



Oliver Tamme

Klimawandel im österreichischen Berggebiet

KLIMAWANDEL
IM ÖSTERREICHISCHEN BERGGEBIET

Ursachen, Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen

Oliver Tamme

Forschungsbericht Nr. 65

Wien, Juni 2012



Medieninhaber (Verleger) und Herausgeber:
Bundesanstalt für Bergbauernfragen

A-1030 Wien, Marxergasse 2
<http://www.berggebiete.at>

Tel.: +43/1/504 88 69 - 0; Fax: +43/1/504 88 69 – 39
office@berggebiete.at

Layout: R. Neissl, M. Hager
Druck: BMLVS Heeresdruckerei

ISBN: 978-3-85311-105-5

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
----------------------	---

Klimasystem und Klimawandel global

1. Einflussfaktoren des Klimasystems	7
1.1 Das Klimasystem	7
1.2 Atmosphäre und Stratosphäre	8
1.3 Die Sonne als Energiespender	9
1.4 Strahlungsbilanz der Erde und natürlicher Treibhauseffekt	9
2. Natürliche Ursachen für Klimaänderungen	11
2.1 Schwankungen der Solarkonstante	11
2.2 Treibhausgehalt der Atmosphäre (Kohlenstoffkreislauf)	12
2.3 Die Erdbahn um die Sonne und die Neigung der Erdachse	13
2.4 Kontinentaldrift, Kontinentalverschiebung	13
2.5 Vulkanismus	15
2.6 Einfluss der Biosphäre auf den natürlichen Treibhauseffekt	17
2.7 Rückkopplungseffekte und interne Variabilität	18
2.7.1 Positive Rückkopplungseffekte	19
2.7.2 Negative Rückkopplungseffekte	20
2.7.3 Interne Wechselwirkungen – Die Nordatlantische Oszillation (NAO)	21
2.8 Resümee Natürliche Ursachen für Klimaänderungen	25
3. Der anthropogene Treibhauseffekt	29
3.1 Freisetzung der Treibhausgase	30
3.1.1 Kohlenstoffdioxid (CO_2)	32
3.1.2 Methan (CH_4)	32
3.1.3 Distickstoffoxid/Lachgas (N_2O)	33
3.1.4 F-Gase	33
3.1.5 Wasserdampf	33
3.2 Anthropogene Aerosole – menschlich verursachte Klimaabkühlung	34
3.3 Anthropogene Landnutzungsänderungen	36
3.4 Ausmaß der globalen Erwärmung	37
3.4.1 Industrielle Temperaturerhöhung im 20. und 21. Jahrhundert	37
3.4.2 Erwartete Temperaturerhöhung bis 2100	41
3.4.3 Erwartete Niederschlagsentwicklung bis 2100	43
4. Folgen des Klimawandels und der Erwärmung	45
4.1 Globaler Gletscherrückgang	45
4.2 Rückgang des arktischen Meereises	46
4.3 Abnahme der Schneebedeckung und Rückgang des Permafrosts	49

4.4 Abschmelzen der kontinentalen Eisschilde in Grönland und der Antarktis	51
4.5 Globaler Anstieg des Meeresspiegels	55
4.6 Änderung der Meeresströmungen - Abschwächung des Nordatlantikstromes?	57
4.7 Wetterextreme	59
4.7.1 Dürren und Überschwemmungen als Folge veränderter Niederschlagsmengen	61
4.7.2 Auswirkungen auf die Häufigkeit von tropischen Wirbelstürmen	61
4.7.3 Vermehrte Hitzewellen als Folge der Klimaerwärmung	62
4.8 Auswirkungen auf Ökosysteme (Artensterben, Versauerung der Ozeane)	62
4.8.1 Verschiebung der Klimazonen	63
4.8.2 Verlust von Ökosystemen und Tier- und Pflanzenarten	63
4.8.3 Erwärmung und Versauerung der tropischen Meere	63
4.9 Wasserversorgung und Nahrungsangebot	64
4.10 Auswirkungen auf die Gesundheit	65
5. Zusammenfassung und Resümee Klimawandel	67

Klima und Klimawandel in Österreich und im Berggebiet

1. Klima- und Naturräume Österreichs und des Berggebietes	71
1.1 Kennzeichen des alpinen Klimas	72
2. Bisherige Auswirkungen des Klimawandels im Alpenraum und im Berggebiet (bis 2010) . . .75	
2.1 Lufttemperatur	75
2.2 Niederschlag	78
2.3 Schneefälle und Schneedecke	80
2.4 Extremwerte	82
2.4.1 Hitze	82
2.4.2 Starkniederschläge	83
2.4.3 Sturmaktivität	84
3. Klimazukunft Alpenraum (2010+)	87
3.1 Lufttemperatur	88
3.2 Niederschlag	90
3.3 Schneefälle und Schneedecke	91
3.4 Extremwerte und Extremereignisse	92
3.4.1 Hitze und Kälte	92
3.4.2 Starkniederschläge	93
3.4.3 Sturmaktivität	94
4. Zusammenfassung	95

Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und die biologische Vielfalt (Biodiversität)

1. Stabilität von Ökosystemen, Biodiversität und Klimawandel	99
2. Klimawandel und beeinträchtigende Auswirkungen auf Naturraum, Ökosysteme und Biodiversität	103
3. Landnutzungsformen im alpinen Raum und dem Berggebiet	105
3.1 Historische Entwicklung der Landnutzung	105
3.2 Gegenwärtige Landnutzung	105
4. Naturräume Österreichs und des Berggebietes	107
5. Gebirge als „hot-spots“ der Biodiversität	109
6. Bedeutsame Bergökosysteme	111
6.1 Ökosystem alpiner Wald	111
6.2 Ökosystem alpine Wiesen, Bergmäher und Almen	112
6.3 Ökosystem alpine Feuchtgebiete (feuchte Wiesen, Moore)	113
7. Der Naturraum des Hochgebirges (Kryosphäre)	115
7.1 Schneebedeckung	116
7.2 Permafrost	117
7.3 Alpine Gebirgsgletscher	118
8. Klimatische Bedingungen für Hochgebirgspflanzen	121
9. Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und Biodiversität	123
9.1 Gletscherschmelze, Auftauen des Permafrosts	123
9.2 Veränderung der Phänologie und Anpassung der Tier- und Pflanzenwelt	129
9.3 Veränderung der Arten- und Pflanzenzusammensetzung	133
9.3.1 Neue Pflanzen- und Tierarten (Neobiota)	135
9.4 Modifikation der alpinen Artengemeinschaften	136
9.5 Auswirkungen auf alpine Feuchtbiotop (Hoch- und Flachmoore)	138
9.5.1 Hoch- und Flachmoore	138
9.6 Auswirkung auf Gewässer (Seen, Flüsse) aquatische Ökosysteme	140
10. Anpassungsmaßnahmen für den Bereich Ökosysteme, Naturhaushalt und biologische Vielfalt	145

Sektoranalyse Forstwirtschaft

1. Kurzcharakteristik des österreichischen Waldes im Berggebiet	151
1.1 Entwicklung der Waldfläche	152
1.2 Waldgesellschaften, Baumartenzusammensetzung	154
1.3 Waldschäden	157
1.3.1 Luftverunreinigungen (Immissionen)	157
1.3.2 Verbisschäden	158
1.3.3 Unzureichende Waldbewirtschaftung	159
1.3.4 Witterungsextreme (Sturm, Schnee, Frost und Dürre)	159
1.3.5 Schadinsekten und -pilze (Käferkalamität)	161
1.4 Besonderheit von Waldökosystemen (im Klimawandel)	161
1.5 Schutzwirkung des Waldes	163
1.5.1 Zustand der Schutz- und Bannwälder	163
2. Klimatische und witterungsbedingte Faktoren der Forstwirtschaft	167
2.1 Faktoren des Wachstums	167
2.2 Klimatische Einflussfaktoren der Waldökosysteme	167
2.3 Waldklimatologie in subalpinen und alpinen Gebirgsstufen	168
2.4 Kleinklimatische Wirkung der Waldökosysteme	169
3. Veränderung der forstwirtschaftlich relevanten klimatischen und pflanzenphysiologischen Parameter	171
4. Immissionen und Stoff-Einträge in Wechselwirkung mit dem Klimawandel	173
4.1 Nähr- und Schadstoffeinträge	173
4.2 Bodennahe Ozonkonzentration	173
5. Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft	175
5.1 Günstige Effekte	175
5.1.1 Höheres Ertragspotential durch verlängerte Vegetationsperiode	175
5.1.2 Verschiebung der Waldgrenze	176
5.1.3 Größere Vielfalt der alpinen Baumartenzusammensetzung	177
5.1.4 Beitrag zum Klimaschutz: Der Wald als Kohlenstoffsенke	180
5.2 Ungünstige Effekte	181
5.2.1 Anfälligkeit von Fichtenbeständen in der montanen Höhenstufe	181
5.2.2 Zunahme von Waldschäden	183
5.2.3 Trockenstress und Dürre	185
5.2.4 Störung des Gleichgewichts von spezifischen Waldökosystemen	186
5.2.5 Freisetzung von Kohlenstoff aus den Waldböden?	186
6. Anpassungsmaßnahmen für die Forstwirtschaft im Berggebiet	189

Sektoranalyse Berglandwirtschaft

1. Kurzcharakteristik der Bergland-, Grünland- und Almbewirtschaftung	195
1.1 Grünlandwirtschaft und Viehhaltung als Basis der Berglandwirtschaft	195
1.2 Klimatische Benachteiligung der Berglandwirtschaft	198
2. Kurzcharakteristik der Pflanzenklimatologie	199
2.1 Einige klimatische Einflussfaktoren des Pflanzenlebens	200
2.1.1 Temperatur und Pflanzenwachstum	200
2.1.2 Wasserhaushalt und Pflanzenwachstum	201
2.2 Klimatische und witterungsbedingte Faktoren der Grünlandnutzung	202
2.3 Klimatische und witterungsbedingte Faktoren des Feldfutterbaus	204
2.4 Klimatische und witterungsbedingte Faktoren der Almwirtschaft	205
3. Auswirkungen des Klimawandels auf die Berglandwirtschaft	207
3.1 Günstige Effekte	207
3.1.1 Verlängerung der Vegetationsperiode	207
3.1.2 Erhöhung des Ertragspotentials, Steigerung der Produktivität	208
3.1.3 Günstiger Effekt? - Intensivierung der guten Standorte	210
3.1.4 Bessere Rahmenbedingungen für die Almwirtschaft	210
3.2 Ungünstige Effekte	212
3.2.1 Alternativlose Grünlandwirtschaft	212
3.2.2 Zunahme der Ertragsschwankungen, Wasserknappheit	213
3.2.3 Veränderung der Artenzusammensetzung des Grünlandes	215
3.2.4 Krankheitsrisiken und Stress für Nutztiere	215
3.2.5 Zunahme von Pflanzenschädlingen und Pflanzenkrankheiten	216
4. Anpassungsmaßnahmen für die Berglandwirtschaft	219

Sektoranalyse Tourismus

1. Bedeutung des alpinen Tourismus in Österreich	225
1.1 Eckdaten des Tourismus in Österreich	225
1.2 Sparten des Tourismus	227
1.2.1 Sommertourismus	227
1.2.2 Wintertourismus	228
1.2.3 Städte und Kulturtourismus	229
1.2.4 Kur- und Wellnesstourismus	229
1.2.5 Agrotourismus/Urlaub am Bauernhof	229
2. Regionale Ausprägung, regionalwirtschaftliche Bedeutung des alpinen Tourismus	231
3. Problematische Aspekte des alpinen Tourismus	235

4. Klimawandel und die Einflussfaktoren auf den Tourismus	237
5. Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus	241
5.1 Günstige Effekte	241
5.1.1 Der Sommertourismus kann vom Klimawandel profitieren	241
5.1.2 Verlängerte Saison in den Frühlings- und Herbstmonaten	243
5.1.3 Der Sommertourismus „wandert den Berg hinauf“	243
5.2 Ungünstige Effekte	243
5.2.1 Für den Wintertourismus birgt der Klimawandel Risiken - Abnehmende Schneesicherheit in niedrigen und mittleren Höhenlagen	243
5.2.2 Schneeeunabhängige Alternativangebote können die Schneesicherheit nur bedingt ersetzen	246
5.2.3 Kunstschneeproduktion und Klimaschutz	247
5.2.4 Veränderungen im Landschaftsbild – „Schutt statt Gletscher“	248
5.2.5 Schäden an touristischer Infrastruktur und Attraktionen durch Extremereignisse	249
5.2.6 Alpine Gefahren durch Degradation des Permafrostes	249
5.2.7 „Klima-Fußabdruck“ von touristischen Aktivitäten	250
6. Anpassungsmaßnahmen für die Tourismuswirtschaft	253

Sonstige Effekte

1. Verkehrsinfrastruktur	259
2. Siedlungsraum (Bauen, Wohnen) und die funktionellen Infrastrukturen	261
2.1 Exkurs - Klima und Besiedelung im Alpenraum	262
2.2 Alpine Naturgefahren im Alpenraum	264
2.2.1 Überflutungen durch Hochwasser	264
2.2.2 Massenbewegungen (Felsstürze, Murengänge, Erosion)	266
2.2.3 Lawinen	268
2.2.4 Waldbrände	270
2.3 Exkurs (Forsttechnischer Dienst für) Wildbach- und Lawinenverbauung	271
2.3.1 Gefahrenzonenpläne	271
2.3.2 Ausweisung von Hochwasserabflussgebieten	272
2.4 Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren und Siedlungsraum	272
2.4.1 Klimawandel und das Auftreten von Hochwasser	273
2.4.2 Klimawandel und Massenbewegungen (Rutschungen, Felsstürze, Murgänge)	274
2.4.3 Klimawandel und das Auftreten von Lawinen	276
3. Wasserwirtschaft	279
4. Energiewirtschaft	281
5. Regionalentwicklung/Raumplanung	283

Resümee und Schlussfolgerungen

Resümee und Schlussfolgerungen	289
--------------------------------------	-----

Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Einleitung

Themenstellung, Relevanz des Themas

Der Klimawandel, wie er seit den 1980er Jahren von Wissenschaft und Medien thematisiert, sowie auf politischer Ebene bei zahlreichen Welt-Klimakonferenzen in mehr oder weniger verbindliche Klimaschutzmaßnahmen „gegossen“ wurde, beeinflusst global das Leben vieler Menschen. Dabei bewegen sich die zu beobachtenden Klimaanomalien (Rückgang des Meereises, Gletscherschmelze, Zunahme von Taifunen und Überschwemmungen, Extremtemperaturen etc.) in dieselbe Richtung, die von Experten seit langem angekündigt worden ist.¹ Im Gegensatz dazu sind auf politischer Ebene Rückschläge zu beobachten. Die Klimakonferenz in Durban im Dezember 2011 hat nicht zuletzt die Schwierigkeiten aufgezeigt Klimaschutzvereinbarungen bzw. Reduktions-Verpflichtungen im Bereich der CO₂-Emissionen international verbindlich zu verankern, wenn dadurch wirtschaftliche Interessen berührt sind. Damit droht auch das Ziel die Erderwärmung bis 2100 auf zwei Grad zu begrenzen zu scheitern. Dabei tun die Auswirkungen der Wirtschafts- und Finanzkrise das ihre dazu den Preis für Klimaschutzbemühungen, vor allem für einige hochentwickelte Länder wie die USA und Kanada, aber auch für Schwellenländer wie China und Indien, als zu hoch erscheinen zu lassen. Demgegenüber ist das *Faktum* des überwiegend anthropogen geprägten Klimawandels nicht mehr länger kontrovers, sondern wissenschaftlicher Konsens. Die Berichte des Intergovernmental Panel on Climate Change (kurz IPCC)² lieferten dafür eine solide Grundlage und fassen den Wissensstand in objektiver und transparenter Weise zusammen. Dabei beruhen die wesentlichen Annahmen nicht primär auf Modellberechnungen, sondern auf validen Messdaten und elementarem physikalischen Verständnis.

Der Vierte Sachstandsbericht des IPCC 2007³ (IPCC 2007a,b,c) dokumentiert die aktuellen Auswirkungen des Klimawandels. Aufgrund der Langlebigkeit der Treibhausgase und der zeitverzögerten Umsetzung innerhalb des Klimasystems werden sich die Auswirkungen in den kommenden Jahrzehnten, ungeachtet aller gesetzten Maßnahmen zugunsten des Klimaschutzes, *verstärken*. Deshalb gewinnt neben dem Klimaschutz die *Anpassung* an den Klimawandel zusehends an Bedeutung. Dazu sind Maßnahmen auf allen Ebenen (national, regional und lokal) und innerhalb aller Sektoren zu setzen, mit denen Schäden gemildert und potenzielle Chancen gewahrt werden können⁴ (EU-Kommission 2007a).

Seitens des IPCC und der EU werden global die Berggebiete und in Europa die Alpen zu den *verwundbarsten* Gebieten gezählt, die mit weitreichenden Folgen des Klimawandels zu rechnen haben (EU-

1. Dabei kann ein Einzelereignis niemals kausal auf die anthropogen verursachte Klimaerwärmung zurückgeführt werden.
2. Zu Deutsch „Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (der Vereinten Nationen)“
3. Der nächste Bericht mit Erscheinungsdatum 2013/14 ist in Vorbereitung.
4. Nach Feststellung des IPCC bleiben die Folgen des Klimawandels nur dann einigermaßen erträglich und „handhabbar“, wenn der Anstieg der Temperatur auf weniger als zwei Grad Celsius (gegenüber dem vorindustriellen Stand) begrenzt wird (IPCC 2007a: 15). Dieses Ziel verfolgt auch die Klimaschutz- und Energiepolitik der EU. Analyse und Optionen für Maßnahmen werden im Grünbuch der EU-Kommission „Anpassung an den Klimawandel in Europa“ dargelegt und erläutert (EU-Kommission 2007a).

Kommission 2007a: 6, IPCC 2007b: 551). Die starke Betroffenheit ergibt sich u.a. durch die vertikale Höhengliederung, die verschiedene Klimazonen umfasst, den sensiblen Ökosystemen, der Verbreitung von Gletschern und Permafrost, die sich auch stabilisierend auf die unteren „Stockwerke“ - den alpinen Dauersiedlungsraum auswirken (Stichwort Abwehr von Naturgefahren). Diese eher allgemeine Einschätzung ergab einen Forschungsbedarf für umfassendere Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Ostalpenraum, das Berggebiet⁵ bzw. von gesamtwirtschaftlich bedeutenden Wirtschaftssektoren dieses Gebietes (Forschungsrelevanz).

Ausgangshypothese und Forschungsfragen

Die *Ausgangshypothese* des Forschungsprojektes folgte den oben beschriebenen Annahmen: Der Ostalpenraum bzw. das österreichische Berggebiet ist vom Klimawandel *stärker* und *negativer* betroffen als andere Gebiete und Regionen. Ausgehend davon ergaben sich folgende weiterführende Fragestellungen, die der Überprüfung der Hypothese dienen sollten. Die zentralen Fragestellungen dabei waren:

- ◆ Ist der Ostalpenraum bzw. das Berggebiet vom Klimawandel *tatsächlich* stärker und negativer betroffen als das umgebende Flach- und Hügelland und woraus ergibt sich diese stärkere Betroffenheit?
- ◆ Welche *Auswirkungen* auf Ökosysteme und wichtige Wirtschaftssektoren sind zu erwarten (kurz- und langfristig)?
- ◆ Sind diese Auswirkungen primär negativer (ungünstiger) Art oder gibt es *auch* positive Folgen?
- ◆ Sind die Aussagen über Auswirkungen auf Teilräume (innerhalb des Alpenraums bzw. Berggebietes) differenzierbar?
- ◆ Welche Anpassungsmaßnahmen sind zu treffen?
- ◆ Sind die Anpassungsmaßnahmen differenzier- und systematisierbar? („Anpassung“ versus „Vermeidung“ des Klimawandels)?

Weitere Fragestellungen, die ebenfalls thematisiert wurden:

- ◆ Abgesehen von den unmittelbaren Auswirkungen, was sind die wichtigsten Antriebskräfte für den anthropogenen Klimawandel?
- ◆ Welche Auswirkungen auf die einzelnen Klimatelemente (Temperatur, Niederschlag etc.) des Ostalpenraums sind bis dato erkennbar?
- ◆ Wie werden sich diese Klimatelemente in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich entwickeln?
- ◆ Werden Extrem- und Elementarereignisse (Hochwasser, Sturmtätigkeit etc.) die Bewohnbarkeit des Alpenraums beeinträchtigen?
- ◆ Was sind andere wichtige Faktoren, die in Wechselwirkung mit dem Klimawandel auf den jeweiligen Raum/Sektor/Bereich einwirken und ihn beeinflussen?

5. In dieser Untersuchung wurden die Begriffe Ostalpenraum und österreichisches Berggebiet (nach EU-Kriterien) synonym und deskriptiv verwendet.

Verwendete Methode: Deskriptiver Ansatz

Die *Forschungsmethodik* bestand in einem deskriptiven Analyseverfahren. Dazu wurden Ergebnisse der Klimatologie und Geologie, der Ökologie, Sozioökonomie u.a. rezipiert. Dabei erfolgte der Fokus auf jene Auswirkungen des Klimawandels die den Ostalpenraum bzw. das Berggebiet betreffen. Es erfolgte die Auswertung verschiedenster Literaturquellen, die den Stand des Wissens zusammenfasst. Verfügbare Informationen aus der einschlägigen Literatur in Form von Fachartikeln, Erscheinungen im Internet etc. wurden gesichtet und auf ihre Relevanz ausgewertet. Dazu und für die Kontextanalyse wurde eine Fülle von unterschiedlichsten Quellen (siehe Literaturverzeichnis) verarbeitet. Im Rahmen dieses Projektes konnten Grundlagenstudien aus Bayern und der Schweiz herangezogen werden, deren Verhältnisse durchaus auf das österreichische Berggebiet, dem Ostalpenraum bzw. die hochalpinen Verhältnisse übertragbar sind, und im Rahmen dieser Studie erstmals ausgewertet wurden (Beierkuhnlein/Foken 2008, Bundesamt für Umwelt 2007, OcCC 2007 etc.).

Zur Systematik der Untersuchung (Vorgangsweise)

Es wurde eine weitgehend einheitliche Vorgehensweise bei den untersuchten Sektoren angestrebt. Dabei erfolgte eine Fokussierung auf Auswirkungen, die insbesondere die Ökosysteme, den Lebensraum und die Wirtschaftssektoren des Berggebietes bzw. den hochalpinen Bereich betreffen. Dazu zählen die Forstwirtschaft, die Berglandwirtschaft, der Tourismus aber auch die Verkehrsinfrastruktur, der Siedlungsraum, sowie die Wasser- und Energiewirtschaft. Für die ausgewählten Sektoren erfolgte die Identifizierung und Beschreibung *günstiger* und *ungünstiger* Effekte und Beeinflussungsfaktoren. Die Auswirkungen wurden zusammengefasst in einer Matrix dargestellt. Getrennt davon wurden in der Analyse die entsprechenden Anpassungsmaßnahmen, die dem jeweiligen Typus (Symptombekämpfung, Anpassungs(strategie), oder Ursachenbekämpfung-Klimaschutzmaßnahmen) zugeordnet und in einer Matrix dargestellt.

Kapitelübersicht

Im Kapitel *Klimasystem und Klimawandel global* wurden die zentralen Antriebskräfte für den natürlichen und anthropogenen Klimawandel beschrieben und analysiert. Wesentliche globale Folgen wurden darin beschrieben und Maßnahmen für den Klimaschutz abgeleitet.

Das Kapitel *Klima und Klimawandel im Ostalpenraum bzw. Berggebiet* fokussierte auf die klimatischen Veränderungen, die durch den Klimawandel bisher aufgetreten sind und zukünftig erwartet werden können. Dazu wurden Ergebnisse für die Klimaelemente (Temperatur, Niederschlag, und die daraus ableitbaren Extremwerte) sowie Klimaszenarien derselben für die weitere Entwicklung zusammengefasst. Besonderer Wert wurde auf die Beschreibung kleinräumigerer Entwicklungen (z.B. Alpensüdseite- versus Alpennordseite) gelegt.

Im Kapitel *Ökosysteme, Naturhaushalt und biologische Diversität* wurden ausgehend von einer Kontextanalyse die wesentlichen Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen des Klimawandels auf diese Bereiche zusammengefasst. Die darauffolgenden Sektoranalysen *Forstwirtschaft, Berglandwirtschaft, Tourismus* und *Sonstige Effekte (Verkehrsinfrastruktur, Siedlungsraum, Wasser-, und Energiewirtschaft, Raumnutzung, und -planung)* setzten ausgehend von der jeweiligen Kontextanalyse die Beschreibung von Auswirkungen und daraus resultierenden Anpassungsmaßnahmen fort.

Klimasystem und Klimawandel global

1. Einflussfaktoren des Klimasystems

Das Wort Klima stammt aus dem Griechischen und bedeutet „Krümmung“.¹ Dadurch offenbart sich offensichtlich das bereits damals vorhandene Wissen über die Wirksamkeit des unterschiedlichen (breitenabhängigen) Einfallswinkels der Sonne.

1.1 Das Klimasystem

Was die Erde erst für Lebensformen bewohnbar macht, ist zunächst ihre Lufthülle (Atmosphäre), dann das Vorhandensein von Wasser und nicht zuletzt die Tatsache, dass bei den für das Klima unseres Planeten typischen Temperaturen dieses Wasser in allen drei Aggregatzuständen – fest, flüssig und gasförmig – vorhanden ist. Dabei hat sich im Laufe der Erdgeschichte die Zusammensetzung der Atmosphäre grundlegend geändert. Gegenwärtig setzt sie sich aus etwa vier Fünftel Stickstoff, etwa ein Fünftel Sauerstoff sowie verschiedener Spurengase zusammen, von denen einige trotz ihrer geringen Mengen das Klima beeinflussen (wie zum Beispiel das Kohlendioxid).

Das Klimasystem ist ein komplexes System und umfasst verschiedene Teilsysteme (siehe Abbildung 1):

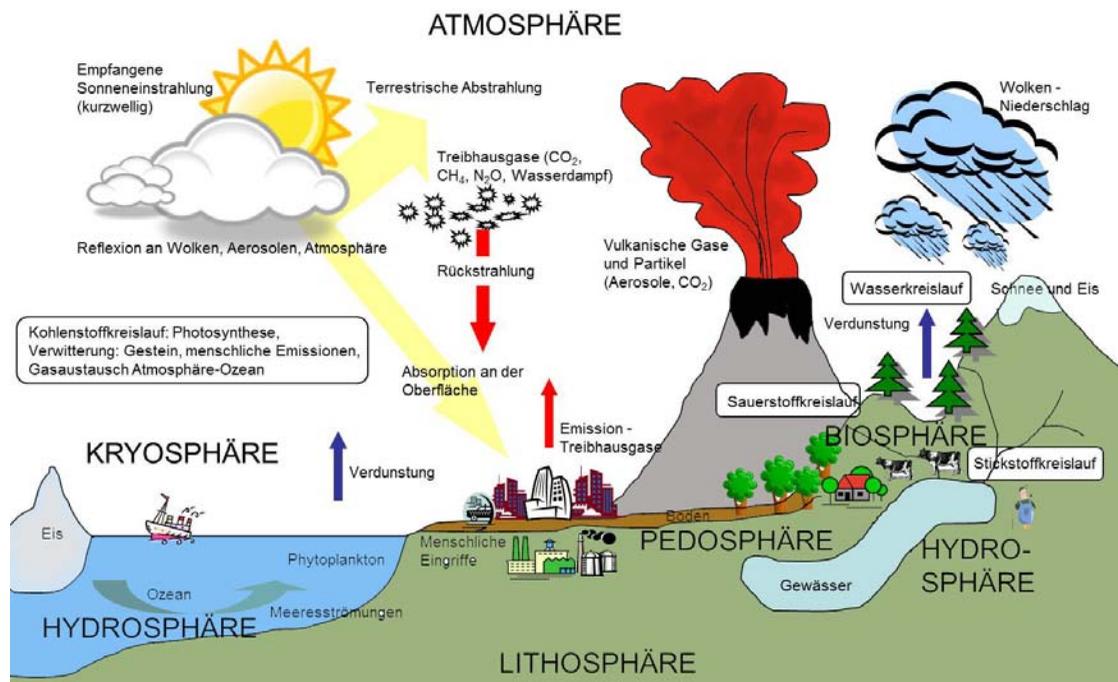
- ◆ Die Atmosphäre mit groß- und kleinräumigen Prozessen wie globalen Windsystemen oder der Wolkenbildung;
- ◆ Die Kryosphäre ist die Eishülle der Erde mit Gebirgs- Gletschern und den Polkappen (arktisches Meereis und Inlandeis von Grönland und der Antarktis);
- ◆ Die Gesteinshülle der Erde bildet die Lithosphäre. Dort befinden sich auch Gebiete mit vulkanischer Aktivität und die Rohstoffvorkommen der Erde, zu letzterem zählen auch die Lagerstätten fossiler Brennstoffe;
- ◆ Zur Hydrosphäre, der irdischen Wasserhülle zählen die Flüsse, Seen und Meere sowie der Prozess der Verdunstung;
- ◆ Die zentimeter- bis meterdicke Schicht in der das Gestein verwittert und sich die Humusschicht befindet wird Pedosphäre genannt;
- ◆ Die oberflächliche Biosphäre besteht aus der Vegetation, den Tier- und Pflanzenarten;
- ◆ Der Mensch, ursprünglich Teil der Biosphäre, hat sich durch den Evolutionsprozess von dieser emanzipiert und greift durch seine Handlungen vermehrt in alle Sphären ein;

In diesem Klimasystem haben alle Teilsysteme einen Einfluss auf das Klima (im Sinne statistischer Größen über atmosphärische Zustände und Prozesse) und das Klima hat wiederum einen Einfluss auf die anderen Teilsysteme des Klimasystems. Von besonderer Bedeutung für das Klimasystem sind die verschiedenen Stoffkreisläufe. Einer der wichtigsten ist der Wasserkreislauf. Das Spezifikum des Elements Wasser besteht darin, dass es zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre, Pedosphäre und der Biosphäre zirkuliert. Neben dem Wasserkreislauf gibt es aber auch einen Sauerstoff-, einen Kohlenstoff-, einen Schwefel- und einen Stickstoffkreislauf. Alle diese Kreisläufe setzen sich aus unterschied-

1. Der griechische Philosoph Aristoteles (384-322 v. Chr.) gilt nicht nur als Begründer der modernen naturwissenschaftlichen Forschungsmethoden sondern prägte auch den Begriff des Klimas – allerdings verstand er darunter ausschließlich die Neigung der Erdoberfläche zur Sonne (Michler 2010: 19).

lichen chemischen und physikalischen Vorgängen zusammen und bewirken sehr verschieden lange „Verweilzeiten“ der Stoffe in den jeweiligen Sphären (Böhm 2008: 28-29). Alle genannten Sphären sind durch Wechselwirkung mit der Atmosphäre verbunden, in der sich das eigentliche Klima abspielt. Im Wechselspiel miteinander formen diese Teilbereiche das Klimasystem.

Abbildung 1: Die Teilsysteme des Klimasystems



Quelle: eigene Grafik (Tamme/Hager)

1.2 Atmosphäre und Stratosphäre

Die Atmosphäre ist für das irdische Leben und das Wettergeschehen von größter Bedeutung. Die Atmosphäre ist das irdische „Luftmeer“. Ohne Luft gäbe es kein Wetter in unserem Sinne, keine Verwitterung, keine Erosion und keine Muttererde für die Pflanzen, keinen Schutzschild gegen die hochenergetische kosmische Strahlung. Letztlich kein Leben. Die Atmosphäre hat einen stockwerkartigen Aufbau. Dies hängt mit den physikalischen Eigenschaften zusammen. Die unterste Luftschicht bis etwa 10 km (an den Polen) und bis etwa 16 km hoch (am Äquator) ist die Troposphäre. In ihr spielt sich fast das gesamte Wettergeschehen ab. Nur die höchsten Gewitterwolken wachsen bis in diese Höhe. Darüber befindet sich die Stratosphäre. Sie reicht bis in 50 km Höhe. Kurzwellige UV-Strahlung der Sonne wird dort von aus Sauerstoff entstehendem Ozon absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die langwellige Infrarot-Wärmestrahlung der Sonne hingegen durchdringt fast ungehindert die Ozonschicht und erwärmt die Erdoberfläche. Von Bedeutung ist die Stratosphäre noch aus einem anderen Grund: Heftige Vulkanausbrüche sind in der Lage Asche und Schwefeldioxid (SO_2) bis in diese Höhe zu schleudern und können das Klima nachhaltig beeinflussen (Michler 2010: 22-23).

1.3 Die Sonne als Energiespender

Den Antrieb aller Vorgänge in der Erdatmosphäre liefert ausschließlich die Sonne. Als sehr heißer Körper sendet sie Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung vor allem im sichtbaren Bereich des Lichtes aus, die von der Erde – je nachdem wo und in welcher Stärke sie auftrifft – auf sehr unterschiedliche Weise aufgenommen wird. Ein Teil wird sofort wieder reflektiert („Albedoeffekt“) und trägt nicht zur Energieaufnahme des Planeten bei. Wolken, Schnee und Eis tun dies in sehr hohem Ausmaß. Von ihrer Strahlungsbilanz zur Arktis und Antarktis vergleichbar sind auch die großen Wüstengebiete dieser Erde. Vegetationsbedeckte Fläche hingegen nimmt schon deutlich mehr Energie auf und am wenigsten reflektieren Wasseroberflächen die Einstrahlung. Der größte Teil der Strahlungsenergie wird an der Erdoberfläche in Wärme umgesetzt. Je nach Einfallswinkel wird *mehr* (steiler Strahlungseinfall) oder *weniger* (flacher Einfallswinkel) Energie pro Flächeneinheit aufgenommen - eine Beobachtung die in unseren Breitengraden (50° nördlicher Breite) leicht nachvollziehbar ist: Dem sommerlichen Sonnenhöchststand (65° im Zenit) mit 16 Stunden Einstrahlung steht das winterliche Minimum (18° im Zenit) bei knapp $8\frac{1}{2}$ Stunden Tageslänge gegenüber. Dies ist auch die Ursache für die Jahreszeiten. Diese sind in erster Linie durch den unterschiedlichen Sonnenstand bedingt, den diese im Laufe des Jahres zur Erde einnimmt. Grund dafür ist die Schiefe der Erdachse, um die sich die Erde dreht. Diese steht nicht senkrecht zur Erdbahn sondern ist in einem Winkel von $23,5^\circ$ geneigt (ZAMG o.J., Michler 2010: 29).

1.4 Strahlungsbilanz der Erde und natürlicher Treibhauseffekt

Aus der Strahlungsbilanz ergeben sich bereits grundlegende Kennzeichen des Erdklimas: Kalte Polarregionen, warme Äquatorialzonen, die durch die Erddrehung bedingten Tag-Nacht Unterschiede, die durch die Neigung der Erdachse verursachten Jahreszeiten und nicht zuletzt – speziell in Gebirgsregionen wichtig – Unterschiede zwischen Nord- und Südhängen (wobei noch verstärkend die Abschattung wirkt). Von der Oberfläche dringt schließlich die aufgenommene Energie durch die schwache molekulare Wärmeleitung nur wenig in den Boden ein, in den Ozeanen erfolgt ein sehr viel stärkerer Wärmetransport auch in tiefere Wasserschichten. Darauf beruht ein weiteres Hauptmerkmal des Erdklimas – die Unterschiede zwischen dem extremeren Kontinentalklima und dem ausgeglichenerem maritimen Klima. Die an der Oberfläche umgesetzte und nicht in den Boden oder das Wasser weiter geleitete Energie wird nun von hier wieder abgestrahlt in Form der unsichtbaren Infrarotstrahlung. Würde diese Infrarotstrahlung ungehindert ins Weltall austreten, hätte die Erdoberfläche eine globale Durchschnittstemperatur von etwa -18°C . Hier greift nun jedoch der natürliche Treibhauseffekt der Erdatmosphäre regulierend ein. Dazu zählen bestimmte Bestandteile der Lufthülle: An erster Stelle das Wasser in flüssigem und gasförmigem Zustand. An zweiter Stelle das Kohlendioxid (CO_2) und schließlich eine Reihe anderer Spurengase. Diese Treibhausgase nehmen Teile der langwelligen Ausstrahlung der Erde auf, erwärmen sich und strahlen sie in Form der atmosphärischen Gegenstrahlung wieder zurück. Dieser „natürliche Treibhauseffekt“ bewirkt eine Anhebung der globalen *Mitteltemperatur* auf etwa $+15^\circ\text{C}$, wie sie mit nur geringen Abweichungen von maximal 1 bis 2°C für die letzten 10.000 Jahre der Erdgeschichte charakteristisch war (ZAMG o.J.).

2. Natürliche Ursachen für Klimaänderungen

Seit der Entstehung des Planeten verändert sich das Klima ständig. Trotz der großen klimatischen Veränderungen in den letzten Millionen Jahren ist jedoch ein *relativ stabiler Temperaturkorridor* für die Erde typisch, der die Entwicklung höherer Lebewesen überhaupt erst möglich gemacht. Während für die gegenwärtige Zwischeneiszeit, das Holozän, der weltweite Durchschnitt der Temperatur bei +15°C liegt, gab es allen Anschein nach in den vergangenen Jahrmillionen Abweichungen bis höchstens +22°C und nie tiefer als +9°C globaler Jahresmitteltemperatur. Klimaverschiebungen der Vergangenheit, der *natürliche* Klimawandel lassen sich dabei auf einige wenige Ursachen zurückführen (Michler 2010: 54-55).

2.1 Schwankungen der Solarkonstante

Die Sonne und die von ihr ausgestrahlte Solarenergie sind die treibende Kraft für den energetischen Antrieb des irdischen Wetters und Klimas. Über Jahrhunderte und Jahrtausende hinweg war der solare Klima-antrieb der bedeutendste des Klimasystems. Die Langfristkomponente der Sonnenstrahlung bezeichnet die Solarkonstante. Damit wird die langjährig gemittelte extraterrestrische Sonnenbestrahlungsstärke bezeichnet, die bei mittlerem Abstand senkrecht auf die Erde auftrifft. Während sie kurz- und mittelfristig nahezu konstant ist, steigt sie äußerst langfristig um etwa ein Prozent alle 100 Millionen Jahre.² Unser heutiges Verständnis des Sonnensystems geht davon aus, dass zu Beginn der Erdgeschichte die Sonne um mindestens 25 bis 30% *schwächer* gestrahlt haben muss als dies heute der Fall ist. Dies bedeutet aber auch, dass bei derart schwacher Sonne (das sogenannte Paradoxon der „schwachen, jungen Sonne“) das Klima global um ca. 20°C kälter und damit deutlich unter dem Gefrierpunkt gewesen sein müsste, *wenn* die anderen Faktoren (Albedo, Treibhausgase) gleich geblieben wären. Dies war jedoch nicht der Fall. Zahlreiche geologische Spuren belegen, dass während des größten Teils der Erdgeschichte fließendes Wasser vorhanden war. Folglich muss der Treibhauseffekt in der Frühgeschichte der Erde erheblich stärker gewesen sein, in Frage kommen dafür das CO₂ oder Methan, um die schwächere Sonneneinstrahlung auszugleichen.

Unter dem Klimawandelaspekt werden auch die *kurzfristigen* Helligkeitsänderungen der Sonne diskutiert. Der elfjährige Sonnenfleckenzyklus³ verursacht nur Schwankungen – sowohl im sichtbaren Spektrum als auch in der Gesamtstrahlung – von weniger als 0,1%. Die solaren Schwankungen lassen sich durch regelmäßige Änderungen im Magnetfeld der Sonne erklären. Zusammen mit Rückkoppelungen kann diese geringe Änderung das irdische Klima beeinflussen, in welchem Ausmaß wird kontrovers diskutiert. Die Wetter- und Klimaentwicklung könnte einerseits in der Beeinflussung der Ozonschicht

-
2. Die Solarkonstante beträgt 1,37 kW/m². Das bedeutet, dass an der Obergrenze der Erdatmosphäre auf eine senkrecht zur Sonnenstrahlung ausgerichtete Fläche von einem Quadratmeter etwa die Heizleistung eines Badezimmer-Heizstrahlers auftrifft (Böhm 2008: 32).
 3. Sehr bald nach der Erfindung des astronomischen Fernrohrs wurden dunkle Flecken auf der Sonne entdeckt, deren Anzahl sich zyklisch (11-jährig) verändert. Erst später durch direkte Satelliten-Messungen der außerhalb der Erdatmosphäre eintreffenden Sonnenenergie erkannte man, dass Sonnenfleckenmaxima mit *höherer* Sonnenintensität einhergehen (ZAMG 2010d).

und der globalen Zirkulation der Luftmassen und in einer Begünstigung der Wolkenbildung bestehen. Zum jetzigen Zeitpunkt weiß man jedoch wenig über die Bedeutung, die den einzelnen Mechanismen zukommt (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 14, ZAMG 2010d).

2.2 Treibhausgehalt der Atmosphäre (Kohlenstoffkreislauf)

Aus den bisherigen Ausführungen ergibt sich, dass der *natürliche* Treibhauseffekt unentbehrlich war (und ist), um die Erde warm und lebenswert zu gestalten. Und es ist wohl kaum ein Zufall, dass die Treibhausgase über Jahrmilliarden in der richtigen Konzentration vorhanden waren um einen stabilen Temperaturkorridor zu gewährleisten.⁴ Viel wahrscheinlicher ist, dass ein globaler Regelkreis, ähnlich einem Heizungsthermostat, die Konzentration der Treibhausgase reguliert hat. Der wichtigste davon ist der Kohlenstoffkreislauf (Rahmstorf/ Schellnhuber 2006: 15).

Treibhausgase sind gasförmige Moleküle in der Luft, die durch ihre besondere Eigenschaft großen Einfluss auf die Energiebilanz der Erde haben: Treibhausgase lassen die von der Sonne einfallende *kurzwellige* UV-Strahlung ungehindert zur Erdoberfläche durch, während sie die von der Erde reflektierte *langwellige* Infrarot-Strahlung in der Erdatmosphäre *zurückhalten*. Durch diesen natürlichen Treibhauseffekt beträgt die Erdtemperatur im globalen Mittel rund +15°C. Ohne die Treibhausgase in der Luft läge die Temperatur hingegen bei eisigen -18°C.

Tabelle 1: Natürliche Treibhausgase

Treibhausgas	Konzentration	Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt	
		Temperaturerhöhung in Grad Celsius	Temperaturerhöhung in Prozent
Wasserdampf (H ₂ O)	1-4%	20,6	62
Kohlendioxid (CO ₂)	280 ppm ¹⁾	7,2	22
Ozon, bodennah (O ₃)	0,03 ppm	2,4	7
Distickstoffoxid (N ₂ O)	0,31 ppm	1,4	4
Methan	1,72 ppm	0,8	2,5
Andere	-	0,6	2,5
Summe		33,0	100

¹⁾ parts per million, Wert vorindustriell, nunmehr 385ppm (2008)

Quelle: Michler 2010

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Treibhausgase. Daraus wird ersichtlich, dass der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre das wichtigste natürliche Treibhausgas ist. Erst an zweiter Stelle folgt das Kohlendioxid. Addiert man die Temperatur erhöhende Wirkung aller Treibhausgase, so ergibt

4. Neben dem natürlichen Treibhauseffekt beruht der interne Stabilisierungseffekt des Erdklimas auch auf dem Stefan-Boltzmann-Gesetz. Dieses beschreibt, dass die Wärmeabstrahlung eines Körpers mit zunehmender Temperatur progressiv ansteigt. Dies bewirkt einen stark negativen Rückkopplungseffekt (ZAMG 2010a).

die Summe daraus 33°C! Um so viel kälter und lebensfeindlicher wäre die Erde ohne diese natürlichen Treibhausgase (Michler 2010: 32-33).

2.3 Die Erdbahn um die Sonne und die Neigung der Erdachse

Eine ganz entscheidende Ursache für natürliche Klimaänderungen liegt auch in der Neigung der Erdachse. Sowohl die Erdbahn um die Sonne als auch die Neigung der Erdachse (23,44°) und damit die Einstrahlwinkel der Sonnenstrahlen in verschiedenen Breiten der Erde schwanken zyklisch.⁵ Die dadurch ausgelösten Schwankungen (und noch mehr die Verteilung über die Jahreszeiten und Breitengrade) der Energieeinstrahlung in die Atmosphäre sind zum Teil sehr groß und werden für den Eiszeitzyklus verantwortlich gemacht. Die dominanten Perioden der Erdbahnzyklen (23.000, 41.000, 100.000 und 400.000 Jahre) treten in den meisten langen Klimazeitreihen deutlich hervor. Der *entscheidende* Punkt der Schwankungen der Erdumlaufbahn und der dadurch veränderten Sonneneinstrahlung besteht darin, dass Schnee und Eis immer dann großflächig akkumulieren, wenn die sommerliche Sonneneinstrahlung über der Nordhalbkugel *zu schwach* ist, um den Schnee des vorherigen Winters abzuschmelzen (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 22-23).

2.4 Kontinentaldrift, Kontinentalverschiebung

Die Kontinentalverschiebung ist eine der wichtigsten Antriebskräfte für natürliche Klimaänderungen bzw. der starken zeitlichen Veränderung der mittleren Globaltemperatur. Die Theorie der Kontinentaldrift, auch Kontinentalverschiebung genannt, beschreibt die langsame Bewegung, Aufspaltung und Vereinigung von Kontinenten.⁶ Die Landmassen sind nicht starr auf der Erdkruste verankert, sondern bewegen sich *im Laufe von Jahrmillionen*. Die mittelozeanischen Rücken sind die Quellgebiete für die aus dem Erdinneren auftauchenden flüssigen Gesteinsmassen, die von dort aus die Ozeanböden immer breiter machen und damit den Antrieb für die Bewegungen der Landmassen liefern. Die Kontinentaldrift beeinflusst nicht nur die Verteilung von Landmassen und Meeresflächen. Noch wichtiger sind die dadurch ausgelösten Meeresströmungen, die für den Wärmetransport bis in hohe Breiten sorgen und zu einem globalen Temperatenausgleich führen.

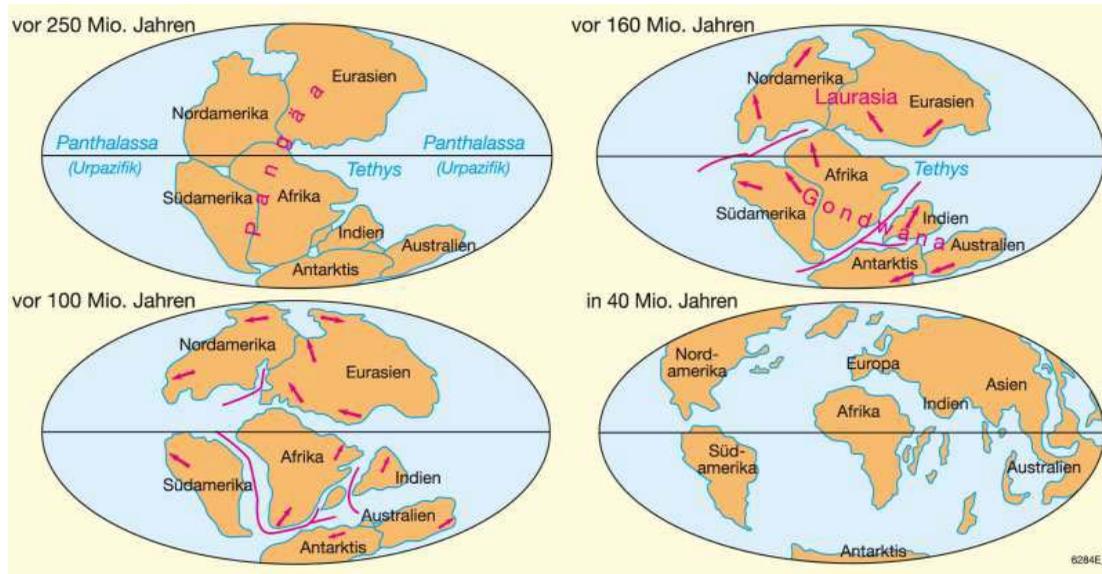
Besondere Bedeutung für das jüngste Eiszeitklima der Erde hat die Position der Antarktis als Landmasse über dem Pol, auf der sich große Mengen Eis ansammeln können. Die Landfläche Antarktikas war vor mehr als 170 Millionen Jahren Teil der Landmasse des Großkontinentes Gondwana (siehe Abbildung 2) und lag auf 40° südlicher Breite. Nach der Trennung von Gondwana, infolge der Kontinentaldrift, wurde die Antarktis langsam nach Süden, zum Pol, bewegt. Während der Kontinent zu Beginn des Paläogens vor ca. 65 Millionen Jahren noch tropisch bis subtropisch war (und zu dem Zeitpunkt noch mit dem Australischen Kontinent eine gemeinsame Landmasse bildete), kam es infolge der Drift Richtung Süden zu einer fortschreitenden Abkühlung. Erst vor etwa 30 Millionen Jahren traten erste nen-

5. Vom serbischen Astrophysiker und Mathematiker Milutin Milanković zu Zeiten der österreichisch-ungarischen Monarchie erstmals beschrieben und nach ihm benannt – die Milanković-Zyklen.

6. Als Vater der Kontinentalverschiebungstheorie wird der deutsche Polar- und Geowissenschaftler Alfred Wegener angesehen.

nenswerte Eisfelder auf. Vor ca. 25 Millionen Jahren öffnete sich schließlich zwischen der Antarktis und Südamerika die Drakestraße. Die dadurch ausgelöste *Bildung des Zirkumpolarstroms* war ein Grund für die vollständige Vereisung Antarktikas und der Beeinflussung des globalen Klimas. Die bis dahin den Kontinent bedeckenden Wälder wurden verdrängt. Erst seit geologisch jungen fünf Millionen Jahren ist der Kontinent von einem dicken Eispanzer nahezu vollständig bedeckt (Wikipedia 2010g, ZAMG 2010c).

Abbildung 2: Lage der Kontinente zu unterschiedlichen Zeiten



Quelle: Diercke: Atlas http://www.diercke.de/bilder/omeda/800/6284E_1.jpg

Die Theorie, die die Kontinentaldrift als Grundlage hat, besagt, dass der Niederschlag an den Polen verstärkt eine Chance hat, Eis oder Schnee zu bilden, wenn sich dort Landmassen befinden (wie in der erdgeschichtlich gegenwärtigen Konstellation). Ein beinahe kreisförmiger Kontinent auf einem Pol, wie heute die Antarktis, der völlig von Ozeanen umgeben ist, wird infolge der Erddrehung stärker durch zirkumpolare Meeres- und Luftströmungen von den wärmeren Gebieten der Erde abgeschlossen, als im Fall, dass Landbrücken bestehen, die die Ozeanströmungen in nord-südliche Richtung ablenken. Die Antarktis wurde gleichsam zu jenem globalen „Tiefkühlschrank“, der von einem 4,5 km dicken Eispanzer bedeckt ist und von jedem maritimen Einfluss isoliert wurde. Die Bedeckung mit Schnee und Eis führt dazu, dass deren Albedo den größten Teil der eingestrahelten Sonnenenergie reflektiert. Diese spezifische Position von Antarktika auf dem Südpol hatte weitreichende Auswirkungen auf das globale Klima und beeinflusste maßgeblich den herrschenden Eiszeitzyklus (Böhm 2008: 110, ZAMG 2010c).

Die Kontinentaldrift bzw. die Plattentektonik führt weiters zur Auffaltung von Gebirgen. Dies hat ebenfalls entscheidende Auswirkungen auf das Klima. Erstens bestimmt die Topographie die Verteilung von Niederschlägen (Barrierewirkung) und bewirkt großräumig die Umlenkung von Luftströmungen. Im Zusammenhang mit klimatischen Faktoren bzw. mit klimawirksamen Treibhausgasen ist jedoch vor

allem der *Prozess der Verwitterung* von Bedeutung, weil dieser einen (langfristigen!) Mechanismus darstellt, CO₂ aus der Atmosphäre (wieder) zu entfernen. Eine Auffaltung von Gebirgen beschleunigt die Verwitterungsrate. Damit wird CO₂ aus der Atmosphäre entfernt, gleichsam „entfernt“ und „eingelagert“. Vereinfacht dargestellt bewirkt die Verwitterung die Bindung des Treibhausgases CO₂ aus der Atmosphäre. In den Sedimenten erfolgt eine Einlagerung in der Erdkruste.⁷ Auf einer sehr langen Zeitskala ist damit eine globale Abkühlung verbunden.

Der gegenläufige Mechanismus ist ebenfalls ein „Nebenprodukt“ der Kontinentalverschiebung und des dadurch ausgelösten Vulkanismus - CO₂ und Aerosole werden in großen Mengen freigesetzt.⁸ Die Folge ist wiederum auf einer sehr langen Zeitskala eine globale Erwärmung. Beide Mechanismen müssen als Regelkreise verstanden werden, die im Zusammenhang mit Rückkopplungsmechanismen das globale Klimageschehen äußerst wirksam beeinflussen.

2.5 Vulkanismus

Unter Vulkanismus versteht man alle geologischen Vorgänge und Erscheinungen, die mit Vulkanen in Zusammenhang stehen, d.h. die mit dem Aufsteigen von Magma aus dem Erdmantel bis zur Erdoberfläche verbunden sind. Vulkanismus tritt in tektonisch aktiven Regionen auf, wie den Subduktionszonen oder Mittelozeanischen Rücken auf.⁹ Die vulkanische Aktivität, die eigentlich ein „Nebenprodukt“ der Plattentektonik ist, hat große Auswirkungen auf das Erdklima. Ein Gutteil der heute vorhandenen Gase entstammt den zahlreichen Vulkanausbrüchen der Erdgeschichte und den darauf folgenden Prozessen fotochemischer Reaktionen. Erdgeschichtlich traten Perioden mit hoher vulkanischer Aktivität neben solchen mit schwacher Aktivität auf. Auffällig ist, dass die Menge des vorhandenen atmosphärischen Kohlendioxids stark von der globalen Rate vulkanischer Aktivität abhängt. In den letzten 500 Millionen Jahren korrespondierte ein hoher Kohlendioxidanteil stets mit einer gesteigerten vulkanischen Aktivität (Wikipedia 2011r).

Explosive, hochreichende Vulkanausbrüche können jedoch auch eine abkühlende Wirkung, in Abhängigkeit vom ausgestoßenen Aerosolgehalt, haben. Sulfat-Aerosole aus SO₂ und Wasser vermindern die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung und kühlen die Luft. Damit es zu erkennbaren, mittel- bis langfristigen Klimawirkungen kommen kann, müssen die Auswurfmaterialien und die Folgeprodukte lange in der Atmosphäre bleiben. Ist die Eruption mächtig, können die Partikel oberhalb der Sperrschicht der Tropopause gelangen. Diese liegt zwischen 9.000 und 10.000 Meter. Diese stratosphärischen Aerosole bleiben ein bis drei Jahre in der Atmosphäre und verteilen sich wie ein Schleier über den gesamten Erd-

7. Die Erdkruste (Gestein und Sedimente) enthält mit rund 66 Millionen Gigatonnen über hundertausendmal tausendmal mehr Kohlendioxid als die Atmosphäre (600 Gigatonnen) (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 16).

8. Dabei ist der Ausstoß von Treibhausgasen nicht primär mit eruptiven Phasen verbunden. Der Anteil der „natürlichen“ Ausgasungen ist bereits beträchtlich. So wurde beim Vesuv, einem aktuell inaktiven Vulkan, festgestellt, dass täglich rund 300 Tonnen CO₂ ausgestoßen werden. Der Prozess der Freisetzung von Kohlenstoff aus karbonhaltigen Magmen durch Vulkane wurde bislang in den globalen Klimaszenarien unterschätzt (Michler 2010: 86).

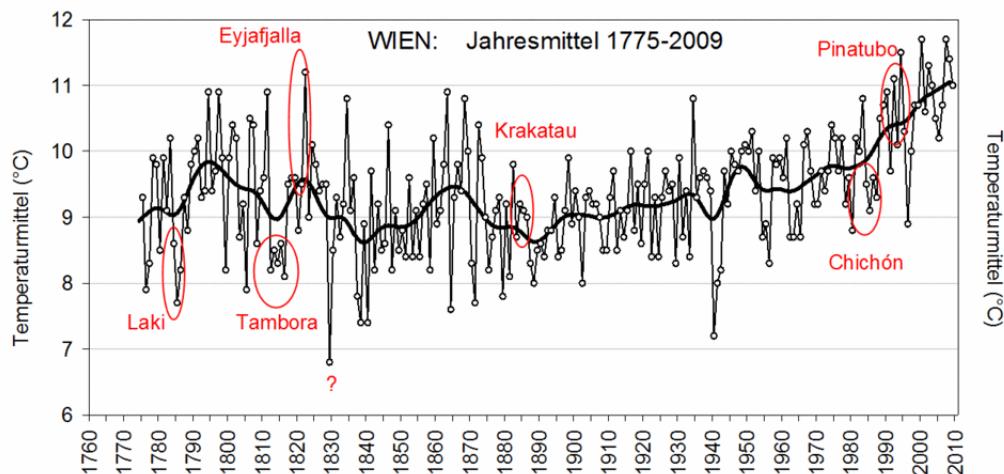
9. Zur Zeit gibt es weltweit 1.343 aktive Vulkane (Wikipedia 2011r).

ball. Die Sonnenstrahlen werden dadurch teilweise absorbiert oder zurückgestreut (ZAMG 2010b).

Große Vulkaneruptionen, bei denen einige Millionen Tonnen von Schwefeldioxid und/oder Schwefelwasserstoff in die Stratosphäre gelangen, wurden schon immer mit Wetter- und Klimaanomalien in Verbindung gebracht. Dies führt zu einer (kurzfristigen) globalen Abkühlung des Weltklimas. Häufungen, wie etwa die im frühen 19. Jahrhundert (in diese Phase fällt zum Beispiel der Ausbruch des Tambora in Indonesien) oder die zu Ende des 16. und Beginn des 17. Jahrhunderts, können dekadische Kaltphasen verursachen. In den beiden genannten kam es jeweils zu bedeutenden Gletschervorstößen, die allerdings auch in ausgeprägten Minima des solaren Klimaantriebes liegen. Insgesamt betrachtet ist jedoch nicht der einzelne Vulkanausbruch interessant, sondern ob (klimawirksame) Vulkanausbrüche gehäuft auftreten oder über eine längere Zeit ausbleiben.

Die Jahre nach größeren Vulkanausbrüchen der letzten 235 Jahre verhielten sich in Mitteleuropa, am Beispiel Wiens, daher ambivalent: Kalte Jahre nach den Ausbrüchen eines unbekanntes Vulkans (1809) und des Tambora (1815), des Laki (1783) und des Chichón (1982) steht ein außergewöhnlich warmes Jahr nach den 1821/22er Ausbruch des Eyjafjalla gegenüber sowie Serien von schwach übernormalen Jahren nach dem Krakatau-Ausbruch des Jahres 1883 und dem des Pinatubo 1992. Weltweit betrachtet hat sich letzterer Ausbruch jedoch signifikant niederschlagen. Damals kühlte sich die globale Temperatur um immerhin 0,5°C ab (ZAMG 2010b).

Abbildung 3: Temperaturentwicklung in Wien seit 1775 und explosive Vulkaneruptionen



Quelle: Klimaportal ZAMG Auer u.a. 2007, Böhm u.a. 2009

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/2-6_Vulkane_Abb3_gr.gif&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=1000&imgHeight=494

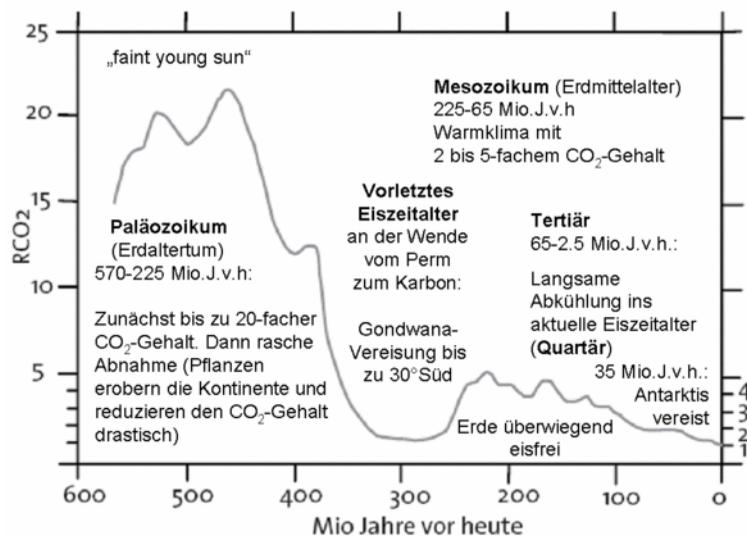
2.6 Einfluss der Biosphäre auf den natürlichen Treibhauseffekt

Die Biosphäre spielt als Gesamtheit der mit Lebewesen besiedelten Schichten der Erde eine wichtige Rolle im Klimasystem. Sie umfasst sowohl die oberste Schicht der Erdkruste die Lithosphäre ein-

schließlich des Wassers (Hydrosphäre) als auch die unterste Schicht der Atmosphäre (die sogenannte planetare Grenzschicht). Das aus dem Meer entstandene Leben auf der Erde hat vor allem in der geologischen Vergangenheit für die Zusammensetzung der Atmosphäre eine entscheidende Bedeutung gehabt. Ursprünglich bestand die Atmosphäre im Wesentlichen aus Kohlendioxid und Stickstoff. Erst die primitiven Algen der Urmeere ersetzten mit Hilfe der Photosynthese das Kohlendioxid soweit durch Sauerstoff, dass höheres Leben möglich wurde.

Auch heute liegt die klimatische Bedeutung der Biosphäre vor allem in ihrem Einfluss auf die Chemie der Atmosphäre. Das Phytoplankton der Meere wie die Pflanzengemeinschaften auf dem Land steuern entscheidend den Kohlenstoffkreislauf. Bei der Photosynthese *entziehen* die Pflanzen der Atmosphäre bzw. dem Meerwasser ständig Kohlendioxid, das bei der Atmung und der bakteriellen Zersetzung der Pflanzen (sowie durch Brände) wieder frei wird bzw. durch Absinkvorgänge im Meer auch ganz der Atmosphäre entzogen werden kann. Auch die Konzentration von Methan und Distickstoffoxid, ebenfalls sehr wirksame Treibhausgase, werden teilweise durch Prozesse in der Biosphäre gesteuert (wiki-bildungsserver 2010a).

Abbildung 4: Veränderungen des CO₂-Gehalts der Atmosphäre in den letzten 600 Mio. Jahren der Erdgeschichte und damit verbundene Klimaveränderungen



Quelle: Klimaportal ZAMG (nach Huber, McLeod, Wing 2000)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/2-4_Natuerliche_Treibhausgase_Abb1_gr.gif&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=600&imgHeight=450

Die Eroberung der Kontinente durch die Pflanzendecke im Devon vor ca. 400 Millionen Jahren hatte damit weitreichende Auswirkungen auf das globale Klima. Dabei hat die flächenhafte Vegetation primär einen dämpfenden, abschwächenden Effekt (negative Rückkoppelung) auf den natürlichen Treibhauseffekt. Die Vegetation gedeiht üppiger in einer warmen und feuchten Atmosphäre und entzieht der

Atmosphäre dadurch mehr CO₂. Die Folge davon ist, dass sich das erreichte Temperaturniveau stabilisiert (ZAMG 2010a).

Landpflanzen nehmen also auf drei Wegen Einfluss auf die klimatischen Verhältnisse: über die erwähnten Veränderungen der Stoffkreisläufe treten noch die Beeinflussung der Strahlungsbilanz und des Impulsaustausches hinzu. So ist die Bodenbedeckung für die Bewegung der Luft (Impulsaustausch) und den Wasseraustausch mit der Atmosphäre wesentlich mitverantwortlich. Gegenüber einer Wüsten- oder Steppenfläche bremsen zum Beispiel Bäume erheblich die Windgeschwindigkeit in Bodennähe. Auch die Wasseraufnahme, -speicherung und -verdunstung unterscheiden sich bei einer waldbedeckten Fläche erheblich von Flächen mit geringer Vegetation. Die Vegetationsbedeckung der Landflächen ist nicht nur Folge der klimatischen Verhältnisse vor Ort sondern sie ist in der Lage natürliche Effekte zu verstärken (= positive Rückkopplung). Bis zu einem gewissen Grad schafft sie sich das eigene Klima. Beispiele aus der „jüngeren“ Vergangenheit der Erde zeigen, wie groß der Einfluss der Vegetation auf das Klimageschehen wirken kann: Man geht heute davon aus, dass vor 10.000 bis 5.500 Jahren die Sahara deutlich grüner war und eine Gras- und Savannenlandschaft bildete. Diese Feuchtperioden fallen mit Zeiten zusammen, in denen aufgrund der Kreiselbewegung der Erdachse die Sonneneinstrahlung am Äquator besonders stark war. Dadurch verdampfte mehr Wasser aus den Meeren wodurch der „afrikanische „Monsun“ stärker wurde. Dieser bewegt sich während des sommerlichen Sonnenhöchststandes nordwärts und reicht in guten Jahren bis in die nördliche Sahelzone. In der Sahara reichte schon eine geringe Zunahme der Niederschlagsmenge um das Pflanzenwachstum drastisch zu steigern. Einmal vorhanden, war die Vegetation in der Lage konvektive Niederschlagsprozesse auszulösen, die sich selbst verstärkten und für Pflanzenwachstum sorgten (Mosbrugger/Micheels 2007, wiki-bildungsserver 2010a).

2.7 Rückkopplungseffekte und interne Variabilität

Von außerordentlich großer Bedeutung für das Verständnis der Wirkungsweise des Klimasystems sind daher die bereits skizzierten positiven und negativen Rückkopplungseffekte sowie die interne Klimavariabilität.

Unter Rückkopplungseffekten versteht man *selbstverstärkende* oder *abschwächende* Effekte, die sich aus der Wirkungsweise des Klimasystems ergeben. Klimaschwankungen werden ursächlich durch die zuvor beschriebenen Antriebe (Kontinentaldrift, Sonnenaktivität etc.) verursacht bzw. angestoßen. Ihre *volle* Wirksamkeit erlangen sie jedoch erst durch selbstverstärkende oder auch abschwächende Effekte. Ein an sich geringer Klimaantrieb kann dadurch eine große, exponentielle Wirkung erzielen, wenn eine positive Rückkopplung ausgelöst wird. Umgekehrt kann ein bedeutender Antrieb durch eine negative Rückkopplung gedämpft werden. Entscheidend dabei ist, dass diese Effekte oftmals nicht-linear sondern exponentiell wirken, einen sogenannten *Kippeffekt* auslösen (ZAMG 2010a).

2.7.1 Positive Rückkopplungseffekte

Wesentliche, positive Rückkopplungseffekte die den Klimawandel *beschleunigen* sind:

◆ **Eis-Albedo-Rückkopplung**

Die Selbsterhaltungsfähigkeit einer vorhandenen Schnee- oder Eisdecke ist beträchtlich. Dies liegt daran, dass bedeutende Energiemengen nötig sind, um Schnee oder Eis zu schmelzen (Schmelzwärme) oder direkt zu verdunsten (Sublimationswärme). Der zentrale Punkt ist jedoch die Fähigkeit von Meereis, Gletschern und schneebedeckten Flächen zur Reflexion des Sonnenlichts. Tabelle 2 gibt die Albedo einiger Oberflächenstrukturen an.

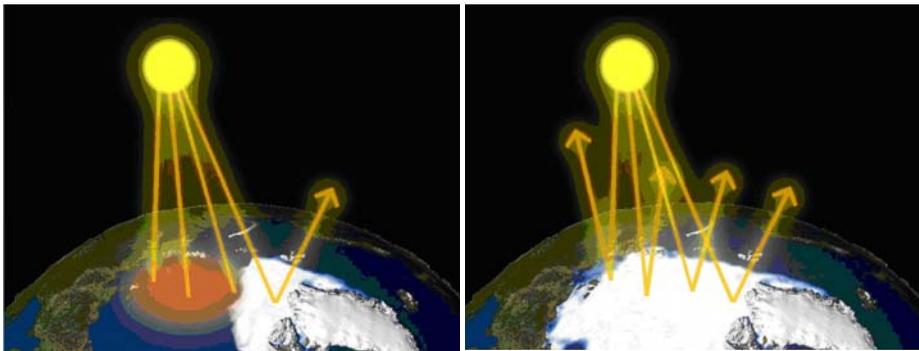
Tabelle 2: Die Albedo (lat. Weißheit) einiger Oberflächenstrukturen

Oberfläche, Landbeschaffenheit, Nutzungsweise	Albedo in % ¹⁾
Wiesen und Steppen	18
Laubwald	18
Ackerland	10-25
Helle Sandwüste	30
Meer (Sonneneinstrahlung 90°)	40
Frische Schneedecke	80
Firnfelder (Gletscher, Antarktis)	90

¹⁾ Die vollständige Rückstrahlung beträgt 100%

Quelle: Michler 2010: 31

Abbildung 5: Eis-Albedo-Rückkopplung



Der Effekt der Eis-Albedo-Rückkopplung steuert das globale Klima.

Quelle: wiki bildungserver.de

<http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/upload/Albedo-Eis.jpg> ; <http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/upload/Albedo-Eis2.jpg>

Im Vergleich zu Boden oder Vegetation ist die Rückstrahlungsfähigkeit von Schnee und Eisflächen deutlich höher. Beispielhaft zeigt sich der Eis-Albedo-Rückkopplungseffekt beim arktischen Meereis. Durch den Rückgang der Vereisung wird vermehrt Sonnenstrahlung absorbiert. Die auf das dunkle Meerwasser auftreffende Sonnenenergie wird

in Wärme umgewandelt. Dadurch verändert sich sprunghaft die Energiebilanz der Polarregion. Diese beeinflusst die atmosphärische und ozeanische Zirkulation (mit Folgen für den Nordatlantikstrom). Die Folge davon ist eine weitere globale Erwärmung (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 58-59).

◆ **Wasserdampf-Rückkopplung**

Durch den globalen Anstieg der Temperaturen wird mehr Wasser verdunstet. Dadurch nimmt der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre zu. Wasserdampf ist neben CO₂ das wichtigste Treibhausgas. Die Erhöhung der Wasserdampf-Konzentration in der Atmosphäre verstärkt wiederum den Treibhauseffekt (Hamburger Bildungsserver 2011a).

◆ **Bodengebundene Kohlenstoff-Rückkopplung**

Eine Reihe von positiven Rückkoppelungseffekten ist mit der Freisetzung von Kohlenstoff aus dem Boden verbunden: Durch die Erwärmung der Böden wird der im Boden als Humus gespeicherte Kohlenstoff als CO₂ freigesetzt. Dieser Mechanismus wirkt beispielsweise auch bei den alpinen Bergwäldern. Ähnliches betrifft Moore und Feuchtgebiete. Moore stellen durch die Bildung von Torf eine CO₂-Senke dar. Beim Rückgang der Moore wird dieses CO₂ wieder frei gesetzt. Ein weiterer Effekt tritt durch das Auftauen der Permafrost-Böden auf. Dadurch werden vor allem in Sibirien und Alaska große Mengen von Methan freigesetzt werden (Umwelt- und Prognoseinstitut e.V. 2010).

Ein Großteil der positiven Rückkopplungen, die den Treibhauseffekt in exponentieller Weise verstärken und beschleunigen könnten, ist in bisherigen Klimamodellen noch nicht enthalten, da diese Prozesse bisher nicht quantifizierbar und damit nicht berechenbar sind. Sie bilden damit einen erheblichen Unsicherheitsfaktor für die Klimaforschung.

2.7.2 Negative Rückkopplungseffekte

Wesentliche, negative Rückkopplungseffekte die den Klimawandel *bremsen* sind:

◆ **Wärmeabstrahlung**

Mit zunehmender Temperatur steigt auch die Wärmeabstrahlung der Erde ins Weltall stark an (Stefan-Boltzmann-Gesetz).

◆ **CO₂ Meeres-Senke**

Die gesamte im Ozean gelöste Menge an Kohlenstoffdioxid -CO₂ ist 50mal größer als der atmosphärische CO₂-Gehalt und 20mal größer als das an Land (Vegetation und Böden) gespeicherte Kohlendioxid. Der Ozean tauscht CO₂ mit der Atmosphäre aus und wirkt bei einer steigenden CO₂-Konzentration in der Atmosphäre als CO₂-Senke. Sekundär bewirkt dies die Versauerung der Weltmeere. Der CO₂-Austausch mit der Atmosphäre findet über die ozeanische Deckschicht statt, die je nach Region zwischen 50-100 m und mehr dick ist und erfolgt durch Gas-Austausch. Es wird als Hydrogenkarbonat und Karbonat gelöst.¹⁰ Die Lösung des Kohlendioxids im Wasser der Welt-

meere ist einer der *wichtigsten* negativen Rückkoppelungsmechanismen. Da kälteres Wasser mehr CO₂ aufnehmen kann als wärmeres, findet dieser Prozess vor allem in den höheren Breiten statt (Nordatlantik, Polarmeer, Nordpazifik, antarktischer Zirkumpolarstrom der Südhalbkugel). In den niederen Breiten *entweicht* hingegen ein Teil des gelösten Kohlenstoffs zurück in die Atmosphäre.

Lange Zeit konnte die Anreicherung der Weltmeere einen großen Teil des freigesetzten Kohlenstoffdioxids aus der Atmosphäre entfernen und diente als Puffer. Der Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Klimaausschusses verweist jedoch darauf, dass dieser negative Rückkopplungseffekt auf die Dauer geschwächt werden könnte. Durch den globalen Klimawandel wird auch das Oberflächenwasser des Ozeans erwärmt, und es bilden sich weniger kalte Wassermassen, die in die Tiefe absinken könnten. Dadurch wird der Transport von Kohlenstoff in den tieferen Ozean durch die "physikalische Pumpe" reduziert. Durch den kombinierten Effekt von erstens der zunehmenden chemischen Sättigung des Oberflächenwassers und zweitens der zunehmenden Schichtung der Wassersäule werden zwei wichtige negative Rückkopplungen im Kohlenstoff-Klima-System geschwächt und damit die Rate der Aufnahme von anthropogenem Kohlenstoff durch die Ozeane reduziert. Umgekehrt verbleibt dadurch ein höherer Anteil von Treibhausgasen in der Atmosphäre (IPCC 2007a: 14, Hamburger Bildungsserver 2011a, Michler 2010: 121).

◆ **CO₂ Vegetations-Senke**

Ein weiterer negativer Rückkopplungseffekt ist der CO₂ -Düngeeffekt der Biosphäre. Bei Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration kann das Wachstum von Pflanzen beschleunigt werden, wenn die Versorgung der Pflanzen mit anderen Faktoren wie Wasser, Mineralien etc. ausreichend ist. Die Wälder entziehen der Atmosphäre so den Kohlenstoff und lagern ihn in Blättern und Stämmen ein.

◆ **Albedo-Wolken-Effekt**

Wenn sich die Erde erwärmt, verdunstet mehr Wasser. Es bilden sich Wolken. Flache, niedrige und hochreichende Wolken haben einen abschwächenden Effekt auf den Klimawandel. Denn sie reflektieren das einfallende Sonnenlicht ins Weltall und haben so einen kühlenden Effekt auf die Erdatmosphäre. Hohe Bewölkung (z.B. Cirrusbewölkung) hingegen hat den gegenteiligen Effekt (Umwelt- und Prognoseinstitut e.V: 2010, ZAMG 2010a).

2.7.3 Interne Wechselwirkungen – Die Nordatlantische Oszillation (NAO)

Auch unter den Anzeichen der Klimaerwärmung *überlagern natürliche Antriebe und interne Wechselwirkungen* den anthropogenen Langfristtrend mit saisonalen bis dekadischen Schwankungen. Das heißt, es werden auch weiterhin Schwankungen zwischen warmen und kalten Jahren, harten und milden Win-

10. Die Korallen lagern den Kohlenstoff in ihr Kalkskelett ein und machen sich so dieses Angebot zunutze.

tern auftreten. Diese kurzfristige Variabilität bewirkt aber auch, dass der Langfristtrend (der Erwärmung) überlagert und damit für die Klimatologen (und die Öffentlichkeit) schwerer erkennbar wird.

Ein typisches Beispiel für die interne Variabilität, die das Wetter- und Klimageschehen Europas wirksam beeinflusst, ist die Ausgeprägtheit des Nordatlantikstroms (auch Golfstrom genannt). Der Nordatlantikstrom ist die natürliche „Warmwasserheizung“ des Kontinents und prägt die Luftströmungen und Großwetterlagen für weite Teile West- und Mitteleuropas.¹¹ Durch die West-, Südwest- und Nordwestwinde erfährt das Klima West- und Mitteleuropas eine wesentliche Milderung (vor allem im Winterhalbjahr) gegenüber Regionen in Klimazonen auf ähnlich hohen Breitengraden. Der Nordatlantikstrom ist in das weltweite ozeanische Förderband eingebunden und transportiert warmes Wasser der Tropen (Mittelamerika, Karibik) in die subpolaren und polaren Breiten vor der Westküste Europas und erwärmt dort Wasser und Luft. Der damit verbundene Transport von Wärme nach Norden wird auf eine Milliarde Megawatt abgeschätzt, das sind 300 Mio. Kilowattstunden pro Sekunde. Mit der Stärke der maritimen Wärmezufuhr durch die Meereszirkulation steht die Ausgeprägtheit der Westwinddrift über West- und Mitteleuropa in Zusammenhang.

Der Index der *Nordatlantischen Oszillation (NAO)* beschreibt die Ausgeprägtheit der Westwinddrift über dem Ostatlantik und Westeuropa. Unter der NAO versteht man die Druckdifferenz des Luftdrucks zwischen Azorenhoch und Islandtief. Sie ist das Maß für die Stärke der Westwinddrift auf dem Nordatlantik. Die von der NAO beschriebene Druckkonstellation übt einen dominanten Einfluss auf die Lufttemperatur- und Niederschlagsverhältnisse sowie das Sturmgesehen über dem Nordatlantik und über Europa aus. Die NAO ist im Winter, zwischen Dezember bis März, oftmals stark ausgeprägt (also positiv). Entlang der Luftdruckgradienten, von West nach Ost, wandern Systeme von Tiefdruckgebieten und Zyklonen sowie eingelagerte Zwischenhochs. Sie führen temperierte, teils niederschlagsreiche Luftmassen nach Mitteleuropa und dem Alpenraum (wiki-Bildungsserver 2010b,c, Wikipedia 2010i).

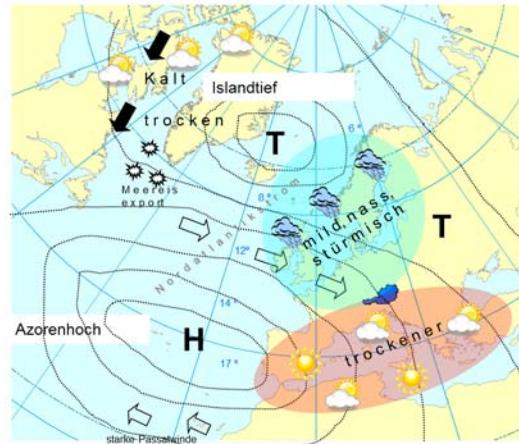
Der NAO-Index hat großräumige Auswirkungen auf die nördliche Hemisphäre (Atmosphäre, Biosphäre, Landmassen, Ozeane etc.). Damit verbunden sind nicht nur klimatische, sondern auch ökologische und ökonomische Folgen (Fischfang, Landwirtschaft, Energieproduktion, Wasserressourcen, Elektrizitätswirtschaft, Tourismus etc.).

Bei einem *positiven NAO-Index (NAO+)* bewegen starke Westwinde (hoher Druckgradient) milde, aber auch feuchte Luftmassen nach West-, Mittel- und Nordeuropa. Die Intensität der Tiefdruckgebiete (Zyklogese) ist ausgeprägt. Zahlreiche Sturmtiefs gelangen zum europäischen Kontinent. In West-, Mittel- und Nordeuropa sind häufige Niederschläge vorherrschend. Dabei bildet im Ostalpenraum bereits der Alpenhauptkamm eine Wetterscheide. Südlich davon und besonders im Mittelmeerraum ist es trockener als gewöhnlich. Über Grönland und der Labradorsee werden mit starken Nordwinden kalte Luftmassen aus arktischen Breiten nach Süden geführt.

11. Meeresströmungen bewirken Advektion, das heißt an Wassermassentransport gebundene Wärme- und Stofftransporte. Sie sind die Grundlage der thermohalinen Zirkulation (thermo = Wärme, halin = Salze, hier allgemein Stoffe) des Nordatlantikstromes (Michler 2010: 35-36).

Abbildung 6: NAO positive Phase

Die Nordatlantische Oszillation (NAO) positive Phase



Starke Westwinddrift über Europa =
milde, feuchte, stürmische Winter (2000/01, 2006/07)

eigene Grafik: Tamme/Gmeiner

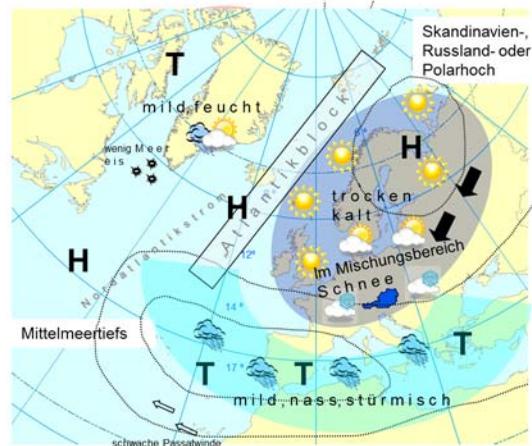
Damit einher geht auch ein starker Meereisexport, d.h. Ausbruch von Eisbergen aus diesen Regionen. Vor der Westküste Nordafrikas verstärken sich demgegenüber die Passatwinde (mit Einfluss auf die Fischbestände)¹². Obwohl die Schwankungen von Jahr zu Jahr groß und auch jahreszeitlich ausgeprägt sind, überwog der positive Zyklus von den 1970er Jahren bis etwa 1995 (wiki-Bildungsserver 2010b,c, Wikipedia 2010i).

In der *negativen Phase des NAO Index (NAO-)* sind die Aktionszentren („Azorenhoch“ und „Islandtief“) nur schwach ausgeprägt, womit auch die milde Westwinddrift über West- und Mitteleuropa schwächer wird. Hat das Azorenhoch den Platz des Islandtiefs eingenommen, und umgekehrt, so ist der NAO-Index stark negativ. Damit dreht die Luftströmung über dem Kontinent großräumig auf Nord bis Ost. Unter dem Einfluss eines Skandinavien, Russland- oder Polarhoch wird der atlantische Einfluss abgeblockt. Kaltlufteinbrüche können bis nach Mittel- und Westeuropa vordringen. Kalte, trockene Winter sind die Folge. Die abgeschwächte Westwinddrift verlagert sich südwärts und führt im Mittelmeer-raum zu reichlichen Winterniederschlägen. Im Mischungsbereich zwischen der feuchtmilden Mittelmeerluft und der Kaltluft kommt es großräumig zu Schneefällen. Während der negativen Phase ist der *Golf- und Nordatlantikstrom schwächer*, das heißt während dieser Phase wird weniger warmes Wasser nach Norden transportiert. Im Ausgleich zur Kälte über West-, Mittel- und Nordeuropa ist es in Grönland und der Labradorsee wärmer als normal.

12. Dadurch wird auch großräumig Saharastaub in den Atlantik bis nach Mittelamerika verfrachtet. Die staubigen Wüstenwinde haben eine düngende Wirkung auf das Phytoplankton. Die Verfrachtungen wirken großräumig: Der dadurch ausgelöste Düngeeffekt ist sogar in den Regenwäldern des Amazonas nachweisbar.

Abbildung 7: NAO negative Phase

Die Nordatlantische Oszillation (NAO) stark negative Phase



Westwinddrift ist schwach oder kommt zum Erliegen und verlagert sich in den Mittelmeerraum, polare Kaltluftvorstöße erreichen Mitteleuropa (Winter 2005/06, 2009/10, 2010/11)

eigene Grafik: Tamme/Gmeiner

Damit einher geht der Rückgang des Pack- und Treibeises sowie der Inlandgletscher in dieser Region. Die Passatwinde vor der Westküste Nordafrikas werden abgeschwächt und damit der Eintrag von Saharastaub. Weiters gibt es dort weniger kaltes Auftriebwasser, was die Fischbestände negativ beeinflusst. Der negative Zyklus überwog von den 1940er bis in die 1960er Jahre und wieder seit Mitte der 2000er Jahre. Durchgehend negativ waren die Werte auch in den Jahren 2010 und 2011 (wiki-Bildungsserver 2010b,c, Wikipedia 2010i).

Auffällig ist, dass das vermehrte Auftreten des *positiven* Zyklus seit den 1970er Jahren in zeitlicher Übereinstimmung mit dem bislang stärksten Signal der Klimaerwärmung auftrat. Dies gab zu Spekulationen Anlass, dass die globale Erwärmung zu einer verstärkten Westwinddrift (NAO+) beitrage (IPCC 2007a: 9). Tatsächlich stiegen die Wintertemperaturen über Eurasien und großen Teilen Nordamerikas seit den frühen 1980er Jahren um 1-2°C an und damit in weit höherem Ausmaß als dies global der Fall war. Schätzungen besagen, dass der Anteil des positiven NAO-Zyklus an der Erwärmung rund ein Drittel ausmacht. Die gesamte Erwärmung ging also deutlich über das aus der NAO-Variabilität ableitbare Maß hinaus, wie die hohen Wintertemperaturen seit Ende der 1990er Jahre trotz eines sich deutlich abschwächenden NAO-Index zeigen (wiki-Bildungsserver 2010b). Die Negativphase der NAO steht aber in Zusammenhang mit den deutlich kälteren Wintermonaten der vergangenen Jahre (2005/06, 2009/10, 2010/11). Dies ist als interne Variabilität des Klimasystems zu werten und muss nicht im Widerspruch zur Klimaerwärmung stehen.¹³ Wie bereits der vierte Sachstandsbericht des IPCC fest-

13. Der NAO-Index schwankt periodisch und steht auch mit den Meerestemperaturen im Nordatlantik in Zusammenhang. So gibt es neben den kurzfristigen Schwankungen im Bereich von zwei bis fünf Jahren überlagerte Schwankungen mit einem Rhythmus von 12-15 Jahren (dekadische Oszillation) und von etwa 50 bis 80 Jahren (Atlantische Multidekaden-Oszillation) (Wikipedia 2010i).

stellt, bleibt die mittel- und langfristige Entwicklung der NAO und das Zusammenspiel mit der anthropogenen Erwärmung jedoch ein hoher Unsicherheitsfaktor für das zu erwartende Ausmaß der Erwärmung in Europa (IPCC 2007c: 290f).

2.8 Resümee Natürliche Ursachen für Klimaänderungen

Das planetare Klima ist immer schon stetigen Wandlungen unterworfen gewesen. Trotz der Veränderlichkeit ist durch geologische Befunde aber gut rekonstruierbar, dass sich die mittlere Temperatur *nie-mals* außerhalb der Bandbreite zwischen $+9^{\circ}$ und $+22^{\circ}$ C bewegt hat - Auch nicht während der global auftretenden Glaziale. Dies stellte sicherlich eine der Voraussetzungen zur Entwicklung höherer Lebewesen dar. Betrachtet man die gesamte Erdgeschichte, so ist jedoch auch offensichtlich, dass das Klima während der längsten Zeit unseres Planeten *wärmer* war, als unter heutigen Voraussetzungen – auch die Polkappen sind in dieser Zeit völlig eisfrei gewesen.

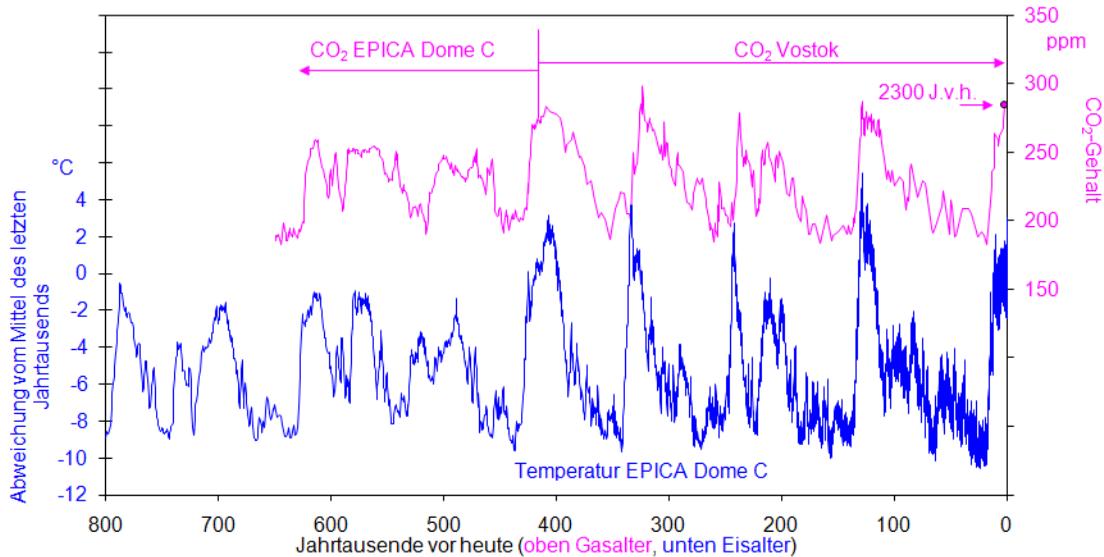
Bereits vor etwa 2,2 Milliarden Jahren wird die erste planetare Vereisungsphase angenommen. Ein Höhepunkt des Eiszeitalters wurde vor etwa 700 Mio. Jahren erreicht. Einer Hypothese zufolge war die Erde damals vollständig vereist („Schneeball Erde“).

Im anbrechenden Eiszeitalter geben die astronomischen, Milankovic-Zyklen, also geringfügige Schwankungen der Neigung der Erdachse, den Takt an. Die geringer werdende Einstrahlung in den höheren Breiten vermochte, vermittelt über mehrere Rückkopplungsmechanismen, Schnee und Eis des Winterhalbjahres nicht mehr zu schmelzen. Langsam wuchsen so die Eismassen zu mehreren tausend Metern Dicke an.¹⁴

Die Hauptursache für das Eintreten der Eiszeitalter ist jedoch in der Plattentektonik zu suchen. Solange sich an den Polkappen Meeresflächen befanden, fand ein ungehinderter Wärmeaustausch vom Äquator nordwärts bis in die hohen Breiten statt. Dies sorgte für einen ausgleichenden Wärmeaustausch. Großflächige Bedeckung mit Schnee, Meereis und Gletschern konnte sich nicht akkumulieren. Also ist die Anordnung großer Landmassen in Polnähe die entscheidende Voraussetzung für deren Vereisung und dem Wirksamwerden der Schnee- und Eis-Albedo-Rückkoppelung. Erst durch diese Rückkoppelungsmechanismen konnte sich der geringe Anstoß der Erdbahnveränderung zu den starken und drastischen Klimaschwankungen zwischen Eiszeiten (Glazialen) und Zwischeneiszeiten (Interglazialen) aufschaukeln: Die Klimawirksamkeit des Kohlenstoffdioxids zeigt sich nun daran, dass der *CO₂-Gehalt* und die aus den Eiskernen der Antarktis abgeleitete *Temperatur im gleichen Takt schwingen* - Je kühler das Meerwasser ist, desto mehr CO₂ konnte der Ozean aufnehmen (siehe dazu auch die folgende Abbildung). Die atmosphärische CO₂-Konzentration sank und als Folge schwächte sich der natürliche Treibhauseffekt weiter ab. Dazu trug auch die kargere Pflanzendecke der kalten, trockeneren Glaziale bei. Abbildung 8 zeigt den Gleichklang von Temperaturen und CO₂-Gehalt anhand der Eisbohrkerne der Ostantarktis. Der sogenannte WOSTOK-Eiskern zeigt dass der CO₂-Gehalt der Atmosphäre zwischen 190ppm auf dem Höhepunkt der Eiszeiten und 280ppm (aktuell 385ppm) in Warmzeiten schwankte. Die geringe Differenz von nur 90ppm hatte (verstärkt durch einige Rückkopplungseffekte) die Kapazität, eine globale Eiszeit auszulösen.

14. Kennzeichen, der Eiszeitalter ist, dass mindestens einer der Pole vereist ist.

Abbildung 8: Antarktische Temperaturen und Treibhausgehalte aus Eisbohrkernen der Ostantarktis



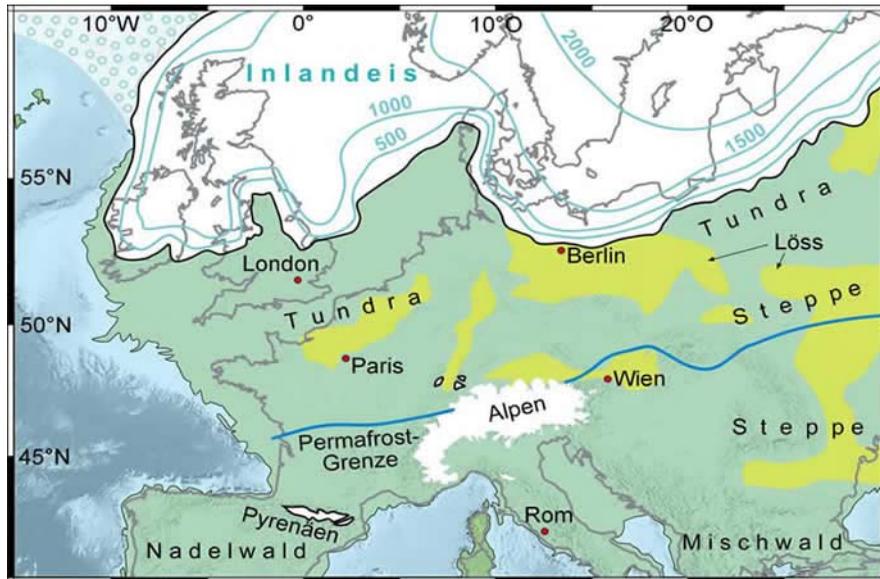
Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach EPICA community members 2004, Jouzel et al. 2007, Petit et al. 1999, Siegenthaler et al. 2005)
http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/2-4_Natuerliche_Treibhausgase_Abb2_neu_gr.png&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=876&imgHeight=483

Einerseits wurde durch die Eiszeitalter, die im Lauf der Erdgeschichte mehrfach auftraten, die Entwicklung des Lebens gefährdet. Andererseits nimmt man aber auch an, dass die Evolution der Vielzeller durch die Eiszeitalter einen Entwicklungsschub erfuhr, die vielleicht sogar die Voraussetzung für höheres Leben darstellte.

Typisch für das Erdklima der jüngeren Zeit (seit fünf Millionen Jahren) sind „rasch“ aufeinander folgende Klimawechsel. In den längeren Kaltzeiten bilden sich mächtige Inlandeisschilde in Nordamerika und Nordeurasien (einschließlich Europa). In den kürzeren Warmzeiten schmelzen diese völlig ab, während die Eisschilde Grönlands- und Antarktikas bestehen bleiben.

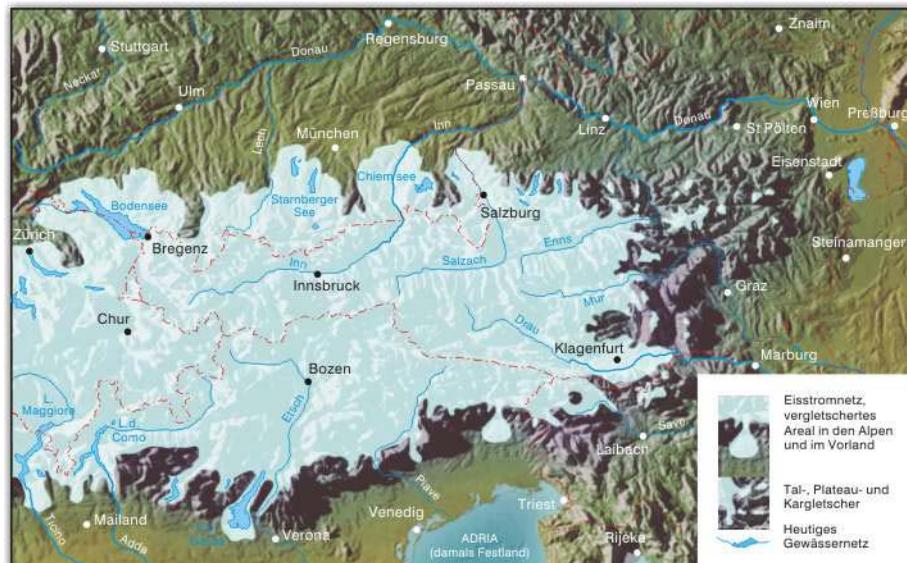
Zum letzten Höhepunkt der Würm-Kaltzeit vor 22.000 Jahren lagen große Teile Nordamerikas und der eurasischen Landmasse unter Eisschilden. Der Meeresspiegel lag in dieser Zeit rund 80 bis 150 Meter tiefer als heute. Da gigantische Wassermengen als Eis gebunden waren, verlandeten die Adria, der Ärmelkanal und die Beringstraße zwischen Alaska und Sibirien. Sie konnten von den damaligen Menschen überquert werden. Der Alpenraum lag vergletschert unter einem Eisstromnetz. Der Inn- und der Salzachgletscher reichten weit ins Alpenvorland, der Drau-Gletscher endete in der Gegend von Völkermarkt. Salzburg und Klagenfurt waren jeweils von 600 Meter dickem Eis bedeckt. Nur die höchsten Gipfel und Bergkämme ragten aus dem bis zu zwei Kilometer mächtigen Eisstromnetz der Zentralalpen (ZAMG 2008a).

Abbildung 9: Größte Eisverbreitung in Europa



Quelle: Geosite Datenbank Greifswald
<http://www.geosite.uni-greifswald>

Abbildung 10: Maximale Gletscherausbretung (im Alpenraum) während der letzten Eiszeit vor etwa 20.000 Jahren



Quelle: www.geologie.ac.at
<http://www.geologie.ac.at/RockyAustria/images/eiszeit.jpg>

Kurz nach dem Eiszeithöhepunkt vor ca. 20.000 Jahren stellten sich die Kennzahlen der Erdbahn wieder auf Erwärmung ein. Die Eismassen wurden (im geologischen Maßstab) schnell - also innerhalb weniger Jahrtausende - abgebaut. Das zusammenhängende alpine Eisstromnetz zerfiel nach und nach. Die letzten Eisreste in den nördlichen Breiten verschwanden vor rund 6.000 bis 7.000 Jahren.

Die aktuelle Zwischenzeit, das Holozän (seit 12.000 Jahren), ist eine Warmzeit innerhalb des quartären Eiszeitalters. Im Holozän schwankte die globale Mitteltemperatur nur noch um weniger als 1°C. Generell kann das Holozän als äußerst ruhige und für eine Zwischeneiszeit bereits sehr lang andauernde Warmphase innerhalb des quartären Eiszeitalters angesehen werden. Es kann vermutet werden, dass die Entwicklung der Menschheit von der nomadischen Jäger- und Sammlerkultur zur sesshaften Ackerbaukultur von einer derart langen und ruhigen Klimaphase zumindest begünstigt wurde (ZAMG 2008a, 2010e).

3. Der anthropogene Treibhauseffekt

Neben den natürlichen Faktoren beeinflusst auch der Mensch, die menschlichen Aktivitäten, das globale Klima. Man spricht von der sogenannten „anthropogenen“ Erwärmung“.

In der Klimatologie und gestützt durch die Ergebnisse des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) ist es heute Konsens, dass die gestiegene Konzentration der vom Menschen in die Erdatmosphäre freigesetzten Treibhausgase mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die wichtigste Ursache der globalen Erwärmung ist, „da ohne sie die gemessenen Temperaturen nicht zu erklären sind. Die globalen atmosphärischen Konzentrationen von CO_2 , Methan und Lachgas sind als Folge menschlicher Aktivitäten seit 1750 markant gestiegen und übertreffen heute die aus Eisbohrkernen über viele Jahrtausende bestimmten vorindustriellen Werte bei weitem“. (IPCC 2007a: 2)

Dabei ist die Erkenntnis von der Klimawirksamkeit von Treibhausgasen bereits älteren Datums. Bereits 1824 beschrieb Jean-Baptiste Fourier, wie Spurengase in der Atmosphäre das Klima erwärmen. In den 1860er Jahren beschäftigte sich der Physiker John Tyndall eingehend mit der Wirkung verschiedener Treibhausgase, insbesondere von Wasserdampf. Im Jahr 1896 berechnete der schwedische Nobelpreisträger Svante Arrhenius dass eine Verdoppelung des CO_2 -Gehalts der Atmosphäre zu einer Temperaturerhöhung um 4 bis 6°C führen würde. Er führte dies bereits auf den Gebrauch fossiler Energiequellen (zunächst Kohle, später auch Erdöl und Erdgas) zurück. Seine Annahme war jedoch auch, dass sich die Zeitskala, auf der sich solche Veränderungen abspielten auf Zehntausende von Jahren erstreckte (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 29).

Mangels Datengrundlage waren die mehr oder weniger plausiblen Annahmen über die wärmende Wirkung der anthropogenen Spurengase jedoch lange nicht verifizierbar. Erst in den 1950er Jahren schließlich wurde sie als ernstzunehmende These erkannt. Im Rahmen des internationalen geophysikalischen Jahres 1957/58 wurde der Nachweis erbracht, dass die CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre tatsächlich ansteigt¹⁵ (ZAMG 2011a).

Isotopenanalysen konnten zudem nachweisen, dass der Anstieg durch *Kohlenstoff aus der Nutzung fossiler Brennstoffe* verursacht wurde – also *menschengemacht* ist.¹⁶ Die ersten Simulationsberechnungen mit einem Atmosphärenmodell in den 1960er Jahren ergaben einen Temperaturanstieg von 2°C bei angenommener Verdoppelung der CO_2 -Konzentration; ein weiteres Modell ergab später einen Wert von 4°C . In weiterer Folge wurde die Spanne zwischen $+1,5^\circ$ und $+4,5^\circ\text{C}$ angesetzt. In den 1970er Jahren warnte mit der National Academy of Sciences der USA erstmals eine große Wissenschaftsorganisation vor der globalen Erwärmung. Gleichzeitig kühlte sich die Erdatmosphäre zwischen den 1940er und 1970er Jahren ab. Medial verbreitet wurde in dessen Folge die These von der „globalen Abkühlung“. In der Wissenschaft wurde hingegen bereits damals die Meinung vertreten, dass die stark gestiegene Luft-

15. Im Rahmen dessen wurde die berühmte CO_2 -Messreihe auf dem Mauna Loa auf Hawaii begründet, die mit Charles Keeling in Verbindung gebracht wird („Keeling-Kurve“) und die erstmals den Nachweis erbrachte, dass der Gesamtanteil des Treibhausgases in der Atmosphäre kontinuierlich ansteigt.

16. Nach Schätzungen wurden 2005 rund 81% des weltweiten Energiebedarfs aus fossilen Quellen gedeckt.

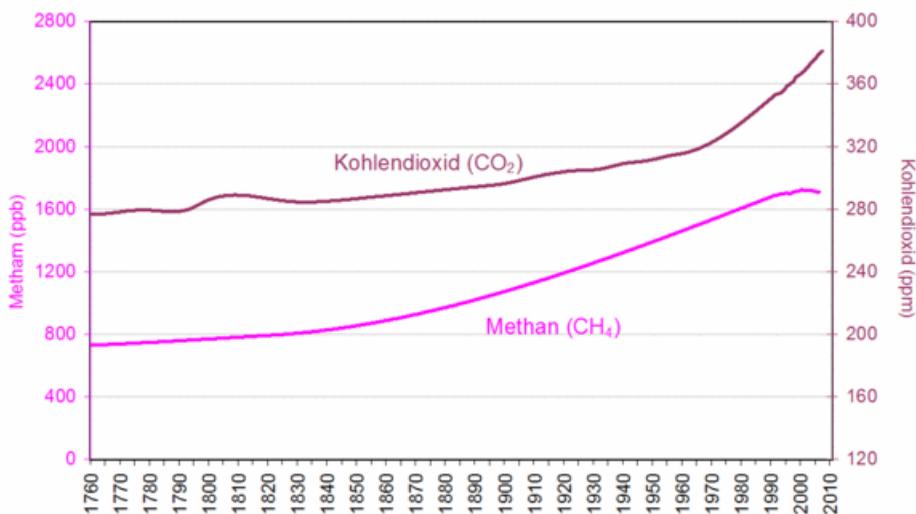
verschmutzung bzw. die dadurch begleitete „globale Verdunkelung“ für die Abkühlung verantwortlich sei und das Klimasignal bloß episodisch überlagere.

Mit dem zunehmenden „Klimasignal“ der anthropogenen Erwärmung in den 1980er Jahren kehrte die Thematik verstärkt ins öffentliche Bewusstsein. Die ersten Computerprogramme zur Modellierung des Weltklimas wurden Anfang der 1980er Jahre geschrieben. Im Jahr 1990 schließlich erschien der erste Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), gefolgt vom zweiten und dritten Bericht 1996 und 2001. Der bislang letzte Bericht wurde 2007 publiziert, der nächste ist für 2013 angekündigt. Der letzte Bericht 2007 gibt den breiten wissenschaftlichen Konsens wider, der über die anthropogene Erwärmung herrscht. Die Wissenschaftler des IPCC präzisierten die zu erwartende globale Temperaturerhöhung schließlich in einer Bandbreite von +1,8 bis 4,0°C (bis 2100), mit einem besten Schätzwert nahe +3°C (IPCC 2007a: 13, ZAMG 2011a).

3.1 Freisetzung der Treibhausgase

Neben dem natürlichen Treibhauseffekt, der erst die Voraussetzung für die Bewohnbarkeit unseres Planeten geschaffen hat, ist der anthropogene Effekt getreten. Die starke Erwärmung unseres Planeten seit Beginn der Industrialisierung lässt sich nur durch die vom Menschen verursachten, also freigesetzten Treibhausgase erklären. Die wichtigsten davon sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), die Gruppe der F-Gase aber auch das Ozon (O₃). Treibhausgase sind gasförmige Moleküle in der Luft, die durch ihre besondere Eigenschaft einen großen Einfluss auf die Energiebilanz der Erde haben:

Abbildung 11: Entwicklung der Kohlendioxid- und Methankonzentration von 1760 bis heute



Quelle Klimawandelportal ZAMG (nach Crowley 2000, aktualisiert)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/2-7_Treibhauseffekt_Abb3_gr.gif&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=600&imgHeight=358

Abbildung 11 zeigt den zeitlichen Verlauf der Jahresmittel der beiden wichtigsten anthropogenen (vom Menschen mitverursachten) Treibhausgase von der vorindustriellen Zeit bis heute. Es handelt sich um eine Kombination von Rekonstruktionen aus der in polaren Eisbohrkernen konservierten fossilen Luft mit aktuellen, direkten Messungen von Messstationen. Beide zeigen verstärkten Anstieg, das Kohlendioxid speziell in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, das Methan bereits seit dem späten 19. Jahrhundert.

Treibhausgase lassen die von der Sonne einfallende kurzwellige UV-Strahlung ungehindert durch, während sie die von der Erde reflektierte langwellige Infrarot-Strahlung in der Erdatmosphäre *zurückhalten*. Die Treibhausgasmoleküle nehmen also Energie auf, die sie von der Erde empfangen und strahlen sie wieder in alle Richtungen ab. Ein Teil davon geht wieder in Richtung Erdoberfläche, und genau dieser Teil macht den Treibhauseffekt aus. Einmal freigesetzt, steigen Treibhausgase langsam in der Atmosphäre auf und können dort über lange Zeit wirksam bleiben. So hat beispielsweise das Kohlendioxid eine Verweildauer von 50 bis 150 Jahren.¹⁷

Jedes der Treibhausgase hat ein unterschiedliches Treibhausgaspotential, das sich aus dem Prozentsatz ergibt, wie viel der Strahlung es pro Wellenlänge absorbiert, wie breit seine Absorptionsbande ist und an welcher Stelle im Ausstrahlungsspektrum der Erde es sich befindet. Das qualitative Treibhausgaspotential des Kohlenstoffdioxids ist das schwächste von allen klimaaktiven langlebigen Spurengasen. Wenn man auf einer relativen Skala CO₂ den Wert 1 zumisst, dann ist Methan (CH₄) 30mal, Lachgas (N₂O) 150mal, Ozon (O₃) 2.000mal und ein durchschnittliches FCKW sogar 15.000mal so wirksam (ZAMG 2011c).

Die Treibhausgase waren immer schon aus verschiedenen Gründen in unterschiedlichen Konzentrationen vorhanden (vgl. Punkt natürlicher Treibhauseffekt), aktuell steigt die Konzentration dieser Spurengase durch intensive Nutzung von fossilen Energieträgern (Kohle, Erdöl und Erdgas)¹⁸ markant an. Aber auch die Landnutzung (z.B. Entwaldung der tropischen Regenwälder) sowie die Land- und Viehwirtschaft nehmen darauf Einfluss. Erschwert wird die Abschätzung der anthropogenen Erwärmung dadurch, dass der direkt wärmende Effekt der Treibhausgase nur *ca. ein Drittel* der erwarteten Erwärmung ausmacht und der größere Teil eine Folge nur schwer quantifizierbarer Rückkopplungsmechanismen ist. Das Ausmaß der erwartbaren Erwärmung (die sogenannte Klimasensitivität) ist daher nicht leicht zu bestimmen (ZAMG 2011c).

An der Spitze der wichtigsten Verursacher der Treibhausgasemissionen steht die Nutzung fossiler Energieträger (Gewinnung fossiler Brennstoffe - Erdöl, Erdgas, Kohle, sowie die thermischen Kraftwerke, v.a. Kohlekraftwerke) weiters die Industrie und das produzierende Gewerbe, der Verkehr (Treibstoffe),

17. Der heute von Menschen verursachte Ausstoß von Treibhausgasen wird dadurch über einen langen Zeitraum von Jahrzehnten bis sogar Jahrhunderten nachwirken.

18. Die Kohlenstoffträger wurden im Lauf von Jahrtausenden der Erdgeschichte durch Assimilation gebildet und abgelagert – wir nennen sie deshalb „fossile Energieträger“. Da wir deren Kohlenstoff nun in vergleichsweise sehr kurzer Zeit durch Verbrennen wieder als CO₂ der Atmosphäre zuführen, kommen die natürlichen Rückführungsmechanismen (z.B. Bindung in kalkbildenden Organismen, Einlagerung im Gestein durch Verwitterung etc.) mit diesem Tempo nicht mit, und das CO₂ reichert sich in der Atmosphäre an.

die Gewinnung von Raumwärme und die sonstigen Kleinverbraucher, die Landwirtschaft und die Landnutzung generell (z.B. Rodung von Wäldern) sowie die Abfalldéponierung und Behandlung.

Das eigentliche Problem der Treibhausgase ist zweifellos, dass die Nutzung fossiler Energieträger auf ganz grundlegende Weise mit unserem Wohlstand, unserem Lebensstil, unserer Mobilität und unserem Komfort verbunden sind. Deshalb greifen die Notwendigkeiten des Klimaschutzes auch tiefgreifend in unsere vertrauten Konsum- und Verhaltensmuster ein. Es ist daher durchaus offen, ob der objektiv nötige Kurswechsel angesichts divergierender Interessen gesellschaftlich überhaupt durchsetzbar ist. Dies gilt einerseits gegenüber jenen wirtschaftlichen Branchen (Kohle- und Erdöl- und Erdgasproduzenten, Grundstoffindustrie, Automobilindustrie etc.) die von einer Abkehr von den fossilen Energieträgern negativ betroffen wären. Andererseits aber auch gegenüber Konsumenten und Verbrauchern dieser Güter.

3.1.1 Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Das wichtigste langlebige Spurengas ist das Kohlenstoffdioxid, es ist für ca. ein Fünftel der Erwärmung durch den natürlichen Treibhauseffekt verantwortlich (siehe Tabelle 1). Diese chemische Verbindung ist hauptverantwortlich für den anthropogenen Klimawandel.

Die Konzentration des Kohlenstoffdioxids hat dabei von vorindustriell (ca. 1750) 280 parts per million (kurz ppm) auf derzeit 385 ppm (2008) stark zugenommen. Die Konzentration in der Atmosphäre übertrifft die aus Eisbohrkernen bestimmte natürliche Bandbreite der letzten 650.000 Jahre (180 bis 300 ppm) bei weitem. Dabei hat sich die jährliche Wachstumsrate der Kohlendioxidkonzentration in den letzten Jahren sogar noch gesteigert.

Die Hauptquelle des CO₂ ist der Verbrauch fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl- und Erdgas), wobei Landnutzungsänderungen einen weiteren, signifikanten, aber kleineren Beitrag liefern. Die Verweildauer beträgt dabei rund 50 bis 150 Jahre (IPCC 2007a: 2, UBA 2012a).

3.1.2 Methan (CH₄)

Das zweitwichtigste langlebige Treibhausgas ist das Methan. Der Methangehalt der Atmosphäre ist von einem vorindustriellen Wert von etwa 715 parts per billion (ppb) auf 1.732 ppb in den frühen 1990er Jahren gestiegen und lag 2005 bei 1.774 ppb. Die Konzentration übertrifft die aus Eisbohrkernen bestimmte natürliche Bandbreite der letzten 650.000 Jahre (320 bis 790 ppb) bei weitem.

Das Methan entsteht hauptsächlich bei Umwandlung von pflanzlicher oder tierischer Materie unter Abwesenheit von Sauerstoff. Also nicht das Verbrennen (wie bei Kohlendioxid) steht hier im Vordergrund, sondern das Verfaulen, Vermodern und Verdauen. Der Name Sumpfgas nennt bereits eine wesentliche Quelle für CH₄, die Methanerzeugung aus abgestorbenen Pflanzenresten in Mooren, aber auch in Reisfeldern oder in Rindermägen tritt es auf. Weiters wird es auch bei der Förderung fossiler Energieträger freigesetzt. Im Hinblick auf die natürliche Methanquelle, die Pflanzenverrottung im Wasser, spielt der Mensch eine ambivalente Rolle. Einerseits wurden die Feuchtraumgebiete in hohem Maße trockengelegt (Flußauen, Trockenlegung saurer Wiesen etc.) Andererseits trägt die globale Erwärmung zum Auftauen der Permafrostgebiete in hohen geographischen Breiten bei, wodurch neue

potentielle Methanquellen entstehen könnten. Die Beispiele Reisanbau und Rinderzucht weisen jedoch darauf hin, dass diese Methanquellen ganz unmittelbar mit der Ernährung der Erdbewohner verknüpft sind und sich daher nicht leicht substituieren lassen. Die Verweildauer dieses Treibhausgases beträgt 9 bis 15 Jahre (ZAMG 2011c, IPCC 2007a: 3, UBA 2012a).

3.1.3 Distickstoffoxid/Lachgas (N_2O)

Das Lachgas ist ein äußerst wirksames Treibhausgas. Die globale atmosphärische Lachgas-Konzentration ist von einem vorindustriellen Wert von etwa 270 ppb auf 319 ppb im Jahr 2005 angestiegen. Dabei ist die Wachstumsrate seit 1980 ungefähr konstant. Menschenverursachte Emissionen stammen hauptsächlich aus der Landwirtschaft (Viehhaltung, Düngemittel und Anbau von Leguminosen, Biomasse), weniger aus der Medizintechnik sowie aus mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken und dem Verkehr. Die wichtigste Quelle sind mikrobielle Abbauprozesse von Stickstoffverbindungen in den Böden. Diese erfolgen sowohl unter natürlichen Bedingungen als auch durch Stickstoffeintrag aus der Landwirtschaft. Insbesondere bei schweren, überdüngten und feuchten Böden geht besonders viel N_2O in die Atmosphäre verloren. Auch der Niederschlag von Ammonium-Stickstoff aus der Luft, der von Gülleverdunstungen herrührt, trägt zur Bildung von Lachgas bei. Dazu kommt, dass die Verweildauer dieses Gases mit 114 Jahren auch sehr lange ist (IPCC 2007a: 3, UBA 2012a).

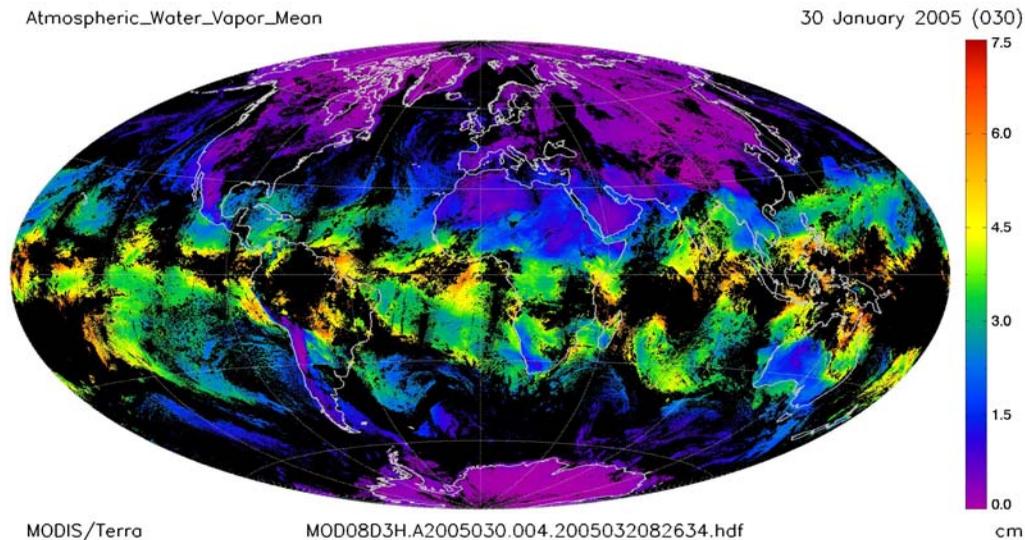
3.1.4 F-Gase

Zu dieser Gruppe zählen vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKWs), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKWs) und Schwefelhexafluorid (SF_6). F-Gase sind die treibhauswirksamsten Luftschadstoffe, die vom Kyoto-Protokoll erfasst werden. Emittiert verweilen sie bis zu mehreren hundert Jahren in der Atmosphäre. Während die klassischen Treibhausgase meist als unerwünschte Nebenprodukte entstehen, werden F-Gase zum überwiegenden Teil gezielt produziert und als Treibgas, Kälte- oder Isoliermittel eingesetzt (deshalb auch der Name Industriegase). Sie werden heute in ähnlicher Weise verwendet wie früher die seit 1995 nur noch eingeschränkt verwendbaren FCKWs. Zur Reduzierung dieser Stoffe ist daher neben technischen Maßnahmen vor allem die Entwicklung von Ersatzstoffen gefragt. Der Emissionstrend der einzelnen F-Gase zeigt teilweise gegenläufige Trends (UBA 2012a).

3.1.5 Wasserdampf

Das insgesamt wichtigste Treibhausgas ist der Wasserdampf. Sein Beitrag zum natürlichen Treibhauseffekt wird mit etwa 60% beziffert. Er wird jedoch nicht in die Liste der anthropogenen Treibhausgase aufgenommen, weil der Mensch seine Konzentration *nicht direkt* verändern kann. Der Wasserdampf entstammt überwiegend dem Wasserkreislauf. Unvorstellbar große Mengen an Wasserdampf (mehr als 4×10^{14} Kubikmeter pro Jahr) verdunsten von den Ozeanen, bewegen sich in der Atmosphäre, kondensieren und fallen als Niederschläge wieder zu Boden. Innerhalb von zehn Tagen wird damit die gesamte Menge an Wasserdampf in der Atmosphäre ausgetauscht. Die folgende Abbildung zeigt eine typisch winterliche Verteilung (auf der Nordhalbkugel) des Wasserdampfes in der Erdatmosphäre. Die höchste Konzentration zeigt sich am und südlich des Äquators.

