



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Der Klimawandel - Auswirkungen und
Zukunftsperspektiven für den Wintersport

Verfasser

Boris Matejowsky

angestrebter akademischer Grad

Magister der Naturwissenschaften (rer. nat.)

Wien, im Oktober 2008

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 482/456

Studienrichtung lt. Studienblatt: LA Leibeserziehung, LA Geographie u. Wirtschaftskunde

Betreuer: Univ.-Prof. Mag. Dr. Otmar Weiß

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	I
Abstract.....	II
1 Einleitung.....	1
1.1 Aufbau der Arbeit.....	2
2 Begriffsbestimmung.....	3
2.1 Klima.....	3
2.2 Wintersport.....	6
2.3 Wintertourismus.....	7
3 Der globale Klimawandel.....	9
3.1 Natürliche Ursachen.....	9
3.1.1 Schwankungen der Erdbahnelemente.....	9
3.1.2 Schwankungen der Sonnenaktivität.....	10
3.1.3 Treibhauseffekt.....	12
3.1.4 Explosive Vulkaneruptionen.....	13
3.1.5 Atmosphärische Zirkulation.....	15
3.1.6 Ozeanische Oszillation.....	17
3.1.6.1 El Niño – Phänomen.....	18
3.2 Anthropogen bedingte Klimaänderungen.....	19
3.2.1 Anthropogener Treibhauseffekt.....	22
4 Zukunftsprognosen mittels globaler Klimamodelle.....	29
4.1 Zukunftsszenarien des IPCC.....	32
5 Der Klimawandel im Alpenraum.....	38
5.1 Historischer Rückblick auf den Alpenraum bezüglich Temperatur und Niederschlag.....	40
5.2 Klimaveränderungen im Alpenraum im 19. und 20. Jahrhundert.....	43
5.2.1 Klimatische Verhältnisse des 19. Jahrhundert im Alpenraum.....	43
5.2.2 Klimatische Verhältnisse des 20. Jahrhundert im Alpenraum.....	44

6 Die zukünftige Entwicklung des Klimas im Alpenraum.....	46
6.1 Klimaänderungsszenarien für den Alpenraum.....	47
6.1.1 Temperatur.....	49
6.1.2 Niederschlag.....	49
6.2. Klimaänderungsszenarien für den Alpenraum in Hinblick auf die Nordatlantische Oszillation.....	50
7 Mögliche Folgen des Klimawandels im Alpenraum.....	54
7.1 Auswirkungen auf die Vegetation.....	55
7.2 Abschmelzen von Gletschern.....	56
7.2.1 Auftauen von Permafrost.....	62
8 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wintersport.....	63
8.1 Exkurs: Bedeutung des Wintertourismus für die österreichische Wirtschaft.....	63
8.1.1 Beginn des Wintertourismus in den Alpen.....	63
8.1.2 Entwicklung der Nächtigungen in den Winterhalbjahren 1970 bis 2007.....	64
8.1.3 Abhängigkeit der österreichischen Wirtschaft am Wintertourismus....	66
8.2 Wetter- bzw. Klimaabhängigkeit im Wintersport.....	67
8.2.1 Grundlegende Angebotsfaktoren im Wintersport.....	68
8.2.2 Der Begriff „Schneesicherheit“.....	69
8.2.3 Die 100 - Tage - Regel.....	71
8.2.4 Die erweiterte Form der 100-Tage-Regel.....	72
8.3 Studien bezüglich des Wintertourismus in der Schweiz und in Österreich....	73
8.3.1 Untersuchungen bezüglich des Wintertourismus aus der Schweiz....	73
8.3.2 Untersuchungen bezüglich des Wintertourismus aus Österreich.....	76
8.4 Synthese der Untersuchungen.....	78
8.5 Auswirkungen auf die Skibranche.....	79
9 Zukunftsperspektiven für den Wintersport.....	80
9.1 Strategien zur Sicherung des Skisports.....	80
9.1.1 Pistenplanung.....	81
9.1.2 Bodenunabhängige Aufstiegshilfen.....	82

9.1.3 Erschließung neuer, höher gelegener Regionen für den Wintersport.....	83
9.1.4 Kunstschnee das Allheilmittel?.....	85
9.2 Indoor-Skilauf.....	93
9.3 Zusammenschlüsse zu großen Skiregionen.....	95
9. 4 Gletscherskilauf.....	96
10 Zusammenfassung.....	198
Literaturverzeichnis.....	101

Abstract

Der weltweite Klimawandel gilt heute in der Wissenschaft als unbestritten. Seit vielen Jahren werden laufend höhere Temperaturen auf der Erdoberfläche gemessen. Hauptursache scheint die Anreicherung von Treibhausgasen in der Erdatmosphäre zu sein, die der Mensch in Form von Kohlendioxid freisetzt. Daneben finden sich auch natürliche klimabeeinflussende Faktoren. Mit Hilfe von Klimamodellen werden mögliche Konsequenzen für die Erde transparent gemacht. Den größten Input diesbezüglich liefert die Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Im Alpenraum äußert sich der Klimawandel in Form von schneearmen Wintern und massiven Gletscherrückzug. Der Wintertourismus ist einseitig auf den Skisport ausgerichtet und deshalb extrem schneeabhängig. Auch für die gesamte Skibranche ist Schneemangel mit massiven Folgen verbunden. Die Klimaänderung (globale Erwärmung) stellt eine neue Herausforderung für den gesamten Wintersport dar. Das Ansteigen der Höhengrenze der Schneesicherheit ist mit tiefgreifenden Folgen in allen Bereichen des Wintersports verbunden. Wenig rentable Skigebiete werden aus dem Markt ausscheiden. Vielerorts wird der Klimaänderung jedoch Großteils mit Vorwärtsgerichteten Strategien begegnet. Dies verstärkt aber die Gefahr, dass der notwendige Strukturwandel der Skigebiete in ruinöser Konkurrenz endet.

Abstract

Scientists confirm that global climate change is already taking place and having discernable impacts. Since years the global average temperature has increased. Atmospheric indicators show that the human-caused increasing concentration of hothouse gas in the atmosphere is the reason for the global warming. Beside that there are as well natural reasons that can affect the global climate. With the help of climate models, future consequences for the earth can be deduced. Relating to this the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPPC) provides the most intense input.

The result of the climate change in the Alps are warmer winters with less snow and the retreat of glaciers. Winter tourism depends in a very strong way on skiing and therefore on snow. A lack of snow and the rise of the snow level effects not only winter tourism, but the whole ski industry. Global warming is the new challenge for winter sport in general. Less profitable skiing regions may drop out of the market. In many places future oriented strategies against climate change are on top of the agenda.

1 Einleitung

Der globale Klimawandel gehört heute nicht zu unrecht zu einem in aller Öffentlichkeit breit diskutierten Thema. Die Temperatur ist im letzten Jahrhundert im globalen Mittel um rund 0,6°C angestiegen. Dieser Anstieg ist der rascheste der letzten 1000 Jahre.

Der ungewöhnlich milde Winter in der Saison 2006/07 und die Klimaberichte des Weltklimarates (IPCC) haben den Klimawandel und seine vermutlichen Auswirkungen zu Top-Themen der Medien gemacht. Nahezu täglich finden sich in den Printmedien Artikel zum Thema Klimawandel.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind in den Alpen deutlich erkennbar. Das zeigt beispielsweise der Rückgang der Tage mit Schneebedeckung in den Skigebieten der Alpen und Pyrenäen innerhalb der letzten Jahre. Aber auch der Gletscherrückzug ist ein deutliches Zeichen der Klimaerwärmung.

Die größte Herausforderung für die Tourismusbranche wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten die globale Erwärmung sein. Schneesicherheit ist eine wichtige Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg des Skitourismus. Schneemangel als Folge zu hoher Temperaturen stellt die Wintertourismusdestinationen vor große Herausforderungen. Vor allem Österreich ist vom Wintertourismus abhängig. Dieser ist einseitig auf den Skisport ausgerichtet und deshalb extrem schneeabhängig.

Obwohl die Voraussagen, in welcher Intensität die Schneedeckendauer in den kommenden Jahrzehnten abnehmen wird, unterschiedlich sind, so sind sich dennoch alle Wissenschaftler einig, dass mit einer Verkürzung der Wintersaison um rund einen Monat zu rechnen ist. Die Zukunftsperspektiven für den Wintersport sind nicht gerade berauschend.

1.1 Aufbau der Arbeit

Die Diplomarbeit ist in neun Großkapitel unterteilt. Das erste Kapitel soll eine grundlegende begriffliche Einführung in die Themenkomplexe Klima, Wintersport und Wintertourismus geben. Außerdem geht es darum, Wetter und Klima als wichtige Komponenten des Wintersports bzw. Wintertourismus zu positionieren.

Kapitel drei beschäftigt sich mit dem globalen Klimawandel. Hier werden natürliche Ursachen den anthropogenen Ursachen gegenübergestellt, um einen groben Überblick über klimawirksame Vorgänge zu schaffen.

In Kapitel vier werden Zukunftsszenarien durch globale Klimamodelle vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt bei den globalen Klimamodellen des IPCC. Das IPCC versucht die Verbindung zwischen Wissenschaft und Politik herzustellen, um damit den aktuellen Forschungsstand zur Klimaproblematik in gebündelter Form der Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Der Klimawandel im Alpenraum wird in Kapitel fünf näher beleuchtet. Anhand eines historischen Rückblicks wird versucht, die heutige Klimasituation der Alpen transparent zu machen.

Der Frage nach der zukünftigen Entwicklung des Klimas im Alpenraum wird in Kapitel sechs auf den Grund gegangen. Klimaänderungsszenarien sollen auch hier dabei helfen, das komplexe Zusammenwirken klimawirksamer Einflussfaktoren in anschaulicher Form näher zu bringen.

Die möglichen Folgen des Klimawandels im Alpenraum werden in Kapitel sieben dargestellt. Besondere Aufmerksamkeit wird dem Gletscherrückzug in den Alpen zuteil. Die durchschnittlich gestiegenen Sommertemperaturen und eine abnehmende Frequenz sommerlicher Schneefälle führen in den europäischen Alpen zu einem drastischen Gletscherschwund.

Die Vielfältigkeit der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wintersport wird in Kapitel acht behandelt. Ein Exkurs über die wirtschaftliche Abhängigkeit Österreichs vom Wintersport soll den Ernst der Lage verdeutlichen.

Im neunten Kapitel wird schließlich auf Zukunftsperspektiven des Wintersports bzw. Wintertourismus hingewiesen. Die Entscheidung, inwieweit diese Anwendung finden bzw. auch tatsächlich als Perspektive angesehen werden können, bleibt dem Leser überlassen.

Den Abschluss der Diplomarbeit bildet schließlich die Schlussbetrachtung, in der nochmals die wichtigsten Aussagen zusammengefasst werden.

2 Begriffsbestimmung

2.1 Klima

Das Klima ist ein hochaktuelles und interdisziplinäres Objekt der Forschung und Wissenschaft. Seine Veränderungen reichen bis in die Entstehungszeit der Erde zurück.

Der Begriff Klima entstammt der griechischen Sprache, tritt bereits bei Paramenides von Elea (um 500 v. Chr.) sowie Hippokrates (460 – 375 v. Chr.) auf und bedeutet „ich neige“ (Schönwiese, 2003, S.11).

Gemeint ist hierbei die Sonne, deren Einstrahlung auf die Erdoberfläche einem bestimmten, von der geographischen Breite abhängigen Neigungswinkel unterliegt. Die damalige Erfahrung ließ bereits erkennen, dass je steiler dieser Neigungswinkel ist, d.h. je geringer er vom Zenitstand der Sonne abweicht, desto wärmer ist die Erdoberfläche sowie die bodennahe Atmosphäre.

Zur Definition des Begriffs Klima geht man zunächst von einem anderen geläufigen Begriff aus, nämlich dem des Wetters.

Unter Wetter versteht man den aktuellen Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort (Häckel, 1999, S. 293). Wesentlich hierbei ist die Kombination atmosphärischer Elemente und die sich dabei abspielenden Vorgänge in der Atmosphäre.

„Die wetterwirksamen Austauschprozesse finden dabei alle in der Troposphäre statt“ (Leser et al., 1997, S. 994).

Im Laufe der Zeit können sich an einem Ort sehr unterschiedliche Wettersituationen einstellen. In Mitteleuropa reicht das Spektrum von der klirrenden Kälte sternenklarer Winternächte (- 37,8° C am 12.2. 1929 in Hüll/Niederbayern) bis zur dumpfen Hitze heißer Sommernachmittage (40,3° C am 17.7. 1983 in Gärmersdorf/Oberpfalz) (Häckel, 1999, S. 293).

Mit Hilfe des Wetters lassen sich zwar Einzelereignisse dokumentieren, jedoch lassen sich keine Aussagen über die für einen Ort typischen meteorologischen Bedingungen machen. Durch langjährige Wetterbeobachtungen und mit Hilfe statistischer Verfahren versucht man die für einen Ort charakteristischen Atmosphärenzustände zu errechnen. Dazu gehören vor allem Mittelwerte und deren Standardabweichungen, absolute und mittlere Maximum- und Minimumwerte, Schwellenwerte, Kälte- und Wärmesummen sowie mittlere und extreme Tages und Jahresabläufe. Das Ergebnis dieser Analysen wird Klima genannt.

Wie lauten nun die allgemeingültigen Klimadefinitionen?

Eine eindeutige Antwort auf diese Frage kann nicht gegeben werden. Immer wieder tauchen neue Formulierungen auf, was ein breites Spektrum an unterschiedlichen Klimadefinitionen entstehen ließ. Darüber hinaus hängen „moderne“ Klimadefinitionen auch von den jeweiligen fachlichen Aspekten ab.

Den Versuch einer allgemein gültigen Formulierung macht Schönwiese (2003):

„Das terrestrische Klima ist für einen Standort, eine definierbare Region oder ggf. auch globale statistische Beschreibung der relevanten Klimaelemente (a), die für eine nicht zu kleine zeitliche Größenordnung (b) die Gegebenheiten und Variationen der Erdatmosphäre (c) hinreichend ausführlich charakterisiert. Ursächlich ist das Klima eine Folge der physikochemischen Prozesse (d) und Wechselwirkungen im Klimasystem sowie der externen Einflüsse auf dieses System“ (S.56).

- a) Die analytische Betrachtungsweise ist charakteristisch für die Klimatologie, der diese Definition zuzuordnen ist. Zu Klimaelementen zählen nicht nur traditionelle Faktoren wie Temperatur, Feuchte, Niederschlag, Wind usw. sondern auch Strahlungsgrößen, Schadstoffkonzentrationen und vieles mehr (Schönwiese, 2003, S.56).
- b) In Zusammenhang mit „zeitlicher Größenordnung“ ist gemeint, dass sich atmosphärische Phänomene nach ihrer charakteristischen Zeit ordnen lassen. Darunter versteht man die mittlere Lebensdauer z.B. einer Wolke, Windböe oder Eiszeit (Schönwiese, 2003, S. 56).
- c) Sowohl aus historischen als auch aus paläoklimatologischen Gründen beschränkt sich die Betrachtung der Klimahistorie auf die bodennahe Luftschicht (Schönwiese, 2003, S. 56-57).
- d) Die physiochemischen Prozesse, die das Klima und seine Veränderungen beeinflussen, sind sehr vielfältig. Es lassen sich gesetzmäßige Ursache-Wirkung-Ketten mit viele Querverbindungen und Rückkoppelungen (sich selbst verstärkende bzw. abschwächende Mechanismen, positive bzw. negative Rückkoppelung genannt) festmachen. Darüber hinaus spielen auch zufallbedingte Faktoren eine Rolle (Schönwiese, 2003, S. 57).

Das Wörterbuch der Allgemeinen Geographie (Leser et al., 1997, S. 392) definiert das Klima wie folgt: „Die für einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsvorgänge während eines längeren Zeitraums in charakteristischer Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte.“

Um die Komplexität der Abgrenzung von Klima in definitorischer Hinsicht sowie die historische Entwicklung dieser Definitionen nochmals hervorzuheben, soll dieses Teilkapitel mit einer Auswahl von Klimadefinitionen aus Schönwiese (2003) abschließen:

„Antikes Griechenland: klino = ich neige; Definition von zunächst drei und später sieben breitenkreisparallelen Zonen mit unterschiedlichem mittlerem Einstrahlungswinkel der Sonne und daher unterschiedlichen Temperaturregimen“ (S. 58).

„A. von Humboldt (1817/1845): Der Ausdruck Klima bezeichnet in seinem allgemeinen Sinne alle Veränderungen in der Atmosphäre, die unsere Organe merklich affizieren: die Temperatur, die Feuchtigkeit, die Veränderungen des barometrischen Druckes, den ruhigen Luftzustand oder die Wirkung ungleichnamiger Winde, die Größe der elektrischen Spannung, die Reinheit der Atmosphäre oder ihr Vermengen mit mehr oder minder schädlichen gasförmigen Exhalationen, endlich den Grad habitueller Durchsichtigkeit und Heiterkeit des Himmels, welcher nicht bloß wichtig ist für die vermehrte Wärmestrahlung des Bodens, die organische Entwicklung der Gewächse und die Reifung der Früchte, sondern auch für die Gefühle und die ganze Seelenstimmung des Menschen“ (S. 58).

„J. von Hann (1883): Unter Klima verstehen wir die Gesamtheit der meteorologischen Erscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an irgend einer Stelle der Erdoberfläche kennzeichnen“ (S. 58).

„W. Köppen (1923): Unter Klima verstehen wir den mittleren Zustand und gewöhnlichen Verlauf der Witterung an einem gegebenen Ort. Eine doppelte ist es, die uns zum Begriff des Klimas führt, nämlich eine Zusammenfassung einerseits der einzelnen wechselnden Witterungen, andererseits der einzelnen meteorologischen Elemente zu einem Gesamtbilde“ (S. 58).

„H. H. Lamb (1972): „Klima ist die Gesamtheit der Wettererscheinungen eines Ortes im Jahresgang und im Laufe der Jahre. Es umfasst nicht nur solche Bedingungen, die als ‚durchschnittlich‘ oder ‚normal‘ bezeichnet werden können, sondern auch die Extreme und alle Variationen“ (S. 58).

„Weltmeteorologische Organisation (WMO, 1979): „Klima ist die Synthese des Wetters über ein Zeitintervall, das im wesentlichen lang genug ist, um die Festlegung der statischen Ensemble-Charakteristika (Mittelwerte, Varianzen, Wahrscheinlichkeiten extremer Ereignisse usw.) zu ermöglichen und das weitgehend unabhängig bezüglich irgendwelcher augenblicklicher Zustände ist“ (S. 58).

2.2 Wintersport

Das Universal Lexikon (Bertelsmann, 2003, S. 458) definiert Wintersport wie folgt:

„Wintersport, Sammelbezeichnung für alle auf Schnee u. Eis betriebenen Sportarten: Bobfahren, Curling, Eislaufen, Eisschießen, Eissegeln, Eishockey, Skisport u. Rodeln.“

In dieser Arbeit liegt das Hauptaugenmerk jedoch auf dem Skisport.

Spricht man vom Wintersport im Sinne von Skisport, so ist zu berücksichtigen, dass er, wie jede andere Sportart auch, nur in einem entsprechendem Umfeld existieren kann. Daraus folgt, dass der Begriff Wintersport zweierlei beinhaltet: 1) die Aktivitäten des Wintersports und 2) die technisch – institutionellen Rahmenbedingungen, welche seine Ausübung überhaupt erst ermöglichen (Eggers, 1993, S. 15).

Punkt zwei umfasst hierbei einerseits die Skilaufspezifischen Erfordernisse, wie das Vorhandensein von präparierten Pisten, Aufstiegshilfen, Langlaufloipen und selbstverständlich Schnee. Darüber hinaus gehören auf Grund der naturräumlichen Gebundenheit des Wintersports auch touristische Infrastruktureinrichtungen wie Zufahrtswege, Parkplätze, Übernachtungs-, Verpflegungs- und Einkaufsgelegenheiten etc. dazu.

2.3 Wintertourismus

Spricht man vom Wintersport, inkludiert das in gewisser Weise auch den Begriff Tourismus bzw. Wintertourismus. Der Wintertourismus setzt sich zum größten Teil aus dem Skitourismus zusammen.

Die UNO findet folgende Definition für den Begriff Tourist: „Ein Tourist ist eine Person, die sich für mindestens 24 Stunden in ein Land, das nicht dem Land entspricht, in dem sich diese Person gewöhnlich aufhält, begibt, ohne dort eine bezahlte Tätigkeit auszuüben“ (Leser et al., 1997, S. 896).

Der Skisport ist nach dem „Freizeit-Lexikon“ ein Sammelbegriff für verschiedene mit Skiern ausgeübte Sportarten. Darüber hinaus wird zwischen Leistungs- und Freizeitsport unterschieden und auf die Landschaft, die Landschaftsveränderungen durch den Skisport und die notwendige Infrastruktur eingegangen. Der Freizeitskisport wird dabei wie folgt definiert:

„Als Freizeitskisport hat sich der Skisport zu einem Massensport entwickelt, der jährlich Millionen von Skifreunden in die Wintersportgebiete, vor allem die Alpen und die höheren Lagen der Mittelgebirge, zieht“ (Freizeitlexikon, 1986, S. 281).

Der Sportbrockhaus definiert den Skisport ebenfalls als Wintersportart, die auf Skiern ausgeübt wird. Darüber hinaus wird zwischen alpinem und nordischem Skisport unterschieden. Neben dem alpinen und nordischen Skisport findet auch das Snowboarden Erwähnung. Das Snowboarden wird jedoch zum Skitourismus gezählt, wenn auch keine Ski im engeren Sinn Verwendung finden, sondern ein „Board“ für die Ausübung dieser Wintersportart vonnöten ist (Brockhaus Sport, 2007, S. 426-427).

Besonders in Österreich hat der alpine Skilauf eine übergeordnete Bedeutung. Im Zuge eines Forschungsprojektes aus dem Jahr 1998 unter der Leitung von Prof. Dr. Otmar Weiß vom Institut für Sportwissenschaften, wurden 1000 Österreicher ab dem Alter von 15 Jahren unter anderem nach der Sportausübung befragt. Der Skilauf lag als Nationalsportart an dritter Stelle jener Sportarten, die von den Österreichern am liebsten ausgeübt werden (Weiß, 1999, S.2).

Trotz der Bedeutsamkeit des Wintertourismus vor allem für die Alpenländer findet sich keine eindeutige Begriffsdeutung. Aus grammatikalischer Sicht ist der Begriff Wintertourismus eine Komposition zweier selbständiger Nomen: aus Winter und Tourismus.

Der erste Bestandteil, das Bestimmungswort (hier Winter), ist dem zweiten Teil, dem Grundwort (hier Tourismus), näher bestimmt. Weil das Bestimmungswort das Grundwort semantisch einschränkt und damit determiniert, ist Wintertourismus eine touristische Reise, die durchgeführt wird, um vor allem Sport im Winter zu treiben.

Doch was verstehen wir unter einer touristischen Reise?

Der Begriff Tourismus unterscheidet sich vom Begriff Reise in einem wesentlichen Punkt: In dem als Zirkel gedachten Tourismusbegriff ist die Wiederkehr implizit, bei der Reise jedoch ist sie unbestimmt (Dettling, 2005, S. 18).

Tourismus charakterisiert das zeitweilige Verlassen des Wohnorts für eine Reise im Sinne von „outbound“ und fasst als Oberbegriff alle Reisen unabhängig von ihren Zwecken und Zielen zusammen, die den zeitweiligen Aufenthalt an einem anderen

als dem Wohnort einschließen und bei denen die Rückfahrt ebenfalls Bestandteil der Reise ist (Mundt, 1998, S. 2-3).

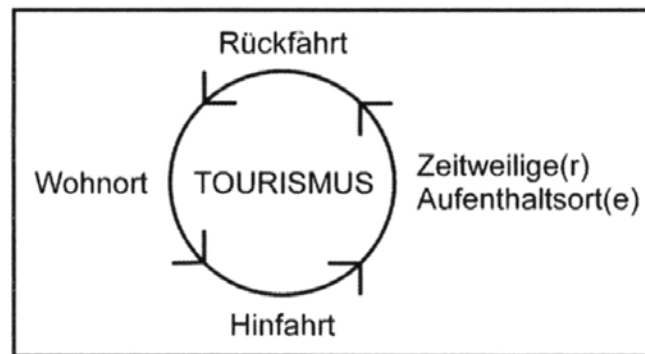


Abb. 1: Die Zirkelbewegung des Tourismus (Mundt, 1998, S. 2)

3 Der globale Klimawandel

3.1 Natürliche Ursachen

3.1.1 Schwankungen der Erdbahnelemente

In Zusammenhang mit den natürlichen Einflussfaktoren der Klimaschwankungen und Klimaänderungen sind zunächst die Einflüsse der Orbitalelemente zu beachten.

Die Sonneneinstrahlung auf die Erdoberfläche weist neben ihrem täglichen und jährlichen Gang auch einen säkularen Gang auf. Die Bahn der Erde um die Sonne ist keine fixe Ellipse (Milankovitch, 1930, S. 53).

„Die Anziehung, welche die übrigen Planeten auf die Erde und aufeinander ausüben, hat zur Folge, daß die Ebene dieser Bahn, die Lage und die Form der Bahnkurve langsamen ‚säkularen‘ Änderungen unterworfen sind“ (Milankovitch, 1930, S. 53).

Eine Zunahme der Ekliptikschiefe vermindert die jährliche Bestrahlung der äquatorialen Gegenden und vergrößert jene der polaren, d.h. sie vermindert die Gegensätze zwischen Äquator und den Polen. Nimmt man eine Schiefe von 54° an, würden diese Gegensätze zur Gänze verschwinden, d.h. die jährliche Bestrahlung der Pole wäre gleich derjenigen des Äquators (Milankovitch, 1930, S. 41). Eine

Abnahme der Ekliptikschiefe hat die entgegengesetzte Wirkung. Bei Verschwinden der Ekliptikschiefe blieben die beiden Pole während des ganzen Jahres von der Sonne unbestrahlt.

Die Änderungen der Ekliptikschiefe haben einen regelmäßigen oszillatorischen Charakter. Die durchschnittliche Periode der Oszillation beträgt rund 40.000 Jahre (Milankovitch, 1930, S. 41).

„Aus diesem Grunde erreichen einmal innerhalb dieser Zeitspanne, und zwar bei maximaler Ekliptikschiefe die geographischen Gegensätze auf beiden Hemisphären ihr Minimum und die jahreszeitlichen Gegensätze ihr Maximum; das entgegengesetzte wird eintreten, wenn die Schiefe der Ekliptik nach rund 20 Jahrtausenden auf ihr Minimum gesunken ist“ (Milankovitch, 1930, S. 41).

Auf Grund weiterer komplexer astronomischer Elemente erfolgen diese Erscheinungen jedoch nicht in regelmäßigen Abständen. So spielen die Exzentrizität der Erdbahn und die Länge des Perihels (sonnenächster Punkt), welche maßgeblichen Einfluss auf die jahreszeitlichen Gegensätze von nördlicher und südlicher Hemisphäre haben, eine wichtige Rolle (Milankovitch, 1930, S. 41).

3.1.2 Schwankungen der Sonnenaktivität

Die Sonne weist als treibende Kraft des Erdklimas ebenfalls zyklische Aktivitätsschwankungen auf. Etwa der 11 jährige Zyklus, der anhand der Sonnenflecken entdeckt wurde (Schönwiese, 2003, S. 321).

Sonnenflecken stellen relative Kältegebiete auf der Sonnenoberfläche dar. Diese Flecken erscheinen auf Grund des Temperaturkontrastes zur Umgebung dunkel. Ursache für die Abkühlung sind starke Magnetfelder, welche die Konvektion behindern (Schönwiese, 2003, S. 110-111).

Eine der bekanntesten langfristigen Variationen abnehmender Sonnenaktivität ist das „Maunder Minimum“ zwischen 1645 und 1715, ein Ereignis geringerer Sonnenfleckenaktivität, dass mit einer der kältesten Phase, der „Kleinen Eiszeit“,

zusammenfällt. Europa, Nordamerika und China hatten in dieser Periode viele kalte Winter zu verzeichnen (Geel van et al., 2002, S. 103).

Bei einer erhöhten Anzahl von Sonnenflecken wird mehr Energie freigegeben, weil dadurch die Chance größer ist, dass sich benachbarte, aber gegenläufig gepolte Magnetfeldlinien neu verbinden und mehr Energie in den Raum abgegeben wird. Es kommt zu einer stärkeren Strahlung Richtung Erde (<http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenfleck> [Zugriff am 14. Oktober 2008]).

Laut Schönwiese (1995, S. 125) ergaben Klimamodellberechnungen hingegen, dass Sonnenflecken die bodennahe Erdmitteltemperatur lediglich in der Größenordnung von wenigen zehntel Graden verändern können.

Bedeutenderen Einfluss auf das Klima hat die längerfristige Variation (80 bis 90 Jahre) der Sonnenaktivität. Aufzeichnungen aus anderen Teilen der Welt sind zwar nicht detailliert und ausführlich genug, um diese Aussage zu verallgemeinern, dennoch wird vermutet, dass eine kurzzeitige Expansion der Sonne, mit einer gleichzeitigen Verlangsamung ihrer Rotation, das „Maunder Minimum“ verursacht hat. Diese Annahme stützt sich allerdings auf keine Sonnenbeobachtungen (Wanner, 2000, S.15).

Ein weiteres Beispiel ist die Periode um 850 v. Chr. Wissenschaftler fanden in Nord - West - Europäischen Bodenproben Hinweise auf klimatische Abkühlung beider Hemisphären in diesem Zeitraum. Auf Grund ähnlichen Rückgangs der Sonnenenergie wie im „Maunder Minimum“, wechselte das relativ warme Klima der nördlichen Hemisphäre (Europa, Nordamerika, Japan) und jenes der südlichen Hemisphäre (Südamerika, Neuseeland) synchron zu kälteren und feuchteren Bedingungen. In den Tropen wandte sich das Klima zu trockeneren Bedingungen (Geel van et al., 2002, S. 105).

Aktuellen Studien zufolge zählt auch das Zusammenspiel zwischen Sonnenaktivität, kosmischer Strahlung, Erdmagnetfeld, irdischer Wolkenbildung und Erdoberflächentemperatur zu den klimabeeinflussenden Faktoren. Wanner (2000, S. 17) gibt jedoch zu bedenken, dass der Beitrag der Sonne als Antriebselement der

dekadischen Energiebilanzschwankungen nur in der Größenordnung von 30 Prozent liegen dürfte. Neue Experimente mit Wolkenkammern sollten in Zukunft darüber Aufschluss bringen.

3.1.3 Treibhauseffekt

Der natürliche Treibhauseffekt gehört zu den Strahlungsvorgängen im Klimasystem selbst. Bestimmte Gase der Atmosphäre besitzen die Eigenschaft die Wärmeausstrahlung der Erdoberfläche sowie der unteren Atmosphäre zum Teil zu absorbieren und zurückzuhalten. Der Name ist in Analogie zum echten Treibhaus geprägt worden, das wegen seiner Glasabdeckung und den dadurch unterbundenen Wärmeflüssen jedoch völlig unterschiedlich funktioniert als das atmosphärische Treibhaus, auch wenn in beiden Fällen eine Erwärmung die Folge ist.

