



# Klimawandel und Alpen.

Ein Hintergrundbericht.

## INHALT

Fakten und Daten .....	2
Der bewegte Boden .....	3
Erdrutsche und Extremniederschläge .....	4
Der Gletscher - eine bedrohte Spezies .....	6
Wintertourismus ade? .....	7
Palmen auf Berggipfeln? .....	7
Gewinner und Verlierer .....	9
Die Treibhauskeptiker .....	9
Lösung in Sicht? .....	10
Referenzen .....	11

---

# Klimawandel und Alpen

von Elke Haubner, CIPRA International

## Fakten und Daten

Die Neunzigerjahre waren global gesehen die wärmste Dekade seit Beginn zuverlässiger instrumenteller Messreihen um 1860, und höchstwahrscheinlich auch die wärmste des letzten Jahrtausends. Mit Hilfe von Klimamodellen wird versucht, die Verantwortlichkeit des Menschen daran und die weitere Entwicklung abzuschätzen.

In mehreren unabhängigen Arbeiten ist die nordhemisphärische Mitteltemperatur des letzten Jahrtausends rekonstruiert worden. Als Datenquellen für solche Rekonstruktionen dienen natürliche Klimaarchive wie Eisbohrkerne, Sedimente und Baumringe, aber auch historische Aufzeichnungen und frühe instrumentelle Messungen. Die Resultate deuten darauf hin, dass die Erwärmung im 20. Jahrhundert seit Beginn des letzten Jahrtausends einzigartig ist.<sup>1</sup> Der Beginn der Industrialisierung traf mit einem Ende der natürlichen kalten Phase überein. Natürliche und menschengemachte Erwärmungsprozesse überlappen sich.

In den letzten hundert Jahren haben sich die Treibhausgase stark angereichert; gleichzeitig ist es weltweit im Mittel um etwa 0,3 bis 0,6°C, in der Schweiz sogar um etwas mehr als 1°C wärmer geworden.

Aufgrund von Szenarien aus Klimamodellen erwartet man, dass bis zum Jahr 2100 die Klimaveränderung weiter beschleunigt und die globale Mitteltemperatur um weitere 1,5 bis 5°C erhöht wird, und dass der Meeresspiegel um 50 cm ansteigt.

Die *Komplexität des Klimasystems* wird insbesondere durch die Substanz Wasser verursacht und insbesondere dadurch, dass Wasser im Klimasystem in einer Vielzahl von Aggregatzuständen auftritt: in der Atmosphäre als Wasserdampf, Wolkentröpfchen und Eiskristalle; auf den Landoberflächen als Schnee, Eis und in flüssiger Form in den Oberflächengewässern; im Erdreich als Grundwasser, Bodenwasser und Permafrost; in den Ozeanen als Salzwasser; und in den polaren Gebieten als Meereis. Diese unterschiedlichen Formen von Wasser besitzen gänzlich unterschiedliche Eigenschaften, und ihr Wechselspiel ist entscheidend für das Verhalten unseres Klimasystems.

Obwohl der Wassergehalt der Atmosphäre mengenmäßig im Vergleich zu den Ozeanen vernachlässigbar ist, spielt atmosphärisches Wasser eine absolut zentrale Rolle: Wasserdampf ist das wichtigste Treibhausgas der Atmosphäre wegen der sogenannten Wasserdampf-Treibhaus-Rückkopplung. Die atmosphärische Bewölkung bestimmt die planetare Albedo der Atmosphäre, das heißt denjenigen Anteil der Sonneneinstrahlung, welcher durch die Atmosphäre in den Weltraum zurückreflektiert wird: Albedo-Rückkopplung durch Wolken. Schneebedeckte Landflächen und eisbedeckte Ozeane verstärken die Albedo der Erdoberfläche, d.i. die Albedo-Rückkopplung durch Schnee und Eis. Niederschlag und Abfluss von den Kontinenten bestimmen über den Süßwassereintrag in die Ozeane einen wichtigen Antrieb der Ozeanzirkulationen. All diese Prozesse sind in hohem Grade nichtlinear und verlangen nach einer quantitativen Behandlung, die im Rahmen von Klimaszenarien nur mit numerischen Modellen möglich ist. Gegenwärtig stammen deshalb die meisten Klimaszenarien aus numerischen Modellen sogar aus einer eigentlichen Kette von Modellen.<sup>1</sup>

Für die Alpenländer sind die jüngsten Ergebnisse bezüglich der Hydrosphäre, d.h. Wasserkreislauf, und Kryosphäre, d.h. Schnee und Eis, von besonderer Bedeutung. Weniger Schnee und mehr Regen werden die Winter der Zukunft bestimmen. Schon bei einer Erwärmung um 1°C wird die mittlere Dauer der Schneebedeckung in manchen Regionen um 4 bis 6 Wochen zurückgehen.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Christoph Schär, Martin Wild: Modelle in der Klimadebatte

<sup>2</sup> "Die Alpen im Treibhaus" - Eine Studie der Greenpeace-Büros Deutschland, Österreich und Schweiz

#### Die wichtigsten anthropogen verursachten Treibhausgase und ihre Herkunft:

- Kohlendioxid CO<sub>2</sub> (fossile Brenn- und Treibstoffe)
- Methan CH<sub>4</sub> (Nutztiere, Reisanbau)
- Lachgas = Distickstoffoxid N<sub>2</sub>O (Landwirtschaft, Verbrennungsprozesse)
- Fluorkohlenwasserstoffe FKWs (Kältetechnik, Isolationsschäume)
- Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKWs und Halogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe HFCKWs (Spraydosen, Schaumstoffherstellung, technische Lösemittel, Kältetechnik)

