

OcCC

Organe consultatif sur les changements climatiques
Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung

Extremereignisse und Klimaänderung

Herausgeber und Vertrieb:

OcCC

Bärenplatz 2

3011 Bern

Tel.: (+41 31) 328 23 23

Fax: (+41 31) 328 23 20

E-Mail: occc@sanw.unibe.ch

Bern, September 2003

ISBN-Nummer: 3-907630-23-8

Inhalt

Editorial	5
Extremereignisse und Klimaänderung: Wissensstand und Empfehlungen des OcCC	7
Einleitung	11
Teil 1 Wissenschaftliche Grundlagen	13
1.1. Extremereignisse, Naturgefahren und Naturkatastrophen: Eine Begriffsklärung	14
1.2. Beobachtete Klimaänderung und Entwicklung des Klimas in der Zukunft	16
1.3. Extremereignisse in der Schweiz	19
1.3.1. Typisierung von klimatologischen Extremereignissen	19
1.3.2. Ein Blick auf die letzten 500 Jahre	21
1.4. Der Nachweis von Trends stösst an Grenzen	25
1.5. Methodik regionaler Klimaszenarien	28
1.6. Extremereignisse aus der Perspektive des Menschen	34
1.6.1. Beeinflussung der Risiken und des Schadenverlaufs	34
1.6.2. Entwicklung der Schäden durch Hochwasser, Rutschungen und Lawinen	38
1.6.3. Schadenentwicklung der Elementarschaden-Versicherung	41
1.6.4. Extremereignisse aus der Sicht der Versicherungsindustrie	44
Teil 2 Wissensstand	47
2.1. Temperaturextreme	48
2.2. Frostrisiko	51
2.3. Trockenheit	54
2.4. Waldbrände	57
2.5. Starkniederschläge	61
2.6. Hagel	65
2.7. Hochwasser	69
2.8. Massenbewegungen: Rutschungen, Fels- und Bergstürze	73
2.9. Lawinen	77
2.10. Winterstürme	81
Anhang	85
A1. Impressum	86
A2. Bildnachweis	87
A3. OcCC-Mitglieder	88

Hochwasser, extreme Stürme und gefährliche Lawinenniedergänge schrecken uns in den letzten Jahren immer wieder auf. Spielt das Wetter verrückt?

Im Jahr 2000 diskutierte das Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC) über einen Zusammenhang zwischen der Häufung solcher Ereignisse und der Klimaveränderung und darüber, welcher Handlungsbedarf bestehe. Auf Anregung des damaligen Präsidenten Gian-Reto Plattner wurde beschlossen, einen Bericht über das Thema, welches breite Bevölkerungskreise, Medienschaffende und Entscheidungsträger interessiert, zu erstellen. Heute liegt mit dieser Publikation eine fundierte Zusammenstellung der wichtigsten wissenschaftlichen Erkenntnisse und meteorologischen Ereignisse vor. Welche Schlüsse sind aus den vorliegenden Erkenntnissen zu ziehen und welche Massnahmen zu ergreifen?

In der Spieltheorie wird vom Minimax-Theorem gesprochen: Das Ziel bei Glücksspielen ist die Ermittlung eines optimalen Einsatzes von Strategien, um den Maximalgewinn von Gegnern zu minimieren. In unserem Fall handelt es sich nicht um ein Spiel, sondern um einen Kampf gegen die vermeintlichen Launen der Natur. Es geht also um grosse Einsätze und um ein weltumspannendes Spielfeld. Die Minimax-Regel verlangt, diejenige Strategie zu wählen, bei welcher der maximal mögliche Schaden am kleinsten ist. Politische Entscheidungen sollten sich somit auf diese Regel abstützen. Anders als in der Spieltheorie geht es hier aber um langfristige Schäden, die zu minimieren sind.

Wissenschaftler können noch Jahrzehnte über die genauen Ursachen der Klimaänderung diskutieren und forschen. Doch die Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger sind jetzt und heute aufgefordert, vorsorgliche Massnahmen zu ergreifen. Das OcCC gibt auf den Seiten 7 bis 10 des Berichtes klare und deutliche Empfehlungen ab. Die Erstellung von Lawinerverbauungen, Steinschlaggalerien, Rückhaltebecken und Dämmen genügt nicht. Selbstverständlich sind diese direkten Massnahmen zur Schadenminimierung nötig. Primär müssen aber diejenigen Massnahmen ergriffen werden, die nebst ihrer Wirkung gegen die Klimaänderung und zum Schutz vor Extremereignissen auch in anderen Bereichen positive Auswirkungen haben. Nur damit kann das Raumschiff Erde auch in ferner Zukunft bewohnbar bleiben. Überdies entstehen schon kurzfristig so genannte Win-win-Situationen. Beispielsweise beim sparsamen Einsatz fossiler Brenn- und Treibstoffe und bei der Förderung der erneuerbaren Energien.

Als wichtiger politischer Schritt ist die am 9. Juli 2003 erfolgte Unterschrift der Schweiz unter das Kyoto-Protokoll zu nennen. Nun sind Taten gefragt. Die politischen Parteien und die Wirtschaftsvertreter sind an ihre Versprechen zu erinnern. Die Lage ist ernst. Den schönen Worten müssen Taten folgen. Über die drohenden Risiken berichtet die vorliegende Publikation.



Nationalrätin Dr. Kathy Riklin
Präsidentin des OcCC

Extremereignisse und Klimaänderung: Wissensstand und Empfehlungen des OcCC

Die Mitglieder des OcCC

Unter Extremereignissen versteht man seltene Wetter- und Naturereignisse, die stark vom Durchschnitt abweichen. Extremereignisse können gewaltige Schäden verursachen. Von Naturkatastrophen spricht man, wenn die Bewältigung des Schadens die Kräfte der betroffenen Bevölkerung übersteigt. Im vorliegenden Bericht werden die für die Schweiz wichtigsten Kategorien von Extremereignissen und ihre Beziehung zur Klimaänderung behandelt, nämlich Temperatur-extreme, Trockenheit, Frost, Waldbrand, Starkniederschläge, Hagel, Hochwasser, Massenbewegungen, Lawinen und Winterstürme.

Einerseits sind Extremereignisse und Naturkatastrophen natürliche Bestandteile des alpinen Klimas. Über Jahrtausende haben Hangrutschungen und Überschwemmungen unsere Landschaft geformt und die charakteristische Struktur unserer Gebirgstäler und Flussläufe gestaltet. Selbst unsere heutige, moderne Infrastruktur kann uns nur ungenügend vor Extremereignissen schützen. Unsere Zivilisation muss sich oft darauf beschränken, gefährdete Siedlungszonen auszugrenzen, die negativen Auswirkungen durch rechtzeitig eingeleitete Massnahmen zu mildern und den Opfern durch schnelle Hilfe beizustehen.

Andererseits sind die Schäden, die durch Unwetterereignisse der letzten Jahrzehnte in Mitteleuropa verursacht wurden, gewaltig. Nach Schätzungen der Swiss Re beträgt zum Beispiel der durch die Stürme Lothar und Martin verursachte volkswirtschaftliche Schaden 31 Mrd. SFr., die im Oktober 2000 durch Überschwemmungen und Erdbeben verursachten Schäden in der Schweiz, Frankreich und Italien belaufen sich auf 9 Mrd. SFr. und die durch die Überschwemmungen im Juli und August 2002 verursachten Schäden in Europa auf 23 Mrd. SFr. (Preisniveau 2002). Diese Zahlen belegen die grosse Bedeutung der Extremereignisse in Europa und im Alpenraum. Sollten sich als Folge der Klimaänderung Verschiebungen im Charakter und in der Häufigkeit von Extremereignissen ergeben, so könnten daraus entsprechend schwerwiegende Konsequenzen erwachsen.

Wissensstand

Der Zusammenhang zwischen Klima, Extremereignissen und Schadenausmass ist ausserordentlich komplex und seine Erforschung involviert ein breites interdisziplinäres Forschungsfeld. Aus dem gegenwärtigen Wissensstand lassen sich folgende allgemeine Folgerungen ziehen:

- Die globale Durchschnittstemperatur ist im letzten Jahrhundert um $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ angestiegen. Diese Erwärmung wird weitgehend auf menschliche Aktivitäten zurückgeführt. Für das 21. Jahrhundert sagen die Klimamodelle einen beschleunigten Anstieg der mittleren globalen bodennahen Temperatur um 1.4°C bis 5.8°C voraus. Von diesen Veränderungen ist auch der ganze Wasserkreislauf betroffen, und man erwartet markante Veränderungen des Niederschlagsregimes.
- Die Wahrscheinlichkeit und die räumliche Verteilung von Extremereignissen werden sich mit der Klimaänderung graduell verschieben. Das Ausmass und der Charakter der Veränderungen wird je nach Ort und Art der Extremereignisse verschieden sein. Eine quantitative Abschätzung dieser Entwicklung ist noch nicht möglich.
- Gegenwärtig ist eine Häufung von Naturkatastrophen zu beobachten. Diese Häufung könnte zufällig sein, durch natürliche langzeitliche Klimavariationen verursacht werden oder eine Folge der anthropogenen Klimaänderung sein. Aus prinzipiellen Gründen ist es schwierig oder sogar unmöglich, einen Trend in der Häufigkeit von seltenen Extremereignissen statistisch gesichert nachzuweisen oder auszuschliessen. Es ist denkbar, dass langfristige Veränderungen von Extremereignissen erst dann nachweisbar werden, wenn sie bereits ein beträchtliches Ausmass erreicht und grosse Schäden verursacht haben.
- Im Gegensatz dazu sind statistische Aussagen über Trends „intensiver“ Ereignisse möglich. Zum Beispiel kann gezeigt werden, dass kräftige Niederschlagsereignisse (welche in der Regel keine Schäden verur-

sachen) seit Beginn des Jahrhunderts deutlich zugenommen haben. Auch die winterlichen Niederschlagsmengen haben seit Beginn des Jahrhunderts fast in der ganzen Schweiz deutlich zugenommen. Diese Resultate können zwar nicht direkt auf Extremereignisse übertragen werden, sind jedoch ein Indiz für die deutlichen Veränderungen des Wasserkreislaufes in den letzten 100 Jahren.

- Das heutige Prozessverständnis führt zur Annahme, dass Häufigkeit und Stärke gewisser Extremereignisse (Hitzewellen, Starkniederschläge und Hochwasser im Winterhalbjahr, Trockenheit im Sommer auf der Alpensüdseite und in inneralpinen Tälern, Hangrutschungen) mit der Klimaänderung zunehmen werden. Diese Befürchtung wird auch durch Rechnungen mit Klimamodellen gestützt. Andererseits wird die Häufigkeit von Frosttagen und Kältewellen abnehmen.
- Zukünftige Veränderungen der Gefährdung durch Extremereignisse werden neben rein klimatischen Faktoren auch durch gesellschaftliche Veränderungen bestimmt. Die zunehmende Konzentration von Gebäuden und Infrastrukturanlagen auch in exponierten Gebieten hat sich in der Vergangenheit nachweislich auf die Schadenkosten ausgewirkt. Zukünftige Veränderungen der Raumnutzung könnten die rein klimatischen Faktoren abschwächen oder verstärken.

Empfehlungen des OcCC

Das OcCC sieht Handlungsbedarf bei Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Forschung in den Bereichen Massnahmen zum Schutz vor Extremereignissen, Massnahmen gegen die anthropogene Klimaänderung und Kommunikation.

Die Planung und Umsetzung von Massnahmen soll auf der Grundlage eines sich dynamisch verändernden Gefährdungsbilds und im Sinne der Nachhaltigkeit (ökologisch, ökonomisch, sozial) erfolgen. Es sollen die Massnahmen bevorzugt werden, die nebst ihrer Wirkung gegen die Klimaänderung und zum Schutz vor Extremereignissen auch in anderen Bereichen positive Auswirkungen haben (win-win) und die auch nach ihrer Realisierung einen möglichst grossen Handlungsspielraum offen lassen (Flexibilität).

(a) Massnahmen zum Schutz vor Extremereignissen

Handlungsbedarf zum Schutz vor Extremereignissen ist aufgrund der zunehmenden Wertekonzentration und Schadenempfindlichkeit und des ansteigenden Schutzbedürfnisses auch ohne Klimaänderung gegeben. Im Bewusstsein der Klimaänderung sollten die Gefährdungsbilder, Schutzziele und die in Kauf genommenen Restrisiken periodisch den sich ändernden Bedingungen angepasst und Lösungen mit möglichst grosser Flexibilität angestrebt werden. Mittelfristig müssen neue Bemessungs- und Planungsmethoden entwickelt werden, welche in der Lage sind, die Gefährdung in einem sich ändernden Klima zu quantifizieren.

Verstärkter Handlungsbedarf besteht beim Schutz vor Ereignissen, zu welchen schon heute qualitative Aussagen über zukünftige Entwicklungen möglich sind:

- Starkniederschläge, Hochwasser und Hangrutschungen: Aufgrund des Prozessverständnisses und der Modellrechnungen wird eine Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen und eine beschleunigte Abflussbildung im Winterhalbjahr erwartet. Diese sollte bei der Risikoabschätzung, der Planung von Schutzmassnahmen (Aufforstungen, Schutzbauten, Rückhalteflächen) und bei der Raumplanung berücksichtigt werden. Dabei müssen die möglichen Veränderungen während des Zeithorizonts der geplanten Massnahme berücksichtigt werden. Das Gleiche gilt auch für die Beurteilung von Zonen, die durch Hangrutschungen gefährdet sind.
- Hitzeperioden: Als Folge der Klimaänderung dürften höhere Temperaturextreme auftreten. Es ist zu erwarten, dass das gehäufte Auftreten von extrem hohen Temperaturen mit zusätzlichen Todesfällen verbunden sein wird. Bauliche Massnahmen (z.B. Sonnenschutz, Isolation, Bepflanzung) können den Komfort und die Energieeffizienz erhöhen. Für die Gewässer, die Vegetation und die Fauna bedeuten höhere Temperaturextreme einen zusätzlichen Stress.
- Permafrost: Die Erwärmung wird einen Rückgang des Permafrosts bewirken. In den betroffenen Gebieten wird die Hangstabilität abnehmen. Hänge und Bauten müssen dort überwacht werden.

- Frost: Die Häufigkeit von Frosttagen wird mit der Klimaänderung wahrscheinlich abnehmen. Weil die Auswirkungen sowohl von der Temperatur als auch von der Vegetationsentwicklung abhängen, ist unklar, wie diese sich zukünftig entwickeln werden. Allgemein dürfte das Risiko von Frostschäden bei der Beibehaltung des Zeitpunktes der Aussaat/Anpflanzung abnehmen.

Über die zukünftige Entwicklung von Trockenheit, Waldbränden, Föhn, Winterstürmen, Hagel und Lawinen sind im Moment keine spezifischen Aussagen möglich. Es ist wichtig, dass in diesen Gebieten der Fortschritt der Forschung sorgfältig beobachtet wird.

(b) Massnahmen gegen die anthropogene Klimaänderung

Bezüglich Zusammenhang, Verlauf, Richtung und Ausmass von Klimaänderung und Extremereignissen bestehen beträchtliche Unsicherheiten. Entscheidungen bei Unsicherheiten sollten sich auf die so genannte Minimax-Regel stützen. Sie besagt, dass die Strategie zu wählen ist, bei welcher der maximal mögliche Schaden am kleinsten ist.

Massnahmen gegen die Ursachen der anthropogenen Klimaänderung sollen konsequent fortgesetzt und auf nationaler und internationaler Ebene zwischen Forschung, Verwaltung, Wirtschaft und Politik koordiniert werden. Aus wissenschaftlicher Sicht ist längerfristig eine Reduktion der globalen Treibhausgasemissionen auf den Stand von 1950 notwendig. Das Kyoto-Protokoll ist ein wichtiger Schritt zur Koordination internationaler Massnahmen. Die Reduktionsverpflichtung der Schweiz soll mit dem CO₂-Gesetz, dem Energiegesetz und zusätzlichen Massnahmen¹ erreicht werden. Diese Massnahmen sehen bis 2010 eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 10% gegenüber 1990 vor. Angesichts der erwarteten Auswirkungen der Klimaänderung soll sich die Schweiz in den Verhandlungen über das Vorgehen nach der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls für wirksame Klimaschutzziele einsetzen. Von den Massnahmen gegen die Klimaänderung wird auch die Schweiz profitieren.

Zusätzlich zum CO₂- und Energiegesetz sind in der Schweiz weitere Massnahmen gegen die anthropogene Klimaänderung und zur Etablierung emissionsarmer Lebensstile und Wirtschaftsabläufe erforderlich. Beispielsweise müssen die

Prozesse und Beziehungen in der Privatwirtschaft transparenter gestaltet werden, damit die Nachhaltigkeit ganz allgemein und die Klimaverträglichkeit von Investitionen im Besonderen gefördert werden. Geeignete gesetzliche Rahmenbedingungen können hier unterstützend wirken. Partnerschaften zwischen Staat und Privatwirtschaft bzw. Industrie sollen aufgebaut und gefördert werden, um sicherzustellen, dass Klimaschutzmassnahmen und Anpassungsstrategien umgesetzt werden. „Saubere“ Technologien und insbesondere erneuerbare Energien werden in Zukunft eine tragende Rolle übernehmen müssen.

(c) Kommunikation

Massnahmen gegen die anthropogene Klimaänderung und zum Schutz vor Extremereignissen müssen langfristig und zu einem Zeitpunkt geplant werden, bei dem erst qualitative Prognosen des zukünftigen Klimas vorliegen. Die Bewusstseinsbildung in Bevölkerung, Politik und Wirtschaft ist deshalb sehr wichtig. Dabei spielen die Medien und Führungspersönlichkeiten eine entscheidende Rolle.

Bei der Berichterstattung über Klimaänderung und Extremereignisse muss beachtet werden, dass Extremereignisse keine verlässlichen Klimaindikatoren darstellen. Die Klimaänderung wird besser durch andere Indikatoren aufgezeigt (Erwärmung, abschmelzende Alpengletscher). Die Verknüpfung von Extremereignissen und Klimaänderung in der öffentlichen Meinung birgt die Gefahr, dass die Klimaproblematik in Zeiten mit vielen Extremereignissen dramatisiert und in Zeiten mit wenigen Ereignissen verharmlost wird.

Eine Zunahme der Häufigkeit gewisser Extremereignisse (z.B. Starkniederschläge, Überschwemmungen) ist konsistent mit den Zukunftserwartungen aus Klimamodellen und dem physikalischen Prozessverständnis. Einzelne Extremereignisse können aber nicht ursächlich der Klimaänderung zugeschrieben werden.

(d) Forschung

Bereits heute ist eine ausreichende Wissensgrundlage vorhanden, um Massnahmen gegen die Klimaänderung und zum Schutz vor Extremereignissen zu ergreifen. Die Forschung wird aber auch in Zukunft den Wissensstand erhöhen und die Unsicherheiten verkleinern.

Für den Umgang mit Extremereignissen braucht es integrale Analysen von natur-, sozial-, ingenieur- und wirtschaftswissenschaftlichen Zusammenhängen. Zuverlässige Messnetze sind von zentraler Bedeutung für Früherkennung und Analyse. Sie bilden das Rückgrat von Warnsystemen und die Datenbasis für die Detektion von langfristigen Veränderungen. Sorgfältige Prozessanalysen beobachteter Ereignisse können aufzeigen, welche Prozesse zum Ereignis führten, ob die Voraussetzungen für ähnliche Ereignisse gegeben sind und ob die Klimaänderung die Häufigkeit ähnlicher Ereignisse verändert. Mathematische Modelle und Computersimulationen gewinnen im Bereich der kurzfristigen Vorhersage und Warnung international an Bedeutung. Sie sind auch geeignete Instrumente, um die Gefährdung in einem zukünftigen Klima abzuschätzen und zu quantifizieren.

Laufende Forschungsprojekte im In- und Ausland (NCCR-Climates, EU-Forschungsprojekte etc.) haben zu einem besseren Verständnis der Klimaänderung und der Extremereignisse geführt. Der Zusammenhang zwischen Klima und Extremereignissen ist jedoch noch immer erst teilweise verstanden. Die zukünftige Forschung soll sich in ihrer Stossrichtung am neusten Bericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)^{2,3,4,5} orientieren und die lokalen Gegebenheiten und Strukturen des

Alpenraums berücksichtigen. Ziel ist insbesondere, die Auswirkungen auf Gesellschaft und Wirtschaft rechtzeitig zu erkennen und mögliche Gegenmassnahmen aufzuzeigen. Die neusten Erkenntnisse sollen laufend in die dynamischen Planungs- und Entscheidungsprozesse einfließen. Die Schweiz soll sich weiterhin aktiv an internationalen Forschungsprogrammen beteiligen und die Diskussion zwischen Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Verwaltung fördern.

-
- 1 Beispielsweise das Programm EnergieSchweiz, das erneuerbare Energien und Massnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz fördert.
 - 2 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
 - 3 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
 - 4 IPCC, Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 752 p., 2001.
 - 5 IPCC, Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 397 p., 2002.

Mit Klima bezeichnen wir gemeinhin das mittlere Wetter und beschreiben dieses mit Mittelwerten meteorologischer Grössen. Extremereignisse sind Episoden, während denen das Wetter von seinem langzeitlichen Mittel und den für einen bestimmten Ort und eine bestimmte Jahreszeit typischen Schwankungen stark abweicht. Sie gehören zum Klima einer Region und prägen Landschaft und Lebensbedingungen. Extremereignisse können aber zu verheerenden Schäden an Kulturen und gesellschaftlichen Einrichtungen führen. Erkenntnisse über ihre Häufigkeit und Intensität sind deshalb für unsere Gesellschaft sehr wichtig. Sie fliessen in die heutigen Planungsaufgaben ein und werden für die Erstellung von Schutzmassnahmen benötigt.

In jüngster Vergangenheit gab es in der Schweiz eine Vielzahl von Extremereignissen. In der folgenden Liste sind nur einige von ihnen erwähnt:

- Eine Hitzewelle bescherte der Schweiz 2003 den wärmsten Juni seit Beginn der Temperaturmessungen im Jahr 1864. Die langjährige Monatsdurchschnittstemperatur wurde um ungefähr 6°C übertroffen.
- Nach Starkniederschlägen Mitte November 2002 in den Kantonen Graubünden, Uri und Tessin richteten Schlammlawinen verheerende Schäden an. Die Gemeinden Schlans und Rueun in der Surselva waren besonders stark betroffen.
- Im Oktober 2000 fielen im Simplongebiet innert zwei Tagen nahezu 500 mm Regen. Am 14. Oktober 2000 brach die Stützmauer oberhalb von Gondo. Die Rutschung mit Hangmure zerstörte Teile des Dorfs und forderte 13 Menschenleben.
- Im Dezember 1999 zog der Wintersturm Lothar quer durch Westeuropa. In Frankreich, Deutschland und der Schweiz richtete der Orkan enorme Schäden an. In der Schweiz waren 13 Menschenleben zu beklagen. Die Waldschäden umfassten 12.7 Mio. m³ Holz.
- Im Juli 1999 wanderte ein grosses Sturmsystem mit Gewitterzellen von West nach Ost durch das Schweizer Mittelland und die Voralpen. Mehr als 500 Gemeinden meldeten Hagelschäden in der Landwirtschaft.
- Anfang 1999 fielen während drei kurz aufeinander folgenden Niederschlagsperioden in weiten Teilen des Wallis, in Nordbünden und im Unterengadin über 300 cm Schnee. In der Folge gingen in den Schweizer Alpen rund 1200 Schadenlawinen nieder.

Schadenreiche Extremereignisse sind für die betroffene Bevölkerung schmerzhaft. In den Medien erhalten sie viel Aufmerksamkeit. Im Wissen um den Anstieg der globalen Temperaturen wird immer wieder die Frage nach dem Zusammenhang zwischen den Extremereignissen und der Klimaänderung gestellt. Sind Extremereignisse als Folge der Klimaänderung häufiger geworden?

Die Klimaänderung und deren Auswirkungen sind im neusten Wissensstandsbericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC^{1,2,3,4}) ausführlich beschrieben. Im 20. Jahrhundert ist die globale Durchschnittstemperatur um ca. 0.6°C angestiegen und haben die Niederschläge über den Kontinenten in mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre deutlich zugenommen. Der grösste Teil der Erwärmung der letzten 50 Jahre ist wahrscheinlich den Aktivitäten des Menschen zuzuschreiben. Für das 21. Jahrhundert wird erwartet, dass sich die globale Erwärmung beschleunigt fortsetzen und sich die Niederschläge je nach Region deutlich verändern werden.

Die globale Klimaänderung wird sich auch auf die Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen auswirken. Es gibt Hinweise, dass die Häufigkeit von Extremereignissen besonders empfindlich auf eine Klimaänderung reagieren könnte. Dafür verantwortlich sind einerseits physikalische Rückkopplungsmechanismen. Andererseits gibt es auch statistische Effekte, durch welche sich die Klimaänderung in der Häufigkeit von Extremen sogar stärker manifestieren könnte als bei „normalen“ Wetterereignissen. (Abbildung 1 veranschaulicht diese statistische Sensitivität am Beispiel von Temperaturextremen.) Die Möglichkeit einer hohen Sensitivität zusammen mit der Empfindlichkeit der modernen Zivilisation verlangt eine wissenschaftliche Abschätzung möglicher zukünftiger Entwicklungen von Extremereignissen und eine Beurteilung ihrer Bedeutung für Mensch und Umwelt.

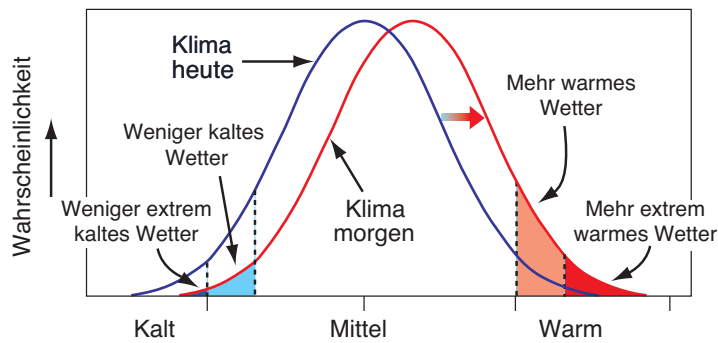


Abbildung 1: Möglicher Einfluss der Klimaänderung auf die Häufigkeit von Extremereignissen am Beispiel von Temperaturextremen.¹ Die blaue Kurve zeigt die statistische Verteilung der heute auftretenden Temperaturen. Mittlere – durchschnittliche – Temperaturen sind häufig, extrem kaltes (blaue Fläche unter der Kurve) oder extrem heisses (rote Fläche unter der Kurve) Wetter ist selten. Mit der Klimaänderung könnte sich diese Häufigkeitsverteilung zu höheren Temperaturen verschieben (rote Kurve). Die Auswirkungen dieser Verschiebung sind bei der Häufigkeit der Extremereignisse besonders stark: Extrem heisses Wetter wird viel häufiger und extrem kaltes Wetter wird viel seltener. Bei den mittleren Temperaturen sind die relativen Veränderungen weniger spürbar.

Der vorliegende Bericht fasst den heutigen Wissensstand über den Zusammenhang zwischen Extremereignissen in der Schweiz und der globalen Klimaänderung aus der Perspektive eines interdisziplinären Expertengremiums zusammen. Dabei wird die Wirkungskette von der globalen Klimaänderung über die Änderung von Wetterextremen im Alpenraum bis hin zu den Veränderungen von Schäden und den ökonomischen Auswirkungen beurteilt. Der Bericht sucht eine differenzierte Sicht, in welcher die naturwissenschaftliche Dimension, die möglichen Auswirkungen auf Lebensräume, aber auch nicht klimatische Einflüsse auf die Schaden-Risiken (z.B. Nutzungsänderungen, Wertexposition) berücksichtigt werden. Der Bericht richtet sich an politische Entscheidungsträger, Behörden, die Medien und die Öffentlichkeit.

Der Bericht besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil klärt die Bedeutung der im Bericht verwendeten Begriffe, führt – soweit für die Beurteilung der Aussagen nötig – in die wissenschaftlichen Me-

thoden ein und beschreibt einige wichtige wissenschaftliche Grundlagen. Der zweite Teil gibt eine Übersicht über den heutigen Wissensstand zu den für die Schweiz wichtigsten Kategorien von Extremereignissen (Temperaturextreme, Frost, Trockenheit, Waldbrand, Starkniederschläge, Hagel, Hochwasser, Massenbewegungen, Lawinen und Winterstürme). Soweit möglich und sinnvoll folgen die einzelnen Unterkapitel einem gemeinsamen Schema, in welchem die Sensitivitäten der entsprechenden Kategorie, Aussagen über Veränderungen in der Vergangenheit und die Perspektiven für die Zukunft beschrieben werden.

Am Bericht haben 24 Autorinnen und Autoren mitgearbeitet. Der Inhalt wurde von 7 Fachpersonen begutachtet. Die Mitglieder des OcCC haben den Text an den Sitzungen vom 27. Februar und 28. Mai 2003 diskutiert und verabschiedet.

- 1 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
- 2 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
- 3 IPCC, Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 752 p., 2001.
- 4 IPCC, Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 397 p., 2002.

Teil 1

Wissenschaftliche Grundlagen

1.1. Extremereignisse, Naturgefahren und Naturkatastrophen: Eine Begriffsklärung

Roland Hohmann, Christian Pfister und Christoph Frei

Extremereignisse sind seltene Ereignisse, die stark von einem statistischen Mittelwert abweichen. Sie sind nicht unbedingt mit Schäden verbunden. Eine Naturkatastrophe ist ein Schadenereignis, dessen Folgen von den Betroffenen nicht alleine bewältigt werden können. Sie wird nicht immer durch Extremereignisse verursacht. Naturgefahren sind natürliche Prozesse und Zustände, die Gesellschaft und Umwelt bedrohen.

Als extrem werden in diesem Bericht Ereignisse bezeichnet, die markant von einem Durchschnittswert oder Trend abweichen und deshalb ausserordentlich sind. Die Definition von Extremereignissen gründet also auf statistischen Kriterien. Oft haben Extremereignisse negative Konsequenzen für den Menschen und die Umwelt. Beispiele für Extremereignisse in der Schweiz sind die Winterstürme Vivian (1990) und Lothar (1999), die extremen Hochwasser in den Kantonen Uri (1987) und Wallis (Brig 1993; Gondo

2000) sowie die Kältewelle 1963, bei der die grossen Schweizer Seen letztmals zufroren.

Der Vergleich mit langen Messreihen erlaubt es, die Seltenheit eines Extremereignisses zu quantifizieren. Sie wird mit der Wiederkehrperiode oder Jährlichkeit ausgedrückt. Ein Ereignis, das statistisch betrachtet alle 10 Jahre zu erwarten ist, hat eine Wiederkehrperiode oder Jährlichkeit von 10 Jahren. Im vorliegenden Bericht wird keine generelle Grenze für die Wiederkehrperiode definiert, ab welcher ein Ereignis als extrem eingestuft wird. Dies nicht zuletzt deshalb, weil eine sinnvolle Unterscheidung unter anderem von der Art und Häufigkeit der Ereignisse sowie vom gewählten räumlichen Massstab abhängt.

- **Art und Häufigkeit der Ereignisse:** In der Schweiz sind spürbare Erdbeben seltener als Hochwasser. Ein Erdbeben, das durchschnittlich alle 300 Jahre vorkommt, ist kein Extremereignis. Es richtet auch keine grossen Schäden an. Ein 300-jährliches Hochwasser ist hingegen ein Extremereignis. Sofern es sich in ungenügend geschütztem Gebiet ereignet, kann es grosse Schäden anrichten.
- **Gewählter räumlicher Massstab:** Ein Ereignis, das lokal als extrem eingestuft werden muss, kann überregional in den statistischen Normalbereich fallen. Zum Beispiel war die Windspitze des Wintersturms Lothar für die Schweiz ein Extremereignis mit einer Wiederkehrperiode von 20–100 Jahren. Für Europa handelte es sich dabei lediglich um ein starkes Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von deutlich unter 10 Jahren.

Auch in der Wissenschaft werden kritische Grenzen für die Wiederkehrperiode je nach Fragestellung unterschiedlich festgelegt.



Die Gesellschaft orientiert sich bei der Beurteilung von Ereignissen nicht an statistischen Kriterien wie die Wissenschaft, sondern an den verursachten materiellen und immateriellen Schäden. So findet ein Lawinnenniedergang in einem unbewohnten Bergtal kaum Beachtung. Zerstört ein solcher jedoch Siedlungen und fordert Menschenleben, wird er als Katastrophe wahrgenommen.

Ein gemeinsames Kennzeichen von Naturkatastrophen ist die Hilflosigkeit der Betroffenen. Sie vermögen sich nicht aus eigener Kraft aus ihrer Situation zu befreien und sind auf Unterstützung von aussen angewiesen. Naturkatastrophen in diesem Sinne sind in der Schweiz die Hochwasser von 1987 oder der Lawinewinter 1951.¹ Naturkatastrophen werden aber nicht nur von Extremereignissen verursacht. Sie können auch durch Ereignisse entstehen, die eine grosse räumliche Ausdehnung erreichen oder zeitlich kurz aufeinander folgen. Beispiele dafür sind ausgedehnte Hagelfelder oder das Zusammenfallen von Schneeschmelze und starken Niederschlägen im Frühling, wie zum Beispiel im Mai 1999.