Beim natürlichen atmosphärischen Treibhaus strahlt jede Materie in Abhängigkeit von ihrer Oberflächentemperatur elektromagnetische Energie ab. Diese Energie hat je nach Wellenlänge eine unterschiedliche Erscheinungsform. Gase können nur in bestimmten Wellenlängenbereichen Energie absorbieren und rückstrahlen (Schönwiese, 1995, S. 132).

Relativ gesehen ist die Schwächung der terrestrischen Ausstrahlung deutlich höher als die der solaren Einstrahlung, wie das bei einem effektiven Treibhaus auch sein muss. Hierfür ist in erster Linie H_2O verantwortlich. Daneben auch CH_4 , N_2O , O_3 sowie andere Gase (Schönwiese, 1995, S. 134).

Daraus folgt: Absorbiert ein Gas mehr im terrestrischen Bereich als im solaren Bereich, behindert es die solare Einstrahlung weniger als die terrestrische Ausstrahlung. Es handelt sich um ein klimawirksames Spurengas. Solche klimawirksamen Spurengase sind unter anderem H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 . Würde man einzelne oder alle diese Gase aus der Atmosphäre entfernen, würde die bodennahe Weltmitteltemperatur statt $+15^\circ \text{C}$ nur -18°C betragen (Schönwiese, 1995, S. 134).

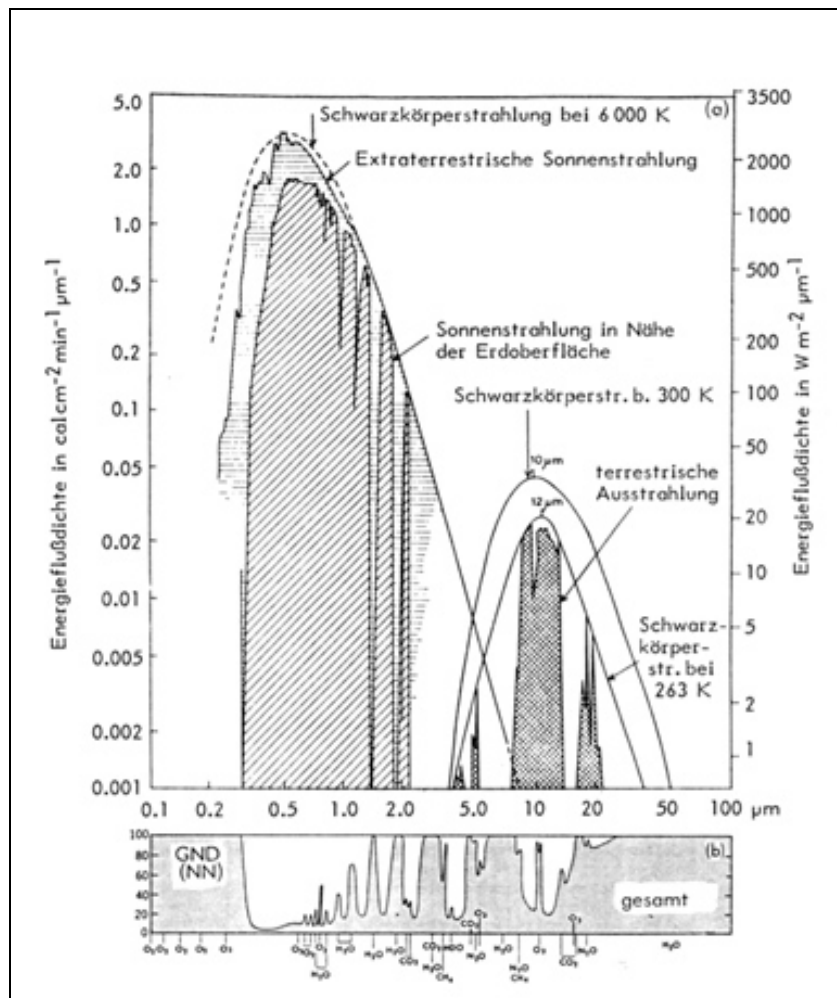


Abb. 2: Planck - Spektren der solaren Ein- und terrestrischen Ausstrahlung (Schönwiese, 1995, S. 133).

3.1.4 Explosive Vulkaneruptionen

Eine weitere natürliche Ursache von Klimaschwankungen und Klimaänderungen sind die Vulkane. Hierbei spielen vulkanische Aerosole, die bei Ausbruch in die Atmosphäre gelangen sowie bestimmte Gase, eine bedeutende Rolle. Diese absorbieren die kurzwellige Strahlung, was in höheren Atmosphärenschichten zu einer Temperaturzunahme führt. In Bodennähe kommt es hingegen zu einem Rückgang der Temperatur (Schönwiese, 2003, S. 319).

Aus klimatologischer Sicht am Bedeutendsten sind Sulfatpartikel (SO_4) die, nach entsprechender Vulkaneruption, aus schwefelhaltigen Gasen entstehen. Diese

Partikel absorbieren einen Teil der Sonneneinstrahlung. Für die untere Schicht der Atmosphäre geht dadurch ein Teil der Sonneneinstrahlung verloren und hat dort Abkühlungseffekte zur Folge (Schönwiese, 2003, S. 319).

Einflüsse von Vulkaneruptionen sind in der Regel über eine Zeitdimension von Monaten bis wenigen Jahren feststellbar und können zu erheblichen Klimaschwankungen führen. In den Mittleren Breiten hat dies kühlere Sommer und tendenziell mildere Winter zur Folge (Wanner et al., 2000, S. 18).

„So ist das Jahr 1816, ein Jahr nach dem Tambora-Ausbruch, der als gewaltigster der historischen Zeit gilt (mit Partikelwurf bis in die Mesosphäre), auch als das Jahr ohne Sommer in die Geschichte eingegangen“ (Schönwiese, 1995, S. 136).

Je nachdem, wo der Ausbruch stattfindet, zeigen sich globale oder hemisphärische Auswirkungen. Neben thermischen und hygri-schen Konsequenzen zeigen sich im atlantisch-europäischen Raum auch Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation (Luterbacher, 2000, S. 98).

Eine Studie nach Briffa et al. (1998, S. 453), in der der Einfluss vulkanischen Forcings auf die Sommertemperaturen der letzten 600 Jahre untersucht wurde, zeigt auf, dass der Ausbruch des Vulkans Kuwae (Südwest-Pazifik) im Jahr 1452 zu extrem kalten und feuchten Verhältnissen im Sommer des Jahres 1453 führte. Die Studie zeigt weiters, dass nicht nur ein einzelnes großes Ereignis, sondern die Häufung mehrerer Vulkanausbrüche zu einer Reduktion der nordhemisphärischen Temperatur führen kann.

Um 1580 leitete einer der stärksten Ausbrüche der vergangen 600 Jahre (Billy Mitchell, Südwest Pazifik) zu kühlfeuchten Sommern auf der Nordhemisphäre über. Aber auch die anderen Jahreszeiten in weiten Teilen Europas waren deutlich zu kühl (Luterbacher, 2000, S. 96-97).

Nach Briffa et al. (1998, S. 451) waren Vulkanausbrüche während des 17. Jahrhunderts häufiger als in den Jahren zwischen 1400 – 2000. Mindestens sechs klimatisch relevante Vulkanausbrüche, zum Teil mit globalem Einfluss, fanden im 17.

Jahrhundert statt. So geht die höchste Sommertemperaturdepression der letzten 1000 Jahre auf das Jahr 1601 zurück. Die Temperaturen auf der Nordhemisphäre waren plötzlich um rund $0,8^{\circ}\text{C}$ tiefer als heute. Zurückzuführen ist dieses Ereignis auf den Ausbruch des Huaynaputina (Peru) im Februar des Jahre 1600.

3.1.5 Atmosphärische Zirkulation

Alle bisher beschriebenen klimabeeinflussenden Faktoren betrafen direkt oder indirekt die Sonneneinstrahlung. Auch bei der atmosphärischen Zirkulation spielt die Sonne keine unwesentliche Rolle.

Die Sonneneinstrahlung bzw. die Strahlungsbilanz ist regional und jahreszeitlich unterschiedlich. Gerade diese Unterschiede sind der Motor für die atmosphärisch-ozeanische Zirkulation. Strahlung- bzw. Temperaturänderungen treten erst über die Mittlerrolle der Zirkulation in Erscheinung (Schönwiese, 1995, S. 146).

Um diesen komplexen Sachverhalt verständlich darzustellen, sollen zunächst die großräumigen Gegebenheiten der atmosphärischen Zirkulation in groben Zügen dargestellt werden:

In den Tropen wird die Erdoberfläche auf Grund des steilen Einfallwinkels der Sonnenstrahlen stark erwärmt. Die erwärmte Luft steigt, da sie eine geringere Dichte als kalte Luft aufweist, nach oben und divergiert dabei. Die Folge ist ein Tiefdruckgebiet, auch äquatoriale Tiefdruckrinne genannt. Darüber hinaus bildet aufsteigende Luft durch Abkühlung Wolken und Niederschlag. In der oberen Troposphäre bewegt sich diese Luft in Richtung der Subtropen beider Hemisphären, sinkt in diesem Bereich ab, was wolkenarme Hochdruckgebiete zur Folge hat, und strömt bodennah in Form der Passate wieder in Richtung äquatorialer Tiefdruckrinne. Diese großräumigen Bewegungen werden zusätzlich auf Grund der Erdrotation von der Corioliskraft beeinflusst. Auf der Nordhalbkugel werden alle Horizontalbewegungen nach rechts abgelenkt, auf der Südhalbkugel nach links. Dadurch entstehen Nordost- und Südostpassat. Wegen des Konvergierens der Passate in den bodennahen inneren Tropen, spricht man dort von der

innertropischen Konvergenzzone (ITK). Schon diese typisch subtropische Zirkulation hat Auswirkungen auf die Temperatur. So werden in den Tropen durch die Bewölkung die Temperaturmaxima gedämpft, in den Subtropen hingegen können Extremwerte auftreten. Senkrecht zur tropisch-subtropischen Zirkulation, der so genannten Hadley-Zelle, gibt es noch ein damit und mit den Meeresströmungen gekoppeltes System mit Hebung in den Kontinentalbereichen und Absinken im Bereich der kalten Meeresströmungen, die so genannte Walker-Zirkulation (Schönwiese, 1995, S. 147):

Da Hochdruckgebiete auf der Nordhalbkugel im Uhrzeigersinn und auf der Südhalbkugel entgegengesetzt umströmt werden, bildet sich polwärts der Subtropen, in den gemäßigten bzw. mittleren Breiten, ein Westwindzone aus, die mit der polaren Luftmassengrenze in Kontakt steht und für ein sehr variables Wetter bzw. Klima sorgt.

Dieses sehr grob beschriebene Bild der globalen atmosphärischen Zirkulation lässt sich hinsichtlich wolkenreicher bzw. wolkenarmer Regionen anhand von Satellitenbildern verifizieren. Darüber hinaus wird die atmosphärische Zirkulation auf Grund der Land-Meer-Verteilung erheblich modifiziert und ist mit der ozeanischen Zirkulation gekoppelt. Außerdem unterliegt sie einem markanten Jahresgang (Schönwiese, 1995):

„Wenn im Nordsommer die Nordhemisphäre stärker erwärmt als die Südhemisphäre, bewegen sich dort die Zirkulationsgürtel polwärts, wobei beispielsweise die Subtrophenhochs in den Mittelmeerbereich vorrücken und dort das sonnenreiche und wolkenarme Mittelmeerklima verursachen. Im Nordwinter hingegen ist das Gegenteil der Fall. Der Mittelmeerraum wird durch die äquatorwärts vorrückende Westwindzone mit ihren Tiefdruckgebieten kühler, windiger und niederschlagsreicher. In der gemäßigten Klimazone fällt hingegen das ganze Jahr über Niederschlag. Allerdings kommt es durch große Strömungsvariabilität immer wieder zu besonders trockenen bzw. feuchten Witterungsabschnitten“ (S. 148).

Dieser Jahresgang kann als grobe Analogie zu einem insgesamt erwärmten Globus dienen, beispielsweise während einer vulkanisch wenig gestörten und deshalb relativ warmen Klimaepoche. Hierfür gibt es viele paläoklimatologische Indizien, wie die Pollenspektren und die daraus resultierende Rekonstruktionen der Paläovegetation (Schönwiese, 1995, S. 148 -150).

3.1.6 Die ozeanische Oszillation

Auch die ozeanische Zirkulation ist ein dreidimensionaler, letztlich von der Sonneneinstrahlung angetriebener, Bewegungsvorgang. Auf Grund der Land-Meer-Verteilung ist die ozeanische Zirkulation weit mehr eingengt als die atmosphärische (Schönwiese, 1995, S. 150). Darüber hinaus gibt es intensive atmosphärisch-ozeanische Wechselwirkungen, die unter anderem über wenig bzw. viel Niederschlag bzw. Verdunstung den Salzgehalt des Ozeans beeinflussen. Denn der Salzgehalt gehört neben der Temperatur zu den entscheidenden Einflussgrößen auf die Dichte des Wassers und wirkt sich somit auf die ozeanische Zirkulation direkt aus (Glogger, 1998, S. 33).

Der für unser Klima der mittleren Breiten wichtigste und im Allgemeinen bekannteste oberflächennahe ozeanische Strom ist der Golfstrom. Ausgehend von der Karibik führt der Golfstrom über die Britischen Inseln hinaus bis nach Skandinavien und wird als die Warmwasserheizung Europas bezeichnet (Schönwiese, 1995, S. 151).

Die ozeanische Tiefenzirkulation ist mit den oberflächennahen Strömungen durch Absinkgebiete, vergleichbar mit den atmosphärischen Hochdruckgebieten, bzw. Aufquellgebieten, ähnlich den Tiefdruckgebieten der Atmosphäre, verbunden (Schönwiese, 1995, S. 151).

Die Absinkgebiete sind für den Tiefenwassernachschub von großer Bedeutung, da dieser unter anderem mit dem Transport von Gasbeimengungen in die Tiefsee verbunden ist. Die Aufquellgebiete führen kaltes und im Allgemeinen nährstoffreiches Wasser nach oben. Vor der Küste von Peru, im Bereich des Humboldtstromes, ist ein Phänomen bekannt, das jährlich etwa um die Weihnachtszeit dieses Aufquellen verringert und somit die Temperatur des oberflächennahen Wassers ansteigen lässt. Dieses Phänomen erhielt den Namen „El Niño“ (bedeutet in der peruanischen Landessprache „Christkind“ oder auch „das Kind“) (Schönwiese, 1995, S. 152).

3.1.6.1 El Niño - Phänomen

Die gesamten atmosphärisch-ozeanischen Wechselwirkungen, sind nicht nur in ihrem mittleren Zustand, sondern auch in ihren zeitlichen Variationen klimatologisch und ökologisch von großer Bedeutung. Das bekannteste und auch interessanteste Beispiel solcher Variationen ist das El Niño-Phänomen, welches sich im tropischen bis südlich tropischen Pazifik ausprägt (Schönwiese, 2003, S. 197).

Hauptakteure dieses Phänomens, dessen Schwerpunkt die Küste von Peru ist, sind der Südostpassat sowie ein Absinkgebiet im Bereich des kalten Humboldtstroms. Der Südostpassat unterstützt die östliche Strömung und bewirkt eine erhebliche Neigung der Meeresspiegelhöhe (Anstieg von West nach Ost) (Schönwiese, 2003, S. 197).

Kommt es nun aus irgendwelchen Gründen zur Abschwächung dieser Ostwindkomponente „schwappt“ eine gigantische Ozeanwelle von West nach Ost über den Pazifik (als Reaktion auf den nachlassenden Ost-West-Wasserdruck). Dies führt nicht nur zu einem Anstieg der Meeresspiegelhöhe im Osten des Pazifischen Beckens, sondern auch zu einem Zufluss oberflächennahen Warmwassers und einem Absinken der Thermokline sowie Kaltwassersphäre (Schönwiese, 2003, S. 197).

Das Gegenstück zum El Niño-Phänomen bei verstärktem Ostwindregime ist das Kaltwasserereignis El Niña.

Die besondere Aufmerksamkeit dieser Phänomene liegt darin begründet, dass im zyklischen aber unregelmäßigen Abstand von ca. drei bis acht Jahren El Niño-Phänomene verstärkt auftreten. In manchen Jahren wie 1877/78, 1983, 1987/88 sowie 1997/98 traten diese Ereignisse derart verstärkt auf, dass von „Super El Niño“ gesprochen wird. Die Wassertemperaturanomalien vor der Peruanischen Küste erreichen dann Werte bis zu 5 - 6° C über dem sonstigen Niveau (Schönwiese, 2003, S. 198).

„Dies kann dazu führen, dass die über dem Humboldtstrom hinweg geführten Warmwassermassen das dort übliche atmosphärische Absinken in eine atmosphärische Hebung mit entsprechender Wolken- und Niederschlagsbildung umkehren“ (Schönwiese, 2003, S. 198). Dies führt zu Niederschlagsanomalien, so dass Trockengebiete vorübergehend enorm niederschlagsreich werden und umgekehrt sonstige Niederschlagsgebiete trocken werden.

Beim „Super El Niño“ Ereignis im Jahre 1983 kam es beispielsweise in Santa Cruz (Galapagos Inseln) zu einer Verzehnfachung des Niederschlages, was die westlich der Anden gelegenen Wüsten von Ecuador über Peru bis Nordchile zum erblühen brachte (Schönwiese, 2003, S. 199).

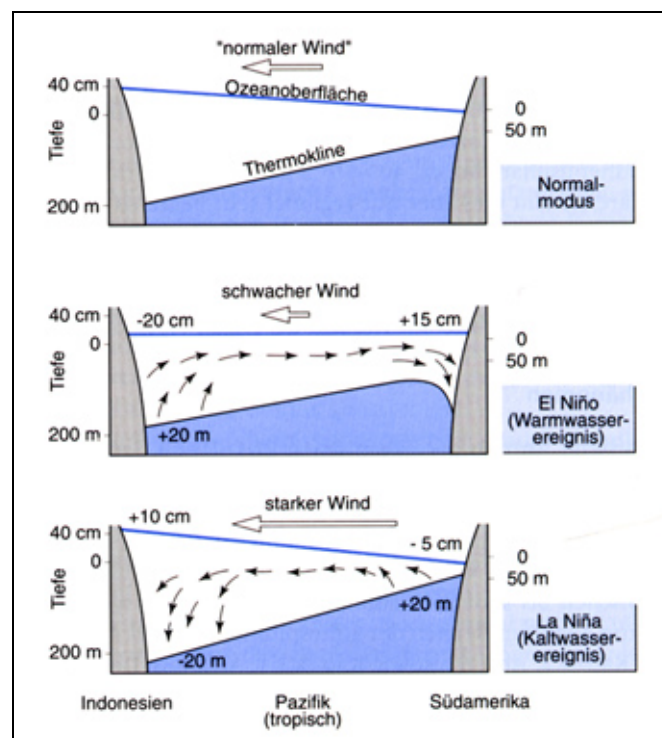


Abb. 3: Schema des Zustandes des tropischen Pazifiks der Südhemisphäre im a) Normalmodus (Südostpassat), bei b) El Niño (Warmwasserereignis vor der Küste von Peru), c) La Niña (Kaltwasserereignis) (Schönwiese, 2003, S. 198).

3.2 Anthropogen bedingte Klimaänderungen

Nach der Betrachtung der natürlichen Ursachen für Klimaänderungen ist nun der Frage nachzugehen, inwieweit auch der Klimafaktor Mensch eine Rolle spielt.

Hinsichtlich der paläoklimatischen Daten besteht dabei das Problem, dass sich in diesen Daten sowohl natürliche Mechanismen als auch anthropogene Mechanismen überlagern.

Grundsätzlich erfolgt die anthropogene Klimabeeinflussung durch Veränderungen der Erdoberfläche. Eingriffe in den Wasser-, Wärme- bzw. Energiehaushalt sowie Beeinflussungen des Ozeans oder Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre spielen hierbei die größte Rolle (Schönwiese, 2003, S. 325).

Die wichtigsten Beispiele anthropogener Klimabeeinflussung nach Schönwiese (2003, S. 325) sind:

- Umwandlung von Natur- in Kulturlandschaften (Einführung, Ausbreitung und sonstige Veränderung der Landwirtschaft, einschließlich Weidewirtschaft), dabei insbesondere
- Waldrodungen;
- Bebauung (Siedlungen, Industrieanlagen, Verkehrswege); weiterhin
- Abwärme (durch Heizung von Gebäuden, Abgase von Industrieanlagen, Abwässer, wobei hier nur der thermische Aspekt gemeint ist),
- Wassernutzung (Wasserentnahme für industrielle, gewerbliche bzw. persönliche Zwecke in den Privathaushalten),
- künstliche Brände (Wald, Ölquellen usw.)
- Energienutzung und Verkehr (insbesondere fossile Energieträger und damit verbundene Emissionen von Spurengasen und Aerosolen in die Atmosphäre),

Zu diesen im Allgemeinen ungewollten Eingriffen, da damit andere Zwecke als Klimaänderungen verfolgt werden, könnte man noch einige gewollte Eingriffe anhängen, wie etwa das „Impfen“ von Wolken mit Silberjodid, um sie eventuell zum Regnen zu veranlassen und um Hagel zu verhindern, oder die gigantischen Ideen der ehemaligen UdSSR in den 60er Jahren, das Polareis mit Ruß zu bestreuen, um das sibirische Klima zu verbessern (Schönwiese, 2003, S. 325-326). Im Folgendem beschränke ich mich jedoch auf die oben aufgelisteten Faktoren.

Die *Umwandlung von Natur- in Kulturlandschaft* hat im Rahmen der neolithischen Revolution (Übergang des Menschen vom „Jäger und Sammler“ zum „Ackerbauer und Viehzüchter“) bereits vor Jahrtausenden begonnen. Ausgehend von Mesopotamien (heute etwa Irak und Syrien) erfasste diese Revolution zunächst Ägypten, dann den gesamten Mittelmeerraum und schließlich Europa und Südostasien. Dieser Vorgang hat sich im Laufe der Menschheitsgeschichte intensiviert (Schönwiese, 2003, S. 326).

Die *Waldrodungen* vor rund zwei Jahrtausenden erreichten ihren Höhepunkt. Um landwirtschaftliche Nutzfläche und Siedlungsfläche zu gewinnen sowie um Kriegsflotten zu bauen, kam es im Mittelmeerraum zu einer fast völligen Entwaldung. In Nordamerika haben zwischen 1600 und 1800 massive Waldrodungen stattgefunden. Zu Beginn des Industriezeitalters (1800/1850) war der natürliche Wald um rund 70 Prozent gegenüber seinem potentiellen Flächenumfang reduziert (Schönwiese, 2003, S. 326). Studien zufolge hat jedoch die Tatsache, dass sich diese Waldrodungen in historischer Zeit über eine sehr lange Zeitspanne hingezogen haben, nur marginale Auswirkungen auf das Globalklima. Dennoch sei darauf hingewiesen, dass Wald im Allgemeinen als natürliche Senke fungiert und somit das atmosphärische CO₂ verringert. Darüber hinaus wird durch Rodungen die Erdoberflächenalbedo erhöht, die Verdunstung verringert und somit Bewölkung und Niederschlag direkt negativ beeinflusst. Diese Auswirkungen sollten bezüglich der mit dramatischer Geschwindigkeit fortschreitenden Rodungen des tropischen Regenwaldes besonders hervorgehoben werden. Modellberechnungen von brasilianischen Forschern ergaben, dass im Falle einer völligen Entwaldung des Amazonasgebietes dort die bodennahe Lufttemperatur zusätzlich zu globalen Effekten um bis zu 3 K ansteigen und der Niederschlag um rund 1000mm abnehmen würde (Schönwiese, 2003, S. 326).

Die Industrielle Revolution Mitte des 19. Jahrhunderts schaffte die Grundlage für die moderne Lebensweise der westlichen Welt. Ein Leben, das sich vor allem in den Städten abspielt. Die *Abwärmeeffekte* sind im Wesentlichen in den Städten zu finden. *Eingriffe in den Wasserhaushalt* in Bezug auf Entziehung von Nutzwasser aus Flüssen und Seen und aus dem Grundwasser sind hingegen nicht nur im Bereich

von Städten und Industrieanlagen von Bedeutung, sondern auch in allen landwirtschaftlich genutzten Bereichen (Schönwiese, 2003, S. 326).

Gravierende Auswirkungen gibt es vor allem in Gebieten wo der Niederschlag relativ gering ist. Hierbei spielt vor allem die künstliche Bewässerung eine entscheidende Rolle, da dies ein Absinken des Wasserstandes der Flüsse und ein Schrumpfen der Seen zur Folge hat. In solchen niederschlagsarmen Regionen kommt es im Zusammenhang mit Überweidung zur „Desertifikation“ (Ausbreitung von Wüsten und Steppen). Schreitet dieser Vorgang voran, so ist auf Grund der übernutzten und somit zurückgehenden Vegetationsbedeckung eine Verringerung der Verdunstung die Folge. Das führt wiederum zu einer geringeren Wolken- und Niederschlagsbildung (Schönwiese, 2003, S. 326-327).

Das wohl deutlichste Beispiel anthropogener Einwirkungen auf das Klima ist die *Nutzung fossiler Energieträger* (Kohle, Erdöl, Erdgas). Klimawirksame Spurengase aber auch toxische Substanzen werden vielerorts ungefiltert in die Atmosphäre emittiert (Schönwiese, 2003, S. 327-328).

3.2.1 Anthropogener Treibhauseffekt

Der anthropogene Treibhauseffekt, der auf Grund diverser menschlicher Aktivität zum natürlichen Treibhauseffekt hinzutritt, ist ein sowohl in der Wissenschaft als auch in der Öffentlichkeit zunehmend diskutiertes Problem.

Historisch gesehen waren Jean Baptiste Joseph Fourier und John Tyndall die Ersten, die bereits im 19. Jahrhundert den natürlichen Treibhauseffekt - einschließlich der besonderen Rolle des CO₂ - physikalisch richtig erklärten. Auf die anthropogene Komponente, die nun in den Blickpunkt rückt, hat im Zusammenhang mit der Nutzung fossiler Energieträger als Erstes der schwedische Physikochemiker Svante August Arrhenius, ebenfalls im 19. Jahrhundert, hingewiesen. Dieser hat nicht nur auf einen dadurch bedingten CO₂-Konzentrationsanstieg der Atmosphäre hingewiesen, sondern auch entsprechende Berechnungen darüber angestellt,

welche Erwärmung der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur dadurch widerfahren sollte (Schönwiese, 2003, S. 333).

Im 20. Jahrhundert war es Guy Stewart Callendar der diesen CO₂-Anstieg auf Grund von Messungen erkannte und erneut auf Konsequenzen für das Klima hingewiesen hat (Schönwiese, 2003, S. 333).

Heute lässt sich der CO₂-Anstieg mittels eines globalen Messnetzes genau verfolgen, wobei die längste kontinuierliche Messreihe auf dem Bergobservatorium Mauna Loa (Hawaii) 1958 begonnen hat (Schönwiese, 2003, S. 333).

Indirekte Rekonstruktionen reichen wesentlich weiter zurück, werden jedoch mit zunehmendem Alter ungenau. Als verlässlich gelten Rekonstruktionen mittels Eisbohrungen. Polares Eis enthält Luftblasen, welche die frühere Zusammensetzung der Atmosphäre hinsichtlich einiger Spurengase wiedergeben.

Die Rekonstruktionen ergeben, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration in der vorindustriellen Epoche nur wenig um den Wert von rund 280 ppm (parts per million; steht für die Zahl 10^{-6}) schwankte (dies gilt wahrscheinlich für das ganze Holozän, d.h. für die letzten 10 000 Jahre). Im Industriezeitalter, ab etwa 1750/1800/1850, erfolgte jedoch ein zunächst mäßiger, dann immer rasanter werdender Anstieg auf bisher fast 370 ppm (Schönwiese, 2003, S. 334).

Dieser hohe neuzeitliche Wert ist in der Vergangenheit wahrscheinlich nie übertroffen worden, obwohl es im Rahmen des Wechsels zwischen Warm- und Kaltzeiten bzw. in der Frühzeit der Erde eventuell noch größere, jedoch ausschließlich natürliche Variationen der Zusammensetzung der Erdatmosphäre gegeben hat (Schönwiese, 2003, S. 334).

Was sind nun die Ursachen für die rapide angestiegene atmosphärische CO₂-Konzentration im Industriezeitalter?

Die Ursachen sind ganz klar bei den Vorgängen des „globalen Wandels“ zu finden. Dazu gehört der Anstieg der Weltbevölkerung seit 1900 um den Faktor 3

(Schönwiese, 2003, S. 335). Im Jahr 1999 ist die 6-Milliarden-Grenze überschritten worden. Parallel dazu kam es zu einem heftigen Energieaufwand.

Die treibende Kraft der CO₂-Anreicherung ist die Weltprimärenergienutzung. Rund 90 Prozent geht auf fossile Energieträger zurück, d.h. Verfeuerung von Kohle, Erdöl und Erdgas, einschließlich des Verkehrs, bei dem C in CO₂ umgewandelt und in die Atmosphäre emittiert wird.

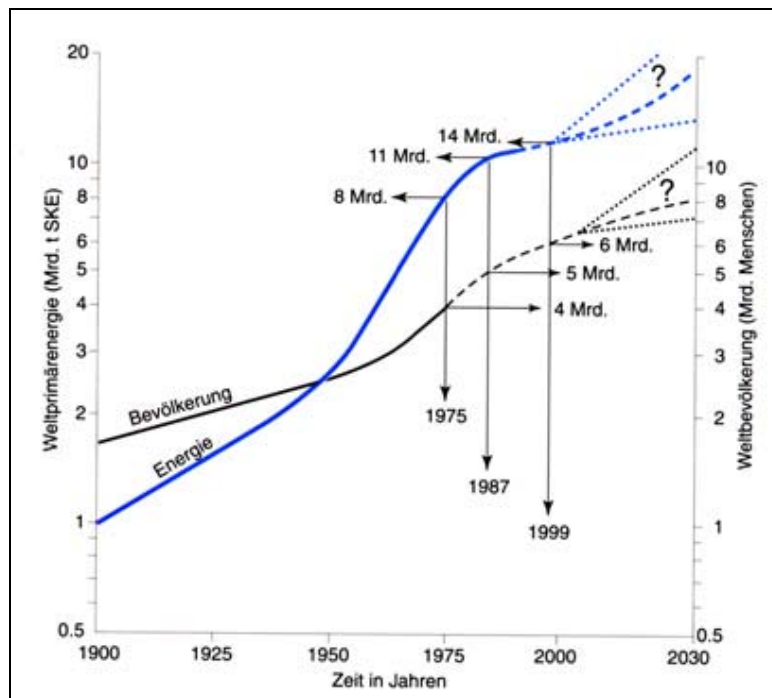


Abb. 04: Entwicklung und Zukunftsprojektion der Weltbevölkerungszahl sowie Weltprimärenergienutzung (SKE = Steinkohleeinheiten) seit 1900 (Schönwiese, 2003, S. 335)

Den Beweis, dass der atmosphärische CO₂-Anstieg im Industriezeitalter anthropogen ist, liefern so genannte „Kohlenstoff (C) - Fluss - Modelle“. Das in Abb. 5 gezeigte Schema stellt den globalen C-Kreislauf für die derzeitige Situation dar.