FCKWs wegen Ozonschädigung seit 1996 in Industrieländern verboten

**Verweildauer von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre:** 100 Jahre

#### Jährliche CO<sub>2</sub>-Emission in Tonnen/Kopf:

Weltweiter Durchschnitt	Durch-	3,8	1994
Schweiz		6	1996
Österreich		7,8	1996
Frankreich		6,6	1996
Deutschland		11,1	1996
Italien		7,3	1996
Slowenien		6,5	1990
USA		20,1	1996
Entwicklungsländer		0,9	1990

## Der bewegte Boden

Der Permafrostboden, d.h. Dauerfrostboden, ist ein ganzjährig gefrorener Boden, wo vereistes Wasser die losen Gesteinsbrocken aneinanderkittet. Im Hochgebirge ist Permafrost sowohl in Festgestein als auch in Lockermaterial wie Schutthalden, Moränen und Böden anzutreffen.

Die Höhenstufe des Permafrost liegt unterhalb der Gletscherregion ab ca. 2600 m.

Ein weiterer Temperaturanstieg wird kurzfristig zunehmende Mächtigkeiten der sommerlichen Auftauschicht, mittel- bis langfristig aber das Ausschmelzen tiefliegender Permafrostkörper und einen Rückzug des Permafrostgürtels in größere Höhen zur Folge haben.

In den 1980er Jahren erwärmten sich die Permafrostböden um 0,5-1°C. Die Permafrostgrenze hat sich in den letzten 100 Jahren um 150 bis 200 m nach oben verschoben. Für die nächsten 50 Jahre prognostizieren die Ergebnisse des NFP 31<sup>3</sup> bei einer Erwärmung um 1 bis 2°C einen Anstieg um weitere 200-750 m. Die Reaktionszeiten von Permafrosttemperaturen auf ansteigende Jahresmitteltemperaturen sind leider derzeit kaum abzuschätzen. Ein fortgesetzter Temperaturanstieg könnte jedoch zu so großen Massenbewegungen führen, wie sie in historischer Zeit bislang kaum bekannt waren.

#### Folgen:

Die Konsequenzen dieses Anstiegs für das Berggebiet sind im einzelnen noch schwer abschätzbar. Direkt betroffen können die Fundamente von Gebäuden und Seilbahn- bzw. Liftinstallationen sein. Sie werden durch Setzungenbewegungen im Untergrund infolge des Ausschmelzens von Eis beeinträchtigt. Als Beispiele sei die Erzherzog-Johann-Hütte am Großglockner angeführt.

Ausschmelzendes Eis kann durch Veränderung der hydrologischen Verhältnisse im Kluftsystem selbst Felswände destabilisieren. Auch eishaltige Schutthalden, Moränen etc. verlieren mit dem Eis ihr Bindemittel. Insgesamt ist durch den Permafrostrückzug mit einer Zunahme von *Hanginstabilitäten* zu rechnen. Bis

<sup>3</sup> Nationales Forschungsprogramm "Klimaänderungen und Naturkatastrophen"

sich die Untergrundtemperaturen wieder mit denen der Atmosphäre im Gleichgewicht befinden, können vermehrt Fels- und Bergstürze, Erdbeben oder Murgänge auftreten. Diese erreichen häufig den Talboden und bedrohen damit Siedlungsgebiete und Verkehrswege. Ein Ereignis, bei dessen Auslösung wahrscheinlich schmelzender Permafrost eine Rolle gespielt hat, ist der katastrophale Erdbeben im Val Pola im Veltlin vom 28. Juli 1987.

## Erdbeben und Extremniederschläge

Die lokalen und regionalen Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich besonders dramatisch in ökologisch sensiblen Gebieten wie beispielsweise den Alpen, was wiederholt anhand von Lawinen und Hochwasser deutlich wird. Die naturwissenschaftliche Forschung kann erste Zusammenhänge zwischen Klimaveränderungen und Änderungen in alpinen Ökosystemen nachweisen.

Gemeinsam mit dem Rückzug der Gletscher wird der Anstieg der Permafrostgrenze für die zunehmende Häufigkeit von Naturkatastrophen verantwortlich gemacht. Muren, Steinschlag, Erdbeben und Hochwasser werden durch ein wärmeres Klima in den Alpen stark begünstigt und bedrohen zunehmend auch bisher verschonte Alpenregionen.

Seit der zweiten Hälfte der 80er Jahre häufen sich extreme Wetterlagen, was eine zunehmende Zahl von Klimaexperten aufhorchen lässt.

Im Alpenraum gehören *Extremniederschläge* und ihre Folgen zu den schadensmäßig bedeutendsten Naturkatastrophen. Extremniederschläge verursachen in der Schweiz materielle Schäden von etwa 200 Millionen Franken pro Jahr. Diese Zahl mag auf den ersten Blick moderat erscheinen, aber bei ihrer Einordnung sind zwei spezielle Umstände wichtig: Erstens fallen die Schäden hauptsächlich in wenigen, besonders exponierten Regionen an: Betroffen sind vor allem Bergkantone in ohnehin schwierigen ökonomischen Verhältnissen, welche neben den direkten Schäden auch mit kostspieligen Vorsorgemaßnahmen belastet sind. Zweitens werden die Schäden durch seltene, besonders starke Ereignisse dominiert: In den 25 Jahren 1972 bis 1996 haben die beiden schadenreichsten Jahre 1987 und 1993 im Reusstal, Tessin, Puschlav und in Brig mehr als die Hälfte aller niederschlagsbedingten Schäden verursacht. Die ökonomischen Auswirkungen solcher Katastrophen sind in den betroffenen Regionen meist noch Jahre danach deutlich spürbar.

