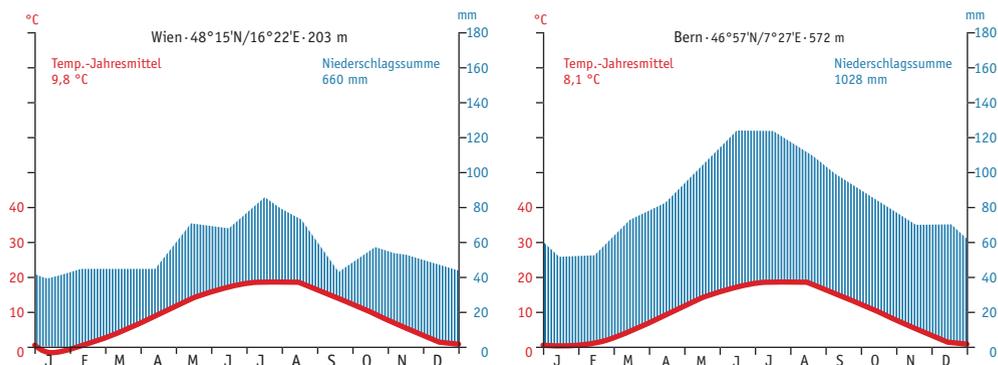
raturminima und sommerliche Temperaturmaxima sowie lange Trockenperioden und Extremniederschläge. Diese Extremwerte beschreiben die maximale Abweichung des Klimas von seinem typischen Zustand, wobei die Amplitude der Abweichung an verschiedenen Orten der Erde unterschiedlich groß ist. Am geringsten sind die Temperaturamplituden in äquatornahen Gebieten sowie in ozeanisch geprägten Klimatypen, wie etwa in Westeuropa und abgeschwächt dem westlichen Mitteleuropa.

Das Wetter ist ein Teilprozess innerhalb des Klimasystems und trägt zum großräumigen Energieaustausch und somit zur Erhaltung des globalen, energetischen Gleichgewichts bei. Wetter spielt sich aber auf wesentlich kürzeren Zeitskalen (Stunden bis Wochen) als Klima ab. Ganz entscheidend bei der Beschreibung des Begriffs Wetter ist der kurzfristige und zumeist auch regionale Gesichtspunkt. Wetter kann von jedem persönlich erlebt und wahrgenommen werden, Wetter ist der aktuelle oder auch kurzfristige Zustand der Atmosphäre. Klima kann im Gegensatz dazu nicht direkt erlebt werden, da die Zeiträume zu lang sind.

1.1.1 Steuernde Mechanismen

Das Klima wird über das Zusammenwirken verschiedener Parameter definiert, von denen einige weitgehend unveränderlich sind oder sich nur sehr langfristig verändern. Hierzu gehören z. B. die Meereshöhe, die Lage der Kontinente zueinander (Kontinentaldrift), die Erdumlaufbahn, und die Milankovitch-Zyklen (□ Kap. 1.2.3). Andere Parameter unterliegen kurz- bis mittelfristigen Schwankungen. Zu diesen gehören die Konzentration klimarelevanter Spurengasen in der Erdatmosphäre, globale Zirkulationsmuster der Atmosphäre und besonders der Ozeane, und die Sonnenstrahlungsintensität (Solarkonstante und Sonnenflecken-Zyklus).

Das Klimasystem ist außerordentlich komplex. Es umfasst neben der Atmosphäre auch Gewässer, Gletscher, Vegetation und den Boden, wobei die Wechselwirkungen zwischen den Elementen des Klimasystems von Sekunden bis Tausenden von Jahren dauern können. Somit sind die Auswirkungen von Einflussnahmen auf das Klimasystem in ihrer Wirkung – d. h. Richtung und Stärke der Änderung und Zeitpunkt des Eintretens – sehr unterschiedlich. Klimatische Änderungen können regional begrenzt (z. B. als Folge der Änderung regionaler Wind- oder Strömungsverhältnisse) oder global wirksam sein (etwa als Folge der Änderung des Gehaltes von Treibhausgasen in der Atmosphäre). Aber auch in letzterem Fall sind das Ausmaß und die Geschwindigkeit der Änderung zwischen ver-



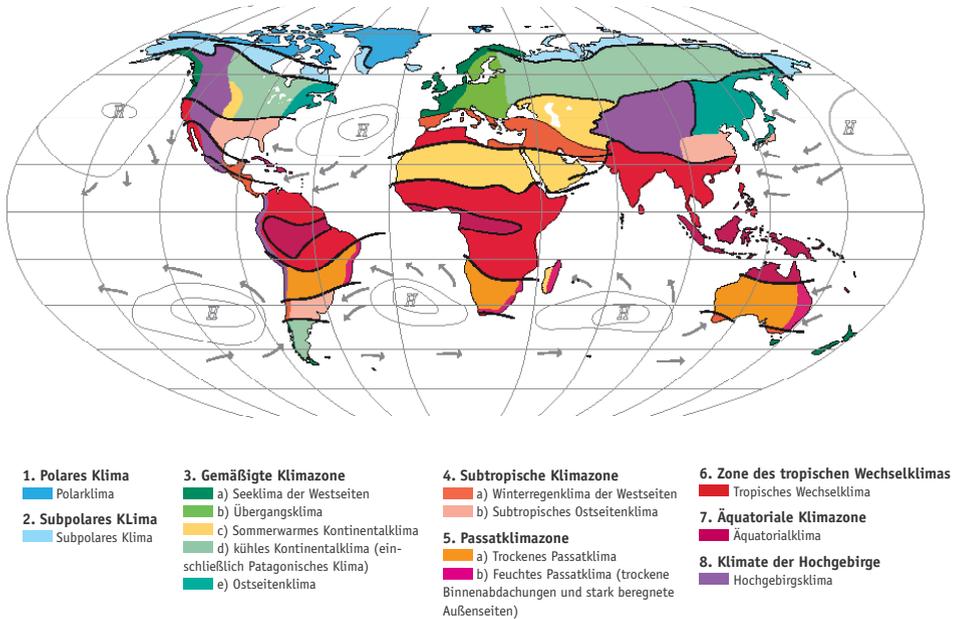


Abb. 1-2: Vereinfachtes Schema der Klimazonen der Erde. Gleiche Klimazonen liegen auf verschiedenen Kontinenten auf ähnlichen geographischen Breitengraden, wobei kleinere Abweichungen zwischen Nord- und Südhalbkugel (auf letzterer liegen die Klimazonen näher am Äquator) sowie zwischen einzelnen Kontinenten zu beobachten sind (in Europa reichen die Klimazonen weiter nordwärts, eine Folge des Golfstroms). Für die Ausbildung mancher Klimazonen ist des Weiteren die Lage auf dem Kontinent entscheidend, z. B. sind mediterrane Klimatypen nur auf der Westseite der Kontinente ausgebildet (<http://klima-der-erde.de>).

schiedenen Orten unterschiedlich. Es ist sogar möglich, dass es als Folge spezifischer Ausgangsbedingungen lokale Sonderfälle gibt, die eine vom allgemeinen Muster abweichende Reaktion zeigen.