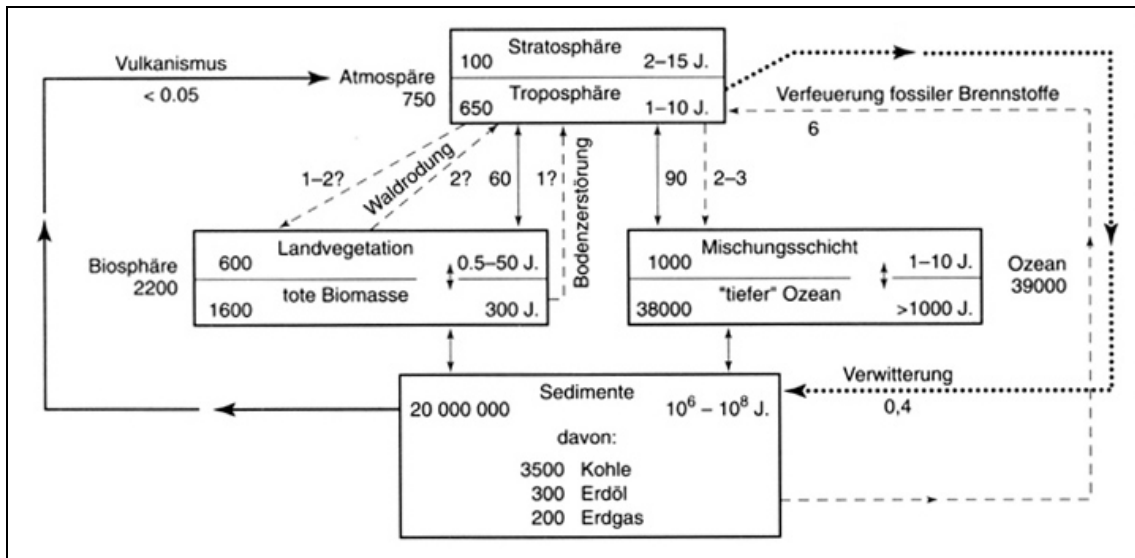


Abb. 5: Globale Kohlenstoff-Speicher; rechts: mittlere Verweilzeiten in Jahren (Schönwiese, 2003, S. 336)

Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass die größten C-Speicher zwar in den Sedimenten und im ‚tiefen‘ (d.h. unteren und somit kalten) Ozean zu finden sind und natürlichen Flüsse zwischen Atmosphäre und Ozean bzw. Biosphäre (Vegetation) relativ groß sind; diese Flüsse funktionieren aber im Sinne eines Austausches, der für bestimmte definierbare Klimazustände zu einem quasistabilen Zustand führt, während der Mensch eine einerseits relativ kleine, andererseits aber zusätzliche Quelle darstellt (Schönwiese, 2003, S. 336).

Beachtenswert ist jener Umstand, dass noch bis zur Mitte des vergangenen Jahrhunderts der Beitrag der Waldrodungen zur anthropogenen CO_2 -Emission größer war als jener der fossilen Energienutzung. Darüber hinaus sind die in der viel größeren Zeitdimension dominierenden Beiträge von Vulkanismus und Verwitterung gegenüber den Beiträgen der wesentlich kleineren Zeitdimension des Industriezeitalters praktisch unbedeutend. Verglichen mit der derzeitigen anthropogenen Gesamtemission liegt vor allem der vulkanische Beitrag im Promillebereich (0,17 Prozent). Darüber hinaus führen Vulkanausbrüche zu Abkühlungen der unteren Atmosphäre und stehen gar nicht in Zusammenhang mit CO_2 , sondern mit dem stratosphärischen Sulfataerosol (Schönwiese, 2003, S. 336).

In Tabelle 1 erfolgt eine Aufschlüsselung der anthropogenen Emissionen in die Atmosphäre. Diese zeigt, dass 75 Prozent der CO_2 -Emissionen auf die Nutzung

fossiler Energieträger zurückzuführen sind. Aber auch die indirekten Einflüsse sind noch erheblich: ca. 5 Prozent gehen auf die Brennholznutzung in den Entwicklungsländern zurück.

Tab. 1: Aufschlüsselung anthropogener Emissionen

Aufschlüsselung der anthropogenen Emissionen	
CO ₂	75% fossile Energie, 20% Waldrodungen, 5% Holznutzung (Entwicklungsländer)
CH ₄	27% fossile Energie, 23% Viehhaltung, 17% Reisanbau, 16% Abfälle (Müll, Abwasser), 11% Biomasse Verbrennung, 6% Tierexkremete
FCKW	Treibgas in Spraydosen, Kältetechnik, Dämm-Material, Reinigung
N ₂ O	23-48% Bodenbearbeitung (einschl. Düngung), 15-38% chemische Industrie, 17-23% fossile Energie, 15-19% Biomasse Verbrennung
O ₃	indirekt über Vorläufersubstanzen wie z.B. Stickoxide (NO _x , u.a., Verkehrsbereich)

Quelle: Schönwiese (2003, S. 338, modifiziert)

CO₂ ist jedoch keinesfalls das einzige klimawirksame Spurengas, bei dem ein anthropogener atmosphärischer Konzentrationsanstieg im Industriezeitalter festgestellt worden ist. Schönwiese (2000, S. 350) führt aus, dass lediglich die weltweiten FCKW-Emissionen in den letzten Jahren, von rund 1 Megatonne auf 0,4 Megatonnen, im Gegensatz zu allen anderen in Tabelle 1 genannten Emissionen in den letzten Jahren zurückgegangen sind.

In Abbildung 6 ist die Veränderung der atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), und Distickstoffoxid (N₂O) im Verlauf der letzten 1000 Jahre graphisch dargestellt.

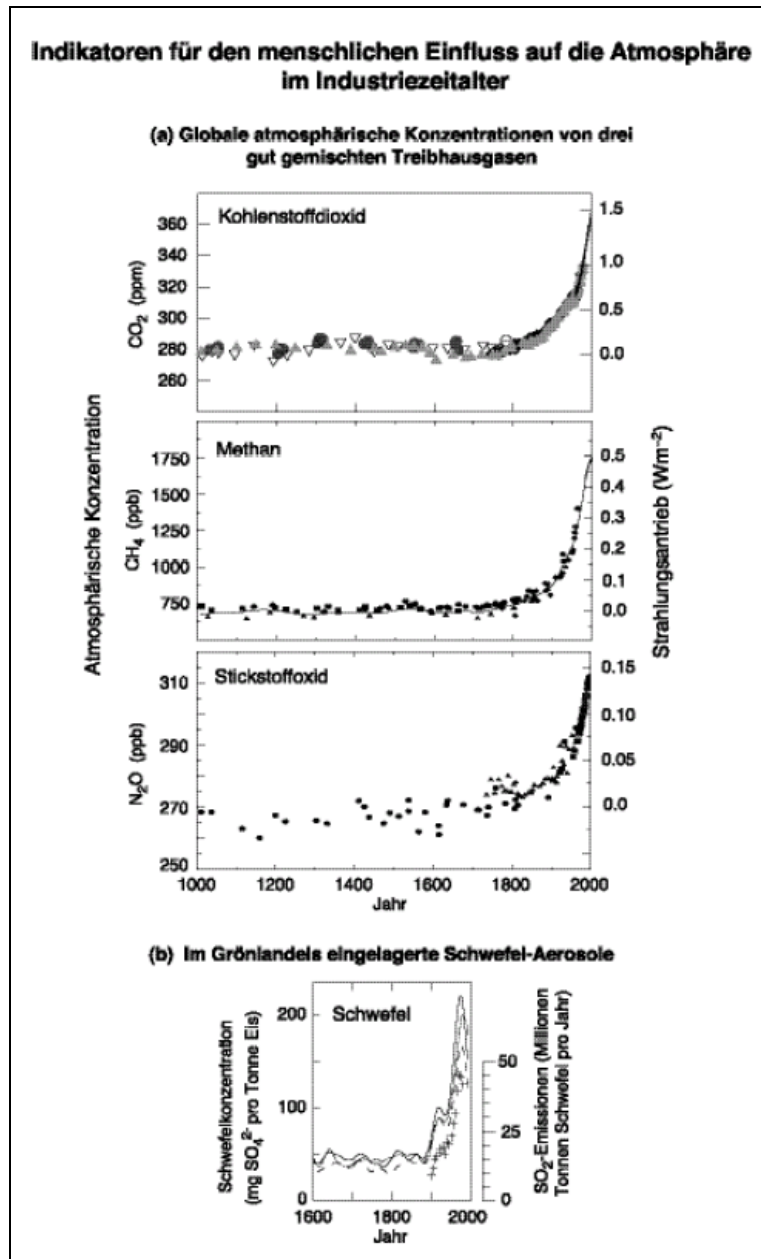


Abb. 6: Indikatoren menschlichen Einflusses im Industriezeitalter (IPCC, 2001, dritter Bericht, S. 48)

Klimamodellberechnungen des deutschen Klimarechenzentrum der Princeton University USA sowie des HEADLY - Klimaforschungszentrum England zufolge ist die Ursache für die seit 1850/60 um rund $0,6^{\circ}\text{C}$ erhöhte global gemittelte Lufttemperatur (Abb. 7) ebenfalls eindeutig auf den zusätzlichen anthropogenen Treibhauseffekt zurückzuführen (Schönwiese, 2003, S. 342).

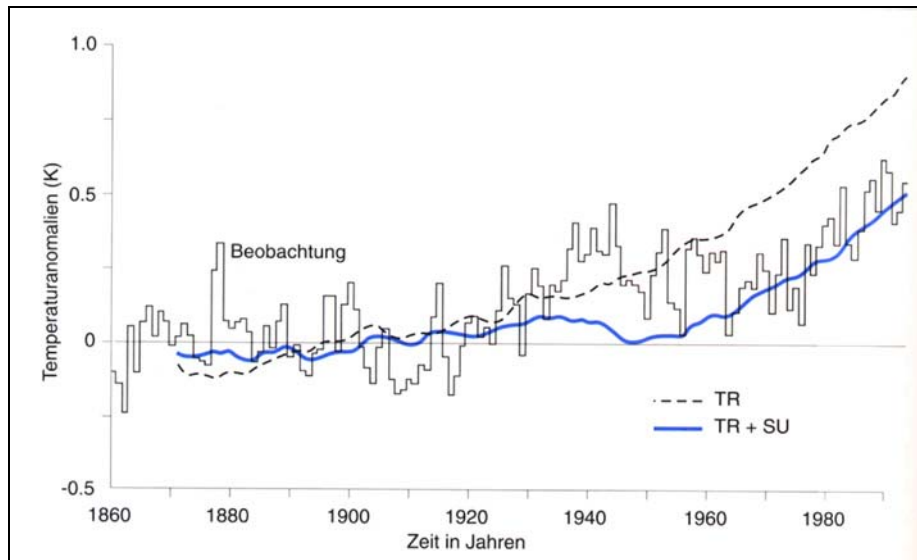


Abb. 7: Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur 1860-1994 auf Grund der anthropogenen Spurengasemissionen (CO₂ usw.). Anthropogenes Treibhausgas (TR), sowie kombiniert mit dem Effekt der troposphärischen Sulfataerosolbildung auf Grund anthropogener SO₂-Emissionen (TR+SU-Signal) (IPCC, 1996 modifiziert von Schönwiese, 2003, S. 342).

Abbildung 8 aus dem Jahre 2005 zeigt, dass die industrialisierten Länder etwas mehr als die Hälfte der CO₂-Emissionen verursachen, die Entwicklungsländer im asiatisch-pazifischen Raum etwas weniger als ein Viertel und die Schwellenländer rund ein Achtel (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 149).

Obwohl Europa, Japan und Nordamerika zusammen lediglich nur rund 15 Prozent der Weltbevölkerung beherbergen, verursachen diese Länder etwa zwei Drittel der CO₂-Emissionen. Die USA ist noch der größte Treibhausgasemittent: mit weniger als 5 Prozent Anteilen an der Weltbevölkerung verursachen die USA nahezu ein Viertel der weltweiten CO₂-Emissionen. China und Indien jedoch dabei die USA in Sachen CO₂-Emissionen zu überholen (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 150).

„Allein die 128 Millionen Autos der USA erzeugten im Jahr 2000 soviel CO₂ wie die gesamte Wirtschaft Japans - der viertgrößte CO₂-Emittent weltweit“ (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S.150).

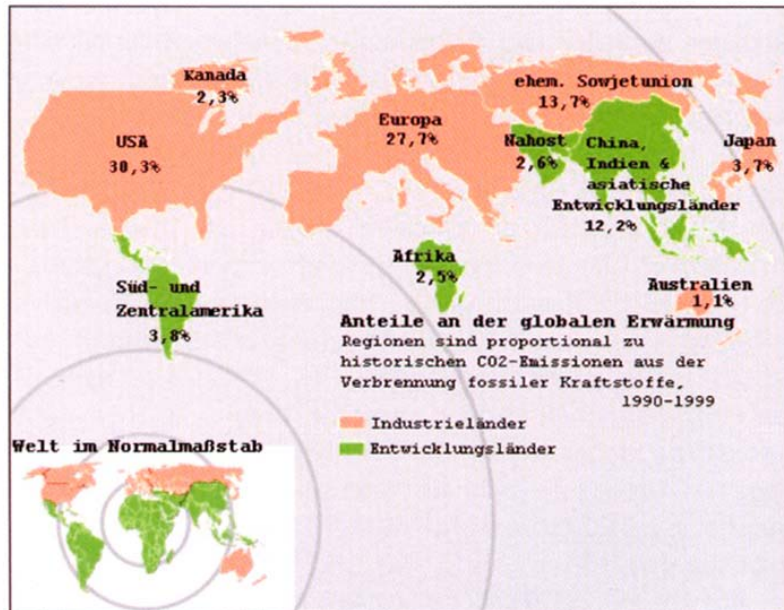


Abb. 8: Anteile einzelner Länder und Regionen an der globalen Erwärmung (1990-1999). Die Größe der Regionen ist so verändert, dass sie die historischen Kohlendioxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe widerspiegelt (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S.150).

4 Zukunftsprognosen mittels globaler Klimamodelle

Komplexe physikalische Klimamodelle sind das wichtigste Werkzeug, um zukünftige Klimaänderungen zu projizieren. Alle relevanten Interaktionen des Klimasystems werden in so genannten „General Circulation Models“ (GCM) berücksichtigt. Hier werden alle Energieumwandlungen und Energieflüsse des Klimasystems anhand von physikalischen Gleichungen nachvollzogen.

Bei der Herleitung von Szenarien kommen Computersimulationen mit physikalisch basierten Modellen, insbesondere mit globalen, gekoppelten Zirkulationsmodellen der Atmosphäre und der Ozeane, eine vorrangige Rolle zu. GCMs stellen die momentan vollständigsten Werkzeuge dar, um die wichtigsten Faktoren und Annahmen zu benennen (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 61).

Den stärksten Input diesbezüglich liefert der „Intergovernmental Panel on Climate Change“, (IPCC) der 1988, gemeinsam von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umwelt-Programm der Vereinten Nationen (UNEP), gegründet wurde (<http://www.ipcc.ch/about/index.htm> [Zugriff am 5. Oktober.2008]).

Die IPCC ist ein zwischenstaatliches Gremium, das die Verbindung zwischen Wissenschaft und Politik herstellt. Der aktuelle Forschungsstand zur Klimaproblematik wird in gebündelter Form der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Durch Aufzeigen von Problemen, Handlungsfeldern und Vermeidungsstrategien fungiert die IPCC als wichtige Entscheidungshilfe für die Politik bei Klimafragen (<http://www.ipcc.ch/about/index.htm> [Zugriff am 5. Oktober.2008]).

Um das Klima der Erde in einem Modell simulieren zu können, wird die Erde mit Hilfe von Hochleistungs-Computern mit einem dreidimensionalen Gitternetz überzogen. Die Atmosphäre wird bis in rund 30 km Höhe von diesem Gitter durchzogen. Für jeden dieser Gitterpunkte werden schließlich meteorologische Größen wie Temperatur, Feuchte, Wind etc. mittels Bewegungs- und Energiegleichungen berechnet. Die Distanz der Gitterpunkte bestimmt wie detailliert das Klimageschehen erfasst wird. Derzeit liegt die Distanz bei einigen hundert Kilometern. Prozesse die kleinräumiger als die Gitterdistanz sind, wie etwa Gewitter, Wolken oder Niederschläge, können nur indirekt berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung der Auswirkung eines Prozesses wird Parametrisierung genannt. Wolken- und Niederschlagsbildung müssen typischerweise parametrisiert werden. Dadurch wird ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor in die Modelle eingebracht, denn Wolken sind klimatologisch relevant, d.h. wie dick sie sind und in welcher Höhe sie auftreten ist entscheidend. Hohe und dünne Wolken etwa wirken erwärmend, niedrige und dicke Wolken hingegen wirken kühlend für die bodennahen Luftschichten. Weitere Prozesse, die in verschiedenen „General Circulation Models“ (GCM) berücksichtigt bzw. parametrisiert werden, sind beispielsweise Wechselwirkungen zwischen Boden und Atmosphäre oder die Einbeziehung von Schnee (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 61-62).

„Die gewählten Parametrisierungen beeinflussen die Empfindlichkeit des Modells gegenüber der Konzentrationserhöhung der Treibhausgase. Bei gleichem Konzentrationsanstieg reagieren empfindliche Modelle mit größerer Erwärmung. Auch die regionalen Ausprägungen des Klimawandels unterscheiden sich in den einzelnen GCMs aufgrund unterschiedlicher Parametrisierung“ (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 62).

An Modelle, die die Atmosphäre simulieren, werden andere Modelle angekoppelt mit denen die Prozesse in den Ozeanen elaboriert werden.

Grundsätzlich müssen im GCM alle Einzelmodelle so miteinander gekoppelt werden, dass Energie- und Massenflüsse von einer Sphäre in die andere richtig wiedergegeben werden und Rückkoppelungseffekte Berücksichtigung finden. So wird seit kurzem versucht die Vegetation in diese Modelle einzubinden. In Hinblick auf mögliche Rückkoppelungen stellt dies eine Erweiterung dar (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 62).

„General Circulation Models“ können bislang auf Grund der groben räumlichen Auflösung nur im globalen bis kontinentalen Maßstab interpretiert werden. Trotz aller Unsicherheiten sind „General Circulation Models“ in der Lage das derzeitige Klima relativ gut zu reproduzieren (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 62).

Mittels validierter Klimamodelle können die Ursachen für vergangene Veränderungen sowie der Beitrag verschiedener klimabeeinflussender Faktoren analysiert werden. Sie stellen die einzige Methode dar, die Frage der Mitverantwortung des Menschen am Klimawandel wissenschaftlich zu behandeln, denn sie machen Experimente möglich, die der Wissenschaft im Klimabereich ansonsten verwehrt sind (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 63).

„Führt man Berechnungen mit und ohne anthropogene Treibhausgaskonzentrations-erhöhung durch, vergleicht man den Temperaturverlauf und die räumlichen Verteilungsmuster, so erreicht man die gewünschte Übereinstimmung nur, wenn neben den Schwankungen natürlicher Einflussgrößen, wie Sonnenfleckenzyklus und Vulkanausbrüchen, auch der anthropogene Anstieg der Treibhausgase berücksichtigt wird“ (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 63).

Wenngleich der Einfluss der Treibhausgase von wissenschaftlicher Seite relativ gut abgesichert ist, so weiß man bislang noch wenig über die indirekten Wirkungen von Aerosolen, sowohl bezüglich des Prozessverständnisses als auch hinsichtlich des Ausmaßes des Beitrags.

Validierte „General Circulation Models“ können auch dazu herangezogen werden Zukunftsszenarien, beispielsweise auf der Basis vorgegebener Veränderungen der Treibhausgaskonzentrationen, zu berechnen. Hierfür benötigt man jedoch zusätzliche Angaben darüber wie sich die anthropogene Treibhausgaskonzentration zukünftig entwickeln wird. Dies erfordert jedoch auch Kenntnisse über die Veränderung der natürlichen Kohlenstoffflüsse (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 64).

In der Natur finden ständig Kohlenstoffflüsse von einer Sphäre in die andere statt. So findet während des Frühjahrs und Sommers eine verstärkte Kohlenstoffspeicherung in den Blättern der Pflanzen statt. Im Herbst hingegen beginnt durch die bakterielle Zersetzung wieder die Freisetzung des Kohlenstoffs. Auch zwischen Ozean und Atmosphäre finden Austauschprozesse statt (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 65).

Bei der zukünftigen Entwicklung der Emissionen spielen Annahmen über das Bevölkerungswachstum, Technologieentwicklung, Wirtschaftswachstum sowie die Umsetzung internationaler Abkommen bezüglich des Klimaschutzes eine bedeutende Rolle. Es liegt auf der Hand, dass viele dieser Entwicklungen nur in groben Zügen abgeschätzt werden können. So bergen allein die Annahmen über die weltweite Wirtschaftsentwicklung für die nächsten 100 Jahre sehr viele Unsicherheiten. Hierzu werden eigene Ansätze entwickelt, da herkömmliche ökonomische Modelle nur einen Zeitraum von einigen Jahren abdecken (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 64-65).

4.1 Zukunftsszenarien der IPCC

Auf der Basis von Emissionsszenarien aus dem „IPCC Special Report on Emission Szenarios“ (SRES) wurden Modelle zur Darstellung der Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen in der Atmosphäre und somit des zukünftigen Klimas herangezogen. Je nach Szenario weisen die Modelle für das Jahr 2100 einen Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration von 90-250 Prozent (540-970 ppm) gegenüber der vorindustriellen CO₂-Konzentration (280 ppm) aus (IPCC, 2001, dritter Bericht, S. 54).

Ein Anstieg der anthropogenen CO₂ - Emissionen ist aus allen Szenarien abzulesen.

Die derzeit verwendeten SRES-Klimaszenarien der IPCC können im Hinblick auf zwei Aspekte klassifiziert werden:

- 1) Verhalten der Menschen (Grad des Umweltbewusstseins)
- 2) Verhalten der Nationalstaaten (internationale Zusammenarbeit in Klimafragen)

Demzufolge erreicht die höchsten Emissionen jenes Szenario, bei dem ein geringes Umweltbewusstsein und keine internationale Zusammenarbeit angenommen werden, siehe Abbildung 10, Diagramm (d). Dieses Szenario wird nach dem Dritten IPCC Bericht (2001) auch als A2 bezeichnet.

Der Ablauf der Klimaszenarienberechnung stellt sich in groben Zügen wie folgt dar: Zunächst wird das Modell mit einer Treibhausgaskonzentration gestartet, die derjenigen vor der Industriellen Revolution entspricht. Im nächsten Schritt wird die Treibhausgaskonzentration entsprechend der beobachteten Veränderung bis heute jeweils von Jahr zu Jahr erhöht. Um in die Zukunft gerichtete Aussagen treffen zu können, wird, entsprechend den Emissionsszenarien, die klimawirksame Treibhausgaskonzentration weiter erhöht. Dies liefert letztendlich die globalen Klimaänderungsszenarien für Erdoberflächentemperatur, Meeresspiegelanstieg, Niederschlag und andere Elemente (siehe Abbildung 9).

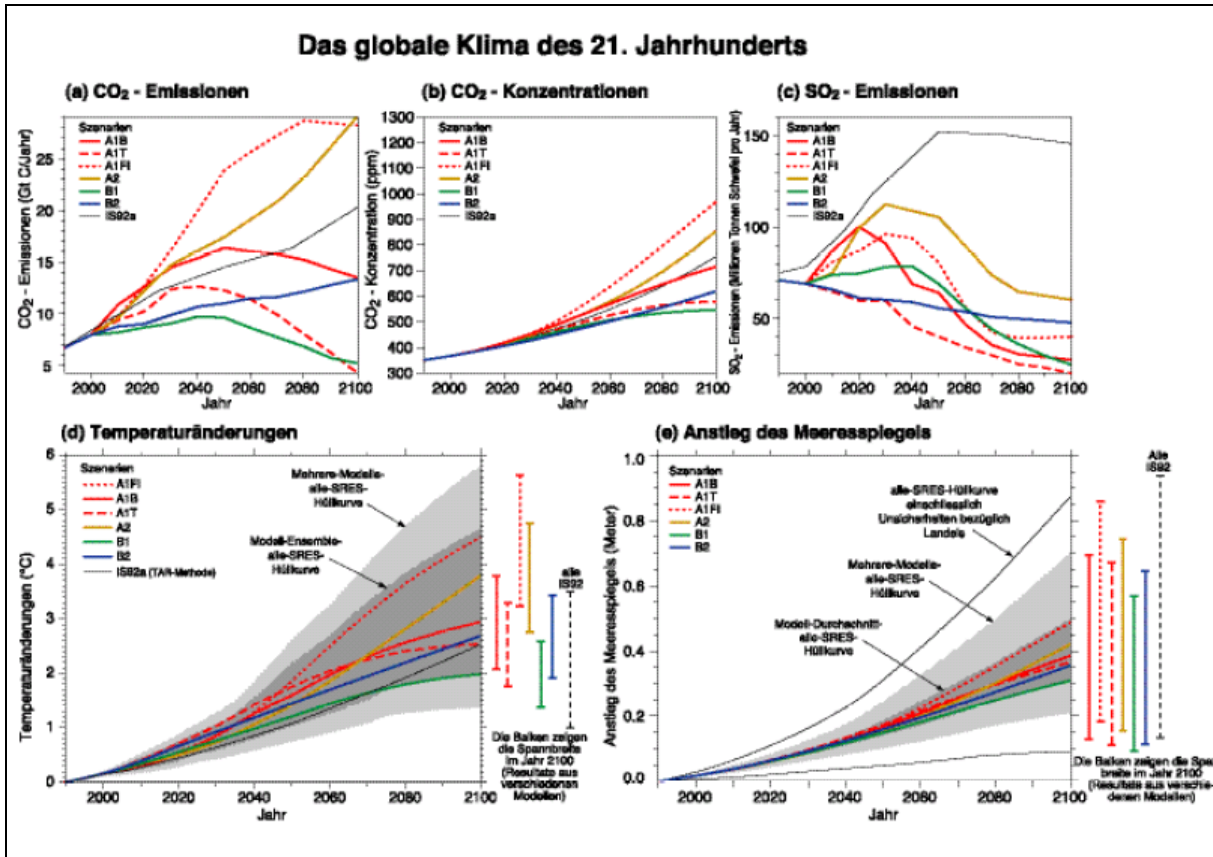


Abb. 9: Emissionsszenarien der IPCC (IPCC, 2001, dritter Bericht, S. 56)

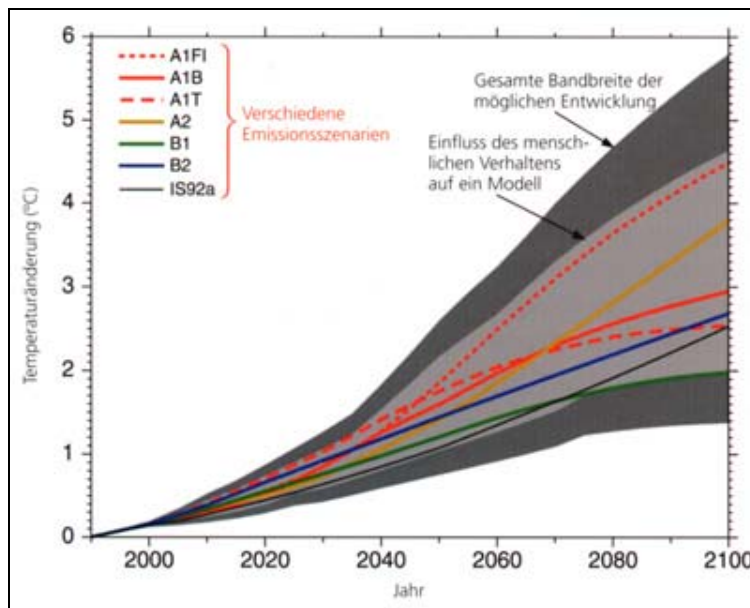


Abb. 10: (d) Temperaturveränderung (IPCC, 2001, dritter Bericht, S. 56).

Alle weltweit gerechneten Klimamodelle zeigen eine deutliche Temperaturzunahme bei einer Erhöhung der Treibhausgaskonzentration. Diese Tatsache zeigt wie wichtig das menschliche Verhalten für die zukünftige Entwicklung ist. Abbildung 10 zeigt deutlich die - mit verschiedenen „General Circulation Models“ der IPCC berechnete - globale Mitteltemperatur. Jede Linie steht für die gemittelten Ergebnisse eines Emissionsszenarios. Die gesamte Bandbreite der möglichen Entwicklungen bis in das Jahr 2100 reicht von 1,4°C bis 5,8°C. Im Jahr 1996 lagen diese Schätzungen noch deutlich niedriger (bei maximal 3,5°C) (IPCC, 2001, dritter Bericht, S. 54).

Diese Bandbreite erscheint auf den ersten Blick sehr groß, wird jedoch von der Tatsache relativiert, dass auch die ganze Bandbreite menschlichen Verhaltens und der damit verbundenen Treibhausgaskonzentration inkludiert ist (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 67).

Selbst das optimistischste Emissionsszenario B1 (Abbildung 10), in dem die anthropogenen Treibhausgase auf ein Minimum reduziert werden und alle Staaten im Sinne des Klimaschutzes kooperieren, zeigt einen Temperaturanstieg von mindestens 1,4°C bis zum Jahr 2100 (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 67).

„Selbst bei diesem Temperaturanstieg würde die globale Mitteltemperatur über das bisherige Klimaoptimum seit der letzten Eiszeit vor rund 7000 Jahren ansteigen“ (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 67).

Das etwas realistischere Emissionsszenario B2 (Abbildung 10) ergibt einen Temperaturanstieg von rund 2,7°C. Dieser Anstieg ist höher als der Unterschied zwischen der wärmsten und der kältesten Periode im Holozän (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 67).

Besonders hohe Emissionsszenarien wie A2 (Abbildung 10), die entweder durch sehr hohe Treibhausgasemissionen der Menschheit oder durch Rückkopplungseffekte im Ökosystem entstehen können, erreichen einen Anstieg der global gemittelten Lufttemperatur von 4°C und mehr (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 67).