Abbildung 12: Wasserdampfgehalt der Erdatmosphäre im Nordwinter



Quelle Wikipedia, Treibhauseffekt

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a0/Atmospheric_Water_Vapor_Mean.2005.030.jpg

Der Mensch erhöht nun indirekt den Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre, weil durch die globale Erwärmung die Lufttemperatur und damit die Verdunstungsrate steigen. Seit den 1980er Jahren ist der atmosphärische Wasserdampfgehalt als Folge des Eintrages von Treibhausgasen angestiegen. Einerseits wird dadurch der Treibhauseffekt verstärkt, weil mehr Infrarotstrahlung gehindert wird, in das Weltall zu entweichen (positive Rückkopplung). Andererseits abgeschwächt, weil die dadurch ausgelöste Wolkenbildung das Sonnenlicht zurückgeworfen wird (negative Rückkopplung). Wahrscheinlich ist, dass beide Effekte auftreten und sich gegenseitig, in welchem Verhältnis ist noch Gegenstand weiterer Forschungen, kompensieren (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 35, IPCC 2007a: 5).

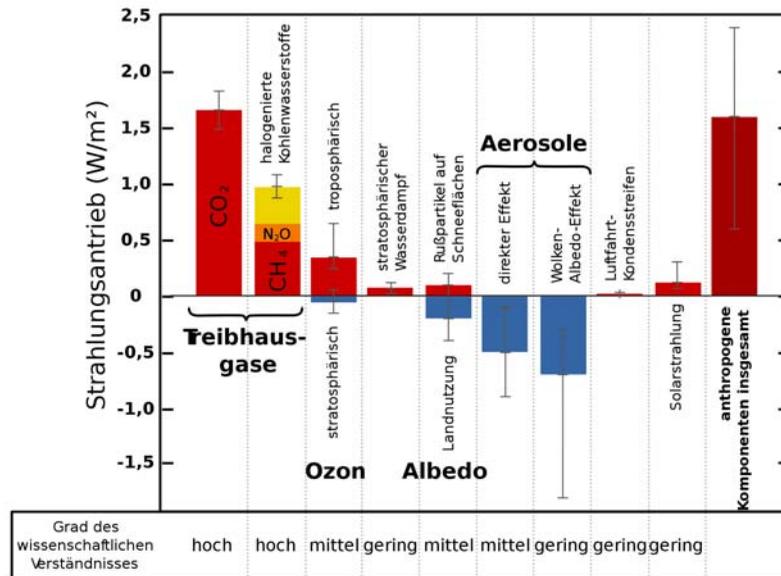
3.2 Anthropogene Aerosole – menschlich verursachte Klimaabkühlung

Während die anthropogenen Treibhausgase die Klimaerwärmung forcieren tritt der überwiegend *gegenteilige* Effekt durch die Aerosole und Rußpartikel auf. Diese „kühlen“ das Weltklima. Nicht nur die explosiven Vulkanausbrüche verursachen kurzfristige, abkühlende Klimaimpulse, auch die ständige Zufuhr von Aerosolen durch industrielle und andere Emissionen hat vor allem in der Zeit der rasanten Wirtschaftsentwicklung seit 1945 zu einem enormen Anstieg dieses anthropogenen Klimaeinflusses gesorgt. Die wichtigsten Verursacher der anthropogenen Aerosole liegen in den großen Industrienationen in Nordamerika, Europa und neuerdings auf dem asiatischen Kontinent (China, Indien). Aber auch brennende Ölquellen oder Brandrodungen des Regenwaldes sind als mögliche Ursachen zu nennen. Der anthropogene Zusatzeffekt durch die troposphärischen Aerosole mit dem Maximum um 1980 wirkte etwa 30 Jahre hindurch *abkühlend* und „*maskierte*“ so zunächst den bereits wirksamen Treibhauseffekt. Dieser kam erst nach 1980 voll zur Geltung.

Zu den anthropogenen Aerosolen zählen vor allem Sulfat, organischer Kohlenstoff, Ruß, Nitrat und Staub. Sie üben eine direkte und indirekte Wirkung aus. Die ausgestoßenen Aerosole reflektieren zum einen das Sonnenlicht („global dimming“) zum anderen kondensiert an ihnen das Wasser und es bilden sich Wolken. Deren höhere Albedo reflektiert das Sonnenlicht stärker. Dieser Effekt ist jedoch auch von der Art der Wolken abhängig, tiefe Wolken haben andere Effekte als hohe Eiswolken. Im Einzelnen sind die Effekte jedoch noch komplizierter, da auch erwärmende Effekte auftreten. Zum Beispiel jene der Kondensstreifen von Flugzeugen. Die damit verbundenen Eiswolken absorbieren die vom Erdboden kommende Strahlung und verstärken so den Treibhauseffekt (IPCC 2007a: 4, Michler 2010: 116-117, ZAMG 2011c).

Abbildung 13 zeigt die Wirkung der kühlenden Aerosole im Vergleich zu den erwärmenden Treibhausgasen auf. Die positiven Werte der Treibhausgase stehen den negativen Werten der Aerosole und Effekten der Landnutzung gegenüber, wobei der Strahlungsantrieb der Treibhausgase deutlich überwiegt. Das Verständnis der verschiedenen Komponenten des Strahlungsantriebes wurde durch den Sachstandsbericht des IPCC deutlich verbessert und hat zu einem „sehr hohen Vertrauen geführt, dass der globale Netto-Effekt der menschlichen Aktivitäten seit 1750 eine Erwärmung hervorgerufen hat“ (IPCC 2007a: 3).

Abbildung 13: Komponenten des Strahlungsantriebs – Die Antreiber der globalen Erwärmung seit 1750 und ihr Nettoeffekt auf den Wärmehaushalt der Erde



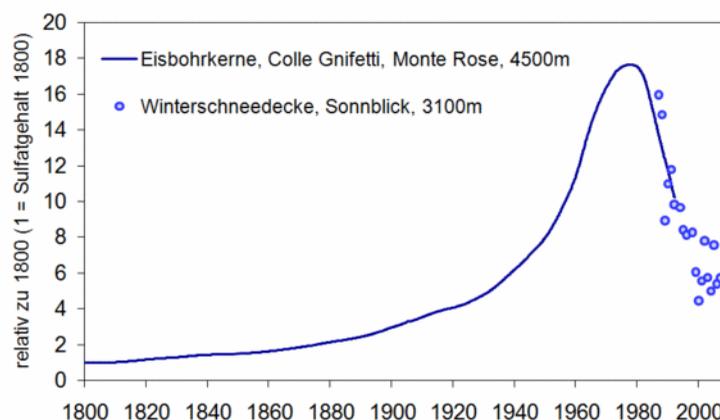
Anmerkung: Der Strahlungsantrieb in Watt pro Quadratmeter gibt an, wie stark der Strahlungshaushalt durch ein bestimmtes Gas (oder auch durch eine andere Ursache, etwa durch Änderung der Bewölkung oder der Sonnenaktivität) verändert wird. Ein Strahlungsantrieb von 1 W/m² bedeutet eine Erwärmung der bodennahen Schichten um etwa 0,5 bis 0,8 Grad Celsius (IPCC 2007a: 3).

Quelle: Wikipedia, Globale Erwärmung (nach IPCC 2007a)

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c7/Komponenten_des_Strahlungsantriebs.svg

Wie stark die Immissionen durch Aerosole in der unmittelbaren Vergangenheit gewesen sind, lässt sich auch aus hochalpinen Aufzeichnungen fernab von störenden Emittenten ablesen. Die folgende Graphik zeigt die Belastung von Schnee und Eis mit Schwefeldioxid auf hochalpinen Gipfeln auf, also in klassischen „Reinluftgebieten“. Die Langzeitkurve der Eisbohrkerne zeigt den rasanten Anstieg nach 1945 bis beinahe zum 20fachen des vorindustriellen Wertes. Seit etwa 1980 zeigt sich wieder eine rückläufige Tendenz. Dies ist auf Maßnahmen der Luftreinhaltung in Mitteleuropa einerseits, und dem Zusammenbruch der „schmutzigen“ Schwerindustrien im früheren Ostblock zurückzuführen.

Abbildung 14: Sulfatkalender für die Hintergrundbelastung von im Schnee und Eis der Hochalpen deponierten Sulfat



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Wagenbach 2007)

http://www.zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/2-8_Aerosole_Abb2_gr.gif&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=600&imgHeight=353

Wie sich die Emissionen der anthropogenen Aerosole in Zukunft entwickeln ist unsicher. Ob der abkühlende Effekt, der die Nachkriegsjahrzehnte bestimmte, in Zukunft wieder ansteigen wird, hängt weitgehend davon ab, auf welche Art und Weise die aufstrebenden Schwellenländer (China, Indien, Brasilien) ihren Energiebedarf decken werden – nicht nur hinsichtlich der genutzten fossilen Energieträger, sondern auch bezüglich anderer Emissionen wie Schwefeldioxid.

3.3 Anthropogene Landnutzungsänderungen

Neben den Treibhausgasen sind auch anthropogene Änderungen der Landnutzung klimawirksam. Im Zuge ihrer Zivilisation hat die Menschheit auch dazu Anstoß gegeben. Durch die Umwandlung von Waldflächen in Kulturland (Ackerflächen, Wiesen etc.), den Brandrodungen, dem damit verbundenen Holzeinschlag, weiters durch das Potential des im Boden gespeicherten Kohlenstoffs (dies betrifft vor allem die tropischen Regenwälder sowie die borealen Wälder der hohen Breiten aber auch die Bergwälder) sowie der veränderten Nachnutzung werden bedeutende CO₂-Emissionen freigesetzt. Auch die Trockenlegung der außertropischen Feuchtwälder (Moorgebiete, Torfe, Auwälder etc.) hat ein großes Treibhausgaspotenzial.

Vor rund 8.000 Jahren, also noch vor Beginn der Jungsteinzeit mit dem Beginn der sesshaften Landwirtschaft, betrug die globale Waldfläche geschätzte 6,2 Mrd. Hektar. Heute sind es lediglich knapp 4 Mrd. Hektar, also nur noch 64% des ursprünglichen Bestandes. Weitestgehend unberührt ist davon aber auch nur noch etwa ein Drittel. Allein im Zeitraum von 1850 bis 2006 wurden durch die Zerstörung der Wälder weltweit geschätzte 156 Mrd. Tonnen Kohlenstoff freigesetzt. Im Bestand akut gefährdet sind zur Zeit vor allem die tropischen Regenwälder. Bis dato werden jährlich rund 6 Mio. Hektar Regenwald zu Kulturläche umgewandelt und damit vernichtet (Michler 2010: 122, UNEP 2009: 50).

3.4 Ausmaß der globalen Erwärmung

Als Folge des Eintrages der anthropogenen Treibhausgase und nur leicht abgeschwächt durch die kühlenden Effekte der anthropogenen Aerosole ist die globale Erwärmung an vielen Indikatoren meßbar.

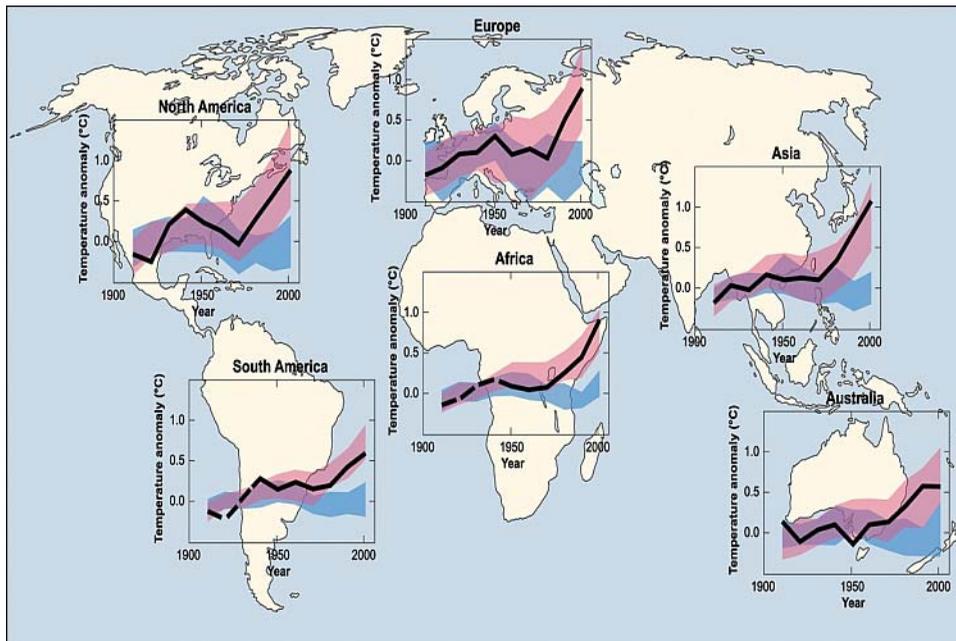
3.4.1 Industrielle Temperaturerhöhung im 20. und 21. Jahrhundert

Die mittleren Temperaturen auf der Nordhalbkugel sind in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts sehr wahrscheinlich höher als während jedes anderen 50-Jahres-Abschnitts der letzten 500 Jahre und wahrscheinlich die höchsten in zumindest den letzten 1.300 Jahren. Eine Rekonstruktion des Temperaturverlaufs vor Beginn der instrumentellen Periode ist mittels Proxy-Daten möglich.¹⁹ Der Temperaturanstieg ist jedoch keineswegs auf die Atmosphäre beschränkt geblieben. Auch die Meerestemperaturen sind signifikant angestiegen.

Als Hauptbeweis für die derzeitige globale Erwärmung gelten die seit 1860 vorliegenden weltweiten (instrumentellen) Temperaturmessungen sowie Auswertungen verschiedener Klimaarchive. Der globale Temperaturanstieg im Zeitraum von 1900 bis 2009 betrug dabei in Summe 0,8°C und ist auf allen Kontinenten festzustellen. Besonders groß waren die Auswirkungen in den hohen Breiten der Nordhalbkugel. Die Messdaten aus aller Welt belegen, dass parallel zur Kohlendioxidkonzentration auch die mittlere Temperatur in den abgelaufenen 150 Jahren deutlich gestiegen ist – und zwar etwa in dem Maße, wie es dem physikalischen Verständnis des Treibhauseffekts nach zu erwarten ist (IPCC 2007a: 5, 10, ZAMG 2011k: 4). Die folgende Abbildung zeigt die modellierte Temperaturentwicklung des letzten Jahrhunderts. Der blaue Korridor beschreibt die Temperaturentwicklung ohne anthropogene Treibhausgasemissionen, der rosa Korridor zeigt den menschlichen Einfluss, und die schwarze Linie gibt die tatsächlich gemessene Temperatur wieder.²⁰ Aus der Graphik ist ersichtlich, dass auf allen Erdteilen eine Erwärmung stattgefunden hat.

19. Die schlüssige Rekonstruktion des Temperaturverlaufs vor Beginn der instrumentellen Periode wurde mittels Proxy-Daten ermöglicht: Proxy-Daten sind indirekte Klimazeiger oder Klimazeugen. Dies können beispielsweise Baumringe, Pollen, Eisbohrkerne oder Hinweise auf Gletscherstände sein. Aber auch historische Quellenangaben, Ernteertragszahlen, phänologische Phasen, Vereisungs- und Hochwasserangaben. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf das Vorzeitklima oder auf vergangene Zustände der Atmosphäre ziehen (Michler 2010: 56).

Abbildung 15: Modellerte globale Temperaturentwicklung des letzten Jahrhunderts



Quelle: www.wetteronline.de (nach IPCC 2007a)

http://www.wetteronline.de/wotexte/redaktion/fotostrecke/2008/11/24_kl9.htm

Die erste deutliche Erwärmungsphase ist zwischen 1910 und 1945 anzusetzen, in der aufgrund der noch vergleichsweise geringen Konzentration von Treibhausgasen auch natürliche Schwankungen einen deutlichen Einfluss hatten. Die Phase globaler Abkühlung zwischen 1945 und ca. 1975 wird hauptsächlich mit einer erhöhten Konzentration von Sulfat-Aerosolen in der Atmosphäre erklärt – die „schmutzigen“ Wirtschaftswunderjahre der 1950er bis 1970er Jahre. Der Zusammenbruch der Ostblock-Schwerindustrien und Maßnahmen zur Luftreinhaltung in den Industriestaaten werden ebenfalls mit dem Anspringen des Klimasignals seit den 1980er Jahren in Zusammenhang gebracht. Seit damals hat sich das Klimasignal verstärkt und beschleunigt, also globalisiert.²¹ Nur mehr wenige Regionen weisen einen stagnierenden oder rückläufigen Verlauf auf.

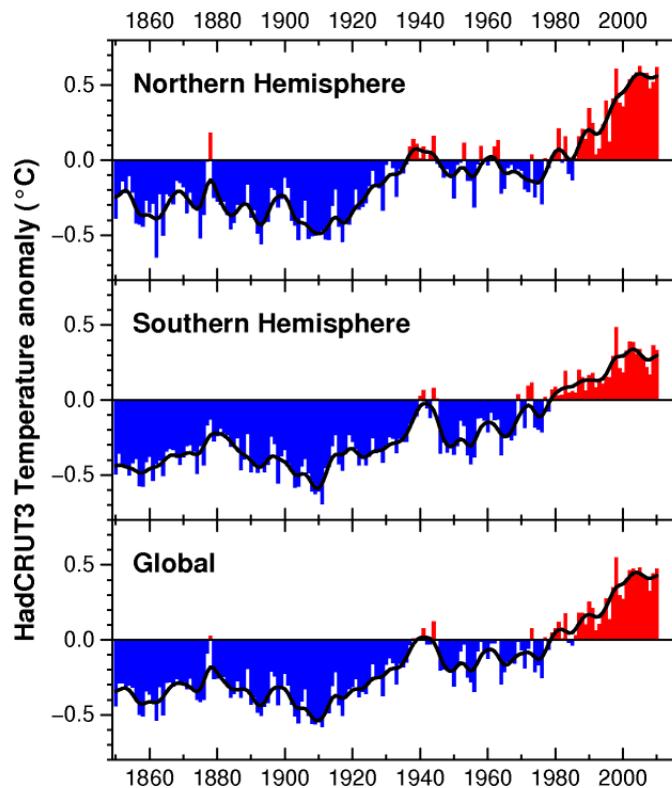
Das anthropogene Klimasignal seit 1980 sollte aber nicht dazu verleiten, eine lineare Fortschreibung der Temperaturerhöhung, örtlich oder zeitlich, zu erwarten. Auch bei Annahme einer weiteren Erwärmung im 21. Jahrhundert wird es im Verlauf immer wieder Phasen der Stagnation oder sogar der Abkühlung geben. Dies erklärt sich einerseits durch natürliche Ursachen von Klimaänderungen (Sonnenszyklus, starke Vulkanausbrüche) aber auch durch die natürliche Eigenschaft des Weltklimas, einen

20. Während der vergangenen 50 Jahre hätte *hingegen die Summe aus solaren und vulkanischen Antrieben wahrscheinlich sogar eine Abkühlung verursacht* (vgl. den abfallenden Verlauf des blau eingefärbten Korridors).

21. In den einschlägigen Temperaturreihen (siehe auch die folgende Graphik) sind, um einem langläufigen Vorurteil zu begegnen, lokale Effekte, vor allem das Wachsen von Städten um Wetterstationen herum (urban heat island effect) herauskorrigiert – sie wurden homogenisiert.

schwingenden Temperaturverlauf (vgl. interne Variabilitäten wie die NAO oder El Nino-Southern Oscillation etc.) zu zeigen (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 36-38). Wie die folgende Abbildung illustriert, war der Erwärmungstrend der letzten 150 Jahre in der Nordhemisphäre ausgeprägter als in der Südhemisphäre. Besonders markant fiel die Erwärmung im hohen Norden, in der Arktis aus, wo sie im jährlichen Mittel etwa doppelt so hoch ist wie im globalen Durchschnitt. Demgegenüber haben sich die Ozeane vergleichsweise gering erwärmt – Ausdruck ihres enormen Volumens und der thermischen Temperaturträgheit.²² Weiters ist zu bedenken, dass sämtliche Klimazeitreihen eine starke Kurzfristvariabilität zeigen. Diese „maskiert“ den langfristigen Erwärmungstrend.²³

Abbildung 16: Combined land and marine sea surface temperature (SST) anomalies from HadSST2



Quelle: Climatic Research Unit

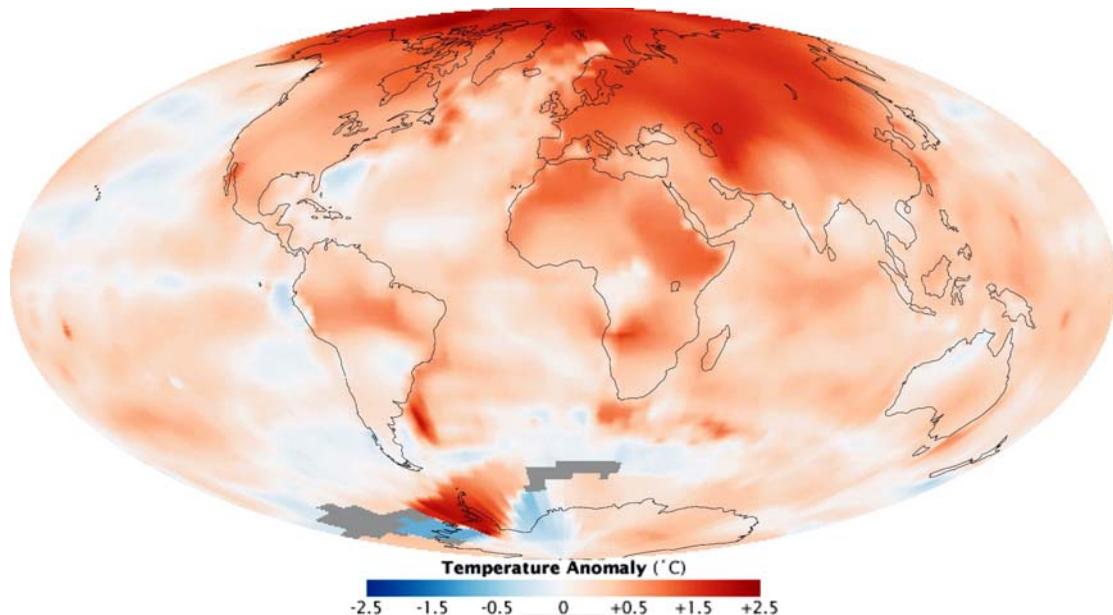
<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/nhshgl.gif>

22. Global gemittelt haben sich die Ozeane seit 1955 lediglich um 0,04 Grad Celsius erwärmt, die Oberflächentemperatur immerhin um 0,6 Grad Celsius - Bis dato erwärmte sich also primär die oberste Wasserschicht. Trotzdem hat, bedingt durch die thermische Ausdehnung, diese geringe Erwärmung einen signifikanten Meeresspiegelanstieg bewirkt (Wikipedia 2011c).
23. Somit sagt ein kalter oder warmer Winter, ein heißer Sommer oder ein Hochwasser, jedes Einzelereignis, nichts über den Klimawandel aus, der nur aus den Langfristtrends ablesbar ist.

Die folgende Abbildung 17 illustriert die globale Erwärmung. Auf der nördlichen Halbkugel ist sie in den letzten 150 Jahren auch stärker ausgeprägt gewesen als auf der Südhalbkugel. Dies ist auf die unterschiedliche Verteilung von Land- und Meeresflächen zurückzuführen.

Das Jahrzehnt von 2000 bis 2010 war mit Abstand das wärmste je gemessene, gefolgt von den 1990er Jahren, die wiederum wärmer waren als die 1980er Jahre. Das abgelaufene Jahrzehnt zeichnete sich dadurch aus, dass neun dieser zehn Jahre neue Höchstwerte aufstellten. Dies widerspricht auch Behauptungen von „Klimaskeptikern“, dass sich seit 1998 (nicht zufälligerweise ein Jahr mit einem besonders starken El-Niño-Ereignis) der Trend der globalen Erwärmung gestoppt hätte. Wie folgende Abbildung der räumlichen Verteilung der globalen Erwärmung aufzeigt, finden sich die „hotspots“ auf der Nordhalbkugel und über den Landflächen. Die höchsten positiven Abweichungen finden sich in mittleren und hohen Breitengraden der Nordhalbkugel. Aber auch in Afrika und dem asiatischen Kontinent war die Erwärmung sehr ausgeprägt. Negative Abweichungen gibt es über Meeresgebieten, in Südamerika und Australien. Auffällig sind auch gegenläufige Trends über der Antarktis.

Abbildung 17: Räumliche Verteilung der Abweichung von den Normalwerten 2000-2009



Quelle: Wikipedia Globale Erwärmung (nach IPCC 2007a)

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bd/NASA-global-warming-map-1970-79-to-2000-09.jpg>

Die Rangreihe der zehn wärmsten jemals instrumentell registrierten Jahre (seit 1860) zeigt die folgende Tabelle 3. Sie sind alle in den letzten zwei Jahrzehnten aufgetreten. Das Jahr 2010 liegt dabei gemeinsam mit 1998 an der Spitze. Bei einer globalen Durchschnittstemperatur von 14,0°C (1961-90) sind positive Abweichungen von 0,4 bis 0,5°C beträchtlich, weil sie sich aus den weltweit gemittelten Werten (Landmassen und Ozeanflächen, Nord- und Südhalbkugel) ergeben. Dies bedeutet, dass lokal viel höhere positive (und auch einige negative) Abweichungen auftraten²⁴.

Tabelle 3: Die global zehn wärmsten Jahre¹⁾

Rangreihe	Hadley Centre (UK)		NOAA (USA)		NASA (USA)	
	Jahr	Abweichung	Jahr	Abweichung	Jahr	Abweichung
1	1998	0,52	2010	0,52	2010	0,56
2	2010	0,50	2005	0,52	2005	0,55
3	2005	0,47	1998	0,50	2007	0,51
4	2003	0,46	2003	0,49	2009	0,50
5	2002	0,46	2002	0,48	2002	0,49
6	2009	0,44	2006	0,46	1998	0,49
7	2004	0,43	2009	0,46	2006	0,48
8	2006	0,43	2007	0,45	2003	0,48
9	2007	0,40	2004	0,45	2004	0,41
10	2001	0,40	2001	0,42	2001	0,40

¹⁾ Nach gängiger Praxis fließen in die Berechnungen nicht nur „reale“ Meßergebnisse von Wetterstationen, Meßbojen und Schiffen sondern auch aus Satellitendaten indirekt ermittelte Werte ein. Daraus erklären sich u.a. die Abweichungen zwischen den meteorologischen Instituten.

Quelle: UK Met office 2011a

<http://www.metoffice.gov.uk/news/releases/archive/2011/2010-global-temperature>

Der Anstieg der mittleren Temperaturen ist aber nur *ein* Indikator für die globale Erwärmung. Daneben ist auch evident, das mehr wärmere und weniger kalte Tage und Nächte über den meisten Landflächen festzustellen sind – Eine höhere Anzahl von warmen und heißen Tagen über 25 bzw. 30°C und eine Abnahme von Frost- und Eistagen (Tagesmittel $\leq 0^\circ\text{C}$). Wärmeperioden und Hitzewellen sind häufiger geworden. Auch die von Dürren betroffene Fläche hat zugenommen. Gefolgt vom Anstieg der Temperaturen sind auch deutliche Umweltauswirkungen, wie veränderte Jahreszeiten, Verschiebung von Klimazonen, und damit verbundene Veränderungen der Fauna und Flora zu beobachten (IPCC 2007a: 8, Wikipedia 2011c).

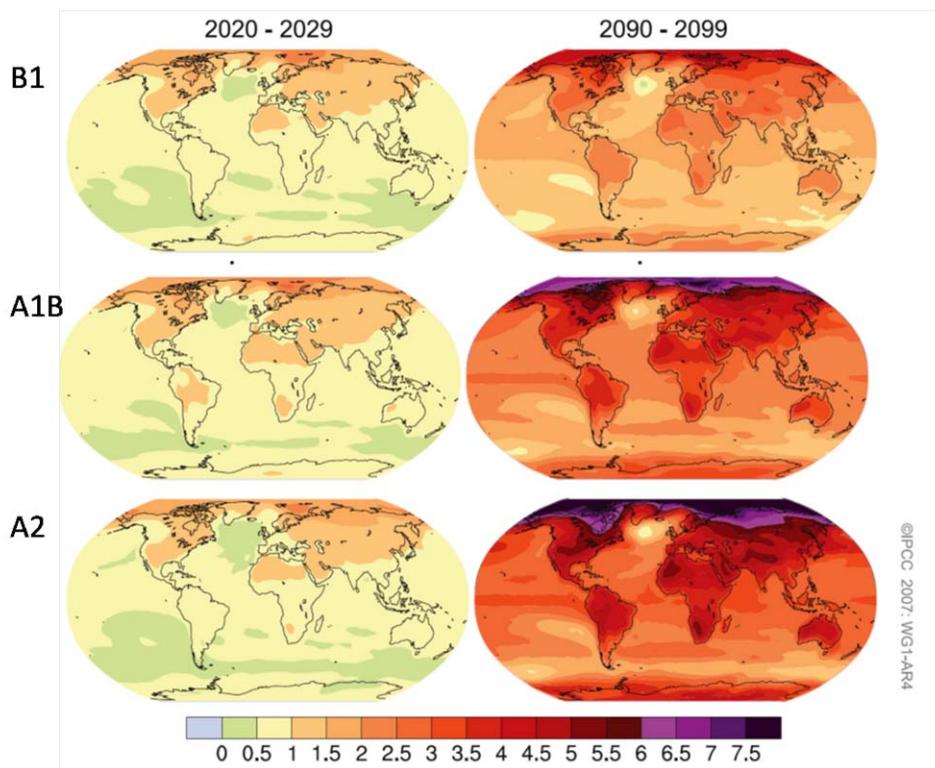
3.4.2 Erwartete Temperaturerhöhung bis 2100

Bei der zu erwartenden Verdoppelung der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre (dies entspricht einem mittleren Emissionsszenario) wird sich die globale Mitteltemperatur in diesem Jahrhundert (bis 2100) um rund $3,0^\circ\text{C}$ (bei einer Bandbreite von $1,8$ bis $4,0^\circ\text{C}$) erhöhen. Dies ist eine als abgesichert geltende Einschätzung und stützt sich auf ein gesichertes Fundament wissenschaftlicher Arbeiten und wird von einem breiten Konsens getragen. Für den im Jahr 2007 erschienen Bericht des IPCC wurden die Simulationsergebnisse einer Vielzahl an globalen Zirkulationsmodellen verwendet, um die Entwicklung des Klimas bis zum Ende 21. Jahrhunderts abzuschätzen.²⁵ Die Stärke der Änderung hängt

24. Das Jahr 2010 zeichnete sich beispielsweise dadurch aus, dass geringfügig negative Abweichungen in Europa, Zentralsibirien, Teilen von Südamerika, im östlichen China und dem Südosten der USA durch großräumig positive Anomalien in Afrika, dem Nahen Osten, dem westlichen China, Indien und Australien, Mittel- und Südamerika, zwischen Kanada und Grönland und generell der Arktisregion, mehr als wettgemacht wurden (WMO 2011a: 1-6).

dabei ganz wesentlich von den verwendeten Emissionsszenarien ab, die vom IPCC konfiguriert wurden (A1 bis B2)²⁶. Letztere sind Abschätzungen anthropogener Emissionen von Treibhausgasen. Sie repräsentieren verschiedene Annahmen über die demographische, soziale, ökonomische, technologische und ökologische Entwicklung der Welt, wobei politische Entscheidungen (z.B. Anreizsysteme, Verbote) den Ausstoß der Treibhausgase limitieren können (IPCC 2007a: 13, ZAMG 2011b). Je nach der Wahl des Emissionsszenarios fällt die Temperaturerhöhung global stärker oder schwächer aus. Noch deutlich stärkere Auswirkungen sind nach der Jahrhundertwende zu erwarten (rechte Bildhälfte) (Abbildung 18).

Abbildung 18: Änderung des Jahresmittels der bodennahen Lufttemperatur von 2020-2029 und 2090-2099 im Vergleich zur Periode 1980-1999 in Grad Celsius



Mittelwert aus dem Multi-Model Ensemble für die Szenarien B1, A1B und A2**

Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach IPCC 2007a

http://www.zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/4-1_Klimazukunft_global_Abb1_gr.png&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=1000&imgHeight=847

25. Die Mittelwerte über alle verwendeten Modelle bilden die Basis für die Temperatur- und Niederschlagsabschätzung. Durch diesen Ansatz wurde versucht die Übereinstimmung der Modelle aufzuzeigen und einzelne Modellausreißer zu eliminieren.
26. Beispielsweise korrelierte in der Vergangenheit das Wirtschaftswachstum der Industriestaaten stark mit dem Verbrauch an fossilen Energieträgern. Jede Klimaschutz-Strategie muss daher bei einer Entkoppelung zwischen der wirtschaftlichen Entwicklung und dem Verbrauch fossiler Energieträger ansetzen.

Wie der Karte zu entnehmen ist, müssen die Landflächen sowie die höheren nördlichen Breitengrade mit einer viel stärkeren Erwärmung rechnen als die Ozeane. Der Nordatlantik (mit Einfluss auf Nordwesteuropa) und Teile des Südpazifik sowie des Südpolarmeeres erwärmen sich nach diesen Projektionen am geringsten. Für die nächsten zwei Jahrzehnte (d.h. 2010 bis 2030) wird über alle Land- und Meeresflächen eine Erwärmung von grob $0,2^{\circ}\text{C}$ pro Jahrzehnt projiziert. Bis 2030 haben die unterschiedlichen Emissionsszenarien auch kaum Einfluss auf die Erwärmung. Dies gilt selbst dann, wenn die Emissionen auf dem Niveau des Jahres 2000 konstant gehalten würden.²⁷ Dies ist hauptsächlich auf die thermische Trägheit der Ozeane zurückzuführen, die die eingetretene Erwärmung zeitverzögert umsetzen. Weitere damit verbundene Effekte sind die Abnahme der Schneebedeckung, die Zunahmen der Auftautiefe in den meisten Permafrostregionen und der Rückgang der Meereisausdehnung. Hitzeextreme, Hitzewellen werden dann gehäuft auftreten (IPCC 2007a: 16, ZAMG 2011a).

Es ist auch nicht auszuschließen, dass die Erwärmung noch stärker ausfallen als die Szenarien des IPCC vorsehen. Dies liegt an Rückkopplungsmechanismen, die bestehende Prozesse aufschaukeln, also weiter verstärken. Beispielfhaft gilt dies für die Eis-Albedo-Rückkopplung - an die Stelle der schmelzenden Eisdecke der Arktis tritt dunkleres Meerwasser - dieses absorbiert erheblich mehr Wärme und verstärkt den Erwärmungsprozess. Im Extremfall tritt bei Auftreten einer kritischen Masse ein "Kippschalter" auf, der den Rückgang (des Meereises) exponentiell beschleunigen kann. Weitere kritische Rückkopplungsprozesse liegen dem Rückgang der globalen Verdunkelung (durch verstärkte Maßnahmen zur Luftreinhaltung wie zum Beispiel der Verringerung des Partikelaustrittes durch Filter) sowie Rückkopplungsprozessen durch Biomasse (deren beschleunigte Verrottung sowie die erhöhte Freisetzung von Kohlendioxid und Methan aus den Weltmeeren etc.) zugrunde (IPCC 2007a: 16).

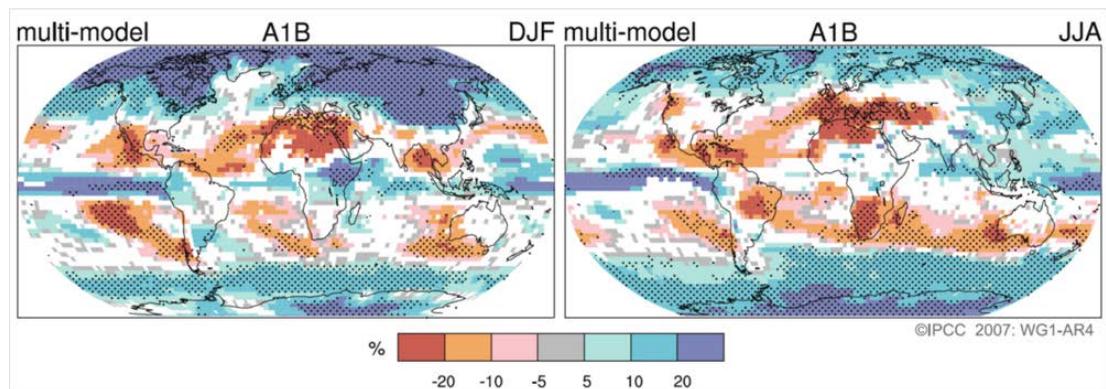
3.4.3 Erwartete Niederschlagsentwicklung bis 2100

Die Simulationen des Multi-Model Ensembles des IPCC (siehe Abbildung 19) zeigen eine schwache Zunahme der *globalen mittleren* Niederschlagsmenge um ca. 4%. Diese Veränderung scheint geringfügig. Jedoch gibt es sehr große Unterschiede in der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Änderungen. So zeigen sich im Winter (Dezember bis Februar) eine Zunahme von 10 bis 30% nördlich des 40. Breitengrades, sowie eine markante Abnahme südlich davon. Im Sommer (Juni bis August) sind die Änderungen überall schwach ausgeprägt. Zu den Polen hin wird eine leichte Zunahme simuliert, während der sommerliche Niederschlag vor allem über den Landflächen von den Subtropen bis zum 45. Breitengrad abnehmen soll. Die räumlichen Muster werden dabei stark von einer Veränderung der Lage der sommerlichen Hoch- und Tiefdruckgebiete gesteuert. Weiters ist es sehr wahrscheinlich, dass sich die Zugbahnen von Tiefdruckgebieten weiter polwärts verlagern, was auch dem beobachteten Trend in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entspricht. Ein weiterer Effekt ist die erwartete Zunahme von Starkniederschlagsereignissen (IPCC 2007a: 9, ZAMG 2011a). Bei der Interpretation der Ergebnisse ist aber auch zu berücksichtigen, dass die globalen Klimamodelle, so leistungsfähig sie auch sind, Schwächen in der Berechnung des Niederschlags aufweisen. Deshalb sind bis dato Aussagen

27. Aufgrund der Rückschläge bei der globalen Klimaschutzpolitik (vergl. Klimakonferenz in Durban 2011) und der damit verbundenen gesteigerten Freisetzung von Treibhausgasen stellt sich aus heutiger Sicht das ökonomisch bestimmte Szenario A2 als das Wahrscheinlichste dar.

über Niederschlagsänderungen und deren räumliche und zeitliche Verteilung noch mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Abbildung 19: Änderung des globalen Niederschlages von 2090-2099 im Vergleich zur Periode 1980-1999 in %, Winter (DJF), Sommer (JJA). Mittelwert aus dem Multi-Model-Ensemble für das Szenario A1B (IPCC 2007a)



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach IPCC 2007a)

http://www.zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/4-1_Klimazukunft_global_Abb2_gr.png&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=999&imgHeight=351

4. Folgen des Klimawandels und der Erwärmung

Die Folgen der globalen Erwärmung sind zahlreiche Mensch und Umwelt betreffende weltweite Veränderungen. Höhere Temperaturen bringen auch weitreichende Folgen wie steigende Meeresspiegel, schmelzende Gletscher, Verschiebung von Klima- und Vegetationszonen sowie Lebensräumen, verändertes Auftreten von Niederschlägen, stärkere oder häufigere Wetterextreme wie Überschwemmungen und Dürren, Ausbreitung von Parasiten und tropischen Krankheiten. Während weitgehend Einigkeit über die Ursachen der globalen Erwärmung besteht, werden ihre tatsächlichen und potenziellen Folgen kontrovers erörtert. Einige Folgen sind bereits jetzt absehbar, andere werden erst mittel- und langfristig sichtbar werden.

4.1 Globaler Gletscherrückgang

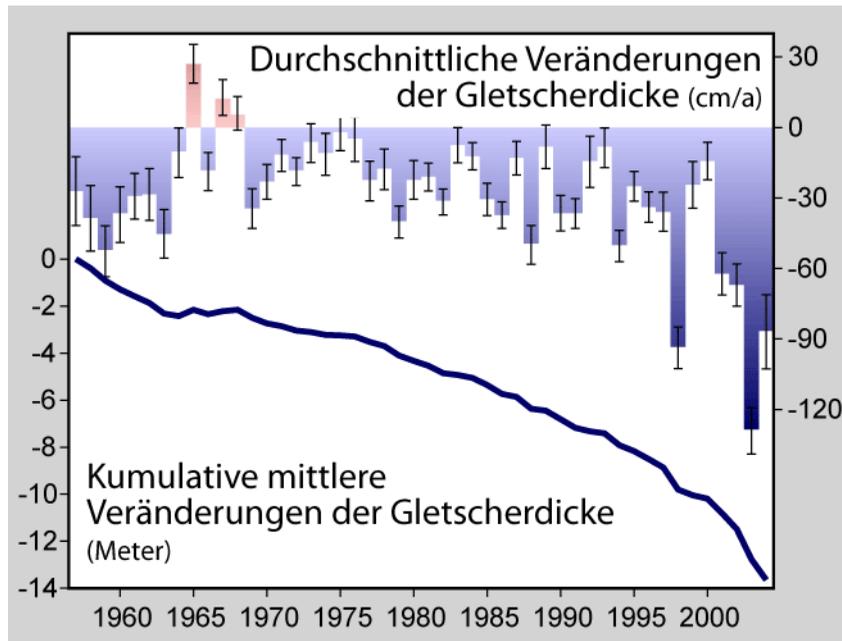
Der Gletscherrückgang ist ein globales Phänomen und wird bei den Andengletschern Südamerikas, in Alaska, bis zum Kilimandscharo in Afrika und den Gletschern des tibetischen Plateaus im Himalaya beobachtet. Ausnahmen werden beispielsweise von Gletschern in Norwegen und vereinzelt in Neuseeland berichtet. Dies könnte mit gestiegenen Niederschlägen in diesen Regionen zusammenhängen, die die Massenbilanz trotz steigender Temperaturen positiv beeinflussen.

Der Anteil der Gebirgsgletscher am globalen Eisvolumen ist global betrachtet gering (0,2% des Eisvolumens bzw. 0,1% der Erdoberfläche). Gebirgsgletscher kommen weltweit aufgrund von Topographie und Klima in den unterschiedlichsten Größen und Formen vor. Von wenigen hundert Metern großen Kar- und Hängegletschern über mehrere Kilometer lange alpine Talgletscher bis hin zu Auslassgletschern in Antarktis und Grönlands.

Gletscher sind sehr träge Gebilde, was dafür sorgt, dass sie weniger durch einzelne Wetterlagen beeinflusst werden als vielmehr durch langjährige Klimaveränderungen. Gebirgsgletscher reagieren empfindlich auf die äußeren Antriebe (z.B. mehr Schmelze durch stärkere Sonnenstrahlung und höhere Lufttemperatur oder mehr Akkumulation durch mehr Schneefall) als auch auf interne Umsetzungen des Klimasystems. Bedeutsam sind auch diverse Rückkopplungen: So reflektiert Schnee an der Gletscheroberfläche bis zu 90% der einfallenden Sonnenstrahlung, während apere, dunkle Gletschereis lediglich 20-40% reflektiert.

In ihrer Gesamtheit sind die Gletscher dieser Welt ein guter Indikator für langfristige Temperaturtrends. 83% aller Gletscher weltweit schrumpften zwischen 1970 und 2004. Die Massenbilanz der globalen Gletscher ist durch diesen Rückgang seit 1960 deutlich negativ. Auch die Vergrößerung und die vermehrte Anzahl von Gletscherseen stehen damit im Zusammenhang.

Abbildung 20: Massenbilanz von Gebirgsgletschern weltweit



Quelle: Wikipedia, Folgen der globalen Erwärmung

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Glacier_Mass_Balance_German.png&filetimestamp=20060923210235

Gletscher dienen Flüssen als jahreszeitenabhängige „Wassertürme“, die im Winter Wasser in Form von Schnee anhäufen und dieses während der Schmelzperiode im Sommer wieder abgeben. In einigen Regionen dieser Welt ist die Wasserspende der Gletscher essentiell für die Landwirtschaft und die Wasserversorgung (z.B. in Perus Hauptstadt Lima). Den Prognosen des IPCC zufolge wird das Volumen der nordhemisphärischen Gletscher bis 2050 durchschnittlich um weitere 60% zurückgehen (IPCC 2007a: 24, Gore 2006: 42-58, Rahmstorf/ Schellnhuber 2006: 56-57, Wikipedia 2011c, ZAMG 2011d).

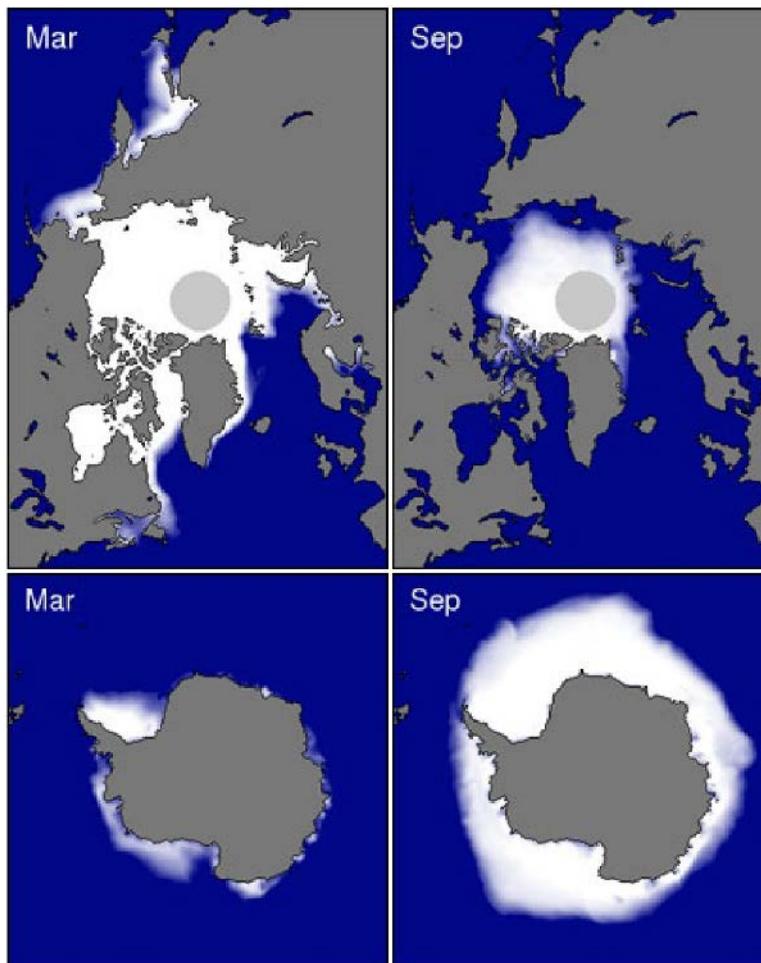
4.2 Rückgang des arktischen Meereises

Seit den 1980er Jahren ist der Rückgang des arktischen Meereises zu beobachten. Dies ist eine der markantesten Auswirkungen des gegenwärtigen Klimas und wird mit dem Klimawandel im Zusammenhang gebracht. Dabei sind die durchschnittlichen Temperaturen in der Arktis in den letzten 100 Jahren fast doppelt so schnell gestiegen wie im globalen Mittel (IPCC 2007a: 7).

Meereis ist gefrorenes Meereswasser, das auf Grund seines geringeren spezifischen Gewichtes auf dem Meerwasser schwimmt und im Mittel rund zwei Meter dick ist. Es entsteht bei Wassertemperaturen von unter $-1,8^{\circ}\text{C}$. Durch die Kälte bilden sich erste Eiskristalle, die sich an der Wasseroberfläche ansammeln. Diese frieren zusammen und es entsteht zunächst ein mehrere Dezimeter dicker Eisbrei.

Mit der Zeit verdichtet sich der Eisbrei zu Klumpen. Durch Wind und Wellen reiben sich die Klumpen ständig aneinander und bekommen eine scheiben- und „pfannkuchenförmige“ Gestalt. Die Eispfannkuchen werden größer und verschmelzen, bis sich eine geschlossene Eisdecke bildet. Angetrieben von Wind und Strömung driften Meereisschollen an der Wasseroberfläche des Meeres. Wo sich Schollen übereinander schieben (wie bevorzugt an der grönländischen und kanadischen Küste) kann es eine Dicke von über sechs Meter erreichen. Vor der sibirischen Küste erreichen sie hingegen nicht mehr als zwei Meter. Steigen die Temperaturen von Luft und Wasser im Frühling und Sommer an, dann beginnt das Meereis zu schmelzen und die geschlossene Eisdecke zerbricht in einzelne Schollen (AWI 2011).

Abbildung 21: Ausdehnung des Meereises in der Arktis und in der Antarktis im Mittel der Periode 1979-2007



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach NSIDC 2010b)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/klima/klimawandel/5/5-4_2_Ausdehnung_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=480&imgHeight=603

Im Gegensatz zum Festlandeis (Grönland, Antarktis) weist das Meereis eine starke jahreszeitliche Schwankung in seiner räumlichen Ausdehnung auf. Zur Zeit der maximalen Ausdehnung im Winter hat das arktische Meereis eine Fläche von ca. 14 bis 16 Mio. km², das antarktische Meereis von ca. 17 bis 20 Mio. km². Normalerweise ist die Abnahme der Meereisfläche während des Sommers in der Antarktis viel größer als in der Arktis, die Fläche reduziert sich auf ca. 3 bis 4 Mio. km², während in der Arktis ca. 7 Mio.km² verbleiben.

Zusätzlich unterliegt die Ausdehnung des Meereises auch einer Veränderung von Jahr zu Jahr und einer hohen dekadischen Variabilität, so wurden auch von 1925 bis 1945 hohe Temperaturen in der Arktis gemessen, die mit niedrigen Eisständen verbunden gewesen sein müssen. Gesicherte Aufzeichnungen gibt es jedoch erst seit den 1970er Jahren.

In den letzten Jahren wurden beim arktischen Meereis mehrfach *Minima der Ausdehnung* verzeichnet, während die Meereisfläche rund um die Antarktis eher gewachsen ist. Die Daten zeigen, dass die Ausdehnung der arktischen Eisdecke im Sommer in den abgelaufenen 30 Jahren um 20% abgenommen hat. Die Satellitenreihe von 1978 bis 2005 zeigte die geringste je gemessene Eisausdehnung im September 2005 (5,5 Millionen Quadratkilometer).²⁸ Die Jahre danach bewegten sich auf weiter niedrigem Niveau. Abbildung 21 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der Eisschmelze bzw. des Eiszuwachses am Nord- (linke Bildhälfte) und am Südpol. Typischerweise werden Höchst- bzw. Tiefststände im März und September erreicht.

Die beobachtete deutliche Abnahme der arktischen Meereisausdehnung hat nicht nur über Rückkopplungseffekte (dunkles Wasser absorbiert die Sonnenstrahlen während Meereis sie reflektiert) deutliche Folgen für das Erdklima. Ein weiterer Effekt der Meereisbildung ist die damit verbundene Salzanreicherung des Wassers. Es sinkt in größere Meerestiefen ab. Dadurch wird u.a. die Zirkulation des Nordatlantikstromes beeinflusst, der für das europäische Klima von großer Bedeutung ist.²⁹

Eine weitere Abnahme der arktischen Meereisfläche in der Zukunft könnte nicht nur zu deutlichen Veränderungen des Erdklimas führen, sondern auch zu starken Veränderungen der arktischen Lebens- und Wirtschaftsräume. Ungünstige Effekte liegen in der verstärkten Küstenerosion (Sibirien, Kanada). Beispielsweise bestehen zwei Drittel der Arktisküsten nicht aus Fels, sondern aus dauerhaft gefrorenem weichem Material, die ohne Permafrost leicht abgetragen werden können. Von Ökologen wird immer wieder das Verschwinden der Lebensräume des Eisbären thematisiert. Demgegenüber stehen aber auch wirtschaftliche Interessen, die vom Verschwinden des arktischen Meereises auch Vorteile wie den besseren Zugang zu marinen Bodenschätzen oder die Erleichterung bei Transportwegen erwarten³⁰ (ZAMG 2011e, Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 58-59, AWI 2011, Michler 2010: 232-233) .

28. Über die Entwicklung der *Eisdicke* gibt es nur annähernde Abschätzungen. Auf Basis von U-Boot-Messungen seitens der US-Marine wurde jedoch gefolgert, dass auch die Dicke des Eises um 40% abgenommen hat. Andere Untersuchungen bemessen die Abnahme der Dicke geringer, zwischen 8 und 15%. Damit im Zusammenhang steht auch die Abnahme des Alters des Eises (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 58-59).

29. In den vergangenen 120.000 Jahren ist der Nordatlantikstrom mehrfach abgerissen oder nahm einen anderen Verlauf als gegenwärtig. Ursache dafür war der Zufluss großer Mengen Süßwassers, welches den Verdichtungsprozess abschwächte und das Absinken des Oberflächenwassers verhinderte (Wikipedia 2011c).

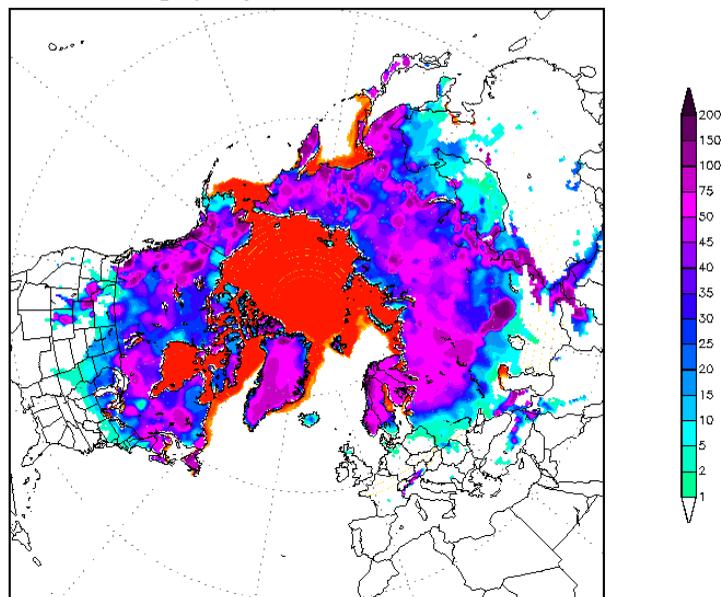
4.3 Abnahme der Schneebedeckung und Rückgang des Permafrosts

Die saisonale Schneedecke bedeckt zur Zeit des Wintermaximums durchschnittlich 47 Mio. km², wovon 98% auf der Nordhalbkugel liegen.³¹ Dann ist rund 30% der Nordhalbkugel von Schnee bedeckt (vor allem Sibirien und Kanada, weniger in Mittel- und Westeuropa). Auch bei der winterlichen Schneebedeckung ist ein Trend zur Abnahme zu bemerken (ZAMG 2011f, IPCC 2007a: 5).

Die folgenden Abbildungen zeigen Schnee- und Eisbedeckung auf der Nordhalbkugel zu ihrem jeweiligen Maximum und Minimum. Deutlich zu erkennen ist die Klimagunst West- und Mitteleuropas: Während im Februar 2011 weite Teile Sibiriens, Kanadas und der nördlichen Bundesstaaten der USA schneebedeckt sind, ist Europa - von den Alpen und Skandinavien abgesehen - schneefrei. Das Polarmeer ist weiträumig zugefroren. Eisfrei hingegen bleibt, unter dem Einfluss des wärmenden Golf- und Nordatlantikstromes, der Nordatlantik.

Abbildung 22: Eisbedeckung und Schneehöhe im Nordwinter

Init : Tue,15FEB2011 00Z Valid: Tue,15FEB2011 00Z
Eisbedeckung (rot) und Schneehöhe in cm



Daten: Eis und Schneehöhenanalyse des NCEP
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

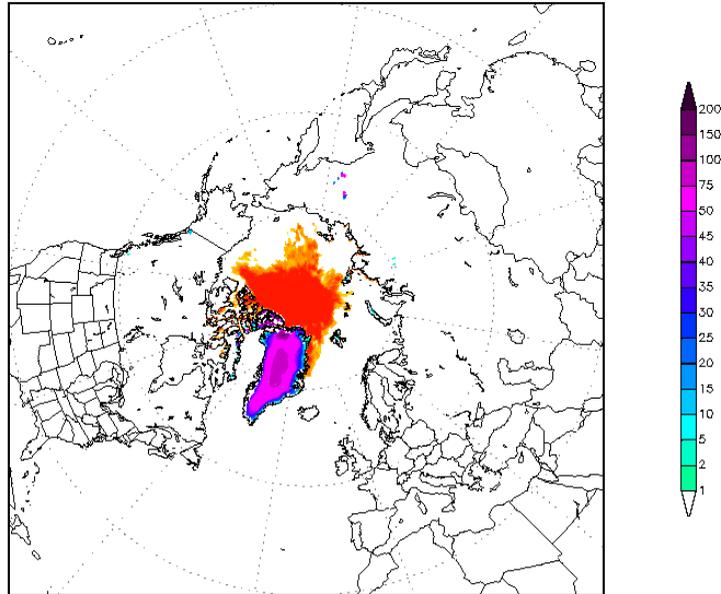
Quelle: Wetterzentrale.de

30. Der Seeweg zwischen Europa und Asien (Rotterdam-Tokio) durch den Suez-Kanal beträgt 21.100 km, der Weg durch die Nordwestpassage hat hingegen eine Länge von nur 15.900 km, wohingegen die Route durch die Nordostpassage mit nur 14.100 km die kürzeste ist. Die Nordost- und die Nordwestpassage waren Ende August 2008 erstmals gleichzeitig eisfrei (Wikipedia 2011d).
31. Demgegenüber ist auch während des Süd winters die schneebedeckte Fläche auf der Südhalbkugel gering, da große Landmassen südlich des 40. Breitengrades fehlen auf denen sich Schnee akkumulieren könnte.

Das Minimum der Eisbedeckung (auf der Nordhalbkugel) wird in der Regel im September erreicht, danach wächst es wieder. Der Eisrückgang erreichte im September 2011 wieder das historische Allzeitminimum von September 2005 (Abbildung 23). Weitgehend schnee- und eisbedeckte Flächen finden sich zu diesem Zeitpunkt nur im zentralen Nordpolarmeer und auf Grönland.

Abbildung 23: Eisbedeckung und Schneehöhe im Nordsummer

Init : Sun,04SEP2011 00Z Valid: Sun,04SEP2011 00Z
Eisbedeckung (rot) und Schneehöhe in cm



Daten: Eis und Schneehöhenanalyse des NCEP
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

Quelle: Wetterzentrale.de

Umfang und Ausmaß der Schneedecke sind ein wichtiger Indikator für Klimaänderungen. Ein wärmeres Klima führt einerseits dazu, dass der Anteil des Niederschlags in fester Form zurück geht. Andererseits verringert sich dadurch in weiterer Folge die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Schneedecke ausbildet. Andererseits und in weiterer Folge bewirkt der Klimawandel, dass die Andauer der flächigen Schneebedeckung sinkt. Für das Klima ist die Schneedecke durch ihre Fähigkeit Sonnenenergie zu reflektieren und Wasser zu speichern ein wichtiger Faktor. Frischer, weißer Schnee reflektiert 80-90% der Sonneneinstrahlung, im Vergleich dazu reflektieren Vegetation oder Boden nur 10-20%. Nimmt die räumliche Ausdehnung der winterlichen Schneedecke ab, wird weniger Energie ins Weltall reflektiert und anstatt dessen von der schneefreien Erdoberfläche absorbiert. Dieser zusätzliche Energieeintrag trägt zu einer Erwärmung der Erde bei und ist (wie bereits beschrieben) ein positiver Rückkopplungseffekt.

Für die Bio- und Hydrosphäre ist die winterliche Schneebedeckung wesentlich. Über den Winter wird Wasser in der Schneedecke zurückgehalten. Dieses wird durch die Schneeschmelze langsam wieder freigegeben. Das Schmelzwasser kann damit gut in den Untergrund eindringen und reichert die Böden

und das Grundwasser an. Schneearme Winter bereiten daher oft Probleme für die Landwirtschaft und die Wasserversorgung. Weiters schützt die winterliche Schneedecke das Abstrahlen der gespeicherten Bodenwärme. Die Vegetation wird vor dem Frost geschützt (ZAMG 2011f).

Sowohl in Gebirgsregionen als auch in polaren Breiten ist der Erdboden bis auf eine dünne Oberflächenschicht im Sommer, dauerhaft gefroren, der sogenannte *Permafrost*. Generell kann man zwei Arten von Permafrost unterscheiden; den oft mehrere hundert Meter mächtigen und häufig kontinuierlich auftretenden Permafrost der hohen Breiten (Arktis und Antarktis) und den oft nur einige Meter mächtigen und meist diskontinuierlich (örtlich) auftretenden Permafrost der Hochgebirge. Auf der Nordhalbkugel weisen immerhin 25% der Landmassen Permafrost auf (Alaska, Kanada, Ostsibirien, Hochland von Tibet). Die Verteilung und Veränderung von Permafrost werden primär durch die klimatischen Bedingungen bestimmt. Eine geringe Veränderung des Klimas führt zu einer deutlichen Änderung der Permafrostbedingungen. Dies macht den Permafrost zu einem wichtigen Klimaindikator. Neben der Lufttemperatur und der Strahlung ist besonders die Schneedecke durch ihre isolierende Wirkung ein Faktor, der zur Erhaltung der Permafrostschicht beiträgt (ZAMG 2011f).

Aufgrund der globalen Erwärmung tauen Permafrostböden vermehrt periodisch oder dauerhaft auf. Die maximale Ausdehnung der Fläche mit saisonal gefrorenem Boden hat in der Nordhemisphäre seit 1990 um etwa 7% abgenommen, bei einer Abnahme von bis zu 15% im Frühjahr (IPCC 2007a: 8). In polaren Regionen sind Häuser und Infrastruktur im Permafrost verankert. Durch das Auftauen werden die Böden weich und schlammig. Straßen, Ölpipelines und Häuser sinken ein. Der Zugang zu nördlich gelegenen Ortschaften auf dem Landweg wird dadurch bei weiterer Erwärmung erheblich erschwert. Ganze Wälder knicken um, weil sie im aufgeweichten Untergrund keinen Halt mehr finden. Neben den Auswirkungen auf die Infrastruktur und die Landbeschaffenheit speichert der Permafrost auch erhebliche Mengen an Kohlenstoff im Boden. Schätzungen zufolge enthalten die oberen Schichten mehr organischen Kohlenstoff als die gesamte Atmosphäre. Das Auftauen des Permafrosts führt dazu, dass dieser Kohlenstoff in Form von Treibhausgasen freigesetzt wird, was einen positiven Rückkopplungseffekt auf die globale Erwärmung hat. Die Abschätzungen über das Ausmaß des Auftauprozesses in Sibirien, Kanada und ähnlich weit nördlich gelegenen Regionen variieren. Belegt ist, dass sich seit 1899 die Grenze des Permafrosts am Yukon in Kanada um 100 km polwärts zurückgezogen hat und ein ähnliches Ausmaß auch an anderen Orten zu erwarten ist oder bereits vorgefunden wurde. Auch aus der Mongolei und Sibirien (Jakutien) wird Ähnliches berichtet. Vorteile des Rückgangs der Permafrostgebiete liegen in der aber nicht kurzfristig umzusetzenden Nutzbarmachung von diesen Flächen für die Landwirtschaft (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 60, Wikipedia 2011c, IPCC 2007a: 30, Michler 2010: 224-225).

4.4 Abschmelzen der kontinentalen Eisschilde in Grönland und der Antarktis

Aufgrund ihrer enormen Größe bestimmen die Eisschilde den Zustand des globalen Klimas wesentlich mit. Dabei kommt der Massenänderung (Zuwachs oder Schmelze) große Bedeutung zu. Einerseits hat die Größe der Eisfläche einen Einfluss auf den Energieeintrag an der Erdoberfläche (Albedoeffekt) und andererseits wird durch Veränderungen des Inlandeises der Meeresspiegel beeinflusst.

Die mächtigsten Eiskappen der Welt bedecken Grönland und vor allem die Antarktis. Die Eiskappen sind dabei nicht auf die Gebirgstäler beschränkt sondern nehmen praktisch die gesamte Landoberfläche ein. Nur einzelne Gebirgsgipfel – die sogenannten Nunatakern – überragen die Gletschermasse. Die heutigen Eisschilde sind geologisch relativ jung. Das grönländische Festlandeis ist überhaupt ein Überbleibsel der letzten Eiszeit ³² (wurde aber erstmals vor rund fünf Mio. Jahren aufgebaut) während das Festlandeis der Antarktis älter ist, und seit rund 25-30 Mio. Jahren besteht (vgl. auch Punkt 2.4). Auch die Eisschilde sind dynamische Gebilde. Sie sind nicht stationär, sondern bewegen sich auch im zentralen Akkumulationsgebiet einige Zentimeter bis wenige Meter im Jahr. An den Randzonen bilden sich schmale Zungen (Eisströme, Ausflussgletscher), die ins Meer kalben, in ein Eisschelf münden oder am Festland enden. Die Maximaltiefen findet man im zentralen Akkumulationsgebiet der Eismasse. In der Ostantarktis erreicht das Eis eine Mächtigkeit von nahezu 5.000 Meter, auf Grönland immerhin noch über 3.000 Meter. ³³ Eine Übersicht über die Eisschilde bietet die folgende Aufstellung:

Tabelle 4: Globale Eisschilder

	Antarktis¹⁾	Grönland
Fläche des Eisschildes	14,0 Mio. km ²	1,7 Mio. km ²
Eismasse	30,0 Mio. km ³	2,9 Mio. km ³
Maximale Eisdicke	~4.800 Meter	~3.400 Meter
Potential Meeresspiegelanstieg ²⁾	61,1 Meter	7,2 Meter
Massenverlust jährlich ⁴⁾	~152km ³ (?)	~240km ³)

¹⁾ West- und Ostantarktis

²⁾ bei vollständigem Abschmelzen

³⁾ jährlich seit 2004

⁴⁾ Der Massenverlust des grönländischen Eisschildes ist gesichert, bei dem der Antarktis besteht aber Unsicherheit, da Akkumulation in den Kernbereichen und Schmelzprozesse in den Randbereichen eine geschlossene Massenbilanz erschweren (ZAMG 2011h, Wikipedia 2011c);

Quelle: ZAMG 2011h, Wikipedia 2011c

Wenn auch kurz- und mittelfristig von den kontinentalen Eisschilden auf Grönland und in der Antarktis kein Risiko ausgeht, da der (vollständige) Abschmelzprozess Jahrhunderte bis Jahrtausende benötigt, trägt eine negative Massenbilanz kurzfristig zum Anstieg des Meeresspiegels bei. Dabei haben die Eisverluste in Grönland und der Antarktis (vor allem der Westantarktis) sehr wahrscheinlich zum Meeresspiegelanstieg zwischen 1993 und 2003 beigetragen. Die *Fließgeschwindigkeit* einiger grönländischer und antarktischer Gletscher, die Eis aus dem Inneren der Eisschilde ableiten, ist *angestiegen*. ³⁴ Der damit verbundene Massenverlust ist häufig auf die Ausdünnung, den Abbau oder den Verlust von Schelfeis oder den Verlust einer schwimmenden Gletscherzunge zurückzuführen - Ein solcher dynamischer Eis-

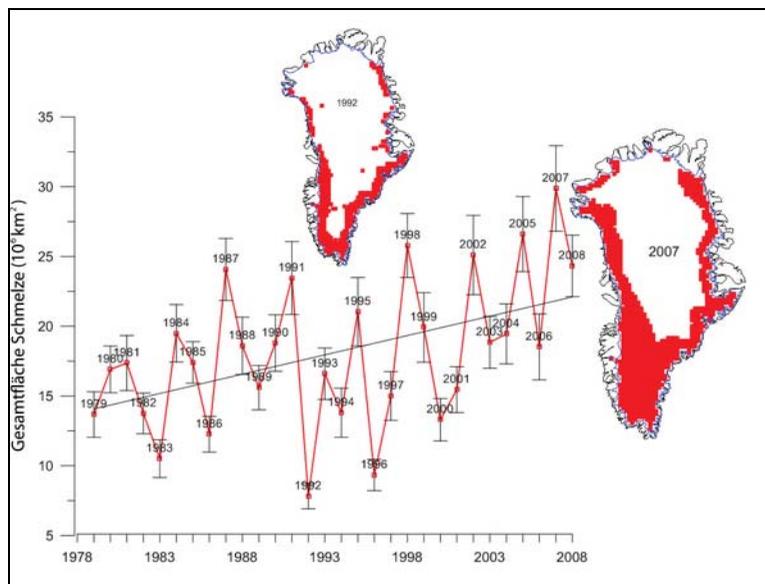
32. In den Eis-Bohrkernen wurden DNA-Spuren von Pinien, Eiben und Erlen sowie von Schmetterlingen und anderen Insekten gefunden. Dies lässt darauf schließen, dass der Eisschild vor rund 125.000 Jahren während des Eem-Interglazial zumindest in Südgrönland abgeschmolzen war. Damals herrschten ca. um 5°C wärmere Verhältnisse als heute (Wikipedia 2011f).

33. Das enorme Gewicht der Eismasse hat den antarktischen Kontinentalsockel teilweise unter das Meeresspiegel gedrückt.

verlust reicht aus zur Erklärung des größten Teils des Netto-Massenverlustes in der Antarktis und ungefähr der Hälfte des Massenverlustes in Grönland. Der Rest des Massenverlustes in Grönland ist entstanden, weil die Verluste durch das Abschmelzen größer waren als der Zuwachs durch Schneefall. Letzterer Effekt, also oberflächliche Schmelzvorgänge, spielen bei der antarktischen Eiskappe, mit Ausnahme der küstennahen, wärmeren Gebiete, eine vernachlässigbare Rolle (IPCC 2007a: 7, ZAMG 2011h).

Die zeitliche Entwicklung der schmelzenden Flächen des grönländischen Eisschildes zeigt Abbildung 24. Seit den 1980er Jahren zeigt sich ein eindeutiger Trend in Richtung Zunahme der räumlichen Ausdehnung von Flächen mit oberflächlichen Schmelzvorgängen.

Abbildung 24: Gesamtfläche der Schmelze in Grönland seit 1978



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Steffen u.a. 2008)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/5-1-3_Abb1_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=600&imgHeight=454

Die Situation der Antarktis ist prinzipiell dieselbe. Viele ihrer Eisströme münden in ein Eisschelf. Bei einem Eisschelf handelt es sich um ein einige hundert Meter bis wenige Kilometer dickes, schwimmendes Eis, das fix mit dem Festlandeis verbunden ist. Das Ende eines Eisschelfes bildet eine nahezu vertikale Eiswand, die über den Prozess des Kalbens an Masse verliert. Das „Kalben“ unterliegt Perioden unterschiedlich hoher Kalbungsraten. Sehr hohe Kalbungsraten, die bis zu einem völligen Kollaps des gesamten Eisschelfs führen, konnte man in den letzten Jahrzehnten vor allem auf der antarktischen Halbinsel beobachten. So zerbrach im Februar 2002 das Jahrtausende alte Larsen-B-Eisschelf vor der

34. Obwohl die Oberfläche der Eisschilde kalt ist, ist die Eisbasis generell wärmer und erreicht an manchen Stellen den Druckschmelzpunkt. Das dann erzeugte Schmelzwasser kann wie ein Schmierfilm wirken und die Eisbewegung stark beschleunigen. Auch die am Grund des Eises entdeckten subglazialen Seen nehmen Einfluss auf die Eisdynamik (Wikipedia 2011e).

westantarktischen Halbinsel auf spektakuläre Weise in tausende Stücke. Mittels Satellitenbeobachtung konnte der Kollaps dokumentiert werden.

Abbildung 25: Abbruch des Larsen-B-Eisschelfs im Jahr 2002



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Turner u.a. 2009)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/5-1-1_Antarktis_Abb7_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=599&imgHeight=259

Vorsichtige Prognosen zeigen, dass der grönländische Eisschild und die Westantarktis bei fortschreitender Erwärmung *Anlass zu Sorge geben*, während die Ostantarktis *robuster* gegen den im 21. Jahrhundert zu erwartenden Temperaturanstieg zu sein scheint. Modellrechnungen ergaben, dass bei einer Erwärmung um lokal 3°C (die schon bei einer Erwärmung um global weniger als 2°C erreicht werden könnte) wahrscheinlich das gesamte Grönland-Eis allmählich abschmelzen wird. Dies könnte den Meeresspiegel um bis zu 7 Meter anheben. Dabei spielt eine verstärkende Rückkopplung eine zentrale Rolle: Sobald der Eispanzer dünner wird, sinkt seine Oberfläche in niedrigere und damit wärmere Luftschichten ab, das den Abschmelzprozess weiter beschleunigt. Auch wärmeres Ozeanwasser, wie in Südgrönland beobachtet, hat auf die Abschmelzdynamik *von unten* großen Einfluss und beschleunigt aktuell den Abbau.

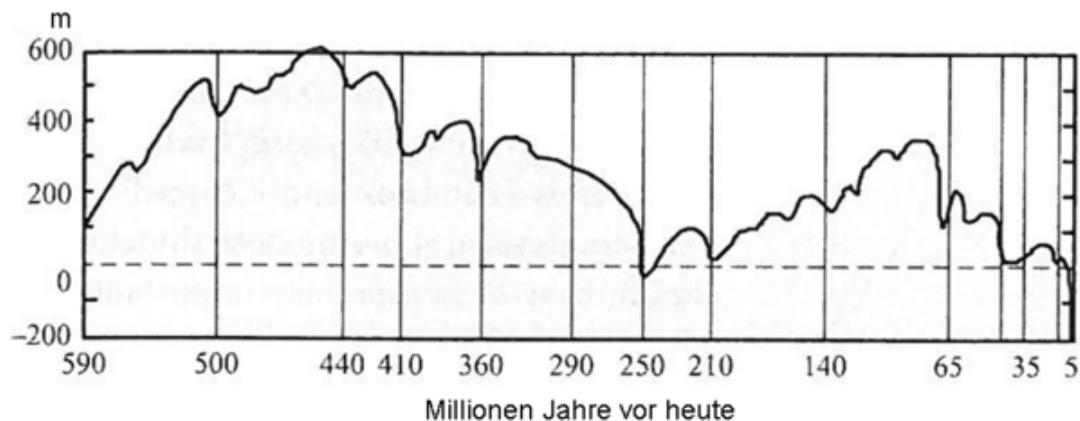
Die ostantarktische Eismasse unterscheidet sich vom Grönland-Eis dadurch, dass sie praktisch überall deutlich unter dem Gefrierpunkt liegt - in der Eismitte herrschen Durchschnittstemperaturen von minus 55°C. Daran ändert sich auch bei fortschreitender Klimaerwärmung um ein paar Grade nichts. Im Gegenteil, durch höhere Niederschläge könnte es sogar Eiszuwächse für die Ostantarktis geben. Kritischer Punkt sind auch hier die vorgelagerten Eisschelfe. Der Eisschild könnte nicht am Land schmelzen, sondern im Kontakt mit wärmerem Ozeanwasser. Letzteres gilt umso mehr für die Westantarktis und die antarktische Halbinsel. Beide Regionen liegen teilweise auch unter Meeresniveau und sind zu großen Teilen von marinen Eisschildern bedeckt (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 60-62, ZAMG 2011h).

4.5 Globaler Anstieg des Meeresspiegels

Mehr als zwei Drittel der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt. Die Wassermenge der Ozeane wird auf rund 1.338 Mrd. km³ geschätzt. Dieser gewaltige Wasserkörper verfügt über ein starkes Beharungs- und Ausgleichvermögen, ist also thermisch träge. Dennoch wirkt sich der Klimawandel auch auf die Meere - wenn auch mit einer zeitlichen Verzögerung - aus (Michler 2010: 198, IPCC 2007a:).

Eine der wichtigsten physikalischen Folgen einer globalen Erwärmung ist ein Anstieg des Meeresspiegels. Erdgeschichtlich betrachtet sind es in erster Linie die Veränderungen der Kontinente und Ozeanbecken durch die Plattentektonik, die zu Schwankungen zwischen 600 m über und mehr als 100 m unter dem heutigen Niveau geführt haben. Die *meiste Zeit* hindurch war der Meeresspiegel jedoch *deutlich höher als heute*.

Abbildung 26: Rekonstruktion der Veränderungen des mittleren globalen Meeresspiegels während der letzten 600 Millionen Jahre



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Hallam 1984)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/5-3_Abb1_gr.png&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=600&imgHeight=246

Das aktuelle Eiszeitalter seit etwa 30 Mio. Jahren ist durch die Ablagerung von großen Mengen von Eis auf den Kontinenten während der Kaltzeiten (Glaziale) und deren Abschmelzen in den Warmeperioden (Interglaziale) geprägt.³⁵ Dadurch kommt es zu drastischen Änderungen des globalen Gesamtvolumens von flüssigem Wasser. Auf dieser kürzeren Zeitskala reichen die Schwankungen von immerhin noch minus 120 m bis plus 5 m gegenüber dem heutigen Niveau. Im Gegensatz zum vorherrschenden höherem Niveau auf der weit zurückreichenden Skala ist *im Eiszeitalter ein niedrigerer Meeresspiegel als heute typisch*.

35. Gegenwärtig existieren auf der Erde nur die Eisschilde der Antarktis und Grönlands. Letzteres ist ein Überbleibsel der letzten Eiszeit (und könnte sich unter heutigen Klimabedingungen nicht mehr aufbauen.) Eiszeitlich bedeckte außerdem der Laurentidische und der Kordilleren-Eisschild große Teile Nordamerikas, der Fennoskandische Eisschild Nordeuropa, der angrenzende Barents-Kara-Eisschild Teile Nordasiens, sowie der Patagonische Eisschild den Süden Südamerikas (Wikipedia 2011e).

Der „rasche“ Anstieg des Meeresspiegels während des Übergangs von der letzten Eiszeit zum gegenwärtigen Holozän in den letzten 25.000 Jahren hat auch Einfluss auf die Menschheitsgeschichte genommen. Mittlerweile geflutete Landbrücken wie die Beringstraße (zwischen Alaska und Sibirien) begünstigten die Ausbreitung des Menschen. Bis vor etwa 6.000 Jahren stieg im Zuge des Abschmelzens der Inlandvereisungen in Nordamerika und Nordeurasien der Meeresspiegel um durchschnittlich *einen Meter pro Jahrhundert* mit Spitzenwerten von bis zu vier Metern. Danach wurde die Anstiegsrate geringer. In den folgenden 4.000 Jahren sorgte die weitere langsame Anpassung der beiden verbleibenden Inlandeismassen der Antarktis und Grönlands an die neuen Klimaverhältnisse, zusammen mit der *thermischen Ausdehnung* des sich erwärmenden Ozeanwassers, für einen weiteren Anstieg um etwa 2,5 m (entspricht 62 cm pro Jahrhundert) – und das trotz des inzwischen stabilen bis leicht rückläufigen Temperaturtrends der Atmosphäre nach dem frühholozänen Maximum. Seit rund 2.000 Jahren ist der globale Meeresspiegel bis zum frühen 19. Jahrhundert kaum noch gestiegen. Trotzdem kam es in den verschiedenen Küstenregionen zu ganz unterschiedlichen Vorstößen oder Rückzügen des Meeres, die ganz unterschiedliche Ursachen hatten. Dazu zählen Sturmfluten, langsame Landabsenkungen, Wasserentnahmen aus dem Untergrund etc. Regional sehr deutlich wirkt sich die *postglaziale, isostatische Ausgleichsdynamik* auf Küstengebiete aus. So haben sich beispielsweise die zentralen Gebiete des ehemaligen fennoskandischen Eisschildes seit seinem Abschmelzen um mehr als 200m gehoben. Diese Hebung ist die Reaktion der Erdkruste auf die nicht mehr vorhandene Auflast von zwei bis drei Kilometer dickem Eis (ZAMG 2011i).

Erst im 19. Jahrhundert wurde das Pegelnetz in den Seehäfen global und erst in den letzten Jahrzehnten dicht genug, um regionale Unterschiede des Meeresspiegels überhaupt festzustellen. Seit den 1990er Jahren ist per Satellitenbeobachtung auch eine global präzise Erfassung des Meeresspiegels möglich. Es zeigt sich aber auch dass der Meeresspiegel kein flaches Kontinuum ist, sondern Höhendifferenzen im Meterbereich bestehen. Räumlich und zeitlich variable Phänomene wie das Gravitationsfeld der Erde und Meeresströmungen formen die Topografie der Ozeanoberfläche ebenfalls mit.

Seit 1870, also in den letzten 140 Jahren, ist der Meeresspiegel (durchaus unterschiedlich je Dekade) um etwa 22,5cm angestiegen. Dabei hat sich die Anstiegsrate in den Jahren 1993 bis 2003 weiter vergrößert, auf ungefähr 3,1mm pro Jahr (IPCC 2007a: 7). Dieser Anstieg war zu groß um nur natürliche Ursachen zu haben.

Die fünf Komponenten des jüngsten Meeresspiegelanstiegs sind erstens die thermische Ausdehnung der Weltmeere (seichter und tiefer Ozeanschichten), zweitens der Zufluss der schmelzenden Gletscher und Eiskappen. Drittens der Zufluss der schmelzenden Eisschichten Grönlands und der Antarktis und schließlich viertens der Zufluss der Wassermengen, die kurz- bis mittelfristig auf dem Festland gespeichert bzw. freigegeben werden (Schneedecke, Permafrost, Stauseen etc.).³⁶ Anteilsmäßig macht die thermische Ausdehnung und die Schmelze von Gletschern und anderen großen Eismassen rund vier Fünftel des gesamten Anstieges aus. Dies ist auch insofern plausibel als die Weltmeere mehr als 80% der dem Klimasystem zugeführten Wärme (bisher) absorbiert haben (IPCC 2007a: 5,7, ZAMG 2011). Zur Abschätzung des zu erwartenden, global gemittelten Meeresspiegelanstieges im 21. Jahrhundert,

36. Der Rückgang des arktischen Meereises kann *nicht* zum Meeresspiegelanstieg beitragen, da schwimmendes Eis die gleiche Masse verdrängt, die es selbst beinhaltet (Archimedisches Prinzip).

wird auf die IPCC-Abschätzungen (aufbauend auf den Emissionszenarien) zurückgegriffen: Der Meeresspiegelanstieg wird sich weiter beschleunigen. Vor allem weil sich die seichten Ozeanschichten weiter erwärmen und *ausdehnen*. Ein weiterer Beitrag stammt von den schmelzenden Gletschern und Eiskappen. Der große Anteil letzterer wird gegen Ende des Jahrhunderts aufgrund der Abnahme der noch vorhandenen Reserven verloren gehen. Die thermische Ausdehnung wird zur Hauptkomponente des Meeresspiegelanstieges werden. Große Unsicherheiten bestehen beim Beitrag der Inlandvereisungen Grönlands und der Antarktis. Diese könnten auch größere Beiträge zum Anstieg beitragen, vor allem dann, wenn durch das Kalben der Ausflussgletscher negative Massenbilanzen entstehen. Auch das „Aufschwimmen“ des unterhalb der Meeresoberfläche aufsitzenden westantarktischen Eisschildes ist nicht auszuschließen. Das IPCC setzt den mittleren Meeresspiegelanstieg zwischen 18 und 59cm an. Aufgrund neuerer Untersuchungen dürfte diese Abschätzung eher die Untergrenze für den tatsächlichen Anstieg bilden: Letztere setzen den Anstieg in einer Bandbreite von 50cm bis zu zwei Metern fest (ZAMG 2011i).

Der Anstieg des Meeresspiegels hat gravierende Auswirkungen auf die Küsten und deren Ökosysteme. Die Auswirkungen auf die Flussdeltas werden dabei am größten sein. Das Auftreten von 100-jährigen oder 1.000-jährigen Flutwellenereignissen wird sich dem Meeresspiegelanstieg entsprechend in diesen Regionen häufen. Weltweit leben etwa 160 Millionen Menschen in Regionen, die sich weniger als einen Meter über den Meeresspiegel erheben. Die Umsiedlung der betroffenen Bevölkerung und die Errichtung von Küstenschutzbauten sind aufwändig und kostspielig, bedeuten gewaltige technische Herausforderungen. Weiters besteht durch Anstieg des Meeresspiegels die Gefahr, dass weltweit in den Küstenregionen und auf den kleinen Inseln salziges Meerwasser in die küstennahen Süßwasserressourcen eindringen kann (Michler 2010: 198-199, ZAMG 2011i).

4.6 Änderung der Meeresströmungen - Abschwächung des Nordatlantikstromes?

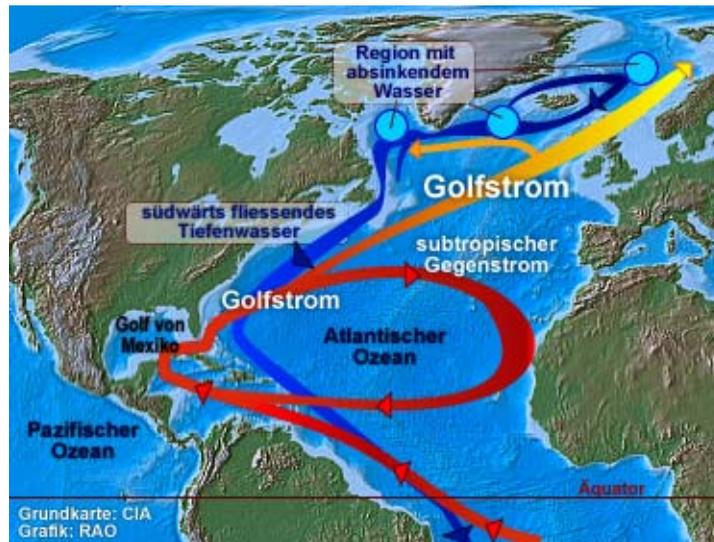
Die Meeresströmungen sind für den Transport fühlbarer Wärme (und Kälte) auf der Erde von ähnlich großer Bedeutung wie die großen globalen Windsysteme. Man nennt das globale marine Förderband auch thermohaline Zirkulation, da sie von Dichteunterschieden, wie sie bei abweichenden *Salzgehalten und/oder Wassertemperaturen* auftreten, angetrieben werden (Michler 2010: 80-81).

Der Nordatlantikstrom, als Teil des globalen Förderbandes, bringt fühlbare Wärme aus tropischen Regionen nach Nordwesteuropa und trägt damit maßgeblich zum relativ milden westeuropäischen Klima bei.

Der Kreislauf der Meeresströmungen im Atlantik wird von Meerwasser angetrieben, das in den Nordatlantik strömt, sich dort abkühlt, mit Salz anreichert (und damit spezifisch schwerer wird) und absinkt – die sogenannte nordatlantische Tiefenwasserbildung. Begünstigt wird dies im Winter noch durch die Neubildung von Meereis, da das Eis nur wenig Salz aufnehmen kann und sich das umgebende Meerwasser dadurch mit Salz weiter anreichert. Riesige, relativ salzhaltigere, abgekühlte Wassermassen sinken so im europäischen Nordmeer und in der Labradorsee in die Tiefe und ziehen - gewissermaßen wie ein Badewannenabfluss - warmes Wasser in den Nordatlantik. Das abgesackte Wasser strömt in zwei bis drei Kilometern Tiefe zurück in südliche Breitengrade. So entsteht eine gigantische Umwälzbewegung

im Atlantik, die etwa 15 Millionen Kubikmeter Wasser pro Sekunde (!) bewegt und für die nördlichen Breiten wie eine Warmwasserzentralheizung funktioniert (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 67).

Abbildung 27: Golfstrom – Meeresströmung im Atlantik



Quelle: RAO online

<http://www.raonline.ch/pages/edu/cli2/golfstrom01.html>

Strömt in den potenziellen Absinkregionen mehr Süßwasser ein, sei es aus Flüssen oder von abschmelzenden Gletschern, erwärmt sich das Meerwasser oder verstärken sich die Niederschläge in hohen Breiten *verringert sich seine Dichte*. Bei einer globalen Erwärmung von drei bis fünf Grad Celsius könnte der Kippunkt überschritten werden und die Strömungen in die Tiefe aussetzen. Unter diesen Bedingungen würde der Nordatlantikstrom abreißen (oder auch nicht mehr so weit nach Norden reichen), der Meeresspiegel im Nordatlantikraum plötzlich (um bis zu einem Meter) steigen und sich der tropische Niederschlagsgürtel verschieben.³⁷ Für Westeuropa – die Britischen Inseln, Island und Skandinavien, weniger für Mitteleuropa, hieße das eine plötzliche Abkühlung, vor allem in den Wintermonaten. Die weit verbreitete Vorstellung einer „neuen Eiszeit“ ist jedoch falsch. Die globale Erwärmung würde durch den reduzierten Wärmetransport im Ozean nur geringer ausfallen als prognostiziert und hätte diesen Effekt binnen weniger Jahrzehnte wieder kompensiert (PIK 2011).

Tatsache ist, dass sich die nordatlantische Tiefenströmung in den letzten Jahrzehnten *abgeschwächt* hat. Diese Beobachtung wird auch dadurch gestützt, dass der Meeressalzgehalt abgenommen hat (IPCC 2007a: 9, Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 68). Andere Untersuchungen kommen hingegen zum

37. In den vergangenen 120.000 Jahren ist der Nordatlantikstrom mehrfach unterbrochen gewesen (zuletzt vor rund 11.000 Jahren und wiederum vor rund 8.200 Jahren). Unter nacheiszeitlichen Bedingungen kam die warme Nordatlantikströmung mutmaßlich durch Eisabrutschungen und/oder Schmelzwassereinstrom tatsächlich zum Erliegen und führte zu einer (vorübergehenden) Fortsetzung der eigentlich gerade zu Ende gehenden Eiszeit (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 67).

Schluss dass die globale Erwärmung sogar eine Verstärkung der Meeresströmungen zur Folge haben kann.

Trotz der Anzeichen der Klimaerwärmung wird deshalb die Stabilität der thermohalinen Atlantikzirkulation von den Wissenschaftlern für das 21. Jahrhundert, trotz einer zu erwartenden Abschwächung des Nordatlantikstromes, *nicht* in Zweifel gezogen. Gleichzeitig treten starke natürliche, zyklische Schwankungen der Stärke des Nordatlantikstromes unabhängig vom anthropogenen Klimasignal auf (IPCC 2007a: 16-17, Wikipedia 2011c).

4.7 Wetterextreme

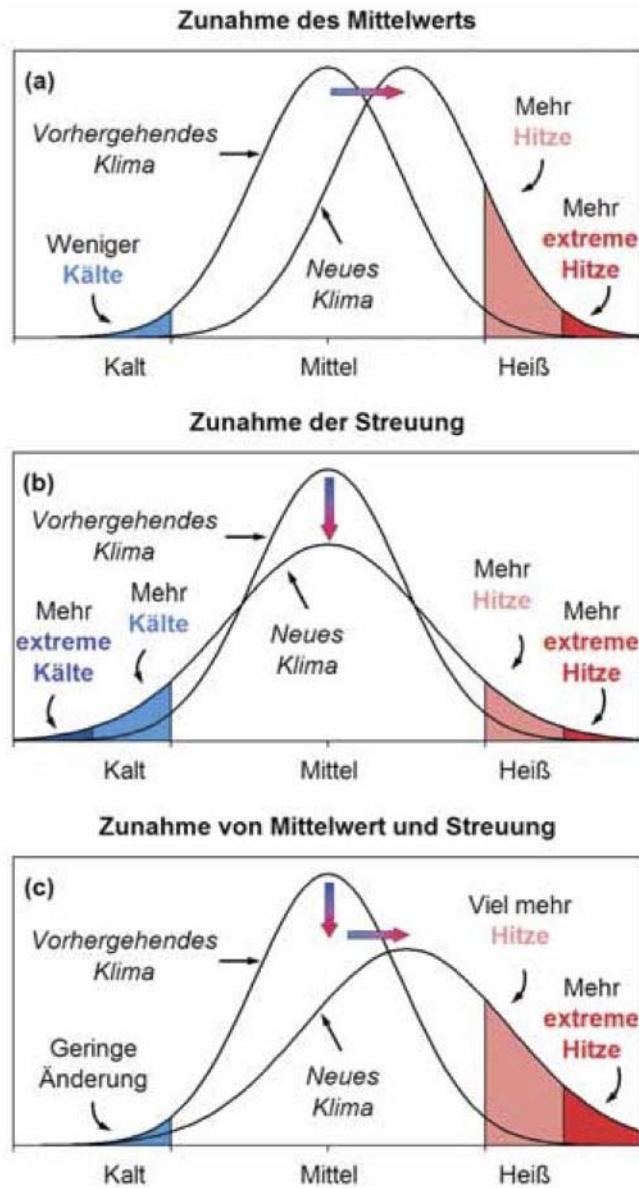
Ereignisse werden als extrem bezeichnet wenn diese mit besonders *hohen oder niedrigen Intensitäten* einhergehen. Wetterextreme sind beispielsweise Hitzewellen, Überschwemmungen, Stürme oder Schwergewitter. Sie sind jener Teil des Klimageschens, die von vielen Menschen „hautnah“ empfunden werden. Subjektiv haben sich solche Extremereignisse in den letzten Jahren gehäuft: Die Flutkatastrophen in Pakistan und Australien im Sommer, Herbst und Winter 2010 und die katastrophale Hitzewelle mit Torf- und Waldbränden in Russland im selben Jahr, 2005 der verheerende US-Hurrikan Katrina. Aber auch Mitteleuropa ist von Wetterkapriolen heimgesucht worden: Der Winterorkan Kyrill 2007, der Hitzesommer 2003, Jahrhunderthochwasser 1999, 2002 und 2005, und die Lawinenkatastrophe von Galtür 1999 (ZAMG 2011j).

Der subjektive Befund einer Zunahme von Wetterextremen ist jedoch *kaum objektivierbar* und damit statistisch insignifikant. Einzelereignisse, wie sie Elementarereignisse darstellen können prinzipiell nicht monokausal auf die Klimaerwärmung zurückgeführt werden. Die Klimaerwärmung ist bislang (noch) zu gering und Extremereignisse sind per Definition selten. Und über kleine Fallzahlen lassen sich kaum gesicherte statistische Aussagen machen. Erst wenn längere Datenreihen verfügbar sind, werden sich statistisch haltbare Aussagen machen lassen. Zudem tritt bei manchen Ereignissen auch das Problem der zuverlässigen Erfassung auf: so werden z.B. Stürme, Hochwässer, Lawinen etc. in der Regel nur dann verzeichnet, wenn sie Schaden anrichten, oder mindestens in Bereichen niedergehen, wo sie potentiell Schaden hätten anrichten können. Extreme Ereignisse in unbesiedelten Gebieten wurden und werden in der Regel nicht oder selten erfasst (ZAMG 2011j).

Obwohl also Aussagen über die Zunahme von klimawandelbedingten Wetterextremen *bis dato* also nicht zuverlässig getroffen werden können, ist es plausibel, dass die zu erwartenden Verschiebungen der klimatischen Mittelwerte und der Streuung auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Extremwerten erhöht. Der UN-Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) geht beispielsweise von einer Zunahme von Wärmeperioden bzw. Hitzewellen („sehr wahrscheinlich“) sowie der Starkniederschlagsereignisse („sehr wahrscheinlich“) im 21. Jahrhundert aus (IPCC 2007a: 8).

Der Klimawandel wirkt sich damit auf die Frequenz, Intensität und das Verbreitungsmuster von Extremwetterereignissen aus. Bereits kleine Änderungen des Mittelwertes und/oder der Streuung sollte zu einem überproportionalen Anstieg bei den Extremwerten führen, wie die folgende Abbildung zeigt (Kreft 2009):

Abbildung 28: Möglichkeit der Änderung der Häufigkeitsverteilung durch den Klimawandel



Quelle: landwetter.net

http://www.landwetter.net/index.php?option=com_content&view=article&id=55:klima&catid=43:klima&Itemid=65

Auf der Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten lässt sich deshalb folgern, dass in einem wärmeren Klima Hitzewellen an Häufigkeit und Intensität zunehmen und Kältewellen abnehmen werden. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts könnten Hitzesommer wie 2003 in Europa zur Normalität zählen. Aber auch das Niederschlagsmuster wird sich verändern. Physikalisch gesehen ist eine Zunahme der Niederschläge in einem wärmeren Klima zu erwarten, da bei höheren Temperaturen mehr Wasser verdunstet und damit auch mehr Niederschlag fallen muss. Damit wird der ganze Wasserkreislauf beschleunigt. Für jedes Grad Erwärmung kann die Atmosphäre um ca. sieben Prozent mehr Wasserdampf enthalten.³⁸ Gleichzeitig steigt auch die Verdunstungsrate an, deshalb geht auch bei konstanten mittleren Niederschlägen die Bodenfeuchte schneller verloren und Dürren werden paradoxerweise wahrscheinlicher (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 73-74).

4.7.1 Dürren und Überschwemmungen als Folge veränderter Niederschlagsmengen

Neben der Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfes in einem wärmeren Klima führt diese auch zu einer veränderten Verteilung des Niederschlags: Niederschläge fallen in größerer Intensität, in kürzeren Intervallen und/oder verteilen sich anders auf die Jahreszeiten. In den letzten Jahrzehnten wurden weltweit bedeutende Veränderungen der Niederschlagsmengen registriert: Höhere Niederschläge entfielen besonders auf Kanada, Nordeuropa, Westindien und Ostaustralien. Rückgänge von bis zu 50% wurden besonders in West- und Ostafrika und im Westen Lateinamerikas gemessen. Niederschlagsbedingte Wetterextreme wie Überschwemmungen oder Dürren haben wahrscheinlich bereits im 20. Jahrhundert zugenommen. Sehr wahrscheinlich wird sich dies im laufenden Jahrhundert fortsetzen (Wikipedia 2011c, IPCC 2007a: 5, 8).

Aufgrund der fehlenden Zeitreihen und der per Definition selten auftretenden Ereignissen gibt es aber auch bei Hochwasser keinen signifikanten Trend, der aus den Daten ablesbar wäre: Eine weltweit 195 Flüsse umfassende Studie von 2005 zeigt für 27 davon eine Zunahme an Überschwemmungen, für 31 eine Abnahme, für die restlichen 137 jedoch keinen klaren Trend. Eine andere Studie aus 2002 kommt aber auch zu gegenläufigen Ergebnissen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass menschliche Eingriffe in die natürlichen Flussverläufe ebenfalls einen großen Einfluss auf Häufigkeit und Schwere von Überschwemmungen haben können und dass eine zunehmende Ansiedlung von Menschen in Flussnähe den durch eine Überschwemmung verursachten Schaden weiter erhöhen kann (Wikipedia 2011c).

4.7.2 Auswirkungen auf die Häufigkeit von tropischen Wirbelstürmen

Obgleich kein einzelner Wirbelsturm direkt mit dem Klimawandel in Verbindung gebracht werden kann ist ein Zusammenhang mit der Klimaerwärmung naheliegend. Von seinen Entstehungsbedingungen her korreliert die Energie und damit Zerstörungskraft der Stürme stark mit der Wassertemperatur. Beide sind in den vergangenen 30 Jahren deutlich angestiegen. Kontrovers wird diskutiert ob der beobachtete Anstieg überwiegend vom Menschen verursacht oder (auch) natürlich, weil zyklisch, bedingt

38. Dagegen war das Klima der letzten Eiszeit sehr trocken, wie der im Eis von Grönland und der Antarktis nachgewiesene stark erhöhte Staubgehalt der damaligen Luft belegt (Rahmstorf 2011a:142).

ist. Tropische Wirbelstürme – Hurrikane im Atlantik und Taifune im Pazifik beziehen ihre Energie aus dem Meer und entstehen nur über Meerwasser von mindestens 27°C. Nun sind die Wassertemperaturen der tropischen Ozeane in den vergangenen 50 Jahren um immerhin 0,5°C angestiegen – dies korreliert mit einer Energiezunahme der Hurrikane um ca. 70%. Auch der UN-Klimabeirat kommt zum Ergebnis, dass die Aktivität tropischer Wirbelstürme seit 1970 stark zugenommen hat und sich dies im 21. Jahrhundert fortsetzen wird (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 72-73, IPCC 2007a: 8, Wikipedia 2011c).

4.7.3 Vermehrte Hitzewellen als Folge der Klimaerwärmung

Der Sommer 2010 mit seinen riesigen Wald- und Torbränden in Russland hat das Katastrophenpotenzial aufgezeigt, das durch eine lang anhaltende Hitzewelle im Frühjahr und Sommer entstehen kann. Aber auch (kleinräumige) Waldbrände in den alpinen Regionen sind in den letzten Jahren vermehrt aufgetreten. *Nicht* von Menschen verursachte Waldbrände sind an sich natürliche Vorgänge, die unregelmäßig auftreten und wichtige Funktionen im Ökosystem Wald übernehmen – dies gilt für allem für nicht unter Nutzung stehende Wälder in den USA. Aber auch in den „künstlichen“ Wäldern Mitteleuropas ist sehr viel brennbare Biomasse (Stichwort Durchforstungsreserven) vorhanden. Neben dieser veränderten Bewirtschaftungspraxis trägt die Erderwärmung entscheidend zu verstärktem Auftreten von Waldbränden bei: Steigende Frühlings- und Sommertemperaturen, eine immer früher einsetzende Schneeschmelze (sofern überhaupt eine Schneedecke vorhanden ist) und längere Trockenperioden erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Waldbrand fördernden Wetterbedingungen (Wikipedia 2011c).

4.8 Auswirkungen auf Ökosysteme (Artensterben, Versauerung der Ozeane)

Klimaänderungen haben seit jeher tiefgreifende Auswirkungen auf Ökosysteme gehabt. Eine Temperaturerhöhung um mehrere Grad würde das Klima wahrscheinlich wärmer machen, als es seit Jahrmillionen gewesen ist. Eine Abschätzung der laufenden und zu erwartenden Klimaerwärmung lautet, dass unterhalb einer Erwärmung von 1°C die Risiken dabei vergleichsweise gering sind. Anfällige Ökosysteme reagieren jedoch bereits unter diesem Schwellenwert. Zwischen 1°C und 2°C Erwärmung liegen bereits signifikante und auf regionaler Ebene mitunter substanzielle Risiken vor. Über 2°C birgt die Erwärmung enorme Risiken für das Aussterben zahlreicher Tier- und Pflanzenarten sowie ganzer Ökosysteme, deren Lebensräume nicht mehr länger ihren Anforderungen entsprechen (Wikipedia 2011c).

Für den vierten Sachstandsberichtes des UN-Klimabeirates wurde weltweit eine Fülle von Studien ausgewertet, die signifikante Veränderungen in physikalischen oder biologischen Systemen aufzeigen.³⁹ Der größte Teil davon steht mit den Erwartungen über eine erwärmte Welt in Einklang. Eine der offenkundigsten Auswirkungen der Klimaerwärmung in den mittleren Breiten ist das zeitlich veränderte Auftreten der Jahreszeiten. Der Frühling und die Vegetationszeit beginnen früher und letztere verlän-

39. Mit über 28.000 Datensätzen zu biologischen Veränderungen ist Europa dabei deutlich überrepräsentiert. Für andere Regionen liegen deutlich weniger Datensätze vor (Wikipedia 2011c).

gert sich in die Spätherbstmonate. Damit im Zusammenhang stehen auch veränderte phänologische Zyklen von Pflanzen (Verfrühung der Blattentfaltung und Blüte im Frühjahr und verspätete Laubverfärbung im Herbst). Beobachtet werden auch das früher einsetzende Aufbrechen von See- und Flusseis sowie das verspätete Zufrieren im Winter.

4.8.1 Verschiebung der Klimazonen

Abgesehen von den mittleren Breiten sind aus biologischer Sicht die Tropengebiete dieser Welt jedoch den stärksten Auswirkungen ausgesetzt, weil sie historisch gesehen bislang den geringsten Schwankungen ausgesetzt waren. Damit ist auch deren Anpassungsfähigkeit sehr gering ausgeprägt. Bis 2100 droht auf bis zu 39% der globalen Landflächen das Entstehen völlig neuartiger Klimate, vor allem in den Tropen und Subtropen, gefolgt von den Polargebieten und Gebirgen. Die Tierwelt reagiert bereits jetzt mit einer zunehmenden Migration nordwärts- und bergaufwärts. Arten, die in Polargebieten oder im Hochgebirge leben und keine oder nur begrenzte Ausweichmöglichkeiten besitzen sind besonders vom Klimawandel betroffen (Wikipedia 2011c).

4.8.2 Verlust von Ökosystemen und Tier- und Pflanzenarten

Zwischen den globalen Temperaturen und der Biodiversität gibt es einen langfristigen Zusammenhang, der sich anhand von Fossilienfunden viele Millionen Jahre zurückverfolgen lässt. In Zeiten höherer Temperaturen war die Artenvielfalt sowohl im Meer als auch am Land *geringer* als in Zeiten niedriger Temperaturen. Dies deutet darauf hin, dass sich die globale Erwärmung durchwegs negativ auf die Biodiversität auswirken könnte. Umgekehrt hat sich die Evolution in Zeiträumen von tausenden (!) bis zehntausenden (!) Jahren aber auch als überaus anpassungsfähig an neue klimatische Bedingungen erwiesen. Kurzfristig sind in der Erdgeschichte bei raschen Klimawechseln Massensterben aufgetreten. Die einschneidendsten globalen Klimaänderungen zumindest der letzten einigen Jahrhunderttausende waren die Eiszeiten. Die stärksten Erwärmungen traten jeweils zum Ende dieser Eiszeiten auf. Sie betrug etwa 4-6°C über einen Zeitraum von 5.000 Jahren (nur lokal, etwa in Grönland, gab es raschere Klimawechsel). Nun droht der Mensch eine ähnliche Erwärmung innerhalb von 100 Jahren zu verursachen – fünfzig mal schneller. Dazu sind die Ökosysteme heute durch die menschliche Landnutzung stark fragmentiert, viele Arten und Spezies leben nur noch in eng begrenzten Naturschutzräumen. Deshalb sind klimatische Rückzugsgebiete knapp und viele Tier- aber auch Pflanzenarten stehen schon unter „normalen“ Klimabedingungen vor der Ausrottung (Rahmstorf 2011a, Rahmstorf/Schellhuber 2006: 75, Wikipedia 2011c).

4.8.3 Erwärmung und Versauerung der tropischen Meere

Die Erwärmung und Versauerung der tropischen Meere ist ein Paralleleffekt der steigenden Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre. Dabei hat das Meerwasser seit Beginn der industriellen Revolution rund ein Drittel der anthropogenen CO₂-Emissionen aufgenommen und sich zu einer bedeutenden CO₂-Senke entwickelt, die es zuvor so nicht gewesen ist. Das emittierte Kohlenstoffdioxid verbindet sich teilweise mit dem Wasser zu Kohlensäure. Dies senkt den pH-Wert des Meerwassers, es „versauert“. Dadurch wird es für Kalkbildner wie Korallen aber auch Muscheln schwerer Kal-

ziumkarbonat für die Schalenbildung anzureichern und einzulagern. Die Kalkneubildung der Korallenriffe wird behindert oder irreversibel geschädigt – die sogenannte Korallenbleiche. Seit den 1950er Jahren sind bereits 20% aller Korallenriffe zerstört worden. Der Zustand vieler anderer Bestände ist besorgniserregend (IPCC 2007a: 14, Wikipedia 2011g, c).

4.9 Wasserversorgung und Nahrungsangebot

Der Klimawandel wird zu erheblichen Veränderungen im Wasserkreislauf der Erde führen. Von Dürre betroffene Gebiete werden vor allem in den Tropen und Subtropen zunehmen. Damit einher geht die Verknappung von Wasserressourcen. An Küsten und auf Inseln ist bedingt durch steigende Meeresspiegelstände die Abnahme der Verfügbarkeit von Süßwasser durch das Eindringen von Salzwasser zu befürchten. Mit dem Wasserangebot ist auch die Ertragssicherheit der Landwirtschaft und somit die Ernährungssicherheit der Weltbevölkerung verbunden. Der Klimawandel führt zu einer Verschiebung von Vegetationszonen. Wetterextreme und Klimakapriolen können sich negativ auf die *Ertragssicherheit* auswirken. In den gemäßigten Breiten sind jedoch auch Ertragszuwächse möglich (IPCC 2007a: 34, Michler 2010: 220-221).

Die Wirkung des Klimawandels auf Kulturpflanzen und Nahrungsmittelерträge ergibt sich aus der Wirkung von Temperatur- und Niederschlagsänderungen und dem (mehr potenziell als tatsächlich realisierbaren) Düngungseffekts des höheren CO₂-Gehaltes, sekundär aus der Anpassungsfähigkeit der Landwirte (Anbausorten und -praktiken, Bewässerungspraxis etc.). Durch die globale Erwärmung dürften sich die Voraussetzungen für Landwirtschaft in den gemäßigten bis kalten Breiten eher verbessern (Kanada, Skandinavien, Russland). In den subtropischen und heute schon trockenen Gebieten muss dagegen mit Einbußen gerechnet werden, vor allem aufgrund von Hitze und Wassermangel. Besonders Nord- und Südafrika und weite Teile Asiens sind von starken Ertragsverlusten bei Getreide und Mais betroffen und damit „hochvulnerabel“. Die armen Länder des Südens zählen damit eher zu den Verlierern des Klimawandels.⁴⁰ Hinzu kommt, dass bereits die „normale“ Landnutzung die Ressourcen über die Maßen in Anspruch nimmt und nicht nachhaltig ist.

Wenn die Lebensgrundlagen eines Menschen in einer bestimmten Region in Gefahr sind, dann bleibt häufig nichts anderes als die Flucht und ein Ausweichen in sichere Gebiete. Diese klimabedingte Migration dürfte die Staaten weltweit vor große Herausforderungen stellen.

Aber auch die möglichen Ertragszuwächse in den Ländern der hohen nördlichen Breiten sind zunächst nur theoretisch, weil nur potenziell vorhanden. Günstigere klimatische Bedingungen müssen nicht unbedingt zu höheren Erträgen führen, zumal ein sich veränderndes Klima auch von größeren Ertragschwankungen begleitet sein dürfte (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 78, Michler 2010: 228-229, Wikipedia 2011c). Eine neuere Untersuchung zeigt, dass der Klimawandel der letzten 30 Jahre die Erträge global eher geschmälert hat. Mittels Modellrechnungen schätzten die Forscher zum Vergleich jene Erntemengen, die es gegeben hätte, wären die Schwankungen von Temperaturen und Nieder-

40. Unterernährung und Hunger entstehen zudem nicht primär durch Mangel an Nahrungsmitteln, sondern weil sich die lokale Bevölkerung (darunter viele Kleinbauern) die teuren Lebensmittel nicht leisten können.

schlagen auf dem Niveau von 1980 geblieben. Dabei zeigten sich Einbußen bei Nutzpflanzen wie Weizen und Mais. Keine Ernteeinbußen erlitten hingegen Sojabohnen und Reis (ORF.at 2011a).

4.10 Auswirkungen auf die Gesundheit

Die menschliche Gesundheit wird vom Klima direkt (z.B. Hitze oder Kälte) und indirekt (z.B. durch temperaturbedingte Veränderung der Ausbreitungsgebiete von Krankheitsüberträgern) beeinflusst. Die Weltgesundheitsorganisation WHO beziffert bereits heute die Anzahl der Todesopfer infolge der Klimaerwärmung auf mindestens 105.000 Menschen jährlich. Das Gros davon befindet sich in den armen Ländern des Südens. Prognosen über die Auswirkungen des Klimawandels auf diesem Gebiet sind jedoch insofern unsicher, als insbesondere die indirekten Folgen mit dem Entwicklungsgrad einer Region, eines Staates zusammenhängen. So sind Länder mit einem entwickelten Gesundheitssystem bei weitem besser gerüstet als Schwellen- und Entwicklungsländer.

Der Sachstandsbericht des UN-Beirates für Klimaänderungen kommt zum Schluss, dass die negativen Folgen der Klimaerwärmung die (wenigen) positiven Folgen - beispielsweise der Rückgang der erfrierungsbedingten Todesfälle - sehr wahrscheinlich übersteigen werden. Besonders ungünstig dürften die Auswirkungen wiederum für die armen Länder des Südens ausfallen (Rahmstorf/Schellnhuber 2006: 79-80, IPCC 2007a: 11,15,35).

An erster Stelle steht die zu erwartende erhöhte Morbidität und Mortalität aufgrund von Hitzewellen, Überschwemmungen und Dürren. Damit im Zusammenhang stehende Krankheitsbilder sind Mangelernährung, Durchfallerkrankungen, Infektionskrankheiten und Herz- und Atemwegs-erkrankungen. So hat beispielsweise die Hitzewelle in Russland im Sommer 2010 infolge des durch die Waldbrände verursachten Smogs rund 56.000 Opfer gefordert (News-de.com 2010). Auch die westeuropäische Hitzewelle im Sommer 2003 hatte die Mortalität statistisch signifikant erhöht.

Eine weitere Gefahr liegt in der veränderten Verbreitung der Überträger einiger Infektionskrankheiten (z.B. Malaria). Und die Verbreitungsgebiete von Insekten sind wesentlich stärker vom Klima bestimmt, da sie als Kaltblüter wesentlich stärker auf die Umgebungstemperatur reagieren. Die genannten Faktoren dürften in jedem Fall das Gesundheitssystem und die Gesundheitsfürsorge vor große Herausforderungen stellen (IPCC 2007a: 11,15, Michler 2010: 226-227).

5. Zusammenfassung und Resümee Klimawandel

Seit der Entstehung der Erde verändert sich das Klima ständig. Trotz der großen klimatischen Veränderungen in den letzten Millionen Jahren ist jedoch ein relativ stabiler Temperaturkorridor für die Erde typisch. Erst dadurch wurde die Entwicklung höherer Lebensformen ermöglicht. Die natürlichen Ursachen für Klimaänderungen der Erdgeschichte liegen in den Schwankungen der eingestrahelten Sonnenenergie, der Wanderung der Kontinente (und der damit verbundenen vulkanischen Aktivität) und dem natürlichen Treibhausgehalt der Atmosphäre. Letzterer ist unentbehrlich um das irdische Klima warm und lebenswert zu erhalten. Auch die Biosphäre (die belebte Natur) hat sich bis zu einem gewissen Punkt jenes Klima geschaffen, das für seine Existenz erforderlich war.

Das Verständnis von selbstverstärkenden aber auch dämpfenden Rückkopplungsmechanismen ist zentral für das Klimageschehen und den Klimawandel. Im Verlauf der Erdgeschichte haben bereits geringe (äußere) Impulse im Zusammenspiel mit verstärkenden Antrieben ausgereicht beispielsweise eine globale Eiszeit auszulösen. Positive Rückkopplungen im Klimasystem verstärken die Antriebe (z.B. Eis-Albedo-Rückkopplung), negative Rückkopplungen stabilisieren sie. Ein Beispiel für eine negative Rückkopplung ist die mit zunehmender Temperatur stark anwachsende Wärmeabstrahlung der Erde ins Weltall.

Rückkopplungsmechanismen können auch in kurzen Zeiträumen zur Auslösung von „Kippelementen“ führen. Ein Beispiel dafür ist der Bestand des grönländischen Eisschildes. Sobald der Auslöser für ein Kippelement erreicht ist, im konkreten Fall wäre dies die Verdoppelung der Treibhausgasemissionen gegenüber dem vorindustriellen Niveau, lässt sich der ursprüngliche Zustand nicht wieder herstellen. Der neue Zustand ist irreversibel. Beispielsweise wäre der Kollaps des grönländischen Eisschildes unumkehrbar, da er sich unter den gegenwärtigen nacheiszeitlichen Voraussetzungen nicht wieder aufbauen könnte.

Als globale Erwärmung bezeichnet man den in den vergangenen Jahrzehnten beobachteten Temperaturanstieg der erdnahen Atmosphäre und der Meere. Im Zeitraum von 1900 bis 2009 ist die globale Temperatur um $0,8^{\circ}\text{C}$ angestiegen. Aus den natürlichen Klimafaktoren alleine (Schwankungen der Sonnenaktivität, Ausstoß vulkanischer Aerosole) ist die eingetretene Klimaerwärmung nicht erklärbar. Die Landmassen haben sich stärker erwärmt als die Weltmeere. Seit 1980 hat sich der Temperaturanstieg verstärkt. Das Jahrzehnt von 2000 bis 2010 war mit Abstand das wärmste je gemessene, gefolgt von den 1990er Jahren, die wiederum wärmer waren als die 1980er Jahre. Sämtliche Klimazeitreihen zeigen jedoch auch eine starke Kurzfristvariabilität (Stichwort interne Variabilität) - diese „maskiert“ den Langfristtrend, der eindeutig in Richtung Erwärmung weist.

Diese Kernaussagen der Klimaforschung wurden in den letzten Jahrzehnten bestätigt. Sie beruhen auf jahrelanger Forschungsarbeit und tausenden von Studien. Es gibt einen breiten wissenschaftlichen Konsens über Ursache, Ausmaß und die weitere Entwicklung. Dazu beigetragen haben die objektiven Sachstandsberichte des UN-Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Der anthropogene Beitrag entsteht im Wesentlichen durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe aber auch durch die Abholzung der Wälder und die intensive Landwirtschaft. Dadurch wird das Treibhausgas Kohlendioxid (CO_2) sowie weitere Treibhausgase wie Methan und Lachgas in der Erdatmosphäre angereichert.

CO₂ ist ein klimawirksames Gas, das den Strahlungshaushalt der Erde verändert: Ein Anstieg der Konzentration führt zu einer Erwärmung der oberflächennahen Temperaturen. Es wird weniger Wärmestrahlung ins Weltall ausgestrahlt. Gedämpft wird die Klimaerwärmung durch den Eintrag von Aerosolen (SO₂, Rußpartikel u.a.). Die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industriellen Revolution signifikant angestiegen, von dem für Warmzeiten seit mindestens 700.000 Jahren typischen Wert von 280 ppm auf inzwischen 380 ppm.

Im Verlauf des 21. Jahrhunderts wird sich die globale Erwärmung fortsetzen. Im globalen Maßstab bedeutet dies bis 2100, unter Annahme eines mittleren Emissionsszenarios, eine weitere Temperaturerhöhung von etwa 3°C (Referenzjahr 1990). Auch höhere Werte sind nicht ausgeschlossen, wenn es zu verstärkenden Rückkopplungen im Kohlenstoffkreislauf kommen sollte. Dabei spielen die Emissionsszenarien bis 2030 für das Ausmaß der Erwärmung keine Rolle - Klimaschutzmaßnahmen durch die Einschränkung des Treibhausgas-Ausstoßes wirken sich erst langfristig dämpfend auf die Temperaturentwicklung aus (vor allem durch die thermische Trägheit der Weltmeere). Globale Klimaszenarien haben eine große Sicherheit bei den Temperaturen, bezüglich der Entwicklung der Niederschläge zeigen sich jedoch Schwächen, sodass Aussagen über Veränderungen und Verteilung derselben eher unsicher sind.

