

OcCC

Organe consultatif en matière de recherche sur  
le climat et les changements climatiques  
Beratendes Organ für Klimaforschungsfragen  
des EDI und UVEK

Klimaänderung Schweiz  
**Auswirkungen von extremen  
Niederschlagsereignissen**

Wissensstandsbericht

Herausgeber und Vertrieb des Dokuments:  
Sekretariat OcCC  
ProClim-  
Bärenplatz 2  
3011 Bern  
Tel: (41 31) 312 21 14, Fax: (41 31) 312 55 37  
proclim@sanw.unibe.ch  
web: <http://www.proclim.unibe.ch>

Bern, Dezember 1998

---

# Impressum

---

Dieser Bericht wurde vom Beratenden Organ für Klimaforschungsfragen des EDI und UVEK (OcCC) in Auftrag gegeben. Er stellt den aktuellen Wissensstand zum Thema dar und basiert auf Gesprächen und einem Workshop im März 1998 mit den unten genannten Experten. Er wurde allen untenstehenden Personen zur Review vorgelegt.

## Experten

## Institut/Firma

Dr. Walter Ammann	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
Dr. Christoph Frei	Geographisches Institut der ETH Zürich
Dr. Dietmar Grebner	Geographisches Institut der ETH Zürich
Dr. Christoph Hegg	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
Martin Kamber	Interkantonaler Rückversicherungsverband, Bern
Prof. Ernst Mohr	Institut für Wirtschaft und Ökologie, Univ. St. Gallen
Dr. Armin Petraschek	Bundesamt für Wasserwirtschaft
Prof. Christian Pfister	Historisches Institut, Universität Bern
Alexander Rist	Dienst für Gesamtverkehrsfragen UVEK, Bern; Mitglied OcCC
Ulrich Roth	Programmleitung NFP 31, Sigmaphan AG, Bern
Dr. Bruno Schädler	Landeshydrologie und -geologie, Bern
Prof. Christoph Schär	Geographisches Institut der ETH Zürich
Dr. Michael Sturm	Eidg. Versuchsanstalt für Wasser, Abwasser und Gewässerschutz, Zürich
Georg Weber	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Baden
PD Rolf Weingartner	Geographisches Institut Universität Bern

Neben den oben genannten Personen wurden folgende Experten und Institutionen in den Reviewprozess einbezogen:

Dr. Stefan Bader	Programmleitung NFP 31, SMAMeteo Schweiz, Zürich
Bruno Hostettler	Bundesamt für Zivildschutz, Bern
Dr. Ivo Knoepfel	Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft, Zürich; Mitglied OcCC
Dr. Reto Schleiniger	Institut für empirische Wirtschaftsforschung, Universität Zürich
Felix Walter	Ecoplan, Bern
Heinz Wandeler	Plattform Naturgefahren (PLANAT), Bern

## Autoren

Dr. Hansjörg Blöchliger	BSS Volkswirtschaftliche Beratung, Basel
Frank Neidhöfer	Sigmaphan AG, Bern

## Begleitgruppe OcCC

Prof. André Musy	Institut d'Aménagement des Terres et des Eaux, EPF Lausanne
Prof. em. Heidi Schelbert	Institut für empirische Wirtschaftsforschung, Universität Zürich
Prof. Heinz Wanner	Geographisches Institut, Universität Bern

## Projektleitung und Redaktion

Dr. Christian Plüss	OcCC, ProClim-, Bern
Dr. Christoph Ritz	ProClim-, Bern

### Klimaänderung: Die Schweiz muss handeln!

**Eine Erwärmung von über 1°C und eine Zunahme der Niederschläge in den Wintermonaten um 10 bis 30%**, so lauten die heute bekannten Fakten über die Klimaentwicklung in der Schweiz in diesem Jahrhundert. Diese Zahlen erscheinen wenig spektakulär, wenn man an die täglichen Launen des Wetters denkt, und kaum spürbar bleibt diese schleichende Entwicklung für den einzelnen Beobachter. Trotzdem sind die Forscher heute weltweit der Ansicht, dass die beobachtete Klimaänderung von den Menschen mitverursacht wird. Delegierte aus aller Welt beraten an globalen Klimakonferenzen in Kyoto oder Buenos Aires, wie diese Klimaänderung und ihre drohenden Auswirkungen abgeschwächt werden können.

Die Schweiz wird dank ihrem günstigen Standort im Herzen Europas nur selten von klimatischen Extremereignissen heimgesucht. Stürme, wie die verheerende 'Vivian' von 1990, oder Überschwemmungen wie in Uri 1987 oder in Brig 1993 erinnern jedoch daran, dass das Klima auch für uns schmerzhaftere Überraschungen bereit hält. Das beratende Organ für Klimaforschungsfragen des EDI und UVEK (OcCC) hat deshalb einen Wissensstandsbericht erstellen lassen, der die heutigen und erwarteten Auswirkungen von Klimaänderungen in der Schweiz am Beispiel von extremen Niederschlagsereignissen aufzeigt:

Als Folge der globalen Klimaänderung wird mit einer Intensivierung des Wasserkreislaufs gerechnet. Die Klimamodelle prognostizieren deshalb bei uns eine weitere Zunahme der Niederschläge im Winter, was - zusammen mit der Erwärmung und der steigenden Schneefallgrenze - zu einer Zunahme der Winterhochwasser führen wird. Auch wenn daraus nicht direkt auf eine Zunahme von Überschwemmungen geschlossen werden kann, so ist doch die Richtung der Entwicklung eindeutig: Mit vermehrten Hochwasserschäden muss künftig gerechnet werden.

Im Mittel der letzten 25 Jahre haben uns die Hochwasserereignisse 450 Millionen Franken pro Jahr gekostet. Die Ökonomen beurteilen die mögliche Zunahme der Hochwasserschäden als einschneidend, aber nicht als kritisch. Solange künftige Ereignisse mit den Überschwemmungen dieses Jahrhunderts vergleichbar bleiben, sind die Schäden begrenzt und können über konventionelle Versicherungsformen gedeckt werden. Erst grossflächige Überschwemmungen - wie sie in historischer Zeit, nicht aber in diesem Jahrhundert aufgetreten sind - könnten Schäden in Milliardenhöhe verursachen, die nicht versicherbar sind. Ob grossräumige Überschwemmungen künftig häufiger werden, lässt sich aufgrund der Seltenheit solcher Ereignisse nicht mit statistischen Methoden beurteilen, und auch unser Verständnis der Prozesse lässt bis heute keine Aussagen zu.

Also Entwarnung und zurück zum 'business as usual'?

Dies ist keine sinnvolle Strategie. Genau so wie die globalen Erkenntnisse weisen die Forschungsergebnisse auf eine unerfreuliche Entwicklung hin. Eine Klimakatastrophe ist aufgrund der heutigen Treibhausgaskonzentrationen zwar nicht zu erwarten, aber die langsamen, im Jahreslauf kaum merklichen Veränderungen können unsere Volkswirtschaft direkt oder indirekt massiv beeinträchtigen.

Die Empfehlungen der am Bericht des OcCC involvierten Experten zeigen die notwendigen Handlungsschwerpunkte auf:

Klimapolitik darf nicht isoliert in der Schweiz betrieben werden, sondern wir müssen uns im internationalen Umfeld engagieren. Um international Erfolg zu haben, ist eine nationale 'Klima-Strategie' Voraussetzung. Sie soll folgende Elemente enthalten:

1. Nationale Massnahmen zur Förderung von ressourcenschonender Technologie und Anreize zur Emissionsreduktion;
2. Förderung der Forschung zur Schliessung von Wissenslücken;
3. Massnahmen zur Verringerung der Auswirkungen;

Es ist klüger, heute vorsichtig zu handeln, denn morgen - wenn wir ganz sicher sein können, was passiert – ist es vermutlich zu spät!



Prof. Gian-Reto Plattner  
Präsident OcCC

---

# Inhaltsübersicht und Zusammenfassung

---

## 1 Klimaänderung und Naturgefahren

7

Als Folge der erwarteten Klimaänderung wird mit weltweiten, ernsthaften Auswirkungen gerechnet, wenn die Emissionen der Treibhausgase nicht deutlich reduziert werden können. In der Schweiz sind insbesondere die Auswirkungen von Naturgefahren von Bedeutung, wobei hier Hochwasser zu den schadenreichsten Ereignissen zählen. Der vorliegende Wissensstandsbericht behandelt die Häufigkeit und die möglichen ökonomischen Auswirkungen von extremen Niederschlagsereignissen und Trockenheiten in der Schweiz.

## 2 Klima, Extremniederschlag und Abfluss

9

Die Forschung hat in den letzten Jahren zu einem vertieften Verständnis der Prozesse geführt, die zu Extremniederschlag und Hochwasser führen. Mit heutigen Klimamodellen können Veränderungen des mittleren Klimas der Zukunft abgeschätzt werden, sie lassen aber keine Aussagen über die zukünftige Entwicklung von Extremereignissen zu. Hingegen sind Wetterprognosemodelle in der Lage, die Bildung extremer Niederschlagsereignisse frühzeitig zu erkennen.

Die Prozesse, die zu einer langandauernden Trockenheit führen, sind für den Alpenraum noch wenig bekannt.

## 3 Häufigkeit von Niederschlags- und Hochwasserereignissen

15

Berechnungen mit Klimamodellen lassen eine Intensivierung des Wasserkreislaufes als Folge der anthropogenen Klimaerwärmung erwarten. Neuste Analysen von Beobachtungen der letzten 100 Jahre in der Schweiz bestätigen die Modellvorhersagen: In den Alpen wurde eine Zunahme der Niederschläge im Herbst und im Winter um bis zu 30% festgestellt. Dieser Trend dürfte sich in Zukunft weiter verstärken. Im Mittelland und in der Südschweiz wird als Folge dieser Zunahme mit häufigeren Hochwasserereignissen im Winterhalbjahr gerechnet.

Für den Sommer sind die beobachteten Veränderungen des Niederschlags gering und dessen zukünftiges Verhalten noch unsicher. Die Auswirkungen auf das Abflussverhalten der Alpenflüsse, deren Hochwasser in erster Linie von Sommergewittern verursacht werden, sind somit noch nicht abschätzbar.

## 4 Wirtschaftliche Auswirkungen extremer Niederschlagsereignisse

19

Die wirtschaftlichen Auswirkungen werden anhand von drei Szenarien beurteilt:

- Eine *saisonale Trockenheit* würde in der Schweiz nicht zu gravierenden volkswirtschaftlichen Auswirkungen führen, da genügend Wasserreserven bestehen.
- Bei einer Zunahme der *regionalen Hochwasser* sind zusätzliche Kosten in von einigen hundert Millionen Franken pro Jahr zu erwarten. Dieses zusätzliche Schadenpotential kann mit den bestehenden Versicherungen, Rückversicherungs- und Solidarabkommen weitgehend aufgefangen werden.

- Klimageschichtliche Unterlagen zeigen, dass extreme Hochwasserereignisse auftreten können, deren Ausmass die heute bekannten regionalen Ereignisse bei weitem überschreitet. Die Schadenskosten könnten die heutige Versicherungsdeckung massiv übersteigen. Aufgrund der Seltenheit solcher Ereignisse ist ein Bezug zu Klimaänderungen jedoch nicht möglich.

## 5 Massnahmen zur Verminderung künftiger Hochwasserschäden

24

Massnahmen zur Vermeidung von Hochwasserschäden greifen an verschiedenen Stellen in die Wirkungskette Niederschlagsbildung - Hochwasser - Schadenereignis ein.

- Bezüglich der *baulichen Massnahmen* weist die Schweiz ein hohes Niveau auf, eine Gesamtevaluation bei Neuinvestitionen drängt sich jedoch auf.
- Der *Raumplanung* kommt mit steigender Hochwassergefahr eine markant grössere Bedeutung zu. Eine wirksame Nutzungsplanung vermindert das Schadenspotential.
- Eine *Reduktion der Treibhausgas-Emissionen* bringt keine direkte Wirkung. Den grössten umweltpolitischen Nutzen erreicht die Schweiz, wenn sie sich auf der internationalen Ebene für Treibhausgasreduktionen einsetzt, was auch eine nationale Reduktion miteinschliesst.