Mittels globaler Klimamodelle lassen sich nicht nur Mittelwerte für die gesamte Erde ermitteln, sondern auch regionale Entwicklungen darstellen. Die Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse des Emissionsszenario A2 anhand einer Weltkarte. Daraus lässt sich ablesen, dass der Temperaturanstieg an Land deutlich stärker ist als über den Ozeanen. Darüber hinaus ist der Anstieg der Temperaturen in höheren Breiten – besonders auf der Nordhalbkugel – stärker ausgeprägt als in den Tropen. Die stärkste Erwärmung wird in der Arktis (hier werden Temperaturanstiege von über 10°C erreicht) erwartet. Demzufolge werden die Schneebedeckung und die Ausdehnung von Meereis in der nördlichen Hemisphäre stark abnehmen. Dadurch wird auch der Meeresspiegel um 0,09 bis 0,88m ansteigen (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 68).

Auffällig ist die geringe Temperaturänderung südlich von Grönland und Island. Dies ist auf den geringen Wärmetransport durch den Golfstrom zurückzuführen, der auf Grund des kalten Schmelzwassers der Arktis stark abkühlt. Auf der Südhalbkugel ist die Erwärmung weniger stark ausgeprägt, da es weniger Landfläche gibt als auf der Nordhalbkugel (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 68).

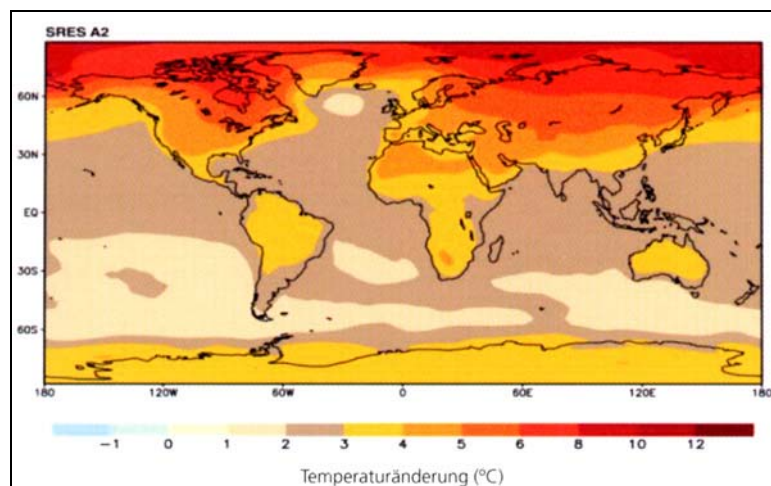


Abb. 11: Änderung der Jahresmitteltemperatur 2085 gegenüber 1990 für das Emissionsszenario A2. Im globalen Mittel beträgt Änderung der bodennahen Lufttemperatur rund 3,1°C. In den höheren Breiten der nördlichen Hemisphäre ist sie jedoch weit größer (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 68).

Deutliche Veränderungen zeigen sich jedoch nicht nur bei der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur. Auch beim Niederschlag zeigen sich laut IPCC (2001) deutliche Anomalien. Im globalen Mittel zeigt sich ähnlich der Temperatur ein Anstieg

der Niederschläge, der jedoch nicht gleichmäßig über die Erde verteilt ist (Abbildung 12). Starke Zunahmen zeigen sich in den mittleren bis höheren Breiten sowohl auf der nördlichen Hemisphäre als auch auf der südlichen Hemisphäre. In den Tropen nimmt der Niederschlag zu, in den Subtropen hingegen zeigt sich eine Abnahme der Niederschläge. Für Europa ergibt das Emissionsszenario A2 ein gespaltenes Bild: im Norden Europas ist mit einer Zunahme der Niederschläge zu rechnen, im Mittelmeerraum hingegen mit einer Abnahme von rund 20 Prozent (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 69).

Kromp-Kolb und Formayer (2005) führen aus:

„Was diese Änderungen für Mitteleuropa und speziell für den Alpenraum bedeuten, kann man aus den globalen Modellen nicht direkt ablesen, da bezüglich Niederschlag hier der Übergangsbereich von Zunahme zu Abnahme ist und die räumliche Auflösung der globalen Modelle nicht ausreicht, um eine genaue Grenze realistisch anzugeben“ (S. 69-70).

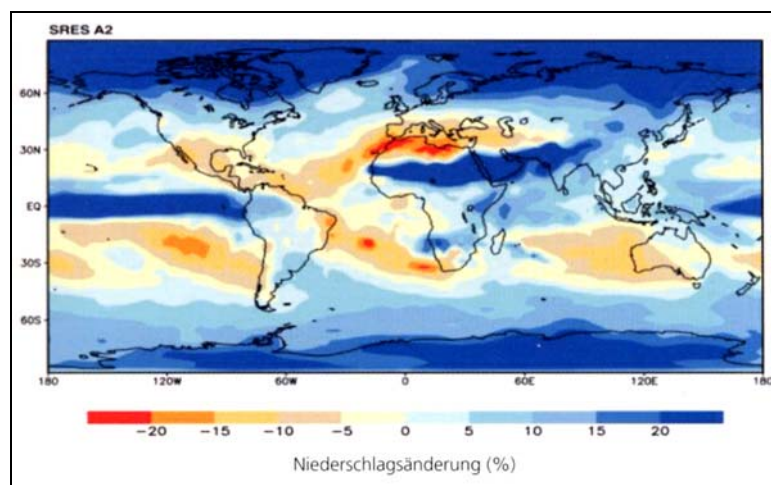


Abb. 12: Prozentuelle Änderung der Jahresniederschlagssummen 2085 gegenüber 1990 für das Emissionsszenario A2 (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 69).

Um regionale Klimaänderungsszenarien ableiten zu können, wurden in den letzten Jahren verschiedene „Downscaling-Methoden“ entwickelt. Hierfür betreibt man ein regionales Klimamodell mit einer feineren räumlichen Auflösung nur für jene Region, die interessiert.

5 Der Klimawandel im Alpenraum

Die Alpen liegen mit ihren 800 km Länge und 200 km Breite im Übergangsbereich zwischen dem Atlantischen Ozean, dem Mittelmeer und der großen eurasischen Kontinentalmasse. Diese Übergangssituation macht klimawirksame Abschätzungen besonders schwierig (Wanner & Schmutz, 2000, S. 31).

„Man denke etwa an die Wechselwirkungen von kontinentalen und ozeanischen Effekten im Winter oder an die unterschiedlichen Einflüsse der wichtigen Feuchtereservoirs des Mittelmeeres und des Atlantiks bei verschiedenen Strömungslagen und Jahreszeiten“ (Wanner & Schmutz, 2000, S. 31).

Zusätzlich stellt das Alpengebirge mit seinen höchsten Gipfeln zwischen 4400m und 4800m über dem Meeresspiegel und seiner mittleren Höhe von 2500m für anströmende Luftmassen ein markantes Hindernis dar (Wanner & Schmutz, 2000, S. 32).

Quertäler gliedern die Alpen in mehrere Segmente. Keines dieser Täler ist zur Gänze durchgehend. Allfällig querende Luftmassen müssen mindestens einen Pass überfließen. Die großen inneralpinen Längstäler wie beispielsweise das Wallis oder das Tirol sind gegen meridionale Strömungen gut abgeschirmt und weisen daher geringere Niederschlagsmengen auf (Wanner & Schmutz, 2000, S. 32).

Die Hörnchenform und Oberflächeneigenschaft der Alpen erweisen sich, angesichts der vorherrschenden Hauptwindrichtung West bis Nordwest, als wetterentscheidend. Bei starken Strömungen und Frontdurchgängen werden dadurch eine Reihe dynamischer Wetterphänomene ausgelöst (Abbildung 13), die das Klima kurzfristig beeinflussen (Wanner & Schmutz, 2000, S. 33).

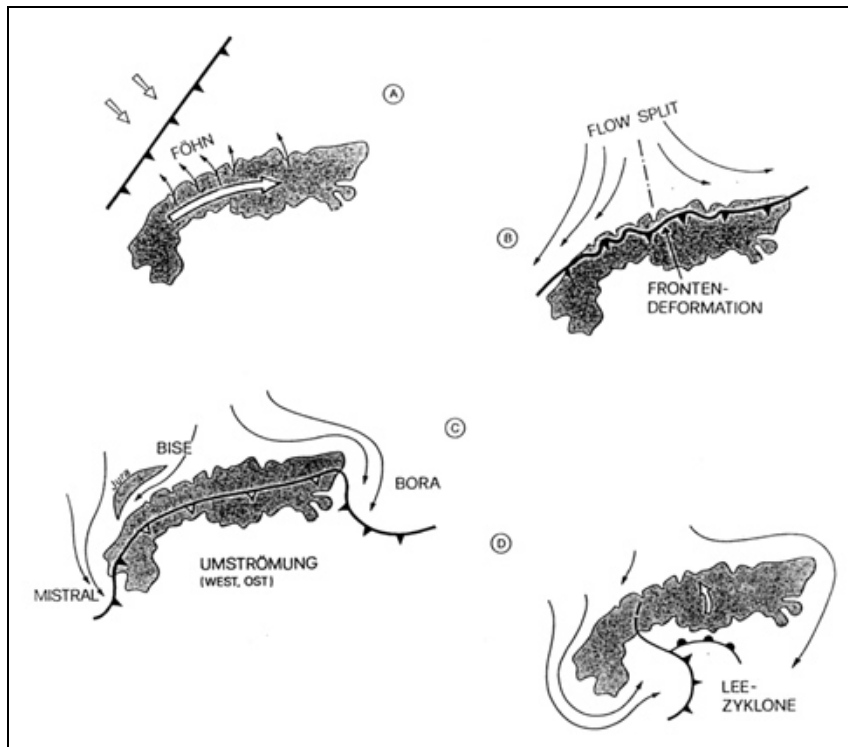


Abb. 13: Schematische Darstellung der dynamischen Vorgänge bei einem alpinen Kaltfrontdurchgang mit Leezyklonogenese: (A) Kaltfront mit seichtem Präfrontalföhn; (B) Blockierung mit Frontendeformation und Flow Split; (C) Umströmung der Kaltluft mit Bildung von Mistral, Bise und Bora; (D) Bildung der Leezyklone; (weiße Pfeile: Höhenströmung; schwarze Pfeile: Bodenströmung) (Wanner & Schmutz, 2000, S. 33).

Die Vorgänge in Abbildung 13 aus dem Bereich der meteorologischen Zeitskala (Stunden bis Tage) werden im Alpenraum sehr rasch klimawirksam.

Anhand dessen wird deutlich, wie klimatisch sensibel die Alpen auf Grund ihrer Form und Oberflächenbeschaffenheit reagieren bzw. welche Einflüsse auf Grund dessen wirksam werden. Dies lässt den Schluss zu, dass die Alpen auf natürliche großmaßstäbige und anthropogen verursachte Klimavariationen noch empfindlicher reagieren. Kromp-Kolb und Formayer (2001, S. 17) führen aus, dass globale Klimaänderungen im alpinen Raum überproportional ausfallen können.

Diese sensible Reaktion der Alpen auf Klimaveränderungen ist im Wesentlichen dadurch begründet, dass sich die Schneegrenze, Waldgrenze, Rasengrenze oder Permafrostgrenze schon bei geringfügigen Änderungen nach oben bzw. nach unten verschieben kann. Deshalb spielt der Alpenraum bei der Frage des anthropogen verstärkten Treibhauseffektes und der daraus resultierenden Klimaerwärmung eine wichtige Rolle (Haubner, 2002, S. 8). Der rasche Temperaturanstieg seit Mitte der

70er Jahre des vorigen Jahrhunderts im Alpenraum führte zu einem rasanten Rückzug der Gletscher sowie einer Verschiebung der Vegetation in höhere Lagen.

Aber nicht nur die Mittelwerte haben sich verändert, wie es aus rein statistischen Überlegungen sein sollte. Es sind vor allem die Extremwerte die sich veränderten. Ereignisse wie der Hitzesommer 2003 müsste nach Standardmethoden als zehntausendjähriges Ereignis eingestuft werden, und der Winter 2006/2007 ist mit Ausnahme von ein paar Föhnstrichen in ganz Österreich mit Abstand der wärmste seit Beginn der Beobachtungen (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 49).

5.1 Historischer Rückblick auf den Alpenraum bezüglich Temperatur und Niederschlag

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über die Klimaverhältnisse im Alpenraum seit dem 14. Jahrhundert gegeben werden. In diesem Zusammenhang soll auch die „Kleine Eiszeit“ Erwähnung finden, eine Periode relativ kühlen Klimas von Anfang des 15. Jahrhunderts bis in das 18. Jahrhundert, wobei der Beginn der „Kleinen Eiszeit“ zum Teil noch heute kontrovers diskutiert wird.

Grundsätzlich gilt die „Kleine Eiszeit“ in der heutigen Klimadiskussion als das klassische Beispiel einer durch kurzfristige Schwankung geprägten Klimavariation.

Die Klimarekonstruktionen basieren auf historischen Dokumenten (Wetteraufzeichnungen, Annalen, Chroniken), da die systematischen Wetteraufzeichnungen erst 1901 begonnen haben.

Das Klima im 14. und 15. Jahrhundert

Wie bereits einleitend erwähnt, wird der Beginn der „Kleine Eiszeit“ unterschiedlich datiert. Nach Lamb (1977, S. 449) begann die Klimawende zu kälteren Klimabedingungen zwischen 1200 und 1400. Schätzungen zufolge waren die mitteleuropäischen Winter zwischen 1300 und 1329 im Durchschnitt um mehr als

1°C kälter als jene in der vorangehenden Dreißigjahrperiode (Luterbacher, 2000, S. 83).

Eine Periode von sehr nassen und kühlen Sommern wie Herbstern mit viel Schnee in den Alpen dürfte Mitte des 14. Jahrhunderts einen markanten Gletschervorstoß ausgelöst haben (Luterbacher, 2000, S. 83).

Diese Ausprägung des Klimas setzte sich auch im 15. Jahrhundert fort und dehnte sich von West- und Zentraleuropa auch nach Osteuropa aus.

„Vor allem in den ersten 30 Jahren dieses Jahrhunderts zeigten sich in weiten Teilen nördlich der Alpen lange winterliche Kälteperioden als Folge von persistenten blockierenden Hochdrucklagen über Nordeuropa“ (Luterbacher, 2000, S. 84-85).

Für diesen Zeitraum wurden auch deutlich weniger Westwindlagen festgestellt. Darüber hinaus herrschten gegen Ende des 15. Jahrhunderts im Alpenraum sowie in Zentraleuropa generell kältere Situationen vor. Studien über die 1450er und 1460er Jahre ergaben deutlich kühlere Verhältnisse auf der gesamten Nordhemisphäre (Luterbacher, 2000, S. 85.)

Das Klima im 16. Jahrhundert

Die klimatischen Verhältnisse des 16. Jahrhunderts vor allem das zweite Drittel davon, war in weiten Teilen Europas durch etwas höhere Temperaturen als im vorangegangenen Jahrhundert gekennzeichnet. Dennoch gilt dieses Jahrhundert als das drittkälteste der vergangenen 1000 Jahre (Luterbacher, 2000, S. 85). Des weiteren kam es in dieser Periode zu regelmäßigen Kaltluftausbrüchen aus Norden bis Nordosten in Richtung Zentraleuropa. Darüber hinaus lassen sich generell weniger Westwindlagen nachweisen.

In der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts können für Österreich, Deutschland, Tschechien und Ungarn kalte und trockene Winter und Frühlinge nachgewiesen werden.

„Vor allem die Winter von 1586 bis 1595 sind in der Schweiz unter die kältesten der letzten 500 Jahre einzureihen mit – verglichen mit der Referenzperiode 1901 – 1960 – rund 2°C tieferen Temperaturen“ (Luterbacher, 2000, S. 86).

Das Klima des 17. Jahrhundert

Das 17. Jahrhundert gilt als das kälteste Jahrhundert des vergangenen Millenniums. Rekonstruktionen belegen, dass die Sommertemperaturen bis in die 1620er Jahre auf einem tiefen Stand verbleiben und eine Erwärmung erst später einsetzte. Diese kühlen Sommertemperaturen gingen im Alpenraum mit mehr Niederschlag einher. Der Sommer des Jahres 1601 gilt als der kälteste der letzten 600 Jahre (Briffa et al., 1998, S. 86).

Gegen Ende des 17. Jahrhunderts erfolgt in weiten Teilen Europas eine radikale Abkühlung, die bis weit nach 1700 als eines der kältesten Regime seit dem Ende der letzten Eiszeit vor über 10.000 Jahren in die Klimageschichte eingeht. Diese generelle Abkühlung ging mit geringen Niederschlagsmengen im Winter, Frühling und Herbst einher. Ursache hierfür scheinen blockierenden Hochdrucklagen zu sein (Luterbacher, 2000, S. 87-88).

„Die generelle Abkühlung ab der zweiten Hälfte des 17. Jahrhundert bis rund 1715 fällt zusammen mit einer Periode minimaler Sonnenaktivität mit minimaler Sonnenfleckenanzahl und, falls überhaupt, nur wenigen Polarlichtern“ (Luterbacher, 2000, S. 88). Diese Phase wird, wie bereits in Kapitel 3.1.2 erläutert, „Maunder Minimum“ genannt.

Das Klima des 18. Jahrhundert

Nach der kalten Periode des „Maunder Minimums“ erfolgte eine Klimaerholung. Dennoch blieben alle mittleren Temperaturen der jeweiligen Jahreszeiten unter den Werten des 20. Jahrhunderts.

Generell fielen die Sommer tendenziell feucht aus:

„Keine Jahreszeit wies während der gesamten „Kleinen Eiszeit“ so lange feuchte Perioden auf wie die Herbste zwischen 1770 und 1880“ (Luterbacher, 2000, S. 92).

5.2 Klimaveränderungen im Alpenraum im 19. und 20. Jahrhundert

Da das 19. und das 20. Jahrhundert eine wichtige Periode der Klimaforschung darstellen – es ist der einzige Zeitraum, in welchem effektiv gemessene Daten von atmosphärischen und ozeanischen Größen zur Verfügung stehen – wird diesen beiden Jahrhunderten ein eigenes Kapitel gewidmet.

In Europa wurden ab 1860 klimatologische zuverlässige Daten erhoben. Dem 19. Jahrhundert kommt zudem eine besondere Bedeutung zu, da das Klimasystem dieser Periode vom Menschen noch weitgehend unbeeinflusst war.

5.2.1 Klimatische Verhältnisse des 19. Jahrhundert im Alpenraum

Um 1800 kam es kurzfristig erneut zu einer Rückkehr in eine kältere Phase. Generell war das 19. Jahrhundert geprägt durch kühle Sommer und kalte Winter. Das Jahr 1816/1817 ging als das „Jahr ohne Sommer“ in die Geschichte ein. Dieser Sommer zeigte sich kalt und nass. Darüber hinaus schneite es in jedem Monat des Jahres 1816 mindestens einmal hinunter bis ins höhere Mittelland (Luterbacher, 2000, S. 92).

In manchen Gegenden wurden 1816 auch anthropogene Ursachen für das anhaltende schlechte Wetter diskutiert. Mancherorts begann man die Blitzableiter von den Dächern zu reißen, da man dachte sie wären die Ursache. Die Obrigkeit bemühte sich indes um Aufklärung. In der „Neuen Züricher Zeitung“ aus dem Jahre 1816 konnte man folgendes lesen:

Die einsichtigsten und redlichsten Naturkundiger haben auch überzeugend dargethan, daß die Wirksamkeit der Wetterableiter auf ihre Bestimmung, nämlich auf den Schutz der Gebäude, an denen sie angebracht werden, gegen das Einschlagen des Blitzes, beschränkt ist, und daß sie auf die Fruchtbarkeit oder Unfruchtbarkeit des Landes keinen Einfluß haben können.

Abb. 14: NZZ, 9.7.1816 (Luterbacher, 2000, S. 93)

Nach einer kurzen Erholung in den 30er Jahren des 19. Jahrhunderts folgte ein zweites Minimum. Die Zeit zwischen 1830 und 1840 gilt als die zweitkälteste Periode der vergangenen 1000 Jahre auf der nördlichen Hemisphäre (Luterbacher, 2000, S. 92).

„Die Niederschlagsmengen lagen auf der Alpennordseite sowie in anderen Regionen Europas ungefähr 10% unter den Werten des 20. Jahrhunderts. Die ununterbrochene Abfolge von sehr kühlen, nassen und in den Alpen schneereichen Sommern und Herbstern in den 1810er Jahren führte zu weitreichenden Gletschervorstößen“ (Luterbacher, 2000, S. 92).

Der Gletscherhöchststand um 1855 war einer der bedeutendsten Vorstöße seit rund 8200 Jahren (Luterbacher, 2000, S. 92).

5.2.2 Klimatische Verhältnisse des 20. Jahrhundert im Alpenraum

Die global gemittelte Temperaturkurve im 20. Jahrhundert zeigt, wie bereits erwähnt, nach oben und zwar um rund 0,6°C. Der Alpenraum ist laut Studien von dieser Erwärmung stärker betroffen. So fand das Forschungsteam um Helga Kromp-Kolb heraus, dass die Temperaturen in Österreich seit 1860/80 um 1,8°C mehr stiegen als im globalen Durchschnitt (Stadler, 2005, S. 120).

Auch die aktuelle Studie von „Start Clim“ (2006, S. 27-28), einem österreichischem Klimaforschungsprojekt unter der Leitung von Helga Kromp-Kolb geht davon aus, dass Österreich stärker als andere Länder vom Klimawandel betroffen ist.

Das Ende des 19. Jahrhunderts leitete eine wärmere Klimaperiode mit geringeren Temperaturschwankungen und normalen Niederschlagsmengen, verbunden mit einem kontinuierlichen Rückzug der Alpengletscher, ein. Der Übergang „Kleine Eiszeit - Gegenwart“ war um 1940 abgeschlossen (Wanner, 2000, S. 152).

Mit der Erwärmung im Alpenraum geht eine Zunahme der Niederschläge einher. Für den gesamten Alpenraum wurde für den Zeitraum 1818 - 1995 eine Zunahme der Niederschläge im Winter um bis zu 20 Prozent festgestellt (Wanner, 2000, S. 156). Anhand der Jahresmittel von Temperatur und Niederschlag auf dem großen Sankt Bernhard in der Schweiz lässt sich dieses Phänomen gut erkennen (Abbildung 15) (Wanner, 2000, S. 153).

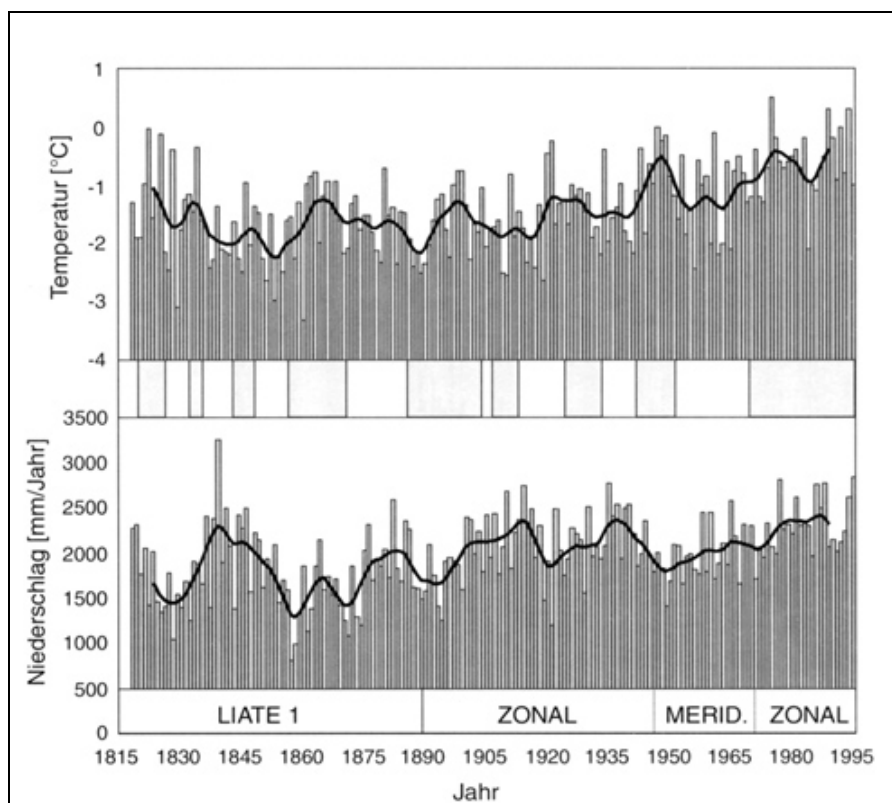


Abb. 15: Jahresmitteltemperatur und -niederschlag auf dem Großen Sankt Bernhard von 1818 bis 1995 (Wanner, 2000, S. 153).

Wo liegen nun die Gründe für diese Niederschlagszunahme?

Glogger (1998, S.33) geht davon aus, dass die Zunahme der anthropogenen Treibhausgase die Ursache der globalen Klimaerwärmung ist. Darüber hinaus führt die Klimaerwärmung zur Erwärmung des Meerwassers im Nordostatlantik. Diese erhöhte Wassertemperatur führt zu verstärkter Verdunstung. Für Europa relevante Großwetterlagen werden dadurch beeinflusst, was möglicherweise der Grund für einen verstärkten Feuchtigkeitstransport gegen die Alpen ist (Gyalistras, 2000, S. 163).

Seit etwa 30 Jahren wird eine verstärkte Westwindzirkulation festgestellt. Bei erhöhter Geschwindigkeit haben die Luftmassen auch die Tendenz Gebirge zu überfließen anstatt seitlich auszuweichen. Durch diese Hebungsvorgänge der Luftmassen wird die Niederschlagsaktivität zusätzlich verstärkt.

„Andererseits ist die Luftfeuchtigkeit direkt abhängig von der Lufttemperatur. Bei einer Erwärmung um 1°C ist eine Zunahme der absoluten Luftfeuchtigkeit von ungefähr 8% zu erwarten“ (Stadler, 2005, S. 122).

6 Die zukünftige Entwicklung des Klimas im Alpenraum

Voraussagen über ein zukünftiges Klima in den Alpen stellen angesichts einer Reihe von Unsicherheiten eine große Herausforderung dar. Die Unsicherheiten ergeben sich zum Einen aus der großen Komplexität des Klimasystems sowie der großen natürlichen Variabilität des Klimas und zum Zweiten sind die empirischen und theoretischen Kenntnisse des Klimasystems limitiert, so dass mit immer neuen überraschenden Erkenntnissen gerechnet werden muss. Darüber hinaus ist der Verlauf der Antriebsfaktoren für das globale und regionale Klima, wie beispielsweise Sonnenaktivität, Vulkanismus, Emissionen von Treibhausgasen oder Änderungen in der Landnutzung, grundsätzlich unsicher.

Die erwartete globale Klimaänderung wird das Klima des Alpenraums voraussichtlich gleich auf mehrere Arten beeinflussen (Gyalistras, 2000, S. 163):

- über Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation

- über Veränderungen von Temperatur und des Feuchtegehalts der dem Alpenraum zugeführten Luftmassen
- Veränderungen von speziell das regionale Klima mitprägende Faktoren wie Vegetation und Schneedecke

All diese Faktoren sind auf das Klima des Alpenraums über zahlreiche, komplexe Wechselwirkungen miteinander verbunden.

Nach Gyalistras (2000, S. 163) kommt den Zirkulationsveränderungen jedoch eine Schlüsselrolle zu, denn die Zirkulation prägt das Regionalklima (z.B. über die mittleren langfristigen Häufigkeiten der wichtigen Wetterlagen) und sie ist die Quelle für die große kurz- und langfristige Variabilität unseres Wetters.

Eine Möglichkeit, um trotz dieser schwierigen Ausgangslage zu brauchbaren zukünftigen klimabezogene Aussagen für den Alpenraum wie auch auf globaler Ebene zu gelangen, sind Klimamodelle.

6.1 Klimaänderungsszenarien für den Alpenraum

Wie könnte sich das Klima in den nächsten Jahrzehnten verändern?

Wird von plausiblen Annahmen über die zukünftige globale sozioökonomische Entwicklung (mögliche Emissionsszenarien) ausgegangen, ist es möglich physikalisch mehr oder weniger konsistente Szenarien für das zukünftige Klima herzuleiten. Diese Szenarien basieren auf Simulationen der „General Circulation Models“ (GCM). Diese GCMs überziehen, wie bereits in Kapitel 5 erwähnt, die Erde mit einem Gitternetz (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 61).

Die Gitterpunktabstände betragen rund 100 km, sodass die Topographie der Alpen in den Modellen nur sehr grob dargestellt ist. Um regionale Klimaszenarien abzuschätzen, müssen somit die von den GCMs simulierten großräumigen Klimaveränderungen in einem separaten Schritt auf die regionale Skala übersetzt

werden. Dieses Verfahren kann auf zwei Arten erfolgen (Kromp-Kolb & Formayer, 2005, S. 61):

1. Empirische Anpassung (Empirical Approach):

Hierbei werden mit Hilfe lang zurückreichender Messreihen, historische Klimabedingungen der letzten Jahrhunderte rekonstruiert (Stadler, 2005, S.123).

2. „Klimaregionalisierung“ oder „Downscaling“:

Die Klimaregionalisierungsmethode erlaubt es, großräumige Klimaveränderungen, wie sie in den GCMs simuliert werden, auf eine regionale Ebene zu übertragen. Hierfür müssen jedoch zunächst aus vorhandenen Messreihen die empirischen Zusammenhänge zwischen großräumigen und lokalen bzw. regionalen Klimaschwankungen ermittelt werden (Stadler, 2005, S.123).

Die daraus resultierenden statischen Modelle können dann auf den Output der GCMs angewendet werden und dienen zur Abschätzung der regionalen Klimaänderungen (Gyalistras & Schär, 1998, S. 184 -185).

Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass Aussagen über etwaige Klimaveränderungen von verschiedensten Klimaparametern mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung gemacht werden können. Jedoch wird lediglich der Einfluss von großräumigen Veränderungen auf die lokalen Klimate berücksichtigt. Diese Methode kann mit vertretbarem Aufwand auf mehrere globale Zirkulationsmodelle angewendet werden. „Ferner beruhen alle durch „Downscaling“ erhaltenen Resultate auf der kritischen Annahme, dass die statistischen Zusammenhänge zwischen den großräumigen und lokalen Gegebenheiten auch unter veränderten Klimabedingungen gültig sind“ (Stadler, 2005, S. 123).

Trotz der verschiedenen Methoden, die es ermöglichen aus den GCM regionale Aussagen zu generieren, sind die Ergebnisse für das komplexe Gebilde der Alpen noch nicht befriedigend.

6.1.1 Temperatur

Bezüglich der Temperaturzunahme im Alpenraum kommen Klimaforscher zu unterschiedlichen Ergebnissen. Dennoch sind sich alle in punkto Temperaturzunahme einig. Die Klimaforscher Helga Kromp-Kolb und Herbert Formayer (2001, S. 17) errechneten im Zuge einer Regionalisierung eines GCM-Szenarios, ausgehend von einer globalen Erwärmung von 1°C bis 2°C für Österreich, eine Temperaturzunahme von 2°C - 3,5°C bis 2035.