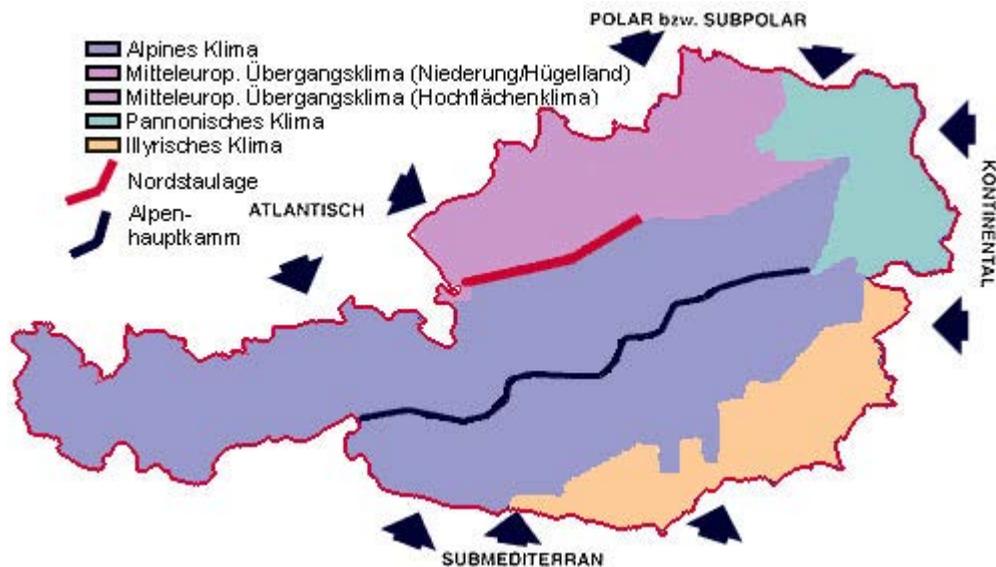
Die Folgen des Klimawandels sind vielfältig und reichen vom globalen Gletscherrückgang, dem Rückgang des arktischen Meereises, der Abnahme der Schneebedeckung in den Gebirgen und hohen Breiten, dem zunehmenden Masseverlust der Eisschilde in Grönland und der Antarktis, dem Anstieg des Meeresspiegels, der wahrscheinlichen Zunahme von Wetterextremen (Elementarereignissen) bis hin zum Verlust von Ökosystemen und Tier- und Pflanzenarten. Gemessen daran, dass sich das Weltklima in den vergangenen 100 Jahren um lediglich 0,8°C erwärmt hat, sind die Auswirkungen bereits zum jetzigen Zeitpunkt beträchtlich. Daraus ist erkennbar, dass eine Erhöhung um nochmals rund 3°C bis Ende dieses Jahrhunderts dramatische Folgen für uns hätte. Eine Eindämmung der Treibhausgase mittels Klimaschutzmaßnahmen ist daher dringend erforderlich.

Klima und Klimawandel
in Österreich und im Berggebiet

1. Klima- und Naturräume Österreichs und des Berggebietes¹

Österreich bzw. der Ostalpenraum lässt sich grob in zwei große Landschaften unterteilen: die Alpen und das Flach- und Hügelland.² Die Alpen bedecken dabei rund 60% des Staatsgebietes und prägen das Landschaftsbild. Die Bundesländer mit dem höchsten alpinen Anteil sind Vorarlberg, Tirol und Salzburg. Kärnten und Teile der Steiermark sind ebenfalls überwiegend alpin geprägt. Die östlichen und nördlichen Bundesländer haben hingegen großen Anteil am Flach- und Hügelland. Diese *unterschiedlichen* Räume, auch innerhalb des Berggebietes selbst, wirken *modifizierend* auf die Einflüsse des Klimawandels. Der hochalpine Raum kann beispielsweise von höheren Temperaturen (verbunden mit den dort ausreichenden Niederschlägen) durchaus profitieren, während dieselben Klimabedingungen bereits einschränkend für die Ökosysteme des umliegenden Flach- und Hügellands wirken.

Abbildung 1: Die Klimazonen des Ostalpenraums



Quelle: Österreichische Hagelyversicherung
<http://www.heltschl.org/7/72/klima.html>

Österreich bzw. der Ostalpenraum liegen in der kühl-gemäßigten Klimazone, am Schnittpunkt unterschiedlicher Klimaräume. Das Gebiet liegt in einer Übergangszone, in welcher im Westen und Norden das mitteleuropäisch-ozeanisch beeinflusste, oft von feucht-atlantischen Westwinden geprägte Klima vorherrscht (ausgenommen die inneralpinen Trockeninseln), im Nordosten, Osten und Südosten Österreichs hingegen der niederschlagsarme, kontinental gefärbte Typus mit heißen Sommern und mäßig-kalten, trüben Wintern anzutreffen ist. In den Südalpen ist hingegen der submediterrane Ein-

1. Der folgende Abschnitt bezieht sich auf die Darstellungen von Bätzing 2003: 34f, Formayer et al. 2008a und dem digitalen Klimaatlas der ZAMG o.J.
2. Einen Sonderfall stellt das Mühl- und Waldviertel dar, das Hochflächen- und gebietsweise Mittelgebirgscharakter hat.

fluss niederschlagsbringender Tiefdruckgebiete schon deutlich erkennbar. Insgesamt herrschen im Ostalpenraum bzw. im Berggebiet die alpinen Klimatypen vor. Flächenmäßig dominiert das subalpine, gefolgt vom alpinen Klima. Mittelgebirgsklima (auch Hochflächenklima genannt) herrscht in Teilen des Wald- und Mühlviertels.

Die Grenzen zwischen den einzelnen Klimaregionen dürfen dabei nicht als scharfe Trennung gesehen werden, sondern als Übergänge von einem Klimaraum in den anderen.

1.1 Kennzeichen des alpinen Klimas

Das alpine Klima weist reliefbedingt auf engstem Raum große Gegensätze auf. Während auf den Berggipfeln arktische und subarktische Bedingungen herrschen, sind die Täler und Becken, zum Teil auch föhnbedingt, deutlich begünstigt.

Kennzeichen des alpinen Klimas sind die tiefen Temperaturen (Abnahme der mittleren Jahrestemperatur $\sim 0,40^\circ\text{C}$ je 100 m) und die hohen Niederschläge. Beide Faktoren wirken einschränkend auf Ökosysteme, land- und forstwirtschaftliche Nutzung und Dauerbesiedelung. So liegen die mittleren Temperaturen im kältesten Monat Jänner auf 500 m Seehöhe zwischen -2 und -5°C , auf 1.000 m Seehöhe bereits zwischen -4 und -6°C . Der tiefste Wert im Bereich der hochalpinen Gipfellagen liegt bei rund -15°C . Im Juli bewegen sich hingegen die Mittelwerte in 500 m Seehöhe zwischen 16 bis 18°C und in 1.000 m auf 13 bis 15°C . Am Großglockner wird auch im Hochsommer im Mittel die Nullgradgrenze nicht überschritten.

Die Anzahl der Vegetationstage (mittlere Tagesstemperatur mindestens 5°C) liegt in den alpinen Talräumen um 200 Tage, auf den Gipfeln um die 150 Tage. Die Einschränkung der alpinen Vegetationsperiode lässt sich auch an den Frosttagen im Sommerhalbjahr erkennen. So treten in 1.000m Seehöhe zwischen April und September 14 und auf 1.500m Seehöhe immerhin noch 29 Frosttage auf.

Die Kältepole Österreichs liegen, abgesehen von Berggipfeln, häufig inneralpin (Lungau, oberes Murtal, mittleres Ennstal, Kärntner Becken) sowie in Teilen des Waldviertels. In den abgeschlossenen Becken, Tälern und Mulden unter 800 bis 1.200m Seehöhe treten im Winter häufig Tage mit Temperaturumkehr auf. Dieser Zeitraum ist oft durch zähe Nebel- und Hochnebellagen gekennzeichnet. Über der Nebelobergrenze liegen in der Regel die Orte mit der längsten Sonnenscheindauer, so etwa die Terrassen im Tiroler Mittelgebirge, in den Niederen Tauern und in den Eisenerzer Alpen sowie entlang der Süd-Abdachung der Kärntner Mittelgebirge (~ 2.100 Sonnenstunden). Am geringsten ist die Sonnenscheindauer über das Jahr in weiten Teilen der Nordstaugebiete an der Alpennordseite (um die 1.500 Sonnenstunden). Großen Einfluss auf das Kleinklima hat auch die Exposition des Geländes.³ Auf der (südlichen) Sonnenseite der alpinen Täler reichen die Almen bis zur Felsregion, während auf der (nördlichen) Schattenseite Bergwälder dominieren.

3. In den mittleren Breiten sind Exposition (Hangrichtung) und Inklination (Hangneigung) von entscheidender Bedeutung, da die direkte Sonnenbestrahlung je nach Hangorientierung größer oder kleiner als auf einer horizontalen Fläche sein kann.

Die Alpen wirken als markante Wetterscheide, vor allem von Nord nach Süd, weniger von West nach Ost. Die Niederschläge nehmen naturgemäß mit zunehmender Entfernung vom Atlantik von West nach Ost ab, dieser Effekt wird noch durch das „Abregnen“ der feuchten Luftmassen im Bereich der Gebirge auf ihrem Weg nach Osten verstärkt. Im Gebirge wirkt sich die Zunahme der Niederschlagsmenge mit der Höhe (Stichwort Steigungsregen) maßgeblich aus. Zu den niederschlagsreichsten Regionen mit einem Jahresmittel von 2.000 bis 2.500 l/m² zählen die Staurengengebiete in den nördlichen und südlichen Kalkalpen, sowie die Kämmen der Hohen Tauern.

Hingegen zählen einige inneralpine und südalpine Regionen zu den trockensten Gebieten der Ostalpen. Dazu zählen beispielsweise das obere Inntal, das obere Murtal und der Salzburger Lungau. Die Ursache für die Trockenheit des inneralpinen Zentralraums liegt in der mehrfachen Abschirmung durch die niederschlagsreichen Randzonen im Norden, Westen und Süden der Alpen. Insbesondere der Winter ist deutlich trockener als den Gebirgsrändern. Im Sommer führen dagegen konvektive Niederschläge (Schauer, Gewitter) zur Abschwächung der relativen Niederschlagsarmut.

Der Schneereichtum ist hauptsächlich abhängig von der Seehöhe sowie von der Lage der Region relativ zu den Hauptströmungsrichtungen und variiert dementsprechend stark. Die Zahl der Schneedeckentage beträgt im Österreichschnitt in 1.000m Seehöhe 126 Tage und in 2.000m Seehöhe 224 Tage. Unter 1.200m Seehöhe fällt die größte Schneemenge im Schnitt im Jänner. In den höheren Lagen verschiebt sich die Zeit mit den ergiebigsten Schneefällen wegen der dann milderen und wasserdampfreicheren Luftmassen auf März und April, in den höchsten Lagen (z.B. Sonnblick) auf den Mai und Juni eines Jahres. Die Grenze mit ganzjähriger Schneebedeckung liegt im langjährigen Schnitt in den nördlichen Kalkalpen bei 2.700m, in den Hohen Tauern bei 2.900m und in den Ötztaler Alpen bei 3.000 bis 3.100m Seehöhe, hat sich aber bedingt durch den Klimawandel in den vergangenen Jahrzehnten bereits merkbar nach oben bewegt.

Neben den großräumigen Windverhältnissen, die durch die (Großwetterlagen-bedingten) Strömungsmuster und durch die Topographie modifiziert werden (Hauptwindrichtung West, Südwest- und Nordwest), haben im Alpenraum die lokalen und regionalen Windssysteme eine nahezu ebenso große Bedeutung. Die Berg- und Talwindssysteme, die sich bei (großräumig) gradient(=wind)schwachen Wetterlagen je nach Landschaftsform ausbilden, tragen viel zur jeweiligen lokalen Witterung bei. Der Südfohn der überwiegend in den Übergangsjahreszeiten auftritt, bewirkt auch eine spürbare Milderung vor allem entlang der Nord-Süd gerichteten Alpentäler (z.B. Rheintal, Wipptal, Salzachtal).

2. Bisherige Auswirkungen des Klimawandels im Alpenraum und im Berggebiet (bis 2010)

Der Klimawandel und die Klimaerwärmung machen sich vor allem durch gestiegene Temperaturen bemerkbar. Aber auch die Sonnenscheindauer, die regionalen Niederschlagsmuster, die Schneeverhältnisse, die Sturmhäufigkeit sowie Extremereignisse (Hitze, Starkregen) werden mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht. Tatsache ist, dass sich im Vergleich zur globalen Entwicklung der Alpenraum im Verlauf der vergangenen 150 Jahre, aus unterschiedlichen Gründen, ungleich stärker erwärmt hat.

2.1 Lufttemperatur

Mit dem Klimawandel wird in erster Linie die langfristige Temperaturzunahme verstanden, die auf globaler Ebene in den letzten 100 Jahren knapp ein Grad Celsius betragen hat. Im Alpenraum ist die Erwärmung dabei *stärker* als im globalen Schnitt ausgefallen: Ausgehend vom tiefen Niveau der sogenannten „kleinen Eiszeit“ um 1850, der ein weiteres Minimum um 1890 folgte, ist die Temperatur seit damals um knapp zwei Grad angestiegen.

Bemerkenswert ist der große räumliche horizontale wie vertikale *Gleichklang* der Erwärmung im Alpenraum und in Mitteleuropa. Auf dem Sonnblick hat sich die Atmosphäre um dieselben zwei Grad erwärmt wie in Wien, am Schweizer Jungfraujoch oder in Marseille. Flachland und Hochgebirgsstationen haben sich also im selben Ausmaß aufgeheizt (vgl. ZAMG-HISTALP Datenbank).⁴ Aber nicht nur beim Klimatelement Temperatur zeigt sich eine Zunahme auch der Luftdruck und die Sonnenscheindauer folgen diesem Trend (Böhm 2009: 163, ZAMG 2011m).⁵

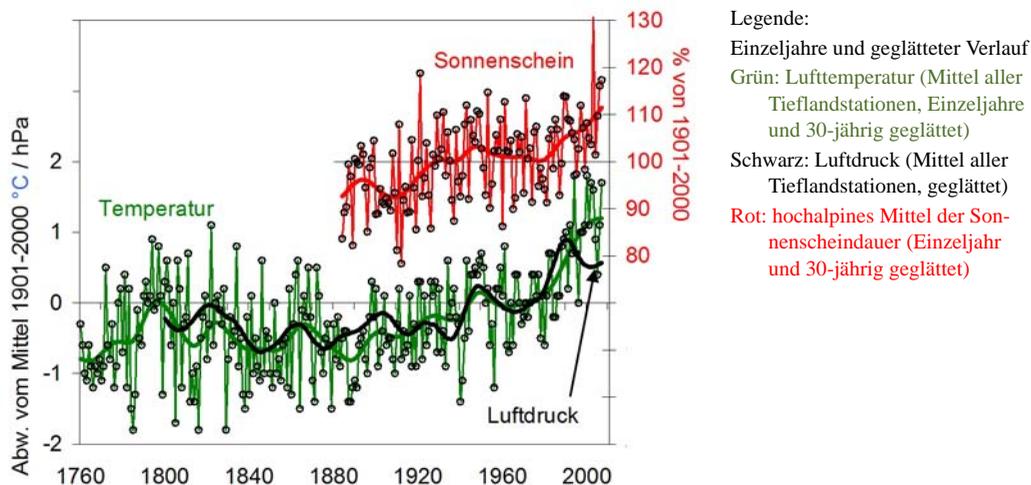
Die stärkere regionale Erwärmung im Alpenraum hängt wahrscheinlich mit einer Zunahme der Hochdrucklagen und der Sonnenscheindauer zusammen. Dies lässt sich auch an der Entwicklung des Luftdruckes im Alpenraum verfolgen, der im gesamten 20. Jahrhundert stetig angestiegen ist und einer Nordwärtsverlagerung des subtropischen Hochdruckgürtels entspricht. Dieser Luftdruckanstieg hat wiederum für mehr Schönwetter im Alpenraum gesorgt (siehe dazu auch Abbildung 2) (TU-Wien/ ZAMG 2011: 2-24,25, ZAMG 2011m).

4. Die HISTALP-Datenbank umfasst 500 *homogenisierte* Klimazeitreihen aus einem Gebiet, das vom Rhonetal im Westen bis Budapest im Osten, und von Karlsruhe und Nürnberg im Norden bis Perugia im Süden reicht. Die älteren, historischen Zeitabschnitte sind nach Standort, Instrumentierung und anderen Kriterien (z.B. Urbaneffekte) an den aktuellen Zustand der Meßstationen angepasst (=homogenisiert) (Böhm 2008: 75).

5. Die Klimaerwärmung im Alpenraum konnte unabhängig von den Temperaturmessungen *auch* durch Luftdruckmessungen bestätigt werden, weil sich im Zuge der Erwärmung die Luftmasse nach den Gesetzen der Thermodynamik ausgedehnt hat und die Luftmassen nach oben verdrängt wurden - Aus den unterschiedlichen Trends des hochalpinen und des Tieflandluftdrucks konnten Zeitreihen der Lufttemperatur der dazwischenliegenden Luftschicht abgeleitet werden, die identisch mit dem gemessenen Temperaturanstieg sind (Böhm 2008: 176).

Die Temperaturzunahme erfolgte dabei nicht kontinuierlich, sondern war von Phasen rascher Erwärmung und zwischenzeitlicher Abkühlung überlagert (siehe folgende Abbildung).⁶ Ein höheres Temperaturniveau herrschte noch Anfang des 19. Jahrhunderts, das jedoch rasch von einer Abkühlung abgelöst wurde. Diese gleichzeitig auch nasse Phase gipfelte zur Mitte des Jahrhunderts (Höhepunkt der sogenannten „Kleinen Eiszeit“) und ist im Alpenraum an den zahlreichen Gletschervorstößen gut nachweisbar. Nach einem weiteren Tiefpunkt um 1890 stiegen die Temperaturen erstmals deutlich nach der vorletzten Jahrhundertwende an. Ein kontinuierlicher Anstieg gipfelte in den 1940er und 1950er Jahren. Danach setzte wieder eine leichte Abkühlung ein, die bis in 1970er Jahre anhielt. Seit 1980 erfolgte ein weiterer signifikanter Anstieg, der in die wärmsten Dekaden der instrumentellen Meßgeschichte in den 1990er und 2000er Jahren mündete. In den letzten 10 Jahren ist eine Stabilisierung auf hohem Niveau zu beobachten.

Abbildung 2: Abweichung der Jahresmittelwerte von drei eng gekoppelten Klimaelementen im Großraum Alpen



Quelle: HISTALP-Datenbank ZAMG (Reinhard Böhm)

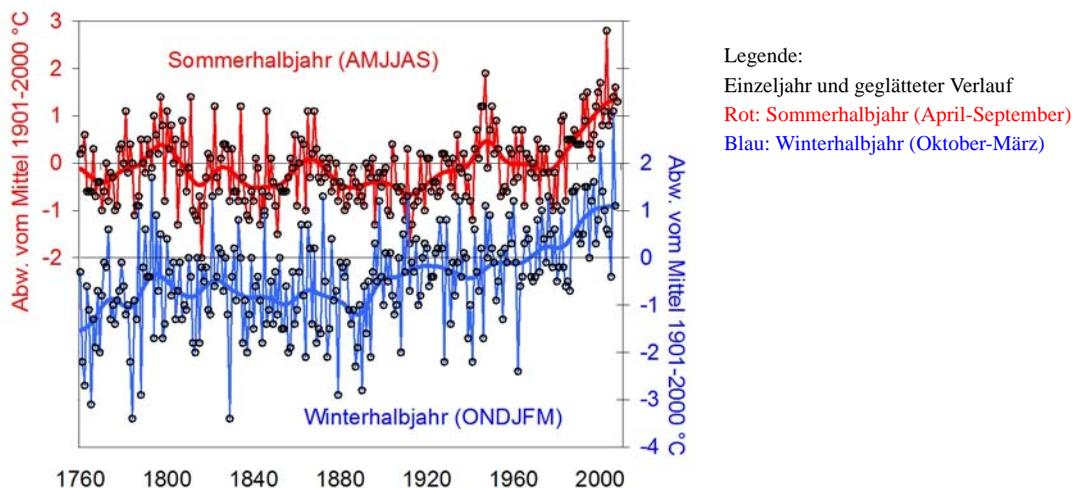
Während natürliche Antriebe (Schwankungen der Sonnenaktivität, explosive Vulkanausbrüche) und interne Wechselwirkungen die Temperaturentwicklung im 19. und der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts prägten, ist der anthropogene Einfluss seit den 1950er Jahren bestimmend.⁷ Dies steht auch nicht im Widerspruch zur leichten Abkühlung in diesem Zeitraum, sondern ganz im Gegenteil als deren Bestätigung – Der Eintrag der Aerosole (Sulfat, Ruß, Staub etc.), aus der Verbrennung von Kohle und

- Auffällig ist dass der Langzeittrend von einer starken Kurzfristvariabilität (Streuung) von Jahr zu Jahr überlagert ist. Ein extremes Jahr (Jahreszeit, Monat) eignet sich somit weder zur Bestätigung noch zur Wiederlegung des Trends der Klimaerwärmung.
- Dies konnte im Rahmen der Sachstandsberichte des IPCC akribisch nachgewiesen werden: Klimamodelle, die nur natürliche Antriebskräfte berücksichtigen sind nicht in der Lage den seitherigen Temperaturanstieg zu plausibilisieren (IPCC 2007a: 11).

Erdöl im Zuge der „Wirtschaftswunderjahre“ und der damit verbundene kühlende Effekt bremste zumindest teilweise den Treibhauseffekt. Maßnahmen zur Luftreinhaltung (Filter, Katalysatoren), der Zusammenbruch der veralteten Industrien im ehemaligen Ostblock, sowie der verstärkte Treibhausgasstoß von Industrie und Verkehr haben seither den anthropogenen Effekt voll zum Wirken gebracht (ZAMG 2011m).

Die Erwärmung der letzten 150 Jahre erfolgte jedoch nicht kontinuierlich, sondern sie war von kürzer dauernden Zwischenmaxima und –minima überlagert, und diese waren jahreszeitlich durchaus unterschiedlich (wie Abbildung 3 zeigt). Strenge Winter herrschten besonders um 1850 bzw. 1890, während die Winter der 1910er Jahre besonders mild waren, aber durch die damaligen kühlen Sommer kompensiert wurden. Warme Sommer wiederum gab es bereits um 1800, um 1950 und dann wiederum in den 1990er und 2000er Jahren. Auffällig ist auch, dass die Abweichungen von Sommer- und Winterhalbjahr selten synchron verliefen. Eine Ausnahme bilden hier die letzten beiden Jahrzehnten, was nun zu einer besonders starken Erwärmung führte: 2003 trat der wärmste Sommer seit Meßbeginn auf und 2006/07 der mildeste Winter der zumindest letzten 250 Jahre. Retrospektiv betrachtet hat der stärkste Temperaturschub Mitte der 1970er Jahre eingesetzt.⁸ Bemerkenswert ist, dass sich die Sommermonate seither stärker erwärmt haben (fast 2°C) als die Wintermonate (ca. 1°C) (TU-Wien/ ZAMG 2011: 2-24, ZAMG 2011m).

Abbildung 3: Abweichungen vom Temperaturmittel im Sommer- und Winterhalbjahr Großraum Alpen 1760-2007 bzw. 1760-2007/08

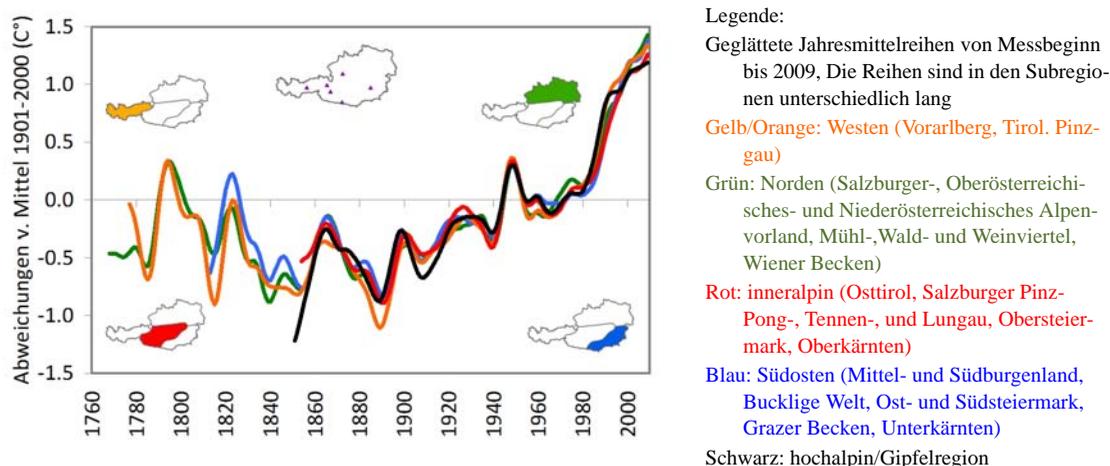


Quelle: HISTALP-Datenbank ZAMG (Reinhard Böhm)

8. Paradoxerweise wurde just zu diesem Zeitpunkt, ausgelöst durch einige kühle Regensommer, von den Medien der Beginn einer neuen Eiszeit lanciert.

Temperaturreihen für Subregionen in Österreich (West- Nord- und Südostösterreich, Innalpine Regionen und Gipfelregionen) zeigen den für den Großraum Alpen zu erwartenden, sehr ähnlichen Verlauf ohne regionale Ausprägungen.

Abbildung 4: Abweichungen vom Temperaturmittel 1760-2009 (C°) in 5 Subregionen Österreichs

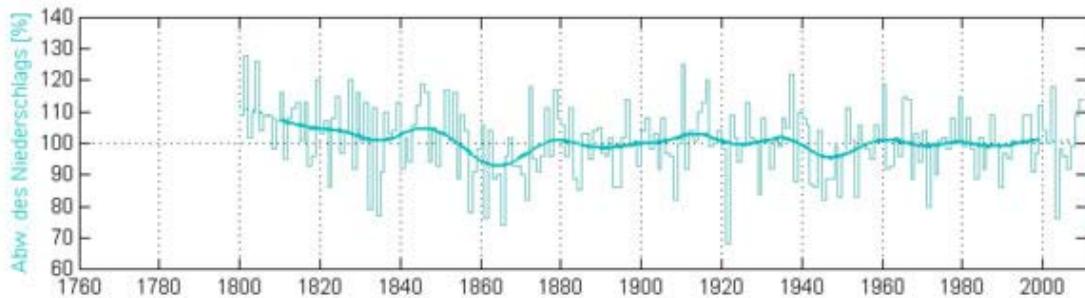


Quelle: HISTALP-Datenbank, ZAMG (Reinhard Böhm)

2.2 Niederschlag

Der Niederschlag steht in enger Beziehung mit Großwetterlagen, den Zugbahnen und Häufigkeiten von Tiefdrucksystemen und deren Variabilität. Auch globale Wetterphänomene wie der „warme“ El Niño (bzw. die „kalte“ la Niña) sowie die Stärke oder Schwäche der Nordatlantischen Oszillation (NAO) prägen das Niederschlagsgeschehen im Alpenraum.

Für den Alpenraum existiert eine relativ lange instrumentelle Zeitreihe seit dem Jahr 1800 (siehe Abbildung 5). Historisch war die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts im Alpenraum eine überdurchschnittlich niederschlagsreiche Periode. Dies hat auch zu den starken Gletschervorstößen dieser Zeit beigetragen. Gefolgt wurde dieser Zeitraum von der trockensten Phase der Messgeschichte, den 1860er Jahren. Ausdruck der großräumigen Niederschlagsarmut dieser Zeit war auch die damit verbundene Austrocknung des Neusiedler Sees. Gefolgt wurde diese Periode von wenig ausgeprägten Schwankungen, die sich zumeist um die Mittelwerte bewegten. Auch das gesamte 20. Jahrhundert zeigt wenig markante Abweichungen. Insgesamt ist der Niederschlag von Trends und *dekadischen* Schwankungen in der Größenordnung von nur +/-10% für den Gesamttraum geprägt, größere Abweichungen traten im Klima der letzten 200 Jahre in Österreich *nicht* auf (TU-Wien/ZAMG 2011: 2-30, ZAMG 2011n).

Abbildung 5: Abweichung des Niederschlags (%) im Großraum Alpen 1800-2009

Quelle: Klimawandelportal ZAMG

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/3-2-2_Niederschlag_Abb1_a_gr.png&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=600&imgHeight=197

Ist die Niederschlagsentwicklung im Großraum der Alpen insgesamt von nur geringen Schwankungen geprägt, so zeigen sich auf Ebene der Subregionen doch, teils *erhebliche*, Unterschiede (siehe dazu Abbildung 6). Im Unterschied zur Temperatur zeigt der Niederschlag im Ostalpenraum *keine* ähnlichen Trends in der gesamten Region. In einem geographisch reich gegliederten Gebirgsland treten Regen- und Schneefälle räumlich und zeitlich eben sehr unterschiedlich auf. Der Alpenhauptkamm ist beispielsweise eine äußerst wirksame Niederschlagsscheide.

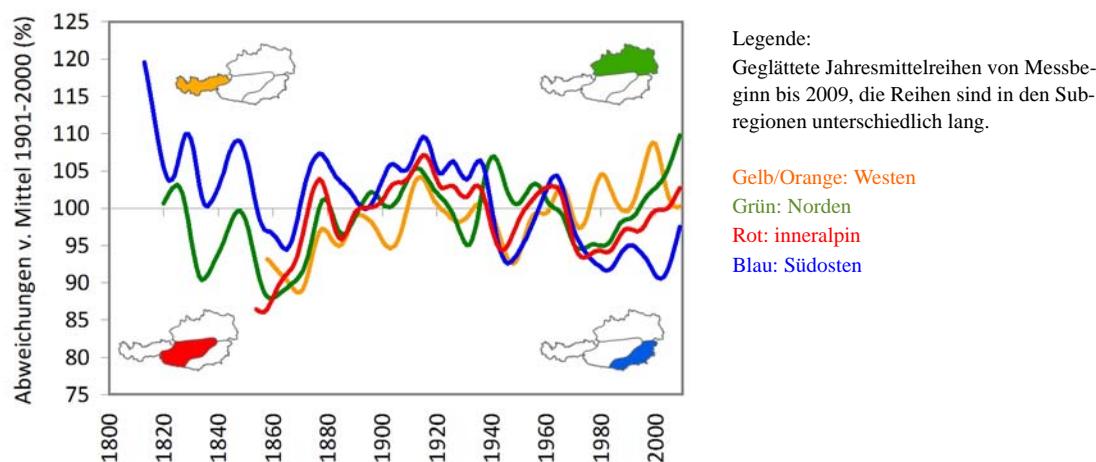
Besonders auffällig ist die langfristig *gegenläufige* Niederschlagsentwicklung in zwei alpinen Subregionen, der Region West und der Region Südosten. Ein feuchterer Westen (Vorarlberg, Tirol) mit einem Niederschlagszuwachs von 10 bis 15% seit 1800 steht einem zunehmend trockeneren Südosten (Mittel- und Südburgenland, Bucklige Welt, Ost- und Südsteiermark, Grazer Becken, Unterkärnten) (-10 bis 15% seit 1800) gegenüber. Im inneralpinen Raum und im Norden ist hingegen kein Langfristtrend zu erkennen, hier dominiert das Auf und Ab dekadischer Anomalien.

Dieser Befund fügt sich auch in das mitteleuropäische Gesamtbild ein, nämlich dass der Nordwesten des Alpenbogens (Frankreich, Schweiz, Süddeutschland und Westösterreich) mehr Niederschläge empfangen hat, während im Südosten davon (Slowenien, Kroatien, Ungarn, Kärnten, Untersteiermark) der gegenläufige Trend zu weniger Niederschlag vorherrscht. Die Grenze zwischen diesen gegenläufigen Trends ist relativ scharf ausgeprägt (Alpenhauptkamm). Offenbar wirkt der in der Westwindzone des globalen Zirkulationssystems gelegene Alpenbogen beim Klimatelement Niederschlag als markante Trennungslinie zwischen diesen beiden Großräumen (Böhm 2008b: 80, Böhm 2009: 163, ZAMG 2011k).

Kurzfristig, also seit 1970, ist auffällig, dass der Norden sowie die inneralpinen Gebiete einen kontinuierlichen *Anstieg* des Niederschlages verzeichnen, der im Norden seit der trockenen Phase davor bereits die Größenordnung von 15% erreicht hat. Im Westen steigen die Niederschlagsmengen ebenfalls, jedoch hier mit einem überlagerten dekadischen Auf und Ab, welches wir auch im Südosten finden, hier jedoch mit einem eher stagnierenden, wie bereits beschrieben, sehr trockenen Niveau, rund 10% unter dem Durchschnitt des 20. Jahrhunderts. Bemerkenswert ist ferner, dass seit Mitte der 1970er Jahre die Winterniederschläge nördlich des Alpenhauptkammes etwas gestiegen, südlich des Alpen-

hauptkammes deutlich gefallen sind. In den anderen Jahreszeiten gab es tendenziell eine Zunahme des Niederschlags in ganz Österreich, wieder mit Ausnahme des Südens, wo die Trends sehr gering waren (TU-Wien/ZAMG 2011: 2-40).

Abbildung 6: Abweichungen vom Niederschlagsmittel 1800-2009 (%) in 4 Subregionen Österreichs



Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Niederschlagsmessung in den Gipfelregionen wurden keine langjährigen Meßreihen in die HISTALP-Datenbank aufgenommen.

Quelle: HISTALP-Datenbank, ZAMG (Reinhard Böhm)

Für den Klimawandel sind ausschließlich die Langzeittrends von Bedeutung, die vom „Rauschen“ der Kurzfristvariabilität unterschieden werden müssen. Die Streuung von Jahr zu Jahr ist beim Klimatelement Niederschlag dabei *sehr hoch*. In typischen Ausreisserjahren weichen sie um 20-25% vom langjährigen Durchschnitt ab. Extreme Trocken- und Feuchtjahre können sogar zwischen 50 und 150% des Jahrhundertmittels liegen. Diese Schwankungen sagen *nichts* über den längerfristigen Trend aus. Interessant ist auch der Befund der ZAMG, dass die hochfrequente Variabilität des Niederschlages entgegen der langläufigen Meinung langfristig nicht zu, sondern eher *abgenommen* hat (Böhm 2009: 163, TU-Wien/ZAMG 2011: 2-31,33, ZAMG 2011).

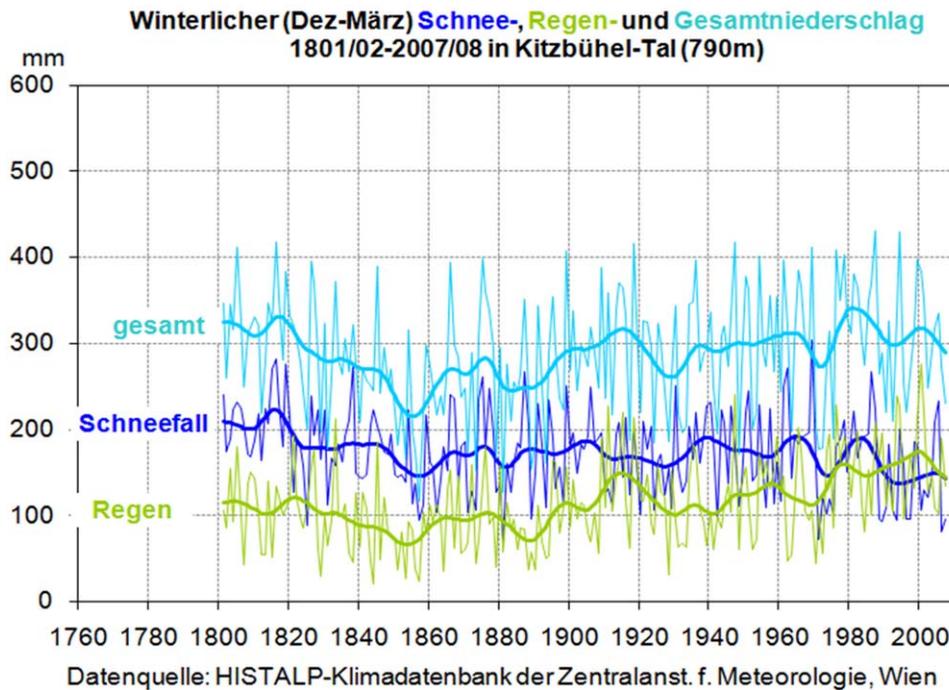
2.3 Schneefälle und Schneedecke

Die Klimaerwärmung, die sich seit 1980 deutlich manifestiert hat, zeigt sich auch beim Klimatelement Schnee. Dies liegt auch daran, dass sich das Element Schnee bei den in den Alpenländern üblichen Wintertemperaturen häufig nahe seinem Schmelzpunkt befindet und damit sehr klimasensitiv ist. Auffällig ist der Anstieg der Schneefallgrenze.⁹ In Lagen unter 1.000 Metern Seehöhe ist der steigende Anteil

9. Trends des jährlichen Medians der potenziellen *Schneefallgrenze* im Zentralalpenraum seit 1980 haben für den Winter hingegen *keinen* Trend ergeben, während die sommerliche Schneefallgrenze um 400 Meter, die Schneefallgrenze im Frühling und Herbst um 300 Meter angestiegen ist (Steinacker 2010a: 166).

des Regens am winterlichen Gesamtniederschlag deutlich meßbar. Seit den 1990er Jahren fällt zum Beispiel in Kitzbühel im Tal (790 m) in den Wintermonaten annähernd genau so viel Regen wie Schnee.

Abbildung 7: Abnehmender Schneeeanteil am Gesamtniederschlag in Kitzbühel



Quelle: Klimawandelportal ZAMG

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/5-6_Abb2_gr.png&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=1000&imgHeight=723

Südlich des Alpenhauptkammes ist dieser Trend am deutlichsten. Dort wurde die größte Abnahme sowohl an Tagen mit einer Schneedecke als auch der Schneedeckenhöhe gefunden. Dazu beigetragen hat einerseits die Temperaturzunahme während der Wintermonate. Andererseits wurde südlich des Alpenhauptkammes auch eine deutliche Niederschlagsabnahme im Winterhalbjahr um ca. 20% beobachtet. Diese beobachtete Niederschlagsabnahme ist wahrscheinlich auf eine Änderung der winterlichen Wetterlagen, genauer gesagt auf eine Abnahme der Südanströmungen (z.B.: Adria und Mittelmeertiefs), zurückzuführen.¹⁰

Dieser Trend in Richtung einer Niederschlagsabnahme im Winter ist für die Gebiete nördlich des Alpenhauptkammes *nicht* zu erkennen. Grundsätzlich besteht bei den Klimatelementen Niederschlag und Schneedecke eine starke interannuale Variabilität der Schneedecke und des Niederschlags. Die

10. In den letzten Jahren ist jedoch wieder vermehrt Tiefdruckeinfluss aus dem Mittelmeerraum im Ostalpenraum wirksam geworden.

Schwankungen von Jahr zu Jahr sind sehr groß und überlagern den manifesten Trend des Klimawandels (TU-Wien/ZAMG 2011: 2-40, ZAMG 2011f).

2.4 Extremwerte

Das mitteleuropäische Klima weist eine große klimatische Spannbreite auf. Innerhalb dieser Grenzen sind extreme Abweichungen - Kaltlufteinbrüche und Hitzewellen - ganz normal und bis zu einem gewissen Grad sogar häufiger als „mittlere“ Wetter- und Klimaverhältnisse.

„Echte“ meteorologische Singularitäten, sogenannte Extrem- oder Elementarereignisse sind auch im Zusammenhang mit dem Klimawandel von großem Interesse, da diese eine große Schadenswirkung auf Natur und Mensch haben können. Dazu zählen sommerliche Unwetter, Sturmtiefs, Extremniederschläge verbunden mit Hochwasser, Hitze- und Kältewellen. Ereignisse werden dabei als „extrem“ bezeichnet, wenn diese mit besonders hohen oder niedrigen Intensitäten einhergehen. Im statistischen Sinn ist die Eintrittswahrscheinlichkeit von Extremereignissen dabei sehr niedrig. Sie kommen selten vor und treten oft sehr kleinräumig auf, so kleinräumig dass sie bei punktuellen Starkniederschlägen, wie sie zum Beispiel durch sommerliche Wärmegewitter auftreten, vom relativ grobmaschigen Netz der meteorologischen Stationen oftmals gar nicht erfasst werden.

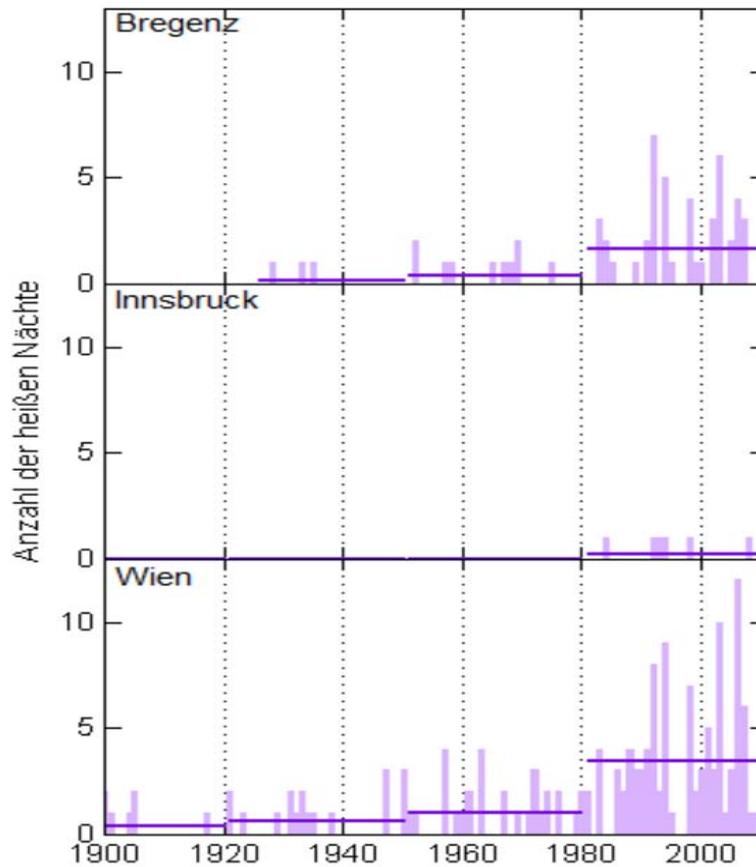
Ob und inwieweit sich *bis dato* bereits das Auftreten von seltenen bzw. exzessiven Ereignissen (vor allem beim Klimatelement Niederschlag) geändert hat, ist nicht eindeutig zu beantworten, da die statistischen Fallzahlen gering und das anthropogene Klimasignal noch zu kurz wirkt um hier schlüssige Antworten geben zu können.

Die *bisherigen* empirischen Beobachtungen der Hohen Warte (ZAMG) *verneinen* aber einen Trend im Ostalpenraum zur Zunahme der Wetterextreme (rascher Wechsel von intensiven kalten und warmen Phasen, plötzliche Übergänge von Sommer zu Winter und umgekehrt), der subjektiv vorherrschen mag. Untersuchungen der langjährigen Beobachtungen der Variabilität von Temperatur, Niederschlag und Luftdruck der letzten 150 Jahren zeigen, dass bei der Änderung der Temperatur von Monat zu Monat im Alpenraum sogar eine *Abschwächung* der Wechselhaftigkeit des Klimas festzustellen ist. Generell war das Klima Mitteleuropas im (kälteren, kontinentaleren) 19. Jahrhundert weitaus *wechselfahrter* als im (wärmeren, ozeanischeren) 20. und 21. Jahrhundert (ZAMG 2011j).

2.4.1 Hitze

Mit dem Anstieg der Mitteltemperaturen ist seit den 1980er Jahren auch ein merkbarer Anstieg der warmen Nächte und heißen Tage (Sommer $\geq 25^{\circ}\text{C}$ und Hitzetage $\geq 30^{\circ}\text{C}$) verbunden gewesen. Für das Berggebiet und mit Anstieg der Seehöhe gilt dies natürlich modifiziert. Die Auswirkungen sind hier keineswegs nur negativ zu sehen, sondern können eine bestehende Klimaungunst abschwächen (ZAMG 2011j, ZAMG 2011o).

Abbildung 8: Entwicklung der jährlichen Anzahl der heißen Nächte für Bregenz, Innsbruck und Wien



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Auer u.a. 2008)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/klima/klimawandel/3/3-2-5_2_Heisse_Naechte_gr.png&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=300&imgHeight=460

2.4.2 Starkniederschläge

Untersuchungen der *globalen* Niederschlagsänderung der letzten 50 bis 100 Jahre belegen, dass die Niederschlagssummen in diesem Zeitraum durchschnittlich um 5% zugenommen haben. Die Gesamtanzahl der Niederschlagstage ist dabei etwa gleich geblieben. In den *globalen* Klimasimulationen zeigt sich somit eine Intensivierung von starken Niederschlagsereignissen. Diese Änderungen der Extreme sind im Allgemeinen deutlicher ausgeprägt als die Änderungen der Mittelwerte, dies allerdings mit ausgeprägten regionalen Unterschieden. Die Ursache der größeren Niederschlagsmengen in einem wärmeren Klima bei Einzelereignissen ist plausibel, insofern als die Atmosphäre einen höheren Wasserdampfgehalt ausweist, wodurch auch das verfügbare Niederschlagspotenzial ansteigt (ZAMG 2011j).

Für den Alpenraum ist die Hypothese insofern verifizierbar, als in *Westösterreich* eine Zunahme der mittleren Niederschlagssummen mit einer *Zunahme* der starken Tagesniederschläge zu beobachten ist. Im Südosten des Alpenbogens fällt hingegen ein fallender Niederschlagstrend mit einem Anstieg der Trok-

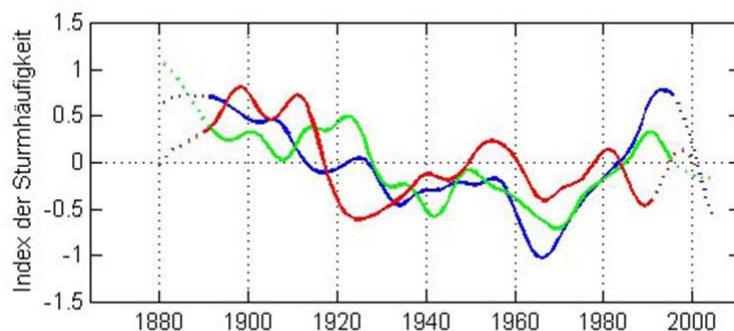
kenperioden zusammen. Die Entwicklungen zu mehr Starkregen und Trockenheit finden also nicht an den gleichen Orten statt, die Spannweiten der Niederschläge bleiben relativ gleich. Die langjährigen Auswertungen der Hohen Warte zeigen für den Alpenraum insgesamt sogar einen Trend zu ruhigeren Niederschlagsverhältnissen (ZAMG 2011).

2.4.3 Sturmaktivität

Eine Häufung von Sturmereignissen in den 1990er Jahren gab zur Hypothese Anlass, dass sich das „Sturmklima“ bedingt durch die anthropogene Erwärmung generell turbulenter gestaltet. Vor allem seitens der Forstwirtschaft wird ein Anstieg der Sturmhäufigkeit und damit verbundener Schadenswirkung befürchtet.¹¹ Gefürchtet sind vor allem die großräumig auftretenden Winterstürme (zuletzt 2007 Kyrill und 2008 Paula). Aber auch Föhnstürme in den Übergangsjahreszeiten können große Schäden verursachen. Im Sommerhalbjahr treten im Zusammenhang mit örtlichen Wärmegewittern bzw. bei großräumigen Gewitterfronten ebenfalls heftige Sturmböen auf, die punktuell großen Schaden anrichten.

Großen Einfluss auf die Zirkulationsmuster und die Zugbahnen von Stürmen über der nordatlantisch-europäischen Region hat dabei die Nordatlantische Oszillation (NAO) und sekundär die Meerestemperaturen im Nordatlantik. Ist der Druckgradient zwischen Islandtief und Azorenhoch (der NAO-Index) ausgeprägt und die Zugrichtung auf West- und Mitteleuropa gerichtet, können im Alpenraum und vor allem in exponierten Hochlagen extreme Windgeschwindigkeiten auftreten. Die größte Häufigkeit und Stärke dieser Druckkonstellation ist vor allem im Winterhalbjahr zu beobachten (Albrecht et al. 2008: 1f).

Abbildung 9: Index der Häufigkeit von starken Stürmen über Nordwest- (blau), Nord- (grün) und Mitteleuropa (rot) 1880/81 bis 2001/05



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Matulla u.a. 2007)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/3-2-7_Stuerme_Abb1_a_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=793&imgHeight=259

11. Zwischen 1950 und 2000 waren Stürme für über 50% der durch abiotische Schadensursachen angefallenen Schadholzmenge in Europa verantwortlich.

Die Forschung relativiert das subjektive Empfinden der Zunahme der Sturmtätigkeit über Mitteleuropa. Analysen der Druckdaten der vergangenen 140 Jahre ergaben, dass die Jahrzehnte um die vorletzte Jahrhundertwende (1900) die stürmischste Periode in Nordwest- und Mitteleuropa war. Danach folgte ein rapider Abfall der Sturmtätigkeit und es folgten die deutlich ruhigeren 1920er bis 1970er Jahre. Erst seit damals stieg die Sturmtätigkeit wieder an, vor allem in Nordeuropa. Seit 1990 ist der Index jedoch überall wieder rückläufig. Retrospektiv betrachtet lagen die Spitzen in den 1990er Jahren im Bereich der normalen Schwankungsbreite (wie dies Abbildung 9 veranschaulicht) (Böhm 2008: 188-190; ZAMG 2009a).

Es gibt damit *keinen* Trend zu mehr und stärkeren Stürmen.¹² Die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete über Europa haben sich weiter nach Norden bzw. Nordosten verlagert. Ein Zusammenhang mit der anthropogenen Klimaerwärmung kann nicht nachgewiesen werden. Dabei ist die Sturmtätigkeit großen Schwankungen unterworfen, die primär durch interne Variabilitäten erklärbar ist. Stürmische Jahrzehnte folgen solchen mit schwächerer Windtätigkeit (Albrecht et al. 2008, ZAMG 2009a).

12. Eine andere Untersuchung ergab, dass die Sturmaktivität sogar über den Zeitraum der vergangenen 500 Jahren bemerkenswert stabil geblieben ist (Albrecht et al. 2008).

3. Klimazukunft Alpenraum (2010+)

Aussagen über das Klima der Zukunft können ausschließlich aufgrund von Modellrechnungen (Simulationen) erstellt werden. Zusätzlich müssen speziell für Extremereignisse auch physikalische Überlegungen bzw. Annahmen getroffen werden. Klimamodelle sind physikalisch/mathematische Modelle mit denen auf Großrechenanlagen das globale Klima simuliert werden kann. Um die Qualität der Vorhersagen zu verbessern, stützen sich die neueren Prognosen nicht mehr nur auf ein einziges Modell, sondern es werden Ensembleuntersuchungen durchgeführt (wie sie auch das IPCC verwendet). Extremvarianten werden dabei ausgeschlossen. Erst wenn der Trend stärker als die natürlichen Schwankungen wird, werden Modellsignale signifikant. In verschiedenen Experimenten mit diesen Modellen wird überprüft, ob und wie sich das Klima unter Annahme natürlicher Antriebe¹³ und anthropogener Einflussfaktoren verhält. Die anthropogenen Einflussfaktoren gehen im Wesentlichen durch verschiedenste Emissionsszenarien in die Modelle ein.

Die globalen Ergebnisse der verschiedenen Modelle, die die Abschätzung des zukünftigen Klimas in Zahlen fassen, sind im *großräumigen* Maßstab grundsätzlich ähnlich und für eine *grobe* Abschätzung über die Klimazukunft auch im Alpenraum brauchbar. Unterschiede existieren in den räumlichen Mustern sowie in der Stärke der Änderungen. Die Analyse der Globalmodelle zeigt eine deutliche Zunahme der Lufttemperatur bis 2100 die für den Sommer mit ca. 4°C stärker ausfällt als für den Winter, für den der wahrscheinlichste Anstieg bei 3,5 °C liegt. Kein Klimamodell zeigt eine Abkühlung. Für den Niederschlag zeigt sich eine deutliche Abnahme bis 2100 für den Sommer auf 80% des Wertes von heute und eine leichte Zunahme auf ca. 105% im Winter (TU-Wien/ZAMG 2011: 2-40ff, Umweltdachverband 2006: 20, ZAMG 2011k).¹⁴

Für eine räumlich differenzierte Analyse ist jedoch die räumliche Auflösung der Globalmodelle (Größenordnung 100km) für den Alpenraum *zu grob*. Deshalb wird mittels unterschiedlicher Verfahren des „Downscalings“ die Information auf eine Größenordnung von 25 bis 50 km je Rasterzelle verfeinert. Diese führen im Alpenraum zurzeit noch zu unterschiedlichen, teils nicht konsistenten Ergebnissen. Die Unsicherheit der Aussagen ist größer, wenn es um *kleinräumige* und extreme Effekte und insbesondere um solche des Niederschlages geht (TU-Wien/ZAMG 2011: 2-40ff, ZAMG 2011k).¹⁵

Das Ausmaß der Klimaerwärmung ist ab 2050 entscheidend davon geprägt, wie stark der Ausstoß von Treibhausgasen (das jeweilige Emissionsszenario) bis zu diesem Zeitpunkt gedrosselt (oder auch beschleunigt) wurde. Dekadische Variabilitäten, also die normalen mehrjährigen meteorologischen Schwankungen nach oben *und nach unten*, können von den Modellen nur unzureichend simuliert wer-

13. Natürliche Faktoren wie der (katastrophale) Ausbruch von Vulkanen oder starke Veränderungen der Sonnenaktivität können dabei nicht berücksichtigt werden, da sie unvorhersehbar sind (siehe dazu Punkt 2.5).

14. Alternativ zu den regionalisierten Klimamodellen aus den in diesem Abschnitt Ergebnisse zitiert wurden, liegen auch andere Klimaszenarien vor, die mit dynamischen „Downscaling-Verfahren“ arbeiten (vgl. Reclip:century1,2: Loibl et al. 2011). Die Ergebnisse dieser Klimaszenarien unterscheiden sich in ihrer Tendenz nicht grundsätzlich von den hier vorgestellten.

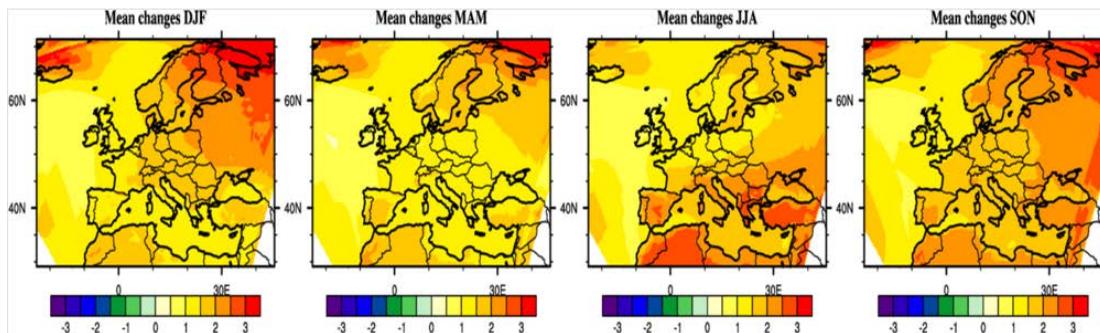
15. In diesem Sinne haben die Ergebnisse der Klimaszenarien keinen prognostischen Wert, sondern sind als Wahrscheinlichkeiten, auf einer Skala von „robust“ bis „weich“, zu werten.

den. Sie überlagern den langfristigen Trend, „maskieren“ ihn. Dieser Effekt ist vor allem bis 2050 ausgeprägt. Bedingt werden diese Variabilitäten unter anderem durch das Wechselspiel der unterschiedlichen Phasen der Nordatlantischen Oszillation (NAO), die zu mehr ozeanischen (feucht-kühl oder mild) oder kontinental (trocken-kalt oder warm) geprägten Witterungsabläufen in Mitteleuropa führen.

3.1 Lufttemperatur

Mittels „regionaler“ Klimamodelle sind bereits kleinräumigere Aussagen über Temperatur- und Niederschlagsentwicklung möglich. Abbildung 10, bildet den Mittelwert aus verschiedenen Ensembles (Modelldurchläufen) und illustriert den weiteren Verlauf der Klimaerwärmung in Europa. Bis 2050 steigen die jährlichen Mitteltemperaturen um 1 bis 3°C an, wobei sich Kontinentaleuropa stärker erwärmt als das maritim beeinflusste Westeuropa. Saisonal ist die Erwärmung über Ost- und Nordeuropa im Winter am stärksten, über Westeuropa am schwächsten. Im Sommer ist der Anstieg besonders in Südeuropa, mit Schwerpunkt über der Iberischen und der Balkanhalbinsel, am ausgeprägtesten. Die Herbstmonate sollten sich gegenüber den Frühlingsmonaten generell deutlich stärker erwärmen (ZAMG 2011k,p).

Abbildung 10: Mögliche zukünftige Änderung der Temperatur 2030–2050 in Europa im Vergleich zu heute (1961–2000) im Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON). (ENSEMBLES 2010)



Quelle: Klimawandelportal ZAMG

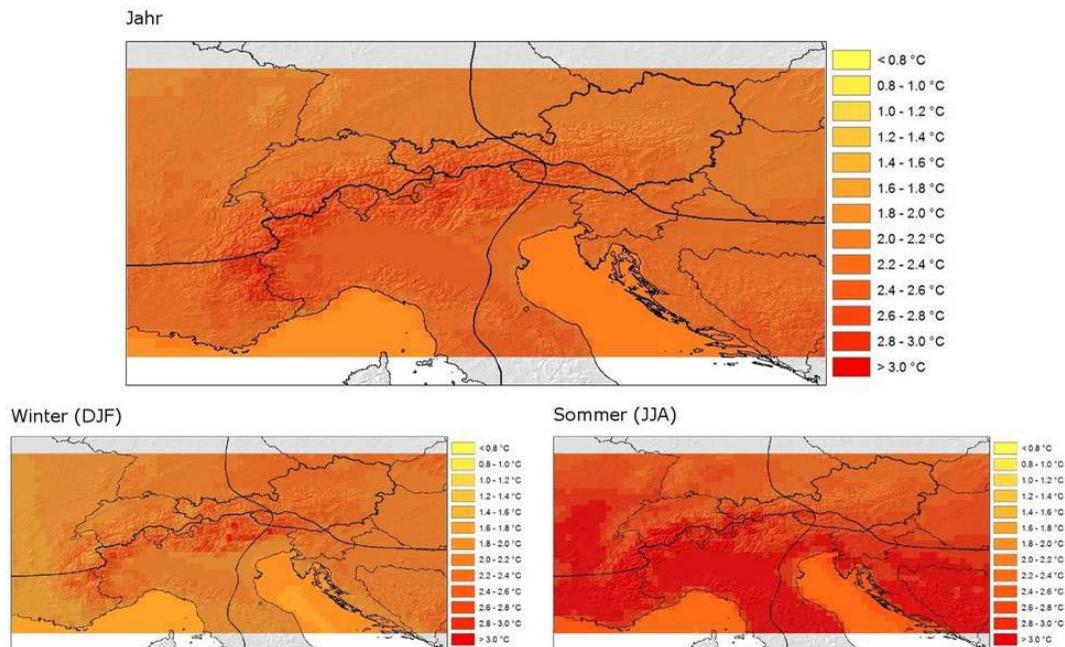
http://www.zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/4-2_Klimazukunft_Europa_Abb1_gr.png&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=1000&imgHeight=298

Im *Alpenraum* ist bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts mit einem Temperaturanstieg von knapp 2°C zu rechnen. Pro Jahrzehnt bewegt sich die Zunahme zwischen 0,3 und 0,45°C der Mittelwerte. Noch deutlicher ausgeprägt ist die Erwärmung in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts von weiteren 3 bis 3,5°C bis 2100.

Abbildung 11 zeigt die modellierte Entwicklung für den Zeitraum von 2041-2070. Daraus ist ersichtlich, dass sich die Erwärmung relativ homogen über den ganzen Alpenraum verteilt (Böhm et al. 2008, ZAMG 2011k,p). Die stärkste Erwärmung findet sich am Alpenhauptkamm und südlich davon. Dies könnte auch durch die stärkere Anströmung der Höhenlagen gegenüber den Ebenen bedingt sein. Diese sind nicht durch lokale Temperaturinversionen (vor allem des Winterhalbjahres) von der freien

Atmosphäre relativ abgekoppelt und erwärmen sich daher stärker. Die überdurchschnittlich starke Erwärmung mit Anstieg der Seehöhe wird jedoch nicht von allen Modellen angezeigt¹⁶. Bei den Jahreszeiten zeigt sich, dass ab 2050 die stärkste Erwärmung in den Sommermonaten stattfindet. Im Tagesgang werden die nächtlichen Tiefstwerte stärker ansteigen als die Tageshöchsttemperaturen - ein Effekt der auch schon während der rezenten Erwärmung manifest ist. Dies zeichnet sich vor allem für alpine Täler und Senken ab. In den Hochlagen steigen Minima und Maxima gleichmäßiger an (AustroClim 2008a: 87f, ETH Zürich 2009: 11, IPCC 2007a: 8, Loibl et al. 2011: 4, OcCC 2007: 44, ZAMG 2011k,p).

Abbildung 11: Änderung der Lufttemperatur im Jahresmittel, Sommer, Winter von 2041-2070 im Alpenraum (bezogen auf 1961-1990) aus regionalen Klimamodellierungsdaten des Modells CCLM



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Lautenschlager u.a. 2005, 2009)

http://www.zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/4-3_Klimazukunft_Alpenraum_Abb5_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=1000&imgHeight=623

3.2 Niederschlag

Niederschlag (Regen, Schnee etc.) ist das in der Atmosphäre aus der Gasphase (Wasserdampf) in die flüssige oder feste Phase umgewandelte und ausgeschiedene Wasser. Ein Sekundäreffekt des Klimawandels

16. Im Widerspruch dazu steht, dass die rezente Klimaerwärmung Täler, Becken *und* Gipfel gleichermaßen erwärmt, also vertikal und horizontal gleich ausgeprägt ist (ZAMG 2011m).

dels, der Klimaerwärmung ist die Ankurbelung der Verdunstungsrate. Ein wärmeres Klima wird physikalisch bedingt auch ein Feuchteres sein. Wärmere Luft kann mehr Wasserdampf als kältere Luft aufnehmen, die Zunahme erfolgt sogar exponentiell. Als Folge davon steigt die Menge an Wasserdampf an, die beispielsweise über den Wasserflächen (des Atlantiks oder des Mittelmeeres) verdunstet. Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre steigt an. Ein Unsicherheitsfaktor ist jedoch *wohin* die atmosphärische Zirkulation die zusätzlichen Wassermassen transportiert und wo sie abgeregnet werden. Hinzu kommt, dass der Alpenraum, als West-Ost ausgerichtete Gebirgskette, bei vorherrschender Strömung aus West-Nordwest, für die Luftmassen ein Hindernis darstellt und eine Wetterscheide bildet. Diese Klimascheidenfunktion, die auch unterschiedliche klimatische Bedingungen in nahe gelegenen Regionen verursacht, lässt erwarten, dass auch der Klimawandel in dieser Region räumlich sehr inhomogen verläuft und sich kleinräumig anders verhält als der mittlere Klimawandel im gesamten Alpenraum (Böhm 2009: 163, Michler 2010: 220-221, ZAMG 2011p).

Die Lage der Alpenkette bewirkt auch, dass Österreich bei den Niederschlagssimulationen jeweils im Übergangsbereich zwischen erwarteten Zu- und Abnahmen liegt. Dies bedeutet eine größere Unsicherheit für die Änderung im Ostalpenraum verglichen mit beispielsweise jener von Skandinavien (klare *Zunahme*) oder jener im Mittelmeerraum (klare *Abnahme*). Zwischen diesen Polen (Zunahme in Nord- und Abnahme in Südeuropa) ist das Muster der simulierten Niederschlagsveränderung über Mitteleuropa weit *inhomogener* als das der zu erwartenden Temperaturänderungsmuster.

Den Ergebnissen der Klimaszenarien nach dürfte im Alpenraum die Jahresniederschlagssumme jedoch in etwa konstant bleiben. Und die Meßbefunde der Vergangenheit legen auch bei der künftigen Niederschlagsentwicklung einen ausgeprägten Übergang zwischen Alpennord- und Alpensüdseite nahe. Die relativ konstante Gesamtniederschlagsmenge in Verbindung mit einem deutlich höheren Temperaturniveau und der damit verbundenen Verdunstung kommt jedoch einem Rückgang des zur Verfügung stehenden Angebots gleich. Ein wichtiger Sekundäreffekt des Klimawandels ist damit auch, dass die Bodenfeuchte, der Bodenwassergehalt *zusehends* von der Temperatur bestimmt wird und *weniger* vom Niederschlagsangebot (Böhm 2009: 163).

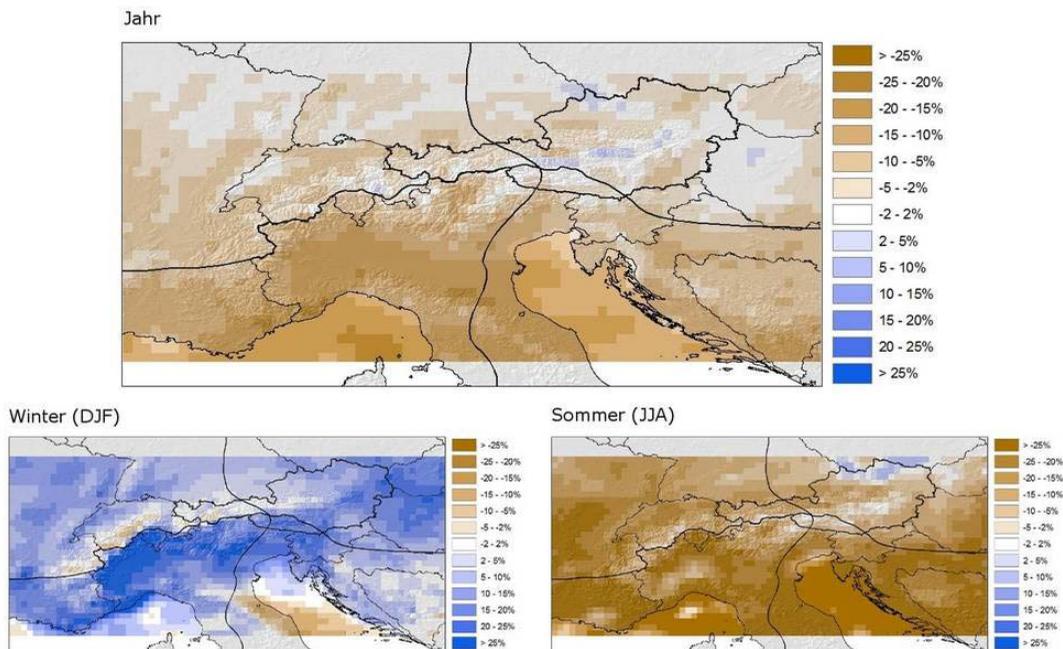
Wichtiges Ergebnis der Klimamodelle ist auch, dass signifikante Veränderungen beim Niederschlag erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu erwarten sind. Bis dahin werden die Effekte von jährlichen Schwankungen (20 bis 25%) und der dekadischen Variabilität *überlagert*.

Abbildung 12 zeigt die Entwicklung des Gesamtniederschlags für den Zeitraum 2041-2070, für die Winter- und Sommermonate. Über das gesamte Jahr betrachtet sind die Veränderungen gering und bewegen sich für den gesamten Ostalpenraum zwischen +/-5 bis 10%. Erkennbar ist ein deutlich *saisonal* Effekt: In den Wintermonaten kommt es durchwegs zu einer Zunahme der Niederschlagsmengen vor allem südlich des Alpenhauptkamms. Die Sommermonate lassen im Unterschied dazu flächendeckend Rückgänge bei den Niederschlägen erwarten. Lediglich für das Wald- und Mühlviertel wird eine leichte Zunahme der Regenmenge simuliert.¹⁷ Diese saisonalen Effekte lassen zukünftig eine Dämp-

17. Die kleinräumig erkennbaren Unterschiede zeigen eine *mögliche* Entwicklung auf. Aus heutiger Sicht sind Aussagen darüber sehr unsicher.

fung des in Österreich üblichen Jahresganges des Niederschlages (geringeres Sommermaximum und höheres Winterminimum) erwarten (Böhm 2009: 162-163, ZAMG 2011k,p).

Abbildung 12: Änderung des Niederschlags sowohl im Jahresmittel, als auch im Sommer und Winter von 2041–2070 bezogen auf das Mittel von 1961–1990 aus regionalen Klimamodellierungsdaten des Modells CCLM



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Lautenschlager u.a. 2005, 2009)

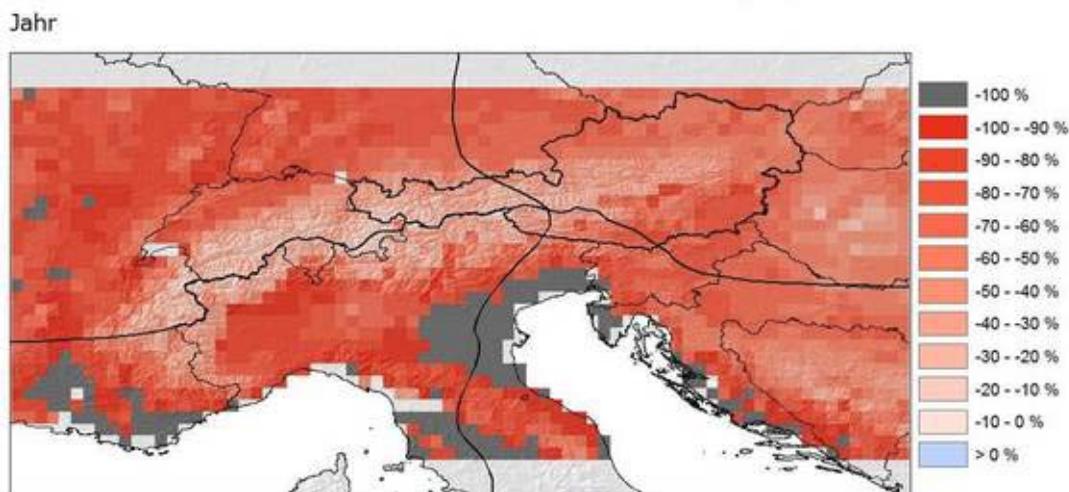
http://www.zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/4_3_Klimazukunft_Alpenraum_Abb6_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=1000&imgHeight=623

3.3 Schneefälle und Schneedecke

Durch den Anstieg der Nullgradgrenze (und damit der Schneefallgrenze) werden sich auch die Anzahl der Frosttage und die Tage mit Schneefall bzw. als Folge daraus die Tage mit Schneebedeckung (in Abhängigkeit von der Höhenlage) weiter reduzieren. Dieser Effekt wird sich besonders im Spätherbst und in den Frühlingsmonaten manifestieren. Das vermehrte Auftreten von Regen- statt –Schneefällen betrifft vor allem die Niederungen und das Mittelgebirge (siehe dazu auch Abbildung 13). In den hochalpinen Lagen (über 1.800 Meter), an oder oberhalb der Null-Grad-Grenze muss die Zunahme von Regen- gegenüber Schneefällen nicht zwangsläufig eintreten. Durch die Höhengliederung (der Temperatur) eines Gebirgslandes kommt es kleinräumig zu unterschiedlichen Trends des Schneefalls. Bei den Schneeverhältnissen bestehen auch große regionale Unterschiede (z.B. Alpennord- und Alpensüdseite). In mittleren Höhenlagen wird sich die Verkürzung der winterlichen Schneedeckendauer deutlich auswirken d.h. späterer Beginn und früheres Abschmelzen des Schnees. Schneereiche Winter wird es in Abhängigkeit von der Großwetterlage aber auch in Zukunft geben, wenngleich seltener als in der

Vergangenheit. Nicht übersehen werden darf aber die starke, kurzfristige Variabilität von Jahr zu Jahr (BMLFUW/TU-Wien 2011: 2-62, Böhm 2008b: ZAMG 2011k).

Abbildung 13: Änderung der Schneedeckendauer (in%) im Jahresmittel von 2041-2070 bezogen auf das Mittel 1961-1990



Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Lautenschlager 2005, 2009)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/4-3_Klimazukunft_Alpenraum_Abb7_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=599&imgHeight=271

3.4 Extremwerte und Extremereignisse

Prospektiv sollte ein wärmeres Klima in Mitteleuropa die Wahrscheinlichkeit für Extremwerte statistisch und physikalisch beträchtlich erhöhen, weil sich wie bereits beschrieben die Zunahme der Mittelwerte auch eine Zunahme der Streuung mit sich bringt, die ganz überwiegend in Richtung extreme Wärme und Hitze ausschlägt.

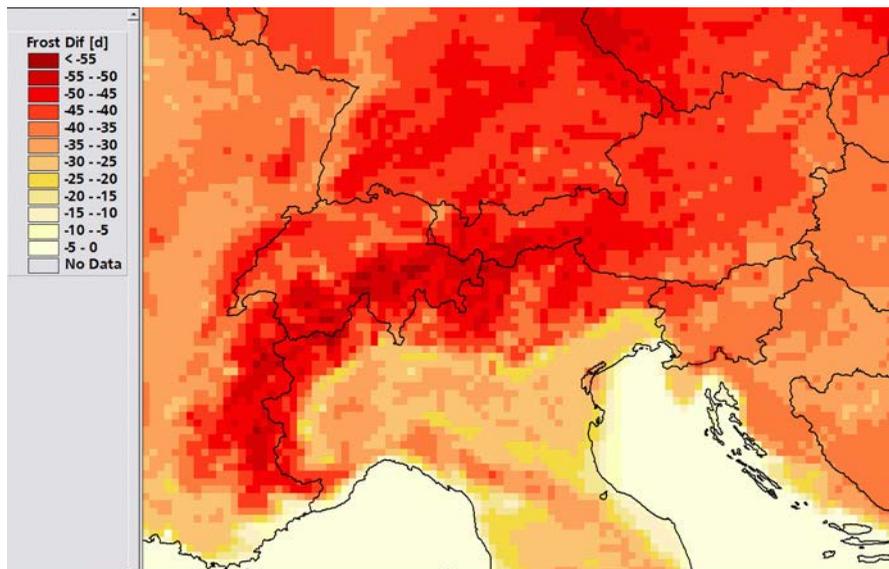
3.4.1 Hitze und Kälte

Analog zur Erhöhung der mittleren Temperaturen nehmen auch alle Arten von positiven Temperaturwerten (heiße Tage, absolute Maxima etc.) zu, bei etwa gleicher Abnahme der negativen Temperatur-extreme (Frost, absolute Minima).

Nach Einschätzung des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) wird die Zunahme der Lufttemperatur mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer Zunahme von Hitzewellen einhergehen, zumal die Erwärmung im Sommer sogar größer als im Winter sein wird. Hitzewellen werden sowohl häufiger auftreten, als auch länger andauern. In erster Linie wird die steigende Hitzebelastung die flachen Regionen außerhalb des Berggebietes betreffen. Das Berggebiet als klimatisch benachteiligtes Gebiet kann vom Anstieg der Temperaturen umgekehrt *profitieren* (alpine Hochtäler, Gebiete über 800 Meter Seehöhe) Hingegen können in den alpinen Tal- und Beckenlagen, ausgelöst durch Hit-

zewellen, zusehends Stressfaktoren für Mensch, Tier und Vegetation auftreten. Gleichzeitig wird es eine Abnahme der negativen Temperaturextremwerte (Frosttage, absolute Minima) geben. Der Rückgang der Frosttage kann anhand der folgenden Abbildung abgelesen werden. Selbst im Mittel- und Hochgebirge wird sich die Anzahl der Frosttage um rund 50 Tage jährlich vermindern.

Abbildung 14: Veränderung der Frosttage 2040-2050 gegenüber 1981-1990



Quelle: Reclip:more 2007

http://foresight.ait.ac.at/SE/projects/reclip/reports/Klimazukunft_Presse_text_final.pdf

Winterliche Kaltlufteinbrüche und Frostperioden werden so seltener, episodenhafter, auch in Abhängigkeit von der Großwetterlage (und dem NAO-Index) jedoch niemals zur Gänze verschwinden (Böhm 2008: 202f, IPCC 2007b, ZAMG 2011o).

3.4.2 Starkniederschläge

Höhere Niederschlagssummen im Winter und der höhere Feuchtegehalt der Atmosphäre (ganzjährig) könnten auch zu einer Zunahme von Starkniederschlägen führen. Aussagen in diese Richtung sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da kleinräumige Änderungen der konvektiven Niederschläge (Schauer, Gewitter), die beispielsweise zu sommerlichen Starkniederschlägen führen, nur schlecht in der Modellphysik der großräumigen Modelle enthalten sind und große Schwierigkeiten beim „Downscaling“ (auf kleinräumige Verhältnisse) bereiten.¹⁸ Besser, weil homogener, ist die Lage im Winterhalbjahr (TU-Wien/ZAMG 2011: 2-62).

18. Wie bereits thematisiert wird die räumliche Struktur von Gebirgszonen bzw. deren Erfassung durch die engmaschigen, regionalen Modelle bis dato noch nicht befriedigend gelöst. Dies gilt umso mehr für das Klimatelement Niederschlag (Böhm 2008: 238).

Ganz allgemein ist zu erwarten, dass sich wahrscheinlich in jenen Regionen die extremen Niederschläge häufen werden, wo auch der Trend der Gesamtniederschläge hinaufgeht, und dort seltener auftreten, wo ein genereller Trend zur Trockenheit besteht (Böhm 2008: 240).

Eine aktuelle Studie der ZAMG erwartet in Österreich eine Erhöhung der Niederschlagsmengen bei extremen Ereignissen um 10-35%. Im Sommer (10-20%) gilt dies für ganz Österreich und im Herbst und Winter speziell für den Südosten und Osten Österreichs. Letzteres könnte auf eine Veränderung der atmosphärischen Strömung und der Zugbahnen der Tiefdruckgebiete im östlichen Alpenraum (vermehrt Mittelmeer- und Adriatiefs?) hinweisen. Prognosen dazu sind jedoch spekulativ (ZAMG 2011k,j).

3.4.3 Sturmaktivität

Widersprüchlich sind die Aussagen, die den Klimaszenarien zur künftigen Sturmtätigkeit, der Zugbahn der atlantischen Sturmtiefs, deren Häufigkeit und Stärke entnommen werden können. Eine große Anzahl von Untersuchungen (beruhend auf Modellsimulationen) lassen den Schluss zu, dass die Anzahl extremer Stürme über der nordatlantisch-europäischen Region *ansteigen* wird und die Anzahl schwacher Tiefdruckgebiete zurückgehen könnte. Dabei ist die Zunahme extremer Sturmereignisse mit einer größeren Zahl intensiverer Tiefdruckgebiete verbunden (Albrecht et al. 2008). Andere Untersuchungen signalisieren hingegen eher eine *Abnahme* der Sturmaktivität, weil sich die Zugbahnen der atlantischen Tiefdruckgebiete eher nördlich verschieben sollten (~55-60° Breitengrad). Gleichzeitig wird eine Abschwächung der Zugbahnen im Mittelmeerraum simuliert. In Mitteleuropa und im Alpenraum hingegen ist keine signifikante Änderung der Sturmhäufigkeit und -intensität zu erwarten (Böhm 2008: 244, ZAMG 2011k).

Die Zunahme in den höheren Breiten wird hauptsächlich durch den höheren Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und der damit verbundenen Zunahme verfügbarer Energie begründet. Insgesamt erscheint eine Zunahme der Häufigkeit in höheren Breiten also wahrscheinlicher als über Mitteleuropa (Albrecht et al. 2008, ZAMG 2011j). Für eine Abschwächung der Sturmtätigkeit spricht global auch die stärkere Erwärmung der Arktis im Vergleich zu den Subtropen. Dadurch könnte der Druckgradient, der die Westwinde antreibt, flacher werden und damit eher schwächere Sturmtiefs hervorrufen als in der Vergangenheit (Böhm 2008: 242).

4. Zusammenfassung

Das Alpengebiet ist klimatisch gegenüber dem umgebenden Flach- und Hügelland benachteiligt, weist jedoch wegen des großen Einflusses des Reliefs bedeutende Unterschiede auf engstem Raum auf. Mit zunehmender Höhe sinkt die Temperatur und es steigt die Strahlungsintensität. Auch die Temperaturschwankungen, die Frosthäufigkeit, die Niederschlagsmenge und die Andauer der Schneebedeckung nehmen zu. Die Vegetationsperiode verkürzt sich gegenüber den alpinen Tal- und Beckenlagen signifikant. Durch ihre Lage als Nord-Süd-Barriere wirkt die Alpenkette als markante Wetter- und Niederschlagsseiche. Im Vergleich zu den Berggipfeln und den (wolken- und niederschlagsreichen) Nordstaulagen sind die inner- und südalpinen Becken und Täler, zum Teil auch föhnbedingt, begünstigt. Der alpine Raum ist nicht homogen, sondern setzt sich kleinräumig aus verschiedenen Teilklimata zusammen, die auch modifizierend auf die Einflüsse des Klimawandels wirken. Durch den Klimawandel verschieben sich nicht nur großräumig die Klimazonen vom Äquator zum Pol nordwärts, sondern sie steigen auch in die Höhe. Dies bewirkt eine deutliche Milderung des vorherrschend subalpinen und alpinen Klimas. Die bestehende Klimaungunst (geringe Wärmesumme resultierend in der kurzen Vegetationsperiode etc.) wird abgeschwächt.

Die Auswirkungen des Klimawandels, der Klimaerwärmung sind im Ostalpenraum bzw. im Berggebiet anhand meteorologischer Parameter (Temperatur, Niederschlag und Schneebedeckung, Sonnenscheindauer, etc.) eindeutig verifizierbar. Ausgehend vom tiefen Niveau der sogenannten „kleinen Eiszeit“ um die Mitte des 19. Jahrhunderts ist die *Temperatur* um knapp zwei Grad angestiegen, etwa doppelt soviel wie im globalen Schnitt. Auf dem Sonnblick hat sich die Atmosphäre um dieselben zwei Grad erwärmt wie in Wien, am Schweizer Jungfraujoch oder in Marseille. Der Klimawandel zeigt sich aber nicht nur bei der Temperatur, sondern auch der Luftdruck und die Sonnenscheindauer sind angestiegen. Dies ist auf die Nordwärtsverlagerung des subtropischen Hochdruckgürtels zurück zu führen. Der Erwärmungstrend hat sich seit den 1980er Jahren beschleunigt und bewegt sich seither auf diesem hohen Niveau. Die beiden wärmsten Dekaden der instrumentellen Messgeschichte waren die 1990er und 2000er Jahre. Frühling und Sommer haben sich stärker erwärmt als die Herbst- und Wintermonate.

Kurzfristig treten im Großraum Alpen beim *Niederschlag* große jährliche Schwankungen (20-25% bis zu 50-150%) auf, die von einer langfristig nur geringen Schwankungsbreite von +/-10% geprägt sind. Im Unterschied zur Temperatur zeigt der Niederschlag keine ähnlichen Trends in der gesamten Region. Die Subregionen weisen erhebliche Unterschiede auf. So ist die langfristig gegenläufige Niederschlagsentwicklung nordwestlich (mehr Niederschlag) und südöstlich (weniger Niederschlag) des Alpenbogens signifikant. Dazu passt auch, dass die Winterniederschläge seit Mitte der 1970er Jahre nördlich des Alpenhauptkammes gestiegen, südlich davon aber zurück gegangen sind. Kurzfristig ist auffällig, dass der Norden sowie die inneralpinen Gebiete einen kontinuierlichen Anstieg des Niederschlages verzeichnen, der im Norden seit der trockenen Phase davor bereits die Größenordnung von 15% erreicht hat (und die langfristige Bandbreite von +/-10% übersteigt). Entgegen der Annahme von einer Zunahme von Niederschlagsextremen hat die hochfrequente Variabilität des Niederschlages eher *abgenommen*.

In Lagen unter 1.000 Metern Seehöhe ist der steigende Anteil des Regen am winterlichen Gesamtniederschlag deutlich meßbar. Südlich des Alpenhauptkammes wurde die größte Abnahme sowohl an Tagen

mit einer Schneedecke als auch in der Schneemächtigkeit festgestellt. Beim Klimaelement Schnee besteht jedoch eine starke jährliche Schwankung, die den manifesten Trend des Klimawandels (noch) überlagert. Bei den Extremwerten (vor allem beim Klimaelement Niederschlag) ist bis dato nicht schlüssig zu beantworten, ob es einen Trend zu häufigerem Auftreten gibt. Die Anzahl der Tage mit hohen Temperaturen ist hingegen eindeutig gestiegen. Bei der Sturmaktivität gibt es keinen Trend zu mehr und stärkeren Stürmen.

Aussagen über das Klima der Zukunft können ausschließlich aufgrund von Modellrechnungen (Klimaszenarien) erstellt werden. Diese haben mehr oder weniger große Aussagekraft. Die Unsicherheit steigt bezüglich kleinräumiger und extremer Effekte, insbesondere beim Klimaelement Niederschlag. Gesichert ist, dass bis 2050 im Alpenraum die jährliche Mitteltemperatur um weitere 2°C ansteigen wird (Anstieg je Jahrzehnt 0,3 bis 0,45°C). Noch deutlicher steigen die Temperaturen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts (3 bis 3,5°C). Die Erwärmung wird sich relativ homogen auf den Alpenraum verteilen. Etwas höher wird sie jedoch für den Alpenhauptkamm und südlich davon simuliert. Bei den Jahreszeiten zeigt sich, dass die stärkste Erwärmung zumindest ab 2050 in den Sommermonaten stattfindet. Warme und heiße Tage sowie Hitzewellen werden häufiger, kalte Tage und strenge Kälte werden seltener auftreten. Für den Alpenraum und das Berggebiet gilt dies natürlich modifiziert.

Den Ergebnissen der Klimaszenarien nach dürfte im Alpenraum die Jahresniederschlagssumme in etwa (+/-5%) konstant bleiben. Und die Messbefunde der Vergangenheit legen nahe, dass es auch zukünftig einen ausgeprägten Übergang zwischen Alpennord- und Alpensüdseite geben sollte. Die relativ konstante Gesamtniederschlagsmenge in Verbindung mit einem deutlich höheren Temperaturniveau kommt jedoch einem Rückgang (höhere Verdunstung und geringere Bodenfeuchte) des zur Verfügung stehenden Wasserangebots gleich. Die saisonalen Effekte liegen darin, dass die Niederschläge verstärkt in den Wintermonaten fallen dürften, während die Sommermonate Rückgänge erwarten lassen. Prospektiv sollte ein wärmeres Klima die Wahrscheinlichkeit für Extremwerte anheben. Genaue Aussagen können darüber aber (noch) nicht angestellt werden. Ähnliches gilt für Prognosen der Starkniederschläge und der Sturmhäufigkeit.

**Auswirkungen des Klimawandels
auf Ökosysteme, Naturhaushalt und
die biologische Vielfalt (Biodiversität)**

1. Stabilität von Ökosystemen, Biodiversität und Klimawandel

Der Klimawandel wird den Menschen, Gesellschaft und Ökonomie über seine Auswirkungen auf den Naturhaushalt bzw. die Ökosysteme beeinflussen. Die Auswirkungen der anthropogenen Erwärmung verändern u.a. die physikalischen und biologischen Komponenten der Ökosysteme – Luft, Wasser, Boden, etc. Dabei weisen die Ökosysteme verschiedene Dimensionen bzw. Teilaspekte auf, die vom Klimawandel unterschiedlich stark beeinflusst werden. Die Komplexität der Wirkungen und Wechselwirkungen zahlreicher Faktoren auf allen Ebenen von Ökosystemen erschweren Prognosen zum Verhalten von Arten und Lebensräumen im Einfluss des Klimawandels. Einige Reaktionsmuster lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt abschätzen. Wissenslücken bestehen besonders bei der Untersuchung komplexer Phänomene, die Einfluss mehrerer Faktoren und Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Arten oder Organismengruppen behandeln (EU-Kommission 2007a: 20, UBA 2010d: 46ff).

Ökosystem ist ein Fachbegriff der Biologie (wörtlich griech. –oikos „Haus, Haushalt“), mit dem die *funktionale Wechselwirkung* von Lebewesen und Lebensraum in einem räumlich abgegrenzten Ausschnitt der Biosphäre gefasst wird. Umgangssprachlich wird auch von dem Ökosystem gesprochen, womit die Gesamtheit aller Ökosysteme und ihren Wechselwirkungen der gesamten Erde gemeint ist (Biosphäre). Wichtige terrestrische (Land-)Ökosysteme umfassen Waldökosysteme, Wiesen und Weiden (als Kulturlandschaftstypen) sowie Feuchtlebensräume (Moore, Auen, Uferzonen). In den alpinen Regionen Österreichs und im Berggebiet treten alle diese Ökosysteme auf. Einzigartige Ökosysteme für das Berggebiet treten in der alpinen (über 2.000 Meter Seehöhe) und nivalen Höhenstufe (Schneestufe) auf. Tier-, Pflanzen- und Pilzarten haben dabei eine zentrale Rolle als Motor ökosystemarer Prozesse. Das Vorkommen von Arten ist abhängig von Klima, Geologie und anderen Standortfaktoren. Bei der Biodiversität kann man drei Ebenen unterscheiden: Die Artenvielfalt¹, die Vielfalt der Ökosysteme (Lebensräume) sowie die genetische Vielfalt (UBA 2010d: 46f, biologischevielfalt.at 2012a).

Die verschiedenen Teilaspekte des Ökosystems werden vom Klimawandel unterschiedlich beeinflusst. Naheliegend sind Veränderungen des *Wasserhaushaltes* bzw. die *Wasserverfügbarkeit* durch die Veränderung und Verteilung der Niederschläge. Und als Lebensgrundlage aller Ökosysteme reagiert der Wasserkreislauf besonders sensibel auf Klimaveränderungen. Aber auch der *Stoffhaushalt* von Ökosystemen (Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor etc.) ist von Klimaänderungen berührt, weil höhere Temperaturen eine Stimulation biologischer Prozesse bedeuten. Besonders direkte Reaktionen auf den Klimawandel sind aufgrund der kurzen Generationszeiten und effizienten Ausbreitungswege bei *Mikroorganismen* zu erwarten. Höhere Temperaturen verändern Bodenqualität und Aktivität der Mikroorganismen im Boden. Beispielsweise führt dies zu Veränderungen beim Abbau des Laubstreu durch Bodenorganismen. Mikro- und Bodenorganismen sind wiederum den globalen Stoffflüssen und Stoffumsätzen eng verbunden. Direkte Wechselwirkungen bestehen auch zwischen Erwärmung und *Vegetation*. Neben der *Vegetation* ist auch die *Tierwelt* vom Klimawandel erfasst. Auswirkungen sind auch bei den sogenannten *biotischen Interaktionen*, des Netzwerkes an gegenseitigen Abhängigkeiten und Beeinflussungen (Dominanzverhältnisse, Konkurrenzbedingungen, Populationsdichten etc.) zu erwarten. Weil der Klimawan-

1. Als Form der Biodiversität ist für den Menschen die Artenvielfalt am leichtesten fassbar und wird daher fälschlicherweise of synonym damit verwendet (biologischevielfalt.at 2012b).

del die Häufigkeit, genetische Vielfalt und Verbreitungsgebiete von Arten beeinflussen wird, sind auch Auswirkungen auf die Zusammensetzung von Ökosystemen zu erwarten (Beierkuhnlein/Foken 2008: 104ff).

Abbildung 1: Gletscherwelt der Ötztaler Alpen.



Die Fels- und Schneestufe liegt an und oberhalb der Vegetationsgrenze. Der Schnee bleibt dort auch im Sommer oft liegen. Trotz der widrigen Bedingungen des Lebensraums finden sich noch Moose, Flechten und Algen.
(Foto: Josef Krammer)

Der Begriff der *Ökosystem-Dienstleistungen* beschreibt Ökosystemfunktionen. Darunter versteht man die Bereitstellung von Ressourcen wie Bodenbildung und Schutz vor Erosion, Wasser, Luft, Artenvielfalt, die Bereitstellung von Trinkwasser, von Nahrungsmitteln, von Rohstoffen und Energie sowie die Abwehr von Naturgefahren. Auch bei diesen für Mensch und Wirtschaft eminent wichtigen Faktoren sind große Veränderungen durch die Klimaerwärmung zu erwarten (UBA 2011b: 31ff, UBA 2010d: 47).

Die Stabilität von Ökosystemen ist vor allem im Hinblick auf die Veränderungen des Artenspektrums durch den Klimawandel von Interesse. Ökosysteme haben die Eigenschaft, sich selbst regulieren zu können, wodurch sie kurzzeitigen Belastungen durch die Umwelt standhalten können. Paradoxe Weise können regelmäßig auftretende natürliche „Störungen“ (Hochwässer, Waldbrände etc.) sogar Bestandteil der Systemstabilität sein. Ist eine gewisse Belastungsgrenze (bzw. Schwellenwerte) jedoch überschritten, kann das Ökosystem in einen anderen Zustand übergehen.

Der Biodiversität und dabei besonders der *genetischen Vielfalt* kommt bei der Anpassung an die Klimaerwärmung eine besondere Bedeutung zu: Jeder Organismus, jede Art hat bestimmte Ansprüche an das Klima. Durch die Klimaerwärmung, die Verschiebung der Klimazonen verändern sich daher absehbar auch die Lebensraumbedingungen in heimischen Ökosystemen. Damit wird die Anpassungsfähigkeit der Arten herausgefordert. Diese müssen in kurzer Zeit auf veränderte klimatische Verhältnisse reagieren. Arten mit hoher genetischer Vielfalt werden sich wahrscheinlich besser an ein wärmeres Klima anpassen können. Beispielsweise können sich Baumarten, deren Populationen die Fähigkeit zur Bildung längerer Wurzeln besitzen oder dickere Blattoberflächen bilden können, auf niederschlagsärmere Bedingungen besser einstellen und diese können längere Trockenperioden vitaler überdauern (biologischesvielfalt.at 2012a, UBA 2010d: 46).

Ein Schlüsselbegriff der Klimafolgenforschung ist aus den beschriebenen Erwägungen über deren Stabilität die *Resilienz* (wörtlich Widerstandsfähigkeit) oder Elastizität ökologischer Systeme. Sie bezeichnet die Fähigkeit von Ökosystemen Störungen zu tolerieren, ohne dass das System so zusammenbricht, dass sich langfristig ein qualitativ veränderter Systemzustand einstellt, der von einer Vielzahl anderer Prozesse geregelt wird. Die Resilienz kann beispielsweise mit der Unterschreitung einer Mindestvielfalt an Arten verloren gehen (AustroClim 2008a: 25ff, UBA 2012d:14f).

Umgekehrt kann die Widerstandskraft der Ökosysteme durch ein breites Artenspektrum und eine nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen (Boden, Wasser, Luft etc.) gestärkt werden (biologischesvielfalt.at: 2012a).

Der Schutz natürlicher Ökosysteme bzw. die Erhaltung der Artenvielfalt beruht deshalb auf der Überlegung, dass die Vielgestaltigkeit und Komplexität der Natur wesentlich zur System-Stabilität beiträgt. Gesunde Ökosysteme sind gegenüber dem Klimawandel unempfindlicher („resilienter“) und daher besser in der Lage, die Ökosystemleistungen aufrechtzuerhalten. Dabei ist in Rechnung zu stellen, dass übermäßige Nutzung und die Verschmutzung von Ökosystemen schon unter „normalen“ Bedingungen an deren Belastungsgrenzen führen (AustroClim 2008a: 25ff, EU-Kommission 2007a: 20).

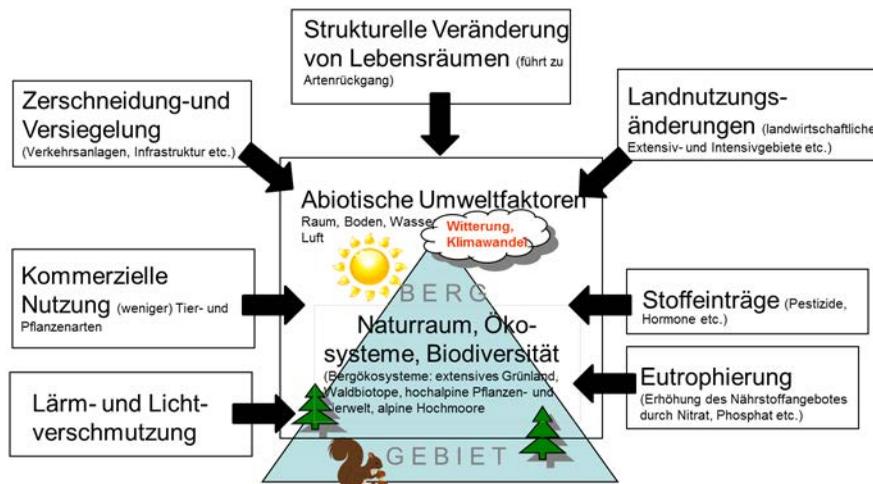
Ökosysteme weisen innerhalb von bestimmten Schwankungsbreiten eine große Stabilität auf. Der Klimawandel stellt nun eine gravierende Veränderung von (abiotischen) Umweltfaktoren dar. Die damit einher gehenden „Störungen“ fordern oder überschreiten absehbar die Widerstandsfähigkeit (Resilienz) der Ökosysteme. Es ist davon auszugehen, dass es beim Überschreiten gewisser Schwellenwerte zu starken ökosystemaren Veränderungen (z.B. Mortalitätsraten) kommen wird. Damit verbunden ist ein Verlust von Funktionalität. Ein Artenverlust geht auch mit einem Verlust von Schutzfunktionen, also von stabilisierend wirkenden Eigenschaften der Ökosysteme einher (Beierkuhnlein/Foken 2008: 154ff).

2. Klimawandel und beeinträchtigende Auswirkungen auf Naturraum, Ökosysteme und Biodiversität

Im Unterschied zu historischen Klimaänderungen sind die aktuellen Veränderungen die der Naturraum und die Ökosysteme ausgesetzt sind nur ein Faktor unter vielen. Global betrachtet hat sich der Zustand der meisten Ökosystemtypen, die Lebensraum für Mensch, Tier- und Pflanzenarten sind, aufgrund von Lebensraumverlust und Degradation in den vergangenen 100 Jahren dramatisch *verschlechtert*. Ressourcenentnahme und die mangelnde Nachhaltigkeit beeinträchtigen Naturraum, Ökosysteme und deren Biodiversität. Zu den schädigenden Faktoren zählen:

- ◆ Strukturelle Veränderungen von Lebensräumen und Landnutzungsänderungen durch den Menschen. Beispielsweise stellt in Mitteleuropa und auch im Berggebiet Österreichs die Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung von Gunstflächen bei gleichzeitiger Nutzungsaufgabe von marginalen Grenzertragsflächen ein latentes Problem dar;
 - ◆ Stoffeinträge in Lebensräume, Anreicherungen von Wirkstoffen (Pestizide, Hormone etc.) Eutrophierung, allgemeine reaktive Substanzen;
 - ◆ Nutzung der biologischen Vielfalt durch den Menschen (z.B. Kommerzielle Nutzung einiger weniger Tier- und Pflanzenarten);
 - ◆ Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre, wie sie auch der anthropogene Treibhauseffekt auslöst (CO₂, Stickstoff-Verbindungen etc.);
 - ◆ Lärm- und Licht-„Verschmutzung“;
- (Hoppichler 2002: 21ff, UBA 2010d: 16, OcCC 2007: 26, biologischevielfalt.at 2012a)

Abbildung 2: Klimawandel und die Degradation von Naturraum, Ökosystem und Biodiversität



Quelle: eigene Graphik

(nach UBA 2010d:16, OcCC 2007:26, biologischevielfalt.at 2012c)

Die Folgen dieser Veränderungen bestehen aus:

- ◆ Verlust an biologischer Vielfalt und ganzer Lebensgemeinschaften – Rückgang von Arten und Lebensräumen;
 - ◆ Veränderung der Landbedeckungsformen; damit verbunden Flächenversiegelung und dauerhafter Verlust von Lebensräumen, Verbauung der Fließgewässer, Zerschneidung von Lebensräumen durch Verkehrswegebauten;
 - ◆ Verlust an Bodensubstanz und Bodenqualität (z.B. Verringerung des Humusgehaltes landwirtschaftlich genutzter Flächen);
 - ◆ Veränderter ökosystemarer Nutzen für den Menschen;
- (Hoppichler 2002: 21ff, UBA 2010d: 16, OcCC 2007: 26, biologischevielfalt.at 2012a)

Es steht zu befürchten, dass sich die Degradationsprozesse in Wechselwirkung mit dem Klimawandel weiter beschleunigen und es zu einem weiteren Verlust an Lebensräumen, Bodensubstanz und -qualität sowie der Arten kommen wird.

3. Landnutzungsformen im alpinen Raum und dem Berggebiet

3.1 Historische Entwicklung der Landnutzung

In prähistorischer Zeit war nahezu der gesamte Ostalpenraum dicht bewaldet. Die Waldbedeckung ist quasi *die* natürliche nacheiszeitliche Vegetationsform. Ökologische Grenzen wurden einerseits durch die abnehmende Temperatur mit steigender Seehöhe (bis zur Waldgrenze) und andererseits durch die Bodenqualität gesetzt. Im Wesentlichen waldfrei blieben nur die hochalpinen Regionen der alpinen und nivalen Höhenstufe, wobei die Baumgrenze nacheiszeitlich (holozänes Klimaoptimum) sogar etwas höher lag als die aktuelle. Ohne Waldbedeckung blieben auch Gewässer- und Moorflächen und Steillagen wo eine dauerhafte Bodenbildung nicht möglich war.

Die großflächige Bewaldung änderte sich erst im Zuge der Sesshaftwerdung der Bewohner des Alpenraumes zu Beginn des vierten Jahrtausends v.Chr. durch die Rodung des Waldes zur Gewinnung von Ackerland und Weideflächen. Die bedeutendste Prägung der Landnutzung erfolgte jedoch seit dem frühen Mittelalter. Seinerzeit wurde der Siedlungsraum im Ostalpenraum wesentlich vergrößert und auch das alpine ökologische Gleichgewicht verändert:

- ◆ Durch Rodung der Wälder der subalpinen Stufe und der Zwergsträucher der unteren alpinen Stufe, sekundär auch durch klimatische Veränderungen, wurde die Baumgrenze *abgesenkt*. Als Weideflächen genutzte Almflächen wurden dadurch gewonnen;
- ◆ Großflächig wurde der Wald auch „sonnseitig“ gerodet, wobei fast immer ein Waldstreifen als Schutz vor Lawinen, Muren etc. zwischen Alm und den Futterflächen im Tal erhalten blieb. Diese mosaikartige Auflichtung der artenarmen subalpinen Wälder *erhöhte* ganz wesentlich die ökologische und landschaftliche Vielfalt dieser Höhenstufe;
- ◆ Durch Rodung der Talflächen und deren Umwandlung in Kulturland und
- ◆ Durch Entsumpfung der großen Talböden und deren Umwandlung in Kulturland wurden weitere Acker- und Weideflächen gewonnen;

Durch die Rodungstätigkeit reduzierte sich der Flächenanteil des Waldes durch menschliche Aktivitäten bis heute auf ca. 30%. Gleichzeitig wurde auch die Baumartenzusammensetzung deutlich verändert. Hohen Zunahmen der Anteile an Fichte, aber auch an Kiefer und Lärche, standen Verluste von Buche und anderen Laubhölzern sowie der Tanne gegenüber (Hoppichler 2002: 10-12).

3.2 Gegenwärtige Landnutzung

Tabelle 1 schlüsselt die wesentlichen Landnutzungsformen in Österreich und im Berggebiet auf. Im Vergleich zum gesamten Bundesgebiet sind die jeweiligen Anteile für die Wald-, Almen- und Ödlandfläche innerhalb des Berggebietes größer. Dies sind auch Flächen die für die Ökosystemleistungen und die Biodiversität von großem Wert sind. Dabei ist die bedeutendste Landnutzungsform der Wald. Dies gilt umso mehr für das Berggebiet. Über 50% der Fläche ist dort von Wald bedeckt, bei steigender Tendenz. Die nächstgrößere Kategorie ist die landwirtschaftlich genutzte Fläche mit rund 20%. Im Gegensatz zum Wald ist diese Kategorie rückläufig. Ökologisch wertvoll ist im Berggebiet dabei vor allem das extensiv genutzte Grünland: Almen bzw. Bergmäher machen weitere 15% der Fläche aus.

Die hochalpine Kategorie „Ödland“ (10%) umfasst Felsen, Geröll und Gletscher. Gewässer nehmen schließlich rund ein Prozent der Fläche ein. Ein Teil der ökologisch wertvollen Feuchtlebensräume wie feuchte Wiesen, Moore und Auen fallen unter diese Kategorie (sekundär Wald und Almen).

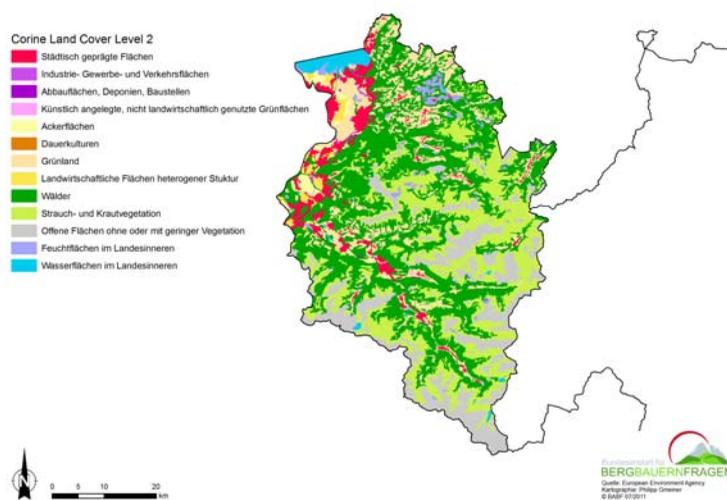
Tabelle 1: Landnutzung Berggebiet – Österreich 2006

	Berggebiet in ha	Berggebiet in %	Österreich in ha	Österreich in %
Baufläche	83.659	1,43	215.618	2,57
Verkehrsflächen und Sonstiges	98.962	1,69	226.912	2,71
Landw. genutzte Flächen	1.140.949	19,52	2.620.783	31,26
Gärten	9.906	0,17	28.271	0,34
Weingärten	3.494	0,06	52.778	0,63
Almen/Alpen	878.551	15,03	878.552	10,48
Wald	2.967.458	50,78	3.627.655	43,27
Gewässer (See, Flüsse, Sumpf, Moor)	70.463	1,21	141.290	1,69
Ödland, Fels, Geröll, Gletscher	590.112	10,01	591.327	7,05
Summen	5.843.554	100,00	8.383.186	100,00

Quelle: Grundstücksdatenbank (GDB) 2006, Zuordnung der Katastralgemeinden zum Benachteiligten Gebiet
Auswertung BABF/Philipp Gmeiner

Abbildung 3 zeigt die typische Flächennutzung einer Region des Berggebietes anhand des Bundeslandes Vorarlberg. Aus sektoraler Sicht „unproduktive“ offene Flächen wie alpine Matten und Rasen nehmen große Anteile ein, vor allem im Hinteren Bregenzerwald und im Montafon. Die Waldfläche nimmt ebenfalls größeren Raum ein. Wirtschaftsgrünland unterschiedlicher Nutzungsintensität findet sich vorwiegend in den Talflächen.

Abbildung 3: Landnutzung Vorarlberg (L2 Corine Vbg)



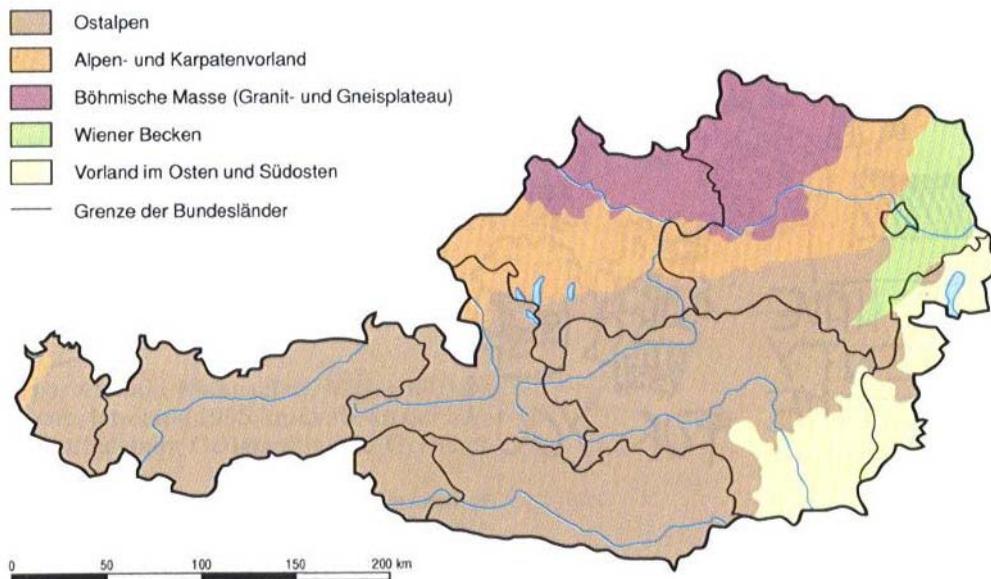
Quelle: BABF, Philipp Gmeiner

4. Naturräume Österreichs und des Berggebietes

Das österreichische Alpengebiet, festgelegt anhand der Abgrenzung der Alpenkonvention umfasst 54.569 km², dies entspricht 65% der gesamten Landesfläche. Die Fläche des österreichischen Berggebietes nach EU-Verordnung ist größer, umfasst auch das Berg- und Hügelland des Wald- und Mühlviertels, und liegt bei 58.571 km². Österreich umfasst drei grundlegende Naturräume, von denen zwei dem Berggebiet zugerechnet werden: Das Granit- und Gneishochland ist der österreichische Anteil an der böhmischen Masse (8.500 km² oder 10,1% des Bundesgebietes). Diese Landschaft hat den Charakter einer welligen Hochfläche. Weitläufige Waldflächen und meist noch kleinteilige Ackerbaulandschaften mit dichten Netzwerken an Ackerrainen und Hecken wechseln sich hier ab.

Den weitaus größeren Anteil bildet jedoch der Anteil Österreichs an den Ostalpen (52.600 km² bzw. 62,8% des Bundesgebietes). Die österreichischen Alpen lassen sich dabei grob gliedern in Nord-, Zentral- und Südalpen. Die höchsten Erhebungen erreichen 3.800 Meter. Die westöstliche Ausrichtung stellt einen Korridor zwischen Nord- und Südeuropa dar. Die wichtigsten Großgruppen sind die kristallinen Hochgebirge am Alpenhauptkamm sowie die nördlichen und südlichen Kalkalpen, die Grauwackenzone und andere Randgebirge, insbesondere die Flyschzone und das Steirische Randgebirge. Eingelagert in die alpinen Gebirgszüge sind die Längstalfurchen, gebildet von Inn, Salzach, Enns, Mur/Mürz und Drau, sowie das Rheintal, weiters die inneralpinen Becken, insbesondere das Klagenfurter Becken. Zum Teil Mittelgebirgscharakter hat das Hochland des Mühl- und Waldviertels.

Abbildung 4: Großlandschaften Österreichs



Quelle: Westermann Atlas

<http://www.eduhi.at/webimg/grosslandschaft.1116950734955649.jpg>

Obwohl der Alpenraum also ökologisch äußerst sensibel ist, erfüllt er alle Funktionen eines integrierten Lebens- und Wirtschaftsraums. Nahezu die Hälfte der österreichischen Bevölkerung lebt im Alpenraum, vier der sechs größten Städte liegen darin oder unmittelbar an dessen Rand. Die starken Bevölkerungszuwächse der vergangenen Jahrzehnte, der Flächenverbrauch der Siedlungs-, Gewerbe- und Industrieflächen, der Intensivtourismus, sowie der steigende hausgemachte und Transitverkehr treffen in diesem Raum zusammen. All dies führt dazu, dass die ökologische Belastung gerade in den Alpentälern infolge der räumlichen Konzentration zahlreicher Raumansprüche stark anwächst (Hoppichler 2002: 9, BMLFUW 2009a: 27-29).

5. Gebirge als „hot-spots“ der Biodiversität

Gebirge gehören weltweit zu den regionalen „hot spots“ der Biodiversität. Dies liegt einerseits am höhenbedingten Klimagradienten. Dadurch werden groß- und kleinräumig wechselnde Standortfaktoren wie Geologie und Topographie wirksam und führen zu einer großen Vielfalt an potenziellen Lebensräumen. Andererseits wirken auch viele biotische Faktoren wie etwa die Artenkonkurrenz und die Artensymbiose in diese Richtung. Nicht zuletzt hat auch die nacheiszeitliche Aktivität des Menschen eine Kulturlandschaft geschaffen, die eine hohe Diversität möglich machte (Hofer 2009: 48).

Die Alpen wiederum gehören zu den Gebieten mit der größten biologischen Vielfalt in Europa. Österreich weist, bedingt durch den hohen Anteil an Hochgebirge sowie das Zusammentreffen zweier biogeographischer Regionen, der alpinen und der kontinentalen Region, ein noch weites Spektrum natürlicher und naturnaher Lebensräume auf und beherbergt eine im europäischen Vergleich reiche Biodiversität. Insgesamt wird von einer Zahl von rund 45.000 Tierarten, 2.950 Farn- und Blütenpflanzen, 1.000 Moosarten sowie 813 verschiedenen Pflanzengesellschaften ausgegangen. Bei den autochthonen Tier- und Pflanzenarten ist Österreich im mitteleuropäischen Vergleich eines der artenreichsten Länder, bei den Blütenpflanzen und Farnen überhaupt das artenreichste. Wild lebende Tier- und Pflanzenarten sind neben den Lebensräumen die Elemente der biologischen Vielfalt, die im Mittelpunkt des Interesses des Naturschutzes stehen bzw. die als Indikatoren für den Erhaltungszustand der Biodiversität als Ganzes herangezogen werden können.² Landschaften mit höchster Bedeutung für die Biodiversität befinden sich großflächig im Alpenraum, wo weite Bereiche der alpinen Fels- und Eisregion von menschlichen Eingriffen unberührt sind. Auch die darunter anschließende Zone der alpinen Rasen und die Krummholzregion stellen weitgehend naturnahe Bereiche dar.

Trotz der potenziell vorhandenen Naturlandschaft ist die biologische Vielfalt durch verschiedenste Faktoren (Übernutzung, Stoffeinträge etc.) in ihrem Bestand bedroht (vergleiche Abbildung 2). Tiere und Pflanzen benötigen im Laufe ihres Lebens-, Jahres- oder Tageszyklus Zugang zu unterschiedlichen Ressourcen und Lebensräumen, um sich artgerecht ernähren, ausbreiten und vermehren zu können. Die Fragmentierung ihres Lebensraumes durch menschliche Aktivitäten steht dem oftmals entgegen (intensive Landnutzung, zunehmende Zersiedelung etc.) und bei ihren Wanderungen müssen sie viele Barrieren überwinden. Über 40% der höheren Pflanzen, 55% der Säugetiere, 59% der Vogelarten und 65% der Fischarten in Österreich sind bereits heute gefährdet. In absoluten Zahlen: Knapp 3.000 Tierarten (davon alleine 2.300 Insektenarten) und 1.187 Pflanzenarten gelten hierzulande als gefährdet und stehen auf der sogenannten Roten Liste. Gefährdet sind auch pflanzen- und tiergenetische Ressourcen (alte Landsorten, Tierrassen), weil sie sich nicht für die Intensivlandwirtschaft eignen. Um den Verlust an Biodiversität zu stoppen, ist eine Vielzahl von Maßnahmen erforderlich. Eine der Maßnahmen ist die Ausweisung von Schutzgebieten, die besonders wertvolle Lebensräume und/oder Arten aufweisen (Hoppichler 2002: 25-26, Niedermair et al. o.J.:5, biologischevielfalt.at 2012a).

2. Vgl. Indikatoren-Bericht zur Biodiversität in Österreich (BMLFUW 2012a).

6. Bedeutsame Bergökosysteme

In Österreich gibt es annähernd 488 Biotoptypen, die größte Anzahl entfällt auf Wälder, Gewässer (Feuchtgebiete) und Grünland. Für die alpinen Regionen relevant ist, dass die meisten gefährdeten Pflanzenarten auf nährstoffarmes, trockenes und feuchtes Magergrünland und auf Moore angewiesen sind. Aber auch Waldbiotope sind im Alpenraum bzw. im Berggebiet zahlreich vertreten (UBA 2010c: 102, BMLFUW 2009a: 30-31).

6.1 Ökosystem alpiner Wald

Die vorherrschende Landbedeckungsform im Berggebiet ist der Wald. Dabei sind die Zentralalpen heute aufgrund der Höhenlage und der landwirtschaftlichen Nutzung relativ walddarm (15-30% Waldflächenanteil), während die niedrigeren Kalkalpen sowie das Mühl- und Waldviertel hohe Walddichten haben. Ein Großteil der 120 in Österreich vorkommenden Waldgesellschaften befinden sich im Bergwald der montanen und subalpinen Höhenstufe. Die Spanne der Waldgesellschaften reicht dabei von den hochsubalpinen Lärchen-Zirben-Wälder, über die subalpinen und montanen Fichtenwälder bis zu den Mischwäldern (Fichten-Tannen-Buchenwälder) der montanen Höhenstufe. Eine der bekanntesten und bedeutendsten Ökosystemgrenzen in Gebirgsregionen liegt an der alpinen Wald- und Baumgrenzen - der Übergangsbereich zwischen subalpinen Wäldern und alpinen Rasenflächen.

Dabei darf der hohe Anteil der alpine Wälder, die als „naturnahe“ und „natürlich“ gelten nicht darüber hinwegtäuschen, dass der Wirtschaftswald so naturschonend er auch bewirtschaftet wird, *nicht* den Schutz der Biodiversität zum Ziel hat und *nicht* der pfleglichen Wahrung naturnaher Waldbiotope dient. In den diversen Schutzgebieten innerhalb des Berggebiets (Nationalparks, Natura 200-Gebiete, Naturschutzgebiete etc.) sind vereinzelt Eingriffe untersagt oder mehrheitlich Nutzungsaufgaben vorgesehen. Auch einige, kleinflächige Naturwaldreservate wurden eingerichtet. Von der menschlichen Nutzung völlig unversehrte Wälder gibt es in Österreich hingegen nur wenige (z.B. der Urwald Rothwald im niederösterreichischen Dürrenstein). Sie zeichnen sich durch komplexe Ökosystembeziehungen zwischen Baumarten, Pilze, Moose, Insekten, Vögeln etc. aus. Totholz, also abgestorbene Bäume bieten einer Vielzahl von Organismen einen Lebensraum.³ Wertvolle Ökosysteme und ebenfalls stark gefährdet, sofern überhaupt noch vorhanden, sind auch diverse Feuchtlebensräume als Bestandteil der alpinen Waldgesellschaften (Auwälder, Moore, Tümpel, Wildbäche etc.). Gleiches gilt für artenreiche Lichtwaldarten und die reich strukturierten Waldränder (Hoppichler 2002: 12-13, UBA 2011, Kuratorium Wald 2010).

3. Von etwa 13.000 im Wald lebenden Arten sind rund 4.500 an Totholz gebunden. Viele dieser Arten sind seltene, vom Aussterben bedroht Spezialisten, die auf Totholz als Habitat angewiesen sind. Darunter befinden sich rund 600 Pilzarten, sowie Flechten, Moose, 1.300 Käferarten, Schmetterlinge, sowie verschiedene Insekten oder Vögel (Kuratorium Wald 2010).