Im Umfeld der Risikogesellschaft², die sich seit den 1970er Jahren herausgebildet hat, wird der Begriff Naturkatastrophe in dem Sinne in Frage gestellt, als solche Ereignisse als gesellschaftlich mitverursacht gelten. Im öffentlichen Bewusstsein haben sich die Unterschiede zwischen Natur- und

Technikkatastrophen verwischt. Kausalitäten zwischen Natur, Gesellschaft und Technik werden als Wechselbeziehungen verstanden.³

In den Naturwissenschaften hat sich seit einiger Zeit der Begriff Naturgefahren durchgesetzt.⁴ Der Begriff umfasst sämtliche Vorgänge und Einflüsse der Natur, die für den Menschen und/oder für Sachwerte schädlich sein können (z.B. Wirbelstürme, Erdbeben, Lawinen, Überschwemmungen, Heuschreckenplagen etc.).⁵ Bei Naturgefahren handelt es sich also um drohendes Unheil, das sich unter Umständen durch Prävention verhindern lässt. Als Naturkatastrophe wird dagegen ein Unheil bezeichnet, das tatsächlich eingetreten ist.

- 1 Pfister C., Am Tag danach. Zur Bewältigung von Naturkatastrophen in der Schweiz 1500–2000, Haupt Verlag, Bern, 263 S., 2002.
- 2 Beck U., Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne. Suhrkamp, Frankfurt/M., 1986.
- 3 Müller U., W. Zimmermann, P. Neuenschwander, A. Tobler, S. Wyss und R. Alder, Katastrophen als Herausforderung für Verwaltung und Politik. Kontinuität und Diskontinuität. Zürich, 1997.
- 4 Kienholz H., Naturgefahren – Naturrisiken im Gebirge, Schweiz. Zeitschrift für Forstwesen, 145/1, 1–25, 1994.
- 5 BUWAL, Begriffsdefinitionen zu den Themen Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit und Risiko. BUWAL, Eidg. Forstdirektion. Bern, 1998.

Extremereignis:	Ereignis, das stark von entsprechenden Durchschnittswerten oder Trends abweicht und ausserordentlich ist. Meist ist die Wiederkehrperiode deutlich länger als 10 Jahre.
Naturgefahr:	Ein aus einem natürlichen Prozess oder Einfluss drohendes Unheil.
Naturkatastrophe:	Naturereignis, dessen Folgen von den Betroffenen nicht ohne Hilfe von aussen bewältigt werden können.

1.2. Beobachtete Klimaänderung und Entwicklung des Klimas in der Zukunft

Urs Neu

Für Extremereignisse sind Veränderungen der Temperatur, des Niederschlags und der Ereignishäufigkeit wichtig. Gemäss IPCC wird sich bis ins Jahr 2100 die mittlere globale Temperatur am Boden gegenüber 1990 um 1.4°C bis 5.8°C erhöhen. Die Niederschläge im Winter werden in den mittleren bis hohen nördlichen Breiten wahrscheinlich zunehmen. Intensive Niederschläge werden sehr wahrscheinlich häufiger vorkommen.

„Eine zunehmende Zahl von Beobachtungen ergeben ein Bild einer sich erwärmenden Welt und anderer Änderungen des Klimasystems.“ Zu diesem Schluss kommt das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) in seinem dritten Wissensstandsbericht (Third Assessment Report, TAR).¹ Darin wird aufgezeigt, dass die beobachtete Erwärmung in den letzten 50 Jahren hauptsächlich durch menschliche Aktivitäten verursacht ist.

Klimaänderung im 20. Jahrhundert

Die im 20. Jahrhundert beobachtete Änderung des globalen Klimas ist im Bericht der Arbeitsgruppe I des TAR¹ (siehe Kasten, S. 18) beschrieben. In Bezug auf Extremereignisse sind vor allem die Änderungen der Temperaturen, der Niederschläge und der Häufigkeit von Ereignissen wichtig. Die durchschnittliche globale Temperatur an der Erdoberfläche ist im Verlaufe des 20. Jahrhunderts um $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$ angestiegen. Die 1990er Jahre waren global gesehen sehr wahrscheinlich das wärmste Jahrzehnt und 1998 das wärmste Jahr seit Beginn der Instrumentenmessungen 1861. Die täglichen Minimalwerte der Lufttemperatur über dem Land sind zwischen 1950 und 1993 im Mittel um 0.8°C angestiegen. Dadurch ist die frostfreie Zeit in zahlreichen Regionen mittlerer und hoher Breiten länger geworden. Seit 1950 sind extrem tiefe Temperaturen seltener und extrem hohe Temperaturen etwas häufiger geworden.

Über den meisten Landflächen der mittleren und hohen nördlichen Breiten haben die Niederschläge im 20. Jahrhundert um 0.5–1% pro Jahrzehnt zugenommen. Starke Niederschlagsereignisse sind in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wahrscheinlich um 2–4% häufiger geworden. Änderungen im Wassergehalt der Atmosphäre oder veränderte Gewitter- und Sturmaktivitäten sind mögliche Gründe für diese Zunahme. Die von schwerer Trockenheit oder schweren Überflutungen betroffenen Landflächen haben im 20. Jahrhundert leicht zugenommen.

Die Intensität und Häufigkeit tropischer und aussertropischer Stürme zeigen global im 20. Jahrhundert keine signifikanten Trends. Konkrete Aussagen über Änderungen der Sturmaktivitäten sind zurzeit nicht möglich. In den untersuchten Gebieten wurden keine systematischen Änderungen der Häufigkeit von Tornados, Gewittertagen oder Hagelereignissen festgestellt.



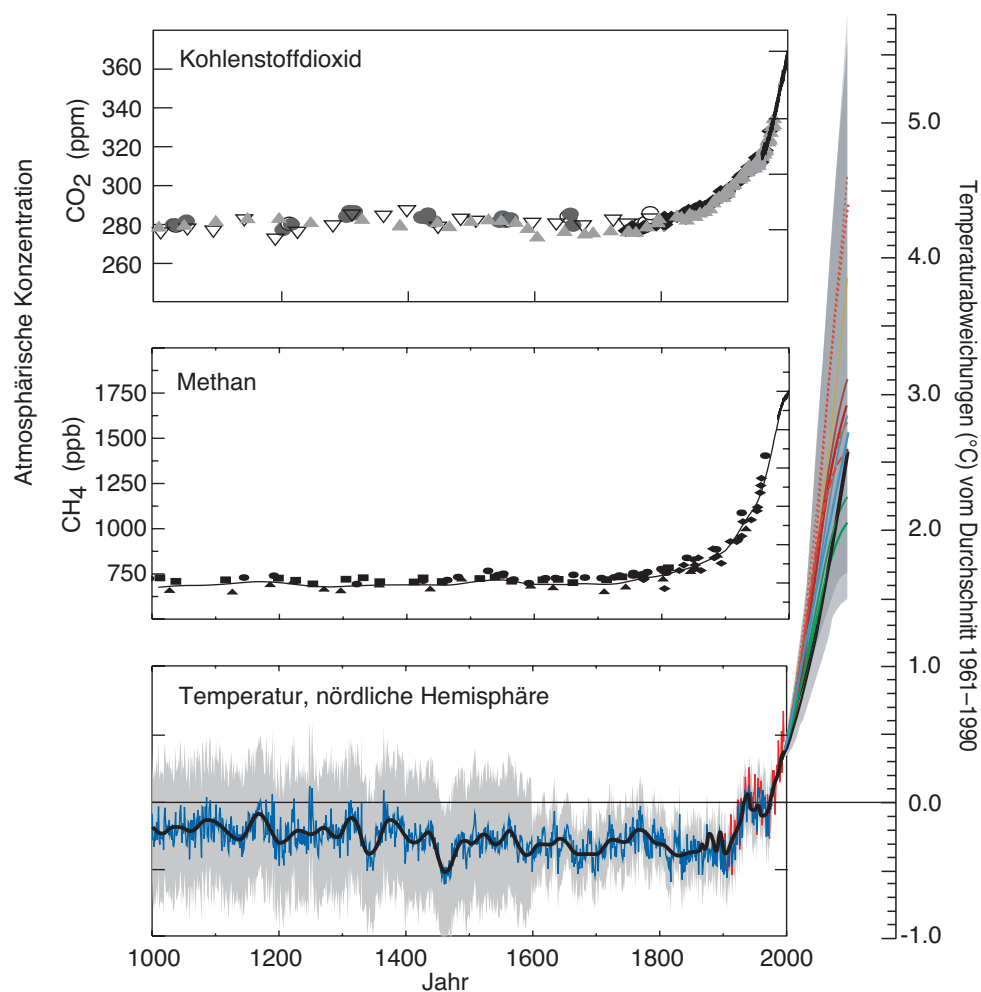


Abbildung 2: Die Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid und Methan haben seit Beginn des 20. Jahrhunderts stark zugenommen und weichen deutlich von den vorindustriellen Werten ab. Parallel dazu sind die bodennahen Temperaturen auf der Nordhalbkugel angestiegen. Für das 21. Jahrhundert sagen die Klimamodelle einen Temperaturanstieg von 1.4°C bis 5.8°C voraus (dargestellt als grauer Bereich). Diese Erwärmung wird viel stärker sein als die beobachteten Temperaturschwankungen der letzten 1000 Jahre.¹

Entwicklung des Klimas im 21. Jahrhundert

Mit komplexen physikalischen Modellen kann die zukünftige Entwicklung des Klimas abgeschätzt werden. Weil die Modelle immer mehr Beobachtungen vergangener Klimaschwankungen reproduzieren können, ist das Vertrauen in die Berechnungen gestiegen. Für die Abschätzung der Zukunft arbeiten die Modelle mit verschiedenen sogenannten Emissionsszenarien⁵, welche die Emissionen wichtiger Treibhausgase und Aerosole bei unterschiedlicher Bevölkerungs-, Technologie- und Wirtschaftsentwicklung beschreiben. Die Beschreibungen der Entwicklungen des zukünftigen Klimas im TAR basieren auf zahlreichen Simulationen und zwischen den verwendeten Modellen vergleichenden Studien.

Für die Periode von 1990–2100 ergeben die Modellrechnungen einen Anstieg der mittleren

globalen bodennahen Temperatur von 1.4°C bis 5.8°C. Die Erwärmung wird wesentlich schneller erfolgen als im 20. Jahrhundert (siehe Abbildung 2) und v.a. über den Kontinenten und in hohen nördlichen Breiten im Winter überdurchschnittlich sein. Allgemein wird eine Entwicklung zu höheren Temperaturmaxima, mehr Hitzetagen, höheren Temperaturminima, weniger Kälte- und Frosttagen sowie geringeren täglichen Temperaturschwankungen über den meisten Landmassen erwartet.

Im 21. Jahrhundert wird auch die mittlere Wasserdampfkonzentration der Atmosphäre global ansteigen. Die Winterniederschläge werden auf der Nordhalbkugel in mittleren bis hohen Breiten und auf der Südhalbkugel in der Antarktis wahrscheinlich zunehmen. Zudem dürften die Niederschlagsschwankungen von Jahr zu Jahr grösser und intensive Niederschlagsereignisse

Die IPCC-Berichte

Das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) trägt die verfügbaren wissenschaftlichen und sozioökonomischen Informationen zur Klimaänderung und den Möglichkeiten zur Vermeidung der Klimaänderung und zur Anpassung an die Klimaänderung zusammen. Es wurde 1988 von der Welt-Meteorologie-Organisation (WMO) und dem Umwelt-Programm der Vereinten Nationen (UNEP) gegründet. Seit 1990 hat das IPCC eine Reihe von Berichten erarbeitet, die von politischen Entscheidungsträgern, Forschenden und anderen Experten häufig als Standardwerke gebraucht werden (www.ipcc.ch).

Der Third Assessment Report (TAR) besteht aus den Berichten der drei Arbeitsgruppen des IPCC (Arbeitsgruppe I: Wissenschaftliche Grundlage¹; Arbeitsgruppe II: Auswirkungen, Anpassung und Anfälligkeit²; Arbeitsgruppe III: Abschwächungsmassnahmen³) und dem Synthesebericht⁴. Rund 2500 WissenschaftlerInnen haben am TAR mitgearbeitet. Die Berichte erheben keinen Wahrheitsanspruch, sondern stellen den derzeitigen Kenntnisstand als Konsens der beteiligten WissenschaftlerInnen dar. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, wenn in Bezug auf ein Thema Kontroversen bestehen.

häufiger werden. Die kontinentale Sommer-trockenheit und die Dürregefahr wird in den meisten innerkontinentalen Gebieten mittlerer Breite wahrscheinlich zunehmen.

Für die Beurteilung kleinräumiger Phänomene, die erhebliche Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft haben könnten, verfügen die Klimamodelle derzeit nicht über die nötige räumliche Auflösung. So werden zum Beispiel sehr kleinräumige Phänomene wie Gewitter, Tornados, Hagel und Blitzschlag in Klimamodellen nicht simuliert.

- 1 IPCC, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
- 2 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
- 3 IPCC, Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 752 p., 2001.
- 4 IPCC, Climate Change 2001: Synthesis Report. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 397 p., 2002.
- 5 IPCC, Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 514 p., 2000.

1.3. Extremereignisse in der Schweiz

1.3.1. Typisierung von klimatologischen Extremereignissen

Heinz Wanner

Die wichtigsten Extremereignisse in der Schweiz können aufgrund ihres Zusammenhangs mit charakteristischen Wetterlagen typisiert werden. Für die Entstehung extremer Werte von Temperatur und Feuchte/Niederschlag sind der horizontale Transport von Luftmassen und somit die grossräumigen Windströmungen entscheidend. Für Stürme und Gewitter sind im Winter grossräumige Druckdifferenzen und im Sommer lokalere Effekte wie Bodenfeuchte und Luftmassenstabilität wichtig. Hochwasser sind eine Folge von Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Oberflächenbeschaffenheit und Topographie.

Ein möglicher Weg zur Typisierung wichtiger Extremereignisse führt über die entsprechenden Wetterlagen sowie über die damit verbundene Ausprägung und Wirkung des Ereignisses in einem bestimmten Gebiet. Die Typisierung der klimatologischen Extremereignisse in der Schweiz ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Weil die Extremereignisse unterschiedlich grosse Gebiete betreffen, sind zusätzlich deren räumliche Skalen angegeben. Folgeereignisse wie Lawinen oder Hangrutschungen sind nicht dargestellt. Diese schematische Erfassung hat allerdings ihre Grenzen, da sich bei Extremereignissen oft verschiedene Prozesse gegenseitig verstärken oder in ihrer zeitlichen Abfolge kumulieren. Die einzelnen Fälle können dann zwar gruppiert werden, aber bei genauer Analyse lassen sich immer wieder fallspezifische Unterschiede feststellen.

Das Klima einer Region wird durch das Zusammenspiel der grossräumigen Luftströmungen (Zirkulation) und der lokalen Topographie und Oberflächenbeschaffenheit bestimmt. In der Schweiz wird das Klima massgeblich durch den Verlauf der Westwindströmung über dem Atlantik und Europa geprägt. Auch der Zustand des Ozeans (Strömungen, Oberflächentemperaturen, Meereisverteilung) spielt eine wichtige Rolle, indem er den Verlauf der Hauptzugstrassen der Tiefdruckgebiete (Storm Tracks) beeinflusst. Ebenfalls von grosser Bedeutung sind die Land-See-Verteilung (Atlantik, Mittelmeer und eurasischer Kontinent) und die Topographie der Alpen. Letztere modifizieren mit ihrer Form („Nussgipfel“) und Höhe die Strömung und die Eigenschaften der Luftmassen. Dadurch werden Extremereignisse erzeugt wie beispielsweise starke Hangabwinde (Föhnstürme), inneralpine Trockenheit (Wallis) oder Tiefdruckbildung auf der vom Wind abgekehrten Seite der Alpen (Lee- oder Genuazyklonen).

Für das Auftreten extremer Temperaturen und Niederschläge (Tabelle 1, oben) spielen horizontale Verschiebungen von Luftmassen (Advektion), die durch die grossräumige Zirkulation gesteuert werden, die entscheidende Rolle. Wichtig ist dabei vor allem, woher diese Luftmassen stammen, wie sie sich auf ihrem Weg zur Schweiz bezüglich Temperatur und Feuchtigkeit verändern und wie rasch sie über unser Gebiet hinwegziehen. Der langfristige Einfluss natürlicher Faktoren (Sonne, Vulkane), menschlicher Einflüsse (Treibhaus- und Aerosoleffekt, Oberflächenveränderungen) oder zufälliger Schwankungen im Klimasystem auf kontinentale bis regionale Schwankungen der Zirkulation und der Häufigkeit extremer Temperaturen und Niederschläge ist nach wie vor unklar.^{1,2}

Für Stürme und Gewitter (Tabelle 1, Mitte) spielen je nach Jahreszeit entweder grossräumige Druckdifferenzen (vor allem im Winter) oder lokalere Effekte wie Luftmassenstabilität und Bodenfeuchte (vor allem im Sommer) eine wichtige Rolle. Luftmassen können Energie direkt in Form von fühlbarer Wärme oder indirekt in Form von Feuchtigkeit speichern. Die im Wasserdampf gespeicherte Energie wird bei der Kondensation wieder freigesetzt. Diese so genannte Kondensationswärme ist die Energiequelle für Hurrikane, die aber nur über warmem Oberflächenwasser bei genügend grosser Verdunstung entstehen können. Für die Schweiz sind direkte und indirekte Wärmeflüsse sowohl grossräumig (vor allem bei Stürmen, die über dem Westatlantik entstehen) als auch regional (bei Sommergewittern) wichtig.³ Winterstürme, wie beispielsweise der Orkan Lothar, sind auf sehr komplexe Entwicklungen zurückzuführen.⁴

Am vielfältigsten präsentiert sich die Situation bei den Hochwassern (Tabelle 1, unten). Sie sind eine Folge von Wechselwirkungen zwischen

Tabelle 1: Typisierung der wichtigsten klimatologischen Extremereignisse für das Gebiet der Schweiz über die entsprechenden charakteristischen Wetterlagen.

Extremereignis	Winter	Sommer
Wetterelemente: Temperatur Niederschlag	(a) Kalt-trocken: Anhaltender Kaltluftzustrom infolge des kontinentalen sibirischen Bodenhochdrucks: <i>Frost- und Trockenschäden</i> <i>Skala: semikontinental</i> (c) Kühl-feucht: Anhaltende Nordwestströmung: <i>Massenschneefälle, Lawinen</i> <i>Skala: regional</i>	(b) Heiss-trocken: Einfluss von Wärme und Trockenheit im Absink- oder Subsidenzbereich des auf den Kontinent vorgedrungenen Azorenhochs: <i>Hitze- und Trockenschäden</i> <i>Skala: semikontinental</i> (d) Kalt-feucht: Von Nordwesten nach Südosten driftende Tiefdruckgebiete: <i>Vegetationsschäden</i> <i>Skala: regional bis semikontinental</i>
Stürme/ Gewitter	Starke Druckgradienten, z.T. mit Sekundärwirbeln: <i>Sturmwinde, Böen, Orkane</i> <i>Skala: regional bis semikontinental</i>	Schwache Druckgradienten, Hitzetiefs, Gewitter: <i>Starkregen, Hagel, Böen</i> <i>Skala: lokal bis regional</i>
Hochwasser	Alpennordseite: Eher anhaltende Südwest-, West- und Nordwest-Wetterlagen bei südwärts verlagelter Zugbahn der Tiefdruckgebiete. Zustrom von warmer, sehr feuchter Luft, die unter extremen Hebungsbedingungen aufsteigt und damit zu anhaltenden, ausgiebigen Niederschlägen führt. Eventuell kombiniert mit Erwärmung, Schneeschmelze und in seltenen Fällen mit Staueffekten an den Alpen. (Vorkommen: warme und Übergangsjahreszeiten, vorzugsweise Frühling bis Frühsommer) <i>Massive Überflutungen von Tal- und Seenlandschaften</i> <i>Skala: regional bis semikontinental</i> Alpensüdseite und inneralpiner Raum: Kombination von Luftmassenzustrom, extremem Aufsteigen (sowohl luftmassenbedingt als auch an der Topographie der Alpen) und anschliessendem Ausregnen. Alpensüdseite: vorherrschende südliche Alpenanströmung (vor allem bei südlich vorbeiziehenden Tiefdruckgebieten); oft verbunden mit dem Phänomen der hochtroposphärischen „Streamer“. Inneralpiner Raum: auch verbunden mit stationären Tiefdruck-Trögen. (Vorkommen: kältere und Übergangsjahreszeiten, vorzugsweise im Herbst) <i>Massive Überflutungen von Tal- und Seenlandschaften</i> <i>Inneralpin: Auslösung von extremen hydro- und geomorphologischen Schadeneignissen wie Massenbewegungen, Murgängen etc.</i> <i>Skala: lokal bis grossregional</i>	

Atmosphäre, Oberflächenbeschaffenheit und Topographie. Im Gebirgsraum spielen auch das Aufsteigen und das anschliessende Ausregnen der Luftmassen als Folge grossräumiger Verschiebungen sowie die Luftströmungen in der gesamten Troposphäre eine wichtige Rolle. Etwas weniger wichtig ist die Auslösung von Niederschlägen durch das Aufsteigen der Luft an der Topographie der Alpen.⁵ Lang anhaltende, massive Niederschläge können den Boden mit Wasser sättigen und, zum Teil kombiniert mit der Schneeschmelze im Alpenraum, zu regionalen bis grossräumigen Hochwassern führen. Im mitteleuropäischen Raum nördlich der Alpen sind vor allem die Zug-

bahnen der Tiefdruckgebiete zu beachten. Deren Verlagerungen nach Süden treten vor allem bei negativer Nordatlantischer Oszillation (d.h. bei warmem Nordatlantik und kühlem Südatlantik) auf und führen zu lange anhaltenden Südwest- bis Nordwestlagen.² Zum Teil treten abgeschnürte Kaltlufttropfen auf, die tagelang über einer Region verharren und dort zu andauernden Niederschlägen führen. Südlich der Alpen sind, abgesehen von der bereits erwähnten leeseitigen Tiefdruckbildung, vor allem die Fälle mit Tiefdruckgebieten zu beachten, die aus dem Atlantikraum langsam via Mittelmeer gegen den Alpenostrand und dann nach Polen wandern.

1.3.2. Ein Blick auf die letzten 500 Jahre

Christian Pfister

Der Nachweis von Trends für Extremereignisse anhand von instrumentellen Messdaten stösst wegen der Kürze der Messreihen und der Seltenheit der Ereignisse an Grenzen. Mit Hilfe von historischen Dokumenten⁶ können die Datenreihen verlängert werden. Für die Zeit zwischen ca. 1100 und 1800 enthalten sie die aussagekräftigsten Informationen über Extremereignisse. Der Nachweis von Naturkatastrophen ist nur anhand von Berichten in historischen Dokumenten möglich: Je aussergewöhnlicher und extremer ein Ereignis war, desto mehr und desto ausführlichere Berichte liegen vor.

Im Gegensatz zu natürlichen Archiven wie Baumringen, die nur Rückschlüsse auf Extremereignisse in einem bestimmten Jahresabschnitt zulassen, decken historische Dokumente alle Jahreszeiten und Kalendermonate ab. In den Dokumenten sind die Ereignisse auf den Tag, später oft auf die Stunde genau datiert. Um die Grössenordnung von Anomalien anzugeben, verwiesen die Beobachter häufig auf geeignete natürliche Indikatoren, die sich anhand von analogen Ereignissen heute quantifizieren und kalibrieren lassen. So blühen die Kirschen nach einem sehr kalten März und April um drei Wochen zu spät. Dies entspricht nach heutigem Wissen einem Temperaturdefizit von insgesamt 5°C.⁷

Die einzelnen Dokumente decken jeweils nur einen beschränkten Zeitraum ab, sind heterogen und meist lückenhaft. In der Regel sind sie nicht quantifizierbar und können deshalb statistisch nicht bearbeitet werden. Für eine aussagekräftige Quantifizierung muss daher eine möglichst grosse Menge verlässlicher Quellen zusammengetragen werden. So lassen sich die Angaben ergänzen und überprüfen. Für die Schweiz wurden für den Zeitraum von 1500–1864 ungefähr 40000 Einzelbeobachtungen aus rund 350 Quellen zusammengetragen.^{6,8} Für die Zeit nach 1550 liegen für 99% aller Monate Witterungsbeschreibungen und/oder Beobachtungen von Indikatoren vor.

Temperatur- und Niederschlagsinformationen für jeden Monat werden einem siebenstufigen Intensitäts-Index zugeordnet. Die entstehenden Indexreihen werden mit solchen aus benachbarten Re-

gionen verglichen. Sorgfältig erarbeitete Indexreihen stimmen fast gleich gut überein wie instrumentelle Messreihen.⁹

Entsprechend der Typisierung der Extremereignisse in Kapitel 1.3.1. sind in der Folge für die Schweiz einige klimatologische Extremereignisse der letzten 500 Jahre dargestellt.⁶ Die Interpretation der Zeitreihen in diesem Kapitel beruht auf der einfachen Feststellung von Perioden mit häufigen und weniger häufigen Berichten über Extremereignisse. Ob es sich bei den Variationen um eher zufällige Fluktuationen handelt oder um tatsächliche Änderungen der Ereigniswahrscheinlichkeit, kann aufgrund der Seltenheit der Ereignisse nicht eindeutig entschieden werden (vgl. Kapitel 1.4.).

Kalt-trocken im Winter

Von 1496–1566 sind kalt-trockene Extreme überhaupt nicht, in den folgenden 110 Jahren nur selten aufgetreten (Abbildung 3). Zwischen 1676 und 1895 häufen sie sich. In jedem Jahrzehnt sind 1 bis 8 kalt-trockene Monate mit anhaltendem



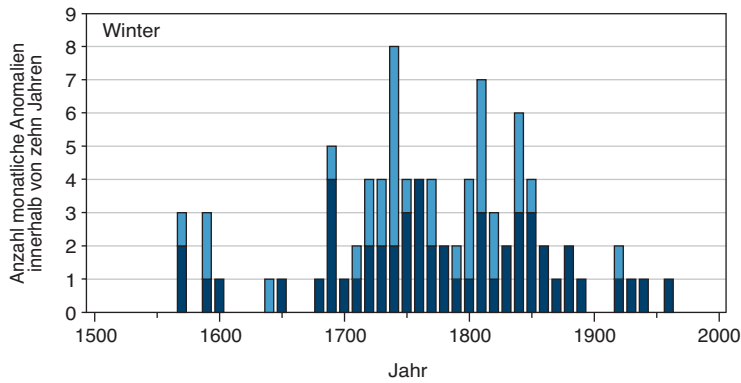


Abbildung 3: Häufigkeit kalter (dunkelblau) und kalt-trockener (hellblau) Monate im Winterhalbjahr (November–März/April) von 1496–2000 (Zehnjahressummen).

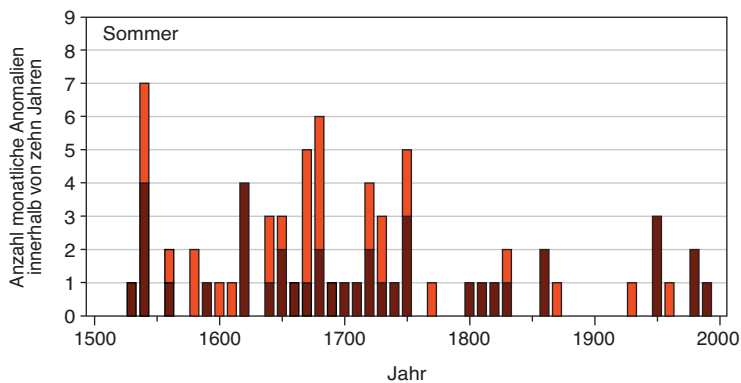


Abbildung 4: Häufigkeit warmer (dunkelrot) und warm-trockener (rot) Monate im Sommerhalbjahr (April–September) von 1496–2000 (Zehnjahressummen).

Kaltluftzustrom aus dem sibirischen Bodenhoch nachgewiesen. Für die Menschen im 18. Jahrhundert war die völlige Eisbedeckung des Bielersees nichts Ausserordentliches. Zwischen 1895 und Januar 1963 (letztmaliges Zufrieren des Zürichsees) sind die kalt-trockenen Monate wieder selten geworden und seitdem völlig ausgeblieben (bis März 2003).

Kühl-feucht im Winter

Zur Auslösung von zahlreichen Schadenlawinen genügen unter geeigneten Bedingungen mehrtägige intensive Nordwestströmungen, die im Monatsmittel der Temperatur und der Niederschläge nicht hervortreten. Die beschriebenen Indexreihen bieten daher hier kein gutes statistisches Hilfsmittel.

Die zeitliche Verteilung der schadenreichen Lawinenwinter ist weitgehend ausgeglichen. Sie sind im 20. Jahrhundert nicht häufiger als in den vorangehenden Jahrhunderten.

Warm-trocken im Sommer

Vor 1730 waren warm-trockene Monate deutlich häufiger als danach (Abbildung 4). Zwischen 1718 und 1728 war jeder zweite Sommer wesentlich zu trocken. Zwar trat in diesen Jahren kein meteorologisches Jahrhundertextrem (wie z.B. 1540 oder 1947) auf. Aber zweimal (1718/19 und 1723/24) kamen unmittelbar aufeinander folgende Trockensommer und dazwischenliegende regenarme Winter und Frühjahrsperioden in ihrer kumulativen Wirkung einem solchen gleich.

Im 20. Jahrhundert sind warm-trockene Monate während der Vegetationsperiode – abgesehen vom Jahrzehnt 1946–1955 – verhältnismässig selten aufgetreten.

Kalt-feucht im Sommer

Vor der Ankoppelung der Schweizer Wirtschaft an das globale Verkehrsnetz um 1880 führten kalt-feuchte Sommer wegen der Vegetationsschäden zu Preissteigerungen, zu Versorgungsengpässen und unter Umständen zu Hungersnöten (z.B. 1816/17). Von 1576–1635 waren kalt-feuchte Sommermonate besonders häufig und die Gletscher wuchsen. Seither sind solche Extremereignisse selten geworden.

Stürme im Winter

Die allgemeine statistische Tendenz für die Alpennordseite weist für das 20. Jahrhundert eine Reduktion der Anzahl Sturmtage und im Winterhalbjahr eine Abnahme der Ereignisdauer der Winde mit Stärke 7–9 aus.¹⁰

Zwischen 1500 und 1960 traten die meisten Stürme im Dezember auf, die extremsten jedoch im Januar und Februar. Immer wieder gab es lange Perioden ohne schwere Stürme (Abbildung 5). Das Mittelland wurde zwischen 1600 und 1900 in jedem Jahrhundert von einem „Jahrhundertsturm“ betroffen: Dabei handelte es sich um winterliche West-Stürme, die über grosse Distanzen hinweg schwere Schäden an Wäldern, Gebäuden und Infrastruktur anrichteten. Im 20.

Jahrhundert wurden innerhalb von nur 33 Jahren drei Jahrhundertstürme registriert: im Februar 1967, im Februar 1990 (Vivian) und im Dezember 1999 (Lothar). Wegen der Seltenheit der Ereignisse lässt sich daraus aber kein langfristiger statistischer Trend ableiten.

Hochwasser Alpennordseite

Im Mittelland ereignen sich die meisten Hochwasser im Früh- und Hochsommer, wenn die Schneeschmelze in den Bergen gross ist und in weiten Teilen des Einzugsgebietes die höchsten Jahresniederschläge fallen.

Bis 1762 trat der Rhein bei Basel durchschnittlich alle 10 Jahre über die Ufer (Abbildung 6). In den folgenden 120 Jahren verlangsamte sich dieser Rhythmus. Zwischen 1882 und 1992 sind extreme Hochwasser völlig ausgeblieben. Weil die Abflussbildung in den letzten 120 Jahren durch verschiedene Eingriffe verändert wurde, kann diese Entwicklung nicht nur nach meteorologischen und hydrologischen Kriterien interpretiert werden.

Hochwasser in den zentralen Alpen und auf der Alpensüdseite

Über die letzten fünf Jahrhunderte hinweg lassen sich in den vier Kantonen Wallis, Uri, Tessin und Graubünden zwei Perioden mit niedriger Überschwemmungsdichte (1641–1706; 1927–1975) und zwei Perioden mit hoher Überschwemmungsdichte (1550–1580; 1827–1875) nachweisen (Abbildung 7). Langfristige Schwankungen in der Häufigkeit von Überschwemmungen sind auch in den Pyrenäen und in Deutschland nachgewiesen.¹¹ Sie sind durch natürliche Klimavariationen bedingt und stehen nicht in erkennbarer Weise mit menschlichen Einflüssen in Zusammenhang.