6.1.2 Niederschlag

Im 21. Jahrhundert werden allen Klimamodellen zufolge die Niederschläge im Alpenraum ansteigen. Starkniederschlagsereignisse, wie wir sie etwa aus der Katastrophe von Galtür kennen, werden tendenziell ebenfalls ansteigen. Dennoch sind laut Forscher diese Trends auch im Alpenraum regional unterschiedlich. So war bislang die Alpennordseite niederschlagsreicher als die Alpensüdseite. Dies könnte sich zukünftig umkehren (Stadler, 2005, S. 125).

Ein alpenspezifisches Klimaszenario erwartet ein Niederschlagsplus von 40 Prozent im Winter an der Alpensüdseite. An der Alpennordseite wird lediglich eine Zunahme von 5 Prozent erwartet. Diese erwartete Umkehrung hängt mit der auf Grund des anthropogenen Treibhauseffektes angenommen Veränderung der „Nordatlantischen Oszillation“ zusammen, die das großräumige Wettergeschehen für Europa beeinflusst (Stadler, 2005, S. 125).

„Andere, nicht regionalspezifisch gearbeitete Prognosen gehen wiederum von einer Zunahme der Niederschläge in Nordeuropa (nördlich von 45° Breite) vor allem im Winter aus, die sich wiederum verstärkt als Starkniederschläge äußern werden und einer Abnahme der Niederschläge besonders im Sommer im Süden Europas“ (Stadler, 2005, S. 125).

Der Klimatologe Veit (2002, S. 276) geht ebenfalls von einem Wandel der regionalen Niederschlagsregime in den Alpen aus. Hingegen sieht er eine maximale Zunahme von 20 Prozent und eine eventuelle Abnahme im Sommer und Herbst.

6.2. Klimaänderungsszenarien für den Alpenraum in Hinblick auf die Nordatlantische Oszillation

Die Wetterlagen in Europa werden durch persistente Druckgebilde, wie dem Islandtief und dem Azorenhoch über dem Atlantik, gesteuert (Formayer et al., 2001, S. 29).

„Die relative Lage dieser beiden Druckzentren unterliegt quasi-zyklischen, etwa dekadischen Schwankungen die als Nordatlantische Oszillation (NAO) bezeichnet werden“ (Formayer et al., 2001, S. 29).

Die Nordatlantische Oszillation ist der Haupteinflussfaktor der Häufigkeitsverteilung europäischer Großwetterlagen (der großräumigen Hoch- und Tiefdruckgebiete) und damit der Klima- und Wettersituation in den Alpen (Abbildung 16) (Formayer et al., 2001, S. 29).

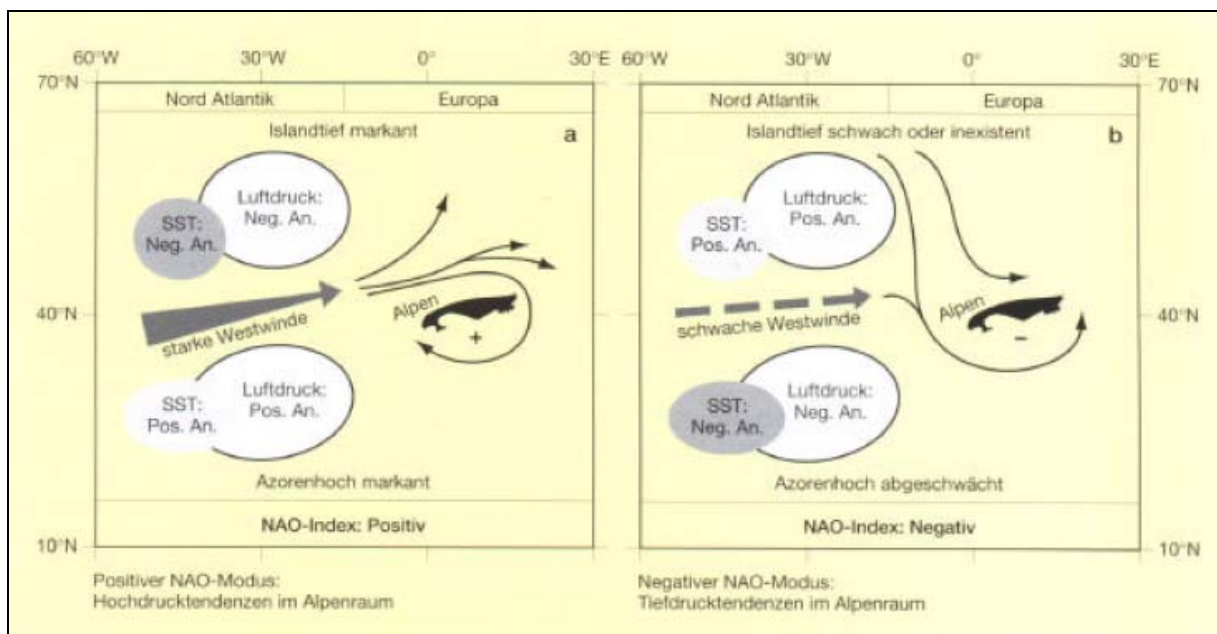


Abb. 16: Schematische Darstellung der Nordatlantischen Oszillation (links positive Phase, rechts negative Phase) (Formayer et al., 2001, S. 29).

Die NAO ist für rund ein Drittel der Temperaturschwankungen der Nordhemisphäre verantwortlich. Seit Beginn der 80er Jahre befindet sich die NAO in einer extremen Positivphase. Dieser Umstand trägt wesentlich zum beobachteten Temperaturanstieg über Europa bei (Formayer et al., 2001, S. 29).

Befindet sich die NAO in einer positiven Phase, bedeutet dies einen kühlen Nordwestatlantik. Diese zieht ein ausgeprägtes Islandtief und ein ausgeprägtes Azorenhoch nach sich. Die daraus resultierenden, starken Westwinde dringen vom Atlantik nach Europa ein und blockieren die arktische Nordströmung. Im Alpenraum führt diese Situation zu einem höheren Luftdruck mit relativer Trockenheit und tendenziell höheren Temperaturen. Daraus ergeben sich für den Alpenbogen geringere Niederschläge.

Eine negative NAO Phase beschreibt warme Wassermassen im Nordwestatlantik, ein schwaches Islandtief sowie ein schwaches Azorenhoch und als Folge auch schwache Westwinde. Von Norden können dadurch arktische Luftmassen eindringen, die dem Alpenraum niedrigere Temperaturen und erhöhte Niederschläge zuführen. In dieser Phase befindet sich über den Alpen ein Tiefdruckgebiet (Formayer et al., 2001, S. 29-30).

Die Erwartungen verschiedener Experten über die zukünftige Entwicklung sind sehr vielfältig und zum Teil widersprüchlich. Deshalb kann für die Druckverhältnisse in den Alpen bzw. für den NAO Index keine Prognose abgegeben werden.

„Falls die anthropogenen Treibhausgasemissionen keinen Einfluss auf die NAO Phasen haben – und Gegenteiliges ist nicht bewiesen – könnte der NAO Index in den nächsten Jahren nach seinem allgemeinen Schwankungsmuster wieder in eine negative Phase zurückspringen. Dafür spricht, dass es – solange Messdaten und Proxydaten zur Verfügung stehen – noch keine so starke und lang andauernde positive NAO Phase wie jene seit 1970 gegeben hat. Manche meiner bereits erste Anzeichen für ein Zurückspringen der NAO in eine negative wahrnehmen zu können“ (Formayer et al., 2001, S. 30).

Für Europa würde dies tiefere Temperaturen, geringerer Druck und ein vermehrtes Eindringen von feuchten arktischen Luftmassen bedeuten. Niederschläge und Starkniederschläge werden sich in einem negativen NAO Szenario verstärken. Dies

führt auch zu einer Zunahme der Windgeschwindigkeiten und der Sturmaktivität im Alpenraum (Formayer et al., 2001, S. 30).

Formayer et al. (2001, S. 30) führt aus, dass, falls die NAO in den nächsten 10 Jahren nicht in eine negative Phase zurückspringt, auch ohne direkten Beleg und ohne die genaue Wirkungsweise zu kennen angenommen werden kann, dass die NAO von der Klimaänderung beeinflusst wird, was bedeutet, dass die anthropogenen Treibhausgase das regionale Klima- und Wettergeschehen über Europa direkt mitbestimmen.

Ein Forschungsteam um den Klimaforscher Gyalistras (2000) hat 33 Klimaänderungssimulationen mit 24 verschiedenen Modellkonfigurationen – diese wurden in den letzten 20 Jahren an sieben Forschungszentren durchgeführt – bezüglich des Einflusses der atmosphärischen Zirkulation analysiert.

Bei den 33 Simulationen handelte es sich um zwölf Simulationen mit einfachen Mischungsschicht-Ozeanmodellen, zwölf weiteren Simulationen mit gekoppelten atmosphärisch-ozeanischen „General Circulation Models“ (GMCs) sowie um neun Zeitscheibenexperimente. Diese Klimamodelle sind europäischen, US-amerikanischen und kanadischen Ursprungs (Gyalistras, 2000, S. 165).

Bei den Zeitscheibenexperimenten werden mögliche Veränderungen der Meeresoberflächentemperaturen sowie weitere Randbedingungen für die Atmosphäre (z.B. Verteilung des Meereises) nicht berechnet, sondern einer transienten Simulation mit einem voll gekoppelten atmosphärisch-ozeanischen „General Circulation Model“ entnommen (Gyalistras, 2000, S. 165-166).

Bei einem Großteil der Simulationen wurde der Effekt von anderen Treibhausgasen als CO₂ (wie beispielsweise Methan, CH₄, oder Lachgas, N₂O) nur vereinfacht dargestellt, indem eine etwas höhere CO₂-Konzentration angenommen wurde (Gyalistras, 2000, S. 166).

Neuere Modelle beziehen auch das Forcing durch Sulfataerosole mit ein, da diese das Klima direkt wie auch indirekt beeinflussen. Das direkte Forcing ergibt sich durch

die Streuung und Reflexion der Sonnenstrahlen an den Sulfatpartikeln, das indirekte Forcing erfolgt dadurch, das Sulfatpartikel als Kondensationskeime für Wolkentröpfchen dienen und dadurch die Wolkenalbedo erhöhen (Gyalistras, 2000, S. 166).

Nach Auswertung der 33 Simulationen durch das Forscherteam lagen für 32 der 33 Simulationen Angaben zur Zirkulationsveränderungen im Winter und für 20 Simulationen Angaben zum Sommer vor. In sieben Fällen lagen Informationen über mögliche Veränderungen in jährlich gemittelten Größen vor und für die Übergangsjahreszeiten konnten nur in vier Simulationen entsprechende Angaben gefunden werden (Gyalistras, 2000, S. 167).

Durch die beschränkte Datenlage wurden in der Analyse der Klimaforscher nur die Resultate für den Winter und Sommer näher vorgestellt. Der Winter umfasst die Periode von Dezember bis Februar, der Sommer die Periode Juni bis August.

Die meisten Informationen konnten aus den reinen Treibhausgas-Forcing-Simulationen für den Winter gewonnen werden (Gyalistras, 2000, S. 167).

Die Klimaforscher kamen in ihrer Analyse zu Folgendem Ergebnis (Gyalistras, 2000, S. 182):

Die betrachteten Klimamodelle lieferten je nach Zirkulationsmerkmal zum Teil völlig entgegengesetzte Szenarien. Der Großteil der europäischen Modelle prophezeit eine Intensivierung der Zirkulation im Nordatlantik. US-amerikanische und kanadische Modelle simulieren tendenziell eine Abschwächung der Zirkulation. Dennoch weisen alle Klimaszenarien darauf hin, dass ein Fortschreiten der globalen Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten komplexe und signifikante Veränderungen der nordatlantisch-europäischen Zirkulation hervorrufen könnten (Gyalistras, 2000, S. 181).

Diese Veränderungen können signifikante Auswirkungen auf das Niederschlagsklima der Alpennord- wie Alpensüdseite zur Folge haben. Niederschlagsanomalien, die in den letzten Jahren im Alpenraum beobachtet wurden, liefern gewissermaßen den Beweis hierfür (Gyalistras, 2000, S. 196).

Auf Grund der großen Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen globalen sozioökonomischen Entwicklung, der vereinfachten Darstellung der alpinen Topographie innerhalb der Klimamodelle sowie sehr rasch ablaufender und kleinräumiger wetterwirksamer Prozesse (z.B. Wolkenbildung oder Interaktionen zwischen der Atmosphäre und der Landoberfläche), können die Auswirkungen auf das alpenraumspezifische Klima nicht präzise vorausgesagt werden (Gyalistras, 2000, S. 226). Deshalb ist es auch der Forschergruppe um Gyalistras nicht möglich objektiv nachprüfbare Eintrittswahrscheinlichkeiten für Klimaszenarien des Alpenraums abzugeben.

Darüber hinaus gibt es noch keine anerkannte Methode, um die Güte von Klimamodellen objektiv zu erfassen. Vor allem nicht in Hinblick auf die Zirkulation der mittleren Breiten. Limitierungen bei der zur Verfügung stehenden empirischen Datenbasis, Unsicherheiten bei den Initialbedingungen und Forcings sowie die große natürliche Variabilität des Klimas spielen auch eine große Rolle (Gyalistras, 2000, S. 235).

7 Mögliche Folgen des Klimawandels im Alpenraum

Die möglichen Auswirkungen derartiger Veränderungen auf den Alpenraum sind äußerst vielschichtig und sicherlich nicht in ihrer gesamten Komplexität erfassbar. Es gibt jedoch eine Reihe von Veränderungen, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eintreten werden bzw. die schon in der Gegenwart und in der jüngeren Vergangenheit zu beobachten sind. Die prognostizierte Temperaturerhöhung würde nicht nur Auswirkungen auf die Schneesicherheit einer Vielzahl von alpinen Wintersportorten haben und somit ökonomische Folgen mit sich bringen, sondern auch zu ökologischen Folgen führen.

Die schwerwiegendsten Auswirkungen des Klimawandels werden in den folgenden Kapiteln näher besprochen.

7.1 Auswirkungen auf die Vegetation

Die erwarteten klimatischen Veränderungen wirken auf die Vegetation in mehrfacher Hinsicht. Temperaturerhöhung und Niederschlagsänderung bewirken vertikale und horizontale Wanderungsbewegungen der Pflanzen. Nicht alle Pflanzenarten werden mit diesen Veränderungen Schritt halten können. Sensible Pflanzenarten werden von anpassungsfähigeren Pflanzen verdrängt (Stadler, 2005, S. 126-127).

Die Änderungen des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre beeinflusst die Photosynthese. Darüber hinaus sind auch geomorphologische und mechanische Prozesse zu beachten, bei denen es durch eine veränderte Landschaftsdynamik zu einer Zunahme von Massenbewegungen wie Felsstürzen, Murenabgängen oder Rutschungen kommt. Diese Vorgänge verändern die Vegetationsbedeckung in großem Umfang (Stadler, 2005, S. 127).

Zwei Schweizer Studien, die vom Botanischen Institut in Basel durchgeführt wurden, untersuchten die Langzeitreaktion von alpiner Vegetation in Zusammenhang mit einem erhöhten CO₂-Angebot in natürlicher Umgebung (Glogger, 1998, S. 87).

In der ersten Studie wurde alpiner Rasen an einem exponierten Standort in 2500m Seehöhe untersucht. Alle Wachstumsfaktoren mit Ausnahme des CO₂- Angebots entsprachen den natürlichen ökologischen Bedingungen. Um diesen Bedingungen zu simulieren, wurden nach oben offene Plexiglaskammern eingesetzt, die zusätzlich mit CO₂ versorgt wurden. Die Ergebnisse unter veränderten Wachstumseinflüssen wurden mit jenen Ergebnissen unter normalen Wachstumseinflüssen verglichen (Glogger, 1998, S. 87).

Zunächst stieg die Kohlendioxidaufnahme zu Versuchsbeginn markant auf über 40 Prozent und führte zu einem Anstieg der Photosynthese. Von Jahr zu Jahr wurde dieser Effekt jedoch geringer. Nach lediglich vier Jahren war der Effekt zur Gänze verschwunden. Die Pflanzen passten sich an die neuen Verhältnisse an und kehrten zu ihrem normalen Wachstumsrhythmus zurück. Auch zusätzliche Düngung konnte die Pflanzen nicht zur Beibehaltung der erhöhten Photosyntheseraten animieren. (Glogger, 1998, S. 87-88).

Veit (2002, S. 286) kam in einer anderen Studie zu folgendem Ergebnis:

Der erhöhte anthropogene Stickstoffeintrag durch Düngung aus der Landwirtschaft, Autos und atmosphärischer Ferneintrag hat weit negativere Effekte als der CO₂-Anstieg. Durch Sättigung der Böden mit Schadstoffen versauern diese.

Die zweite Studie im Rahmen der Forschungsreihe des Botanischen Institutes in Basel befasste sich mit den Auswirkungen des erhöhten CO₂ - Angebots bezüglich des Waldes.

Dieses Projekt wurde im Labor durchgeführt und dauerte drei Jahre. Die Ergebnisse waren ähnlich jenen zu den Alpenrasen. Beim Wald führt jedoch ein erhöhtes CO₂- Angebot zu einer verstärkten Investition in die Wurzeln der Bäume. Die Baumkronen hingegen lichten tendenziell etwas auf (Glogger, 1998, S. 88-89).

Der erhöhte CO₂-Eintrag bewirkt somit eine verstärkte Abgabe der Photosyntheseprodukte über die Wurzeln auf Kosten des Ast- und Nadelwerks. Wie auch beim alpinen Rasen verstärkt sich die Photosynthese bei erhöhtem CO₂-Angebot nur in den ersten Jahren (Glogger, 1998, S. 89).

Grundsätzlich lässt sich aus den Experimenten mit den Pflanzen schließen, dass kaum zwei Pflanzenarten identisch auf eine CO₂-Anreicherung in der Atmosphäre reagieren. Dennoch werden sich die Artenzusammensetzungen verändern. Einige Arten werden vom zusätzlichen CO₂ Eintrag profitieren, andere werden verlieren. Schnellwüchsige, klimasensiblere Arten werden von langsamwüchsigen, klimarobusten Arten verdrängt. Damit wird das Ökosystem instabiler und anfälliger für extreme Witterungsbedingungen (Glogger, 1998, S. 105).

7.2 Abschmelzen von Gletschern

Das Phänomen Klimawandel ist schwierig sichtbar zu machen. Gletscher und deren Vorfelder eignen sich mitunter gut dazu die Klimaerwärmung zu veranschaulichen.

Wissenschaftler gehen davon aus, dass rund 90 Prozent der alpinen Gletscher in den letzten Jahrzehnten mehr als die Hälfte ihrer Substanz verloren haben (Gspan & Scheiber, 2007, S. 22).

Die Hauptursachen, die zu diesem eklatanten Gletscherschwund in den europäischen Alpen führen sind die gestiegenen durchschnittlichen Sommertemperaturen und die abnehmende Frequenz sommerlicher Schneefälle (Winkler, 2002, S. 44).

Gleichzeitig sorgen die gestiegenen Lufttemperaturen im Winterhalbjahr und die die Verdunstung begünstigenden gestiegenen Temperaturen der Meeresoberfläche für eine Zunahme der Winterniederschläge in maritimen Gebirgsregionen (Südnorwegen, Neuseeland), was dort wiederum zu einem Massengewinn der Gletscher und zu einem Gletschervorstoß führt (Winkler, 2002, S. 46).

Deutliche Rückgänge sind jedoch auch an der winterlichen Packeisgrenze im nördlichen Polarmeer zu bemerken (Formayer et al., 2001, S.15).

Plötzliche Längen- und Flächenänderungen von Gletschern sind die ersten Anzeichen von Klimaänderungen, dennoch können Gletscher bis zu 40 Jahre verspätet auf klimabedingte Änderungen reagieren. Daraus folgt, dass das, was wir heute erleben, möglicherweise die Folge von den Ereignissen vor rund 40 Jahren ist.

Die letzten markanten Gletschervorstöße der Alpengletscher erfolgten um 1850 und 1880. Seit dieser Zeit befinden sich die Alpengletscher auf dem Rückzug. Dies erfolgte wie bereits angesprochen nicht kontinuierlich, sondern in Schüben. Seit dem Höchststand von 1850 haben die alpinen Gletscher rund die Hälfte ihrer Masse verloren (Formayer et al., 2001, S.15).

In den Ostalpen verlor beispielsweise die Goldberggruppe in den Hohen Tauern zwischen den Jahren 1850 und 1992 drei Viertel ihrer Gletscheroberfläche (Formayer et al., 2001, S.16). In den Ötztaler Alpen verlor der Hintereisferner in nur 13 Jahren, nämlich zwischen 1982 und 1994, im Mittel zehn Meter an Eisdicke und im Nationalpark Hohe Tauern zog sich die Gletscherfläche von 1969 bis 1990 trotz des

dazwischenliegenden leichten Gletschervorstoßes in den 70er Jahren um rund 10 Prozent zurück (Formayer et al., 2001, S.16). Diese Liste ließe sich noch erweitern.

„Die seit Anfang des 20. Jahrhunderts in Österreich an rund 100 Gletschern durchgeführten kontinuierlichen Längenänderungsbeobachtungen zeigen auf, dass in den letzten Jahren praktisch kein Gletscher in Österreich mehr vorstößt und die meisten sich zurückziehen“ (Formayer et al., 2001, S.16).

Dieser Gletscherrückzug wurde von einer Erhöhung der mittleren Temperatur, von lediglich 1 bis 2 Grad und einem daraus resultierendem Ansteigen der so genannten Gleichgewichtslinie (oberhalb dieser entsteht über Firn neues Gletschereis, unterhalb schmilzt der Gletscher ab) um ca. 100 Meter, verursacht (Kuhn, 2005, S. 40).

Zukünftige Entwicklungen sind in Abhängigkeit von den regionalen Klimamodellen wiederum sehr uneinheitlich. Jedoch ist deutlich ersichtlich, dass die Mehrheit der Forscher mit weiteren enormen Verlusten rechnet. Einige Szenarien sprechen davon, dass in etwa 50 bis 60 Jahren nahezu sämtliche Gletscher der Alpen verschwunden sein werden (Kuhn, 2005, S. 40).

Da die Gletscher der Ostalpen (Österreich) nicht so hoch liegen wie jene in den Westalpen (Schweiz und Frankreich), wird der Rückzug hier noch schneller verlaufen als im Durchschnitt.

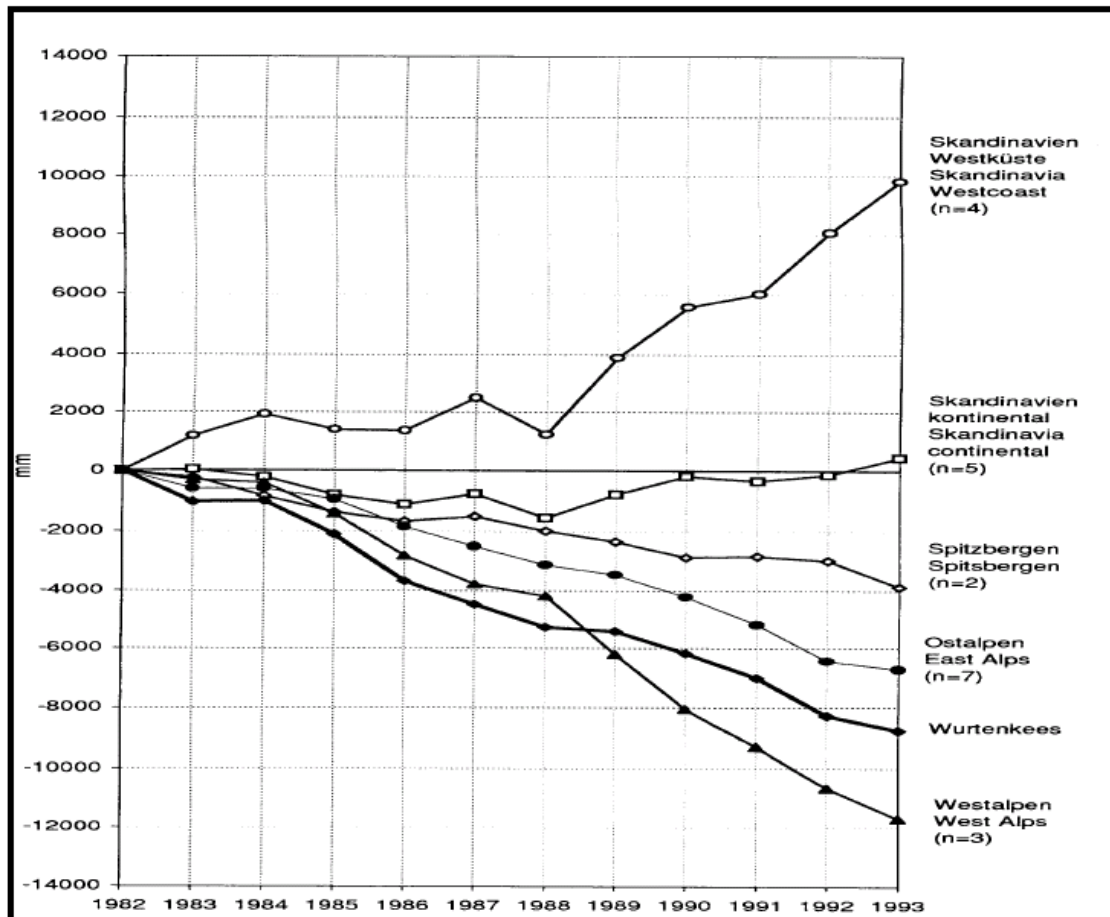


Abb. 17: Die Änderung der Gletscher in fünf europäischen Regionen zwischen 1982 und 1993. Die Vertikalachse stellt den kumulativen Eisverlust gemittelt über die gesamte Gletscherfläche in Wasseräquivalent [mm] dar. 10 000 mm Abnahme entsprechen zirka einem Abschmelzen von 11 Meter Eis. Die Zunahme der Gletscher an der Westküste Skandinaviens kann durch höhere Niederschläge erklärt werden (Kromp-Kolb, 1998, S. 2).

Um eine genauere Vorstellung der Gletscherfluktuation zu bekommen, werden seit 1952 an einigen Gletschern Massenbilanzbestimmungen durchgeführt. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse dieser Messungen für die Ötztaler Alpen, die Silvrettagruppe und die Hohen Tauern zusammengefasst.

Die Jahresnettomassenbilanz in mm gibt den über die gesamte Gletscherfläche gemittelten Massengewinn bzw. Massenverlust in mm Wasseräquivalent pro m² an. Eine Änderung von ± 1000 mm entspricht hierbei einem Zuwachs bzw. einem Abschmelzen von 1,1 m Gletschereis (Formayer et al., 2001, S.16).

Es ist deutlich erkennbar, dass in allen drei Gebirgszügen seit Beginn der 80er Jahre fast ausschließlich negative Massenbilanzen beobachtet wurden (Slupetzky, 2005, S. 53).

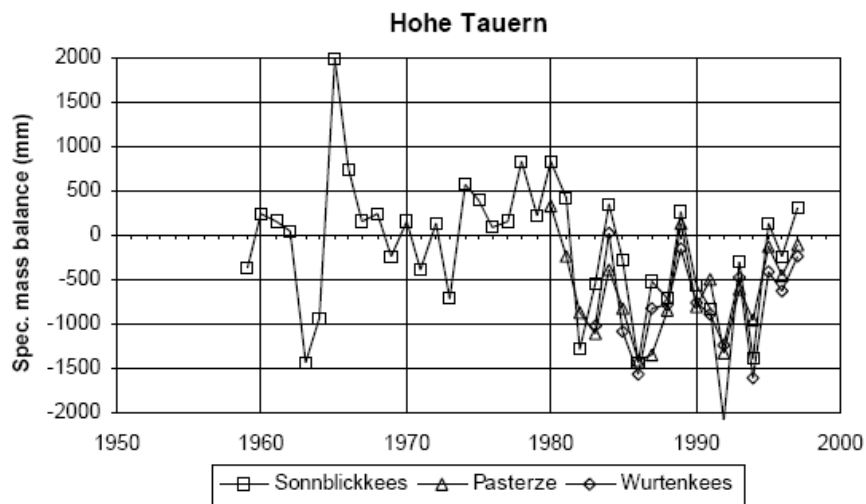
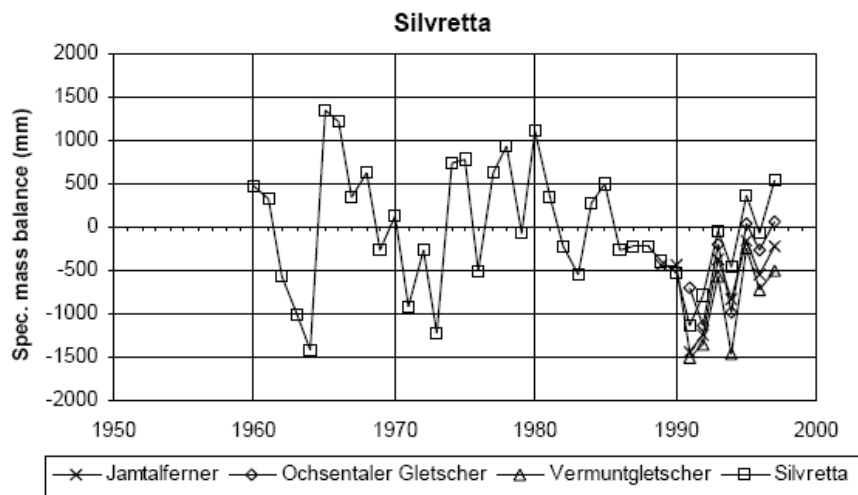
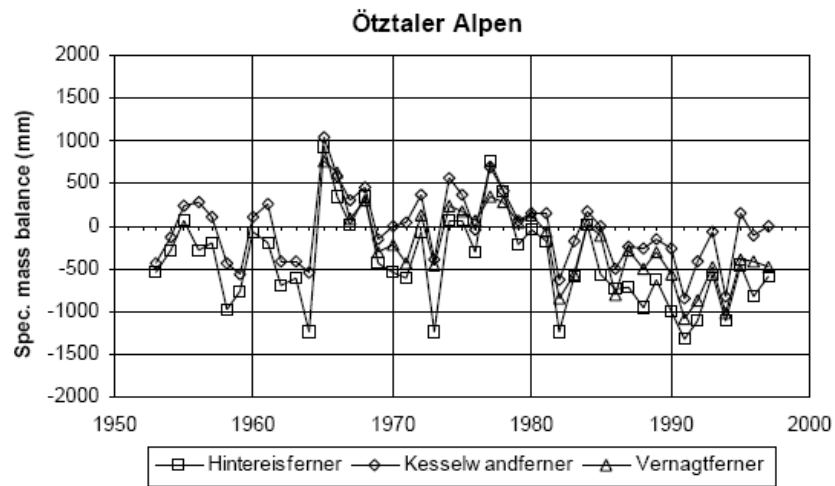


Abb. 18: Verlauf der Nettomassenbilanz von Gletschern in den letzten 50 Jahren in drei Gebirgszügen Österreichs (Formayer et al., 2001, S.17-18).