## 6 Synthese und Handlungsbedarf

28

Für die Bewältigung häufigerer Hochwasserereignisse sind verschiedene Institutionen gefordert:

- Die *Forschung* hat die Klima-, Wetterprognose- und Naturgefahrenmodelle weiter zu verbessern. Zudem sind bessere Grundlagen zur Abschätzung von Schadenskosten und Kosten-Nutzen-Analysen von Schutzmassnahmen nötig.
- Den *Versicherungen* wird u.a. das Überprüfen der Deckungsbeträge und die Entwicklung risikogerechter Prämien empfohlen.
- Der *Staat* wird auf allen Ebenen gefordert:
  - In den Gemeinden mit der angemessenen Berücksichtigung des Hochwasserschutzes in der Nutzungsplanung;
  - auf Kantonsebene mit der Richtplanung und dem effizienteren Einsatz der Mittel für den Hochwasserschutz;
  - auf Bundesebene mit einer verstärkten raumplanerischen Koordination, mit einem effizienten Einsatz der Beiträge an den baulichen Hochwasserschutz sowie diplomatischen Initiativen für internationale Umwelt- und Klimaabkommen.

---

# 1 Klimaänderung und Naturgefahren

---

## Einleitung

Eine der Konsequenzen der erwarteten Klimaänderung liegt in der möglichen Zunahme der Naturgefahren. Von der Öffentlichkeit werden witterungsbedingte Naturgefahren häufig als Indikatoren für eine Klimaänderung wahrgenommen. In der Schweiz zählen Hochwasser zu den schadenreichsten Naturgefahren, so dass ein grosses Interesse an den künftig zu erwartenden Schäden besteht. Der vorliegende Bericht legt den Wissensstand bezüglich des Einflusses von Klimaänderungen auf extreme Niederschlagsereignisse dar und diskutiert die möglichen ökonomischen Auswirkungen in der Schweiz.

## Internationales Umfeld

Die weltweiten Gefahren einer Klimaänderung bestehen u.a. in einer Schädigung von Lebens- und Wirtschaftsräumen, von Ökosystemen, im Anstieg des Meeresspiegels und in der möglichen Zunahme von Naturgefahren (IPCC 1996). Global wird mit erheblichen wirtschaftlichen und sozialen Auswirkungen gerechnet, wenn die Emissionen der Treibhausgase nicht deutlich reduziert werden können.

Die Reduktion des anthropogenen Einflusses auf das Klima gehört zu den wichtigsten internationalen Aufgaben der Umweltpolitik. Im Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über die Klimaänderungen (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) haben sich 159 Staaten verpflichtet, die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre auf einem Niveau zu stabilisieren, das gefährliche anthropogene Störungen des Klimasystems verhindert (Artikel 2).

Mit den Beschlüssen von Kyoto sind erste Schritte eingeleitet worden, die Treibhausgase international abgestimmt zu begrenzen. Die Schweiz hat sich dabei verpflichtet, die Treibhausgas-Emissionen bis zum Jahr 2010 gegenüber dem Jahr 1990 um 8% zu reduzieren.

## Wissensstand zu den Auswirkungen in der Schweiz

Dank dem nationalen Forschungsprogramm 31 'Klimaänderungen und Naturkatastrophen – NFP 31' und dem Schwerpunktprogramm Umwelt SPPU sind für die Schweiz erhebliche Fortschritte bezüglich Problemerkennung und Wirkungsanalyse des Klimasystems gemacht worden (Bader und Kunz 1998). Diese Projekte haben auf die Zusammenhänge zwischen Klimaveränderung und Extremereignissen hingewiesen und die Gefahrenpotentiale für natürliche Systeme aufgezeigt. Diese Resultate werden auch von internationalen Forschungsarbeiten gestützt.

Hochwasserereignisse zählen in der Schweiz zu den grössten Naturgefahren (Bundesamt für Zivilschutz 1995), und die Ergebnisse des NFP31 weisen darauf hin, dass eine Zunahme der Hochwasserschäden einen wesentlichen Anteil der Kosten einer Klimaänderung ausmachen dürfte. Für Wirtschaft, Politik und Öffentlichkeit besteht ein grosses Interesse an den möglichen Einflüssen von Klimaänderungen auf Naturgefahren.

Das Beratende Organ für Klimaforschungsfragen des EDI und UVEK (OcCC) als Plattform zwischen Forschung, Verwaltung und Öffentlichkeit hat deshalb beschlossen, den Stand des Wissens über die möglichen Kosten von extremen Niederschlagsereignissen in der Schweiz zusammenzustellen, um daraus die Dringlichkeit des Handlungsbedarfs abzuleiten.

Der vorliegende Bericht basiert auf dem internationalen Stand des Wissens über den Einfluss von Klimaänderungen auf das Niederschlagsgeschehen. Daraus werden mögliche Auswirkungen auf das Niederschlags- und Abflussgeschehen in der Schweiz abgeleitet. Die resultierenden Schadenskosten als Folge von Hochwasserereignissen werden im Vergleich zu den historischen Schadenskosten diskutiert.

Nicht eingegangen wird auf die Folgen der Veränderungen der mittleren Niederschlagstätigkeit, die z.B. die Landwirtschaft oder den Tourismus betreffen können.



Foto: Plattform Naturgefahren, PLANAT

Überschwemmungen zählen zu den schadenreichsten Naturgefahren in der Schweiz. Beispiel Reuss bei Seedorf am 27.8.1987



## 2 Klima, Extremniederschlag und Abfluss

### 2.1 Globale Auswirkungen einer Klimaveränderung

«Die Abwägung der Erkenntnisse legt einen erkennbaren menschlichen Einfluss auf das globale Klima nahe<sup>1</sup>»

Die Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre, v.a. Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O), sind seit der vorindustriellen Zeit (ca. 1750) wesentlich angestiegen (IPCC 1996). Diese Entwicklung ist weitgehend menschlichen Aktivitäten zuzuschreiben, insbesondere der Verbrennung fossiler Energieträger, Landnutzungsänderungen und der Landwirtschaft. Die Steigerung der Treibhausgaskonzentrationen wirkt sich im Wesentlichen auf folgende Bereiche des Klimas aus:

- Sie erhöht die Strahlungsabsorption der erdnahen Atmosphärenschicht im Infrarotbereich und damit die Temperatur der Erdoberfläche
- Sie verstärkt die Intensität des globalen Wasserkreislaufes und damit den natürlichen Treibhauseffekt des Wasserdampfes
- Sie beeinflusst die grossräumigen Strömungen in der Atmosphäre und in den Ozeanen

Da viele Treibhausgase weder rasch abgebaut noch deponiert werden, bleibt ihre Wirkung über lange Zeiträume (Jahrzehnte, Jahrhunderte) erhalten.

Neben den Treibhausgasen müssen auch die sog. Aerosole berücksichtigt werden. Es handelt sich dabei um kleinste Partikel, die vorwiegend bei Verbrennungsprozessen entstehen und in der Luft angereichert werden. Im Gegensatz zu den Treibhausgasen wirken die Aerosole auf die bodennahe Atmosphäre eher kühlend. Der durch anthropogene Aerosole verursachte Abkühlungseffekt ist aber räumlich und zeitlich begrenzt. So ist die Aerosolkonzentration vor allem über hochindustrialisierten Regionen wirksam und wegen der kurzen Lebensdauer der Aerosole stark von steigenden bzw. sinkenden Emissionsraten abhängig.

Auf globaler Skala ist der Erwärmungseffekt durch erhöhte Konzentrationen der Treibhausgase stärker als der Abkühlungseffekt der Aerosole. Selbst in den hochindustrialisierten Regionen der Erde wird auf längere Sicht (einige Jahrzehnte) die Wirkung der Treibhausgase überwiegen (IPCC 1996).

Mit heutigen globalen Zirkulationsmodellen erstellte Klimaprojektionen weisen für den Zeitraum von heute bis ins Jahr 2100 folgende Änderungen aus, deren physikalische Mechanismen identifiziert sind (IPCC 1996, ProClim- 1996):

- einen Anstieg der globalen mittleren bodennahen Lufttemperatur um 1 bis 3.5°C, die beste Schätzung liegt bei 2°C.
- einen Anstieg des Meeresspiegels um 15 cm bis 95 cm, die beste Schätzung liegt bei 50 cm.

Dabei wird

- im Winter die Lufttemperatur über Land stärker steigen als über dem Meer
- sich die Luft in hohen nördlichen Breiten und im Winter maximal, in niederen Breiten und im Sommer minimal erwärmen
- im globalen Mittel der hydrologische Kreislauf verstärkt
- im Winter die Niederschlagsmenge in mittleren und hohen Breiten zunehmen

<sup>1</sup>Englisch: «The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate» (IPCC,1996)

## 2.2 Nachweis einer Klimaänderung

Beim Führen eines Nachweises einer vom Menschen verursachten Klimaänderung liegen die grössten Schwierigkeiten einerseits in der hohen natürlichen Variabilität des Klimas, verbunden mit der zeitlichen Beschränkung der zur Verfügung stehenden Datenreihen, und andererseits in der hohen Komplexität des Klimasystems. In den letzten Jahren wurden jedoch grosse Fortschritte insbesondere bei der Modellierung des globalen Klimas und bei der Aufarbeitung historischer und gemessener Daten erzielt.

Der *Nachweis* einer Klimaveränderung wird mittels statistischer Verfahren geführt. Es konnte gezeigt werden, dass der in den letzten hundert Jahren beobachtete Anstieg der mittleren globalen bodennahen Lufttemperatur nur mit geringer Wahrscheinlichkeit vollständig natürlichen Ursprungs sein kann (IPCC 1996).

Die *Ermittlung der Ursache* eines menschlichen Einflusses basiert auf numerischen Modellen. Gewisse Muster der heute beobachteten räumlichen und zeitlichen Temperaturveränderungen konnten von den Klimamodellen nur mittels einer Erhöhung der Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen in Verbindung mit einer Reduktion des stratosphärischen Ozongehaltes nachvollzogen werden. Es wird daher geschlossen, dass ein Zusammenhang zwischen der Erhöhung der Konzentration von Treibhausgasen und der Erhöhung der mittleren globalen bodennahen Lufttemperatur besteht (IPCC 1996). In der Schweiz zeigt die Auswertung von Datenreihen eine Temperaturerhöhung von etwas über 1°C in diesem Jahrhundert, ein Wert der über dem globalen Mittelwert liegt (Beniston et al. 1994, Bader und Kunz, 1998).

Es ist wichtig festzustellen, dass ein Nachweis der Klimaveränderung über die Häufigkeit von Extremereignissen nicht möglich ist. Extremereignisse sind per definitionem selten und die heute vorhandenen Zeitreihen entsprechender Messdaten sind zu kurz und zu inhomogen, um aussagekräftige Langzeitveränderungen abzuleiten (siehe Fig. 1).

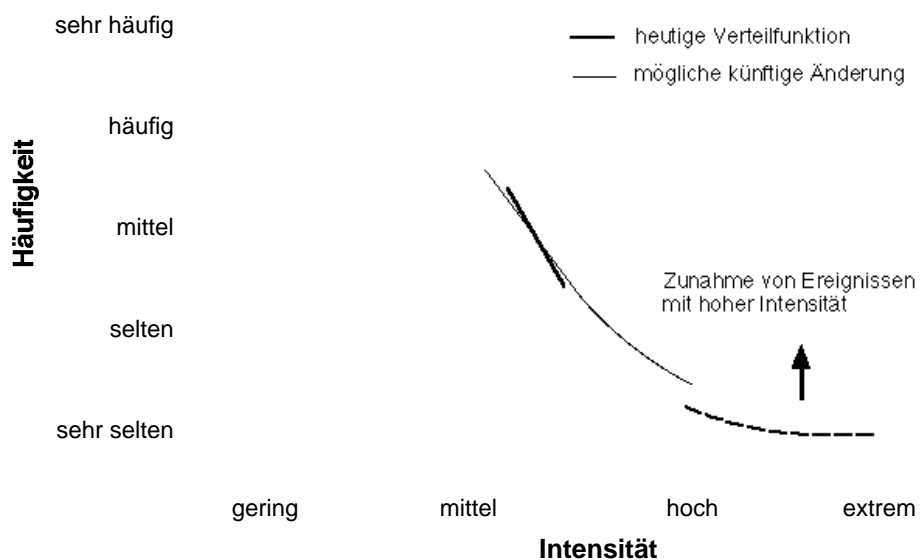


Fig. 1: Schematische Verteilung täglicher Niederschläge. Die Intensität beruht auf einem logarithmischen Massstab. Die gestrichelte Linie gibt den Bereich an, in dem aufgrund bestehender Daten keine statistische Aussagen zu Trends in den Häufigkeiten möglich sind.