6.2 Ökosystem alpine Wiesen, Bergmäher und Almen

Die von Natur aus kleinräumig wechselnden Standortbedingungen in den Alpen sowie die verschiedenen landwirtschaftlichen Maßnahmen von Nutzung und Pflege (Düngung oder Nährstoffentzug) ermöglichen eine große Vielfalt an verschiedensten Pflanzenbeständen auf den Almweiden. Viele der ökologisch wertvollen, artenreichen Räume im Berggebiet sind erst durch die Aktivitäten der Landwirtschaft bzw. die Beweidung mit Rauhfutter verzehrenden Tieren (Schafe, Ziegen, Kühe) entstanden. Entscheidend für eine artenreiche Vegetation sind neben der richtigen Beweidung (die Über- und Unterbesatz vermeidet) der Schnitzeitpunkt und die Schnitthäufigkeit. Wird beispielsweise früh im Jahr gemäht wie bei der Silagegewinnung dann erfolgt keine Aussamung der Gräser und Kräuter und nur jene Pflanzen, die sich vegetativ vermehren sind bestandesbildend. Dies führt zu einer Monokultur aus wenigen Grassorten und Klee. Voraussetzung für hohe Artenvielfalt ist hingegen die Beweidung oder eine einzige Mahd im Sommer oder Frühherbst.

Nicht gedüngte Alpweiden⁴ sind bedeutsam für die ökologische Qualität der alpinen Landschaft. Auf diesen nährstoffarmen Flächen gedeihen die artenreichsten subalpinen und alpinen Pflanzengemeinschaften. Werden diese Flächen zusätzlich gedüngt, erfolgt eine Verdrängung der auf magere Böden angepassten Arten. Durch bessere Erschließung (Wegebau, Aufstiegshilfen etc.) Gewässerschutzvorgaben, technischen Fortschritt und das Fördersystem fällt heute auf den Heimbetrieben Stalldünger (Jauche, Gülle) konzentriert an und kann großflächig ausgebracht werden.⁵ Dadurch und durch die Einstellung der Nutzung ungünstiger (Grenzertrags-)Flächen wird die Biodiversität herabgesetzt. Ein weiterer Faktor ist die Viehbesatzdichte, die vereinzelt auch im Berggebiet (z.B. Vorderer Bregenzerwald oder andere Gunstlagen) das ökologisch anzustrebende Maß überschreitet. Die Wiesen werden stärker gedüngt und häufiger geschnitten. Dies verringert die Vielfalt der Gräser- und Kräuterarten, eine „Vergrünung“ der Wiesen ist die Folge. Auch der Kraftfuttereinsatz auf Melkalmen ist problematisch, weil intensitätssteigernd. Deswegen sind auch die Züchtungsziele zu hinterfragen, da einseitig auf Milchleistung selektierte „Hochleistungskühe“ nur unter Einsatz von Grundfutter *nicht* gehalten werden können (Vorarlberger Naturschutzrat 2009: 16).⁶

Artenreiche Wiesen, Weiden und Almen bieten hingegen für zahlreiche Tier- und Pflanzenarten Lebensraum – Schmetterlinge, Heuschrecken, Orchideen und viele andere Arten. In Österreich kommen 61 verschiedene Grünlandtypen vor – die Palette reicht von artenreichen Feuchtwiesen wie dem Biotopytyp „Pfeifengras-Streuwiese“ bis zu „Fels-Trockenrasen“. Bergheumäher weisen rund 30 bis 60 Arten auf, alpine Fettwiesen liegen mit 30 bis 50 Arten leicht darunter. Feuchtmagerwiesen und traditionelle Fettwiesen weisen hingegen nur etwa 20 bis 45 Arten auf. Im modernen „Intensivgrünland“ treten hingegen kaum mehr als 10 Arten auf. Sehr wertvolle Flächen bildeten seinerzeit die weitverbreiteten Pfeifengraswiesen, Flachmoore und feuchte Wirtschaftswiesen in den alpinen Tal- und Bek-

4. Mit Ausnahme des Tierdunges der aufgetriebenen Tiere.

5. Die ÖPUL Maßnahme Alpung und Behirtung hingegen untersagt beispielsweise das Ausbringen von alpfremdem Dünger.

6. So findet auch der Import von eiweißreichem Sojaschrot aus Nord- und Südamerika sowie der Zukauf von Kraftfutter aus agrarischen Gunstlagen mittels intensiver Milchviehfütterung in der *Veränderung* alpiner Nährstoffkreisläufe einen nicht unwesentlichen Niederschlag.

kenlagen. Durch Flussverbauungen und Drainagierungen sind jedoch die Mehrzahl dieser ökologisch wertvollen Flächen in den letzten Jahrzehnten, begünstigt durch eine intensitäts- und wettbewerbsgetriebene Agrarpolitik, vernichtet worden (Hoppichler 2002: 14, Bätzing 2003: 93-96, UBA 2010c: 100, BMLFUW 2009a: 32).

6.3 Ökosystem alpine Feuchtgebiete (feuchte Wiesen, Moore)

Alpine Feuchtgebiete umfassen eine Vielzahl von Lebensräumen und Ökosystemen. Dazu zählen beispielsweise Bäche und Flüsse mit ihren Auwäldern, Seen, Teiche, Quellen, Moore und Feuchtwiesen. Feuchtgebiete sind essentiell für Wasserkreislauf und Klima. Sie stellen auch wichtige Ressourcen (Ökosystemdienstleistungen) wie Trinkwasser bereit oder dienen als Puffer von Starkniederschlägen (Naturgefahren). Auch als Erholungsräume werden sie oft genutzt. Heute sind naturbelassene Feuchtgebiete in Tallagen eine Rarität. Nur mehr oberhalb der Waldgrenze finden sich weitgehend ungestörte Bedingungen. Mit der Zerstörung wurde eine große Zahl der an diesen Lebensraum gebundenen und hoch spezialisierten Pflanzen- und Tierarten an ihr Existenzlimit gedrängt. Nur einige kleinere und größere Biotop konnten vor der Nutzung bewahrt werden. Je weiter diese inselartigen Areale voneinander getrennt sind, desto geringer wird die biologische Vielfalt da in einem stark fragmentierten Lebensraum der (genetische) Austausch behindert ist (Amphibienwanderung u.a.). Zum Rückgang bzw. zur Beeinträchtigung der Feuchtgebiete haben vor allem wasserbauliche Maßnahmen, energie-wirtschaftliche Nutzung, Entwässerungen, Eutrophierung, Materialabbau, Müllablagerungen, Verbauung und intensive Freizeitnutzung beigetragen. Die Wiederherstellung einmal zerstörter Feuchtgebietsökosysteme ist dabei kaum oder nur mit hohem finanziellem Aufwand durchführbar. Deshalb ist die Erhaltung bestehender Feuchtgebiete bzw. deren intakter Wasserkreislauf essentiell (Hofer 2009: 42, UBA 2010c: 68).

Feucht- oder Nasswiesen sind vom Grundwasser beeinflusst oder zeitweise überschwemmt und weisen teilweise auch Staunässe auf. Die starke Bodendurchfeuchtung kann lang anhaltend oder von sommerlichen Austrocknungsphasen unterbrochen sein. Feuchtwiesen sind ungedüngte, einmal jährlich gemähte Streuwiesen und werden auch als Pfeifengraswiesen bezeichnet. Weiters zählen dazu die nährstoffreichen meist zweimal gemähten Feucht – und Nasswiesen (Sumpfdotterblumenwiesen). In den alpinen Tallagen wurden Feuchtwiesen in der Vergangenheit großflächig drainiert und in Fettwiesen oder auch Äcker umgewandelt.

Eine weitere Gefährdung von Feuchtwiesen ist die Nutzungsaufgabe landwirtschaftlicher Flächen. Erhalten geblieben sind sie hingegen kleinräumig in quellig-staufeuchten bis vermoorten Bereichen von Hängen und Plateaus. Böden, die ständig unter Wasser stehen, sind arm an Sauerstoff, so dass die an solche Lebensräume angepassten Pflanzen (vor allem Sumpf- und Wasserpflanzen) Luft über Hohlraumgewebe vom Spross in die Wurzeln leiten (Wurzelatmung). Weiteres Charakteristikum der feuchten Wiesen ist der Nährstoffmangel, an dem sich ganz bestimmte Pflanzenarten angepasst haben. Aber auch die nährstoffreicheren Feuchtwiesen sind artenreiche Biotop. Sie sind durch eine hohe Anzahl von Feucht- und Nässezeigern gekennzeichnet (Wiesenpflanzen, -vögel, Amphibien und Reptilien, Wirbellose) (Hofer 2009: 42).

Schätzungsweise gab es in Österreich noch im Mittelalter zwischen 150.000 und 300.000 Hektar Moorfläche. Davon sind heute nur mehr 17.000-21.000 Hektar erhalten geblieben, wovon 2/3 gestört sind, d.h. nicht mehr über die ursprüngliche Wasserversorgung verfügen. Der Großteil dieses Bestandes wurde durch Entwässerung vernichtet und wird landwirtschaftlich genutzt. Die Verbreitungsgebiete liegen in Österreich in feucht-kühlen Gebieten des Alpenvorlandes, der Alpen und der Mittelgebirge (Mühl- und Waldviertel). Die meisten *Hochmoore* sind kleinflächig und liegen im alpinen Raum oder in den Mittelgebirgen. Der ständige Wasserüberschuss führt zu einem sauerstoff- und nährstoffarmen Klima. Pflanzliche Reste werden nur unvollständig abgebaut und als Torf abgelagert. Durch die Anhäufung von Torf wächst die Oberfläche von lebenden Mooren langsam in die Höhe. Nur wenige Tierarten leben ständig im Hochmoor. Es gibt weder Fische im sauren Wasser, noch gibt es Schnecken, Muscheln oder Krebse. Im Gegensatz dazu treten aber hochspezialisierte und seltene Tierarten auf (Vögel, Insekten, Amphibien, wirbellose Tiere etc.), die nur in diesen Biotopen ihren Lebensraum finden.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Hoch- und Flachmooren. Zur Entstehung benötigen Flachmoore reichlich Grundwasser und eine Abdichtung nach unten (meist Tonablagerungen). Bei besonders nassem Klima bilden sich schließlich aufgewölbte Hochmoore. Hochmoore werden schließlich nicht (mehr) vom Grundwasser versorgt sondern sind regengespeist. Sie benötigen Gebiete mit geringem Wasserabfluss und ein *Klima, bei dem die Niederschlagsmenge jene der Verdunstung übersteigt*. Deswegen finden sie sich im Bereich der subalpinen und montanen Klimazone. Die Wasserbewegungen im Moor fehlen fast völlig, deswegen ist der Wärmeaustausch zwischen Wasser und der Atmosphäre stark eingeschränkt. Diese Bedingungen schaffen ein ganz eigenes Mikroklima und verkürzen die Vegetationsperiode (Uni Wien-Faculty Centre of Biodiversity 2011, Hofer 2009: 42; WWF Österreich 2010a).

7. Der Naturraum des Hochgebirges (Kryosphäre)

Im Hochgebirge, der subalpinen, der alpinen und der nivalen Höhenstufen finden sich enorme klimatische Gegensätze auf engstem Raum. Die mit der Höhe abnehmende Lufttemperatur erzeugt in Gebirgsregionen die charakteristische Abfolge von Höhen- und Vegetationsstufen. Die Wald- bzw. Baumgrenze kennzeichnet den Übergang von der subalpinen zur alpinen Stufe. In der kurzen Wachstumsperiode ist die Stamm- bzw. Holzbildung nicht mehr möglich. Oberhalb der Waldgrenze ist die Vegetation von den alpinen Rasen und Matten aber auch schon von Fels, Schutt- und Schneefeldern geprägt. Die Höhenstufe über 3.000m ist der Bereich der nivalen Höhenstufe (Kryosphäre⁷). Selbst in dieser unwirtlichen Region finden sich Pionierpflanzen, wie Moose und Flechten.

Tabelle 2: Höhen- und Vegetationsstufe des Hochgebirges (Ostalpen)

Höhenstufe	Höhenlage in Meter	Beschreibung
Subalpin	1.500-2.500	Hochalmregion und Baumgrenze, Bergwälder (Fichte, Lärche, Zirbe, Rotbuche, Bergahorn, Tanne) Latschenfelder, tiefe Gletscherzungen
Alpin	2.000-3.000	alpine Rasen, Matten Staudenfluren, Polsterpflanzen, Sommerweide für Schafe und Ziegen, Zehrgebiet der Gletscher,
Nival	über 3.000	weitgehend schneebedeckt, Nährgebiet der Gletscher, Moose und Flechten

Quelle: nach Wikipedia
[http://wikipedia.org/wiki/Höhenstufe_\(Ökologie\)](http://wikipedia.org/wiki/Höhenstufe_(Ökologie))

Im Hochgebirge ist Schnee und Eis allgegenwärtig. Das vermeintlich „ewige“ Eis der Gletscher bildet sich dort, wo der Schnee das ganze Jahr über liegen bleibt (das sogenannte Nährgebiet) und periodisch in den Sommermonaten mehr oder weniger abschmilzt. In niederschlagsreichen Bergketten mit viel Schnee können die Zungen bis in die tiefer gelegenen Regionen hinunterreichen. Typisch für diese Region ist auch der Permafrost, der sich an Nordhängen das ganze Jahr über dort hält, wo mangels Schneeeauflage keine Gebirgsgletscher entstehen können. Im Wasserkreislauf und damit für die Wasserversorgung im Unterland stellen Schnee und Eis der Hochgebirge wichtige Speicher dar. Das sommerliche Schmelzwasser wirkt ausgleichend auf den Wasserstand der großen Flüsse im Alpenvorland. Allgegenwärtig im Hochgebirge ist auch die Erosion. Mit ihren steilen Hängen und den großen Niederschlagsmengen gehören die Berge zu den Gebieten mit dem größten Abtrag. Durch Frostverwitterung entstehen große Mengen Schutt. Dieser wird stetig oder auch „katastrophal“ talwärts transportiert. Aber auch die Gebirgsgletscher sorgen für große Massenbewegungen. Das Fließen von Gletschern oder das Kriechen gefrorener Schutthalde verfrachtet große Mengen an Gestein.

7. Die Kryosphäre (altgriechisch kalt oder Eis) bezeichnet den Bereich der Landbedeckung, der von Eis bedeckt ist. Dazu zählen Gebirgsgletscher, Eis in Permafrostböden sowie mit Schnee bedeckte Flächen.

Abbildung 5: Gletscherschliff



Durch Gletscherschliff polierte Felsen (Pasterze).

Quelle: Wetteronline (Jürgen Vollmer)

Schnee und Eis prägen das Bild von Hochgebirgslandschaften, haben aber ganz unterschiedliche Charakteristiken und Funktionen in alpinen Ökosystemen. Schneefall und Schneebedeckung ist stark von kurzfristigen, saisonalen Wetterabläufen abhängig. Gletschereis und Permafrostböden hingegen bestehen über große Zeiträume hinweg.

7.1 Schneebedeckung

Der Schnee befindet sich bei den in den Alpenländern üblichen Wintertemperaturen häufig nahe seinem Schmelzpunkt und ist daher sehr *klimasensitiv*. Andauer und Mächtigkeit der Schneedecke im Ostalpenraum schwankt in Abhängigkeit der Wetterlagen von Jahr zu Jahr beträchtlich. Schneearme Winter folgen auf Schneereiche. Aufgrund des Einflusses der Schneedecke auf den globalen Energie- und Wasserhaushalt, spielt ihre räumliche Ausdehnung eine wichtige Rolle für das Klima. Frischer, reiner Schnee reflektiert 80-90% der einfallenden Sonnenstrahlen, im Vergleich dazu reflektieren nackter Boden oder Vegetation nur 10-20% (Albedo-Rückkopplung). Schneefreie, dunklere Oberflächen absorbieren daher Energie und verstärken so die Klimaerwärmung, umgekehrt unterbricht ein sommerliches Schneefallereignis die Gletscherschmelze für ein paar Tage.

Die winterliche Schneedecke verhindert zusätzlich ein Abstrahlen der gespeicherten Bodenwärme in die vergleichsweise kühlere Atmosphäre. Kleintiere und Pflanzen überleben so die winterlichen Ex-

tremtemperaturen vergleichsweise unbeschadet. Die Schneedecke fungiert aber auch als wichtiger Wasserspeicher. Während des Winterhalbjahres wird Wasser in Form der Schneeauflage zurück gehalten, welches bei der Schneeschmelze langsam über Tage und Wochen wieder abschmilzt. Im Spätwinter und im Frühjahr ist die saisonal vorhandene und höhenabhängige Schneebedeckung auch die entscheidende Variable, da sie den effektiven Vegetationsbeginn um Wochen hinauszögern kann (ZAMG 2011f, Haeberli/Maisch o.J.:99-101).

7.2 Permafrost

Permafrost ist ganzjährig gefrorener Boden bzw. gefrorenes Felsgestein. Von Permafrost spricht man, wenn ein Boden im Untergrund mindestens über zwei Jahre gefroren bleibt. Auch im Sommer wenn die Schneeauflage geschmolzen ist, taut die oberste Schicht des Permafrostbodens nur oberflächlich auf. Der Permafrostkörper darunter bleibt dauerhaft gefroren. Schätzungsweise 1,9% oder 1.600km² des Bundesgebietes sind Permafrostgebiete. Eine genaue Verortung steht bis dato jedoch aus (Salzburg online 2009).

Abbildung 6: Reichenkarblockgletscher Ötztal



Der Reichkar-Blockgletscher im Tiroler Ötztal ist oberflächlich von Schutt bedeckt.

Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Hausmann 2005)

http://zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/5-5_Permafrost_Abb3_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=599&imgHeight=450

Im Alpenraum tritt Permafrost „fleckig“ das heißt kleinräumig, zumeist in nördlich ausgerichteter Exposition über 2.500m auf. Permafrost hat in vielen Hochgebirgsregionen eine große Bedeutung für die Stabilität von Schutt- und Felshängen, insbesondere in hohen Steillagen. Der permanent gefrorene Boden wirkt als „Klebstoff“, der Blockwerk und Schutt stabilisiert. Permafrost ist im Boden oberflächlich *nicht* sichtbar. Daher ist auf sein Auftreten primär über Temperaturmessungen an der Bodenoberfläche und vor allem mittels Bohrlöchern zurückzuschließen.

Neben der Lufttemperatur und der Strahlung ist besonders die Schneedecke durch ihre isolierende Wirkung ein bestanderhaltender Faktor. In der kleinstrukturierten Hochgebirgslandschaft spielen weitere Bedingungen wie die Hangneigung, die Hangausrichtung, die Seehöhe, die Vegetation und die Beschaffenheit des Untergrundes (blockig, anstehender Fels, Schutt) eine wesentliche Rolle für Auftreten von Permafrost. Auch gefrorene Schutthalde oder Moränen können oft mehr Eis als Gesteinsmaterial enthalten, beginnen zu kriechen und bilden Ströme aus Schutt und Eis, die wie Lavaströme aussehen. Diese auffälligen Fließformen werden „Blockgletscher“ genannt. Als Beispiel für diesen Typus von Permafrost kann der Reichenkar-Blockgletscher im Tiroler Ötztal dienen. Am Reichenkar-Blockgletscher ist die Schuttdecke zwei Meter dick, darunter befindet sich grobkörniges Gletschereis. Bei einer Länge von 1,4km und einer Breite von bis zu 260m bewegt sich seine Stirn jährlich um bis zu drei Meter vor (Hofer 2009: 118).

Die Abschmelzraten bei Blockgletschern sind wesentlich geringer als bei Gletschern, weil die mehrere Meter mächtige Schuttlage konservierend auf das Eis wirkt (Hofer 2009: 117-118, ZAMG 2011g, Haerberli/Maisch o.J: 102-103).

7.3 Alpine Gebirgsgletscher

Im Gegensatz zu den großen Eisschilden in der Antarktis und auf Grönland hat die Existenz von Gebirgsgletschern mit einer weltweiten, räumlichen Ausdehnung von 760.000 km² (0,2% des Eisvolumens bis 0,1% der Erdoberfläche) eher vernachlässigbare Auswirkungen auf das Weltklima. Gebirgsgletscher kommen weltweit aufgrund von Topographie und Klima in den unterschiedlichsten Größe und Formen vor, von wenigen hundert Metern großen Kar- und Hängegletschern bis zu den mehrere Kilometern langen alpinen Talgletschern (ZAMG 2011d).

Gebirgsgletscher entstehen dort, wo die sommerlichen Temperaturen nicht ausreichen, um den im Winter gefallenen Schnee wieder abzuschmelzen. So lagern sich Jahr für Jahr Schneeschichten übereinander, welche sich nach der Umwandlung in Firn und durch die starken Druckkräfte schließlich zu kompaktem Eis verdichten.⁸ Diese Region wird als Nährgebiet bezeichnet. Gletschereis fließt sodann als zähe Masse der Schwerkraft folgend zu Tal und schmilzt im sogenannten Zehrgebiet ab. Beim Überfließen von Kuppen und Felsstufen entstehen Zerrkräfte, welche sich durch das Aufreißen von Spalten entladen. Gegen Ende der „Ablationssaison“ im September erreichen die Gletscher ihr jährliches Minimum. Kurz danach beginnt mit dem Aufbau der Winterschneedecke das nächste glaziologische Bilanzjahr.

8. Neben der Akkumulation des gefallenen Schnees tragen auch Schneeverfrachtungen und Lawinenabgänge im Nährgebiet wesentlich zur Gletscherbildung bei.

Gebirgsgletscher reagieren empfindlich auf die äußeren Antriebe (z.B. mehr Schmelze durch stärkere Sonnenstrahlung und höhere Lufttemperatur oder mehr Akkumulation durch mehr Schneefall) als auch auf die interne Variabilität des Klimasystems, die durch den Wechsel von feuchter geprägten ozeanischen und trockeneren kontinentaleren Phasen gekennzeichnet ist und interagieren mit ihm in Form diverser Rückkopplungen (Haeberli/Maisch o.J.:101-102, ZAMG 2007a: 45-52, 2011d).

Der Pasterzengletscher ist mit 9 km Länge und einer Fläche von 18 km² der größte Einzelgletscher Österreichs, gefolgt vom Gepatschferner und dem Obersulzbachkees der Venedigergruppe.

Tabelle 3: Rangreihe der größten österreichischen Gletscher (1998)

Name	Gebirgsgruppe	Fläche (km ²)	Maximum Eisdicke (m)
Pasterzenkees	Glocknergruppe	18,4	275
Gepatschferner	Ötztaler Alpen	17,7 (21,6) ¹⁾	235
Obersulzbachkees	Venedigergruppe	11,0	184

¹⁾ inklusive dem italienischen Anteil

Quelle: ZAMG 2011d

Abbildung 7: Blick von der Franz-Josephs-Höhe auf die Pasterze



Blick von der Franz-Josephs-Höhe auf die obere Pasterze. Noch in den 1930er Jahren füllte die mächtige Gletscherzunge das gesamte Becken aus.

Quelle: Wetteronline (Jürgen Vollmer)

Seit dem Gletscherhöchststand im 19. Jahrhundert haben sich die Gletscher der Ostalpen zurückgezogen. Dort wo sich die Gletscher zurückgezogen haben, entstand eine sich rasch verändernde Landschaft: Zuerst prägten noch vom Gletschereis aufgetürmte Schuttmoränen das Landschaftsbild, aber

schon bald begannen die Pioniere der Pflanzenwelt (Steinbrech-Arten, Alpen-Leinkraut etc.) mit der Wiederbesiedelung. Dies sind jedoch langfristige Prozesse, die selbst nach 160 Jahren Eisfreiheit noch nicht abgeschlossen sind. Beispielsweise schreitet die Bodenbildung nur äußerst langsam voran.⁹ Regional und lokal sind Gebirgsgletscher vor allem als Süßwasserspeicher (Wasserkreislauf, Wasserressource), als touristische Attraktion (Landschaftsbild) und als potentielle Gefahrenquelle (Gletscherseeausbrüche, Eisstürze etc.) von Bedeutung (ZAMG 2011d, Hofer 2009: 104).

Die Massenänderung der Gletscher in den Alpen wird im Laufe eines Jahres besonders *von der Witterung der Sommermonate gesteuert*. Kalte, feuchte und wolkenreiche Sommermonate begünstigen die Akkumulation und drosseln den sommerlichen Abfluss, während warme und sonnenscheinreiche Perioden die Gletscherschmelze beschleunigen¹⁰. Die Wintertemperaturen haben *weniger* Ausschlag auf die Massenbilanz, da es in diesen Höhenlagen in jedem Fall kalt ist, sehr wohl jedoch die Niederschlagsverhältnisse. Trockene Winter wie zum Beispiel 2010/11 zehren gleichfalls an den Eisreserven der Gletscher.

Abbildung 8: Eishöhle Vernagtferner



Eishöhlen bilden sich durch Wassererosion im Randbereich der Gletscherzunge (Vernagtferner).

Quelle: Homepage Alpenverein OeAV/Span, Gletscherbericht 2008/2009
http://www.alpenverein.at/portal/Service/Downloads/Presseaussendungen_2010/Pressebilder_2010/Gletscherbericht/Eishoehle_Vernagtferner.jpg

9. Im Bereich der 150 Jahre alten Grundmoräne des Rotmoosferners in den Ötztaler Alpen hat sich bis heute erst ein 4-5cm mächtiger Boden ausgebildet (Hofer 2009: 104).
10. Schnee an der Gletschoberfläche reflektiert bis zu 90% der einfallenden Sonnenstrahlung, aperes, dunkleres Gletschereis hingegen nur 20 bis 40%.

8. Klimatische Bedingungen für Hochgebirgspflanzen

Die Hochgebirgsflora hat sich gut an das Leben unter kalten Verhältnissen angepasst. Die Vegetationszeit ist kurz und auf die Sommermonate beschränkt. Typischerweise sinkt die jährliche Durchschnittstemperatur alle 1.000 Höhenmeter um etwa 6°C ab. Auch der Niederschlag verteilt sich nicht gleichmäßig. An den Gebirgsrändern stauen sich feuchte Luftmassen bzw. Regenwolken, diese kühlen sich mit zunehmender Höhe ab und erzeugen starke Niederschläge. Umgekehrt lösen sich auf der Leeseite der Hauptwindrichtung die Wolken auf und es ist trockener (Föhneffekte). Auch können innerhalb des Gebirges aufgrund von Höhenunterschieden starke horizontale und vertikale Luftströmungen entstehen. Bemerkenswert ist auch die Vielzahl an kleinklimatischen Sonderstandorten, an klimatischen Gegensätzen auf engstem Raum. Das jeweilige Kleinklima wird durch das Relief, den geologischen Aufbau, die jeweilige Höhenlage sowie die Exposition des Geländes (süd-, ost- oder westseitig) sowie die Bodenbedeckung bestimmt. Typisch für das Hochgebirge sind auch die hohe Strahlungsintensität insbesondere der UV-Strahlung und die erhöhte Luftreinheit.

Alpine Pflanzen sind an die extremen Strahlungs- und Temperaturverhältnisse angepasst. Die intensive Sonneneinstrahlung führt an Schönwettertagen zu einer starken Erwärmung der Pflanzen. Nachtsüber kühlt sich die klare Luft stark ab. Pflanzen verlieren in der Höhe aufgrund der dünneren Luft und der dadurch verminderten atmosphärischen Gegenstrahlung mehr Wärme. Die Blätter von Pflanzen der alpinen Stufe können so tagsüber um bis zu 35°C wärmer und in der Nacht um bis zu 8°C kühler sein als die umgebende Luft. Im Sommer sind die insgesamt tieferen Temperaturen für das Pflanzenwachstum limitierend, weshalb über der Waldgrenze zumeist kleinwüchsige Pflanzen (Gräser, Polsterpflanzen etc.) wachsen, die die wärmende Grenzschicht an der Bodenoberfläche nützen können. Durch den bodennahen Wuchs besteht aber auch das Risiko der Überhitzung. Hitzeschäden an südexponierten Bereichen von Polsterpflanzen können auftreten, obwohl sie eine große Hitzetoleranz aufweisen.

Abbildung 9: Alpenblumen Tiroler Ötztal



Alpenblumen des Hochgebirges: (von links nach rechts) Frühlingsenzian, Bergmargeriten, Scharfer Mauerpfeffer.

Fotos: Josef Krammer

Im Winter sind kleinwüchsige Pflanzen durch die Schneeauflage geschützt, während über die Schneedecke ragende Arten extremen Frösten (bis zu -30°C) ausgesetzt sind. Viele Überlebensstrategien zie-

len darauf ab, Frostschäden oder Frosttrocknis zu vermeiden.¹¹ Aktiviert wird der „Frostschutz“ oftmals durch die herbstlichen Frostabhärtungsperioden. Im Frühling geben viele Pflanzen während der Frostenthärtungsperioden diesen Schutzmechanismus auf, um die für die Vegetationsperiode wichtigen Stoffwechselfvorgänge aktivieren zu können. Spätfröste und frühe Wintereinfälle sind dem Pflanzenwachstum daher abträglich (Hofer 2009: 94-96).

11. Frosttrocknis ist eine Form des Wassermangels, die dadurch entsteht, dass die Pflanze Wasser verdunstet, jedoch aus dem gefrorenen Boden keines aufnehmen kann.

9. Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und Biodiversität

9.1 Gletscherschmelze, Auftauen des Permafrosts

Der sichtbarste Beleg für den anthropogenen Klimawandel ist die alpine Gletscherschmelze. Die jährlichen Gletschervermessungen des Österreichischen Alpenvereins, die ca. 90 Gletscher umfassen, dokumentieren akribisch die Zerfallserscheinungen der Alpengletscher. Dabei fällt weniger ein einzelnes Rekordjahr, (wie zum Beispiel der Sommer 2003) als vielmehr die Summenwirkung von negativen Massenbilanzen über viele Jahre hinweg, ins Gewicht. Symptomatisch für die Gletscherschmelze ist die immer frühere Ausaperung bzw. längere Dauer der Ablationsperiode. Schneearme Winter und sonnenreiche Sommermonate mit positiven Temperaturen bis 4.500 m Seehöhe wirken sich zusätzlich ungünstig aus. Die Längenverluste (der Talgletscher) haben sich in den letzten Jahren gehäuft. Die Eisoberfläche der Gletscher sinkt ein und die Fließgeschwindigkeit nimmt ab. Viele Gletscherzungen zerfallen, werden durch Felsstufen vom Nährgebiet abgeschnitten, und nehmen toteisähnlichen Charakter an. Bezeichnend für die Zerfallserscheinungen sind ferner das Einstürzen von Hohlräumen, die Unterspülung durch Gletscherbäche sowie die zunehmende Schuttbedeckung der Gletscherenden. Anstelle der Gletscherzungen bilden sich vermehrt Gletscherseen (z.B. Sonnblickkees, Obersulzbachkees etc.) (Österreichischer Alpenverein 2010a, 2011b).

Die Längenveränderung der beobachteten Gletscher (n=89) in der Saison 2009/10 zeigt Tabelle 4 auf. Die große Mehrzahl von ihnen befand sich auf dem Rückzug. Der durchschnittliche Längenverlust betrug 10,4m.

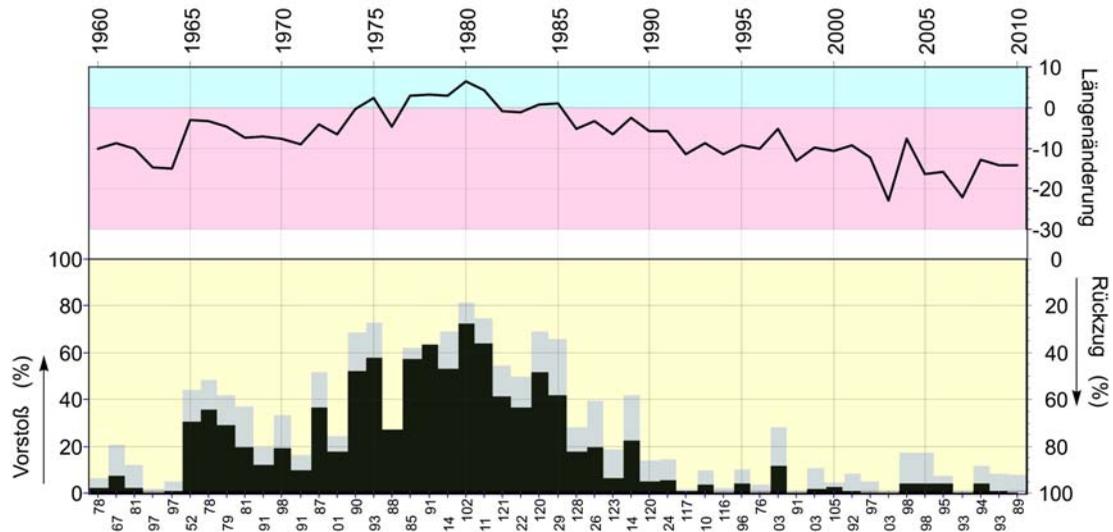
Tabelle 4: Längenveränderung der gemessenen Gletscherenden 2009/10

Gebirgsgruppe	Anzahl der Gletscher			Summe	durchschnittliche Änderung in Metern
	vorstoßend	stationär	zurückschmelzend		
Dachstein	0	0	4	4	-4,0
Silvretta	0	0	8	8	-14,8
Ötztaler Alpen	0	1	23	24	-20,0
Stubaier Alpen	0	0	13	13	-8,0
Zillertaler Alpen	0	1	5	6	-12,0
Venedigergruppe	0	0	9	9	-23,0
Granatspitzgruppe	0	1	2	3	-6,2
Glocknergruppe	0	1	9	10	-15,4
Schobergruppe	0	1	2	3	-4,8
Goldberggruppe	0	0	3	3	-9,7
Ankogel-Hochalmspitzgruppe	0	1	4	5	-6,9
Karnische Alpen	0	1	0	1	-0,2
Summe	0	7	82	89	-10,4

Quelle: Österreichischer Alpenverein, Gletscherbericht 2009/2100 (ÖAV 2011a)

Aus Abbildung 10 wird ersichtlich dass zuletzt in den 1960er, 70er, und 80er Jahren Längenzuwächse an den beobachteten Gletschern verzeichnet wurden. Seit damals befinden sich die Gletscherzungen im kontinuierlichen Rückzug:

Abbildung 10: Gletscherbeobachtungsnetz des Alpenvereins



Legende: Die mittlere Längenänderung und die Anzahl der beobachteten vorstößenden (schwarz), stationären (grau) und zurück-schmelzenden (Hintergrundfarbe) Gletscher von 1960 bis 2010

Quelle: Österreichischer Alpenverein

Seit dem letzten Höchststand gegen Ende der sogenannten kleinen Eiszeit um 1850 haben die rund 900 österreichischen Gletscher, die im Mittel eine Eisdicke von etwa 38 Meter aufweisen mehr als 50% ihrer Fläche verloren, wobei davon ca. die Hälfte anthropogen bedingt ist.¹² Kleinere Gletschervorstöße der vergangenen 160 Jahre wurden nur um 1890, 1920 und 1980 registriert. Gletscheränderungen vor 1950 sind dabei praktisch zur Gänze ein Resultat natürlicher Klimaantriebe. Damit reagierten die Gletscher, zeitverzögert, auf die Rückkehr zu „normalen“ Temperaturverhältnissen nach dem Tiefpunkt des 19. Jahrhunderts („Kleine Eiszeit“).¹³ Seit ca. 1980 überwiegt hingegen deutlich das anthropogene Klimasignal (ZAMG 2011d).

Kleine (Kar-) Gletscher zeigen weniger starke Veränderungen als andere. Aufgrund der geringen Masse haben sie sich rascher an das geänderte Klima angepasst. Sie liegen im Mittel auch meist höher und haben geringere Abschmelzraten. Die großen Talgletscher hingegen haben meist lange, niedrig gele-

12. Sichtbares Zeichen dafür sind die Moränenwälle, die bis heute die Höchststände des 19. Jahrhunderts markieren und im Hochgebirge gut erkennbar sind.
13. Die ersten (katastrophalen) Gletschervorstöße setzten bereits um 1600 ein und führten mit Unterbrechungen schließlich in den 1820er und 1850er Jahren zur größten Ausdehnung der Alpengletscher seit etwa 8.000 Jahren (ZAMG 2007a: 23).

gene Zungen mit noch sehr dickem Eis, was zu hohen Abschmelzraten, Volumensverlusten und Längenveränderungen aber nur zu geringen Flächenverlusten führt (ZAMG 2011d).

Zahlreiche Fotovergleiche dokumentieren den Gletscherrückzug und haben die Öffentlichkeit über die Auswirkung des Klimawandels sensibilisiert.

Abbildung 11: Pasterze, Gletschermarke 2005



Österreichs längster Talgletscher, die Pasterze hat sich seit 2005 weiter zurückgezogen. Gleichzeitig ist die Eisdicke um 40 Meter geschmolzen, dies verdeutlicht die negative Massenbilanz.

Quelle: Wetteronline (Jürgen Vollmer)

Ein Gletscher lässt sich in ein Akkumulations- (Massengewinn) und ein Ablationsgebiet (Massenverlust) teilen. Die Gleichgewichtslinie (vereinfacht gesagt die sommerliche Schneegrenze) trennt das Akkumulations- vom Ablationsgebiet. Das objektive Kriterium zur Beurteilung des Gletschers ist die jährliche *Massenbilanz* d.h. das Verhältnis zwischen Einnahmen und Ausgaben. Die Massenbilanz stellt eine unmittelbare Reaktion auf die Wetter- und Klimaverhältnisse dar. Baut der Gletscher mehr Eis auf als abschmilzt, ergibt die Bilanz einen positiven Wert – das Eisvolumen nimmt zu. Setzt sich der Trend über einige Zeit fort, führt dies zu wachsenden Gletschern. Im umgekehrten Fall, der die letzten Jahrzehnte (seit ca. 1985) vorherrscht, verlieren die Gletscher an Substanz (negative Massenbilanz). Langjährige Meßreihen der *Massenbilanz* eignen sich daher hervorragend, um auf Klimaänderungen bzw. das anthropogene Klimasignal rückschließen zu können.¹⁴ Von ca. 40% der österreichischen Gletscherfläche wird auch die Eisdecke erfasst. Sodass die Entwicklung der Gesamtvolumen der Gletscher, und die negative Massenbilanz der vergangenen 25 Jahren, als gut abgesichert gilt (ZAMG 2007a: 45, Neff/Vuilleumier 2008: 8, ZAMG 2011d).

Abbildung 12: Schneebedeckter Vernagtferner (Ötztal)



Sommerliche Schneefälle bedecken den Gletscher und unterbrechen die Abschmelzperiode. (Foto: Josef Krammer)

Die Massenbilanz der Gletscher wird ganz überwiegend von den Sommertemperaturen sowie den Schneerücklagen des Frühlings und Winters gesteuert. Wolkenverhangene, kühle und niederschlagsreiche Tage mit Schneefällen im Hochgebirge sind „gletscherfreundliche“

Wetterbedingungen. Sonnenscheinreiche und warme Tage aber auch Niederschläge die bis ins Hochgebirge als Regen fallen forcieren hingegen die Gletscherschmelze. Verstärkend wirkt auch die Luftverschmutzung, vor allem der Eintrag von Feinstaub und Ruß auf der Gletscheroberfläche, der die Albedo herabsetzt und die Schmelze beschleunigt. Ein natürliches Phänomen ist hingegen die großräumige Verfrachtung von Saharasand, deren Eintrag die Gletscherschmelze ebenfalls verstärkt. Das Temperaturniveau der Wintermonate hat demgegenüber wenig Auswirkung auf den Gletscher, da es immer unter Null Grad liegt.

Ein Effekt der Gletscherschmelze ist der vermehrte Zufluss von geschmolzenem Gletschereis in Bäche und Flüsse des Alpenraumes und des Berggebietes („Gletscherspende“). Lokal und regional sind diese Zuflüsse beträchtlich, vor allem in Hitzesommern (wie 2003), *insgesamt jedoch gering*.¹⁵ Selbst in stark

14. Flächen-, Volumen- und Längenänderungen sind dazu nur bedingt in der Lage, weil sie u.a. topographisch bedingt sind – Steilstufen mit dünnerem Eis schmelzen rascher als flachere Bereiche mit mächtigem Gletschereis (ZAMG 2011d).
15. Wenn man die derzeit ca. 17 km³ österreichischen Eises in Flüssigwasser umrechnet und auf das gesamte Staatsgebiet verteilt entspricht dies lediglich 200l/m² oder weniger als einem Fünftel des mittleren Jahresniederschlags Österreichs (ZAMG 2011d).

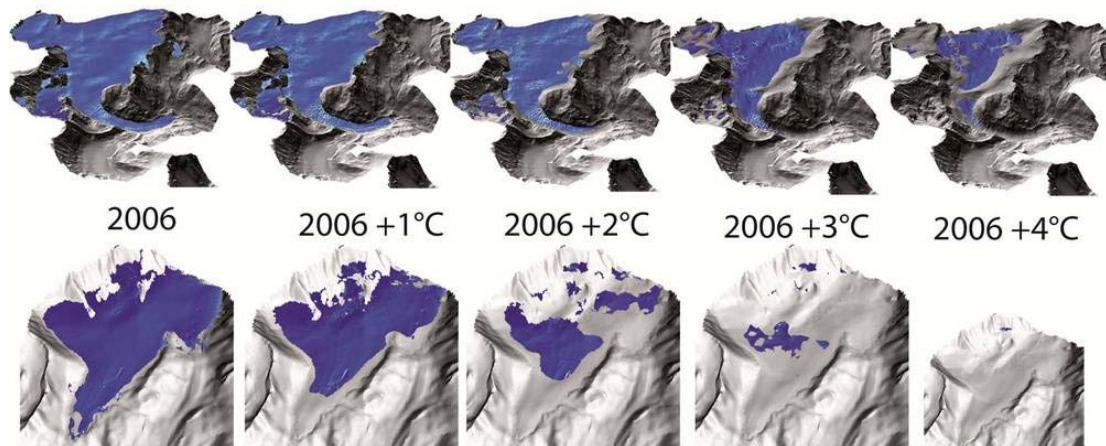
vergletscherten Einzugsgebieten wie dem Tiroler Rofental liegt die Gletscherspende bei nicht mehr als 20% für die Sommermonate und unter 10% für den Jahreswert (ZAMG 2011d).

Wie sich die Alpengletscher in Zukunft verhalten werden, hängt einerseits davon ab, wie dick das verbliebene Eis ist, wie stark der jeweilige Gletscher mit dem momentanen Klima im Ungleichgewicht ist, und davon wie sich vor allem die Klimaelemente Strahlung (Sonnenscheindauer), Temperatur und Niederschlag über die nächsten Jahrzehnte entwickeln werden. Ein entscheidender Punkt ist darüber hinaus die Frage wie sich die globalen Emissionen, der Ausstoß von Treibhausgasen bzw. Beschränkungen derselben, entwickeln werden.

Prognosen unter Hinzuziehung von regionalen Klimamodellen zeigen, dass die kleinen und mittleren Gletscher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts verschwunden sein werden, die großen (Talgletscher) in stark reduzierter Form, das nächste Jahrhundert aber noch erleben werden. Je Grad Temperaturanstieg verlagert sich beispielsweise die Gleichgewichtslinie und damit das Nährgebiet des Gletschers um ca. 60 bis 140m bergwärts. Im Vergleich zu den höher gelegenen Gletschern der Westalpen sind die heimischen Gletscher aber klimasensitiver, sie werden früher abschmelzen (IPCC2007b: 551, ZAMG 2011d).

Die folgende Abbildung zeigt die Abschätzung zukünftiger Gletscherausdehnung anhand des Gepatsch- (Ötztal) und Fernaufnerers (Stubaital). Nach dieser Simulation wird der Fernaufnerer (2006 1,5 km²) bis 2100 abgeschmolzen sein, während der Gepatschferner (2006 16,6 km²) erheblich geschrumpft aber auch noch 2100 bestehen sollte.

Abbildung 13: Abschätzung zukünftiger Gletscherausdehnung anhand zweier Alpengletscher



Legende: Gepatschferner (obere Zeile) und Fernaufnerer (untere Zeile)

Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Olefs u.a. 2009)
http://www.zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/5-2-5_Abb3_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=1000&imgHeight=437

Eine (noch) geringere Ausdehnung, freilich aus natürlichen Antrieben heraus, hatten die alpinen Gletscher nach dem Ende der letzten Eiszeit vor ca. acht- bis neuntausend Jahren. Mit wenigen Ausnahmen waren die ersten Jahrtausende der jetzigen Zwischenwarmzeit (Holozän) etwas wärmer als heute. Berggruppen mit geringerer Gipfelhöhe (bis 3.000m Seehöhe), wie die Goldberggruppe (Hohe Tauern) dürften mehrere Jahrtausende lang beinahe unvergletschert gewesen sein. Als Indiz dafür dienen tausende Jahre alte Zirbenstämme, die in den letzten Jahren aus der Pasterze ausgeapert sind. Diese Baumreste weisen auf einen Wald hin, der vor acht- bis neuntausend Jahren den Pasterzenboden, also den heutigen Zungenbereich, bedeckte. Auch die recht massive Warmphase des frühen Holozäns reichte wohl aber nicht aus, um bis zu den höchsten Alpengipfeln das Eis abzutauen. Um die Gleichgewichtslinie um 1.000 Meter nach oben zu verschieben – von jetzt etwa 3.000m auf 4.000m - bräuchte es eine Erwärmung von etwa 6°C (ZAMG 2007a: 22, 62-65)¹⁶.

Während der Gletscherrückzug aufgrund der anthropogenen Erwärmung gut dokumentierbar ist, weiß man wenig über Verteilung und Mächtigkeit des Permafrosts. Bis dato wird an der Erstellung von Permafrost-Landkarten gearbeitet. Sicher ist, dass sich die Permafrostgrenze im Zuge des Klimawandels weiter nach oben verschieben wird. Bei verschiedenen Berg- und Felsstürzen in den letzten Jahren gibt es eine Reihe von Indizien, die auf das Abschmelzen (Degradation) des Permafrost zumindest als einer der Ursachen hindeuten. Die im Hochgebirge sehr komplexe kleinräumige (inselhafte) Verteilung macht eine Lokalisierung und Einschätzung der Tragweite der Schmelzprozesse aber schwierig.

Durch die höheren Temperaturen kommt es zu einem Verlust der Bodenfestigkeit an steilen Hängen. Die Mächtigkeit der oberflächennahen jährlichen Auftauschicht nimmt zu. So war im Hitzesommer 2003 die Steinschlagfähigkeit und Felssturzaktivität im gesamten Alpenraum außergewöhnlich hoch. Im Hitzesommer desselben Jahres war die Auftautiefe um einen halben Meter größer als in den Jahrzehnten davor. Auch für die Schweiz und die Westalpen konnten ähnliche Folgen beobachtet werden. Die Ereignisse von 2003 könnten erste Anzeichen einer künftigen Entwicklung sein (Bundesamt für Umwelt 2007: 40, Salzburg online 2009, ZAMG 2011g).

Ein besonders spektakuläres Beispiel für die Dynamik des auftauenden Permafrostbodens stellte die notwendige Sanierung des meteorologischen Observatoriums auf dem 3.106m Hohen Sonnblick dar. Das Gipfelplateau musste 2002 aufwändig saniert werden, da Wasser in das Gestein und in die Felsen eindrang und es zu „sprengen“ drohte. Mittels Stahllankern und großen Betonblöcken konnte eine Stabilisierung erreicht werden (ZAMG 2011g).

16. Dieser durch natürliche Antriebe verursachte Gletschertiefststand gibt jedoch keinen Anlass, die anthropogene Erwärmung bzw. den dadurch bedingten Gletscherschwund zu bagatellisieren.

Abbildung 14: Sanierungsarbeiten Hoher Sonnblick



Das Sonnblickobservatorium musste aufgrund des auftauenden Permafrostbodens 2002 aufwändig saniert werden.

Quelle: Klimawandelportal ZAMG (nach Schober 2006)

http://www.zamg.ac.at/display.php?imgPath=/pict/forschung/5-5_Permafrost_Abb4_gr.jpg&imgTitle=&imgSource=&imgWidth=600&imgHeight=446

9.2 Veränderung der Phänologie und Anpassung der Tier- und Pflanzenwelt

Auch die phänologischen Eintrittsphasen, vor allem des Frühlings auf der Nordhalbkugel zeigen deutliche Anzeichen der Klimaerwärmung. Damit im Zusammenhang stehen die Verschiebung der Klima- und Vegetationszonen, und die damit verbundenen veränderten Jahreszeiten. Viele Pflanzenarten entwickeln sich und blühen früher oder sie bleiben im Herbst länger grün. Beispielsweise konnte das zeitigere „Ergrünen“ der Vegetation auf der Nordhalbkugel mittels Satellitenbeobachtungen nachgewiesen werden. Nicht nur positiv zu bewerten ist die Verkürzung der winterlichen Wachstumsunterbrechung (UBA 2010d: 50f, Beierkuhnlein/Foken 2008: 112, IPCC 2007b: 551, Wikipedia 2011c).

Die Phänologie¹⁷ befasst sich mit dem Ablauf der Pflanzenentwicklung (und den wechselnden Erscheinungen in der Tierwelt) in Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Witterung. In den phänologischen Daten kommt der Gesamtkomplex der Umwelteinflüsse (Boden, Genetik, Konkurrenzverhältnisse) zum Ausdruck, nicht nur der der Witterung. Letztere und dabei vor allem die Lufttemperatur spielt aber vor allem bei den Frühjahrsphasen in mittleren und höheren Breiten eine wesentliche Rolle und ist

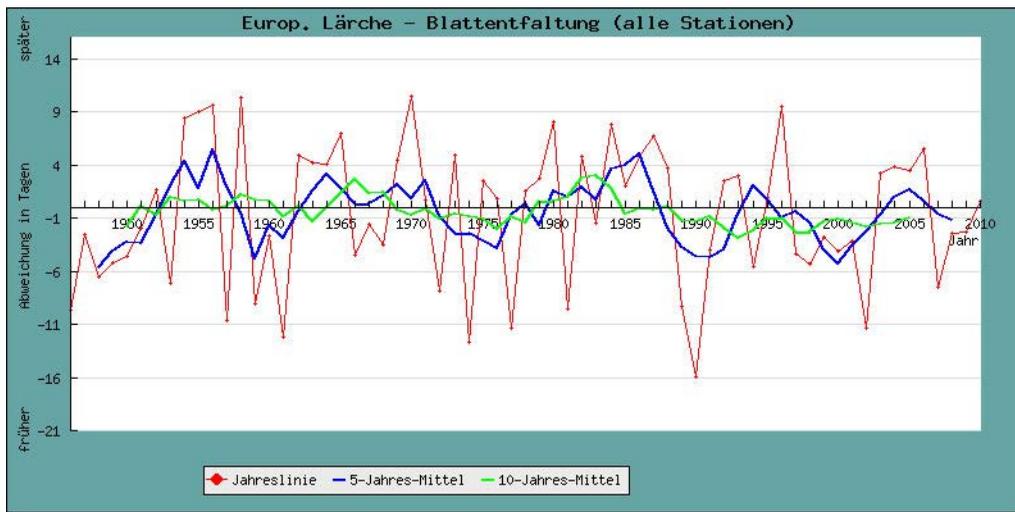
17. Wörtl. die Lehre oder Kunde von den Erscheinungen.

somit ein guter Bioindikator für allmähliche Änderungen des Klimas. Nicht übersehen werden darf dabei aber die *hohe Kurzfristvariabilität* der phänologischen Phasen von Jahr zu Jahr. Diese kurzfristige Wechselhaftigkeit muss vom längerfristigen Trend unterschieden werden. Die wichtigsten phänologischen Phasen sind die erste Blüte von verschiedenen Wild- und Kulturpflanzen (Frühjahrsblüher, Hasel, Süßkirsche etc.) die Blattentfaltung, die erste Mahd im Dauergrünland, die Fruchtreife, sowie Blattverfärbung und –fall im Spätherbst (ZAMG 2011q, Beierkuhnlein/Foken 2008: 112).

Die Pflanzenentwicklung ist in unseren Breiten maßgeblich durch den Temperaturverlauf bestimmt. Eine Temperaturzunahme um ein Grad Celsius im Frühling bedingt ein ca. um eine Woche früheres Einsetzen der Frühlingsphasen. Lange phänologische Beobachtungsreihen zeigen, dass Pflanzen auf diese gering scheinenden Veränderungen ihrer Umwelt vor allem in mittleren und höheren Breiten deutlich reagieren. In den letzten 50 Jahren verfrühte sich die Blattentfaltung und Blüte von Frühjahrsblütern um 1,4 bis 3,1 Tage pro Jahrzehnt. Auch der Zeitraum zwischen Blüte und Fruchtreife ist während der letzten Jahrzehnte deutlich geschrumpft, da die Fruchtreifephase ihre Eintrittszeiten rascher nach vorne verschoben haben, als die Blühphasen (Scheifinger et al. 2007 nach Balas et al. 2010a: 59).

Typische Beispiele für die Verfrühung der Vegetation in den Alpen zeigen die folgenden Abbildungen. Abbildung 15 zeigt die Abweichung in Tagen bei der Blattentfaltung der Lärche. Längerfristig (seit ca. 1985) ist eine immer frühere Entwicklung festzustellen. Der Verlauf des Eintrittstermins von Frühjahrsblüchern in alpinen Gebieten des Alpenbogens wird in Abbildung 16 gezeigt. Auch darin wird die Verfrühung des Vegetationsbeginns erkennbar.

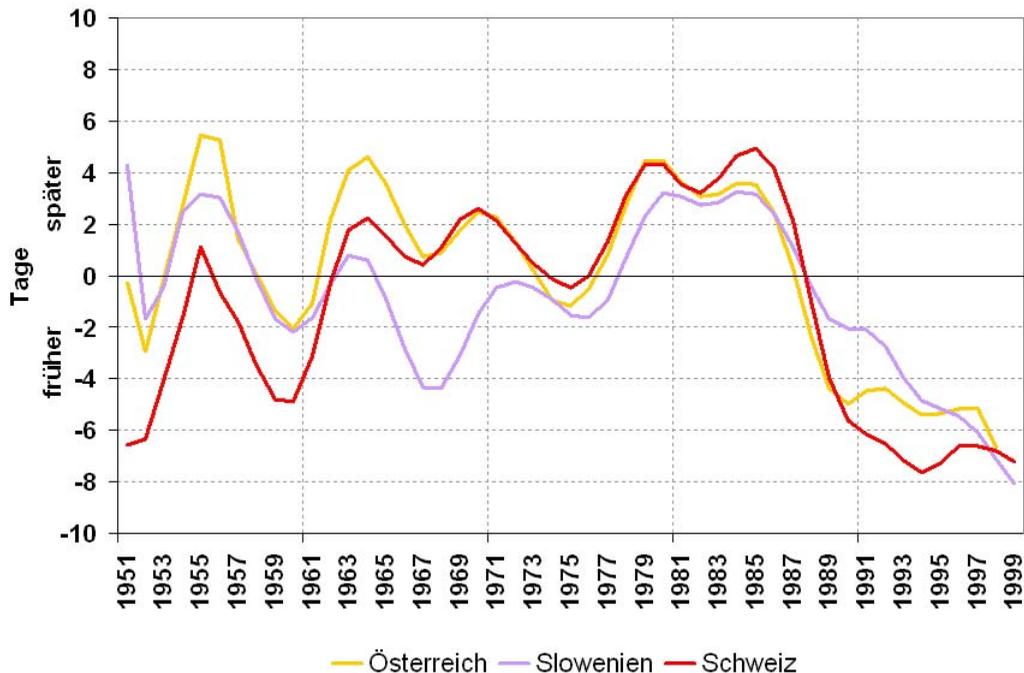
Abbildung 15: Blattentfaltung Europäische Lärche



Quelle: Phänologieportal ZAMG

http://zacost.zamg.ac.at/phacno_portal/no_cache/auswertungen/diagramme/diagramm.html?stat_id=mittel&element_id=12

Abbildung 16: Verlauf des Eintrittstermins von Frühlingsblüchern in alpinen Gebieten Österreichs, Sloweniens und der Schweiz seit 1951, Abweichung vom Mittel



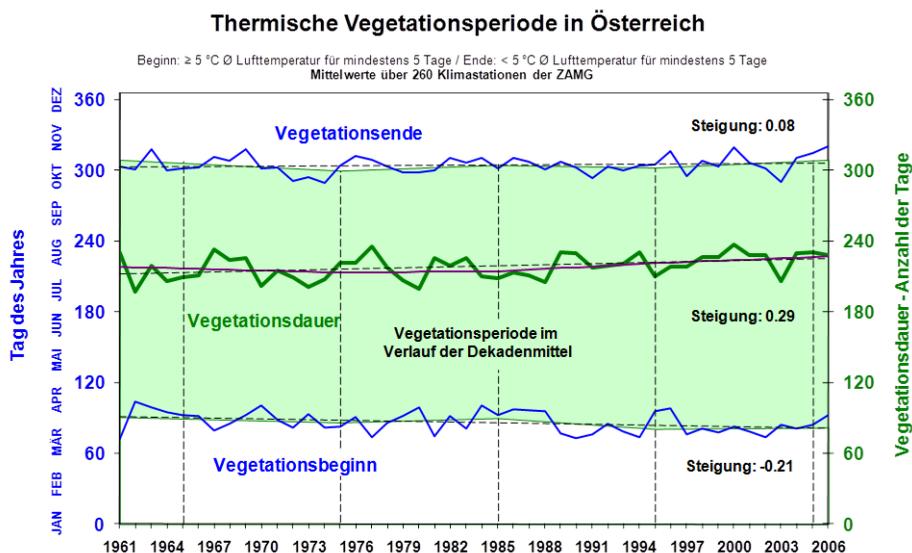
Quelle: Phänologieportal ZAMG

http://zacost.zamg.ac.at/phaeno_portal/index.php?eID=tx_cms_showpic&file=uploads%2Fpics%2Fphaeno-fruehling-alpenlaender.jpg&width=1024m&height=850m&bodyTag=%3Cbody%20style%3D%22margin%3A0%3B%20background%3A%23fff%3B%22%3E&wrap=%3Ca%20href%3D%22javascript%3Aclose%28%29%3B%22%3E%20|%20%3C%2Fa%3E&md5=bc62afefc8079cc446e2bef8d081606f

Analog zu der Verfrüherung der phänologischen Phasen hat die Vegetationsperiode insgesamt seit den 1960er Jahren signifikant zugenommen. Dabei ist die Zunahme der Vegetationsperiode zu zwei Drittel auf einen *früheren* Vegetationsbeginn zurückzuführen. Dieser Trend ist bei den höher gelegenen Wetterstationen noch ausgeprägter. Beispielsweise weist die Station Rauris eine Steigung der Vegetationsdauer von 0,38 (entspricht 17,48 Tagen) auf. Auch andere Stationen (Bad Aussee, Mariazell, Rax) zeigen diesen Trend¹⁸ (Schaumberger/Formayer 2008b).

18. Ein wichtiger Faktor, der bei der Analyse jedoch keine Berücksichtigung fand ist die Schneebedeckung, die vor allem in den Bergen eine Verzögerung der effektiven Vegetationsentwicklung bewirkt (Bohner/Bruckner 2006).

Abbildung 17: Thermische Vegetationsperiode in Österreich 1961–2006 Regressionsberechnung

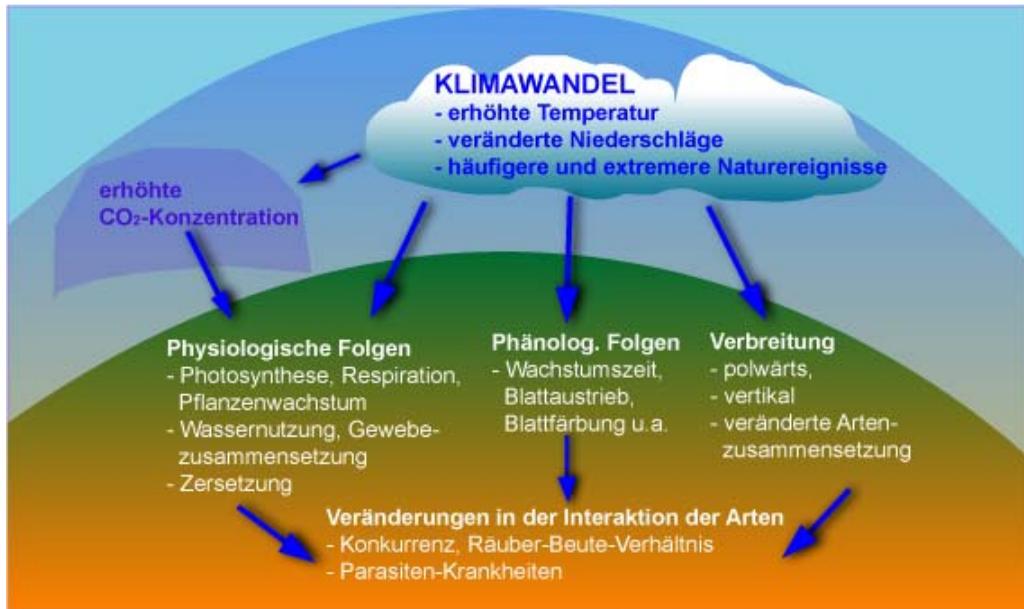


Die Tier- und Pflanzenwelt passt sich an die veränderten phänologischen Phasen, vor allem an den verfrühten Saisonbeginn zu Beginn der neuen Wachstumsperiode an. Im Vergleich zu den Pflanzen ist das Wissen über die Veränderungen der Tierwelt noch deutlich geringer. Insgesamt liegen für Österreich und den Alpenraum nur wenige Daten vor. Es liegen jedoch die Ergebnisse internationaler Studien vor, die zwecks Prognosen für die österreichische Fauna und Flora herangezogen werden können (Beierkuhnlein/Foken 2008: 124, ÖBf o.J.: 7).

In einem Vergleich von 143 Langzeitstudien mit Daten von 1.473 Tier- und Pflanzenarten zu den Auswirkungen des Klimawandels zeigten sich bei 81% der Arten phänologische Änderungen. In den meisten Fällen wurden dabei eine *Vorverlegung* von Schlupfterminen, Hauptaktivitätszeiten oder Wanderverhalten beobachtet. Frühjahrsaktivitäten (z.B. Brüten von Vögeln, Ankunft von Zugvögeln, Erscheinen von Schmetterlingen, Laichrufe von Amphibien etc.) traten in den letzten 40 Jahren immer früher ein. Im Frühjahr sind die phänologischen Phasen deutlich von der Temperatur bestimmt. Im Herbst verlaufen diese deutlich heterogener (ÖBf o.J. nach Parmesan und Yohe 2003: 4, Root et al. 2003, Walther et al 2002).

Veränderungen phänologischer Ereignisse wirken sich gravierend auf die *Nahrungsbeziehungen* in den Ökosystemen und der Nahrungskette aus: So können Schmetterlingsraupen den Blattaustrieb ihrer Nahrungspflanze versäumen, wenn dieser verfrüht stattfindet und so ihre Nahrungsquelle verlieren (wiki-Bildungsserver 2011a). Die Veränderung der Interaktion der Arten als Folge des Klimawandels verdeutlicht auch Abbildung 18:

Abbildung 18: Ökosystemfolgen (des Klimawandels)



Quelle: Wiki-Bildungsserver

http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/upload/Oekosystem_folgen.jpg

Bei den Zugvögeln wurde beobachtet, dass sich die Brutzeiten nach vorne verschieben, die Tiere später und in Gunstlagen überhaupt nicht (mehr) in die Winterquartiere aufbrechen. Bedingt durch mildere Winter erhöht sich auch das Nahrungsangebot. Grundsätzlich profitieren anpassungsfähigere Arten vom Klimawandel auf Kosten hoch spezialisierter und weniger robuster Arten. Dies ist auch beim Verhältnis von Standvögeln gegenüber Zugvögeln zu beobachten (UIBA 2010d: 59, ÖBf o.J.: 5, OcCC 2007: 29 ORF Kärnten 2011a).

Änderungen in Ausbreitung und Phänologie sind auch bei heimischen Insekten und Spinnen zu beobachten: Schwebfliegen und Wanderfalter profitieren von den höheren Temperaturen. Früher konnten sie nur an wenigen, besonders warmen Sommertagen die Alpen überqueren, jetzt haben sie dafür wesentlich mehr warme Tage zur Verfügung. Bei anderen Insekten konnten Arealausweitungen beobachtet werden. Ausschlaggebend dafür dürfte vor allem die Erhöhung der Wintertemperaturen sein, weil sie eine niedrigere Wintermortalität bewirkt (ÖBf o.J.:3).

9.3 Veränderung der Arten- und Pflanzenzusammensetzung (Verschiebung von Verbreitungsgebieten)

Bestehende Ökosysteme sind immer das Produkt einer längeren Entwicklungsphase. Seit dem Ende der letzten Eiszeit sind ständig Arten aus wärmeren Gebieten in den Ostalpenraum eingewandert. Dieser Prozess dauerte Jahrhunderte. Pflanzen und Tiere haben sich hier in einem Lebensraum unter bestimmten Klimabedingungen aufeinander angepasst. Sie stehen untereinander in zahlreichen Wech-

selbeziehungen, werden von den abiotischen Umweltfaktoren beeinflusst und wirken auf diese wieder zurück (biozönotischer Konnex). Die Arten haben Nischen und Rückzugsräume gefunden. Beute und Jäger stehen in der Regel im Gleichgewicht zueinander. Es entstand ein biologisches bzw. ökologisches Gleichgewicht.

Die nacheiszeitlichen Arealgrenzen von Arten sind dabei jedoch nicht statisch, sondern verändern sich dynamisch. Verschiebungen sind jedoch nur innerhalb der ökologischen Leistungsfähigkeit einer Art möglich. Gewisse Bandbreiten können hier nicht überschritten werden. Ein entscheidender Faktor ist dabei das Klima des Standortes. Verändern sich nun die Bedingungen, sei es durch das Klima oder das Einwandern neuer Arten, so ist das *Gleichgewicht* potenziell *gefährdet*. Trotz der bisherig moderaten Erwärmung zeigen sich bereits erste Anzeichen einer Veränderung der Arten- und Pflanzenzusammensetzung. Prinzipiell begünstigt der Klimawandel Arten mit einer hohen Temperaturtoleranz und wärmeliebende Arten, benachteiligt werden kältesuchende Arten. Bei einem Anstieg der Jahresmitteltemperatur von nur einem Grad verschieben sich die Vegetationszonen bereits um rund 100 bis 150 km polwärts bzw. um 100 bis 150 Meter gipfelwärts. Neben den Durchschnittswerten sind jedoch auch Extremwerte signifikant von Bedeutung. Nimmt zum Beispiel die Wahrscheinlichkeit für winterliche Kaltlufteinbrüche ab, so kann dies wesentlich die Erschließung neuer Areale begünstigen (UBA 2010d: 51, 57).

Eine Änderung der klimatischen Rahmenbedingungen bedeutet damit eine Änderung der möglichen Verbreitung für die Organismen. Populationen, die sich anpassen können, indem sie auf die veränderten Lebensbedingungen reagierten, sind im Klimawandel im Vorteil. Abwanderung ist aber nur dann eine erfolgreiche Strategie, wenn sich geeignete Standorte in der näheren oder weiteren Umwelt finden. Hinzu kommt, dass sich diese Räume in der Regel auch schon in einer festen, aufeinander abgestimmten Ökosystemstruktur befinden. Treten neue Arten hinzu, entwickelt sich aller Voraussicht nach eine Konkurrenzsituation.

Da unterschiedliche Arten aber nicht in derselben Weise und Geschwindigkeit auf klimatische Veränderungen reagieren, können sich *Artengemeinschaften* sowie die *Artenzahlen verändern, verschieben* oder komplett *verschwinden*. Ökosysteme und funktionale Zusammenhänge können damit stark verändert werden. Verschiebungen der Nahrungskette sind zu erwarten.

Es ist plausibel, dass eine raschere Anpassung bzw. Ausbreitung mobiler, also durchsetzungsstärkerer Arten erfolgen wird. Für *anspruchsvollere, kleinstäumig* (oder gar isoliert) *verbreitete und weniger mobile Arten* sind hingegen *Arealverluste* anzunehmen.¹⁹ Oder sie werden nicht überhaupt verdrängt und sterben aus. Entscheidend sind dabei Ausbreitungskapazität bzw. Ausbreitungsbarrieren der Arten.

Mobile Tierarten wie Vögel, Schmetterlinge, Libellen und Heuschrecken, die auch größere Barrieren überwinden können, sind prinzipiell rascher in der Lage auf Veränderungen ihrer Lebensräume zu reagieren, als wenig mobile Arten wie Amphibien und Reptilien. Letztere Arten zählen zu den absehbaren Verlierern des Klimawandels. Als hoch vulnerabel gelten insbesondere Rote-Liste-Arten, Arten mit geringer Standorttoleranz sowie kälte- und feuchtigkeitsliebende Arten. Prognosen gehen von bis zu 30

19. Dabei ist zu bedenken, dass bereits unter „normalen“ Verhältnissen Arten- und Habitatverluste vor allem durch die menschliche Nutzungsweise entstehen (siehe Punkt 2 des Kapitels).

bis 50% Verlust der Arten in Europa aus. Bei Arten, die in ihrem Bestand zurückgehen ist auch mit einem Verlust genetischer Vielfalt zu rechnen. All dies bedeutet einen drastischen Biodiversitätsverlust. Und, unter den neuen anthropogen geprägten Klimaverhältnissen kann es Jahrzehnte bis Jahrhunderte dauern, bis sich ein neues, stabiles Gleichgewicht einstellt (AustroClim 2010a, UBA 2010d: 51-52, Beierkuhnlein/Foken 2008: 115-116, Bundesamt für Naturschutz 2008, Michler 2010: 206-207).

9.3.1 Neue Pflanzen- und Tierarten (Neobiota)

Unter den „neuen“ Arten, die sich den Klimawandel zu Nutze machen oder auch nur ein Produkt der Globalisierung sind, befinden sich auch wärmeliebende Pflanzen und Tiere sogenannte Neobiota (altgriechisch „neues Leben“). Sie haben das Potenzial die Artenzusammensetzung der heimischen Fauna und Flore nachhaltig zu verändern. Diese gebietsfremden Pflanzen sind Arten, die durch menschliche Einflussnahme Einzug in ein Gebiet erhielten, in dem sie nicht heimisch sind. Als Unterbegriff für eingeschleppte Pflanzen ist der Begriff *Neophyten* gebräuchlich, analog dazu existiert für Tiere der Begriff *Neozoen*. Den Vorgang der Einschleppung, Etablierung und Ausbreitung im neuen Gebiet bezeichnet man auch als biologische Invasion. Zu den wichtigsten Transportmitteln für Neobiota gehört der globale Güterverkehr (u.a. Containerschiffe). Neobiota zeichnen sich meist durch typische Eigenschaften wie Anpassungsfähigkeit, hohe Fortpflanzungsrate und oft auch eine Assoziation mit Menschen aus. Neozoen können auch aus menschlicher Haltung entweichen und stabile Populationen etablieren, und Nutzpflanzen können sich in der Wildnis etablieren. Neobiota verändern oft die Zusammensetzung einer Biozönose²⁰ signifikant und können den Bestand von heimischen Arten vermindern. Insgesamt sind jedoch nur 1-2% der Neobioten tatsächlich invasiv und bewirken Biodiversitätsverlust bei heimischen Pflanzen. Kritisch ist die Ausbreitung von Neobiota in seltenen Biotopen zu beurteilen, insbesondere in Naturschutzgebieten, wo die Verdrängung von ohnehin bereits bedrohten Arten und Pflanzengesellschaften zu befürchten ist. (UBA 2010d: 61, Hofer 2009: 30).²¹

Auch im Alpenraum haben neophytische Pflanzenarten weite Verbreitung gefunden und es ist zu erwarten, dass diese durch die Erwärmung, die Wintermilde, einen weiteren Verbreitungsschub finden werden. Weit über eintausend Arten befinden sich hier und haben regional Anteile von 15-25% an der Gesamtflora. Am stärksten betroffen sind die unteren und mittleren Höhenlagen, bis etwa 1.200 m Seehöhe. Darüber spielen Neophyten derzeit meist eine untergeordnete Rolle. In den alpinen Tallagen sind es vor allem siedlungsnaher Bereiche, die Fließgewässer und deren Umgebung Auwälder, Uferpioniervegetation). Die zahlenmäßig am wichtigsten Florenelemente liegen an Lagerplätzen, Deponien, Industrie- und Gewerbebezonen, Straßenrändern und Bahnanlagen. Sie sind aber auch in Äckern, Feldrainen, Böschungen und generell in aufgelassenem Kulturland zu finden. Die größte Gruppe unter den Neozoen sind Insekten, aber auch Fische und wirbellose Wasserbewohner finden sich darunter (Hofer 2009: 30, UBA 2011a).

20. Eine Gemeinschaft von Organismen verschiedener Arten in einem abgrenzbaren Lebensraum (Biotop) bzw. Standort (Wikipedia 2011n).

21. Vgl. dazu auch den Aktionsplan Neobiota des BMLFUW (2005).

In Summe wird sich die Biodiversität in Österreich durch Zuwanderung (Neophyten etc.) *nominell* und *vorerst* bei einer moderaten Temperaturerhöhung *erhöhen*. Vermutlich wird ein *Großteil* der neuen Arten *geringe* Veränderungen, einige *wenige* aber sehr *bedeutende* negative ökologische Auswirkungen haben. In der Gesamtbewertung der Artenvielfalt sind die Verluste besonders an alpinen Arten höher zu gewichten, da Endemiten – d.h. Arten, die nur in Österreich vorkommen – damit weltweit aussterben, wohingegen die einwandernden Arten in ihrer Art nicht einmalig sind und auch anderswo auftreten (Niedermaier et al. o.J.:16).

9.4 Modifikation der alpinen Artengemeinschaften

Durch den Klimawandel gelten die alpinen Ökosysteme deshalb als besonders bedroht. Durch die Klimaerwärmung kommt es zu einer massiven Verschiebung der Klimazonen Richtung Norden *und* gipfelwärts, was gerade für die alpine und nivale Klimazone von einem massiven Flächenverlust begleitet ist, weil die Fläche mit der Höhe abnimmt. Die Artenzusammensetzung der alpinen Ökosysteme wird sich verändern. Sie dringen in andere Höhenlagen vor, werden auseinander gerissen oder verschwinden vollständig. Bereits bei einer Temperaturzunahme von ca. 2°C wird ein massiver Umbau von vielen Lebensgemeinschaften erwartet. Bei einer Erwärmung in dieser Größenordnung verschieben sich die Vegetationszonen um ca. 400 Meter in die Höhe. Wird diese Schwelle überschritten weisen viele Arten ein erhöhtes Aussterberisiko auf (Fischlin et al. 2007 nach Balas et al. 2010a: 50).

Für den Alpenraum und das Berggebiet ist diese Arealverschiebung der alpinen Pflanzen- und Tiergemeinschaften in die Höhe eine der prägnantesten Begleiterscheinungen des Klimawandels. Dabei ist eine klimabedingte Veränderung der Artenzahlen im Hochgebirge bereits erkennbar. Dies ergab beispielsweise eine Analyse der auftretenden Gipffluren. Im Verlauf des 20. Jahrhunderts ist ein deutlicher *Zuwachs* der Artenvielfalt und der Bodendeckung zu beobachten. Vielzitiertes Beispiel dafür ist der Schrankogel in den Stubai Alpen (vgl. GLORIA-Netzwerk: Pauli et al. 2007). In den Ostalpen wurde beobachtet, dass Grasarten um bis zu 4m pro Jahrzehnt höher gewandert sind (Niedermaier et al. o.J.: 12). Beobachtet wurde auch, dass Pflanzen kürzerer Lebensdauer und häufigerer Generationswechsel schneller in die Höhe vordringen, als Bäume und Sträucher (AlpMedia 2008 nach Lenoir, J. et al 2008). Besonders ausgeprägt ist der Trend bei den weniger hohen Gipfellagen, im Vergleich zu den höheren Gipfeln (UBA 2010d: 52, Beierkuhnlein/Foken 2008: 117, Global 2000 2010, Hofer 2009: 106)²².

Einerseits ist daher mit einem Anstieg der Arten in größeren Höhen zu erwarten, andererseits wird der Lebensraum für an Kaltklimate angepasste alpine Tiere und Pflanzen *enger*. Viele Pflanzen, Fische und Bäume müssen in höher gelegene Bereiche oder flussaufwärts ausweichen. Sehr negativ könnte sich dieser Prozess aber mittel- und langfristig für viele nivale und subnivale Arten einer *sehr engen ökologischen Amplitude* auswirken. Dies sind oft sehr seltene, gefährdete Arten. Die Folge der Höherverlage-

22. Dabei sind nicht nur steigende Temperaturen für Fauna und Flora von Bedeutung, sondern auch Veränderungen bei Niederschlägen und der Schneebedeckung. Sonderstandorte wie die sogenannten „Schneetälchen“ dürften als Folge der Erwärmung und der damit verbundenen Ausdehnung der Wachstumsperiode völlig verschwinden und ebenfalls durch alpine Rasen ersetzt werden (Hofer 2009: 104).

zung ist im günstigsten Fall nur ein Nettoflächenverlust bzw. die Habitatfragmentation der betroffenen Art. Im Extremfall stirbt die Art aus. Existenzielle Probleme bedeutet dies vor allem für Arten, die im Bereich der niederen Gipfel existieren, auf denen ein Höherwandern irgendwann nicht mehr möglich ist. Sie sind in ihrem Bestand gefährdet oder werden von anderen Arten verdrängt. Niederösterreich wird beispielsweise einen erheblichen Teil seiner Alpenpflanzen verlieren. Aber auch die Gipfflora der oberösterreichisch,- und steirischen Kalkalpen ist gefährdet (ÖBf o.J.: 6).

Bedrohte *Pflanzen* sind zumeist alpine Stauden-, Fels- und Steinfluren, oft Pionierarten (wie Alpenmannschild, Gletscher-Hahnenfuß und Steinbrech-Gewächse etc.), die von höheren Temperaturen *nicht* profitieren, während anspruchslose Folgearten ihre Blatt- und Triebanzahl verdoppeln und um ein Vielfaches mehr blühen.²³ Die Folge ist ein *Verdrängungsprozess*. Auch Arten wie Preisel- und Heidelbeeren, die jetzt im obersten Waldbereich vorkommen werden sukzessive alpine Standorte einnehmen (Beierkuhnlein/Foken 2008: 159, Global 2000 2010, Hofer: 2009: 104, IPCC 2007b: 551, Niedermair et al. o.J.: 12, UBA 2010c: 107).

Gleiches gilt bei den *Baumarten*. Endemische alpine Arten sind durch die Ausbreitung von konkurrenzfähigen subalpinen Büschen und Baumarten in höher gelegene Regionen gefährdet (Beierkuhnlein/Foken 2008: 119 nach Pitelka 1997, EEA 2004, McLachlan et al 2005).

23. Beispielsweise verdrängen alpine Rasen den Lebensraum für zahlreiche nivale Pionierpflanzen, die in den Alpen endemisch auftreten und auf Schutthänge und lange Schneebedeckung angewiesen sind (Hofer 2009: 105-108).

Auch die alpinen Tierarten sind von der Klimaerwärmung betroffen. Manche große Wirbeltierarten wie Vögel oder Säugetiere (Gams- und Steinwild) sind an das Leben im Hochgebirge angepasst. Bei einem Anstieg der Waldgrenze verbunden mit Veränderungen der Wirtschaftsweise (Auflassen der Almen etc.) verringert sich der Lebensraum dieser Tierarten massiv. Vogelarten des Hochgebirges werden von steigenden Temperaturen keineswegs nur positiv beeinflusst, ganz im Gegenteil. Insbesondere alpine Arten wie der Schneefink, die Alpenbraunelle, Bergpieper und das Alpenschneehuhn gelten bei einem weiteren Temperaturanstieg und einer längeren Vegetationsperiode als hochempfindlich. Da diese Arten ihre Brutgebiete auf Bergwiesen oder Schuttfluren meist in Höhenstufen ab 1.600 bis 1.800 Meter Seehöhe haben, könnte ein Ansteigen der Waldgrenze zu einem Zurückdrängen dieser Arten in höhere Lagen und dadurch zu einer Schrumpfung ihrer Areale führen (UBA 2010d: 53 nach Kromp-Kolb/Gerersdorfer 2003).

Umgekehrt profitieren Generalisten, die ihre Ausbreitungsgebiete von der montanen Höhenstufe aus ausdehnen. Aus Vorarlberg ist bekannt, dass die meisten Brutvögelarten in höheren Lagen brüten als noch vor 20 Jahren. Bedingt durch das mildere Klima, die längere Vegetationsperiode haben sie ihren Lebensraum in die Höhe ausgedehnt. Es sind sowohl Insektenfresser als auch die Samen fressenden Finkenvögel, die vermehrt über 1.800m anzutreffen sind. Sie können ihren Lebensraum damit ausweiten und profitieren vom Klimawandel (ÖBf o.J.:4, OcCC 2007: 32, Vorarlberger Naturschutzrat 2009: 8).

In den tieferen Lagen Österreichs ist hingegen eine „Mediterranisierung“ – eine Zunahme wärmeliebender Arten – zu erwarten. Auswirkungen davon können bis in die Tal- und Beckenlagen des Berggebietes und besonders für die Alpensüdseite erwartet werden. Periodisch nach wie vor auftretende Kälteeinbrüche sowie winterliche Fröste setzen der Einwanderung von Tier- und Pflanzenarten aus wärmeren Regionen jedoch Grenzen (Nidermair et al. o.J.: 8).

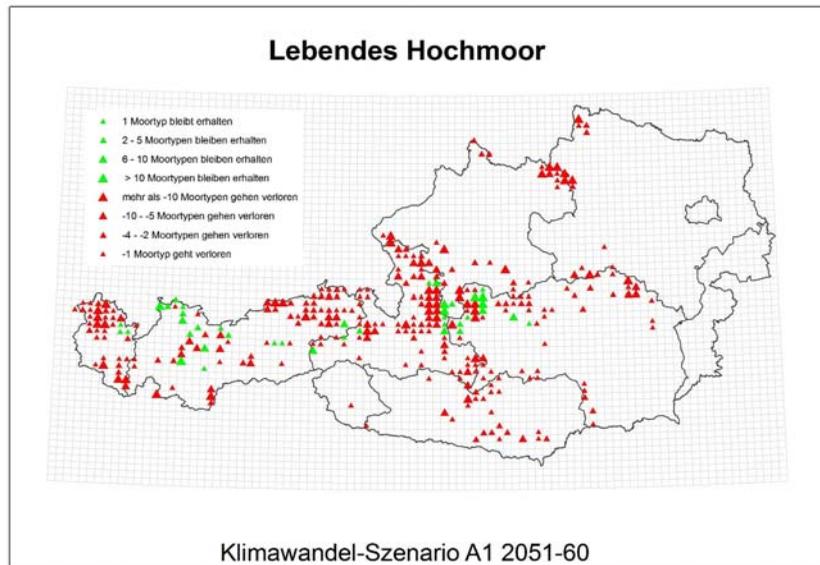
9.5 Auswirkungen auf alpine Feuchtbiotope (Hoch- und Flachmoore)

Besonders starke Effekte des Klimawandels sind in Vegetationstypen zu erwarten, die an ein gleichmäßig kühles Klima und an gleichmäßig hohe Niederschläge gebunden sind. Feuchtgebiete sind gegenüber Wassermangel, Hitzeperioden (und sekundär Eutrophierung) besonders empfindlich. Dazu ist zu bemerken, dass gerade die Feuchtgebiete (Teiche, Moore, Feuchtwiesen, Auen) als vermeintlich „nutzlose“ Flächen bereits unter normalen Verhältnissen unter großem Nutzungsdruck (Entwässerung, Eutrophierung, Flächenverlust etc.) stehen.

9.5.1 Hoch- und Flachmoore

Hochmoore werden ausschließlich von Regenwasser gespeist und reagieren auf steigende Temperaturen, geringere (sommerliche) Niederschläge und Hitzeperioden empfindlich. Im Extremfall fallen sie trocken und der über Jahrtausende gespeicherte Kohlenstoff, aber auch Methan werden durch beschleunigte Zersetzungsprozesse freigesetzt und tragen zur Klimaerwärmung bei. Modellierungen zeigen, dass die Mehrheit aller Mooregebiete bis 2050 einem zunehmenden Trockenheits- und Hitze-stress ausgesetzt sein wird. Dies wird selbst unter den günstigsten Klimaszenarien der Fall sein.

Abbildung 20: Rückgang der Hochmoortypen im Zuge des Klimawandels



Legende: Klimatische Gefährdungssituation der Vorkommen des Biotoptyps „Lebendes Hochmoor“ unter dem Emissionsszenario A1 für 2050 bei einem Temperaturanstieg von etwa 2,3°C. Rote Dreiecke symbolisieren Moore, die einem hohen, grüne Dreiecke hingegen solche, die einem geringen klimatischen Risiko ausgesetzt sind. Je größer die Symbole, desto mehr Hochmoorflächen befinden sich in der Rasterzelle.

Quelle: Franz Essl (UBA)

Der Klimawandel bedroht die Lebensbedingungen für Pflanzen und deren Artenzusammensetzung. Längere Vegetationsperioden führen zur Bewaldung und zur Zuwanderung von für Moore untypischen Arten (Neobiota). Flachmoore sind von veränderten Niederschlägen generell weniger stark betroffen, da sie durch ihre Anbindung ans Grund- und Quellwasser alternative Wasserspeisungsmöglichkeiten haben (Hofer 2009: 42, Niedermair et al. o.J: 16., WWF Österreich 2010a: 9).

Moore tragen wesentlich zum Klimaschutz bei, da im langsam aufgebauten Torf viel Kohlenstoff gespeichert wird. Der Grund liegt darin, dass abgestorbenes Pflanzenmaterial in Mooren aufgrund von Stau-nässe und Sauerstoffmangel nicht abgebaut, sondern konserviert wird (WWF Österreich 2010a).

Um Hochmoore vor dem Klimawandel zu sichern, sollte eine Wiederherstellung natürlicher Verhältnisse angestrebt werden. Bei der Renaturierung von Mooren versucht man, ihren ursprünglichen Wasserhaushalt wiederherzustellen oder zumindest das Wasser teilweise wieder zurückzugeben (Wieder-vernässung). Auch die Beseitigung bestehender Drainagen kann wieder natürliche Bedingungen herbeiführen (WWF Österreich 2010a: 11).

Abbildung 21: Moor im Schladminger Untertal



Temperaturanstieg und Trockenheit gefährden die alpinen Moore in ihrem Bestand.

Quelle: Franz Essl (UBA)

9.6 Auswirkung auf Gewässer (Seen, Flüsse) aquatische Ökosysteme

Die Klimaerwärmung der Atmosphäre hat auch Folgen für die Wasserflächen – alpine Seen, Bäche und Flüsse bzw. die dort befindlichen Ökosysteme und die darauf spezialisierten Tier- und Pflanzenarten (Fische, Amphibien, Wasservögel). Die Wassertemperaturen der Gewässer steigen an. Bei Bächen und Flüssen sinkt die Wasserführung und es treten niedrigere Wasserstände, vor allem im Sommer, auf. Kleine Wasserstellen (Tümpel etc.) fallen überhaupt trocken. Hingegen könnten Hochwässer häufiger auftreten und die Abflussdynamik weißt möglicherweise größere Schwankungen auf. Menschliche Eingriffe in Gewässer – v.a. Fließgewässer – können einen solchen Temperaturanstieg zusätzlich verstärken (z.B. Wasserausleitung, Einleitung thermisch vorbelasteten Wassers, Rodung von Ufergehölzen etc.). Insgesamt ist mit erheblichen Veränderungen der Fauna und Flora zu rechnen (Niedermair et al. o.J: 14).

Durch die Abnahme der Gletscherspende, trockene Sommer und stärkere Schwankungen der Abflussdynamik steigt bei Bächen und Flüssen das Risiko von Niedrigwasserständen mit negativen Folgen für die *Fischbestände*. Die Erwärmung der Gewässer verkleinert die Lebensräume von Kaltwasserfischen (Äschen, Bachforellen, Huchen etc.). Wobei Maximalwerte während Hitzeperioden besonders problematisch sind, da die Sauerstoffkapazität des Wassers mit steigender Temperatur abnimmt. Karpfen oder exotische Fischarten profitieren hingegen vom Klimawandel. Insgesamt muss mit einer Areal-

vergrößerung von Arten gerechnet werden, die hohe Temperaturen oder einen breiten Schwankungsbereich von diversen Umweltfaktoren aushalten bei gleichzeitiger Reduktion von Arten und Organismen, die nur in einer kalten und kühlen Umgebung existieren. In der Regel sind solche Tierarten in höheren Lagen bzw. in Quellnähe verbreitet. Die Änderung der Artenzusammensetzung kann auch hier temporär zu einer größeren Artenvielfalt führen, weil es zu einer Koexistenz der „alten“ und „neuen“ Arten kommt. Längerfristig ist jedoch mit dem Aussterben jener Arten zu rechnen für die die klimatischen Bedingungen immer ungünstiger werden (UBA 2010d: 60, nach Schmutz et al. 2004, ÖBf o.J.: 5, Niedermair et al. o.J.: 14).

In der Schweiz konnte festgestellt werden, dass die Flüsse im Mittelland und teilweise auch die der alpinen Regionen, seit den 1960er Jahren immer wärmer geworden sind. Ebenso steigt die Anzahl der Stunden, an denen die Wassertemperatur über 18°C steigt. Zeitgleich mit dieser Erwärmung nimmt der Bestand an Bachforellen ab. Für Fortpflanzung und Wachstum ist die Bachforelle auf kühles Wasser angewiesen, das sie zunehmend nur mehr in den Oberläufen vorfinden. Wiederholt auftretende extrem hohe Sommertemperaturen führten zum Absterben empfindlicher Fischbestände, wie beispielsweise die Äschen-Population im Rhein unterhalb des Bodensees im Hitzesommer 2003 (Bundesamt für Umwelt 2007: 42-45).

Amphibien (Lurche, Frösche, Salamander etc.) sind vom Klimawandel besonders bedroht. Sie benötigen aufgrund ihrer wasserdurchlässigen Haut, die sie nicht vor Verdunstung oder Sonnenstrahlung schützt, generell feuchte Habitate, Feuchtgebiete oder Gewässer. Zunehmende Trockenheit, ein Rückgang von Feuchtgebieten oder periodisches Trockenfallen von sonst permanent wasserführenden Gewässern beeinflusst alle Arten negativ und kann zu lokalem Aussterben führen (Pampus 2005, Kagarise/ Morton 1993 beide nach Balas et al. 2010a: 56).

Vor allem die See-Wasseroberflächen haben sich deutlich erwärmt, aber auch im tieferen Wasser zeigt sich noch eine geringfügige Erhöhung. Große Auswirkungen sind bei der Schichtung und damit der Durchmischung der verschiedenen Wassersäulen zu bemerken. Dies gilt vor allem für Seen ohne Abflüsse. Seen als „stehende“ Wasserkörper zeigen eine deutliche „inverse“ Schichtung - oben wärmer, unten kälter. Das von der Sonneneinstrahlung langsam erwärmte Oberflächenwasser hat eine geringe Dichte und lagert – je nach Erwärmungsgrad – relativ stabil über dem kühleren Wasserkörper.²⁴ Dies gilt vor allem für den Sommer. In den Übergangsjahreszeiten erfolgt eine stärkere Durchmischung und im Winter ist die Schichtung einheitlich kalt. Durch die Klimaerwärmung ist die stabile Schichtungsphase des Sommerhalbjahres stärker ausgeprägt als in der Vergangenheit. Und die Sprungschicht, der Übergang zwischen dem warmen Oberflächenwasser und dem kälteren Tiefenwasser hat sich um mindestens ein Meter weiter nach unten verlagert. Gleichzeitig *sinkt* die Sauerstoffversorgung des Tiefenwassers. Dies hat negative Folgen für das Ökosystem, zum Beispiel der Fischwelt (Beierkuhnlein/ Foken 2008: 130, Michler 2010: 196-197).

Höhere Wassertemperaturen und eine stabilere thermische Schichtung der Wassersäule wurde an einigen alpinen Seen bereits festgestellt: In einer Untersuchung für die Österreichischen Bundesforste

24. Das Einsetzen der thermischen Schichtung im Frühling steigert gleichzeitig das Algenwachstum, welches in der Nahrungskette wiederum für das Zooplankton und die Fischwelt essentiell ist.

wurden höhere Wassertemperaturen für 12 große alpine Seen seit den 1960er Jahren festgestellt (Altaussee See, Grundlsee, Hallstätter See, Traunsee, Wolfgangsee, Fuschlsee, Mondsee, Attersee, Weissensee, Millstätter See, Ossiacher See, Wörther See). Dabei haben sich die Temperaturen im Frühjahr und Sommer stärker erwärmt als im Herbst (Dokulil 2009: 3-5).

Auch am Vorarlberger Bodensee konnte die verringerte vertikale Durchmischung und die damit verringerte Sauerstoffanreicherung des Tiefenwassers beobachtet werden. Gleichzeitig macht sich die verminderte Menge an Schmelzwasser im Frühjahr und Sommer bemerkbar, sodass die sommerlichen Pegelstände auffallend gesunken sind. Nicht auszuschließen ist, dass auch die höhere Verdunstung infolge der wärmeren Temperaturen dazu beiträgt (Vorarlberger Naturschutzrat 2009: 50-51).

Negativ wirkt sich die Frühjahrs- und Sommertrockenheit auf die Nahrungspflanzen für Insekten aus. Gleichermaßen gilt dies für die Kleingewässer, die Brutstätten derselben sind. Beides lässt Bestandsrückgänge oder Ausdünnungseffekte bei den heimischen Brutvögeln befürchten. Direkt am Wasser lebende Vögel sind wahrscheinlich durch Gewässerveränderungen infolge Austrocknung bedroht (ÖBf o.J.: 4).

Der Klimawandel macht sich weiters auch in der verringerten Eisbedeckung der Alpenseen bemerkbar. Die Seen des (Schweizer) Mittellandes sind seit den 1940er Jahren signifikant weniger zugefroren als zuvor (Bundesamt für Umwelt 2007: 45). Aber auch in Österreich gibt es einige Beispiele dieser Art: Für den Salzburger Zeller See ist bekannt, dass die Seeoberfläche 1994/95, 2000/01 und 2006/07 keine geschlossene Eisdecke aufwies. Dies war in den 100 Jahren davor niemals der Fall. Ähnliche Trends lassen sich für andere Seen im Ostalpenraum annehmen (Klimabündnis.at 2011).

Beim Schwarzsee im Tiroler Sölden, einem extremen Hochgebirgssee (2.800 Meter) gab es während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts durchaus Hochsommermonate an denen der See nur unvollständig auftaute. Dies ist heute nicht mehr der Fall. Der See ist im Sommer eisfrei. Der Ionengehalt des Wassers hat sich durch eine temperaturbedingte Steigerung der Zersetzungsprozesse im Einzugsgebiet in den letzten Jahren verdoppelt (Hofer 2009: 86). In Hochgebirgsseen wurde darüber hinaus beobachtet, dass sich das Auftreten von pflanzenfressendem Plankton während des Frühsommers, welches das Algenwachstum unterdrückt, in den letzten Jahrzehnten um etwa zwei Wochen vorverschoben hat (ÖBf o.J.: 6 nach Psenner 2002).

Tabelle 5: Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und biologische Vielfalt im Berggebiet (Zusammenfassung)

Bereich	Auswirkungen
Gletscher, Permafrost	Fortgesetzte Gletscherschmelze: Längenverluste der Gletscherzungen, negative Massenbilanz, kleine und mittlere Gletscher tauen bis 2100 ab, große Talgletscher (Pasterze, Gepatschferner etc.) stark reduziert, beschleunigtes Auftauen des hochalpinen Permafrosts: Verlust der Bodenfestigkeit an steilen Hängen – Gefahr von Berg- und Felsstürzen
Phänologie, Anpassung Tier- und Pflanzenwelt	Verschiebung der Klima- und Vegetationszonen (nord- und gipfelwärts) + Jahreszeiten, verlängerte Wachstums- und Vegetationsperiode, Höhenlagen-Hochtäler: effektiv durch Schneebedeckung herabgesetzt, Verkürzung winterliche Wachstumsunterbrechung; Tierwelt: Vorverlegung von Schlupfterminen, Hauptaktivitätszeiten, Wanderverhalten, Arealausweitungen, vor allem im Frühjahr, verändertes Nahrungsangebot
Arten- und Pflanzenzusammensetzung	Verschiebung von Verbreitungsarealen, Artenspektrum (Tiere, Pflanzen) Gefährdung des ökologischen Gleichgewichts, Arealverluste für anspruchsvollere, kleinräumig (oder isoliert) verbreitete und weniger mobile Arten, entscheidend: Ausbreitungskapazität bzw. Ausbreitungsbarrieren (der Arten)
Invasive Pflanzen- und Tierarten (Neobiota)	Einschleppung, Etablierung, Ausbreitung wärmeliebender (gebiets-fremder) Pflanzen und Tiere auch ins Berggebiet/alpine Regionen bis 1.200m Seehöhe - vor allem siedlungsnaher Bereiche, Fließgewässer, Ufer und Auwälder, Verdrängung der „heimischen“ Fauna und Flora
Artenvielfalt	Nominell höhere Biodiversität durch Zuwanderung (Neobiota), durch die neuen Arten überwiegend geringe Veränderungen, aber einige wenige haben bedeutende, negative, ökologische Auswirkungen; bedroht sind endemische, alpine Arten, die nur im Ostalpenraum auftreten, Zulassen modifizierter Ökosysteme?
Alpine Pflanzen- und Tiergemeinschaften	Arealverschiebung „gipfelwärts“, Zuwachs der Artenvielfalt/Gipfelfluren/ Bodenbedeckung (anspruchsvolle, montane, subnivale Arten) umgekehrt Nettoflächenverlust bzw. Habitatfragmentation nivaler, subnivaler Arten mit enger ökologischer Amplitude d. s. ökologisch wertvolle, seltene Pflanzen, betroffen vor allem weniger hohe Gipfelflagen
Alpine Feuchtgebiete (Feuchte Wiesen, Moore, Gewässer)	Feuchtgebiete (bes. alpine Hochmoore weil regengespeist) infolge Hitzeperioden, Trockenheit hochvulnerabel (Amphibien!), Moore sekundär CO ₂ -Quelle: Zersetzungsprozess z.B. von Torf setzt Kohlenstoff (und Methan) frei; Erwärmung von Flüssen, (Hochgebirgs-)Seen (weniger Eisbedeckung, geringere Durchmischung + Sauerstoffgehalt durch oberflächliche, warme Sperrschicht) niedrigere Wasserstände, Veränderung der begleitenden Fauna und Flora, Verkleinerung der Lebensräume für Kaltwasserfische, Fauna + Flora: Abwanderung in höhere Lagen bzw. Quellnähe (Fische)

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

10. Anpassungsmaßnahmen für den Bereich Ökosysteme, Naturhaushalt und biologische Vielfalt

Der Klimawandel und seine Ausprägungen, Verschiebung der Klima- und Vegetationszonen (im Berggebiet auch vertikal) wirken direkt auf die Ökosysteme, den Naturhaushalt und die Artenvielfalt oder präziser auf die physikalischen und biologischen Komponenten der Ökosysteme – Wasser, Boden, Luft und Artenvielfalt. Durch diese direkte Wirkungsweise sind Interventions- und Anpassungsmaßnahmen im Vergleich zu sektoralen Wirtschaftsbereichen ungleich komplexer. Dabei sind die vom Ökosystem bereit gestellten Ressourcen (Wasser, Boden, Luft), im alpinen Raum tritt noch die Abwehr von Naturgefahren hinzu, für das menschliche Wohlergehen unerlässlich, effizienter und auch volkswirtschaftlich billiger als technische Lösungen.

Grundsätzlich sind intakte Ökosysteme gegenüber dem Klimawandel unempfindlicher. Gleichzeitig sind sie auch besser in der Lage Basisleistungen (Nährstoffkreislauf, Bodenbildung etc.) und darauf aufbauende, für den Menschen unverzichtbare Ökosystemleistungen (Nahrungsmittelsicherheit, Erosions-, Hochwasserschutz etc.) aufrecht zu erhalten. Dem steht jedoch gegenüber, dass schon unter den gegenwärtigen Bedingungen unseres Wirtschaftssystems Ressourcen über die Maßen ausgebeutet werden (Verschmutzung und Übernutzung) und ein dramatischer Artenschwund in der Tier- und Pflanzenwelt stattfindet. Neben direkten menschlichen Auswirkungen wie der Umwandlung natürlicher Ökosysteme durch eine immer intensiver werdende Landwirtschaft, der Zersiedelung durch Gewerbe, Tourismus, dem ausufernden Verkehrsnetz und der Verbauung für Wohnzwecke verschärft der Klimawandel diese Problematik weiter.

Die Zielsetzung aller Anpassungsmaßnahmen muss es sein, nicht klimawandelbedingte „konventionelle“ Gefährdungsfaktoren auf Arten und Lebensräume zu beschränken. Anpassungs- bzw. Pufferkapazitäten von Arten und Lebensräumen können dadurch wesentlich gestärkt werden. Der Erhalt ausreichend großer Populationen der heimischen Arten, der Erhalt der genetischen Vielfalt und die Intaktheit der Lebensräume (extensiv bewirtschaftete Flächen, Feuchtgebiete etc.) sind sicher zu stellen. Der Barriere-Wirkung von Verkehrswegen, Fließgewässerverbauungen, sowie Flächen mit intensiver land- und forstwirtschaftliche Nutzung ist mittels Korridoren entgegenzuwirken.

Mittels Biotopverbundkonzepten ist bei der ökologischen Vernetzung und Vergrößerung von Habitaten anzusetzen. Die Erreichbarkeit der verschiedenen Gebiete (Nahrungsaufnahme, Fortpflanzung etc.) zu verbessern hat entscheidenden Einfluss auf das Überleben von Populationen und Arten. Projekte zum gezielten Artenschutz für besonders bedrohte Arten, Lebensraumpflege und Lebensraumwiederherstellung bis hin zur gezielten Populationsstützung sind umzusetzen.

- ◆ Unter Klimawandelperspektive ist der Erhalt von Ökosystemfunktionen (Basisleistungen, Regulierungsfunktionen wie zum Beispiel Hochwasserschutz) von zentraler Bedeutung;
- ◆ Für gefährdete Arten bleibt letztlich nur die Unterstützung der Migration durch Translokation. Dabei ist die Rolle der Bergregionen als Rückzugsgebiete für an kühlere Bedingungen angepasste Arten zentral;
- ◆ Dem Erhalt und der Förderung der genetischen Vielfalt ist großes Augenmerk zu widmen, da sie Voraussetzung für die Anpassungsfähigkeit von Pflanzen und Tieren an veränderte Lebensraumbedingungen (Habitate), Umwelteinflüsse und Krankheiten darstellen. Der Klimawandel

verändert diese Faktoren nachhaltig. Anpassungsmaßnahmen zur Förderung der genetischen Diversität sind zu setzen;

- ◆ Die Prävention und Früherkennung von Neobiota (invasive Pflanzen- und Tierarten) ist zu forcieren, da die Bekämpfungsmöglichkeiten eher limitiert sind;
- ◆ Die Erhaltung und Wiederherstellung von Feuchtlebensräumen ist als Klimaanpassungsmaßnahme essenziell: Dazu sind entwässerte Feuchtgebiete gezielt wieder zu vernässen, weitere Drainagierungen nicht mehr vorzunehmen;
- ◆ Dem Anstieg der Gewässertemperaturen, vor allem dem damit verbundenen Sauerstoffgehalt kann durch verschiedene Maßnahmen begegnet werden: Dies besteht beispielsweise durch die Anpflanzung schattenspendender Gehölze, der Verringerung der Einleitung wärmender Abwässer, und zeitweilig der Erhöhung der Restwassermenge bei Hitzeperioden;
- ◆ Durch den Klimawandel wird der Wasserbedarf weiter ansteigen. Deswegen sind Maßnahmen zur Schonung der Grundwasserkörper, der Neubildung von Grundwasser und der Verbesserung des Wasserrückhaltes zu setzen;
- ◆ Aus der Nutzung genommen Flächen sind Naturschutzzwecken zu widmen, und dienen z.B. auch als Retentionsräume (Hochwasserschutz);
- ◆ Intensivtourismus bzw. das Freizeit- und Urlaubsverhalten verursachen Störungen und Schädigungen an Umwelt und Naturhaushalt. Durch die Klimaerwärmung wird sich diese Zone weiter in die Höhe verlagern. Negative Beeinträchtigungen der Biodiversität (Schutzgebiete) sind hintanzuhalten;
- ◆ Die Landnutzung hat einen erheblichen Einfluss auf den Kohlenstoffgehalt der Böden. Die meisten Böden speichern Kohlenstoff (v.a. Torfböden). Grünland- und Wälder sind Kohlenstoffsenken, während Ackerland als Nettoemittent wirkt. Unter dem Klimaschutzgedanken ist die Freisetzung von Bodenkohlenstoff (v.a. in Humus-Verbindungen, als Streuauflage, in Feuchtgebieten als Torf) hintanzuhalten. Ansatzpunkt ist die augenblickliche Landnutzung. Die Mobilisierung der Senkenfunktion von kohlenstoffreichen Ökosystemen (insbesondere Moore, Feuchtgebiete, alte Wälder) ist anzustreben;

(AustroClim 2010a: 45ff, Beierkuhnlein/Foken 2008: 370-373, Bundesamt für Naturschutz 2008, CIPRA International 2010a)

Anpassungsmaßnahmen können nach ihrem Ansatzpunkt (mehr reaktiv oder präventiv) in drei verschiedene Vorgehensweisen differenziert werden (nach VISUMtourism o.J):

Symptombekämpfung

Darunter sind Maßnahmen zu verstehen die notwendig sind um kontraproduktive Auswirkungen des Klimawandels zu kompensieren. Diese können spontan oder auch geplant sein. Geplante Maßnahmen dieser Art werden situativ gesetzt und wirken punktuell. Im Bereich Ökosysteme, Naturhaushalt und biologische Vielfalt zählen dazu beispielsweise die Unterstützung der Migration von Arten mittels Translokation oder die punktuelle Bekämpfung von invasiven Pflanzen (Neobiota).

Anpassungsstrategien

Anpassungsstrategien dienen der Vorwegnahme (Antizipation) des Klimawandels. Der Umgang mit Unsicherheiten muss auch darauf abstellen, dass Klimarisiken innerhalb eines Gebiets oder auch des jeweiligen Sektors etc. so gut wie möglich verteilt werden. Unter Anpassung sind alle Aktivitäten zu verstehen, die gesellschaftliche Akteure auf aktuelle oder zu erwartende klimatische Stimuli oder deren Effekte setzen, um Schäden zu mildern oder um mögliche Chancen zu nützen, die sich aus dem Klimawandel ergeben. Zusammen mit der Symptombekämpfung ist die Anpassungsstrategie eine primär reaktive Politik. Für den Bereich Ökosysteme, Naturhaushalt, Biodiversität sind dies Maßnahmen wie die Stärkung von Anpassungs- und Pufferkapazitäten von Arten und Lebensräumen, die Vernetzung und Vergrößerung von Habitaten oder auch das Zulassen modifizierter Ökosysteme.

Ursachenbekämpfung (Klimaschutzmaßnahmen)

Die möglichst weitgehende Begrenzung der Klimaänderung wird als Vermeidung (engl. „mitigation“) bezeichnet. Diese setzt bei der Begrenzung oder auch Rückführung der Treibhausgasemissionen an. Ein Ansatzpunkt zur Vermeidung des Klimawandels im Bereich der Ökosysteme sind Maßnahmen die die Senkenfunktion kohlenstoffreicher Ökosysteme (Feuchtgebiete, Moore etc.) forcieren.

Abbildung 22: Beispiele für Anpassungsmaßnahmen im Bereich Ökosysteme, Naturhaushalt, Biodiversität



Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 6: Anpassungsmaßnahmen Ökosysteme, Naturhaushalt, biologische Vielfalt

Bereich	Symptombekämpfung	Anpassungs(strategie)	Ursachenbekämpfung/ Klimaschutz
Gletscher, Permafrost	Schutzmaßnahmen bei Gletscherseeausbruch, Permafrost: Maßnahmen zur Sicherung der Bausubstanz	Beschränkung konventioneller Gefährdungsfaktoren, Nutzungsansprüche (Tourismus, Energie etc.) zurückstellen	-
Phänologie, Anpassung Tier- und Pflanzenwelt	Unterstützung der Migration durch Translokation	Beschränkung konventioneller Gefährdungsfaktoren auf Arten und Lebensräume, Stärkung von Anpassungs- und Pufferkapazitäten von Arten und Lebensräumen, Vernetzung und Vergrößerung von Habitaten (Biotopverbundkonzepte)	-
Arten –und Pflanzenzusammensetzung	Unterstützung der Migration durch Translokation	Zulassen modifizierter Ökosysteme (mit veränderter Artenzusammensetzung?)	-
Invasive Pflanzen (Neobiota)	Punktuelle Bekämpfung	Prävention und Früherkennung	-
Alpine Pflanzengemeinschaften	Unterstützung der Migration durch Translokation in höhere Täler oder flußaufwärts	Zulassen modifizierter Ökosysteme (mit veränderter Artenzusammensetzung?)	-
Alpine Feuchtbiotope (Hoch- und Flachmoore)	Rückbau der Drainagierungen bzw. Wiedervernässung von Feuchtgebieten	Beschränkung konventioneller Gefährdungsfaktoren auf Arten und Lebensräume	Mobilisierung der Senkenfunktion von kohlenstoffreichen Ökosystemen (Torfböden)
Gewässer (Seen, Flüsse) bzw. Begleitflächen, aquatische Ökosysteme	Retentionsräume als Hochwasserschutz; Anpflanzung schattenspendender Gehölze, Verringerung der Einleitung wärmender Abwässer, Erhöhung der Restwassermenge bei Hitzeperioden	Beschränkung konventioneller Gefährdungsfaktoren auf Arten und Lebensräume, Verbesserung des Wasserrückhaltes und Schonung der Grundwässer	Mobilisierung der Senkenfunktion von kohlenstoffreichen Ökosystemen (Feuchtgebiete)

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

Sektoranalyse Forstwirtschaft

1. Kurzcharakteristik des österreichischen Waldes im Berggebiet

Unterhalb der je nach geographischer Lage in Höhen von rund 1.500 bis 2.300 m Seehöhe liegenden ursprünglichen Waldgrenze im Gebirge ist die natürliche Vegetationsdecke der Wald. Während die vom Menschen geprägte Kulturlandschaft (Grünland, Äcker etc.) „offengehalten“ und „gepflegt“ werden muss, nutzt die Forstwirtschaft eine Vegetationsform, die in den gemäßigten Breiten ihre natürliche Verbreitung hat. Diese besteht nicht nur aus Bäumen und Gehölzen aller Art. Sie ist vielmehr ein komplexes Ökosystem aus Boden, Luft, Wasser, Fauna und Flora.

Tabelle 1: Höhenstufen der Ostalpen

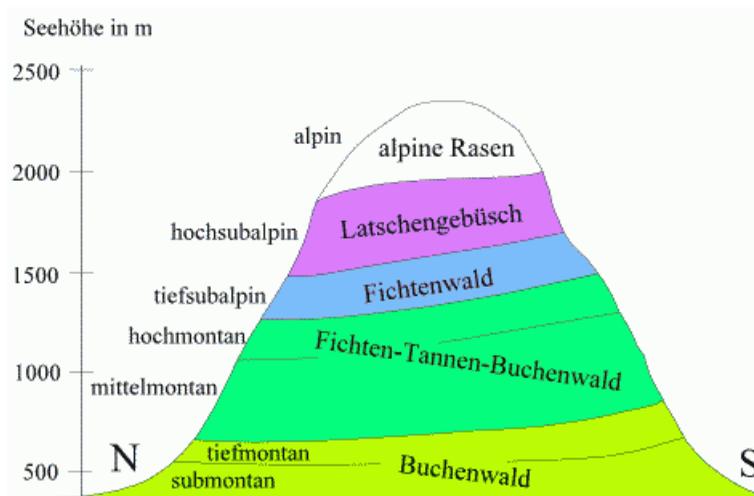
Höhenstufe	Höhenlage in Meter	Beschreibung
Nival	> 3.000	Gletscher, schneebedeckt
Alpin (Hochgebirge)	2.000-3.000	Grenze d. geschlossenen Vegetation, waldfrei, alpine Matten und Rasen
Subalpin	1.500-2.500	Untergrenze: Rotbuchen, Tanne, Bergahorn – Fichte, Lärche, Kiefer, Zirbe, Zwergformen, darüber Waldgrenze, Hochalmregion
Hochmontan	1.300-1.850	Nadel(Fichten)wälder, Obergrenze des Laubwalds, Mittelalmen und Bergmähder
Tief- und mittelmontan	800-1.400	Fichtenmischwälder (Fichten, Buchen, Weiß-Tanne, Bergahorn, Kiefern, Lärchen)
Submontan	700-1.000	Submontane Fichten- und Buchenwälder, Obergrenze des Obstbaus an günstigen Standorten

Quelle: nach Wikipedia

[http://wikipedia.org/wiki/höhenstufe-\(Ökologie\)](http://wikipedia.org/wiki/höhenstufe-(Ökologie))

Den Aufbau der typischen Waldgesellschaften am Nordrand der Ostalpen (Flyschzone, Nördliche Kalkalpen) illustriert die folgende Graphik:

Abbildung 1: Höhenstufenschema der Vegetation am Beispiel der Nördlichen Randalpen



Quelle: waldwissen.net

http://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/standort/bfw_wuchsgebiete/index_DE

Das Vorkommen von bestimmten Waldpflanzen sowie auch die Produktionskraft des Waldes werden von Klima, Boden und Lage bestimmt. Im Ostalpenraum gibt es aufgrund seiner geographischen Lage und seines Reliefs eine große Anzahl verschiedener Standorte, die ganz unterschiedliche Waldgesellschaften umfassen.

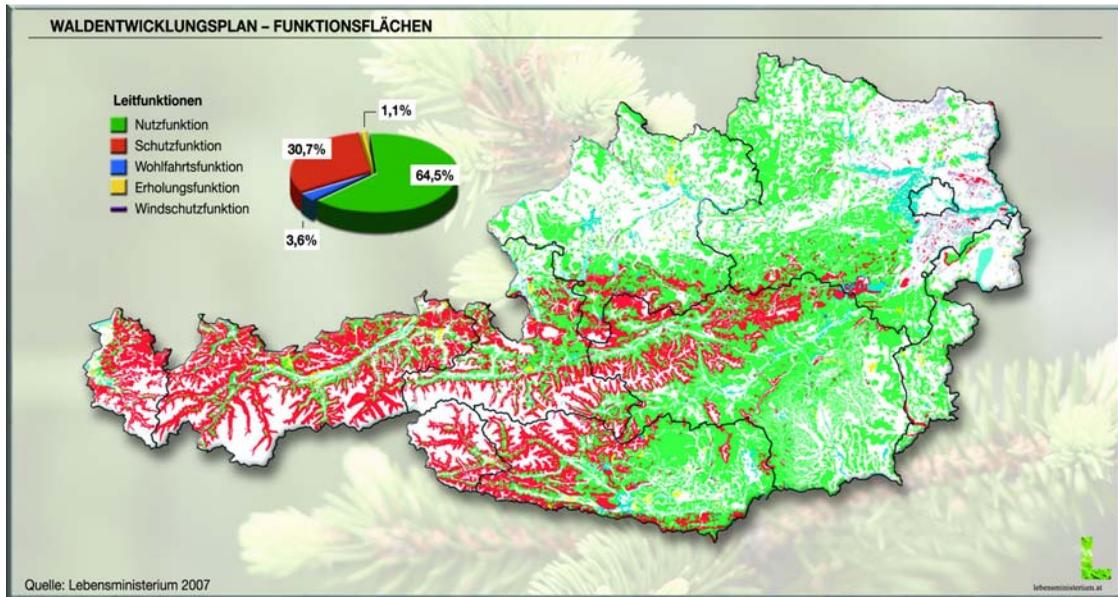
Für das Berggebiet sind vor allem Fichten-Tannen-Buchen-Mischwälder sowie reine Fichtenwälder bestandsbildend. Der österreichische Wald ist aufgrund der jahrtausendlangen Nutzung durch den Menschen längst kein Urwald mehr, sondern ein Kulturwald, das Ergebnis dieser Nutzung. Insbesondere durch die seit Mitte des 19. Jahrhunderts in Verbindung mit der Kahlschlagwirtschaft in großem Maßstab betriebenen *künstliche* Verjüngung (hauptsächlich Pflanzung) von Beständen, bei der oft aus kurzfristigen ökonomischen Überlegungen vor allem der Anteil der Fichte in weiten Gebieten über das ökologisch zulässige Ausmaß erhöht worden ist. Umgekehrt wurde das Areal der natürlichen Laub(misch)wälder und Nadel-Laub-Mischwälder stark verkleinert. Gleichzeitig wurden Bestände geschaffen, die hauptsächlich aus gleichaltrigen Bäumen bestehen. Als Folge dieser einseitigen, plantagenartigen Bewirtschaftung ist die ökologische Stabilität vor allem der standortwidrigen, labilen und bodenverschlechternden Fichtenreinbeständen mangelhaft (BMLFUW 2008a: 40ff, Kastner 1988: 265).

1.1 Entwicklung der Waldfläche

Österreich ist eines der am dichtesten bewaldeten Länder Mitteleuropas und der EU. Dabei ist der Wald ein prägendes Element der österreichischen Landschaft. Die Waldfläche hierzulande beträgt 3,99 Mio. ha, das sind 47,6 Prozent der gesamten Staatsfläche. Das entspricht einer Anzahl von rund 3,3 Mrd. Bäumen (Waldinventur 2007/09). Dabei kann seit den 1960er Jahren (dem Zeitpunkt der ersten Waldinventur) eine stetige Zunahme der Waldfläche (und des stehenden Holzes) verzeichnet werden – insgesamt um 300.000 ha. Das Ausmaß der Gesamtwaldzunahme seit damals übersteigt somit die Fläche des Bundeslandes Vorarlberg. Seit Anfang der 1990er Jahre hat sich die Waldflächenzunahme verlangsamt. Auch bei der Altersstruktur und/oder Durchmesserverteilung sind Zuwächse zu verzeichnen. Neben Struktureffekten (der Aufforstung landwirtschaftlicher Grenzertragsböden) dürften die Zuwächse der vergangenen Jahrzehnte auch auf günstigere Witterungsbedingungen („Klimasignal“) zurückzuführen sein. Aber auch die Veränderungen des CO₂-Gehaltes der Luft sowie Stickstoffeinträge („Düngeeffekt“) dürften daran beteiligt gewesen sein (BMLFUW 2008a: 13f, BMLFUW 2011b: 145).

Nach dem Waldentwicklungsplan wird der österreichische Wald nach seinen (überwiegenden) Funktionsflächen klassifiziert (vgl. Forstgesetz 1975). Abbildung 2 verdeutlicht dies: Im Berggebiet, vor allem in der West- und Südwesthälfte überwiegt die Schutzfunktion. In der Osthälfte des Berggebietes hingegen ist die Nutzfunktion des Waldes dominant. Von lokal sehr großer Bedeutung ist die Erholungs- und Wohlfahrtsfunktion – Gebiete mit dieser Funktion finden sich im gesamten Berggebiet.