Der Gletscherrückzug bringt ebenfalls Auswirkungen und Gefahren mit sich. So werden unter anderem unverfestigte Böden (Permafrostböden, d.h. ständig gefrorene Böden, die im Sommer nur oberflächlich auftauen) freigelegt und der Strahlungshaushalt des betroffenen Gebietes wird durch die verminderte Albedo (Rückstrahlvermögen von nicht selbst leuchtenden Oberflächen) verändert. Darüber hinaus geht die ausgleichende Wirkung der Gletscher auf das Abflussverhalten alpiner Flüsse verloren (Kuhn, 2005, S. 40).



Abb. 19: Gletscherrückzug am Beispiel des Vernagtferners in den Ötztaler Alpen mit Blick von der Kreuzspitze in 3.455m Höhe (Braun & Weber, 2005, S. 43).

7.2.1 Auftauen von Permafrost

Durch das Abschmelzen der Gletscher werden Permafrostböden, d.h. Böden, die im Sommer nur oberflächlich auftauen, freigelegt.

Permafrostböden sind in den Alpen ab etwa 2400m Höhe möglich und über 3000m Höhe sicher vorhanden. Die Untergrenze des Permafrostbereichs ist in den letzten 100 Jahren vor allem in der Schweiz um rund 150 bis 250m gestiegen (Formayer et al., 2001, S.17).

So ist beispielsweise am Corvatsch (3.451m ü. M.) in Graubünden, die Bodentemperatur laut Messungen in 11m Tiefe seit 1987 jährlich um rund 0,1°C angestiegen. Dieser Umstand erhöht die Wahrscheinlichkeit von Massenbewegungen, wie zum Beispiel Bergstürze, da der Permafrost als Bindemittel fungiert und lockeres Gesteinsmaterial zusammenhält. Erinnern wir uns an den Felssturz am Eigermassiv im Juli 2006, bei dem 500.000. Kubikmeter Felsen in Bewegung geraten sind (<http://www.tagesschau.de/ausland/meldung108282.html> [Zugriff am 7.August.2008]).

Darüber hinaus sind Murenabgänge und Gletscherhochwasser auch auf das Auftauen von Permafrostbereichen zurückzuführen. „So ging rund die Hälfte aller im gesamten Alpengebiet verzeichneten Gerinnegänge im Jahr 1987 von Permafrostgebieten oder Gletscherrückzugszonen aus“ (Formayer et al., 2001, S.17).

Ein weiteres Problem ergibt sich durch Setzungen von Gebäude- und Seilbahnfundamenten, die in Permafrostgebieten errichtet wurden und durch den Auftauprozess instabil werden könnten.

8 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wintersport

8.1 Exkurs: Bedeutung des Wintertourismus für die österreichische Wirtschaft

8.1.1 Der Beginn des Wintertourismus in den Alpen

Die Erschließung des winterlichen Gebirges durch den Schillauf legte, an der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert, den Grundstein für das „Alpenerlebnis für alle“. Dem Niederösterreicher Mathias Zdarsky (1856 - 1940) gelang es, durch die Entwicklung eines optimalen Ski-Bindung-Systems und einer darauf abgestimmten alpinen Schilauflauftechnik, den Skilauf zu revolutionieren. Dieses System, bei dem der Schuh durch eine Stahlplatte fest mit dem Ski verbunden war und es dennoch gelang die Ferse vom Ski abzuheben, erlaubte es, auch die steilsten Hänge in rhythmischen Bögen zügig und sturzfrei zu befahren (Dettling, 2005, S. 213).

Der Sieg des alpinen Skilaufs nach Zdarsky über die nordische Richtung war jedoch ein deutsch-englisches Produkt, das von der Werbewirksamkeit der wettkampforientierten Ausprägungsform des Alpensports profitierte (Dettling, 2005, S. 214).

Der Hochalpinist und Freund Zdarskys W. Rickmer Rickmers, lehrte die alpine Schilauflauftechnik zunächst in der Schweiz vor allem englischen Touristen. Dadurch entdeckte Sir A. Lunn 1922 den alpinen Torlauf. Bald darauf organisierte Lunn im Schweizer Mürren Schilauflaufwettbewerbe, die er „Slalom“ taufte. Die Schweizer Bevölkerung war begeistert. Der Österreicher Skipionier Hannes Schneider war ebenfalls fasziniert und brachte den „neuen“ alpinen Wettbewerb auf den Arlberg. Er begründete damit die Kandahar-Rennen (Dettling, 2005, S. 214).

Von dieser „Verrennsportlichung“ profitierte der Skilauf enorm. Der Auf- und Ausbau der Infrastruktur war dabei ebenfalls eine wesentliche Voraussetzung. In den 1930er Jahren wurden vermehrt Schilifte als mechanische Aufstiegshilfe gebaut (Dettling, 2005, S. 215).

Aber nicht nur die Schirennen und neuartige Aufstiegshilfen trugen dazu bei, dass der Schillauf zunehmend in Mode kam. Berg- und Ski-Spielfilme des Regisseurs Arnold Franck in den 1930er Jahren taten ihr übriges dazu. Diese Filme weckten das Verständnis für die Schönheit und Wirklichkeit der winterlichen Hochgebirge bei der Masse der Bevölkerung und legten den Grundstein für den Wirtschaftsfaktor Wintersport (Dettling, 2005, S. 214).

Den gewaltigsten Aufschwung erlebte der Skisport und damit der Wintertourismus im Alpenraum speziell in Österreich während der 60er Jahre. Die großen Erfolge österreichischer Sportler sorgten für Euphorie im In- und Ausland. Das führte zum Einen dazu, dass immer größere Teile der heimischen Bevölkerung den Skisport für sich entdeckten und zum Anderen, dass dadurch das Image Österreichs als „Skination“ entscheidend geprägt wurde (Dettling, 2005, S. 215-216).

Die Fremdenverkehrspolitik versuchte die durch den Boom entstehenden neuen Potentiale zu nutzen und sorgte für eine möglichst hohe Erschließung des österreichischen Alpenraumes mit Pisten, Aufstiegshilfen und Hotels (Dettling, 2005, S. 216).

8.1.2 Entwicklung der Nächtigungen in den Winterhalbjahren 1970 bis 2007

Betrachtet man die Entwicklung der Nächtigungen der letzten Jahrzehnte (Diagramm 1), so lässt sich ein stetiger Anstieg der Gesamtnächtigungen mit leichten Auf- und Abwärtsbewegungen erkennen.

Zu Beginn der 70er Jahre kam es zum stärksten Anstieg der Gesamtnächtigungen in Österreich. In den Folgejahren wurde ein leichter Rückgang bzw. ein geringer Anstieg der Gesamtübernachtungen verzeichnet.

Eine vorläufige Rekordnächtigungszahl konnte im Winterhalbjahr 1980/81 mit 43.102.204 Übernachtungen verzeichnet werden (Österreichisches Statistisches Zentralamt, 1986, S. 9).

Wie aus Abbildung 20 ersichtlich wird, kam es jedoch Mitte der 80er Jahre zu einem starken Rückgang der Nächtigungen. Die Ursache hierfür waren die schneeärmeren Winter zu Beginn der 80er Jahre.

Nach dem Tiefpunkt von 1985 erfolgte wieder ein leichter Aufwärtstrend. Gegen Ende der 80er Jahre konnten wieder Nächtigungszuwächse verzeichnet werden.

Der Beginn der 90er Jahre leitete wieder einen Abwärtstrend der Nächtigungszahlen in den Winterhalbjahren ein. Nach dieser kurzen rückläufigen Periode folgte ein Anstieg der Nächtigungen bis Mitte der 90er Jahre.

Zu einem massiven Nächtungsverlust im Wintertourismus kam es erst wieder in Wintersaisons von 1995 bis 1998. Auch hier dürften die schneearmen Winter die Hauptursachen gewesen sein.

Diese rückläufige Tendenz wurde erst im Winterhalbjahr 1999/00 gestoppt. Insgesamt ergaben rund 53,4 Mio. Nächtigungen in der Wintersaison 1999/00 ein Plus von 2,5 Prozent, was absolut einer Zunahme von 1,29 Mio. Nächtigungen gegenüber der vorangegangenen Saison entsprach (Statistik Austria, 2001, S. 202).

Seit der Wintersaison 1999/00 ist ein stetiger Aufwärtstrend zu beobachten. Rund 60 Mio. Nächtigungen in der Wintersaison 2005/06 sind bislang absoluter Rekord für den österreichischen Tourismus (Statistik Austria, 2006, S. 178).

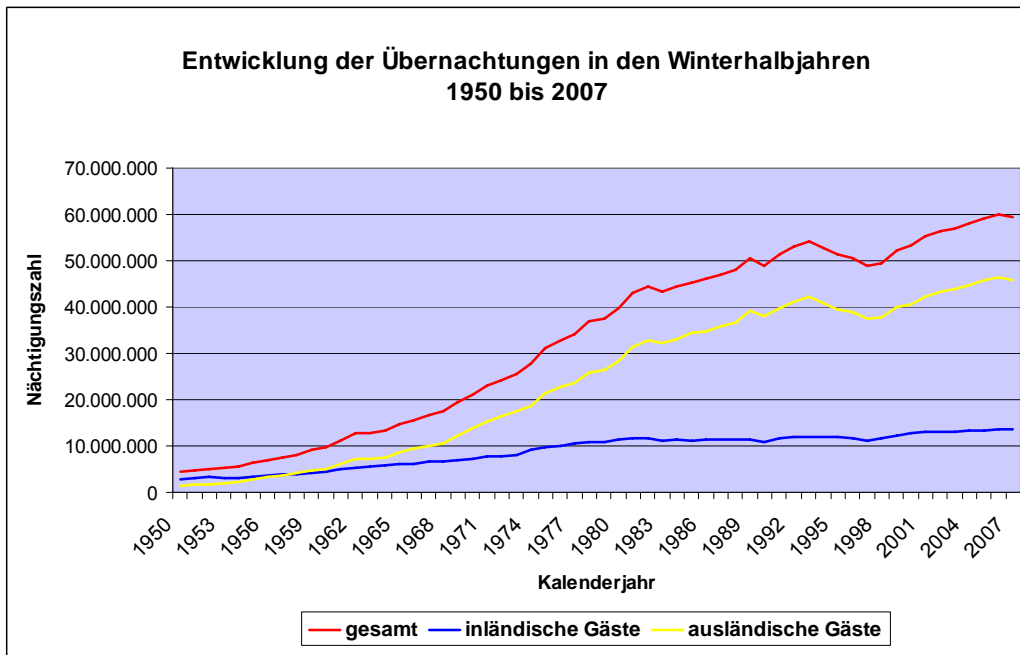


Abb. 20: Entwicklung der Übernachtungen in den Winterhalbjahren 1950 bis 2007, eigener Entwurf (Daten: Statistik Austria).

8.1.3 Abhängigkeit der österreichischen Wirtschaft am Wintertourismus

Der Tourismussektor sorgt in Österreich für 5,9 Prozent des BIP und stellt 7,8 Prozent aller potentiellen Vollzeit Arbeitsplätze (Statistik Austria, 2007, S.60). Im Jahr 2007 betrug die direkte Wertschöpfung des Tourismus rund 15,8 Mio. Euro. Dies ist eine Zunahme seit dem Jahre 2000 von 23,1 Prozent.

Im Jahr 2006 hat der Wintertourismus zum ersten Mal die Sommersaison überholt (Statistik Austria, 2007, S. 61).

Der Tourismus ist auch ein wichtiger Faktor am österreichischen Arbeitsmarkt. Im Jänner 2004 arbeiteten 167.396 Menschen im Tourismus (Stadler, 2005, S. 81).

Laut OECD sind in Österreich 586.000 Personen d.h. 13,9 Prozent direkt oder indirekt vom Tourismus abhängig (Stadler, 2005, S. 81).

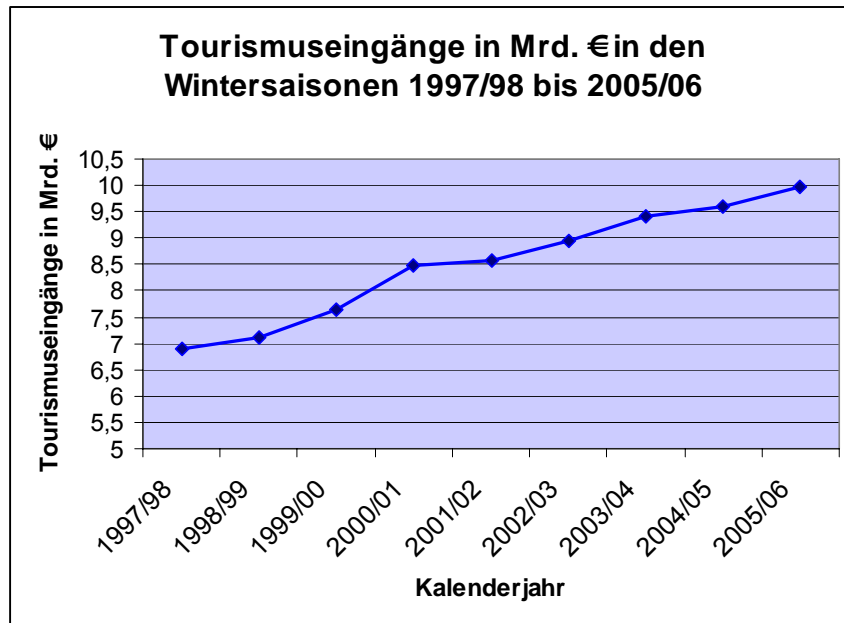


Abb. 21: Tourismuseingänge in Mrd. € in den Wintersaisons 1997/98 bis 2005/06 eigener Entwurf (Daten: Statistik Austria).

Die oben genannten Daten verdeutlichen die Wichtigkeit des Fremdenverkehrs für Österreich. Für den ländlichen und insbesondere den alpinen Raum ist der Tourismus zu einem existentiellen Faktor geworden. Vielerorts bildet er den wichtigsten Wirtschaftszweig. Der Tourismus hat die Arbeits- und Lebensbedingungen, den Wohlstand und die Wohlfahrt in einer Vielzahl von alpinen Regionen deutlich und nachhaltig verbessert.

Diese touristische Entwicklung führte jedoch zu einer einseitigen Abhängigkeit. Schneearme Winter, wie sie in den letzten Jahren gehäuft auftraten, schlagen sich dramatisch in den Nächtigungszahlen nieder. Der Begriff der touristischen Monostruktur umschreibt diesen Sachverhalt treffend.

8.2 Die Wetter- bzw. Klimaabhängigkeit im Wintersport

Klima und Wetter beeinflussen den Tourismus stark, vor allem den Wintertourismus. Aus diesem Grund ist es notwendig einen kurzen theoretischen Abriss über die verschiedenen Faktoren im touristischen Angebot zu geben.

8.2.1 Grundlegende Angebotsfaktoren im Wintersport

Entscheidend für den Wintersport sind die natürlichen Faktoren des ursprünglichen Angebots (Wetter und Klima), sowie die touristische Infrastruktur in Form von Aufstiegshilfen.

Alle weiteren Faktoren wie soziokulturelle Interessen, Beherbergungs- und Versorgungsbetriebe, sowie allgemeine verkehrsmäßige Infrastruktur sind begleitende Faktoren, die ebenfalls nötig, jedoch für die Ausübung des Skisports an sich weniger maßgeblich sind.

Wetter und Klima, als natürliche Faktoren sind im Allgemeinen für sehr viele Formen des Tourismus von großer Bedeutung. Im Unterschied zu anderen Wirtschaftszweigen, in denen Wetter und Klima zwar Rahmenbedingungen darstellen, jedoch keinen großen Stellenwert für die Ausübung haben, sind sie für den Tourismus von absolut entscheidender Bedeutung und deshalb als eine Ressource im engeren Sinn anzusehen (Abegg, 1996, S. 13).

Wetter und Klima sind demnach dann als Ressource zu sehen, wenn gewisse Tourismusformen erst durch spezielle Bedingungen ermöglicht bzw. entscheidend begünstigt werden.

Wie bereits erwähnt sind neben der technischen Erschließung in Form von Aufstiegshilfen die Faktoren Wetter und Klima entscheidend für die Eignung einer Region als Wintersportgebiet. Die Ausübung von Wintersport setzt eine entsprechende Schneelage voraus. Da die Wintersaison zeitlich begrenzt ist und die Errichtung und Erhaltung von Lift- und Seilbahnanlagen äußerst kapitalintensiv ist, führen Phasen mit unzureichender Wetterlage zu beträchtlichen Verlusten.

„So haben zum Beispiel die schneearmen Winter Ende der 80er Jahre, aber auch der sehr schneereiche Winter 1998/99 deutliche Spuren in der Tourismusbranche hinterlassen“ (Bürki, 2000, S. 20).

Der Alpine Wintertourismus unterliegt demnach einer sehr hohen Sensibilität gegenüber der natürlichen Klimavariabilität und den damit verbundenen wechselnden Witterungsbedingungen. Diese natürlichen Schwankungen, die an sich nicht ungewöhnlich sind, bewegten sich bislang in einem Ausmaß innerhalb dem die Tourismuswirtschaft noch damit leben konnte. Zukunftsprognosen, die auf eine langfristige und deutliche Erwärmung hinweisen, stellen allerdings eine völlig andere Situation in Aussicht.

8.2.2 Der Begriff „Schneesicherheit“

Der Begriff „Schneesicherheit“ ist ein weit verbreiteter und oft verwendeter Ausdruck und meint im Allgemeinen jene klimatischen Bedingungen, die es einem Wintersportort auf längere Sicht ermöglichen, sich erfolgreich auf dem Markt des Wintertourismus zu behaupten. Eine allgemein gültige Definition dieses Begriffs ist allerdings schwierig zu finden. Einer Schweizer Studie zufolge steht die Schneesicherheit für die Mehrheit der Urlauber an erster Stelle, wenn es um die Wahl eines Winterurlaubsortes geht (Bürki, 2000, S. 39).

Schneearme Winter hinterlassen nicht nur massive finanzielle Lücken, sondern auch Imageverluste in den Folgejahren. Trotz der enormen Bedeutung, die der Begriff für das Image einer Tourismusregion besitzt, mangelt es an einer allgemein gültigen und anerkannten Definition. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird „Schneesicherheit“ meist sehr subjektiv interpretiert.

Im Folgenden werden die bedeutendsten wissenschaftlichen Definitionsansätze, von denen sich bislang noch keiner wirklich durchsetzen konnte, zusammengefasst und einer kritischen Bewertung unterzogen:

- Die Definition von Schneesicherheit nach Wanner und Speck

Wanner und Speck beziehen in ihre Definition die Schneedeckenhöhe mit ein, die für den Wintersport im Allgemeinen von großer Bedeutung ist. Nur eine

ausreichende Schneehöhe sowie eine gut präparierte Piste ermöglichen eine entsprechende Auslastung der Pisten.

Dies wirft jedoch die Frage auf, wie hoch die Schneedecke mindestens sein muss, um für den Schisport als „ausreichend“ zu gelten?

Wanner und Speck legen sich auf eine Schneedecke von mindestens 30 cm Mächtigkeit fest. Anhand dessen definieren sie drei Stufen der Schneesicherheit, die wie folgt charakterisiert werden (Bürki, 2000, S. 39):

- Stufe 1: mindestens 30 zusammenhängende Tage mit über 30 cm Schneedecke.
- Stufe 2: mindestens 60 zusammenhängende Tage mit über 30 cm Schneedecke.
- Stufe 3: mindestens 90 zusammenhängende Tage mit über 30 cm Schneedecke.

Als tatsächlich schneesicher gelten folglich nur Orte, in denen in 90 Prozent aller Winter die Kriterien von Stufe 3 erfüllt sind. In diesen Ansatz fließt auch die Zeitdimension mit ein, die in diversen früheren Definitionsversuchen ignoriert wurde.

- Die Definition von Schneesicherheit nach Witmer

Witmer (1976, S. 61) definiert die Höhe der ausreichenden Schneedecke für den alpinen Skisport ebenfalls mit 30 cm. Für den Langlauf nimmt er 15 cm als ausreichend an. Darüber hinaus betrachtet diese Methodik die vier Wintermonate Dezember, Jänner, Februar und März und berechnet die Gesamtzahl der Tage mit „ausreichender“ Schneelage. Schneesicherheit ist demnach über den Anteil dieser Summe am gesamten Betrachtungszeitraum definiert.

Daraus lassen sich folgende vier Klassen ableiten (Witmer, 1976, S. 61):

- 90 bis 100 % große Schneesicherheit
- 75 bis 89 % mittlere Schneesicherheit
- 50 bis 74 % geringe Schneesicherheit
- unter 50 % sehr geringe Schneesicherheit

Beide Definitionsansätze (Wanner und Speck sowie Witmer) zeigen trotz unterschiedlicher Herangehensweisen die gemeinsame Tendenz, den Begriff Schneesicherheit über bestimmte als „ausreichend“ erachtete Schneehöhen und gewisse Zeiträume, in denen diese Verhältnisse gegeben sein müssen, zu definieren.

Auf diesen Definitionen aufbauend wurde die so genannte 100-Tage-Regel, die aktuell häufig verwendet wird, entwickelt.

8.2.3 Die 100-Tage-Regel

Die 100-Tage-Regel behauptet, dass eine ökonomisch sinnvolle Investition in Wintersportgebieten nur dann möglich ist, wenn an mindestens 100 Tagen pro Saison eine Ausnützung der installierten Anlagen zu erwarten ist. Dies wiederum sei natürlich nur bei Vorhandensein einer Schneedecke mit ausreichender Mächtigkeit möglich (Witmer, 1986, S. 193).

Bezüglich dieser Regel stellen sich allerdings folgende drei Fragen (Abegg, 1996, S. 61):

1. Wann ist eine Schneedecke für den Skisport „ausreichend“?
2. Von wann bis wann erstreckt sich die „Wintersaison“?
3. Sind tatsächlich 100 Tage für einen rentablen Skibetrieb notwendig?

ad 1) Schneedecke:

Obwohl die Meinungen bezüglich einer „ausreichenden“ Schneedecke auseinander gehen, wird dennoch in vielen Fällen der bereits erwähnte Schwellenwert von 30 cm genannt. Witmer (1986, S. 193) beispielsweise geht differenzierter vor. Er erachtet eine Schneedeckenhöhe von 30 cm als „ausreichend“, 50 cm werden als „gut“ erachtet und 75 cm werden als „ausgezeichnet“ für den Skipistenbetrieb gesehen.

Die Übertragung solcher Standardwerte in die Praxis ist jedoch problematisch, da die tatsächlich nötige Schneehöhe sehr stark vom Gelände abhängt. Auf relativ ebenen Flächen reicht eine deutlich geringere Schneedecke aus als auf steilen eventuell felsigen Hängen, die aus Schutt und Geröll bestehen.

ad 2) Wintersaison:

Abegg (1996, S. 61) schlägt vor, die Wintersaison als den Zeitraum zwischen Mitte Dezember und Mitte April zu definieren. Für die Anwendung der 100-Tage-Regel wäre somit eine Wintersaison von 121 Tagen heranzuziehen.

ad 3) Sind tatsächlich 100 Tage für einen rentablen Skibetrieb notwendig?

Der Wert von 100 Tagen ist natürlich keine endgültige Wahrheit, sondern ein relativ willkürlich gewählter Anhaltspunkt, der lediglich als Richtlinie dienen soll und kann. Die Meinung, dass es bei einer Auslastung der Liftanlagen und Seilbahnen von weniger als 100 Tagen bereits zu ökonomischen Problemen kommen kann, ist jedoch allgemein relativ anerkannt.

Durch den Versuch die Fragen, welche die 100-Tage-Regel in ihrer ursprünglichen Form offen lässt, zu beantworten, wurde eine erweiterte Form dieser Regel entwickelt.

8.2.4 Die erweiterte Form der 100-Tage-Regel

Rolf Bürki (2000, S. 43) führt in seiner Studie zu den Anpassungsprozessen im Wintertourismus im Schweizer Alpenraum aus, dass ein Skigebiet dann als schneesicher gilt, wenn in sieben von zehn Wintern in der Zeit von 1. Dezember bis

15. April an mindestens 100 Tagen eine für den Wintersport ausreichende Schneedecke von mindestens 30 bis 50 cm vorhanden sein muss.

Abschließend muss jedoch festgehalten werden, dass die bloße Betrachtung eines Winters in Wahrheit nicht genügt, um Aussagen über die Schneesicherheit eines Ortes zu machen. Vielmehr muss jeder Wintersportort mit der natürlichen Klimavariabilität leben und wirtschaftlich in der Lage sein, den ein oder anderen schneearme Winter, wie sie in der Vergangenheit immer wieder vorgekommen sind, zu verkraften.

8.3 Studien bezüglich des Wintertourismus in der Schweiz und in Österreich

Klimaänderungen können sich unterschiedlich auf den Wintertourismus auswirken. Hierbei sind direkte und indirekte Folgen zu unterscheiden. Die wesentlichsten direkten Folgen sind die vermehrte Zunahme schneearmer Winter, der Verlust der Schneesicherheit und das Ansteigen der Schneegrenze.

Erfolg oder Misserfolg sowohl des Wintertourismus als auch der Skiindustrie sind direkt vom Vorhandensein von Schnee abhängig. Der Ausfall von lediglich einer Wintersaison wirkt sich nachteilig auf diese Wirtschaftsbereiche aus.

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen über die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wintertourismus.

Arbeiten, die speziell auf die Folgen für den Winter- und damit den Skitourismus eingehen, sind in den USA, Australien, und vor allem in der Schweiz und in Österreich zu finden. Da die Ergebnisse jener Studien, die sich auf Untersuchungsgebiete im Alpenraum beziehen, für die hier bearbeitete Fragestellung besonders relevant sind, wird im Folgenden auf die wichtigsten schweizer und österreichischen Forschungsarbeiten näher eingegangen.

8.3.1 Untersuchungen bezüglich des Wintertourismus aus der Schweiz

In der Schweiz beschäftigte sich eine Vielzahl von Wissenschaftlern mit der Thematik „Auswirkungen des Klimawandels auf den Wintertourismus“.

Bereits Paul Föhn spricht zu Beginn der 90er Jahre davon, dass gesetzt dem Fall die gemittelten Temperaturen würden sich in den nächsten Jahrzehnten um 3°C erhöhen, sich eine Abweichung von Niederschlägen und Verdunstung um ± 10 Prozent ergeben würde. Daraus würden sich folgende Effekte auf die Schneesituation in den Schweizer Alpen ergeben (Föhn, 1990, S. 45):

- Inneralpin würde die mittlere Schneefallgrenze um 200m ansteigen.
- Außerhalb würde die mittlere Schneefallgrenze um 400m ansteigen.
- In den Voralpen würde die Schneefallgrenze um 500m ansteigen.

Daraus ergibt sich laut Föhn der Umstand, dass unterhalb von 1200m selten eine geschlossene Schneedecke anzutreffen wäre. Darüber hinaus wäre das Einschneien verzögert, das Ausapern verfrüht und die Dauer der Schneebedeckung würde in mittleren Höhenlagen (bis etwa 1500m) mindestens ein Monat kürzer ausfallen als bislang (Föhn, 1990, S. 45).

Würde die Erwärmung nach Föhn tatsächlich eintreten, wären nur noch zwei Drittel der heute existierenden Skigebiete in den Schweizer Alpen als schneesicher einzustufen.

Bruno Abegg (1996) untersuchte vor dem Hintergrund von drei schneearmen Wintern in den 80er Jahren die Schneeabhängigkeit Schweizer Wintersportorte. Auch er kam zu dem Ergebnis, dass Skigebiete in Regionen unterhalb von 1200m unter den gegenwärtigen klimatischen Bedingungen als schneeunsicher einzustufen sind (Abegg, 1990, S. 52-53).

Darüber hinaus stellte Abegg eine Fülle theoretischer Überlegungen über klimatisch bedingte Veränderungen der touristischen Nachfrage an. Die formulierten Aussagen entbehren allerdings einer empirischen Basis. Jedoch wirft er die entscheidende

Frage auf, ob eine Klimaänderung „nur“ eine Verschiebung der Nachfrage von tiefergelegenen zu schneesichereren Skigebieten bewirkt, oder ob die Konzentration auf begünstigten Standorte von einer insgesamt schrumpfenden Wintersportnachfrage begleitet wird.

Rolf Bürki (2000) beleuchtete schließlich auf der Basis realistischer Klimaänderungsszenarien die Veränderung der Nachfrage auf Grund der Klimaänderungen. Ausgangspunkt seiner Forschung waren die zum Teil massiven Einbußen der Skigebiete in den schneearmen Wintern Ende der 80er Jahre.

In seiner Studie führte er eine Gästebefragung in fünf Skigebieten der Kantone Ob- und Nidwalden durch (Bürki, 2000, S. 69). Er kam zu folgendem Ergebnis:

- Die Schneesicherheit bzw. die aktuellen Schneesicherungsverhältnisse zählen zu den wichtigsten Beweggründen bei der Wahl des Skigebietes. Fehlt der Schnee im vertrauten Skigebiet, besuchen die Touristen ein anderes, schneesichereres Skigebiet, das vom Angebot und von der Größe möglichst ähneln soll (Bürki, 2000, S. 97).
- Skifahrer sind für die Problematik „Klimaänderung und Tourismus“ sensibilisiert. Die meisten sind sich über Auswirkungen einer Klimaänderung bewusst und rechnen damit, dass der Skitourismus in den nächsten Jahren stark vom Klimawandel betroffen sein wird (Bürki, 2000, S. 97).
- Eine Klimaänderung wird zu massiven Veränderungen der Nachfrage im Wintertourismus führen. Die Gästebefragung zeigte deutlich, dass erstens mit einem Konzentrationsprozess auf die schneesicheren Skigebiete zu rechnen ist, und zweitens die skitouristische Nachfrage generell abnehmen wird. Zwar werden wenige mit dem Skifahren wirklich aufhören, aber rund ein Drittel wird weniger oft als bisher Skifahren gehen. Vor allem tiefergelegene Skigebiete werden mit einem massiven Rückgang der Frequenzen rechnen müssen (Bürki, 2000, S. 97).

- Bei einer möglichen Klimaänderung werden sich auch die Erwartungen der Skifahrer an das touristische Angebot verändern. Fast die Hälfte der befragten Skifahrer erachtet die künstliche Beschneidung und/oder den Ausbau in höhergelegene Regionen des Skigebietes im Falle einer Klimaänderung als wichtig (Bürki, 2000, S. 98).

Bürki merkt an, dass diese Umfrage zwar nicht als Prognose zukünftiger Gästefrequenzen betrachtet werden kann, sie verdeutlicht aber die Tatsache, dass eine Klimaänderung zu gravierenden Veränderungen der skitouristischen Nachfrage führen wird (Bürki, 2000, S. 98).

8.3.2 Untersuchungen bezüglich des Wintertourismus aus Österreich

Auch in Österreich wurden Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf die Schneedeckendauer und die Länge der Skisaison durchgeführt. Ähnlich den schweizer Studien wird auch für Österreich eine Verkürzung der Wintersaison angenommen.