1.1.2 Extremereignisse

Klimatische Extremereignisse haben im Hinblick auf Mensch und Natur stets schwerwiegende Folgen (z. B. Hochwässer, Lawinenabgänge). Somit prägen sie die Verteilung von Lebensräumen und Organismen sowie die Möglichkeiten der menschlichen Raumnutzung entscheidend mit. Als statistische Ausnahmeseheinungen lassen sie sich aber durch Klimamodelle nur schwer beschreiben. Dabei ist zu beachten, dass sich Änderungen von Frequenzen, Intensitäten, Dauer oder auch die räumliche Ausdehnung und die Lage betroffener Regionen sich unterschiedlich entwickeln können und somit auch getrennt zu betrachten sind.

Bei Extremereignissen herrschen Bedingungen, welche nur sehr selten wiederkehren. Entsprechend ist auch die historische Datengrundlage häufig schlecht. Umso wichtiger sind lange, qualitativ hochwertige und homogene Klimadaten in einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung (WMO 2009). Beim Homogenisieren werden historische Messwerte an die heutigen

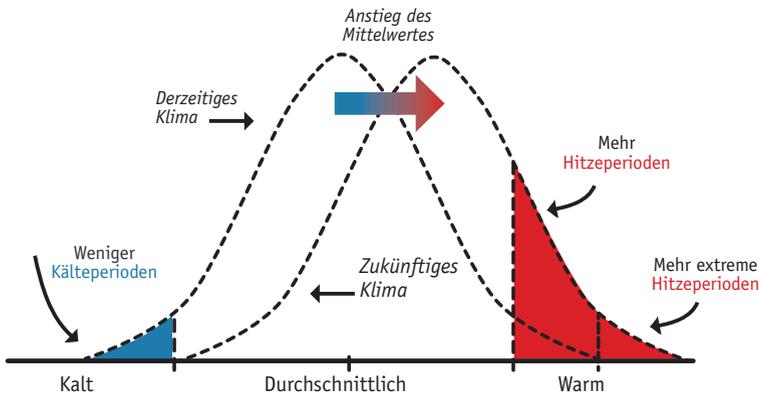


Abb. 1-3: Illustration zur Änderung von Extremereignissen bei Veränderung der mittleren Temperatur (IPCC 2007).

Messbedingungen angepasst und somit nicht-klimatische Einflüsse aus den Messreihen entfernt. Häufigste Ursachen sind Stationsverlegungen, der Einsatz neuartiger Messinstrumente oder Veränderungen der Umgebung. Die mitteleuropäischen Länder sind in der glücklichen Lage, dass hochwertige klimatologische Aufzeichnungen zur Verfügung stehen, die teilweise bis ins 18. Jahrhundert zurückreichen (Auer et al. 2007).

Änderungen von Extremereignissen lassen sich auf zwei verschiedene Arten beschreiben. Das mittlere Klima kann sich stärker in eine Richtung verschieben (Abb. 1-3) oder die klimatische Variabilität ändert sich. Beide Faktoren haben für sich oder in Kombination zur Folge, dass Extremereignisse in veränderter Form auftreten können. Bei Extremereignissen ist der Nachweis des Bezugs zum Klimawandel im Einzelfall nur schwer möglich, allerdings führen klimatische Änderungen zu veränderten Eintrittswahrscheinlichkeiten von Extremereignissen.

Zur Abschätzung zukünftiger Extremereignisse werden entweder beobachtete Messdaten in die Zukunft projiziert oder Berechnungen aus Modelldaten verwendet. Anhand von Wiederkehrperioden, die aus beobachteten Messdaten berechnet werden, lässt sich bei Annahme eines stationären Klimas (d. h. ohne Klimaänderung) eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Extremereignisses machen. Bei der direkten Berechnung der Extremereignisse aus Modelldaten wird zwar die Klimaänderung miteinbezogen, jedoch stellen sich dadurch neue Probleme. Modellresultate zu Extremereignissen sind derzeit noch mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Oft werden deshalb Abschätzungen aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten verwendet.

1.1.3 Das Klima ändert sich – ändert sich das Klima?

Ändert sich die Ausprägung eines oder mehrerer der das Klima steuernden Mechanismen, so reagiert das Klima darauf, wenngleich verzögert. Somit sind das globale und regionale Klima zeitlich variabel, auch wenn Änderungen nach menschlichen Maßstäben meist langsam erfolgen. Nur selten, als Folge katastrophaler Ereignisse (z. B. Vulkanausbrüche, Meteoriteneinschläge), beim Überschreiten von Kippunkten (z. B. sprunghafte Änderungen der Meeresströmungen im Nordatlantik mit einem temporären Aussetzen

des Golfstromes am Ende der letzten Kaltzeit; Rahmstorf 2002; □ Kap. 1.3.2) und beim Eintreten positiver Rückkoppelungen, können solche Änderungen auch rasch verlaufen. Mehrere dieser zeitlich variablen Faktoren weisen Zyklen auf. Dazu gehören etwa periodische Schwankungen der Solarkonstante (z. B. 11-jähriger Zyklus in der Sonnenfleckenaktivität), aber auch langfristige Änderungen der Erdumlaufbahn, des Neigungswinkels der Erdachse und der Exzentrizität mit Periodizitäten von zehn- bis hundertausenenden von Jahren.

Globale Veränderungen im Temperaturhaushalt sind nur möglich, wenn es zu Änderungen in der Energiezufuhr im System Erde-Atmosphäre kommt oder es Änderungen im Energie-Rückhaltevermögen gibt. Letzteres entspricht dem Treibhauseffekt. Dieser entsteht dadurch, dass manche Bestandteile der Erdatmosphäre, die sogenannten Treibhausgase, zwar die kurzwelligen auf die Erde eintreffenden Sonnenstrahlen passieren lassen, die langwellige Wärmestrahlung, wie die Erdoberfläche sie abstrahlt, jedoch absorbieren und gleichmäßig in alle Richtungen, also auch zum Boden hin, abstrahlen. Die Erdoberfläche erhält so zusätzliche Wärmestrahlung (Abb. 1-4). Der Treibhauseffekt wurde 1824 von Joseph Fourier entdeckt und 1896 von Svante Arrhenius erstmals quantitativ genauer beziffert. Der natürliche Treibhauseffekt erhöht weltweit die Mitteltemperatur um etwas über 32 °C – d. h. die globale Mitteltemperatur läge ohne den Treibhauseffekt bei -18 °C anstatt bei +14 °C. Leben wäre auf der Erde nicht möglich. Die wichtigsten Treibhausgase sind Wasserdampf (H₂O), Kohlendioxid (CO₂), troposphärisches Ozon (O₃), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O).