**Abbildung 2: Waldentwicklungsplan – Funktionsflächen
(Schutzwald-Waldentwicklungsplan)**

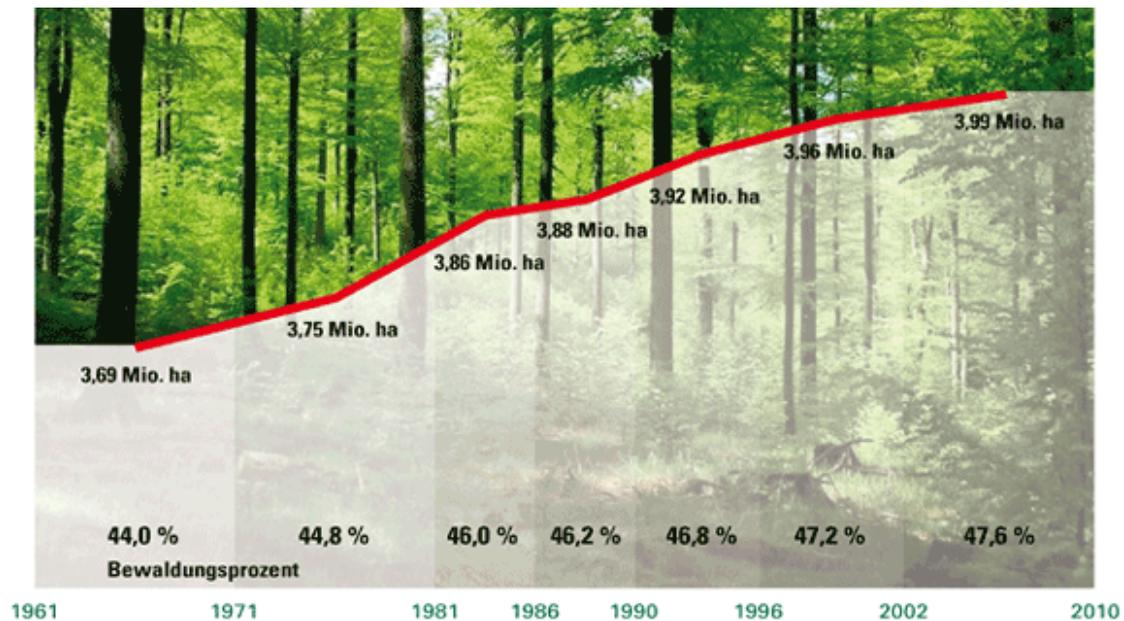


Quelle: BMLFUW, Waldbericht

Die Waldanteile der einzelnen Regionen Österreichs sind sehr unterschiedlich. Die höchsten Waldanteile weisen das Voralpengebiet und der Alpenostrand auf. Aber auch das Hochalpengebiet liegt über dem österreichischen Durchschnitt. Je günstiger die Lagen für die landwirtschaftliche Produktion sind, desto geringer sind die Waldanteile dieser Gebiete. Hinsichtlich des Berggebietes ist relevant, dass auch die Hochlagen eine relativ geringe Waldausstattung aufweisen. Dies ist hauptsächlich die Folge der intensiven Rodungen im ausklingenden Mittelalter bzw. am Beginn der Neuzeit zur Gewinnung von zusätzlichen Almweideflächen. Die Waldgrenze in den Alpen wurde dadurch häufig stark herabgedrückt und der für diese Region lebenswichtige Schutzwaldgürtel schmaler gemacht. Zu den historischen Rodungen kamen in diesem Waldgürtel in den letzten Jahrzehnten noch Rodungen für Schipisten und Aufstiegshilfen (Seilbahnen, Schilifte etc.).

Die Waldflächenzunahme seit Anfang der 1990er Jahre findet zu fast 90% im bewirtschafteten Hochwald statt und teilt sich annähernd gleichmäßig auf Wirtschaftswaldflächen sowie den bewirtschafteten Schutzwald auf. Auch bei den unbewirtschafteten Schutzwaldflächen außer Ertrag ist in den letzten Jahren ein (wenn auch geringerer) Zuwachs an Waldfläche festzustellen. Die Zunahme der Bewaldung verteilt sich auf die einzelnen Höhenstufen unterschiedlich: Die größten Zuwächse wurden zwischen 500 und 1.000m Seehöhe festgestellt. Setzt man dazu jedoch den Anteil an der Gesamtwaldfläche in der jeweiligen Seehöhe in Relation, ist ein überproportionaler Zuwachs gerade in den geringer bewaldeten Höhen bis 500m und über 1.500m Seehöhe (im Berggebiet) zu verzeichnen (Waldwissen.net 2011a).

Abbildung 3: Waldflächenzunahme (ÖWI 2007/09)



Quelle: BFW, Waldinventur 2007/09

Die Ergebnisse können dahingehend interpretiert werden, dass sich die Bewaldung langsam in die höheren Regionen entlang der Waldgrenze (und sekundär auch in den tieferen Lagen) ausbreitet. In diesen Regionen breitet sich der Wald vor allem durch das natürliche Zuwachsen von nicht mehr bewirtschafteten Alm- und Weideflächen aus. Insgesamt sind die größten Zuwächse nicht nur in den höheren Almregionen, sondern verstärkt auch in strukturschwächeren Regionen festzustellen. Durch Umstieg auf landwirtschaftlichen Nebenerwerb, das Aufgeben der Grenzertragsflächen sowie durch Abwanderung und Grundstücksverkäufe sinkt das Interesse an einer intensiven landwirtschaftlichen Nutzung dieser Flächen (BMLFUW 2011b: 145).

Unter dem Vorzeichen des Klimawandels sind diese Entwicklungen nicht uneingeschränkt positiv zu bewerten. Einerseits besteht ein Interesse an einer Neubewaldung von Hochlagen mit einer bestehenden geringen Waldausstattung. Andererseits kann die Aufgabe der Almbewirtschaftung, das „Zuwachsen“ des Grünlandes der Almen und Bergmäher durchaus auch nicht erwünschte Folgen für die ökologische und kleinklimatische Stabilität haben.

1.2 Waldgesellschaften, Baumartenzusammensetzung

In Österreich bzw. den Ostalpen gibt es aufgrund seiner geographischen Lage und seines Reliefs eine große Anzahl verschiedener Standorte, die ganz unterschiedliche Waldgesellschaften umfassen. Für das Berggebiet sind folgende Waldgesellschaften charakteristisch:

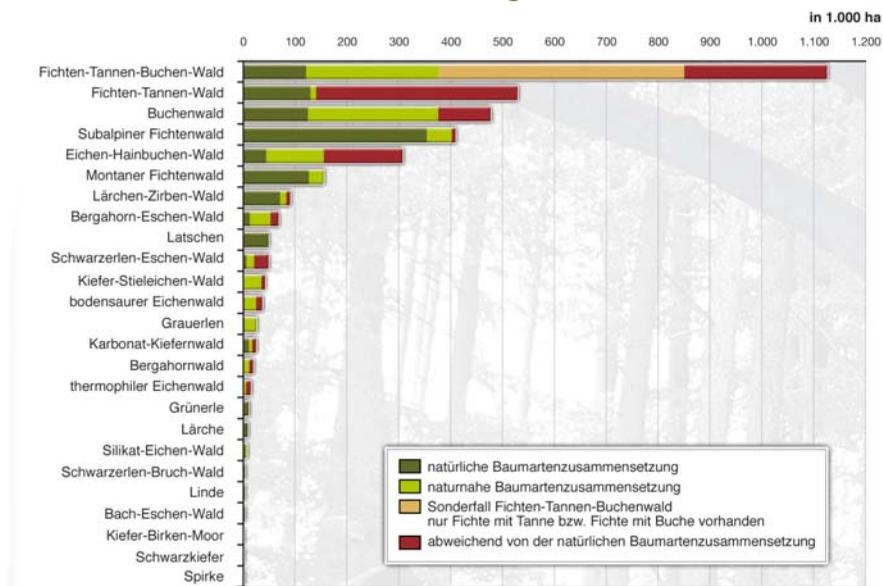
Tabelle 2: Waldgesellschaften im Berggebiet

Region	Waldgesellschaft	Baumarten
Mühl- und Waldviertel, nördliche- und südliche Randalpen	Fichten-Tannen-Buchen-Mischwälder	Fichte, Tanne, Buche, Weißkiefer, Lärche, Esche, Bergahorn
Nördliches Alpenvorland	Buchemischwälder	Buche, Tanne, Fichte, Weißkiefer, Eiche, Hainbuche, Esche
Innen- und Zwischenalpenraum	Fichten-Tannen-Mischwälder	Fichte, Tanne, Lärche, Kiefer, Zirbe, Buche, Bergahorn
Zentralalpenraum	Fichtenwälder	Fichte
Waldgrenze		Lärchen, Zirben, Bergkiefern, Latschen, Grünerlen, Bergahorn

Quelle: Kastner 1988, BMLFUW 2008a: 41

Die Baumartenverteilung zeigt ebenfalls die Dominanz der Nadelgehölzer und besonders jene der Fichte exemplarisch auf.

Abbildung 4: Die natürlichen Waldgesellschaften und die Natürlichkeit der aktuellen Baumartenzusammensetzung in 1.000 ha

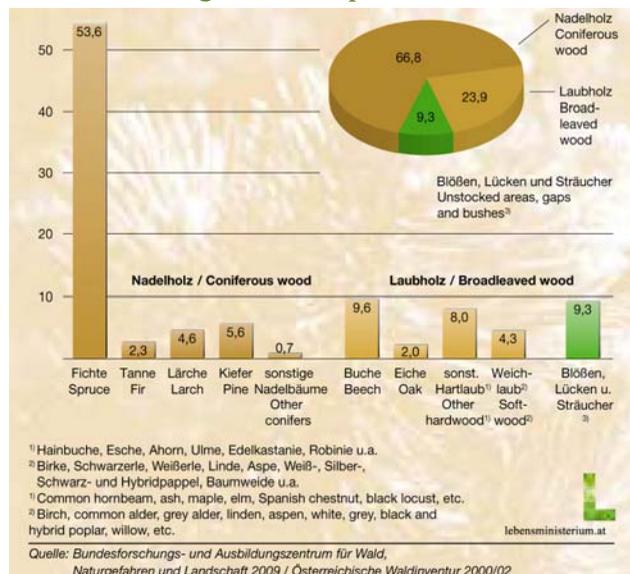


Quelle: BFW 2008

Quelle: BFW 2008

Österreichs Wälder sind aus den bereits erörterten Gründen von einem hohen Nadelholzanteil geprägt. In den letzten Jahren besteht jedoch ein Trend zur Etablierung von laubholzreichen Mischbeständen bei gleichzeitigem Rückgang von Fichtenreinbeständen (BMLFUW 2011b: 145). Dieser Umbau der Waldbestände ist aus ökologischen Gründen, aus Gründen der Bestandessicherheit und nicht zuletzt auch im Zeichen des Klimawandels dringlich. Aufgrund der langen Umtriebszeiten (zumindest 80-100 Jahre) wird eine Änderung der Waldzusammensetzung erst langfristig wirksam. Trotz der steigenden Anteile von Laubholz- und Mischbeständen bei gleichzeitigem Rückgang der Fichtenreinbestände besteht nach wie vor eine erhebliche Abweichung der tatsächlichen Bestandesformen von den ökologisch standortgerechten (siehe dazu Abbildung 4). Diese Abweichungen von der natürlichen Baumartenzusammensetzung und vor allem die hohen Fichtenreinbestände sind vor allem auf ihre hohe Zuwachs- und Wertleistung zurück zu führen. Überhöhte Wildbestände bzw. der selektive Verbiss von Tanne und Laubhölzern, frühere Bewirtschaftungsformen sowie Waldschäden trugen ebenfalls zu Änderungen in der Baumartenzusammensetzung bei.

Abbildung 5: Baumartenverteilung in Flächenprozenten



Quelle: BFW, Waldinventur 2007/09

Im Zeichen des Klimawandels sind vor allem jene Bestände problematisch, die nicht standortgerecht sind. Das sind vor allem sekundäre Fichtenwälder in Tieflagen der tief- und submontanen Höhenstufe (zumeist außerhalb des Berggebietes). Eine außerhalb des natürlichen Fichtenwaldes liegende künstlich begründete artenarme Fichten-Monokultur ist labiler als ein standortgemäßer artenreicher Mischwald. Deshalb besteht die Herausforderung darin, diese nicht standortgemäßen Wälder weiter umzubauen. Die subalpinen Fichtenbestände (zwischen 1.500 und 2.500m Seehöhe) dürften hingegen *stabiler* sein und auch mit den Auswirkungen des Klimawandels *nicht* an ihre Verbreitungsgebiete stoßen.

Die Baumartenzusammensetzung im Kulturwald wandelt sich sukzessive. Auch bedingt durch zufällig eingeschleppte oder auch bewusst kultivierte Baumarten. Dies kann beispielsweise an gebietsfremden

Pflanzen (und Tier-)arten („invasive Neophyten“¹) beobachtet werden, die schrittweise auch im Alpenraum Fuß fassen. Durch Globalisierung und Umweltwandel haben sich die Anzahl und die Dynamik einwandernder, verschleppter oder vom Menschen bewusst eingeführter Arten jedoch deutlich erhöht. Noch ist das Berggebiet im Vergleich zur submontanen Höhenstufe davon nicht betroffen, weil die Artenanzahl der Neophyten mit zunehmender Seehöhe und rauherem Klima abnimmt. Tatsächlich handelt es sich dabei um teilweise natürliche Sukzessionsprozesse, die vom Klimawandel begleitet oder überlagert werden. Wegen der Klimaerwärmung wird die Bedeutung invasiver Neophyten aber auch in den Gebirgswäldern zunehmen (UBA 2010b: 376).

1.3 Waldschäden

Die Bäume haben im Laufe der Evolution zwar die Fähigkeit erworben, die speziellen natürlichen Belastungen (Witterungsextreme, Schädlinge, karge Böden etc.) standzuhalten, für die vom Menschen verursachten zusätzlichen Belastungen – vor allem für die durch Luftverschmutzung verursachten – ist ihre genetisch programmierte Widerstandsfähigkeit nicht ausreichend. Die Folge ist eine Instabilität des Ökosystems Wald. Dieses „Umkippen“ erfolgt umso früher, je labiler die Bestände und je extremer die Standortverhältnisse sind. Die meist auf Extremstandorten stockenden Schutzwälder sind dabei besonders gefährdet.

1.3.1 Luftverunreinigungen (Immissionen)

Der Wald stellt eine bedeutende Senke für Schadstoffe dar. Die Verursacher sind industrielle Punkt-emittenten, Verkehr, Hausbrand und die Landwirtschaft hierzulande und über Ferntransporte darüber hinaus. In Österreich belasten vor allem die Luftschadstoffe Ozon, Stickstoffoxide, Schwefeldioxid, Stickstoff- bzw. Säure- und Schwefeleinträge sowie lokal Fluorwasserstoff, Ammoniak und Schwermetalleinträge den Wald direkt. Geringer und vorwiegend indirekter Natur sind die Einwirkungen von Lachgas sowie flüchtigen organischen Komponenten (BMLFUW 2008a: 19).

Der höhere Eintrag von Schadstoffen in den Wald im Vergleich zu Nichtwaldflächen ist verursacht durch die höhere Schadstofffilterung aufgrund der größeren Blattoberfläche im Vergleich zur Kronenüberschirmungsfläche, der Oberflächenrauigkeit des Kronendaches und der Schadstoff speichernden Eigenschaften der Blätter und Nadeln (Streufall und Anreicherung). Eine besondere Senke für akkumulierende Schwermetalle (z.B. Blei, Cadmium) und organische Schadstoffe, die über die Atmosphäre eingetragen werden, ist der Waldboden (BMLFUW 2006a: 37, BMLFUW 2008a: 19, Kastner 1988: 271f).

Dabei sind die Schäden, verursacht durch Ozon sowie von NO_x , aktuell am kritischsten, während bei den SO_2 -Konzentrationen (bedingt durch Emissionsreduktionen in Industrie- und Gewerbe) seit den 1980er Jahren Abnahmen zu verzeichnen sind. Beim Ozon kommt hinzu, dass dessen Konzentration mit der Seehöhe markant zunimmt – Wälder an der Waldgrenze somit den höchsten Konzentrationen ausgesetzt sind. Als Vorläufer-Substanz werden auch die NO_x -Grenzwerte großräumig überschritten.

1. Dazu zählen beispielsweise Douglasie, Robinie und Götterbaum.

Wesentliche sichtbare Symptome für einen schlechten Gesundheitszustand des Waldes, ohne aber etwas über dessen Ursache aussagen zu können, sind insbesondere Nadel- und Blattverluste (Kronenverlichtungen), Nadel- und Blattverfärbungen sowie Kronenstrukturveränderungen. Diese Symptome wurden periodisch und österreichweit bei der Waldzustandsinventur (zuletzt 2007/09) erhoben.² Beispielsweise hatte sich der Kronenzustand bzw. der als geschädigt klassifizierte Anteil der Bäume seit Beginn der 2000er Jahre verschlechtert. Und es ist bekannt, dass sichtbare Symptome erst dann auftreten, wenn die Schädigung der Bäume bereits weit fortgeschritten ist. Bemerkenswert ist auch dass ein Zusammenhang zwischen Immissionseinträgen und der Qualität der Samen besteht. So konnte festgestellt werden, dass die Anzahl der keimfähigen Samen in Schadeintragsgebieten sinkt und damit die Verjüngungsfähigkeit des Waldes stark beeinträchtigt ist (BMLFUW 2006a: 37, BMLFUW 2008a: 19, Kastner 1988: 271f).

1.3.2 Verbisschäden

Wild, vor allem das Schalenwild (Rot-, Reh- und Gamswild), kann durch Verbeißen von Keimlingen, Leit- und Seitentrieben, durch Rindenschälung, aber auch durch Schlagen und Fegen an jüngeren Bäumen schwerwiegende Schäden im Wald verursachen. Durch die Schälwunden dringen Pilze in die Bäume ein und zersetzen, ausgehend von den Infektionsstellen, das Holz. Verbisschäden verhindern in letzter Konsequenz die Verjüngung des Waldes bzw. führen sie *zumindest* zu einer *Baumartenverarmung*, da wertvolle, für die Bestandesstabilität wichtige Mischbaumarten, wie Tanne, Bergahorn und Buche, besonders stark geschädigt werden. Die Folgen des Verbisses für den Schutzwald sind ein zunehmendes *Ausbleiben* der Verjüngung und damit ein Überaltern und Verlichten vieler Bestände. Gleichzeitig kommt dadurch ein Aufwuchs *nicht* hoch, der naturnäher wäre und den Auswirkungen des Klimawandels besser standhielte.

In Summe führt der Verbiss zu einer Minderung der Schutzwirkung des Waldes. Die im jährlichen Wildschadensbericht des BMFLUW zusammengefassten Meldungen der Bezirksforstinspektionen über Wild- und Weideschäden zeigen seit Jahren eine aus forstlicher Sicht unbefriedigende Situation: Trotz Verbesserungen der jagdgesetzlichen Bestimmungen werden nach wie vor mehr als zwei Drittel aller österreichischen Wälder als durch Verbiss so stark beeinträchtigt eingestuft, dass die Verjüngung mit den waldbaulich erforderlichen Baumarten nicht oder nur mit Hilfe von Schutzmaßnahmen möglich ist. Die wesentlichen Gründe für diese Entwicklung sind die übertriebene Wildfütterung, eine die Überhege fördernde Jagdgesetzgebung der Bundesländer, sowie der Trophäenkult der Jäger. Alle diese Faktoren führen letztlich zu einem Überbestand (Stichwort Wildüberhege). Nicht unerwähnt bleiben darf aber auch die ständige Beunruhigung des Wildes durch die zunehmende Raumnutzung im Berggebiet. Durch die Aktivitäten des Tourismus, des Verkehrsaufkommens und der Siedlungstätigkeit wird der Lebensraum des Wildes laufend verkleinert. Dies äußert sich in stressbedingten Verbisschäden (BMLFUW 2008a: 26f, BMLFUW 2006a: 28ff, Kastner 1988: 273f).

2. Die Kronenzustandserhebungen wurden im Jahr 2007 eingestellt.

1.3.3 Unzureichende Waldbewirtschaftung

Verbiss und Schäden des Waldes durch das Weidevieh selbst sind im Berggebiet neben den Wildschäden häufig anzutreffen. In Österreich sind rund 40.000 landwirtschaftliche Betriebe mit 170.000 Stück Vieh eingeforstet. Der Großteil der Weiderechte betrifft dabei den Besitz der Bundesforste. Die Waldweide kommt gehäuft in den Bundesländern Salzburg und Tirol vor in jenen Bundesländern in denen es viele alte Waldweiderechte gibt. Bedingt durch die Prämienanreize (vgl. Alpungs- und Behirtungsprämie) ist der Viehbestoss in die Hochlagen lukrativ. Schäden des Bann- und Schutzwaldbereiches, die durch Verbiss (des Jungwuchses und der Keimlinge) und Vertritt (dadurch werden die Wurzeln der Bäume verletzt und es treten Infektionen durch Fäulepilze auf) hervorgerufen werden, verhindern die natürliche Verjüngung und führen zur Überalterung und Verlichtung der Bestände. Ein weiteres Problem entsteht durch die Bodenverdichtung (Abnahme des Bodenlebens, Verminderung der Wasserspeicherfähigkeit, Erosion) infolge des steigenden Gewichts der aufgetriebenen Rinder. Zudem verbeißten Schafe, die vermehrt aufgetrieben werden, besonders intensiv die Kulturen (BMLFUW 2006a: 31, Kastner 1988: 274f).

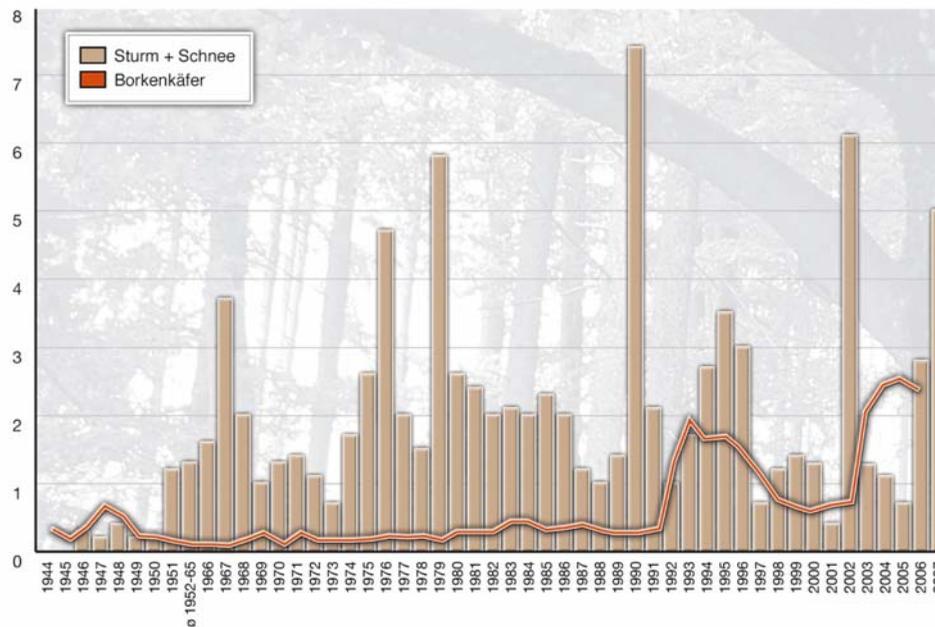
1.3.4 Witterungsextreme (Sturm, Schnee, Frost und Dürre)

Extreme Wetterereignisse als Folge des Klimawandels beeinflussen die Wälder auf vielfache Art und Weise. Dabei haben Witterungsextreme das Potenzial sehr große Waldschäden zu verursachen. Schadereignisse sind zumeist mit Windbruch (Sturm, Schnee, Reifablagerungen), Dürre- und Frostschäden an den Kulturen verbunden. Bislang ist das Schadpotential ausgelöst durch Waldbrände im Alpenraum gering. Auf Abbildung 6 ist zu erkennen, dass die Schadholzmenge ausgelöst durch Sturm- und Schneebruch den letzten Jahrzehnten stark geschwankt ist. Einen Anstieg haben die Jahre 2006 und 2007 gebracht.

In Europa treten in mehrjährigen Abständen immer wieder schwere Sturmtiefs auf (vgl. der legendäre Wintersturm „Kyrill“ im Jänner 2007), die auch in Österreich zu großen Waldschäden führen.³ Dadurch fallen große Mengen an Schadholz an. Es zeigt sich, dass die Waldbestände dabei *unabhängig* von ihrem Grad der Naturnähe, jedoch in Abhängigkeit von der *regionalen Intensität* der Sturmereignisse betroffen sind. Stürme führen entweder zu Windbruch (Baumkronen oder Äste brechen ab) oder zu Windwurf (der ganze Baum wird entwurzelt). Schaden entsteht durch die ungeplante und vorzeitige Nutzung des entsprechenden Baumes, durch die Beschädigung anderer Bäume beim Umstürzen, die Kosten zur Aufarbeitung der Schäden und die Schäden an anderen Bäumen, die bei der Aufarbeitung entstehen. Unterbleibt die Aufarbeitung, steigt im Falle von Nadelholz die Gefahr einer Massenvermehrung rinden- und holzbrütender Insekten (Kupferstecher, Buchdrucker).

3. Die Windwürfe der Jahre 2007 und 2008 haben den Wald stark geschädigt: Während das Ausmaß der Blößen in den letzten Jahrzehnten einem stets rückläufigen Trend folgte, stieg dieser Wert (und auch der der Bestandeslücken) seither stark an (Waldwissen.net 2011a).

Abbildung 6: Schadholzmengen – Zeitreihe



Quelle: Dokumentation der Waldschädigungsfaktoren (DWF), BFW 2008

Quelle: BFW 2008

Heftige Nass-Schneefälle und absetzender Reif kann Schneebruch/-wurf verursachen. Sehr anfällig für Schneebruch (also Astabbrüche) sind nicht standortgerechte Nadelbäume und die Äste begrünter Laubbäume. Schneeschub entsteht in Hanglagen durch die talwärtige Fliebbewegung der Schneedecke, die junge Bäume aus der Vertikalen drückt und Säbelwuchs bedingt, oder Bäumchen überhaupt aus dem Boden aushebelt. Nadelbäume sind dabei aufgrund ihrer immergrünen Natur stärker gefährdet als Laubbäume.

Auch im Verlauf von sommerlichen Unwettern fallen lokal größere Schadholzmengen an. In Zusammenhang mit dem Anfall von Schadholz kann es auch zu Borkenkäfer-Massenvermehrungen kommen, weil das Bruchholz nicht rechtzeitig aus den Wäldern entfernt werden kann. Eine weitere Quelle für Waldschäden sind lange Perioden mit ausbleibenden Niederschlägen. Im Hitzesommer 2003 waren Trockenschäden an nahezu allen Baumarten zu beobachten. Lange Zeit spielten Waldbrände in Österreich eine untergeordnete Rolle. Kleine Waldbrände sind schon jetzt vor allem während des Sommers aufgetreten. Große Waldbrände sind hingegen selten. Der Hitzesommer 2003 und jüngere Ereignisse haben aber gezeigt, dass die Waldbrandgefahr auch im Alpenraum nicht zu unterschätzen ist.

Frost gefährdet die Bäume besonders nach Beginn der Vegetationsperiode: Diese "Spätfröste" zerstören an jungen Bäumen das Zellgewebe von Blättern, bzw. von neugebildeten Nadeln immergrüner Nadelbäume. In weiterer Folge welken die Nadeln und Triebe und sterben ab. Gefährdet sind vor allem tiefgelegene Standorte ohne Abflussmöglichkeiten für Kaltluft. Das Risiko von Frostschäden an Forstkulturen ist vor allem an Hanglagen mit Ausrichtung nach Süden und Südwesten infolge der erhöhten Sonneneinstrahlung hoch: Die Bäume treiben dort früher aus. Unter den besonders durch Spätfrost

gefährdeten Baumarten finden sind unter anderem die Rotbuche und die Weißtanne, die aus diesem Grund in der Regel nur unter Schirm verjüngt werden. Frostschäden treten aber auch während des Winterhalbjahres auf (vgl. den Jahreswechsel 1978/79, bei dem die Temperaturen innerhalb von Stunden um 30 Grad absackten und großflächige Frostschäden hinterließen.) Da jedoch die meisten Baumarten an ihre jeweiligen Standorte angepasst sind, kommt es selten zu Schäden durch Winterfröste. Neophyte Baumarten wie die Douglasie sind sogar noch stärker gefährdet, da sie früher austreiben. Ein weiterer Waldschaden ist die „Frosttroknis“, die Nadelverfärbungen und –verluste im Laufe des Sommers bewirkt. Diese tritt an sonnenreichen Wintertagen bzw. während winterlicher Warmlufteinbrüche auf und wird durch Assimilationsprozesse der Nadeln bei gleichzeitigem Fehlen von flüssigem Wasser, ausgelöst. (BMLFUW 2004a: 28, BMLFUW 2006a: 36, BMLFUW 2008: 22f)

1.3.5 Schadinsekten und –pilze (Käferkalamität)

Zu den biotischen Schäden zählen die Ausfälle durch den Borkenkäfer und anderer Laub- und nadelfressender Insekten sowie weiterer Krankheitserreger. Das Hitzejahr 2003 brachte beispielsweise eine der höchsten Schadholzmengen (1,8 Mio. Efm) in Österreich seit Beginn der Aufzeichnungen vor mehr als 50 Jahren. Seither bewegen sich die biotischen Schäden auf hohem Niveau. Anfällig gegenüber den Befall sind vor allem Fichtenreinbestände. Auffällig ist, dass der Käferbefall nunmehr auch in Lagen über 1.500 m Seehöhe im Berggebiet auftritt. Bei der Bekämpfung stellen die höheren, teilweise schwer erreichbaren Lagen eine zusätzliche Herausforderung dar. Insektenkalamitäten bedingt durch den Anfall von großen Schadholzmengen korrelieren auch mit extremen Wetterereignissen (Stürme, Dürre).

Sonstige Waldschäden treten auch durch nicht sachgemäße Holzernteverfahren auf, (Verletzung der Rinde durch die Rückung, Verdichtung durch schwere Maschinen etc.) sowie durch das weitläufige Netz an Forststraßen. In Schutz- und Bannwäldern treten neben den durch Menschen verursachten auch natürliche Steinschlagschäden auf, weil eine der wesentlichen Aufgaben dieser Wälder auch das Auffangen von abrollendem Geröll aus dem Felsbereich ist (BMLFUW 2006a: 32f, BMLFUW 2008a: 24, Kastner 1988: 275f).

Die Bedeutung der Waldschäden liegt darin, dass sie die Vitalität der Waldökosysteme schwächen und die natürliche Anpassungsfähigkeit negativ beeinflussen. Die Bestände sind dadurch weniger robust gegenüber widrigen Witterungsbedingungen und den Auswirkungen des Klimawandels.

1.4 Besonderheit von Waldökosystemen (im Klimawandel)

Waldökosysteme weisen spezifische Eigenschaften auf, die sie gegenüber den raschen Veränderungen des Klimawandels besonders anfällig machen:

- ◆ *Komplexität des Ökosystems*

Das Ökosystem Wald besteht aus einer Vielzahl von Einzelwesen, die alle von den Umweltbedingungen (z.B. der Witterung, dem Klima) beeinflusst werden, aber auch aufeinander Einfluss haben. Gravierende Änderungen der Rahmenbedingungen haben das Potential, das Gleichgewicht des Ökosystems nachhaltig zu stören. Die stabilen

nacheiszeitlichen Bedingungen der letzten 10.000 Jahren brachten die Herausbildung der spezifischen Waldökosysteme, nachdem sie in den Eiszeiten massiv zurückgedrängt wurden. Beispielsweise erreichte die Buche erst mit einer Verzögerung von etwa 5.000 Jahren den nördlichen Alpenraum nachdem sie ihr submediterranes eiszeitliches Überdauerungsgebiet „verlassen“ hatte. Diese nacheiszeitlich etablierten Wälder sind innerhalb *gewisser* klimatischer Bandbreiten stabil. Werden diese Bandbreiten verlassen ist die Anpassungsfähigkeit gefährdet. Eine rasche natürliche Anpassung der Vegetation, sozusagen Zug um Zug mit den stattfindenden Klimaveränderungen, kann deshalb in der gegebenen Frist von etwa 100 Jahren nicht erwartet werden. Die prognostizierte kurzfristige Klimaerwärmung lässt deshalb weitreichende Auswirkungen auf die Waldökosystem erwarten. Dadurch sind nicht nur Verschiebungen bestehender Pflanzen- und Tiergesellschaften, sondern auch ein Neuaufbau ganzer Gesellschaften zu erwarten und vergangene Klimaänderungen lassen darauf schließen, dass sich die Kernbereiche mit optimalen Lebensbedingungen und damit die potenziellen Verbreitungsgebiete von Arten aber auch die Konkurrenzbeziehungen zwischen den Arten ändern werden.

◆ *Langlebigkeit*

Die Auswirkungen der Klimaänderung sind für das Waldökosystem tiefgreifend. Wälder sind gegenüber anderen Ökosystemen aus verschiedenen Gründen empfindlicher. Dazu zählt vor allem die Langlebigkeit der Bäume. Im Regelfall weisen diese hohe Umtriebszeiten auf. Während die momentanen Klimaprognosen, mehr oder weniger profunde Klimaszenarien bis Ende des 21. Jahrhunderts projizieren, stellen derartige Zeiträume ein durchschnittliches Baumleben dar. Berücksichtigt man die „Systemzeit“ des Ökosystems Wald (lange Reproduktionszeiträume, Lebensdauer) wird die zu erwartende Klimaänderung rapide ablaufen. Im Vergleich zu anderen Landnutzungsformen, wie zum Beispiel der Landwirtschaft, bieten sich Waldökosystemen dadurch sehr eingeschränkte Anpassungsmöglichkeiten.

◆ *Ortsgebundenheit*

Für die langlebigen, ortsgebundenen Waldökosysteme sind besonders das Ausmaß und die Geschwindigkeit des Wandels sowie die vielfältigen Wechselwirkungen, evolutionär neu. Die prognostizierten Klimaveränderungen werden die Verbreitungsgrenzen der Baumarten wesentlich rascher verschieben, als diese nachwandern können. Dies hat mit der relativen Ortsgebundenheit der Waldökosysteme zu tun. (Umgekehrt ergibt sich daraus, dass Spezies mit einer hohen Ausbreitungsgeschwindigkeit bei der Neubesiedelung im Vorteil gegenüber langsameren Arten sind.) Die Migrationsgeschwindigkeit der in Europa vorkommenden Baumarten beträgt nur 0,04 bis 1,0 km pro Jahr bzw. 0,4 bis 10 km pro Jahrzehnt. Aus der Differenz zwischen diesen Werten ergeben sich rechnerisch zeitliche Verzögerungen von Jahrhunderten für die potenziell natürlichen Sukzessionsabläufe. Das heißt, es ist mit langen Überführungszeiträumen zu rechnen, um den Waldumbau zu bewerkstelligen.

◆ *Zentrale Funktion in der Landnutzung des Alpenraums*

In einem intensiv genutzten Siedlungs-, Wirtschafts-, Erholungs- und nicht zuletzt Naturraum wie den Alpenraum, mit seiner Begrenztheit der Dauersiedlungsräume, hat der Wald eine Vielzahl von Funktionen (Multifunktionalitäten) zu erfüllen. Dabei geht seine Funktion über die Bereitstellung des Rohstoffes Holz hinaus. Er schützt nicht nur vor Lawinen, Steinschlag und Murenabgängen und stellt sauberes Trinkwasser (u.a. Ressourcen) sicher, sondern stellt auch einen vielfältig genutzten Erholungsraum (Naherholung und Tourismus) für den Menschen bereit. Diese Vielzahl an Funktionen kann lokal dazu führen, dass die Leistungsfähigkeit von Waldökosystemen zu stark beansprucht wird. Diese vielfältigen Nutzungen sind vor dem Hintergrund des Klimawandels zu beachten.

(Institut für Waldbau 2010a: 1, WWF 2006a: 29-31)

1.5 Schutzwirkung des Waldes

Neben der Bereitstellung des Rohstoffes Holz (Nutzfunktion) und der Bereitstellung weiterer Ressourcen (Boden, Wasser, Luft) kommt dem Wald in einem alpin geprägten Land wie Österreich eine elementare Bedeutung in seiner Schutzfunktion zu. Diese Schutzfunktion wird durch den Klimawandel zukünftig noch an Bedeutung gewinnen.

1.5.1 Zustand der Schutz- und Bannwälder

Die Schutzwirkung des Waldes ist für das österreichische Berggebiet von existenzieller Bedeutung. In einem Gebirgsland wie Österreich stellen alpine Naturgefahren in vielen Gebieten ein Sicherheitsrisiko dar: Hochwasser, Muren, Lawinen, Hangbewegungen und Steinschlag bedrohen Menschen, ihren Lebens-, Siedlungs- und Wirtschaftsraum, sowie Verkehrswege. Der steigende Siedlungsdruck, die Verkehrserschließung des Alpenraumes sowie die starke touristische Nutzung (Schigebiete) haben in den letzten Jahrzehnten eine Vergrößerung der gefährdeten Fläche bewirkt.

Die Schutzwirkung des Waldes kommt dabei mehrfach zur Geltung. Der Wald schützt vor Lawinen indem er einen großen Teil des Schnees bereits mit seiner Baumkrone auffängt und die Schneedecke am Boden zwischen den Stämmen fixiert. Die Wucht der flüssigen Niederschläge wird durch Blätter, Nadeln und Äste gebremst und durch die Baumkronen aufgefangen. Der tief durchwurzelte Waldboden wirkt schließlich wie ein Schwamm der das Wasser zurückhält und danach zeitverzögert abgibt (sei es durch Transpiration der Vegetation oder durch Quellschüttung). Im freien Gelände fließt oberflächlich drei- bis fünfmal soviel Niederschlagswasser ab wie im Wald. Waldboden ist daher gegen Abschwemmung, Verwehung, Geröllbildung und Hangrutschung geschützt.

Dem steht gegenüber, dass die Waldausstattung in vielen höher gelegenen Alpentälern objektiv zu gering ist. Die vorindustriellen Rodungen zur Gewinnung von Alm- und Weideland haben in manchen Regionen den Wald auf kleine Reste an Steilstufen und in Grabeneingängen, also auf die landwirtschaftlich nicht brauchbaren „absoluten Waldböden“ zurückgedrängt. Weiters wurde dadurch die Waldgrenze um mehrere hundert Meter tiefer gedrückt als die mögliche und potentiell natürliche. Diese

Entwaldungen haben den Schutzwald mancherorts unter das notwendige Maß gedrückt und aufwändige technische Verbauungen (Kunstabauten) notwendig gemacht.

Dabei erreicht der Schutzwald in Österreich insgesamt beachtliche Dimensionen. Auf 776.000 Hektar Schutzwald, das sind rund 20 Prozent der österreichischen Waldfläche, dominieren subalpine Fichtenwälder, montane Fichten-Tannen-Buchenwälder, Latschenflächen und Lärchen-Zirbenwälder. Der größte Anteil entfällt auf Bestände außer Ertrag. Teile der Schutzwälder sind auch nicht begehbar, was eine pflegliche Behandlung der Bestände erschwert. Den größten Schutzwaldanteil haben die Bundesländer Tirol, Vorarlberg und Salzburg (BMLFUW 2008a: 61f, BMLFUW 2006a: 95-98).

Die Schutzwälder sind im Berggebiet, der alpin geprägten Landschaft von besonderer Bedeutung für die Sicherung des Dauersiedlungsraumes bzw. aller sozialen und wirtschaftlichen Aktivitäten, die sich in diesem Raum konzentrieren. Gemäß dem Forstgesetz stehen diese unter besonderem Schutz und die Eigentümer sind gesetzlich verpflichtet, deren stabile Erhaltung und Erneuerung zu gewährleisten. Weiters gibt es Bewirtschaftungsauflagen bezüglich der Nutzung. Der auf gefährdeten Standorten stokkende Schutzwald darf laut Forstgesetz nur mit besonderer Vorsicht, d.h. mittels Einzelstammnutzung oder in schmalen Streifen genutzt werden.

Nach dem Forstgesetz wird der Schutzwald in die Kategorien Standortschutzwald, Bannwald und Objektschutzwald eingeteilt:

- ◆ Standortschutzwälder schützen ihren Standort, also sich selbst;
- ◆ Bannwälder zum Schutz vor Elementargefahren (Lawinen, Sturm) oder wegen positiver Umweltwirkungen (Klima, Wasserhaushalt) sind nur eingeschränkt nutzbar;
- ◆ Objektschutzwälder bewahren Menschen, Siedlungen und Einzelgehöfte oder kultivierte Flächen vor Elementargefahren und schädigenden Umwelteinflüssen – diese Kategorie hat in den letzten Jahren stetig zugelegt;

Die wichtigsten Schutzfunktionen des Waldes beispielsweise zur Hochwasservorbeugung sind eng mit den anderen Landnutzungsformen (für Siedlungs-, Verkehrs-, Gewerbe- und Tourismuszwecke) verbunden. Ein Zusammenwirken mit der örtlichen und überörtlichen Raumplanung ist essentiell.

Der Zustand der österreichischen Schutzwälder ist verbesserungsbedürftig. Die Ergebnisse der Österreichischen Forstinventur zeigen, dass der Schutzwald vielerorts in einem sehr schlechten Zustand ist und seine Funktion nur mehr mangelhaft erfüllen kann. Nur 59% des Schutzwaldes werden als „stabil“ eingestuft, 33% als „stabil bis labil“ und sogar 8% als „kritisch labil bis instabil“. Das Hauptproblem ist die fehlende Verjüngung der Bestände und die mangelnde Pflege (z.B. zu hohe Stammzahlen). Denn damit Schutzwälder ihre Funktion voll erfüllen können, müssen verschiedene Altersklassen vorhanden sein, nur so ist eine stabile Dauerbestockung möglich. Daher ist es wichtig, ältere Bestände rechtzeitig zu verjüngen, bevor deren Schutzfunktion verloren geht. Auf etwa der Hälfte der Schutzwaldfläche gibt es jedoch zu wenige Jungpflanzen, die die Schutzfunktion übernehmen könnten, wenn die vorhandenen Bäume dafür zu alt geworden sind (BMLFUW 2008a: 61f).

Das höhere Alter der Schutzwälder ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Lange Zeit sind sie der Schlägerung bzw. Rückung entzogen gewesen, weil sie außerhalb der Erreichbarkeit lagen. Weiters unterblieb die Nutzung aus Angst vor den Folge für die darunter liegenden Siedlungen. Zudem wurden zuerst die Wälder in den tieferen Lagen genutzt, die aufgrund ihrer standörtlichen Gegebenheiten,

schneller wuchsen. Dabei sagt das „Alter“ von Waldbeständen alleine noch nichts über deren Gesundheitszustand aus. Je älter sie sind, desto eher kann deren Vitalität aus verschiedenen Gründen (wie z.B. Trockenheit, Steinschlag-, Schäl-, Sturmschäden, Insektenfraß, Luftschadstoffe) geschwächt sein. Kritischer als das biologische Alter der Schutzwälder ist in vielen Fällen jedoch die ausbleibende Verjüngung (BMLFUW 2006a: 96f, Waldwissen.net 2010e).

Dabei werden viele Faktoren wirksam, die das Aufkommen der Naturverjüngung verhindern: Wildverbiss durch die Überbestände des Schalenwildes, die fehlende Trennung zwischen Almen, Bergmähder und Waldweide, die Vergrasung aber auch Erosionserscheinungen und Lichtmangel durch ein zu dichtes Kronendach. Weiters sind Samenjahre in großen Höhen seltener. Aufgrund der hohen Pflege- und Erntekosten im Bergwald sind, soweit es sich überhaupt um Schutzwälder im Ertrag handelt, Maßnahmen zum Erhalt und zur Verbesserung der Schutzwirkung für die WaldbesitzerInnen meist eine finanzielle Belastung. Der Holzerntrag der Schutzwälder ist vielfach so gering, dass nicht einmal die Kosten der Nutzung, geschweige denn die der Aufforstung gedeckt sind. Deshalb ist der Einsatz von öffentlichen Fördermitteln unumgänglich (BMLFUW 2006a: 96f).

Angesichts der Herausforderungen des Klimawandels bekommt die Notwendigkeit für den Erhalt und die Wiederherstellung eines funktionsfähigen Bergwaldes eine neue Dimension. Möglich aber keineswegs sicher ist, dass Extrem- und Elementarereignisse gehäuft auftreten könnten. Der Trend ist bei den einzelnen Naturgefahren auch unterschiedlich. Der Schutz von Siedlungs- und Verkehrsflächen, ja die Besiedelung des Berggebietes, der alpinen Seiten- und Hochtäler sind von der Gewährleistung der schutzfunktionalen Wirkungen abhängig. Stabile und gesunde Baumbestände erfüllen die Schutzfunktion in den Hochlagen am besten. Dies gilt für Schutzwälder ebenso wie für Neuaufforstungen. Bei der Schutzwaldsanierung stehen Maßnahmen im Vordergrund, die die Verjüngung fördern und für Hochlagen geeignete Herkünfte beimischen (BMLFUW 2008a: 61f, BMLFUW 2006a: 96f, Waldwissen.net 2010e).

2. Klimatische und witterungsbedingte Faktoren der Forstwirtschaft

Im folgenden Abschnitt werden einige biologische und wald-klimatologische Faktoren erläutert, die für das Verständnis der Wirkungsweisen des Klimawandels von Bedeutung sind.

2.1 Faktoren des Wachstums

Vereinfacht gilt, dass Baumwachstum Kohlendioxyd, ein entsprechendes Wärmeangebot (Temperaturabhängigkeit), Wasser- und Nährstoffangebot sowie Lichtenergie benötigt. Dabei hängt die Höhe des Pflanzenwachstums im engeren Sinn von der Photosynthese, der Atmung, der Reservestoffbildung und des Umbaus von Zuckern in Feststoffe einer Pflanze ab. Der Zusammenhang zwischen Temperatur (über dem Auslöseminimum von ca. 5°C) und der Photosynthese ist jedoch nicht so zwingend, wie anzunehmen wäre (Beierkuhnlein/Foken 2008: 109f). Obwohl sich, isoliert betrachtet, eine Temperaturerhöhung meist positiv auf die Photosynthese auswirkt, spielt die Temperatur für die Photosynthese nach Berücksichtigung aller Faktoren eine *untergeordnete* Rolle: Zum einen weisen Waldbäume generell eine sehr hohe Fähigkeit der phänotypischen Anpassung an Temperaturveränderungen auf. Diese Akklimatisierungsphänomene und die starke Korrelation der Temperatur mit Licht führen dazu, dass selbst in kalten, alpinen Ökosystemen durch eine hypothetische ständige Optimaltemperatur nur ca. 7% der ohnehin schon erreichten Photosyntheseleistung dazu gewonnen werden könnte. Bei den Bedingungen vor Ort kommt hinzu, dass eine Temperaturerhöhung oft von trockeneren Witterungsverhältnissen begleitet ist, wodurch eine niedrigere Produktivität eintritt (Eidgenössische Forschungsanstalt WSL 2006: 35f, ETH Zürich 2009: 10).

2.2 Klimatische Einflussfaktoren der Waldökosysteme

Die mittleren *Jahrestemperaturen* sind sehr stark von der Seehöhe und der Exposition abhängig. Die ökologische Höhenstufe lässt sich im Wesentlichen aus der Temperaturabnahme mit zunehmender Seehöhe ableiten. Für das Berggebiet sind dies die Waldgesellschaften der montanen, subalpinen und alpinen Höhenstufe. Für die jeweiligen Höhenstufen sind unterschiedliche Pflanzen und unterschiedliche Waldgesellschaften charakteristisch. Das den Pflanzen zur Verfügung stehende *Wasser* hängt maßgeblich von den örtlichen Niederschlagsmengen, der Verdunstung, dem Geländere relief und der Wasserhaltekapazität des Bodens ab. Die Verdunstung sinkt mit der Temperatur. Wie lange die Niederschlagsmenge in den für die Pflanzen verfügbaren oberen Bodenschichten erhalten bleibt, hängt stark vom Bodenaufbau und dem Geländere relief ab. Aus der Gründigkeit und dem Geländere relief lässt sich ein Wert für das relative Wasserangebot des Bodens ermitteln. Auf Rücken und Oberhängen ist das Wasserangebot höher. Aus dem relativen Wasserangebot und der jeweiligen Niederschlagsmenge ergibt sich dann das absolute Wasserangebot für die Vegetation. Dabei ist auch wesentlich, dass flachgründige oder sandige Böden eine geringere Wasserhaltekapazität als tiefgründige, tonige Böden haben. Die Verfügbarkeit von *Nährstoffen* hängt stark vom Wasserhaushalt und dem geologischen Ausgangsmaterial ab. Sie nimmt mit abnehmendem Wasserangebot ab. Auch der Basengehalt des Bodens, der sich aus dem Grundgestein

ableitet, ist ein Maß für die Verfügbarkeit unterschiedlicher Ionen und Mineralstoffe (Kirchmeir et al. 2000: 46f).

2.3 Waldklimatologie in subalpinen und alpinen Gebirgsstufen

In den Hochlagen herrschen besonders extreme klimatische Verhältnisse, an die sich die Vegetation angepasst hat. Für das Hochgebirge bis an die Baumgrenze, wo sich auch viele Schutzwälder befinden sind vor allem die niedrigeren Temperaturen und geringere absolute Temperaturschwankungen (zwischen Tag und Nacht) charakteristisch. Durch die niedrigeren Temperaturen wird die Vegetationszeit stark verkürzt. Wiederholte Wachstumsunterbrechungen durch Schneefall und Fröste hemmen die pflanzenphysiologischen Prozesse während der Vegetationszeit beträchtlich. Das Klima ist weiters von einer hohen Strahlungsintensität und UV-Strahlung geprägt. Je nach Neigung und Ausrichtung der Hänge können starke lokale Temperaturunterschiede auftreten. Klimabegünstigt sind südlich ausgerichtete Steillagen, die von der Horizontüberhöhung einerseits und von einem günstigen Einfallswinkel der Sonnenstrahlen profitieren können. Ungunstlagen sind Expositionen, die nördlich ausgerichtet sind (Waldwissen.net 2010a).

Nicht die tiefen Wintertemperaturen oder extreme Frostereignisse lassen den Wald in großen Höhen nicht gedeihen sondern die klimatische Ungunst während der Vegetationsperiode. Im Wurzelraum muss mindestens eine Temperatur von 5 bis 7 Grad Celsius herrschen, damit für das Wachstum wichtige Stoffwechselprozesse ablaufen. Ist die Vegetationszeit zu kurz oder zu kalt, können Bäume nicht genügend Energie in die Ausbildung eines aufrechten Stammes investieren.

Die Existenzgrenze kann aber auch durch Schädigungen bedingt sein, die zum Beispiel durch Umwelteinflüsse und lokale und temporäre Witterungsungunst entstehen. Durch solche Schäden kann der saisonale Zuwachs vermindert werden oder die Existenz einer Baumart überhaupt begrenzt werden. Typische Schädigungsbilder sind beispielsweise das Auftreten der Frosttrocknis: Sie entsteht, wenn einerseits eine relativ starke Lufterwärmung auftritt, während andererseits der Boden noch gefroren ist. Die Lufterwärmung regt dann die Atmung der Gehölze an, aus dem gefrorenen Boden kann aber noch keine Wasserversorgung erfolgen, so dass es zum Absterben von Nadeln, Zweigen oder auch der ganzen Pflanze kommt.

Große Bedeutung kommt in Gebirgslagen dem Wind zu, der allerdings orographisch bedingt, lokal stark verschieden sein kann. Er übt in den ausgesetzten Lagen des obersten Waldgürtels und oberhalb desselben auf den Baumwuchs eine schädliche und lebensbedrohende Wirkung aus, die im Winter durch die Schneeverfrachtung noch verstärkt wird. Der Schnee wird durch den Wind verlagert und dem Relief entsprechend unterschiedlich hoch abgesetzt. Rücken werden frei geweht und bleiben im Extremfall während des ganzen Winters schneefrei und sind dem Frost ausgesetzt. Mulden hingegen werden oft mit Schnee befüllt und apert spät im Jahr wieder aus, setzen also die mögliche Vegetationszeit herab. Beide Extreme sind für den Baumwuchs nachteilig, denn die ausgesetzten Rücken trocknen aus und verhagern – die Gefahr von Frosttrocknis-Schäden ist dort besonders groß. Mulden hingegen, die vom Wind mit Schnee voll geweht werden, sind oft lawinenanfällig und zudem häufig dem Schneeschimmel ausgesetzt (BMLF 1972: 24-29, Waldwissen.net 2010a, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL 2006: 36).

Typisch für die Steillagen des Hochgebirges sind auch Gleit- und Kriechschneebewegungen, die die Gehölze mechanisch schädigen, ja sogar vernichten können. Unter Schneegleiten versteht man das Abrutschen der Schneedecke entlang der Bodenoberfläche. Beim Schneekriechen bewegt sich die obere Schicht der Schneedecke rascher als die unteren Schichten. Durch beide Bewegungen entstehen große mechanische Kräfte, durch die ältere Jungbäume abgebrochen und gekrümmt und jüngere ausgerissen werden. Durch das Setzen der Schneedecke treten bei hoher Schneelage auch auf flachen Hängen Schäden durch Bruch und Verformung auf.

Die Schneedecke, die im Durchschnitt in 2.000m von Anfang Oktober bis Anfang Juni anhält und vor allem die späte Schneeschmelze im Frühjahr fördern die Entwicklung mehrerer für Nadelbäume schädliche Pilze (Schneesimmel, Schnee- und Kiefernscütte). Diese Pilze befallen die im Schnee steckenden Teile der Nadelbäume und zerstören in diesem Bereich ihre Nadeln. Dadurch kommt es zu Zuwachsverlusten, bei Jungwüchsen vielfach auch zum Absterben. Am günstigsten für die Jungpflanzen sind Schneehöhen von einem halben bis zu einem Meter, weil dadurch ein wirksamer Frostschutz ohne mechanische oder pilzbedingte Schädigungen gewährleistet ist (BMLF 1972: 24-29, Waldwissen.net 2010a, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL 2006: 36).

Während sich die Waldökosysteme in den Hochlagen der Alpen an die dort herrschenden extremen klimatischen Bedingungen angepasst haben, sind sie ihrerseits auch im Stande das Kleinklima zu beeinflussen, bzw. haben in Wechselwirkung damit jene subalpinen und alpinen Waldgesellschaften hervorgerufen, die heute das Landschaftsbild prägen.

2.4 Kleinklimatische Wirkung der Waldökosysteme

Die alpinen Wälder haben sich nach dem Ende der letzten Eiszeit ausgebreitet, wobei die Waldobergrenze bei 2.000-2.400m Seehöhe, also sogar höher als derzeit lag. Diese Wälder montaner, subalpiner und alpiner Höhenstufe, die das Relief mit einer dichten Vegetationsdecke überziehen bieten einen unerlässlichen Schutz gegen Erosion, Lawinen und Hochwässer. Gewitter und Schauerregen wird teilweise schon von den Baumzweigen aufgefangen und verdunstet während der größere Teil mit einer gewissen Verzögerung auf den Erdboden gelangt und dann im Waldboden mit seiner hohen Speicherfähigkeit versickert, so dass nur wenig Wasser oberflächlich abfließt. Die Baumwurzeln, die sich oft in Felsspalten verankern, halten das Erdreich zusammen und schützen es optimal gegen Erosion, so dass auch das oberirdisch abfließende Wasser kaum Schäden anrichten kann (Bätzing 2003: 39-40).

Eine vergleichbare Wirkung tritt auch bei Schneefällen auf. Der Schnee sammelt sich zuerst auf den Zweigen und fällt dann in gewissen Abständen zur Boden, so dass eine sehr unregelmäßige Schneedecke im Wald entsteht, die keine Schichtungen und damit keinen Gleithorizont ausbildet, auf dem Lawinen abgehen können. Das im Boden oder in Form von Schnee gespeicherte Wasser wird vom Wald anschließend relativ langsam und gleichmäßig abgegeben, sei es in Form von ganzjährig fließenden Quellen, sei es, dass der Wald durch sein Mikroklima eine abrupte Schneeschmelze bei einem Föhnwindbruch verhindert und den Abtauprozess über Wochen verzögert. Darüber hinaus spielt die Verdunstung des Wassers eine wichtige Rolle für das Lokalklima eines Alpenteales, weil die krassen Unterschiede zwischen feuchten und trockenen Wetterlagen durch den Waldeinfluss gepuffert und ausgeglichen werden. Hierbei ist offenkundig, dass sich das Waldklima deutlich von dem des Freilandes

unterscheidet. Das Kronendach des Waldes mildert Temperaturextreme, erhöht die Luftfeuchtigkeit, vermindert die Windgeschwindigkeit und filtert Luftschadstoffe (Staub, Aerosole) aus der Luft. Ohne die Waldbedeckung wäre die Dynamik vieler Niederschlagsprozesse und der klimatischen Prozesse im Allgemeinen wesentlich höher (Bätzing 2003: 39-40).

3. Veränderung der forstwirtschaftlich relevanten klimatischen und pflanzenphysiologischen Parameter

Erhöhte Temperaturen, veränderte Niederschlagsverhältnisse und der mögliche Anstieg des Risikos für das Auftreten von Extremereignissen wie Stürme, Dürre oder Inversionswetterlagen werden erhebliche direkte und indirekte Effekte auf den Sektor haben⁴. Eine Besonderheit der Forstbestände ist die Einwirkung von Nähr- und Schadstoffeinträgen (teilweise als Düngungseffekt) sowie der Anstieg der schädigenden Ozonkonzentration. Eine besondere Bedeutung für das Pflanzenwachstum hat der mit den Treibhauseffekt erhöhte Ausstoß von CO₂-Emissionen, weil dadurch, so die Annahme, das Pflanzenwachstum angeregt und gleichzeitig CO₂ in Pflanzen gespeichert werden soll.

Der kausale Zusammenhang zwischen dem Mehrzuwachs der mitteleuropäischen Wälder und der Zunahme des atmosphärischen CO₂-Gehaltes wurde mittlerweile wieder relativiert. Verschiedene Kultur- und Nutzpflanzen zeigen starke positive Effekte nur bei kurzfristigen Laborversuchen. Im Freiland kommt es zu einer Anpassung an hohe Kohlendioxidgehalte durch eine Reduktion der Öffnung der Spaltöffnungen. Daher sollte sich der Düngungseffekt kaum substantiell auswirken. Eine andere bayrische Studie kommt jedoch auch zu gegenteiligen Schlussfolgerungen (BayFORKLIM 1999 zitiert nach Beierkuhnlein/Foken 2008: 211). Möglicherweise erklären sich die unterschiedlichen Ergebnisse dadurch, dass die Photosynthese von anderen limitierenden Faktoren beeinflusst wird, die in die Analysen einbezogen werden müssen. So dürfte die Festlegung von Kohlenstoff in pflanzlicher Substanz in vielen Fällen mit erhöhter Temperatur sogar *abnehmen*, da mit höheren Temperaturen, nicht zuletzt aufgrund der höheren Transpirationsleistung, auch ein erhöhter Wasserbedarf der Pflanzen verbunden ist. Letzterer kann jedoch oft nicht gewährleistet werden. Die Photosynthese-Rate wird verringert, da die Pflanzen bei schlechter Wasserversorgung weniger CO₂ in ihre Blätter aufnehmen können. Die aufbauenden Prozesse werden dadurch limitiert und als Folge stehen weniger Stoffwechselprodukte für den Aufbau von nutzbarer pflanzlicher Biomasse zur Verfügung und die Erträge gehen zurück (Beierkuhnlein/Foken 2008: 103, 110)⁵.

Ein höheres Temperaturniveau, so es mit günstigeren Witterungsverhältnissen einher geht, kann sich positiv auf die Forstwirtschaft auswirken. Wie bereits jetzt sichtbar, wird sich die Obergrenze der Waldgesellschaften (die Kältengrenze) gipfelwärts verschieben. Das Wachstum der Kulturen wird sich durch einen Anstieg der Temperatur bei ausreichendem Wasserangebot deutlich erhöhen (Böhm et al. 2008: 80, ZAMG 2011p).

Für den Vegetationsverlauf am wichtigsten sind Tagesmaxima über +5°C, da die Tageserwärmung für die Vegetation auslösend wirkt. Dies kommt in der thermischen Vegetationsperiode zum Ausdruck. Der frühere Beginn der Vegetationsperiode hat aber umgekehrt den Effekt, dass die Gefahr von Spätfrösten zunimmt, da die bereits früher entwickelte Vegetation durch Kaltluftinbrüche stärker gefährdet ist (AustroClim2008a:87f, IPCC 2007a:8, OcCC 2007: 44, ETH Zürich 2009: 11).

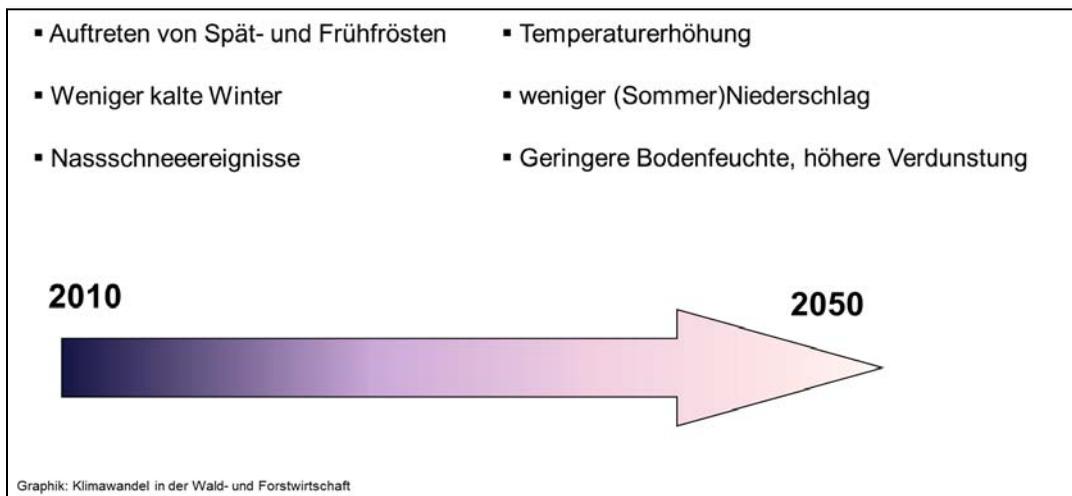
4. Eine ausführliche Beschreibung der Entwicklung der einzelnen Parameter findet sich im Abschnitt Klimazukunft Alpenraum (2010+).

5. Ähnliches gilt für landwirtschaftliche Nutzpflanzen.

Forstwirtschaftlich relevant ist die erwartete Änderung des Auftretens und der Verteilung der Niederschläge. Die Wasserverfügbarkeit ist und bleibt ein ebenso entscheidender Faktor für das Wachstum der Wälder wie eine Erhöhung der Temperatur. Höhere Temperaturen führen immer auch zu erhöhten Verdunstungsraten. Eine Erhöhung der Temperatur um ca. 1°C führt grob zu einer Erhöhung der Verdunstung um ca. 5%. Die Wasserspeicherkapazität der Böden spielt in diesem Zusammenhang für das Pflanzenwachstum eine große Rolle. Bei geringer Bodenfeuchte können auch nur weniger Nährstoffe aus dem Boden mobilisiert werden. Bäche und Flüsse speisen sich teilweise aus der Schneedecke des Winters. Infolge der früheren Schneeschmelze werden damit auch die Abflussmengen im Frühsommer absinken. Relevant dürfte auch sein, dass bedingt durch die milderen Winter, Nadelbäume in bisherigen Ruhephasen vermehrt photosynthetisch aktiv bleiben. Dies hat zur Folge dass der potenziell notwendige Wasserbedarf der Kulturen ansteigt.

Steigende Temperaturen erhöhen auch die Transpiration bzw. Verdunstungsrate. Aufgrund der Zunahme der Niederschlagsintensität und der Abnahme der Schneedecken-Häufigkeit und Mächtigkeit, wiederum in Abhängigkeit von der Seehöhe, ist mit einer Abnahme der Infiltration des Niederschlags in den Boden zu rechnen. Gemeinsam mit der generellen Niederschlagsabnahme im Sommer muss man von einer starken Abnahme des Bodenwassergehaltes, weniger Wasserverfügbarkeit und damit erhöhten Trockenstress für die Kulturen rechnen. Extremereignisse treffen die Kulturen in Form von raschen Temperaturschwankungen (Wetterstürze), Fröste, Stürme, Hagel, Schneefälle und Dürreperioden. Windwürfe und Schneebruch stellen die größten Gefahrenquellen für die Forstwirtschaft dar. Aber auch Trocken- und Hitzeschäden an den Kulturen können auftreten (Beierkuhnlein/Foken 2008: 188, AustroClim 2008a: 87f, Formayer et al. 2008a: 32ff).

Abbildung 7: Klimawandel in der Forstwirtschaft



Quelle: eigene Darstellung

4. Immissionen und Stoff-Einträge in Wechselwirkung mit dem Klimawandel

In die österreichischen Wälder werden bedeutende Nähr- und Schadstoffeinträge eingebracht. Zusammen mit den Auswirkungen des Klimawandels entfalten diese bedeutsame Wechselwirkungen.

4.1 Nähr- und Schadstoffeinträge

Durch Immissionen und Ablagerungen erfolgen Modifikationen der Umweltbedingungen, die Wälder neben der Klimaerwärmung in unterschiedlichem Ausmaß beeinflussen bzw. schädigen. Dabei stellt der Wald eine bedeutende Senke für Schadstoffe dar. Der höhere Eintrag von Schadstoffen in den Wald im Vergleich zu Nichtwaldflächen ist verursacht durch die höhere Schadstofffilterung aufgrund der größeren Blattoberfläche im Vergleich zur Kronenüberschirmungsfläche, der Oberflächenrauigkeit des Kronendaches und der Schadstoff speichernden Eigenschaften der Blätter und Nadeln. Quellen für Wald schädigende Schadstoffe sind industrielle Punktemitteln, Verkehr, Hausbrand und die Landwirtschaft. Kleinräumig bestehen die Einträge aus Schwefeldioxid, Stickstoffoxide und Fluorwasserstoff sowie Streusalz und flüchtigen organischen Komponenten. Großräumig sind die Wälder durch Ozon, durch eutrophierende und saure Depositionen sowie durch diffuse Einträge von Schwermetallen und organischen Schadstoffen belastet (BMLFUW 2006a: 37). Ein Nebeneffekt v.a. der Stickstoffeinträge dürfte eine erhöhte Zuwachsleistung der Wälder sein, die in den letzten Jahren registriert worden ist. Gleichzeitig bewirkt dies einen Mangel an anderen wichtigen Elementen wie Magnesium, wodurch die Widerstandskraft von Bäumen gegenüber Pathogenen sinkt (BMLFUW 2004a: 31, Eidgenössische Forschungsanstalt 2006: 35). Eine Studie aus Bayern (nach Beierkuhnlein/Foken 2008: 210) verweist darauf, dass Zuwachsleistungen des Forsts auf den kombinierten Effekt von günstigeren Wuchsbedingungen und der erhöhten Stickstoffmineralisierung in Zusammenhang steht. Ein Temperaturanstieg von 1°C erhöhe die Mineralisierung um rund 15%. Neben einer verbesserten Nährstoffversorgung der Wurzeln entstehe umgekehrt aber auch die Gefahr einer höheren Auswaschung von Mineralstoffen.

4.2 Bodennahe Ozonkonzentration

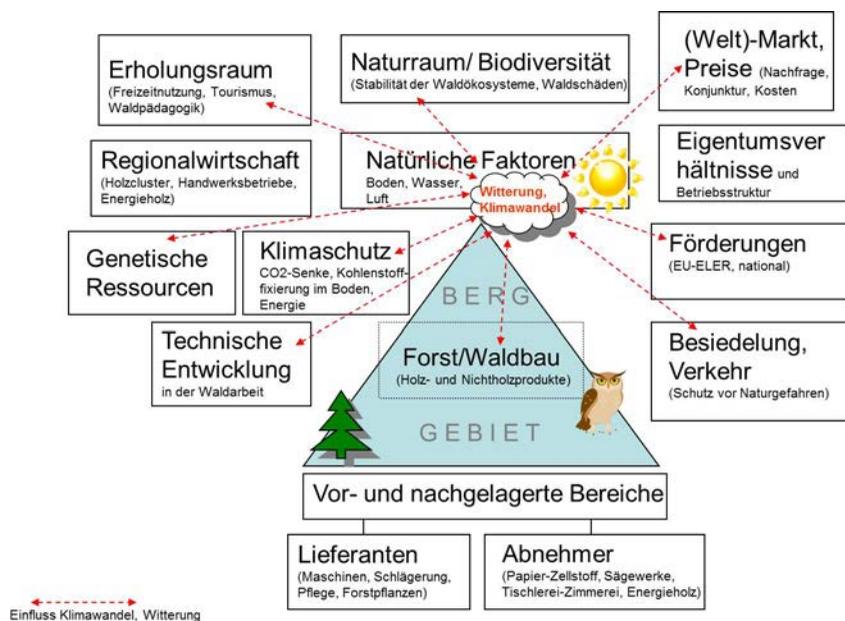
Die heimischen Wälder sind großräumig durch Ozon belastet. Dabei hat sich die langfristige Hintergrundbelastung mit bodennahem Ozon über die letzten 100 Jahre verdoppelt und steigt weiterhin an. Daran haben auch beachtliche Emissionsreduktionen vor allem seitens Industrie und Gewerbe nichts ändern können. Das bodennahe Ozon ist für Menschen, Tiere und Pflanzen schädlich. Ozon wird im Sonnenlicht aus Sauerstoff und bestimmten Vorläufersubstanzen (Stickoxide aus Verkehr und leichtflüchtige Kohlenwasserstoffe aus Industrie und Gewerbe) gebildet. Gleichzeitig ist die Sonnenscheindauer im Alpenraum in den letzten 20 Jahren deutlich *angestiegen*, wahrscheinlich als Folge des Klimawandels. Damit ist auch die höhere Ozonkonzentration in Zusammenhang zu bringen. Ozon reagiert mit Bestandteilen von Zellmembranen und Enzymen der Pflanzen. Dies beeinträchtigt oder zerstört den Stoffwechsel in der Zelle. Daneben kann Ozon in der Zelle auch in andere giftige Verbindungen umgewandelt werden. Symptome sind verfärbte Blätter, die frühzeitig abfallen. Auch Kleinwuchs der

Kulturen wird beobachtet. Die von den pflanzlichen Schutzmechanismen beanspruchte Energie führt zu geringerem Wachstum, wie in Experimenten nachgewiesen wurde. Darüber hinaus kann die Pflanze unter Umständen auf andere Umwelt- und Schadstoffeinflüsse nicht mehr entsprechend reagieren, wenn pflanzliche Atmungsorgane verstärkt Ozon aufnehmen. Die Wasserversorgung spielt in diesem Zusammenhang ebenfalls eine wichtige Rolle (UBA 2010).

5. Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft

Die Waldökosysteme und damit verbunden die Forstwirtschaft ist von vielen natürlichen Faktoren abhängig. Dazu zählen auch die Witterung und die Verschiebung von klimatischen Parametern (Temperatur, Niederschlag etc.) in Folge des Klimawandels. Daneben steht der Sektor aber auch in einem Kontext von unterschiedlichen gesellschaftlichen und ökonomischen Faktoren. Die Auswirkungen des Klimawandels müssen daher auch in Wechselwirkung mit diesen Faktoren betrachtet werden. Abbildung 8 skizziert kursorisch einige dieser Zusammenhänge.

Abbildung 8: Forstwirtschaft und Klimawandel und die Einflussfaktoren auf den Wald, die Forstwirtschaft im Berggebiet



Quelle: eigene Darstellung

5.1 Günstige Effekte

Der Klimawandel bringt für die Forstwirtschaft eine Reihe von günstigen Effekten mit sich. Dies gilt vor allem für die hochalpinen Regionen, die von einer wesentlich verlängerten Vegetationsperiode und einem breiteren Artenspektrum profitieren können.

5.1.1 Höheres Ertragspotential durch verlängerte Vegetationsperiode

Der wahrscheinlich wichtigste positive Effekt der Klimaerwärmung ist die Verlängerung der Vegetationsperiode. Dies äußert sich in einem früheren Einsetzen und einem späteren Ende der Transpiration der Pflanzen. Zugute kommt dies vor allem den Kulturen mit ansteigender Seehöhe (im Berggebiet). Klimainduzierte, gesteigerte Wachstumsleistungen der Waldbäume (und parallel dazu ein Anstieg des

Durchmesserzuwachs) wurden bereits im 20. Jahrhundert in weiten Teilen des Alpenraumes beobachtet. Eine verlängerte Wachstumsperiode kann in weiterer Folge auch zu einer erhöhten Produktivität der Waldbestände (Steigerung des Holzzuwachses) führen. Allerdings lässt sich ein erhöhtes Ertragspotenzial aufgrund der Abhängigkeit von anderen Rahmenbedingungen nicht ohne weiteres als tatsächlicher wirtschaftlicher Ertrag realisieren.

Der Temperaturanstieg hat bereits jetzt zu Änderungen der Pflanzenphänologie geführt. Beobachtet wurde, dass Blühtermine und Blattentfaltung früher im Jahr auftreten. Umgekehrt verzögern sich die Eintrittstage der Blattverfärbung und des Blattfalls. In Summe weitet sich damit die Vegetationsperiode aus (AustroClim2008a:87f, IPCC 2007a:8, OcCC 2007: 44, Waldwissen.net 2010b, Eidgenössische Forschungsanstalt 2006: 35).

Es ist deshalb wahrscheinlich, dass die im Berggebiet vorkommenden Baumarten (wenn auch differenziert nach der Baumart) auf den Klimawandel vor allem bedingt durch eine Verlängerung der Vegetationszeit, positiv in ihrem Zuwachs reagieren werden. Insbesondere die heimischen Laubbaumarten werden sehr wahrscheinlich von der Erwärmung profitieren, jedoch hauptsächlich in Regionen und zu Zeiten mit ausreichender Wasserverfügbarkeit.

Die günstigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft müssen jedoch regional sowie nach der Höhenstufe differenziert werden. Teile des Berggebietes wie das Wald- und Mühlviertel sowie die inneralpinen Trockentäler (z.B. Oberland in Tirol, Trockentäler der Alpensüdseite, Alpenstrand) sowie generell die Tieflagen des Berggebietes (unter 800 Meter Seehöhe) können durch die unzureichende Wasserverfügbarkeit in den Ertragsersparungen deutlich limitiert sein (AustroClim2008a:87f, Waldwissen.net 2010b, Eidgenössische Forschungsanstalt 2006: 35).

5.1.2 Verschiebung der Waldgrenze

Die alpine Waldgrenze ist eine klimatisch sensible Grenzzone. Nimmt die Temperatur während der Vegetationszeit langfristig zu, wird die Waldgrenze ansteigen und sich der Bestand im Grenzbereich verdichten. Umgekehrt führen Temperaturrückgänge zur Auflichtung der Waldgrenzwälder und zu einem Absinken der Baumgrenze. Die natürliche Waldgrenze des Berggebietes befindet sich zwischen 1.500 (in den Stauniederschlagsgebieten der Alpennordseite) und 2.000 m Seehöhe (an der Südabdachung des Alpenhauptkammes). Je höher die Waldobergrenze, desto günstiger die klimatischen Bedingungen für die Vegetation. Dabei ist die Waldgrenze im Berggebiet von der Almbewirtschaftung geprägt und „künstlich“ niedrig gehalten worden. Niedriger, als sie es ohne menschliche Eingriffe wäre.

Die Waldflächenzunahme der vergangenen Jahrzehnte an und unterhalb der Baumgrenze lässt sich überwiegend durch „Struktureffekte“, das natürliche Zuwachsen von nicht mehr bewirtschafteten Alm- und Weideflächen erklären. Aber auch ein „Klimasignal“ ist der zunehmenden Wachstumsleistung der hochalpinen Waldbäume (und parallel dazu des Anstieges der Durchmesserzuwächse) zu entnehmen. Durch die wärmeren Temperaturen verschiebt sich die Baumgrenze nach oben in die hochsubalpine Höhenstufe. Gleichzeitig wurde ein höherer Längenzuwachs der Nadelbäume im Hochgebirge beobachtet (Gappmaier 2009: 52).

Jahresringanalysen der Universität Innsbruck in den Tiroler Zentralalpen zeigen ein Ansteigen der Verbreitungsgrenze von erwachsenen Bäumen und Jungwuchs während der letzten 150 Jahre (seit dem Höhepunkt der „Kleinen Eiszeit“ um 1850). Der Anstieg der Baumgrenze bzw. das Aufkommen der heute in diesem Bereich wachsenden Zirben und Lärchen erfolgte jedoch nicht durchgängig. Gerade die letzten 25 Jahre sind von einer starken Verjüngung auch über der bereits etablierten Baumgrenze geprägt (Waldwissen.net 2010c).

Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kommt eine Untersuchung von Lackner (2008). Er verweist darauf, dass sich derzeit über der Waldgrenze sehr häufig Bäume mit einem Alter von bis zu 20 Jahren befinden – Anzeichen der Klimaerwärmung (Lackner 2008: 7ff). Bei einer mittleren Erwärmung von 2°C könnte sich die Baumgrenze auf etwa 2.400m Seehöhe verschieben (Formayer et al. 2008a: 18). Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass sich die Zeitspanne vom Vorkommen einzelner Bäume bis zur Bildung eines dichten Waldbestandes auf viele Jahrzehnte erstreckt. Die Verschiebung der ökologischen Höhenstufen nach oben führt gleichzeitig zu verbesserten Wuchsbedingungen für Waldgesellschaften oberhalb der jetzigen Waldgrenze.

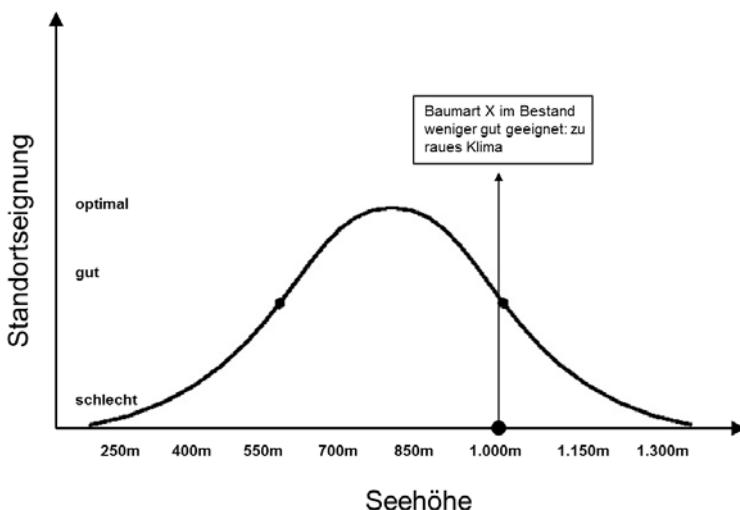
Die wichtigste offene Frage ist die der zukünftigen landwirtschaftlichen Nutzungsintensität der Almen und Alpen (Stichwort Offenhalten der Kulturlandschaft). Bleiben die Beweidung und die damit verbundenen Pflegemaßnahmen (Schwenden, Räumen) erhalten, ist trotz Klimawandel kaum mit einem Anstieg der Waldgrenze zu rechnen.

5.1.3 Größere Vielfalt der alpinen Baumartenzusammensetzung

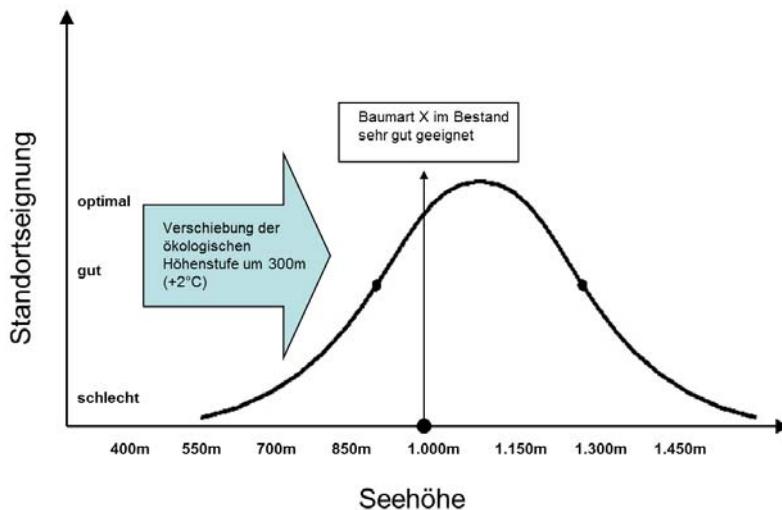
Ein günstiger Aspekt der Klimaerwärmung ist, dass die bis dato bestehenden klimatischen Einschränkungen für viele Baumarten in alpinen und hochalpinen Regionen wegfallen sollten. Dadurch vergrößert sich das mögliche Baumartenspektrum bzw. der waldbauliche Entscheidungsspielraum in den montanen und subalpinen Höhenstufen des Berggebietes. Die Verschiebung der Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse führt also in den höheren Stockwerken des alpinen Raumes zu einer Verbesserung der Standortneigung von vielen Baumarten. Generell ist davon auszugehen, dass Laubholzarten (u.a. Buche, Esche) gegenüber Nadelholzarten an Ausbreitung gewinnen werden. Die Fichte als Hauptbaumart und ihrer Vorliebe für feucht-kühle Standortverhältnisse wird ihr Verbreitungsgebiet auf die höheren subalpinen Höhenstufen verlagern und beschränken und sich dort *auch ausdehnen* können. Gleichzeitig könnte sie dabei Zirben und Lärchen verdrängen. Letztere Beispiele lassen aber auch erkennen, dass der Klimawandel veränderte Konkurrenzbeziehungen *zwischen* den Arten zur Folge haben wird, sodass es nicht so einfach ist, „Gewinner“ von „Verlierern“ zu unterscheiden (AustroClim 2008a: 140-142, ORF Tirol 2008, Ammer 2009: 200).

Die folgende Graphik 9 verdeutlicht die Auswirkungen des Klimawandels auf die Standortseignung von Baumarten. Geht man von einer moderaten Klimaerwärmung von 2°C aus, so verschieben sich die ökologischen Höhenstufen um ca. 300m gipfelwärts. Dies hat zur Folge, dass Baumarten denen das derzeitige Klima im Berggebiet auf rund 1.000 Meter Seehöhe eher zu rau ist, unter den neuen Bedingungen gut gedeihen können.

Abbildung 9: Veränderung der Standortseignung von Baumarten durch den Klimawandel



Standortseignung für Baumart X unter gegenwärtigen klimatischen Bedingungen



Graphik: Standortseignung für Baumart X unter den Bedingungen des Klimawandels

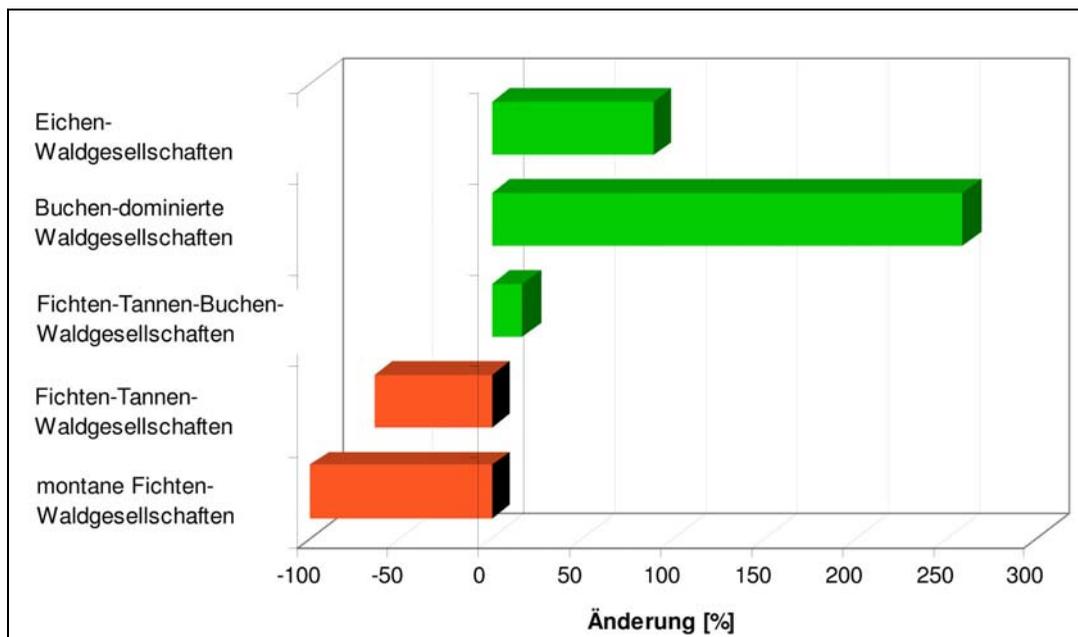
Quelle: eigene Graphik

Im Vergleich zur Fichte erscheint das Risiko des Anbaus von Baumarten, deren Areal einen weiten Temperatur- und Niederschlagsbereich abdeckt und dabei in warme und trockene Klimate hineinragt, deshalb als wesentlich geringer.⁶ Die häufigste Laubbaumart in Österreich, die Rotbuche, dürfte positiv auf die Klimaerwärmung reagieren. Der Klimawandel hat zur Folge, dass die Buche in der hoch-

montanen und subalpinen Höhenstufe des gesamten alpinen Raumes Standorte mit erträglichen klimatischen Bedingungen vorfindet und nur mehr auf Extremstandorten durch Kälte limitiert wird. Keine günstige Prognose gibt es hingegen für die Buchenbestände des Waldviertels und des Voralpengebietes. Weiters auf jenen Standorten wo die Buche teilweise bereits heute nicht ausreichend mit Niederschlägen versorgt wird. In Summe aber wird die Buche das für sie potenziell besiedelbare Areal als Folge des Klimawandels ausdehnen können, insbesondere durch Vordringen in höhere Lagen (AustroClim 2008a: 140, Furlinger 2009: 45).

Mittels des Simulationsmodells PICUS wurde eine Abschätzung der Auswirkungen einer möglichen Klimaänderung flächendeckend für Österreich auf Basis des Stichprobennetzes der Österreichischen Waldinventur durchgeführt (Lexner/Seidl 2007). Im Modell wurde eine Temperaturerhöhung von 2°C bei gleichzeitiger Abnahme der Sommerniederschläge um 15% simuliert. Als Ergebnis zeigt sich ein deutlicher Anstieg des Anteils an Buchenwaldtypen, sekundär auch der Eichwälder. Demgegenüber verlieren montane Fichten dominierte Waldgesellschaften stark an Konkurrenzfähigkeit (Lexner/Seidl 2007: 4).

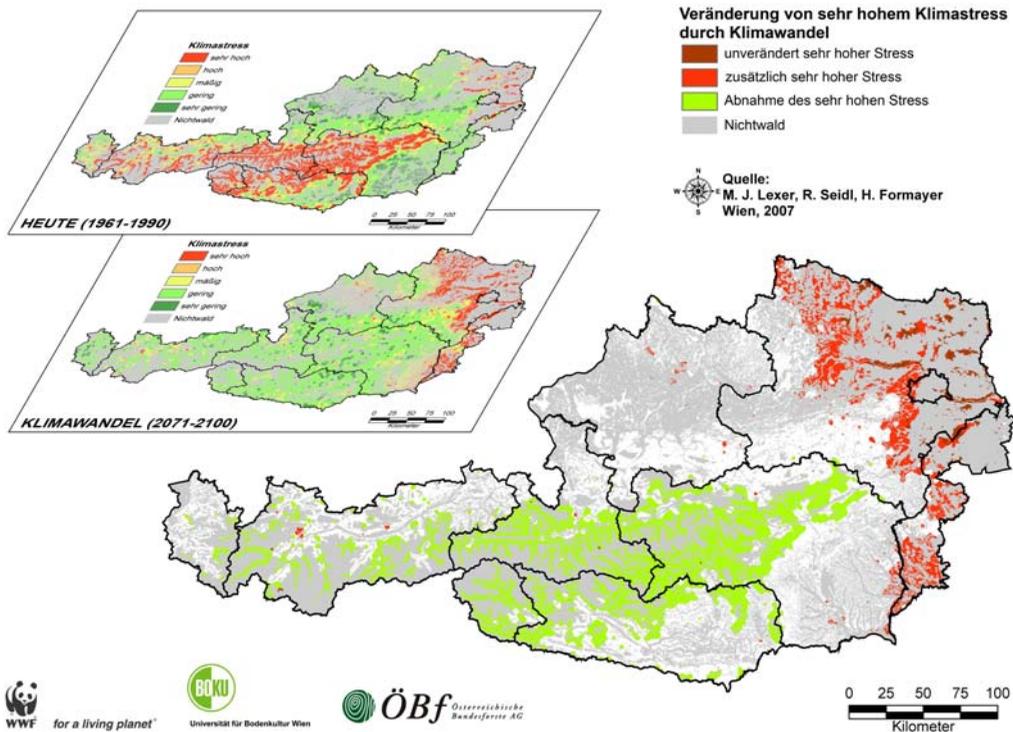
Abbildung 10: Relative Veränderung wichtiger potenziell natürlicher Waldtypen unter einem Klimaänderungsszenario



Quelle: Lexner et al. 2007

6. Deshalb hätte auch die Weißtanne aufgrund ihrer Trockenheitsresistenz Potenzial.

Abbildung 11: Buche: Veränderung von Stress im Klimawandel



Quelle: Lexer et al. 2007

Günstigere Wuchsbedingungen werden auch für die Laubbaumarten Ahorn und Erle erwartet. Bei den Nadelhölzern werden der Lärche, Weißtanne, Kiefer und der Douglasie Potenzial versprochen. Diese Baumarten können bis zur tiefsubalpinen Höhenstufe (~1.500m Seehöhe) vordringen. In den inneralpinen Tälern bis ins Mittelgebirge besteht dann Potential für das Gedeihen von Walnüssen, Edelkastanien und Eichen (ORF Tirol 2008).

Aus heutiger Sicht bleiben die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wald beherrschbar, solange der Temperaturanstieg ca. 2°C nicht übersteigt (dies wird bis 2050 erwartet), da eine Reihe von heimischen Baumarten diese Steigerung vermutlich verkraften kann. Kritischer ist die Erwartung bei diesem Niveau schon für empfindliche Waldökosysteme (z.B. alpine Feuchtgebiete). Bei Temperaturanstiegen *jenseits* von 2°C (prognostiziert werden 3 bis 6°C bis 2100), die von regelmäßigen sommerlichen Trockenperioden begleitet werden, ist hingegen mit flächigen Schäden an den Waldbeständen zu rechnen (Ammer 2009: 201).

5.1.4 Beitrag zum Klimaschutz: Der Wald als Kohlenstoffsенke

Waldökosysteme sind eine Anhäufung lebender und toter Substanz, deren wichtigstes Element der Kohlenstoff ist. Deswegen haben sie ein großes Potential, den globalen Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration und den Temperaturanstieg zu beeinflussen. Der Kohlenstoff wird während der Photosyn-

these der Luft entzogen, um Biomasse aufzubauen. Eine Fichte mit einer Holzmasse von einem Festmeter (fm) speichert im Laufe ihres Lebens rund 200 kg Kohlenstoff und entnimmt dadurch der Atmosphäre ca. 750 kg Kohlendioxid. Dadurch werden im stehenden Holz sowie im Waldboden große Mengen Kohlenstoff als Vorrat gespeichert und umgekehrt der Atmosphäre entzogen.

Alle Abbauvorgänge (von der Verbrennung bis zum natürlichen Abbau) verwandeln den gebundenen Kohlenstoff *wieder* in Kohlendioxid. Es kehrt wieder in den natürlichen Kreislauf der Atmosphäre zurück. Beim natürlichen Abbau im Waldboden ist dies ein langsamer Prozess, beim Verbrennen hingegen geschieht dies in rascher Folge.

Die Klimaschutzwirkung des Waldes liegt einerseits in der sinnvollen Substitution von fossilen Brennstoffen durch erneuerbare Energieträger, andererseits in der Kohlenstoff-Speicherungskapazität der Wald-Biomasse bzw. der daraus geschaffenen Holzprodukte. Durch den Mehrzuwachs der österreichischen Wälder, der die Nutzungsrate um 1/3 übersteigt, erhöht sich der in der Biomasse gespeicherte Kohlenstoff. Daraus resultiert die Funktion der Waldökosysteme als Kohlenstoffsänke. Nicht enthalten in diesen Zahlen ist jedoch die Veränderung des Waldbodenkohlenstoffs (BMLFUW 2008a: 16-17, Waldwissen.net 2006).

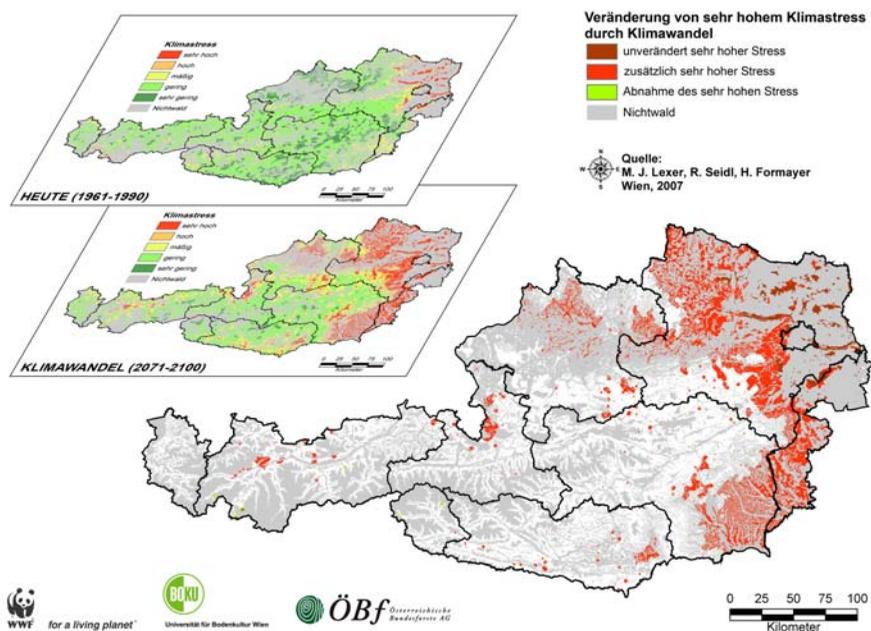
5.2 Ungünstige Effekte

Die ungünstigen Effekte resultieren überwiegend aus der mangelnden Anpasstheit vieler Fichtenbestände in den Mittelgebirgen, aus der Zunahme der Waldschäden und der Ungewissheit darüber ob Waldböden bei fortschreitender Klimaerwärmung nicht vermehrt zu einer CO₂-Quelle werden könnten.

5.2.1 Anfälligkeit von Fichtenbeständen in der montanen Höhenstufe

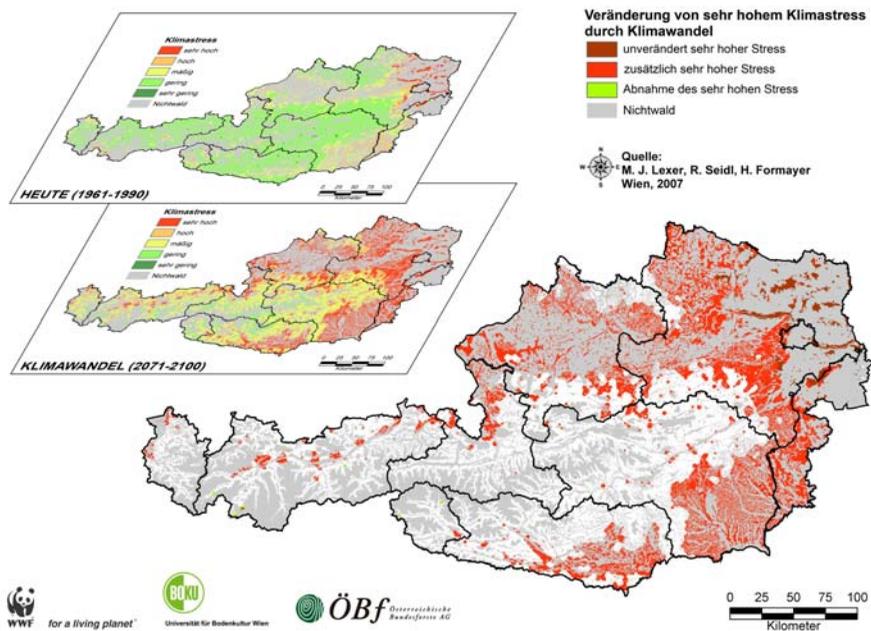
Eine Temperaturerhöhung um 2°C (die bis 2050 erwartet wird) würde in Österreich einer Verschiebung der Vegetation um eine ganze Höhenstufe entsprechen. Damit wären viele montane Fichtenwälder nicht mehr standortgerecht und würden über der optimalen Temperaturobergrenze liegen. Fichten bevorzugen feuchte, kühle Standorte und sind daher wenig trockenheits- und hitzetolerant. Die Fichte wird als Flachwurzler (Senkerwurzler) durch saisonale Wasserknappheit besonders betroffen sein. Deshalb werden Fichtenbestände neben anderen Hauptbaumarten besonders vom Klimawandel betroffen sein. Weil die Umtriebszeiten der Fichte bis zur Hiebsreife relativ rasch sind wurde sie in der jüngeren Vergangenheit vielerorts außerhalb ihrer natürlichen Standorte angebaut. Oft ist sie an der Grenze ihres Toleranzbereichs angelangt. Fichten gelten auch als besonders anfällig gegenüber indirekten Auswirkungen des Klimawandels – wie dem Borkenkäfer – und Schäden durch extreme Wetterereignisse, etwa Windwurf. Die Anfälligkeit der Fichte geht auch anschaulich aus den folgenden Abbildungen hervor. Daraus ist zu entnehmen, dass die Bewirtschaftung von Fichtenwäldern zukünftig auf die subalpinen Standorte beschränkt werden sollte. Auf dieser Höhenstufe könnte die Baumart sogar Anteile gewinnen (Beierkuhnlein/Foken 2008: 213, AustroClim 2008a: 137-139, Lexer/Seidl 2007: 4-5).

Abbildung 12: Fichte: Veränderung von Stress im Klimawandel



Quelle: Lexer et al. 2007

Abbildung 13: Fichte: Veränderung von Stress im Klimawandel unter Berücksichtigung von Störungen durch Borkenkäfer



Quelle: Lexer et al. 2007

Im Berggebiet ist die mangelnde Standortangepasstheit der Fichte nur sekundär von Bedeutung, da die tief- und submontane Höhenstufe (bis 700m) weniger große Anteile einnimmt. Trotzdem werden die Fichtenbestände in den inneralpinen Tal- und Beckenlagen, im Wald- und Mühlviertel sowie auf Standorten im Voralpengebiet negativ betroffen sein.

5.2.2 Zunahme von Waldschäden

Eine Zunahme von Waldschäden ist als Folge der sich abzeichnenden Klimaänderungen im Zuge der globalen Erwärmung zu erwarten und schon bis dato erkennbar. Die *genauen* Konsequenzen sind aufgrund der unsicheren Prognosen bezüglich der Qualität und des Ausmaßes des Wandels schwer abzuschätzen. Kurzfristige waldbauliche Maßnahmen sind aufgrund der Besonderheit der Waldökosysteme (Langlebigkeit, Ortsgebundenheit etc.) enge Grenzen gesetzt.

Abiotische und biotische Störungen, vor allem durch Windwurf und durch Schädlingsbefall sind forstwirtschaftlich bereits heute relevant. Durch den Klimawandel, das Ansteigen der Temperaturen sowie den Veränderungen bei den Niederschlägen und noch viel stärker durch das Potenzial von witterungsbedingten Extremereignissen wird das veränderte Störungsregime noch deutlich größeren Einfluss auf die Waldentwicklung nehmen.

Zu den größten Risikofaktoren für die Wälder des Berggebietes zählen Extremereignisse bzw. die damit verbundene großflächige Vernichtung von Kulturen. Dabei entscheidend sind die Häufigkeit, die Dauer und die Intensität von Ereignissen wie (Spät)Frost, Sturm, Hagel, Schnee, Hochwasser, Trockenheit und dadurch ausgelöste Waldbrände. Die Sturmwurfgefahr, speziell von den flachwurzelnden Fichtenbeständen, stellt dabei eine der größten Gefahren in der Forstwirtschaft dar. Von ExpertInnen wird darüber diskutiert, ob im Zusammenhang mit dem Klimawandel eine Häufung dieser Ereignisse auftritt, bzw. schon eingetreten ist (vgl. Hochwasserkatastrophen, Sturmereignisse wie Kyrill, Paula, Lothar). Aus der Zeitreihe der Schadholzmengen ist seit Beginn der 1990er Jahre jedenfalls eine Steigerung der anfallenden Schadholzmengen ablesbar (AustroClim 2008a: 137ff, Furlinger 2009: 45).

Im engen Zusammenhang zu Windwurf-Schäden ist insbesondere mit verstärktem Auftreten von Käferkalamitäten ist zu rechnen. Für das Berggebiet sind die Fichtenborkenkäfer (Buchdrucker und Kupferstecher) besonders relevant. Es gibt jedoch auch auf Kiefern, Lärchen und einigen Laubbaumarten (Buchen) Borkenkäfer, die schwere Schäden anrichten können. Die rindenbrütenden Borkenkäfer bohren sich durch die Rinde von Bäumen und zerstören durch den Fraß der Larven und der erwachsenen Käfer das für den Baum lebensnotwendige Bastgewebe. Die meisten Borkenkäferarten sind „sekundäre“ Schädlinge, das heißt sie finden nur in kränkenden und absterbenden Bäumen bzw. in eingeschlagenem Holz günstige Entwicklungsbedingungen. Windwürfe, Schneebrüche und manchmal auch durch Insektenfraß, Immissionen oder Trockenheit geschwächte Bäume können Brutstätten bilden, von denen bei warmer Sommerwitterung eine ausgedehnte Massenvermehrung ihren Ausgang nehmen kann.

Abbildung 14: Waldschäden durch Windwurf



Anfang des Jahres 2007 verursachten die Orkanstürme „Franz“, „Kyrill“ und „Olli“ schwere Windwurf- und -bruchschäden

Quelle: Salzburger Landesregierung
<http://www.salzburg.gv.at/pic-windwurf5-bhta.jpg>

Im Zusammenspiel mit den Auswirkungen des Klimawandels (höhere Temperaturen, mildere Winter, längere Sommer) erhöhen sich die Überlebenswahrscheinlichkeit und die Reproduktionsmöglichkeiten von Schadinsekten. Borkenkäfer können, bedingt durch die höheren Temperaturen auch immer mehr Generationen pro Saison ausbilden. Gleichzeitig wird die Ausbreitung bestimmter Schädlingarten bis in größere Höhenlagen (über 1.500m Seehöhe) begünstigt. Andererseits kann aus dem gehäuften Auftreten der Schadinsekten während trockener und warmer Jahre nicht geschlossen werden, dass dies gleichermaßen auch für eine dauerhafte Klimaerwärmung gilt (Fürlinger 2009: 47, Waldwissen.net 2010d, Landwirtschaftskammer Tirol 2010a).

5.2.3 Trockenstress und Dürre

Insbesondere die Wasserversorgung wird zukünftig die maßgebliche klimatische Einflussgröße für die Produktivität von Waldstandorten und die Vitalität von Waldökosystemen sein. Dabei beeinflusst der Klimawandel die Wasserversorgung sowohl angebots- als auch bedarfsseitig. Mit steigenden Temperaturen, milderem Winter und längerer Vegetationsperiode erhöht sich der Wasserbedarf durch erhöhte Verdunstungsraten. Dazu tragen einerseits die verstärkte Transpiration der Pflanzen und andererseits die stärkere Verdunstung des Bodens selbst bei. Daraus resultiert ein geringeres Wasserangebot durch abnehmende Niederschläge während der Wachstumsperiode (vor allem für die Sommermonate werden um 15% geringere Niederschläge simuliert) reduziertes Wasserangebot aus der Schneeschmelze (dies betrifft vorrangig die mittleren Höhenlagen des Berggebietes) sowie geringerer Niederschlagsinfiltration des Bodens infolge des höheren Anteils von Starkniederschlägen und gleichzeitig wird sich dies auf den Grundwasserspiegel auswirken, der stärker schwanken oder generell niedriger sein wird.

Alle Faktoren zusammengerechnet wird allgemein mit einer *Abnahme des pflanzenverfügbaren Wassergehalts* im Boden und damit erhöhtem Trockenstress für viele Wälder gerechnet. Insbesondere während sommerlicher Trockenperioden, deren Wahrscheinlichkeit, Intensität und Länge zunehmen könnten, kann dies zu schweren Trockenschäden am Wald mit erhöhter Baum mortalität führen. Zusätzlich reagieren heimische Baumarten besonders sensitiv auf Veränderungen der Extremwerte in der Temperaturverteilung. Beispielsweise führten die Dürreschäden des Sommers 2003 zu verfrühtem Frucht- und Blattfall, Wurzelschäden und stark reduzierten Zuwächsen. Weiters verändert sich die Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Baumarten infolge der Trockenheit. Dies wurde zwischen Buche, Fichte und Tanne festgestellt. Trockenperioden können Anteilsverschiebungen bewirken. Die Analyse von Dürre-Effekten auf die Konkurrenz zwischen Baumarten wird dadurch erschwert, dass die Auswirkungen oft erst im Folgejahr bis viele Jahre danach beobachtet werden können.

Sollten Temperaturen und Niederschlagsmangel wie im Hitzesommer 2003 zukünftig regelmäßig auftreten, könnte dies die Stabilität, Funktionsfähigkeit und Produktivität vieler Wälder stark gefährden. Dabei ist die Auswirkung von Trockenstress stark von der Höhenlage abhängig, also insofern zu relativieren als auf subalpinen Lagen über 1.500m Seehöhe (mit höheren Niederschlagssummen und tieferen Mitteltemperaturen) Perioden, die in Tieflagen als Dürre wahrgenommen werden, durchaus positive Auswirkungen haben können.

Insgesamt kann der Klimawandel erhebliche negative Auswirkungen auf die heimischen Wälder nehmen. Durch Trockenstress geschwächte Waldbestände sind weiters besonders anfällig für andere Stressfaktoren (z.B. Schädlingsbefall). Extremtemperaturen können weiters direkte Hitzeschäden (Sonnenbrand) an Bäumen auslösen. Waldbrände waren in Österreich lange Zeit singuläre Ereignisse. Der Hitzesommer 2003, aber auch der Herbst 2011 haben aufgezeigt, dass lang anhaltende Hitzewellen und damit einhergehende Niederschlagsdefizite auch in den alpinen Regionen das Risiko für Waldbrände ansteigen lassen. Das Waldbrandrisiko steigert sich noch durch die teils vorhandenen hohen Durchforstungs- und Pflögerückstände. (Beierkuhnlein/Foken 2008: 210, AustroClim 2008a: 131-132, 144, ETH-Zürich 2009: 13, BMLFUW 2006a: 37).

5.2.4 Störung des Gleichgewichts von spezifischen Waldökosystemen

Für den Artenschutz erfüllen Wälder eine wesentliche Funktion. Wälder sind Lebensraum für viele gefährdete Tiere und Pflanzen. Wertvolle Biotope, wie z.B. Quellen, Fließgewässer oder Moore sind von Wald umgeben. Besonders die Sonderstandorte (alpine Hochmoore, stehende Gewässer, Augenbiete) tragen im Verhältnis zu ihrer geringen Fläche mit einem deutlich überproportionalen Anteil zur heimischen Artenvielfalt bei und werden durch die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und das Kleinklima besonders gefährdet sein. Dabei ist zu rechnen, dass es zur Verschiebung von Verbreitungsarealen und des Artenspektrums (Tiere, Pflanzen) kommt. Dies gefährdet das Gleichgewicht von Waldökosystemen (Beierkuhnlein/Foken 2008: 214, BMLFUW 2006a: 87).

5.2.5 Freisetzung von Kohlenstoff aus den Waldböden?

Die Wälder sind global und regional wichtige Kohlenstoffsinken. Der österreichische Wald stellt bislang eine Nettokohlenstoffsinke dar. Umgekehrt gibt es jedoch auch dafür Indizien, dass durch die Temperaturerhöhung die mikrobielle Aktivität von im Boden gespeichertem Kohlenstoff und Stickstoff *angeregt* wird. Dies hat zur Folge dass organisch gebundener Kohlenstoff durch die Atmungsvorgänge umgehend als CO₂ in die Atmosphäre abgegeben wird. Schon geringfügige Klimaänderungen können dazu führen, dass die Kohlenstoffspeicherkapazität *der Waldböden* abnimmt oder diese sogar von einem Kohlenstoffspeicher zu einer CO₂-Quelle wird. Durch die globale Erwärmung könnte sich demnach der Boden-Kohlenstoffvorrat der Bergwälder drastisch verringern. Dieser selbstverstärkende Effekt konnte beispielsweise mittels Modellberechnungen für drei Waldstandorte in Tirol belegt werden (Waldwissen.net 2006). Bei einer Temperaturzunahme um 1°C wird etwa 10% mehr CO₂ durch Bodenatmung freigesetzt. Bei einer Temperaturzunahme von 2°C werden sogar 20% mehr CO₂ und N₂O (Lachgas) emittiert (AustroClim 2008a: 145, BMLFUW 2008a: 16-17).

**Tabelle 3: Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft
(Zusammenfassung)**

Bereich	Günstige Effekte (+)	Ungünstige Effekte (-)
Wirtschaftswälder	Höheres Ertragspotenzial und Produktivität durch verlängerte Wachstums- und Vegetationsperiode (im Frühling), und mit ansteigender Seehöhe (alpine Regionen), Voraussetzung: Wasserverfügbarkeit! Höhenverschiebung und Anstieg der Waldgrenze (100m/Jahrzehnt); größere Vielfalt der alpinen Baumartenzusammensetzung (Laubbäume!), Edellaubbäume, subalpine Fichtenwälder (1.500-2.500m), Waldzuwachs durch Stickstoffeintrag (Düngeeffekt), diversifiziertes Holzangebot, wachsender Markt für Energieholz (z.B. Durchforstungsreserven)	Hitze- und Trockenperioden, frühere Schneeschmelze: Trockenstress bzw. mangelnde Wasserverfügbarkeit (v.a. Fichtenwälder der montanen Gebirgsstufe) potenziell: großflächiges Zusammenbrechen der Fichtenreinbestände und Gefahr der Bodenerosion, Gefahr von Extremwetterlagen, Elementarereignissen (Windwurf, Schneebruch, Waldbrände etc.) in Verbindung mit Schädlingsdruck (Borkenkäfer etc.): vermehrt Schadholzanfall; Anstieg der Waldgrenze schafft Nutzungskonflikte (Almwirtschaft) Belastung durch Schadstoffe/Ozon, milderes Klima erhöht den Nutzungsdruck durch Tourismus/Freizeitaktivitäten, volatile Holz-Preisentwicklung (u.a. bedingt durch Anfall von Schadholz)
Schutzwälder	Verlängerte Wachstums- und Vegetationsperiode, Höhenverschiebung und Anstieg der Waldgrenze (100m/Jahrzehnt), größere Vielfalt der alpinen Baumartenzusammensetzung (Laubbäume), Waldzuwachs durch Stickstoffeintrag (Düngeeffekt), Aufarbeitung von Windwurf-Kahlflächen hat zu technischen Innovationen (Gebirgsharvester, Seilzug) geführt, die die Mobilisierung auch in topographisch schwierigen Regionen erleichtert	Hitze- und Trockenperioden, frühere Schneeschmelze: Trockenstress bzw. mangelnde Wasserverfügbarkeit, Einbuße der schutzfunktionalen Wirkung des Waldes durch Extremwetterlagen, Elementarereignisse (Windwurf, Schneebruch, Waldbrände etc.) in Verbindung mit Schädlingsdruck (Borkenkäfer etc.) - Ausbreitung über 1.500m Seehöhe, Gefahr der Bodenerosion, Belastung durch Schadstoffe/Ozon, milderes Klima erhöht den Nutzungsdruck durch Tourismus/Freizeitaktivitäten
Waldökosysteme/ Sonderstandorte -		Verschiebung von Verbreitungsarealen und des Artenspektrums (Tiere, Pflanzen) gefährdet das Gleichgewicht von Waldökosystemen, Hitze- und Trockenperioden: Trockenstress bzw. mangelnde Wasserverfügbarkeit: alpine Hochmoore, stehende Gewässer, Feuchtwälder, fortschreitende Verwaldung und Verdichtung gefährdet licht- und wärmeliebende Arten, Nährstoffeinträge, milderes Klima erhöht den Nutzungsdruck durch Tourismus/Freizeitaktivitäten
Kohlenstoffspeicherung	Heimische Wälder bislang Nettokohlenstoffsenke (gesteigerte Wuchsleistung, Zunahme der Fläche, aber ohne Berücksichtigung des Waldbodenkohlenstoffs)	Potenziell abnehmende Kohlenstoffspeicherkapazität der Waldböden oder sogar CO ₂ -Freisetzung (vgl. Trocken- und Hitzejahr 2003)

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

6. Anpassungsmaßnahmen für die Forstwirtschaft im Berggebiet

Anpassungsmaßnahmen im Forstbereich stehen durch die Spezifika der Waldökosysteme (Langlebigkeit, Ortsgebundenheit etc.) vor besonderen Schwierigkeiten und Herausforderungen. Kurzfristige Anpassungsmaßnahmen sind nur partiell möglich. Umgekehrt werden durch die Aufforstungsmaßnahmen (Baumartenwahl etc.) Entscheidungen getroffen, die den waldbaulichen Entscheidungsspielraum für die nächsten Jahrzehnte determinieren werden. Diese Entscheidungen über die standortgerechte Baumartenwahl sind zu treffen, *ohne* über wichtige Details des künftigen Klimas Kenntnis zu besitzen (z.B. die räumliche und saisonale Niederschlagsverteilung etc.).

Prinzipiell lässt sich aus der Analyse der Auswirkungen des Klimawandels schlussfolgern, dass in der standorttauglichen Waldzusammensetzung eine Schlüsselstrategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels liegt. Naturnahe und auf den jeweiligen Standorten natürlich selektionierte bzw. standortgerechte Waldbestände weisen eine breitere Anpassungsamplitude auf, als künstlich begründete, standortfremde Baumartenmischungen.

Grundsätzlich sollten alle Maßnahmen getroffen werden, die die Anpassungsfähigkeit der Waldbestände erhöhen: Dazu zählt beispielsweise Baumarten entsprechend ihrer natürlichen Verbreitung anzupflanzen und, in diesem Rahmen, Baumarten mit weiten Bereichen an Temperatur- und Niederschlags- bzw. Bodenfeuchteansprüchen zu bevorzugen, die Baumartenvielfalt dem Standort entsprechend zu erhöhen (auch auf Kosten einer effizienten Holzernte). Zum größeren Artenportfolio können auch eingebürgerte Baumarten wie zum Beispiel die Douglasie beitragen. Weiters ist ein strukturreicher Bestandsaufbau (Altersstruktur, Wuchsformen) sowie die genetische Vielfalt zu fördern. Diese Maßnahmen sind auch von Vorteil, weil sie die Wiederbewaldung nach großflächigen Störungen (z.B. Windwurf, Insektenbefall) beschleunigen.

Waldbautechnisch ist der vermehrte Einsatz von trockenheitstoleranten, frühsukzessionalen und/oder wenig schattentoleranten Arten zu fördern. Weiters zeigt sich, dass starke Durchforstungen die Toleranz gegenüber sommerlichen Trockenstress deutlich erhöhen. Auch wenn zum jetzigen Zeitpunkt exakte waldbauliche Empfehlungen zur Risikominimierung nur annähernd abschätzbar sind, sollten die *bereits bestehenden* standortbezogenen Baumartenempfehlungen unter Berücksichtigung des Klimawandels überarbeitet werden.

In jedem Fall ist ein Waldumbau von Beständen mit risikobehafteten Baumarten (besonders Fichtenreinbeständen) in Mischbestände dringend erforderlich. Im Berggebiet treten diese nur vereinzelt auf (z.B. am Alpenostrand-steirische Randgebirge, im nieder- und oberösterreichischem Voralpengebiet sowie im Mühl- und Waldviertel, aber auch im Inn- und Salzachtal). Fichtenreinbestände außerhalb der klimabedingten Grenze des natürlichen Verbreitungsgebietes sind auch besonders anfällig gegenüber indirekten Auswirkungen des Klimawandels – wie dem Borkenkäfer – und Schäden durch extreme Wetterereignisse (Wind- und Schneebruch). Fichten-Mischwälder sind tendenziell weniger anfällig. Eine Vielfalt an Baumarten mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften verringert die Anfälligkeit des gesamten Waldes. Schon unter „normalen“ Verhältnissen sind Mischbestände aus ökonomischen wie ökologischen Gründen höchst sinnvoll (ETH Zürich 2009: 41, Ammer 2009: 201f).

Neben dem zunehmenden Klimastress ist der Wald vielerorts zusätzlichen Stressfaktoren ausgesetzt. Dazu zählen Luftverunreinigungen-Immissionen, Wildüberbestand, fehlerhafte Waldbewirtschaftung

und „neuartige Waldschäden“. Die Instabilität der Ökosysteme bzw. die mangelnde Widerstandskraft des Waldes setzt die Anpassungsfähigkeit an Witterungsextreme und Klimaerwärmung herab. Deshalb sind die multikausalen Waldschäden einzudämmen (AustroClim 2008a: 146).

Weitere Maßnahmen bestehen in der Ausweisung von gefährdeten Gebieten, der Schaffung von Lagerungs- und Abfuhrmöglichkeiten für Schadholz, der Werterhaltung des Holzes vor Schädlingsbefall, der Abschätzung von Waldbrandgefahren – beispielsweise erhöhen hohe Durchforstungs- und Pfelegerückstände das Brandrisiko - sowie der Entwicklung von waldbaulichen Entscheidungshilfen unter Berücksichtigung des Klimawandels.

Auch wenn die Aussagen der Meteorologen bezüglich des gehäuftem Auftretens von Extremereignissen zurückhaltend sind, ist nicht auszuschließen, dass der Klimawandel zu einer Erhöhung des Naturgefahrenpotenzials (Hochwasser, Muren, Steinschlag, Lawinen etc.) führt. Gleichzeitig kann sich der Bodenabtrag (Erosion) infolge häufigerer Starkniederschlagsereignisse erhöhen, die Hangstabilität nimmt ab. Daraus ist zu schließen, dass die Anforderungen an die Schutzwirkung des Waldes ansteigen werden. Dies gilt ganz besonders für den Objektschutz im Berggebiet (Besiedelung, Verkehrswege etc.). Gleichzeitig befindet sich der Schutzwald infolge Überalterung, mangelnder natürlicher Verjüngung sowie dem Wildüberbestand in einem teils schlechten Zustand. Vorsorgende Anpassungsmaßnahmen (Verjüngung der Bestände bzw. Beimischung von geeigneten Herkünften, sowie Pflege von jüngeren und mittelalten Beständen) sind daher in bestehende Schutzwaldsanierungskonzepte zu integrieren. Ansonsten droht durch den Klimawandel eine weitere Destabilisierung der Schutz- und Bannwälder. Unter dem Aspekt des Klimawandels ist weiters die Neuaufforstung bisher nicht bestockter Flächen in Einzugsgebieten von Wildbächen und Lawinen vordringlich. Davon sind besonders einige Bezirke mit Unterbewaldung in Westösterreich betroffen. Weiters erforderlich ist neben der pflegerischen Almbewirtschaftung die Hochlagenaufforstung zur Anhebung oder Sicherung der Waldgrenze sowie einfache technische Maßnahmen gegen Schneegleiten und Steinschlag (AustroClim 2008a: 143).