Gegenüber den Mittelwerten des 20. Jahrhunderts hat die Zahl extremer inner- und südalpiner Überschwemmungen in den letzten 15 Jahren zugenommen (August 1987, September

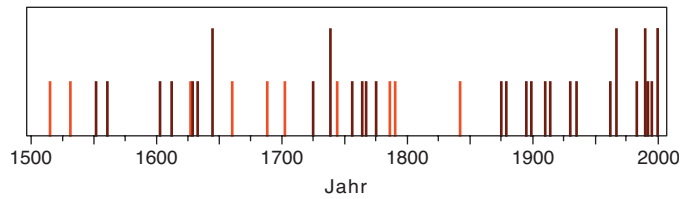


Abbildung 5: Schwere (kurze Balken) und extreme (lange Balken) Winterstürme in der Schweiz in den letzten 500 Jahren. In einigen Fällen (orange) sind die historischen Daten nicht eindeutig.⁶

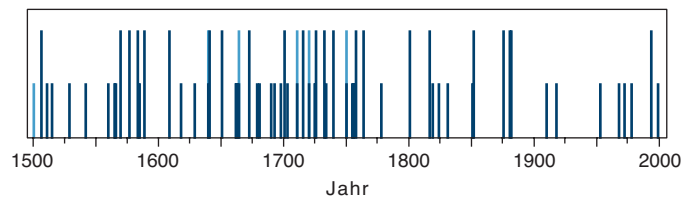


Abbildung 6: Schwere (kurze Balken) und extreme (lange Balken) Hochwasser des Rheins bei Basel in den letzten 500 Jahren. In einigen Fällen (hellblau) sind die historischen Daten nicht eindeutig.⁶

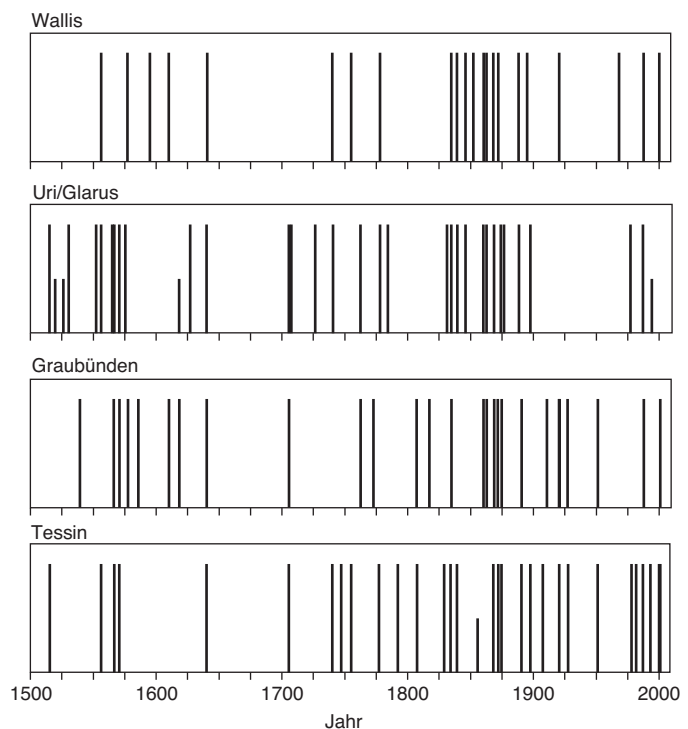


Abbildung 7: Schwere (kurze Balken) und extreme (lange Balken) Überschwemmungsereignisse in den vier Gotthardkantonen Wallis, Uri, Tessin und Graubünden in den letzten 500 Jahren. Als extrem gelten Überschwemmungen, die in mindestens zwei Alpentälern und/oder im benachbarten Ausland Schäden anrichten.⁶

1993, Oktober 2000), doch liegt die Häufigkeit dieser Ereignisse noch in der Bandbreite bisheriger Ereignisse.

-
- 1 Easterling D. R., G. A. Meehl, C. Parmesan, S. A. Changnon, T. R. Karl, and L. O. Mearns, Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science* 289, 2068–2074, 2000.
 - 2 Wanner H., S. Brönnimann, C. Casty, D. Gyalistras, J. Luterbacher, C. Schmutz, D. B. Stephenson, and E. Xoplaki, North Atlantic Oscillation – concepts and studies. *Surveys in Geophysics*, 2002.
 - 3 Schär C., D. Lüthi, U. Beyerle, and E. Heise, The soil-precipitation feedback: A process study with a regional climate model. *J. Climate* 12, 722–741, 1999.
 - 4 Wernli H., S. Dirren, M. Liniger, and M. Zillig, Dynamical aspects of the life-cycle of the winter storm ‘Lothar’ (24–26 December 1999). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128, 405–429, 2002.
 - 5 Frei C. and C. Schär, Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Clim.*, 14, 1568–1584, 2001.
 - 6 Pfister C., *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496–1995*, Haupt Verlag, Bern, 304 S., 1999.
 - 7 Summe der Abweichung von der Durchschnittstemperatur 1901–1960 in beiden Monaten.
 - 8 Eine vollständige Fassung ist in der Datenbank Euro-Climhist gespeichert. Ausschnitte sind als Pilotversion freigegeben unter www.euroclimhist.com.
 - 9 Pfister C., *Raum-zeitliche Rekonstruktion von Witterungsanomalien und Naturkatastrophen*, vdf, Zürich, 142 S., 1998.
 - 10 Schiesser H. H., C. Pfister, and J. Bader, Winter storms in Switzerland North of the Alps 1864/65–1993/94, *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 1–19, 1997.
 - 11 Glaser R., *Klimageschichte Mitteleuropas. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen*, Primus Verlag, Darmstadt, 227 S., 2001.

1.4. Der Nachweis von Trends stösst an Grenzen

Christoph Frei

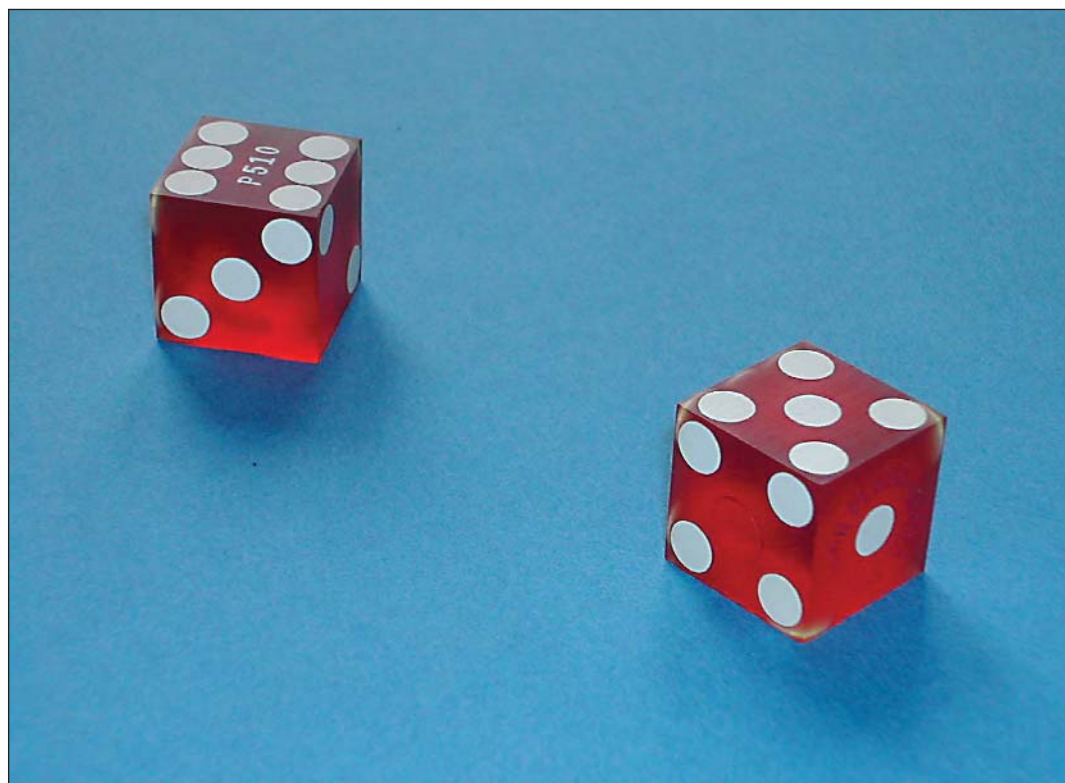
Der Nachweis von Trends bei Extremereignissen stösst wegen ihrer Seltenheit an grundsätzliche Grenzen. Je seltener nämlich die Ereignisse sind, umso schwieriger ist es, einen Trend nachzuweisen. Kleinere Häufigkeitsänderungen sehr seltener Ereignisse gehen in den natürlichen Klimavariationen unter. Die scheinbare Häufung von Extremereignissen in den letzten Jahren könnte durch einen wirklichen Trend oder durch Zufall verursacht sein. Extremereignisse sind deshalb ungeeignete Indikatoren für die globale Klimaänderung.

In der Schweiz gilt, im Rückblick der letzten 30 Jahre, das Jahr 1999 mit dem Lawinenwinter, dem Pfingsthochwasser, den sommerlichen Hagelgewittern und dem Wintersturm Lothar als dasjenige mit den zahlreichsten wetterbedingten Naturkatastrophen von nationaler Bedeutung. Ist dies eine unnatürliche Häufung, gar ein Anzeichen der globalen Klimaänderung? Was kann man darüber aus den langjährigen instrumentellen Klimabeobachtungen in Erfahrung bringen?

Die längsten instrumentellen Beobachtungsreihen in der Schweiz reichen zurück bis ins frühe 19. Jahrhundert (z.B. Grosser Sankt Bernhard bis 1818). Koordinierte Klimamessnetze mit weitgehend vergleichbaren Messbedingungen wurden in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts aufgebaut. Aus diesen Netzen liegen heute kontinuierliche Messreihen in täglicher Auflösung von etwa 100 Niederschlagsstationen und etwa 30 Temperaturstationen vor.^{1,2} Für andere Beobachtungsgrössen sind die Datengrundlagen weniger gut: Messungen der Windstärke zum Beispiel existieren über einen 100-Jahre-Zeitraum lediglich für drei Stationen (Bern, Basel und Zürich) und die zahlreichen Instrumentenwechsel und Stationsverschiebungen erschweren die Bereinigung der Zeitreihen von nicht klimatischen Signalen (Homogenisierung).³ Nach intensiver Aufarbeitung von instrumentellen Beobachtungsreihen in den letzten Jahren liegen heute für die Schweiz zahlreiche, im internationalen Vergleich qualitativ

hoch stehende Zeitreihen vor, die die notwendige zeitliche und räumliche Auflösung aufweisen, damit Langzeitvariationen und Trends für temperatur- und niederschlagsbedingte Extremereignisse untersucht werden können.

Trotz der komfortablen Datengrundlage stösst der Nachweis von Trends für Extremereignisse an prinzipielle Grenzen. Diese sind durch die Seltenheit der Ereignisse und eine damit verbundene statistische Unsicherheit bedingt: Der Nachweis eines Trends enthält eine Beurteilung darüber, ob die in den Beobachtungen vorgefundene Abfolge von Ereignissen das Ergebnis einer systematischen Veränderung (das Signal eines Trends) oder aber einfach das Resultat des Zufalls (das Rauschen des Klimas) ist. Die Unterscheidung zwischen Signal und Rauschen wird umso unsicherer, je seltener (extremer) die Ereignisse sind. Die Situation ist vergleichbar mit derjenigen eines Würfelspielers, der mit wenigen Würfeln nachweisen sollte, ob sein Würfel gezinkt ist.



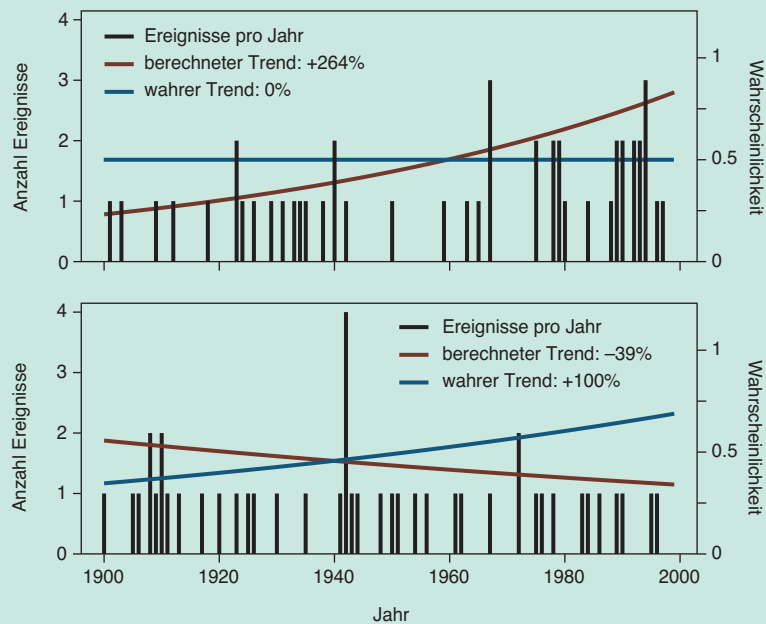


Abbildung 8: Künstlich generierte Zeitreihen von Ereignissen im 20. Jahrhundert. In der oberen Abbildung wurde eine konstante Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis vorgegeben (blaue Linie). Die zufällige Häufung der Ereignisse am Ende des Jahrhunderts täuscht eine Wahrscheinlichkeitszunahme von über 250% vor (rote Kurve). Im Gegensatz dazu wurde in der unteren Abbildung eine Verdoppelung der Ereigniswahrscheinlichkeit vorgegeben (blaue Linie). Die zufällige Verteilung der Ereignisse täuscht aber eine Abnahme der Ereigniswahrscheinlichkeit um 39% vor (rote Linie).

Getarnter, gebluffter oder wahrer Trend?

Aufgrund ihrer Seltenheit lässt sich für Extremereignisse ein Trend nur sehr ungenau bestimmen. Eine zufällige Häufung von Ereignissen am Anfang oder am Ende der Beobachtungsperiode kann einerseits einen Trend vorgaukeln, der in der Realität nicht vorhanden ist („gebluffter“ Trend). Andererseits kann ein tatsächlich vorhandener Trend derart von zufälligen Variationen überlagert sein, dass er bei der statistischen Analyse von Messreihen nicht nachgewiesen werden kann (getarnter Trend).

Abbildung 8 illustriert die möglichen Fehlschlüsse einer Trendanalyse: Sie zeigen künstlich generierte Zeitreihen von Extremereignissen über eine 100-Jahre-Periode (schwarz, Anzahl Ereignisse pro Jahr, linke Achse). Für das obere Beispiel wurde bei der Generierung vorgegeben, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis (blaue Kurve, rechte Achse) konstant ist, also kein wahrer Trend vorliegt. Im Durchschnitt tritt ein Ereignis pro zwei Jahre auf. Der für die dargestellte Sequenz von Ereignissen berechnete Trend (rote Kurve) impliziert aber eine Zunahme in der Ereigniswahrscheinlichkeit um mehr als 250% über 100 Jahre. Dieser „gebluffte“ Trend ist das Resultat der zufälligen Häufung von Ereignissen am Ende der Periode. Ebenso gut hätte sich eine zufällige Häufung von Ereignissen am Anfang der Zeitperiode ereignen können. Dann hätte man irrtümlicherweise einen abnehmenden Trend ermittelt.

Im unteren Beispiel wurde bei der Zeitreihen-Generierung vorgegeben, dass sich die Ereigniswahrscheinlichkeit im Laufe von 100 Jahren verdoppelt (blaue Kurve). Die generierte Ereignissequenz gibt diese Vorgabe aber kaum wieder, weil sich, entgegen dem vorgegebenen „wahren“ Trend, eine zufällige Häufung von Ereignissen am Anfang der Periode ereignet hat. Die statistische Analyse dieser Zeitreihe ermittelt eine Abnahme um ca. 40% (rote Kurve). In diesem Fall ist der „wahre“ Trend getarnt und wird nicht nachgewiesen. Je seltener die betrachteten Ereignisse sind, umso geringer ist die Chance, einen wahren Trend nachzuweisen.

Christoph Frei

Die Grenzen der Nachweisbarkeit von Trends in Extremereignissen lassen sich theoretisch abschätzen. Für Ereignisse mit einer Wiederkehrperiode von einem Jahr könnte ein Trend nur nachgewiesen werden, wenn sich die Ereigniswahrscheinlichkeit im Laufe eines Jahrhunderts mindestens verdoppelt hätte.⁴ Für das Kaliber von Ereignissen des Jahres 1999, mit Jährlichkeiten von 10 bis über 100 Jahre, wären für einen Nachweis gar Änderungen um ein Vielfaches nötig. Kleinere Trends gehen im Rauschen der natürlichen Klimavariationen unter.

Das Nachweisproblem wirkt sich sowohl auf wissenschaftliche Untersuchungen als auch auf die öffentliche Diskussion über den Zusammenhang zwischen Klimaänderung und Extremereignissen aus:

- (a) Die scheinbare Häufung von Extremereignissen in den letzten Jahren könnte das Zeichen eines realen Trends oder lediglich dasjenige eines durch den Zufall vorgegaukelten Trends sein. Genauere Aussagen lassen sich für diese sehr seltenen Ereignisse aus statistischen Gründen zurzeit nicht machen.
- (b) Extremereignisse sind ungeeignete Indikatoren für die globale Klimaänderung. Die Aufmerksamkeit der Klimaproblematik in den Medien jeweils im Takt von Extremereignissen impliziert einen Zusammenhang, der weder nachgewiesen noch ausgeschlossen werden kann. Dies birgt die Gefahr, dass die öffentliche Wahrnehmung der Klimaproblematik einerseits in Perioden mit häufigeren Extremereignissen möglicherweise ungerechtfertigt dramatisiert und andererseits in Perioden mit selteneren Ereignissen möglicherweise ungerechtfertigt verharmlost wird.
- (c) Aussagen über Trends in der instrumentellen Periode basieren auf dem Studium von intensiven, nicht notwendigerweise Schaden verursachenden Ereignissen. So konnte z.B. für intensive Niederschläge mit einer durchschnittlichen Wiederkehr von 30 Tagen eine deutliche Zunahme im Winter und im Herbst um 20–80% gefunden werden.⁴ Diese hebt sich insbesondere im nördlichen Mittelland deutlich vom reinen Zufall ab. Aussagen zu intensiven Ereignissen können aber nicht einfach auf die wirklichen Extremereignisse übertragen werden. Zudem sind die Trends für sich alleine noch kein Nachweis einer menschengemachten Klimaänderung, sie können ihre Ursache auch in natürlichen langzeitlichen Klimavariationen haben und dürfen deshalb nicht unbedacht in die Zukunft extrapoliert werden.
- (d) Aussagen über die zukünftige Änderung in der Wahrscheinlichkeit von wirklich seltenen Extremereignissen sind zumindest regional von eingeschränktem Nutzen. Auch markante Änderungen können in Zukunft durch die Zufallskomponente überlagert sein. Ein allenfalls erhöhtes Risiko als Folge der globalen Klimaänderung wird sich nicht notwendigerweise in den kommenden Jahrzehnten spürbar auswirken. Trotzdem können technische Massnahmen zum Schutze vor einem erhöhten Risiko bereits über kürzere Zeiträume Wirkung zeigen: So haben sich zum Beispiel die Massnahmen in Brig nach der Überschwemmung von 1993 beim Hochwasser vom Herbst 2000 bereits als sehr wertvoll erwiesen.
- (e) Die Untersuchung von Langzeitbeobachtungen allein reicht nicht für ein vertieftes Verständnis des Zusammenhangs zwischen Klimaänderung und Extremereignissen. Wissenschaftliche Fortschritte sind vielmehr in einem tieferen Verständnis der Prozesse des Klimasystems zu suchen, wozu die Anwendung von Klimamodellen einen wichtigen Beitrag leistet.

- 1 Weingartner R., Niederschlagsmessnetze, in: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Landeshydrologie und -geologie EDMZ, Bern, 1992.
- 2 Jungo P. and M. Beniston, Changes in the anomalies of extreme temperature anomalies in the 20th century at Swiss climatological stations located at different latitudes and altitudes. *Theor. Appl. Climatol.*, 69, 1–12, 2001.
- 3 Schiesser H. H., C. Pfister, and J. Bader, Winter storms in Switzerland North of the Alps 1864/65–1993/94. *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 1–19, 1997.
- 4 Frei C. and C. Schär, Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Clim.*, 14, 1568–1584, 2001.

1.5. Methodik regionaler Klimaszenarien

Christoph Schär, Heini Wernli und Christoph Frei

Mit globalen Klimamodellen kann das mittlere Klima beschrieben werden unter Berücksichtigung der relevanten Prozesse in der Atmosphäre, den Ozeanen, den Eisschilden und auf den Landoberflächen. Die Auswirkungen der globalen Klimaänderung zeigen sich jedoch auf der regionalen und lokalen Ebene. Die mittlere globale Temperaturzunahme ist wohl ein hervorragender Indikator für die globale Erwärmung, aber ein schlechter Massstab, um die Konsequenzen der Klimaänderung abzuschätzen. Anstelle dessen sind regionale Klimaszenarien notwendig, welche auch konkrete Aussagen über die Häufigkeit von Extremereignissen in verschiedenen Regionen machen.

Extremereignisse im Alpenraum stehen am Ende einer langen Kette von Prozessen und Vorgängen im Klimasystem. Die potentiellen Auswirkungen der Klimaänderung auf die Häufigkeit von Extremereignissen sind dementsprechend schwierig zu beurteilen. Besonders kritische Fragestellungen sind: Wie reagiert die atmosphärische Zirkulation auf die Klimaerwärmung und wie verändern sich die Zugbahnen der Tiefdruckgebiete? Wie ändert sich die Häufigkeit relevanter Grosswetterlagen und welchen Einfluss hat dies auf Extremereignisse? Welchen Einfluss hat die mit der Erwärmung einhergehende Feuchtigkeitszunahme der Atmosphäre auf das zukünftige Niederschlagsklima und die Häufigkeit von Sturmtiefs? Wie wirkt sie sich auf die geographische und jahreszeitliche Verteilung von Starkniederschlägen und Dürren aus? Welche Konsequenzen hat ein Anstieg der Schneefallgrenze auf die Abflussbildung in Flüssen und Gewässern und wie wirkt sie sich auf die Häufigkeit von Hoch- und Niedrig-

wasser aus? All diese Faktoren, die ganz unterschiedliche räumliche Dimensionen haben, müssen bei der Erzeugung regionaler Klimaszenarien berücksichtigt werden.

Globale Klimamodelle

Heute wird eine breite Palette von verschiedenen Modellen in der Klimaforschung eingesetzt.¹ Sie berücksichtigen je nach Fragestellung unterschiedliche Komponenten des Klimasystems (Atmosphäre, Ozeane, Eisschilde, Landoberflächen) und decken unterschiedliche Regionen ab (ganze Erde, Kontinente, Regionen). Gemeinsame Eigenschaft dieser Modelle ist ein dreidimensionales Rechengitter, auf dem die physikalischen Gleichungen der atmosphärischen und ozeanographischen Strömungen dargestellt und in die Zukunft weitergerechnet werden.

Die ersten globalen Modelle wurden mit dem Aufkommen leistungsfähiger Computer in den 1960er Jahren für die Zwecke der Wetterprognose

entwickelt. Anfänglich beschränkten sie sich auf die Simulation der atmosphärischen Zirkulation. Zur Beschreibung des Klimas wurden diese Modelle zunehmend um weitere Komponenten des Klimasystems (Ozeane, Land- und Meereis, Landoberfläche und Biosphäre) ergänzt. Auch die Beschreibung klimarelevanter Prozesse (z.B. Wolkenbildung) wurde laufend verbessert.

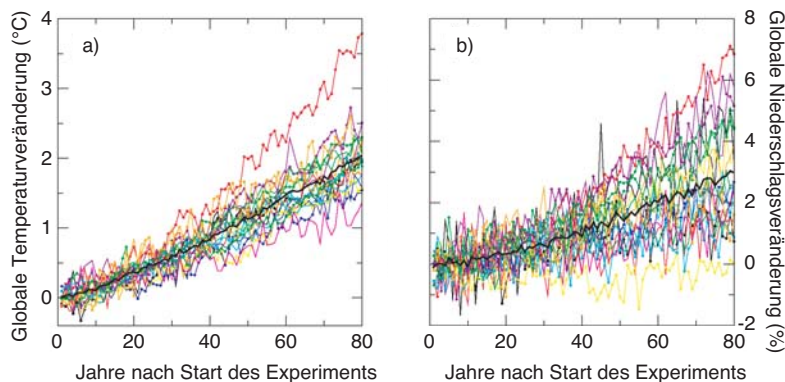


Abbildung 9: Vergleich globaler gekoppelter Klimamodelle für ein Treibhausgas-szenario mit einer Zunahme der Treibhausgaskonzentration von 1% pro Jahr.¹ Die Resultate sind dargestellt als Änderung relativ zum Mittel 1961–1990 für (a) die globale Erdoberflächentemperatur und (b) die globalen Niederschläge.

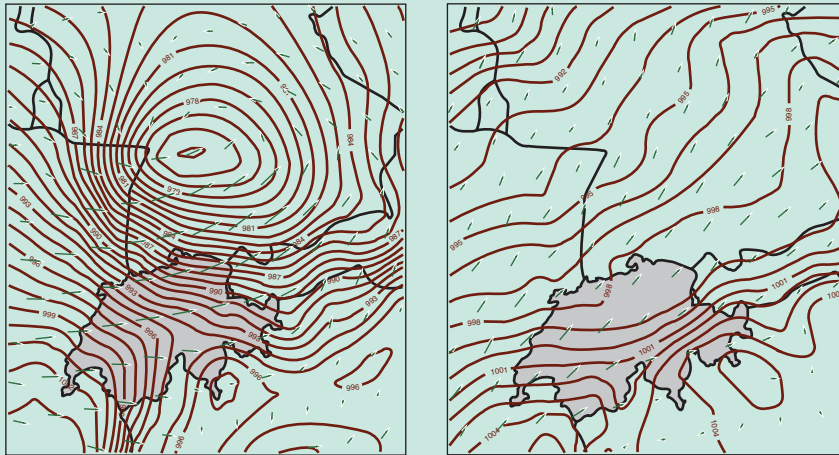


Abbildung 10: Sensitivitätsexperiment zum Lothar-Sturm.² Dargestellt sind der reduzierte Bodendruck (rote Linien im Abstand von 1 hPa) und der bodennahe Wind (grüne Windpfeile) für eine Simulation mit allen Niederschlagsprozessen (links) und für ein Sensitivitätsexperiment ohne Kondensation von Wasserdampf (rechts). Der Vergleich zeigt, dass die Bildung des Lothar-Sturmtiefs massgeblich durch Niederschlagsprozesse bestimmt war.

Lothar – eine Prozesstudie

Die Kenntnisse der entscheidenden Schlüsselprozesse und Wirkungsketten, die zu Extremereignissen führen, sind oft noch sehr unvollständig. Fortschritte lassen sich erzielen durch detaillierte Fallstudien einzelner Wettervorgänge, durch Sensitivitätsexperimente mit Computermodellen, durch Feldexperimente sowie durch die detaillierte Analyse von Trends und Schwankungen wichtiger Klimaelemente. Ein Beispiel zum Einsatz von Sensitivitätsexperimenten mit einem Wettermodell wird in Abbildung 10 illustriert. Solche Experimente erlauben eine gezielte Untersuchung ausgewählter Wirkungsketten. Im vorliegenden Fall wird untersucht, wie die Kondensation von atmosphärischem Wasserdampf das Sturmtief Lothar beeinflusst hat. Dazu wird eine so genannte Kontrollsimulation durchgeführt (Abbildung 10, links), welche das zu untersuchende Phänomen so genau wie möglich beschreibt. Anschliessend können die simulierten Prozesse in einem Experiment künstlich modifiziert werden. Im vorliegenden Fall wurde die Kondensation von Wasserdampf unterdrückt. Der Vergleich des Experiments (Abbildung 10, rechts) mit der Kontrollsimulation belegt die grosse Bedeutung der Kondensations- und Niederschlagsprozesse für die Intensivierung dieses speziellen Sturms: In der Simulation mit unterdrückten Kondensationsprozessen entsteht kein Sturmtief. Dies bestätigt, dass Niederschlagsprozesse in der Atmosphäre einen potentiell wichtigen Einfluss auf die Häufigkeit von Sturmtiefs haben können, ohne jedoch eine Szenario-artige Aussage über die Häufigkeit zu machen (da Letztere noch durch viele andere Faktoren beeinflusst wird).

Heini Wernli

Globale Klimamodelle werden angetrieben durch Szenarien der zukünftigen Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgas- und Aerosolkonzentration. Dies erlaubt eine Abschätzung der Auswirkungen auf die langfristige Entwicklung des Globalklimas. Gegenwärtig sind die Resultate von Klimamodellen noch mit grossen Unsicherheiten behaftet. Dies illustriert Abbildung 9, die einen Vergleich verschiedener gekoppelter Klimamodelle für ein Treibhausgasszenario mit einer jährlichen äquivalenten CO_2 -Zunahme von 1% zeigt. Die Modelle stimmen recht gut überein in Bezug auf die globale bodennahe Lufttemperatur.

Beim globalen Niederschlagsmittel ist die Streuung jedoch sehr gross. Die Auswirkungen für Teilgebiete (z.B. einzelne Kontinente) und die Konsequenzen für die Häufigkeit von Extremereignissen (z.B. Überschwemmungen und Dürren) sind mit noch grösseren Unsicherheiten behaftet.

Wegen des enormen Bedarfs an Rechenzeit, welche die immer komplexer werdenden Modellsysteme beanspruchen, können globale Szenarien für die nächsten Jahrzehnte auch auf den leistungsfähigsten Supercomputern nur mit einem relativ groben Rechengitter gerechnet werden. Die höchste numerische Auflösung

für gekoppelte atmosphärische/ozeanographische Modelle beträgt heutzutage nur etwa 300 km.

Modellketten zur Abschätzung regionaler Auswirkungen

Die Ursachen der Klimaproblematik sind von globalem Ausmass, die Auswirkungen können jedoch regional sehr unterschiedlich sein. Der globale Mittelwert ist deshalb nicht geeignet, um regional eine potentielle Gefährdung abzuschätzen. Zum Beispiel: Die erwarteten Veränderungen in den globalen Niederschlägen betragen nur wenige Prozent (siehe Abbildung 9b), doch erwartet man jahreszeitliche und regionale Änderungen, die teilweise zehnmal grösser sind. Es gibt auch Regionen (z.B. Teile des Mittelmeerraums), für welche die globalen Modelle eine Niederschlagsabnahme (anstelle einer globalen Zunahme) erwarten lassen, mit möglicherweise weitreichenden Konsequenzen für die Häufigkeit von sommerlichen Dürreperioden.

Eine hohe rechnerische Auflösung ist somit eine wichtige Voraussetzung für das Abschätzen regionaler Auswirkungen menschlicher Aktivitäten. Diese kann mit hochauflösenden atmosphärischen Modellen, mit regionalen Klimamodellen oder mit globalen Klimamodellen variabler Auflösung erreicht werden.^{3,4,5,6} Häufig werden eigentliche Modellketten eingesetzt, die vielfältige Phänomene unterschiedlicher horizontaler Ausdehnung berücksichtigen. Diese Methodik wird als „numerische Regionalisierung“ bezeichnet. Als Beispiel betrachte man die Modellkette in Abbildung 11. Diese erlaubt, grossräumige

Klimaänderungen rechnerisch zu verfeinern und – im vorliegenden Fall – den Wasserkreislauf auf der regionalen Skala detailliert zu beschreiben. Die illustrierte Modellkette umfasst insgesamt fünf Modelle, nämlich zwei globale Klimamodelle, zwei regionale Klimamodelle und ein regionales Abflussmodell. Letzteres dient zur Beschreibung der Abflusshydrologie im Einzugsgebiet des Rheins und soll Aufschluss über mögliche Änderungen in der Häufigkeit grossräumiger Überschwemmungen geben.

Die Qualität einer Modellkette hängt von der Qualität aller beteiligten Modelle ab. Ein feinkaliges Modell kann grossräumige Modellfehler eines antreibenden Modells nicht korrigieren, sondern nur die kontinentalen Klimamuster der antreibenden Modelle räumlich verfeinern. Für die Beschreibung von Extremereignissen, die oft von kleinskaliger Natur sind und massgeblich durch die Topographie beeinflusst werden, ist eine solche räumliche Verfeinerung von zentraler Bedeutung.^{8,9} Aufgrund der höheren Auflösung können regionale Modelle kritische Ereignisse wie Starkniederschläge und Sturmtiefs besser repräsentieren als globale gekoppelte Modelle. Die Methodik der numerischen Regionalisierung wurde auf verschiedene Kategorien von Extremereignissen angewendet, darunter Starkniederschläge¹⁰ und Hurrikane¹¹. Das für die Beschreibung der Modelle notwendige Prozessverständnis wird dabei laufend durch Feldexperimente, Fallstudien, theoretische Untersuchungen und Laborexperimente verbessert und überprüft (siehe Kasten *Lothar – eine Prozessstudie*).

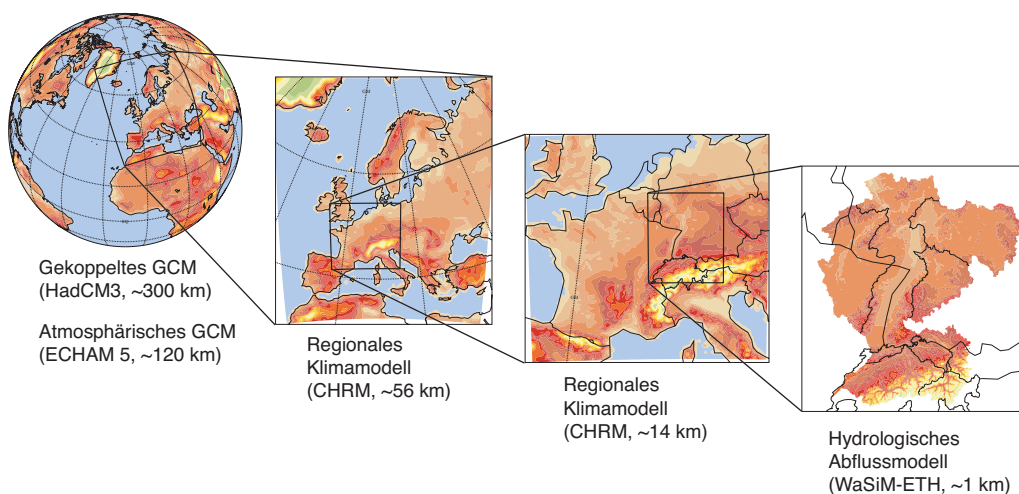


Abbildung 11: Modellkette zur Simulation regionaler Klimafolgen.⁷ Die Modellkette setzt sich zusammen aus verschiedenen Modellen mit zunehmend feinerer horizontaler Auflösung. Man beachte die verbesserte Darstellung der Topographie, welche mit dieser Methodik erreicht werden kann.