Menschliche Aktivitäten (v. a. Verbrennungsprozesse, Rodung von Wäldern, Trockenlegung von Mooren, Reisanbau und Rinderhaltung) haben dazu geführt, dass die Konzentration der natürlichen Treibhausgase seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts zuerst langsam und seit der Mitte des 20. Jahrhunderts mit zunehmender Geschwindigkeit angestiegen ist (Abb. 1-5). Den größten Beitrag zum anthropogenen Treibhauseffekt leistet Kohlendioxid, gefolgt von Methan und Lachgas (IPCC 2007). Die CO₂-Konzentration lag in den letzten 10.000 Jahren relativ konstant bei 280 ppm. Im

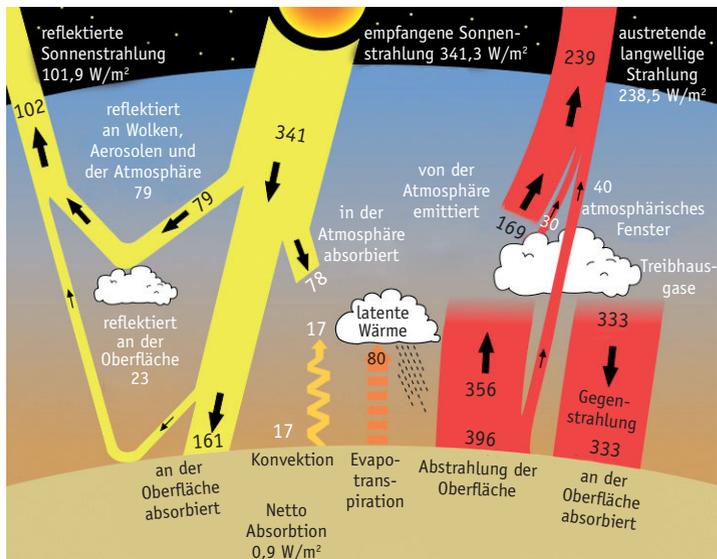


Abb. 1-4: Energiebudget der Erdatmosphäre im Jahr 2004. Gut erkennbar ist die erhebliche Bedeutung der durch Spurengase verursachten Gegenstrahlung (Trenberth et al. 2009).

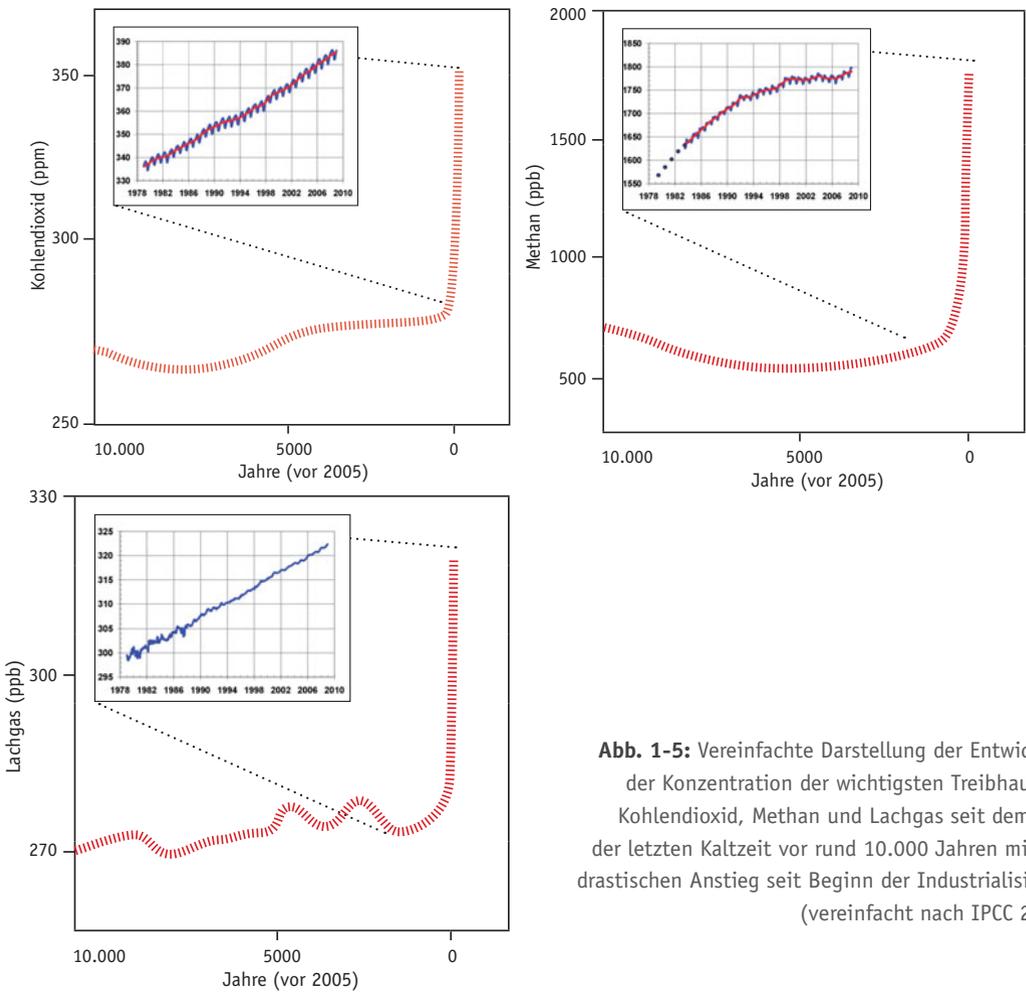


Abb. 1-5: Vereinfachte Darstellung der Entwicklung der Konzentration der wichtigsten Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas seit dem Ende der letzten Kaltzeit vor rund 10.000 Jahren mit dem drastischen Anstieg seit Beginn der Industrialisierung (vereinfacht nach IPCC 2007).

Jahr 2010 lag sie nach einem zu Beginn des 19. Jahrhunderts einsetzenden Anstieg bei 389 ppm, mit einem jährlichen Anstieg von 1,9 ppm in der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts (Allison et al. 2009). Die CO₂-Konzentration variiert jahreszeitlich sowie lokal besonders in Bodennähe. Etwa 80 % der globalen CO₂-Emissionen in der letzten Dekade des 20. Jahrhunderts stammen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, der Rest aus Landnutzungsänderungen (Latif 2009).