Eine Analyse der Schweizer Messreihen zeigt, dass die Häufigkeit von intensiven Niederschlägen, die im Durchschnitt einmal pro Monat vorkommen, in den letzten 100 Jahren zugenommen hat. Die Zunahmen werden für die Jahreszeiten Herbst und Winter festgestellt und belaufen sich auf 20–80%. Die beobachteten Trends sind nicht notwendigerweise repräsentativ für Extremniederschläge, und sie beweisen nicht den ursächlichen Zusammenhang mit der anthropogenen Klimaveränderung. Sie deuten aber auf eine markante langzeitliche Veränderung in der Niederschlagsstatistik hin. Zusammen mit ähnlichen Beobachtungen für andere Gebiete der mittleren und hohen geografischen Breiten unterstützen diese Ergebnisse eine These, wonach der Wasserkreislauf des Klimasystems durch die beobachtete globale Erwärmung und deren erwartetes Fortschreiten in den nächsten Jahrzehnten beeinflusst werden könnte.

Diese These beruht auf der Erkenntnis, dass für Extremniederschläge der Transport und die Konvergenz von Wasserdampf aus einer größeren Umgebung nötig sind. Die in mittleren geografischen Breiten lokal in der Atmosphäre als Dampf und Wolkenwasser vorhandenen Wassermengen belaufen sich auf 5–30 mm und reichen nicht aus, um die bei Extremniederschlägen gemessenen Mengen von über 100 mm zu verursachen. Für die südlichen Alpenrandgebiete, die in den Alpen die am weitest häufigsten von Extremniederschlägen betroffenen Gebiete sind, spielt der atmosphärische Wassertransport vom Mittelmeer eine wichtige Rolle. Beim Ereignis von Mitte Oktober 2000 zum Beispiel war dieser besonders spektakulär: Über die ligurische Küste, zwischen Seealpen und Appennin, sind in der Atmosphäre rund 50 Mio. Kubikmeter Wasser pro Sekunde in die westliche Poebene und gegen die Alpen geführt worden. Dieser Wert ist vergleichbar mit dem mittleren Mündungsabfluss des Kongo von 42 Mio. m<sup>3</sup>/s und des Yangtsekiang von 35 Mio. m<sup>3</sup>/s, nach dem Amazonas die abflussmäßig größten Flüsse der Erde. Auch wenn nur ein Teil des in der Atmosphäre herangeführten Wassers als Niederschlag fällt, ist es naheliegend, dass die Abflusssysteme an der Erdoberfläche damit überfordert sind.

Der Transport von Wasserdampf in der Atmosphäre könnte nun durch die erwartete Klimaerwärmung deutlich beeinflusst werden. Der Sättigungsdampfdruck von Luft steigt nach dem Gesetz von Clausius-

Clapeyron pro Grad Erwärmung um 7%. Eine wärmere Atmosphäre kann also wesentlich mehr Wasser aufnehmen und transportieren. Globale Klimamodelle, mit welchen die Prozesse des Klimasystems und deren Änderungen simuliert werden, weisen neben der bekannten Erwärmung um 1 bis 3,5°C im globalen Mittel bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auch auf eine allgemeine Intensivierung des Wasserkreislaufs hin. Während subtropische aride Landmassen durch die erhöhte Verdunstung von zunehmender Trockenheit betroffen sind, zeigen die Modelle für die mittleren und hohen geografischen Breiten einen erhöhten Wasserdampftransport von den Ozeanen gegen die Landmassen und eine Zunahme des mittleren Niederschlags. Die Auswirkungen der Wasserkreislauf-Intensivierung auf Starkniederschläge im Alpenraum wurden mit regionalen Klimamodellen untersucht und liefern ein bemerkenswertes Resultat: Bei einer angenommenen Erwärmung von 2°C zeigen die Simulationen nur geringfügige Änderungen in der Zahl von schwachen und mittleren Niederschlagsereignissen, während intensive Regenfälle um 20–40% häufiger auftreten. Die Simulationen deuten auf eine progressive Zunahme von Niederschlagsereignissen mit ihrer Intensität hin und damit auf besonders markante Effekte auf die Häufigkeit von Starkniederschlägen.

Eine Intensivierung des Wasserkreislaufs und eine Zunahme von intensiven Niederschlagsereignissen als Resultat einer erhöhten Treibhausgas-Konzentration wurde mittlerweile in zahlreichen globalen und regionalen Klimasimulationen festgestellt.<sup>4</sup>

Auswirkungen einer Klimaerwärmung auf die Wasserbilanz des Einzugsgebietes eines Sturzbaches:

Im Winterhalbjahr kommt es zu einem erhöhten Abfluss wegen der Verringerung des schneeförmigen Anteils der Niederschläge, im Frühling dagegen zu einer Reduktion der Abflussmengen wegen Schneemangels. Der Sommer und Herbst sind besonders sensible Zeiten wegen auftretender Gewitter und stark konzentrierter Niederschläge.