## 2.3 Extremniederschlag und Hochwasser im Alpenraum

Die Forschung hat in den letzten Jahren zu einem vertieften Verständnis der Prozesse, die zu Extremniederschlägen und Hochwasserereignissen führen, beigetragen. Daraus können erste Aussagen über mögliche Veränderungen im Alpenraum abgeleitet werden.

### Wirkungskette für das Niederschlagsgeschehen im Alpenraum

Die physikalischen Mechanismen, die Klima und Wetter der Schweiz steuern, spielen sich auf unterschiedlichen Skalen ab (Wanner et al. 1997, Schär et al. 1998b, Grebner und Roesch 1998. Siehe auch Fig. 2).

Die unterschiedliche Sonneneinstrahlung am Äquator und den Polen bewirkt ein globales Temperaturgefälle und treibt in den mittleren geographischen Breiten beider Hemisphären eine starke wellenförmige Westwindströmung an. Die Wellen dieser Strömung führen zur Bildung grossräumiger Tiefdrucktröge und Hochdruckkeile. Diese sind einerseits selbst wetterwirksam, andererseits generieren und steuern sie die kleineren Hoch- und Tiefdruckgebiete. Die grossräumigen Tröge und Keile sind Ursache für Niederschlags- und Trockenphasen von mehr als 3 Tagen Dauer und für entsprechende Reaktionen in grossen Flusssystemen. Auf der regionalen Skala sind durch Tröge und Keile gesteuerte Hoch- und Tiefdruckgebiete für die Variabilität des Wetters und des Niederschlags von Tag zu Tag verantwortlich. Im Alpenraum wird die Verteilung der Niederschlagsmengen und -intensitäten zudem stark von der Topographie beeinflusst. So modifizieren die Alpen die Entwicklung und Zugbahn von regionalen Niederschlagssystemen (Tiefdrucksysteme, Fronten), und sie wirken in komplexer Weise auf die lokalen Niederschlagsprozesse ein.

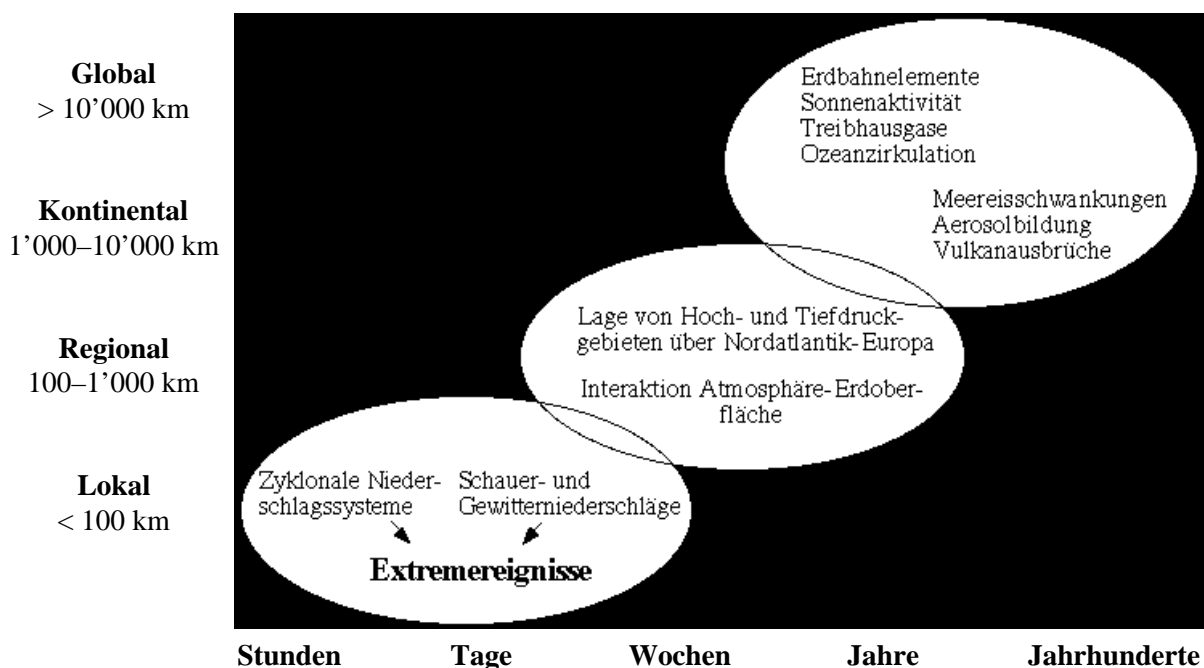


Fig. 2: Wichtige Einflussgrössen verschiedener räumlicher und zeitlicher Skalen auf das Niederschlagsgeschehen der Schweiz. Die meisten Prozesse und ihre direkten Wirkungen sind weitgehend bekannt. Grosse Unsicherheiten bestehen jedoch an den Skalenübergängen, insbesondere bei den Wechselwirkungen zwischen Klima, Witterung und Wetter.

## Prozesse extremer Niederschlagsereignisse

Bei der Niederschlagsbildung sind grundsätzlich zwei Prozessformen zu unterscheiden, deren Niederschlagsleistung bezüglich Dauer und Fläche getrennt betrachtet werden muss:

- *Konvektiver Prozess* (Schauer und Gewitter)
- *Zyklonaler Prozess* (Landregen)

Konvektive Niederschläge sind von kurzer Dauer (einige Stunden) und kleinräumig wirksam. Sie können jedoch hohe Intensitäten erreichen. Konvektion findet in erster Linie im Sommerhalbjahr statt. Das Schadenausmass durch den Niederschlag-Abfluss-Prozess ist lokal: Murgänge, Hochwasser in Wildbächen und kleinräumigen Einzugsgebieten (Kienholz et al. 1998, Zimmermann et al. 1997).

Die Intensität nimmt von voralpinen in inneralpine Gebiete ab (Grebner und Roesch 1998, Frei und Schär 1998). Weitere Schadenpotentiale ergeben sich durch Sturmböen und Hagel (Schiesser et al. 1997).

Zyklonale Niederschläge eines Tiefdruckgebietes können bis zu drei Tage dauern. Die Intensitäten pro Stunde betragen dabei weniger als 20% von konvektiven Mengen. Bevorzugte Jahreszeit ist das Winterhalbjahr, insbesondere die Übergangsjahreszeiten mit Schwergewicht im Herbst. Verursacht werden zyklonale Niederschläge sowohl durch einzelne Tiefdruckgebiete als auch durch längere Folgen von Tiefdrucksystemen (mit einer Dauer von wenigen Tagen bis zu mehreren Wochen). Je länger zyklonale Strömungslagen andauern, desto grösser ist das dadurch betroffene Gebiet (einzelne Flusssysteme bzw. ganze Regionen und Länder).



Foto: PLANAT

zenabfluss der Saltina bei Brig,  
September 1993

Im Alpenraum werden die grössten Niederschlagsintensitäten südlich des Hauptkammes beobachtet. Das Tessin und die angrenzenden Gebiete Norditaliens weisen insbesondere im Herbst eine ausgesprochen hohe Häufigkeit von Starkniederschlägen auf (Courvoisier 1998, Frei und Schär 1998). Diese Ereignisse werden häufig durch eine Kombination von zyklonalen und konvektiven Niederschlägen verursacht, wobei die Zufuhr von Feuchte aus dem Mittelmeerraum durch ein aktives Tiefdruckgebiet und der dynamische Einfluss von Höhentroggen eine wichtige Rolle spielen (Grebner 1980, Buzzi und Tartaglione 1995, Masacand et al. 1998).

## Abflussmechanismen und Hochwasserbildung in der Schweiz

Der durchschnittliche Abfluss eines Gewässers im Verlaufe eines Jahres wird durch das sogenannte Abflussregime charakterisiert. Es ist in erster Linie abhängig von der mittleren Höhe des Einzugsgebietes sowie seiner Lage bezüglich der Alpen. Das Abflussregime der meisten Flüsse in der Schweiz weist - aufgrund der Schneeschmelze zwischen Frühling und Sommer - ein Maximum des durch-

schnittlichen Abflusses auf. Nach der Schneeschmelze und im Herbst sind die Abflüsse wieder geringer und nähern sich dem winterlichen Minimum (Grabs et al. 1997, Gurtz et al. 1997).

Im Gegensatz zum Abflussregime ist ein Abflusswert und somit auch ein Hochwasser ein Einzelereignis, das hauptsächlich von folgenden Komponenten abhängig ist:

- Niederschlagsmenge eines Ereignisses
- Niederschlagsform (Schauer oder Landregen; Regen oder Schnee)
- Zustand der Speichergrossen (Gletscher, Schneedecken, Vegetation, Böden)
- Verdunstung
- Grösse des Einzugsgebietes und dessen räumliche und zeitliche Betroffenheit durch die Niederschläge

Bei der Entstehung eines Hochwassers werden einige zusätzliche Komponenten zu massgeblichen Steuergrössen:

- die Art der Bodenbedeckung (Fels, Gletscher, Vegetation, Siedlungsfläche)
- der Vegetationstyp (Weide, Wald, Kulturland)
- die Bodenbeschaffenheit (Struktur, Verdichtung, Gründigkeit, Wassersättigung)
- bauliche Massnahmen (Kanalisationen, Drainage, Überschwemmungsflächen, Bodenversiegelung)

Lage, Grösse und Beschaffenheit eines Einzugsgebietes sind wichtige Parameter, um maximale Abflusswerte eines Flusses abschätzen zu können. Dieser Umstand erschwert eine generelle Einschätzung der Hochwassergefährdung.

## 2.4 Extreme Trockenheit

Die Prozesse, die zu einer lang andauernden Trockenheit führen könnten, sind für den Alpenraum noch wenig bekannt.

Für Mitteleuropa und die Schweiz existiert relativ wenig Literatur über die Dynamik und das Klima von lang andauernden Trockenperioden. Die Prozesse, die solche Ereignisse im Alpenraum steuern, sind noch wenig bekannt. Ebenso sind Aussagen über mögliche Einflüsse durch die globale Klimaänderung wegen der begrenzten räumlichen Auflösung der Modelle nicht möglich. Das mangelhafte physikalische Wissen über diese Art von Extremereignissen steht in einem gewissen Widerspruch zu den naturräumlichen und sozioökonomischen Auswirkungen von langen Trockenperioden, wie sie am Beispiel einiger Ereignisse dieses Jahrhunderts illustriert wurden (Grütter et al. 1948, Schorer 1992).

## 2.5 Extremereignisse in Klimamodellen

Mit heutigen Klimamodellen können Veränderungen des mittleren Klimas der Zukunft abgeschätzt werden. Gegenüber Modellszenarien von Extremereignissen bestehen aber noch grosse Vorbehalte. Trotzdem lassen sich Modelle als Forschungsinstrumente benutzen, um mögliche Einflussfaktoren einer globalen Klimaveränderung auf Extremereignisse aufzuzeigen.

Globale Atmosphären-Ozean-Modelle bilden gute Grundlagen, um Änderungen globaler bis kontinentaler Mittelwerte abzuschätzen. Ihre räumliche Auflösung sowie Unsicherheiten in den Wechselwirkungen zwischen verschiedenen atmosphärischen Skalen erlauben jedoch keine ortsbezogenen Aussagen über im Mittel zu erwartende Werte oder sogar Extremwerte in Gebieten wie dem Alpenraum oder der Schweiz. Dies ist aber die relevante Skala für politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Fragestellungen. Um dennoch Abschätzungen auf lokaler Ebene machen zu können, werden zwei unterschiedliche Methoden angewandt:

- Statistisches Downscaling (“Herabskalierung”, Gyalistras et al. 1994): Dabei wird aufgrund beobachteter Daten ein statistisches Modell gebildet, das den grossräumigen Zustand der Atmosphäre mit den kleinräumig gemessenen Niederschlägen in Zusammenhang bringt. Dieses Modell kann benutzt werden, um ein Szenario für den Niederschlag in der Schweiz abzuleiten. Dabei wird der aus den globalen Klimamodellen errechnete zukünftige atmosphärische Zustand als Ausgangslage genommen. Sowohl im Rahmen des NFP 31 als auch des SPPU wurden bzw. werden diese Verfahren angewandt (z.B. Overney et al. 1997).
- Numerische Modellierung mit regionalen Modellen: Bei diesem Ansatz wird ein regionales physikalisches Klimamodell mit einer Auflösung von einigen 10 Kilometern in ein globales Klimamodell über dem Alpenraum eingepflanzt. Es erhält an seinen Rändern das grossräumige Geschehen als Input und errechnet daraus ein detaillierteres Szenario für den Alpenraum. Erste Modellanwendungen für die Schweiz wurden in den letzten Jahren durchgeführt (Ohmura et al. 1996, Lüthi et al. 1996).