Die mittlere Verweildauer der wichtigen Treibhausgase in der Atmosphäre ist sehr unterschiedlich. Sie reicht von etwa 10 Jahren bei Methan bis zu deutlich über 100 Jahren bei Kohlendioxid und Lachgas (IPCC 2007). Danach werden diese Treibhausgase entweder als Folge chemischer oder physikalischer Prozesse in andere Verbindungen ab- oder umgebaut, oder von anderen Reservoiren, mit denen die Atmosphäre in einem Fließgleichgewicht steht, aufgenommen (Beer et al. 2010). So ist deutlich mehr als die Hälfte des vom Menschen in den letzten zwei Jahrhunderten freigesetzten Kohlendioxids heute nicht mehr in der Atmosphäre, sondern in der terrestrischen Vegetation, in Böden und vor allem in den Ozeanen gespeichert – wodurch letztere versauern, was für kalkeinlagernde Wasserorganismen zunehmend eine erhebliche Bedrohung darstellt (□ Kap. 5.7).

1.2 DER BEOBACHTETE KLIMAWANDEL

1.2.1 Die Welt im Klimawandel

Seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts ist die globale Mitteltemperatur etwa um 0,8 °C angestiegen, wobei etwa die Hälfte des Temperaturanstiegs erst seit 1980 erfolgte. Somit hat sich der Temperaturanstieg in den letzten Jahrzehnten merklich beschleunigt. Die zehn weltweit wärmsten Jahre wurden alle im Zeitraum seit 1997 gemessen. Die prägende Rolle des Menschen an diesen klimatischen Änderungen steht heute außer Zweifel (IPCC 2007, Allison et al. 2009).

Der Temperaturanstieg erfolgte regional unterschiedlich stark (Abb. 1-6), wobei er dem von den Klimatologen vorhergesagten Trend folgte: starker Anstieg der Durchschnittstemperaturen in hohen geographischen Breiten, über großen Landmassen und wegen des höheren Anteils an Kontinenten ein höherer Anstieg in der Nordhemisphäre als in der Südhemisphäre. Änderungen der Niederschlagsverteilung sind uneinheitlicher und schwieriger zu analysieren (Abb. 1-7), es zeigen sich aber Niederschlagsrückgänge v. a. in schon niederschlagsarmen Regionen (z. B. Sahelzone, Südeuropa), während eine Zunahme von den temperaten bis in polare Gebiete registriert wurde (Kromp-Kolb u. Formayer 2005, IPCC 2007) (Abb. 1-7).

Die bisher erfolgten Änderungen im globalen Klima haben besonders in den letzten Jahrzehnten zu deutlichen sekundären Effekten im Erde-Klimasystem geführt: Besonders rasch reagiert hat die Kryosphäre. Gebirgsgletscher, aber auch viele arktische Gletscher sind deutlich im Rückzug, der Meeresspiegel ist seit 1900 um etwa 20 cm angestiegen – davon etwa 7 cm seit 1980 (Kemp et al. 2011, Abb. 1-8). Die Andauer der Winterschneedecke hat abgenommen, und Permafrostböden der hohen Breiten und der Gebirge tauen länger und tiefer auf (WBGU 2006). Dramatisch und in dieser enormen Geschwindigkeit völlig unerwartet verlief der Rückgang des arktischen Meereises (Abb. 1-9): seit Ende der 1970er-Jahre ist die Ausdehnung des arktischen Eises im Som-

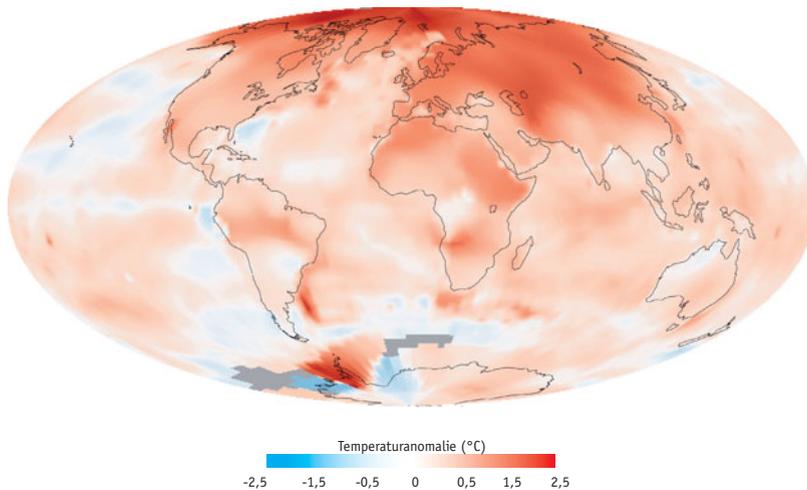


Abb.1-6: Räumliche Verteilung des Temperaturanstiegs auf der Erde, dargestellt als Temperaturanomalien der Dekade 2000-2009 vom langjährigen Mittelwert (1951-1980). In *grau* sind Regionen mit zu wenigen Daten dargestellt (IPCC 2007) (<http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=42392>).

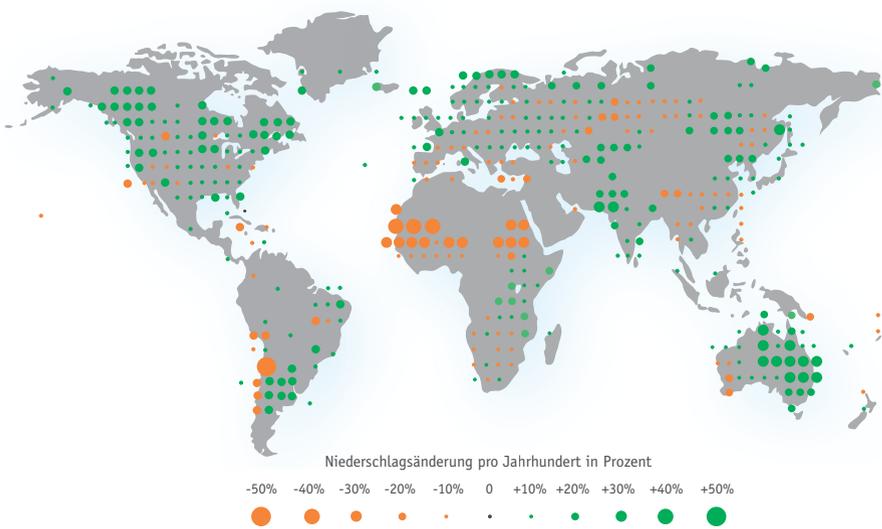


Abb. 1-7: Globale Veränderungen des Jahresniederschlags im 20. Jahrhundert. Generell wird eine Zunahme der Niederschlagsmengen in höheren Breiten und eine Reduktion in den Subtropen beobachtet. Besonders deutlich war der Rückgang südlich der Sahara. Verändert nach IPCC (2001).