#### **Kleine Chronik von Naturkatastrophen:**

- 1987 Poschiavo (Graubünden): Zerstörung des Ortes durch Wasser und Geschiebe
- 1987 Veltlin: katastrophaler Bergsturz nach tagelangen, rekordartigen Niederschlägen
- 1987 Kanton Uri: Schädigung der Eisenbahnlinie, der Gotthardautobahn und zahlreicher Gebäude durch ein Hochwasser
- 1990 Surselva (Graubünden) und Kanton Glarus: Orkan "Vivian" entwaldete großflächig Berghänge
- 1991 Randa bei Zermatt: Fels- und Schlammmassen rutschten zu Tal, stauten dort den Bach und setzten das halbe Dorf unter Wasser
- 1993 Brig (Oberwallis): Zerstörung des historischen Zentrums durch einen nach heftigen Niederschlägen über die Ufer tretenden Bergbachs
- 1994 Piemont: der Fluss Po trat über seine Dämme und zerstörte Wohnsiedlungen, die entgegen den herrschenden Raumplanungsgesetzen in den Überflutungszonen standen
- 1999 Schweiz, Frankreich, Österreich (Galtür): mehrere Lawinenkatastrophen aufgrund außergewöhnlicher Schneelage
- 1999 Schweiz: im Frühjahr Rekordhochwasser
- 1999 Frankreich, Schweiz, Deutschland: Orkan "Lothar" mit verheerenden Schäden an voralpinen Wäldern
- 2000 Wallis, Tessin, Aostatal: Mitte Oktober regnet es lokal in fünf Tagen so viel wie im Durchschnitt in drei Monaten. Zerstörung von Siedlungen, Verkehrswegen und Kulturland durch Schlamm Lawinen und Hochwasser.
- 2001 Täsch, Oberwallis: Eine Schlamm- und Gerölllawine beschädigt viele Häuser im Ort.

<sup>4</sup> Christoph Frei: Extremniederschläge im Wandel?

## Der Gletscher - eine bedrohte Spezies

Der Rückzug der Gletscher besteht seit Mitte des letzten Jahrhunderts. Die zeitlich verzögerte Reaktion der Alpen auf erhöhte Temperaturen führt dazu, dass wir heute die Gletscherschmelze beobachten können, die vor Jahrzehnten verursacht wurde. Angesichts der Rekordtemperaturen in den 90er Jahren - auch in den Alpenländern - ist mit einem weiteren dramatischen Gletscherrückzug in den nächsten Jahren zu rechnen.

Alpenregionen reagieren unterschiedlich auf eine allfällige Klimaerwärmung. Eine entscheidende Rolle spielt dabei der Anteil der Gletscher. Ist der Gletscheranteil gering, nimmt die Wasserabflussmenge proportional zur Klimaerwärmung ab. Gletscher dagegen puffern die Abnahme des Wasserabflusses eine Weile ab und lassen die Abflussmenge sogar ansteigen. Das hat eine Untersuchung<sup>5</sup> ergeben.

Bisher ging man davon aus, dass die gesamte Wasserabflussmenge bei steigenden Temperaturen abnimmt. Die neue Untersuchung zeigt nun aber, dass die Abflussmenge in einem der drei Untersuchungsgebiete zunimmt: im stark vergletscherten Einzugsgebiet Rhône-Sion. Bei steigenden Temperaturen schmilzt dort mehr Gletschereis. Zudem fällt weniger Niederschlag in Form von Neuschnee, der den Gletscher im Sommer und anfangs Herbst, wenn die Gletscherschmelze stattfindet, vor dem Abschmelzen schützen könnte. Die Folge ist eine Zunahme des Wasserabflusses. Aber nur bis zu einem gewissen Grad, solange noch genügend Eis vorhanden ist. Dann fließt auch hier insgesamt weniger Wasser ab. Wie sich der verminderte Wasserabfluss möglicherweise auf die Umwelt auswirken wird, ist im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht worden.

Eine Temperaturerhöhung verändert nicht nur die Abflussmenge, sondern auch das Abflussregime. Bisher lag das Abflussmaximum in allen Gebieten im Sommer. Bei höheren Temperaturen fällt aber im Winter mehr Niederschlag als Regen und nicht als Schnee. Der Regen wird direkt abflusswirksam, so dass das winterliche Niedrigwasser weniger ausgeprägt ausfällt. Und im Sommer schmilzt weniger Schnee ab, weil die Schneedecke nicht so mächtig ist. Zudem verdunstet im Sommerhalbjahr bei höheren Temperaturen mehr Wasser. Das führt zu einem ausgeglicheneren Abflussregime. Für die Stromwirtschaft ein Vorteil: Besonders Laufkraftwerke könnten ihre Anlagen besser ausnutzen und in Zukunft die Stromproduktion steigern. Denn sommerliche Spitzen überstiegen bisher in der Regel das Schluckvermögen der Laufwasserkraftwerke, und im Winter war zuwenig Wasser vorhanden.<sup>6</sup>

Der Verlust der Gletscher schafft in den Alpen neue ökologische als auch ökonomische Probleme. Neben dem lebenswichtigen Wasserspeicher geht mit dem Gletschereis ein wichtiges landschaftsästhetisches Element verloren, von dem der Alpentourismus 200 Jahre lang profitieren konnte.<sup>7</sup>

### Beispiele für betroffene Gletscher:

Der 3045 Meter hohe Mont Clapier liegt im französisch-italienischen Grenzgebiet der Cottischen Alpen. Wer über den Col del Chiapous wandert, erkennt in der gegenüberliegenden Flanke des Mont Clapier einen schmutzigweissen, kleinen Fleck. Es sind die kläglichen Reste des südlichsten aller Alpengletscher. Unter andauerndem Treibhausklima wird der kleine Firn innert weniger Jahre vollständig abgeschmolzen sein. Dieses Schicksal erwartet auch viele seiner Artgenossen anderswo in den Alpen. Treten die gegenwärtigen Prognosen ein - und daran ist kaum mehr zu zweifeln - wird von der Riederfurka aus vom berühmten Eisstrom des Grossen Aletschgletschers in einigen Jahrzehnten nichts mehr zu sehen sein. Bereits wesentlich früher schlägt die letzte Stunde für die meisten Eisströme in den Ostalpen. Nur gerade die Pasterze am Grossglockner und einige wenige andere hochgelegene Ferner werden nach übereinstimmenden Prognosen aus der Fachwelt das 21. Jahrhundert überstehen.<sup>7</sup>