Die umfangreichste Studie bezüglich der Klimasensibilität österreichischer Bezirke und die damit in Zusammenhang stehenden möglichen Auswirkungen auf den Wintertourismus lieferte Breiling et al. (1997). Unter der Annahme einer Temperaturzunahme von 2°C, kommt es nach Breiling et al. zu einer Verschiebung der gegenwärtigen Schneeverhältnisse um etwa 10m bis 200m nach oben (Breiling, S. 47-48). Darüber hinaus ergibt sich bei einer Erhöhung der europäischen Mitteltemperaturen um 1°C eine Verringerung der Schneedeckendauer in schneesensiblen Höhenbereichen um rund vier Wochen im Winter und sechs Wochen im Frühling. Derzeit liegen die schneesensibelsten Bereiche auf 575 m Höhe im Winter und 1373 m Höhe im Frühjahr. Bei der angenommenen Erwärmung würden diese Bereiche nach oben wandern. Im Winter auf über 900m und im Frühling auf etwa 1900m Höhe.

Tabelle 2 zeigt ein Beispiel von Breiling (1993) zum besseren Verständnis, wo anhand einer tabellarischen Aufstellung die Saisonverkürzung zu einer gewissen

Erwärmung gezeigt wird. Als Erwärmungsszenarien wurden Temperaturen von 0,75°C, 1,5°C und 3°C angenommen.

Tab. 2: Veränderungen der potentiellen Wintersporttage bei einer Erwärmung

Veränderung der potentiellen Wintersporttage bei einer Erwärmung				
Tage mit Temperaturmittel unter 0°C als Mittel der Stationen der Ostalpen				
Höhe über dem Meeresspiegel (in m)	100-jähriges Mittel	0,75°C Erwärmung	1,5°C Erwärmung	3°C Erwärmung
400	77	68	60	27
600	90	84	77	60
800	101	95	90	77
1000	110	106	101	90
1200	120	115	110	101
1400	130	125	120	110
1600	144	137	130	120
1800	163	155	144	130
2000	178	170	163	144

Quelle: (Breiling, 1993, S. 4).

Die Tabelle stellt die Anzahl jener Tage dar an denen Wintersport betrieben werden kann. Um das Skifahren zu ermöglichen, ist eine geschlossene Schneedecke von rund 30 cm notwendig. Je nach Höhenlage der Skigebiete sind zwischen 25 und 40 Tage vom Erwärmungsszenario abzuziehen, um die tatsächlichen Wintersporttage auszurechnen (Breiling, 1993, S. 4).

Breiling (1993, S. 4) betont dass eine relative Erwärmung von 0,75°C zu einem Rückgang von rund 10 Prozent der Wintertourismuseinnahmen führt. Auch in einer Seehöhe von 2000m würde sich die Saison schon bei einer Erwärmung um 0,75°C bereits um eine Woche verkürzen.

Für Wintersportorte unter 700m Seehöhe ist bei einer Erwärmung zwischen 2°C und 3°C, wie sie die IPCC vorhersagt, klimasensibler Wintertourismus nicht mehr möglich (Breiling et al., 1997, S. 22). Die Alpinbezirke Kufstein, Kitzbühel und Liezen würden

als erste Spitzenbezirke auf Grund einer zu kurzen Wintersaison ausfallen (Kromp-Kolb, 1998, S. 1).

„Beschneiungsanlagen können nur mehr in Regionen über 1500m und während der Monate Dezember bis Februar eingesetzt werden“ (Breiling et al., 1997, S. 90).

Ungünstig gelegene Skigebiete könnten weit höheren Schaden davon tragen. In diesem Zusammenhang sei nochmals auf die umfangreiche Studie von Breiling et al. aus dem Jahr 1997 über die Klimasensibilität österreichischer Bezirke hingewiesen, worin die verschiedenen Wintersportregionen und ihre Schneeabhängigkeit einer genauen Analyse unterzogen werden.

8.4 Synthese der Untersuchungen

Das Fazit aus all diesen Studien ist, dass sich die heutige Grenze der schneesicheren Skigebiete von 1200m Seehöhe in den nächsten Jahrzehnten auf über 1500m verschieben wird. Vor allem tiefer gelegene Wintersportorte wären von dieser Entwicklung drastischer betroffen.

„Die hohe Korrelation zwischen Bettenauslastung und Höhenlage, die besonders zwischen 1100m und 1200m eine deutliche Anhebung zeigt, lässt erwarten, dass die unter 1500m gelegenen Gebiete dramatische Nachfrageeinbrüche erleiden könnten, sodass ein rentabler Winterbetrieb nicht mehr möglich sein würde“ (Stadler, 2005, S. 146).

Mögliche Opfer der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wintertourismus in Österreich sind Orte wie Hinterstoder (584m) in OÖ, Schladming (750m) oder Spittal am Semmering (777m) in der Steiermark. Aber auch der weltweit bekannteste Wintersportort Kitzbühel in Tirol auf 761m Seehöhe wäre betroffen.

In der Schweiz könnte jeder zweite Wintersportort den Folgen des Klimawandels zum Opfer fallen.

Für die zukünftige Entwicklung der Nachfrage spielen, nach Rolf Bürki (2000), jedoch neben einer Klimaänderung auch nicht-klimatische Faktoren eine gewichtige Rolle:

„Zwar kann im Moment noch nicht von einem schrumpfenden Markt gesprochen werden, gewisse Sättigungstendenzen sind jedoch seit einiger Zeit nicht zu übersehen. Ob sich der Wintersportmarkt in Zukunft revitalisieren kann, stagnieren oder schrumpfen wird, darüber herrschen unter den Experten unterschiedliche Meinungen vor. Tatsache ist jedoch bereits heute eine gewichtige Veränderung der Struktur des Wintertourismus, zum Beispiel hin zu einem Käufermarkt, einem Verdrängungswettbewerb und einer verstärkten Erlebnisorientierung verbunden mit einem Trend zum Schönwettersport. Zudem verliert der Wintersport je länger je mehr den Charakter eines Volkssports. Die Streichung von Schulsikikursen verdeutlichen diese Entwicklung“ (S. 66).

8.5 Auswirkungen auf die Skibranche

Der milde Winter 2006/07 hat die österreichische Skiindustrie hart getroffen. Alle großen Hersteller schreiben Verluste im zweistelligen Millionenbereich. Nur 350.000 bis 380.000 Paar Ski wurden im vergangenen Jahr verkauft. In normalen Jahren lag der Absatz bei 500.000 Paar (<http://www.wirtschaftsblatt.at/home/275655/index.do> [Zugriff am 16. Mai 2008]).

Fischer Ski, der letzte Hersteller in österreichischem Besitz, verzeichnete in der vergangenen Saison einen Umsatzeinbruch von 14,4 Prozent (Auer, 2007, Die Presse, 11. Oktober S. 22). Nur im Langlauf konnte der Absatz, dank der hohen Nachfrage aus Russland, relativ stabil gehalten werden (Auer, 2007, Die Presse, 11. Oktober, S. 22). Bei Atomic stürzte der Umsatz gar um 41 Prozent auf 17,3 Mio. Euro ab. Der Skihersteller Head verlor 30,5 Prozent und liegt bei einem Umsatz von 20,7 Mio. Euro (Die Presse, 11. Oktober 2007, S. 22).

Auf Grund der vollen Lager im Handel am Ende der Wintersaison 2006/07 kam es zu knapp 32 Prozent weniger Vorbestellungen für die Wintersaison 2007/08 (Die Presse, 11. Oktober 2007, S. 22).

Die Folgen:

Bei Amer (Atomic, Salomon) wurden in der Wintersaison 2007/08 Produktionskapazitäten von 800.000 Paar Ski vom Markt genommen. In Frankreich musste das Salomon-Werk zusperrern. In Österreich nahmen Atomic, Fischer, Head und Blizzard über mehrere Wochen ein Kurzarbeitsmodell zu Hilfe, um die

Stammarbeitsplätze halten zu können. Darüber hinaus wird zukünftig die Produktion in Billiglohnländer verlagert (Die Presse, 11. Oktober 2007, S. 22).

Der Skihersteller Fischer wird die Skiproduktion in die Ukraine verlagern. Im derzeitigen Werk in Ried, sind nach dem auftragbedingten Stellenabbau nur noch 600 Mitarbeiter beschäftigt (Die Presse, 11. Oktober 2007, S. 22).

9 Zukunftsperspektiven für den Wintersport

Der globale Klimawandel stellt, wie in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich dargestellt, eine große Herausforderung für den Wintersport und Wintertourismus im gesamten Alpenraum dar.

Gibt es eine oder mehrere Zukunftsperspektiven und wenn ja, wie sehen diese aus? Sind diese Maßnahmen mit vorwiegend ökonomischem Hintergrund ökologisch vertretbar?

Auf diese Fragen versuche ich in den folgenden Kapiteln Antworten zu finden.

Der Wintersport als Ganzes wird aller Voraussicht nach auch in den kommenden Jahrzehnten das interessanteste und größte Gästesegment bilden auf welches der Tourismus in den Alpen bauen wird. Die daraus ableitbare logische Schlussfolgerung ist die Sicherung des Wintersports, vor allem aber des Skisports.

9.1 Strategien zur Sicherung des Skisports

Die Tatsache, dass Schneesicherheit für Wintersportgäste oberste Priorität hat, liegt auf der Hand. Daneben spielt die attraktive Landschaft sowie die gute Luft der Berge ebenfalls eine große Rolle. Nun lässt sich die Schneesicherheit leichter bewerkstelligen als das Herstellen einer attraktiven Alpenlandschaft mit guter Luft. Die Hauptstrategie liegt in der Anpassung der Wintersportorte an den Klimawandel bezüglich der Sicherung des Skisports durch folgende Maßnahmen.

9.1.1 Pistenplanierung

Die unterschiedliche Bodenbeschaffenheit der Skipisten, verlangt unterschiedliche Schneemengen. Ebene Skispisten benötigen eine geringere Schneeauflage. In höheren Gebieten bei geröllartigen oder felsigen Untergrund ist demnach eine höhere Schneeauflage notwendig.

Mit unterschiedlichen baulichen Maßnahmen kann die Bodenbeschaffenheit verändert werden. Es sind dies einerseits Pistenplanierungen geringeren Ausmaßes, die zur Beseitigung von Gefahrenstellen im Skigebiet dienen, andererseits vorwiegend wirtschaftlich orientierte großflächige Planierungen, die ausschließlich eine Erhöhung der Pistenkapazität zum Ziel haben. Zudem gewährleisten die großflächigen Pistenplanierungen eine problemlosere mechanische Bearbeitung der Skipiste, wodurch die Befahrbarkeit, wie bereits mehrfach angesprochen, auch bei geringer Schneelage gesichert ist. Nicht zu vergessen ist die Durchführung der großen Anzahl von internationalen Skirennen.

Mittels Planierdrauen und Planierpflügen wird meist im großen Umfang Gesteinsmaterial abgetragen, geglättet und eingeebnet. Anstehende Felspartien müssen dabei zum Teil weggesprengt werden.

Aus Sicht der Wintersportorte und Liftbetreiber sind diese Landschaftseingriffe von Vorteil. Aus ökologischem Blickwinkel sind diese Eingriffe jedoch bedenklich und auf ein absolutes Minimum zu reduzieren, denn die Ergebnisse jeder Planierung sind Waldrodungen, Zerstörung der Vegetationsdecke und des gewachsenen Bodens (Mosimann 1986, S. 305). Diese Eingriffe führen zur Vernichtung seltener Biotope und Zerschneidung von Lebensräumen.

Da das hangstabilisierende Wurzelgeflecht damit auch verloren geht, kommt es zu unterschiedlich stark ausgeprägtem oberflächlichem Wasserabfluss. Dies ist im Gebirge, wo das Wasser durch die größere Neigung der Abflussfläche hohe Kräfte entwickelt, mit erheblichen Folgen verbunden.

Eine Auswirkung von vermehrtem Oberflächenabfluss ist die Erhöhung der Wildbachtätigkeit bei Dauer- oder Starkregen (Eggers, 1993, S. 29). Es kommt zu Unterspülungen, Vermurungen oder ganzen Hangrutschungen. Diese können ein gewaltiges Ausmaß annehmen, wie z.B. die Murkatastrophe im Skigebiet Axamer Lizum (Tirol), das im Einzugsbereich des Axamer Baches liegt. Im Jahr 1983 wurde dadurch das Zentrum des Ortes Axams vermurt.

Auf den Skipisten selbst, kommt es bei Niederschlägen zu vermehrter Boden- und Hangabtragung (Erosion und Denudation). Damit verbunden ist ein praktisch vollständiger Verlust des Humusbodens und der im Humus gespeicherten Nährstoffe. Es kann dabei soweit kommen, dass feines Bodenmaterial völlig verloren geht und der Felsuntergrund zu Tage tritt.

Die Wasserspeicherkapazität auf planierten Böden ist etwa zwei bis zehn Mal geringer als in natürlich gewachsenen Böden (Mosimann, 1986, S. 305). Bei Rodungen geht zusätzlich der Interzeptionsverlust des Waldes verloren.

Demzufolge sind Pistenplanierungen zwar ökonomisch ansprechend, wenn sie aber im großen Umfang erfolgen, sind sie ökologisch zu überdenken.

9.1.2 Bodenunabhängige Aufstiegshilfen

Seit den 90er Jahren wird in der Schweiz und in Österreich sowie in anderen Alpenländern verstärkt in Sessellifte und Kabinenbahnen investiert (Stadler, 2005, S. 159 -160). Traditionelle Schlepplifte gehören bald der Vergangenheit an. Der Grund für diesen Trend liegt neben Kapazitätserhöhung, Komfortverbesserung und Sicherheitsüberlegungen vor allem in der Angebotsanpassung der Wintersportorte. Bei ungenügender Schneesituation können die Skifahrer ins Tal oder in höher gelegene Gebiete gebracht werden. Bruno Abegg (1996, S. 163) ist auf Grund der Erfahrungen aus den schneearmen Wintern in der Schweiz der Meinung, dass in Hinblick auf die zukünftigen klimatischen Verhältnisse in Höhen zwischen 1500 bis 1700m keine bodenabhängigen Aufstiegshilfen mehr gebaut werden sollten.

„In sonnenexponierten Hängen ist diese Grenze bei rund 2000m ü.M. anzusetzen“
(Abegg, 1996, S. 163).

Dennoch sind auch hier ökologische Eingriffe notwendig, jedoch im weit geringeren Ausmaß als im Falle großflächiger Pistenplanierungen. Dennoch ist hierbei auch das Auftauen der Permafrostbereiche zu beachten.

9.1.3 Erschließung neuer, höher gelegener Regionen für den Wintersport

Die Erschließung höherer Lagen für den Skisport ist eine Strategie, die mittlerweile von einigen Wintersportregionen sehr intensiv verfolgt wird. Hierbei ist zwischen Skigebietserweiterungen, Neuerschließungen und Zusammenschlüssen zu unterscheiden (Güthler, 2003, S. 9):

- Skigebietserweiterung: Ein bestehendes Skigebiet wird durch den Neubau mindestens eines Liftes/einer Seilbahn an einem bislang nicht erschlossenen Hang erweitert. Nicht aufgenommen in diese Kategorie werden Neubauten innerhalb eines Gebietes, Kapazitätssteigerungen, Trassenänderungen von Liften und Ersatzanlagen.
- Neuerschließungen: Neue Skigebiete in bislang skitouristisch nicht erschlossenen Gebieten.
- Zusammenschlüsse: Neue Skilifte/Seilbahnen, die dazu dienen, zwei bislang getrennte Skigebiete zu verbinden.

Obwohl die Erschließung höherer Lagen die Schneesicherheit gewährleistet und somit der Skitourismus am Leben erhalten werden kann, gibt es auch hier wieder zahlreiche negative Aspekte wie sie Abegg (1996, S. 163 -164) in seiner Studie zusammenfasst:

- Die Erschließung von hochgelegenen Gebieten ist mit einem großen technischen Aufwand verbunden und dementsprechend kostspielig.

- Mit der Höhengerschließung ist ein Vordringen in ökologisch sehr sensible Räume verknüpft.
- In Gebieten mit Permafrostvorkommen müssen die notwendigen bautechnischen Vorkehrungen getroffen werden. Dies setzt einen erhöhten Finanzbedarf voraus.
- Die Geländeeigenschaften können den Pistenunterhalt massiv erschweren und verteuern.
- Mit zunehmender Höhe verschiebt sich das Schneehöhenmaximum in den Frühling hinein. Hochgelegene Gebiete sind im Hochwinter oftmals abgeblasen. Hinzukommt, dass die Terrainverhältnisse nach größeren Schneemengen verlangen. Die „Flucht nach oben“ ist deshalb nicht immer Garant für eine erhöhte Schneesicherheit.
- Die Gefahr von Lawenniedergängen ist tendenziell größer.
- Die oftmals rauen Wetterbedingungen (Wind, Kälte) beeinträchtigen das Skivergnügen und führen wiederholt zu Betriebsunterbrüchen.

Inzwischen sind viele Seilbahnen hochverschuldet und müssen von externen Investoren aufgekauft werden.

„Bei der mit 7,3 Mio. € verschuldeten "Großglockner Seilbahn GmbH&CoKG" versucht die Gemeinde, wenigstens die Minderheitenrechte durch eine verbleibende Gemeindebeteiligung am Unternehmen zu retten“ (Güthler, 2003, S. 13)

9.1.4 Kunstschnee das Allheilmittel?

Noch vor etwas mehr als zehn Jahren gab es in den Skiregionen der westlichen Bundesländer Österreichs heftigen Diskussionen, ob künstliche Beschneigung

überhaupt durchgeführt werden sollte. In Salzburg dachte man vor rund 15 Jahren noch darüber nach Schneekanonen per Gesetz zu verbieten. Diejenigen Skigebiete, die schon damals beschneiten, taten dies hinter vorgehaltener Hand.

In den Anfängen des Kunstschnees galt es die „Schwächen“ der natürlichen Beschneigung auszubessern. So galt es zunächst den Saisonstart tiefer gelegener Wintersportorte bzw. die Schneeunterlage zu Beginn der Saison zu sichern. Schwachstellen an Kuppen, Kanten, Sonnenhängen oder Einstiegsstellen zu beschneien sowie die Grasnarbe gegen Beschädigungen durch die Skikanten und Präpariermaschinen zu schützen.

Nachdem die Natur in den vergangenen Wintern allzu oft „Schwächen“ zeigte und der Schnee ausblieb, bildete und bildet der Kunstschnee die einzige Lösung die Wintersaison zu retten. Durch die Kommerzialisierung des Skisports wird der Schnee als Muss angesehen und Beschneiungsanlagen sind mittlerweile unumgänglich geworden.

Auf die künstliche Beschneigung wird aber nicht mehr nur wegen ungünstiger Wetterverhältnisse zurückgegriffen, sondern auch um die Skisaison zu verlängern. Darüber hinaus ist es seit den letzten Jahren fast unmöglich geworden Skiweltcuprennen ohne Hilfe von Kunstschnee durchzuführen.

Ulrike Pröbstel (2006, S. 17) fasste die vier grundlegenden Motive für die explosionsartige Ausbreitung der Beschneiungsanlagen in den letzten Jahrzehnten wie folgt zusammen:

- Sicherung der touristischen Auslastung und der gesamten Tourismusbranche
- Sicherung der Einkommen der Seilbahngesellschaften
- Sicherung von Austragungsorten internationaler Skiwettkämpfe
- Sicherung der Rahmenbedingungen für Training und Ausübung des Spitzensports

„Für die Skigebiete ist die technische Beschneigung insbesondere in den Monaten Oktober, November und Dezember zur Präparierung der Pistenunterlage und zur

Sicherung des Weihnachtsgeschäftes von großer Bedeutung“ (Teich et al., 2007, S. 26).

Ökologen sind sich einig, dass Beschneiungsanlagen nicht als Allheilmittel gesehen werden können. Die Gründe liegen auf der Hand wie die folgenden Zeilen zeigen.

a) Funktionsweise von Schneekanonen

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Formen von Beschneiungsanlagen (Golja, 2003, S. 49):

- **Hochdruck-Schneekanonen:** Diese sind am Pistenrand fest montiert; Wasser wird in Mischkammern mittels Druckluft, die von großen Kompressoren erzeugt wird, zerstäubt.
- **Niederdruck-Schneekanonen** (Propellerkanonen): Hier wird Wasser mit einem Gebläse, welches Umgebungsluft ansaugt, ohne Druck versprüht und gefriert in der Luft zu Schneekristallen. Da keine Druckluftleitungen notwendig sind, erweisen sich Niederdruck-Schneekanonen im Gegensatz zu den Hochdruck-Schneekanonen, mobil einsetzbar.

Zur Herstellung des Schnees wird Wasser mit Luftdruck zu feinsten Tröpfchen versprüht. Liegt die Temperatur unter Null Grad Celsius so bilden sich Schneekristalle. Das Wasser wird aus höhergelegenen meist künstlich angelegten Speicherseen (Fassungsvermögen der offenen Wasserspeicher rd. 5.000 – 50.000 m³) in Zapfsäulen gepumpt, die entlang der Abfahrten montiert sind. An diese Wasserentnahmestellen sind die Schneekanonen angeschlossen.

b) Ökologische Auswirkungen von Schneekanonen

Schneekanonen funktionieren normalerweise nur bei einer Lufttemperaturen unter 0°C. Unter gewissen Voraussetzungen kann eine künstliche Beschneigung auch über 0°C Lufttemperatur (bis max. plus 6°C) durchgeführt werden, und zwar wenn dem

Wasser chemische bzw. biotechnische Zusätze unter hohem Druck beigemischt werden.

Zu derartigen Zusätzen gehört *Snomax*, dessen Wirkstoff das Bakterium „*Pseudomonas syringae*“ ist. Dieses Bakterium wird künstlich gezüchtet, gefriergetrocknet und durch Sterilisation „vollständig“ abgetötet (Golja, 2003, S. 93). *Snomax* fungiert als Eiskeim und führt dazu, dass der Kristallisationsprozess speziell bei höheren Temperaturen einsetzt.

Selbst wenn alle Bakterien abgetötet werden, hat *Snomax* dennoch eine negative Wirkung auf die Vegetation. Der natürliche Eigenschutz der Pflanzen gegen Frost wird vermindert. Außerdem bestätigten Untersuchungen, dass nicht alle Bakterien abgetötet werden, was zusätzlich eine Gesundheitsgefährdung für den Menschen darstellt, weil Wasser als Kunstsnee versprüht, in die Atemwege und ins Trinkwasser gelangen kann (Stadler, 2005, S. 171).

Wie bereits erwähnt, apert eine künstlich geschaffene Schneedecke, im Gegensatz zu einer Naturschneepiste, bis zu drei Wochen später aus und verlängert somit die Skisaison. Dies hat allerdings mehrere Folgen:

1. Der Beginn des Pflanzenwachstums verzögert sich, so dass es zu einer Verschiebung der Blütezeit einiger Pflanzenarten kommen kann (Eggers, 1993, S. 31).
2. Durch das verspätete Abschmelzen der Kunstschneepiste im Frühjahr kommt es zu einem zusätzlichen Wassereintrag. Durch die Jahresniederschlagsmenge kommt es zu einer Zunahme des Wassereintrags in Höhe von rd. 20-30%. Berücksichtigt man auch noch die Schneeschmelze im Zeitraum von März bis Mai aus den höher gelegenen Regionen, kann sich der Wassereintrag sogar verdoppeln (Eggers, 1993, S. 38).
„Je nach Bodenbeschaffenheit, Hangneigung und Lage der Piste kann sich der Oberflächenabfluss beträchtlich erhöhen“ (Eggers, 1993, S. 38).

An von Natur aus feuchten und schattigen Standorten, kommt es durch diesen zusätzlichen Wassereintrag zu einer vermehrten Verringerung der Bodenstabilität.

3. Je nach Standort einer natürlichen Wasserquelle ist diese mehr oder weniger mit Nährstoffen angereichert. Durch künstliche Beschneigung gelangen diese Nährstoffe aus den Speicherseen vorerst auf die Piste und später in den Boden. Anlässlich einer im Jahre 1987 durchgeführten Untersuchung einer Beschneiungsanlage im schweizerischen Savognin stellte sich heraus, dass die mit der Beschneigung aufgebrauchte Menge an Natrium und Schwefel pro Jahr größer war als jene durch konventionelle Düngung mit Stallmist. (Eggers, 1993, S. 38).

Düngung bedeutet immer eine Veränderung der Artenvielfalt. Durch den zusätzlichen Wassereintrag wird die Artenvielfalt zugunsten feuchtigkeitsliebender Pflanzen, die nicht der natürlichen Umgebung entsprechen, verändert. Artenreiche Magerstandorte (d.h. nährstoffarme Standorte wie Magerwiesen und -weiden sowie Regionen oberhalb der Waldgrenze) werden dauerhaft zerstört. Zusätzlich belasten die Nährstoffe das Grundwasser (Eggers, 1993, S. 38).

4. Aufgrund der von Kunstschnee höheren Dichte, geht künstliche Beschneigung immer mit einer Verfestigung der Schneedecke einher. Im Gegensatz zu lockerem Schnee bietet die Kunstschneedecke eine geringere Wärmeisolation. Der Frost kann schneller und tiefer in den Boden eindringen und Pflanzen massiv schädigen. Darüber hinaus ist die Kunstschneedecke weniger luftdurchlässig. Es kommt unter der Piste häufig zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentration mit entsprechender CO₂-Anreicherung. Empfindliche Pflanzen gehen dadurch zugrunde (Eggers, 1993, S. 30).

Kunstschneepisten tauen im Frühjahr später und langsamer ab. Das Ausapern kann sich um mehrere Wochen verzögern. Das verkürzt die Vegetations- und gleichzeitig die Erholungszeit der Pflanzen (Eggers, 1993, S. 31).

5. Mit der Betreibung einer Beschneiungsanlage begibt man sich in einen Teufelskreis. Einerseits befinden wir uns im Klimawandel, der schneeärmere Winter zur Folge hat, andererseits möchte man den Wintertourismus als Wirtschaftsfaktor nicht verlieren bzw. weiter ausbauen. Die Folgen der künstlichen Beschneigung sind jedoch gleichzeitig ein erhöhter CO₂-Ausstoß. Der Energieverbrauch einer Beschneiungsanlage eines durchschnittlichen Skigebietes beträgt pro Jahr etwa 400.000 kWh (Eggers, 1993, S. 39). Zum Vergleich: Der Jahresbedarf eines Einfamilienhauses liegt bei etwa 6.000 kWh.

Die Beschneiungsleistung der heimischen Seilbahnen sicherte in der Wintersaison 2004/05 die Schneegarantie auf 40 Prozent der Pisten in Österreich. Hierfür wurden insgesamt 128 Mio. € investiert (Stadler, 2005, S. 167).

Gemeinsam mit dem Energieverbrauch kostet ein Kubikmeter Schnee rund 5 €. Die Tabellen 3 und 4 geben einen groben Überblick über Strom- und Wasserverbrauch von Schneekanonen.

Tab. 3: Stromverbrauch von Beschneiungsanlagen

	Strommenge (kWh)
1m ³ technischer Schnee	1.5 - 9
1 ha technischer Schnee bei 30 cm Schneehöhe	5.000 – 27.000

Quelle: (Teich et al., 2007, S. 94)

Tab. 4: Wasserverbrauch Beschneiungsanlagen

	Wassermenge (l)	Wassermenge (m ³)
1m ³ technischer Schnee	200 - 500	0,2 – 0,5
1 ha technischer Schnee bei 30 cm Schneehöhe	600.000 - 1.500.000	600 – 1.500

Quelle: (Teich et al., 2007, S. 94)

c) Ausmaß der Beschneigung im Alpenraum

In den Alpen wurde die Errichtung von Beschneiungsanlagen vor allem nach den schneearmen Wintern Ende der 1980er Jahre stark forciert (Teich et al., 2007, S.

27). Mittlerweile verfügen rund 90 Prozent aller großen Skigebiete über Beschneiungsanlagen (Teich et al., 2007, S. 27). Einige Skidestinationen wie Tre Valli in Südtirol und Chamrousse im Département Isère in Frankreich können bereits zu 100 Prozent beschneit werden (Teich et al., 2007, S. 27)

In der Schweiz etwa können derzeit 19 Prozent der Skipistenfläche beschneit werden (Teich et al., 2007, S. 27). Die Verbreitung technischer Beschneiungsanlagen verlief in der Schweiz rasend schnell. Wurden im Jahr 1990 ca. 1 Prozent der Pistenfläche beschneit, so waren es im Jahr 2000 bereits ca. 7 Prozent und im Jahr 2003 ca. 10 Prozent (Teich et al., 2007, S. 27). Derzeit können 19 Prozent der Skipistefläche beschneit werden und das, obwohl im Jahr 1993 großflächige Beschneigungen von Skipisten in der Schweiz auf Grund einer Initiative im Kanton Bern noch der Bewilligungspflicht unterstellt waren. Die Liberalisierung der künstlichen Beschneigung stellte sich wie folgt dar (Teich et al., 2007, S. 27):

- 1995 Beschneigung ganzer Pisten für bedeutende Sportanlässe
- 1998 Aufhebung des Verbots chemischer Zusätze
- 2000 Erlaubnis zur flächendeckenden Beschneigung

Dieser Trend, Beschneiungsanlagen großflächig auszubauen, wird vermutlich auch in den kommenden Jahren anhalten.

„In der Schweiz wurden 2006/07 ca. 20 Mio. CHF in den Neu- und Ausbau von Beschneiungsanlagen investiert; für 2007/08 sind weitere Investitionen in Höhe von ca. 30 Mio. CHF geplant“ (Teich et al., 2007, S. 27).

Tabelle 5 gibt einen Überblick über das Ausmaß technischer Beschneigung im Alpenraum.

Tab. 5: Ausmaß technischer Beschneigung im Alpenraum

	Pistenfläche	beschneit	in %
Schweiz	22.300 ha	4.200 ha	19%
Österreich	20.000 ha	10.000 ha	50%
Deutschland (Bayern)	3.700 ha	480 ha	13%
Italien	22.600 ha	9000 ha	40%
Frankreich	25.000 ha	4.750 ha	19%
Slowenien	1.200 ha	320 ha	27 %
Liechtenstein	138 ha	60 ha	43%
gesamter Alpenraum	Ca. 95.000 ha	Ca. 28.500 ha	30%

Quelle: (Teich et al., 2007, S. 28).

d) Zukünftige Entwicklung von Beschneigungssystemen

Für die Skigebiete ist die technische Beschneigung insbesondere in den Monaten Oktober, November und Dezember zur Präparierung der Pistenunterlage und zur Sicherung des Weihnachtsgeschäftes von größter Bedeutung. Teich et al. (2007, S. 26) führen aus, dass eine Analyse der natürlichen Schneedecke der vergangenen Winter zeigte, dass in Folge der wärmeren Temperaturen eine Abnahme der Schneedeckenhöhe in der Frühwinterperiode auch in Lagen oberhalb von 1.300 m Seehöhe zu verzeichnen ist. Deshalb wird die technische Beschneigung im Frühwinter für die Bergbahnbetreiber existenziell.