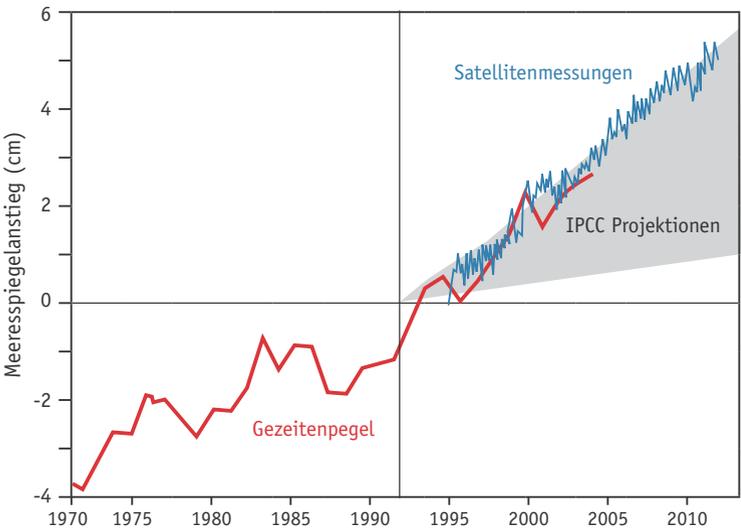


Abb. 1-8: Anstieg des globalen Meeresspiegels im Zeitraum 1970-2010. Die rote Linie zeigt Messdaten von Gezeitenpegeln, mit blauer Linie sind Satellitenmessungen dargestellt. Verändert nach Allison et al. (2009).

mer um mehr als 20 % zurückgegangen (Allison et al. 2009). In der Antarktis waren in den letzten Jahren große Abbrüche von Schelfeisgebieten zu beobachten. Die Intensität und Häufigkeit von Extremniederschlägen, Hitzeperioden, tropischen und subtropischen Stürmen hat ebenfalls zugenommen (WBGU 2006, Allison et al. 2009).

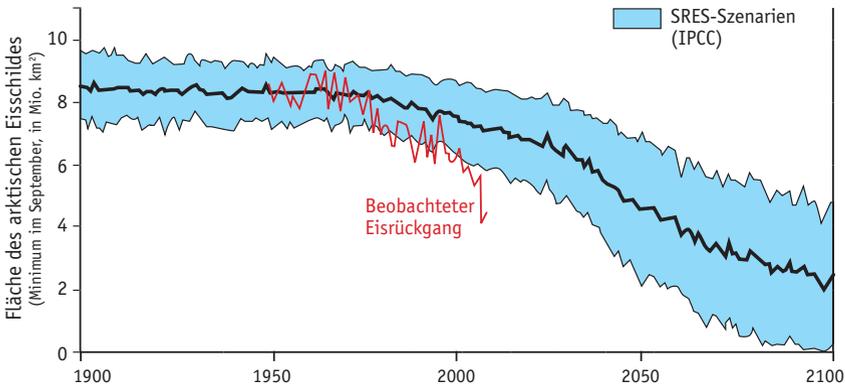


Abb. 1-9: Entwicklung der Flächenausdehnung des arktischen Meereises seit 1950 bis heute im Vergleich mit der prognostizierten Entwicklung. Der hellblaue Bereich umfasst die Bandbreite der von den Modellen auf Basis der vom IPCC verwendeten SRES-Szenarien vorhergesagten Entwicklung. Der beobachtete Eisrückgang (*rote Linie*) verlief im Vergleich dazu in den letzten Jahren jedoch weitaus rascher. Verändert nach Allison et al. (2009).

1.2.2 Mitteleuropa im Klimawandel

Das Ausmaß des Temperaturanstiegs in Mitteleuropa seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts liegt mit einem Anstieg von etwa 1,5 °C deutlich über dem globalen Durchschnitt (Schönwiese et al. 2006). Dem globalen Trend folgend, hat sich der Temperaturanstieg seit den 1980er-Jahren beschleunigt. Am Beispiel der Schweiz ist gut zu erkennen, dass die fünf wärmsten Jahre während der letzten 15 Jahre registriert wurden (Abb. 1-10). In Übereinstimmung mit globalen Trends, fällt der Temperaturanstieg in Mitteleuropa dabei jahreszeitlich unterschiedlich stark aus, am stärksten ist er im Frühling und Sommer (IPCC 2007, Tab. 1-1). Es zeigen sich auch innerhalb Mitteleuropas regionale, wenngleich geringfügige Unterschiede in der Temperaturzunahme, mit einem besonders starken Anstieg in meeresfernen Regionen (östliches und südöstliches Mitteleuropa) (Schönwiese 2003). In der ersten Dekade des 21. Jahrhunderts wurden in Mitteleuropa mehrfach extreme Temperaturabweichungen registriert, etwa die Hitzewelle des Sommers von 2003, oder der sehr milde Winter 2006/07.

Tab. 1-1: Änderung der saisonalen und der Jahresmitteltemperatur sowie des saisonalen und des Jahresniederschlags in Deutschland im 20. Jahrhundert (nach Schönwiese 2003).

	FRÜHJAHR	SOMMER	HERBST	WINTER	JAHR
Temperatur 1901–2000	+0,8°C	+1,0°C	+1,1°C	+0,8°C	+1,0°C
Temperatur 1981–2000	+1,3°C	+0,7°C	-0,1°C	+2,3°C	+1,1°C
Niederschlag 1901–2000	+13%	-3%	+9%	+19%	+9%
Niederschlag 1971–2000	+13%	+4%	+14%	+34%	+16%