<sup>5</sup> Untersuchung von Jesko Schaper im Rahmen eines Nationalfonds-Projektes zur Entwicklung neuer Methoden der Schneedeckenabschätzung an der ETH Zürich

<sup>6</sup> Schweizerischer Nationalfonds SNF - Pressemitteilungen, 21. März 2001

<sup>7</sup> Dominik Siegrist: Klimaspuren - In den Alpen ist der Klimawandel sichtbar, in: 2. Alpenreport

#### **Fakten zum Gletscherschwund:**

- Seit dem Gletscherhochstand von 1850 sind rund 100 Gletscher in den Schweizer Alpen verschwunden.
- Von 1850 bis 1973 nahm die Eismächtigkeit der Gletscher in der Schweiz um durchschnittlich 19 m ab. Das Eisvolumen wurde von 107 km<sup>3</sup> auf 74 km<sup>3</sup> (um 33%) reduziert.
- Europaweit verloren alpine Gletscher ca. die Hälfte ihres Eisvolumens und 30-40% ihrer ursprünglichen Oberflächen.

### **Wintertourismus ade?**

Die Grenze für Schneesicherheit liegt in der Schweiz heute bei 1200 m. Bis zum Jahr 2050 wird sie auf 1500 m steigen. Heute sind 85% der Skigebiete schneesicher, in Zukunft nur noch 63%. Die Anzahl der zum Schifahren geeigneten Tage mit über 30 cm Schnee wird sinken. Z.B. in Einsiedeln, das auf 910 m liegt, von heute 51 auf 24 Tage.

In den Alpenländern wird der Wintertourismus in den Regionen mittlerer Höhe bei einem ungebremsten Verlauf der Treibhausgasemissionen in ca. 20 Jahren kaum mehr möglich sein. Auf der Roten Liste befinden sich selbst wichtige Stationen wie „Les Portes du Soleil“ im Wallis/Haute Savoie, Kitzbühel in Tirol oder Kranjska Gora in Slowenien. In ca. 30 Jahren wird auch in Höhen über 1500 m und in den Gletschergebieten der Wintertourismus seine Basis verlieren. Oft wird versucht, diesen Niedergang mit künstlicher Beschneidung aufzuhalten.

Der aus der Klimaänderung resultierende direkte volkswirtschaftliche Schaden wird allein für die Schweiz auf jährlich 2,3 Milliarden Schweizer Franken beziffert, das sind 1,5 Milliarden Euro. Der fehlende Schnee in tieferen Lagen hat noch eine weitere fatale Konsequenz: Große, kapitalstarke Bergbahnunternehmen versuchen bereits heute, ihre Pisten vermehrt in höhere Lagen auszuweiten: in die vergletscherten hochalpinen Räume und in einige der letzten intakten Naturgebiete der Alpen.

Das Problem ist, dass der Wintertourismus in den Alpen einseitig auf Skisport ausgerichtet und deshalb extrem schneeabhängig ist. Eine Strategie für betroffene Gebiete - außer finanziellen Unterstützungen - wäre also, die Schnee- und Skiabhängigkeit zu reduzieren, und zwar einerseits inhaltlich durch Angebotsergänzungen und andererseits zeitlich durch einen Vier-Jahreszeiten-Tourismus.

### **Palmen auf Berggipfeln?**

Das Verbreitungsgebiet vieler Pflanzen- und Tierarten wird durch Klimaparameter begrenzt. Bei einer Klimaänderung ändern sich an einem Standort Bedingungen wie Temperatur, Niederschlag und Einstrahlung. Dadurch ist mit Wanderungen von Arten zu rechnen.

Die Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Vegetation haben eine räumliche und eine zeitliche Komponente.

#### Auswirkungen auf das Artenspektrum:

In manchen Gipfelbereichen kommen heute doppelt so viele Arten vor wie bei früheren Aufnahmen im vorigen Jahrhundert, wobei artenreiche Gipfel mit hoher Vegetationsdeckung weniger potentielle Zuwanderer und geringeres Aufnahmepotential für Neankömmlinge haben als offene, artenärmere Gipfelzonen, deren "Artenpool" noch nicht abgesättigt ist.

Gefährdungen für die Arten- und Vegetationsvielfalt des Hochgebirges, d.h. Biodiversitätsverluste, sind zu erwarten.

Eine Reihe von Szenarien wurde schon entworfen, welche Folgen Vegetationsveränderungen im Hochgebirge mit sich brächten. Für die hochalpine Flora wird vielfach angenommen, dass es zu Aussterbepro-

zessen kommt. Die Arten werden von nachkommenden und konkurrenzstarken Arten von unten verdrängt. Nach oben ist ein Auswandern durch die Höhenbegrenzung der Gipfel nicht möglich.<sup>8</sup> Außerdem wird die Vegetation auch durch indirekte Auswirkungen des Klimawandels, wie z.B. die Erhöhung der Hanginstabilität, gefährdet.

Es kommt auch zu einer geografischen Verschiebung der Vegetation:

In den vergangenen Jahrzehnten können sich eine Vielzahl ökologischer Faktoren verändert und die Ausbreitung exotischer Arten mitbeeinflusst haben. Das sich ändernde Klima wird in zweifacher Hinsicht zu einem mitentscheidenden Faktor dieser Entwicklung. Sowohl die absoluten Tiefsttemperaturen wie auch die Häufigkeit von Frosttagen haben sich bei gleichbleibender Niederschlagsverteilung im untersuchten Zeitraum dermaßen verringert, dass sie die Ansiedlung exotischer immergrüner Arten nachhaltig begünstigt haben.