Beide Verfahren können lokal (< 100 km) interpretierbare Szenarien mittlerer zukünftiger Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse liefern, die als Eingangswerte in Impactmodellen (hydrologische Einzugsgebietsmodelle, Waldmodelle, u.ä.) nutzbar sind. Sie sind aber zurzeit nicht in der Lage, Wahrscheinlichkeiten über das Ausmass und Auftreten von Extremereignissen abzuschätzen. Sie helfen jedoch, die physikalischen Prozesse zu verstehen, die zu Extremereignissen führen können.

Das verbesserte Prozessverständnis, das in den letzten Jahren gewonnen wurde, hat zudem zur Entwicklung von numerischen Modellen beigetragen, mit welchen es möglich ist, den Aufbau eines extremen Niederschlagsereignisses kurzfristig vorherzusagen und Massnahmen einzuleiten.

---

## 3 Häufigkeit von Niederschlags- und Hochwasserereignissen

---

Untersuchungen klimatologischer Beobachtungen in der Schweiz zeigen, dass in den vergangenen 100 Jahren die Niederschläge im Winter um bis zu 30% zugenommen haben und hohe Niederschlagsintensitäten in Herbst und Winter markant häufiger geworden sind. Ob in dieser Periode auch die Wahrscheinlichkeit von Extremereignissen zugenommen hat, kann aufgrund der kurzen Beobachtungsphase nicht beurteilt werden.

### 3.1 Der Niederschlag der letzten hundert Jahre

Trendanalysen der Niederschlagsmengen anhand täglicher Daten haben gezeigt, dass die winterliche Niederschlagsmenge in der Schweiz in den letzten hundert Jahren um bis zu 30% zugenommen hat (Schweiz. Meteorologische Anstalt 1996, Widmann und Schär 1997). Diese Zunahme kam ohne nennenswerte Vermehrung der Anzahl Niederschlagstage zustande. Sie ist primär durch eine Verschiebung in der Intensitätsverteilung der Niederschläge bedingt. Im Herbst und Winter konnte ein Trend zu intensiveren Niederschlagsereignissen v.a. auf der Alpennordseite festgestellt werden (Courvoisier 1998). Es wird vermutet, dass dies auf eine Intensivierung des Wasserkreislaufes aufgrund der in diesem Jahrhundert beobachteten Temperaturerhöhung zurückzuführen ist.

Im Sommerhalbjahr konnten keine Veränderungen des Niederschlagsklimas nachgewiesen werden.

Die beobachteten Veränderungen liegen im Bereich natürlicher Klimavariationen und können deshalb nicht zwingend einer vom Menschen verursachten Klimaveränderung zugeschrieben werden. Die Art der Trends stimmt aber mit dem heutigen Verständnis der Klimaveränderung und mit den Klimamodellrechnungen überein.

### 3.2 Hochwasser und Überschwemmungen der letzten 700 Jahre

Die Untersuchung von Hochwassern der letzten 700 Jahre hat ergeben, dass die Häufigkeit der Hochwasserereignisse schwankt. Während der untersuchten Zeit gab es sowohl Perioden mit vermehrten Hochwassern als auch solche, in denen kaum Verheerungen durch Wasser dokumentiert wurden (Pfister 1998). Der Grund für die Schwankungen ist zurzeit noch unbekannt. Zur Lösung dieser Frage konzentriert sich die Forschung auf Hypothesen, die Zusammenhänge mit den nordatlantischen Druckverhältnissen, mit atlantischen Meeresströmungen und mit Änderungen im Strahlungshaushalt (Sonne, Vulkane) als Basis haben.

Die Analyse historischer Hochwasser hat zudem ganz klar gezeigt, dass die in diesem Jahrhundert beobachteten Hochwasser und Überschwemmungen den Bereich natürlicher Variabilität nicht verlassen haben. Gestützt werden diese Resultate auch durch Untersuchungen von Sedimentarchiven aus Schweizer Seen. Diese kamen zum Schluss, dass das Ausmass von extremen Hochwassern in den letzten 1000 Jahren nicht zugenommen hat. Das bisher grösste Ereignis, das in diesen Archiven gefunden wurde, war dasjenige von 1342 (Siegenthaler und Sturm 1991).

Aufgrund der heute beobachteten Hochwasserentwicklung kann daher kein Zusammenhang mit einer durch den Menschen verursachten Klimaänderung postuliert werden. Ein wichtiges Ergebnis der Klimarückschau ist allerdings, dass extreme Hochwasser und Überschwemmungen an Übergängen von einem kälteren in ein wärmeres Klima oder umgekehrt gehäuft auftraten (Pfister 1998).

Trendanalysen über die instrumentelle Messperiode weisen eine Zunahme der mittleren Abflüsse an Schweizer Hauptflüssen auf (Schädler 1987). Auch Overney et al. (1997) stellen an sechs Einzugsgebieten nicht stationäre Phänomene fest. Eine systematische Zunahme von schadenverursachenden Hochwasserereignissen konnte hingegen nicht festgestellt werden, da Trends für Extremereignisse aufgrund ihrer Seltenheit nur sehr schwer nachzuweisen sind.

### 3.3 Aussagen zum Niederschlagsgeschehen der Zukunft

Bei einer Erwärmung der Atmosphäre wird mit einer Intensivierung des Wasserkreislaufes gerechnet. Resultate aus Modellrechnungen zeigen, dass ein solcher Effekt mit häufigeren intensiven Niederschlägen im Winter und in den Übergangsjahreszeiten verbunden ist. Ob sich ein ähnlicher Effekt auch auf die Sommerniederschläge auswirkt, gilt noch als sehr unsicher.

Physikalische Überlegungen und Resultate globaler Klimamodelle weisen darauf hin, dass eine Erhöhung der bodennahen Temperaturen in unseren Breiten mit einer Zunahme des atmosphärischen Feuchtegehaltes verbunden ist. Bei einer Erwärmung um 2 °C beträgt die erwartete Feuchtezunahme 15%. Dieser Mechanismus kann zu einer bedeutenden Intensivierung des Wasserkreislaufes führen (IPCC 1996).

Wie bereits in Kapitel 2.3 erwähnt, hängen die Perspektiven für extreme Niederschlagsereignisse in hohem Masse von der grossräumigen atmosphärischen Steuerung und der mittlräumigen Struktur (Temperatur, Feuchte) der Atmosphäre ab. Über das zukünftige Verhalten dieser Parameter kann man aber zurzeit noch keine Abschätzungen vornehmen.

#### Winterhalbjahr

Regionale Klimasimulationen legen nahe, dass die Intensivierung des Wasserkreislaufes im Winterhalbjahr zu einer Zunahme der mittleren Niederschläge beiträgt und mit einer Zunahme der Häufigkeit stärkerer Niederschlagsintensitäten gekoppelt ist (Frei et al. 1998). Die relativen Veränderungen sind um so ausgeprägter, je intensiver die Niederschlagsereignisse sind, und sie könnten – bei einer Erwärmung um 2 °C – mehrere 10% ausmachen (siehe Figur 3). Veränderungen dieser Art hätten insbesondere auf der Alpensüdseite gewichtige Auswirkungen, wo schon heute herbstliche Niederschläge zu Überschwemmungen und Hochwassern mit grossen Schäden führen. Der Intensivierung des Wasserkreislaufes könnten zudem Änderungen in der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen überlagert sein, die man heute noch nicht abschätzen kann. Eine zusätzliche Verschärfung der Niederschlagssituation ergibt sich aus der Erhöhung der Schneefallgrenze, wodurch höhere Abfluss-Spitzen zu erwarten sind.



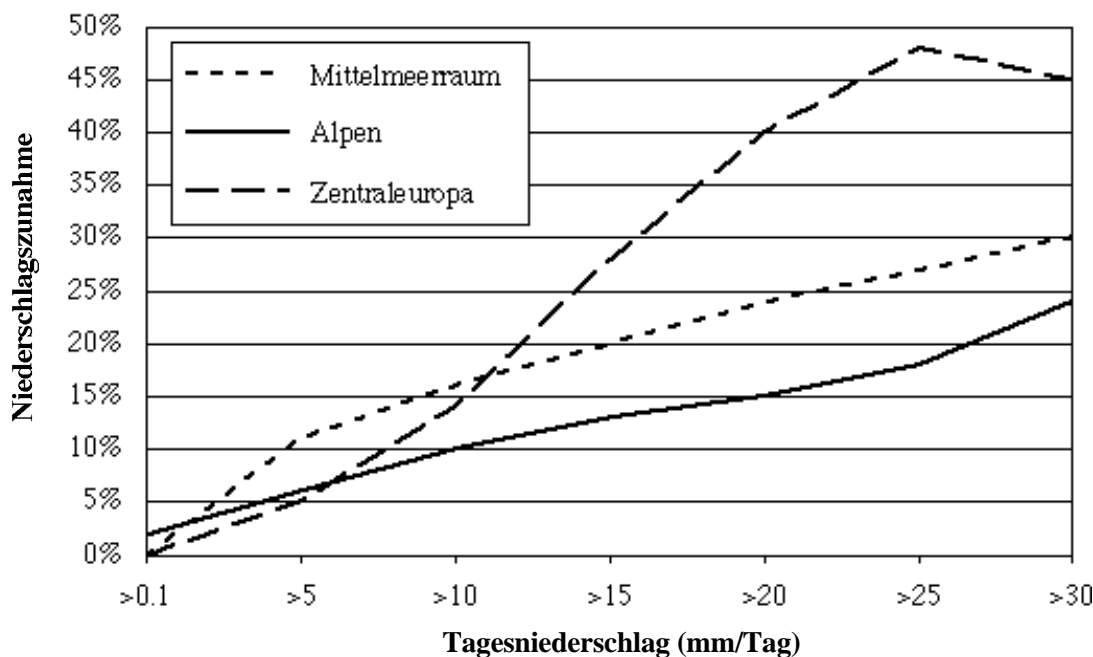


Fig. 3: Berechnete Zunahme der Niederschlagstätigkeit im Winter für drei Regionen in Mitteleuropa in einer gegenüber heute 2°C wärmeren und 15% feuchteren Atmosphäre (nach Frei et al. 1998).

### Sommerhalbjahr

Im Sommerhalbjahr, in dem auf der Alpennordseite die meisten Hochwasser (v.a. durch konvektive Niederschläge) ausgelöst werden, ist zurzeit keine eindeutige Aussage zur künftigen Niederschlagsentwicklung möglich. Einerseits sind keine signifikanten Trends zu beobachten und andererseits sind die Modellresultate für das Sommerhalbjahr noch sehr unsicher (Schär et al. 1998a). Eine weitere Verbesserung der Modelle, um insbesondere die im Sommer wirksamen konvektiven Niederschlagsprozesse und die Verdunstungsvorgänge genauer zu erfassen, sollte in den nächsten Jahren zu zuverlässigeren Resultaten führen.

## 3.4 Aussagen zum Hochwassergeschehen der Zukunft

Die erwarteten Veränderungen der Niederschlagstätigkeit werden eine Verschiebung im jahreszeitlichen Abflussverhalten verursachen. Die mittlere Hochwasserhäufigkeit wird im Winter eher steigen und im Sommer eher etwas abnehmen. Die Gefährdung der Siedlungsräume und Infrastrukturanlagen wird aufgrund der ablaufenden Prozesse auch in Zukunft in den Alpen grösser sein als im Mittelland. Aussagen zu Eintretenswahrscheinlichkeiten und Sachdenausmass von Hochwassern in der Zukunft können derzeit noch nicht gemacht werden.

### Veränderungen im Abflussregime des schweizerischen Mittellandes

Bei einer Erwärmung des Klimas wird eine gewisse Umverteilung des Abflusses innerhalb des Jahres stattfinden:

In den Monaten Dezember bis März ist mit einer Erhöhung der durchschnittlichen Abflüsse, in den Monaten April bis September mit einer Abnahme zu rechnen. Die Zunahme im Winter ist die Folge vermehrter Regen- und verminderter Schneeniederschläge. Die sommerliche Abnahme ist eine Folge höherer Verdunstung, die mit einer tendenziellen Abnahme der Niederschläge einhergehen könnte (Bader und Kunz 1998, Grabs et al. 1997). Dabei muss beachtet werden, dass die Resultate betreffend Tendenzen des sommerlichen Niederschlagsklimas noch sehr unsicher sind. Das heutige Maximum des durchschnittlichen Abflusses im Frühsommer wird vermindert und der Jahresgang gesamthaft ausgeglichener sein. Im Mittelland könnte der Sommer zur Hauptniedrigwassersaison werden, was eventuell Bewässerungen von Kulturland nach sich ziehen wird.