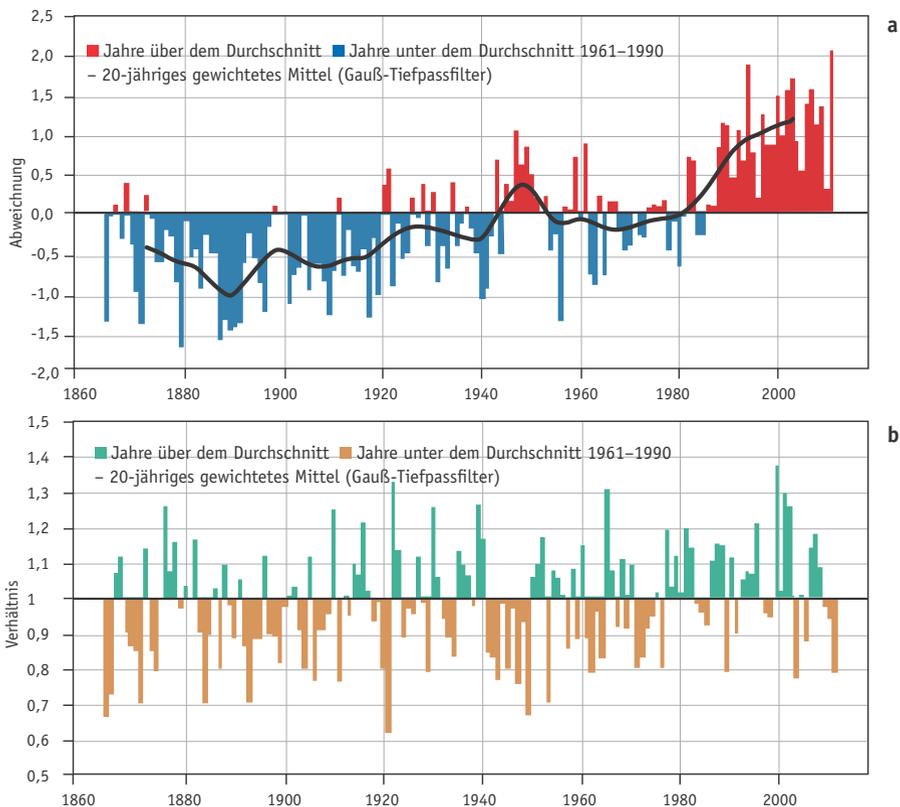


Abb. 1-10: Abweichung der mittleren Jahrestemperatur (a) und des mittleren Jahresniederschlags (b) seit 1864 im Vergleich zur Normperiode (1961–1990) in der Schweiz. Für die Temperatur wurden Daten der gesamten Schweiz verwendet, beim Niederschlag wurden die Daten auf die Nordschweiz begrenzt (© MeteoSchweiz 2010).

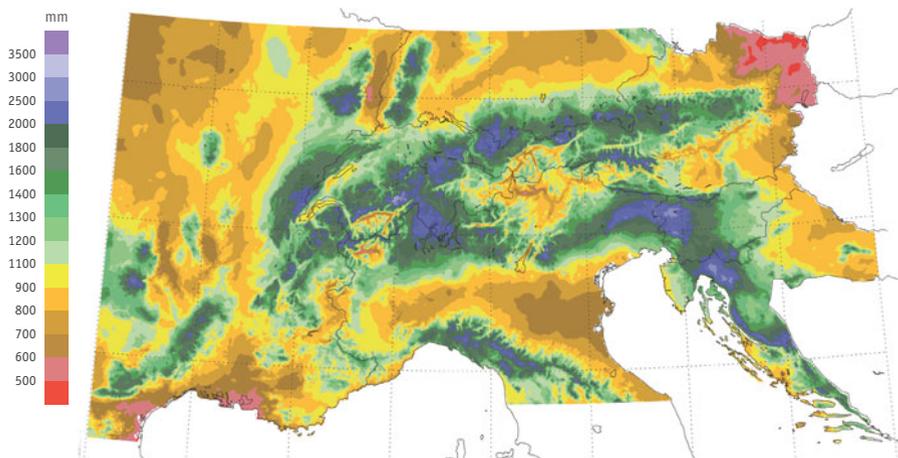


Abb. 1-11: Mittlere jährliche Niederschlagssummen (mm) für die Alpenregion und die angrenzenden Länder (Schwab et al. 2001).

Die Niederschlagsverteilung in Mitteleuropa und speziell im Alpenraum weist sehr starke räumliche und zeitliche Schwankungen auf. Studien belegen (Frei u. Schär 1998), dass der Niederschlagscharakter innerhalb kurzer räumlicher Distanzen – vor allem in alpinem Gelände – stark variieren kann (Abb. 1-11) und dass die Niederschlagssummen von Jahr zu Jahr beträchtlich schwanken können.

Die hohe Variabilität des Niederschlags erschwert die Identifizierung signifikanter Trends beträchtlich. Das hat zur Folge, dass Beobachtungsdaten kaum signifikante Trends des mittleren Niederschlags während der letzten Jahrzehnte liefern können. Tendenziell hat sich der mittlere Niederschlag im Norden von Europa erhöht und hat südlich der Alpen und im Mittelmeergebiet abgenommen (IPCC 2007).

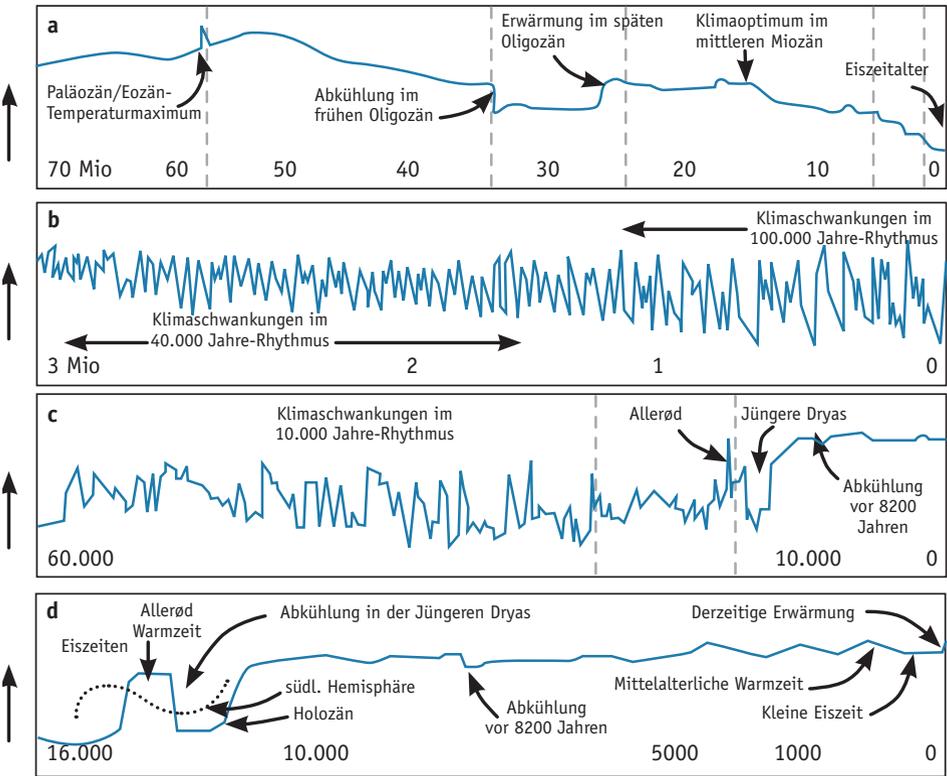


Abb. 1-12: Änderungen der globalen Durchschnittstemperatur in der Erdgeschichte in den letzten 70 Mio. Jahren bis heute (nach Steffen et al. 2011). Über die vergangenen 70 Mio. Jahre zeigt sich ein Abkühlungstrend, der mit einer sinkenden atmosphärischen CO₂-Konzentration einher geht (a). Die letzten 3 Mio. Jahre sind gekennzeichnet durch rhythmische Schwankungen zwischen langen kalten Klimaperioden und viel kürzeren Warmzeiten (b). In die letzten 60.000 Jahre fällt die letzte Kaltzeit, die sich durch abrupte Klimaschwankungen gekoppelt mit Meeresspiegelschwankungen von 5-10 m auszeichnet (c). Vor etwa 12.000 Jahren vollzog sich dann der Übergang von der letzten Kaltzeit zum wärmeren Holozän mit seinem stabilen Klima. Die letzten 16.000 Jahre stellen den Übergang von der letzten Kaltzeit in das Holozän sowie den Klimaverlauf im Holozän genauer dar (d).