Z.B. Einwanderung von Palmen und exotischen immergrünen Laubgehölzen, wie Lorbeer, Kampferbaum, Ölweide und Hanfpalme, in die Edellaubmischwälder des Südtessins.<sup>9</sup>

#### Bergwald:

Bei Erwärmung wird sich die potentielle natürliche Vegetation an vielen Standorten der Schweiz verändern und es kann zu einem Vorrücken des Laubwaldgürtels in höhere Lagen kommen. Damit einher geht eine Verkleinerung des Areals des heutigen Nadelwaldgürtels. Bei starker Erwärmung könnte der Eichen-Hainbuchengürtel den Buchengürtel ablösen. Dies könnte in den nächsten 150 bis 200 Jahren stattfinden. Ob es zu einer Verschiebung der oberen Waldgrenze kommen könnte oder nicht, ist unklar. Soviel kann jedoch aufgrund der Simulationen gesagt werden: Bleibt die Nutzungsintensität auf den Alpweiden gleich hoch wie heute, ist kaum mit einem Ansteigen der Waldgrenze zu rechnen, auch wenn aus klimatischen Gründen die Waldgrenze wieder höher steigen könnte. Bei den alpinen Rasen zeigte sich, dass heute kontinental geprägte Gebiete wie das Wallis oder Graubünden am sensibelsten auf Klimawechsel reagieren könnten.<sup>10</sup>

#### Auswirkungen auf die Physiologie:

Es wurde allgemein erwartet, dass eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft einen gewissen Düngeeffekt mit sich bringt: durch mehr CO<sub>2</sub> wird die Photosynthese von Pflanzen angekurbelt und dadurch können sie mehr organische Substanz aufbauen, d.h. sie wachsen schneller und werden größer. Jedoch hat sich der erwartete CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt anhand von Untersuchungen des Alpenrasens und des Bergwaldes nicht bestätigt. Die Pflanzen gedeihen bei einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft langfristig nicht besser und werden dadurch auch nicht resistenter gegen die Auswirkungen des Klimawandels.<sup>2</sup>

Photosynthese von natürlich wachsenden Pflanzen wird nämlich mehr durch Nährstoffe und Wasser limitiert als durch das CO<sub>2</sub> in der Luft.

Hochgebirgspflanzen in alpinen Rasen passen sich an erhöhtes CO<sub>2</sub>-Angebot an, indem ihr Photosyntheseapparat weniger leistungsfähig wird. Die Photosyntheseleistung bleibt also etwa gleich. Zu einer erhöhten Photosynthese kommt es nur zu Beginn, besonders bei den gedüngten Teilen.

#### Aufforstungen als Kohlenstoffsinken?

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sieht in Aufforstungen den besten Weg, Kohlendioxid in der Biomasse einzulagern. Doch bindet zwar die oberirdische Biomasse der schnell wachsenden Jungwälder mehr Kohlendioxid als sie ausatmet, aber die Atmung der Organismen im Boden ist auch höher: die Bodenorganismen fühlen sich wohl, da junge Bäume kaum Sonne und Regen abhalten, und atmen daher mehr. Nicht die Bindungsrate von Kohlenstoff ist also maßgeblich, sondern wie lange dieser in der Biomasse gespeichert ist.<sup>11</sup>

<sup>8</sup> Georg Grabherr: Klimawandel: Veränderungen an den Kältengrenzen des Pflanzenlebens, in: 2. Alpenreport

<sup>9</sup> Gian-Reto Walther: Palmen in der Schweiz - ein Indiz?

<sup>10</sup> Felix Kienast, Otto Wildi, Niklaus Zimmermann: Klimaveränderung - Veränderung des Bergwaldes?, in: 2. Alpenreport

<sup>11</sup> Martin Läubli: Klimazank: Jungwald bringt wenig



Alte Bäume binden mit der Zeit viel Kohlenstoff über die Streu und die Wurzeln im Boden. Alte Wälder sind echte Kohlenstoff-Senken, Wiederaufforstungen setzen eher Kohlenstoff frei.

Auch eine Studie, die im Magazin *Nature* veröffentlicht wurde, zeigt, dass Boden und Streuschicht nur geringe Menge an Kohlenstoff speichern, und dass Kohlenstoffspeicherung in den Bäumen langfristig durch Nährstoffe und Wasser limitiert ist.

## Gewinner und Verlierer

Bei extremen Klimaszenarien entwickeln die Klimamodelle global gesehen umfangreiche Produktionsverluste und ein starkes Ansteigen des Weltmarktpreises für Getreide. Die Schere zwischen Industrie- und Entwicklungsländern wird größer: Industrieländer profitieren von ihrer geografischen Lage in der gemäßigten Zone. Hier kommt es zu einer Produktionszunahme wegen des CO<sub>2</sub>-Düngungseffekts.

In der Schweiz zeigen diese Szenarien zwar Flächenertragsverluste, diese werden aber kompensiert durch den Düngungseffekt einer höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration, eine Verlängerung der Vegetationsperiode und eine Verschiebung der Höhenzonen. Daher kommt es hier insgesamt zu einer Ertragszunahme.

## Die Treibhauskeptiker

Das 1997 in Kyoto verabschiedete Klimaprotokoll verlangt von den Industrieländern bis zum Zeitraum 2008 - 2012 eine Reduktion ihrer Treibhausgas-Emissionen um mindestens 5% gegenüber dem Stand von 1990. Verfehltes Ziel der 6. Welt-Klimakonferenz von Den Haag im November 2000 war, das Kyoto-Klimaprotokoll in den umstrittenen Bereichen so weit zu konkretisieren, dass es für die wichtigen Parteien ratifizierbar würde.