Statistische Regionalisierung

Der Rechenaufwand für die räumliche Verfeinerung von zukünftigen Klimaszenarien mittels regionaler oder hochauflösender globaler Klimamodelle ist sehr gross. In der Klimawissenschaft werden deshalb neben numerischen Modellen auch alternative Methoden der Klimaregionalisierung verwendet. Diese Methoden werden unter dem Begriff „statistische Regionalisierung“ zusammengefasst und basieren auf einem quantitativen Modell des Zusammenhangs zwischen regionalen Klimagrössen (z.B. Niederschlag in Davos) und grossskaligen Eigenschaften der Atmosphäre (z.B. Verteilung des Luftdrucks über Europa und dem Nordatlantik). Dieser Zusammenhang wird empirisch, d.h. anhand von Klimabeobachtungen in der Vergangenheit, erfasst und danach auf die Resultate von globalen Klimamodellen für ein zukünftiges Klima angewendet. Die mathematische Formulierung dieser Modelle basiert auf statistischen Konzepten oder einer Kombination von statistischen und numerischen Elementen.^{12,13}

Die einfachere mathematische Formulierung der statistischen Methoden erlaubt die Herleitung von regionalen Klimaszenarien mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand. Diese Verfahren werden deshalb vor allem zur Abschätzung von Unsicherheiten von Szenarien (z.B. durch Anwendung auf eine grosse Zahl unterschiedlicher globaler Klimamodelle⁹) oder für die Regionalisierung auf ganz kleine Raumskalen (z.B. durch Anwendung auf Resultate von regionalen Klimamodellen) angewendet.

Eine solche statistische Formulierung kann nur dann funktionieren, wenn sich die erwähnten empirischen Beziehungen im zukünftigen Klima nicht ändern. Statistische und numerische Klimaregionalisierung stellen Techniken dar, die sich gegenseitig ergänzen. Vergleiche der beiden Methoden erlauben es, wichtige Informationen über ihre Verlässlichkeit und letztlich über die Plausibilität von regionalen Klimaszenarien zu gewinnen. Neben der Anwendung auf mittlere Klimagrössen sind in den letzten Jahren auch verschiedene statistische Verfahren zur Regionalisierung von Extremereignissen entwickelt worden.^{14,15,16}

- 1 Cubasch U., G. A. Mehl et al., Projections of future climate change. Chapter 9 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 525–582, 2001.
- 2 Wernli H., S. Dirren, M. Liniger, and M. Zillig, Dynamical aspects of the life-cycle of the winter storm ‘Lothar’ (24–26 December 1999). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128, 405–429, 2002.
- 3 Wild M., L. Dümenil, and J. P. Schulz, Regional climate simulation with a high resolution GCM: surface hydrology, *Climate Dyn.*, 12, 755–774, 1996.
- 4 Lüthi D., A. Cress, H. C. Davies, C. Frei, and C. Schär, Interannual variability and regional climate simulations, *Theor. Appl. Climatol.*, 53, 185–209, 1996.
- 5 Déqué M., P. Marquet, and R. G. Jones, Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model, *Climate Dyn.*, 14, 173–189, 1998.
- 6 Giorgi F., B. Hewitson et al., Regional climate information – evaluation and projections. Chapter 10 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 583–638, 2001.
- 7 Kleinn J., *Climate change and runoff statistics in the Rhine Basin: a process study with a coupled climate-runoff model*. Ph.D. Thesis No. 14663, ETH Zürich, 114 p., 2002.
- 8 Schär C., T. D. Davies, C. Frei, H. Wanner, M. Widmann, M. Wild, and H. C. Davies, Current Alpine climate. In: Cebon P., U. Dahinden, H. C. Davies, D. M. Imboden, and C. Jäger [Eds.], *Views from the Alps: Regional perspectives on climate change*. MIT Press, Boston, 21–72, 1998.
- 9 Wanner H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg und C. Schmutz, *Klimawandel im Schweizer Alpenraum*, vdf, Zürich, 283 p., 2000.
- 10 Jones R. G., J. M. Murphy, M. Noguer, and A. B. Keen, Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. Part II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123, 265–292, 1997.
- 11 Bengtsson L., M. Botzet, and M. Esch, Will greenhouse gas induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes. *Tellus*, 48A, 57–73, 1996.
- 12 Gyalistras D., C. Schär, H. C. Davies, and H. Wanner, 1998: Future Alpine climate. In: Cebon P., U. Dahinden, H. C. Davies, D. M. Imboden, and C. Jäger [Eds.], *Views from the Alps: Regional perspectives on climate change*. MIT press, Boston 171–224.
- 13 Heimann D. and V. Sept, Climate change estimates of summer temperature and precipitation in the Alpine region. *Theor. Appl. Climatol.*, 66, 1–12, 2000.
- 14 Plaut G. and E. Simonnet, Large-scale circulation classification, weather regimes, and local climate over France, the Alps and Western Europe. *Climate Res.*, 17, 303–324, 2001.
- 15 Plaut G., E. Schuepbach, and M. Doctor, Heavy precipitation events over a few Alpine subregions and the links with large-scale circulation 1971–1995. *Climate Res.*, 17, 285–302, 2001.
- 16 Wilby R. L., H. Hassan, and K. Hanaki, Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *J. Hydrol.*, 205, 1–19, 1998.

Intensiviert sich der globale Wasserkreislauf?

Der Wasserkreislauf wird angetrieben durch die an der Erdoberfläche anfallenden kurzwelligen (solaren) und langwelligen (atmosphärischen und terrestrischen) Strahlungsflüsse. Der resultierende Energieeintrag wird als Nettostrahlungsbilanz bezeichnet. Sie wird im gegenwärtigen Klima zur Erwärmung der Atmosphäre (zu ca. 20%) und zur Verdunstung von Wasser (zu ca. 80%) verwendet. Für den Energiehaushalt an der Erdoberfläche ist der Wasseraustausch somit wichtiger als der Wärmeaustausch. Er führt über Kondensationsprozesse zu einer Erwärmung der unteren und mittleren Troposphäre.

Die Zunahme der atmosphärischen Treibhausgaskonzentrationen bewirkt in erster Linie eine Erhöhung der an der Erdoberfläche anfallenden Strahlungsenergie. Da diese Energie mehrheitlich für Verdunstung aufgewendet wird, dürfte sie nebst einer globalen Erwärmung auch eine globale Anfeuchtung der Atmosphäre bewirken: Man spricht von einer „Intensivierung des Wasserkreislaufes“.¹ Eine Intensivierung des Wasserkreislaufes hätte wichtige Auswirkungen auf die Wettersysteme, die Niederschlagsverteilung sowie auch auf Extremereignisse.

Die wichtigsten Kenngrößen des atmosphärischen Wasserkreislaufes sind Verdunstung und Niederschlag. Da die Atmosphäre nur geringe Mengen von Wasser in Form von Wasserdampf, Wolkentröpfchen und Eiskristallen enthält (im globalen Mittel entspricht der atmosphärische Wassergehalt einer Wassersäule von 26 mm), ist im globalen Jahresmittel die Verdunstung gleich gross wie der Niederschlag. Eine Intensivierung des globalen Wasserkreislaufes würde somit Verdunstung und Niederschlag im gleichen Umfange betreffen.

Beobachtungen des Wasserkreislaufes der letzten 100 Jahre

Langfristige Beobachtungsreihen von Niederschlag und Verdunstung beschränken sich fast ausschliesslich auf landgestützte Messungen mit Niederschlagssammlern und Verdunstungswannen. Die Ozeane, die 71% der Erdoberfläche ausmachen, sind dabei unterrepräsentiert.

Seit mehr als 100 Jahren liegen Beobachtungen von tausenden von Niederschlagssammlern auf allen Kontinenten vor. Sie zeigen eine leichte Zunahme des mittleren globalen Landniederschlags um 1% seit Anfang des letzten Jahrhunderts.^{2,3} Die Niederschlagszunahme ist ausgeprägt in den mittleren und hohen Breiten der nördlichen Hemisphäre (zwischen 40° und 80°N), wo die Landniederschläge um 8% zugenommen haben.⁴ Von dieser Zunahme ist insbesondere auch der Alpenraum betroffen.⁵ Andererseits wurde in den Subtropen eine Niederschlagsabnahme beobachtet.

Im Gegensatz zu den Niederschlagsmessungen beschränken sich langjährige Beobachtungen der Verdunstung vornehmlich auf Stationen in der ehemaligen Sowjetunion und in Nordamerika. Mit der Verdunstungswanne kann jedoch nicht die wirkliche Verdunstung ermittelt werden, sondern nur die hypothetische Verdunstung über einer wassergesättigten Fläche.⁶ Die wirkliche Verdunstung wird stark durch lokale Gegebenheiten (Bodenwassergehalt, Vegetation) mitbestimmt, und es ist deshalb fraglich, ob Messungen mit Verdunstungswannen als Mass für die globale Verdunstung geeignet sind. Für die letzten Jahrzehnte zeigen sie mehrheitlich (aber nicht ausschliesslich) eine Abnahme der Verdunstungssummen.⁷ Die Diskrepanz zwischen der gemessenen globalen Niederschlagszunahme und der Abnahme der Verdunstungssummen wird als „Verdunstungsparadoxon“ bezeichnet. Es gibt verschiedene Versuche, dieses Paradoxon zu interpretieren – zum Beispiel als ein Artefakt der Messung^{8,9} oder als Konsequenz der zunehmenden Bewölkung oder Aerosolkonzentration^{10,11}.

Resultate von Klimamodellen

Die allermeisten globalen gekoppelten Klimamodelle lassen in Übereinstimmung mit den oben diskutierten physikalischen Prozessen eine Intensivierung des Wasserkreislaufes erwarten. Die meisten Szenario-Läufe im neuesten IPCC-Bericht zeigen eine Zunahme der global gemittelten Niederschläge als Folge der Treibhausgaszunahme.¹² Alle Modelle für alle Szenario-Kategorien zeigen eine Niederschlagszunahme in den Tropen sowie den mittleren und hohen Breiten; in den Subtropen resultiert eher eine Niederschlagsabnahme. Diese Resultate sind qualitativ konsistent mit der Hypothese eines intensivierten Wasserkreislaufes und die regionale Ausprägung der Niederschlagszunahme stimmt überein mit den Niederschlagstrends des letzten Jahrhunderts. Die grosse Streuung zwischen den verschiedenen Modellen belegt aber, dass wichtige Prozesse des Wasserkreislaufes noch ungenügend verstanden und in den Klimamodellen noch mangelhaft dargestellt sind.⁶ Infolge der energetischen Dominanz der Verdunstung über die Erwärmung ist bei zunehmender Treibhausgaskonzentration – zumindest längerfristig – von einer Intensivierung des Wasserkreislaufes auszugehen. Dies legen auch Beobachtungen und Simulationen des gegenwärtigen Klimas nahe. Die verschiedenen Quellen streuen zum Teil signifikant, zeigen jedoch eine klare Korrelation zwischen der Nettostrahlungsbilanz an der Erdoberfläche und der global gemittelten Verdunstung.

Christoph Schär und Atsumu Ohmura

- 1 Flohn H., A. Kapala, H. R. Knoche, and H. Mächel, Recent changes of the tropical water and energy budget and of midlatitude circulations. *Climate Dyn.*, 4, 237–252, 1990.
- 2 Folland C. K., T. R. Karl et al., Observed climate variability and change. Chapter 2 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 99–181, 2001.
- 3 Dai A., I. Y. Fung, and A. D. Del Genio, Surface observed global land precipitation variations during 1900–88, *J. Climate*, 10, 2943–2962, 1997.
- 4 New M., M. Todd, M. Hulme, and P. Jones, Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *Int. J. Climatol.*, 21, 1899–1922, 2001.
- 5 Schmidli J., C. Schmutz, C. Frei, H. Wanner, and C. Schär, Mesoscale precipitation variability in the Alpine region during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, 22, 1049–1074, 2001.
- 6 Ohmura A. and M. Wild, Is the hydrological cycle accelerating? *Science*, 298, 1345–1346, 2002.
- 7 Peterson T. C., V. S. Golubev, and P. Y. Groisman, Evaporation losing its strength. *Nature*, 377, 687–688, 1995.
- 8 Brutsaert W. and M. B. Parlange, Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 396, 30, 1998.
- 9 Golubev V., J. H. Lawrimore, P. Groisman, N. A. Speranskaya, S. A. Zhuravin, M. J. Menne, T. C. Peterson, and R. W. Malone, Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. *Geophys. Res. Letters*, 28, 2665–2668, 2001.
- 10 Roderick M. L. and G. D. Farquhar, The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 298, 1410–1411, 2002.
- 11 Liepert B. G., Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. *Geophys. Res. Letters*, 29, Art. No. 1421, 2002.
- 12 Cubasch U., G. A. Meehl et al., Projections of future climate change. Chapter 9 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 525–582, 2001.

1.6. Extremereignisse aus der Perspektive des Menschen

1.6.1. Beeinflussung der Risiken und des Schadenverlaufs

Armin Petrascheck

In den Naturwissenschaften werden Naturereignisse nach physikalischen Parametern beurteilt. Aus der Sicht des Menschen steht hingegen der Schaden im Vordergrund. Er entsteht durch den Konflikt zwischen einer Nutzung und einem natürlichen Prozess. In der Schweiz werden Schadenausmass und Schadenhäufigkeit zurzeit viel stärker durch menschliche Faktoren wie Nutzungsänderungen und Wirtschaftswachstum beeinflusst als durch den vergleichsweise langsamen Prozess der Klimaänderung.

Risikobegriff

Im Unterschied zum Begriff Gefahr, der die Möglichkeit umschreibt, einen Schaden zu erleiden, wird beim Begriff Risiko das potentielle Schadenausmass mit der Eintretenswahrscheinlichkeit verknüpft. Meist wird unter einem hohen Risiko ein grosser Schaden bei einer kleinen Eintretenswahrscheinlichkeit verstanden. Bei den ortsgebundenen Naturgefahren (z.B. Hochwasser, Lawinen, Rutschungen und Felsstürze) ist das Schadenausmass meist gut bestimmbar, die Eintretenswahrscheinlichkeit jedoch nur unsicher. Beim Risiko der Klimaerwärmung sind die Verhältnisse genau umgekehrt. Die Eintretenswahrscheinlichkeit ist sehr hoch, das Schadenausmass aber sehr unsicher bis unbekannt.

Schadenentstehung als Folge dynamischer Faktoren

Schaden entsteht aus dem Konflikt zwischen einer natürlichen Einwirkung und einer Nutzung. Je intensiver die Einwirkung, je verletzbarer und je wertvoller die Nutzung, umso grösser der Schaden. Die Beeinflussung des Naturereignisses durch den Menschen wird im Kapitel 1.6.2. behandelt.

Damit Schaden entsteht, müssen für alle Naturgefahren verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Als Beispiel ist in Abbildung 12 die Wirkungskette bei Hochwasserschäden dargestellt. Auf dem Weg vom Niederschlag bis zum Schaden wirken viele dynamische Einflussgrössen, so dass nicht direkt vom Schaden auf das Naturereignis geschlossen werden darf. Die Klimaänderung beeinflusst die hydrologischen Gefahren, also vor allem den meteorologischen

Input und den Zustand des Einzugsgebietes. Eingriffe im Einzugsgebiet (Rückhalt) oder im Flussbett (Steigerung der Abflussleistung) können die Gefahr des Ausufers mindern, aber auch durch Hindernisse (Brücken) vergrössern, wie die Beispiele von Poschiavo (1987) oder Brig (1993) gezeigt haben. Von klassischen Wasserschutzbauten wird erwartet, dass sie Überschwemmungen verhindern. Sie können aber keinen vollständigen Schutz



bieten, wie die Hochwasser von 1987, 1993, 1999 und 2000 gezeigt haben. Im Vertrauen auf die Wirkung der Schutzmassnahmen wurden während Jahrzehnten Infrastrukturwerte in potentiell gefährdete Gebiete gebracht, wodurch die Schadenpotentiale anstiegen (vgl. Kapitel 1.6.3.).

Eine Verringerung des Schadenpotentials ist auch ohne Änderung der Nutzung möglich. Die Städte Köln, Regensburg oder Passau sind Beispiele dafür, dass wirtschaftliches Wachstum auch in häufig überschwemmten Gebieten möglich ist, sofern Nutzung und Bauweise angepasst an das Überschwemmungsrisiko erfolgen. Wenn ein Ereignis eintritt, kann durch Notfallmassnahmen Schaden verhütet oder begrenzt werden. Beispielsweise konnte im Oktober 2000 in Naters der Kelchbach mit provisorischen Massnahmen der Feuerwehr in seinem Bett gehalten werden.¹

Ein positives Beispiel des Zusammenwirkens verschiedenster Schutzmassnahmen ist der Lawinenwinter 1999.² Der betroffene Raum und die Anzahl der Tallawinen sind vergleichbar mit dem Winter von 1951, man kann also von einem ähnlichen Ereignis sprechen. Trotz der seit 1951 wesentlich grösseren Anzahl von Gebäuden (Parahotellerie) und trotz der grösseren Anzahl von Personen, Autos und Verkehrswege ging die Zahl der Todesopfer von 98 auf 17 und die Zahl der Gebäudeschäden von 1300 auf 720 zurück. Das heute wesentlich höhere Schadenpotential wurde durch eine konsequente Schutzpolitik (Lawinenverbauung, Gefahrenzonenausscheidung, Alarmierung und Notmassnahmen) mehr als kompensiert.

Menschliche Faktoren

Eine wichtige Ursache für die Erhöhung der Schäden ist das Wirtschaftswachstum. In der Schweiz werden jedes Jahr rund 40 Mrd. SFr. in Hoch- und Tiefbau investiert. Die verbaute Fläche (Siedlungsraum, Strassen und Wege) wächst kontinuierlich – wenn auch heute nicht mehr ganz so schnell wie in den 1970er Jahren (Tabelle 2). Die durchschnittliche Wohnfläche wächst pro Einwohner jährlich um fast einen Quadratmeter. Somit nehmen die Schäden auch bei gleich bleibenden Gefahren wegen der zusätzlich geschaffenen Werte zu.

Tabelle 2: Jährliche Zunahme der Siedlungsfläche (in ha) der Schweiz.⁴

Periode	Siedlungen	Strassen	Wege	Summe
1972–83	+1220	+1000	+680	+2900
1978–89	+1685	+250	+470	+2400
1984–95	+1620	+130	+350	+2100

Der Einfluss des Wirtschaftswachstums auf die Schadenhöhe lässt sich durch die Wahl einer geeigneten Bezugsgrösse, beispielsweise des Bruttosozialprodukts oder der Versicherungssumme, ausschalten: 1868 suchte ein grosses Hochwasser die Schweiz heim und verursachte materielle Schäden nach damaliger Währung von 14 Mio. SFr. (Abbildung 13), umgerechnet auf heutige Verhältnisse mindestens 1400 Mio. SFr.³ Beim Hochwasser von 1987 betragen die Schäden 1200 Mio. SFr.⁵ Gemessen an der Leistungsfähigkeit der Volkswirtschaft war der Schaden von 1868 bedeutend schwerer. Werden nämlich die Schadenssummen in Beziehung zum Volkseinkommen gesetzt, so entspricht der Schaden von 1987 einem gesamtschweizerischen Arbeitsaufkommen von 2.2 Tagen, jener von 1868 aber von 4 bis 6 Tagen. Abbildung 13 zeigt, wie sich die Schadenverteilung gemäss Bedeutung der wirtschaftlichen Sektoren verändert hat.

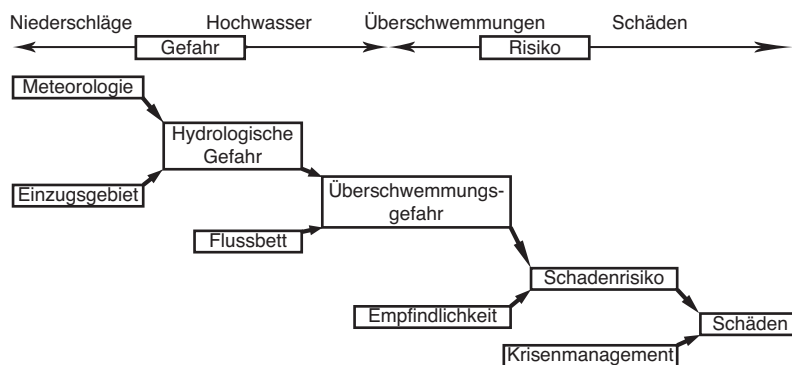


Abbildung 12: Wirkungskette bei Hochwasserschäden.³ Viele dynamische Einflussgrössen beeinflussen die Entwicklung vom Niederschlag zum Schaden. Vom angerichteten Schaden kann deshalb nicht auf die Stärke des Naturereignisses geschlossen werden.

Abbildung 13 zeigt, wie sich die Schadenverteilung gemäss Bedeutung der wirtschaftlichen Sektoren verändert hat.

Aber nicht alle Schadensveränderungen lassen sich mit dem Wirtschaftswachstum erklären. 1994 und 1999 gab es Hoch-

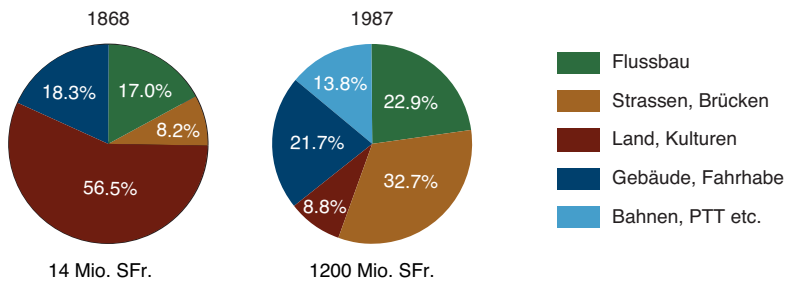


Abbildung 13: 1868 verursachte ein grosses Hochwasser materielle Schäden nach damaliger Währung von 14 Mio. SFr. (heute mindestens 1400 Mio. SFr.). Beim Hochwasser von 1987 betragen die Schäden 1200 Mio. SFr. Im Zuge der gesellschaftlichen Entwicklung verändert sich aber nicht nur das Schadenausmass, sondern auch die Art der Schäden.⁵

wasserschäden im aargauischen Reusstal. Der mittlere Schaden pro Gebäude erhöhte sich zwischen 1994 und 1999 von 4500 auf 9200 SFr. pro Gebäude (61 bzw. 87 Gebäude in 12 Gemeinden). Die Gründe sind eine erhöhte Verletzlichkeit der betroffenen Güter sowie eine geringere Schadentoleranz der Betroffenen.

Naturkatastrophen überfordern die betroffenen Gesellschaften

Aus naturwissenschaftlicher Sicht werden Naturereignisse nach physikalischen Parametern beurteilt, beispielsweise nach dem Abfluss bei Hochwasser, dem Volumen bei Bergstürzen oder der Reichweite bei Lawinen. Aus der Sicht des Menschen steht der Schaden im Vordergrund. Katastrophenstatistiken geben die Anzahl der Todesopfer, die Höhe der materiellen Schäden und den auslösenden Prozess an und enthalten – ausser bei Erdbeben – keine Angaben über die Intensität des Naturereignisses. Beispielsweise zerstörte bei den Unwettern vom Oktober 2000 im Wallis der Murgang von Fully mit einem Volumen von ca. 350'000 m³ Land und Kulturen. Bei Gondo staute sich eine Hangmure von knapp 10'000 m³ Volumen hinter einer Mauer zum Schutz vor Steinschlag, die der Belastung nicht standhielt. 10 Häuser wurden zerstört und 13 Menschen verloren ihr Leben.¹ Fully war ein Schaden, der bald in Vergessenheit geraten ist. Gondo hingegen geht als Naturkatastrophe in alle Statistiken ein.

Gemäss Definition des Zivilschutzes ist eine Katastrophe ein Schadenereignis, dessen Bewältigung die Kräfte der betroffenen Gesellschaft übersteigt (vgl. Kapitel 1.1.). Die Höhe des materiellen Schadens ist also kein eindeutiges Mass

für den Katastrophenbegriff. Als 1997 der Dorfbach die Ortschaft Sachseln verwüstete und Schäden von rund 100 Mio. SFr. verursachte, handelte es sich um eine Naturkatastrophe und die Medien berichteten detailliert. Kaum zur Kenntnis genommen wurden jedoch die Schäden in der Höhe von 70 Mio. SFr., die im Jahr darauf ein Hagelzug im Kanton Luzern hinterliess. Der Schaden verteilte sich auf eine grössere Gemeinschaft,

so dass niemand in seiner Existenz gefährdet war. Wie schon beim Vergleich der Hochwasserschäden von 1868 und 1987 gezeigt, muss der Schaden im Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit der betroffenen Gesellschaft gesehen werden. Aus dieser Sicht ist die Schweiz – trotz steigender Schadenzahlen – im Vergleich zu den vergangenen Jahrhunderten sicherer geworden.

Ein wesentlicher Motor, der zu immer höheren Einzelschäden und somit zu häufigeren Katastrophen führt, sind die Konzentrationsprozesse in der Wirtschaft. Die immer stärkere Vernetzung der Wirtschaft, der Abbau der Lagerhaltung und die Konzentration der Produktion auf wenige Standorte führten zu einer Verschiebung des Risikoprofils, schematisch dargestellt in Abbildung 14. Auch wenn das Gesamtrisiko (Flächen F1, F2 in Abbildung 14) gleich bleibt, nimmt beim System B Zahl und Ausmass der Katastrophen zu.

Verschärfend wirkt sich das Kostenbewusstsein bei der wirtschaftlichen Kalkulation aus. Beim Abwägen der „sicher“ eintretenden Kosten von risikomindernden Massnahmen gegen den „möglicherweise“ eintretenden Schaden wird – zumindest verbal – das Risiko in Kauf genommen. So ist es bekannt, dass der Lago Maggiore mehr oder weniger regelmässig über die Ufer tritt. Wegen der günstigen Lage wird der Uferbereich intensiv genutzt, aber leider nicht in einer der Gefährdung angepassten Bauweise. So erreichten im Oktober 2000 die versicherten Schäden an Gebäuden und Fahrhaben 160 Mio. SFr., fast gleich viel wie im Wallis (180 Mio. SFr.). Doch im Wallis traten die Schäden an unerwarteten Orten auf und die dynamischen Wirkungen der Murgänge und der strömenden Wasser

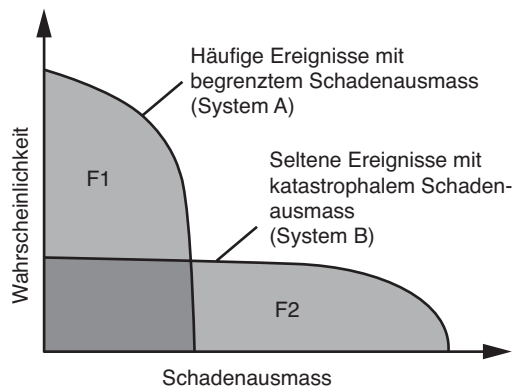


Abbildung 14: Veränderung des Risikoprofils. Wegen Konzentrationsprozessen in der Wirtschaft geht die Tendenz von Ereignissen mit begrenztem Schadenausmass und hoher Wahrscheinlichkeit gemäss System A zu seltenen Ereignissen mit viel grösserem Schadenausmass gemäss System B.⁶

begrenzten die Möglichkeiten des Selbstschutzes. Die genau gleichen Gegenden (Oberwallis und Lago Maggiore) waren bereits 1993 von schweren Unwettern heimgesucht worden. Im Wallis hatte man die Lehren gezogen und teils durch realisierte Schutzbauten und teils aufgrund einer sorgfältigen Gefahrenanalyse mit mobilen Massnahmen das Schadenausmass verringert. Am Lago Maggiore waren keine Vorsorgemassnahmen erkennbar und die Sachschäden waren deutlich höher als 1993. Anscheinend wird dieses Risiko weitgehend akzeptiert.

Klimaänderung als zusätzlicher Unsicherheitsfaktor

Schadenausmass und Häufigkeit werden weit stärker durch die dynamischen Veränderungen der Wirtschaft als durch den bisher noch vergleichsweise langsamen Prozess der Klimaänderung

beeinflusst. Der Mensch wählt die Nutzung gemäss den Chancen und Risiken des Standortes, wobei bei der Berücksichtigung der Risiken die eigene oder die historische Erfahrung ein wesentliches Entscheidungskriterium ist. Dabei werden kurzfristige Kostenvorteile mehr berücksichtigt als bestehende oder zukünftige Naturgefahren. Naturkatastrophen treten ein, wenn an bekannten Orten die Intensität der Einwirkung das bisher bekannte Mass deutlich übersteigt oder an bisher als sicher erachteten Orten neu Gefahren auftreten. Hier liegt vielleicht die grössere Gefahr der Klimaänderung, da sich mit dem Klima das System ändert und in einem empfindlichen System wie dem Alpenraum schon geringfügige Änderungen grosse Wirkungen zeigen können. Das Gegenstück, dass gewisse Orte sicherer werden, bringt kaum wirtschaftliche Vorteile, da diese Orte entweder nicht genutzt werden oder bereits durch Schutzbauten gesichert sind.

- 1 BWG, Hochwasser 2000, Ereignisanalyse. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 248 S., 2002.
- 2 SLF, Der Lawinenwinter 1999 – Ereignisanalyse. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 588 S., 2000.
- 3 IKSR, Kriterien für die Erstellung von Hochwassergefahren- und Hochwasserrisikokarten. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, Koblenz, 1999.
- 4 ARE, Landschaft unter Druck, 2. Fortschreibung. Bundesamt für Raumentwicklung, Bern, 48 S., 2001.
- 5 Petrascheck A., Die Hochwasser 1868 und 1987, ein Vergleich. WEL, 81, 1–8, 1989.
- 6 Planat, Bewertung von Naturgefahren, Umgang mit Katastrophenereignissen, Vorstudie. Ernst Basler + Partner AG, Bern, 2000.

1.6.2. Entwicklung der Schäden durch Hochwasser, Rutschungen und Lawinen

Christoph Hegg und Franziska Schmid

Lawinen, Hochwasser und Rutschungen fordern in der Schweiz jedes Jahr Todesopfer und verursachen Sachschäden. Ihre Verteilung weist in den letzten 30 Jahren keinen offensichtlichen Trend auf. Die Entwicklung der Schadenzahlen hängt vor allem von der Verteilung der seltenen Grossereignisse ab. Durch Schutzmassnahmen kann das Schadenausmass verringert werden. Eine genaue Quantifizierung der Auswirkungen von Schutzmassnahmen ist aber nicht möglich.

Entwicklung der Zahl der Todesopfer

Jedes Jahr fordern Lawinen, Hochwasser und Rutschungen in der Schweiz Todesopfer. In den letzten 30 Jahren waren dabei insgesamt rund 200 Todesopfer zu verzeichnen, was einem jährlichen Durchschnitt von etwa 7 Todesopfern entspricht.^{1,2,3} Davon entfallen etwa 60% auf Lawinen und 40% auf Hochwasser und Rutschungen. Nicht berücksichtigt sind die weit über 600 Todesopfer, die bei vorwiegend touristischen Aktivitäten ausserhalb des so genannt gesicherten Bereichs ums Leben kamen. Dazu gehören die

jährlich etwa 20 Varianten- und Tourenskifahrer oder die 21 Opfer des Canyoning-Unglücks im Saxetbach vom 27. Juli 1999.

Die Verteilung der Todesopfer bei Lawinen sowie Hochwasser und Rutschungen der letzten 30 Jahre ist sehr heterogen und weist keinen offensichtlichen Trend auf (Abbildung 15). Vielmehr heben sich besonders verlustreiche Jahre von den anderen ab. Beispielsweise waren im Jahre 2000 insgesamt 20 Unwetteropfer zu beklagen, wovon 13 Personen in Gondo ums Leben kamen. In anderen Jahren blieben solche Grossereignisse zum Glück aus. In früheren Jahren ereigneten sich einzelne Grossereignisse mit wesentlich grösseren Opferzahlen als in den letzten 30 Jahren. Im Lawinenwinter 1951 waren 98 Todesopfer zu beklagen; oder beim Hochwasser von 1868 kamen 50 Personen ums Leben. Andere Naturkatastrophen, wie z.B. der Bergsturz von Goldau, der 1806 etwa 500 Menschen unter sich begrub, können noch wesentlich grössere Opferzahlen verursachen.

Entwicklung der gesamten finanziellen Schäden

Die finanziellen Schäden, die durch Extremereignisse verursacht werden, können auf verschiedene Arten erfasst werden. Eine mögliche Grundlage dazu bieten die in Kapitel 1.6.3. erläuterten Schäden an versicherten Objekten. Da aber in der Schweiz vor allem die öffentliche Hand ihre Güter in der Regel nicht versichert, geben diese Zahlen je nach Ereignis nur einen unvollständigen Überblick über den gesamten angefallenen Schaden. Deshalb wird nachfolgend am Beispiel der durch Hochwasser und Rutschungen verursachten Schäden die Entwicklung der gesamten direkten Schäden in den letzten 30 Jahren erläutert. Die Grundlage dazu bildet die Unwetterschaden-Datenbank der WSL,



welche unter anderem systematische Schadensschätzungen enthält. Diese Schätzungen basieren auf Angaben von Gemeinden, Versicherungen etc., aber vor allem auch auf allen Zeitungsartikeln, die in der Schweiz zu diesem Thema publiziert werden.¹ Nicht berücksichtigt, da kaum fassbar, sind indirekte Schäden wie z.B. Ertragsausfälle wegen gesperrter Verkehrswege.