### Veränderungen im Abflussregime in den Schweizer Alpen

In den alpinen Einzugsgebieten werden die Unterschiede zwischen mittlerem Sommer- und Winterabfluss weniger gross ausfallen. Die durchschnittlichen winterlichen Abflüsse werden jedoch zunehmen, da die Niederschlagsretention durch die Schneedecke reduziert sein wird. Im Sommer werden von Gletschern beeinflusste Einzugsgebiete dank vermehrtem Schmelzwasserabfluss eine kleinere Abflusseinsparung verzeichnen als die Mittellandflüsse. Mit zunehmendem Gletscherrückzug wird dieser Effekt jedoch zurückgehen (Grabs et al. 1997, Gurtz et al. 1997).

### Veränderungen der Hochwassergefährdung

Anhand des heute erreichten Wissensstandes kann die Klimaforschung nur Aussagen bezüglich des mittleren Verhaltens der Atmosphäre für die Zukunft machen. Bis heute können lediglich Trendaussagen über Veränderung der Hochwassergefährdung in der Zukunft gemacht werden, nicht aber konkrete Angaben für einzelne Regionen oder auch die gesamte Schweiz.

Im Mittelland und in der Südschweiz könnte im Winterhalbjahr die Hochwasserhäufigkeit allenfalls etwas zunehmen, da in dieser Jahreszeit verschiedene Prozesse Tendenzen in eine solche Richtung zeigen: der Wassergehalt der Atmosphäre wird zunehmen, der Niederschlag fällt mehr als Regen und weniger als Schnee, und die Dauer flächendeckender und damit wasserspeichernder Schneedecken wird sich verkürzen (Gurtz et al. 1997, Schulla 1997).

Über die zukünftige Entwicklung der sommerlichen kleinräumigen Überschwemmungen im Alpenraum können heute noch keine Aussagen gemacht werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Hochwasser in erster Linie von Schauern und Gewittern ausgelöst werden, über deren Häufigkeit weder in der Vergangenheit als auch in der Zukunft Trends erkennbar sind.

Untersuchungen von Naef et al. (1998) haben gezeigt, dass das Retentionsvermögen der Böden in der Schweiz bei einer Erhöhung der Niederschlagsmenge oder -intensität um je 20% nicht ausgeschöpft ist. Eine überproportionale Zunahme des Oberflächenabflusses und der Hochwassergefahr ist in diesem Zusammenhang nicht zu erwarten.



Foto: PLANAT

sion der Varunasch, Poschiavo,  
1988

# 4 Wirtschaftliche Auswirkungen extremer Niederschlagsereignisse

## 4.1. Ereigniskette und ökonomische Bewertung

Die naturwissenschaftlichen Kapitel haben versucht, den ersten Teil der Ereigniskette "Veränderungen der Atmosphäre - Veränderung der Niederschläge - Hochwasser und Trockenheiten - zusätzliches Schadenspotential - Zunahme von Schäden" aufzuzeigen und die Wahrscheinlichkeit künftiger Hochwasser zu erfassen. In diesem Kapitel wird versucht, die wirtschaftliche und gesellschaftliche Dimension der künftigen Hochwassergefahr zu erfassen.

Die Ökonomie befasst sich vor allem mit den Schäden von Hochwasser und Trockenheiten, den volkswirtschaftlichen Auswirkungen von Hochwasserschäden, mit dem Verhalten der Bevölkerung gegenüber solchen Schäden und mit der Beurteilung von Massnahmen zur Verminderung oder Vermeidung von Schäden.

Die naturwissenschaftliche Analyse zeigt keine lückenlos nachweisbare Ereigniskette von der Klimaveränderung bis zur Hochwasserhäufigkeit. Die Unsicherheiten sind weiterhin sehr gross. Die ökonomische Bewertung kann deshalb die naturwissenschaftlichen Erkenntnisse nicht direkt übernehmen. Der Ökonomie sind Aussagen und Bewertungen unter Unsicherheit geläufig; wichtig ist lediglich, dass die Unsicherheit offengelegt ist. Für die ökonomische Beurteilung klimabedingter Hochwasser wird deshalb auf *Szenarien* zurückgegriffen: Szenarien erlauben Aussagen darüber, welche Folgen zu erwarten sind, falls vermehrte Hochwasser auftreten.

## 4.2. Szenarien der Niederschlagsentwicklung

Für die natur- wie die wirtschaftswissenschaftliche Diskussion der Auswirkungen von Extremereignissen ist es sinnvoll, Szenarien zu definieren, die auf historischen Erfahrungen beruhen (ein Vorschlag für die Beurteilung des Ausmasses bilden die Ausmassklassen für die Auswirkungen von Naturgefahren, welche die KATANOS-Studie (Bundesamt für Zivilschutz 1995) verwendet). In diesem Bericht wurden drei Szenarien untersucht:

- *Regionales Hochwasserereignis*. Hochwasserereignis mit lokal/regional schwerwiegenden Auswirkungen (z.B. Uri 1987, Brig 1993, Sachseln 1997).
- *Extremes Hochwasserereignis*. Grossräumige Überschwemmungen (grosse Teile der Schweiz), vergleichbar mit den Überschwemmungen des Jahres 1342. Ereignisse in dieser Art sind 1993 und 1995 in Deutschland aufgetreten.
- *Extreme Trockenperiode*. Eine ganzjährige Trockenperiode in Mitteleuropa, vergleichbar mit jener des Jahres 1540.

Diese drei Szenarien dienen als Grundlage für die Beurteilung der wirtschaftlichen Folgen klimatischer Extremereignisse.



Foto: PLANAT

Hochwasserschäden in Brig r  
der Überschwemmung der Sa  
im September 1

### 4.3. Regionale Hochwasserereignisse

Regionale Hochwasser können in Zukunft aufgrund zunehmender Winterniederschläge zunehmen. Die zusätzlichen Schäden werden auf einige hundert Millionen Franken jährlich geschätzt. Diese Schäden können von den bestehenden Versicherungssystemen weitgehend gedeckt werden.

#### Zusätzliches Schadenspotential regionaler Hochwasser

Regionale Hochwasserereignisse treten in der Schweiz sowohl im Mittelland wie in den Alpen immer wieder auf. Die Schäden solcher Hochwasser haben von 1815 bis 1885 zugenommen, in den mittleren Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts abgenommen, seither wieder zugenommen (Röthlisberger 1998, Weingartner et al. 1998, Pfister 1998). Die Ursachen für diese Schwankungen sind unklar. Es ist offen, ob der Rückgang der Schäden in der Mitte des 20. Jahrhunderts primär klimabedingt oder auf planerischen und baulichen Schutz zurückzuführen ist. Ebenso wenig ist es möglich, als Ursache für den Anstieg seit Mitte des 20. Jahrhunderts zwischen klimabedingten Einflüssen und der zunehmenden Besiedelung von Gefahrenräumen zu unterscheiden.

Im Rahmen des NFP 31 sind die jährlichen Kosten für Unwetterschäden auf 450 Mio. Franken geschätzt worden. (Preisstand 1995, vgl. dazu Meier 1998). Die Herleitung dieses Wertes stützt sich vor allem auf die Unwetterstatistik des WSL von 1972-1996 (Röthlisberger 1998), welche in Abbildung 4 zusammengefasst ist. Diese Werte dienen im folgenden als Basis für die Abschätzung der Schadenskosten klimabedingter Hochwasser.

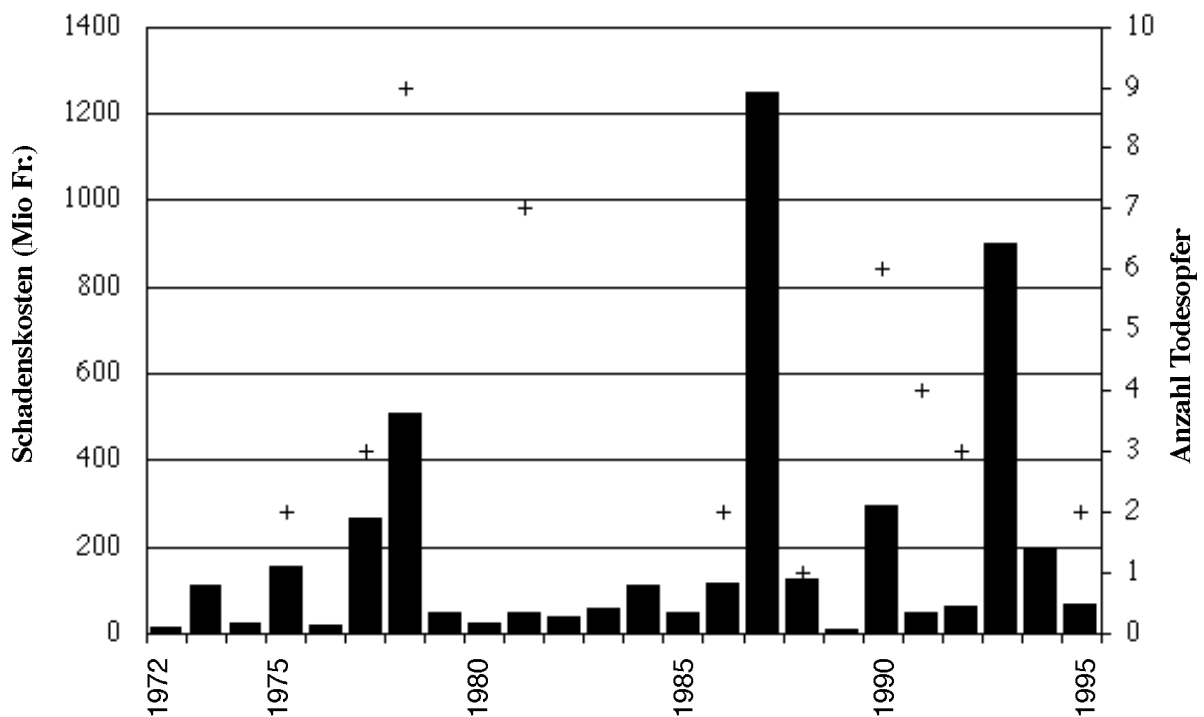


Abb. 4: Jährliche Schadenssummen (Balken) und Anzahl Todesopfer (+) durch Hochwasserereignisse in der Schweiz (nach Röthlisberger 1998, nicht teuerungsbereinigt)

Das Szenario "regionales Hochwasserereignis" geht davon aus, dass vermehrte und stärkere Niederschläge zusätzliche Schäden von 30 bis 100 Prozent verursachen. Diese grobe Schätzung kann statistisch nicht belegt werden, beruht jedoch auf einer Reihe von Plausibilitätsannahmen (Meier 1998). Der Schadensablauf dürfte neben den Starkniederschlägen durch weitere Faktoren wie höhere Permafrostgrenzen, vermehrte Murgänge und allenfalls eine geschwächte Schutzfunktion des Waldes geprägt sein. Für das Schadenpotential ist somit eine Verkettung von Ursachen anzunehmen. Zusätzliche Hochwasser würden in diesem Szenario 135 bis 450 Mio. Franken Schäden pro Jahr verursachen. In diesen Kosten sind die Kosten für die Evakuationen, Betriebsunterbrüche und Aufräumarbeiten mit eingeschlossen.

### Versicherungsdeckung

Die Schäden regionaler Hochwasser sind durch die Elementarschadenversicherer weitgehend gedeckt; die kantonalen Gebäudeversicherungen haften unbeschränkt, die Privatversicherer aufgrund der Elementarschadenverordnung bis zu einem Betrag von 300 Mio. Zur Sicherstellung dieser Leistung haben die privaten Versicherungseinrichtungen den Elementarschadenpool gebildet. Für grössere Schäden (bis 100 Mio. Franken pro Ereignis) steht den kantonalen Versicherern eine interkantonale Rückversicherung zur Verfügung; für sehr grosse Schäden (bis 750 Mio. Franken pro Jahr) die IRG (Interkantonale Risikogemeinschaft). Die privaten Elementarschadenversicherer verfügen ebenfalls über Pools (Elementarschadenpool). Nicht gedeckt und deshalb von Bund, Kantonen und Gemeinden zu tragen sind die Schäden an der öffentlichen Infrastruktur.