Mit dem "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC) - ein staatenübergreifendes UN-Gremium von rund 2500 Wissenschaftern, dem von etwa 3000 weiteren Wissenschaftern zugearbeitet wird - verfügt die Klimakonvention über ihr eigenes Wissenschaftergremium, welches den neuesten Erkenntnisstand laufend aufarbeitet und bewertet.

Diesen wissenschaftlichen Beratern der UNO, die in ihrem dritten Zustandsbericht für die kommenden hundert Jahre mit einem Temperaturanstieg bis zu sechs Grad Celsius rechnen und es als wahrscheinlich bezeichnen, dass die Erwärmung der letzten Jahrzehnte größtenteils durch menschliche Aktivitäten verursacht worden ist, stehen jene der Industrie gegenüber. Diese geringe Anzahl von sogenannten "Klimaexperten", die von der Erdöl- und Kohleindustrie engagiert wurden und an der Spitze verschiedener Organisationen wie etwa der "Global Climate Coalition" stehen, widerspricht den IPCC-Wissenschaftlern. In Fachkreisen werden diese "Experten" als Klima-Skeptiker ("Climate Skeptics") oder Treibhaus-Skeptiker ("Greenhouse Skeptics") bezeichnet.<sup>12</sup>

Der amerikanische Journalist Ross Gelbspan studierte zwei Jahre lang die amerikanische Erdöl- und Kohle-Industrie und die Aktivitäten der von ihnen finanzierten Klima-Skeptiker.<sup>13</sup> Gelbspan stellt fest: "In den letzten sechs Jahren hat die Kohle- und Erdölbranche Millionen für eine Propagandakampagne ausgegeben, mit der die drohende Klimakatastrophe heruntergespielt werden sollte. Davon sind große Beträge für den publikumswirksamen Medienauftritt einer Handvoll Wissenschaftler mit abweichender Ansicht über die Klimaproblematik verwendet worden; für 'Experten', deren gesponserte Publizität und aufgepöppelte Glaubwürdigkeit in keinem Verhältnis zu ihrer Bedeutung in der Forschergemeinde steht."

Die Gründe für das zähe Voranschreiten der internationalen Klimapolitik sind vielfältig. Im Vordergrund stehen die unterschiedlichen Interessen der Vertragsstaaten. Im Fall der Klimapolitik geht es um zentrale staatliche Interessen, wie Energieversorgung, Wachstum, Innovation, freie Mobilität, individueller Konsum. Dies wird etwa deutlich in den heftigen Gegensätzen zwischen den Europäern, die zu einer restriktiveren Klimapolitik bereit sind, und der so genannten Umbrella-Gruppe, zu der die USA, Kanada, Japan, Australien und einige Erdöl exportierende Staaten gehören. Eine dritte Interessenskoalition sind die Entwicklungsländer. Diese fordern die Einhaltung der 1992 in Rio zugesicherten Versprechen wie der Transfer

<sup>12</sup> Website von Greenpeace Österreich

<sup>13</sup> Ross Gelbspan: The Heat is on

von klimafreundlicher Technologie und finanzielle und technologische Hilfe zur Anpassung an den Klimawandel.<sup>14</sup>

Der mangelnde Konsens der Wissenschaftler über die Treibhauseffekte erhöht die Unsicherheit der Politiker. Umgekehrt fehlt den Entscheidungsträgern die Methodik im Umgang mit wissenschaftlicher Ungewissheit: das Denken in Modellen, Optionen und Wahrscheinlichkeiten.

Für die Reduktion der Emissionen von Treibhausgasen etwa kann es entscheidend sein, wie die so genannten Senken – Wälder und Felder, welche der Atmosphäre Treibhausgase entziehen – angerechnet werden. Die Treibhausgas-Bilanz eines Landes kann sich dadurch bis zu zwanzig Prozent verändern, ein Mehrfaches also der Reduktionsziele von Kyoto. Unter dem Strich geht es um die Frage, wie viel die Vertragsstaaten in den Abbau der Treibhausgase investieren und inwieweit ihre Bevölkerungen das Konsumverhalten ändern müssen.<sup>14</sup>

Massive Kritik in der UNO gibt es zu den Absichten von Präsident Bush, die Energieversorgung der USA durch einen massiven Ausbau von Kohle-, Öl-, Gas- und Atomkraftwerken zu sichern, statt durch Einsparprogramme und den stärkeren Einsatz erneuerbarer Energien. Im April 2001 stiegen die USA aus den Kyoto-Vereinbarungen zum Klimaschutz aus, da Bush aufgrund der Aussagen der von ihm engagierten Wissenschaftler die Klimaerwärmung und deren Auswirkungen in Zweifel zogen. Dazu sei bemerkt, dass die Wahlkampagne von Bush größtenteils - jeweils zu 25,5% - von der Öl- u. Gasindustrie und von Bank- u. Kreditkartenunternehmen finanziert wurde; daneben auch von der Pharmaindustrie, der Tabakindustrie, dem Bergbau, und von den Fluglinien.

Doch nun besagt auch eine Studie der amerikanischen Akademie der Wissenschaft, die eben erst herausgekommen ist und die von der Bush-Regierung in Auftrag gegeben wurde (!), dass in den nächsten hundert Jahren mit einem Temperaturanstieg um 1,5 - 5°C zu rechnen ist, worauf Bush nun zumindest nicht mehr die wissenschaftliche Grundlage der Diskussion bezweifelt.