Die in Abbildung 16 dargestellten Schäden der einzelnen Jahre streuen um mehr als 2 Grössenordnungen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass ein Grossteil der Schäden durch einzelne grosse Ereignisse ausgelöst wurde. So haben z.B. die fünf grössten Ereignisse der letzten 30 Jahre (07.08.78, 24.08.87, 24.09.93, 15.05.99, 15.10.00) über 2/3 der gesamten finanziellen Schäden verursacht. Auf die übrigen gut 1300 Ereignisse entfallen 1/3 der Schäden. Entsprechend hängt die Entwicklung der Schadenzahlen vor allem von der Verteilung der seltenen Grossereignisse ab. Über deren Verteilung und deren Ursachen ist wenig bekannt. In den allermeisten Fällen werden sie durch aussergewöhnliche Niederschlagsereignisse ausgelöst.

Die Kurve der aufsummierten Schäden seit 1972 zeigt keinen Trend zu einer Zu- oder Abnahme der durch Hochwasser und Rutschungen verursachten Schäden. Sowohl zu Beginn als auch am Schluss des dargestellten Zeitfensters ist eine grössere Anzahl von besonders schadenträchtigen Ereignissen aufgetreten. Aussagen zu Entwicklungen über längere Zeiträume oder zu vergleichsweise schwachen Trends, die von der grossen Streuung überdeckt werden, lassen sich aus den verfügbaren Angaben nicht ableiten (vgl. Kapitel 1.4.).

Wie gross der Schaden bei einem aussergewöhnlichen Niederschlagsereignis wird, hängt von zahlreichen Faktoren und Zufälligkeiten ab.

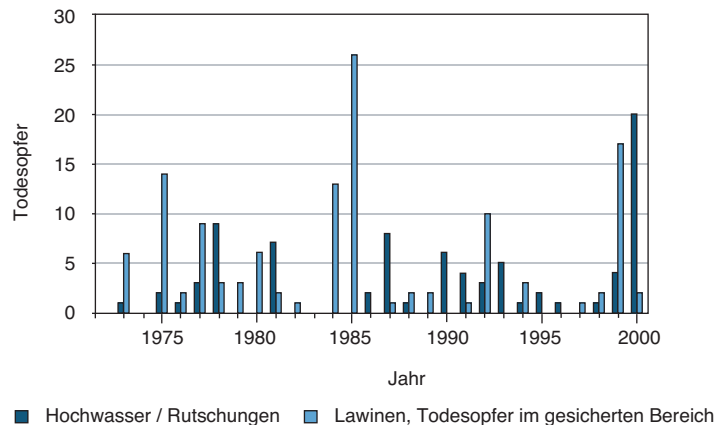


Abbildung 15: Zahl der durch Lawinen, Hochwasser und Rutschungen in den letzten 30 Jahren in der Schweiz geforderten Todesopfer. Die Verteilung weist keine offensichtlichen Trends auf.

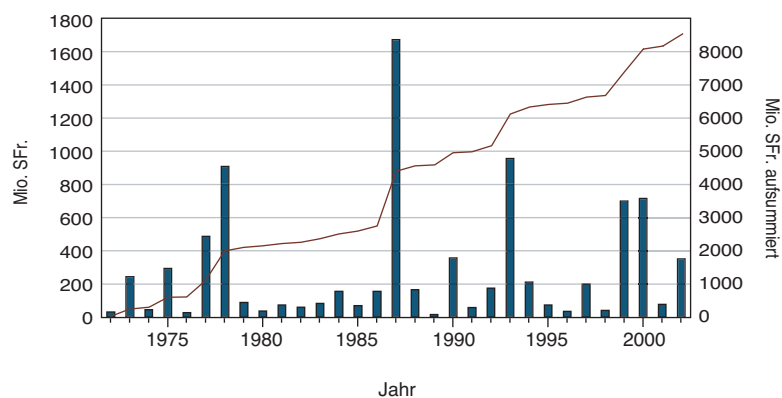


Abbildung 16: In der Schweiz durch Hochwasser und Rutschungen verursachte direkte Schäden. Die Säulen beziehen sich auf die linke Skala und stellen die jährlichen Schäden dar, inflationsbereinigt per Ende 2000. Die Kurve stellt den seit 1972 laufend aufsummierten Gesamtschaden dar und bezieht sich auf die rechte Skala.

Dabei haben Schutzmassnahmen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Ein eindrückliches Beispiel dafür ist die Dammerhöhung bei Visp, die nach dem Hochwasser vom September 1993 für wenige 100'000 SFr. ausgeführt wurde. Sie schützte im Oktober 2000 grosse Industrieanlagen vor dem Hochwasser und verhinderte vermutlich einen Schaden in Milliardenhöhe. Die Tatsache, dass ein nur wenige Zentimeter höherer Wasserstand in der Rhone dazu geführt hätte, dass die Anlagen trotz der Dammerhöhung überflutet worden wären, zeigt aber, dass die Beziehung zwischen der Grösse eines auslösenden Ereignisses und dem verursachten Schaden nicht linear ist. Vielmehr weist sie Schwellenwerte auf, die beispielsweise durch die Höhe eines Dammes gegeben sind.

Eine schweizweite Quantifizierung der Auswirkungen der in den letzten Jahrzehnten und Jahrhunderten realisierten Schutzmassnahmen auf das Schadenausmass ist nicht möglich. Diese lassen sich nur für genau dokumentierte Einzelfälle z.B. mit Hilfe von Kostenwirksamkeitsanalysen aufzeigen, wo auch der Unterhalt und allenfalls das Versagen von getroffenen Massnahmen berücksichtigt werden können. Eine Prognose, wie sich eine Zunahme von Starkniederschlägen im Zusammenspiel mit diesen und allen anderen in Kapitel 1.6.1. erläuterten Einflussfaktoren auf die zukünftigen Schadenkosten auswirken könnte, ist deshalb kaum möglich.

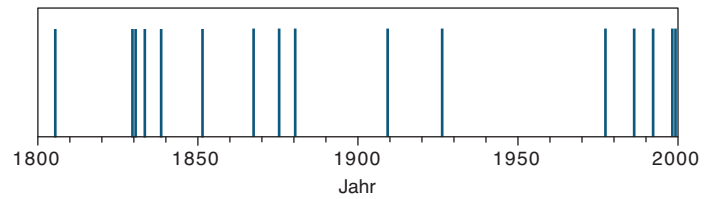


Abbildung 17: Hochwasser-Katastrophen in der Schweiz in den letzten 200 Jahren.

- 1 Hegg C., D. Gerber und G. Röhliberger, Unwetterschaden-Datenbank der Schweiz. Int. Symposium Interpraevent 2000 – Villach/Österreich. Tagungspublikation, Band 1: 37–48, 2000.
- 2 Röhliberger G., Unwetterschäden in der Schweiz. Eidg. Forschungsanstalt Wald Schnee Landschaft, 346, 51 S., 1998.
- 3 Latenser M., M. Schneebeli und R. Wüthrich, Die neue SLF-Schadenlawinendatenbank. Bündnerwald 51, 1, 35–39, 1998.

1.6.3. Schadenentwicklung der Elementarschaden-Versicherung

Dörte Aller und Ewa Kozlowski

Die Höhe der Gebäudeschäden wird neben den gefahr- und risikoändernden Einflüssen auch durch volkswirtschaftliche Faktoren beeinflusst. Die Entwicklung der Gebäudeschäden der Kantonalen Gebäudeversicherungen in der Schweiz zeigt seit Anfang der 1980er Jahre eine Zunahme der Variabilität der Schadenereignisse. Die ausserordentlichen Schäden im Jahr 1999 deuten zudem auf das enorme Schadenpotential hin.

Die Schadenentwicklung in der Elementarschaden-Versicherung wird häufig als Indiz für die Klimaänderung verwendet. Die Klimaänderung ist eine wichtige, aber nicht die einzige Einflussgrösse, welche die Schadenentwicklung beeinflusst. Neben den risikoändernden Faktoren sind die Schadenkosten auch von der wirtschaftlichen Entwicklung abhängig (vgl. Kapitel 1.6.1.). Die Einflussfaktoren werden am Beispiel der Gebäudeschäden der 19 öffentlich-rechtlichen Kantonalen Gebäudeversicherungen¹ (KGV) in der Schweiz behandelt. Seit der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts decken die KGV die durch Feuer verursachten Gebäudeschäden. Die Elementarschäden² wurden erst in den späten 1920er Jahren in die Deckung eingeschlossen.³

Datenlage

Die Elementarschäden an Gebäuden stehen für die letzten 30 Jahre aus den 19 Kantonen mit öffentlich-rechtlicher Gebäudeversicherung zur Verfügung (Abbildung 18). Da die Gebäude bei den jeweiligen kantonalen Gebäudeversicherungen obligatorisch und im Monopol gegen Feuer und Elementargefahren versichert sind, werden praktisch alle Gebäudeschäden registriert.

Die Zahlen beziehen sich ausschliesslich auf Gebäudeschäden.⁴ Um die 30 Jahresschäden vergleichen zu können, werden sie mit der Versicherungssumme des jeweiligen Jahres ins Verhältnis gesetzt. Die Verhältniszahl wird Schadensatz genannt.

Die Anpassung an die Versicherungssumme sollte ein gewisses Grundmass an Vergleichbarkeit gewährleisten, da die Versicherungssumme ständig dem Baukostenindex angepasst wird und zudem die Gebäudewerte periodisch überprüft werden.⁵

Schadenkosten- Einflussfaktoren

Die Höhe der Schadenkosten wird neben dem Schadenausmass auch von wirtschaftlichen Faktoren beeinflusst (Abbildung 19). Die Schadenkosten sind entweder versichert oder müssen vom Eigentümer selbst getragen werden.⁶

Das Schadenausmass ist nicht nur von der Stärke des Ereignisses abhängig, denn ein Extremereignis muss nicht zu einem extremen Schadenausmass führen, wenn es z.B. auf unbewohntem Gebiet stattfindet. Hingegen kann ein lediglich überdurchschnittliches Ereignis ein extremes Schadenausmass auslösen, falls es ein stark besiedeltes Gebiet mit hoher und schadenempfindlicher Wertkonzentration trifft (vgl. Kapitel 1.6.1.).

Die Schaden-Einflussfaktoren lassen sich in die gefahr- und risikoändernden Faktoren und die kostenändernden Faktoren unterteilen.



Gefahr- und risikoändernde Faktoren

Diese Faktoren haben einen Einfluss auf die Häufigkeit und das Ausmass des Schadens. Mit der Klimaänderung ändern sich die Intensität und die Wiederkehrperiode von Naturereignissen.

- Die räumliche Gefährdung kann bei mittleren und starken gravitativen Ereignissen durch Verbauungen, z.B. Dämme und Lawingalerien, begrenzt werden. Für die Extremereignisse bleibt aber immer ein Restrisiko bestehen (vgl. Kapitel 1.6.2.).
- Die Intervention der Wehrdienste kann im Eintretensfall das Schadensausmass begrenzen.
- Der effektive Schaden wird durch die Empfindlichkeit des Gebäudes beeinflusst. Dazu gehören:
 - das Bauen in gefährdeten Gebieten, z.B. in überschwemmungsgefährdeten Gebieten
 - das Ausführen von schadenempfindlichen Bauarten, z.B. tief liegende Öffnungen in überschwemmungsgefährdeten Gebieten
 - die nicht-Naturgefahren-gerechte Nutzung von Gebäuden, z.B. Nutzung des Kellers als Wohnraum in überschwemmungsgefährdeten Gebieten
 - die Verwendung von schadenempfindlichem Material, z.B. nicht hagelbeständigen Lichtkuppeln

Die Zunahme des Grundscha-denpotentials durch die Nutzung exponierter Regionen sowie durch die schadenempfindlicheren Bauweisen und Materialien lässt sich nicht leugnen.

Kostenändernde Faktoren

Diese Faktoren beeinflussen die Höhe des versicherten Schadens über betriebs- und volkswirtschaftliche Aspekte:

- die Versicherungsbedingungen, z.B. Änderung des Selbstbehaltes
- die Versicherungssumme, z.B. wurde von Zeitwert- auf Neuwertversicherung umgestellt
- das Verhalten der Versicherten, z.B. wird der Hof nicht selbst, sondern von einer Reinigungsfirma gesäubert

Die Vergleichbarkeit der langfristigen Datenreihen wird weitgehend durch die Indexierung mit der Versicherungssumme – Berücksichtigung von Teuerung und Realkapitalzunahme – gewährleis-

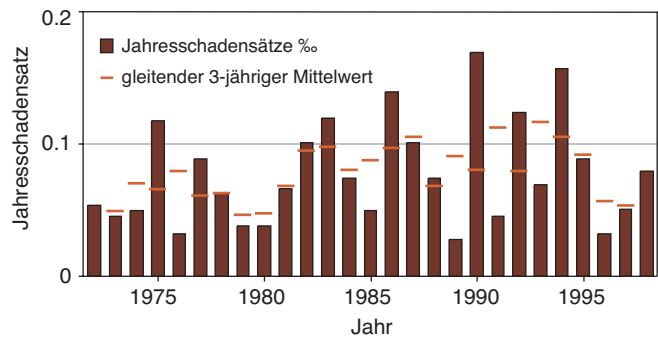


Abbildung 18: Jahresschadensätze der Gebäudeschäden der 19 Kantonalen Gebäudeversicherungen⁷ (in ‰ der Versicherungssumme, 1972–1998).

tet. Schwieriger ist die Berücksichtigung der Änderung von Versicherungsbedingungen und des Verhaltens der Versicherten.

Die verschiedenen Faktoren können kaum isoliert quantifiziert werden und sind daher auch nicht nach der Grösse ihres Einflusses aufgelistet.

Langjährige Datenreihe der Gebäudeschäden

In der Abbildung 20 sind die Schadensätze der Jahre 1972–2002 aufgetragen. Das Jahr 1999 fällt sofort auf. Die fast 30-jährige Reihe – von 1972–1998 (vgl. Abbildung 18) – gibt keinen direkten Hinweis auf die Möglichkeit eines solch extremen Schadenjahres. Die Wiederkehrperiode des Schadens von 1999 liegt zwischen 50 und weit über 100 Jahren. Dies verdeutlicht die Spannweite der Variabilität und lässt den Schluss zu, dass auch noch extremere Schäden jederzeit möglich sind.

Noch nie sind so viele Einzelschäden innerhalb eines Kalenderjahres aufgetreten wie im Jahr 1999. Fast 300'000 der knapp 2 Millionen versicherten Gebäude haben einen Schaden erlitten. Die aufsummierten Gebäudeschäden der 19 Kantonalen Gebäudeversicherungen belaufen sich im Jahr 1999 auf über 1 Mrd. SFr., bei einem Gesamtwert aller versicherten Gebäude von rund 1500 Mrd. SFr.

Die Summe pro Jahr über 19 Kantone mit KGV und über die verschiedenen Elementarge-

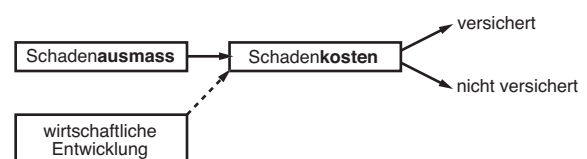


Abbildung 19: Schema der Einflussfaktoren, die die Schadenkosten bestimmen.

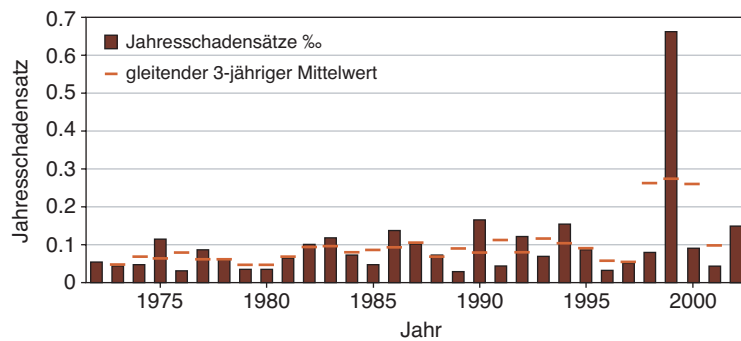


Abbildung 20: Jahresschadensätze der Gebäudeschäden der 19 Kantonalen Gebäudeversicherungen⁷ (1972–2002). Die Abstände zwischen den einzelnen Gitternetzlinien entsprechen den Abständen (Skalierung) in Abbildung 18.

fahren stellt einen gewissen Ausgleich dar. Trotzdem summierten sich im Jahr 1999 mehrere ausserordentliche Schadenereignisse und führten zu einem extremen Schadenjahr.

- Lawinen und Schneedruck im Frühjahr (ca. 80 Mio. SFr.),
- Überschwemmungen um Auffahrt und Pfingsten (ca. 200 Mio. SFr.),
- Hagelsturm am 5. Juli (ca. 80 Mio. SFr.) und
- Sturm Lothar am 26. Dezember (ca. 600 Mio. SFr.).

Die Wahl der Abrechnungsperiode – in der Versicherungswirtschaft in der Regel das Kalenderjahr – kann auch einen erheblichen Einfluss auf die Jahresschadenssummen haben. Der Lothar-Schaden ist dafür ein gutes Beispiel: Hätte sich Lothar eine Woche später ereignet, würde er das Jahr 2000 belasten und das Jahr 1999 entlasten. Um Aussagen zur Entwicklung der 30-jährigen Schadendaten machen zu können, wurde aus diesem Grund ein gleitender 3-jähriger Mittelwert berechnet.

Die Abbildung 18 zeigt einen Sprung Anfang der 1980er Jahre. Die gemittelten Schadensätze sind nach 1981 etwas höher als zwischen 1972 und 1981. Die Variabilität hat in den 80er Jahren zugenommen. Im letzten Jahrzehnt beobachtet man sogar eine noch stärkere Zunahme der Variabilität.

Die Rolle der Prävention

Auch in der Zukunft ist mit Naturkatastrophen zu rechnen. Die Verantwortung des Einzelnen und der Gemeinschaft bei der Bewältigung der Schäden muss formuliert werden. Dabei gewinnt die Prävention zunehmend an Bedeutung.

Die Kantonalen Gebäudeversicherungen dehnen den Schutz von Gebäuden, der sich im

Feuerbereich seit Jahrzehnten bewährt hat, auch auf den Elementarbereich aus.⁸ Schadenprävention heisst, bis zu einem gewissen Grad naturgefahrengerecht zu bauen. Kommt dann doch ein stärkeres Ereignis, so kann eine gut ausgebildete und ausgerüstete Feuerwehr mögliche Schäden vermindern. Die Versicherung im Obligatorium und Monopol garantiert zum Schluss, da alle Gebäude ausreichend versichert sind, dass der

Schaden vollständig ersetzt wird. Die Synergie von Schadenprävention, Schadensbekämpfung und Versicherung führt zu einem umfassenden, kostengünstigen und solidarischen Versicherungsschutz. Damit regeln die KGV die Elementarschaden-Versicherung und -Vorbeugung in der Schweiz im europäischen Vergleich vorbildlich.⁹

1 Kantonale Gebäudeversicherungen gibt es in den Kantonen: ZH, BE, LU, NW, GL, ZG, FR, SO, BS, BL, SH, AR, SG, GR, AG, TG, VD, NE, JU; Kantone ohne Kantonale Gebäudeversicherung: GE, UR, SZ, TI, AI, VS, OW.

2 Elementarschäden: plötzliche und unerwartete Schäden durch Sturm, Hagel, Überschwemmung, Lawinen, Schneedruck, Murgang, Erdbeben, Steinschlag, Felssturz, Bergsturz.

3 Wanner C., Vorbeugen – schützen – entschädigen. Die Entstehung der Elementarschadenversicherung in der Schweiz. Lizentiatsarbeit, Historisches Institut der Universität Bern, 2002.

4 Gebäudeschäden: Schäden an nicht beweglichen Teilen nach Abzug des Selbstbehaltes, ohne Schaden an Mobiliar oder Betriebsunterbruchskosten.

5 Die Bestimmung des Versicherungskapitals und die Bearbeitung der Schäden wird von geschultem internem und externem Baufachpersonal (Architekten, Bauingenieure...) durchgeführt. Aus diesem Grund und wegen der praktisch vollständigen Schadenerfassung kann die Qualität der Daten als gut bezeichnet werden.

6 In Kantonen mit Kantonalen Gebäudeversicherungen sind alle Gebäude gegen Elementargefahren versichert.

7 Die Schadenereignisse in den Kantonen ohne Kantonale Gebäudeversicherung sind in der Abbildung nicht berücksichtigt (vgl. Fussnote 1). So sind z.B. das Hochwasser in Brig 1993 oder die Überschwemmungen im Tessin und im Wallis im Oktober 2002 nicht dargestellt.

8 Kantonale Gebäudeversicherungen, Manifest der Kantonalen Gebäudeversicherungen zur Elementarschadenverhütung, 2001.

9 von Ungern-Sternberg T., Gebäudeversicherung in Europa – Die Grenzen des Wettbewerbs. Haupt Verlag, Bern, 178 S., 2002.

1.6.4. Extremereignisse aus der Sicht der Versicherungsindustrie

Gerry Lemcke

Die Schäden aus Naturereignissen schwanken von Jahr zu Jahr. Die Wachstumsrate der versicherten Schäden beträgt ungefähr 5.2% pro Jahr. Zwei Drittel aller Schäden aus Naturgefahren sind atmosphärischen Ursprungs. Jede Klimaänderung hat das Potential, Häufigkeit und Intensität dieser Ereignisse zu verändern. Die Versicherungsindustrie versucht, durch Anwendung des Vorsorgeprinzips und Entwicklung neuer Produkte auch in Zukunft ausreichende Deckung zu gewährleisten.

Das Jahr 1999 reihte sich aufgrund seiner versicherten Schadenssumme¹ von 28.6 Mrd. USD, aber auch aufgrund seiner sieben Milliarden-schäden als weltweit zweit teuerstes Jahr der Versicherungsgeschichte in die Serie rekordteurer Jahre seit 1989 ein. In der Periode 1970–2000 verzeichnet die Sigma-Statistik der Swiss Re 47 Versicherungsschäden in Milliardenhöhe: 33 davon entfallen auf die Jahre 1989–2000. Die Schäden aus Naturereignissen zeichnen sich durch eine ausserordentliche Fluktuation aus (Abbildung 21): Bei einer mittleren jährlichen Schadenlast von 20.2 Mrd. USD seit 1989 beträgt die Standardabweichung 8.2 Mrd. USD. Sturmereignisse tragen im Mittel 11.0 Mrd. USD, Erdbeben 2.0 Mrd. USD und Überschwemmungen 1.1 Mrd. USD bei. Der Rest verteilt sich auf „andere Gefahren“ wie z.B. Tornados, Hagel oder Erdbeben. Die Wachstumsrate der versicherten Naturgefahrenschäden liegt bei ungefähr 5.2% pro Jahr. Schreibt man diese Zahlen – stark vereinfachend – für die nächsten 20 Jahre fort, so sehen sich Gesellschaft

und Industrie im Jahre 2020 mit mittleren jährlichen versicherten Schäden von 60 Mrd. USD konfrontiert.

Lothar und Martin, meist unter Lothar subsumiert, gingen als Jahrhundertereignisse durch die Presse. Sie forderten über 80 Menschenleben, davon 13 in der Schweiz, und verursachten volkswirtschaftliche Schäden in der Grössenordnung von 12 Mrd. USD sowie versicherte Schäden von rund 5.8 Mrd. USD. Mit Ausnahme der Sturmschäden im Jahr 1990 durch Daria, Herta, Vivian und Wiebke wurde ein solches Schadenausmass durch Stürme in den mittleren Breiten zuvor nie erreicht. Obwohl es sich bei Lothar und Martin auf europäischer Skala lediglich um Ereignisse von mittlerer Schadenintensität handelte, zeigte das unmittelbare Aufeinanderfolgen der Stürme vielen europäischen Erstversicherern die Grenzen ihrer Deckungskapazität auf: Viele Rückversicherungsprogramme sind auf den Schutz vor einzelnen, sehr seltenen Ereignissen ausgelegt, nicht auf die Kompensation mehrerer, kurz aufeinander folgender Schadenereignisse.

Die Anfälligkeit auf Naturkatastrophen und damit das Risikopotential wurden in den letzten Jahren durch demographische Veränderungen, technologische Fortschritte sowie sozioökonomische Entwicklungen enorm erhöht. So leben heute beinahe 40% der globalen Bevölkerung in Küstenregionen, die überdurchschnittlich stark Naturgefahren ausgesetzt sind. Das Risiko, bei gleich



bleibender Gefährdung grössere Schäden zu erleiden, wird alleine durch das Anwachsen der versicherten Werte nachhaltig vergrössert. Während der letzten Dekade lagen die volkswirtschaftlichen Schäden rund 8-mal höher und die versicherten Schäden rund 12-mal höher als in den 1960er Jahren.² Auch wenn weitgehend Einigkeit besteht, dass vor allem die Zunahme der versicherten Werte diesen Trend bewirkt, dürfen Veränderungen der Häufigkeit und der Intensität von Naturgefahren wegen der Klimaänderung nicht un beobachtet bleiben.

Grösseres Risikopotential

Für die Versicherungsindustrie lässt sich das Phänomen Extremereignisse nicht auf physikalische oder statistische Grössen reduzieren. Vielmehr ergeben sie sich aus dem Zusammenwirken von Ereignisintensität, Ereignishäufigkeit und den durch das Ereignis betroffenen materiellen oder immateriellen Werten. Für die Beurteilung von Extremereignissen im versicherungstechnischen Sinne ist die Verknüpfung mit dem verursachten monetären Schaden zwingend. Aus humanitärer Sicht ist diese Sichtweise jedoch zu hinterfragen. Es muss stets bewusst bleiben, dass für alle nicht versicherten Schäden der Eigentümer oder die Allgemeinheit aufkommen muss. Für Entwicklungsländer hat dies zum Teil schwerwiegende Folgen, wie der Hurrikan Mitch, der Honduras 1998 verwüstete und über 9000 Menschenleben forderte, gezeigt hat.

Rund zwei Drittel aller Schäden aus Naturgefahren sind atmosphärischen Ursprunges. Sie werden also z.B. durch Stürme, Überschwemmungen oder Hagel verursacht. Jede Klimaänderung – eine Änderung des globalen atmosphärischen Energiehaushaltes – hat grundsätzlich das Potential, regional oder auch nur lokal Häufigkeit und Intensität von Klimaereignissen zu verändern.

Die Klimaänderung wird meist nur als Änderung langjähriger Mittelwerte diskutiert. Oft wird dabei übersehen, dass Mittelwerte letztlich eine Verteilung beschreiben. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

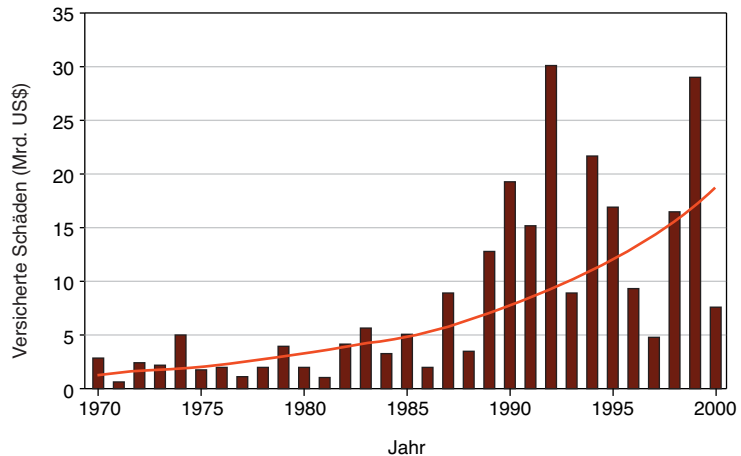


Abbildung 21: Versicherte Schäden bei Naturkatastrophen 1970–2000 in Mrd. USD bei Preisniveau 2000 (Swiss Re Sigma-Statistik, inflationsbereinigt).

- Jede Verschiebung des Mittelwertes ist durch eine Verschiebung der Häufigkeit bzw. Intensität der Ereignisse verursacht. Es können sowohl „normale“ als auch seltene Ereignisse zunehmen. Ändert sich die Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Ereignisse, hat das einen starken Einfluss auf die Grösse eines geschätzten Höchstschadensszenarios (EML-Szenario), das über sehr seltene, extreme Ereignisse definiert ist.
- Nehmen mittelgrosse Ereignisse zu, hat das einen unmittelbaren Einfluss auf die so genannte Grundschaadenlast: Diese Ereignisse absorbieren dann einen grossen Teil der für seltenere Naturkatastrophen zurückgelegten Prämien.

Ob und in welchem Umfang die globale Erwärmung zu einer Intensivierung von Naturgefahren sowie zu Verschiebungen ihrer Häufigkeit führt, ist gegenwärtig nicht klar zu beantworten. Während die Intensivierung des Wasserkreislaufes mit erhöhten Starkniederschlagsereignissen in einzelnen Regionen Europas bereits eingetreten zu sein scheint, fehlen z.B. klare Indizien hinsichtlich einer Veränderung bei den Wintersturmereignissen. Dabei ist es offensichtlich, dass bereits eine leichte Häufigkeitszunahme von Stürmen der Stärke Lothars zu massiven Auswirkungen nicht nur auf zukünftige Versicherungsprämien führt.³

Rolle und Möglichkeiten der Rückversicherung

Die Versicherungsindustrie beobachtet die seit etwa 10 Jahren markant steigenden Schadenzahlen mit grosser Aufmerksamkeit. Die wichtigsten Instrumente, die auch in Zukunft ausreichen-

de Deckung gewährleisten sollen, sind die Anwendung des Vorsorgeprinzips, einschliesslich eines proaktiven Risiko-Managements/Risiko-Assessment basierend auf neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen, sowie, neben klassischen Versicherungslösungen, die Entwicklung neuer innovativer Produkte wie Kapitalmarkttransfers (so genannte Cat-Bonds) oder Wetterderivate.

Risiko-Management ist deutlich weiter gefasst als ingenieurtechnische Bauten zur Abwehr von Naturgefahren. Es schliesst in starkem Masse eine Bewusstseinsbildung ein. Die Öffentlichkeit muss sich bewusst werden, in welchem Ausmass die heutigen Technologien und modernen Lebensformen im Zusammenspiel mit den sich ändernden Klimabedingungen ein Risikopotential schaffen, das nicht in jedem Falle und in heutiger Form von Dritten übernommen und absorbiert werden kann. Wenn bewusst in hochexponierten Gebieten wie Überschwemmungsgebieten gebaut wird, so ist das daraus resultierende erhöhte Risiko vom Einzelnen allein oder in Form erhöhter Risikoprämien zu tragen und sollte nicht auf die Allgemeinheit überwältigt werden. Im Falle von Veränderungen, die die Allgemeinheit betreffen, wie beispielsweise eine Zunahme von Hochwassern wegen der Klimaänderung, müssen die verfügbaren Deckungskapazitäten für Grossschäden und nicht für Bagatellschäden eingesetzt werden. So wird heute bei einem Selbstbehalt von 0.2% der Versicherungssumme bei der Schadenbewältigung ein Grossteil der Gelder durch Klein- und Kleinstschäden absorbiert, die für den Einzelnen nicht existenzgefährdend sind.

Risiko-Assessment, als Teil des gesamtheitlichen Risiko-Managements, ist die Anwendung naturwissenschaftlichen *Know-hows* bei der Beurteilung von Naturgefahrenrisiken. Probabilistische Modelle, welche die Naturgefahr, die Werteverteilung, die geographische Verteilung und die Versicherungsbedingungen möglichst realistisch abbilden, helfen, über Schaden-

frequenzkurven auch seltene Ereignisse mit hinreichender Genauigkeit abzuschätzen. Neben einer genauen geographischen Kenntnis der exponierten Werte und ihrer Qualität ist es entscheidend, einen vollständigen Katalog historischer Ereignisse verfügbar zu haben.

Durch die konsequente Weiterentwicklung klassischer Versicherungsmodelle (z.B. nicht-proportionale Versicherungsmodelle oder Alternativer Risk Transfer) wurden die verfügbaren Versicherungs- und Rückversicherungskapazitäten ständig erweitert. Die Möglichkeiten sind jedoch nicht beliebig ausbaubar, umso mehr, weil Kapazitäten vor allem in Gebieten mit bereits hoher Deckungsdichte nachgefragt werden. Dies widerläuft der Notwendigkeit zur Diversifikation, also einem Ausgleich der Risiken über Raum und Zeit. Damit verbunden sind massiv steigende Preise, die solche Deckungen in gewissen Gebieten unerschwinglich machen könnten.

Es ist eine wesentliche Aufgabe der Versicherungsindustrie, für ihren eigenen Schutz und den ihrer Versicherten die tatsächlichen und möglichen direkten und indirekten Folgen des Klimawandels abzuschätzen. Trotz grossen Unsicherheiten über die tatsächlichen Auswirkungen muss dies so früh wie möglich geschehen. Die Entwicklung von Produkten, die einer veränderten Nachfrage – beispielsweise nach Überschwemmungsdeckungen – gerecht werden, braucht nämlich Zeit.

- 1 Es werden ausschliesslich Schäden aufgrund von Naturereignissen diskutiert. Menschenverursachte Extremereignisse wie die Terroranschläge vom 11. September 2001 in den USA bleiben unberücksichtigt.
- 2 Müncher Rück, Nat Cat Service, 2001.
- 3 Swiss Re, Despite continued price erosion and overcapacity: Cat markets on the rebound? 1999.

Teil 2

Wissensstand

2.1. Temperaturextreme

Patricia Jungo

Die warmen und kalten Temperaturextreme haben sich im Verlauf des 20. Jahrhunderts in allen Jahreszeiten erhöht. In hohen Lagen war eine markante Zunahme der warmen Extreme im Winter zu beobachten. In den tiefen Lagen sind die kalten Extreme etwas weniger häufig vorgekommen. Auch im 21. Jahrhundert dürften die Temperaturen von warmen und kalten Extremen mit der erwarteten Klimaerwärmung ansteigen.