Die technische Beschneigung bei Umgebungstemperaturen über dem Gefrierpunkt stellt jedoch eine große Herausforderung dar und endet oft mit einem Misserfolg und mit einem verschwenderischen Umgang von natürlichen Ressourcen. Die Hersteller der Beschneigungsanlagen werden deshalb vor neue technische Herausforderungen gestellt, um dieser Problematik entgegenzuwirken. Bei der Entwicklung von neuen Anlagen werden folgende drei wichtige Eigenschaften hervorgehoben (Teich et al., 2007, S. 26):

- Die Beschneigung im Temperaturgrenzbereich muss gewährleistet sein,
- Die Anlage muss über eine hohe Schneikapazität verfügen,

- Die Anlage sollte möglichst energie- und kosteneffizient sein.

Mit einer hohen Schneikapazität können die Pistenbetreiber gewährleisten, dass die Grundbeschneigung der Skipisten innerhalb weniger Tagen abgeschlossen ist. Somit können die potentiellen Beschneigungstage gezielter und effizienter ausgenützt werden.

„Solche neuartigen Systeme hätten zudem eine verbesserte Ökobilanz (reduzierter Druckluftverbrauch, Beschneigung ohne chemische Zusätze auch bei höheren Temperaturen) zur Folge, was in Bezug auf die ökologische Verträglichkeit der Beschneigungsanlagen im Skigebiet von Bedeutung ist“ (Teich et al., 2007, S. 26).

Seit kurzem werden auch Beschneigungssysteme entwickelt, die nach einem ganz neuen Verfahren technischen Schnee bei Plus-Temperaturen erzeugen können (Teich et al., 2007, S. 26):

Diese Technologie basiert dabei auf absolutem Vakuum und wurde bisher für die Entsalzung von Meerwasser zur Produktion von Trinkwasser verwendet. Wenn sich Meerwasser in einem Vakuum befindet, verdampft ein Teil dieses Wassers und kondensiert zu Süßwasser. Die Schneeproduktion funktioniert dabei nach dem gleichen Prinzip. Das Süßwasser wird dem Vakuum zugeführt und wiederum verdampft ein Teil. Dieser Teil entzieht dem anderen Teil Energie, der dann bis unter den Gefrierpunkt abkühlt und zu Schnee wird. Mit einem auf Luftdruck basierenden Kompressor-System kann der Schnee bis zu einer Distanz von 1.5 km transportiert werden.

Den Herstellern zufolge zeigen bereits Gletscherskigebiete in Österreich und der Schweiz Interesse an diesen neuartigen Beschneigungssystemen. Jedoch sind diese Systeme mit einem sehr hohen Energieverbrauch verbunden und deshalb weder energie- noch kosteneffizient. Es ist deshalb fraglich, ob sich solche Verfahren für die Schneeerzeugung bei Plus -Temperaturen zukünftig durchsetzen werden.

9.2 Der Indoor-Skilauf

In diesem Kapitel möchte ich auf das Thema Skihallen näher eingehen. Dieser Trend zur Errichtung solcher Wintersporthallen ist vor allem in flacheren Regionen Mittel- und Westeuropas, aber auch in Australien, den USA und dem Mittleren Osten zu finden. In Anbetracht der zukünftigen klimatischen Entwicklung ist das Indoor-Skilaufen eine weitere mögliche Zukunftsperspektive für den Wintersport.

Die Erfolge der deutschen Skihallen, die sich in den letzten drei Jahrzehnten etablierten und mit tendenziell steigenden Besucherzahlen aufzeigen, liegen vor allem im Zusammenspiel jener Faktoren begründet, die auch in einem naturnahen Skigebiet zu finden sind (Stadler, 2005, S. 192).

Neben den traditionellen Angeboten wie Gastronomie, Sporthandel, Skisschule und Verleih versucht man mit erweitertem Angebot, das über das Skifahren hinausläuft, wie etwa Kletterwände, Snowtubingbahnen und Businesscenter, einen möglichst großen Kundenkreis zu erreichen.

Dennoch sehen sich die Skihallenbetreiber nicht als Konkurrenz zu den Alpen, sondern eher als Ergänzung bzw. Anregung für den Wintersport.

„Der Geschäftsführer der zweitgrößten Skihalle in Deutschland spricht davon, dass rund 100.000 neue Ski- und Snowboardfahrer jedes Jahr in der Skihalle ihre Leidenschaft für den weißen Sport entdecken und somit die künstlichen Pisten im künstlichen Klima auch Nachwuchs für die echten Berge rekrutieren“ (Stadler, 2005, S. 193).

Darüber hinaus zeigt sich bei den bereits vorhandenen Skihallen, dass diese weniger Sportstätten sind, sondern vielmehr Event- und Funstätten eines vorwiegend konsumorientierten Publikums (Stadler, 2005, S. 193).

Aus ökologischer Perspektive betrachtet sind Skihallen dennoch nicht frei jeglicher Bedenken. So wurde im Jahr 2003 das Skihallenprojekt Sasbachwalden in Deutschland auf Grund ökologischer Bedenken nicht realisiert. Vor allem der Deutsche Alpenverein wehrte sich vehement gegen die geplante Realisierung. Begründet wurde seitens des Deutschen Alpenvereins wie folgt (DAV, 2003, S. 2):

- Der Bau einer Skihalle in Sasbachwalden ist ein umweltschädigendes Großprojekt und stellt einen nachhaltigen Eingriff in das ökologische Gefüge der Hornisgrinde dar. Eine intakte Landschaft ist in Bergregionen wie dem Schwarzwald das große Kapital für den Tourismus. Skihallen zur Ausübung von alpinem Wintersport sind deshalb in solch sensiblen Naturlandschaften fehl am Platz. Für den Naturraum Schwarzwald müssen gebietsspezifische und zukunftsweisende Formen von Tourismus und Natursport entwickelt und umgesetzt werden.
- Der Bau und Betrieb der Skihalle am geplanten Standort führt zum Verbrauch von Landschaft, Ressourcen, Energie und führt zur Steigerung von Verkehr und Schadstoffbelastungen. Die Skihalle widerspricht grundsätzlichen Zielen des Klima-, Natur- und Umweltschutzes (Protokolle von Rio, Kyoto, Umweltplan Baden- Württemberg).
- Auf Klimaveränderung und daraus resultierende schneeärmere Winter mit weiteren klimaschädlichen Maßnahmen zu reagieren ist kein geeignetes Mittel zur Problemlösung.
- Als Natursportverband möchte der Deutsche Alpenverein die Menschen an die Natur heranführen und das Bewusstsein für ein umweltverträgliches Verhalten fördern. Durch eine Skihalle in einem Berggebiet werden die besonderen landschaftlichen Potenziale übergangen. Natürliche Erlebniswelten werden durch Kunstwelten ersetzt und so die Distanz zwischen Mensch und Natur vergrößert.

Auch die geplante Skihalle in Todtmoos, Deutschland, steht schwer unter Beschuss. Der tourismuspolitische Sprecher der bündnisgrünen Landtagsfraktion Reinhold Pix verweist zur Begründung auf eine im Jahr 2005 veröffentlichte Einschätzung der DEGI (Deutsche Gesellschaft für Immobilienfonds), die Skihallenprojekte ohne ökologische Prüfung allein aus wirtschaftlicher Betrachtungsweise im Mittelgebirge als hochriskant einstuft. Zur Rentabilität einer solchen Einrichtung brauche es ein dicht besiedeltes Einzugsgebiet, da für einen wirtschaftlichen Betrieb mindestens 500.000 Besucher jährlich benötigt werden (Stadler, 2005, S. 198).

Hinzu kämen erhebliche Kosten für den immensen Energiebedarf. So verschlingen Skihallen jährlich 5 Mio. kWh da sie ganzjährig auf konstanten -5°C gekühlt werden müssen (Stadler, 2005, S. 200).

9.3 Zusammenschlüsse zu großen Skiregionen

Eine attraktive Zukunftsperspektive für den Wintersport sind großflächige Zusammenschlüsse benachbarter Skorte, die mit dem gleichen Marketingkonzept vermarktet werden können. Seilbahnbetreiber die miteinander kooperieren, haben die finanziellen Möglichkeiten dem Klimawandel entgegenzuwirken. Abegg (1996, S. 196) fasst die Möglichkeiten die sich aus einer engeren Kooperation auf lokaler und regionaler Ebene ergeben wie folgt zusammen:

- Es ist eine koordinierte Investitionstätigkeit möglich, wodurch im Kollektiv moderne Pistenfahrzeuge oder Beschneiungsanlagen gekauft werden können.
- Durch derartige Kooperationen ist die Ausnützung von Kostensparpotentialen, etwa im gemeinsamen Betrieb und Unterhalt von Fahrzeugen, in der Zusammenarbeit bei der Pistenpräparierung und der Bewirtschaftung von Parkplätzen gewährleistet.
- Durch den Ausbau von Tarifgemeinschaften sowie durch die Vermarktung der Skiregion mit einer Marketingstrategie lassen sich ökonomische Vorteile effektiv nutzen.

Beispielgeber für derartige Entwicklungen ist die Sportwelt Amdè, Österreichs größter Skipassverbund der 276 Seilbahnen und 865 Pistenkilometer aus fünf Skigebieten umfasst (Stadler, 2005, S. 201).

9. 4 Der Gletscherskillauf

In den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde damit begonnen die Gletscher der Alpen touristisch zu erschließen. Man versprach sich von der Gletschererschließung eine nachhaltige Attraktivitätssteigerung alpiner Regionen. Es sollte vor allem der damals rückläufige Sommertourismus angekurbelt werden. Das Sommerskifahren wurde langsam zur Modeerscheinung und erlebte einen Aufschwung. Im Laufe der Zeit wurden die Gletscher auch in den Winterbetrieb integriert.

„Ende der achtziger und zu Beginn der neunziger Jahre wurde der Sommerbetrieb immer unbedeutender und die Gletscher wurden wichtig als Garanten der Schneesicherheit im Winter und für die Sicherung eines frühen Saisonstarts im Herbst“ (Elsasser & Bürki, 2005, S. 21).

Ein früher Saisonstart ist nicht nur für das betreffende Skigebiet wichtig, sondern hat vor allem eine Signalwirkung für den gesamten Wintersport sowie für die damit verbundene Sportartikelbranche. Zu Beginn der neunziger Jahre kam es zu folgender Situation: Die Erwartungen, die in das Sommerskifahren gesetzt wurden, erfüllten sich nur noch in wenigen Gletscherskigebieten. Wegen der immer stärker werden Ausaperung wurde vielerorts der Sommerskibetrieb eingestellt.

„In den schneearmen Wintern Ende der achtziger Jahre konnte die Rettungsankerfunktion der Gletscherskilifte gut nachgewiesen werden (Elsasser & Bürki, 2005, S. 21). Massive Frequenzsteigerungen auf Grund von Schneearmut in tieferen Lagen waren die Folge.

In einer im Jahr 2003 veröffentlichten Studie über Erweiterungs- und Neuerschließungsprojekte von Skigebieten in den Schweizer Alpen wurden 113 Ideen und Projekte gezählt, davon 18 in der Kategorie „Hochgebirgserschließung“ mit Schwerpunkten in den Kantonen Wallis und Graubünden (Elsasser & Bürki, 2005, S. 22). Obwohl sich die Vielzahl dieser Projekte als Utopien entpuppten, die auch an Rentabilitäts- und Finanzierungsfragen scheiterten, ist die grundsätzliche Idee der

Erschließung der Gletscherskigebiete eigentlich eine logische Schlussfolgerung aufgrund der wegen der Klimaerwärmung weiter in die Höhe gewanderten Schneegrenze.

Auch in Österreich gibt es derartige Projekte. Das Tiroler Ski-Mekka Ischgl beispielsweise möchte das Gletschergebiet Kaunertal erweitern. Im Tiroler Ötztal möchte man mit den Seilbahnen immer näher an die Weißseespitze rücken.

Problematisch ist, dass die Seilbahnbetreiber auch geschützte Bereiche der Gletscher für sich gewinnen möchten. Naturschützer protestieren gegen diesen Vorstoß vehement, da die ohnehin in die enge getriebene hochalpine Flora und Fauna äußerst sensibel auf Eingriffe reagiert. Darüber hinaus ist diese Erschließung extrem aufwendig und kostspielig.

Die Problematik der Gletscherschmelze führt gerade in Hochlagen durch instabil werdende Hänge zu zusätzlichen Gefahren und Unsicherheiten. Schlagzeilen machte beispielsweise das Skigebiet Gemsstock bei Adermatt (Kt. Uri) im Frühjahr 2005. Die Skiabfahrt von der Bergstation in 2.961m Höhe führt über den *Gurschengletscher*. In den letzten 15 Jahren hat sich dieser Gletscher jedoch um 20 Meter abgesenkt (Elsasser & Bürki, 2005, S. 22). Ohne kostspielige Kunstbauten die nur mit hohem Arbeits- und Maschinenaufwand zu errichten sind, ist es nicht mehr möglich die Pisten auf dem abgesunkenen Gletscher zu erreichen. Im Mai, nach Ende der Wintersaison, werden nun 2.500m² des Gurschengletschers mit einer speziellen weißen Folie aus Polyester und Polypropylen abgedeckt. Dadurch soll die Schneeschicht vor Wärmeeinstrahlung, UV-Strahlen und Regen geschützt werden (Elsasser & Bürki, 2005, S. 22).

Auch den Schweizer Rhone-Gletscher möchte man vor dem Abschmelzen schützen. Studierende der Uni Mainz haben einen 15 Meter breiten und drei Meter hohen Test-Windfang in der Mitte der Gletscherzunge aufgebaut, um durch den Stau der Fallwinde einen kühlenden Effekt herbeizuführen und so die Abschmelzung zu verringern (Der Standard, 16./17. August 2008).

10 Zusammenfassung

Der Klimawandel und seine Folgen kommen mit hohem Tempo auf uns zu. Neben den natürlichen Ursachen, die zu Klimaänderungen führen können, sind es seit der Industrialisierung vor allem die anthropogenen Ursachen, die zur jetzigen Situation führten.

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts kam es zu einer enormen Steigerung der Emissionen klimawirksamer Spurengase. Diese kommen aus der Nutzung fossiler Energieträger. Die Verfeuerung von Kohle, Erdgas, Erdöl sowie das gestiegene Verkehrsaufkommen treiben den Treibhauseffekt gewaltig an. China und Indien sind dabei, den einstigen Emissionsweltmeister USA zu überholen.

Klimamodelle der IPPC prophezeien eine dramatische Temperaturzunahme, wenn die CO₂-Emissionen nicht drastisch reduziert werden. Die gesamte Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklung der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2100 reicht von 1,4°C bis 5,8°C Temperaturerhöhung.

Die Auswirkungen des Klimawandels sind heute schon bei uns in den Alpen bemerkbar. So sind beispielsweise die Tage der Schneebedeckung in vielen Skigebieten der Alpen deutlich zurückgegangen. Aber auch der Gletscherrückgang ist ein deutliches Zeichen.

Auf Grund der klimageographischen Lage, sowie auf Grund der Form und Oberflächenbeschaffenheit, reagieren die Alpen besonders sensibel auf Klimaänderungen. Schon bei geringfügigen Klimaänderungen verschieben sich die Schneegrenze, Waldgrenze, Rasengrenze und die Permafrostgrenze nach oben bzw. nach unten.

Zuverlässige Voraussagen über ein zukünftiges Klima in den Alpen stellen eine große Herausforderung für die Forscher dar. Unsicherheiten ergeben sich auf Grund der großen Komplexität des Klimasystems, sowie auf Grund der natürlichen Variabilität des Klimas. Auch hochkomplexe Klimamodelle, die eigens auf die Alpen abgestimmt werden, bringen keine befriedigenden Ergebnisse. Dennoch weisen alle

Klimaszenarien für den Alpenraum darauf hin, dass in den nächsten Jahrzehnten durch den Treibhauseffekt signifikante Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation eintreten können. Niederschlagsanomalien, die in den letzten Jahren im Alpenraum beobachtet wurden, liefern gewissermaßen den Beweis.

Gletscher eignen sich besonders gut, um die Klimasituation im Alpenraum zu veranschaulichen. Rund 90 Prozent der alpinen Gletscher haben in den letzten Jahren mehr als die Hälfte ihrer Substanz verloren. Forscher rechnen mit weiteren enormen Verlusten. Es wird sogar davon ausgegangen, dass in etwa 50 bis 60 Jahren nahezu sämtliche Gletscher der Alpen verschwunden sein werden.

Die Auswirkungen des Klimawandels machen sich vor allem beim Wintertourismus bemerkbar. Eine Verkürzung der Wintersaison bzw. schneearme Winter hinterlassen nicht nur in der Tourismusbranche, sondern in der gesamten Skibranche, deutliche Spuren.

Wissenschaftler gehen davon aus, dass zukünftig unterhalb von 1200m nur mehr selten eine geschlossene Schneedecke anzutreffen sein wird. Dies würde für viele Skigebiete in den Alpen das Ende bedeuten. Alleine der milde Winter in der Saison 2006/07 führte bei allen großen Skisherstellern zu Verlusten im zweistelligen Millionenbereich.

Die Zukunftsperspektiven für den Wintersport sehen nicht rosig aus. So ist etwa die Erschließung neuer, höher gelegener Regionen ökologisch äußerst fragwürdig. Kunstschnee als Allheilmittel ist ebenfalls nur bedingt geeignet, da er ökologisch bedenklich ist und ökonomisch ein Preistreiber bei den Liftkarten.

Der Gletscherskilauf, der einst als Garant für einen frühen Saisonstart galt, ist auf Grund des massiven Gletscherrückzugs mit Gefahren verbunden. Schutt auf den Skipisten und offene Gletscherspalten gefährden die Skiläufer.

Bleibt noch der Indoor-Skilauf als Zukunftsperspektive, wobei hier wiederum der Faktor „Naturerlebnis“ beim Skilauf zur Gänze fehlt. Darüber hinaus ist der Betrieb einer Indoor-Skihalle mit enormem Energieaufwand verbunden.

Problematisch ist, dass auch der Wintertourismus sowie die dazugehörige Industrie generell den anthropogenen Treibhauseffekt in gewisser Weise weiter ankurbeln. Optimierung des Energieeinsatzes oder der verstärkte Einsatz alternativer Energie im Bereich des Wintersports bzw. Wintertourismus wären Möglichkeiten dies zu vermeiden.

Literaturverzeichnis:

Abegg, B. (1996). *Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen*. Zürich: Vdf Hochschulverlag.

Baumhackl, H. (2005). *Einführung in die Tourismuswirtschaft*. Skriptum zur Vorlesung. Universität Wien.

Braun, L. & Weber, M. (2005). Gletscher – Wasserkreislauf und Wasserspende. *Bedrohte Alpengletscher*. Fachbeiträge des Österreichischen Alpenvereins. 27, 41-46.

Breiling, M. (1993). *Klimaveränderung, Wintertourismus und Umwelt*. In *EnviroTour II*. Wien, Hilton: Internationale Gesellschaft für Umweltschutz.

Breiling, M., Charamza, P. & Skage, O (1997). *Klimasensibilität österreichischer Bezirke mit besonderer Berücksichtigung des Wintertourismus*. Endbericht des Forschungsauftrages des Österreichischen BM für Wirtschaftliche Angelegenheiten. Alnarp.

Briffa, K. R, Jones, P.D., Schweingruber, F.H. & Osborn T.J. (1998). *Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over past 600 years*. Nature 393.

Bürki, R. (2000). *Klimaänderung und Anpassungsprozesse im Wintertourismus*. Heft 6. St. Gallen: Verlag St. Gallen. Publikationen der Ostschweizerischen geographischen Gesellschaft.

Dettling, S. (2005). *Sporttourismus in den Alpen. Die Erschließung des Alpenraums als sporttouristisches Phänomen*. Marburg: Tectum Verlag.

Eggers, R. (1993). *Skisport und Ökologie. Beiträge zur Lehre und Forschung im Sport*. Band 103. Schorndorf: Karl Hofmann.

Elsasser, H. & Bürki, R. (2005): Klimawandel und (Gletscher-) Tourismus. *Bedrohte Alpengletscher*. Fachbeiträge des Österreichischen Alpenvereins. 27, 16-23.

Föhn, P. (1990): *Schnee Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. Schnee und Lawinen*. Nr. 108. Zürich: Mitteilungen VAW-ET.

Formayer, H., Eitzinger, S., Nefzger, H., Simic, S. & Kromp-Kolb, H. (2001). *Auswirkungen einer Klimaveränderung: Was aus bisherigen Untersuchungen ableitbar ist*. Wien: Universität für Bodenkultur.

Geel van, B., Raspopov, M., Renseen, J., Van der Plicht, J., Dergachev, H. A. & Meijer, J. (2002). *The Role of Solar Forcing upon Climate Change*. In *Climate Change, Critical Concepts in the Environment*. London: Verlag Routledge.

Glogger, B. (1998). *Heißzeit. Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz*. Zürich: vdf Hochschulverlag.

- Golja, M. (2003). *Die ökologischen Auswirkungen eines medialen Großereignisses am Beispiel der alpinen Skiweltmeisterschaft 2001 in St. Anton Am Arlberg*. Wien: Universität Wien.
- Gspan, B. & Scheiber E. (2007). *Klimawandel & Wintertourismus*. Wien: Club Niederösterreich.
- Güthler, A. (2003). *Aufrüsten im alpinen Wintersport. Ein Hintergrundbericht*. Alpmedia Hintergrundbericht. CIPRA.
- Gyalistras, D. (2000). Wie wird sich die atmosphärische Zirkulation im Raum Nordatlantik-Europa verändern?. In *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Gyalistras, D., & Schär, C. (1998). *Future Alpine Climate*. In *Views from the Alps*. Cambridge: MIT Press.
- Häckl, H. (1999). *Meteorologie*. 4. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Haubner, E. (2002). *Klimawandel und Alpen. Ein Hintergrundbericht*. CIPRA International.
- Kromp-Kolb, H. (1998). *Gletscherrückgang durch Klimawandel*. ACCC.
- Kromp-Kolb, H. (2006). *Klimawandel und Gesundheit, Tourismus, Energie. Endbericht*. Wien: Umweltbundesamt.
- Kromp-Kolb, H. & Formayer, H. (2001). *Klimaänderungen und mögliche Auswirkungen auf den Wintertourismus in Salzburg*. Wien: Universität Wien.
- Kromp-Kolb, H. & Formayer, H. (2005). *Schwarzbuch Klimawandel. Wie viel Zeit bleibt uns noch?* Salzburg: ecowin.
- Kuhn, M. (2005). Gletscher im Klimawandel. *Bedrohte Alpengletscher*. Fachbeiträge des Österreichischen Alpenvereins. 27, 35-40.
- Lamb, H.H. (1977). *Climate: Present, Past, Future*. Vol 2. London: Methuen.
- Leser, H. (Hrsg.), Haas, H.-D., Mosimann, T. und Paesler, R. (1997). *Diercke - Wörterbuch allgemeine Geographie*. Deutschland: Westermann.
- Luger, K. & Rest, F. (Hrsg.). (2002). *Der Alpentourismus – Entwicklungspotentiale im Spannungsfeld von Kultur, Ökonomie und Ökologie*. Innsbruck, Wien, München, Bozen, Studienverlag.
- Luterbacher, L. (2000). Die Kleine Eiszeit. In *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*. Zürich: vdf Hochschulverlag.
- Milanković, M. (1930). *Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen*. Berlin: Borntraeger.

- Mosimann, T. (1986). *Skitourismus und Umweltbelastung im Hochgebirge*. In *Geographische Rundschau*. Jahrgang 38.
- Mundt, J. W. (1998). *Einführung in den Tourismus*. 2. Auflage. München, Wien: Oldenbourg.
- ProClim, (2001). *Dritter Wissensstandsbericht des IPCC (TAR): Klimaänderung 2001. Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger*. Bern: ProClim.
- Pröbstl, U. (2006). *Kunstschnee und Umwelt – Auswirkungen der technischen Beschneigung*. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt Verlag.
- Schönwiese, C. D. (1995). *Klimaänderungen: Daten, Analysen, Prognosen*. Berlin: Springer.
- Schönwiese, C. D. (2000). *Treibhaus und Klimaänderungen*. In *Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie*. Band 1B: Atmosphäre. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schönwiese, C. D. (2003). *Klimatologie*. 2. Auflage. Stuttgart: Ulmer.
- Slupetzky, H. (2005). Die Gletscher geben Neuland frei: Das Gletschervorfeld. *Bedrohte Alpengletscher*. Fachbeiträge des Österreichischen Alpenvereins. 27, 50-56.
- Stadler, S. (2005). *Klimawandel & Wintertourismus in den Alpen. Effekte und Bewältigungsstrategien der Wintersportorte*. Wien: Universität Wien.
- Teich, M., Lardelli, C., Bebi, P., Gallati, D., Kytzia, S., Pohl, M., Pütz, M. & Rixen, C. (2007). *Klimawandel und Wintertourismus: Ökonomische und ökologische Auswirkungen von technischer Beschneigung*. Birmensdorf: Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
- Veit, H. (2002). *Die Alpen. Geoökologie und Landschaftsentwicklung*. Stuttgart: Ulmer.
- Wanner, H. (2000). Der Klimawandel in den Alpen und in der Schweiz aus historischer und aktueller Sicht. In *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*. Zürich: vdf.
- Wanner, H., Gyalistras, D., Luterbacher, J., Rickli, R., Salvisberg, E. & Schmutz, C. (2000). *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*. Zürich: vdf.
- Wanner, H. & Schmutz, C. (2000). Dynamische Überlegungen zur geographischen und synoptischen Kontrolle des Alpenklimas. In *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*. Zürich: vdf.
- Winkler, S. (2002). *Von der kleinen Eiszeit zum globalen Gletscherrückzug- Eigenen sich Gletscher als Klimazeugen?* Mainz: Akademie der Wissenschaften und der Literatur. Stuttgart: Franz Steiner.

Witmer, U. (1976). *Die mittlere Schneehöhe und die Schneesicherheit im Kanton Bern*. In *Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft von Bern*. Band 52.

Witmer, U. (1986). *Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz*. In *Geographica Bernensia*. Bern: Geographisches Institut der Universität.

Lexika:

Bertelsmann Universal-Lexikon. (2003). Gütersloh: Bertelsmann.

Der Brockhaus Sport. Sportarten und Regeln, Regeln, Wettkämpfe und Athleten, Training und Fitness (2007). 6. Auflage. Mannheim: Brockhaus.

Freizeit-Lexikon. Neue Begriffe aus Politik, Wissenschaft, Praxis. (1986). Ostfildern: Fink-Kümmerly u. Frey.

Artikel aus Tageszeitungen und Broschüren:

Deutscher Alpenverein, (2003). *Positionspapier zur geplanten Skihalle in Sasbachwalden*. Landesverband Baden-Württemberg: Bergsport- und Kletterverband e.V.

Der Standard, (2008). *Wind gegen Schmelze*. 16. /17. August. S. 30.

Auer, M. (2007). *Ski: Standort Ried gefährdet*. In *Die Presse*. 11. Oktober. S. 22.

Weiß, O., (1999). *Sport 2000 – Entwicklungen und Trends im österreichischem Sport*. Wien: BSO.

Artikel aus dem Internet:

Der Lifestylepresseservice. Diese Planung ist weder ökologisch noch wirtschaftlich sinnvoll. Zugriff am 20. April 2008 unter <http://www.lifepress.de/presse-meldungen/buendnis-90die-gruenen-im-landtag-von-baden-wuerttemberg/boxid-1864.html>

Landesverband Baden-Württemberg des DAV Bergsport- und Kletterverband e.V. (2003). *Positionspapier zur geplanten Skihalle in Sasbachwalden*. Zugriff am 23. April 2008 unter http://www.alpenverein-bw.de/downloads/dav_position_skihalle.pdf

Tagesschau.de. Riesige Felsmassen stürzen vom Eiger-Massiv. Zugriff am 07. August 2008 unter <http://www.tagesschau.de/ausland/meldung108282.html>

Intergovernmental Panel on Climate Change. About IPCC. Zugriff am 05. Oktober 2008 unter <http://www.ipcc.ch/about/index.htm>

Wirtschaftsblatt. Talfahrt für die Skiindustrie: Markt verliert 30 Prozent. Zugriff am 16. Mai. 2008 unter <http://www.wirtschaftsblatt.at/home/275655/index.do>

Statistiken:

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1986). *Übernachtungen in den Winterhalbjahren 1949/50 bis 1984/85*. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1987). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1986*. Heft 860. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1988). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1987*. Heft 887. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1989). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1988*. Heft 930. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1990). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1989*. Heft 970. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1991). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1990*. Heft 1011. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1992). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1991*. Heft 1053. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1993). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1992*. Heft 1091. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1994). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1993*. Heft 1132. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1995). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1994*. Heft 1166. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1996). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1995*. Heft 1200. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1997). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1996*. Heft 1236. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1998). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1997*. Heft 1274. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (1999). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1998*. Heft 1301. Wien.

Österreichisches Statistisches Zentralamt, (2000). *Der Fremdenverkehr in Österreich im Jahre 1999*. Heft 1334. Wien.

Statistik Austria, (2001). *Tourismus in Österreich 2000*. Wien.

Statistik Austria, (2002). *Tourismus in Österreich 2001*. Wien.

Statistik Austria, (2003). *Tourismus in Österreich 2002*. Wien.

Statistik Austria, (2004). *Tourismus in Österreich 2003*. Wien.

Statistik Austria, (2005). *Tourismus in Österreich 2004*. Wien.

Statistik Austria, (2006). *Tourismus in Österreich 2005*. Wien.

Statistik Austria, (2007). *Tourismus in Österreich 2006*. Wien.

Statistik Austria, (2008). *Tourismus in Österreich 2007*. Wien.

Statistik Austria, (2007). *Österreich-Zahlen-Daten-Fakten 07/08*. Wien.

LEBENS LAUF

■ Persönliche Daten

Name: Boris Matejowsky
Geburtstag: 29.06.1976 in Mödling
Anschrift: Waldgasse 6, 2371 Hinterbrühl
Tel.: 0699/11282409
e-mail: borishome@gmx.at
Familienstand: ledig

■ Schulbildung

1982 – 1985 Besuch der Volksschule Hinterbrühl
1985 – 1986 Besuch der Volksschule Ma. Enzersdorf
1986 – 1991 Besuch der AHS Bachgasse, Mödling
1991 – 1996 Besuch der AHS Anton Krieger-Gasse, 1230 Wien
1996 Matura an der AHS Anton Krieger-Gasse, 1230 Wien

■ Ausbildung

1996 – 1997 Studium der Rechtswissenschaften an der Universität Wien
ab 01.10.1997 Studium Lehramt Leibeserziehung und Lehramt Geographie u. Wirtschaftskunde an der Universität Wien

■ Präsenzdienst

01.04.2003 – 23.12. 2003 Präsenzdienst beim Stabsbattalion 1 der Aufklärungskompanie, Bendek-Kaserne in Bruckneudorf. Sanitäterausbildung in der Kaserne Kranebitten in Innsbruck. Assistenzeinsatz an der burgenländischen Grenze.

■ Sonstige Qualifikationen

Sprachkenntnisse: Englisch fließend
Italienisch Grundkenntnisse

Hinterbrühl, am 2. November 2008