## Lösung in Sicht?

Hoffnungsträger im Klimadilemma sind die kommunale Energiepolitik, der verstärkte Einsatz erneuerbarer Energie und die Förderung einer nachhaltigen Lebens- und Wirtschaftsweise. Z.B. gibt es ein bislang einzigartiges Projekt der Landesinitiative Zukunftsenergien des Landes Nordrhein-Westfalen für zehn Schulen in NRW, das derzeit vom Wuppertal Institut umgesetzt wird. Dabei wird - zunächst an einer Pilotschule - der Bau einer 40 kW-Photovoltaikanlage mit Stromeinsparinvestitionen kombiniert. An den Maßnahmen können sich private Geldgeber beteiligen und vom Ertrag profitieren. Somit wird Klimaschutz auch zu einer wirtschaftlich höchst attraktiven Kapitalanlage.

Es gibt auch Ansätze wie das Integrated Assessment: Im Climate Change in the Alpine Region CLEAR-Projekt des Schwerpunktprogramms Umwelt des Schweizerischen Nationalfonds wurden die wissenschaftlichen Ergebnisse in leicht verständlichen Modellen aufbereitet und miteinander in Bezug gebracht ([clear.eawag.ch/clear/index.html](http://clear.eawag.ch/clear/index.html)). So entstehen nachvollziehbare Entscheidungsgrundlagen für die Klimapolitik. Da einschneidende Reduktionsschritte und geforderte Verhaltensänderungen nicht allein Sache der Politik sind, sondern der Gesellschaft überhaupt, wurden die CLEAR-Resultate in so genannten Fokusgruppen auch einer breiteren Bevölkerungsgruppe unterbreitet, um die Kommunizierbarkeit zu testen und die Akzeptanz der vorgeschlagenen Optionen zu prüfen. Integrated Assessment ermöglicht so, ungewisses Wissen abzuwägen und die Auswirkungen alternativer Handlungsoptionen einzuschätzen.<sup>14</sup>

Die Herausforderung für die Klimamodellierung wird in Zukunft noch vermehrt darin bestehen, verlässlichere Abschätzungen der Klimaentwicklung nicht nur im globalen Mittel, sondern auch für spezifische Regionen zu ermöglichen. Zudem ist es notwendig, nebst dem mittleren Klimazustand auch die Häufigkeit von seltenen Ereignissen wie Dürren, Überschwemmungen und anderen Unwetterereignissen abzuschätzen sowie die möglichen Auswirkungen auf unsere Umwelt, Ökonomie, Wasserressourcen und Gesellschaft zu untersuchen.<sup>1</sup>

<sup>14</sup> Stephan Kux: Chancen und Risiken im Klimapoker

## Referenzen

1. Stefan Bader, Pierre Kunz: Klimarisiken - Herausforderung für die Schweiz, Wissenschaftlicher Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1998.
2. Stefan Flückiger, Peter Rieder: Klimaänderung und Landwirtschaft, Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1997.
3. Stefan Flückiger, Peter Rieder, Peter Burri, Thomas Schmid: Klimaänderung und Naturkatastrophen im Berggebiet, Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1997.
4. Bruno Abegg: Klimaänderung und Tourismus, Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 1996.
5. CIPRA-International (Hrsg.): 2. Alpenreport, 2001.
6. CIPRA-International (Hrsg.): Mögliche ökologische Auswirkungen von Klimaveränderungen in den Alpen. Kleine Schriften 8/91.
7. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Schweiz (Hrsg.): Klima in Gefahr - Fakten und Perspektiven zum Treibhauseffekt, Bern, 1997.
8. Peter Schütt: Bergwald und Klimaänderung, in: Schöne neue Alpen (Hrsg. Sylvia Hamberger, Oswald Baumeister, Rudi Erlacher, Wolfgang Zängl), Raben Verlag von Wittern KG und Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., München, 1998, S. 142.
9. Helmut Klein: Die Alpen im Klimastreiß, in: Schöne neue Alpen (Hrsg. Sylvia Hamberger, Oswald Baumeister, Rudi Erlacher, Wolfgang Zängl), Raben Verlag von Wittern KG und Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., München, 1998, S. 143.
10. Michael Gottfried, Harald Pauli, Georg Grabherr: Die Alpen im "Treibhaus": Nachweise für das erwärmungsbedingte Höhersteigen der alpinen und nivalen Vegetation, Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt, München, 59 (1994): 13-27.
11. Stephan Kux: Chancen und Risiken im Klimapoker, Bulletin (Magazin der ETH Zürich), Nr. 280, Januar 2001, S. 6.
12. Christoph Schär, Martin Wild: Modelle in der Klimadebatte, Bulletin (Magazin der ETH Zürich), Nr. 280, Januar 2001, S. 18.
13. Christoph Frei: Extremniederschläge im Wandel?, Bulletin (Magazin der ETH Zürich), Nr. 280, Januar 2001, S. 30.
14. Harald Bugmann: Fiebertemperaturen am Gebirgswald, Bulletin (Magazin der ETH Zürich), Nr. 280, Januar 2001, S. 34.
15. Gian-Reto Walther: Palmen in der Schweiz - ein Indiz?, Bulletin (Magazin der ETH Zürich), Nr. 280, Januar 2001, S. 38.
16. Martin Läubli: Klimazank: Jungwald bringt wenig, Tagesanzeiger (7.6.2001)
17. Christian Plüss, Urs Neu: Ändert das Klima?, in: Die Alpen (Hrsg. Schweizer Alpen-Club), 5/2001, S. 46.
18. Climate facts: [http://clear.eawag.ch/menu\\_d.html](http://clear.eawag.ch/menu_d.html)
19. <http://www.proclim.ch/ClimateFacts.html>
20. Science News: <http://news.swiss-science.ch/news/newsarchive.jsp>
21. <http://www.greenpeace.at/umweltwissen/klima/auswirkungen>
22. <http://www.greenpeace.at/umweltwissen/klima/klimawandel/skeptiker>