Die Grenzen für die Versicherungen sind allenfalls erreicht, wenn ein regionales Hochwasser die Ausmasse von 1817 in der St. Galler Rheinebene erreicht. Schätzungen gehen von einem Schadenpotential von über 1 Mia. Franken aus (Hausmann 1998). Die Gebäudeversicherung des Kantons St. Gallen könnte diese Schäden (nach Abzug des IRG-Beitrages mehr als 250 Mio. Franken) noch knapp decken.

## 4.4. Extremes Hochwasser

Ein extremes Hochwasser kann Schäden in Milliardenhöhe verursachen. Solche Schäden können weder heute noch in Zukunft von Versicherungen gedeckt werden.

### Schadenpotential eines extremen Hochwassers

Im ausgehenden Mittelalter (1342) ist das westliche Mitteleuropa von extremen, ausgedehnten Hochwassern überschwemmt worden (Pfister 1998). Dieses Jahrtausendereignis lag mit Sicherheit deutlich über den seither nachgewiesenen extremen Hochwassern. Das Ereignis rechtfertigt eine Auseinandersetzung mit den Folgen einer weiträumigen Hochwasser- und Überschwemmungskatastrophe. Es muss jedoch betont werden, dass diese Singularität keine Verbindung zu den naturwissenschaftlichen Wirkungsketten aufweist. Die folgenden Abschnitte gehen deshalb nur darauf ein, was passiert, *falls* eine solche Hochwasserlage wirklich eintreten sollte.

Ein katastrophales Hochwasser, vergleichbar mit jenem von 1342, würde in erster Linie die Infrastrukturen der Täler überfluten. Über die Auswirkung der Schäden können nur sehr vage Annahmen getroffen werden. Betroffen wären gemäss Annahmen 5 Prozent der Infrastruktur. Der Beschädigungsgrad liegt bei 7 bis 20 Prozent, im Schnitt 10 Prozent; dieser Wert stützt sich auf Erfahrungen mit regionalen Hochwassern. Geht man von einem Neuwert der gesamten schweizerischen Hoch- und Tiefbauinfrastruktur von rund 2'400 Mia. Franken aus (Baumarkt Schweiz 1998), dann beliefe sich der gesamte Infrastrukturschaden auf etwa 12 Mia. Franken. Hinzu kommen die Wertverluste an Mobilien ("Gebäudeinhalt") sowie Folgekosten in Form von Evakuationen, menschlichen Verlusten und Produktionsausfällen.

### Die Grenzen der Versicherbarkeit

Die Schäden eines extremen Hochwassers übersteigen bei weitem die heutigen Versicherungsfonds. Würde ein solches Hochwasser morgen eintreten, dann müsste es weitgehend von den Geschädigten und der öffentlichen Hand selbst getragen werden. Betroffen wären zudem die Banken über die Wertminderung der hypothekarisch belasteten Gebäude. Damit stellt sich die Frage, ob ein verstärkter Versicherungsschutz gegen ein solches Extremereignis möglich ist.

Extreme Hochwasser sind definitionsgemäss sehr seltene Ereignisse (d. h. sie weisen eine tiefe Eintretenswahrscheinlichkeit bzw. ein tiefes Risiko auf) mit einem sehr hohen Schadenpotential. Damit stellt sich die Frage, wie man mit solchen Ereignissen umgehen kann.

- Versicherungen auf freiwilliger Basis werden kaum abgeschlossen. Die fehlende Kenntnis der Eintretenswahrscheinlichkeit ist zwar noch kein Grund für fehlende Versicherungsverträge (Borch 1988), es ist vielmehr die individuelle Beurteilung dieser Wahrscheinlichkeit: Die Menschen unterschätzen die Wahrscheinlichkeit sehr seltener Ereignisse noch zusätzlich (Yates 1992). Sie sind deshalb nicht bereit, die entsprechenden Prämien zu leisten, selbst dann nicht, wenn sie im Prinzip risikoavers<sup>2</sup> sind (Zweifel und Nocera 1996).
- Obligatorische Versicherungen lösen das Problem der fehlenden Deckung kaum: Werden die Haftungslimiten, allenfalls bis zur vollen Schadendeckung, gesetzlich erhöht, dann steigt die Prämienbelastung für längere Zeit massiv an. Der Grund hierfür ist weniger die Höhe des Schadens an sich als vielmehr die Unmöglichkeit zu bestimmen, ob er in 10, 100 oder 1000 Jahren eintritt. Die Versicherungen müssten, um sicherzugehen, sehr hohe Prämien für die Äufnung ihrer Fonds verlangen, was die von einem potentiellen Schaden Betroffenen übermässig belastet.
- Erdbeben sind versicherungstechnisch eine dem extremen Hochwasser vergleichbare Naturkatastrophe, die selten auftritt, aber hohe Schäden (weit höhere als ein Hochwasser, vgl. Bachmann et al. 1998) verursacht. Das Erdbeben von San Francisco 1906 verursachte Schäden in Milliardenhöhe. Die meisten Versicherungen konnten damals einen grossen Teil dieser Schäden

<sup>2</sup> Risikoaversion bedeutet, dass Individuen aus zwei Ereignissen mit dem selben Produkt aus Schaden und Eintretenswahrscheinlichkeit jenes mit dem kleineren möglichen Schaden und der grösseren Wahrscheinlichkeit (im Extremfall jenes mit der Wahrscheinlichkeit 1) vorziehen. Risikoaversion ist damit die Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung eines Risikos. Versicherungs-mathematisch entspricht sie dem Zuschlag auf die "neutrale" Versicherungsprämie, die sich aus dem Produkt von Eintretenswahrscheinlichkeit und dem abdiskontierten potentiellen Schaden ergibt ("Risikozuschlag").

nicht übernehmen und gingen bankrott. Die Schäden mussten von den Geschädigten selbst getragen werden (NZZ 1998).

- Die Kernenergie kann als Analogie dienen, auch wenn diese Analogie nicht überstrapaziert werden sollte (keine Naturkatastrophe; Verursacher sind identifizierbar und können im Prinzip zivilrechtlich belangt werden). Schwere Kernenergieunfälle treten sehr selten auf, können aber Schäden in Billionenhöhe verursachen (Prognos/Infras/econcept 1997). Eine solche Last, die ein Mehrfaches der volkswirtschaftlichen Wertschöpfung ausmachen kann, lässt sich nicht versichern. Die Grenze für die Haftung bei Kernkraftwerkunfällen wurde deshalb bei 1 Mia. Franken limitiert. Die Geschädigten müssen die verbleibenden Kosten selbst tragen.

Die Erhöhung von Haftungslimiten oder die Äufnung von öffentlichen Schadenfonds können eine gewisse Erleichterung schaffen. Dennoch müssen sich Politik und Gesellschaft bewusst sein, dass sich Extremereignisse mit kleiner Eintretenswahrscheinlichkeit versicherungstechnisch nur schlecht in den Griff bekommen lassen. Eine extreme Hochwasserkatastrophe wird von den direkt Betroffenen und – über die volkswirtschaftlichen Rückkoppelungsprozesse – von der gesamten Wirtschaft getragen werden müssen.

## 4.5. Extreme Trockenheit

Die Schäden aufgrund einer einjährigen Trockenperiode sind in der Schweiz relativ gering.

In den Jahren 1947, 1949 und 1976 sind längere Trockenperioden aufgetreten. Diese Trockenjahre sind relativ gut dokumentiert (Schorer 1992). Der schwerwiegendste Trockensommer war jener von 1540 mit 10 Monaten praktisch ohne Niederschlag auf der Alpennordseite (Pfister 1998). Mehrere aufeinanderfolgende Jahre mit extremer Trockenheit hat es in der Schweiz in den letzten 500 Jahren nicht gegeben. Das folgende Szenario beruht deshalb auf einem einzigen vollständig trockenen Sommer analog zu jenem von 1540.

Eine extreme Jahrestrockenheit zieht vor allem die Landwirtschaft, die hydro- und nuklearelektrische Produktion sowie Wasserreserven für die Industrie und die Haushalte in Mitleidenschaft. Erfahrungen aus dem Jahr 1976 zeigen jedoch, dass die Folgen nicht allzu gravierend sind: Die Landwirtschaft erlitt Verluste von total ca. 100 Mio. Franken, und die Industrie konnte Engpässe mit einem flexiblen Wasser- und Strommanagement weitgehend vermeiden. Die Haushalte erlitten durch angeordnete Einschränkungen des Wasserverbrauchs gewisse Nutzungseinbussen.

Die wirtschaftlichen Auswirkungen einer einjährigen extremen Trockenheit sind als nicht allzu gravierend zu bezeichnen. Die Schweiz verfügt mit den alpinen Gletschern über ausreichende Wasserreservoirs. Engpässe können deshalb mit einem Ausbau der Wasserversorgung und flexiblen Anpassungsstrategien bei Stromkonsum und -produktion weitgehend aufgefangen werden. Bei einem starken Rückgang der alpinen Gletscher könnte sich diese Situation jedoch verändern.

---

## 5 Massnahmen zur Vermeidung künftiger Hochwasserschäden

---

Schäden aus Hochwasserereignissen entstehen aufgrund der bereits diskutierten Wirkungskette Veränderungen der Atmosphäre - Veränderung der Niederschläge - Hochwasser und Trockenheiten - Schadenpotential - Schäden. Will man Schäden verhindern, dann kann im Prinzip an jedem Punkt dieser Wirkungskette eingegriffen werden: Man kann den anthropogenen Einfluss auf das Klima reduzieren (Verminderung der Treibhausgas-Emissionen), man kann die Hochwasserentstehung reduzieren (mit Aufforstungen oder baulichen Massnahmen im Entstehungsbereich), man kann das Schadenpotential vermindern (über raumplanerische Massnahmen), und man kann schliesslich die Schäden selbst vermindern (über bauliche Massnahmen oder Katastrophenhilfe). Je weiter der Ansatzpunkt von der ursächlichen Klimaveränderung entfernt liegt, desto stärker ist er als "end-of-pipe" zu bezeichnen.

Jede Massnahme weist ein bestimmtes Kosten-Nutzen-Verhältnis auf. Wollte man sich politisch für bestimmte Massnahmen oder einen Massnahmenmix entscheiden, müssten die Kosten-Nutzen-Verhältnisse der einzelnen Massnahmen überprüft und untereinander verglichen werden. Der gegenwärtige Wissensstand lässt jedoch nur eine qualitative Beurteilung der einzelnen Massnahmen zu. Für den vorliegenden Abschnitt werden die folgenden Massnahmen beurteilt:

- bauliche Schutzmassnahmen
- raumplanerische Massnahmen
- Massnahmen zur Verminderung der anthropogenen Treibhausgas-Emissionen

Nicht verfolgt wird die Option "Aufforstungen", da sie beim heutigen hohen Waldflächenanteil nur geringe Wirkungen zeigen würden.

### 5.1. Bauliche Schutzmassnahmen

Der bauliche Hochwasserschutz wurde bisher meist für ein Jahrhunderthochwasser bemessen. Ein forcierter Ausbau des baulichen Hochwasserschutzes kann wiederum neue Risiken hervorrufen. Notwendig ist eine bessere Gesamtevaluation von Neuinvestitionen.

Die Schweiz hat in den letzten Jahrzehnten intensiv in den Hochwasserschutz investiert. Der Wert des gesamten Hochwasserschutzwerkes beträgt zwischen 4 und 5 Mia. Franken. Diese Investitionen dürften zu der seit dem Zweiten Weltkrieg beobachteten Verminderung von Überschwemmungen und Hochwasserschäden beigetragen haben. Die jährlichen Unterhaltskosten dieses Werkes betragen ca. 40 bis 50 Mio. Franken.

Die bestehenden Schutzbauten wurden weitgehend auf Hochwasser ausgerichtet, die einmal alle hundert Jahre auftreten ("Jahrhundert-Hochwasser"). Diese 100-Jahre-Regel ist allerdings sehr schematisch: sie wird unterschiedlichen Schadenpotentialen, z.B. auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und im Siedlungsgebiet, nicht gerecht. Investitionen in den Hochwasserschutz werden zudem



oft unter dem Druck des Ereignisses getätigt: Gebaut wird dort, wo zuvor ein Hochwasser zu Schäden geführt hat, statt dort, wo Investitionen – gemäss einer Gesamtevaluation – über eine längere Periode den grössten Nutzen bringen würden. Das 1993 revidierte Wasserbaugesetz sieht denn auch einen differenzierteren Hochwasserschutz vor, der von der 100-Jahre Regel abkehrt.