Bei spezifischen Waldökosystemen sind vor allem Feuchtgebiete wie die alpinen Hochmoore durch die bereits eingetretene und die zu erwartende Veränderung des Wasserhaushaltes massiv gefährdet. Bedroht sind paradoxerweise auch alle licht- und wärmeliebenden Arten, die von der fortschreitenden Verwaldung und Verdichtung negativ betroffen sind. Anpassungsmaßnahmen bestehen in Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen (Bewahrung von Waldrändern und Lichtungen, Tot- und Altholzanteile, Solitär bäume).

Die Kohlenstoffspeicherkapazität der Waldböden kann durch gezielte Maßnahmen verbessert werden. Die Erhaltung und Verbesserung des Humusgehaltes der Waldböden stellt eine Schlüsselvariable zur Erhaltung der Kohlenstoffspeicherkapazität der Waldböden dar. Humusverluste durch nicht angepasste Nutzungsformen und Bodenstörungen können so auf ein Minimum reduziert werden. Bewirtschaftungsmaßnahmen bestehen aus der Durchforstung (mehr Licht am Boden fördert die Umsetzung der Humusschicht) weiters über das Einbringen ökologisch wertvoller Baumarten (z.B. Tannen und generell Laubgehölze) sowie von Pionierholzarten (Vogelbeere, Espe, Birke etc.). Letztere Maßnahme erfordert jedoch eine rigorose Wildregulierung. Auf einigen Standorten ist auch eine gezielte Düngung mit Magnesium zielführend (AustroClim 2008a: 145, Beierkuhnlein/Foken 2008: 363, BMLFUW 2001: 20f).

Abbildung 15: Beispiele für Anpassungsmaßnahmen des Forstsektors



Quelle: eigene Darstellung

Anpassungsmaßnahmen können nach ihrem Ansatzpunkt (mehr reaktiv oder präventiv) in drei verschiedene Vorgehensweisen differenziert und zusammengefasst werden (nach VISUMtourism o.J.):

Symptombekämpfung

Darunter sind Maßnahmen zu verstehen die notwendig sind, um kontraproduktive Auswirkungen des Klimawandels zu kompensieren. Diese Maßnahmen wirken punktuell und werden situativ gesetzt. Sie können spontan (durch die Ökosysteme) erfolgen oder durch sektorale Akteure gesetzt werden. Im Forstsektor zählen dazu generell betriebliche Optimierungsstrategien.

Anpassungsstrategien

Anpassungsstrategien dienen der Vorwegnahme (Antizipation) des Klimawandels. Der Umgang mit Unsicherheiten muss auch darauf abstellen, dass Klimarisiken innerhalb des Berggebiets oder auch des jeweiligen Sektors etc. so gut wie möglich verteilt werden. Die standortgerechte Baumwahl und des Bestandesumbau nicht angepasster Waldbestände zählen zur Anpassungsstrategie.

Ursachenbekämpfung (Klimaschutzmaßnahmen)

Die möglichst weitgehende Begrenzung der Klimaänderung wird als Vermeidung (engl. „mitigation“) bezeichnet. Diese setzt bei der Begrenzung oder auch Rückführung der Treibhausgasemissionen an. Dazu dienen auch Innovationen zur Steigerung der Energieproduktivität und die Schließung von Stoffkreisläufen. Im Forstbereich ist die Förderung der Kohlenstofffixierung durch die Wald-Biomasse eine der wirksamsten Klimaschutzmaßnahmen.

Tabelle 4: Beispiele für Anpassungsmaßnahmen der Forstwirtschaft im Berggebiet

Bereich	Symptombekämpfung	Anpassungs(strategie)	Ursachenbekämpfung/ Klimaschutz
Wirtschaftswälder	Generell betriebliche Optimierungen, Bekämpfung von biotischen (Borkenkäfer etc.) und abiotischen Waldschäden (Trockenheit-Brände, Windbruch etc.), Beseitigung von Schadholz,	standortgerechte Baumartenwahl, Bestandesumbau (v.a. der Fichtenreinbestände entsprechend der natürlichen Verbreitung unter den „neuen“ klimatischen Bedingungen) struktureicher Bestandsaufbau, neue Baumarten (z.B. Douglasie): trockenresistent, frühsukzessional, wenig schattentolerant, Eindämmung von Verbissschäden, Vorbeugung Waldbrände (Aufarbeitung der Durchforstungs- und Pfelegerückstände) Wald-, Weidpflege, Schadstoffeinträge reduzieren, Lagerungs- und Abfuhrmöglichkeiten von Schadholz	Ersatz fossiler Brennstoffe durch Holz bzw. -produkte (als erneuerbarer Energieträger), Kohlenstofffixierung der Wald-Biomasse, Bodenpflege
Schutzwälder	Bekämpfung von biotischen (Borkenkäfer etc.) und abiotischen Waldschäden (Trockenheit-Brände, Windbruch etc.), Beseitigung von Schadholz, technische Verbauungen zur Abwehr von Elementarereignissen	Sanierung bzw. Verjüngung, Bestandesumbau, Neuaufforstung nicht bestockter Flächen, Pflegemaßnahmen, Minimierung von Wild- und Weideschäden, Schutzfunktion konzeptuell: Zusammenwirken mit anderen Landnutzungsarten + Raumplanung	Kohlenstofffixierung der Wald-Biomasse, Bodenpflege
Waldökosysteme/ Sonderstandorte	„Vernässung“ von ausgetrockneten Hochmooren	Stabilisierung der Waldökosysteme: höhere Anteile an Tot- und Altholz, Sicherung der artenreichen Waldränder, Verbuschung und Verwaldung entgegenwirken, kleinflächige Nutzung, Erhaltung von Einzelbäumen, Beseitigung der bestehenden Drainagierungen von Hochmooren	Kohlenstofffixierung der Wald-Biomasse, Bodenpflege
Kohlenstoffspeicherung	-	Bewirtschaftungsmaßnahmen, Steigerung des Humusgehalts	Bewirtschaftungsmaßnahmen, Steigerung des Humusgehalts

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

Sektoranalyse Berglandwirtschaft

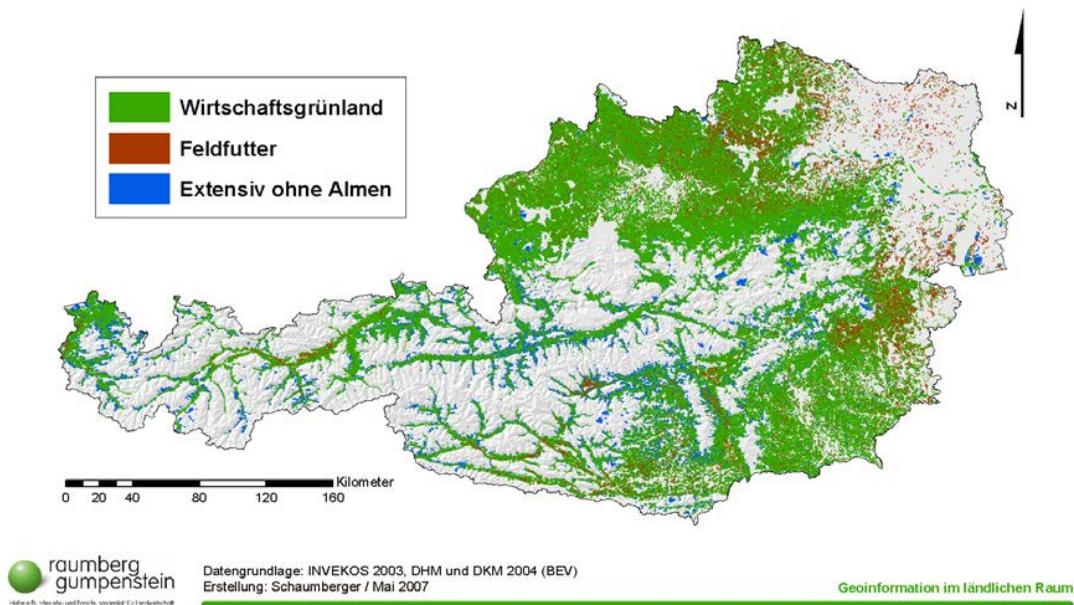
1. Kurzcharakteristik der Bergland-, Grünland- und Almbewirtschaftung

Im folgenden Abschnitt werden die Bewirtschaftungsschwerpunkte der Berglandwirtschaft skizziert, die stark naturräumlich und klimatisch bestimmt sind.

1.1 Grünlandwirtschaft und Viehhaltung als Basis der Berglandwirtschaft

Im Bergland dominiert aufgrund der naturräumlichen Verhältnisse (Höhenlage, Klima, Hangneigung) die Grünlandwirtschaft, das Dauer-, bzw. extensive Grünland (siehe Abbildung 1). Die Dauergrünlandfläche ist rückläufig, wobei sich dieser Trend durch die stetige Reduktion landwirtschaftlicher Betriebe vor allem im Berggebiet zukünftig noch weiter fortsetzen dürfte. Von der Nutzungsaufgabe sind vor allem die extensiv bewirtschaftenden Grenzertragsflächen (Almen, Bergmähder, Hutweiden, einmähdige Wiesen und Streuwiesen) betroffen, die im Vergleich zu den mehrmähdigen Wiesen und Kulturweiden deutlich weniger produktiv sind. Die Verringerung des Grünlandes erfolgt bei gleichzeitiger Nutzungsumwandlung in Wald (Hovorka 2001a: 110).

Abbildung 1: Räumliche Verteilung des österreichischen Grünlandes



Quelle: Ifz/Schaumberger 2007

In den Berglagen werden die Dauer- oder Mähwiesen je nach Lage zwei- bis dreimal, gelegentlich in den guten Tallagen (Inntal, Salzachtal, Ennstal, Mur- und Mürztal) auch viermal gemäht. Die Mehrzahl der Grünlandflächen des Berggebietes liegen zwischen 600 und 1.000m Seehöhe. Über 1.000m Seehöhe ist die Vegetationszeit bereits deutlich reduziert.

Die Bergmäher werden überhaupt nur noch jedes Jahr bzw. jedes zweite Jahr gemäht. Die steilen Grünlandfutterflächen sind oft nur mittels Spezialmaschinen zu bewirtschaften. Die Grünlandfutterflächen liegen überwiegend in südlicher Ausrichtung und die steilsten davon können oftmals nur mittels Spezialmaschinen bewirtschaftet werden. In den Berglagen wurden immer schon die Südhänge bevorzugt für die Kultivierung von Grünland gerodet, während die Nordlagen stärker mit Wald bestockt sind (Buchgraber 2007a: 1ff).

Der Ackerbau hat flächenmäßig nur (noch) eine untergeordnete Bedeutung, wenngleich er auf vielen Bergbauernbetrieben einen wichtigen Beitrag zur Selbstversorgung der Haushalte leistet. Neben der Grünlandbewirtschaftung ist die Flächennutzung vom Wald geprägt. Knapp 80% des Waldes liegen im Berggebiet. Der Flächennutzung entsprechen auch die vorherrschenden Betriebsformen - Futterbau- und Forstbetriebe (BMLFUW 2009a: 28-30).

Die Berglandwirtschaft ist durch verschiedene Faktoren, wie etwa eine verkürzte Vegetationszeit und erschwerte Bewirtschaftungsmöglichkeiten durch steile und kleinflächige Landwirtschaftsflächen geprägt. Diese Faktoren bedingen höhere Arbeits-, bzw. Produktionskosten und machen die Berglandwirtschaft im monetären Sinn wenig rentabel (Groier/Hovorka 2007a: 47). Daher wurden in der Vergangenheit viele Grenzertragsflächen aus der Nutzung genommen. Dieser Trend ist im Berggebiet regional jedoch unterschiedlich ausgeprägt. Dabei ist jedoch nicht zu übersehen, dass sich innerhalb des Berggebietes auch relative Gunstlagen, zumeist in den Tallagen, befinden.

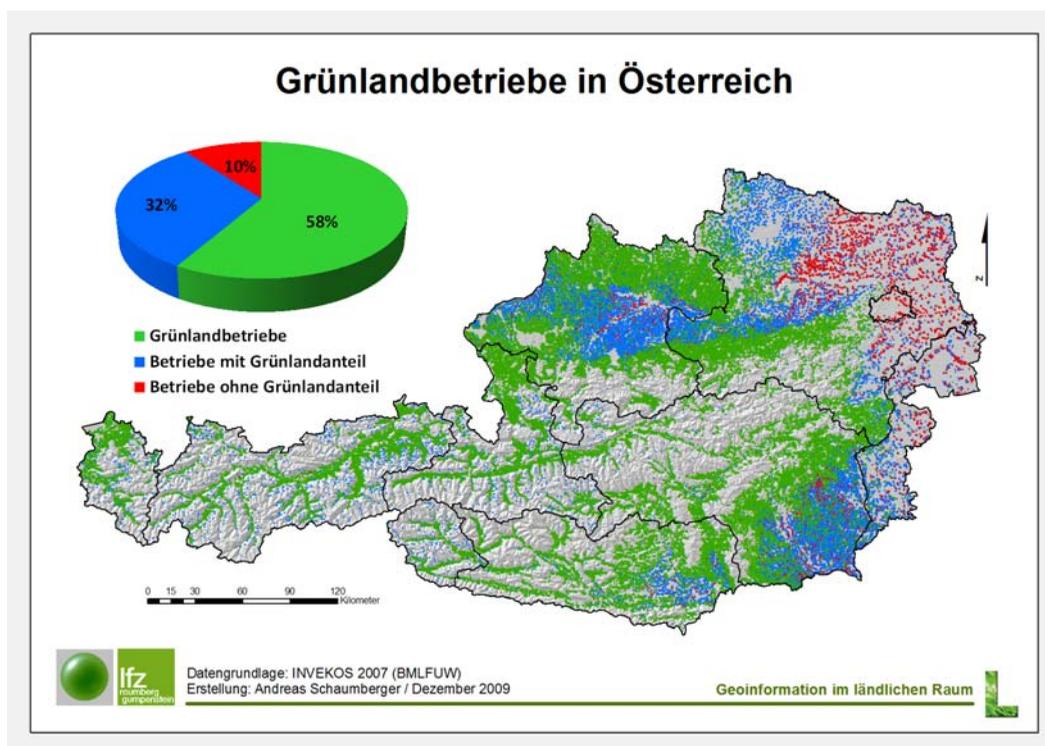
Die besondere Bedeutung der Berglandwirtschaft und der Almwirtschaft liegt in der Sicherung des sensiblen Ökosystems und der Erhaltung und weiteren Bewirtschaftung der Kulturlandschaft. Der Lebens- und Wirtschaftsraum insgesamt ist im Berggebiet von ihrer Aufrechterhaltung abhängig. Die Abhängigkeiten reichen von der Gefahrenabwehr (Schutz vor Lawinen, Muren, Steinschlag, Hochwasser) bis zur Erfüllung der Mindestbesiedlungsfunktion und der Basis für den Tourismus.

Weiters sind die Betriebe im Berggebiet auch für den Schutz des Waldes und die Bewirtschaftung der Almflächen von großer Bedeutung (Hovorka 2004a: 24). Alle diese Faktoren bzw. ihre Wechselwirkungen sind auch für die klimatischen Verhältnisse im alpinen Raum von großer Bedeutung

Die Berglandwirtschaft ist aufgrund der historischen Entwicklung und der natürlichen Bewirtschaftungserschwernisse überwiegend in Form von Familienbetrieben organisiert und durch eine kleinbetriebliche Struktur gekennzeichnet.

Bemerkenswert ist die Konzentration der Grünlandbetriebe einerseits in den Tälern im zentralen Berggebiet und andererseits im Übergang zwischen Flachland und Berggebiet (Produktionsgebiete Alpenoststrand, Voralpen, Wald- und Mühlviertel) (Abbildung 2).

Abbildung 2: Grünlandbetriebe in Österreich



Quelle: Ifz/Schaumberger 2009

Das vorherrschende Grünland des alpinen Raumes wird zur Viehhaltung genutzt. Den Schwerpunkt der tierischen Produktion bilden die raufutterverzehrenden Rinder, Pferde, Schafe und Ziegen. Rund zwei Drittel des einheimischen Rinderbestandes werden innerhalb des Berggebietes gehalten. Sehr hohe Anteile werden bei der Mutterkuhhaltung und der extensiven Rinderzucht erreicht. Hingegen liegt die Intensivmast (mit hohem Ackerfutter- und Kraftfutteranteil) überwiegend außerhalb des Berggebietes. Neben der Viehzucht ist die Milchproduktion von großer Bedeutung. Jedoch ist dabei zu beobachten, dass sich die Milcherzeugung zusehends in die Gunstlagen der Talräume des Berggebietes verlagert und bei den Betrieben mit geringer Erschwernis konzentriert. Weniger als die Hälfte der Bergbauernbetriebe haben zur Zeit noch eine Milchquote (Groier/Hovorka 2007a: 15).

Die Almwirtschaft ist integraler Bestandteil der Berglandwirtschaft. Rund 8% des Berggebietes sind von Almweiden bedeckt. Rund ein Drittel des gesamten Dauergrünlandes und 80% des ökologisch besonders wertvollen extensiven Grünlandes fallen unter diese Kategorie. Die Almen sind gerade für die Landwirtschaft in den westlichen Bundesländer Vorarlberg, Tirol und Salzburg von großer Bedeutung (Groier/Hovorka 2007a: 22, Kirchengast 2005).

1.2 Klimatische Benachteiligung der Berglandwirtschaft

Die auch klimatisch ungünstigen natürlichen Voraussetzungen der Bergbauernbetriebe – vor allem jene mit hoher Erschwernis – kommen durch die starke Hangneigung der landwirtschaftlichen Flächen, die kurze Vegetationsdauer, extreme Witterungsverhältnisse und niedrige Erträge aufgrund der kargen Boden zum Ausdruck. Hinzu treten häufig eine ungünstige innere und äußere Verkehrserschließung und eine teure Infrastruktur, die anfällig für witterungsbedingte Unterbrechungen ist. Im Berghöfekataster kommt im Merkmal Klima/Boden das regionale Kleinklima differenziert zum Ausdruck. Dabei sind die Wärmesumme und die Tagesmaxima die wichtigsten Indikatoren für die Vegetationszeit (BABF 2007a: 27, Tamme et al. 2002: 18).

Die Berglandwirtschaft bzw. die einzelnen Bergbauernbetriebe sind sehr stark witterungs- bzw. klimaabhängig. In der Vergangenheit richtete sich die Bewirtschaftung hauptsächlich nach der Standort-eignung, welche einerseits von den Bodeneigenschaften und dem Relief bestimmt wird. Diese drei Faktoren sind im Wesentlichen klimatisch bestimmt.

Der wechselnde Witterungsverlauf bestimmt hingegen seit alters her den Ablauf der Bewirtschaftung. Der im Berggebiet vorherrschende Futterbau ist von einer kontinuierlichen Wasserversorgung des Grünlandes abhängig. Umgekehrt muss für die Winterfutterbergung in nur wenigen Tagen während der Sommermonate das gesamte Grundfutter für 150-200 Tage geerntet werden. Langanhaltende Schlechtwetterperioden oder Dürrejahre wie zum Beispiel 2003 führen dazu, dass Schnitte ausfallen oder wesentlich geringeren Ertrag bringen. Vegetationsbeginn und die Schnittreife sind ganz wesentlich von der Temperatur abhängig. Dabei ist die Temperatur stark höhen- und reliefabhängig. Begünstigt oder auch benachteiligt sind beispielsweise horizontüberhöhte Südhänge, oder Föhn beeinflusste, nord-süd ausgerichtete Längstäler.

Durch die Berglandwirtschaft und noch viel stärker durch die Forstwirtschaft werden Naturgefahren, die durch extreme Wetterlagen ausgelöst werden, hintangehalten. Dadurch kann in vielen Alpentälern die Siedlungsgrenze bewahrt werden. Der Bewaldung kommt hier eine besondere Funktion zu. Neben den technischen Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung, wie der Errichtung und Instandhaltung von Ufersicherungen, Dämmen, Geschieberückhalteanlagen sowie Steinschlag- und Lawinenschutz, weiters den flächenwirtschaftlichen Maßnahmen der Schutzwälder (Hochlagenaufforstungen, Verjüngungen, Erosionssicherungen) erfüllt auch die Flächennutzung der Berglandwirtschaft Präventivwirkung. Dabei stellt die Aufgabe von Grenzertragsflächen eine eminente Gefahr dar. Die extensiv bewirtschaftenden Flächen sind am stärksten von der Bewirtschaftungsaufgabe bedroht, weil sie schwer zu erreichen und nur mit hohem arbeitswirtschaftlichen Aufwand zu bewirtschaften sind. Die jährliche Mahd von Steilflächen, die Verhinderung der Verbuschung offener Flächen, die Festigung von Narbe und Boden durch die Beweidung und der Artenreichtum (die Biodiversität) der Bergheumäher verhindern Erosion und Schneerutschungen, die auf aufgegebenen Grünlandflächen vermehrt auftreten. Umgekehrt treten jedoch auch negative Effekte durch die intensive Landwirtschaft, wie Weidetritt und Blaikenbildung, auf (Bätzing 2010: 34ff, Dörfler 1990: 292).

2. Kurzcharakteristik der Pflanzenklimatologie

Die Landwirtschaft hängt fundamental von klimatischen Faktoren ab, da Wärme, Licht und Wasser die wichtigsten Elemente sind, die das Wachstum der Pflanzen bewirken. Welche Krankheiten Pflanzen befallen können, hängt ebenso vom Klima ab, wie die Verfügbarkeit von Wasserressourcen für die Bewässerung. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Boden bzw. die Bodenbeschaffenheit.

Einer der wichtigsten Beiträge der Pflanzenwelt zum Klimasystem ist die Erzeugung und Freisetzung von Sauerstoff (O_2) und die Aufnahme (Absorption) von Kohlendioxid (CO_2) aus der Atmosphäre. Beides ist eine Folge der Photosynthese, ein Grundprozess im Leben der Pflanzen. Die Photosynthese bezeichnet die Erzeugung von energiereichen Stoffen mit Hilfe von Lichtenergie. Bei diesem biochemischen Vorgang wird zunächst mit Hilfe von lichtabsorbierenden Farbstoffen, meistens Chlorophyllen, Licht-Energie in chemische Energie umgewandelt. Diese wird dann zur Fixierung von Kohlenstoffdioxid verwendet. Aus energiearmen, anorganischen Stoffen, hauptsächlich Kohlenstoffdioxid und Wasser werden dabei energiereiche organische Verbindungen – Kohlenhydrate – synthetisiert (Wikipedia 2009a).

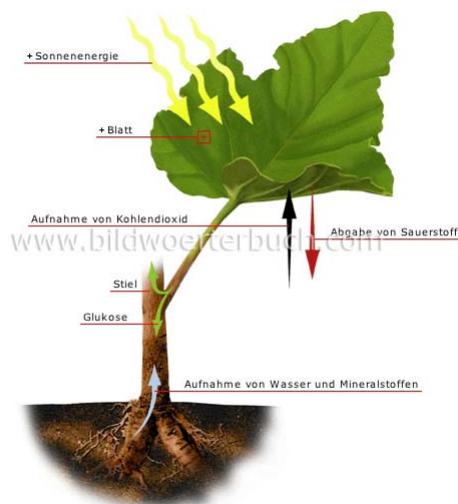
Photosynthese

Die Photosynthese der Pflanzengesellschaften ist in mehrfacher Weise von den klimatischen Bedingungen bestimmt: Die Faktoren sind Kohlenstoffdioxid, Licht, Wasser/Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Dabei gilt das Gesetz des Minimums: Wenn einer der Faktoren begrenzend wird, drosselt er das gesamte System.

Da in der Photosynthese *Kohlendioxid* fixiert wird, ist diese von einer ausreichend hohen Konzentration abhängig. In der heutigen Atmosphäre beträgt die CO_2 -Konzentration 0,03 Volumsprozent. Da C_3 -Pflanzen diese Konzentration nicht aktiv erhöhen können, ist dort der CO_2 -Level ein begrenzender Faktor für die Photosynthese.¹

Als lichtbetriebener Prozess hängt die Photosynthese naturgemäß in erster Linie von der *Lichtstärke* ab. Je höher diese ist, desto höher ist auch die Photosyntheserate einer Pflanze. Sonnenscheindauer und –intensität entscheiden unter der Voraussetzung, dass alle Wachstumsfaktoren (wie Wasser, Temperatur, Nährstoffe und Blattmasse) optimal verfügbar sind, über den Ertrag. Daher folgen

Abbildung 3: Wichtige Faktoren der Photosynthese



Quelle: Pons Bildwörterbuch

<http://bildwoerterbuch.pons.eu/pflanzenreich/>

1. Die meisten Pflanzen gehören zum Stoffwechsellyp der C_3 -Pflanzen.

die Blätter einer Pflanze dem Sonnenstand und sind möglichst senkrecht zum Licht ausgerichtet. Umgekehrt ist jedoch auch nachgewiesen, dass C_3 -Pflanzen bei zunehmender Bestrahlung eine Sättigung der Photosyntheserate zeigen. Infolgedessen bringt eine weitere Erhöhung der Lichtstärke keine zusätzliche Steigerung der Photosyntheserate.

Wasser bzw. die *Luftfeuchtigkeit* sind ein weiterer limitierender Faktor, indem der CO_2 -Einstrom in die Blätter durch die Spaltöffnungen erfolgt. Diese sind – je nach Luftfeuchtigkeit – offen oder geschlossen. Dadurch wirkt sich die Luftfeuchtigkeit indirekt auf die Photosyntheseleistung aus: Bei Trockenheit sind die Spaltöffnungen durch die Schließzellen geschlossen, um die Pflanze vor Austrocknung zu schützen. Dadurch gelangt aber auch kaum noch CO_2 in das Blatt. Die Folge ist ein eingeschränktes Pflanzenwachstum. Umgekehrt kann jedoch auch Vernässung zu Pflanzenschäden führen, wenn die Wurzeln im Wasser verrotten.

Diese kurze Beschreibung der Prozesse, die bei der Photosynthese ablaufen, zeigen, dass das Pflanzenwachstum ein komplexes Wechselspiel von mehreren Faktoren ist, die direkt oder indirekt klimatisch determiniert sind. Dabei treten limitierende Schranken unterhalb und oberhalb bestimmter Optimalbereiche auf.

2.1 Einige klimatische Einflussfaktoren des Pflanzenlebens

Zu den wichtigsten Produktions- und Standortfaktoren zählen der Boden und das Klima. Der Boden erfüllt im Naturhaushalt und für die Landwirtschaft vielfältige Funktionen. So filtert er beispielsweise Niederschlagswasser und ist Lebensraum für viele Tiere. In der Landwirtschaft sichert der Boden die Versorgung der Kulturpflanzen mit Wasser und Nährstoffen für das Wachstum und die Ertragsbildung.

Das Klima ist ein maßgeblicher Faktor für die Verbreitungsgrenze der natürlichen Vegetation (Bäume, Sträucher, Gräser) und für die Anbaueignung und –form landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. Besonders über den Wasserhaushalt (Niederschlag, Verdunstung, Bodenwassergehalt) sind Klima und Boden eng miteinander verknüpft.

2.1.1 Temperatur und Pflanzenwachstum

Das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen setzen im Allgemeinen bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt (meist bei ca. $3-5^{\circ}C$) ein. Mit zunehmender Temperatur werden die Entwicklungsvorgänge in der Pflanze (die Phänologie) beschleunigt. Dies ist bis zu einer, für jede Pflanzenart optimalen Temperatur möglich. Danach nehmen die Wachstumsraten ab, bis durch sehr hohe Temperaturen das Enzymsystem zerstört wird und der Zelltod eintritt. Die Photosyntheseraten der Pflanzen erhöhen sich dementsprechend mit steigenden Temperaturen bis zu einem Höchstwert. Um die Lebensprozesse der Pflanze aufrecht zu erhalten, wird ein Teil der von der Pflanze gebildeten Kohlenhydrate wieder veratmet. Hierbei wird Sauerstoff verbraucht und Kohlendioxid gebildet. Die maximale Produktion (Nettophotosynthese) bzw. der höchste Ertrag wird dann erreicht, wenn möglichst viel Kohlenhydrate produziert und wenig wieder veratmet werden. Beide Prozesse, Photosynthese und Atmung, sind temperaturabhängig.

Der optimale Temperaturbereich der Photosynthese liegt für die meisten Pflanzen der mittleren Breiten im Bereich zwischen 18 und 25°C. Bei diesem Temperaturoptimum sind, wenn alle anderen Faktoren ebenfalls optimal sind (Beleuchtungsstärke, Nährstoffversorgung, Wasser), die Photosyntheseraten der Pflanze am größten. Hohe Temperaturen beeinflussen die Pflanze direkt, indem sie die Verdunstungsrate mittels der Spaltöffnungen erhöhen. Sie sind über die Blätter verteilt und stellen den wichtigsten Mechanismus zur Regulation des Wasserhaushaltes nach innen und außen dar. Mit weiter steigender Temperatur nimmt die Netto-Photosynthese zunehmend ab und wird beim Überschreiten einer Maximaltemperatur schließlich eingestellt. Zur Abschätzung der Auswirkung einer Temperaturerhöhung auf landwirtschaftliche Nutzpflanzen ist es deshalb wichtig zu wissen, ob die Pflanze während der Vegetationszeit noch unterhalb oder schon über ihrem Optimalbereich liegt (Wikipedia 2009a, Chmielewski 2009: 76f).

2.1.2 Wasserhaushalt und Pflanzenwachstum

Wasser ist der Hauptbestandteil lebender Zellen. Dabei dient es nicht nur als universelles Lösungsmittel, sondern wird auch im Zellstoffwechsel hergestellt und als Substrat in der Photosynthese benötigt. Der Wasserhaushalt bzw. das Vorhandensein hinreichender Mengen ist daher eine notwendige Voraussetzung lebender Zellen und ist mehrfach durch witterungsbedingte bzw. klimatische Faktoren beeinflusst. Da Pflanzen ihren Standort nicht verlassen können, sind sie mehr als Tiere davon abhängig, mit dem zur Verfügung stehenden Wasser hauszuhalten. Pflanzen und besonders das Dauergrünland haben einen hohen Wassergehalt, da ihre Ladung tragenden Bestandteile des Cytoplasmas in hydratisierter Form vorliegen müssen. Auch für die Transportvorgänge sowie für osmotische Bewegungen und für die Photosynthese ist ein ausreichender Wassergehalt der Gewebe notwendig. Die Pflanzen nehmen das Wasser über die Wurzeln auf und transpirieren es über die Spaltöffnungen der Blätter (Wikipedia 2009c).

Die Verfügbarkeit von Wasser für das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen hängt nicht nur von der jährlichen Höhe und Verteilung der Niederschläge ab, sondern ebenso von den physikalischen Fähigkeiten des Bodens, Wasser zu speichern, von den klimatischen Verhältnissen, die die Verdunstung des Bestandes steuern und letztendlich vom Wasserbedarf der Nutzpflanzen selbst. Zwischen Biomassebildung und Wasserverbrauch der Pflanzen besteht deswegen ein enger Zusammenhang. Bei Wassermangel kommt es zu einer Einschränkung der Transpiration und damit in der Regel zu einer linearen Verminderung der Stoffproduktion. Die Folge sind Ertragseinbußen. Zwischen den einzelnen Nutzpflanzenarten ergeben sich große Unterschiede im Wasserverbrauch, die nicht zuletzt von der Wachstumszeit und –dauer sowie der Kulturart abhängig sind. Die höchsten Wasserverbrauchswerte weisen langlebige Futterpflanzen (Rotklee, Luzerne) und das Grünland auf.

Als die wichtigste Auswirkung des Klimawandels wird eine Verstärkung des Wasserkreislaufes erwartet (IPCC 2007a: 15). Eine Intensivierung des hydrologischen Zyklus bedeutet gleichsam höhere Verdunstung infolge allgemein höherer Temperaturen, wodurch die zusätzlichen Niederschlagsmengen nicht durch die Pflanze genutzt werden können. Wenn die Intensität einzelner Niederschlagsereignisse zunimmt, ist gleichfalls mit höheren oberirdischen Abflussraten zu rechnen. Stärkere Verdunstung und größere Abflussraten tragen nicht zu einer Erhöhung des Bodenwasservorrats bei, der letztendlich für das Wachstum und die Ertragsbildung der landwirtschaftlichen Kulturen entscheidend ist. Zudem ist

im Pflanzenbau die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge von Bedeutung. Wichtiger ist der Niederschlag, der im Sommerhalbjahr während der Vegetationsperiode effektiv zur Verfügung steht (Chmielewski 2009: 77f).

2.2 Klimatische und witterungsbedingte Faktoren der Grünlandnutzung

Der größte Teil der landwirtschaftlichen Nutzfläche des Berggebietes wird als Grünland genutzt. Grünland – Wiesen und Weiden – ist eine dauernde, von zahlreichen Pflanzenarten im Gemisch gebildete Grasnarbe. Das Grünfutter wird vor allem an Wiederkäuer verfüttert und bildet daher für Futterbaubetriebe die überwiegende Grundfutterquelle.² Das Grünland ist erst durch menschliche Einflüsse (deswegen auch der Begriff der Kulturlandschaft) entstanden und – bis auf wenige Ausnahmen – keine natürliche Vegetationsform Mitteleuropas. Natürliches Grünland war bei der Besiedelung des Ostalpenraumes vor rund 6.000 Jahren auf waldfeindliche Standorte (z.B. auf Weiden und Almen oberhalb der Baumgrenze) beschränkt (Hoppichler 2002: 10ff).

Hauptsächlich wird Grünlandwirtschaft in Gebieten betrieben, in denen Ackerbau aus topographischen und klimatischen Gründen, bzw. ungeeigneten Bodenverhältnissen nicht oder nur noch beschränkt möglich ist. Dauergrünland werden solche Grundfutterflächen genannt, die längere Zeit eine kurzrasige Vegetation als Dauerkultur tragen. Dauergrünland ist somit eine mindestens 5 Jahre alte Vegetationsform (Wiese oder Weide) mit relativ geschlossener Grasnarbe, die von einer Pflanzengemeinschaft aus Gräsern, Kräutern und Leguminosen gebildet wird. Grünland wird durch mehr oder weniger regelmäßige Mahd und/oder Beweidung gehölzfrei bzw. waldfrei gehalten. Dauergrünland kann absolut oder fakultativ sein. Absolutes Grünland findet sich an Stellen, die Ackernutzung nicht zulassen, fakultatives Grünland lässt auch Umbruch und Ackernutzung zu. Grünland im engeren Sinne sind Wiesen, Weiden oder Mähweiden. Es wird auch als Wirtschaftgrünland bezeichnet. Diese Flächen werden in der Regel mehr als zweimal im Jahr gemäht, abgeweidet oder bei intensivierter Nutzung siliert. Grünland im weiteren Sinne umfasst darüber hinaus Magerwiesen und –weiden, Feuchtwiesen, Trocken- und Halbrockenrasen. Dies sind ökologisch zumeist wertvolle Flächen. Die botanische Zusammensetzung von Grünland ist das Ergebnis einer bestimmten Bewirtschaftung und Nutzung am jeweiligen Standort (Dörfler 1990: 292).

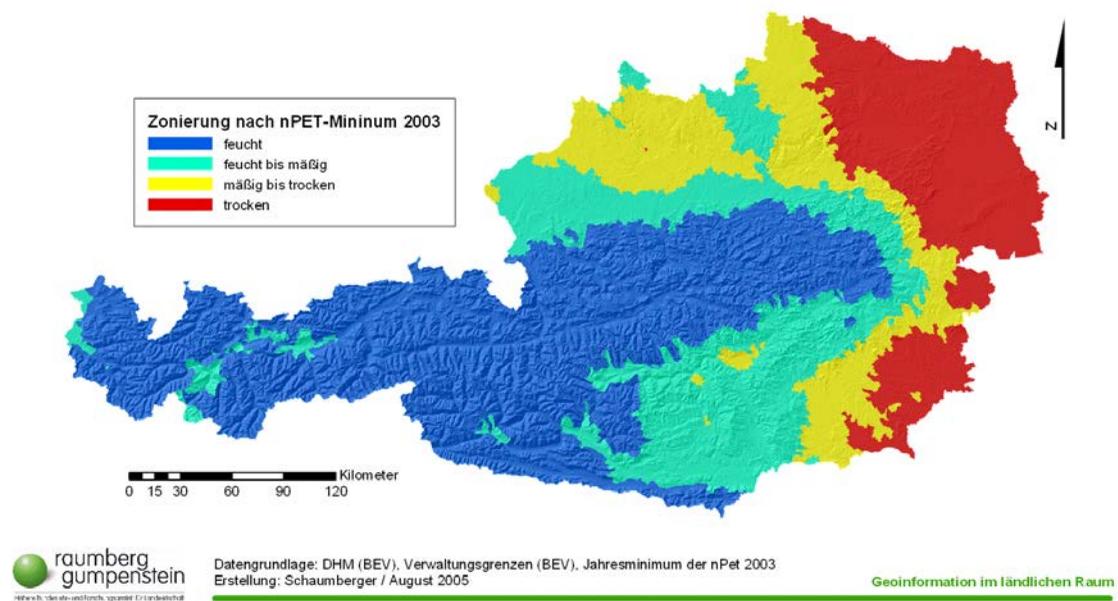
Die Grünlandnutzung ist abhängig von bestimmten Standortfaktoren, wie Wasserversorgung, Temperatur, Bodenverhältnisse, Niederschlagshöhe und –verteilung. Ob ein bestimmter Standort als Acker- oder Grünland genutzt werden kann oder auch muss, ist nicht nur von einem Faktor abhängig.

Im Allgemeinen nimmt der Grünlandanteil mit steigenden Niederschlägen zu. Dies betrifft vorwiegend die Alpentäler und Voralpengebiete. Zur Grünlandnutzung sind durchschnittliche Niederschlagsmengen von mindestens 800 bis 1.000 mm und darüber erforderlich. Auf gut wasserhaltenden Standorten mit sandig-lehmigen bis lehmigen Böden kann Grünlandwirtschaft auch noch bei 700 bis 800 mm

2. Die pflanzliche Biomasse von absolutem Grünland kann nur mit Hilfe des Wiederkäuers in menschliche Nahrung umgewandelt werden. Der besondere Wert von Rindern, Schafen, Ziegen liegt darin, dass sie für den Menschen keinen Nahrungskonkurrenten darstellen, solange sie nicht Futter erhalten, welches der Mensch auch selbst verwerten könnte.

Niederschlag betrieben werden. Durch den großen Wasserbedarf ist die Grünlandbewirtschaftung daher stark begrenzt. Auf Standorten mit Grundwasseranschluss haben Niederschläge, Bodenart und Porengefüge nur geringen Einfluss auf die Ertragsbildung, auf grundwasserfernen dagegen einen sehr hohen. Grundwasserhöhe, Niederschläge, Bodentyp und Höhenlage bestimmen die Grünlandnutzung. Dabei ist der Wasserbedarf des Grünlandes als erheblich zu bezeichnen. Er liegt während der Vegetationsperiode bei 2,2-2,5kg/m² und Tag, wobei hoch wachsende Pflanzenbestände mehr Wasser verbrauchen als kurzgehaltene. Typische Schnittwiesen haben vor jedem Schnitt einen besonders hohen Wasserverbrauch, der bis auf 3,5kg/m² und Tag ansteigen kann. Häufig genutzte Weiden haben keine ausgesprochenen Bedarfsspitzen, ihr Wasserverbrauch verläuft gleichmäßiger. Die Grünlandnutzung ist also in erster Linie eine Frage des konstanten Wasserangebotes an die Grünlandnarbe (Dörfler 1990: 292). Die folgende Graphik des LFZ/Raumberg Gumpenstein zeigt die Zonierung der potenziellen Wasserverfügbarkeit für das Grünland im Trockenjahr 2003. Nur im Alpenraum und Teilen des Mühlviertels war damals der Wasserbedarf des Grünlandes gesichert.

Abbildung 4: Wasserverfügbarkeit Grünland



Quelle: lfz/Schaumberger 2005

Mit zunehmender Höhenlage steigen Niederschläge und Strahlung an, während die Temperatur absinkt. Durchschnittlich ist im Berggebiet in Höhenlagen bis 1.000 Meter Seehöhe mit 160 Weideta- gen (knapp über 5 Monaten) zu rechnen. Sinkende Temperaturen verzögern den Beginn der Wachstumsperiode im Frühjahr. Nach Vegetationsbeginn kommt es in den Höhenlagen zu einem Wachstumsschub, der den Rückstand zum Teil kompensiert. Die Aufwuchsdauer zwischen Vegetationsbeginn und dem Erreichen der Weidereife (Aufwuchshöhe 20-25cm bei entsprechender Dichte) verkürzt sich stark. Mit sinkenden Tages- und Nachttemperaturen steigt umgekehrt der Gehalt an leicht löslichen

Zuckern (Mono- und Disacharide) in den Futterpflanzen an, das bewirkt, dass die Pflanzen weniger schnell altern (GeBl 1985: 9).

Von besonderer Bedeutung für einen erfolgreichen Weidebetrieb ist weiters eine ausreichende Wasserversorgung der Tiere selbst. Im Durchschnitt werden je GVE (500kg) täglich 50 Liter Wasser benötigt. Wassermangel führt bei Kühen zu einem erheblichen Rückgang der Milchleistung.

Für die Winterfutterbergung muss in nur wenigen Tagen während der Sommermonate das gesamte Grundfutter für 150-200 Tage geerntet werden. Dabei hat die Silagebereitung gegenüber der Heuwerbung den Vorteil größerer Wetterunabhängigkeit – Während für die Heuwerbung eine Periode von drei Tagen mit trockener Witterung erforderlich ist, genügt bei der Silierung eine Zweitageperiode. Beim Trocknen von Gras müssen große Mengen Wasser an die Umgebungsluft abgegeben werden. Die Aufnahmefähigkeit der Luft steigt mit der Erhöhung der Lufttemperatur und bei Senkung der relativen Luftfeuchte. Bei der Bodentrocknung wird die natürliche Sonnenergie, die die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft und die Gutstemperaturen erhöht, zum Trocknen des Futters genutzt. Zur Senkung des Wetterrisikos wird die Trocknung mittels mechanischer Bearbeitung wie Zetten, Wenden und Schwaden unterstützt (Dörfler 1990: 314ff).

Wiesen und Weiden erfüllen wichtige ökologische Funktionen wie Boden-, Hochwasser- und Trinkwasserschutz, sie bieten einer breiten Artenvielfalt an Pflanzen und Tieren Lebensraum. Die Klimaschutzwirkung des Grünlandes ist dabei mehrdimensional: Die Bodenabträge sind unter Grünland gering. Im Vergleich dazu übersteigen jene der Ackerflächen sie um ein Vielfaches. Weiters speichert Dauergrünland durch Bewuchs und Boden deutlich mehr Wasser als Ackerflächen. Nach dem Abklingen der Niederschläge verdunstet dieses Wasser wieder. Im Vergleich zu Ackerland ist der Oberflächenabfluss von Dauergrünland nur halb so hoch. Wiesen und Weiden dienen daher auch dem vorbeugenden Hochwasserschutz. Eine weitere wichtige Funktion ist der Humusanteil des Bodens (unter dem Dauergrünland). Dadurch werden große Mengen von Kohlenstoff gebunden („Kohlenstoffsénke“). Hingegen entweicht der Kohlenstoff, wenn Grünland umgebrochen und in Ackerfläche umgewandelt wird (Ruppaner 2010: 27).

2.3 Klimatische und witterungsbedingte Faktoren des Feldfutterbaus

Neben der Grünlandnutzung hat nur noch der Feldfutterbau (Klee, Luzerne, Klee gras, Wechselgrünland) im Berggebiet eine größere Bedeutung. Die kleeartigen Futterpflanzen und ihre Mischungen mit Gräsern nehmen nach dem Silo- bzw. Grünmais und neben den Futterrüben auch heute noch die wichtigste Stellung im Feldfutterbau ein. Die verschiedenen Kleesorten gedeihen am besten im kühleren, gemäßigten Klima mit hoher Luftfeuchtigkeit. Kurze Trockenzeiten können sie wegen des tiefreichenden Wurzelwerks gut überstehen. Im Allgemeinen werden Nässe und Kälte besser vertragen als langanhaltende Trockenheit. Es gibt jedoch auch Kleesorten, die trockenere Bedingungen vorziehen und höhere Wärmeansprüche haben.

Die ertragreichste Futterpflanze der trockeneren und wärmeren Gebiete sind die Luzerne. Sie bevorzugen warmes, sonnenscheinreiches, vorwiegend trockenes Klima. Die Einsatzmöglichkeiten in der Tierernährung sind vielfältig. Die Pfahlwurzeln dringen rasch tief in den Boden ein, bei genügender

Durchlässigkeit des Bodens bis zu einer Tiefe von über zwei Meter. Ihr Hauptvorteil im Feldfutterbau liegt in der Trockenheitsverträglichkeit (Dörfler 1990: 264ff).

2.4 Klimatische und witterungsbedingte Faktoren der Almwirtschaft

Die Grundlage der Almwirtschaft beruht darin, dass die naturräumlichen Verhältnisse den Menschen dazu zwingen in der kurzen Zeit zwischen Frühjahr und Herbst soviel Nahrung zu erzeugen, dass damit der lange Winter, der oft sechs Monate dauert, überstanden werden konnte. Da die Flächen im klimatisch günstigen Talbereich meist relativ klein sind und häufig nur 10-15% der Gesamtfläche ausmachen³, müssen die höheren Vegetationsstockwerke systematisch mitgenutzt werden. Dort ist die Vegetationszeit wesentlich kürzer und beträgt bereits im subalpinen Stockwerk häufig weniger als hundert Tage. Ausgeglichen wird die niedrige Produktivität durch die sehr großen Flächen, die hier oberhalb der Waldgrenze zur Verfügung stehen und deshalb relativ leicht genutzt werden können. Hauptproduktionsort und –zeit der Viehwirtschaft ist der kurze Hochsommer auf der Alm, der so produktiv sein muss, dass mit seinen Erträgen seinerzeit der lange Winter durchgestanden werden konnte. Diese Ergänzungsfunktion der Almflächen zur Heimfutterfläche ist bis heute erhalten geblieben. Wiesen und Weideflächen können zur Futtergewinnung für die Wintermonate intensiver genutzt werden. Und dies erlaubt auch einen höheren Viehbestand, der ohne die Almwirtschaft nicht möglich wäre. Die Almproduktion wird durch eine naturräumliche Eigenschaft positiv beeinflusst: Zwar nimmt mit der Höhe das Längenwachstum der Pflanzen und damit auch die Quantität des Ertrages ab, aber die Qualität steigt an. Dies liegt darin, dass Kräuter und Gräser in dieser Höhenstufe einen erheblich höheren Energieumsatz haben als Flachlandpflanzen, weil die Sonneneinstrahlung durch die dünnere Atmosphäre erheblich weniger gefiltert wird und dadurch viel stärker ist. Der Protein- und Fettgehalt der Pflanzen nimmt mit der Höhe zu, und dies macht die Pflanzen für die Wiederkäuer schmackhafter, nahrhafter und leichter verdaulich.

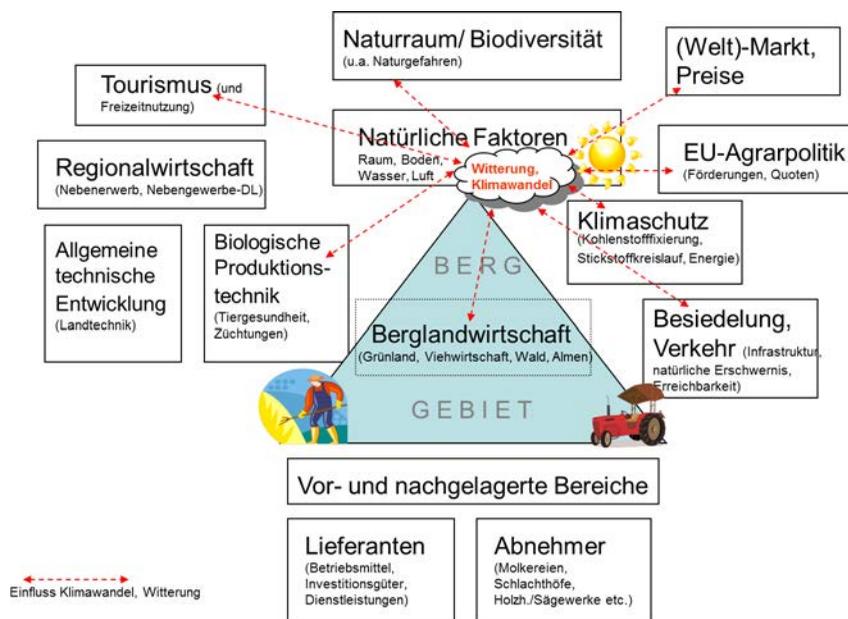
Im Mittel liegt die Waldobergrenze im Ostalpenraum bei 1.900m Seehöhe. Je höher die Waldobergrenze, desto günstiger die klimatischen Bedingungen für die Vegetation und für die landwirtschaftliche Nutzung. Deutlich zeigt sich die Benachteiligung der feuchten Alpenränder v.a. des Alpennord- und Ostrandes (Waldgrenze 1.500–1.600m) sowie die Bevorzugung der inneralpinen Regionen (Waldgrenze bis über 2.000m Seehöhe). Diese Waldobergrenze ist weithin keine natürliche, sondern von Menschenhand geschaffen und durch die systematische Ausweitung der Almflächen auf Kosten der Waldfläche entstanden. Als Ergebnis der Rodung durch die Landwirtschaft ist die Waldgrenze nach unten gedrückt worden und die klimatische und die tatsächliche Waldgrenze klaffen um mehrere hundert Meter auseinander. Zusätzlich wurde die Biodiversität der Alm- und Bergmäher durch die regelmäßige Beweidung und Bearbeitung verändert. Während auf nicht genutzten alpinen Rasen ungefähr 70% Gräser und 30% Kräuter wachsen, ist das Verhältnis auf beweideten Almflächen etwa umgekehrt. Die Erschließung der Almregion durch den Menschen führte also nicht nur zu einer erheblichen Vergrößerung der alpinen Matten, sondern auch zu einer starken Veränderung der Vegetationsdecke. Sie sind zur Kulturlandschaft geworden und stehen im Zeichen des Klimawandels vor tief-greifenden Veränderungen (Bätzing 2003: 48f, 80ff).

3. Vielerorts konzentrieren sich selbst die Talflächen überhaupt nur auf nicht zu steile, südexponierte Hänge.

3. Auswirkungen des Klimawandels auf die Berglandwirtschaft

Die Berglandwirtschaft ist von vielen natürlichen Faktoren abhängig. Dazu zählen auch die Witterung und die Verschiebung von klimatischen Parametern (Temperatur, Niederschlag etc.) in Folge des Klimawandels. Daneben steht der Sektor aber auch in einem Kontext von unterschiedlichen gesellschaftlichen und ökonomischen Faktoren. Die Auswirkungen des Klimawandels müssen daher auch in Wechselwirkung mit diesen Faktoren betrachtet werden. Abbildung 5 skizziert cursorisch einige dieser Zusammenhänge.

Abbildung 5: Klimawandel und die Einflussfaktoren auf die Berglandwirtschaft



Quelle: eigene Darstellung

3.1 Günstige Effekte

Vom Klimawandel kann die Berglandwirtschaft durchaus profitieren, da die bestehende klimatische Ungunst abgemildert wird. Gleichzeitig könnten damit aber auch Intensivierungseffekte auf den guten Standorten verbunden sein.

3.1.1 Verlängerung der Vegetationsperiode

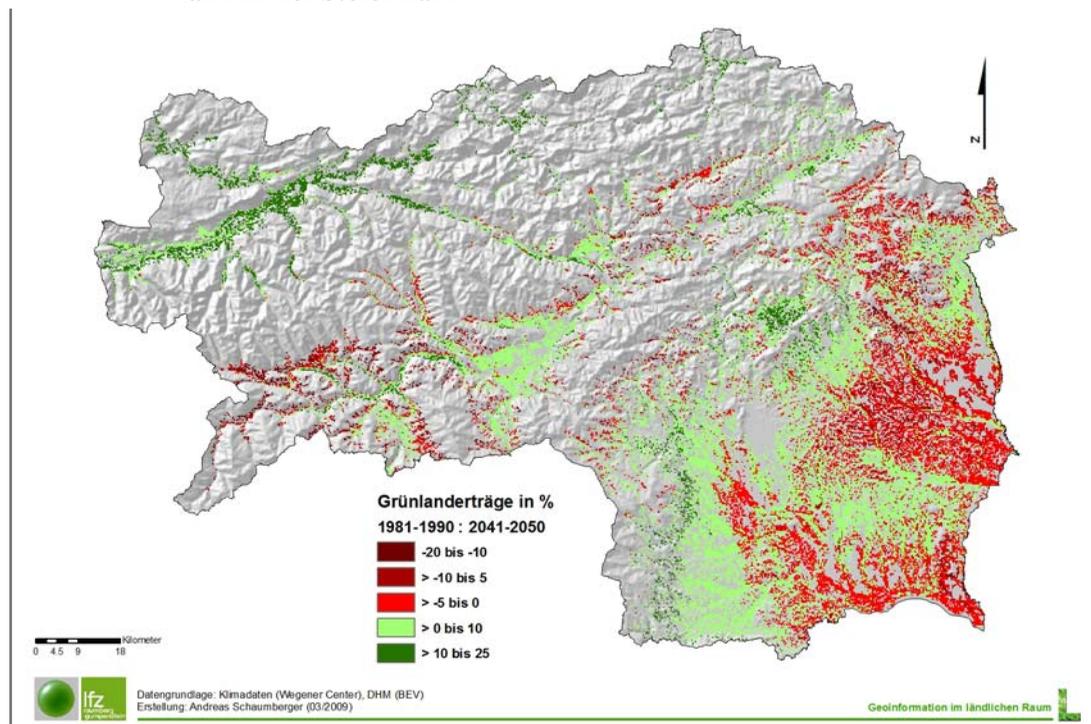
Mit dem Temperaturanstieg verbunden, ist eine Verlängerung der Vegetationsperiode in die Frühlings- (März-April) und Herbstmonate (Oktober-November) hinein. Die längere Vegetationsperiode verkürzt die winterliche Ruheperiode der Vegetation. Mit der Verlängerung der Vegetationsperiode ist eine Zunahme der potenziell verfügbaren Feldarbeitstage verbunden. Ein weiterer Effekt ist, dass die Arbeitsspitzen immer früher im Jahr anfallen werden.

Entscheidend ist der Faktor „Schneebedeckung“, deren Mächtigkeit sich zusehends in den Spätwinter verlagert, vor allem für die Hochlagen, weil sich dadurch die Bearbeitung der Felder und Wiesen bzw. die Bestoßung der Weiden beträchtlich verzögern kann und von Jahr zu Jahr differieren wird. Andauer und Mächtigkeit der Schneedecke sind auch für den Bodenwasserhaushalt des Frühjahrs von großer Bedeutung. Mit der Abnahme der Anzahl der Frosttage sinkt auch das Risiko von Frostschäden, wobei im Falle eines früheren Vegetationsbeginns die Gefahr von Spätfrostschäden eher ansteigt (AustroClim 2008a: 96, Gobiet et al. 2009: 69, OcCC 2007: 44).

3.1.2 Erhöhung des Ertragspotentials, Steigerung der Produktivität

In der Grünlandwirtschaft (Wiesen, Weiden, Almen) bedeutet der frühere Beginn der Vegetationsperiode eine Zunahme der Ertragssicherheit, da der erste Schnitt bereits im Frühling angesetzt werden kann. Die potenzielle Jahresproduktion des Grünlandes wird daher zunehmen, der potenzielle Ernteertrag wird, bei ausreichendem Wasser- und Nährstoffangebot, steigen. Damit verbunden ist eine Steigerung der Nutzungsintensität. Die Tierproduktion kann durch die Ertragssteigerungen und die verlängerte Weideperiode nachhaltig profitieren (AustroClim2008a:87f, Eitzinger et al. 2008: 103, OcCC 2007: 46).

Abbildung 6: Ertragsänderung - Relative Änderungen des Jahresbruttoertrages im Grünland in der Steiermark



Quelle: Ifz/Schaumberger 2009

Für das Bundesland Steiermark wurden die veränderten Ertragsänderungen im Grünland simuliert⁴ (siehe Abbildung 6). Es zeigt sich, dass das Salzkammergut, das Ennstal aber auch die Grünlandgebiete der Koralpe von den höheren Temperaturen und der längeren Vegetationsperiode profitieren und mehr Ertrag erwirtschaften können. Für die inneralpinen Lagen-, sowie andere Standorte an der Südabdachung von Alpenhauptkamm und Randgebirgen gilt dies nicht uneingeschränkt.

Der Befund einer verlängerten Vegetationsperiode im gesamten Alpenraum wird durch einige Regionalstudien zusätzlich illustriert, aus denen in der Folge zitiert wird: So zeigten regionale Befragungen im Großen Walsertal, dass sich die Vegetationsperiode schon jetzt um rund zwei Wochen verlängert hat. Damit verbunden ist ein früherer Weidegang des Viehs. Auf den Schattenseiten (den Nordhängen) kann in wärmeren Jahren ein zusätzlicher Schnitt gemacht werden. Im Salzburger Lungau sind die Tage mit Temperaturen über 25 Grad sprunghaft angestiegen. Dadurch ist ein guter dritter Schnitt möglich geworden. Beobachtet wird auch, dass Marillenbäume, die bisher nur als Spalierbäume (an den Hausmauern) gezogen werden konnten, nun freistehend gedeihen. In der Weststeiermark setzt die Apfelblüte immer früher ein. Im Herbst wird später gepflügt (Gappmaier 2009: 43ff, Furlinger 2009: 15-20, Burger-Scheidlin et al. 2009: 261-265).

Das Berggebiet, vor allem die alpinen Becken und Täler, kann von besseren klimatischen Bedingungen profitieren, vor allem bei ausreichender Wasserversorgung. In den bisher feuchteren Lagen können die erwarteten geringeren Niederschläge im Sommer kompensiert werden. Extensives Grünland und die Almen könnten künftig produktiver genutzt werden. Dies ist jedoch unter der Einschränkung der Bodenqualität und der Nährstoffversorgung zu sehen. Der intensivere Bewuchs könnte so in höhere Lagen wandern - Glatthafer, Knautgras, Wiesenschwingel, aber auch Luzerne können gedeihen. Letztere sind trockenresistent und vergleichsweise sehr ertragsstark (Gobiet et al. 2009: 71).

Es zeichnet sich ab, dass der erste Aufwuchs der ertragreichste des Jahres sein wird, weil er von der Winterfeuchtigkeit am meisten profitieren kann. Die folgenden zweiten und dritten Schnitte schwanken je nach Ausmaß der Niederschlagsspende. Bei Auftreten von Trockenperioden fällt die Ertragskraft ab. Seicht-gründige, schottrige, lehmige Sandböden in südlicher Exposition könnten unter den Folgen von Dürreperioden leiden. Tiefgründige Braunerden haben bei der Wasserversorgung hingegen eine günstigere Voraussetzung. Weiters beeinflusst die Nutzungstiefe die Wüchsigkeit. Hochgemähte Wiesen sind trockenresistenter als Kurzrasen (Landwirtschaftskammer Tirol 2008a: 1).

Gobiet et al. (2009: 70) beziffern die Verlängerung der durchschnittlichen Weideperiode in den besseren Lagen des Grünlandes mit etwa 14 Tagen (für 2041-2050). Skeptischer sind sie mit den Ertragsersparungen für die höheren Lagen: Diese würden zwar auch von den höheren Temperaturen profitieren jedoch würden die limitierenden Faktoren Boden und Nährstoffversorgung zu keinem ertragssteigernden Wachstum führen. Die Nachweide verlängert sich in den Spätherbst hinein, früher war dies bis Mitte Oktober üblich. In günstigen Jahren ist sie schon jetzt bis in den November hinein möglich.

4. Dabei wurde der Schwerpunkt für die Abschätzung der Ertragsentwicklung im Grünland auf die Veränderungen der Wasserverfügbarkeit gelegt. Mittels eines Bodenwasserbilanzmodells wurde basierend auf Klimaszenarien (MM5: reclip:more) die Ertragsentwicklung räumlich simuliert (Gobiet et al. 2009: 91).

3.1.3 Günstiger Effekt? - Intensivierung der guten Standorte

Eine Folge des Klimawandels in der Grünlandwirtschaft ist die problematisch einzuschätzende (weitere) Intensivierung der besten Grünlandlagen. Eine Untersuchung im steirischen Ennstal kam zum Schluss, dass schon unter den gegenwärtigen, günstigeren Klimabedingungen Ertragsoptimierungen antizipiert werden. So liegt die Schnitthäufigkeit im Talraum bei vier und in den Bergregionen bei drei Schnitten. Dieser intensiven Nutzung wird mit Übersaaten entgegengewirkt. Die Verlängerung der Vegetationsperiode in Kombination mit den Nutzungsterminen, die in der Grünlandwirtschaft immer häufiger früher stattfinden verringert die Artenvielfalt (Stichwort: „Verschwinden der bunten Blumenwiesen“) (StartClim2009.A 2010a).

Unter den erwarteten günstigen klimatischen Bedingungen wird Ackerbau bis auf 1.000 Meter Seehöhe wirtschaftlich sinnvoll, regional auch noch höher. Die Umwandlung von Grünland zu ackerfähigen Flächen ist eine mögliche Folge. Dabei ist die Aufnahme des Silomaisanbaus eher wahrscheinlich als der Getreide- und Kartoffelanbau.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass ackerbaulichen Nutzungen der Hanglagen sowie kleinräumig strukturierten Landschaften ökologisch (schlechte Bodenverhältnisse) wie technisch enge Grenzen gesetzt sind. Die Anlage von Dauerkulturen (Obst- und Weinbau) der Gemüse- und Beerenanbau, sowie die Kräuterproduktion können in diesen Lagen – ähnlich wie in Südtirol eine interessante Produktionsnische darstellen (Eitzinger et al. 2008: 103, StartClim 2008.D 2009a: 42).

Die energetische Verwertung auf Basis Gülle, Grünschnitt, Heu und Grassilage findet günstigere Voraussetzungen für eine wirtschaftliche Nutzung. Die Biogaserzeugung mittels hofeigenem Dünger oder die direkte Nutzung des Grünlandaufwuchses oder von Hackschnitzel bietet eine mögliche Perspektive für Grünlandbetriebe des Berggebietes. Gleichzeitig besteht jedoch die Gefahr von Intensivierungsschritten wie ein höherer GVE-Besatz, der Verdrängung des Wirtschaftsdüngers etc. (ARGE Kompost & Biogas 2005: 13ff, StartClim 2008D 2009a: 43).

3.1.4 Bessere Rahmenbedingungen für die Almwirtschaft

Die Entwicklungen in der Almwirtschaft im Zeichen des Klimawandels laufen entlang bestehender Trends, die sich einerseits durch Nutzungsintensivierung (z.B. auf Niederalmen) und andererseits durch das Einstellen oder die Extensivierung der Bewirtschaftung äußern (Groier/Hovorka 2007a: 22, Kirchengast 2005). Auch auf den Almen hat sich die Vegetationsperiode bereits verlängert. Ausdruck dessen ist nicht zuletzt, dass die kurzen Wintereinbrüche, die es während der Sommermonate auf den Hochalmen immer wieder gegeben hat, seltener geworden sind.

Abbildung 7: Septemberschnee auf der Alm



Sommerliche Kaltlufteinbrüche mit Schneefällen sind in den letzten Jahrzehnten deutlich seltener geworden

Quelle: Wetteronline (Jürgen Vollmer)

Längere Vegetationszeiten könnten für das Vieh ausgedehntere Weide- bzw. Alpungszeiten mit sich bringen. Bislang dauert die Almsaison drei Monate lang ca. von Juni bis August. In Zukunft könnte sie sich bis auf fünf Monate ausdehnen. In der Schweiz beispielsweise ist wegen der früheren Ausaperung der Alpweiden die Alpbestoßung heute 15 Tage früher möglich als noch vor 30 Jahren (OcCC 2007: 44). Eine ähnliche Tendenz ist für den Ostalpenraum anzunehmen.

Ein Effekt der Almbewirtschaftung war, dass durch Beweidung und Pflegemaßnahmen die Waldgrenze „künstlich“ niedrig gehalten wurde. Niedriger, als sie es ohne menschliche Eingriffe (Stichwort: „Offenhaltung der Kulturlandschaft“) wäre. Günstigere Wetter- und Klimaverhältnisse könnten dazu führen, dass die Baumgrenze ansteigt. Aus Untersuchungen ist bekannt, dass es einen Zusammenhang zwischen der Höhe der Waldgrenze und den vorherrschenden mittleren Temperaturen gibt. Bei einer mittleren Erwärmung von 2°C könnte sich die Baumgrenze von derzeit im Mittel rund 1.970m auf etwa 2.415m verschieben (Formayer et al. 2008a: 18). Untersuchungen zeigen, dass sich derzeit über der Waldgrenze sehr häufig Bäume mit einem Alter von bis zu 20 Jahren finden. Dies stellt ein Anzeichen für die Klimaerwärmung dar. Die Höhenentwicklung wird mit rund 2,5m pro Jahr errechnet. Die Zeitspanne vom Vorkommen einzelner Bäume bis zur Bildung eines dichten Waldbestandes erstreckt sich jedoch noch länger (Lackner 2008: 7ff).

Die Almbewirtschaftung steht aus den angeführten Gründen in direkter Konkurrenz zur Nadelwald- und Krummholzzone. Es zeichnen sich Anteilsverschiebungen zwischen den Weide- und Waldflächen

ab. Schon bis dato ist eine rapide Zunahme von Fichte, Erle und Latsche auf den Almweideflächen und darüber hinaus zu verzeichnen. Diese verwaldeten und verwilderten Flächen tragen zu einer *Verringerung* der Artenvielfalt bei und nehmen negativen Einfluss auf die Biodiversität. Dem Verwaltungsprozess wird durch Schwenden der holzigen Pflanzen (zur Flächenfreistellung) und der Pflegemahd begegnet. Die Nutzung des selektiven Bissverhaltens von Rindern, Schafen, Ziegen und Pferde – diese verschmähen Blätter, Rinde, Triebe und Knospen nicht - kann das Offenhalten der Almflächen ebenfalls günstig beeinflussen. Fraglich ist die Entwicklung der zukünftigen Nutzungsintensität der Almen und Alpen. Diese ist von verschiedenen Faktoren abhängig (Agrarstrukturwandel, Fördersystem etc.).

Ein höherer Verwaltungs- und Verwilderungsgrad wirkt sich auch negativ auf das Speicherverhalten der Böden aus. Quell- und Nutzwasser wird vom Waldboden vermehrt gespeichert und zurück gehalten. Daraus kann sich eine prekäre Situation bei der Versorgung mit Trinkwasser ergeben. Der sukzessive Gletscherschwund kann sich ebenfalls negativ auf die Wasserversorgung einzelner Almen auswirken – ein für die Bewirtschaftung von Almen ganz entscheidender Faktor, da speziell Rinder große Mengen an Wasser benötigen. Durch heiße, regenarme Sommer, wie jener im Jahr 2003, kann es dazu kommen, dass Quellen nicht nur vorübergehend sondern gänzlich versiegen (Kirchengast 2005: 39).

Bei den Pflanzengesellschaften ist zu beobachten, dass begünstigt durch wärmere Temperaturen, unerwünschte Arten wie Almampfer und Germer sich immer höher ausbreiten. Extrem- und Elementarereignisse (Starkregen, Hagel, Blitzschlag, Rutschungen, Steinschlag, Lawinen etc.) können auch die Alminfrastruktur (Almgebäude, Wege, Zäune, Weideflächen) gefährden. Durch die Zunahme von Schadensereignissen (vgl. Wind- und Schneebrüche der vergangenen Jahre) ist in unwegsamen Almgebieten, wo die Holzbringung problematisch ist, der Schädlingsdruck (Borkenkäfer) angestiegen (Formayer et al. 2008a: 18, Lackner 2008: 7ff).

3.2 Ungünstige Effekte

Ungünstige Effekte liegen primär in der Alternativlosigkeit der alpinen Grünlandwirtschaft. Weiters ist zu befürchten, dass die Ertragsschwankungen, ausgelöst durch Wetterkapriolen, zunehmen werden.

3.2.1 Alternativlose Grünlandwirtschaft

Die Grünlandwirtschaft als Dauerkultur stellt im Berggebiet oft die einzige Möglichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung dar. Das Anpassungspotential der Grünlandwirtschaft ist daher deutlich geringer einzuschätzen als jenes im ackerbaubetonten Flachland. Da das Grünland aus mehrjährigen Pflanzen besteht und eine Umstellung der Pflanzenzusammensetzung ein langfristiger Prozess ist, bzw. mit hohen Investitionskosten verbunden ist, gibt es wenig Spielraum für Anpassungsmaßnahmen. Hinzu treten wenig beeinflussbare Rahmenbedingungen des Berggebietes wie Bodeneigenschaften, Topographie und Landnutzungsbeschränkungen. Alle diese Faktoren lassen einen Umstieg von Grünland auf Ackerwirtschaft in vielen Fällen nicht zu (Formayer et al. 2008a: 21, AustroClim 2008a: 102).

3.2.2 Zunahme der Ertragsschwankungen, Wasserknappheit

Die einschlägigen Studien sprechen davon, dass in der Landwirtschaft die Ertragsschwankungen von Jahr zu Jahr zugenommen haben und bedingt durch den Klimawandel auch weiter zunehmen werden. Die Prognosen für den Alpenraum gehen davon aus, dass künftig mit geringeren Niederschlägen im Sommerhalbjahr, also während der Wachstumsperiode und höheren Niederschlagsspenden im Winter zu rechnen ist. Darüber hinaus ist mit einer Zunahme einerseits von Trockenperioden und andererseits von Starkniederschlägen zu rechnen. Ein höheres Temperaturniveau steigert gleichzeitig die Verdunstung. Alle diese Faktoren bedingen, dass höhere Ertragsschwankungen als in der Vergangenheit auftreten könnten. Neben der Erhöhung des Ertragspotenzials kann dies auch zu Ernteausfällen führen.

Für das Grünland ist die ausreichende Wasserversorgung die entscheidende Variable. Grünland hat einen äußerst hohen, kontinuierlichen Wasserbedarf. Der Ertrag ist daher stark von der Niederschlagsspende abhängig. Die Untergrenze des Dauergrünlandes liegt bei 800mm jährlich. Bessere Aufwüchse sind mit Niederschlagsspenden um oder über 1.000mm zu erreichen, wobei die Verteilung innerhalb der Wachstumsperiode natürlich ebenfalls ein wichtiger Faktor ist. Die effektive Wasserverfügbarkeit des Bodens (Bodenwasserbilanz unter Berücksichtigung der höheren Verdunstung) wird ein für den Standort entscheidender Faktor sein. Auch die Gründigkeit des Erdbodens ist naturgemäß von Bedeutung (kristallin, kalkhaltig usw.).⁵ Wasserknappheit führt bei den Futterpflanzen zu Wachstumsstillstand, in weiterer Folge zu lückigen Beständen, in letzter Konsequenz zum Totalausfall („Ausbrennen“). Schnittausfälle, vor allem die ersten ertragreicheren, sind im Jahresverlauf nicht mehr wettzumachen. Verstärkt betrifft diese Problematik südlich ausgerichtete Lagen und seichtgründige Böden. Treten wiederholt trockene und heiße Sommer auf, so wird sich das Grünland aus diesen Gebieten zurückziehen. Fettwiesen wandeln sich so zu Trockenrasen (AustroClim 2008a: 102, OcCC 2007: 47, Diepolder 2007: 7).

Die Untersuchungen im Rahmen von StartClima 2004 haben gezeigt, dass das Grünland von den vier dabei untersuchten Kulturarten *am stärksten* vom Hitzesommer 2003 betroffen war. Im Rahmen der Auswertungen konnten für alle untersuchten Kulturarten auf der Basis von Regressionsmodellen die voraussichtlichen Ertragsminderungen bei bestimmten Niederschlagsreduktionen und Temperaturerhöhungen zu bestimmten Zeiten des Auftretens abgeleitet werden. Dies lässt Rückschlüsse auf künftige, zu erwartende Trockenperioden zu. Erschwerend tritt hinzu, dass die Schnittigkeit des Dauergrünlandes in der Hauptsache von den Niederschlägen der Monate Mai bis Juli bestimmt werden. Gerade die Sommerniederschläge erscheinen aber im Lichte der zukünftigen Klimaszenarien für den Alpenraum als hochvolatil (StartClim2004 2005: 24ff).

Mit der stärkeren Sonneneinstrahlung in Zusammenhang steht die Gefährdung des Aufwuchses durch die Gülle-Ausbringung - Dabei können Verätzungen und Verbrennungen am Grünland entstehen. Die befragten LandwirtInnen aus dem Großen Walsertal in Vorarlberg äußerten die Meinung, dass der Gülleinsatz behutsamer erfolgen müsse, als in der Vergangenheit. Beobachtet wurden in dieser Region außerdem die abnehmende Wasserführung der Bäche und die geringere Quellschüttung (vor allem im Hitzesommer 2003) bei ansonsten noch ausreichenden Niederschlägen. Damit verbunden waren Pro-

5. Die Gründigkeit bestimmt u.a. das Speichervolumen für Wasser und Nährstoffe.

bleme bei der Wasserversorgung des Viehs auf den Alpen und in den Sennereien (Fürlinger 2009, Burger-Scheidlin et al. 2009: 263).

Einige regionale Beispiele aus Österreich mögen zur Verdeutlichung von Trends dienen, die im gesamten Alpenraum zu beobachten sind: In der Weststeiermark wird die geringere Wasserführung von Bächen und Flüssen beobachtet. Damit verbunden sind auch niedrige Grundwasserstände. Deshalb treten zusehends Probleme bei der Wasserversorgung auf.⁶ Ganz allgemein geben die Landwirte an, dass es weniger sommerliche „Landregen“ gäbe, dafür häufiger Starkniederschläge im Gefolge von sommerlichen Schauern und Gewittern aufträten. Eine ähnliche Beobachtung wird im Salzburger Lungau gemacht. Dort ereignen sich vermehrt Gewitter mit Hagelschlägen. Bislang galt der Lungau als kaum für Gewitter anfällig (Burger-Scheidlin et al. 2009: 263, Gappmaier 2009: 48).

Simulationen der zu erwartenden agrarklimatischen Bedingungen zeigen, dass es auch im Berggebiet Problemgebiete geben kann, die von den im allgemeinen günstigeren, weil mildereren Bedingungen nicht profitieren werden können. Während niederschlagsreiche Regionen und namentlich die Stauniederschlagsgebiete der Alpennordseite daher durch den Klimawandel profitieren können, sind die trockeneren Voralpen im Osten und Südosten (rund 30% der Grünlandflächen) im Übergangsbereich von Grünland und Ackerland problematischer zu bewerten. Es ist zu erwarten, dass sich das Grünland aus diesen Regionen zurückziehen wird. Damit sind die Randlagen des Berggebietes (Mühl- und Waldviertel), aber auch der Alpenostrand sowie die inneralpinen Trockengebiete, die schon bis dato Niederschlagsspenden von teilweise weniger als 700-800mm empfangen, deutlich benachteiligt. Es ist fraglich, ob in diesen Gebieten die Grünlandwirtschaft aufrechterhalten werden kann. Dies wäre mit einem Rückgang der Weideflächen verbunden. Dabei bestimmen die Bodeneigenschaften, die Topographie sowie der Temperaturverlauf das Produktionspotenzial mit. In den beschriebenen Regionen könnten Silomais und Luzernegrasbau die Hauptfutterquelle werden. Ferner ist zu vermuten, dass an die Stelle der Freilandhaltung reine Stallhaltungsbetriebe treten (vgl. die Praxis der Viehhaltung in den sommertrockenen, mediterranen Ländern) (Eitzinger 2007: 6f, AustroClim 2008a: 102, Eitzinger et al. 2008: 98, 103).

Eine mögliche Zunahme von Witterungsextremen birgt generell ein sehr hohes Schadenspotential für die Landwirtschaft und könnte positive Auswirkungen wie zum Beispiel eine längere Vegetationsperiode wieder konterkarieren. Extreme Ausprägungen (nasse Winter, Frühjahre, sehr trockene Sommer) schränken die Planbarkeit der Futterwirtschaft ein. Die Ertragssicherheit nimmt ab. Auch im Grünlandbereich wird es eine Zunahme der jährlichen Ertragsschwankungen geben, wodurch ein erhöhter Lagerbedarf für Tierfutter (insbesondere Heu und Silage) entsteht. Intensivere Niederschlagsereignisse in kurzer Zeit können bei der Bodenbefahrbarkeit zu Problemen führen (Eitzinger et al. 2008: 99, AustroClim 2008a: 102).

Aufgrund der Zunahme herbst-/wintermilder Wetterlagen bei nach wie vor auftretenden temporären Frostperioden tritt bei den Kulturen eine verminderte Frosthärtung auf (Diepolder 2007: 6).

6. Auch diese Beobachtung kann durch „harte“ klimatologische Befunde der gestützt werden. Die Region Südostösterreich erlebt seit 1980 außergewöhnlich trockene Bedingungen. Dies wird mit einer geringeren Tiefdrucktätigkeit südlich der Alpen und in der nördlichen Adria in Verbindung gebracht.

In Südtirol wird in der Grünlandwirtschaft der sommerlichen Trockenheit dadurch begegnet, dass Beregnungsanlagen und Wasserspeicher angelegt werden. Eine Anpassungsmöglichkeit bestünde daher in der Bewässerung des Grünlandes, falls das Wasser dazu kostengünstig zugänglich und vorhanden ist. Es bleibt jedoch unsicher, inwiefern der Ausbau von Bewässerungsanlagen zur Überbrückung von Trockenperioden sinnvoll, machbar, angesichts der Wasserverfügbarkeit in Trockenjahren auch tatsächlich möglich und nicht zuletzt ökonomisch vernünftig ist. Die Meidung von gefährdeten Standorten und der Anbau von weniger wasserbedürftigen Kulturen dürfte zielführender sein (Eitzinger 2007: 7, OcCC 2007: 47).

3.2.3 Veränderung der Artenzusammensetzung des Grünlandes

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass viele Grünlandarten durch höhere Temperaturen begünstigt werden, insofern ein ausreichendes Feuchtigkeitsangebot gewährleistet ist. Allerdings wird sich die Artenzusammensetzung des Dauergrünlandes (Weiden, Mähwiesen) stark verändern, was insbesondere Auswirkungen auf die Futterqualität haben kann. Prognostiziert wird beispielsweise die Zunahme von Weidelgrasarten in den Beständen.

Eine Untersuchung im Bezirk Lilienfeld hat ergeben, dass von den Bauern auf trockenen Standorten ein gehäuftes Auftreten der Trepse verzeichnet wird. Dadurch werden für die Futtergewinnung qualitativere Gräser im Grünland verdrängt (Fürlinger 2009: 18). Die zu erwartende Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung (vgl. Siloballenwirtschaft) ist der Biodiversität hingegen abträglich. Die häufigere Schnittnutzung und der hohe Düngerbedarf verändern die Artenzusammensetzung, da sich überwiegend raschwüchsige und/oder vegetativ reproduzierbare Gräser vermehren. Die Dominanz von einigen wenigen Arten (Wiesentyp Englisch-Raigras-Mähweide) kann in Trockenjahren zu massiven Ertragsrückgängen führen (Tiroler Umweltschutz 2009). Dieser Effekt sowie die Trockenzehung der Gräser macht die Nachsaat von rasenbildenden Gräsern notwendig.

Trockenperioden begünstigen auch tief wurzelnde Kräuter gegenüber den seicht wurzelnden Gräserarten (90% der Wurzelmasse befinden sich in den obersten 10cm). Letztere erhalten dabei zu wenig Wasser und trocknen im schlimmsten Fall aus. Kräuter hingegen reichen mit ihrem Wurzelwerk tief in die Bodenhorizonte hinein und versorgen sich so mit Wasser und Nährstoffen. Hingegen werden Gräser, insbesondere Untergräser wie die Wiesenrispe oder der Rotschwinger zurückgehen. Mittelfristig wird die Züchtung und der Anbau neuer stresstoleranter Gräserarten (Trocken- und Hitzestress, Wasserverbrauch, ausgeprägteres Wurzelsystem) notwendig sein (AustroClim 2008a: 102, Wikipedia 2009d, Eitzinger et al. 2008: 105, Schaumberger/Buchgraber 2008: 31).

3.2.4 Krankheitsrisiken und Stress für Nutztiere

Witterungsschwankungen, Hitze und parasitäre Erkrankungen können die Leistungsfähigkeit der Nutztiere (Milchkühe und Rinder, Schafe) ganz wesentlich herabsetzen. Stressbedingte Wärmebelastungen des Milchviehs wirken sich negativ auf die Milchleistung aus. Ganz allgemein verringern erhöhte Sommertemperaturen die Nahrungsaufnahme und damit die Produktivität der Nutztiere. Bei Tieren in Stallhaltung tritt vermehrt Hitzestress auf, was zu Leistungsabfall und Ausfällen führt. Untersuchungen in Raumberg-Gumpenstein zeigten, dass Milchkühe, die keinen schattigen Platz aufsuchen konnten, bei

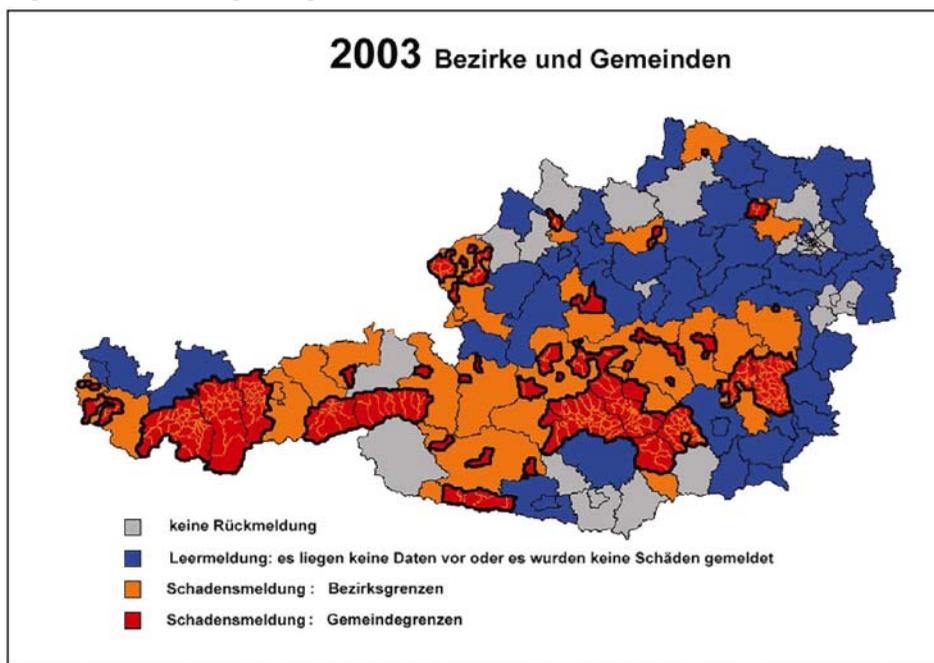
hohen Temperaturen über 30 Grad und hoher relativer Luftfeuchtigkeit eine deutliche Erhöhung der Oberflächentemperatur und vor allem auch der inneren Körpertemperatur ausgesetzt sind. Schattenplätze unter Bäumen und der freie Zugang zum Stall oder Sprinkleranlagen zwecks Kühlung der Tiere können dem Hitzestress entgegen wirken. Sommerliche Hitzewellen stellen daher erhöhte Anforderungen an den Stallbau (Klimaregulierung) sowie an die Organisation von Lebendviehtransporten (Steinwidder et al. 2008: 32).

Künftig ist bei Wiederkäuern mit neuen Krankheiten, Schaderregern und Parasiten zu rechnen, die bisher in unseren Breiten (noch) nicht heimisch sind. Bereits bis dato lässt sich eine Zunahme bei den von Insekten übertragenen Krankheitserregern beobachten, beispielsweise die Blauzungkrankheit bei Schafen, Ziegen und Rindern, welche von Mücken übertragen wird. Die Blauzungkrankheit ist eine Viruskrankheit, die sich aufgrund veränderter Klimabedingungen von Afrika bis nach Nordeuropa ausbreiten konnte (OECD 2009a: 14, Beierkuhnlein/Foken 2008: 188, Eitzinger et al. 2008: 99).

3.2.5 Zunahme von Pflanzenschädlingen und Pflanzenkrankheiten

Eine indirekte Gefahr besteht durch die mit der Temperaturerhöhung einhergehende verstärkte Ausbreitung von Pflanzenschädlingen und Pflanzenkrankheiten, da viele Schädlingsarten generell von höheren Temperaturen und vor allem von höheren Wintertemperaturen profitieren. Weiters zeichnet sich eine Zunahme von Pflanzenkrankheiten (v.a. Roste) bei den Gräsern ab (Beierkuhnlein/Foken 2008: 197ff, AustroClim 2008a: 101, Diepolder 2007: 6).

Abbildung 8: Die von Engerlingsschäden betroffenen Bezirke im Jahr 2003



Quelle: StartClim 2005

Anfang der 2000er Jahre wurden regional im Wirtschaftsgrünland bedeutende Schäden durch die bodenlebenden Engerlinge der Feld-Maikäfer, Junikäfer und Gartenlaubkäfer verursacht. Klimatische Einflussfaktoren gelten als hauptverantwortlich für das Massenauftreten der Engerlinge und die damit verbundenen Fraßschäden. Besonders massiv traten die Schäden im Hitze- und Dürrejahr 2003 auf.

Seit 2004 bis 2006 nahm das Schadenausmaß wieder ab. Die befallenen Flächen erstreckten sich entlang des Alpenhauptkammes von Vorarlberg bis ins Alpenvorland (siehe Abbildung 8). Dies deutet auf höhere Temperaturen, geringere Niederschläge bzw. Trockenheit und daraus folgend höhere Bodentemperaturen als bestimmende Faktoren hin (StartClim 2006a: 18f).

Eine Befragung im Salzburger Lungau hat ergeben, dass Schädlinge und Krankheiten zusehends ein Problem für den Kartoffelanbau werden. Es wurden Kartoffelkäfer beobachtet, die zuvor in dieser Region noch nie aufgetreten sind. Weiters treten vermehrt Kraut- und Knollenfäule auf. Bei den Apfel- und Birnbäumen gibt es vermehrt Fälle von Feuerbrand (Gappmaier 2009: 45).

Weiters konnte in den vergangenen Jahren, vor allem in Trockenjahren eine starke Vermehrung von Maulwürfen und Wühlmäusen verzeichnet werden (Landwirtschaftskammer Tirol 2008a: 1).

Einen umgekehrten, positiven Nebeneffekt dürfte die zunehmende Erwärmung auf das Auftreten des Ampferkäfers haben. Dieser kommt vor allem bei der Verwendung von Frischmist, Gülle oder Jauche vor und dezimiert die unerwünschten Ampferbestände (Schaumberger/Buchgraber 2008: 31).

Tabelle 1: Auswirkungen des Klimawandels auf die Berglandwirtschaft (Zusammenfassung)

Bereich	Günstige Faktoren (+)	Ungünstige Faktoren (-)
Intensives Grünland, Gunstlagen, Talböden	Längere Vegetationsperiode bringt höhere Erträge, höhere Nutzungsintensität: Schnitte, Feldarbeitstage; Voraussetzung: ausreichend Wasser (Niederschlags-) und Nährstoffversorgung; Anbau von Luzernen, Erdäpfeln, Getreide, Silomais, Dauerkulturen (Obst, Wein, Gemüse) Energieerzeugung (z.B. Biogas)	Grünland ist hochvolatil gegenüber Trockenheit (problematische Regionen: Mühl-/Waldviertel, Alpenostrand, inneralpin und Südabdachung) höheres Ertragspotential durch günstigeres Klima kann zu Intensivierung führen: Umwandlung von Grünland zu Acker bis 1.000m (Silomais); verminderte Frosthärtung/Auswinterungsschäden; Zunahme der Ertragsschwankungen; Änderung der Artenzusammensetzung, Gräserkrankheiten (Roste); Schädlinge (Engerlinge, Wühlmäuse)
Extensives Grünland, Berglandwirtschaft (Bergmähder)	Längere Vegetationsperiode bringt höhere Erträge, höhere Nutzungsintensität: Schnitte, Feldarbeitstage, Arbeitsspitzen früher im Jahr; ausreichende Wasserversorgung sollte gegeben sein (Ausnahme: inneralpin, Süd-, Ost-Abdachung); neue Produktionsnischen (Obst, Wein, Beeren, Kräuter)	Geringes Anpassungspotential, da keine Produktionsalternativen; limitierende Faktoren (Boden, Topographie = Landnutzungsbeschränkungen); Änderung der Artenzusammensetzung (Verhältnis Gräser-Kräuter); Zunahme der Ertragsschwankungen; Witterungsextreme bergen Schadpotenzial;
Viehhaltung	Verlängerung der Weideperiode (Frühjahr, Herbst)	Erhöhter Lagerbedarf für Tierfutter (Heu, Silage) durch Zunahme der Ertragsschwankungen; Änderungen der Artenzusammensetzung (Futterqualität); neue Krankheiten (Blauzungen, Mastitis, Parasiten); Hitzestress
Almwirtschaft	Längere Vegetations- und Weideperiode (frühere Bestoßung); höhere Erträge/Nutzungsintensität v.a. auf Niederalmen, selteneres Auftreten sommerlicher Schneefälle	Anteilsverschiebung zwischen Weide- und Waldflächen („Verbuschung“); Wasserversorgung teils problematisch (Gletscherschwund), Intensivierung von Niederalmen, Witterungsextreme bergen Schadenspotenzial

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

4. Anpassungsmaßnahmen für die Berglandwirtschaft

Maßnahmen zur Anpassung an die Folgewirkungen des Klimawandels im Dauergrünland stehen vor dem Dilemma, dass die Grünlandwirtschaft im Berggebiet oftmals die einzige Möglichkeit der landwirtschaftlichen Nutzung darstellt. Daher ist das Anpassungspotential der mehrjährigen Pflanzengesellschaft deutlich geringer als zum Beispiel im Ackerbau, wo auf entsprechend hitzeresistente und trockenheitsunempfindlichere Kulturarten umgestellt werden kann.

In der Grünlandwirtschaft sind der Erhalt und die Förderung der Biodiversität die wichtigste Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel. Artenreiche Wiesen bieten im Hinblick auf den Klimawandel eine höhere Ertragssicherheit (vgl. höhere Witterungsvariabilität), da in artenreichen Beständen von Jahr zu Jahr, in Abhängigkeit von den jeweiligen Witterungsbedingungen, jeweils unterschiedliche Arten profitieren können.

Generell verringert eine Diversifizierung des Fruchtartenspektrums (im Ackerbau) die Gefahr von Ernteeinbußen durch Klimaextreme, sie trägt zur landwirtschaftlichen Biodiversität wie auch zur ökologischen Funktionalität bei. Bodenschonende und wassersparende Arbeitsverfahren (Mulchen, Zwischenfruchtanbau, pfluglose Bodenbearbeitung) weisen Vorteile auf.

Alle Szenarien gehen davon aus, dass die Niederschlagsvariabilität zunehmen wird. Zusammen mit der höheren Verdunstung nimmt dies massiv Einfluss auf den Bodenwassergehalt. Maßnahmen zur Erhaltung des Bodenwassergehaltes sind zu setzen. Weiters ist der Einsatz von trockenresistenten Gräsern zu forcieren (Bereitstellung des notwendigen Saatgutes). Trockenschäden im Dauergrünland sind durch Nachsaat von rasenbildenden Gräsern zu minimieren. Weiters ist die Bewässerung auch von Grünlandflächen zu überlegen. Dazu kann die Anlage von Wasserspeichern beitragen.

Die Viehhaltung erfordert Anpassungsmaßnahmen auf den Gebieten Rasseauswahl und Tierzucht (Robustheit, Hitzeresistenz). Arten bzw. Rassen, die bisher in südlicheren Regionen genutzt wurden könnten auch im Alpenraum gehalten werden. Darüber hinaus besteht einschlägiger Forschungsbedarf darin Schaderreger, Parasiten und Krankheiten zu identifizieren, die für die Viehzucht und Tierhaltung zukünftig relevant werden könnten.

In der Weideführung ist auf die Beschattung und den Zugang zu Sprinkleranlagen zu achten. Die Wasserversorgung ist sicherzustellen. Im Stallbau und bei den Tiertransporten ist auf die notwendige Klimaregulierung zu achten. Günstigere Klimabedingungen ermöglichen Stallbauten in Leichtbauweise und mit Ganzjahresfreilandhaltung. Durch die stärkeren Witterungsschwankungen ist von einem erhöhten Lagerbedarf bei Tierfutter (Heu, Silage) auszugehen.

In der Almbewirtschaftung sind vermehrt Pflegemaßnahmen (Rodungsmaßnahmen gegen Verbuschung und Verwaldung) zu setzen. Dem Erosionsschutz (z.B. Starkniederschlagsereignisse) ist mittels optimierter Weideführung Rechnung zu tragen. An das Gelände angepasste Rassen und Tiergewichte (extensive Rassen wie zum Beispiel Grauvieh, Schafe und Ziegen) sind zu forcieren. Weiters ist die Wasserversorgung des gealpten Tierbestandes sicherzustellen. Gegen extreme Witterungsverhältnisse (Hagel, Kälte, Hitze) sind Einstellungen für das gealpte Vieh erforderlich.

Eine Anpassungsmaßnahme im Ackerbau ist die Erhöhung des Humusgehaltes der Böden. Bei der Förderung des Humusgehaltes ist die Zufuhr organischer Stoffe (Festmist, Kompost, Gründüngung-Mul-

chen) maßgeblich. Dadurch wird das Bodenleben gefördert und der Bodenabtrag durch Erosion (Wasser, Wind) reduziert. Eine entscheidende Aufgabe des Bodens ist es, das ungleichmäßige Wasserangebot der Niederschläge in ein möglichst gleichmäßiges für die Pflanze umzuwandeln. Humusreicher, lockerer (nicht verdichteter) Boden hat ein hohes Wasserspeichervermögen, er ist gegenüber Trockenperioden, die Erosion hervorrufen können, aber auch gegenüber Extremniederschlägen wesentlich resistenter. Extensive Bewirtschaftungssysteme wie zum Beispiel der Biolandbau (niedrigerer Betriebsmitteleinsatz etc.) wirken sich vorteilhaft auf den Humusgehalt aus. Zudem bindet ein humusreicher Ackerbau wesentlich höhere Mengen an klimarelevantem Kohlendioxid. Mittels angepasster Landnutzungstechniken kann die Bindung von Kohlen- und Stickstoff in Böden und Vegetation erhöht werden.

Der Umbruch und die Umwandlung zu Ackerland führen zu einer zum Teil massiven Freisetzung von Kohlenstoff, denn Ackerböden weisen vergleichsweise geringe Kohlenstoffgehalte auf. Die Zielsetzung des Klimaschutzes verlangt daher die Erhaltung des Grünlandes als Kohlenstoffspeicher (AustroClim 2008: 113ff, Beierkuhnlein/Foken 2008: 357ff, OcCC 2007: 46-52, Bundesamt für Umwelt 2007: 68, StartClim2008.D 2009a: 27-42). Anpassungsmaßnahmen können nach ihrem Ansatzpunkt (mehr reaktiv oder präventiv) in drei verschiedene Vorgehensweisen differenziert und zusammengefasst werden (nach VISUMtourism o.J.):

Symptombekämpfung

Darunter sind Maßnahmen zu verstehen die notwendig sind, um kontraproduktive Auswirkungen des Klimawandels einzudämmen. Diese Maßnahmen wirken punktuell und werden situativ gesetzt. Sie können spontan (durch die Ökosysteme) erfolgen oder durch sektorale Akteure gesetzt werden. In der Berglandwirtschaft kann mittels betrieblicher Optimierungsstrategien abträglichen Folgewirkungen des Klimawandels gegengesteuert werden. Beispielsweise der Verkleinerung des Tierbestandes bei trockenheitsbedingten Futtermangel.

Anpassungsstrategien

Anpassungsstrategien dienen der Vorwegnahme (Antizipation) des Klimawandels. Der Umgang mit Unsicherheiten muss auch darauf abstellen, dass Klimarisiken innerhalb des Berggebiets oder auch des jeweiligen Sektors etc. so gut wie möglich verteilt werden. Unter Anpassung sind alle Aktivitäten zu verstehen, die gesellschaftliche Akteure auf aktuelle oder zu erwartende klimatische Stimuli oder deren Effekte setzen, um Schäden zu mildern oder um mögliche Chancen zu nützen, die sich aus dem Klimawandel ergeben. Zusammen mit der Symptombekämpfung ist die Anpassungsstrategie eine primär reaktive Politik. Wesentliche Anpassungsstrategien bestehen in der Erhaltung des Artenreichtums, der Optimierung der Weideführung der Grünlandwirtschaft und der Sicherstellung der Wasserversorgung.

Ursachenbekämpfung (Klimaschutzmaßnahmen)

Die möglichst weitgehende Begrenzung der Klimaänderung wird als Vermeidung (engl. „mitigation“) bezeichnet. Diese setzt bei der Begrenzung oder auch Rückführung der Treibhausgasemissionen an. Dazu dienen auch Innovationen zur Steigerung der Energieproduktivität und die Schließung von Stoffkreisläufen. Eine wesentliche Maßnahme der Berglandwirtschaft besteht in der Vermeidung des Umbruchs bzw. der Erhaltung des Dauergrünlandes auch in der Schließung der Stoffkreisläufe.

Abbildung 9: Beispiele für Anpassungsmaßnahmen des Sektors Berglandwirtschaft



Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 2: Anpassungsmaßnahmen Berglandwirtschaft

	Symptombekämpfung	Anpassungs(strategie)	Ursachenbekämpfung/ Klimaschutz
Intensives Grünland, Gunstlagen, Talböden	Generell betriebliche Optimierungen, bei Ausfällen beweidete Flächen vergrößern, gelagertes Futter verteilen, Zukäufe (Heu, Silage); Dürreschäden: Kahlstellen, Lücken nachsäen (Übersaat); Bekämpfung von Engerlingsschäden	Förderung des Artenreichtums (Mähwiesen), trockenheitsverträgliche Gräserarten + Luzerne, Optimierung Weideführung, Versicherungsmodelle gegen Extremereignisse (Flächen, Tiere) Beregnungsanlagen, Wasserspeicher	Erhaltung des Dauergrünlandes/ Feldfutterbaues als Kohlenstoffspeicher, Ackerflächen: Erhöhung des Humusgehaltes zur Kohlenstoffbindung, Stoffkreisläufe schließen
Extensives Grünland, Berglandwirtschaft (Bergmähder)	Generell betriebliche Optimierungen, bei Ausfällen beweidete Flächen vergrößern, gelagertes Futter verteilen, Zukäufe (Heu, Silage); Dürreschäden: Kahlstellen, Lücken nachsäen; Bekämpfung von Engerlingsschäden	Erhaltung des Artenreichtums (Mähwiesen), trockenheitsverträgliche Gräserarten, Luzerne, Optimierung Weideführung, Versicherungsmodelle gegen Extremereignisse, Beregnungsanlagen, Wasserspeicher	Erhaltung des Dauergrünlandes/ Feldfutterbaues als Kohlenstoffspeicher, Stoffkreisläufe schließen
Viehhaltung	Generell betriebliche Optimierungen, bei Ausfall von Silomais: weniger Tiere mästen, Futterzukauf, Bekämpfung von Viren und Parasiten, Blauzungkrankheit	Robuste Rassen; erhöhter Lagerbedarf bei Tierfutter, Stallbau-Tiertransporte (Klimaregulierung), Freiland: Wasserversorgung, Beschattung, Sprenklerinlagen	Viehbesatz und (hofeigene!) Betriebsmittel (Kraftfutter, Dünger etc.) reduzieren, Grundfutteranteil steigern, Stoffkreisläufe schließen
Almwirtschaft	Bekämpfung von Viren und Parasiten, u.a. Blauzungkrankheit	Optimierung Weideführung (Besatz, Rasse) Wasserversorgung sicherstellen; dichte Grasnarben als Erosionsschutz bei Starkregen; Flächenfreistellung und Pflegemahd gegen Verbuschung/Verwaldung	Erhaltung der Almflächen als Kohlenstoffspeicher

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

Sektoranalyse Tourismus

1. Bedeutung des alpinen Tourismus in Österreich

Der Tourismus ist in Österreich ein bedeutender Wirtschaftszweig. Österreich verfügt in hohem Ausmaß über die Voraussetzungen für Tourismus: attraktive Gebirgs- und Seenlandschaften sowie die Donau, zahlreiche Kulturdenkmäler und attraktive Städte und ländliche Regionen sowie eine gut ausgebaute Infrastruktur. Vorteilhaft sind die zentrale Lage in Europa und die gute Erreichbarkeit.

1.1 Eckdaten des Tourismus in Österreich

2009 erzielte die Tourismusbranche Umsätze von 21,49 Mrd. €. An Nächtigungen wurden 2009 rund 124,3 Mio. Übernachtungen gezählt¹. Täglich halten sich rund 348.000 Touristen (exklusive Tagestouristen und unentgeltlich Nächtigende) in Österreich auf. Über 70% der Gäste kommen aus dem Ausland. Neben den Touristen aus Deutschland- und Süd- und Westeuropa kommen diese vermehrt aus den mittel- und osteuropäischen Ländern sowie dem arabischen Raum (Weiß 2009: 10-12, WKÖ 2010a, Statistik Austria 2010a).

Tabelle 1: Eckdaten Tourismus in Österreich

Kategorie	2009	Anmerkungen
Umsätze	21,49 Mrd. €	davon 11,85 Mrd. Wintersaison 08/09
BIP-Beitrag	21,36 Mrd. € oder 7,7%	Direkte und indirekte Wertschöpfung des Tourismus nach dem Tourismus-Satellitenkonto (TSK)
Tourismusbetriebe	67.166	Zahl der Beherbergungsbetriebe
Beschäftigte	178.691	Arbeitnehmer Beherbergungs- und Gaststättenwesen
Ankünfte	32,3 Mio.	-1,0% gegenüber 2008
Nächtigungen ¹⁾	124,3 Mio.	davon 89,9 Mio. von ausländischen Gästen, davon entfallen 53,7% auf Tirol und Salzburg
Aufenthaltsdauer in Tagen	3,85	Tendenz fallend
Bettenauslastung	31,1%	

¹⁾ Tourismus ist die Bewegung vom Wohnort an den Urlaubsort und zurück, der Aufenthalt und sämtliche Aktivitäten am Urlaubsort. Die Reisebewegung findet aus nicht beruflichen Gründen statt und umfasst mindestens eine Nächtigung gegen Bezahlung oder im (Zweit-)Wohnsitz.

Quelle: WKÖ 2010a, BMWFJ 2009a: 8ff, Statistik Austria 2010a, Österreich Werbung 2011a

Der alpine Raum ist (neben der Attraktion der Bundeshauptstadt Wien) die wichtigste natürliche Ressource für den Tourismus in Österreich, die Alpen der zentrale Angebotsfaktor. Die alpine Tourismuswirtschaft erwirtschaftet etwa drei Viertel des gesamten Tourismusumsatzes in Österreich. Rund zwei Drittel der Umsätze der österreichischen Freizeitwirtschaft werden alleine in den Bundesländern Salzburg, Tirol und Vorarlberg umgesetzt. Bei den Destinationen führt das Bundesland Tirol, wo mehr als

1. Die volkswirtschaftlichen Erträge, die aus dem Tourismus erzielt werden, korrelieren stark mit den Daten der Nächtigungsstatistik, die demnach als brauchbare Indikatoren herangezogen werden können (Weiß 2009: 10).

ein Drittel aller Übernachtungen gezählt werden, gefolgt von Salzburg (20%) und Kärnten (10%). Außerdem fällt die Hälfte aller Übernachtungen in die Monate Jänner und Februar sowie Juli und August.

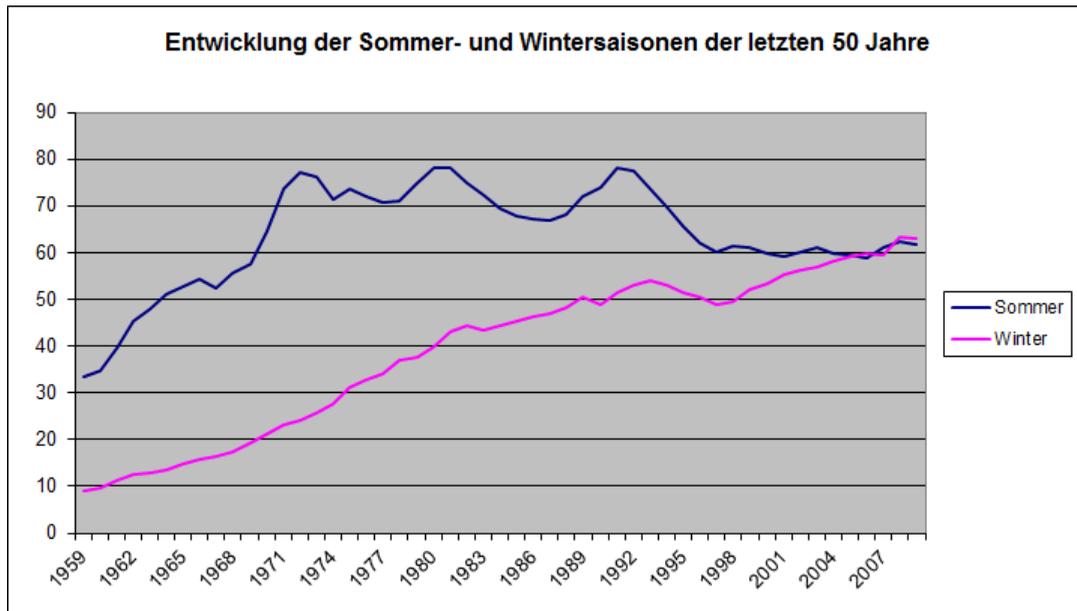
Insgesamt trägt der Tourismus (2009) rund acht Prozent zum österreichischen BIP bei (direkte und indirekte Wertschöpfung nach dem Tourismus-Satellitenkonto). Dies ist ein im internationalen Vergleich sehr hoher Anteil und trägt dazu bei, dass in den letzten Jahrzehnten stets ein Zahlungsbilanzüberschuss erzielt werden konnte. Der Tourismus zählt mit seinen 67.000 Beherbergungsbetrieben mit rund 180.000 Beschäftigten zu den wichtigsten Dienstleistungsbranchen. Die gewerblichen Beherbergungsbetriebe sind mit durchschnittlich 40 Betten klein strukturiert. Dazu kommen weitere rund 25.000 private Beherbergungsbetriebe, die nebenberuflich im Familienbetrieb geführt werden (z.B. Urlaub am Bauernhof). Das Unterkunfts-Angebot differenziert und professionalisiert sich stetig: Seit Jahren gibt es den Trend weg von den Privatquartieren hin zu größeren gewerblichen Betrieben in gehobenen Kategorien (und sekundär zu den Ferienappartements). Dementsprechend ist in den letzten zehn Jahren die Anzahl der Betten bei den 4/5-Sterne-Hotels um mehr als ein Viertel angestiegen. Diese Qualitätsverbesserung geht auch mit einer besseren Auslastung in der Nebensaison einher (Statistik Austria 2010a: 14).

Nicht vergessen werden darf, dass Umsatz und Wertschöpfung nicht nur aus tourismusnahen Branchen wie etwa Beherbergungs- und Gaststättenwesen stammt, sondern dass eine Vielzahl von Branchen direkt und indirekt am Tourismus beteiligt ist und von ihm profitiert. Dazu zählen andere gastronomische Betriebe und solche der Kultur-, Freizeit-, Sport-, und Verkehrswirtschaft sowie der Einzelhandel. Regional profitieren die ortsansässigen Zulieferbetriebe oder auch Gewerbebetriebe, die am Bau und Ausbau touristischer Infrastruktur beteiligt sind.

Sommer- und Wintertourismus halten sich im Bereich der Nächtigungen die Waage. Dies war jedoch nicht immer der Fall. Im Langzeitvergleich nahm die Zahl der Übernachtungen in der Wintersaison seit den 1950er Jahren kontinuierlich zu, sieht man von kleineren Einbrüchen zu Beginn der 1980er Jahre und Mitte der 1990er Jahre ab. Wurden in den 1970er und 1980er Jahren vorwiegend „Sommerfrischegäste“ in den Monaten Juli und August beherbergt, so entwickelte sich die Wintersaison zunehmend zum bedeutenden Wirtschaftsfaktor.² Gleichzeitig kam es zu einer Verlängerung der Vor- und Nachsaison (bei gleichzeitiger Abflachung der Saisonspitzen) (Statistik Austria 2010a: 14, BMWFJ 2009a: 23, Weiß 2009: 10-12).

2. Dies erhöht jedoch gleichzeitig die Anfälligkeit gegenüber dem Ausbleiben winterlicher Witterung und dem Mangel an Naturschnee.

Abbildung 1: Nächtigungen im Sommer- und Wintertourismus seit 1959



Quelle: Tourismus in Österreich (Statistik Austria 2010a)

1.2 Sparten des Tourismus

Das touristische Angebot hat sich in den vergangenen Jahrzehnten zusehends ausdifferenziert. Dominierte in den 1960er bis in die 1980er Jahre vor allem der Sommer-Massentourismus so ist in den letzten Jahren der Wintertourismus gleichrangig von Bedeutung geworden. Neben den klassischen „Sommerfrischegästen“ hat sich die Nachfrage (und das Angebot) nach sportlichen und kulturellen Aktivitäten, Wellness-Angeboten etc. vervielfacht. Österreich hat sich zu einer Ganzjahresdestination entwickelt (Weiß 2009: 11).

1.2.1 Sommertourismus

Der Sommertourismus in Österreich besteht traditionell in Bergsport, Badetourismus, sekundär auch im kulturellen Angebot („Sommerzeit ist Festspielzeit“, Städtetourismus etc.). In den letzten Jahren hat sich die sportliche Angebotspalette gewandelt und ist vielfältiger geworden: Tourenradfahren, Mountainbiken, Golfsport sowie weitere Outdoor-Aktivitäten (Rafting, Canyoning etc.). Bergwanderungen und Bergsteigen werden traditionell ausgeübt. Österreich verfügt über zahlreiche Schutzhütten und über 1.000 km markierte Wanderwege, die von den alpinen Vereinen und Fremdenverkehrsverbänden betreut werden. Der Badetourismus konzentriert sich auf das Salzkammergut und das Salzburger Seengebiet sowie die Kärntner Badeseen (Wörthersee, Ossiacher See, Millstätter See etc.) (Österreich Werbung 2011a).

1.2.2 Wintertourismus

Der Wintertourismus umfasst primär den Wintersport. Und der Wintersporttourismus nimmt in Österreich eine besondere Stellung ein. Nicht zuletzt auch deswegen, weil Österreich beim Schnee-/Wintersporturlaub europaweit und vor allem am deutschen Markt (Marktanteil fast 70%) unangefochtenen Marktführer ist. Die anderen Anrainerstaaten des Alpenbogens wie die Schweiz, Italien und Frankreich liegen weit abgeschlagen hinter Österreich.

Die Mittel- und Hochgebirge der Ostalpen bieten hierzulande ideale Möglichkeiten den alpinen Wintersport auszuüben. Und das Angebot hat sich in den letzten Jahren weiter ausdifferenziert (Carvingsskilanglauf, Snowboarden, Schilanglauf, Rodelbahnen etc.). Insbesondere die Bundesländer Vorarlberg, Kärnten, Tirol und Salzburg bieten in beinahe jedem Alpental ein oder mehrere Skigebiete, die mit zahlreichen Aufstiegshilfen (Seilbahnen, Sessellifte, Schlepplifte) ausgestattet sind. Waren es zu Beginn des Massenwintertourismus noch die Schlepplifte, die entscheidend für die Erschließung der Tourismusregionen verantwortlich waren, so sind die Klein- und Hauptseilbahnen an deren Stelle getreten. Letztere erschließen Skigebiete vor allem in Höhenlagen über 1.500 Meter Seehöhe. Genauso wie die Aufstiegshilfen dient der Einsatz von Beschneigungsanlagen der Gewährleistung der Schneesicherheit. Während bis in die 1980er Jahre vor allem punktuell Kunstschnee aufgebracht wurde, so werden heute ganze Skigebiete künstlich beschneit. Österreichweit besteht bereits auf rund 59% der gesamten Pistenfläche die Möglichkeit, diese künstlich zu beschneien (Arbesser et al. 2008: 21).

Tabelle 2: Aufstiegshilfen im österreichischen Tourismus

	1985	1995	2001
Hauptseilbahnen	522	282	374
Kleinseilbahnen		442	430
Schlepplifte	3.364	2.517	2.384
Gesamt	3.886	3.241	3.157

Quelle: BMVT 2010 (Eisenbahn- und Seilbahnstatistik 2001/02)

Die bedeutsamsten Wintersportorte liegen am Arlberg, Lech/Zürs/Warth, im Ötz- (Ischgl) und Ziller- und Stubaital, in Kitzbühel. Weiters der Skiverbund Amadé, Saalbach Hinterglemm, Radstadt/Altenmarkt/Zauchensee, Obertauern. In Kärnten sind das Nassfeld, die Gerlitzen und der Weißensee hervorragend, in der Steiermark die Dachstein-Tauern-Region. Die großen „Skiarenen“ bieten sogar über 50 oder mehr Liftanlagen und hunderte Kilometer an präparierten Skiabfahrten. Die künstliche Beschneigung garantiert die Benutzbarkeit auch in schneearmen Wintern. Aber auch am östlichen Alpenrand gibt es viele Skigebiete. Zusätzlich gibt es in Österreich auch einige Gletscherskigebiete (Kauertaler-, Hintertuxer-, Pitztaler- und Stubai Gletscher, Sölden, Kitzsteinhorn-Kaprun, Mölltaler- und Dachstein Gletscher), die ganzjährig geöffnet sind (Peck 2005: 7, Arbesser et al. 2008: 22).

1.2.3 Städte und Kulturtourismus

Der Städte- und Kulturtourismus in Österreich umfasst vor allem die Bundeshauptstadt Wien und die acht Landeshauptstädte. Gäste halten sich in Städten generell kürzer auf als in ländlichen Tourismusorten, geben aber pro Tag im Durchschnitt deutlich mehr aus. Die Besuchszwecke reichen vom Verwandten- bzw. Bekanntenbesuch und vom Erlebnis- und Kulturtourismus in der Freizeit bis hin zur vom Arbeitgeber bezahlten Teilnahme an Kongressen, Messen und Firmentagungen (die aber in die Statistik definitionsgemäß nicht eingehen). In den meistfrequentierten Städten (wie Wien, Salzburg und Innsbruck) fällt der Anteil der per Flugzeug anreisenden Gäste wesentlich größer aus als in Gesamtösterreich, auch die Herkunft der Besucher gestaltet sich vielfältiger. Mehr als die Hälfte dieses Tourismuszweiges entfällt auf die ehemalige Reichshaupt- und Residenzstadt Wien, ist also im Rahmen dieser Untersuchung nicht von belang. Stark von ausländischen Gästen frequentierte Städte innerhalb des alpinen Raumes sind jedoch Salzburg, Innsbruck und Klagenfurt (am Wörthersee) (Österreich Werbung 2011a).

1.2.4 Kur- und Wellnesstourismus

Der Kurtourismus umfasst in Österreich den Tourismus von 84 Heilbädern und Kurorten, darunter etliche Thermalbäder (Thermenlinie, Thermenland). Im Jahr 2009 wurden in diesen Gemeinden 18,7 Millionen Übernachtungen gezählt. Bedeutsam ist dieses Angebot, weil es auch in der Neben- Vor- und Nachsaison frequentiert wird. Zusätzlich erfüllt es eine wichtige Ergänzungsfunktion zu Wintersportaktivitäten sowie während (sommerlicher) Schlechtwetterperioden. Im Mühl- und Waldviertel (sowie in anderen Regionen Ost- und Südösterreichs) ist der Kur- und Wellnesstourismus ein bedeutsamer Wirtschaftsfaktor in einem ansonsten strukturschwachen und wenig touristisch geprägten Umfeld (Österreich Werbung 2011a).

1.2.5 Agrotourismus/Urlaub am Bauernhof

Der Agrotourismus bzw. die Vermietung von Privatzimmern und Ferienwohnungen erfreut sich nach wie vor großer Beliebtheit. Touristen erleben direkt die Kulturlandschaft der ländlichen Regionen und der Berge, wobei diese Urlaubsform gerade für Kinder durch das aktive Erleben bäuerlicher Arbeit am Hof, die Erntearbeit sowie die Freizeitaktivitäten in der Natur eine Bereicherung bedeutet. Historisch betrachtet war das bäuerliche Unterkunfts-Angebot aufgrund der relativ geringen Investitionen Voraussetzung für die flächenhafte Entwicklung des (Sommer) Tourismus seit den 1960er Jahren. Seit den 1980er, 1990er Jahren beginnt sich jedoch das Unterkunftsangebot verstärkt zu differenzieren bzw. zu professionalisieren. Dadurch bedingt, zieht sich das touristische Angebot ansatzweise aus der Fläche zurück. Trotzdem bleibt dieses Segment regional jedoch von großer Bedeutung. Insgesamt gibt es österreichweit 15.500 Betriebe oder rund 8% aller Landwirtschaftsbetriebe mit Urlaub am Bauernhof-Angebot. Das gesamte Angebot beläuft sich auf ca. 170.000 Betten; davon werden über 40% in der gewerblichen Vermietung auf Bauernhöfen und auf Betrieben mit mehr als 10 Betten angeboten. Von allen touristischen Übernachtungen entfielen im Jahr 2005 2,3% auf die Kategorie „Privatquartiere auf Bauernhöfen“ und weitere 2% auf „Ferienwohnungen und Ferienhäuser auf Bauernhöfen“. Dabei hat

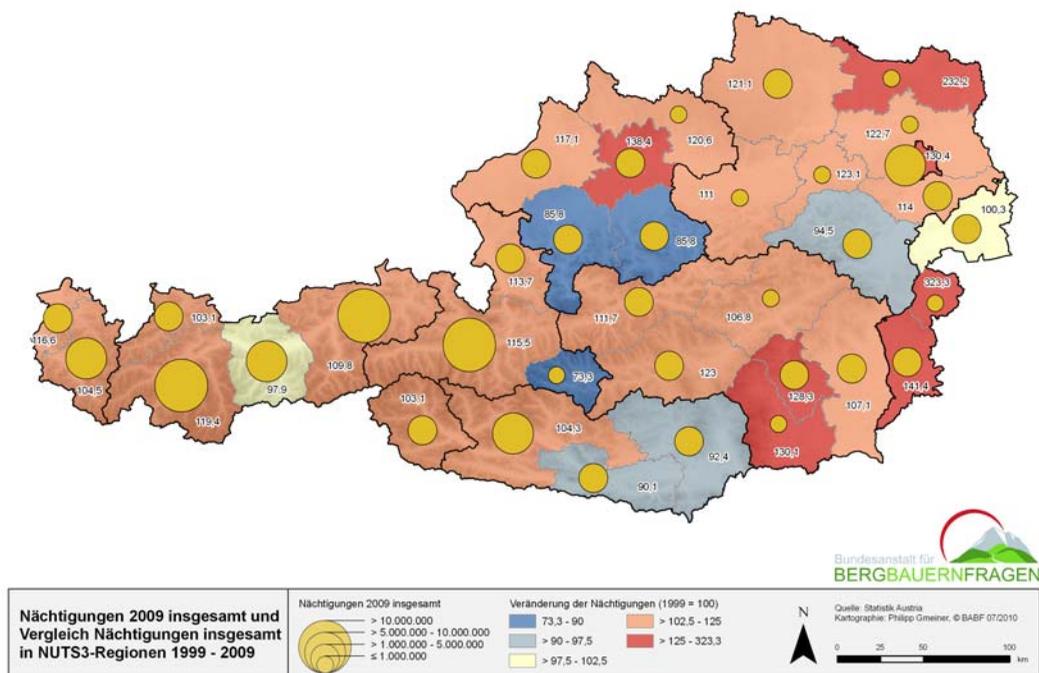
sich das Angebot in den letzten Jahren deutlich zu den Ferienwohnungen verschoben (BMLFUW 2009a: 57, 200, Bätzing 2003: 146).