Die für das mitteleuropäische Klima wichtigen Extremereignisse zeigen bislang unterschiedliche Tendenzen:

- ▶ **Starkniederschläge:** Ein klarer Trend der Entwicklung der beobachteten Starkniederschläge ist bislang (noch) schwierig zu diagnostizieren. Insgesamt ist in Mitteleuropa eine tendenzielle Zunahme von Starkniederschlägen beobachtet worden (Klein Tank u. Können 2003, Schmidli u. Frei 2005). Eine Häufung von Starkniederschlägen und dadurch ausgelösten Hochwässern ist seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts für Mitteleuropa verzeichnet worden (Klein Tank u. Können 2003).
- ▶ **Trockenperioden:** Über die Häufigkeit und Intensität lang andauernder niederschlagsarmer oder -freier Perioden in Mitteleuropa lassen sich bislang keine statistisch signifikanten Aussagen treffen (Schmidli u. Frei 2005, van der Schrier et al. 2006). Allerdings traten in den letzten Jahren mehrfach, besonders im Sommer 2003, extreme Trockenphasen gekoppelt mit Phasen sehr hoher Sommertemperaturen in Teilen Mitteleuropas auf.
- ▶ **Hitze- und Kälteperioden:** In Mitteleuropa ist ein Trend zu häufigeren und stärkeren Hitzeperioden zu erkennen (Klein Tank u. Können 2003). Als die markanteste Hitzeperiode in Mitteleuropa während der letzten Jahrzehnte gilt der Sommer 2003 (Schär et al. 2004). Winterliche Kälteperioden sind hingegen seltener geworden, besonders solche mit extrem niedrigen Temperaturen.
- ▶ **Stürme:** Stürme in Mitteleuropa sind meistens mit starken winterlichen Tiefdruckgebieten verbunden, welche hohe Windgeschwindigkeiten und damit auch Schäden, verursachen können. Zwar wurde seit dem Ende der 1980er-Jahre Mitteleuropa mehrfach von besonders starken winterlichen Sturmtiefs getroffen. Dennoch lassen die Ergebnisse aus direkten Windmessungen für die letzten 100 Jahre bei dekadisch stark schwankender Variabilität keinen einheitlichen Trend erkennen (Matulla et al. 2007). Allerdings konnte eine tendenzielle Zunahme von Tiefdruckgebieten festgestellt werden, welche in Europa im Vergleich zu früher aber weiter nördlich durchziehen (IPCC 2007).

2000	Kulturforste Buchen	Nachwarmzeit (Subatlantikum)	Nacheiszeit	Geschichtliche Zeit			
1000				Buchen - Eichen	Späte Warmzeit (Subboreal)	Eisenzeit	
0						Bronzezeit	
-1000	Eichenmischwald (Eichen, Ulmen, Linden, Eschen)	Mittlere Warmzeit (Atlantikum)		Späte			
-2000				Jungsteinzeit			
-3000				Mittlere			
-4000	Hasel	Frühe Warmzeit (Boreal)		Frühe			
-5000				Mittelsteinzeit			
-6000	Hasel - Kiefern	Vorwarmzeit		Mittelsteinzeit			
-7000	Birken - Kiefern			Mittelsteinzeit			
-8000			Mittelsteinzeit				
-9000	baumarme Tundren	Jüngere	subarktische Zeit (Späteiszeit)	Jungpaläolithikum	Altsteinzeit		
-10.000	Birken - Kiefern	Mittlere (Alleröd)					
-11.000	baumarme Tundren	Ältere					
-12.000	baumlose Tundren	späte arktische Zeit	Hocheiszeit	Jungpaläolithikum	Altsteinzeit		
-12.500							

Abb. 1-13: Spätwürmeiszeitliche und holozäne Vegetationsentwicklung in Mitteleuropa (Lang 1994). In der ersten Spalte ist die Jahreszahl (vor und nach Christi Geburt) angegeben, danach folgen der in Mitteleuropa dominierende Vegetationstyp bzw. die dominierenden Gehölze, anschließend paläoklimatisch definierte Perioden. Die letzte Spalte gibt die korrespondierende menschliche Kulturperiode an.

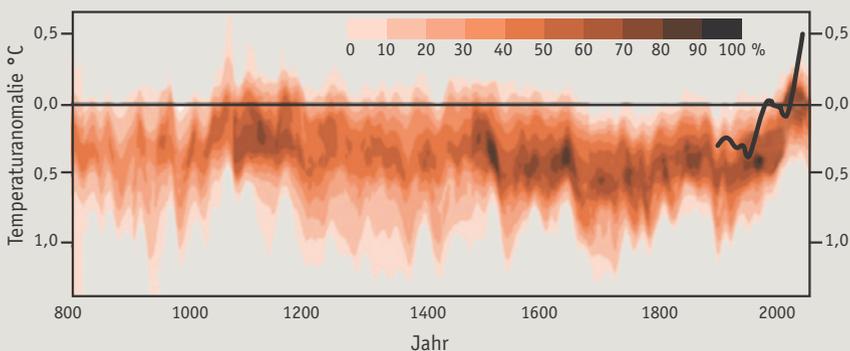


Die mittelalterliche Wärmeperiode und die kleine Eiszeit

Die von etwa 950 n. Chr. bis 1300 andauernde mittelalterliche Warmzeit hat in Mitteleuropa für die Aktivitäten des Menschen günstige Rahmenbedingungen geschaffen. Die Anbaugrenzen für Feldfrüchte reichten bis etwa 200 m höher als gegenwärtig, Weinanbau wurde bis ins nördliche Deutschland betrieben und in den Alpen kam es zur ersten ausgedehnten Anlage von Hochalmen. Zugleich kam es als Folge der durch das milde Klima begünstigten Ausdehnung der Rodungstätigkeit zu einem starken Rückgang des Waldes auf unter 20 % Flächenanteil in Deutschland (Bork et al. 1998). Durch das warme Klima geförderte Einfälle großer Wanderheuschreckenschwärme aus dem südlichen Europa führten mehrfach zu massiven Ernteausfällen, die größte Heuschreckeninvasion in Mitteleuropa erfolgte in den Jahren 1338–41. Heuschreckenplagen wurden in der zeitgenössischen Interpretation häufig als Strafe Gottes gedeutet (Rohr 2007).