Eine Forcierung des baulichen Schutzes kann den aus dem Versicherungswesen bekannten Effekt des "moralischen Wagnisses" auslösen: die Menschen verhalten sich wegen des Schutzes sorgloser, was den beabsichtigten Schutzeffekt wieder zunichte macht. Moralische Wagnisse können sich vor allem in der Raumplanung zeigen: Sind bestimmte, bisher gefährdete Zonen durch bauliche Massnahmen "geschützt", dann erhöht dies den Druck auf die Raumplanung, die exponierten Zonen zur Nutzung freizugeben. Ein solches Verhalten kann langfristig wiederum grössere Hochwasserschäden auslösen (Schweizer Rück 1994).

Flussaufweitungen (Mäander) sind in bestimmten Fällen eine wirksame und oft kostengünstigere Alternative zum "harten", baulichen Hochwasserschutz, weil sie Hochwassern Raum lassen und die Fliessgeschwindigkeiten vermindern (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft 1997). Der Raumbedarf von Fliessgewässern lässt sich z.T. über ökologische Ausgleichsflächen erfüllen.



Foto: PLANAT

Beispiel eines Schutzbauw  
am Durnagelbach, Gl

## 5.2. Raumplanung

Der Raumplanung kommt mit steigender Hochwassergefahr eine markant grössere Bedeutung zu. Eine wirksame Nutzungsplanung vermindert das Schadenspotential. Eine gezielte Verstärkung der raumplanerischen Kompetenzen des Bundes ist zweckmässig.

Aufgabe der Raumplanung ist die zweckmässige und haushälterische Nutzung des Bodens und die geordnete Besiedelung des Landes; ihr wichtigstes Mittel ist die territoriale Zuteilung von Nutzungsarten. Hochwasser beeinflussen die potentiellen Nutzungsmöglichkeiten; insbesondere gefährden sie bestehende Nutzungen. Falls sich die klimabedingte Hochwassergefahr in der Schweiz wirklich erhöht, gewinnen raumplanerische Massnahmen markant an Bedeutung (Bloetzer et al. 1998).

Die Raumplanungsinstanzen haben sich in den letzten Jahren intensiv mit Naturkatastrophen auseinandergesetzt (Bloetzer et al. 1998). Die Raumplanung ist bezüglich der Abwehr von Hochwasserschäden sowohl auf der Ebene "Datenerhebung" wie auf der Ebene "Massnahmen" involviert:

- *Datenerhebung*: Gefahrenkarten, Risikoanalysen sowie Grundlagenforschung über die Wirkungszusammenhänge können aufzeigen, wo, wie häufig, wie weitreichend und wie intensiv Hochwasser und Überschwemmungen zu erwarten sind. Solche Datenerhebungen bilden eine wesentliche Grundlage für die Nutzungsplanung.
- *Massnahmen*: Aus raumplanerischer Sicht können eine ganze Reihe von Massnahmen Überschwemmungsschäden vermindern: Wird der Raumbedarf von Fließgewässern genügend berücksichtigt und werden gefährdeten Zonen die intensive Nutzung entzogen, vermindert dies das Schadenpotential. Eine Kontrolle der Bodenversiegelung oder sogar Entsiegelungen vermindern die Abflussbildung und damit die Hochwassergefahr. Diese und weitere Massnahmen sind Teil einer wirksamen Nutzungsplanung.

Raumwirksame Entscheide fallen gegenwärtig weitgehend auf Gemeindeebene. Die Einflussmöglichkeiten des Bundes, und zum Teil auch der Kantone, auf die kommunale Nutzungsplanung sind gering. Da jede Gemeinde in erster Linie für ihre eigenen Bedürfnisse plant, vernachlässigt sie externe Effekte, d.h. Wirkungen auf andere Gemeinden oder Kantone; ein klassisches Beispiel ist die Ausscheidung von Überschwemmungsgebieten, deren Folgen an die Unterlieger weitergegeben werden. Die Tendenz, dem Druck zur Erschliessung neuer Zonen nachzugeben, ist zudem auf Gemeindeebene am grössten.

Bund und Kantone haben zwar gewisse Möglichkeiten, raumwirksame Entscheide indirekt zu beeinflussen. Der Bund gewährt verschiedene Investitionsbeiträge nur dann, wenn eine sachgerechte räumliche Planung vorliegt; Beispiele sind das Wald- und das 1993 revidierte Wasserbaugesetz. Mit der vom Raumplanungsgesetz verlangten Trennung von Siedlungs- und Nichtsiedlungsgebiet haben Bund und Kantone zudem die Möglichkeit, Neunutzungen in gefährdeten Gebieten zu verhindern. Eine wichtige Frage wird zukünftig dennoch sein, inwieweit raumwirksame Entscheide verstärkt von den übergeordneten Ebenen koordiniert werden müssen, wenn die Hochwassergefahr ansteigt.

Die Versicherungen können zudem die Raumplanung über risikogerechte Prämien unterstützen. Eine stärkere Differenzierung von Versicherungsprämien nach Gefährdungsgrad kann Bauen in Gefahrenzonen unattraktiv machen.

### 5.3. Verminderung der Treibhausgas-Emissionen

Die Verminderung der globalen Treibhausgas-Emissionen kann die Gefahr von extremen Niederschlagsereignissen vermindern. Die Schweiz sollte ihre eigenen Bemühungen zur Verminderung fortsetzen und sich verstärkt für den Abschluss und die Durchsetzung internationaler Umwelt- und Klimaabkommen engagieren.

Die ursächliche Massnahme, eine mögliche Zunahme der Hochwasser und Überschwemmungen zu vermeiden, besteht in der Stabilisierung und Verminderung der Treibhausgas-Emissionen. Hierzu stehen eine Reihe von (aktuellen und potentiellen) Massnahmen zur Verfügung: Information, Vorschriften, Vereinbarungen, Abgaben etc. Eine Reihe von Studien zeigt, dass Umweltabgaben ein effizientes Mittel zur Reduktion des Treibhausgas-Ausstosses sind (z.B. Nordic Councils of Ministers 1994). Umstrittener sind die Zweit- und Drittwirkungen von

Abgaben vor allem auf Beschäftigung, Wachstum und Steuersystem. Unter gewissen modelltheoretischen Annahmen können Abgaben, im Rahmen ökologischer Steuerreformen, positive fiskalische, beschäftigungs- und wachstumspolitische Effekte auslösen. Kontrovers beurteilt wird ein schweizerischer Alleingang (zur aktuellen Diskussion um die CO<sub>2</sub>-Verminderung, Umweltabgaben und ökologische Steuerreformen vergleiche Staehelin-Witt und Blöchlinger 1997 oder Jeanrenaud et Stritt 1994).

Nationale Massnahmen zur Treibhausgas-Reduktion weisen den Charakter eines öffentlichen Gutes auf: Die Kosten fallen in der Schweiz an, während sich der Nutzen auf die ganze Welt verteilt. Die Verminderung der *schweizerischen* Treibhausgas-Emissionen hat keinen direkten Effekt auf das Klima, die Niederschläge und die Hochwasser *in* der Schweiz. Diese Klimaeffekte werden weitgehend von den internationalen Massnahmen zur Treibhausgas-Reduktion bestimmt. Treibhausgas-Emissionen zu vermindern – allein mit dem Ziel, die Hochwassergefahr in der Schweiz zu reduzieren – würde ein negatives Kosten-Nutzen-Verhältnis ergeben.

Global betrachtet stellt die Reduktion der Treibhausgas-Emissionen dagegen ein effizientes Mittel zur Klimastabilisierung dar. Die Schweiz hat sich mehrfach zu einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen verpflichtet, u.a. im Rahmen des Klimaprotokolls von Kyoto 1992. Ein wirksames Mittel für die Verhinderung klimabedingter Schäden liegt für die Schweiz deshalb darin, sich auf der *internationalen* Ebene für Treibhausgas-Reduktionen einzusetzen. Ein weltweit bindender Umwelt- oder Klimavertrag stiftet der Schweiz den grössten umweltpolitischen Nutzen.

---

## 6 Synthese und Handlungsbedarf

---

### 6.1 Veränderungen des Wasserkreislaufs

Die Erkenntnisse der naturwissenschaftlichen Forschung legen einen menschlichen Einfluss auf das Klimasystem der Erde nahe. Insbesondere die Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre löst Veränderungen im Klima aus, die die Niederschlagsmenge und -intensität beeinflussen und das Risiko extremer Hochwasser und Überschwemmungen erhöhen. Die Unsicherheit über die genaue Wirkungsabfolge und die effektiv zu erwartenden Veränderungen sind jedoch immer noch sehr gross.

Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst.

#### Niederschlag

Beobachtungen der letzten 100 Jahre zeigen, dass nebst einer Erwärmung auch eine bedeutende Veränderung des Wasserkreislaufes stattgefunden hat: In den Alpen wurde eine Zunahme der Niederschläge im Winter und eine Zunahme starker Niederschläge in Herbst und Winter festgestellt. Diese Beobachtungen sind konsistent mit den Resultaten von Klimamodellen, welche eine Intensivierung des Wasserkreislaufes als Folge der anthropogenen Klimaerwärmung nahelegen. Im Gegensatz zum Winter sind für den Sommer die beobachteten Veränderungen des Niederschlagsklimas gering und dessen zukünftiges Verhalten noch unsicher.

#### Abflussregime und Hochwasser

Bei einer Erwärmung des Klimas wird das Abflussregime der Flüsse insbesondere aufgrund des veränderten Retentionsvermögens von Schnee- und Landoberflächen beeinflusst. Der Jahresgang des durchschnittlichen Abflusses wird ausgeglichener sein, das frühsummerliche Maximum wird verringert, das winterliche Niedrigwasser erhöht. Dieser Effekt wird die Mittellandflüsse stärker betreffen als die Flüsse der Alpen.

Im Mittelland und in der Südschweiz deuten die Veränderungen im atmosphärischen Wasserhaushalt darauf hin, dass im Winterhalbjahr (Südschweiz: Herbst) die Hochwasserhäufigkeit etwas zunehmen dürfte.

Für die Alpenflüsse, deren Hochwasser in erster Linie von Gewittern verursacht werden, können aufgrund der Unsicherheit in bezug auf das sommerliche Niederschlagsklima noch keine Aussagen zur Häufigkeit und zum Ausmass künftiger Hochwasserereignisse gemacht werden.

## 6.2. Wirtschaftliche Auswirkungen extremer Niederschlagsereignisse

Die wirtschaftlichen Folgen von Extremereignissen werden im Bericht anhand von drei Szenarien dargestellt:

- *Hochwasserereignisse mit lokal oder regional schwerwiegenden Auswirkungen*, wie sie in den letzten Jahren in Uri, Brig oder Sachseln auftraten. Solche Ereignisse könnten künftig etwas häufiger werden, mit zusätzlichen Schäden von einigen hundert Mio. Franken jährlich. Dieses Schadenpotential kann mit den bestehenden Versicherungen, Rückversicherungs- und Solidarabkommen weitgehend aufgefangen werden.
- *Extreme Hochwasserereignisse mit grossräumigen Überschwemmungen weiter Teile der Schweiz*. In den letzten tausend Jahren ist ein solches Ereignis einmal (1342) aufgetreten. Es würde heute zu gesamtwirtschaftlichen Schäden in Milliardenhöhe führen. Die Fonds der Versicherungen wären überfordert, die Schadenskosten hätten weitgehend die Geschädigten und, über Multiplikatoren, die gesamte Wirtschaft zu tragen. Aufgrund der Seltenheit solcher Ereignisse ist der Bezug zu Klimaveränderungen jedoch nicht möglich.
- *Extreme Trockenperioden* während eines ganzen Jahres in Mitteleuropa. Eine solche Trockenperiode würde in der Schweiz nicht zu gravierenden volkswirtschaftlichen Auswirkungen führen, solange genügend Wasserreserven (Gletscher) zur Verfügung stehen.

## 6.3 Leitlinien für die Bewältigung künftiger Hochwasser

Für die Bewältigung möglicher vermehrter Hochwasserlagen sind verschiedene Institutionen gefordert:

### Forschung

Nach wie vor bestehen Wissenslücken sowohl im naturwissenschaftlichen Prozessverständnis als auch bezüglich den möglichen ökonomischen Konsequenzen der Auswirkungen von extremen Niederschlagsereignissen. Um die Wissensbildung weiter zu fördern, muss die Forschung zu diesem Thema auch künftig substantiell gefördert werden.