Einleitung

Langzeitliche Veränderungen der bodennahen Temperaturen können vielfältige Auswirkungen auf Ökosysteme (speziell auf Pflanzen¹), den Bodenwasserhaushalt, Gletscher und Permafrost haben (vgl. Kapitel 2.8.). Dabei sind nicht nur die Veränderungen in den mittleren Temperaturen sondern auch das Vorkommen von Temperaturextremen zentral. Neben den Auswirkungen auf die erwähnten Bereiche können extreme Warm- und Kaltperioden Langzeitschäden an Ökosystemen und landwirtschaftlichen Kulturen anrichten oder gar gesundheitliche Risiken für Mensch und Tier darstellen. Extreme Temperaturen können auf verschiedene Arten wahrgenommen werden. Massgebend sind ihre Dauer und die regionale Ausdehnung. Die extremsten Formen sind Hitze- und Kältewellen, die weite Landesteile erfassen. Man denke an den eisigen Winter 1962/63 oder den Hitzesommer 1947.² Bei der Untersuchung von Trends und möglichen Änderungen in der Zukunft sind Temperaturextreme mit solch langen Wiederkehrperioden jedoch wenig aussagekräftig (vgl. Kapitel 1.4.). In diesem Kapitel wird deshalb die

Entwicklung von „gemässigten“ Temperaturextremen diskutiert, nämlich die 10% wärmsten und 10% kältesten Maximum- und Minimumwerte einer Jahreszeit. Zur Vereinfachung können die Maximumtemperaturen auf den Tag und die Minimumtemperaturen auf die Nacht bezogen werden.

Die bodennahen Temperaturen in der Schweiz unterliegen starken jahreszeitlichen Schwankungen und, bedingt durch das sehr unterschiedliche Gelände, starken regionalen und lokalen Einflüssen. Hier unterscheiden wir grob zwischen alpinen Regionen oberhalb 1500 m und den tiefen Regionen unterhalb 800 m nördlich der Alpen. Die alpine Region ist besonders wichtig, weil es in diesen Höhen Ökosysteme gibt, die gut ans lokale Klima angepasst sind und deshalb empfindlich auf Veränderungen reagieren könnten. Zudem sind die Temperaturmessungen in diesen abgeschiedenen Gebieten weniger von nicht-natürlichen Einwirkungen (z.B. der Urbanisierung) beeinflusst.³

Beobachtete Trends im 20. Jahrhundert

Im 20. Jahrhundert fand sowohl in alpinen als auch in tiefen Regionen in allen Jahreszeiten eine

Erwärmung der warmen sowie der kalten Extreme statt. Seit 1900 wurden die wärmsten Tage, die wärmsten Nächte sowie die kältesten Tage und die kältesten Nächte je nach Jahreszeit zwischen 0 und 3,3°C wärmer.⁴

Zusätzlich veränderte sich das Vorkommen von warmen und kalten Extremen. Im Jahresvergleich haben die kalten Extreme vor allem in den Wintermonaten abgenommen.⁵ Insbesondere in den 1990er



Jahren war im Winter, Frühling und Sommer die Häufigkeit warmer Extreme deutlich höher und die Zahl kalter Extreme deutlich niedriger als im Durchschnitt der 90 Jahre zuvor. Die markanteste Veränderung fand bei den warmen Extremen im Winter in alpinen Regionen statt (Abbildung 22). In den 1990er Jahren zählte man durchschnittlich 16 warme Tage und 17 warme Nächte, während in vorhergehenden, vergleichbar langen Zeitspannen nur immer zwischen 1 und 9 warme Tage und Nächte gezählt wurden.

In den tieferen Regionen beruht die Erwärmung eher darauf, dass die kalten Extreme etwas weniger häufig vorkommen. Im Schweizer Mittelland wurden in den 1990er Jahren 50 Frosttage weniger gezählt als im ersten Jahrzehnt des Jahrhunderts (vgl. Kapitel 2.2.).⁶

Einflussfaktoren der Klimaänderung

Eine Klimaänderung kann sich über verschiedene Prozessketten auf die Temperaturen auswirken. An erster Stelle steht der direkte Einfluss des erhöhten Treibhauseffekts als Folge der Zunahme in der Treibhausgaskonzentration, der eine Erwärmung bewirkt. Die bodennahen Temperaturen werden aber auch von dynamischen Prozessen gesteuert, wobei die grossräumige Verteilung der Drucksysteme die Herkunft der Luftmassen bestimmt. So besteht in der Schweiz ein enger Zusammenhang zwischen dem Vorkommen der Wetterlagen⁷ und der Häufigkeit warmer oder kalter Temperaturextreme (vgl. Kapitel 1.3.). Zum Beispiel wird die vergleichsweise geringe Häufigkeit von kalten Wintertagen während der 1990er Jahre als Folge einer Zunahme von Hochdruck- und Westwindlagen auf Kosten der kalten Bisenlagen verstanden. Dieser Wandel scheint in enger Beziehung zu stehen mit Veränderungen in der atmosphärischen Strömung über dem Nordatlantik und der damit beobachteten Zunahme im Index der Nordatlantischen Oszillation (NAO-Index).⁸ Ob diese Strömungsänderungen eine Folge der globalen Klima-

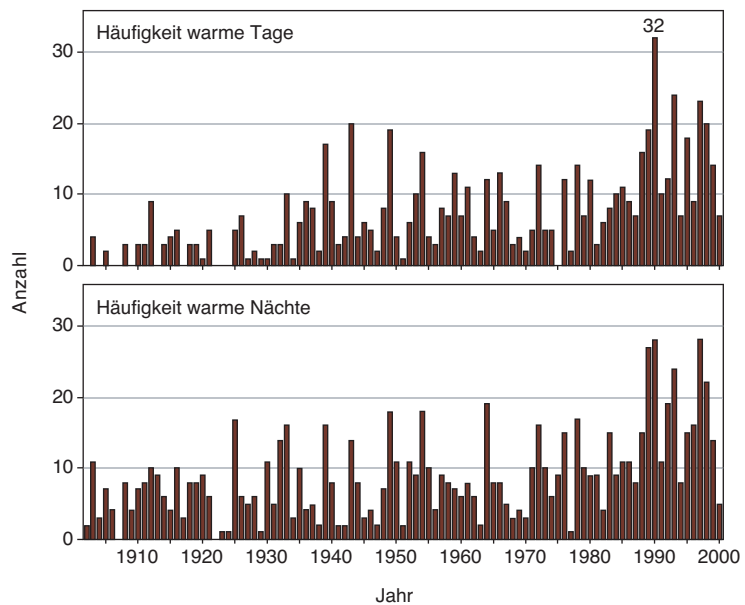


Abbildung 22: Anzahl warme Temperaturextreme 1902–2000 während der Wintermonate in alpinen Regionen (oberhalb 1500 m). Der Schwellenwert wurde als 90. Perzentile der Maximumtemperaturen (Tag) und der Minimumtemperaturen (Nacht) der klimatologischen Referenzperiode 1961–1990 definiert.⁴ D.h., als Schwellenwert wurde nicht der höchste Maximum- oder Minimumwert der Referenzperiode gewählt, 10% der gemessenen Maximum- bzw. Minimumtemperaturen liegen über diesem Schwellenwert.

änderung oder Ausdruck einer speziellen Phase der natürlichen Klimavariabilität sind, ist zurzeit noch unklar.

Neben dem Treibhauseffekt und den dynamischen Einflüssen spielen auch lokale Bodenbedingungen und die Wolkenbedeckung eine Rolle: Zum Beispiel modifiziert die Schneedecke den Strahlungshaushalt und die unter einer Erwärmung erwartete Reduktion in der winterlichen Schneebedeckung könnte damit zu einer regionalen Verstärkung der Erwärmung führen. Dieser Prozess dürfte vor allem für winterliche Temperaturextreme relevant sein.

Einfluss der Klimaänderung

Die erwartete Erwärmung der mittleren Temperaturen im Laufe des 21. Jahrhunderts ist mit grosser Wahrscheinlichkeit mit einer Erhöhung der Temperaturextreme in Europa verknüpft. Eine Analyse der in einem globalen Klimamodell simulierten 20-jährlichen Temperaturextreme für das Ende des 21. Jahrhunderts zeigt einen allgemeinen Anstieg der Temperaturminima und -maxima.⁹ Bei den Minima liegen die Änderungen gegenüber dem heutigen Klima je nach Region zum Teil über 5° und bei den Maxima zwischen 1 und 4°. Die regionalen

Muster zeigen, dass die kalten Extreme vor allem in Gebieten höher werden, wo die Schneedecke abnimmt, und die warmen Extreme vor allem in Gebieten, wo die sommerliche Bodenfeuchte abnimmt. Für den Alpenraum ist ein Szenario mit abnehmender Bodenfeuchte sehr unsicher, aber eine Reduktion der Periode mit Schneedecke im Winter ist plausibel. Interessanterweise sind die simulierten Erwärmungen der Extreme grösser als diejenigen der Mittel.¹⁰ Auch wenn die Interpretation der Modellergebnisse für die kalten Extreme im Alpenraum eine gewisse Sensitivität nahe legt, sollten die erwähnten Zahlenwerte vorsichtig gewertet werden. Änderungen in der grossskaligen Strömung werden eine wichtige Komponente zur regionalen Änderung in Temperaturextremen beitragen. In diesem Punkt gelten die heute vorliegenden Modellrechnungen aber als sehr unsicher.

- 1 Defila C. and B. Clot, Phytophenological trends in Switzerland, *Int. Journal of Biometeorology*, 45, 208–211, 2001.
- 2 Pfister C., *Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496–1995*, Haupt Verlag, Bern, 304 S., 1999.
- 3 Beniston M. and M. Rebetez, Regional behavior of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979–1993, *Theor. Appl. Climatol.*, 53, 231–243, 1996.
- 4 Jungo P., 20th century minimum and maximum temperature variations analysed on a regional scale in Switzerland – statistical analyses on observational data, Ph.D. Thesis No. 1365, University of Fribourg, Switzerland, 221 p., 2001.
- 5 Rebetez M., Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland, *Theor. Appl. Climatol.*, 69, 13–21, 2001.
- 6 Heino R., R. Brazdil, E. Forland, H. Tuomenvirta, H. Alexandersson, M. Beniston, C. Pfister, M. Rebetez, G. Rosenhag, S. Rösner, and J. Wibig, Progress in the study of climatic extremes in northern and Central Europe, *Climatic Change*, 42, 151–181, 1999.
- 7 Schüepp M., *Klimatologie der Schweiz*, Band III, in: Beiheft zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt, Zürich, 89 S., 1978.
- 8 Wanner H., R. Rickli, E. Salvisberg, C. Schmutz, and M. Schüepp, Global climate change and variability and its influence on Alpine climate – concepts and observations, *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 221–243, 1997.
- 9 Kharin V. V. and F. W. Zwiers, Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled Atmosphere-Ocean GCM, *J. Climate*, 13, 3760–3788, 2000.
- 10 Gregory J. M. and J. F. B. Mitchell, Simulation of daily variability of surface temperature and precipitation in the current and 2xCO₂ climates of the UKMO climate model, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 121, 1451–1476, 1995.

2.2. Frostrisiko

Claudio Defila

Frost verursacht oft Schäden an Kulturen. Da nicht nur die Minimumtemperatur, sondern auch der Entwicklungsstand der Pflanzen das Schadenausmass bestimmt, sind in der Schweiz vor allem die Spätfröste im Frühling gefürchtet. Die Entwicklungsstadien einiger Pflanzen haben sich in der Schweiz seit 1951 im Frühling um durchschnittlich 11.6 Tage verfrüht und im Herbst um 1.7 Tage verspätet. Gleichzeitig ereignete sich in den letzten 30 Jahren bei einzelnen Messstationen der letzte Frosttag im Frühling immer früher im Jahr. Mit der Klimaänderung wird sich das Frostrisiko auch in Zukunft verändern. Es ist aber nicht möglich, eindeutig eine Erhöhung oder eine Verminderung des Frostrisikos vorauszusagen.

Einleitung

In der Klimatologie wird von einem Frosttag gesprochen, wenn die Minimumtemperatur unter 0°C sinkt. In der Biometeorologie, die den Einfluss von Wetter und Klima auf die Lebewesen untersucht, muss der Begriff Frost differenzierter betrachtet werden. In der Agrarmeteorologie wird nur dann von Frost gesprochen, wenn Schäden an den Kulturen entstehen. Weil die Frostresistenz der Pflanzen sich mit der Vegetationsentwicklung verändert, handelt es sich nicht immer um einen Frosttag, wenn die Minimumtemperatur unter 0°C sinkt. Dem Frost kommt deshalb je nach Jahreszeit eine unterschiedliche Bedeutung zu. Entsprechend wird auch der Frost nach dem jahreszeitlichen Auftreten definiert.

Winterfröste haben in der Schweiz eine geringe Bedeutung. Die einheimischen Pflanzen sind den tiefen Temperaturen im Winter angepasst. Sie können Wintertemperaturen bis -30°C ohne Schäden ertragen. Exotische Kulturpflanzen oder Zierpflanzen hingegen können bereits bei weniger tiefen Temperaturen im Winter Schäden erleiden. In den Jahren 1985 und 1987 gab es in einigen Regionen der Schweiz Schäden bei den Weinreben, als die Temperaturen im Winter unter -20°C sanken.

Frühfröste im Herbst sind in der Schweiz kein grosses Problem. Lediglich bei der Lagerung von Feldfrüchten im Freien oder beim Gemüsebau können Schäden entstehen.

Die *Spätfröste* im Frühling sind in der Schweiz sehr gefürchtet. Aus diesem Grund erstellt MeteoSchweiz in den Monaten April/Mai Frostwarnungen. Spätfröste können je nach Zeitpunkt im Obst-, Reb- und Gemüsebau grosse Schäden anrichten, da die Pflanzen im Frühling je nach Stand der Vegetationsentwicklung unterschiedlich empfindlich sind (Abbildung 23). So können geschlossene Blütenknospen Temperaturen bis -8°C ertragen, ohne dass Schäden entstehen. Völlig geöffnete Blüten hingegen ertragen nur noch Temperaturen leicht unter dem Gefrierpunkt.

Bei der Beurteilung von Frostereignissen spielen also die Minimumtemperatur, die Jahreszeit und die Länge der Frostperiode eine Rolle. Eine einheitliche Definition eines extremen Frostereignisses ist deshalb nicht möglich. In den folgenden Ausführungen benutzen wir die Definition der Agrarmeteorologie und beziehen uns auf Frostereignisse, die Schäden an den Kulturen verursachen.



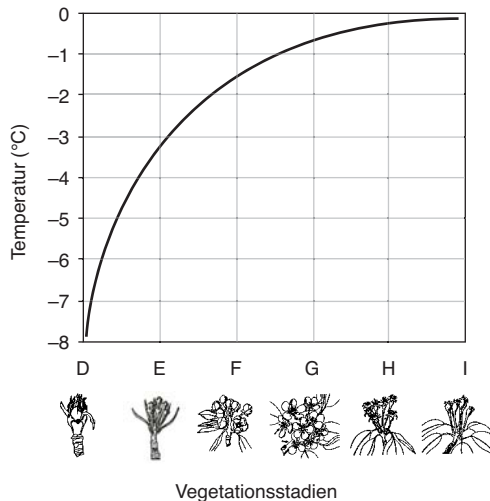


Abbildung 23: Frostempfindlichkeit der Birnen bei unterschiedlichen phänologischen Stadien.

Meteorologische Bedingungen

Spätfröste werden aufgrund ihrer Entstehung unterteilt in so genannte Advektivfröste, Verdunstungsfröste und Strahlungsfröste. In der Schweiz sind die Strahlungs- und Advektivfröste von Bedeutung.

Advektivfröste treten auf, wenn kalte Luftmassen vorwiegend aus Norden bis Osten herangeführt werden. Sie werden also von der grossräumigen Zirkulation in der Atmosphäre beeinflusst und sind nicht von der Tageszeit und nur in geringem Mass von der Bewölkung abhängig.

Der Strahlungsfrost entsteht bei einer negativen Strahlungsbilanz, wenn die Abstrahlung des Bodens oder der Pflanzen grösser ist als die Einstrahlung. Solche Situationen kommen oft im Frühling bei wolkenlosem Himmel und in den frühen Morgenstunden vor.¹

Phänologische Trends

In der Schweiz werden seit 1951 landesweit Erhebungen zu den jahreszeitlichen periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen von Pflanzen durchgeführt. Es existieren zusätzlich zwei sehr lange Zeitreihen von der Vollblüte der Kirschbäume in Liestal seit 1894 (Abbildung 24) und vom Blattausbruch der Rosskastanien in Genf seit 1808.

Eine Trendanalyse aller Daten der Periode 1951–1998 ergibt eine Verschiebung und eine Verlängerung der Vegetationszeit. Es handelt sich dabei insbesondere um eine Verfrühung der Frühlingsphasen (Blattentfaltung, Vollblüte) um 11.6 Tage. Bei den Herbstphasen (Blattverfärbung, Blattfall) zeigt sich eine leichte Verspätung um 1.7 Tage. Allerdings bestehen grosse regionale Unterschiede.²

Ein früherer Start der Vegetationsperiode kann das Risiko von Frostschäden erhöhen, da die Anzahl von Frostereignissen im März im Mittel höher ist als im Mai. Ein früheres Erwachen der Vegetation kann dazu führen, dass die Landwirte früher mit der Aussaat beginnen und dadurch das Risiko von Frostschäden erhöht wird.

Diesem Risiko erhöhter Frostschäden wirkt aber entgegen, dass in den letzten 30 Jahren bei einzelnen Messstationen der letzte Frosttag früher im Frühjahr aufgetreten ist. Beispielsweise tritt in Zürich der letzte Frosttag heute im Schnitt ungefähr 10 Tage früher auf als noch 1975 (Abbildung 25).

Einfluss der Klimaänderung

Die Klimaänderung kann sich auf verschiedene Arten auf Frostereignisse auswirken:

- (a) *Zunahme der Minimumtemperatur*
Die heute verfügbaren Klimamodellergebnisse weisen für das späte 21. Jahrhundert eine Tendenz zu weniger häufigen kalten Temperaturextremen auf (siehe Kapitel 2.1.). Insbesondere wurde eine Erhöhung der Nachttemperaturen im 20. Jahrhundert festgestellt.³ Dieser Faktor könnte zu einer

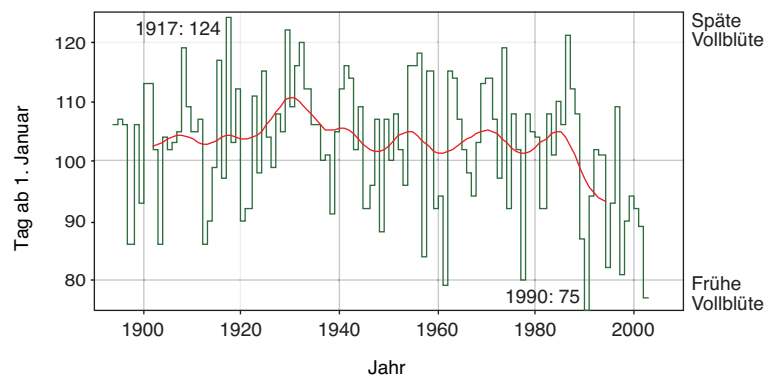


Abbildung 24: Eintrittsdaten der Vollblüte der Kirschbäume von Liestal 1894–2001. Seit den 1980er Jahren blühen die Kirschbäume tendenziell immer früher im Jahr. Die Vegetationsperiode hat sich gegen das Frühjahr hin verlängert.

Reduktion des Frostrisikos beitragen.

(b) *Veränderung der atmosphärischen Zirkulation*

Die Klimaänderung kann die grossräumigen Zirkulationen in der Atmosphäre beeinflussen. Bei veränderten Strömungsverhältnissen in der Atmosphäre können Advektivfröste häufiger oder auch seltener auftreten. Die in den heute verfügbaren Klimamodellen simulierten Zirkulationsänderungen sind noch sehr widersprüchlich und lassen derzeit auch keine qualitativen Aussagen zu.

(c) *Veränderung der Bewölkung*

Bei den Spätfrösten spielen die Bewölkungsverhältnisse eine grosse Rolle. Bei wolkenlosem Himmel ist die nächtliche Abkühlung grösser als bei bedecktem Himmel. Sollte die Bewölkung infolge höherer Temperaturen und grösserer Verdunstungsrate zunehmen, könnte die Anzahl Frosttage abnehmen.

Es ist möglich, dass das Frostrisiko in der Schweiz durch die Klimaänderung verändert wird. Die Erkenntnisse über Änderungen der grossräumigen Zirkulationen, der Bewölkungsverhältnisse und der Verfrühung des Vegetationsbeginns lassen erst Spekulationen zu. Beim heutigen Wissensstand ist es nicht möglich, eindeutig eine Erhöhung oder eine Verminderung des Frostrisikos vorauszusagen, da sich zwei wichtige Parameter ändern können: die Vegeta-

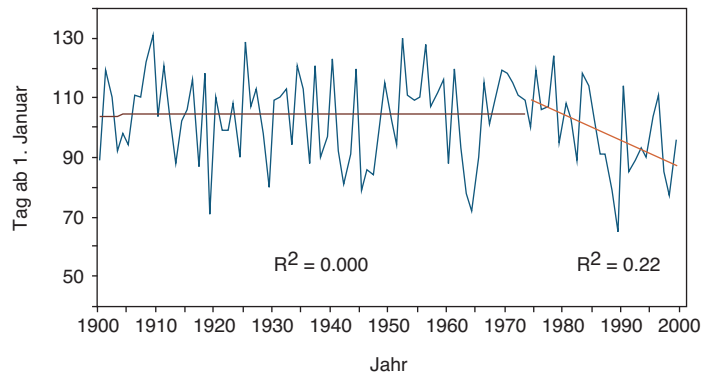


Abbildung 25: Der letzte Spätfrösts trat an der Messstation in Zürich seit 1975 tendenziell immer früher im Jahr auf. Diese Tendenz ist nicht an allen Stationen der Schweiz feststellbar.

tionsentwicklung und die Temperaturen. Zudem kann eine einzige Frostnacht die Pflanzenkulturen stark schädigen. Auch wenn das Risiko von Frosttagen möglicherweise abnimmt, kann das Auftreten von einzelnen Frostepisoden, die die Pflanzen schädigen, nicht ausgeschlossen werden.

- 1 Brändli J., Das Frostrisiko im Frühling an ausgewählten Standorten in der Schweiz, 1961–1990, *Klimatologie* 1961–1990, 82 S., 1994.
- 2 Defila C. and B. Clot, Phytophenological trends in Switzerland, *Int. Journal of Biometeorology*, 45, 208–211, 2001.
- 3 Rebetz M., Changes in daily and nightly day-to-day temperature variability during the twentieth century for two stations in Switzerland, *Theor. Appl. Climatol.*, 69, 13–21, 2001.

2.3. Trockenheit

Bruno Schädler

Trockenheit wirkt sich nachteilig auf Menschen, Tiere und Pflanzen aus. In den verschiedenen Klimaregionen der Schweiz treten Trockenperioden oft unterschiedlich ausgeprägt und zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf. Im 20. Jahrhundert ist bei der Trockenheit im Mittelland kein Trend feststellbar. Das Wissen über zukünftige Veränderungen als Folge der Klimaänderung ist beschränkt. Südlich der Alpen wird mit geringeren Abflussmengen und trockeneren Böden gerechnet. Auch nördlich der Alpen dürften die vom Schmelzwasser gespeisten Flüsse wegen geringerer Schneemengen im Sommer und Herbst weniger Wasser führen.

Einleitung

Die Definition von Trockenheit ist schwierig und wird sehr unterschiedlich formuliert. Oft erfolgt sie nicht nur aufgrund meteorologisch-klimatologischer und hydrologischer Kriterien, sondern auch aufgrund der wirtschaftlichen Auswirkungen der Trockenheit. Meteorologisch gesehen bezeichnet Trockenheit einen längeren Zeitraum mit ausserordentlich trockenem Wetter und einem Wassermangel, der ein grosses Ungleichgewicht im Wasserhaushalt einer Region bewirkt.¹ Allgemeiner wird unter Trockenheit eine Zeitperiode verstanden, während der ein Feuchte-Defizit besteht, das sich negativ auf die Vegetation, die Tiere und die Menschen einer grösseren Region auswirkt.²

In Trockenperioden bleiben die Niederschläge längere Zeit aus, der Boden trocknet aus, der Grundwasserspiegel sinkt ab und Fliessgewässer sowie kleinere stehende Gewässer führen wenig Wasser oder trocknen aus. Die Auswir-

kungen der Trockenheit auf die Landwirtschaft und andere wirtschaftliche Sektoren hängen wesentlich von der Jahreszeit ihres Auftretens ab (Wachstumsperiode bei der Landwirtschaft, Beginn der Skisaison für den Wintertourismus etc.). Zudem wird Trockenheit im Vergleich mit den durchschnittlichen klimatischen Bedingungen einer Region beurteilt.

In der Schweiz ist zumindest im Mittelland der Wasserstand bzw. der Abfluss in kleineren und mittleren Bächen und Flüssen ein gutes Mass für die Trockenheit. Er zeigt die Wasserbilanz eines ganzen Einzugsgebiets. Einzelne Regentage, die eine längere Trockenperiode unterbrechen, fallen dabei kaum ins Gewicht. Das betrachtete Fliessgewässer darf aber nicht von einem See gespeist werden oder künstliche Zu- oder Ableitungen haben. Im Gebirge ist der Abfluss wegen dem Abschmelzen von Schnee und Eis kein gutes Mass für die Trockenheit. Niedrige Abflüsse werden dort in den Wintermonaten beobachtet.

Aus naturwissenschaftlicher Sicht erweist sich das NM7Q als nützliches Mass für Trockenheit. Der Index bezeichnet den niedrigsten mittleren Abfluss während 7 aufeinander folgender Tage im Verlauf eines Kalenderjahrs. Dabei handelt es sich um ein sensibles Mass für ausgeprägte Trockenheitsphasen, denn der identifizierte Zeitraum von 7 Tagen muss in eine



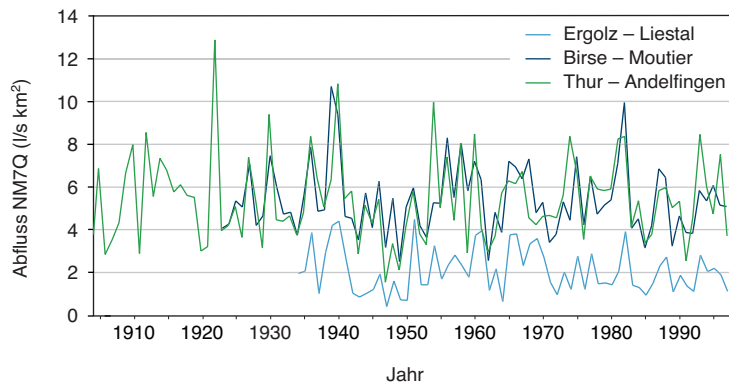


Abbildung 26: Niedrigster mittlerer Abfluss über 7 aufeinander folgende Tage (NM7Q in Liter pro Sekunde und Quadratkilometer) für jedes Jahr der Zeitreihe für die Flüsse Thur (Andelfingen), Ergolz (Liestal) und Birs (Moutier).⁵

längere relative Trockenzeit eingebettet sein, damit kleine NM7Q-Werte erreicht werden.

Bedeutung der Trockenheit

Trockenheit hat ökologisch und ökonomisch nachteilige Auswirkungen^{3,4}, teilweise auch mit Konsequenzen für die Politik:

Ökologische Auswirkungen

In Phasen der Trockenheit fließt weniger Wasser. Weil Trockenheit und Wärmeperioden häufig zusammenfallen, ist die Wassertemperatur oft erhöht. Gelöste Stoffe werden weniger verdünnt und liegen in höheren Konzentrationen vor. Der Sauerstoffgehalt des Wassers nimmt ab. Die Situation wird dadurch verstärkt, dass den Gewässern während Trockenzeiten oft Wasser zu Bewässerungszwecken entnommen wird. Für viele Wasserorganismen, insbesondere Fische, bedeutet dies Stress. Ihre Sterberate nimmt zu. Die Pflanzenwelt am Ufer der Gewässer leidet ebenfalls unter der Dürre, was auch wild lebende Tiere beeinträchtigen kann.

Ökonomische Auswirkungen

Von andauernden Trockenheitsperioden ist die Wasserversorgung betroffen. Das Trinkwasser (Quellen und Grundwasser) kann knapp werden und in Industriebetrieben mit hohem Wasserbedarf kann es zu Produktionseinschränkungen kommen (z.B. Papierindustrie, Industrie mit hohem Kühlwasserbedarf). Die Energieerzeugung in Lauf- und Speicherkraftwerken kann reduziert sein. Auch thermische Kraftwerke wie Kernkraftwerke sind möglicherweise betroffen, wenn zu wenig Wasser zur Kühlung vorhanden ist oder

wenn das Flusswasser nicht mehr zusätzlich erwärmt werden darf. In der Landwirtschaft sind Einbussen in Feldwirtschaft und Viehhaltung möglich. Betroffen sind auch der Wintertourismus wegen geringer Schneemengen und die Schifffahrt wegen des tiefen Wasserstandes.

Politische Auswirkungen

Bei Wasserknappheit müssen die Behörden Einschränkungen im Wasserbezug (Sparmassnahmen, Rationierung etc.) verfügen und Regeln zum Bezug von Wasser aus

öffentlichen Gewässern aufstellen und durchsetzen. In besonders betroffenen Gebieten müssen logistische Mittel wie Zisternenwagen, Wasserpumpen und Transportleitungen und provisorische Reservoirs zur Vermeidung der Wasserknappheit bereitgestellt und Massnahmen zur Aufrechterhaltung der Hygiene veranlasst werden.

Insgesamt sind die Auswirkungen der Trockenheit für die Schweiz dank der international vernetzten Märkte und dem Wasserreichtum der Gebirgsregionen nicht von existentieller Bedeutung. Zudem treten in den verschiedenen Klimaregionen der Schweiz Trockenperioden oft nicht gleichzeitig und unterschiedlich ausgeprägt auf.

Beobachtungen und Trends

Analysen des Niederschlags- und Temperaturverlaufs erlauben die Identifikation von Dürresommern. In den letzten 500 Jahren ereigneten sich im schweizerischen Mittelland vier extreme Dürrejahre, nämlich – in absteigender Intensität – die Jahre 1540, 1669, 1603 und 1947.⁶ Vor 1730 waren Dürresommer etwa alle 12 bis 15 Jahre zu verzeichnen. Nach 1730 sind trockene Sommer nur noch etwa alle 50 Jahre aufgetreten. Im 20. Jahrhundert wurde nur ein Dürresommer registriert, nämlich 1947. Dies bedeutet, dass das 20. Jahrhundert als ein speziell günstiges Jahrhundert bezüglich Trockenheiten bezeichnet werden kann.

Die Niedrigwasserabflüsse in verschiedenen Mittellandflüssen (Abbildung 26), die ausserhalb von Trockenzeiten kaum durch menschliche Nutzung beeinflusst sind, zeigen ein einheitliches Bild⁵: Das Jahr 1947 erscheint in der Regel als trockenstes Jahr; ein Trend über

das 20. Jahrhundert hinweg ist im schweizerischen Mittelland nicht feststellbar.

Die Verhältnisse auf der Alpensüdseite und in den Alpen können mangels geeigneter auswertbarer Daten nicht beurteilt werden.

Mögliche Veränderungen in der Zukunft

Gemäss IPCC⁷ ist mit der Klimaänderung ein Anstieg der kontinentalen Sommertrockenheit und der damit verbundenen Dürregefahr über den meisten innerkontinentalen Landmassen mittlerer Breite wahrscheinlich.

Bei der Entstehung von Trockenheit und Dürren ist der gesamte Wasserhaushalt eines Gebietes beteiligt. Informationen über die Veränderung der Niederschlagsmengen und der Temperatur reichen nicht aus, um die mögliche Veränderung der Trockenheit abzuschätzen. Vielmehr wären Kenntnisse über die Veränderung der Niederschlagsintensität und der Abfolge von Regentagen in Abhängigkeit der Jahreszeit wichtig.

Prognosen über die Entwicklung der Niederschläge sind schwierig und mit grossen Unsicherheiten verbunden. Die möglichen Veränderungen beinhalten eine Verschiebung der räumlichen Verteilung der Niederschläge in Europa einschliesslich des Alpenraums, eine Zunahme der mittleren Niederschlagsintensität und eine Abnahme des Bodenwassergehalts im Sommer.

Als Folge der Klimaänderung wird es in tiefen und mittleren Höhenlagen vermehrt regnen und weniger schneien, und die Schneereserven in den Bergen werden abnehmen. In Gebieten ohne wesentliche Schneemengen als Wasserspeicher – speziell im Süden der Alpen – muss im Sommer infolge verminderter Niederschlagsmengen und erhöhter Temperatur im Durchschnitt mit einem verminderten Abfluss und verschärftem Niederwasser sowie mit trockeneren Böden gerechnet werden. Aber auch die vom Schmelzwasser gespeisten Flüsse auf der Alpennordseite dürften bei kleineren Schneereserven im Sommer und Herbst geringere

Abflüsse aufweisen. Dies wird insbesondere im Unterlauf des Rheins zu verschärften Niederwassern mit entsprechenden Konsequenzen für die Rheinschifffahrt führen.⁸

Das gegenwärtige Wissen über zukünftige Veränderungen der Trockenheit in der Schweiz ist insgesamt beschränkt. Die Betroffenheit könnte relativ gross sein. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass oft grosse Gebiete von der Trockenheit betroffen waren. Trotz internationaler Vernetzung könnten in Zukunft die ökonomischen Folgen kurzfristig bedeutend sein. Auch die ökologischen Folgen sind sehr schwer abschätzbar. Wasser dürfte jedoch in der Schweiz und in der niederschlagsreichen Alpenregion auch in Zukunft nicht allgemein knapp werden.