Obwohl definitionsgemäß kein Tourismus im herkömmlichen Sinn ist der Freizeit- und Naherholungstourismus und die damit verbundenen Tagesgäste im Alpenraum von großer Bedeutung und trägt lokal erheblich zu Umsatz und Wertschöpfung bei.

2. Regionale Ausprägung, regionalwirtschaftliche Bedeutung des alpinen Tourismus

Kennzeichnend für den österreichischen Tourismus ist seine Gebundenheit an landschaftliche Standortqualitäten: Höhenunterschiede, Schneesicherheit, eine attraktive Kulturlandschaft sind die naturräumlichen Voraussetzungen einer erfolgreichen Tourismuswirtschaft. Touristische Schwerpunkte finden sich entlang des Alpenhauptkamms, in den Seengebieten Kärntens, Oberösterreichs- und Salzburgs sowie in den städtebaulichen und kulturell attraktiven österreichischen Großstädten (für den Alpenraum sind hier besonders Salzburg und Innsbruck relevant). Das stark ausgeprägte West-Ost-Gefälle ist dabei auffallend. Der Westen Österreichs (Vorarlberg, Tirol, Salzburg) erzielt fast zwei Drittel aller Gesamt-Nächtigungen und mehr als drei Viertel aller Winternächtigungen (ÖROK 2008a: 25). Nach den zum Teil massiven Rückgängen der Nächtigungszahlen Anfang der 1990er Jahre, die in erster Linie auf Nächtigungseinbrüche in der Sommersaison zurückzuführen waren und vor allem den Westen und Süden Österreichs betrafen, ist es Mitte der 1990er Jahre wieder zu einer Trendwende gekommen. Die Nächtigungszahlen haben sich seit 1999 nicht nur stabilisiert, seit damals sind in West- aber auch in Ostösterreich wieder zum Teil kräftige Anstiege zu beobachten. Für die positive Entwicklung schrieb vor allem die Wintersaison verantwortlich. In Südösterreich ist die Bilanz nicht so günstig. Zum Teil sind die Nächtigungszahlen hier wieder rückläufig (ÖROK 2010a).

Abbildung 2: Nächtigungen 2009 insgesamt und Vergleich Nächtigungen insgesamt in NUTS3-Regionen 1999-2009



Die Unterschiede bei der Entwicklung der Nächtigungszahlen in den einzelnen Regionen sind dabei bemerkenswert: Eindeutige Gewinner sind jene Regionen, die durch den Aufbau saisonunabhängiger Angebote meist im Bereich des hochqualitativen Wellness-, Sport- und Gesundheitstourismus gute Ausgangsbedingungen schaffen konnten (v.a. Mittel- und Südburgenland, Weinviertel). In den alpinen Regionen konnten in einigen Wintersportregionen (Pinz- und Pongau, Tiroler Unterland) überdurchschnittlich hohe Zuwächse erreichen. Einige traditionelle Tourismusregionen, zumeist reine Sommerdestinationen, sind hingegen mit Rückgängen konfrontiert (z.B. Traunviertel-Salzkammergut, Kärntner-Zentralraum, Wörthersee, Lungau) (ÖROK 2010a, Bätzing 2010: 37).

Die räumliche Konzentration des Nächtigungsaufkommens kommt auch in regional unterschiedlichen Auslastungsquoten zum Ausdruck. Die Regionen, die ein attraktives natürliches (Seen, Berge etc.) und historisch gewachsenes kulturelles (Städte) Angebot aufweisen, haben auch gleichzeitig die besten Auslastungswerte. Regionen, die tendenziell als strukturschwache Gebiete einzustufen sind, hinken auch im touristischen Bereich nach. Während beispielsweise in den Wintersportzentren Auslastungen von 70% erreicht werden, gibt es in Regionen mit weniger massentourismustauglichem Angebot Auslastungen, die unter 20% liegen (Weiß 2009: 11).

In einigen Gemeinden nimmt der Tourismus beträchtliche Ausmaße an. Im Sommer- wie auch im Winterfremdenverkehr liegen die „Hotspots“, in den Bundesländern Vorarlberg, Tirol und Salzburg. Im Wintertourismus werden rund ein Viertel aller Übernachtungen von nur zehn Gemeinden erzielt. Im Sommerhalbjahr konzentriert sich das Angebot auf immerhin rund ein Fünftel.

Abbildung 3: Die wichtigsten Tourismusgemeinden Österreichs, Winter 2008/09

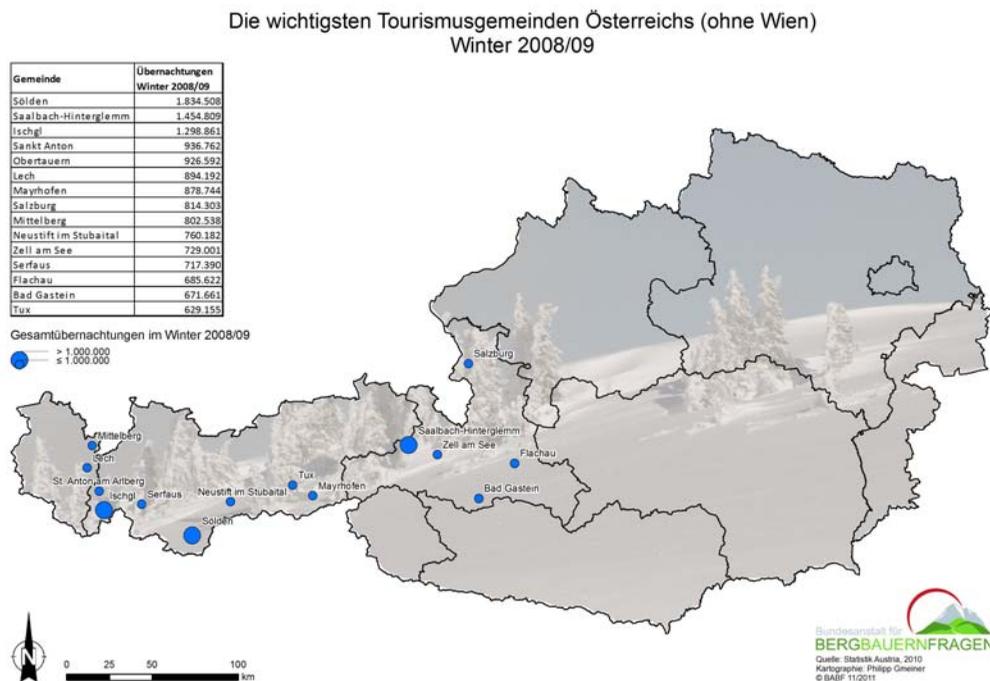
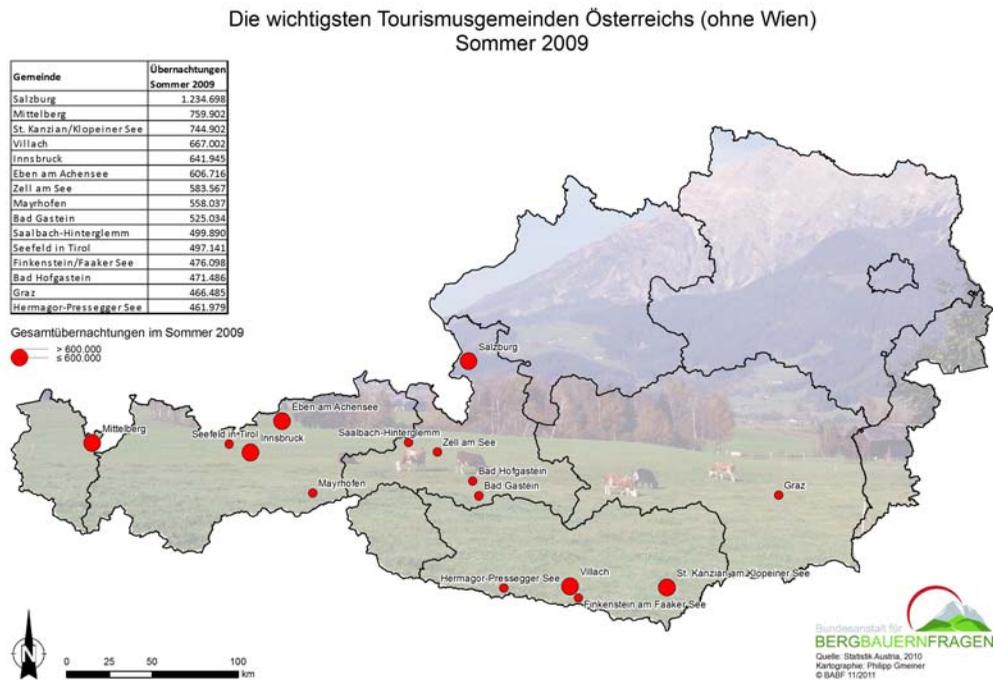


Abbildung 4: Die wichtigsten Tourismusgemeinden Österreichs, Sommer 2009



Hohe regionale Nächtigungsintensitäten (bezogen auf Einwohner) bedeuten nicht nur ein attraktives touristisches Angebot, sondern vor dem Hintergrund saisonaler Spitzenwerte auch besondere Anforderungen an die kommunale Infrastruktur (z.B. Verkehrsaufkommen, Entsorgungssysteme, ärztliche Versorgung etc).

3. Problematische Aspekte des alpinen Tourismus

Der Tourismus hat vor allem in den alpin geprägten Regionen Westösterreichs enorme Bedeutung. Mehr als zwei Drittel aller Gesamt-Nächtigungen und mehr als drei Viertel aller Winternächtigungen konzentrieren sich auf diese Gebiete. Ganze Talschaften und Regionen leben überwiegend vom Tourismus. Und die günstige gesamtwirtschaftliche Entwicklung, auch verglichen mit alpinen Regionen ohne nennenswerten Tourismus, ist nicht ausschließlich aber zu einem beträchtlichen Ausmaß auf den florierenden Tourismus zurückzuführen. Der Tourismus hat dort die Berglandwirtschaft als dominante Erwerbs- und Einkommensquelle seit den 1960er Jahren abgelöst. Neben den positiven Aspekten des alpinen Tourismus wie der Schaffung von Arbeitsplätzen und Einkommen, weniger Abwanderung, Finanzierung der kommunalen Infrastruktur etc. hat der Tourismus aber auch negative Aspekte. Durch die räumliche Konzentration treten diese auf vielfältige Weise auf (Reiner 2007: 41-54).

Negative sozioökonomische Aspekte:

- ♦ Hohes Preisniveau in Tourismusgemeinden (für Güter und Dienstleistungen aber auch Grundstückspreise);
- ♦ Hohe Abhängigkeit bzw. mangelnde Diversifizierung von Tourismuseinnahmen;
- ♦ Gefährdung von gewachsenen Wirtschaftsstrukturen;
- ♦ Im Gegenzug dazu Entstehung touristischer Monostrukturen;
- ♦ Viele Saisonarbeitsplätze mit niedrigem Qualifizierungsniveau;
- ♦ Erhaltung der teuren Infrastruktur (Auslastung muss auf saisonale Spitzen ausgerichtet sein);
- ♦ Zunahme von Nutzungskonflikten (u.a. gegenüber der Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz etc.);

Negative soziale Aspekte:

- ♦ Eingeschränktes Arbeitsplatzangebot
- ♦ Gewachsene Sozialstrukturen, kulturelles Erbe, werden ausgehöhlt;
- ♦ Abwanderung (aus den Gebieten mit nicht nennenswertem touristischen Angebot)
- ♦ „Ausverkauf“ des kulturellen Erbes
- ♦ Einheimische werden zu Fremden in eigener Umgebung;

Negative Umwelt-Aspekte:

- ♦ Hohe Verkehrsbelastung (Mobilität)
- ♦ Veränderung bzw. Störung des Orts- und Landschaftsbildes
- ♦ Nutzungskonflikte (mit divergierenden Zielen: z.B. Biodiversität, Biotopschutz)
- ♦ Zersiedelung und Versiegelung der Landschaft
- ♦ Umweltbelastungen (z.B. Entsorgungs- und Müllaufkommen, Emissionen)

(nach Reiner 2007: 43)

Als Reaktion auf die zunehmend artikulierten negativen Aspekte des Massentourismus sieht Bätzing (2010) zwei mögliche Strategien: Er sieht Bedarf nach integrativ konzipierten und partizipativ erarbeiteten Tourismus- bzw. Gemeindeleitbildern. Dies gilt vor allem für intensiv frequentierte Tourismusgemeinden. Mittels der Leitbilder sind die ökonomischen, ökologischen und soziokulturellen Probleme gemeinsam anzugehen. Darüber ist auch eine dauerhafte Akzeptanz der lokalen Bevölkerung zu erreichen. In Gemeinden ohne nennenswertes Angebot oder mit stark rückläufigem Tourismus sieht er den Bedarf an Impulsen, durch die das endogene touristische Potenzial (anstelle technischer Tourismus-Infrastrukturen und beliebiger Mega-Events) und die Vernetzung mit der regionalen Wirtschaft und Kultur im Vordergrund stehen sollte (Bätzing 2010: 37).

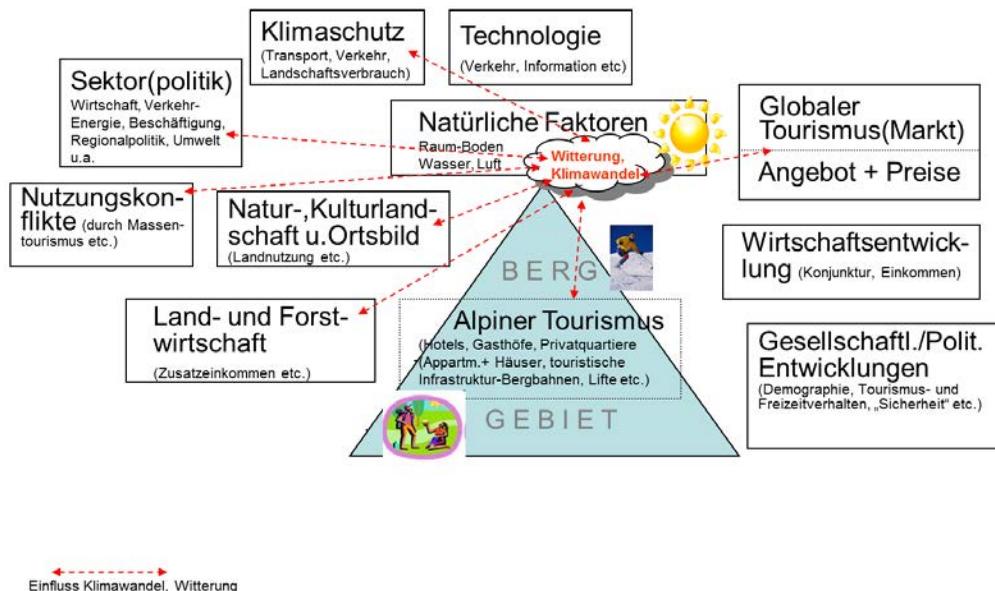
4. Klimawandel und die Einflussfaktoren auf den Tourismus

Der Tourismus ist zentral für die Entwicklung des ländlichen Raumes, insbesondere des Alpenraumes. Viele alpine Seitentäler, insbesondere in Westösterreich, würden ohne Arbeitsplätze im Tourismus- (und Freizeitsektor) heute in diesem Ausmaß nicht mehr bewirtschaftet und besiedelt sein als dies durch diese touristische Einkommensquelle ermöglicht wird.

Die folgende Graphik bildet wichtige räumliche Einfluss- und Entwicklungsfaktoren auf den alpinen Tourismus ab. Beziehungen, Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zu anderen Sektoren und Bereichen werden ansatzweise verdeutlicht. Der Klimawandel ist dabei nur eine Größe unter anderen und wird von anderen Faktoren in seiner Wirkung überlagert. Das Dreieck alpiner Tourismus, der Sektor der Land- und Forstwirtschaft sowie die (Bewirtschaftung und Erhaltung der) Natur-, Kulturlandschaft sowie des Ortsbildes ist bedeutsam, weil sie ganz wesentlich die Attraktivität einer Landschaft ausmacht und die Raumentwicklung prägt. Daraus ergeben sich aber auch Nutzungskonflikte und divergierende Zielvorstellungen.

Insgesamt sind die Rahmenbedingungen für die zukünftige Entwicklung des Tourismus und noch mehr Langfristprognosen über die künftige Entwicklung mit großen Unsicherheiten behaftet. Der Tourismussektor kann nicht isoliert betrachtet werden, sondern muss im Kontext verschiedenster Parameter gesehen werden. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind dabei die gesamtwirtschaftliche nationale und internationale Entwicklung weiters die gesellschaftliche, technologische, politische und ökologische Entwicklung (Stichwort „natürliche Faktoren“). Zu letzterer zählen auch die Folgen des Klimawandels.

Abbildung 5: Klimawandel und die Einflussfaktoren auf den alpinen Tourismus



Quelle: eigene Darstellung

Der alpine Tourismus ist ganz stark von den natürlichen Faktoren (Ressourcenausstattung – Raum/Boden, Wasser, Luft) des Alpenraumes abhängig. Die Realisierung der Tourismusnachfrage, noch dazu der intensive Tourismus, der durch hohe räumliche und zeitliche Konzentration geprägt ist, führt zu einem hohen Ressourcenverbrauch –diese Ressourcen sind jedoch nicht unbegrenzt vorhanden also endlich. Problematisch ist in diesem Zusammenhang, dass der Ressourcenverbrauch (Raum/Boden, Wasser, Luft etc.) oft nicht mit den „wahren“ Kosten in die betriebliche Kalkulation eingeht.

Das Wettergeschehen und das regionale Klima prägen nicht nur das touristische Angebot, sondern steuern auch die Nachfrage. Beides beeinflusst unter anderem die Kundenpräferenz – das Ziel und die Aktivität. Touristische Aktivitäten finden überwiegend im Freien statt („Outdoor-Aktivitäten“) und sind deshalb bis zu einem gewissen Grad auf günstige Wetterverhältnisse angewiesen - „Indoor-Angebote“ während Schlechtwetterperioden sind eine notwendige Begleitung aber kein hinreichender Ersatz dafür. Wetterkapriolen beeinflussen deshalb erheblich die Nächtigungsentwicklung. Verstärkt wird dies durch den Trend zu Kurzfrist-Entscheidungen und Kurzurlauben. Anhaltende Schlechtwetterperioden während der Sommermonate begünstigen Destinationen im Mittelmeerraum. Umgekehrt führt fehlender (natürlicher) Schnee in den Schigebieten zu Buchungsrückgängen. Gleichzeitig führt dies zu einer Verschiebung der Nächtigungen in die Thermenregionen.

Der Primärsektor, die Berglandwirtschaft, ist dem Tourismussektor eng verbunden. Dies gilt vor allem für die touristischen „Gunstlagen“ in Westösterreich. Dadurch ergeben sich Einkommensmöglichkeiten, die zur Erhaltung der land- und forstwirtschaftlichen Aktivitäten beitragen. Rund ein Fünftel der land- und forstwirtschaftlichen Betriebe in Vorarlberg, Tirol und Salzburg bietet Gästezimmer- oder –appartements an. Weiters sind Einnahmen aus der Verpachtung von Flächen für Fremdenverkehrszwecke, dem Grundstücksverkauf, sowie der nebenberuflichen Tätigkeit in gewerblichen Fremdenverkehrs-Betrieben lukrierbar. Nicht zuletzt ergeben sich Absatzmöglichkeiten an Gäste sowie das Hotel- und Gastgewerbe durch Direktvermarktung.

Die Natur- und Kulturlandschaft sowie das Ortsbild in ihrer sozioökonomischen, kulturellen und naturräumlichen Dimension ist ein wichtiger Faktor für den Tourismus, sowohl als Gegenstand (Schipisten, Aufstiegshilfen, Berghütten etc.) als auch als unverzichtbare Kulisse („Alpenpanorama“). Eine gepflegte Kulturlandschaft wird beispielsweise von den Touristen als Hauptgrund für einen Urlaub in Österreich genannt. Dabei besteht die Kulturlandschaft der alpinen Regionen aus einer Vielzahl von Elementen wie Siedlungen, Dörfern, Wirtschafts- und Wohngebäuden, Wiesen, Weiden und Almen, Waldstücken, Solitär bäumen und Baumgruppen, Feldbegrenzungen und Wegen, Terrassierungen, Weidetieren, aber auch Wildtieren und –pflanzen, Wildbächen und Seen. Geprägt ist die Natur- und Kulturlandschaft, in den alpinen Regionen ist dies vor allem das Dauergrünland (Mähwiesen, Weiden, Almen etc.) durch die Flächenbewirtschaftung der Land- und Forstwirtschaft. Besonders die bewirtschafteten Almen sind eine der Hauptattraktionen im Sommertourismus. Die Aufrechterhaltung der Bewirtschaftung gewährleistet die Gestaltung, Erhaltung und Pflege der Kulturlandschaft sowie die Aufrechterhaltung der Besiedelung - Beides Hauptressourcen für die Tourismuswirtschaft. Aber auch die Abwehr von Naturgefahren (Lawinen- und Murenabgänge) ist u.a. durch die Pflege und letztlich durch das Offenhalten der Kulturlandschaft gesichert. Unter dem Diktum des Klimawandels und zunehmender Wetterkapriolen und deren Extremwetterlagen erscheint die Intaktheit der Natur- und

Kulturlandschaft als zusehends gefährdet. Veränderungen im Landschaftsbild (Stichwort Gletscherrückzug) könnten zu einem Attraktivitätsverlust führen.

Die Nutzungsansprüche und die Intensität des modernen Massentourismus im Alpenraum führen auch zu negativen ökologischen, sozialen und kulturellen externen Effekten. Der alpine Raum und im besonderen der Dauersiedlungsraum ist beschränkt, daher eröffnet sich ein Spannungsfeld zwischen dem touristischen Landschafts- und Flächenverbrauch (Hotel- und Gastgewerbe, touristische Einrichtungen der Ver- und Entsorgung, Freizeitparks, Pisten, Aufstiegshilfen etc.) und den Nutzungsansprüchen der Land-, Forst- und Almwirtschaft, aber auch dem Naturschutz und anderen Sektoren gegenüber. Nutzungskonflikte ergeben sich aber auch direkt und indirekt im Zusammenhang mit dem Klimawandel. Beispielsweise steht die Notwendigkeit der Ausweisung von Renaturierungsflächen und Gefahrenzonen oftmals im Widerspruch zu anderen Nutzungsinteressen.

Der alpine Tourismus ist mit anderen Sektorpolitiken eng verbunden. Diese beeinflussen maßgeblich das überregionale und regionale Umfeld und die touristische Infrastruktur aber auch den Kernbereich des Tourismussektors, beispielsweise der Wirtschaftspolitik (behördliche Auflagen wie gewerberechtliche Betriebsauflagen -Hygiene, Sicherheit etc.), der Beschäftigungspolitik (Beschäftigung von Arbeitnehmern, Saisoniers etc), der Verkehrspolitik (Bau und Erhaltung des niederrangigen Straßennetzes der alpinen Seitentäler) aber auch der Gesundheits- und Umweltpolitik etc.

Die Wirtschafts- und Konjunkturentwicklung oder präziser die Wohlstandsentwicklung in den Industriestaaten steuert wesentlich das potentiell verfügbare Haushaltseinkommen bzw. die touristische Nachfrage. Beispielsweise führte die Finanzkrise 2008/09 zu einem Nachfrageausfall wichtiger Auslandsmärkte (und deren teilweiser Substitution). Ob es auch in Zukunft (wie in den letzten 20 Jahren) eine relative Verbilligung der touristischen Dienstleistungen (Transport, Unterkunft, sekundär auch Informationskosten) geben wird ist hingegen ungewiss, trägt aber entscheidend zur Tourismusedwicklung bei.

Innerhalb des Tourismussektors ist es für die Anbieter immer dringlicher erforderlich Angebotsinnovationen zu entwickeln. Dies ist auch vor dem Hintergrund der Globalisierung der Tourismusk Märkte zu betrachten. Neue Märkte (z.B. Gäste aus verschiedenen Herkunftsländern) werden erschlossen. „Neue“ Reiseziele, begünstigt durch billige Flugreisen und Reiseaktivitäten (z.B. Trendsportarten) werden nachgefragt. Sowohl angebotsseitig (billige Flugreisen, „neue“ Fernziele) als auch nachfrageseitig (potentielle Gäste aus Osteuropa, Nahost und generell aus den Schwellenländern wie Indien und China). Das steigende Angebot und die billigen Transportkosten haben eine Wandlung vom „Verkäufer-“ zum „Käufer-Markt“ bewirkt. Touristische Destinationen im Alpenraum treten in Konkurrenz zu ähnlichen Angeboten in der ganzen Welt. Der globalisierten Struktur entsprechend steigt auch die Außenabhängigkeit der Branche. Vermehrt international operierende Hotelketten im 4- und 5-Sterne-Segment stehen der mittelständischen, kleinbetrieblichen Struktur in Österreich gegenüber. Dies bewirkt Nachteile im Marketing und im Vertrieb. Gleichzeitig boomt die Vermietung von gut ausgestatteten Appartements und verdrängt das klassische „Urlaub am Bauernhof“ Angebot. Insgesamt wird der Tourismus immer kapital- und investitionsintensiver. Die Positionierung auf den internationalen Tourismusk Märkten wird einerseits wichtiger und andererseits aufwändiger. An die Seite von klassischen Angeboten wie Skisport, Wandern, Erholung treten aufwändige Inszenierungen wie „Ski-Openings“, „Erlebniswelten“ (Freizeitpark, Erlebnisbad etc.) und andere „Events“ um Aufmerksamkeit und Gäste

auf einen Tourismusort oder eine Region zu lenken. Die globale Klimaveränderung wird sich auch auf den internationalen Tourismus auswirken. Möglicherweise kann der Alpenraum den Touristenstrom anziehen, der bislang mediterrane Destinationen aufsuchte. Andererseits bergen auch hierzulande mögliche Wetterkapriolen, Extrem- und Elementarereignisse das Risiko des Ausbleibens der Kunden.

Bevölkerungswachstum und die Alterszusammensetzung sind wichtige Parameter für die Tourismusentwicklung. Weitere wichtige soziodemographische Faktoren bilden das steigende Bildungsniveau, die sinkende Haushaltsgröße sowie die fortschreitende Urbanisierung. Bedingt durch die „Alterung der Gesellschaft“ werden sich in Österreich und Europa in den nächsten 10 bis 20 Jahren Angebot und Nachfrage verstärkt an die Bedürfnisse der älteren Generation anpassen. Wie überhaupt der Anteil der älteren Menschen, die eine Reise antreten, steigen wird. Gesellschaftliche Entwicklungen im Allgemeinen bewirken eine Wandlung des Tourismus- und Freizeitverhalten. Darunter fallen beispielsweise „neue“ Urlaubspräferenzen wie Kurzurlaube, Fernreisen oder der „Sanfte“ - energie- und ressourcensparende Tourismus. Letzterer sollte für die alpinen Regionen Potenzial haben. Der (Fern)Tourismus ist hingegen sehr anfällig gegenüber wahrgenommenen Sicherheitsrisiken (Anschlägen, Flugzeugentführungen, politischen Umwälzungen, aber auch Naturkatastrophen vgl. den Ausbruch des isländischen Eyafjalla im Frühjahr 2010). Davon könnten touristische Einzugsgebiete (wie der Alpenraum), die in kurzer und mittlerer Distanz liegen durchaus profitieren.

Der Massentourismus ist von der Entwicklung der modernen Verkehrsmittel (Pkw, Bahn, Bus, Flugzeug) abhängig. Tourismus, in der heutigen Form, ist historisch eng mit dem Transportwesen, der qualitativen und quantitativen und vor allem leistbaren Transportleistung sowie dem Ausbau und Instandhaltung der damit verbundenen Infrastruktur (Gleis- und Straßennetz, Luftkorridore) verbunden. Insofern ist der Massentourismus hochvulnerabel gegenüber Kostensteigerungen des Transportwesens. Vom Gesichtspunkt der Ressourcenschonung her wie sie vom Klimaschutz geboten wäre, ist eine Verteuerung des Individualverkehrs jedoch dringend geboten (Stichwort Kostenwahrheit). Ein weiterer wichtiger Punkt ist die zukünftige Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie (z.B. effiziente und kostengünstige Reservierungssysteme mittels des Internets).

Der Aspekt des Klimaschutzes ist für den Tourismussektor von großer Relevanz. Und der Tourismus ist nicht nur Betroffener sondern auch wesentlicher Mitverursacher von Treibhausgas-Emissionen. Daher ist einerseits Klimafolgenanpassung und andererseits Klimaschutz gefordert. Der Tourismus ist Produzent von Emissionen in den Bereichen Personentransport (Flugverkehr, KFZ-Verkehr) sowie im Beherbergungssektor, weiters birgt auch die touristische Infrastruktur (generell der Flächenverbrauch, Aufstiegshilfen, künstliche Beschneigung) ein erhebliches Potenzial (Österreich Werbung 2011a, WKÖ 2010a).

5. Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus

Die meisten Aktivitäten des Tourismus im alpinen Raum werden im Freien ausgeübt. Deshalb liegt es auf der Hand, dass die Auswirkungen des Klimawandels großen Einfluss auf die Tourismuswirtschaft haben.

5.1 Günstige Effekte

Freizeitaktivitäten sind im Alpenraum oftmals durch schlechtes Wetter beeinträchtigt, deshalb kann die Klimaerwärmung durchaus günstige Effekte mit sich bringen. Vor allem der Sommertourismus und der Tourismus der Übergangsjahreszeiten können davon profitieren.

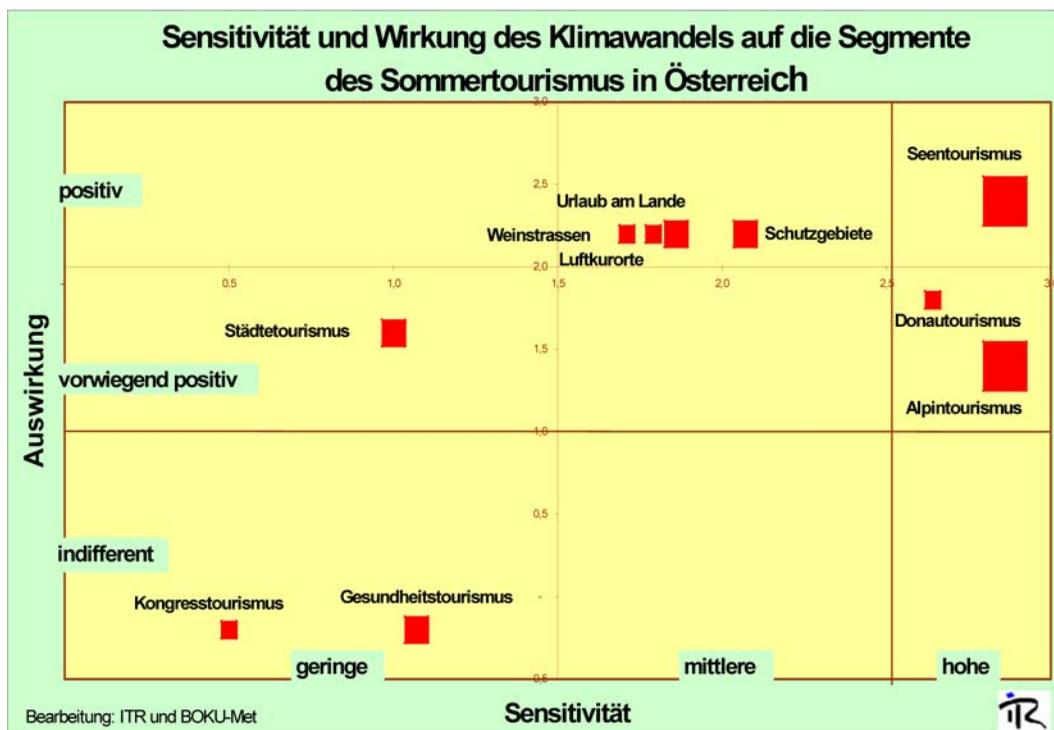
5.1.1 Der Sommertourismus kann vom Klimawandel profitieren

Der „Sommertourismus“ in den alpinen Regionen, schwerpunktmäßig in Westösterreich, weist verschiedene Segmente auf: Alpin/Bergtourismus, Schutzgebietstourismus (Nationalparks), Bade- und Seetourismus, Städtetourismus (Salzburg, Innsbruck, Villach) aber auch Kur- und Gesundheitstourismus. In den letzten 20 Jahren hat sich Angebot und Nachfrage ausdifferenziert (Aktiv- und Erlebnisorientierung etc.). Zudem reicht die Sommersaison mehr und mehr auch in die Übergangsjahreszeiten von Frühling und Herbst hinein.

Die zukünftigen bioklimatischen Bedingungen für den Sommertourismus in Österreich sind einer Verlängerung der Saison mit angenehmen thermischen Bedingungen bis in den Spätherbst hinein zuträglich, die damit einhergehende Zunahme der warmen und heißen Tage ist für den Seentourismus positiv zu bewerten, für den Kur- und Wellness Tourismus kann dies eine Beeinträchtigung darstellen. Die in den Klimaszenarien enthaltene Abnahme des sommerlichen Niederschlags wird sich auf viele, aber nicht auf alle Sektoren des Sommertourismus günstig auswirken. Negative Folge sind beispielsweise für Gletscherschigebiete (Sommerschilaf) zu befürchten (StartClim 2006a: 29).

Die Prognosen gehen daher überwiegend davon aus, dass die touristischen Aktivitäten im Sommerhalbjahr vom Klimawandel profitieren können. Wärmere Temperaturen und häufigere heiße und trockene Sommer erhöhen die Attraktivität der alpinen Regionen. Der Klimawandel erhöht somit die Marktchancen von Destinationen im Alpenraum. Die touristische Sommersaison kann verlängert werden, und insbesondere der stark wetterabhängige Tages- und Kurzaufenthaltstourismus an den Wochenenden wird voraussichtlich zunehmen. Zudem hat der Hitzesommer 2003 gezeigt, dass der Sommertourismus in höheren Lagen Potenzial hat. Von häufigeren Hitzewellen und Schönwetterperioden profitieren Orte mit attraktiven Wander- und Bademöglichkeiten. Der bestehende Trend zu Aktivferien, Erlebnis- und Freizeitparks ist ebenfalls begünstigt. Entscheidend ist auch die Nähe zu den großen Agglomerationen und eine Neuausrichtung des Angebots (OcCC 2007: 84, 93).

Abbildung 6: Sensitivität und Wirkung des Klimawandels auf die Segmente des Sommertourismus in Österreich



Quelle: StartClim 2006a

Da die Wassertemperaturen in den österreichischen Seen in erster Linie von der Lufttemperatur abhängen, werden auch die Seetemperaturen steigen und dadurch länger „badetaugliche“ Temperaturen erreichen. Dieser Trend konnte für viele alpine Seen (u.a. Bodensee, Wörthersee, Ossiacher See, Attersee u.a.) festgestellt werden (Dokulil 2009: 3-5, Vorarlberger Naturschutzrat 2009: 51). Bei den Flüssen werden im Sommer vermehrt Niedrigwasserstände auftreten. Diese werden speziell in Gletschereinzugsgebieten Werte erreichen, die man derzeit aufgrund der „Gletscherspende“ nicht kennt (AustroClim 2008a: 62, 70).

Gegenwärtig geht man von einem sehr starken Temperaturanstieg im Mittelmeerraum im Sommer aus, was die Attraktivität dieser Urlaubsregion verringert. Da die Hitzebelastung auch bei uns und unseren nördlichen Nachbarn im Sommer stark zunimmt, gewinnen die „kühlen“ Alpen an Attraktivität und die Nachfrage nach Ferien in den Bergen könnte sich erhöhen und eine Verlagerung der Touristen zur Folge haben. „Die Städte und das Flair werden „mediterraner“, die alpinen Seen werden zu „Beaches“ und die Sommerfrische, begünstigt durch die Kühle der Höhenlage erlebt eine Renaissance“ (Tagesanzeiger 2010) – so die Meinung von Tourismusexperten (OcCC 2007: 84, 93).

5.1.2 Verlängerte Saison in den Frühlings- und Herbstmonaten

Auch der alpine Städte- und Kulturtourismus wird voraussichtlich vom Klimawandel profitieren, da durch eine Verlängerung der Saison in die Übergangsjahreszeiten die Attraktivität dieser Destinationen ansteigt. Längere Sommerabende, die zum Verweilen im Freien einladen, Open-air-Veranstaltungen aller Art (Konzerte, Kino etc.) und ein vermehrt „mediterranes Flair“ bereichern die Aktivitätspalette. Beeinträchtigend wirkt aber die erhöhte Wärmebelastung in den zentralen Alpentälern, wie sie bereits heute in den Becken der Südalpen (z.B. in Südtirol) zu beobachten ist.

5.1.3 Der Sommertourismus „wandert den Berg hinauf“

Da die erwarteten Klimatrends für die alpinen Hochtäler klimatische Vorteile erwarten lassen, ist umgekehrt jedoch davon auszugehen, dass hier der Flächenbedarf weiter zunehmen wird und dadurch verstärkt ökologisch sensible Bereiche betroffen sein werden. Dies kann zu Nutzungskonflikten, zu einer Überbelastung der empfindlichen subalpinen und alpinen Fauna und Flora führen (StartClim2007 2008a: 29, Reiner 2007: 43).

Trotz der positiven Anzeichen für den Sommertourismus ist jedoch eine alleinige Berücksichtigung der Klimakenngrößen nicht ausreichend. Dies zeigt auch die regional unbefriedigende Bilanz des Sommertourismus für die 1990er und 2000er Jahre (z.B. im Salzkammergut und an den Kärntner Seen). Der Sommer- und Seetourismus hat schon bislang trotz wetterbedingter zeitweiliger Nachfragesteigerungen seit vielen Jahren mit Nachfrageproblemen zu kämpfen. Ankünfte der Gäste und Nächtigungen sind daher maßgeblich von tourismusrelevanten internen (regionale Wettbewerbsfähigkeit) und externen Rahmenbedingungen (ökonomische Entwicklung, Einzelereignisse) bestimmt (AustroClim 2006a: 30, BMWFJ 2009a: 63ff).

5.2 Ungünstige Effekte

Ungünstige Effekte für die Tourismuswirtschaft ergeben sich primär für die Wintersaison, da Wintersportaktivitäten oftmals auf winterliche Witterungsverhältnisse angewiesen sind. Aber auch Extrem- und Elementarereignisse, ausgelöst durch den Klimawandel, haben das Potenzial die Tourismuswirtschaft zu schädigen.

5.2.1 Für den Wintertourismus birgt der Klimawandel Risiken - Abnehmende Schneesicherheit in niedrigen und mittleren Höhenlagen

Für den alpinen Wintertourismus in den Ostalpen hat der Klimawandel, die Klimaerwärmung negative Folgen. Dies hängt vor allem mit der Schneesicherheit zusammen. Diese ist der wichtigste Faktor im Wintertourismus, da nahezu alle Aktivitäten (Alpenschifahren, Snowboarden, Langlaufen etc.) davon abhängig sind.³ Die wichtigsten Voraussetzungen für eine Schneedecke sind Temperaturen um bzw. unter dem Gefrierpunkt, welche stark von der Seehöhe und der Jahreszeit abhängig sind, und der Niederschlag. Schon seit den 1990er Jahren ist in den alpinen Tallagen der Schneeanteil am Gesamtniederschlag sowie die Anzahl der Tage mit Schneedecke zurückgegangen (Böhm 2008: 182).

Und die Klima-Szenarien gehen davon aus, dass für Mittelgebirgslagen unter 1.500 Metern Seehöhe Schneefallereignisse, Schneebedeckung und –Mächtigkeit weiter abnehmen werden. Dies tritt schon bei einer Klimaerwärmung von nur 2°C bis 2050 ein. Eine Temperaturerhöhung von +3°C hebt die Grenze der Schneesicherheit sogar bis 1.800 Metern Seehöhe an. Unter Annahme dieser sehr plausiblen Szenarien sind wintersporttaugliche Bedingungen in vielen Fremdenverkehrsorten in den Ostalpen nicht mehr gewährleistet. Auch die technischen Voraussetzungen für die Kunstschneeerzeugung (in Westösterreich sind immerhin bereits 70-90% der Pistenfläche beschneibar) macht diese Orte nicht „erwärmungsresistent“. Auch die Kunstschneeproduktion und Haltbarkeit ist an gewisse Klimaparameter (Mindesttemperaturen, Wasserverfügbarkeit) gebunden. Exponierte Hanglagen, die über winterliche Inversionen (in den Tälern) hinausragen erfüllen diese Anforderungen oftmals noch weniger. Dazu kommt dass die Klimamodelle gerade im Mittel- und Hochgebirge eine deutlich höher Erwärmung prognostizieren als für die umgebenden Tal- und Beckenlagen.

Bereits bei einer mittelfristig moderaten Klimaerwärmung von plus ein Grad Celsius sinkt die „natürliche“ Schneesicherheit in Nieder- und Oberösterreich drastisch ab. - Die Abnahme wird deshalb vorerst die kleineren Schigebiete in niedrigen Lagen treffen. Kurz- und mittelfristig könnten größere Schigebiete in höheren Lagen sogar profitieren, weil Schneefälle und die Akkumulation in den hochalpinen Regionen sogar zunehmen könnten. Längerfristig (bis 2050) werden sich wärmere, schneeärmere Winter aber auch in den höheren Lagen Süd- und Westösterreichs bemerkbar machen. Rund die Hälfte der heute noch schneesicheren Orte bietet dann keine geeigneten Schneeverhältnisse mehr. Bei einer noch höheren Klimaerwärmung von +4°C sind selbst in Westösterreich nur mehr wenige Wintersportorte schneesicher. Aber auch die klimatischen Voraussetzungen für die künstliche Beschneigung wären bei solchen Verhältnissen nur mehr sehr eingeschränkt gegeben (IHS 2008: 17, Peck 2005: 50, 59).

Tabelle 3: Anteil der schneesicheren Schiregionen in Österreich als Folge des Klimawandels

Bundesland	Schigebiete	Schneesicher 2006	in %	Bei +2°C (2050)	in %	Bei +4°C (2070+)	in %
Vorarlberg	25	19	76	12	48	3	12
Tirol	79	75	95	45	57	23	29
Salzburg	39	35	90	24	62	9	23
Steiermark	37	34	92	17	46	5	14
Kärnten	24	20	83	14	58	7	29
Oberösterreich	11	7	64	2	18	0	0
Niederösterreich	13	9	69	1	8	0	0
Österreich	228	199	87	115	50	47	21

Quelle: IHS 2008: 17 (nach OECD 2007)

- Die Schneesicherheit eines Gebietes gilt als gewährleistet, wenn in der Zeitspanne vom 16. Dezember bis zum 15. April an mindestens 100 Tagen eine für den Wintersport ausreichende Schneedecke von 30cm (Ski alpin bzw. 15 cm (Ski nordisch) vorhanden ist Dabei bezieht sich die Schneehöhe nur auf wegsames Gelände mit entsprechendem Untergrund. Bei schwer präparierbaren Untergrund ist sogar eine Schneeauflage von 50cm erforderlich (Peck 2005: 42).

Abbildung 7: Künstliche Beschneung (Bürgeralm/Mariazell)

Der Anteil der schneesicheren Schiregionen könnte infolge des Klimawandels stark zurückgehen (Foto: Oliver Tamme)

Die Abnahme der Schneesicherheit bedeutet auch eine (drastische) Verkürzung der Wintersaison und kann für manche Regionen das Ende einer rentablen Wintersaison bedeuten.⁴

Neben der Konzentration des Wintertourismus auf die höheren Lagen der zentralen Alpen (über 1.800 Meter Seehöhe) – die Wintersport Topdestinationen – sekundär auch auf die Gletscherschigebiete könnte es auch zu einer Verlagerung des Fremdenverkehrs in die Westalpen und zu Marktanteilsverlusten österreichischer Destinationen kommen. Im Vergleich zu den österreichischen Wintersportorten sind die Westalpen (Schweiz, Frankreich) begünstigt, da sie höher gelegen sind und daher weniger empfindlich auf den Anstieg der Schneefallgrenze reagieren (Peck 2005: 49, AustroClim 2008a: 69, Deutsche Bank Research 2008: 18-19).

Dem Mangel an Naturschnee wurde schon bislang immer stärker mit der Kunstschneeerzeugung begegnet. Sind Mitte der 1990er Jahre nur 35-50% der Pistenfläche in den westlichen Bundesländern beschneibar gewesen, so beträgt dieser Anteil nunmehr bereits 70-90%. In diesem Sinne ist die Problematik des Mangels an natürlichem Schnee durch die Wintersportorte bereits antizipiert worden. Dem widerspricht auch nicht, dass seit Mitte der 2000er Jahre wieder schneereiche Jahre gefolgt sind. Dem hohen Investitionsbedarf und den laufenden Kosten der Kunstschneeproduktion können naturgemäß potente Wintersportregionen leichter aufbringen als kleine Regionen und Orte. Indirekt bedeutet dies einen Wettbewerbsvorteil.

4. Die Wintersportorte Schladming und Kitzbühel werden aufgrund der geringen Höhenlage immer wieder als besonders anfällig genannt.

Modifiziert wird die Höhenabhängigkeit der Schneesicherheit bzw. der Möglichkeit der Kunstschnee-erzeugung durch die regionale Lage. So konnte für die alpinen Schigebiete in Niederösterreich gezeigt werden, dass durch die Nähe zum winterlich-kalten Kontinent die Voraussetzungen für die Produktion von Kunstschnee (Temperaturen unter dem Gefrierpunkt) wesentlich besser sind als für Destinationen in West- oder Südösterreich. Dadurch kann die geringe Seehöhe der Wintersportorte teilweise kompensiert werden. Der relative Vorteil der Nähe zum winterlich kalten Kontinent bleibt auch unter den verschiedenen Erwärmungsszenarien erhalten (Niederösterreichische Klimastudie 2007: 11). Regionale, kleinklimatische Einflüsse müssen ebenfalls berücksichtigt werden: Pröbstl (2007) kommt in einer Studie über die Schneesicherheit in Schladming zum Schluss, dass die Beschneigungsbedingungen im Talraum bedingt durch winterliche Inversionen günstiger sind als für mittlere Höhen (bis 1.300m) (Pröbstl 2007: 4).

Problematisch ist, dass der Wintertourismus in den Alpen einseitig auf Schisport ausgerichtet ist und deshalb extrem schneeabhängig ist. Eine Strategie für die betroffenen Gebiete wäre daher die Schnee- und Schiabhängigkeit zu verringern. Einerseits durch Angebotsergänzungen (Ganz-Jahres-Aktivitäten, Erlebnis- und Freizeitparks, Erholungs- und Wellness Angeboten etc.) und andererseits durch einen Vier-Jahreszeiten-Tourismus, der die Saison in die Übergangsjahreszeiten hinein verlängert (alpmedia.net 2002: 7).

Der Klimawandel wird sich nicht nur auf die Schneesicherheit auswirken, sondern auch auf die Nachfrage nach Wintersportangeboten. Schon jetzt ist beobachtbar, dass das Interesse am Schisport bei den jüngeren Generationen nachlässt u.a. deswegen, da dieser Zielgruppe die Gelegenheit fehlt in der nahen Umgebung das Schifahren zu erlernen. Bereits heute stagniert die Anzahl der Schifahrer, wobei dies nur am Rande auf die klimatischen Veränderungen zurückzuführen ist (OcCC 2007: 90).

5.2.2 Schneeeunabhängige Alternativangebote können die Schneesicherheit nur bedingt ersetzen

Dabei darf die Bedeutung des Schnee- und Wintererlebnisses für den Schifahrer oder generell den Winterurlauber nicht unterschätzt werden. Aus Umfragen der Urlaubsmotive geht hervor, dass die Schneesicherheit gefolgt vom Wintererlebnis hohe Bedeutung für den Urlauber hat. Ein hoher Anteil der Schiurlauber gibt an nur zu Zeiten mit guter Schneelage einen Schiurlaub zu unternehmen und bei Ausbleiben ausreichender Schneefälle auf einen Schiurlaub gänzlich zu verzichten. Deutlich negativer sind die Auswirkungen noch wenn mehrere schneearme Winter nacheinander folgen. Ein Teil der Befragten will dann auf schneesichere, höhere gelegene Destinationen ausweichen. Völlig unwichtig waren hingegen Einkaufsmöglichkeiten, das Apres-Ski-Programm sowie das Angebot an schneeeunabhängigen Aktivitäten.

Selbst wenn daher die Voraussetzungen für künstliche Beschneigung gegeben sind, ist das Wintererlebnis durch „Fahren auf weißen Bändern in grüner Winterlandschaft“ deutlich geschmälert. Die schneearmen Winter Anfang der 1990er Jahre und Mitte der 2000er Jahre haben exemplarisch gezeigt, dass Einbrüche bei den Gästeankünften mit Mildwintern in Mitteleuropa ursächlich in Zusammenhang stehen. Die technischen Möglichkeiten der künstlichen Beschneigung befreien daher nicht vor dem Dilemma, dass die Lust am Alpenschifahren, Snowboarden etc. mit dem ganzheitlichen Wintererlebnis

–Naturschnee, Winterlandschaften und auch den großräumigen Winterverhältnissen in Mitteleuropa verbunden bleibt. Schneeunabhängige Alternativangebote alleine motivieren *nicht* für einen Winterurlaub in einem Schiessort (Pröbstl 2007: 7, BMWFJ 2009b: 41-42).

5.2.3 Kunstschneeproduktion und Klimaschutz

Problematisch ist die Kunstschneeproduktion aber unter dem Aspekt des „Klima-Fußabdruckes“ – des Ressourcenverbrauches bzw. des Emissionsausstoßes. Österreichweit besteht bereits auf rund 59% der gesamten Pistenfläche die Möglichkeit, diese künstlich zu beschneien. Bei den bedeutenden Skigebieten in Westösterreich liegt dieser Prozentsatz noch deutlich darüber. In beinahe allen Wintersportregionen wurden in den letzten Jahren umfangreiche Infrastrukturinvestitionen in die Kunstschneeproduktion mit dem Ziel getätigt, das Pistenangebot für den alpinen Wintersportort unabhängig von der natürlichen Schneeauflage aufrecht zu erhalten.

Gleichzeitig sind damit aber unerwünschte, negative Effekte verbunden. Kritisch einzuschätzen ist der hohe Energie- und Wasserbrauch der künstlichen Beschneigung. Beides ist mit „Klimaschutz“ und dem Ziel der Reduktion von Treibhausgasen nur schwer in Einklang zu bringen. Paradoxerweise wird so einer ungünstigen Auswirkung des Klimawandels – dem Ansteigen der Schneefallgrenze und des insgesamt geringeren Anteils von Schnee an den Niederschlägen natürlich in Abhängigkeit von der Seehöhe - mit einem erhöhten „Klima-Fußabdruck“ der touristischen Beschneigungs-Infrastrukturen begegnet. Dabei bestehen die negativen Konsequenzen keineswegs nur unter Erwägungen des Klimaschutzes bzw. der anzustrebenden Verminderung des Ausstoßes von CO₂ Emissionen.

Abbildung 8: Wasserreservoir Bürgeralm/Mariazell



Die künstliche Beschneigung erfordert große Wasserressourcen und beeinträchtigt das Landschaftsbild (Bürgeralm/Mariazell).
Foto: Oliver Tamme

Hervorzuheben sind auch negative Folgen für die Umwelt, das Landschaftsbild, und die Pflanzen und Tierwelt. Die nächtliche Beleuchtung der Anlagen und der Lärm der Gebläse vor allem in den Dämmer- und Nachtstunden ist für die alpine Tierwelt (vor allem die Vogelwelt) eine massive Beeinträchtigung. Das Landschaftsbild wird, abgesehen von den technischen Anlagen an sich, durch die Verlegung von Wasser-, Druckluft- und Stromleitungen bzw. durch die dabei eingesetzten Baumaschinen beeinträchtigt. Die damit verbundene Planierung der Pisten schädigt die Humusschicht, das Bodenleben sowie die Pflanzen- und Tierwelt. Schließlich sind die künstlichen Teiche zur Wasserspeicherung massive Landschaftseingriffe. Weiters verändert die künstliche Schneeaufgabe Bodentemperatur, Wasserangebot, Nährstoffeintrag und Zeitpunkt der Ausaperung. Die Aufbringung von Kunstschnee führt zu überwiegend negativen Umweltfolgen für das Grünland: Kunstschnee schmilzt zwei bis drei Wochen später, außerdem enthält sein Schmelzwasser etwa viermal mehr Mineralien und Nährstoffe als natürliches Schmelzwasser. Als Folge davon verändert sich der Bewuchs der Böden. Pflanzen mit höherem Nährstoffbedarf verdrängen die Magerrasen. Bis in Höhen unter 1.600 Meter Seehöhe gibt es kaum Schäden an der Vegetation. Darüber kann eine verkürzte Vegetationszeit dazu führen, dass sich einige Arten im Frühjahr nicht rechtzeitig entwickeln und damit nicht mehr vermehren können. Weiters gibt es erhebliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Bei Zusammentreffen von starker Schneeschmelze und ergiebigen Regenfällen steigt durch die zusätzlich aufgebrauchte Wassermenge des Kunstschnees die Gefahr von Vermurungen und Hangrutschungen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009, Naturschutzbund Österreich 2007).

5.2.4 Veränderungen im Landschaftsbild – „Schutt statt Gletscher“

Eine wenig beachtete Facette des Klimawandels ist die Veränderung des Erscheinungsbildes der hochalpinen Landschaft. Von den Sommerurlaubern aus dem Flachland wird der Eindruck der „Hohen Berggipfel und des imposanten Panoramas“ als besonderer Anziehungspunkt ja als Reisemotiv für das Aufsuchen der Bergwelt beschrieben. Teil dieser Bergkulisse sind die schneebedeckten Gipfel und das „ewige Eis“ der Gletscherregion. Manche alpine Panoramen sind fixer Bestandteil der lokalen Identität oder der eines ganzen Landes (beispielsweise der „Pasterzenblick“ von der Großglockner Hochalpenstraße aus). Das attraktive Marketinginstrument Gletscher widerspiegelt sich beispielsweise in der Schweiz in höheren Liegenschafts-, Miet- und Hotelpreisen in den betroffenen Ferienorten. Ähnliche Effekt sind auch für Destinationen in den österreichischen Zentralalpen anzunehmen. Mit dem Gletscherrückzug büßt das Landschaftsbild an Attraktivität ein - Der Gletscherrückzug hinterlässt Schutt- und Geröllhalden sowie wassergefüllte Mulden. Ein anderer Effekt besteht im Ansteigen der Waldgrenze, die eine Veränderung des Erscheinungsbildes der Almen und Bergmähder mit sich bringen wird. Insgesamt werden viele Landschaftselemente wie Gletscher, Vegetation oder Boden durch den Klimawandel große Veränderungen erfahren. Die Auswirkungen der Landschaftsveränderungen auf das Reiseverhalten der Sommertouristen ist jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nur schwer abschätzbar (OcCC2007: 84-85, StartClim2008.F: 23, Neff/Vuilleumier 2008: 26-27).

5.2.5 Schäden an touristischer Infrastruktur und Attraktionen durch Extremereignisse

Während für den Sommertourismus durch den Klimawandel an sich günstigere Bedingungen erwartet werden, ist für den Sektor ein erhöhtes Gefährdungspotenzial durch eine Häufung von Extremwetterlagen nicht auszuschließen. Diese können punktuell oder großflächiger auftreten. Regional verschieden, aber speziell in den alpinen Seiten- und Hochtälern kann dieses Gefahrenpotenzial erheblich sein. Die Gefahrenquellen liegen im Auftreten von Hitzeperioden, punktuellen Schwergewittern, Föhnstürmen, Hochwasser etc. Diese können mit hoher Schadwirkung verbunden sein. Hochwässer können Rutschungen, Vermurungen und Steinschläge auslösen. Hitzeperioden können den Wasserhaushalt negativ beeinflussen und Wasserknappheit bewirken. Auch Waldbrände können durch lang anhaltende Dürreperioden ausgelöst werden. Trotz oder gerade wegen der Klimaerwärmung stellen auch Lawinenabgänge vor allem im Hoch- und Spätwinter ein Bedrohungspotenzial dar.

Die in den letzten 60 Jahren stark intensivierete Nutzung von Berggebieten führte zu einem Ausbau und damit zunehmender Gefährdung von Infrastruktureinrichtungen und Siedlungen. Die Zunahme des alpinen Tourismusangebots (Hotellerie, Pensionen, Gastgewerbe, Bergbahnen, Aufstiegshilfen etc.) brachte eine Steigerung der Gefahrensituation für Touristen und Einheimische, die sich in den exponierten Gebieten aufhalten, mit sich. Natürlich sind auch die Sachwerte der touristischen Infrastruktur davon betroffen. Unterbrochene oder gesperrte Verkehrswege können die Folge sein. Die Erreichbarkeit, die für den Tourismus zentral ist, könnte damit entscheidend beeinträchtigt werden. Gleichzeitig ist die Sanierung der Verkehrswege und anderer Infrastrukturen vor Naturgefahren aufwändig und teuer (OECD 2007: 3, BMLFUW 2008b: 22-23, Deutsche Bank Research 2008: 6, OcCC 2007: 88).

Durch die Auswirkungen des Klimawandels treten Nutzungskonflikte zwischen dem Tourismussektor und anderen Sektoren aber auch übergeordneten Zielvorstellungen (beispielsweise der Raumplanung) verstärkt auf. Die Begrenztheit des alpinen Dauersiedlungsraumes steht den großen Flächenansprüchen des Tourismussektors gegenüber (Hotels, Pensionen, Ver- und Entsorgungseinrichtungen, Schipisten, Bergbahnen, Golfplätze etc.) Zielkonflikte zum Hochwasserschutz treten beispielsweise in Tourismusorten mit roten Zonen auf. Auch ein Ausweichen des Wintersporttourismus auf hochalpine Bereiche über 2.000 Meter Seehöhe würde in Konflikt mit den Zielen des Landschafts- und Naturschutzes treten. Nutzungskonflikte bestehen auch mit der Sicherung der Trinkwasserversorgung der Bevölkerung, die durch die Wasserentnahme zur Pistenbeschneigung beeinträchtigt werden könnte. Nutzungskonflikte bestehen auch gegenüber der Land- und Forstwirtschaft sowie der Jagdwirtschaft (AustroClim 2008a: 75, StartClim2007 2008a: 29).

5.2.6 Alpine Gefahren durch Degradation des Permafrostes

Größere Probleme sind jedoch mit einem weiteren Phänomen der fortschreitenden Klimaerwärmung verbunden: Des Auftauens der Permafrostböden. Permafrost tritt in den Ostalpen oberhalb von 2.500 bis 3.000 Meter Seehöhe auf. In Permafrostböden verankerte Infrastrukturen können durch die Temperaturschwankungen destabilisiert werden. Da teilweise die Fundamente von Masten und Stationen der Bergbahnen, die Fundamente der Schutzhütten sowie von Lawinenverbauungen im gefrorenen, losen Gestein verankert sind, steigt die Notwendigkeit die Fundamente kostspielig zu erneuern. Wei-

ters erhöht sich auch die Gefahr von Steinschlag, Rutschungen und Murabgängen, was wiederum erhöhte Investitionen in die Sicherheit zur Folge hat und zu einem Anstieg der Betriebsunterbrechungen führen kann (Peck 2005: 47, OcCC 2007: 90, StartClim2008.F: 5).

Von der Degradation des Permafrostes sind aber auch die hochalpinen Schutzhütten und die alpinen Wanderwege und Hochgebirgsrouten betroffen. Bauliche Einrichtungen verlieren an Stabilität und Standfestigkeit. Bei den alpinen Schutzhütten, die seinerzeit am Eisrand erbaut wurden tritt diese Problematik verstärkt auf. Weiters gibt es Probleme bei der Wasserversorgung. Für die Bergtouristen steigt das Risiko von Steinschlag und Felsstürzen. Wegübergänge die über Gletscher und Fels führen werden unpassierbar und müssen neu angelegt werden. Darüber hinaus steigt die Spaltensturzgefahr an (StartClim2008.F: 41, BMLFUW 2008b: 28).

5.2.7 „Klima-Fußabdruck“ von touristischen Aktivitäten

Der Tourismussektor ist ressourcen- und energieintensiv und trägt wesentlich zu den klimaschädlichen CO₂-Emissionen bei. Damit ist der Tourismussektor nicht nur Betroffener, sondern auch Mitverursacher des Klimawandels (WWF Deutschland 2010a). Dabei fällt vor allem der Transport (Flug- und Kfz-Verkehr – Anreise und vor Ort) und die Energieintensität des Sektors ins Gewicht (Müll- und Abwasserentsorgung, Beheizung im Winter, künstliche Beschneigung etc.). Steigende Energiepreise, wie sie unter der Maxime des sparsamen Umganges mit Ressourcen gefordert sind, beeinflussen umgekehrt negativ die Kostenstruktur der Beherbergungsbetriebe (OcCC 2007: 91, Deutsche Bank Research 2008: 8).

Tabelle 4: Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus/Alpinismus im Berggebiet (Zusammenfassung)

Bereich	Günstige Faktoren (+)	Ungünstige Faktoren (-)
Sommertourismus	Höhere Attraktivität und Marktchancen, Zunahme der warmen + heißen Tage - „Mediterranisierung“, Saison reicht in Übergangsjahreszeiten (Frühling, Herbst), Ganzjahresdestinationen, Klimagunst der alpinen Hochtäler	Risiko Extremwetterlagen (Hochwasser, Gewitter, etc.), bioklimatische Wärmebelastung in Becken- und Tälern (Schwüle- und Hitzestress), Sommer-Gletscherschneegebiete, Wasserknappheit (Trink- und Nutzwasser), Ausweitung des Tourismus in alpinen Hochtälern und Hochlagen führt zu Nutzungskonflikten gegenüber Land- und Forstwirtschaft, Ökosystem/Biodiversität etc. (begrenzter Raum, Ressourcen)
Bade- und Seentourismus	Höhere Attraktivität und Marktchancen, Zunahme der warmen + heißen Tage - „Mediterranisierung“, Anstieg der Wassertemperaturen (Badeseen)	Risiko Extremwetterlagen (Hochwasser, Gewitter etc.), Wasserknappheit (Trink- und Nutzwasser)
Alpine Gefahren	-	Risiko Extrem- und Elementarereignisse: Punktuelle und großflächige Schäden durch Hochwasser, Schergewitter, Lawinen u.ä. an Bausubstanz und Infrastruktur (Verkehrswege etc.), Waldbrände, Auftauen des Permafrostes
Veränderung Landschaftsbild	-	Gletscherschmelze führt zum Verlust des „Alpenpanoramas - „Schutt statt Gletscher“, Verwaldung der (Hoch)Almen
Wintertourismus + Schneesicherheit	Kurz- und mittelfristig (bis 2050) Wintersportorte in höheren Lagen	Attraktivitätseinbuße und Verlust von Marktanteilen zu befürchten, mittelfristig keine Wintersportbedingungen in kleinen Schigebieten in niedriger Höhe, langfristig auch größere Schigebiete in höherer Lage, Nutzungskonflikte (Ressourcen, Raum) mit Land- und Forstwirtschaft, Ökosystem/Biodiversität, Wettbewerbsnachteile im Vergleich zu den (höher gelegenen) touristischen Destinationen der Westalpen, einseitige Ausrichtung auf Schisport, abnehmende Schneesicherheit in Mittelgebirgslagen unter 1.500m, Verkürzung der Saison, künstliche Beschneigung nur begrenzt „erwärmungsresistent“ v.a. in Tieflagen, Kunstschnee: hoher Energie- und Wasserverbrauch, Landschaftseingriffe, ökologische Problematik

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

6. Anpassungsmaßnahmen für die Tourismuswirtschaft

Der Klimaschutz als Handlungsprinzip kann im Tourismussektor an verschiedenen Maßnahmen ansetzen, die ursächlich die Emissionen und damit den CO₂-Ausstoß verringern. Der Energie- und Ressourcenverbrauch sowie die Verkehrsintensität des Sektors bieten Ansatzpunkte. Primär ist eine Ausschöpfung sämtlicher Energiesparpotenziale zielführend. Dies kann durch den Einsatz verbesserter Technologien erreicht werden (z.B. Wärmeisolierung der Gebäudesubstanz). Mittels Mobilitätsmanagement ist eine Verlagerung des Individualverkehrs auf Massenförderungsmittel bei der Anreise einerseits (Bahn, Bus) und maßgeschneiderte Mobilitätslösungen vor Ort (Ortstaxis, Nachtmobile etc.) andererseits erzielbar. Stichworte sind „Sanfte Mobilität“, „Urlaub vom Auto“ etc. Dazu gibt es bereits einige Best Practice Beispiele. Nicht zuletzt sind jedoch auch CO₂-Abgaben und eine ökologische Steuerreform (z.B. in der Form einer Ressourcenbesteuerung) lenkungswirkend um den Treibhausgasausstoß zu limitieren (AustroClim 2008a: 75, VISUMtourism o.J.: 2).

Die Prognosen gehen davon aus, dass die Klimaerwärmung und ihre Begleiterscheinungen im Vergleich zum Sommertourismus dem Wintertourismus eher zusetzen werden. Daher sind die Anpassungserfordernisse auf dem Gebiet der touristischen Aktivitäten im Winter größer und schwerwiegender (AustroClim2008a: 75). Der Sommertourismus sollte im Hinblick auf den Klimawandel einerseits relativ leichter bewältigbar sein. Andererseits ist auch im Zuge des Klimawandels nicht nur mit günstigen Klima- und Wetterszenarien in Mitteleuropa und im Alpenraum zu rechnen. Die Auswirkungen auf den Sommertourismus sind deswegen weniger vorhersehbar und vielschichtiger. Deshalb dürfte die Angebots-Diversifizierung im Zentrum der Bemühungen stehen (StartClim2008.D 2009a: 45). Die wirtschaftliche Diversifizierung zur Förderung alternativer Wirtschaftssektoren mildert die Anfälligkeit des Sektors (Occc 2007: 92).

Alternative Tourismusangebote bestehen dabei im Sommerhalbjahr nicht nur aus wetterunabhängigen (=Schlechtwetter-) Aktivitäten. Darunter werden beispielsweise Angebote bzw. Innovationen für Fahrradfahrer (Flachland- und Gelände), den Reit- und Wassertourismus (Rafting, Canyoning), Ballonfahren, sowie generell dem Abenteuer- und Erlebnistourismus (Abenteuer- und Erlebnisparks) gesehen. Weiters die Bereitstellung der dafür notwendigen Infrastruktur (markiertes Wegenetz, Reitwege etc.). Alternativen zu alpinen Wintersportarten sind geführte Wanderungen, Schneeschuhwanderungen, Kutschenfahrten, Nordic-Walking, geführte Trekkingtouren mit Lasttieren, Wildtierbeobachtungen, Wintergolfen etc. Weiters sind gänzlich wetter- (und schnee-)unabhängige Ganzjahresangebote vonnöten. Dazu zählen Wellnessangebote (z.B. Thermalbäder) Kletterhallen, Events- und Veranstaltungen im Jahreskreis und deren Verknüpfung mit regionalen Ressourcen (z.B. Holz, Salz, Wasser, lokales Handwerk, Bergwerke, Höhlen etc.) als zukunftssträftig. Weiters hat die Verbindung mit Bildungs- und Kulturangeboten Potenzial (Beierkuhnlein/Foken 2008: 398, 401, AustroClim2008a: 75-75).

In letzter Konsequenz ist für einige auch touristisch intensiv genutzte Regionen das Erstellen eines integrativen Ausstiegsszenarios aus dem Schneetourismus anzugehen. Dies ist strategisch eine mittel- bis langfristig sehr wirksame Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel (StartClim2008.D 2009a: 45).

Zum Schutz des Alpintourismus bzw. der flächigen Infrastruktur sind Anpassungsmaßnahmen zur Abwehr von Naturgefahren und Extremereignisse zu setzen. Als Anpassungsmaßnahme sind integrierte

Maßnahmen zur Abwehr von Naturgefahren notwendig, wie sie auch schon in der Vergangenheit gesetzt wurden (vgl. Gefahrenzonenplanung, Wasserbau Wildbach- und Lawinenverbauung etc.) aber auch Renaturierungsmaßnahmen um beispielsweise den Flussläufen wieder mehr Raum zu geben. Bei den Seilbahnen und Liften sind bauliche Maßnahmen gegen die Auswirkung der Degradierung des Permafrostes vonnöten (OcCC 2007: 92).

Die Folge der Klimaerwärmung akzentuiert Nutzungskonflikte um den begrenzten Raum der alpinen Talschaften und Hochtäler. Im Sinne einer regionalwirtschaftlichen, tourismuspolitischen und ökologisch tragbaren Entwicklung wird es notwendig sein, nicht nur die tourismuspolitischen Instrumente entsprechend anzupassen, sondern auch verstärkt das Zusammenspiel und die Kooperation mit anderen Sektorpolitiken z.B. der Raumplanung, der Verkehrs- und Energiepolitik, der Wirtschaftsförderungspolitik usw. zu suchen und gemeinsame Vorgangsweisen und Konzepte zum effizienten Flächenmanagement, der effizienten Energieverwendung, sowie zur Prävention von Naturgefahren zu erarbeiten (StartClim2007 2008a: 29).

Symptomatisch für die Klimaerwärmung ist die Milderung der Wintermonate bzw. der Schneemangel. Aber auch hier werden die von den Großwetterlagen hervorgerufenen Schwankungen der Schneefälle von Jahr zu Jahr lange Zeit *größer* sein als der manifeste Trend. Erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts werden Mildwinter zum Regelfall. Bedingt durch die Wechselhaftigkeit der Schneeverhältnisse wurde im Wintertourismus schon in den vergangenen 20 Jahren auf die künstliche Beschneigung bzw. die technischen Voraussetzungen dafür gesetzt. Die Kunstschneeproduktion hat jedoch ökologische und ökonomische Folgekosten. Der Ressourcenverbrauch und die Kosten sind beträchtlich. Weiters gilt es zu bedenken, dass sich zukünftig aufgrund steigender Preise für den notwendigen Ressourceneinsatz (Energie, Wasser etc.), nicht zuletzt unter dem Klimaschutzaspekt, die Kunstschneeproduktion auch betriebswirtschaftlich nicht mehr rechnen wird. Gefordert ist zumindest der gezielte Einsatz von Beschneiungsanlagen unter bestimmten Voraussetzungen. Andere Maßnahmen bestehen beispielsweise in der Abdeckung von Gletschern mit Folien zur Eindämmung der Gletscherschmelze. Darüber hinaus wurden auch neue Projekte zur Erschließung von (schneesicheren) Schigebieten in höheren Lagen oder hochgelegenen Gletschergebieten bekannt. Diese „Flucht in die Höhe“ dient zur Sicherung eines durchgehenden Schibetriebs mit einem frühen Saisonstart und späten Saisonendes, hat aber ökologisch und raumplanerisch problematische Auswirkungen (Beierkuhnlein/Foken 2008: 268, StartClim2008D: 45, AustroClim2008a: 70).

Weitere Maßnahmen mit fragwürdigen Auswirkungen auf Landschaft und Naturhaushalt bestehen in der Errichtung von Schihallen und längeren geschlossenen Pistenabschnitten in tiefen Lagen („Indoor-Schipisten“). Mittels Versicherungen und Wetterderivaten können die finanziellen Verluste von einzelnen schneearmen Wintern abgedeckt werden (Risikostreuung). Längerfristig werden sich jedoch die zu erwartbaren höheren Prämien wirtschaftlich nicht rechnen (StartClim2008D: 45).

Anpassungsmaßnahmen können nach ihrem Ansatzpunkt (mehr reaktiv oder präventiv) in drei verschiedene Vorgehensweisen differenziert und zusammengefasst werden (nach VISUMtourism o.J.):

Symptombekämpfung

Darunter sind Maßnahmen zu verstehen die notwendig sind um unerwünschte Auswirkungen des Klimawandels im Sektor entgegenzuwirken. Maßnahmen dieser Kategorie wirken punktuell und werden situativ gesetzt. Die vielzitierten Beschneiungsanlagen sind ein typisches Beispiel für Maßnahmen dieser Art. Mittels „Optimierung“ der betrieblichen Abläufe von Hotels, Pensionen, Infrastruktureinrichtungen etc. kann kurzfristig reagiert werden.

Anpassungsstrategien

Anpassungsstrategien dienen der Vorwegnahme (Antizipation) des Klimawandels. Der Umgang mit Unsicherheiten muss auch darauf abstellen, dass Klimarisiken innerhalb des Berggebiets oder auch des jeweiligen Sektors etc. so gut wie möglich verteilt werden. Unter Anpassung sind alle Aktivitäten zu verstehen, die gesellschaftliche Akteure auf aktuelle oder zu erwartende klimatische Stimuli oder deren Effekte setzen, um Schäden zu mildern oder um mögliche Chancen zu nützen, die sich aus dem Klimawandel ergeben. Zusammen mit der Symptombekämpfung ist die Anpassungsstrategie eine primär reaktive Politik. Eine typische Anpassungsstrategie des Tourismussektors ist die Diversifizierung der Angebotsstruktur.

Ursachenbekämpfung (Klimaschutzmaßnahmen)

Die möglichst weitgehende Begrenzung der Klimaänderung wird als Vermeidung (engl. „mitigation“) bezeichnet. Diese setzt bei der Begrenzung oder auch Rückführung der Treibhausgasemissionen an. Gerade im Tourismussektor besteht dabei ein großes Potenzial. Durch die Senkung des Ressourcenverbrauchs, der Absenkung und Optimierung des Energieverbrauchs sowie Maßnahmen zum Mobilitätsmanagement kann der „Fußabdruck“ des Sektors beträchtlich verringert werden.

Abbildung 9: Beispiele für Anpassungsmaßnahmen des Tourismussektors



Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 5: Anpassungsmaßnahmen Tourismus

Bereich	Symptombekämpfung	Anpassungs(strategie)	Ursachenbekämpfung/ Klimaschutz
Sommertourismus	Generell betriebliche Optimierungen, Alternativprogramm für Hitzewellen (Badetourismus, Schaubergwerke etc.)	Wetterunabhängige Ganzjahresangebote, zielgruppenspezifische Diversifizierung	Verringerung des CO ₂ -Ausstoßes, generell Ressourcenverbrauch senken, Energiesparpotenziale, Mobilitätsmanagement
Bade- und Seentourismus	Generell betriebliche Optimierungen	Wetterunabhängige Ganzjahresangebote, zielgruppenspezifische Diversifizierung	Verringerung des CO ₂ -Ausstoßes, generell Ressourcenverbrauch senken, Energiesparpotenziale, Mobilitätsmanagement
Alpine Gefahren	Beseitigung von Schäden von Extrem- und Elementarereignissen (Hochwasser, Waldbrände etc.), Degradation des Permafrosts: Beseitigung von Schäden und Absicherung der Infrastruktur (alpine Wanderwege, Schutzhütten, Liftanlagen etc.)	Integrierte Maßnahmen (Wasserbau, Wildbach- und Lawinenverbauung, Gefahrenzonenplanung etc.) Renaturierungsmaßnahmen	-
Wintertourismus + Schneesisicherheit	Generell betriebliche Optimierungen, Künstliche Beschneidung (z.t. bereits vorweggenommen) und damit verbundene Infrastruktur, Versicherungsmodelle	Konzentration auf höhere Lagen der Zentralalpen (über 1.800m), Diversifizierung des Angebots, (schneeunabhängige) Alternativen, Ausstiegsszenarien für stark betroffene Orte/Regionen	Verringerung des CO ₂ -Ausstoßes, generell Ressourcenverbrauch senken, thermische Sanierung, Energiesparpotenziale, Mobilitätsmanagement

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

Sonstige Effekte
(Verkehrsinfrastruktur, Siedlungsraum,
Wasser- und Energiewirtschaft, Raumnutzung, -planung)

1. Verkehrsinfrastruktur

Die Verkehrsinfrastruktur (VIS) ist in der modernen, globalisierten und arbeitsteiligen Wirtschaft und Gesellschaft von größter Bedeutung für alle Sektoren und Bereiche. Zur Verkehrsinfrastruktur zählen dabei in erster Linie das Straßen- und Eisenbahnnetz sowie deren Transportmittel. Direkt abhängig von der VIS ist der gesamte Transportsektor, sowie der Berufs- und Reiseverkehr (Tourismus). Die Empfindlichkeit des Verkehrssystems gegenüber Störungen ist aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens und dem Selbstverständnis einer fast unbeschränkten Mobilität bereits heute sehr groß. Gleichzeitig ist die VIS höchstgradig anfällig für Behinderungen und Schäden, die aus Witterungserscheinungen, Extrem- und Elementarereignissen resultieren. Dabei ist die räumliche Ausdehnung und Exponiertheit (Hanglagen, alpine Seiten- und Hochtäler) des kleinteiligen Verkehrsnetzes vor allem für ein alpines Land wie Österreich beträchtlich. (Beierkuhnlein/Foken 2008: 258, OcCC 2007: 116-119, UBA 2010d: 61-62).

Abbildung 1: Hochwasser



Extrem- und Elementarereignisse wie Hochwasser können den Schienen- und Straßenverkehr nachhaltig behindern (Steiermark, Laussa).

Quelle: BMLFUW

Für die Verkehrsinfrastruktur sind einerseits die Temperaturerhöhung sowie die Entwicklung der Temperaturextreme (Maxima!) von Interesse, andererseits das Auftreten von Extremniederschlägen (Hochwasser, Starkschneefälle, Gewitter- und Sturmaktivität). Besonders im alpinen Bereich tritt die Gefahr von Massenbewegungen (Bergstürze, Muren) auf. Im hochalpinen Raum ist punktuell der Permafrostrückgang ein Faktor.¹ Im Hochgebirge könnten potenziell höhere Schneemengen auftreten (OcCC 2007: 117, UBA 2010d: 63).

Günstig wirkt sich auf den Straßenverkehr im Winter die Abnahme von Frost- und Eistagen aus. Aber ganz allgemein führt die Abnahme von widrigen Witterungsverhältnissen zu geringeren Einschränkungen auf allen Verkehrssektoren (Unfallrisiko etc.). Damit verbunden sind auch geringere Kosten für den Winterdienst und die Straßenerhaltung. Dennoch kann es auch weiterhin zu Extremereignissen durch Kältewellen und Starkschneefälle kommen. Erst nach 2050 sinken die Wahrscheinlichkeiten kalter und schneereicher Winter deutlich. In den Hochsommermonaten führt die Klimaerwärmung in allen Höhenstufen der Alpen zu einer stärkeren thermischen Beanspruchung der (Bau)materialien. Extreme Temperaturmaxima (Hitzewellen) führen zu hohen Oberflächentemperaturen und damit verbundenen Schäden an Straßenbelägen und an den Gleisanlagen (Verwerfungen). Streckenabschnitte im Wechsel zwischen Sonne und Schatten sowie kurvenreiche Bereiche wie im Berggebiet sind davon besonders betroffen. Anfällig für hitzebedingte Materialschäden sind auch Brückenkonstruktionen und elektrische Anlagen. Die Begleitvegetation des Straßen- und Schienenverkehrsnetzes ist durch Böschungs- und Waldbrände (Hitzewellen) potenziell gefährdet. Gewitteraktivität und Blitzschläge können zur Unterbrechung der Elektrizitätsversorgung und damit zu Ausfällen oder Schäden an Signalen und elektronischer Infrastruktur führen. Sturmschäden betreffen vor allem den Oberbau (z.B. Oberleitungen, Signalanlagen). Das Straßenverkehrsnetz hat ganz allgemein gegenüber dem Schienennetz den Vorteil, dass bei Unpassierbarkeit häufig alternative Fahrrouten vorhanden sind (Beierkuhnlein/Foken 2008: 259-260, IPCC 2007b: 556, OcCC 2007: 119, UBA 2005a: 150ff).

Negative Auswirkungen können auch bei Extremniederschlägen eintreten: Davon betroffen sind das Straßen- und Schienennetz, Tunneln und Unterführungen. Starkniederschläge können zur Überlastung der Drainage- und Kanalsysteme führen, sowie Unterspülungen (von Böschungen, Bahndämmen) hervorrufen (OcCC 2007: 116, UBA 2010d: 65-72).

Im Permafrost verankerte Infrastruktureinrichtungen können durch Setzungserscheinungen punktuell instabil werden. Massenbewegungen, (Muren, Steinschlag etc.) ausgelöst durch den Permafrostrückgang, können VIS-Einrichtungen beschädigen. Betroffen davon sind Straßen und Bahntrassen in Hochlagen, Aufstiegshilfen (Schilifte, Seilbahnen) sowie Schipisten, Wanderwege und Kletterrouten (OcCC 2007: 117, UBA 2010d: 63-68, Umweltdachverband 2006: 34-40, 52f).

1. Siehe dazu auch Kapitel Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und biologische Vielfalt, Punkt 7.2. und 10.1. Permafrostrückgang und deren Folgen.

2. Siedlungsraum (Bauen, Wohnen) und die funktionellen Infrastrukturen

Zu diesem Bereich zählen die Siedlungen (Wohngebäude etc.) sowie die dazugehörigen Infrastrukturelemente, Ver- und Entsorgungseinrichtungen (z.B. Energie- und Wasserversorgung). In Österreich gibt es rund 2,05 Mio. Wohngebäude, die Mehrzahl davon sind Ein- und Zweifamilienhäuser. Aufgrund der überwiegend gebirgigen Topographie (Höhenlage, Steilheit des Geländes) ist der Dauersiedlungsraum hierzulande eingeschränkt. Nur rund 40% der Staatsfläche sind als Dauersiedlungsraum ausgewiesen. Die westlichen Bundesländer (Vorarlberg, Tirol und Salzburg) haben sogar nur Anteile zwischen 12 und 22 Prozent (ÖROK 2008a: 32). Die Nutzung der *vorhandenen* Fläche für Verkehrs- und Siedlungszwecke steigt hingegen kontinuierlich an, zum Teil auch in Bereiche, die sich aufgrund ihrer Exponiertheit (Hochwassergefährdung etc.) nicht dafür eignen. Die damit geschaffenen Werte führen aber auch dazu, dass daraus auch potentiell höhere Gefahren und Schadenssummen resultieren (UBA 2010d: 70). Besonderer Handlungsbedarf gibt sich durch die lange Nutzungsdauer von Gebäuden, Wohnungen etc. Sie beträgt 50 bis 100 Jahre. Deshalb ist es wichtig architektonische, raumplanerische, baukonzeptionelle und gebäudetechnische Entscheidungen frühzeitig an stattfindende und künftige klimatische Veränderungen anzupassen (OcCC 2007: 110).

Für die Bebauung sowie die funktionellen Infrastrukturen sind einerseits die Temperaturerhöhung sowie die Entwicklung der Temperaturextreme (Maxima!) von Interesse, andererseits das Auftreten von Extremniederschlägen (Hochwasser, Starkschneefälle, Gewitter- und Sturmaktivität). Die Auswirkungen daraus bergen auch die Gefahr von Massenbewegungen (Steinschläge, Bergstürze, Muren und Lawinen). Im hochalpinen Raum ist punktuell der Permafrostrückgang ein Faktor.² Im Hochgebirge könnten potenziell höhere Schneemengen auftreten (OcCC 2007: 110, UBA 2010d: 75).

Günstig ist sicherlich der abnehmende Heizwärmebedarf im Winterhalbjahr. Dies betrifft die Haushalte im Alpenraum noch stärker als in den Flachlandgebieten (StartClim 2006a: 23). Eine negative Auswirkung des Klimawandels ist hingegen die thermische Belastung von Bauteilen sowie der Innenräume (Aufheizung) in den Sommermonaten. Gebäude mit schlechter Wärmedämmung und hohem Glasanteil heizen sich besonders leicht auf. Im Vergleich zum Flachland kommt diese Auswirkung in den alpinen Räumen jedoch nur abgeschwächt zur Wirkung. Die Höhenlage bzw. die damit verbundene stärkere nächtliche Abkühlung wirkt dem entgegen. Durch die mögliche Zunahme von Niederschlagsintensitäten ist die derzeitige Kapazität von Dachrinnen und Kanalsystemen zu redimensionieren. Weiters besteht die Gefahr von mechanischen Belastungen von Bauwerken durch Stürme und Hagelschlag. Höhere Schneelasten können Probleme für die Tragwerkssicherheit der Gebäude mit sich bringen. In alpinen Regionen können starke Niederschläge vermehrt zu Massenbewegungen und im Winter vermehrt zu Lawinenabgängen führen und Gebäude und Infrastrukturen zerstören. Durch Hochwasserereignisse können in talnahen Siedlungsbereichen und Gewerbegebieten erhebliche Schäden durch eindringendes Wasser auftreten. Davon sind sowohl Sachwerte als auch die Gebäudesubstanz selbst betroffen. Bei Extrem- und Elementarereignissen ist auch damit zu rechnen, dass in weniger gut

2. Siehe dazu auch Kapitel Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und biologische Vielfalt, Punkt 7.2. und 10.1. Permafrostrückgang und deren Folgen.

erschlossenen Gebieten wie dem peripheren Berggebiet Probleme bei Rettungsmaßnahmen, Instandsetzung und Wiederaufbau eintreten (Beierkuhnlein/Foken 2008: 258, 273, OcCC 112ff, UBA 2010d: 76ff).

Die Wasserversorgung wird mit großer Wahrscheinlichkeit trotz veränderter Nachfrage (z.B. erhöhter Bedarf im Sommer) gesichert bleiben. Bei der Abwasserentsorgung können steigende Temperaturen, Trockenperioden, aber auch Starkniederschläge möglicherweise Anpassungen im Betrieb von Kläranlagen erforderlich machen (OcCC 2007: 111).

2.1 Exkurs - Klima und Besiedelung im Alpenraum

Die Siedlungstätigkeit im Alpenraum ist immer auch mit den klimatischen Entwicklungen in Beziehung gestanden. Die Besiedlung des Alpenraumes reicht dabei bis in die Steinzeit zurück. In der Jungsteinzeit (ca. ab 5.000 v.Chr.) erfolgte die Brandrodung und Beweidung der Alpentäler. Die Vergrößerung der Nutzungsflächen erfolgte dabei von *oben nach unten*. Die Hochlagen und Almen wurden als Erstes begangen oder als Weiden benutzt.

Klimatisch steht diese Besiedelungsphase am Ende des mittelholozänen Wärmeoptimums, das von ca. 7000 bis 3.500 v. Chr. andauerte. Während dieser Wärmeperiode erreichte die Waldgrenze in den zentralen Ostalpen Höhen von 2.400 bis 2.550m, die danach nie mehr erreicht wurden. Die Gletscher erreichten historische Tiefststände.³ Gefolgt ist die Klimagunst dieser Zeit von einer kälteren Periode. Danach nahm die Siedlungstätigkeit erst wieder im Spätneolithikum (ab ca. 3.000 v.Chr.) zu. Ab der frühen Bronzezeit (ca. 2.200 v.Chr.) wurden auch die alpinen Seitentäler intensiver besiedelt, und in der mittleren Bronzezeit (ca. 1.500 v.Chr.) erreichte die Siedlungstätigkeit ihre maximale Ausdehnung.

Im Allgemeinen *begünstigen warme* Klimaverhältnisse daher die Siedlungsaktivität. Pollenanalytische und archäologische Befunde belegen jedoch auch während klimatisch ungünstigerer Perioden eine rege Siedlungstätigkeit im Alpenraum. Das Vorhandensein von Rohstoffen (Salz, Kupfer- und Eisenerzen) und andere sozioökonomische Faktoren beeinflussten neben klimatischen Faktoren ebenfalls das Siedlungsverhalten. Nur Klimarückschläge stärkerer Intensität so zwischen 3.700-3.200 v.Chr., die mit starken Gletschervorstößen verbunden waren, führten zu einem Rückgang der Siedlungsaktivitäten vor allem in den alpinen Hochtälern. Sosehr also Klimagunst ein wesentlicher Faktor für Siedlungsaktivitäten darstellt, so lässt sich daraus keine Kausalbeziehung ableiten (Oeggel/Nicolussi 2009: 77ff).

Die naturräumlichen Voraussetzungen der Ostalpen haben die Siedlungstätigkeit entscheidend beeinflusst, bergen aber auch das Potenzial von Naturgefahren. Das zentrale Charakteristikum der Alpen ist ihre geologisch betrachtet „sprunghafte“ Naturdynamik. Die Alpen sind ein erdhistorisch junges Faltengebirge, dessen Ausbildung bis dato noch nicht abgeschlossen ist, so dass es sich in einem steten Wandel befindet. Ausdruck dessen sind *Abtragungsprozesse* in den *oberen*, und *Ablagerungsprozesse* in den *unteren* Höhenstufen. Auf Grund labiler Gesteinsschichtungen, steilem Relief, hohen Niederschlägen, kurzer

3. In diese Periode fällt auch die Lebenszeit von „Ötzi“ - dem „Mann vom Hauslabjoch“ - der ca. um 3.500 v. Chr lebte und die Sommerweidegebiete des hintersten Ötztals aufsuchte.

Vegetationszeit und ausgeprägter Temperaturextreme laufen viele Naturprozesse in Form einer sprunghaften Dynamik als Bergstürze, Muren, Hochwasser, Lawinen, Stürme usw. ab. Biologisch betrachtet sind „Naturkatastrophen“ also „normale“ Prozesse.

Die letzte Eiszeit prägt dabei den Siedlungsraum der Ostalpen bis heute. Durch die Arbeit der Gletscher wurden die Täler erweitert und verbreitert. Auch die Passübergänge wurden durch die Eisbewegung niedriger und breiter, weil die Gletscher als verbundenes Eisstromnetz über die Wasserscheiden hinaus reichten. Darüber hinaus hinterließen die Gletscher an den Talhängen charakteristische Verebnungen, sogenannte Terrassen, die später vom Menschen als bevorzugte Siedlungs- und Nutzungsplätze erschlossen wurden. Nicht zuletzt wurde auch die Bodenbildung durch das von den Gletschern mittransportierte Moränenmaterial günstig beeinflusst. Paradoxerweise haben also gerade die Eiszeiten die Ostalpen zu einem relativ siedlungsfreundlichen Raum geformt.

Die Hinterlassenschaft der Eiszeit erhöht aber gleichzeitig das geoökologische Gefahrenpotenzial, weil das Lockermaterial der Moränen bei Starkregen leicht in Bewegung kommen und Muren auslösen kann. Ein gefährliches Überbleibsel der Eiszeit sind auch die übersteilten alpinen Talflanken, die die abgetauten Gletschermassen hinterließen. Aus diesen lösen sich noch heute Bergstürze. Eine weitere Gefahrenquelle des Hochgebirges sind Gletscher und Permafrostböden und die damit verbundenen Verwitterungsprozesse. Die Frostsprengung ist eine temperaturabhängige Form der physikalischen Verwitterung. Wasser dringt hierbei in Risse und Spalten des Gesteins ein. Da sich Wasser beim Gefrieren ausdehnt, wird dadurch das Gestein gesprengt. In der Regel beschränkt sich dieser Auftauprozess auf die kurzen Hochsommermonate. Das Eis wirkt wie ein Kitt, der das Gestein zusammenhält (Bätzing 2003: 30ff).

Für die Besiedelung der alpinen Täler wurden vorzugsweise die Schwemmkegel der einmündenden Wildbäche genutzt. Dies sind die Ablagerungsbereiche der transportierten Sedimente an einer Stelle an der der Fluss an Gefälle verliert, also beim Übertritt vom steilen Gelände in den Talbereich. Diese Schwemmkegel sind alte Siedlungsstandorte, liegen hochwassersicher und gut besonnt über dem Hauptfluss, und weisen gute Bodenqualitäten auf. Die Talböden hingegen waren seinerzeit weitgehend versumpft und wurden häufig durch die Hochwässer des Talflusses überschwemmt. Gefahrenpotenzial bestand jedoch weiterhin bei größeren Geschiebeschüben, vor allem durch Murgänge, weil es dann zu unvorhersehbaren Bachausbrüchen mit entsprechenden Schäden in den Ortschaften, bei der Bausubstanz und den Verkehrswegen durch Wasser und Bachschutt kommt. Die Ausbrüche von Wildbächen haben historisch auch immer wieder große Schäden im Alpenraum angerichtet: Im 12. Jahrhundert beispielsweise wurde Lienz vom Schleinitz- und Grafenbach fast völlig zerstört. 1347 Matrei in Osttirol vom Bretterwandbach. 1669 Schwaz vom Lahnbach, 1737 und 1884 Zell am See durch den Schmittenbach.

Das latente Gefahrenpotenzial durch ausbrechende Wildbäche zeigt auch, dass im Hochgebirge Prozesse, die in den oberen Höhenstockwerken ihren Ausgang finden, in kürzester Zeit die tiefen Tallagen erreichen und hier als Muren, Hochwasser oder Lawinen große Zerstörungen anrichten. Hoch- und Tieflagen sind ökologisch also sehr eng miteinander vernetzt.

2.2 Alpine Naturgefahren im Alpenraum

In Österreich als Gebirgsland stellen Naturgefahren in vielen Regionen ein Sicherheitsrisiko dar: Hochwasser, Muren, Lawinen, Hangbewegungen und Steinschlag bedrohen Menschen, ihren Lebens-, Siedlungs- und Wirtschaftsraum, Verkehrswege- und Versorgungswege und die gesamte Infrastruktur.

2.2.1 Überflutungen durch Hochwasser

Hochwasser entsteht durch extreme Niederschläge, die in Wildbacheinzugsgebieten zu einem raschen Anstieg des Wasserabflusses und dadurch zu Überschwemmungen in den Talschaften führen. Entsprechend der Geologie in den Einzugsgebieten kann ein Hochwasserereignis durch die Kraft des abfließenden Wassers große Massen an Feststoffen abtragen, als Geschiebe (Wildholz) durch den Wildbach transportieren und auf dem Schwemmkegel ablagern.

Hochwasser und hoch anstehendes Grundwasser gefährden Gebäude und Außenanlagen. Die Schäden entstehen durch die Strömung des Wassers, den Druck des Wassers auf die Wände, Erosion und Unterspülung, den Auftrieb und das eindringende Wasser selbst. Hochwässer können nicht nur Schäden am Inventar verursachen, sondern auch die Bausubstanz gefährden. So können durch den Wasserdruck Seitenwände einstürzen, durch Unterspülung der Fundamente kann es im Extremfall zum Gebäudeeinsturz kommen (BMLFUW 2007a: 4, 2010a: 12-15).

Die Hochwässer der Donau und der Zubringerflüsse wie Inn, Salzach und Enns sind historisch gut belegt und vielfach aufgetreten. Die Hochwasserereignisse von 1999, 2002 und 2005 haben gezeigt, welche volkswirtschaftlichen Werte in einem Gebirgsland wie Österreich von Überflutungen bedroht sind. Nach Angaben der Versicherungsbranche befinden sich ca. 163.000 Gebäude mit einem Wert von rund 114,0 Milliarden Euro österreichweit an Standorten, die statistisch mindestens alle 30 Jahre mit einem Hochwasser zu rechnen haben. Weitere rund 30.500 Objekte (geschätzter Wert rund 21,0 Milliarden Euro) sind alle 30 bis 100 Jahre von Überschwemmungen betroffen. Fazit dessen ist, dass in den letzten 50 Jahren das *Schadenspotenzial* von Hochwässern zugenommen hat, *weniger* durch verschmutzte Hochwasser als auf Grund der Tatsache dass sich immer *mehr* Infrastrukturwerte in exponierten Lagen befinden (ORF.at 2010a, OcCC 2007: 56).

Viele Faktoren, die zu den Schäden bei Hochwasser führen sind deshalb „hausgemacht“ und somit auf veränderte Nutzungsansprüche sowie die Regulierungsmaßnahmen der vergangenen Jahrzehnte zurückzuführen:

- ◆ Viele inneralpine Fließgewässer (Salzach, Enns, Inn etc.) wurden seit damals reguliert und in ihr heutiges Gewässerbett gelegt. Aus damaliger Sicht sollte damit eine größere Hochwassersicherheit erzielt werden. Dies gelang auch mit der Verbesserung der Abflussverhältnisse, und der Kanalisierung der Flussläufe. Neue, begradigte Flußverläufe wurden geschaffen. Dies bewirkte neben einer Beschleunigung des Abflusses im Hochwasserfall aber auch massive Schäden am Ufer bzw. den Uferdämmen;
- ◆ Da fast alle Abschnitte der größeren Flüsse „technisch“ geregelt werden ist der Wasserstand heutzutage wasserbaulich kontrolliert, sofern die Mengen im Rahmen der Berechnung liegen. Namentlich die Energieversorgungsgesellschaften (Staustufen) an der Donau und ihren Zubringern seien hier genannt;
- ◆ Durch die Versiegelung der Landschaft (Verkehrswege, Bauland aber auch die Verdichtung der landwirtschaftlichen Böden durch Traktoren) steigt der Anteil des Niederschlags, der direkt abfließt und nicht zurückgehalten wird. Dadurch hat sich die Wassermenge in Abhängigkeit vom Wettergeschehen vergrößert. „Offene Flächen“ wie Wiesen, Wälder dienen hingegen als Puffer und tragen dazu bei, das Niederschlagsspitzen nur gepuffert zu den Pegelständen der Flüsse beitragen;
- ◆ Konträr zu ökologischen Zielsetzungen und dem Naturschutzgedanken ging damit auch eine völlige Veränderung des Erscheinungsbildes der natürlichen Gewässer einher: Gewässerbegleitende Schotterbänke und Auwälder wurden beseitigt, der ökologische Wert massiv beeinträchtigt. Maßnahmen eines integrierten Hochwasserschutzes müssen deshalb die problematischen Effekte dieser Regulierungsmaßnahmen wieder teilweise *rückgängig* machen (Zopp 2007: 19-21).

Zum Schutz vor Wildbächen werden Sperren für die Stabilisierung der Bachsohle gegen Tiefenerosion und zum Rückhalt der Geschiebe und Wildholz errichtet, weiters kommen Sperren zur „Dosierung“ des Hochwasserabflusses und des Geschiebetransportes hinzu. Der Hochwasserschutz in den Talräumen (Freiland) besteht hingegen primär in der Freihaltung der natürlichen Überflutungs- und Ablagerungsflächen. Zu den vorbeugenden Maßnahmen zählt daher das neue Gebäude nur außerhalb der von der Wildbach- und Lawinenverbauung ausgewiesenen (gelben und roten) Gefahrenzonen errichtet werden sollten. Dies erfordert die Freihaltung von hochwassergefährdeten Fläche vor Widmungen mit hohem Schadenspotenzial (v.a. Wohn- und Gewerbeflächen, Verkehrsinfrastruktur) sowie die raumplanerische Sicherung potenzieller Überflutungs- und Retentionsflächen (Rückhalteflächen). Vonnöten ist weiters ein integriertes Hochwassermanagement, das unterschiedliche Disziplinen und Akteure umfasst.

Am Hochwasserschutz manifestiert sich auch ein Zielkonflikt, wie er für die Raumplanung typisch ist. Prinzipiell ist die interkommunale Kooperation gefordert, weil den kommunalen Entwicklungsinteressen (Widmung als Bauland etc.) das übergeordnete Gemeinwohl (des Hochwasserschutzes) unterzuordnen wäre, konkret der Bereitstellung von Überflutungsflächen: Die Sicherung von Retentionsflächen haben aufgrund ihrer topographischen Lage, der vorhandenen Flächenreserven oder der Nachbarschaft zu größeren Agglomerationsräumen nämlich nur wenige Schlüsselgemeinden zu tragen. Diese Gemeinden liegen zumeist im Oberlauf der Flüsse. Diese Gemeinden müssen dann den Nachteil der Einschränkung ihrer Siedlungs- bzw. gewerblich-industriellen Entwicklung zum Vorteil flussabwärts gelegener Gemeinden in Kauf nehmen. Probleme entstehen daraus sowohl wegen der fehlenden Akzeptanz für Unterlieger-Probleme bei den Anrainergemeinden im Oberlauf. Weiters besteht bei den „Unterliegern“ auch keine Bereitschaft ihnen diese nicht realisierbaren baulichen Entwicklungen finanziell abzugelten (Seher/Beutl 2007: 12-13).

2.2.2 Massenbewegungen (Felsstürze, Murengänge, Erosion)

Wenn die Menge des vom Wasser mitgeführten Geschiebes so groß ist, dass die bewegte Masse ein Gemisch von Erde, verschieden großem Geschiebe, oft auch mächtigen Felsblöcken oder auch Holz bildet, spricht man von einer *Mure*. Sie transportiert deutlich mehr feste Stoffe als ein Hochwasser, erreicht wesentlich höhere Fließgeschwindigkeit und hat ein großes Zerstörungspotential. Entsprechend der Zusammensetzung können Muren aus grobem Geröll, feinem Schlamm oder einer Mischung aus beidem bestehen. Die Ereignisse treten in der Regel kurzfristig, ohne Vorwarnzeit, ein. Durch den Anprall können beträchtliche Gebäudeschäden, bis zur Gefährdung der Standsicherheit, auftreten. Murgänge sind in den Gefahrenzonenplänen vermerkt. Zu den präventiven Maßnahmen zählen die Errichtung neuer Gebäude nur außerhalb Gefahrenzonen und bauliche Maßnahmen zur Schadensminimierung (BMLFUW 2010a: 20-21).

Hangbewegungen können in Form von langsamen Kriech- und Gleitbewegungen oder schnellen Rutschungen und Hangmuren auftreten. Die Bewegungsrate kann zwischen einigen Zentimetern pro Jahr bis mehreren hundert Metern innerhalb von Sekunden liegen. Geologisch besonders rutschungsgefährdete Gebiete in Österreich liegen in der Flysch(Sandstein)zone des Bregenzer- und Wienerwaldes, in den jungtertiären Hügelländern des Alpenvorlandes, in den inneralpinen Schiefergebirgen oder im Bereich eiszeitlicher Lockermassen (Moränen). Rutschungen werden durch starke bzw. lang andau-

erde Niederschläge ausgelöst. Wenn der Boden steiler Hänge wassergesättigt ist, geraten die Bodenschichten in Bewegung. Neben großen Niederschlagsmengen stehen Hangbewegungen auch häufig im Zusammenhang mit Quellen und oberflächennahem Grundwasser, deshalb zählt die Entwässerung des Rutschkörpers zu den effizientesten Methoden der Stabilisierung. Darüber hinaus werden technische Schutzsysteme wie Verankerungen, Verpfählungen oder Stützbauwerke eingesetzt, um den Hängen größere Stabilität zu geben (BMLFUW 2007a: 4-5, BMLFUW 2010a: 23-25).

Abbildung 3: Rutschung



Rutschungen werden meist durch starke und lang anhaltende Niederschläge ausgelöst.

Quelle: BMLFUW

Steinschlag ist der Absturz einzelner Gesteinstrümmen, die durch Verwitterung und mechanische Einflüsse (Frost, Baumwurzeln) aus felsigen Steilböschungen und Felswänden gelöst werden. Steinschläge erreichen Geschwindigkeiten von über 100 km/h. Steinschlag führt häufig zu schweren Schäden an Gebäuden und gefährdet auf langen Abschnitten die Verkehrswege in den Alpen. Der Absturz größerer Felsmassen wird als Felssturz oder Bergsturz bezeichnet.⁴ Der Schutz vor Steinschlag wird überwiegend mit Stahlnetzen durchgeführt, welche die Steine während des Sturzprozesses auffangen. Zur sicheren Ablagerung von Felsstürzen werden Auffangdämme errichtet. Auch dieser Naturgefahr kann nur durch ein konsequentes Ausweichen der bezeichneten Gefahrenzonen entgangen werden (BMLFUW 2007a: 4-5, 2010a: 29).

4. Der historisch größte Bergsturz mit verheerenden Zerstörungen ereignete sich ausgelöst durch ein Erdbeben 1348 am Dobratsch bei Villach. Berichten zufolge wurden damals 17 Dörfer verschüttet.

Abbildung 4: Steinschlag



Steinschläge erreichen Geschwindigkeiten von über 100km/h

Quelle: BMLFUW

2.2.3 Lawinen

Lawinenabgänge haben in den hochgelegenen Alpentälern immer wieder große Schäden verursacht und viele Opfer gefordert. Zuletzt forderte die Lawinenkatastrophe von Galtür 1999 38 Todesopfer. Lawinen sind Schneemassen, die bei raschem Absturz auf steilen Hängen oder in Gräben infolge der Bewegungsenergie oder Luftdruckwelle oder durch ihre Ablagerung große Schäden oder Zerstörung in den gefährdeten Gebieten verursachen. Fließ- und Staublawinen haben ein enormes Zerstörungspotenzial und gefährden die Standsicherheit von Gebäuden. Staublawinen erreichen Geschwindigkeit von bis zu 220km/h und entwickeln enorme Druck- und Sogkräfte. Außenwände und Dach können durch Anprall, Reibung oder das Gewicht der komprimierten Schneemassen beschädigt werden. Insbesondere Staublawinen führen zur kompletten Zerstörung von Gebäuden.⁵ Es besteht Lebensgefahr, auch für Personen, die sich in den Gebäuden befinden. Aufgrund des Zerstörungspotentials sind die Möglichkeiten eines effektiven Gebäudeschutzes gegen Lawinen auch sehr beschränkt.

5. Das Lawinenunglück von Galtür im Februar 1999 wurde von einer Staublawine verursacht.

Abbildung 5: Lawinenabgang



Staublawinen entwickeln enorme Druck- und Sogkräfte

Quelle: BMLFUW

Das Hauptaugenmerk beim Lawinenschutz wird auf permanente Sicherungs- und Schutzmaßnahmen zur Sicherung der Siedlungsräume gelegt. Zu den präventiven Maßnahmen zählt, dass neue Gebäude nur außerhalb der Gefahrenzonen errichtet werden sollten, oder unter dem Schutz bereits bestehender Objekte. Passive Maßnahmen sind beispielsweise das Aufstellen von Lawinenverbauungen (Betonwände und Überdachungen, Zäune und Gitterverbauten) zum Schutz von Straßen, Brücken und Objekten. Aktive Maßnahmen sollen dem Entstehen von Lawinen vorbeugen. Intakte Schutzwälder bieten dabei den besten Schutz. In den Bezirken Westösterreichs mit geringer Waldausstattung gibt es auch Wiederaufforstungsprogramme. Ansonsten greift man zu künstlichen Schutzbauten mittels Netzen, Gitter oder windbrechenden Barrieren aus Holz, Beton oder Stahl. Dadurch wird die Schneedecke entweder unterteilt, sodass sich keine großen Schneebretter ablösen können, oder Schneeanhäufungen an kritischen Punkten verhindert. Auch Lawinensprengungen gehören zu dieser Maßnahmengruppe. Mit Hilfe von Hubschraubern, Kanonen oder Seilbahnsystemen wird Sprengstoff an kritische Stellen befördert, um kleine kontrollierte Lawinen auszulösen. Dadurch wird die Schneedecke entlastet und man kommt unkontrollierten Lawinenabgängen zuvor (BMLFUW 2007a, 2010a).

2.2.4 Waldbrände

Bis dato stellen Wald- und Flächenbrände im Alpenraum kein sehr bedeutendes Gefahrenpotenzial dar. Beispielsweise wurden im Jahr 2011 bundesweit nicht mehr als 190 Waldbrände registriert. Im bisher waldbrandreichsten Jahr 2007 traten 240 Ereignisse auf. Die meisten Feuer werden im Frühjahr und Sommer registriert.⁶ Gehäuft sind sie in Teilen von Kärnten und Tirol sowie in den südlichen Regionen von Niederösterreich vorgekommen. Feststellbar ist, dass vor allem an der Alpensüdseite eine deutliche Zunahme von Brandereignissen zu beobachten ist (ZAMG 2011t). Das Bedrohungspotenzial könnte sich zukünftig, ausgelöst durch lange Hitze- und Trockenperioden, steigern. Großflächige Brände trockener Wälder, wie sie derzeit in Südeuropa und Kalifornien auftreten könnten auch hierzulande auftreten und Menschen und Sachwerte bedrohen (UBA 2010d: 82).

Abbildung 6: Waldbrand Vorderes Jamtal (Galtür) November 2011



Langanhaltende Trockenperioden begünstigen das Auftreten von Waldbränden (Jamtal/Galtür)

Quelle: Lukas Hechl

Der Dauersiedlungsraum des Berggebiets ist beschränkt. Steigender Siedlungsdruck, die Verkehrerschließung der Alpen sowie starke Wachstumsraten des Tourismus haben in den letzten Jahrzehnten eine starke räumliche Ausdehnung der durch Naturgefahren gefährdeten Gebiete bewirkt. Hinzu kommt noch, dass steigender Wohlstand und Lebensqualität erstens die bedrohten Sachwerte in den betroffenen Gebieten objektiv anstiegen ließen und zweitens ein Selbstverständnis der „Machbarkeit“ von Schutz und Sicherheit vorherrscht, das angesichts des latenten Gefahrenpotenzials eines Gebirgslandes nicht angemessen ist. Jeder Schutzmaßnahme sind sowohl technische als auch ökonomische

6. Eine Ausnahme bildete der Herbst 2011, als im Oktober und November eine 50 Tage andauernde Trockenheit, verbunden mit sonnenscheinreicher Witterung über der Nebelobergrenze, immer wieder Brände auslöste (Galtür u.a.).

Grenzen gesetzt. In manchen Fällen kann es durchaus sinnvoller sein auszuweichen und den Siedlungsraum in weniger bedrohte Gebiete zu verlagern. Gefordert ist insgesamt auch ein kritischer Umgang mit dem Gefahrenpotenzial von Naturgefahren.

Der Schutz vor Naturgefahren ist in Österreich eine Aufgabe der öffentlichen Hand und wird von allen Gebietskörperschaften (Bund, Länder, Gemeinden) der Bundesbauverwaltung und der Wildbach- und Lawinenverbauung wahrgenommen.

2.3 Exkurs (Forsttechnischer Dienst für) Wildbach- und Lawinenverbauung

Die Wildbach- und Lawinenverbauung ist in Österreich in Gesetzgebung und Vollziehung Bundessache und wird dezentral vom Forsttechnischen Dienst für die Wildbach- und Lawinenverbauung (WBLV), als Dienststelle des BMFLUW, erledigt. Wesentliche Aufgaben der WBLV sind die Erstellung von Gefahrenzonenplänen, die Umsetzung und Betreuung von Schutzvorhaben (technisch und forstlich-biologische Schutzmaßnahmen) und Sofortmaßnahmen nach Wildbach- und Lawinenereignissen (BMLFUW 2007a: 6-7, BMLFUW 2010a: 11).

Große Teile des Alpenraumes sind Intensivzonen des Schutzes vor alpinen Naturgefahren. Die Aufrechterhaltung der Besiedlung und Bewirtschaftung hängt in einigen Regionen *unmittelbar* von den Schutzmaßnahmen des WBLV ab (z.B. Montafon, die Seitentäler des Lechtales, Mölltales) Österreichweit sind rund 35.000 Gebäude und 1.500km Verkehrswege von Wildbächen bedroht. Die Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung umfassen rund 13.000 Wildbäche, rund 6.000 Lawinen(striche) in insgesamt 860 Risikogebieten (Rutschung, Steinschlag). Lawinen bedrohen vor allem den Lebensraum der inneralpinen Hochtäler, wo Großlawinen häufig den Talboden erreichen. 67 Prozent des Bundesgebietes fallen in den Betreuungsbereich der WBLV, wobei der Anteil in Vorarlberg, Tirol, Kärnten und Salzburg sogar auf mehr als 80% der Landesfläche ansteigt. Für die Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung werden jährlich beträchtliche Mittel von Bund, Länder und Interessenten aufgewendet (BMLFUW 2007a: 8-9).

2.3.1 Gefahrenzonenpläne

Der Gefahrenzonenplan ist ein Instrument der forstlichen Raumplanung. Er hat den Charakter eines gesetzlich-normierten Gutachtens, das vom Bundesminister für Umwelt und Wasserwirtschaft genehmigt wird. Grundsätzlich ist der Gefahrenzonenplan jedoch rechtlich *nicht* verbindlich. Erst durch seine Verankerung in der örtlichen Raumplanung (im Flächenwidmungsplan der Gemeinde) erlangt dieser verbindliche Wirkung. Auch die Raumordnungs- und Baugesetze der Länder enthalten Bestimmungen, die die Baunutzung von Flächen, die von Naturgefahren bedroht sind, einschränken. Zur Beurteilung derselben dient die Darstellung der Gefahrenzonen in den Flächenwidmungs- und Bebauungsplänen.⁷ Daraus leiten sich beispielsweise Auflagen zur Erreichung einer Bauplatzzeichnung ab.

7. Seit 1975 werden in Österreich Gefahrenzonenpläne auf der Grundlage des Forstgesetzes erstellt. 2011 soll eine flächendeckende Abdeckung des Bundesgebietes erreicht werden.

Der Gefahrenzonenplan stellt die Summe aller möglichen Gefährdungen durch Wildbäche und Lawinen dar.⁸ In der *Roten Gefahrenzone* ist die Gefährdung durch Wildbäche und Lawinen so groß, dass eine ständige Besiedlung nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich ist. In der *Gelben Gefahrenzone* ist die ständige Benützung für Siedlungs- und Verkehrszwecke beeinträchtigt. Eine Bebauung ist hier nur eingeschränkt und unter Einhaltung von Auflagen (mittels eines Sachverständigengutachtens) möglich. Die Umsetzung der Gefahrenzonenpläne in der Raumordnung und im örtlichen Bauwesen führt häufig zu Konflikten mit anderen, partikularen Nutzungsinteressen. Ungeachtet der potenziellen Schutzwirkung wird die Verortung eines Grundstückes in der Roten Gefahrenzone vom Grundeigentümer nämlich häufig als Wertminderung empfunden (BMLFUW 2007a: 10-11).

Die aktuellen Ereignisse des Sommers 2012 (Murenkatastrophe von St. Lorenzen) verweisen auf die Problematik der Situation. Derzeit befinden sich in Österreich schätzungsweise 400.000 Gebäude in roten und gelben Zonen. Diese Gebäude wurden zumeist vor der Erstellung der Pläne in den 1970er und 1980er Jahren errichtet. Gegenüber den Grundstücksbesitzern besteht keinerlei rechtliche Handhabe der Nutzungsbeschränkung. Bauliche Schutzmaßnahmen der WBLV können das Elementarschadensrisiko für diese Objekte nur auf ein Restrisiko vermindern aber nicht beseitigen.

2.3.2 Ausweisung von Hochwasserabflussgebieten

Ohne Hochwasserschutz bzw. Rückhalteflächen wären die inneralpinen Talböden sowie die größeren Flusstäler unbewohnbar. Zum Schutz geschlossener Siedlungen, wichtiger Industrieanlagen und Betriebsstätten ist es unvermeidbar, dass Flüsse und Bäche reguliert werden müssen. Die Aufgaben der Bundeswasserbauverwaltung werden von den Ländern im Auftrag des BMLFUW wahrgenommen. Sie umfassen die Errichtung und den Betrieb von Hochwasserschutzmaßnahmen, die Gewässerbetreuung und die Ausweisung von Gefahrenzonen und Hochwasserabflussgebieten. Auch in hochwassergefährdeten Gebieten muss die Nutzung und Bewirtschaftung der Flächen an die jeweilige Situation angepasst werden. Dies geschieht durch die Errichtung von Hochwasserrückhaltebecken und durch Maßnahmen der Gewässerbetreuung. Vielerorts müssen Grundstücke abgelöst bzw. Entschädigungen für die Nutzer vorgenommen werden, damit der „passive Hochwasserschutz umgesetzt werden kann. Passiver Hochwasserschutz heißt, dass zum Schutz von Siedlung gewisse Flächen bewusst überflutet werden (BMLFUW 2010a: 10-11).

2.4 Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren und Siedlungsraum

Allgemein ist damit zu rechnen, dass die Raumnutzung vor allem durch Extremereignisse bedroht sein wird. In den Talböden wird es zu einer erhöhten Hochwassergefährdung für Siedlungen, landwirtschaftliche Nutzflächen und Verkehrswegen kommen. In den inneralpinen Tälern können die Destabi-

8. Die Ausweisung der Gefahrenzonen basiert auf dem digitalen Grundstückskatasters auf Grundlagen von Methoden nach dem Stand der Technik, der ortskundigen Abschätzung unter Heranziehung historischer Katastropheneignisse und der Vorstellung möglicher Schadensereignisse die mit einer 150jährigen Eintrittswahrscheinlichkeit auftreten (BMLFUW 2007a: 10).

lisierung von Hängen und die Gefährdung durch Muren zunehmen. Andere Elementargefahren wie Stürme und Starkregenereignisse und Lawinen gefährden Siedlungen, Energie- und Wasserversorgung und weitere Infrastrukturbereiche.

Generell ist zu sagen, dass der Wissensstand über die Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren noch sehr gering ist. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass langfristige Prognosen zur Niederschlagsentwicklung und vor allem deren kleinräumige Ausprägung unsicher sind. Ausgehend von physikalischen Annahmen können jedoch mehr oder weniger plausible Abschätzungen über zu erwartende Entwicklungen getroffen werden.

2.4.1 Klimawandel und das Auftreten von Hochwasser

Die Bildung von Hochwässern wird stark durch das Niederschlagsklima bestimmt. In der Vergangenheit gab es sowohl Perioden mit vielen Hochwässern als auch solche mit wenigen Ereignissen. Im Vergleich zu früheren Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts scheinen sich im Alpenraum (vor allem nördlich der Alpen) in den letzten 20 Jahren große Hochwässer zu häufen (1999, 2002, 2005). Ein Indiz dafür sind die Pegelmessungen der Donau, die einen Anstieg bei den maximalen Durchflussmengen zeigt (ZAMG 2011). Dieser Trend lässt sich auch damit in Einklang bringen, dass im Einzugsgebiet der Donau oberhalb von Wien langfristig mehr Niederschlag fällt als in der Vergangenheit. Erhöhte Durchflussmengen haben ihre Ursache aber auch in den zahlreichen Begradigungen der vergangenen Jahrzehnte, die zu einer Verkürzung der Flussläufe geführt haben.⁹

Eine Detailanalyse zeigt jedoch auch, dass der ansteigende Trend beim Pegelstand der Donau auf die schwachen höchsten jährlichen Durchflussmengen zurückzuführen ist, die keine Schäden anrichten. Die zu Überschwemmungen führenden Durchflussmengen von $7.000\text{m}^3/\text{s}$ und mehr zeigen keine Steigerung und auch die absolut extremsten Donauhochwässer (1899, 2002, 1862, 1954, 1991, 1897) sind gleichmäßig auf die letzten beiden Jahrhunderte verteilt. Dies lässt den Schluss zu, dass *bis dato* keine Zunahme der „großen“ Donau-Hochwässer registriert werden kann. Die früher so gefürchteten Winterhochwässer im Zuge von Schneeschmelze und Eistau sind ganz im Gegenteil mittlerweile so selten geworden, dass sie fast in Vergessenheit geraten sind (ZAMG 2011, OcCC 2007: 60).