Im *naturwissenschaftlichen* Bereich sind verschiedene elementare Zusammenhänge und Prozesse innerhalb der Atmosphäre und über die Entstehung von Naturgefahren noch immer ungenügend bekannt. Das Prozessverständnis muss in internationaler Zusammenarbeit weiter vertieft werden. Insbesondere von Bedeutung ist

- die weitere Verbesserung der Klimamodelle mit Schwergewicht auf dem Prozessverständnis;
- die Intensivierung des Monitorings zur Früherkennung von Klimatrends oder Veränderungen der Naturgefahren, Erhaltung und Verdichtung des Beobachtungsnetzes in klimasensiblen Gebieten;

- vermehrte Auswertung von gemessenen und modellierten Daten und Proxy-Daten, um die Kenntnis der Variabilität des Klimas zu erweitern;
- die Verbesserung der Wetterprognose- und Naturgefahrenmodelle, um die Schadensprävention zu verbessern.

Im *volkswirtschaftlichen* Bereich sind die Zusammenhänge zwischen den naturwissenschaftlichen und den gesellschaftlichen Systemen noch wenig untersucht. Dabei stehen insbesondere Fragen des Erkennens, der Bewertung und der Bewältigung von Risiken im Vordergrund:

- das Bereitstellen der Grundlagen für die Schätzungen von Schadenskosten; das Erfassen der Risikoaversion in der Bevölkerung und der Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung von Hochwasserschäden;
- Kosten-Nutzen-Vergleiche der verschiedenen Massnahmen zur Vermeidung von Hochwasserschäden.

### Versicherungen

Für die Versicherungen drängt sich eine verstärkte Auseinandersetzung mit dem Risiko vermehrter Klima- und Hochwasserschäden auf. Dies beinhaltet z.B. das Überprüfen der Deckungsbeträge oder die Entwicklung risikogerechter Prämien.

### Politik

Für die verschiedenen staatlichen Ebenen stehen die folgenden Strategien und Massnahmen zur Verminderung hochwasserbedingter Schäden im Vordergrund:

- Ausreichender Unterhalt und Optimierung der bestehenden baulichen Schutzmassnahmen und vermehrte Wirksamkeitsanalysen von Neuinvestitionen.
- Raumplanerische Massnahmen, vor allem die Anpassung der Nutzungsplanung an Hochwassergefahren und die Ausscheidung von Flächen zur Sicherstellung des Raumbedarfs von Fliessgewässern.
- Einhaltung der internationalen Verpflichtungen zur Treibhausgas-Verminde rung sowie vermehrte politische und wirtschaftliche Initiativen auf internationaler Ebene, um bindende Umwelt- und Klimaabkommen zu erzielen.

Diese Strategien betreffen alle drei Staatsebenen:

- Die *Gemeinden* mit der angemessenen Berücksichtigung des Hochwasserschutzes in der Nutzungsplanung;
- die *Kantone* mit der Richtplanung sowie einem effizienten Einsatz der Mittel für den Hochwasserschutz;
- den *Bund* mit
  - einer verstärkten raumplanerischen Koordination;
  - einem effizienten Einsatz der Beiträge an den baulichen Hochwasserschutz;
  - einem flexiblen Katastrophenhilfe-Konzept;
  - diplomatischen Initiativen für internationale Umwelt- und Klimaabkommen.

---

## Literatur

---

- Bachmann H. et al., 1998. Handlungsbedarf von Behörden, Hochschulen, Industrie und Privaten zur Erdbebensicherung der Bauwerke in der Schweiz.
- Bader S., Kunz P., 1998. Klimarisiken – Herausforderung für die Schweiz. Hrsg. von der Programmleitung NFP31. Wissenschaftlicher Schlussbericht NFP31. VdF Hochschulverlag AG, Zürich.
- Beniston M., M. Rebetez, F. Giorgi and M. Marinucci, 1994. An analysis of regional climate change in Switzerland. *Theor. Appl. Climatol.* 49, 139-159.
- Bloetzer W., T. Egli, A. Petrascheck, J. Sauter und M. Stoffel, 1998. Klimaänderungen und Naturgefahren in der Raumplanung, Synthesebericht NFP31, Vdf Hochschulverlag AG, Zürich.
- Borch K., 1988. *Economics of Insurance*. North Holland, Amsterdam.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 1997. *Landschaftskonzept Schweiz*. Bern.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft, 1995. *Anforderungen an den Hochwasserschutz*. Bundesamt für Wasserwirtschaft. Bern.
- Bundesamt für Zivilschutz, 1995. *Katanos-Bericht. Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine vergleichende Übersicht*. Bern.
- Buzzi A., and N. Tartaglione, 1995. Preliminary meteorological analysis of the Piedmont flood of November 1994. *MAP newsletter*, 2, 2-6.
- Courvoisier H. W., 1998. Statistik der 24-stündigen Starkniederschläge in der Schweiz 1901-1996. *Arbeitsbericht der SMA, Nr.194*, 20pp.
- Frei C., C. Schär, D. Lüthi and H. C. Davies, 1998. Heavy precipitation processes in a warmer climate. *Geoph. Res. Letters*, 25, 1431-1434.
- Frei, C. and C. Schär, 1998. Aprecipitation climatology of the alps from high-resolution rain-gauge observations. *Int. J. Climatol.*, 18, 873-900.
- Grabs W., K. Daamen, D. Gellens, J. C. J. Kwadijk, H. Lang, H. Middelkoop, B. W. A. H. Parmet, B. Schädler, J. Schulla and K. Wilke, 1997. *Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Ressources Management in the Rhine Basin*, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR), CHR-Report No. I-16.
- Grebner D., 1980. Starkregensituation vom 7./8. August 1978 im Schweizer Alpenraum; Entwicklung, Bewertung und Vorhersagbarkeit. *Interpraevent 1980, Bad Ischl, Band1 (215-224)*.
- Grebner, D. und T. Roesch, 1998. Flächen-Mengen-Dauerbeziehungen von Starkniederschlägen und mögliche Niederschlagsgrenzwerte für die Schweiz, *Schlussbericht NFP 31*, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Grütter M., W. Kuhn und Ch. Golaz, 1948. Übersicht über den Witterungsverlauf in der Schweiz im Jahre 1947 – Die Dürre des Sommers 1947 – Description synoptique de l'évolution du temps au cours des mois particulièrement secs de l'année 1947. Separatabdruck aus den *Annalen der Meteorologischen Zentralanstalt (Jahrgang 1947)*, City-Druck AG, Zürich.
- Gurtz J., A. Baltensweiler, H. Lang, L. Menzel und J. Schulla, 1997. Auswirkungen von klimatischen Variationen auf Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins, *Schlussbericht NFP 31*, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Gyalistras D., H. v.Storch, A. Fischlin and M. Beniston, 1994. Linking GCM-Simulated Climatic Changes to Ecosystem Models: Case Studies of Statistical Downscaling in the Alps. *Clim. Res.* 4: 167-189
- Hausmann P., 1996. 1 Milliarde sFr. Schadenspotential für die Versicherer aus einem Ueberschwemmungsereignis in der Schweiz?. Vortrag anlässlich eines Seminars der Schweizer Rück.
- IPCC, 1996. *Climate Change 1995, The Science of Climate Change*.
- Jeanrenaud, Claude et M. Stritt, 1994. *Instruments économiques et politiques de l'environnement*. Université de Neuchâtel (dossier 36).
- Kienholz, H., H. M. Keller, W. Ammann, R. Weingartner, P. F. Germann, C. Hegg, P. Mani und D. Rickenmann, 1998. Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. *Schlussbericht NFP 31*, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Lüthi D., A. Cress, H. C. Davies, C. Frei and C. Schär, 1996. Interannual Variability and Regional Climate Simulations, *Theor. Appl. Climatol.*, 53, 185-209.
- Massacand, A.C., H. Wernli and H. C. Davies, 1998. Heavy Precipitation on the Alpine southside: An upper-level precursor. *Geophys. Res. Lett.*, 25,1435-1438
- Meier R., 1998. *Sozioökonomische Aspekte von Klimaänderungen und Naturkatastrophen*, vdf, Zürich.

- Meier R., Messerli P., Stephan G., 1998. *Ökologische Steuerreform für die Schweiz*. Rüegger-Verlag Chur/Zürich.
- Naef F., S. Scherrer, A. Fach, 1998. Die Auswirkungen des Rückhaltevermögens natürlicher Einzugsgebiete bei extremen Niederschlagsereignissen auf die Grösse extremer Hochwasser. Schlussbericht NFP31, Vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Nordic Councils of Ministers, 1994. *The Use of Economic Instruments in Nordic Environmental Policy*, Copenhagen.
- Overney O., D. Consuegra, A. Musy, P. Lazaro, J. Boillat et R. Sinniger, 1997. Influence des changements climatiques sur le régime hydrologique et hydraulique des cours d'eau. Rapport Final PNR 31. Vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Ohmura A., M. Beniston, M. Rotach, P. Tschuck, M. Wild, M. R. Marinucci, 1996. Simulation of Climate Trends over the Alpine Region, Schlussbericht NFP31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Pfister, C., 1998. *500 Jahre Klimanachhersage*, Paul Haupt Verlag Bern.
- ProClim- (Hrsg.), 1996. *Zweiter umfassender IPCC-Bericht – Zusammenfassung für Entscheidungsträger und Synthesebericht*, ProClim-, Forum für Klima und Global Change, Bern.
- Prognos/Infras/Econcept, 1997. *Die vergessenen Milliarden*, Verlag Haupt, Bern.
- Röthlisberger G., 1998. *Unwetterschäden in der Schweiz*. Bericht der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- Schädler B., 1987. Long Water Balance Time Series in the Upper Basins of Four Important Rivers in Europe – Indicators for Climate Change? IAHS-Publication No. 168, 209-219.
- Schär C., D. Lüthi, U. Beyerle und E. Heise, 1998a. The Soil-Precipitation Feedback: A Process Study with a Regional Climate Model. *J. Climate*, 11, in press.
- Schär C., T. D. Davies, C. Frei, H. Wanner, M. Widmann, M. Wild und H. C. Davies, 1998b. Current Alpine Climate. In: *A View from the Alps: Regional Perspectives on Climate Change* (Eds: P. Cebon, U. Dahinden, H. C. Davies und C. Jaeger). MITPress, Boston.
- Schiesser, H.H., A. Waldvogel, W. Schmid, S. Willemse, 1997: *Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten*, Schlussbericht NFP31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Schorer, M., 1992. *Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft*, Geographica Bernensia G40, Geogr. Inst. d. Univ. Bern.
- Schulla, J., 1997. *Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen*. Zürcher Geographische Schriften, 69. ETH Zürich, Geographisches Institut.
- Schweizerische Meteorologische Anstalt SMA, 1996. *Klima-90 Schlussbericht*. Arbeitsbericht der SMA, Zürich.
- Schweizerischer Bundesrat, 1997. *Botschaft zum Bundesgesetz über die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen*. Bern.
- Schweizer Rück, 1994. *Risiko Klima*, Zürich.
- Siegenthaler C. und M. Sturm, 1991. Die Häufigkeit von Ablagerungen extremer Reusshochwasser. Die Sedimentationsgeschichte im Urnersee seit dem Mittelalter, *Mitt. Bundesamt für Wasserwirtschaft* 4, 127-139.
- Stahelin-Witt, Elke und Blöchliger Hansjörg, 1997. *Ökologisch orientierte Steuerreformen*. Verlag Haupt, Bern.
- Wanner, H., R. Rickli, E. Salvisberg, C. Schmutz, M. Schüepp, 1997. *Global Climate Change and Variability and its Influence on Alpine Climate – Concepts and Observations*, *Theor. Appl. Climatol.* 58, 221-243.
- Weingartner R., H. Aebischer, A. Elsasser, A. Gees, C. Kann, S. Manser, 1998. Analyse der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Hochwasser in der Schweiz, Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Widmann, M. und C. Schär, 1997. A Principal Component and Long-Term Trend Analysis of Daily Precipitation in Switzerland, *Int. Journal of Climatology*, 17, 1333-1356.
- Yates F., 1992. *Risk: Analysis, Perception and Management*. MacMillan, London.
- Zimmermann M., P. Mani, P. Gamma, P. Gsteiger, O. Heiniger, G. Hunziker, 1997. *Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz*. Schlussbericht NFP 31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- Zweifel P. und S. Nocera, 1996. *Risikoaversion gegen und Zahlungsbereitschaft für die Vermeidung von nuklearen Umweltrisiken*. Bundesamt für Energiewirtschaft.