- 1 Huschke R. E. [ed.], Glossary of meteorology, American Meteorological Society, Boston, 638 p., 1959.
- 2 Warwick R. A., Drought hazard in the United States: A research assessment, University of Colorado, Institute of Behavioral Science, Monograph No. NSF/RA/E-75/004, 199 p., 1975.
- 3 Kleeberg H.-B. und U. Mayer, Hydrologische Extreme – Gefährdungspotentiale in Fliessgewässern durch Trockenperioden, Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen, Mitteilung Nr. 70, 189 S., 1999.
- 4 Schorer M., Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft, Geographica Bernensia, G40, 192 S., 1992.
- 5 Kan C., Niedrigwasserstatistik des Bundesamtes für Wasser und Geologie, persönliche Mitteilung, 2002.
- 6 Pfister C. und M. Rutishauser, Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525. In: M. Schorer, Trockenheit in der Schweiz, Workshopbericht, OcCC, Bern, 2000.
- 7 IPCC, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 1032 p., 2001.
- 8 Grabs W. [ed.], Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin, International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR), CHR-Report, No. I-16, Lelystad, 172 p., 1997.

2.4. Waldbrände

Marco Conedera

Waldbrände ereignen sich häufiger auf der Alpensüdseite als auf der Alpennordseite. Meistens werden sie durch den Menschen verursacht. Auch in Zukunft wird der Mensch als Verursacher von Bränden und durch Massnahmen zur Brandverhütung die Entwicklung von extremen Waldbränden beeinflussen. Natürliche Faktoren wie Trockenheit und starke Winde, die auf der Alpensüdseite mit der Klimaänderung zunehmen könnten, würden die Brandgefahr allenfalls erhöhen.

Einleitung

Feuer entsteht, wenn Brennstoff, Sauerstoff und Zündenergie gleichzeitig vorhanden sind. Bei Waldbränden liefert pflanzliches, insbesondere abgestorbenes Material den Brennstoff. Je nach Dichte, chemischer Zusammensetzung und Feuchtigkeit ist es unterschiedlich leicht entzündbar.

Die Auswirkungen eines Waldbrandes hängen unter anderem von der Feueranfälligkeit des Ökosystems, von den vorhandenen Baumarten, vom früheren Brandregime und von der nachträglich potentiellen Gefährdung durch andere Naturereignisse in der betroffenen Gegend ab. Die Auswirkungen des Feuers auf die Umwelt sind noch wenig erforscht.¹ Unbestritten ist aber, dass ein Brand die Schutzfunktion des Waldes beeinträchtigt. Wegen der hohen Temperaturen und der bei Bränden entstehenden Asche verschliessen sich die Bodenporen und wird der Boden stärker wasserabweisend.² Bei starken Regenfällen erhöhen sich dadurch der Oberflächenabfluss und die Erosion.³ In Gebieten, die länger als 10 Jahre von Bränden verschont geblieben sind, ist dieser Effekt besonders gross, da die Vegetation nicht an Feuer angepasst ist.⁴ Beispielsweise wurden 1997 bei einem Brand im Gebiet von Ronco s. Ascona (TI) 80% des Einzugsgebietes des Flusses Buffaga in Mitleidenschaft gezogen. Starke Regenfälle, wie sie einmal pro Jahrzehnt vorkommen, lösten im darauffolgenden Monat August eine Jahrhundert-Hochwasserflutwelle aus. Eine Schlammlawine von

4000 m³ ergoss sich in bewohnte Gebiete und verursachte Sachschäden von mehreren Mio. SFr. Nur durch Zufall gab es keine Opfer. Die Kosten für Brandlöschung, die sich in Extremfällen bis auf eine halbe Mio. SFr belaufen, wirken gegenüber solchen Schäden gering.

Als Extremereignis bezeichnen wir in diesem Kapitel einen oder mehrere Waldbrände, die während Trockenperioden auftreten und daher sehr intensiv sind, eine Fläche von über 100 ha bzw. ganze Wassereinzugsgebiete betreffen und in Gebieten auftreten, die über 10 Jahre von Waldbränden verschont geblieben sind.

Voraussetzungen

Von den Waldbränden auf der Alpensüdseite wurden zwischen 1981 und 2000 durchschnittlich 8.6% natürlich durch Blitzschlag ausgelöst (Tabelle 3). Dabei entstehen Bodenbrände, die sich nur langsam ausbreiten. Die Häufigkeit der Brände und der Ursachen schwankt allerdings von Jahr zu Jahr stark. In ungefähr 40% aller Brände bleibt die Ursache unklar. Von den Bränden be-



kanter Ursache sind durchschnittlich mehr als 90% auf vorsätzliche oder unbeabsichtigte Handlungen des Menschen zurückzuführen. Zwischen 1981 und 2000 waren davon knapp 97% der verbrannten Flächen betroffen.

Neben dem Blitzschlag, der Waldbrände direkt auslösen kann, gibt es natürliche Faktoren, die die Brandgefahr in einem Gebiet erhöhen (Tabelle 3). Häufig sind ausbleibende Niederschläge, hohe Windgeschwindigkeiten und niedrige relative Luftfeuchtigkeit massgebend. Einflussreich sind auch Sonneneinstrahlung, Feuchtedefizit und Häufigkeit von Winden. Ausbleibende Niederschläge und Feuchtedefizit können sich auch langfristig über Jahre hinweg auswirken.

Der Mensch löst Waldbrände meist durch Fahrlässigkeit oder Brandstiftung aus. In seltenen Fällen reichen Funken von der Eisenbahn oder von einem elektrischen Kurzschluss oder Projektileinschläge bei militärischen Übungen aus. Der Mensch kann die Brandgefahr in einem Gebiet verändern. Den grössten Einfluss haben heute gesetzliche Massnahmen. Ebenfalls sehr wichtig sind sozioökonomische Entwicklungen (z.B. Rückgang der traditionellen Landwirtschaft, Abwanderung aus den Seitentälern), Landschaftspflege und Umwelterziehung. Die Auswirkungen sind vor allem langfristig.

Welche Trends sind bereits erkennbar?

Ablagerungen von Kohlepartikeln im Origliosee zeigen, dass die Alpensüdseite von Natur aus für Feuer anfällig ist (Abbildung 27). Der Mensch hat die Häufigkeit der Waldbrände aber immer beeinflusst, indem er Brandrodung betrieb (Eisen- und Bronzezeit) oder eine Kontrollfunktion übernahm (ab Römerzeit). Daten aus dem Lobsigensee (BE) zeigen, dass das allgemeine Waldbrandniveau auf der Alpennordseite um einem Faktor 2 bis 5 kleiner sein dürfte als auf der Alpensüdseite. Aber

Tabelle 3: Zusammenfassung der bedeutendsten Waldbrand-Einflussfaktoren in der Schweiz.⁵

			Häufigkeit/ Gewichtung	Zeithorizont
Voraussetzungen	natürlich	Niederschläge	++	ein Tag bis Jahre
		Windhäufigkeit	+	ein bis mehrere Tage
		Windgeschwindigkeit	++	ein Tag
		relative Luftfeuchtigkeit	++	ein Tag
		Sonneneinstrahlung	+	ein Tag
		Feuchtigkeitsdefizit	+	ein Tag bis Jahre
	Mensch	sozioökonomische Entwicklung	+	Monate bis Jahre
		Landschaftspflege	+	Monate bis Jahre
		gesetzlicher Rahmen	++	Monate bis Jahre
Umwelterziehung		+	Monate bis Jahre	
direkt auslösend	natürlich	Blitzschlag	8.6%	
		Mensch	Fahrlässigkeit	26.1%
	Brandstiftung	15.2%		
	Eisenbahn	3.6%		
	Militär	1.7%		
	el. Leitung (Kurzschluss)	1.7%		
	grenzübergreifend	1.7%		
	übrige	2.4%		
Ursache unklar bzw. unbekannt		38.9%		

++ = häufig / massgebend; + = wiederkehrend / einflussreich
Die Prozentangaben beziehen sich auf die Periode 1981–2000.

auch hier ist der Einfluss des Menschen durch Brandrodungen während der Eisenzeit ersichtlich.⁶

Im 20. Jahrhundert nahm die jährliche Anzahl Brände auf der Alpensüdseite ab den 1960er Jahren von durchschnittlich 30 auf 80 zu (Abbildung 28a). Seit den 1980er Jahren sinkt die Anzahl Waldbrände wieder. Die Brandflächen nehmen seit den 1960er Jahren ab, am stärksten seit den 1980er Jahren. Eine Ausnahme bildet das ausserordentliche Jahr 1973. Die Extremereignisse, bei denen sich die Waldbrände auf Flächen von über 100 ha ausweiten, waren zwischen 1941 und 1980 am häufigsten (Abbildung 28b). Zwischen 1981 und 2000 sank die Anzahl der Brände auf das Niveau von 1921–1940 zurück.

Für die Alpennordseite existieren keine flächendeckenden Angaben. Auf der Alpennordseite des Kantons Wallis haben die Anzahl Brände und die verbrannte Fläche seit den 1990er Jahren durchschnittlich um einen Faktor 3 bis 4 gegenüber vorangehenden Jahrzehnten zugenommen (von 5.2 auf fast 20 Brände pro Jahr⁷). Die natürliche Ursache Blitzschlag wurde ab 1978 in 12% der Fälle registriert. In 34% der

Fälle bleibt die Ursache unbekannt.⁷ Im Kanton Graubünden werden Waldbrände erst seit den 1980er Jahren systematisch erfasst. In der Regel handelt es sich um kleinere Brandflächen (1–10 ha), wobei auch Grossereignisse zu verzeichnen sind (Calanda bei Chur 1943, ca. 477 ha; Münstertal 1983, ca. 60 ha; St. Luzisteig 1985, ca. 110 ha; Misox 1997, ca. 405 ha). Im Gegensatz zur Alpensüdseite ergab die raumzeitliche Auswertung dieser Brände einen deutlichen Unterschied zwischen menschlich und natürlich verursachten Bränden. Menschlich verursachte Brände (74% seit 1980, inkl. unbekannte Ursache) sind v.a. im Bündner

Oberland, im Rheintal und in Mittelbünden zu verzeichnen. Natürliche Brände (Blitzschlag, 26% seit 1980) konzentrieren sich auf die Regionen Unterengadin, Münstertal und Bündner Südtäler.¹⁰

Die Entwicklung der Häufigkeit der Waldbrände widerspiegelt den Einfluss der Menschen. Auf der Alpensüdseite verursachten das Vordringen der Waldgebiete und die Anhäufung brennbarer Materialien auf dem Boden seit den 1960er Jahren eine grosse Anzahl von Bränden. Die durchschnittlich betroffene Fläche und die Anzahl der Extremereignisse nahmen jedoch ab, vor allem dank guter Organisation der Brandverhütung. Im Tessin sind entsprechende Massnahmen seit 1980 in Kraft. Seit 1987 gilt die Verordnung zum absoluten Verbot von Feuern im Freien (partielle Lockerung 1996). Zudem zeigen Medieninformationen über die Brandgefahr Wirkung und die Bevölkerung ist generell für Umweltbelange sensibilisierter. Im Wallis ist diese Entwicklung quantitativ weniger wichtig und zeitlich um 20 Jahren verzögert. Im Kanton Graubünden wurde das generelle Feuerverbot im Freien mit der Einführung des neuen kantonalen Waldgesetzes 1996 aufgehoben. Das Amt für Wald Graubünden hat aber die Möglichkeit, mittels des Waldbrand-Prognosesystems Incendi bei Bedarf regionale, temporäre Feuerverbote auszusprechen (www.wald.gr.ch).¹¹ Weitere Prognose-Methoden für die ganze Alpensüdseite sind zurzeit in der Entwicklungsphase.¹²

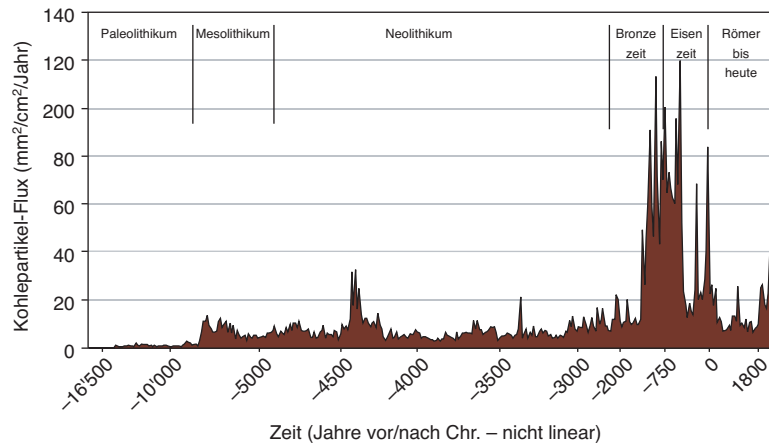


Abbildung 27: Der Mensch hat die Häufigkeit von Waldbränden auch früher beeinflusst. Ablagerungen von Kohlepartikeln in der Nacheiszeit, nachgewiesen in den Sedimenten des Origiosees, sind proportional zur Brandhäufigkeit.⁸ Die Periode von 5000–7200 v. Chr. zeigt das Niveau natürlicher Waldbrände unter ähnlichen klimatischen Bedingungen wie heute. Die extreme Häufigkeit von Waldbränden in der Bronze- und Eisenzeit ist auf Brandrodungen durch den Menschen zurückzuführen. Brandrodungen fanden jedoch ein Ende, als die Römer um das Jahr 0 die Edelkastanie einführten.⁹

Durch Landschaftspflege, Gesetzgebung sowie Massnahmen zur Brandverhütung verändert der Mensch die Voraussetzungen für Brände. Durch Massnahmen zur Brandbekämpfung kontrolliert er die Brände. Der Mensch ist jedoch weiterhin für die meisten Brände verantwortlich, sowohl durch Fahrlässigkeit als auch durch Brandstiftung.

Einfluss der Klimaänderung

Extremereignisse werden auch in Zukunft auftreten, vor allem wenn witterungsmässig ausserordentlich günstige Voraussetzungen zusammentreffen. Trotz der allgemein abnehmenden Tendenz (Abbildung 28b) haben sich an der Alpensüdseite im Frühjahr 1997 nach einer längeren Trockenperiode und während Tagen mit starken Föhnböen einige grössere Waldbrände ereignet.¹³

In einer Analyse von Trockenperioden im Tessin wurden gegen Ende des 20. Jahrhunderts zwar wieder eher längere niederschlagsarme Perioden gefunden¹⁴; doch zeigen diese Auswertungen und die Beobachtung der Waldbrände gemäss Abbildung 28 keinen Zusammenhang. In Kapitel 2.3. wurde erwähnt, dass speziell im Süden der Alpen im Sommer infolge verminderter Niederschlagsmengen und erhöhter Temperatur in Zukunft mit einem verminderten Abfluss und verschärftem Niederwasser sowie mit trockeneren Böden gerechnet werden muss. Dies könnte die

Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass mehrere günstige Voraussetzungen für Brände zusammentreffen.

Die zukünftige Entwicklung von Extremereignissen bei Waldbränden wird einerseits weiterhin mit menschlichem Handeln wie Landschaftspflege, Brandverhütung und Brandbekämpfung verknüpft sein. Andererseits spielt die Häufigkeit von Extremwetterlagen wie längeren Trockenperioden in Verbindung mit starken Winden eine grosse Rolle. In diesem Sinne muss die Erforschung der Entwicklungstendenzen von Waldbränden beide Faktoren gleichzeitig berücksichtigen.

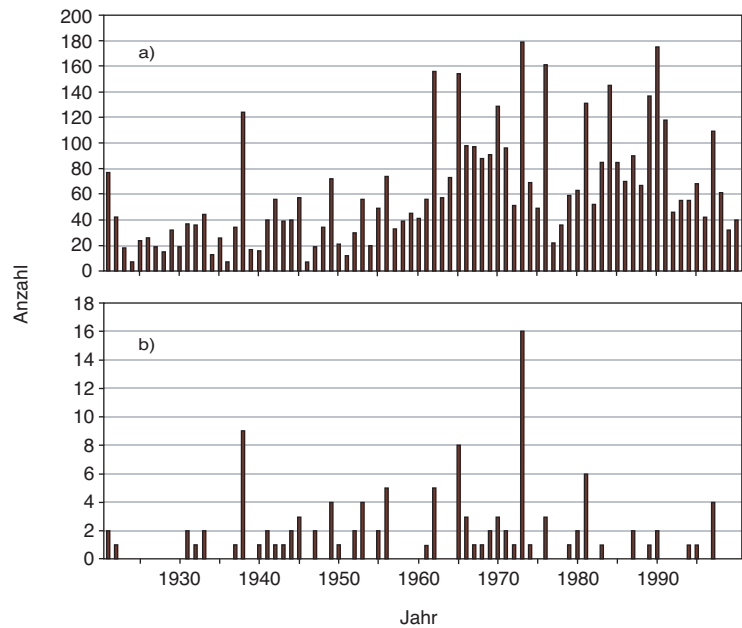


Abbildung 28: Verteilung (a) der Zahl aller Brände pro Jahr und (b) der Zahl der Extremereignisse, die eine Fläche > 100 ha erfassen. Bezugszeitraum 1920–2000. (Datenbank über Waldbrände auf der Alpensüdseite⁵)

- 1 Moretti M., M. Conedera und P. Duelli, Grosse Dynamik nach Waldbränden auf der Alpensüdseite, *Inf. bl. Forsch. bereich Wald*, 7, 1–3, 2001.
- 2 Letey J., Causes and consequences of fire-induced soil water repellency, *Hydrol. Process.*, 15, 2867–2875, 2001.
- 3 Neary D. G., C. C. Klopatek, L. F. DeBano, and P. F. Ffolliott, Fire effects on belowground sustainability: A review and synthesis, *Forest Ecology and Management*, 122, 51–71, 1999.
- 4 Marxer P., M. Conedera, and D. Schaub, Postfire runoff and soil erosion in the sweet chestnut belt of Southern Switzerland. In: Trabaud L. [ed.], *Fire Management and Landscape Ecology*, International Association of Wildland Fire, Washington, 51–62, 1998.
- 5 Conedera M., M. Marcozzi, B. Jud, D. Mandallaz, F. Chatelain, C. Frank, F. Kienast, P. Ambrosetti, G. Corti, *Incendi boschivi al Sud delle Alpi: passato, presente e possibili sviluppi futuri*, PNR31, vdf, Zürich, 143 p., 1996.
- 6 Tinner W. and B. Ammann, The Late-Glacial and Holocene fire history of the western Swiss Plateau (unpubl.).
- 7 Bochatay J. et J.-B. Moulin, *Inventaire des incendies de forêt dans le Canton du Valais, Rapport final du projet 98.12 du Fonds pour les recherches forestières et l'utilisation du bois*, Salvan-Vollèges, 45 p., 2000.
- 8 Tinner W., M. Conedera, B. Ammann, H. W. Gäggeler, S. Gedyé, R. Jones, and B. Säggesser, Pollen and charcoal in lake sediments compared with historically documented forest fires in Southern Switzerland since 1920, *The Holocene*, 8, 32–42, 1998.
- 9 Tinner W., P. Hubschmid, M. Wehrli, B. Ammann, and M. Conedera, Long-term forest fire ecology and dynamics in Southern Switzerland, *Journal of Ecology*, 87, 273–289, 1999.
- 10 Langhart R., *Räumliche und jahreszeitliche Charakteristiken von Waldbrandherden (Kanton Graubünden)*, travail de diplôme, Geographisches Institut, Université de Zurich, Zurich, 117 p., 1999.
- 11 Schöning R., A. Bachmann und U. Maissen, *Incendi: Unterstützung der Waldbrandwarnung im Kanton Graubünden*, ArcAktuell, Nr. 3, ESRI Kranzberg (D), 1998.
- 12 Beispielsweise die Anpassung von der in der Lawinenwarnung sehr erfolgreich eingesetzten Nearest-Neighbour-Methode (NDX), die zurzeit an der SLF erfolgt.
- 13 Conedera M., P. Marxer, P. Ambrosetti, G. Della Bruna, and F. Spinedi, The 1997 forest fire season in Switzerland, *Int. For. Fire News*, 18, 85–88, 1998.
- 14 Rebetez M., Twentieth century trends in drought in Southern Switzerland, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 6, 755–758, 1999.

2.5. Starkniederschläge

Christoph Frei

Starkniederschläge in der Schweiz sind entweder kurz und intensiv in Zusammenhang mit Sommergewittern oder weniger intensiv über mehrere Tage in Zusammenhang mit stationären Wettersystemen. Extreme Starkniederschläge können zu Hochwassern, Uferüber tretungen, Murgängen und Hangrutschungen führen. Im 20. Jahrhundert haben intensive Tagesniederschläge in weiten Teilen des Mittellandes und des nördlichen Alpenrandes zugenommen. Aussagen über Veränderungen von extremen Starkniederschlägen sind nicht möglich. Für die Zukunft weist eine Mehrheit von Modellrechnungen auf eine Zunahme der mittleren Niederschlagsintensität und der Häufigkeit von intensiven Tagesniederschlägen hin. Bei einer Intensivierung des Wasserkreislaufs könnten in den Alpen vor allem die Starkniederschläge von langer Dauer zunehmen.

Arten von Starkniederschlägen in der Schweiz

In der Schweiz gibt es grob gesagt zwei Arten von Starkniederschlägen: kurze, intensive und länger dauernde, aber weniger intensive.

Starkregen von kurzer Dauer (eine bis wenige Stunden) und hoher Intensität (40–80 mm pro Stunde) treten vor allem im Sommer im Zusammenhang mit Gewittern auf und sind räumlich auf den eigentlichen Gewitterzug (wenige Kilometer bis wenige Dutzend Kilometer) begrenzt. Extreme Ereignisse können zu Uferüber tretungen von Bächen und kleineren Flüssen sowie zu Murgängen im Gebirge führen (vgl. Kapitel 2.7. und 2.8.). Überschwemmungen in besiedeltem Gelände können folgen, wenn die Kapazität der Abwassersysteme überschritten wird. Gelegentlich sind kurze, intensive Starkregen auch von Hagelschlag begleitet (vgl. Kapitel 2.6.). Ein Beispiel für einen extremen kurzzeitigen Starkniederschlag ist das Gewitter von Sachseln am 15. August 1997.

Starkniederschläge von längerer Dauer (ein bis mehrere Tage), aber geringerer Intensität (100–400 mm pro Tag) können über das ganze Jahr hindurch auftreten. Sie sind verbunden mit intensiven und/oder mehr oder weniger stationären grossskaligen Wettersystemen. Extreme Dauerregen können zu Hochwassern und eventuell zu Uferüber tretungen von grossen Flüssen und Seen sowie zu Murgängen und Hangrutschungen führen (vgl. Kapitel 2.7. und 2.8.). Beispiele für diese Kategorie sind die Dauerniederschläge vom Mai 1999 in der Ostschweiz, jene vom Oktober 2000 im Wallis und Tessin sowie die verheerenden Starkniederschläge in Zentraleuropa im August 2002. In Form von

Schnee können extreme Dauerniederschläge verbreitete und grosse Lawinnenniedergänge verursachen (vgl. Kapitel 2.9.).

Die Schadenwirkung von Starkniederschlägen ist in der Regel nicht unmittelbar, sondern das Resultat von Folgeeffekten wie Hochwasser, Rutschungen und Lawinen (vgl. Kapitel 2.7., 2.8. und 2.9.) oder Begleiterscheinungen wie Hagel (vgl. Kapitel 2.6.). Der entstehende Schaden ist deshalb nicht nur von der Dauer und



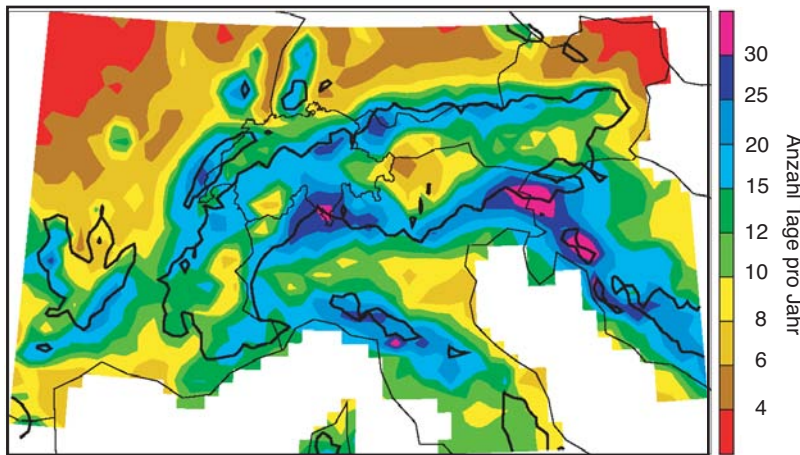


Abbildung 29: Klimatologische Häufigkeit von Tagesniederschlägen grösser als 20 mm pro Tag im Alpenraum (1971–1990, Anzahl Tage pro Jahr).

Intensität des Niederschlags, sondern in hohem Masse von der Disposition des Gebietes (z.B. Vorfeuchte im Boden) und Begleiteffekten (z.B. Schneeschmelze) abhängig.

Klimatologie

Bei Starkniederschlägen in der Schweiz spielen Effekte der Topographie wie Staulagen und Thermik an Hügel- und Bergzügen eine wesentliche Rolle. Die Topographie bestimmt damit massgeblich, wo Starkniederschläge wie häufig auftreten. Tagesniederschläge von 20 mm pro Tag oder mehr treten entlang dem nördlichen und südlichen Alpenrand sowie im Jura häufiger

auf als im Mittelland und in inneralpinen Tälern (Abbildung 29). Das Tessin ist rund doppelt so häufig betroffen wie das Schweizer Mittelland. Die grosse Zahl an Ereignissen im Tessin ist für den gesamten Alpenraum ausserordentlich.

Starkniederschläge im Tessin treten besonders häufig im Herbst auf. Dann erreichen Fronten und Tiefdruckgebiete den Mittelmeerraum wieder auf südlicheren Zugbahnen als im Sommer und bewirken starke Feuchtetransporte gegen die Südalpen. Beim Starkniederschlag vom Oktober 2000 wurde innerhalb von 5 Tagen eine Wassermenge von Süden gegen die Alpen geführt, die schätzungsweise dem Volumen des Genfersees entspricht (Abbildung 30). Oft werden auch das Wallis und das Puschlav von solchen Südströmungsereignissen betroffen.

Beobachtete Trends im 20. Jahrhundert

Die Niederschläge im Alpenraum schwanken stark von Jahr zu Jahr. Je nach Jahreszeit und Region unterscheiden sich feuchte und trockene Jahre um einen Faktor 2 bis 4. Beobachtungen zeigen, dass die mittleren Winterniederschläge im 20. Jahrhundert im nördlichen und westlichen Alpenraum um 20–30% zugenommen haben.¹ Im mediterranen Bereich der Alpen hat der mittlere Herbstniederschlag andererseits um ähnliche Beträge abgenommen.

Für extreme Starkniederschläge sind keine verlässlichen Aussagen über Trends möglich, da seltene Ereignisse statistisch schlecht erfassbar sind (vgl. Kapitel 1.4.). Trendanalysen beschränken sich auf häufigere Ereignisse. Ihre Intensität liegt weit unterhalb jener von schadenverursachenden Ereignissen. In der Schweiz haben intensive Tagesniederschläge (Wiederkehrperiode 30 Tage) im Winter und im Herbst an den meisten Langzeitstationen des Mittellandes und des nördlichen Alpenrandes zugenommen (Abbildung 31).² Für rund 30% der Stationen ist der Trend signi-

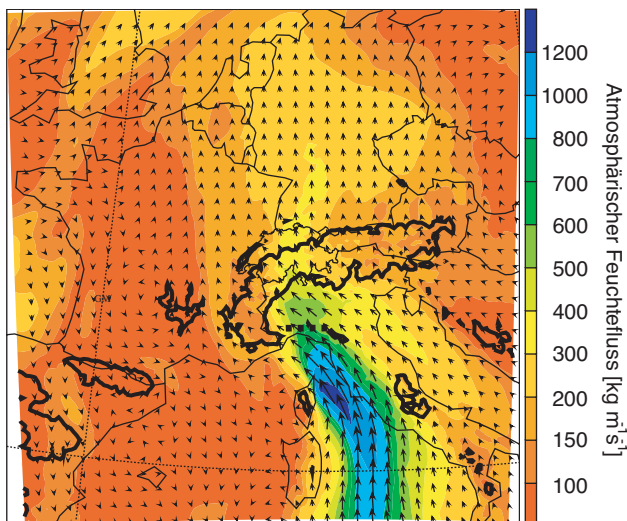


Abbildung 30: Vertikal integrierter atmosphärischer Feuchteffluss am 15. Oktober 2000. Vom 12.–16. Oktober ist in der Atmosphäre eine Wassermenge gegen die Südalpen geführt worden, die dem Inhalt des Genfersees entspricht.

fikant. Die Zunahmen bewegen sich in einer Grössenordnung von 20–80% pro 100 Jahre. Ähnliche Trends wurden für intensive Niederschläge von 2–5 Tagen Dauer nachgewiesen. Bei den intensiven sommerlichen Tagesniederschlägen zeigen sich keine systematischen Veränderungen (Abbildung 31). Allerdings können Trends in der Intensität von Sommergewittern nicht ausgeschlossen werden. Wegen der kurzen Zeitdauer von Gewittern wären für Trendaussagen Angaben über stündliche Niederschlagsintensitäten aussagekräftiger. Dafür fehlt jedoch die hohe Zeitaufösung in den Langzeit-Messreihen.

Wie die Schweiz beobachtet auch das benachbarte Europa eine Zunahme der mittleren und intensiven Winterniederschläge.³ Die Veränderungen im Herbst südlich der Alpen, wo das Mittel abnimmt und die intensiven Ereignisse zunehmen, werden ebenfalls durch Trendstudien für Italien bestätigt.⁴

Veränderung als Folge der globalen Klimaänderung

Es lassen sich drei verschiedene Wirkungsketten unterscheiden, über welche die globale Klimaänderung die Häufigkeit von Starkniederschlägen beeinflussen kann:

- (a) Es wird erwartet, dass die Klimaänderung zu einer stärkeren Erwärmung in polaren gegenüber tropischen Regionen führt und der Feuchtegehalt der Atmosphäre zunimmt. Diese beiden Faktoren können sich auf die Intensität, die Häufigkeit und die Zugbahn der Tiefdruckgebiete in den mittleren Breiten auswirken. Solche Veränderungen wären direkt gekoppelt mit Änderungen in der räumlichen Verteilung und der Intensität von Niederschlägen in Europa einschliesslich des Alpenraums.
- (b) In den mittleren Breiten ist eine Erwärmung der Atmosphäre mit einer Zunahme des Wasserdampfgehalts von ca. 6% pro Grad Erwärmung verbunden (Gesetz von Clausius-

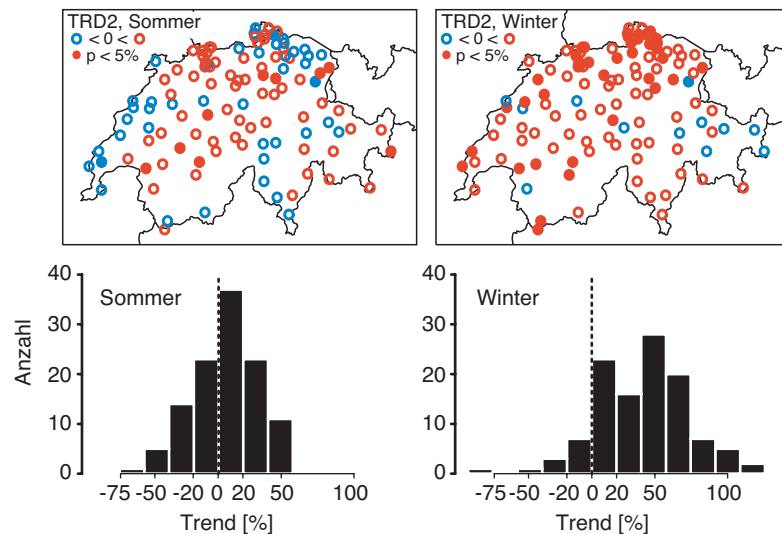


Abbildung 31: Trend in der Häufigkeit von intensiven täglichen Niederschlägen (durchschnittlich ein Ereignis pro Monat) an 110 Schweizer Niederschlagsstationen im Zeitraum 1901–1994. Oben: Stationen mit einer Zunahme in Rot, Stationen mit einer Abnahme in Blau. Gefüllte Kreise für Stationen mit statistisch signifikanter Veränderung. Unten: Histogramme der prozentualen Veränderung (Wahrscheinlichkeitsänderung seit 1901) für alle Stationen.²

Clapeyron). Heute gilt als relativ gesichert, dass die daraus resultierende Intensivierung des Wasserkreislaufes zu einer Zunahme der mittleren Niederschlagsintensität beiträgt. Diese Intensivierung wirkt sich zudem überproportional auf die Häufigkeit von Starkniederschlägen aus.⁵

- (c) Die Intensivierung des Wasserkreislaufes ist auch mit einer erhöhten Verdunstung verbunden. In Regionen mit einer andauernden trockenen Jahreszeit wie dem Mittelmeerraum könnte dies zu einer Abnahme des Bodenwassergehaltes im Sommer und Herbst führen. Diese Änderung kann sich auf die Thermodynamik der unteren Troposphäre und die Niederschlagsprozesse auswirken. Die Grössenordnung dieses Effektes und seine mögliche Bedeutung im Alpenraum ist aber noch nicht ganz verstanden.