Das Ende der mittelalterlichen Warmzeit am Ende des 13. Jahrhunderts wurde durch einen Abkühlungstrend ausgelöst, der im 17. und 18. Jahrhundert seinen Höhepunkt erreichte. Somit war es in Mitteleuropa bei hoher interannueller Variabilität (Pfister 1999) um etwa 0,2 bis 0,6 °C kühler als im Mittelalter. Der Beginn dieser als „Kleine Eiszeit“ bezeichneten kühlen Klimaphase war gekennzeichnet durch intensive Sturmfluten an der deutschen und niederländischen Küste, die den Küstenverlauf stark veränderten und denen Tausende Menschen zum Opfer fielen (Latif 2009).

Verstärkt durch den Bevölkerungsrückgang als Folge der großen Pestzüge in der zweiten Hälfte des 14. Jahrhunderts, wurden Siedlungen in klimatisch ungünstigen Lagen nun wieder aufgegeben. Missernten in besonders feucht-kühlen Jahren führten zu einem Anstieg der Lebensmittelpreise (Glaser 2001) und viele Regionen verzeichneten Bevölkerungsrückgänge. Unter dem nun kühleren Klima kam es besonders im nördlichen Mitteleuropa zu einem verstärkten Höhen- und Flächenwachstum der Hochmoore (Succow u. Joosten 2001). Seit der Mitte des 19. Jahrhunderts steigen die Temperaturen wieder deutlich.



Jahresgang der Durchschnittstemperatur auf der Nordhemisphäre im Mittelalter und in der Neuzeit. Die unterschiedlichen *Rottöne* stellen die Unsicherheit der rekonstruierten Temperaturen aus verschiedenen Datenquellen dar, die *schwarze Linie* stellt gemessene Werte dar. Verändert nach IPCC (2007).

1.2.3 Lehren aus historischen Klimawandelphasen

Im Allgemeinen werden für die Rekonstruktion der wechselhaften Klimageschichte der Erde unterschiedliche Zeiträume studiert und vielfältige Methoden genutzt. Während die erdgeschichtlich jüngere Vergangenheit sich über zahlreiche Methoden erschließen lässt (z. B. Eisbohrkerne, Pollenanalyse, Gewässersedimente), kann das Klima weit zurückliegender Perioden nur erschwert rekonstruiert werden. In jüngerer Vergangenheit erfolgte jedoch eine aktive Weiterentwicklung der Methoden, so dass auch weit zurückreichende Klimaarchive wie Sedimente und Eisbohrkerne vermehrt und mit zunehmender Aussagekraft analysiert werden können.

In der Erdgeschichte war es im Vergleich zu heute meist merklich wärmer, über lange Zeiträume herrschte selbst in polaren Gebieten ein gemäßigtes Klima und größere Vergletscherungen fehlten. Vergleichsweise kurzfristige Kälte- und Vereisungsphasen gab es jedoch mehrfach. Die Extremste fand im Proterozoikum vor ca. 750–580 Millionen Jahren statt, und führte dazu, dass große Teile der Erde vergletschert waren (Evans et al. 1997).

Der Großteil des Tertiärs (vor 65–1,8 Mio. Jahren) war durch ein warmes Klima geprägt, selbst in Mitteleuropa herrschte ein subtropisches, feuchtes Klima. Im jüngeren Tertiär, dem Pliozän (vor 5,3–1,8 Mio. Jahren) setzte eine spürbare Abkühlung ein (Abb. 1-12), die zum Entstehen einer ausgedehnten Eiskappe in der Antarktis führte. Abrupt verstärkt hat sich diese Abkühlung mit dem Beginn des Eiszeitalters, dem Pleistozän vor ca. 1,8 Mio. Jahren (www.stratigraphy.org), in dem rund zwei Dutzend Kaltzeiten mit vergleichsweise kurzen Warmzeiten alternierten (Veit 2002). Die Ursachen für diese klimatischen Schwankungen sind noch nicht völlig verstanden. Einen bedeutenden Anteil dürften periodische Änderungen der Erdumlaufbahn, die Milankovitch-Zyklen (Milankovitch 1930), ausmachen, die sich u. a. aus den sich überlagernden Effekten der Präzession (= taumelnde Bewegung der Erdachse, mit einem Zyklus von 18.000 und 23.000 Jahren), der Veränderung des Neigungswinkels der Erdachse (Zyklus 41.000 Jahre) und der Änderung der Exzentrizität (Zyklus 100.000 Jahre) zusammensetzen.

Durch diese starken, weltweiten Klimaschwankungen unterlagen die Gletscher massiven Veränderungen. Damit verbunden kam es zu Meeresspiegelschwankungen um bis zu 120 m. In den Kaltzeiten sank die globale Durchschnittstemperatur der Sommermonate um bis zu 8–9 °C unter die heute herrschenden Werte. In Mitteleuropa war der Temperaturabfall mit bis zu 15 °C wesentlich stärker (Veit 2002). Zudem war das Klima in den Kaltzeiten in Mitteleuropa kontinental geprägt, vergleichbar mit dem heutigen Steppenklima Zentralsibiriens. Der Übergang zwischen Kalt- und Warmzeiten erfolgte teilweise mit starken, abrupten Klimaschwankungen. In Extremfällen änderte sich das Klima innerhalb weniger Jahrhunderte. Dies ist jedoch immer noch deutlich langsamer als die prognostizierte anthropogene Klimaerwärmung. In Europa war die vorletzte Kaltzeit (Riss- oder Saale-Eiszeit, vor 230.000–130.000 Jahren) die stärkste Kaltzeit mit der größten Vereisung. Die letzte Kaltzeit, die Würm-oder Weichsel-Eiszeit genannt wird, erreichte in Mitteleuropa ihren Höhepunkt vor 20.000–18.000 Jahren. Sie endete vor ca. 11.000 Jahren. In der daraufhin einsetzenden Nacheiszeit begann die großflächige Bewaldung Mitteleuropas (Abb. 1-13) (Lang 1994). Ausgelöst wurde das Ende der Würm-Eiszeit vermutlich durch die Verstärkung des nordwärts gerichteten nordatlantischen Wärmetransports durch den Golfstrom (Latif 2009).