In Zukunft sind dem heutigen Kenntnisstand nach verschiedene Veränderungen des Niederschlagsklimas möglich, welche sich auf die Hochwasserhäufigkeit auswirken können. Ein Effekt der Klimaerwärmung ist die Intensivierung des Wasserkreislaufes - die Atmosphäre enthält eine größere Feuchtigkeitsmenge – dies führt zu einer Zunahme der mittleren Niederschlagsintensität. Überproportional wirkt sich dies auf die Häufigkeit von Starkniederschlägen aus. Regionale Modellanalysen sprechen auch davon dass die Häufigkeit von intensiven Tagesniederschlägen zunehmen sollte. Extrem niederschlags-

9. Beispielsweise wurde der Rhein zwischen Basel und Karlsruhe seit 1850 um 60% seiner Überschwemmungszonen beraubt. Dadurch ist der Flusslauf zwischen den beiden Städten um ganze 82km kürzer geworden. Während das Wasser 1850 noch durchschnittlich 64 Stunden benötigte, beträgt die Zeitspanne heute nur mehr 23 Stunden. Ähnliche Effekte können für alle Fließgewässer in Mitteleuropa angenommen werden (Böhm 2008: 200).

reiche Winter (heutige Wiederkehrperiode 40 Jahre) könnten um den Faktor 3 bis 5 häufiger werden. Das heißt der Wasserkreislauf wird sich gerade im Winterhalbjahr intensivieren.

Auslösend für Niederschlagsereignisse wirken natürlich bestimmte Großwetterlagen. Für den Alpenraum ist generell die Zufuhr feuchter atlantischer Luftmassen von Bedeutung. Im Südalpenraum können jedoch auch Zyklongenese über dem westlichen Mittelmeer, Oberitalien und der Adria große Niederschlagsmengen heranführen. Dies gilt vor allem für die Herbstmonate. In der Vergangenheit haben Schlechtwetterfronten aus dem Mittelmeerraum bereits Extremereignisse ausgelöst. Insgesamt sind jedoch die Veränderung der Zugbahn und die Intensität der Tiefdruckgebiete entscheidend. Zum jetzigen Zeitpunkt können hier (noch) keine verlässlichen Aussagen getroffen werden. Dies gilt umso mehr für den stark gegliederten Alpenraum und das österreichische Berggebiet.

Im Alpenraum steht die Hochwassergefahr im Zusammenhang mit der Nullgradgrenze, da Niederschläge in Form von Schnee als Puffer wirken und nicht sofort abfließen. Einerseits wird der Niederschlag dadurch zurückgehalten und andererseits dient dieser als Wasserlieferant während der Schneeschmelze. Als Folge der Klimaerwärmung wird die Nullgradgrenze ansteigen und Regenfälle treten bis in größere Höhen auf. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Starkniederschlag mit einer hohen Nullgradgrenze zusammenfällt und einen extremen Hochgebirgsabfluss verursacht, nimmt zu. Wesentlich dabei ist auch die Häufigkeit von Wechseln zwischen Schneefall und Schneeschmelze, also das Schwanken der Frostgrenze. Erhöht sich mit der Klimaerwärmung gleichzeitig die Niederschlagsmenge pro Ereignis, nehmen sowohl der Spitzenabfluss als auch die Wahrscheinlichkeit für ein Hochwasser zu. Gleichzeitig sollen die Niederschläge im Winter laut der Klimaszenarien zunehmen. Einerseits hat dies zur Folge dass im Hochgebirge mehr Schnee fällt, andererseits wird es in tiefen und mittleren Höhenlagen bis 1.500 Metern vermehrt regnen und weniger schneien.

Ein Zusammentreffen von Schneeschmelze und Starkniederschlägen wird deshalb primär in den Wintermonaten aber auch in den Frühjahrsmonaten auftreten, wenn die akkumulierten Schneemassen im Hochgebirge ihr Maximum erreichen. Exakte Prognosen über die Verschiebung der Schneeschmelze und den damit verbundenen Abflussspitzen sind jedoch zum jetzigen Zeitpunkt spekulativ. Allgemein wird aber davon ausgegangen, dass die bisher wegen der tiefen Wintertemperaturen Hochwasser-freie Perioden im Alpenraum *verkürzt* werden. Mit der Folge das Hochwasser im Winterhalbjahr zunehmen könnten.

Im Sommer ist generell mit weniger Schmelzwasser und trockeneren Böden zu rechnen. Die Abflussbereitschaft wird auch durch die mittlere Temperaturerhöhung und prognostizierte Niederschlagsabnahme im Sommer vermindert. Die Bodenspeicher leeren sich dadurch rascher, weil die Pflanzen bei höheren Temperaturen mehr Wasser verdunsten. Eine Folge davon wird sein, dass die Wasserführung der Bäche und Flüsse *niedriger* als in der Gegenwart sein sollte (OcCC 2007: 60ff, Patek 2007a: 7-8, ZAMG 2011).

2.4.2 Klimawandel und Massenbewegungen (Rutschungen, Felsstürze, Murgänge)

Massenbewegungen sind in den nacheiszeitlichen Alpen ein natürlicher Prozess, der durch die Auffaltung der Gebirge, Abtragungsprozesse in den oberen Stockwerken und Ablagerungsprozesse in den unteren Stockwerken geprägt ist. Nacheiszeitlich stellen beispielsweise übersteilte Talflanken und das

Lockermaterial der Moränen ein latentes Gefahrenpotenzial dar. Verwitterung und labile Gesteinsschichtungen lösen Rutschungen, Muren und Felsstürze aus. Dazu tragen auch das steile Relief, extreme Vegetationsbedingungen und hohe Niederschläge bei.

Die Häufigkeit von Massenbewegungen wird durch Veränderungen der Temperatur, des Wasserkreislaufs, der Gletscher und des Permafrosts beeinflusst. Die Zunahme der Winter- und Frühlingstemperaturen verändert die Form des Niederschlags, die Schneedeckenhöhe und die Bodentemperaturen. Darüber hinaus prägen saisonale Schwankungen die Verwitterung, die hauptsächlich von der Mächtigkeit der Schneedecken abhängig sind. Im Herbst und Frühwinter verzögert eine frühe Schneedecke das Auskühlen des Bodens. Die Erdwärme kann gespeichert werden, wodurch im darauf folgenden Sommer ein Trend zum Aufschmelzen unterstützt wird. Umgekehrt wird der kühle Boden im Frühling durch eine andauernde Schneedecke isoliert. Große Schneemengen haben ein spätes Ausapern zur Folge. Durch die kürzere Auftauphase kann im Sommerhalbjahr weniger Wärme in den Boden gelangen (Patek 2007a: 9).

Die vielleicht *stärksten* Auswirkungen des Klimawandels werden auf die frostgeprägten vergletscherten und unvergletscherten Hochgebirgsstufen einwirken, die sich auch auf die darunter liegenden Höhenstufen auswirken. Generell ist bei einer langfristigen Temperaturzunahme das verzögerte Aufschmelzen des Dauerfrostbodens wahrscheinlich. Dauerfrostböden (Permafrost) finden sich in an Nordhängen bereits in Höhen zwischen 2.000 und 2.200 Metern. Das gefrorene Wasser bindet die Felsschichten wie ein „Kleber“ zusammen. Dabei sind Permafrostböden ein guter Indikator für Klimaveränderungen: Sie reagieren zeitverzögert, thermisch träge, da die Wärmekapazitäten von Eis und Boden größer sind als diejenige von Luft. Zuerst erwärmt sich der Permafrost in den oberflächennahen Schichten, in schneefreien Zonen und in kleinen Permafrostgebieten geringer Mächtigkeit. In solchen Gebieten können Block- und Felsstürze, Erosion, Rutschungen und Murgänge auftreten.¹⁰ Ein anderer Effekt tritt beim Zurückweichen der Gletscher auf. Die steilen Hänge an der Seite stützen sich auf die Eismassen. Taut das Gletschereis fehlt sozusagen das Widerlager, und die Hänge kommen ins Rutschen.

Schwindende Gletscher werden selbst langfristig nicht durch Wald, sondern durch Geröllmaterial ersetzt – die Ausdehnung der Schuttstufe wächst auf Kosten der Gletscherstufe. Daher kommt es zu erhöhtem Abtrag der eisfrei werdenden und tief auftauenden Schuttflächen. Diese werden dabei nur zu geringen Teilen stetig als Geschiebe- und Schwebstofffracht in Bächen und Flüssen verfrachtet, die größten Schuttmengen werden im Hochgebirge kurzfristig und oft dramatisch bei Hochwasserereignissen transportiert. Wo die Hangneigung über 25 Grad beträgt bilden sich Murgänge schnell fließender Schutt/Wasser-Gemische mit großem Zerstörungspotenzial. Rutschungen und Muren in tieferen Höhenstufen werden meistens durch starke bzw. lang andauernde Niederschläge ausgelöst. Wenn der Boden steiler Hänge wassergesättigt ist, gerät der Boden in Bewegung. Kleinere Rutschungen und Hangmuren können dagegen auch kurzfristig durch Extremereignisse wie Starkniederschläge oder Gewitter instabil werden. Besonders große und weitreichende Murgänge mit Volumen von mehreren

10. Ein spektakulärer Bergsturz am Matterhorn (CH) im Jahrhundertssommer 2003 sorgte für große Aufmerksamkeit. Im Zuge einer mehrwöchigen Hitzewelle stieg damals die Null-Grad-Grenze auf über 4.500 Meter an.

100.000 m³ entstehen beim Ausbruch von Gletscherseen, die sich als Folge des Rückgangs des Gletschereises im freigelegten Moränenschutt bilden (Patek 2007a: 9, Haeberli/Maisch o.J.: 104-105).

2.4.3 Klimawandel und das Auftreten von Lawinen

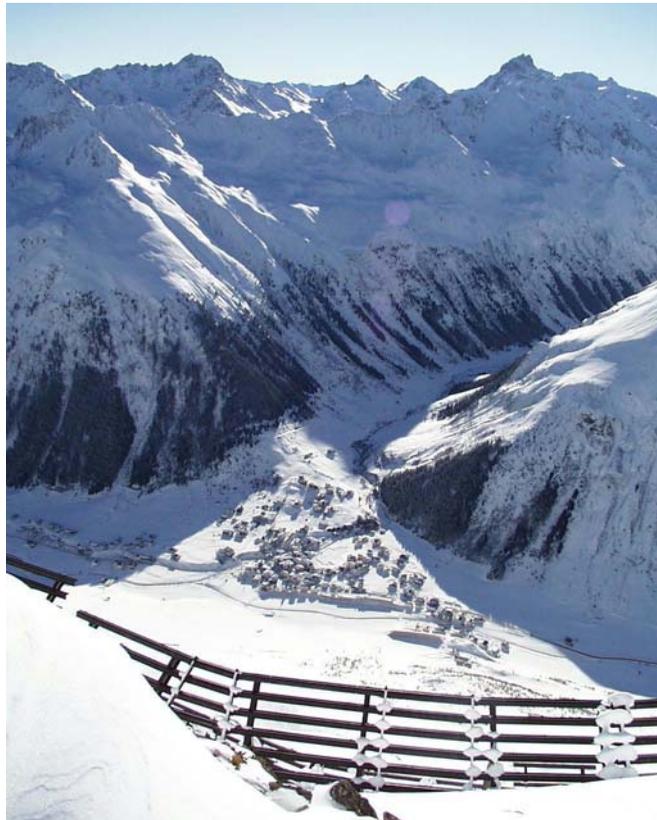
Extreme Lawinensituationen entstehen als Folge außerordentlicher Wetterlagen, die oberhalb von rund 1.200m während einiger Tage massive Schneefälle verursachen. Als Folge des Klimawandels wird in Zukunft eine Erwärmung der mittleren Lufttemperatur sowie eine Zunahme der Winterniederschläge und der Häufigkeit extremer Wettersituationen im Winter erwartet. Bedingt durch das Ansteigen der Schneefallgrenze sollten eigentlich weniger mächtige und kürzere Schneebedeckungen in die Alpen die Folge sein. In den Tallagen der Ostalpen ist dieser Trend zu einem Rückgang des Schneeanteils an den Niederschlägen bereits zu beobachten (am Beispiel Kitzbühels) (Böhm 2008b: 82-83).

Andererseits führt die Zunahme der Winterniederschläge in den höheren Lagen und vor allem oberhalb der Waldgrenze, also in potenziellen Lawinenanriss-Gebieten, zu mächtigeren Schneedecken. Entscheidend ist, dass die Niederschlagszunahme während *außerordentlicher* Wetterlagen passiert und nicht verteilt über den ganzen Winter. Unter der ersten Voraussetzung wird sich das Potenzial für eine extreme Lawinensituation gegenüber heute *vergrößern*. Unter heutigen Klimaverhältnissen führt im Winter jede dritte außerordentliche Wetterlage auch zu einer extremen Lawinensituation. Mit der Zunahme der Häufigkeit von außerordentlichen Wetterlagen während der Wintermonate steigt somit auch die Wahrscheinlichkeit dass in einem Winter eine extreme Lawinensituation auftritt (Patek 2007a: 10).

Darüber hinaus ist auch der Schneedecken-Aufbau ein Faktor, der die Lawinenauslöse hemmt oder forciert: Eine Schneedecke besteht aus mehreren

Schneesichten, die durch verschiedene Schneefälle und Schneeverwehungen entstehen. Je nach den Wetter-, Sonnen- und Temperaturverhältnissen verbinden sich diese einzelnen Schichten mehr oder weniger gut und schnell miteinander. Dabei ist der saisonale Schneedeckenaufbau von Bedeutung.

Abbildung 7: Lawinenschutz Galtür



Lawinerverbauung oberhalb von Galtür

Quelle: BMLFUW

Für die Entwicklung des Schneedeckenfundamentes, d.h. des untersten Teiles der Schneedecke, sind die Schnee- und Wetterbedingungen zu *Beginn* des Winters entscheidend. Neben Temperatur und Niederschlagsverhältnissen prägt auch der Wind entscheidend die Schneedecke (Verfrachtungen durch Tribschnee).

Schwachschichten innerhalb der Schneedecke entstehen dadurch, dass sich zwei Schneeschichten schlecht miteinander verbinden. Zum Beispiel kann Oberflächenreif als Auslöser für Schneebratter dienen. Aber auch steile, ungemähte Grashänge begünstigen den Abgang von Lawinen. Durch den Klimawandel dürfte das Gleiten der Schneedecke auf dem bewachsenen Boden ausgeprägter werden als in der Vergangenheit. In tieferen alpinen Lagen kann häufigerer Regen auf eine vorhandene Schneedecke vermehrt Nassschneelawinen verursachen. Solche Situationen treten aber bereits heute im Frühling auf, weshalb das Risiko kaum zunehmen wird. Conclusio daraus ist, dass für die Lawinenhäufigkeit auch weiterhin der saisonale Aufbau entscheidend sein wird auch wenn sich einige Parameter durch den Klimawandel verändern sollten (Patek 2007a: 10-11).

Die folgende Tabelle gibt eine Zusammenfassung des durch den Klimawandel zu erwartenden Veränderungspotenzials bei den Naturgefahren im Alpenraum:

Tabelle 1: Änderungen des Naturgefahrenpotentials durch den Klimawandel im Alpenraum

Naturgefahr	Tendenz der Entwicklung
Hochwasser	Zunahme (+)
Rutschung	Zunahme (+)
Fels-, Bergsturz	Einzelfälle, wenig Veränderung (+/-)
Murgang	Allgemeine Zunahme (+)
Lawinen	Hohe Schwankungsbreite, gleich bleibend (+/-)
Waldbrände	Ausgehend von niedrigem Niveau Zunahme (+)

Quelle: eigene Zusammenstellung - Ergebnis der Analyse

3. Wasserwirtschaft

Wasser ist eine unentbehrliche Ressource für den Menschen und seine Umwelt. Mensch, Fauna und Flora sind in vielfältiger Weise mit dem Wasserkreislauf verbunden. Als Rohstoff ist Wasser zur Trinkwasserversorgung unentbehrlich. Aber es dient auch zur Energieversorgung, als Brauch- und Kühlwasser für Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft. Auch für Tourismus, Freizeitgestaltung und Erholungszwecke ist Wasser eine wichtige Ressource. Als verbrauchtes Gut wird es in Form von Abwasser behandelt, gereinigt und über die Flüsse an den Wasserkreislauf zurückgegeben. Wassernutzung und Verbrauch werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dazu zählen die demographische Entwicklung in Zusammenhang mit dem „modernen“ Lebensstil, aber auch Veränderungen der Landnutzung.

Österreich ist eines der wasserreichsten Länder Europas. Die ergiebigen Niederschläge sowie die ausgleichende Wirkung der Schneeschmelze und – mit abnehmender Bedeutung – der Gletscherschmelze sorgen für ein vergleichsweise hohes Wasserangebot. Die Niederschläge speisen auch das hierzulande verfügbare Trinkwasser, wobei rund die Hälfte aus Quellwasser, die andere Hälfte aus Grundwasser besteht. Niederschläge sind die „Einnahmenseite“ der Wasserbilanz. Weitere Komponenten sind der Abfluss und die Verdunstung (BMLFUW 2011a, OcCC 2007: 56).

Den Ergebnissen der Klimaszenarien nach dürfte im Alpenraum die Jahresniederschlagssumme in den kommenden Jahrzehnten in etwa konstant (+/-5-10%) bleiben. Es ist aber eine Verlagerung der Niederschläge in die Wintermonate zu erwarten. Trotzdem werden die Niederschläge bis ins Mittelgebirge hinauf häufiger als Regen statt als Schnee fallen. Die Sommermonate lassen hingegen flächendeckend Rückgänge bei den Niederschlägen erwarten (v.a. nach 2050). Regional könnte es größere Unterschiede geben, weil ein ausgeprägter Übergang zwischen Alpennord- und Alpensüdseite zu erwarten ist. Die konstante Niederschlagsspende in Verbindung mit einem deutlich höheren Temperaturniveau und der damit verbundenen Verdunstung kommt einem effektiven Rückgang des zur Verfügung stehenden Angebots gleich. Die Bodenfeuchte, der Bodenwassergehalt wird daher zusehends von der Temperatur bestimmt und weniger vom Niederschlag (Böhm 2009: 162-163, UBA 2005a: 46, ZAMG 2011k,p,s).

Analog zu diesen Prognosen werden bis etwa 2050 nur geringfügige Änderungen der Abflüsse (als einer Komponente der Wasserbilanz) erwartet. Die Verfügbarkeit des Rohstoffes Wasser ist voraussichtlich gesichert. Die *natürlichen* Schwankungen der Hochwässer sind wesentlich *größer* als Änderungen wegen des Klimawandels. Aussagen über die Entwicklung bei den Extremereignissen (z.B. Hochwässer) sind aus heutiger Sicht sehr unsicher. Inneralpin werden die Abflüsse bei Winterniederschlag wegen der höheren Temperaturen deutlich erhöht, was als positiv zu bewerten ist. Die Leistung der Laufkraftwerke dürfte folglich im Winter zunehmen und sich im Sommer (bis 2050) wenig verändern. Dadurch ist eine bessere Anpassung an den Verbrauch zu erwarten. Regional, also kleinräumig könnten sich jedoch vorhandene Engpässe in Gebieten mit ungünstigem Wasserangebot, wie zum Beispiel Südostösterreich, *verstärken* (ZAMG 2011r).

Prognosen für die Schweiz sehen als Folge des Klimawandels eine zunehmende Grundwasserneubildung im Winter, bei einer Abnahme im Sommer und Herbst. Die Grundwasserstände sollten insgesamt leicht sinken¹¹ (OcCC 2007: 63).

Bedingt durch die saisonale Verschiebung kann Wasser, zeitlich und örtlich beschränkt, im Sommer durchaus zu einem knappen Gut werden. Häufigere Hitze- und Dürreperioden führen zu einem Mehrbedarf der Haushalte und der Landwirtschaft. Der Bewässerungsbedarf letzterer steigt an. Ganz allgemein ist auch vermehrt von Konkurrenzsituationen zwischen dem Wasserbedarf der Flussökosysteme und verschiedenen Verbrauchern und Regionen, insbesondere bei der Nutzung von Grundwasser und kleinen und mittleren Flüssen auszugehen. Dadurch wird die Notwendigkeit einer geeigneten Bewirtschaftung zunehmen. Dabei wird eine Prioritätenreihung vorzunehmen sein (Beierkuhnlein/Foken 2008: 240, OcCC 2007: 56, 64).

Der Klimawandel wird eine Erhöhung der mittleren Wassertemperaturen aller Gewässer nach sich ziehen was für jene Bereiche und Sektoren Probleme aufwirft, die von der wasserwirtschaftlichen Nutzung abhängen. Bei der Verfügbarkeit des Kühlwassers für thermische Kraftwerke und andere industrielle Anlagen könnten Engpässe auftreten. Der Abtransport der Wärme geschieht am effizientesten über Kühlwasser, jedoch nur solange keine unzulässige Erwärmung des kühlenden Gewässers auftritt. Temperaturanstieg und lange sommerliche Trockenperioden können zur „Überhitzung“ führen. Vor allem im Flach- und Hügelland aber auch südlich der Alpen kann dies problematische Effekte für die Begleitgewässer haben (Beierkuhnlein/Foken 2008: 244-245, ZAMG 2011s).

11. Auch die Grundwasserbildung hängt stark von der Niederschlagsverteilung ab. Rund ein Viertel des Jahresniederschlags gelangt durch Versickerung ins Grundwasser (Beierkuhnlein/Foken 2008: 246).

4. Energiewirtschaft

Der inländische Energieverbrauch (im Verkehr, zur Strom- und Wärmeerzeugung) hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Dabei ist vor allem der Erdgas- und Stromverbrauch angestiegen. Die Verbrauchsentwicklung und der Energiesektor als Ganzes werden von verschiedenen Einflussfaktoren wie dem Wirtschaftswachstum, der technologischen Entwicklung, der Bevölkerungsentwicklung und der EU-Öffnung des Strommarktes, wie auch (langfristig) vom Klimawandel beeinflusst.

Ein hoher Anteil der Stromerzeugung wird in Österreich aus der Wasserkraft gewonnen. Laufkraftwerke befinden sich überwiegend im Flach- und Hügelland während die Speicherkraftwerke die Stromerzeugung im hochalpinen Raum dominieren. Für Österreich als Land mit einem sehr hohen Anteil der Stromproduktion aus Wasserkraft ist die zukünftige Entwicklung der Wasserführung an den heimischen Flüssen von großem Interesse. Das Wasserkraftpotenzial wird dabei im Wesentlichen von den Faktoren Durchflussmenge und Höhendifferenz entlang der Flussstrecke bestimmt. Hohes Potenzial gibt es demzufolge entlang der Donau und in den alpinen Gebieten. Jahreszeitlich verschieden ist das Wasserkraftpotenzial nicht nur räumlich sondern auch zeitlich unterschiedlich. Etwa 38% des Potenzials sind im Sommer verfügbar und nur 14% im Winter. Dem entspricht Niederwasser in den Winter- und Abflussspitzen in den Sommermonaten. Dem entgegengesetzt ist der Inlandsstromverbrauch, der im Winter seine Maximalwerte erreicht (ZAMG 2011s).

Der Energiesektor ist gleichermaßen Verursacher wie Betroffener der anthropogenen Klimaerwärmung. Antreibend wirken die Emissionen aus fossilen Brennstoffen. Gleichzeitig ist der Sektor aber von der Klimaerwärmung durch seine Wirkung auf die Niederschlagsveränderungen und auf die Energienachfrage *betroffen*.

Als Folge der Klimaänderung wird in Zukunft im Winter *weniger* Heizenergie und im Sommer *mehr* Kühlenergie (vor allem im Dienstleistungssektor) verbraucht werden. Darüber hinaus kommt es zu einer Verlagerung der Nachfrage von den Brennstoffen zu Strom. Erneuerbare Energien werden bedingt durch Nachfrage- und Preisänderungen vermehrt Potenzial haben (OcCC 2007: 97).

Die Wasserführung der heimischen Flüsse wird sich im Zuge des Klimawandels nur geringfügig verändern. Simulationen der zukünftigen Abflüsse durch die ZAMG ergeben dass die Änderungen des Wasserkraftpotenzials *klein* sein werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Änderungen des Niederschlags (lt. den Klimaszenarien) zumindest bis 2050 eher gering ausfallen sollen. Daher wird die *Zunahme des Wasserkraftpotenzials* bei weniger als 1% angesetzt. Eine Studie der TU/BOKU kommt hingegen auf einen *Rückgang der Energieproduktion aus Wasserkraft* zwischen 6 und 15% (im Zeitraum von 2025 bis 2075) (KlimAdapt 2010: 47)¹². Das Fehlen der glazialen Wasserspende wird nur unter extrem trockenen Bedingungen von Bedeutung sein. Die saisonalen Änderungen fallen stärker aus als die räumlichen. Im Sommer ist in Westösterreich mit einer Abnahme des Potenzials um mehr als 10% zu rechnen, wobei der Beitrag der glazialen Wasserspende eher vernachlässigbar ausfällt und nur unter extrem trockenen Bedingungen von Bedeutung sein wird. Im Winter ist eine Erhöhung des Wasserkraftpotenzials um etwa 15-20% zu erwarten. Dies könnte in Zukunft zu einer besseren Anpassung der

12. Die Unterschiede sind möglicherweise durch die Bezugsgröße, den gewählten Zeitraum und auch durch die Auswahl des Klima- und Emissionsszenarios erklärbar.

Stromproduktion an die Verbrauchsspitzen im *Winterhalbjahr* führen und die Rentabilität der Elektrizitätswirtschaft erhöhen (Formayer et al. 2008a: 13, ZAMG 2011s).

Abbildung 8: Niederwasser an der Donau



Niederwasser an der Donau bei Greifenstein (Niederösterreich)

Quelle: BMLFUW

In den Sommermonaten könnten als Folge der Klimaerwärmung hingegen vermehrt Niedrigwasserstände auftreten. Dies betrifft auch die inneralpinen Speicherkraftwerke, die hauptsächlich durch Sommerniederschläge und vom Schmelzwasser der Schneedecke im Frühling und Frühsommer gespeist werden (Formayer et al. 2008a: 13). Die Energiewirtschaft kann durch Hochwasserereignisse ebenfalls Einbußen erleiden. So kann es zu Betriebsunterbrechungen sowie zu Schäden an der Infrastruktur kommen (z.B. überflutete Umspannwerke, Stromverteiler, mechanische Schäden an Flussbauwerken durch Fracht). Dadurch sinkt auch die Energieausbeute (Beierkuhnlein/Foken 2008: 245; OcCC 2007: 97).

5. Regionalentwicklung/Raumplanung

Regional- und Raumordnungspolitik kann definiert werden als zusammenfassende Vorsorge für eine den natürlichen Gegebenheiten und den abschätzbaren sozialen- und wirtschaftlichen Interessen der BewohnerInnen entsprechende Gestaltung und Nutzung eines bestimmten Gebietes. Dem entsprechend zählen Regional- und Raumordnungspolitik zu den *Querschnittspolitiken*. Die Raumordnungspolitik als räumliches Gestaltungselement hat das Ziel die verschiedenen Sektor-Politiken (wie Landwirtschafts-, Wirtschafts- Verkehrspolitik etc.) bestmöglich aufeinander abzustimmen und zu koordinieren.

In Österreich werden die raumbezogenen öffentlichen Aufgaben von Bund, Ländern, Städten und Gemeinden gleichermaßen wahrgenommen.¹³ Der Bund wird auf Grund der sektoralen Zuständigkeiten tätig („funktionale Raumordnung“). Die Länder auf Grund der umfassenden Planungsbefugnis nach der Generalklausel des Bundesverfassungsgesetzes. Im Gegensatz zu anderen Staaten gibt es in Österreich keine "Rahmenkompetenz" des Bundes.¹⁴ Eine lediglich koordinierende Funktion der raumbezogenen Agenden übt die Österreichische Raumordnungskonferenz aus, in der alle Gebietskörperschaften und die Sozialpartner vertreten sind. Sie ist beim Bundeskanzleramt angesiedelt.¹⁵

Die *Instrumente der Raumordnung* sind insbesondere Raumordnungsprogramme (Entwicklungsprogramme, Raumpläne), Flächenwidmungspläne und Bebauungspläne. In Rechtsvorschriften des Landes vorgesehene Vollziehungsakte dürfen den örtlichen Flächenwidmungs- und den Bebauungsplänen nicht widersprechen. Die Ziele werden durch Maßnahmen auf den einzelnen Verwaltungsgebieten verwirklicht, zum Teil durch Beschränkung oder Entzug von Eigentum (ÖROK 2011a, Oberleitner/Han-cvencl 2000: 75).

Landesgesetze bilden einerseits die gesetzliche Grundlage für die überörtliche und örtliche Raumordnung und Raumplanung (Raumplanungs- und Raumordnungsgesetze der Bundesländer). Andererseits fällt die Vollziehung der örtlichen Raumplanung in den eigenen Wirkungsbereich der Gemeinden. Darin drückt sich ein Zielkonflikt aus, der durch die Auswirkungen des Klimawandels noch verstärkt werden könnte. Der Bodenverbrauch durch die Siedlungsentwicklung, Freizeiteinrichtungen und Betriebs- und Gewerbegebiete ist anhaltend stark. Für die Kommunen sind Baulandreserven und der Zuzug attraktiv, weil sie darüber Anteile aus dem Finanzausgleich lukrieren können. Damit geraten die Bürgermeister häufig in Interessenskonflikte. Vor allem landwirtschaftlich genutzte Flächen gehen durch Umwidmungen verloren. Deshalb besteht die Forderung, „*dass überörtliche, regionale Entwicklungsplanungen regionsspezifische Ziele für die örtliche Raumplanung vorgeben sollen. Flächenwidmungskompetenzen*

13. Die EU verfügt mit der Agrar- und Agrarstrukturpolitik, den Strukturfonds, Teilbereichen der Umweltpolitik zum Beispiel der Natura 2000, sowie partiell mit der Verkehrspolitik zum Beispiel den transeuropäischen Verkehrsnetzen ebenfalls über raumwirksame Gemeinschaftspolitiken.
14. Eine wünschenswerte Rahmengesetzgebung für die Raumordnung auf Bundesebene wie in der Schweiz und Deutschland gibt es hierzulande nicht.
15. Von der ÖROK wird auf politischer Ebene ein Österreichisches Raumentwicklungskonzept beschlossen. Dieses bildet ein wichtiges wenngleich rechtlich nicht bindendes Referenzdokument zur Beschreibung der vorrangig zu lösenden räumlichen Probleme und Aufgabenschwerpunkte.

sollen weitestgehend auf eine überörtliche, regionale Ebene angehoben werden“ (CIPRA International 2010b: 3, Vorarlberger Naturschutzrat 2009: 13).

Der Klimawandel hat räumlich unterschiedliche Auswirkungen. Der Alpenraum ist anders betroffen als Nord- und Südeuropa, die Alpennordseite anders als die Alpensüdseite, der hochalpine Raum anders als die inneralpinen Tal- und Beckenlagen. Sicher ist, dass kleinräumige Auswirkungen des Klimawandels auftreten werden (vor allem nach 2050). Aussagen dazu sind aber aus heutiger Sicht sehr unsicher. Durchaus möglich ist jedoch, dass Extremwetterlagen (Hochwasser, Muren, Lawinen etc.) häufiger auftreten werden als in der Vergangenheit. In Talräumen kann es zu einer erhöhten Hochwassergefährdung für Siedlungen, Landwirtschaft und Verkehrswege kommen. In den hochalpinen Lagen und im Mittelgebirge können die Destabilisierung von Hängen und die Gefährdung durch Muren zunehmen. Hierdurch und durch andere Ereignisse (Stürme, Starkregenereignisse) können Siedlungen, die damit verbundenen Sachwerte sowie Menschenleben, Energie- und Wasserversorgung und weitere Infrastrukturen bedroht werden.

Als eine mögliche Konsequenz könnte es zu einer *Einschränkung* künftiger Entwicklungspotenziale kommen und es könnten „neue“ raumplanerische Konflikte entstehen wie zum Beispiel zwischen Landnutzungs-Interessen und einer vorausschauenden Gefahrenprävention. Ein konkretes Beispiel ist die in den Gemeinden der alpinen Regionen als Bauland gewidmete Fläche oder schon bestehende Gebäude, die sich innerhalb von Gefahrenzonen befinden. Durch die hohe wirtschaftliche Wertschöpfung, speziell im Tourismussektor, entsteht ein hoher Druck, sei es für Gebäude oder anderer Nutzungen, Widmungen in gefährdeten Gebieten zu erteilen. Bedingt durch den Klimawandel könnte in Zukunft das Risiko steigen, dass diese Flächen einem höheren Risiko (Überflutung, Vermurung etc.) und den damit verbundenen Schäden und Kosten ausgesetzt sind als zum Zeitpunkt der Widmung anzunehmen war. Diesem Druck entgegen zu wirken erfordert eine konsequente Raumordnungspolitik (Beierkuhnlein/Foken 2008: 227, CIPRA International 2010b: 7, Formayer et al. 2008a: 20).

Der Regional- und Raumordnungspolitik kommt deshalb eine zentrale Funktion bei der sektorübergreifenden Klimawandel-Anpassung zu. Der Raumentwicklung wird eine koordinierende und steuernde Rolle zum Schutz, zur Sicherung und zur nachhaltigen Entwicklung der Besiedlungs-, Wirtschafts-, und Verkehrs- und Freiraumstruktur sowie der natürlichen Ressourcen beigemessen. Dies gilt im Berggebiet umso mehr, weil der Dauersiedlungsraum hier naturräumlich eingeschränkt ist.

Tabelle 2: Auswirkungen des Klimawandels auf wichtige Bereiche und Sektoren im Berggebiet (Zusammenfassung)

Bereich, Sektor	Günstige Faktoren (+)	Ungünstige Faktoren (-)
Verkehrsinfrastruktur(einrichtungen)	Geringere Einschränkung durch widrige Wetterverhältnisse, geringere Aufwendungen für den Winterdienst - Schneeräumung, Streumittel (vor allem nach 2050)	Thermische Beanspruchung der Baumaterialien (Temperaturspitzen, sommerliche Hitzewellen), Fahrbahnschäden, Gleisverwerfungen, Auswirkungen von Extrem- und Elementarereignissen (Hochwasser, Massenbewegungen, Lawinen etc.) Überlastung der Drainage- und Kanalsysteme von Straßen, Schienen, Tunneln, Unterführungen bei Extremniederschlagsereignissen, Erosion und Unterspülungen von Böschungen, Bahndämmen
Siedlungsraum (Bauen, Wohnen) funktionelle Infrastruktur	Abnehmender Heizwärmebedarf	Steigender Kühlenergiebedarf im Sommer (Tal- und Beckenlagen, Alpensüdseite), Verschlechterung des Raumklimas (Aufheizung), thermische Belastung von Bauteilen, mechanische Belastung von Bauwerken (Stürme, Hagelschlag) höhere Gefährdung des Gebäude-Altbestandes (nicht angepasste Bautechnik und Nutzung) gegenüber Neubestand durch Wetterextreme, -elementarereignisse
Wasserwirtschaft	Wasserversorgung aus heutiger Sicht gesichert, Abschwächung niedriger Winterwasserstände	Verstärkung vorhandener Wasserengpässe in Gebieten mit ungünstigem Wasserangebot (Südostösterreich), Sommerliche Trockenperioden, leicht sinkende Grundwasserstände, vermehrt Nutzungskonkurrenz (Kraftwerke, Industrie: Prozesswasserkühlung) vs. Ökosystem, erhöhte Hochwassergefahr (?), Risiko von Betriebsunterbrechungen
Energie	Abnehmender Heizwärmebedarf, Abschwächung niedriger Winterwasserstände - dadurch bessere Anpassung an den Verbrauch	Steigender Kühlenergiebedarf im Sommer (Tal- und Beckenlagen, Alpensüdseite), vermehrt Niederwasser im Sommer, Höhere und häufigere Schwankungsbreite der Wasserstände, Rückgang der glazialen Wasserspende, eingeschränkte Prozesswasserkühlung wg. höherer Wassertemperaturen der Gewässer, Hochwasser: Risiko von Betriebsunterbrechungen, Schäden an Infrastruktur
Raumnutzung, -planung	-	Steigende Bedrohung durch Extremwetterlagen (Naturgefahren)

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

Tabelle 3: Anpassungsmaßnahmen für wichtige Bereiche und Sektoren im Berggebiet

Bereich, Sektor	Symptombekämpfung	Anpassungs(strategie)	Ursachenbekämpfung (Klimaschutz)	Abstimmung mit Bereichen
Verkehrsinfrastruktur (VISE)	Wasserableitung von Fahrbahnen (Extremniederschläge), Beseitigung von Schäden durch Extrem- und Elementarereignisse (Hochwasser, Massenbewegungen, Lawinen), technische Bauwerke zur Gefahrenabwehr (Sicherheitsnetze, Schutzwälle)	„Klimasicherheit“ bei Planung, Errichtung, Bewirtschaftung und Nutzung der VISE sowie der Transportmittel, Maßnahmen zur Sicherung der Bausubstanz (Permafrostrückgang), Verwendung angepasster Baustoffe (z.B. Hitzebeständigkeit), allenfalls Trassenverlegungen	Einschränkung der Emissionen des Sektors, Effizienzsteigerung bei Transportmitteln, Verlagerung zu und Ausbau des öffentlichen Personen Nah- und Fernverkehrs	Schutz vor Naturgefahren (WBLV), Katastrophenschutz, Raumplanung, Siedlungswirtschaft (Bauen, Wohnen) Tourismus, Wasser- und Elektrizitätswirtschaft, Land- und Forstwirtschaft
Siedlungsraum (Bauen, Wohnen) funktionelle Infrastruktur	Bereitstellung der Infrastruktur für Rettungsmaßnahmen, Instandsetzung und Wiederaufbau bei Extrem- und Elementarereignissen, Behebung von auftretenden Bauschäden	Anpassung von Planung, Errichtung, Bewirtschaftung und Nutzung von Gebäuden (z.B. Innenraumklima), Anpassung von Normen und Bauvorschriften, Flächenwidmung und Bebauungsplänen, geeignete Baustoffe	Energieeffizienzsteigerung, Sanierung des Altbestandes (Raumwärmeerzeugung, bei Neubauten Passivhausstandard, Einsatz erneuerbarer Energieträger, Materialentwicklung (Gesamt-Emissionsbilanz)	Schutz vor Naturgefahren (WBLV), Katastrophenschutz, Raumplanung, Tourismus, Wasser- und Elektrizitätswirtschaft, Gesundheitssektor
Wasserwirtschaft	Bewirtschaftung bei Engpässen, Bewässerung, Hochwasserschutz: Notfallplanung (Vorhersagen, Alarmierung, mobile Schutzmaßnahmen etc.)	Wassersparen, angepasste Raumnutzung - naturnaher Ausbau der Fließgewässer (Retentionsflächen, Objektschutz) bauliche Maßnahmen, Rückhalt im Einzugsgebiet	Wassersparen	Landwirtschaft, Tourismus, Wasser- und Elektrizitätswirtschaft, Raumplanung, Schutz vor Naturgefahren (WBLV), Katastrophenschutz
Energiewirtschaft	Behebung von Schäden an der Energieinfrastruktur durch Extrem- und Elementarereignisse	Wirkungsgrad erhöhen, Energieeinsparungspotenzial ausreizen (thermische Sanierung)	Emissionsarme Energieversorgung, erneuerbare Energien	Wasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Schutz vor Naturgefahren (WBLV), Wasserbauverwaltung, Katastrophenschutz
Raumnutzung, -planung	Behebung von Schäden an Siedlungen und Infrastrukturen, Verbesserung des Katastrophenschutz- bzw. Krisenmanagements	Vorausschauende Raumplanung, Nutzungsbeschränkungen oder –vorgaben: Freihaltung von Flächen z.B. schutzwasserwirtschaftliche Raumentwicklungspläne, Gefahrenzonenpläne; Flächen sparende Siedlungsmodelle	Sicherung von Flächen mit hohem CO ₂ -Bindungspotenzial (Moore, Böden, Wälder, Grünflächen) Emissionsarme Ressourcennutzung, Mobilität der „kurzen Wege“, Flächenvorsorge für erneuerbare Energieträger	Schutz vor Naturgefahren z.B. WBLV, Katastrophenschutz, Siedlungswirtschaft, Verkehr, Land- und Forstwirtschaft, Tourismus

Quelle: Ergebnis der Literaturanalyse

Resümee und Schlussfolgerungen

Resümee und Schlussfolgerungen

Als globale Erwärmung bezeichnet man den in den vergangenen Jahrzehnten (beschleunigt) festzustellenden Temperaturanstieg ($\sim 0,8^{\circ}\text{C}$) der erdnahen Atmosphäre und der Meere. Aus den natürlichen Klimafaktoren alleine (Schwankungen der Sonnenaktivität, Ausstoß vulkanischer Aerosole) ist die eingetretene Klimaerwärmung nicht erklärbar. Dabei haben sich die Landmassen wesentlich stärker erwärmt als die Weltmeere, die Nordhalbkugel mehr als die Südhalbkugel. Seit 1980 hat sich der Temperaturanstieg verstärkt. Das Jahrzehnt von 2000 bis 2010 war mit Abstand das wärmste je gemessene, gefolgt von den 1990er Jahren, die wiederum wärmer waren als die 1980er Jahre.

Die anthropogene Erwärmung entsteht im Wesentlichen durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Gas) aber auch durch die Abholzung der Wälder und intensiver Landwirtschaft. Dadurch wird das Treibhausgas Kohlendioxid (CO_2) sowie weitere Treibhausgase wie Methan und Lachgas in der Erdatmosphäre angereichert und heizt die bodennahe Erdschicht auf. Gedämpft wird die Klimaerwärmung durch den Eintrag von Aerosolen (SO_2 , Rußpartikel u.a.). Die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre ist seit Beginn der Industriellen Revolution signifikant angestiegen, von dem für Warmzeiten seit mindestens 700.000 Jahren typischen Wert von 280 ppm auf nunmehr 380 ppm.

Die Folgen des Klimawandels sind vielfältig und reichen vom global zu beobachtenden Gletscherrückgang, dem Rückgang des arktischen Meereises, der Abnahme der Schneebedeckung in den Gebirgen und hohen Breiten, dem zunehmenden Masseverlust der Eisschilde in Grönland und der Antarktis, dem Anstieg des Meeresspiegels, der wahrscheinlichen Zunahme von Wetterextremen bis hin zum Verlust von Ökosystemen und Tier- und Pflanzenarten. Diese Wirkungen sind bereits durch die lediglich geringe Erwärmung (von global $\sim 0,8^{\circ}$) aufgetreten. Noch vielfach größere Temperaturanstiege von rund 3°C , wie sie bis Ende dieses Jahrhunderts zu erwarten sind, werden weit gravierende Auswirkungen hervorrufen und viele Ökosysteme, Ressourcen, den menschlichen Lebensraum und alle wirtschaftlichen Aktivitäten ernsthaft gefährden.

Im Ostalpenraum bzw. dem österreichischen Berggebiet hat sich der Klimawandel ebenfalls deutlich manifestiert. Ausgehend von dem tiefen Niveau der sogenannten „Kleinen Eiszeit“ um 1850 ist die Temperatur hier um knapp zwei Grad angestiegen. Dabei war die Erwärmung horizontal und vertikal, also in ganz Mitteleuropa, auf den Bergspitzen wie im Flachland, gleich ausgeprägt. Ähnliche Tendenzen zeigen sich beim Luftdruck und der Sonnenscheindauer.

Die starke Erwärmung vom tiefen Niveau des 19. Jahrhunderts aus geht jedoch nicht zur Gänze auf das Konto des Treibhauseffektes. Während natürliche Antriebe (Schwankungen der Sonnenaktivität, explosive Vulkanausbrüche, das Auf und Ab interner Wechselwirkungen) die Temperaturentwicklung im 19. und der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts prägten, ist der anthropogene Einfluss seit den 1950er Jahren bestimmend.

Beim Niederschlag fällt auf, dass der Alpenhauptkamm eine Klimascheide bildet, die eine feuchtere Nordwesthälfte von einer trockeneren Südosthälfte trennt. Dies ist einer der wichtigsten klimatisch wirksamen, räumlichen Effekte. Langfristig weist der Niederschlag nur geringe Schwankungsbreiten von $\pm 10\%$ auf (bei hoher kurzfristiger Variabilität). Die hochfrequente Variabilität des Niederschlages hat überraschenderweise eher abgenommen. In Lagen unter 1.000 Metern Seehöhe ist der steigende Anteil des Regens am winterlichen Gesamtniederschlag signifikant. Vor allem auf der Alpensüdseite

fällt überhaupt weniger Schnee. Die Häufigkeit von Extremereignissen (Sturm- und Hochwassertätigkeit) zeigt innerhalb wie außerhalb des Ostalpenraums/Berggebiet keine besondere Ausprägung. Deren Auftreten hat bis dato nicht signifikant zugenommen oder ist aus den Daten bis jetzt nicht erkennbar. Aus dem Gesagten ist die Hypothese einer Häufung von katastrophalen Wetterereignissen in unserem Raum nicht haltbar.

Das alpine Klima der Zukunft (berechnet anhand von Klimaszenarien) wird deutlich wärmer werden. Bis 2050 steigt die Mitteltemperatur um weitere 2°C an (Anstieg pro Jahrzehnt 0,3-0,45°C). Noch deutlicher steigen die Temperaturen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts (3 bis 3,5°C). Die Verteilung wird sich relativ homogen auf den Alpenraum verteilen. Etwas höher wird sie für den Alpenhauptkamm und südlich davon simuliert. Jahreszeitlich sollte die stärkste Erwärmung in den Sommermonaten stattfinden. Die Jahresniederschlagssumme sollte im Alpenraum in etwa (+/-5%) konstant bleiben, sich jedoch in die Wintermonate verschieben. Anzunehmen ist, dass auch in Zukunft der Alpenhauptkamm eine wirksame Wetterscheide (zwischen Alpennord- und Südseite) bilden wird. Die relativ konstante Gesamtniederschlagsmenge in Verbindung mit einem deutlich höheren Temperaturniveau kommt jedoch einem Rückgang (höhere Verdunstung und geringere Bodenfeuchte) des zur Verfügung stehenden Wasserangebots gleich.

Trend-Aussagen zu Extremwetterlagen sind höchst unsicher. Tatsächlich nimmt der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre zu und das Potenzial für Starkregenereignisse nimmt zu. Aus heutiger Sicht wissen wir heute jedoch nicht das „Wann“ und „Wo“ der Extremwetterlagen. Ebenfalls schwierig ist es das Potenzial für Sturmereignisse abzuschätzen. In Abhängigkeit von Großwetterlage und Druckgradient ergibt sich die Windstärke. Die Erwärmung kann die Polarfront sowohl nach Norden verschieben aber auch verschärfen. Insofern ist die Hypothese nach einem Anstieg von Extremwetterlagen weder positiv noch negativ verifizierbar.

Insgesamt kann der alpine Raum von höheren Temperaturen durchaus profitieren, diese wirken der bestehenden Klimaungunst entgegen. Anders als im Flach- und Hügelland dürfte auch der Niederschlag weiterhin ausreichend zur Verfügung stehen. Unterschiedliche Räume, auch innerhalb des Ostalpenraumes bzw. Berggebietes wirken jedoch modifizierend auf die Einflüsse des Klimawandels (Alpennord- versus Alpensüdseite). Die stärksten Auswirkungen des Klimawandels werden weniger kurzfristiger als mittel- und langfristiger, vor allem ab 2050, auftreten.

Der Klimawandel beeinflusst die Menschen, die Gesellschaft und Ökonomie über seine Auswirkungen auf den Naturhaushalt bzw. die Ökosysteme. Die Auswirkungen der anthropogenen Erwärmung verändern u.a. die physikalischen und biologischen Komponenten der Ökosysteme – Luft, Wasser, Boden etc. Damit sind auch die für den Menschen unbedingt erforderlichen Ressourcen (Stichwort Ökosystemleistungen) betroffen.

Durch den Klimawandel verschieben sich nicht nur großräumig die Klimazonen vom Äquator zum Pol nordwärts, sondern sie steigen auch in die Höhe – gipfelwärts. Auch in der Tierwelt sind ähnliche Verhaltensänderungen bemerkbar. Der Klimawandel bewirkt eine deutliche Milderung des vorherrschend subalpinen und alpinen Klimas. Dies lässt sich auch durch die Verschiebung bzw. Verfrühung der phänologischen Phasen belegen. Die bestehende Klimaungunst (geringe Wärmesumme resultierend in der kurzen Vegetationsperiode etc.) wird dadurch abgeschwächt. Andererseits werden die „höheren

Stockwerke“ durch den Rückgang von Gletschern und Permafrost instabiler, Abtragungsprozesse verstärken sich. Der Klimawandel bewirkt eine Veränderung der Arten- und Pflanzenzusammensetzung. Arealverluste für kältesuchende, kleinräumig verbreitete und weniger mobile Arten sind absehbar. Dies betrifft viele nivale und subnivale Arten mit enger ökologischer Amplitude, die zum Teil nur in diesem eng begrenzten Lebensraum auftreten (v.a. den weniger hohen Gipfellagen) und vor dem Aussterben stehen. Umgekehrt können sich wärmeliebende, anspruchslose, montane und subnivale Arten weiter verbreiten, darunter befinden sich auch invasive Pflanzen- und Tierarten (Neobiota). Neben der nivalen Hochgebirgszone sind die alpinen Feuchtgebiete (Moore, Gewässer etc.) durch den Klimawandel gefährdet. Deren Fauna und Flora wird durch die Zunahme von Hitze- und Trockenperioden beeinträchtigt. Durch die Komplexität der Ökosysteme, ihre weitgehende Selbststeuerung, sind Anpassungsmaßnahmen nur begrenzt möglich. Dazu zählen aber die Unterstützung der Migration (gefährdeter Arten) durch Translokation, sowie nicht zuletzt die Beschränkung konventioneller Gefährdungsfaktoren der Arten und ihrer Lebensräume. Beim Klimaschutz kommt der Mobilisierung der Senkenfunktion kohlenstoffreicher Ökosysteme (Feuchtgebiete, Wälder) große Bedeutung zu.

Die Forstwirtschaft hat innerhalb des Berggebietes einen hohen Anteil an der Wertschöpfung. Gleichzeitig weist dieser Sektor eine hohe Betroffenheit durch den Klimawandel auf. Prinzipiell ergibt sich ein günstiger Effekt durch das höhere Ertragspotenzial und die ansteigende Produktivität durch die verlängerte Wachstums- und Vegetationsperiode. Dies lässt sich an der höheren Zuwachsleistung sowie dem Anstieg der Waldgrenze klar nachweisen. Positiv zu bewerten ist auch die größere Vielfalt der alpinen Baumarten (Mischwald, Laubbäume), die bedingt durch die milderen Temperaturen, kultiviert werden können. Ungünstig beeinflusst wird der Wald durch Trockenstress und mangelnde Wasserverfügbarkeit. Darunter leiden vor allem die Fichtenreinbestände, die in der montanen Gebirgsstufe akut gefährdet erscheinen. Hitze und Trockenheit macht die Wälder insgesamt anfälliger für Borkenkäfer und andere Schädlinge. Extremwetter, vor allem Windbruch kann die Bestände stark schädigen. Anpassungsmaßnahmen können vor allem mittels standortgerechter Baumartenwahl, der Erhöhung des Strukturereichtums gesetzt werden.

Auch die Berglandwirtschaft kann durch die längere Vegetationsperiode höhere Erträge erwarten, wenn die Wasser- und Nährstoffversorgung gewährleistet ist. Das Dauergrünland ist auf ausreichende Niederschläge angewiesen. Arbeitsspitzen, Schnitte werden früher im Jahr auftreten. Auch die Zunahme von Ertragsschwankungen (Lagerbedarf) und eine Änderung der Artenzusammensetzung der Gräser ist die Folge (Futterqualität). Ungünstig für die Grünlandbewirtschaftung ist zumeist der Mangel an Produktionsalternativen. Darüber hinaus könnten die günstigen Grünlandstandorte (weiter) intensiviert werden (Acker, Silomais). In der Almwirtschaft ist ebenfalls von längeren Vegetations- und Weideperioden auszugehen. Die Tiergesundheit kann durch Hitzestress beeinträchtigt werden. Witterungsextreme bergen auch in der Berglandwirtschaft Schadpotenzial. Anpassungsmaßnahmen erfolgen durch die Förderung des Artenreichtums, sekundär auch durch die Aussaat von trockenheitsverträglichen Gräserarten, der Bekämpfung von Viren und Parasiten (Viehhaltung) sowie der Optimierung der Weideführung. Die Erhaltung des Dauergrünlandes bzw. des Feldfutterbaues als Kohlenstoffspeicher ist eine Klimaschutzmaßnahme.

Der Tourismus hat eine starke witterungsbeeinflusste Komponente, weil Freizeitaktivitäten oft Außer-Haus-Aktivitäten sind, die auf günstige Wetterverhältnisse angewiesen sind. Insofern wirkt sich der

Klimawandel vor allem positiv auf das Sommerhalbjahr und die Übergangsjahreszeiten aus. Dies schließt Beeinträchtigungen durch Schlecht- und Extremwetterlagen nicht aus. Ansonsten ergibt sich eine höhere Attraktivität und steigende Marktchancen durch die Zunahme warmer und milder Tage. Die Ausweitung des Tourismus in alpinen Hochtälern und Hochlagen führt jedoch zu steigenden Nutzungskonflikten. Nicht günstig ist hingegen die Prognose für den Wintertourismus. Trotz künstlicher Beschneigung ist der Wintersport auf ein Mindestmaß an „Winterfeeling“ gebunden. Die abnehmende Schneesicherheit in Mittelgebirgslagen unter 1.500m trifft vor allem kleine Schigebiete in niedriger Höhe. Anpassungsmaßnahmen der Tourismuswirtschaft bestehen in der Abkehr der zum Teil sehr einseitigen Ausrichtung auf Wintersportaaktivitäten. Gerade der Tourismus ist von demographischen Faktoren abhängig und anfällig für wirtschaftliche Konjunkturreinbrüche. Diese Faktoren überlagern den Klimawandel. An Klimaschutzmaßnahmen besteht in diesem Sektor ein großes Potenzial: Dazu zählen die Senkung des Ressourcenverbrauchs, ein geeignetes Mobilitätsmanagement, Energiesparpotenziale etc.

Sonstige Effekte betreffen die Verkehrsinfrastruktur, den Siedlungsraum, die Wasser- und Energiewirtschaft und die Raumnutzung und –planung. Günstig wirkt sich das geringere Auftreten von widrigen Wetterverhältnissen (Kälte, Schnee etc.) aus, wenngleich die Häufigkeit des Auftretens von Extremwetter- und Elementarereignissen aus heutiger Sicht kaum abschätzbar ist. Negativ ist die erhöhte thermische Beanspruchung aller Art von Baumaterialien. Im Siedlungsraum (Bauen, Wohnen) ist der abnehmende Heizwärmebedarf ein Pluspunkt. Bei den Naturgefahren steigt das Potenzial für Hochwasser, Murgänge, gleichbleibend ist die Tendenz bei Lawinen, Waldbrände könnten häufiger vorkommen. In der Wasserwirtschaft ist die Versorgung mit Trinkwasser gesichert. Es kann jedoch zur Verstärkung vorhandener Wasserengpässe in Gebieten mit ungünstigem Wasserangebot (südlich des Alpenhauptkamms) kommen. Positiv ist die Abschwächung niedriger Winterwasserstände zu beurteilen. Die Gefährdung durch Hochwässer ist aus heutiger Sicht kaum abschätzbar. Die Energieversorgung ist durch abnehmenden Heizwärmebedarf (im Winter) und steigendem Kühlenergiebedarf (im Sommer). Modifiziert gilt dies jedoch für Höhenlagen über 1.000m Seehöhe. Höhere und häufigere Schwankungsbreite der Wasserstände und vermehrtes Niederwasser im Sommer treten auf. In der Raumnutzung, und –planung ist Vorsorge für eine steigenden Bedrohung durch Extremwetterlagen zu treffen (Retentionsflächen usw.) Anpassungsmaßnahmen in diesen Bereichen sind vielfältig und reichen von der Planung, Errichtung und Bewirtschaftung (Anlagen, Gebäuden) bis zur Nutzungsbeschränkungen oder Freihaltung von Flächen in der Raumplanung. Auch das CO₂-Emissionspotenzial dieser Sektoren ist beträchtlich und sollte reduziert werden.

Die Ausgangshypothese dieses Projekts war, dass der Ostalpenraum bzw. das Berggebiet vom Klimawandel stärker und negativer betroffen ist als Regionen außerhalb davon. Die stärkere Betroffenheit, die durch dieses Projekt positiv verifiziert werden kann, resultiert aus *naturräumlichen, ökologischen* Gegebenheiten nicht weil der Klimawandel hochalpin stärker ausgeprägt ist:

- ◆ Die Landnutzung, Besiedelung (dabei hohe Konzentration auf die Talräume, Schwemmkegel der Bäche, bei begrenztem Dauersiedlungsraum) und die Infrastruktur ist durch Naturgefahren und Extremwetterlagen (Hochwasser, Erd- und Felsbewegungen, Lawinen etc.) latent bedroht;
- ◆ Das Auftreten von Permafrost und Gletschern in den oberen Stockwerken der Hochalpen wirkt stabilisierend auf Felsen und Schutt und schützt auch die Talräume, durch den Klimawandel werden Massenbewegungen bis in die unteren Stockwerke wahrscheinlicher;
- ◆ Der Tourismus, als wichtige Einkommensquelle, ist auf Schneesicherheit, intaktes Landschaftsbild (Gletscher) bis zu einem gewissen Grad angewiesen;
- ◆ Die alpinen Ökosysteme sind hochgradig verletzlich, da viele Arten am Rand ihrer Existenz (Verbreitungsgebiete) leben, die auch nicht ausweichen können, viele endemische Arten, v.a. „kältebedürftige“ Arten;
- ◆ Im Ostalpenraum bzw. dem Berggebiet ist der Ausgangspunkt vieler natürlicher Ressourcen, die unmittelbar vom Klimawandel betroffen sind (Wasser, Boden, Luft etc.) bzw. der Sektoren die damit eng verbunden sind (Land- und Forstwirtschaft, Wasser- und Elektrizitätswirtschaft etc.) und die auch für die umliegenden Regionen von großer Bedeutung sind bzw. genutzt/konsumiert werden;
- ◆ Problematische Folgen ausgelöst durch ein milderes Klima bestehen aber auch in der (landwirtschaftlichen) Intensivierung und der damit verbundenen veränderten Raumnutzung (mehr Tourismus, Freizeitnutzung, „höher hinauf“);

Letztlich ist der Klimawandel aber nur ein Faktor unter anderen. Er muss im Zusammenwirken mit gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Einflussfaktoren (Konjunktur, Technologie, Demographie, Politik etc.) betrachtet werden.

Literaturverzeichnis

- Albrecht, Axel/ Schindler, Dirk/ Grebhan, Karin/ Kohnle Ulrich/ Mayer, Helmut (2008): Klimawandel und Stürme über Europa – eine Literaturübersicht.
http://www.waldwissen.net/wald/klima/wandel_co2/fva_sturm/fva_klima_sturm_artikel
(Zugriff am 6. September 2011)
- Alpmedia.net (2002): Klimawandel und Alpen. Ein Hintergrundbericht
http://www.cipra.org/pdfs/24_de/at_download/file (Zugriff am 27. August 2010)
- AlpMedia Newsletter (2008): Modifikation der alpinen Pflanzengemeinschaften
http://www.cipra.org/pdfs/604_de (Zugriff am 11. August 2011)
- Ammer, Christian (2009): Welche Baumarten trotzen dem Klimawandel? In: Landwirtschaft 2009. Der kritische Agrarbericht (Hg.) AgrarBündnis e.V., Kassel/Hamm 2009, S199-203
- Arbesser, Maximilian/ Borrmann, Julia/ Felderer, Bernhard/ Grohall, Günther/ Helmenstein, Christian/ Kleissner, Anna/ Moser, Bernhard (2008): Die ökonomische Bedeutung des Wintersports in Österreich. Institut für Höhere Studien. Wien
- ARGE Kompost & Biogas (2005): Biogas, Energieträger der Zukunft.
<http://www.klimaaktiv.at/filemanager/download/12950> (Zugriff am 20. Juli 2010)
- AustroClim (2008a): Identifikation von Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel in Österreich: 1.Phase, 2008, Bericht im Auftrag des BMLFUW
<http://www.umweltnet.at/filemanager/download/38676/> (Zugriff am 2. November 2009)
- AustroClim (2010a): Handlungsempfehlungen für das Aktivitätsfeld „Natürliche Ökosysteme und Biodiversität.“
http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/reports/Handlungsempfehlungen_GesBiodivVerkehrsinfrastr.pdf (Zugriff am 24. August 2011)
- AWI – Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (2011) Meereis
http://www.awi.de/de/entdecken/klicken_lernen/lesebuch/meereis/
(Zugriff am 17. Februar 2011)
- Balas, Maria/ Essl, Franz/ Felderer, Astrid/ Formayer Herbert/ Prutsch, Andrea/ Uhl Maria (2010a): Klimaänderungsszenarien und Vulnerabilität, Aktivitätsfeld Natürliche Ökosysteme und Biodiversität.
<http://geoinfo.lebensministerium.at/filemanager/download/73518/>
- Bätzing, Werner (2003): Die Alpen, Geschichte und Zukunft einer europäischen Kulturlandschaft. Verlag C.H.Beck. 2. Auflage. München

- Bätzing, Werner (2010): Vom Wandel des Tourismus in den österreichischen Alpen. In: Ausblicke 1/10, S36-37. Wien
<http://www.leader-austria.at/lum/downloads/ausblicke-magazin-fuer-laendliche-entwicklung/ausblicke-1.10-schwerpunkt-wandel-1>. (Zugriff am 9. August 2010)
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009): Beschneiungsanlagen und Kunstschnee.
http://www.lfu.bayern.de/umweltwissen/doc/uw_11_beschneiungsanlagen.pdf
(Zugriff am 6. August 2010)
- Beierkuhnlein, Carl/ Foken, Thomas (2008): Klimawandel in Bayern, Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. Bayreuther Forum Ökologie Vol. 113-2008. Bayreuth
- Biologischesvielfalt.at (2012a): Biologische Vielfalt – Clearing House mechanism. Informationsplattform des UBA, BMLFUW u.a. zum Thema Biodiversität. <http://www.biologischesvielfalt.at/> (Zugriff am 15. Mai 2012)
- Biologischesvielfalt.at (2012b): Genetische Vielfalt.
<http://www.biologischesvielfalt.at/biodiversitaet-in-oesterreich/arten/genetische-vielfalt>
(Zugriff am 31. Mai 2012)
- Biologischesvielfalt.at (2012c): Gefährdung der Lebensraumvielfalt
- Böhm, R./ Godina, R./ Nachtnebel, H.P./ Pirker O. (Hg.) (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die Österreichische Wasserwirtschaft. Im Auftrag des BMLFUW und des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV). Wien
http://www.uni-graz.at/igam7www_gobiet_truhetz-2008-oewavbrochure.pdf
(Zugriff am 18. Oktober 2011)
- Böhm, Reinhard (2008): Heiße Luft – Reizwort Klimawandel, Fakten – Ängste – Geschäfte. Edition Va Bene, Wien und Klosterneuburg
- Böhm, Reinhard (2008b): Schnee im Klimawandel.
<http://www.zamg.ac.at/histalp/downloads/abstract/Boehm-2008a-F.pdf>
- Böhm, Reinhard (2009): Geändertes Umfeld durch Klimawandel?
<http://www.zamg.ac.at/histalp/downloads/abstract/Boehm-2009b-F.pdf>
(Zugriff am 20. Mai 2010)
- Burger-Scheidlin, Hemma/ Christanell, Anja/ Vogl, Christian R. (2009): Wetter – Wahrnehmung – Wissen, Bäuerliche Perspektiven auf Klima und Klimawandel In: Landwirtschaft 2009. Der kritische Agrarbericht. AgrarBündnis e.V.(Hg.). ABL Bauernblatt Verlags-GmbH. Konstanz/Hamm.S261-265
- Bohner, Andreas/ Bruckner, Josef (2006): Pflanzenphänologische Beobachtungen an der HBLFA Raumberg-Gumpenstein als Bioindikator für den Klimawandel, 9. Österreichischer Klimatag (BOKU Wien, 16.-17. März 2006)
- Buchgraber, Karl (2007a): Österreichisches Grünland ist schwer zu bearbeiten. In: Ländlicher Raum Jahrgang 2007. <http://www.laendlicher-raum.at/article/archive/26627>
(Zugriff am 30. Oktober 2009)

- Bundesamt für Naturschutz (2008): Wie hängen Biodiversität und Klimawandel zusammen?
http://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/service/2008_04_01_Klimawandel_Bonn_JESSEL.pdf (Zugriff am 29. August 2011)
- Bundesamt für Umwelt (2007): Klimaänderung in der Schweiz. Bern.
<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00065/index.html?lang=de>
(Zugriff am 6. August 2010)
- Bundesanstalt für Bergbauernfragen (2007a): Zeitreisen(de) im ländlichen Raum. Forschungsbericht Nr. 57. Wien
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft (Hg.) (1972): Schutzwaldsanierung und Hochlagenaufforstung. Wien
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2001): Wald(boden)sanierung
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2004a): Österreichischer Waldbericht 2004. Wien
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2006a): Österreichisches Waldprogramm 2006. Wien
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2007a): Wildbach- und Lawinenverbauung in Österreich. Wien
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2008a): Österreichischer Waldbericht 2008. Wien
http://gpool.lfrz.at/gpoolexport/media/file/waldbericht_2008_Gesamtbericht.pdf
(Zugriff am 16. März 2010)
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2008b): Schutz für Mensch und Natur im Zeichen des Klimawandels. Jahresbericht 2008 der Bundeswasserbauverwaltung und der Wildbach- und Lawinenverbauung, Wien
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2009a): Österreichisches Programm für die Entwicklung des Ländlichen Raums 2007-2013.
<http://land.lebensministerium.at/article/articleview/60417/1/21433>
(Zugriff am 21. September 2009)
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2010a): Leben mit Naturgefahren. Wien
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2011a): Wasser in Österreich.
<http://www.lebensministerium.at/wasser/wasser-oesterreich.html>
(Zugriff am 8. November 2011)
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2011b): Grüner Bericht 2011. Wien

- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) (2012a): Indikatoren-Bericht zur Biodiversität in Österreich
http://www.lebensministerium.at/dms/lmat/publikationen/indikatoren-bericht_zur_biodiversitaet_in_oesterreich/Indikatoren-Bericht_zur_Biodiversitaet_in_Oe.pdf?1=1 (Zugriff am 31. Mai 2012)
- Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend, BMWFJ (2009): Bericht über die Lage der Tourismus und Freizeitwirtschaft in Österreich 2009.
http://www.bmwfj.gv.at/Tourismus/TourismusInOesterreich/Documents/Lagebericht09_Homepage.pdf (Zugriff am 5. August 2010)
- Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend – BMWFJ (2009b): Klimawandel und Reiseverhalten Auswirkungen des Klimawandels auf das künftige Reiseverhalten im österreichischen Tourismus am Beispiel einer repräsentativen Befragung der österreichischen Urlaubsreisenden.
<http://www.bmwfj.gv.at/Tourismus/TourismusstudienUndPublikationen/Documents/Sammelmappe1%20Klimawandel%20Reiseverhalten.pdf> (Zugriff am 26. August 2010)
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - BMVIT (2010): Eisenbahn- und Seilbahnstatistik 2001/02 http://www.bmvit.gv.at/service/publikationen/verkehr/eisenbahn/downloads/statistik_allgemein.pdf (Zugriff am 5. August 2010)
- Chmielewski, Frank Michael (2009): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft.
<http://edoc.hu-berlin.de/miscellanies/klimawandel-28044/75/PDF/75.pdf> (Zugriff am 4. November 2009)
- CIPRA International (2010a): Tourismus und ökologische Netzwerke im Alpenraum
http://www.alpine-ecological-network.org/pdfs/910_de/at_download/file (Zugriff am 29. August 2011)
- CIPRA International (2010b): Raumplanung im Klimawandel
http://www.cipra.org/pdfs/837_de/at_download/file (Zugriff am 11. November 2011)
- Deutsche Bank Research (2008): Klimawandel und Tourismus: Wohin geht die Reise? Ausgabe 5. März 2008, Frankfurt am Main
http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD000000000221332.pdf (Zugriff am 30. August 2010)
- Diepolder, Michael (2007): Auswirkungen des Klimawandels und Strategien für die bayerische Grünlandwirtschaft
http://www.lfl.bayern.de/iab/kulturlandschaft/27617/linkurl_0_18_0_4.pdf (Zugriff am 4. November 2009)
- Dokulil, Martin (2009): Abschätzung der klimabedingten Temperaturänderungen bis zum Jahr 2050 während der Badesaison. Universität Wien, Fakultät für Lebenswissenschaften, Department für Limnologie und Hydrobotanik, Studie im Auftrag der Österreichischen Bundesforste.
http://www.oebf.at/uploads/tx_pdforder/Klimastudie_Seen_2009_Dokulil.pdf (Zugriff am 19. August 2011).
- Dörfler, Hildegard (Hg) (1990): Der praktische Landwirt. BLV Verl.-Ges. München

- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) (2006): Wald und Klimawandel. <http://www.wsl.ch/publikationen/pdf/7654.pdf> (Zugriff am 19. April 2010)
- Eitzinger, Josef (2007): Einfluss des Klimawandels auf die Produktionsrisiken in der österreichischen Landwirtschaft und mögliche Anpassungsstrategien. In: Ländlicher Raum Jahrgang 2007. <http://www.laendlicher-raum.at/filemanager/download/23017/> (Zugriff am 5. November 2009)
- Eitzinger, Josef/ Kubu, Gerhard/ Thaler, Sabina/ Trnka, Mirek (2008): Der Klimawandel, seine absehbaren Folgen für die Landwirtschaft in Oberösterreich und Anpassungsstrategien http://www.land-oberoesterreich.gv.at/cps/rde/xbcr/SID-D174A12D-9F394FA2/ooe/LFW_GB_Kap12.pdf (Zugriff am 26. November 2009)
- ETH Zürich (2009): Stand der Kenntnisse zu den Auswirkungen des Globalen Wandels auf Schweizer Wälder. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU. http://www.bafu.admin.ch/wald/01198/01209/index.html?lang=de&download=NHZLpZeg7t,lnp6f0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCFfYR9gGym162cpYbg2c_JjKbNoKSn6A-- (Zugriff am 21. Mai 2010)
- Formayer, Herbert/ Clementschitsch, Lukas/ Hofstätter, Michael/ Kromp-Kolb, Helga (2008a): Vorsicht Klima! Klimawandel in Österreich, regional betrachtet. Schwerpunkt: Tirol und der alpine Raum. Studie im Auftrag von Global 2000. Wien. <http://www.global2000.at/pages/paklima080729.htm> (Zugriff am 3. November 2009)
- Fürlinger, Cornelia (2009): Der Klimawandel als Herausforderung für die agrarische Beratung in Niederösterreich. Bachelorarbeit. Hochschule für Agrar- und Umweltpädagogik Wien
- Gappaier, Mathias (2009): Erfahrungen, Ängste und Strategien von Landwirtinnen und Landwirten in Bezug auf den Klimawandel. Bachelorarbeit. Hochschule für Agrar- und Umweltpädagogik Wien
- Geßl, Erich (1985): Das Grünland. Leopold Stocker Verlag, Graz, Stuttgart.
- Global 2000 (2010): Klimawandel: Die Berge wachsen zu. <http://www.global2000.at/site/de/magazin/nawi/klimawandelflora/>
- Gobiet, Andreas/ Heinrich, Georg/ Steiner, Martin/ Leuprecht, Armin/ Themeßl, Matthias / Schaumberger, Andreas/ Buchgraber, Karl (2009): AgroClim 2 – Landwirtschaftliche Ertragsentwicklung und Trockengefährdung unter geänderten Klimabedingungen. Endbericht. Graz
- Gore, Al (2006): Eine unbequeme Wahrheit, Riemann Verlag München.
- Groier, Michael/ Hovorka, Gerhard (2007a): Innovativ bergauf oder traditionell bergab? Politik für das österreichische Berggebiet am Beginn des 21. Jahrhunderts. Forschungsbericht Nr. 59 der Bundesanstalt für Bergbauernfragen. Wien
- Haeberli, Wilfried/ Maisch, Max (o.J.): Klimawandel im Hochgebirge. http://www.sciencealumni.uzh.ch/Agenda/GV/Vortrag/4-4-Haeberli_F.pdf (Zugriff am 21. Juni 2011)

- Hamburger Bildungsserver (2011a): Kohlenstoffkreislauf im Ozean.
<http://www.hamburger-bildungsserver.de/index.phtml?site=themen.klima>
(Zugriff am 10. Februar 2011)
- Hofer, Rudolf (Hrsg.) (2009): Die Alpen. Alpine space – man & environment: vol. 9, university press, Innsbruck
- Hoppichler, Josef (2002): Biodiversität im Alpengebiet. Evaluation und Bewertung. OECD-Fallstudie. (Hg.) Bundesanstalt für Bergbauernfragen. Forschungsbericht Nr. 48. Wien
- Hovorka, Gerhard (2004a): Den Bergbauernbetrieben wird nichts geschenkt. Evaluierung der Ausgleichszulage im Rahmen des österreichischen Programms für die Entwicklung des ländlichen Raums. Forschungsbericht Nr. 52 der Bundesanstalt für Bergbauernfragen. Wien
- Hovorka, Gerhard (2001a): Keine Berglandwirtschaft ohne Ausgleichszahlungen. Evaluierung der Maßnahme Ausgleichszulage in benachteiligten Gebieten und Nationale Beihilfe. Forschungsbericht Nr. 47 der Bundesanstalt für Bergbauernfragen. Wien
- Institut für Höhere Studien, IHS (2008): Die ökonomische Bedeutung des Wintersports in Österreich. Wien
- Institut für Waldbau (2010a): Waldbewirtschaftung und Klimaänderung
<http://www.wabo.boku.ac.at/wald-klimawandel.html> (Zugriff am 10. März 2010)
- Kastner, Alfred (1988): Forstwirtschaft in Österreich. In: GRÜNBUCH, Krise und Perspektiven der österreichischen Landwirtschaft. (Hg.) Gerhard Steger. Ernst Schweiger Verlag. Wien
- IPCC, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (2007a): Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ipcc_entscheidungstraeger_gesamt.pdf (Zugriff am 2. November 2009)
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007b): Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Chapter 12 Europe.
<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter12.pdf>
(Zugriff am 29. Juli 2011)
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007c): Physical Science Basis, Observations: Surface and Atmospheric Climate Change, Chapter 3
<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter3.pdf>
(Zugriff am 16. November 2011)
- KlimAdapt (2010): Ableitung von prioritären Maßnahmen zur Adaption des Energiesystems an den Klimawandel. Technische Universität Wien, Energy Economics Group (Projektleitung) Endbericht
http://www.eeg.tuwien.ac.at/eeg.tuwien.ac.at_pages/publications/pdf/KRA_REP_2010_1.pdf (Zugriff am 21. Mai 2012)

- Klimabündnis.at (2011): Eisbedeckung und Klimawandel
<http://www.klimabuendnis.at/start.asp?ID=232399&b=334&b2=974&am=2>
(Zugriff am 19. August).
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften (2007a): Grünbuch, Anpassung an den Klimawandel in Europa – Optionen für Maßnahmen der EU. KOM (2007) 354 endgültig. Brüssel
- Kirchengast, Christoph (2005): Über Almen, Sozial- und kulturanthropologische Betrachtungen zur Almwirtschaft in Österreich. Diplomarbeit. Wien
- Kirchmeir, Hanns/ Herzog, Ernst/ Jungmeier, Michael/ Grabherr, Georg (2000): Der Wald im Klimawandel, o.V., Klagenfurt
- Kreft, Sönke (2009): Klimawandel in Norddeutschland.
<http://www.germanwatch.org/klima/nord09.pdf> (Zugriff am 10. März 2011)
- Lackner, Karl (2008): Klimaerwärmung – Neue Herausforderungen für die Almbauern.
http://www.raumberg-gumpenstein.at/cms/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=2765&Itemid=53
(Zugriff am 4. November 2009)
- Loibl, Wolfgang/ Formayer, Herbert/ Schöner, Wolfgang/ Truheth, Heimo (2011): Reclip:century 1, Research for Climate Protection: Century Climate Simulations, Austrian Institute of Technology.
http://reclip.ait.ac.at/reclip_century/index.php?id=39 (Zugriff am 12. Oktober 2011)
- Kuratorium Wald (2010): Vielfalt im Wald.
http://www.biologischesvielfalt.at/fileadmin/inhalte/chm/pdf-files/Vielfalt_im_Wald.pdf
(Zugriff am 12. Juli 2011)
- Landwirtschaftskammer Tirol (2008a): Grundfutterqualität, gefragt denn je.
http://www.agrarnetatustria.at/netautor/napro4/appl/na_professional/parse.php?id=2500%2C1369055%2C%2C%2CbnBmX3NldF9wb3NbaGl0c109MTQ%3D
(Zugriff am 31. Oktober 2009)
- Landwirtschaftskammer Tirol (2010a): Forstschutz: Diese Käfer können ihren Wald gefährden
http://www.diekammer.info/netautor/napro4/appl/na_professional/parse.php?id=2500%2C1360548%2C%2C%2CbnBmX3NldF9wb3NbaGl0c109Mg%3D%3D
(Zugriff am 31. Mai 2010)
- Lexer, Manfred J./ Seidl, Rupert (2007): Der österreichische Wald im Klimawandel – Auswirkungen auf die Waldbewirtschaftung. In: Ländlicher Raum, Online-Fachzeitschrift des BMLFUW Jahrgang 2007
- Michler, Günther (Hrg.) (2010): Klimaschock o.O.
- Mosbrugger, Volker/ Micheels, Arne (2007): Vegetation der unterschätzte Klimafaktor.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/biuz.200610327/abstract>
(Zugriff am 23. November 2010)

- Naturschutzbund Österreich (2007): Künstliche Beschneigung. Position des Naturschutzbundes Österreich. <http://www.naturschutzbund.at/info/positionen.html#Anchor-13214> (Zugriff am 6. August 2010)
- Neff, Christine/ Benedict Vuilleumier (2008): Verkannte Gletscher? Gletscherschwund in der Wahrnehmung der Schweizer Gletscher-Gemeinden. Stiftung Landschaftsschutz Schweiz (SL) Bern.
- News-de.com (2010): Bericht: Hitzewelle in Russland forderte fast 56.000 Tote. <http://www.news-de.com/news-2/bericht-hitzewelle-in-russland-forderte-fast-56-000-tote/> (Zugriff am 31. März 2011)
- Niedermair, Markus/ Lexer, Manfred J./ Plattner, Gerald/ Formayer, Herbert/ Seidl, Rupert (o.J.): Klimawandel und Artenvielfalt. Wie klimafit sind Österreichs Wälder, Flüsse und Alpenlandschaften. 27 Seiten
http://www.oebf.at/fileadmin/user_upload/Natur/Natur_Dokumente/Klimastudie_WWF.pdf (Zugriff am 21. Juli 2011).
- Niederösterreichische Klimastudie (2007): Auswirkungen des Klimawandels in Niederösterreich. http://www.noe.gv.at/bilder/d33/NOE_Klimastudie_2007.pdf?13263 (Zugriff am 19. August 2010)
- Oberleitner, Günter/ Hancvencl, Peter (2000): Rechtskunde Land- und Forstwirtschaftsrecht. Manz Verlag Schulbuch. Wien 2000.
- OcCC – Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. http://www.occc.ch/products/ch2050/PDF_D/CH2050.pdf (Zugriff am 29. Oktober 2009)
- OECD (2007): Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management. <http://www.oecd.org/dataoecd/25/40/37909236.pdf> (Zugriff am 31. August 2010)
- OECD, Trade and agriculture directorate, environment directorate (2009a): Climate change and agriculture: impacts, adaption, mitigation and options for the OECD. COM/TAD/CA/ENV/EPOC(2009)13/REV1. Paris
- Oeggel, Klaus/ Nicolussi, Kurt (2009): Prähistorische Besiedlung von zentralen Alpentälern in Bezug zur Klimaentwicklung. In: Klimawandel in Österreich. Schmidt, Roland/ Matulla, Christoph/ Psenner, Roland (Hrsg.) Innsbruck university press. 77-86.
- ÖBf, Österreichische Bundesforste AG (o.J.): Auswirkungen des Klimawandels in Österreich. 14 Seiten.
http://www.oebf.at/fileadmin/user_upload/Natur/Natur_Dokumente/Auswirkungen_des_Klimawandels_in_sterreich.pdf (Zugriff am 21. Juli 2011).
- Österreichische Raumordnungskonferenz - ÖROK(2008a): Zwölfter Raumordnungsbericht. Analysen und Berichte zur räumlichen Entwicklung Österreichs 2005-2007. Wien

- Österreichische Raumordnungskonferenz, ÖROK (2010a): Regionale Tourismusentwicklung in Österreich, ÖROK-Atlas
http://www.oerok-atlas.at/gui/map.php?predef_mapid=regionale_tourismusentwicklung&redraw_x=1&system_app_send_from_index=0&&staat01=1&land_grenzen01=1&bezirk_grenzen_01=1&see01=1&fluss01=1&gradgitter01=1&stadt01=1&schummerung01=1&staat_anno=1&anno_stadt01=1&katz59e6760f9598a2a123182af33731ba68=1 (Zugriff am 6. August 2010)
- Österreichische Raumordnungskonferenz, ÖROK (2011a): Raumordnung in Österreich.
<http://www.oerok.gv.at/die-oerok/raumordnung-in-oesterreich.html>
(Zugriff am 26. April 2011)
- Österreichischer Alpenverein, ÖAV (2010a): Gletscherbericht 2008/2009.
http://www.alpenverein.at/portal/Service/Downloads/Presseaussendungen_2010/Pressedownloads_2010/Fischer.pdf (Zugriff am 3. August 2011)
- Österreichischer Alpenverein ÖAV (2011a): Gletscherbericht 2009/2010.
http://www.alpenverein.at/portal/Service/Downloads/Presseaussendungen_2011/Downloads/Gletscherbericht_09_10.pdf (Zugriff am 3. August 2011)
- Österreich Werbung (2011a): Tourismus in Österreich 2009. Fact-Sheet.
http://www.austriatourism.com/media/8998/2009E_Factsheet%20Tourismus%20in%20%20%C3%96%202009_14%2007%202010.pdf
(Zugriff am 5. August 2010)
- ORF.at (2008): Fichtensterben durch Klimawandel. <http://tirol.orf.at/stories/288578/>
(Zugriff am 26. Juni 2008)
- ORF.at (2010a): Jedes zehnte Gebäude überflutungsgefährdet.
<http://oesterreich.orf.at/stories/463355/> (Zugriff am 6. Mai 2011)
- ORF.at (2011a): Klimawandel senkt globale Erträge.
<http://science.orf.at/stories/1682396/> (Zugriff am 9. Mai 2011)
- ORF Kärnten (2011a): Vogelforscher warnen vor dem Klimawandel
<http://kaernten.orf.at/stories/393576/> (Zugriff am 8. August 2011)
- Patek, Maria (2007a): Klimawandel und Naturgefahren. In Ländlicher Raum Jahrgang 2007
<http://www.bmlfuw.gv.at/article/articleview/53549/1/10602/> (Zugriff am 12. Mai 2011).
- Pauli, H., Gottfried, M., Reiter, K., Klettner, C., Grabherr, G. (2007): Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: Observations (1994-2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. *Global Change Biology*, 13: 147-156
- Peck, Stefan (2005): Die Entwicklung der Wintersportinfrastruktur in Österreich von 1995 bis 2005. Technische Universität, Institut für Städtebau, Landschaftsarchitektur und Entwerfen. Diplomarbeit. Wien
- PIK, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (2011): Risiko für Abbruch der Atlantischen Ozeanzirkulation.

- <http://www.pik-potsdam.de/aktuelles/pressemitteilungen/archiv/2007/risiko-fur-abbruch-der-atlantischen-ozeanzirkulation> (Zugriff am 1. März 2010)
- Pröbstl, Ulrike (2007): Klimawandel: Zukunft und Herausforderung für den Tourismus. In Ländlicher Raum, Jahrgang 2007
<http://www.laendlicher-raum.at/article/articleview/61179/1/26623/>
(Zugriff am 19. August 2010)
- Rahmstorf, Stefan/ Hans Joachim Schellnhuber (2006): Der Klimawandel. Verlag C.H.Beck, München.
- Rahmstorf, Stefan (2011a): Befinden wir uns im Klimawandel?
<http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Other/brockhaus2002.pdf>
(Zugriff am 7. März 2011)
- Reiner, Karl (2007): Bergtourismus – Herausforderungen und Entwicklungschancen für eine nachhaltigere Entwicklung. In: Zeitreisen(de) im ländlichen Raum. Forschungsbericht Nr. 57 der BA für Bergbauernfragen. Wien. S.41-54
- Ruppaner, Marion (2010): Zukunft für Wiesen und Weiden. In: Landwirtschaft 2010. Der kritische Agrarbericht. AgrarBündnis e.V.(Hg.). ABL Bauernblatt Verlags-GmbH. Konstanz/Hamm. 27-34
- Salzburg online (2009): Salzburger Forscher arbeiten an Permafrost-Landkarte
<http://www.salzburg.com/online/salzburg/aktuell/Salzburger-Forscher-arbeiten-an-Permafrost-Landkarte.html?article=eGMmOI8V5MPDSSnsteryRZB7A0lMCGkVX1ikSbo&img=&text=&mode=&> (Zugriff am 4. August 2011)
- Schaumberger, Andreas/ Buchgraber, Karl (2008): Das Gras leidet. In: Bio Austria Fachzeitschrift für Landwirtschaft und Ökologie, Ausgabe 1/2008. S 31
- Schaumberger, Andreas/ Formayer, Herbert (2008b): Räumliche Modellierung der thermischen Vegetationsperiode für Österreich. http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/ppt_10.Klimatag/Tagungsband_Klimatag2008.pdf (Zugriff am 4. August 2011).
- Seher, Walter/ Beutl, Harald (2007): Raumplanung und Hochwasservorsorge – Interkommunale Strategien. In: Land & Raum 2/2007. S12-13.
- StartClim2004 (2005): Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich. Enbericht. <http://www.boku.ac.at/austroclim/startclim/bericht2004/StCl04end.pdf>
(Zugriff am 27. November 2009)
- StartClim 2007 (2008a): Auswirkungen des Klimawandels auf Österreich: Fallbeispiele
http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/reports/StCl07_end.pdf
(Zugriff am 19. August 2010)
- StartClim2008.D (2009a): Bio-Berglandwirtschaft in Tirol – Beitrag zur „Klimaentlastung“ und Anpassungsstrategien. Universität für Bodenkultur.

- http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/reports/StCl08D.pdf
(Zugriff am 2. März 2010)
- StartClim2009.A (2010a): Klimatisch beeinflusste Vegetationsentwicklung und Nutzungsintensivierung von Fettwiesen im österreichischen Berggebiet, Endbericht 2010
http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/reports/StCl09_Folder_20110207.pdf
- Statistik Austria (2010a): Tourismus in Österreich. Ergebnisse der Beherbergungsstatistik. Wien.
http://www.statistik.at/dynamic/wcmsprod/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&dID=70694&dDocName=045278 (Zugriff am 5. August 2010)
- Steinacker, Reinhold (2010a): Meteorologische Extremwerte: historisch und zukünftig. In: Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich. (Hg.) Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Wien
- Steinwider, Andreas/ Mayrhauser, Josef/ Hagmüller, Werner (2008): Wenn es unseren Tieren zu heiß wird. In: Bio Austria. Fachzeitschrift für Landwirtschaft und Ökologie, Ausgabe 1/2008. S 32-33
- Tagesanzeiger (08.07.2010): „Unsere Seen werden zu Beaches.“,
<http://www.tagesanzeiger.ch/schweiz/standard/Unsere-Seen-werden-zu-Beaches/story/21175634> (Zugriff am 20. August 2010)
- Tamme, Oliver/ Bacher, Ludwig/ Dax, Thomas/ Hovorka, Gerhard/ Krammer, Josef/ Wirth, Matthias (2002): Der Neue Berghöfekataster. Ein betriebsindividuelles Erschwerisfeststellungssystem in Österreich. Fact & Features Nr. 23 der BA für Bergbauernfragen. Wien
- Tiroler Umweltschutz (2009): Siloballenwirtschaft als Naturschutzproblem.
http://www.tiroler-umweltschutz.gv.at/fileadmin/inhalte/___PDFs/siloballenwirtschaft.pdf (Zugriff am 20. Juli 2010)
- Technische Universität Wien/ Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft.
<http://wasser.lebensministerium.at/filemanager/download/77385/>
(Zugriff am 9. September 2011)
- Umweltbundesamt (2005a): Klimawandel in Deutschland, Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Dessau.
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2947.pdf>
(Zugriff am 9. November 2008)
- Umweltbundesamt, UBA (2010): Schadstoffeinträge und deren Einfluss auf den Wald.
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/wald/schadstoffe/ozon1/>
(Zugriff am 20. Mai 2010)
- Umweltbundesamt, UBA (2010b): Neobiota in Österreich.
<http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/DP089.pdf>
(Zugriff am 27. Mai 2010)

- Umweltbundesamt, UBA (2010c): Neunter Umweltkontrollbericht, Biologische Vielfalt und Naturschutz.
http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltkontrolle/2010/ukb2010_08_biologischevielfalt.pdf (Zugriff am 5. Juli 2011)
- Umweltbundesamt, UBA (2010d): Klimaänderungsszenarien und Vulnerabilität. Aktivitätsfelder Gesundheit, Natürliche Ökosysteme und Biodiversität, Verkehrsinfrastruktur, Energie, Bauen und Wohnen <http://geoinfo.lebensministerium.at/filemanager/download/73518/> (Zugriff am 4. November 2011)
- Umweltbundesamt, UBA (2011a): Die Aliens sind da.
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/naturschutz/artenschutz/aliens/> (Zugriff am 9. August 2011)
- Umweltbundesamt, UBA (2011b): Ökosystemleistungen und Landwirtschaft. <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0355.pdf> (Zugriff am 15. Mai 2012)
- Umweltbundesamt, UBA (2012a): Treibhausgase
<http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/treibhausgase/> (Zugriff am 23. Mai 2012)
- Umweltdachverband (Hg.) (2006): Auswirkungen der Klima- und Gletscheränderung auf den Alpinismus. Wien
- Umwelt- und Prognoseinstitut e.V. –UPI (2010): Klimabericht der Vereinten Nationen 2007.
http://www.upi-institut.de/klima-bericht_des_ipcc.htm (Zugriff am 10. Dezember 2010)
- UNEP – United Nations Environment Programme (2009): Climate Change 2009
http://www.unep.org/pdf/ccScienceCompendium2009/cc_ScienceCompendium2009_full_en.pdf (Zugriff am 15. Februar 2011)
- Universität Wien, Faculty Centre of Biodiversity (2011): Moore.
<http://www.botanik.univie.ac.at/~temsche/moore.html> (Zugriff am 16. August 2011).
- VISUMtourism (o.J.): Klimawandel und Tourismus.
http://www.visumtourism.ch/fachartikel_klima.pdf (Zugriff am 1. September 2010)
- Vorarlberger Naturschutzrat (2009): Natur und Umwelt in Vorarlberg.
<http://www.naturschutzrat.at/bericht-2009.pdf> (Zugriff am 24. Mai 2011)
- Waldwissen.net (2006): Klimaerwärmung regt Aktivität der Bodenorganismen an.
http://www.waldwissen.net/themen/umwelt_landschaft/co2_klimaschutz/bfw_bodenerwaermung_2006_DE (Zugriff am 29. April 2010)
- Waldwissen.net (2009): Wie Mechanisierung und Umweltvorsorge die Forstwirtschaft veränderten.
http://www.waldwissen.net/themen/forsttechnik/forstmaschinen/lwf_entwicklung_holzerntemaschinen_2003_DE (Zugriff am 28. April 2010)
- Waldwissen.net (2010a): Auswirkungen von Schnee und Lawinen auf junge Bäume.
http://www.waldwissen.net/themen/naturgefahren/schnee/wsl_schnee_baeume_DE (Zugriff am 16. April 2010)

- Waldwissen.net (2010b): Phänologische Trends bei Waldbäumen in der Schweiz.
http://www.waldwissen.net/themen/waldoekologie/pflanzenoekologie/wsl_phaenologische_trends_DE (Zugriff am 21. Mai 2010)
- Waldwissen.net (2010c): Klimawandel und Veränderungen an der alpinen Waldgrenze.
http://www.waldwissen.net/themen/waldbau/schutzwald_gebirgswald/bfw_klima_waldgrenze_2006_DE (Zugriff am 25. Mai 2010)
- Waldwissen.net (2010d): Klimaveränderungen und Biotische Schäden im Wald.
http://www.waldwissen.net/themen/waldschutz/insekten/lwf_klimawandel_biotische_schaeden_2003_DE (Zugriff am 31. Mai 2010)
- Waldwissen.net (2010e): Stabile Schutzwälder – eine Herausforderung für die Forstgenetik.
http://www.waldwissen.net/themen/waldbau/schutzwald_gebirgswald/bfw_stabile_schutzwaelder_2007_DE (Zugriff am 31. Mai 2010)
- Waldwissen.net (2011a): Mehr Wald in Österreich – Ergebnisse der Österreichischen Waldinventur 2007/09
http://www.waldwissen.net/technik/inventur/bfw_oewi07_flaeche/index_DE
(Zugriff am 6. Dezember 2011)
- Weiß, Jürgen (2009): Wirtschaftliche Konsequenzen der touristischen Nachfrage in Österreich. In: Agrarische Rundschau 4/2009, S10-12, Wien
- Wikipedia (2009a): Photosynthese.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Photosynthese> (Zugriff am 28. September 2009)
- Wikipedia (2009c): Wasserhaushalt der Pflanzen
http://de.wikipedia.org/wiki/Wasserhaushalt_der_Pflanzen
(Zugriff am 28. September 2009)
- Wikipedia (2009d): Taube Treppe
http://de.wikipedia.org/wiki/Taube_Treppe (Zugriff am 26. November 2009)
- Wikipedia (2010g) Antarktis.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Antarktis> (Zugriff am 22. November 2010)
- Wikipedia (2010i) Nordatlantische Oszillation.
http://de.wikipedia.org/wiki/Nordatlantische_Oszillation (Zugriff am 20. Dezember 2010)
- Wikipedia (2011c) Folgen der globalen Erwärmung.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Klimafolgen> (Zugriff am 15. Februar 2011)
- Wikipedia (2011d) Nordostpassage.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Nordostpassage> (Zugriff am 16. Februar 2011)
- Wikipedia (2011e) Eisschild.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Eisschild> (Zugriff am 22. Februar 2011)
- Wikipedia (2011f) Grönland.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Grönland> (Zugriff am 22. Februar 2011)

- Wikipedia (2011g) Korallenbleiche.
<http://de.wikipedia.org/wiki/Korallenbleiche> (Zugriff am 30. März 2011)
- Wikipedia (2011n): Biozönose
<http://de.wikipedia.org/wiki/Biozönose> (Zugriff am 9. August 2011)
- Wikipedia (2011r): Vulkanismus
<http://de.wikipedia.org/wiki/Vulkanismus> (Zugriff am 16. November 2011)
- Wiki-Bildungsserver (2010a): Biosphäre im Klimasystem
[http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Biosphäre im Klimasystem](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Biosphäre_im_Klimasystem)
(Zugriff am 23. November 2010)
- Wiki-Bildungsserver (2010b): NAO-Folgen
[http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/NAO Folgen](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/NAO_Folgen)
(Zugriff am 15. Dezember 2010)
- Wiki-Bildungsserver (2010c): Nordatlantische Oszillation
[http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Nordatlantische Oszillation](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Nordatlantische_Oszillation)
(Zugriff am 20. Dezember 2010)
- Wiki-Bildungsserver (2011a): Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme
[http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Auswirkungen des Klimawandels auf %C3%96kosysteme](http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Auswirkungen_des_Klimawandels_auf_%C3%96kosysteme) (Zugriff am 8. August 2011).
- Wirtschaftskammer Österreich – WKÖ (2010a) Tourismus in Zahlen.
http://portal.wko.at/wk/dok_detail_file.wk?AngID=1&DocID=657734&ConID=&StID=314831&titel=Tourismus.in.Zahlen (Zugriff am 29. Juli 2010)
- World Meteorological Organization – WMO (2011a) 2010 in the top three warmest years, 2001-2010 warmest 10-year period, Press Release No. 904
http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_904_en.html
(Zugriff am 3. Februar 2011)
- WWF (2006a): Potenziale der Biomassenutzung aus dem Österreichischen Wald unter Berücksichtigung der Biodiversität.
http://www.wwf.at/downloads/cms_uploaded/studie_biomassenutzung_okt2006_wwf.pdf
(Zugriff am 13. April 2010)
- WWF Deutschland (2010a): Der touristische Klima-Fußabdruck.
[http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/Der_touristische Klima-Fussabdruck.pdf/](http://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/pdf_neu/Der_touristische_Klima-Fussabdruck.pdf/) (Zugriff am 18. August 2010)
- WWF Österreich et al. (2010a): Moore im Klimawandel.
http://www.oebf.at/uploads/tx_pdforder/Studie_Moore_im_Klimawandel.pdf
(Zugriff am 11. August 2011)
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (o.J.) ÖKLIM - Digitaler Klimaatlas Österreichs

- ZAMG (2007a): Gletscher im Klimawandel. Vom Eis der Polargebiete zum Goldbergkees in den Hohen Tauern. Wien.
- ZAMG (2008a): A Tale of two valleys, Rauris, Flattach, Die Vorgeschichte des Klimas in den Hohen Tauern.
http://www.zamg.ac.at/a-tale-of-two-valleys/documents/ZV_7.pdf
(Zugriff am 7. September 2011)
- ZAMG (2009a): Ein Jahr nach Paula und Emma: Ist es in Österreich stürmischer geworden.
http://www.zamg.ac.at/aktuell/index.php?seite=1&artikel=ZAMG_2009-02-26GMT07:52
(Zugriff am 6. September 2011)
- ZAMG (2010a): Portal Klimawandel, Klimasystem
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimasystem/>
(Zugriff am 29. November 2010).
- ZAMG (2010b): Portal Klimawandel, Klimasystem. Vulkane
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimasystem/Vulkane/> (2010b)
- ZAMG (2010c): Portal Klimawandel, Klimasystem. Plattentektonik.
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimasystem/Plattentektonik/>
(Zugriff am 1. Dezember 2010)
- ZAMG (2010d): Portal Klimawandel, Klimasystem. Sonnenaktivität mittelfristig
http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimasystem/Sonnenaktivitaet_mittelfristig/
(Zugriff am 3. Dezember 2010)
- ZAMG (2010e): Portal Klimawandel, Klimavergangenheit: 12.000 Jahre.
http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimavergangenheit/Palaeoklima/12_000_Jahre/
(Zugriff am 21. Dezember 2010)
- ZAMG (2011a): Portal Klimawandel, Klimawandel Global. Die Temperaturkurve zeigt nach oben.
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimazukunft/Global/>
(Zugriff am 31. Jänner 2011)
- ZAMG (2011b): Portal Klimawandel, Klimamodellierung, Emissionsszenarien
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimaforschung/Klimamodellierung/Emissionsszenarien/> (Zugriff am 2. Februar 2011)
- ZAMG (2011c): Portal Klimawandel, Anthropogene Treibhausgase. Der zusätzliche Treibhauseffekt
http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimasystem/Anthropogene_Treibhausgase/
(Zugriff am 8. Februar 2011)
- ZAMG (2011d): Portal Klimawandel, Klimafolgen Gebirgsgletscher.
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimafolgen/Gebirgsgletscher/?ts=1297785001>
(Zugriff am 15. Februar 2011)

- ZAMG (2011e): Portal Klimawandel, Klimafolgen Meereis
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimafolgen/Meereis/>
(Zugriff am 16. Februar 2011)
- ZAMG (2011f): Portal Klimawandel, Klimafolgen Schnee
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimafolgen/Schnee/>
(Zugriff am 17. Februar 2011)
- ZAMG (2011g): Portal Klimawandel, Klimafolgen Permafrost
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimafolgen/Permafrost/?ts=1297938061>
(Zugriff am 17. Februar 2011)
- ZAMG (2011h): Portal Klimawandel, Klimafolgen Eisschilde
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimafolgen/Eisschilde>
(Zugriff am 22. Februar 2011)
- ZAMG (2011i): Portal Klimawandel, Klimafolgen Meeresspiegel
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimafolgen/Meeresspiegel>
(Zugriff am 23. Februar 2011)
- ZAMG (2011j): Portal Klimawandel, Klimazukunft. Extremwerte
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimazukunft/Extremwerte/?ts=1299570901>
(Zugriff am 8. März 2011)
- ZAMG (2011k): ZAMG-Stellungnahme zum Klimawandel im November 2010.
http://www.zamg.ac.at/docs/aktuell/ZAMG-Klimastatement_2010.pdf
(Zugriff am 4. April 2011)
- ZAMG (2011l): Portal Klimawandel, Klimavergangenheit. Aktuelle Entwicklungen. Starkniederschlag.
http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimavergangenheit/Aktuelle_Entwicklungen/Starkniederschlag/ (Zugriff am 13. Mai 2011)
- ZAMG (2011m): Portal Klimawandel, Klimavergangenheit. Aktuelle Entwicklungen. Lufttemperatur.
http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimavergangenheit/Aktuelle_Entwicklungen/Lufttemperatur/?ts=1317194281 (Zugriff am 28. September 2011)
- ZAMG (2011n): Portal Klimawandel, Klimavergangenheit. Stürme. Der Mythos der stürmischen Gegenwart.
http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimavergangenheit/Aktuelle_Entwicklungen/Stuerme/?ts=1315313821 (Zugriff am 6. September 2011)
- ZAMG (2011o): Portal Klimawandel, Klimavergangenheit, Aktuelle Entwicklungen, Hitze
http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimavergangenheit/Aktuelle_Entwicklungen/Hitze/?ts=1315553701 (Zugriff am 9. September 2011)
- ZAMG (2011p): Portal Klimawandel, Klimazukunft, Alpenraum
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimazukunft/Alpenraum/?ts=1317644161>
(Zugriff am 3. Oktober 2011)

- ZAMG (2011q): Phänologie
http://zacost.zamg.ac.at/phaeno_portal/informationen.html (Zugriff am 4. August 2011)
- ZAMG (2011r): ZAMG-Studie: Wasserkraft im Klimawandel
http://www.zamg.ac.at/aktuell/index.php?seite=6&artikel=ZAMG_2011-06-30GMT08:07
(Zugriff am 8. November 2011)
- ZAMG (2011s): Portal Klimawandel, Klimafolgen Wasserwirtschaft
<http://www.zamg.ac.at/klima/Klimawandel/Klimafolgen/Wasserwirtschaft/>
(Zugriff am 8. November 2011)
- ZAMG (2011t): Waldbrandrekord für November
http://www.zamg.ac.at/aktuell/index.php?seite=1&artikel=ZAMG_2011-11-29GMT13:48
(Zugriff am 30. November 2011)
- Zopp, Martin (2007): Neue Wege für die obere Salzach. In Land & Raum 2/2007. S19-21.

Abbildungsverzeichnis

Klimasystem und Klimawandel global

Abbildung 1 :	Die Teilsysteme des Klimasystems	8
Abbildung 2 :	Lage der Kontinente zu unterschiedlichen Zeiten	14
Abbildung 3 :	Temperaturentwicklung in Wien seit 1775 und explosive Vulkaneruptionen	16
Abbildung 4 :	Veränderungen des CO ₂ -Gehalts der Atmosphäre in den letzten 600 Mio. Jahren der Erdgeschichte und damit verbundene Klimaveränderungen	17
Abbildung 5 :	Eis-Albedo-Rückkopplung	19
Abbildung 6 :	NAO positive Phase	23
Abbildung 7 :	NAO negative Phase	24
Abbildung 8 :	Antarktische Temperaturen und Treibhausgehalte aus Eisbohrkernen der Ostantarktis	26
Abbildung 9 :	Größte Eisverbreitung in Europa	27
Abbildung 10 :	Maximale Gletscherausbreitung (im Alpenraum) während der letzten Eiszeit vor etwa 20.000 Jahren	27
Abbildung 11 :	Entwicklung der Kohlendioxid- und Methankonzentration von 1760 bis heute	30
Abbildung 12 :	Wasserdampfgehalt der Erdatmosphäre im Nordwinter	34
Abbildung 13 :	Komponenten des Strahlungsantriebs – Die Antreiber der globalen Erwärmung seit 1750 und ihr Nettoeffekt auf den Wärmehaushalt der Erde	35
Abbildung 14 :	Sulfatkalender für die Hintergrundbelastung von im Schnee und Eis der Hochalpen deponierten Sulfat	36
Abbildung 15 :	Modellierte globale Temperaturentwicklung des letzten Jahrhunderts	38
Abbildung 16 :	Combined land and marine sea surface temperature (SST) anomalies from HadSST2	39
Abbildung 17 :	Räumliche Verteilung der Abweichung von den Normalwerten 2000-2009	40
Abbildung 18 :	Änderung des Jahresmittels der bodennahen Lufttemperatur von 2020-2029 und 2090-2099 im Vergleich zur Periode 1980-1999 in Grad Celsius	42
Abbildung 19 :	Änderung des globalen Niederschlages von 2090-2099 im Vergleich zur Periode 1980-1999 in %, Winter (DJF), Sommer (JJA). Mittelwert aus dem Multi-Model-Ensemble für das Szenario A1B (IPCC 2007a)	44
Abbildung 20 :	Massenbilanz von Gebirgsgletschern weltweit	46
Abbildung 21 :	Ausdehnung des Meereises in der Arktis und in der Antarktis im Mittel der Periode 1979-2007	47
Abbildung 22 :	Eisbedeckung und Schneehöhe im Nordwinter	49

Abbildung 23 :	Eisbedeckung und Schneehöhe im Nordsommer	50
Abbildung 24 :	Gesamtfläche der Schmelze in Grönland seit 1978	53
Abbildung 25 :	Abbruch des Larsen-B-Eisschelfs im Jahr 2002	54
Abbildung 26 :	Rekonstruktion der Veränderungen des mittleren globalen Meeresspiegels während der letzten 600 Millionen Jahre	55
Abbildung 27 :	Golfstrom – Meeresströmung im Atlantik	58
Abbildung 28 :	Möglichkeit der Änderung der Häufigkeitsverteilung durch den Klimawandel	60

Klima und Klimawandel in Österreich und im Berggebiet

Abbildung 1 :	Die Klimazonen des Ostalpenraums	71
Abbildung 2 :	Abweichung der Jahresmittelwerte von drei eng gekoppelten Klimaelementen im Großraum Alpen	76
Abbildung 3 :	Abweichungen vom Temperaturmittel im Sommer- und Winterhalbjahr Großraum Alpen 1760-2007 bzw. 1760-2007/08	77
Abbildung 4 :	Abweichungen vom Temperaturmittel 1760-2009 (C°) in 5 Subregionen Österreichs	78
Abbildung 5 :	Abweichung des Niederschlags (%) im Großraum Alpen 1800-2009	79
Abbildung 6 :	Abweichungen vom Niederschlagsmittel 1800-2009 (%) in 4 Subregionen Österreichs	80
Abbildung 7 :	Abnehmender Schneeanteil am Gesamtniederschlag in Kitzbühel	81
Abbildung 8 :	Entwicklung der jährlichen Anzahl der heißen Nächte für Bregenz, Innsbruck und Wien	83
Abbildung 9 :	Index der Häufigkeit von starken Stürmen über Nordwest-, Nord- und Mitteleuropa 1880/81 bis 2001/05	84
Abbildung 10 :	Mögliche zukünftige Änderung der Temperatur 2030-2050 in Europa im Vergleich zu heute (1961-2000) im Winter (DJF), Frühling (MAM), Sommer (JJA) und Herbst (SON). (ENSEMBLES 2010)	88
Abbildung 11 :	Änderung der Lufttemperatur im Jahresmittel, Sommer, Winter von 2041-2070 im Alpenraum (bezogen auf 1961-1990) aus regionalen Klimamodellierungsdaten des Modells CCLM	89
Abbildung 12 :	Änderung des Niederschlags sowohl im Jahresmittel, als auch im Sommer und Winter von 2041-2070 bezogen auf das Mittel von 1961-1990 aus regionalen Klimamodellierungsdaten des Modells CCLM	91
Abbildung 13 :	Änderung der Schneedeckendauer (in%) im Jahresmittel von 2041-2070 bezogen auf das Mittel 1961-1990	92
Abbildung 14 :	Veränderung der Frosttage 2040-2050 gegenüber 1981-1990	93

Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und die biologische Vielfalt (Biodiversität)

Abbildung 1:	Gletscherwelt der Öztaler Alpen.	100
Abbildung 2:	Klimawandel und die Degradation von Naturraum, Ökosystem und Biodiversität	103
Abbildung 3:	Landnutzung Vorarlberg (L2 Corine Vbg)	106
Abbildung 4:	Großlandschaften Österreichs	107
Abbildung 5:	Gletscherschliff	116
Abbildung 6:	Reichenkarblockgletscher Ötztal	117
Abbildung 7:	Blick von der Franz-Josephs-Höhe auf die Pasterze	119
Abbildung 8:	Eishöhle Vernagtferner	120
Abbildung 9:	Alpenblumen Tiroler Ötztal	121
Abbildung 10:	Gletscherbeobachtungsnetz des Alpenvereins	124
Abbildung 11:	Pasterze, Gletschermarke 2005	125
Abbildung 12:	Schneebedeckter Vernagtferner (Ötztal)	126
Abbildung 13:	Abschätzung zukünftiger Gletscherausdehnung anhand zweier Alpengletscher	127
Abbildung 14:	Sanierungsarbeiten Hoher Sonnblick	129
Abbildung 15:	Blattentfaltung Europäische Lärche	130
Abbildung 16:	Verlauf des Eintrittstermins von Frühlingsblühern in alpinen Gebieten Österreichs, Sloweniens und der Schweiz seit 1951, Abweichung vom Mittel	131
Abbildung 17:	Thermische Vegetationsperiode in Österreich 1961-2006 Regressionsberechnung . .	132
Abbildung 18:	Ökosystemfolgen (des Klimawandels)	133
Abbildung 19:	wurde entfernt	
Abbildung 20:	Rückgang der Hochmoortypen im Zuge des Klimawandels	139
Abbildung 21:	Moor im Schladminger Untertal	140
Abbildung 22:	Beispiele für Anpassungsmaßnahmen im Bereich Ökosysteme, Naturhaushalt, Biodiversität	147

Sektoranalyse Forstwirtschaft

Abbildung 1:	Höhenstufenschema der Vegetation am Beispiel der Nördlichen Randalpen	151
Abbildung 2:	Waldentwicklungsplan – Funktionsflächen (Schutzwald-Waldentwicklungsplan) . . .	153

Abbildung 3 :	Waldflächenzunahme (ÖWI 2007/09)	154
Abbildung 4 :	Die natürlichen Waldgesellschaften und die Natürlichkeit der aktuellen Baumartenzusammensetzung in 1.000 ha	155
Abbildung 5 :	Baumartenverteilung in Flächenprozenten	156
Abbildung 6 :	Schadholzmengen – Zeitreihe	160
Abbildung 7 :	Klimawandel in der Forstwirtschaft	172
Abbildung 8 :	Forstwirtschaft und Klimawandel und die Einflussfaktoren auf den Wald, die Forstwirtschaft im Berggebiet	175
Abbildung 9 :	Veränderung der Standortseignung von Baumarten durch den Klimawandel	178
Abbildung 10 :	Relative Veränderung wichtiger potenziell natürlicher Waldtypen unter einem Klimaän- derungsszenario	179
Abbildung 11 :	Buche: Veränderung von Stress im Klimawandel	180
Abbildung 12 :	Fichte: Veränderung von Stress im Klimawandel	182
Abbildung 13 :	Fichte: Veränderung von Stress im Klimawandel unter Berücksichtigung von Störungen durch Borkenkäfer	182
Abbildung 14 :	Waldschäden durch Windwurf	184
Abbildung 15 :	Beispiele für Anpassungsmaßnahmen des Forstsektors	191

Sektoranalyse Berglandwirtschaft

Abbildung 1:	Räumliche Verteilung des österreichischen Grünlandes	195
Abbildung 2 :	Grünlandbetriebe in Österreich	197
Abbildung 3 :	Wichtige Faktoren der Photosynthese	199
Abbildung 4 :	Wasserverfügbarkeit Grünland	203
Abbildung 5 :	Klimawandel und die Einflussfaktoren auf die Berglandwirtschaft	207
Abbildung 6 :	Ertragsänderung - Relative Änderungen des Jahresbruttoertrages im Grünland in der Steiermark	208
Abbildung 7 :	Septemberschnee auf der Alm	211
Abbildung 8 :	Die von Engerlingsschäden betroffenen Bezirke im Jahr 2003	216
Abbildung 9 :	Beispiele für Anpassungsmaßnahmen des Sektors Berglandwirtschaft	221

Sektoranalyse Tourismus

Abbildung 1:	Nächtigungen im Sommer- und Wintertourismus seit 1959	227
--------------	---	-----

Abbildung 2 :	Nächtigungen 2009 insgesamt und Vergleich Nächtigungen insgesamt in NUTS3-Regionen 1999-2009	231
Abbildung 3 :	Die wichtigsten Tourismusgemeinden Österreichs, Winter 2008/09	232
Abbildung 4 :	Die wichtigsten Tourismusgemeinden Österreichs, Sommer 2009	233
Abbildung 5 :	Klimawandel und die Einflussfaktoren auf den alpinen Tourismus	237
Abbildung 6 :	Sensitivität und Wirkung des Klimawandels auf die Segmente des Sommertourismus in Österreich	242
Abbildung 7 :	Künstliche Beschneigung (Bürgeralm/Mariazell)	245
Abbildung 8 :	Wasserreservoir Bürgeralm/Mariazell	247
Abbildung 9 :	Beispiele für Anpassungsmaßnahmen des Tourismussektors	255

Sonstige Effekte

Abbildung 1:	Hochwasser	259
Abbildung 2 :	wurde entfernt	
Abbildung 3 :	Rutschung	267
Abbildung 4 :	Steinschlag	268
Abbildung 5 :	Lawinenabgang	269
Abbildung 6 :	Waldbrand Vorderes Jamtal (Galtür) November 2011	270
Abbildung 7 :	Lawinenschutz Galtür	276
Abbildung 8 :	Niederwasser an der Donau	282

Tabellenverzeichnis

Klimasystem und Klimawandel global

Tabelle 1:	Natürliche Treibhausgase	12
Tabelle 2:	Die Albedo (lat. Weißheit) einiger Oberflächenstrukturen	19
Tabelle 3:	Die global zehn wärmsten Jahre	41
Tabelle 4:	Globale Eisschilder	52

Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und die biologische Vielfalt (Biodiversität)

Tabelle 1:	Landnutzung Berggebiet – Österreich 2006	106
Tabelle 2:	Höhen- und Vegetationsstufe des Hochgebirges (Ostalpen)	115
Tabelle 3:	Rangreihe der größten österreichischen Gletscher (1998)	119
Tabelle 4:	Längenveränderung der gemessenen Gletscherenden 2009/10	123
Tabelle 5:	Auswirkungen des Klimawandels auf Ökosysteme, Naturhaushalt und biologische Vielfalt im Berggebiet (Zusammenfassung)	143
Tabelle 6:	Anpassungsmaßnahmen Ökosysteme, Naturhaushalt, biologische Vielfalt	148

Sektoranalyse Forstwirtschaft

Tabelle 1:	Höhenstufen der Ostalpen	151
Tabelle 2:	Waldgesellschaften im Berggebiet	155
Tabelle 3:	Auswirkungen des Klimawandels auf die Forstwirtschaft (Zusammenfassung)	187
Tabelle 4:	Beispiele für Anpassungsmaßnahmen der Forstwirtschaft im Berggebiet	192

Sektoranalyse Berglandwirtschaft

Tabelle 1:	Auswirkungen des Klimawandels auf die Berglandwirtschaft (Zusammenfassung)	218
Tabelle 2:	Anpassungsmaßnahmen Berglandwirtschaft	221

Sektoranalyse Tourismus

Tabelle 1:	Eckdaten Tourismus in Österreich	225
Tabelle 2:	Aufstiegshilfen im österreichischen Tourismus	228
Tabelle 3:	Anteil der schneesicheren Schiregionen in Österreich als Folge des Klimawandels	244
Tabelle 4:	Auswirkungen des Klimawandels auf den Tourismus/Alpinismus im Berggebiet (Zusammenfassung)	251
Tabelle 5:	Anpassungsmaßnahmen Tourismus	256

Sonstige Effekte

Tabelle 1:	Änderungen des Naturgefahrenpotentials durch den Klimawandel im Alpenraum	277
Tabelle 2:	Auswirkungen des Klimawandels auf wichtige Bereiche und Sektoren im Berggebiet (Zusammenfassung)	285
Tabelle 3:	Anpassungsmaßnahmen für wichtige Bereiche und Sektoren im Berggebiet	286

Oliver Tamme

Klimawandel im österreichischen Berggebiet

Ursachen, Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen

Der Klimawandel ist die Herausforderung des 21. Jahrhunderts. Immer deutlicher werden die Auswirkungen und Gefahren der globalen Klimaerwärmung wie Verschiebung der Klimazonen, Gletscherrückgang oder Häufung von Wetterextremen. Der Alpenraum und das Berggebiet zählen dabei zu den am meisten verwundbaren Regionen. Die starke Betroffenheit erklärt sich durch die vertikale Höhengliederung mit ihren verschiedenen Klimazonen, den fragilen Ökosystemen mit ihren zahlreichen kälteliebenden, endemischen Arten und der Verbreitung von Gletschern und Permafrost. Letzteres wirkt sich (noch) stabilisierend auf die unteren Höhenstufen – den alpinen Dauersiedlungsraum – aus. Und nicht zuletzt liefert das Berggebiet auch viele natürliche Ressourcen (Wasser, Boden, Luft) und damit verbundene Ökosystemleistungen. Aber auch günstige Effekte des Klimawandels sind unbestreitbar: Höhere Temperaturen mildern das raue alpine Klima, verlängern die Vegetationsdauer und verbessern ganz allgemein die Lebensbedingungen im Berggebiet.

Der Forschungsbericht gibt einen Überblick über den Klimawandel im Alpenraum bzw. dem Berggebiet, seine Ursachen, Auswirkungen und Anpassungsmaßnahmen. Besonders berücksichtigt werden Alpine Ökosysteme, Bergland- und Forstwirtschaft, Tourismus, Verkehrsinfrastruktur sowie Wasser- und Energiewirtschaft. Es erfolgt eine Analyse günstiger und ungünstiger Auswirkungen und schließt mit einem Überblick von beispielhaften Anpassungsmaßnahmen. Die Klimaerwärmung stellt den Alpenraum als Gebirgsraum vor enorme Anforderungen: Klimaschutzmaßnahmen in Form der Verringerung des Verbrauchs fossiler Brennstoffe der im Berggebiet vertretenen Sektoren (Mitigation) sind ebenso notwendig wie vorbeugende Anpassungsmaßnahmen (Adaptation) an lokale und regionale Auswirkungen.

Medieninhaber (Verleger) und Herausgeber
Bundesanstalt für Bergbauernfragen

A-1030 Wien, Marxergasse 2
<http://www.berggebiete.at>

Tel.: +43/1/504 88 69 - 0; Fax: +43/1/504 88 69 – 39
office@berggebiete.at

Layout: R. Neissl, M. Hager
Druck: BMLVS - Heeresdruckerei
ISBN: 978-3-85311-105-5