Verschiedene globale Klimamodellszenarien für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts wurden auf charakteristische Grössen für Starkniederschläge untersucht. Eine Mehrheit der Resultate weist auf eine globale Zunahme der mittleren Niederschlagsintensität und der Häufigkeit von intensiven Tagesniederschlägen hin.⁶ Diese Tendenz bestätigt sich in den verfügbaren regionalen Modellanalysen für Europa. Diese zeigen eine Zunahme des maximalen jährlichen Tagesniederschlags um 10–25%. Für die Häufigkeit,

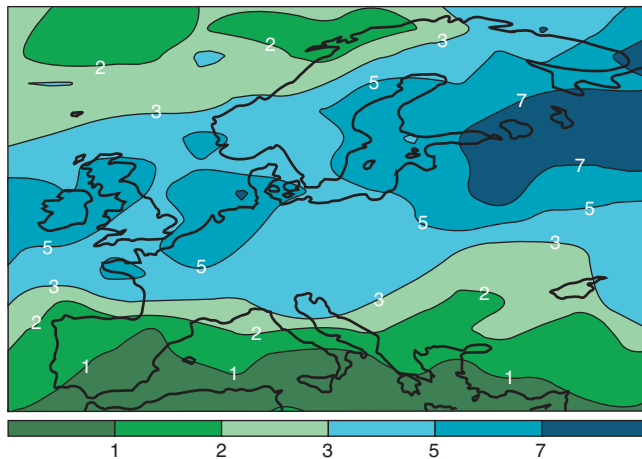


Abbildung 32: Relative Änderung in der Häufigkeit von extrem nassen Wintern bei einer Verdoppelung des CO_2 -Gehaltes der Atmosphäre. Für Winterniederschläge, die heute im Durchschnitt alle 40 Jahre auftreten, wird über Zentral-, und Nordeuropa eine Zunahme um einen Faktor 3–5 simuliert. Resultate aus 19 gekoppelten Klimamodellsimulationen.⁷

mit welcher der heutige einjährige und der heutige 50-jährliche Niederschlags-Extremwert überschritten wird, werden Zunahmen um einen Faktor 2 und mehr festgestellt.⁸ Eine umfassende Analyse von 19 globalen Klimamodellen zeigt, dass extrem niederschlagsreiche Winter (heutige Wiederkehrperiode 40 Jahre) gar um Faktoren 3–5 häufiger werden könnten (Abbildung 32)⁷. Die Zunahmen werden im Winterhalbjahr über dem gesamten europäischen Kontinent und im Sommer vor allem in Zentral- und Nordeuropa erwartet.

Die in vielen Modellen gefundene Zunahme von Starkniederschlägen wird vor allem als Folge der Intensivierung des Wasserkreislaufs mit der globalen Erwärmung interpretiert (Wirkungskette b). Ein intensivierter Wasserkreislauf wird heute für das Winterhalbjahr und für den gesamten Kontinent als wahrscheinlich angesehen.⁹ Im Alpenraum könnte dies vor allem eine Zunahme von Starkniederschlägen von langer Dauer bewirken. Diese Ereignisse hängen nicht nur von der Wetterlage ab, sondern auch von der Feuchtigkeitsmenge, welche die Atmosphäre zuführt. Zu dieser Kategorie könnten auch die besonders extremen herbstlichen Ereignisse auf der Alpensüdseite zählen.

Allerdings zeigen die Modelle grosse Unterschiede im Muster der regionalen Veränderungen. Diese Unterschiede gehen darauf zurück, dass sich die typische Zugbahn und Intensität von Tiefdruckgebieten (Wirkungskette a) in den verschie-

den Modellen unterschiedlich ändert. Es ist deshalb noch unklar, wie und wo in Europa die Intensivierung des Wasserkreislaufs durch allfällige Änderungen in der grossräumigen Dynamik kompensiert oder verstärkt wird. Bei den quantitativen Angaben für den Alpenraum handelt es sich also höchstens um grobe Abschätzungen.

Für sommerliche Starkniederschläge im Alpenraum sind zurzeit weder qualitative noch quantitative Angaben möglich. Es fehlen Modellanalysen auf der Zeitskala von Stunden, und die Modelle weisen für den Sommer grosse systematische Fehler auf. Zudem sind die Wechselwirkungen zwischen Bodenhydrologie, Vegetation und sommerlichen Niederschlagsprozessen (Wirkungskette c) noch ungenügend verstanden und in den verfügbaren Modellen nur ungenau repräsentiert.

- 1 Schmidli, J., C. Schmutz, C. Frei, H. Wanner, and C. Schär, Mesoscale precipitation variability in the Alpine region during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, 22, 1049–1074, 2001.
- 2 Frei C. and C. Schär, Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Clim.*, 14, 1568–1584, 2001.
- 3 Frich P., L. V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. G. Klein Tank, and T. Peterson, Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Res.*, 19, 193–212, 2002.
- 4 Brunetti M., M. Maugeri, and T. Nanni, Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1995. *Theor. Appl. Climatol.*, 65, 165–174, 2000.
- 5 Frei C., C. Schär, D. Lüthi, and H. C. Davies, Heavy precipitation processes in a warmer climate, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1431–1434, 1998.
- 6 Kharin V. V. and F. W. Zwiers, Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled Atmosphere–Ocean GCM. *J. Climate*, 13, 3760–3788, 2001.
- 7 Palmer T. N. and J. Räisänen, Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature*, 415, 512–514, 2002.
- 8 Durman C. F., J. M. Gregory, D. C. Hassell, R. G. Jones, and J. M. Murphy, A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 127, 1005–1015, 2001.
- 9 Cubasch U., G. A. Mehl et al., Projections of future climate change. Chapter 9 in: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 525–582, 2001.

2.6. Hagel

Hans-Heinrich Schiesser

Bei einem extremen Hagelereignis organisieren sich die einzelnen Gewitterzellen entlang einer Linie, die sich über mehrere 100 km erstreckt und durch das ganze Mittelland und die Voralpen zieht. Von den fünf extremen Hagelereignissen seit 1920 waren jeweils mehr als 500 Gemeinden betroffen. Diese Ereignisse sind gleichmässig über die Beobachtungsperiode verteilt. Die Häufigkeit der vier Grosswetterlagen, die für extreme Hagelereignisse verantwortlich sind, hat hingegen seit 1940 deutlich zugenommen. Falls die Häufigkeit dieser Wetterlagen auch in Zukunft zunimmt, müsste mit mehr extremen Hagelereignissen gerechnet werden.

Definition eines extremen Hagelereignisses

Hagelereignisse treten oft sehr lokal auf. Eine einzelne Hagelzelle verursacht einen Hagelstrich mit mehreren Hagelzügen am Boden. Mehrere Hagelzellen können sich aber auch in einem grossen Sturmsystem formieren, das die ganze Schweiz betrifft und viele Hagelstriche produziert. Ein Sturmsystem verursacht weitverbreitet Hagel-, Wasser- und Windschäden in der Landwirtschaft, im Wald, an Gebäuden und an Autos. In seltenen Fällen sind es mehrere Sturmsysteme, die ganz Europa abdecken.

Sowohl Einzelzellen als auch Sturmsysteme können zu extremen Hagelereignissen führen. Extremwerte in einzelnen Hagelzellen sind zum Beispiel Hagelkorngrössen von 5–10 cm, Böenspitzen von 144–180 km/h, Regenintensität von 100 mm/h, Niederschlagsmenge von 30–50 mm/m² oder einige Blitze pro km².¹ In einem extremen Sturmsystem organisieren sich die einzelnen Gewitterzellen zu einer Linie, die sich über mehrere 100 km erstreckt und von West nach Ost durch das ganze Schweizer Mittelland und die Voralpen wandert. Die Meteorologen nennen ein solches System ein mesoskaliges konvektives Sturmsystem (MCS). Hinter der Linienformation folgt ein grossflächiges Niederschlagsgebiet mit teilweise intensivem Regen. In Hagelzellen der Formation werden grössere Hagel- und Regenintensitäten, Regenmengen, Windstärken und Blitzaktivitäten beobachtet als in isolierten Zellen.²

Für die Schweiz definieren wir im Folgenden solche Sturmsysteme (MCS) als Extremereignisse. Sie beeinträchtigen einen grossen Teil des Landes und verursachen weitverbreitet Schäden.

Meteorologische Bedingungen

Es hat sich gezeigt, dass extreme MCS in der Schweiz unter ganz bestimmten meteorologischen Voraussetzungen entstehen³:

- Die Grosswetterlage wird bestimmt durch eine so genannte Troglage, die eine Strömung aus Südwest gegen die Schweiz bewirkt.
- Eine Kaltfront mit grossen Temperaturunterschieden liegt über Frankreich und reicht weit nach Spanien.
- Auf der Vorderseite der Kaltfront fliesst feuchtwarmer tropische oder subtropische Luft in die Schweiz.
- Über der Schweiz sind die Druckunterschiede gering und die Luftschichtung ist instabil.



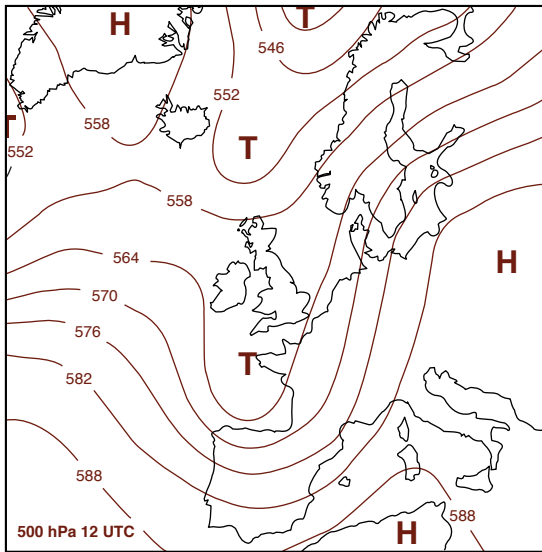


Abbildung 33: Typische Troglage über der Biscaya mit einer Südwestströmung gegen Zentraleuropa (500-hPa-Niveau). Das Beispiel ist vom 5. Juli 1999.

Vier verschiedene Grosswetterlagen waren für die Auslösung der fünf extremen Hagelereignisse der letzten 80 Jahre verantwortlich. Allen gemeinsam ist die Südwestströmung vor dem Frontdurchgang. Eine typische Troglage über der Biscaya mit einer Südwestströmung gegen Zentraleuropa führte zum extremen Hagelereignis vom 5. Juli 1999 (Abbildung 33).

Häufigkeit und Trend der Extremereignisse

Mit dem Wettarradar lassen sich Niederschlagsgebiete verfolgen und grosse, intensive Hagelzellen erkennen. Die einzelnen Hagelzellen lassen sich auch übergeordneten Sturmsystemen zuordnen. Solche Radarmessungen werden aber erst ab etwa 1980 systematisch in der Schweiz durchgeführt.

Somit existieren keine langen Messreihen, die bezüglich Häufigkeit und Trend von Extremereignissen (MCS) untersucht werden können. Über die Ausdehnung eines Hagelgebiets gibt die Hagelversicherung Auskunft. Die Schadenstatistik erlaubt eine naturwissenschaftliche Betrachtung der Auswirkungen der Klimaänderung auf extreme Hagelereignisse.

Die Statistik zeigt in einer vertrauenswürdigen, relativ homogenen Zeitreihe ab 1920^{4,5} wie viele Gemeinden pro Tag nördlich der Alpen Hagelschäden in der Landwirtschaft meldeten. Die

Anzahl betroffener Gemeinden gibt Auskunft über die Ausdehnung eines Sturmsystems – unter der Annahme, dass von mindestens einem Landwirt ein Schaden gemeldet wird, wenn ein Sturmsystem mit Hagelschlag über eine Gemeinde zieht.

Abbildung 34 zeigt, wie viele Gemeinden an wie vielen Tagen von 1920–1999 einen Hagelschaden in der Landwirtschaft meldeten. Insgesamt wurden 5690 Hageltage verzeichnet. In fünf Fällen (0.1%) waren 500 oder mehr Gemeinden (von 2400 Gemeinden) betroffen. Dass es sich bei diesen fünf extremen Hageltagen um ein MCS handelt, zeigt die Verteilung der Schadengemeinden für das Hagelereignis vom 21.

- (e) Bis kurz vor dem Eintreffen der Kaltfront aus Westen ist die Einstrahlung über dem Mittelland maximal. Die untersten Luftschichten werden auf über 30°C erwärmt.
- (f) Die Kaltfront trifft am späteren Nachmittag ein. Im Vorfeld und innerhalb der Front wird die Bildung von Gewitterzellen ausgelöst.
- (g) Die Gewitterzellen formieren sich zu einem oder mehreren linienförmigen MCS.

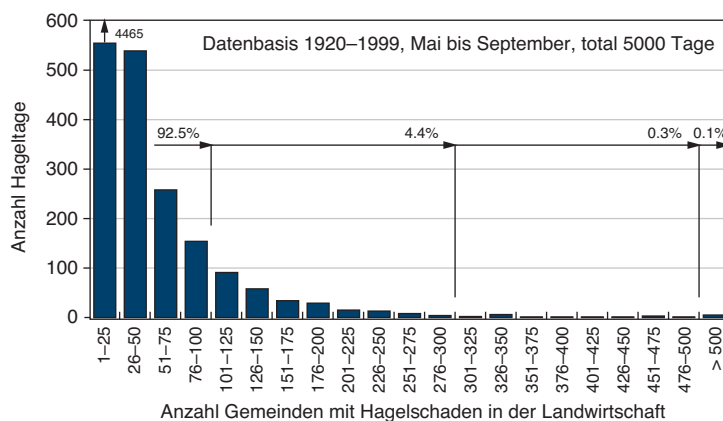


Abbildung 34: Anzahl Hageltage mit einer bestimmten Anzahl betroffener Gemeinden (aus insgesamt 2400 Gemeinden in der Schweiz nördlich der Alpen) mit Hagelschäden in der Landwirtschaft. An fünf (0.1%) der 5690 Hageltage von 1920–1999 wurden über 500 Gemeinden betroffen (letzte Säule). Diese Fälle werden als „extrem“ definiert. Tage mit 100–200 betroffenen Gemeinden werden als „stark“ bezeichnet (3.9%, 5.–8. Säule). Hageltage mit nur 1–25 betroffenen Gemeinden gab es in derselben Zeit 4465 (79%, erste Säule).

Juli 1992 (Abbildung 35). Es verursachte versicherte Schäden von ungefähr 100 Mio. SFr. Hinzu kamen unversicherte Schäden wie grosse Waldschäden.

Sämtliche Hageltage, an denen von 1920–1999 mehr als 100 Gemeinden Schäden meldeten, sind in Abbildung 36 dargestellt. Die fünf Extremereignisse sind gleichmässig über die Beobachtungsperiode verteilt. Die „starken“ Hagelereignisse, die in 100 bis 200 Gemeinden Schäden verursachten, nehmen nach 1980 zu. Dieser Trend ist in Abbildung 37 verdeutlicht: Vor 1980 ist die Häufigkeit starker Hagelereignisse ungefähr konstant. Zwischen 1980 und 1994 nimmt sie deutlich zu. Nach dem intensiven Hageljahr 1994 nimmt sie wieder ab, bleibt aber über dem Durchschnittswert der Zeitperiode vor 1980.

Seit 1940 hat die Häufigkeit der vier Grosswetterlagen, die für die extremen Hagelereignisse verantwortlich waren, im Sommer in Zentraleuropa deutlich zugenommen (Abbildung 38).

Einfluss der Klimaänderung

Falls die Häufigkeit der vier Grosswetterlagen im atlantisch-europäischen Raum mit der Klimaänderung weiter zunimmt, werden auch die für Sturmsysteme günstigen Bedingungen häufiger. Es müsste mit mehr extremen Hagelereignissen gerechnet werden. Auch der zunehmende Trend innerhalb der „starken“ Hageltage könnte sich fortsetzen.

Ob die Ereignisse intensiver werden, hängt auch davon ab, ob die Schichtung der Troposphäre während der Sommermonate

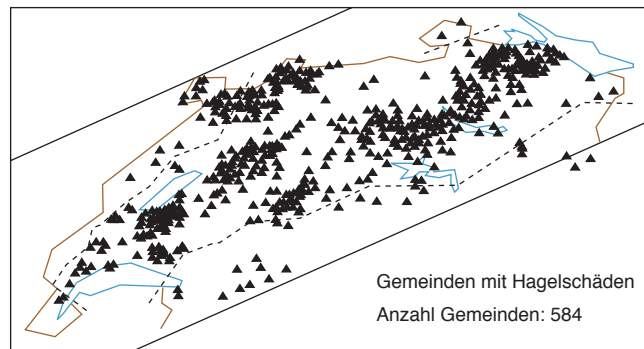


Abbildung 35: Verteilung der Gemeinden mit Hagelschadensmeldungen an einem „Extremtag“ (21.7.1992). Die Hagelzüge des Sturmsystems (SW-NE-Richtung) sind aus der Anordnung der Gemeinden gut zu erkennen.

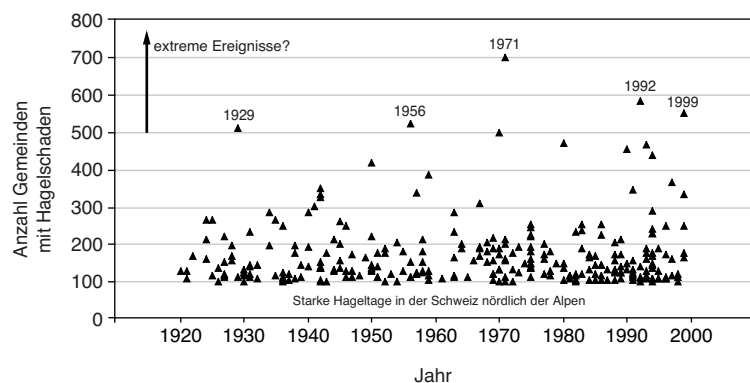


Abbildung 36: Zeitreihe der Tage von 1920–1999 mit 100 und mehr Schweizer Gemeinden nördlich der Alpen mit Hagelschaden in der Landwirtschaft. Die fünf „Extremtage“ sind relativ gut über die Beobachtungsperiode verteilt. Im Bereich zwischen 100 und 200 betroffenen Gemeinden „starker“ Hageltage ist nach 1980 eine etwas dichtere Ansammlung festzustellen.

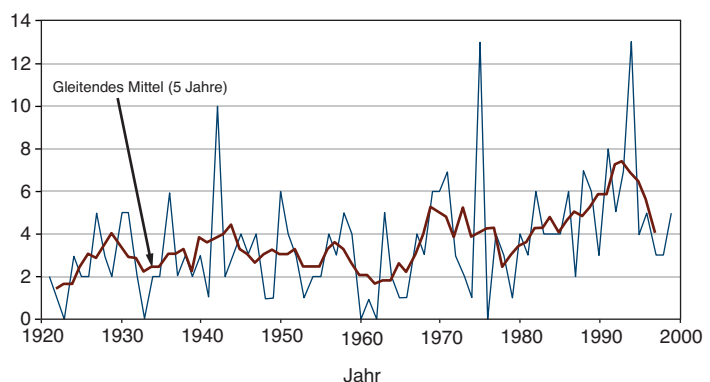


Abbildung 37: Zeitreihe der Anzahl Tage mit 100 und mehr betroffenen Gemeinden von 1920–1999. Der steigende Trend der „starken“ Hageltage zwischen 1980 und 1994 ist deutlich erkennbar.

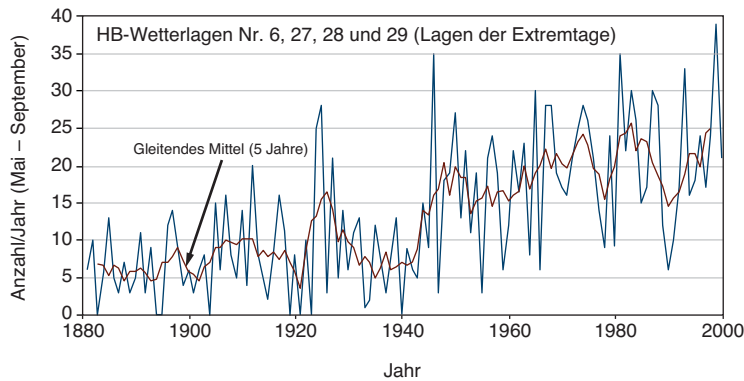


Abbildung 38: Zeitreihe 1881–2000 der vier Wetterlagen, die für „Extremhageltage“ verantwortlich sind.⁶ Allen gemeinsam ist die Südwestströmung vor dem Frontdurchgang (Abbildung 33). Seit 1940 ist ein markanter Anstieg der vier Wetterlagen zu beobachten.

durch die Klimaänderung instabiler wird. Eine instabile Schichtung fördert die Bildung von Gewitterzellen beim Frontdurchgang. Sondenmessungen zwischen 1954 und 1993 haben gezeigt, dass sich die untere Troposphäre stärker erwärmt hat als die obere Troposphäre und die Stabilität der Schichtung schwächer wurde.^{1,5}

Die Datenreihe der Hageltage wurde bis 1999 aufgearbeitet. Neuere Daten zeigen für das Jahr 2000 (am 3. Juli) einen weiteren „Extremtag“ mit 620 betroffenen Gemeinden. Dies bedeutet, dass wir in den letzten 10 Jahren drei Fälle registrierten, im Gegensatz zu drei Fällen in den vorangegangenen 70 Jahren. Es liegen aber noch nicht genügend Daten vor, um zu erkennen, ob es sich dabei um einen effektiven Trend oder eine zufällige Anhäufung handelt (vgl. Kapitel 1.4.).

- 1 Schiesser H.-H., A. Waldvogel, W. Schmid und S. Willemse, *Klimatologie der Stürme und Sturmsysteme anhand von Radar- und Schadendaten*, Schlussbericht NFP31, vdf, Zürich, 132 S., 1997.
- 2 Schiesser H.-H., R. A. Houze, and H. Huntrieser, *The meso-scale structure of severe precipitation systems in Switzerland*, *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2070–2097, 1995.
- 3 Huntrieser H., *Zur Bildung, Verteilung und Vorhersage von Gewittern in der Schweiz*, Diss. Nr. 11020, ETH Zürich, 246 S., 1995.
- 4 Bider M., *Statistische Untersuchungen über die Hagelhäufigkeit in der Schweiz und ihre Beziehung zur Grosswetterlage*. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimat.*, 6, 66–90, 1954.
- 5 Willemse S., *A statistical analysis and climatological interpretation of hailstorms in Switzerland*, Ph.D. Thesis No. 11137, ETH Zürich, 194 p., 1995.
- 6 Wetterlagen nach Hess-Brezowsky: Lage 6 (Südwestlage zyklonal, 5.7.1999, 3.7.2000), 27 (Südlage zyklonal, 10.9.1956), evtl. 28 (Tief britische Inseln, wahrscheinlich 21.7.1992) und 29 (Trog Westeuropa, 4.7.1929, 26.8.1971).

2.7. Hochwasser

Armin Petrascheck

Niederschlag, Temperatur und Zustand des Einzugsgebiets spielen bei der Hochwasserbildung zusammen. Bei extremen Hochwassern werden die langjährigen Hochwasserspitzen deutlich übertroffen. Im 20. Jahrhundert zeigen die Hochwasserspitzen in der Schweiz keine einheitliche Zu- oder Abnahme. Die Klimaänderung kann aber die Hochwasserbildung durch die Temperaturerhöhung, Veränderungen beim Niederschlag und Veränderungen im Einzugsgebiet beeinflussen. In Gebieten des Mittellands, in denen heute schon Winterhochwasser auftreten, ist eine Zunahme der Hochwassergefahr wahrscheinlich. Bei hochalpinen Einzugsgebieten sind abflusserhöhende sowie -mindernde Faktoren zu beachten, so dass Veränderungen der Hochwassergefahr schwer vorhersagbar sind.

Einleitung und Definition

Hochwasser ist eine deutlich über dem Mittelwert liegende Abflussmenge. Ausgehend von den jährlichen Höchstwerten werden in der Hydrologie den Spitzenabflussmengen verschiedene Wahrscheinlichkeiten (Wiederkehrperioden) zugeordnet, so dass man von einem 10- oder 100-jährlichen Hochwasser (HQ10 oder HQ100) spricht. Ein HQ100 ist zwar ein seltenes Ereignis, aber nur dann ein Schadenereignis, wenn die Abflussmenge markant grösser als die meisten bisher beobachteten Werte ist. So zeigt der Vergleich der Hochwasserspitzen der Albula bei Tiefencastel und des Rheins bei Domat/Ems (Abbildung 39), dass die natürliche Variation zu beachten ist. Beim Rhein steigt bei einem 100-jährlichen Ereignis gegenüber einem 10-jährlichen Ereignis die Abflussmenge um 40% und der Wasserstand um 1.5 m. Im Gegensatz dazu ist ein 100-jährliches Ereignis der Albula nur um 20% grösser als ein 10-jährliches und der Wasserstand nur 25 cm höher.

Die Angabe der Wahrscheinlichkeit ist aus vielerlei Gründen notwendig, enthält aber keine Aussage über die Grösse der Abflussmenge und ihre Bedeutung für die Umwelt und den Menschen. Aus der Sicht der natürlichen Umwelt interessieren die Abflüsse, bei denen der Geschiebetrieb einsetzt, Auen benetzt werden oder das Flussbett

verändert wird. Dies sind in der Regel relativ häufige Ereignisse mit Wiederkehrperioden kleiner als 2 bis 10 Jahre. Sie verursachen meistens keine Schäden und werden deshalb kaum beachtet – das Ökosystem und auch der Mensch haben sich diesen relativ häufigen Ereignissen angepasst. Aus der Sicht des Menschen interessieren Abflüsse, bei denen der Fluss sein Bett verlässt und in genutzte Gebiete eindringt.

Extremereignisse übertreffen bisher beobachtete Hochwasser meist deutlich. Beispielsweise war der Abfluss der Urner Reuss 1987 mehr als 50% grösser als in den vorangehenden 90 Jahren. Noch extremer war die Situation beim Hochwasser der Langeten in Lotzwil im November 1975 (Abbildung 40), bei dem sämtliche Hochwasserspitzen seit 1924 um ein Mehrfaches übertroffen wurden. Solche Ereignisse formen das Gewässersystem um und überfluten Flächen, die weit über das normale



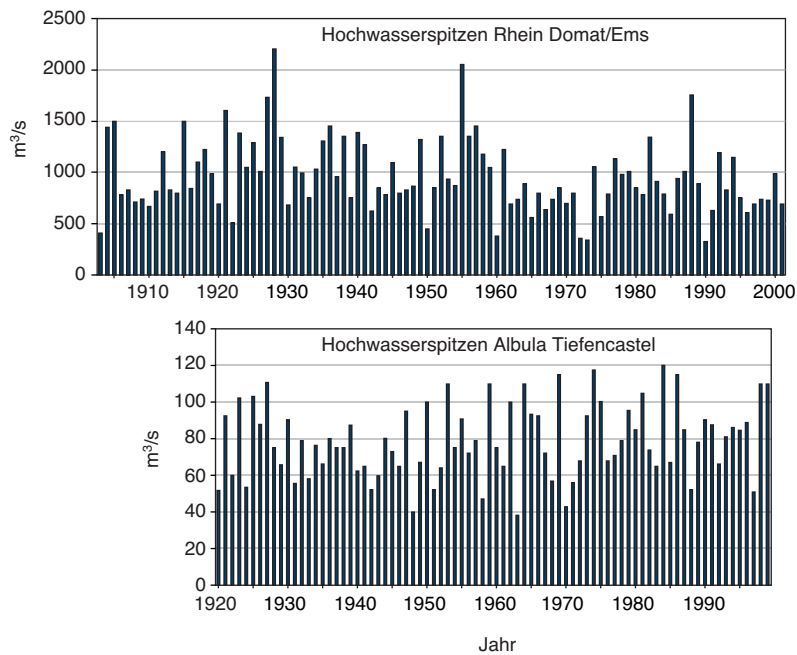


Abbildung 39: Die Hochwasserspitzen des Rheins bei Domat/Ems weisen eine grosse Variabilität auf. In der Periode 1899–1962 entsprach ein 10-jährliches Hochwasser einer Abflussmenge von 1550 m³/s und einem Pegelstand von 10.1 m. Bei einem 100-jährlichen Hochwasser war der Abfluss 43% grösser (2200 m³/s) und der Pegelstand 1.5 m höher (12.6 m). Im Gegensatz dazu sind die Hochwasserspitzen der Albulas bei Tiefencastel gleichmässiger verteilt und wird ein 100-jährliches Hochwasser kaum als extrem wahrgenommen. Ein 10-jährliches Hochwasser entspricht einem Abfluss von 105 m³/s und einem Pegelstand von 8.2 m; bei einem 100-jährlichen Hochwasser beträgt der Abfluss 130 m³/s und der Pegelstand 8.45 m.

Flussbett hinausgehen. Für die Natur sind diese Ereignisse ein Teil der Landschaftsdynamik. Für den Menschen handelt es sich dabei um grosse Schadenereignisse bzw. Naturkatastrophen.

Die Wahrnehmung von Hochwassern als Schadenereignisse wird durch Schutzbauten beeinflusst. So hat ein Abfluss der Saltina von 90 m³/s im September 1993 in Brig einen Schaden von ungefähr 500 Mio. SFr. verursacht. Im Oktober 2000 betrug der Abfluss 125 m³/s. Die in der Zwischenzeit erstellten Schutzbauten verhinderten jedoch grössere Schäden. Als Schadenereignis bleibt 1993 für Brig das grösste Hochwasser.

Voraussetzungen für die Hochwasserbildung

Hochwasser entstehen durch das Zusammenwirken von Niederschlag, Temperatur und Zustand des Einzugsgebietes.

In Flüssen mit grossen Einzugsgebieten (>300 km²) sind extreme Hochwasserereignisse mit frontalen Wetterlagen verbunden, die lang

andauernde Niederschläge mit sich bringen und das gesamte Einzugsgebiet überregnen (vgl. Kapitel 2.5.). Die grossflächigen Hochwasser von 1910 und 1999 sind auf nordalpin zentrierte, grossräumige Wetterlagen zurückzuführen und jene von 1987, 1993 und 2000 auf Südtaulagen. Für kleine Einzugsgebiete (<100 km²) bilden Sommergewitter die grösste Gefahr (Beispiel Sachseln 1997, Gantrisch 1990).

Es besteht kein direkter Zusammenhang zwischen Niederschlagsmenge oder -intensität und der Grösse der Hochwasserabflussspitzen, denn je nach Vorgeschichte werden im Einzugsgebiet unterschiedliche Wassermengen gespeichert. So führte bei der Langeten (Abbildung 40) nicht nur ein ausserordentlicher Niederschlag zur extremen Abflussspitze, sondern

auch die Erschöpfung der Speichermöglichkeiten. Ähnlich starke Niederschläge wurden unter anderen Bedingungen durch Ausuferungen stark gedämpft.

In alpinen Lagen spielt die Temperatur eine wichtige Rolle. Bei einer tiefen Nullgradgrenze fällt ein Teil des Niederschlags als Schnee und fliesst nicht unmittelbar ab. So wurde das Wallis beim Hochwasser vom Oktober 2000 durch das Sinken der Nullgradgrenze von 3000 m auf 2600 m in der letzten Phase der Niederschläge vor noch schlimmeren Folgen bewahrt. Das vorübergehende Speichern des Niederschlags als Schnee vermindert den Abfluss. Umgekehrt erhöht die Schneeschmelze den Abfluss, wobei vor allem grosse Abflussmengen während 1 bis 2 Wochen zu erwarten sind und weniger die grossen Spitzenabflüsse. So hat im Frühjahr 1999 die Schneeschmelze zusammen mit starken, aber nicht ausserordentlichen Niederschlägen Höchststände bei den Alpenvorlandseen und Hochwasser des Rheins, der Thur und der Aare verursacht.

Trends im 20. Jahrhundert

Bei den Abflussspitzen der Hochwasser lassen sich in den Schweizer Flüssen keine einheitlichen Trends erkennen. Dies hängt auch mit der starken Beeinflussung der Gewässer durch den Menschen zusammen. So zeigt sich am Rhein bei Domat/Ems (Abbildung 39) der Einfluss des Ausbaues der Wasserkraft zwischen 1955 und 1970 in einer Verminderung der jährlichen Abflussspitzen. Andere Faktoren, wie Zunahme der Bewaldung und verstärkter Hochwasserschutz, beeinflussen die Abflüsse ebenfalls. Eine systematische Untersuchung des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft² zeigte an 73 Stationen keinen Trend und an je einer einen positiven und einen negativen Trend.

Der Nachweis von Trends für die sehr seltenen Extremereignisse ist auf statistischer Basis praktisch unmöglich (vgl. Kapitel 1.4.). Zurzeit fällt eine Häufung grosser Schadenereignisse (1987, 1993, 1999, 2000, 2002) auf. Allerdings gab es auch im 19. Jahrhundert vergleichbare Häufungen (1834, 1838, 1852, 1868). Bei der Betrachtung der langen Reihen und Chroniken fallen auch Perioden ohne nennenswerte Hochwasser auf, wie beispielsweise von 1940–1950. Für das episodische Verhalten gibt es bis jetzt nur Spekulationen und keine Erklärungen.

Einfluss der Klimaänderung auf Hochwasserprozesse

Die Klimaänderung kann die Hochwasserbildung über verschiedene Prozesse beeinflussen:

Einfluss der Temperaturerhöhung

In der Schweiz kann die Hochwassergefahr nicht unabhängig von der Lage der Nullgradgrenze diskutiert werden. Die Rolle des Schnees – einerseits als Rückhalt des Niederschlags, andererseits als Wasserlieferant bei der Schneeschmelze – ist besonders wichtig in den stark nach der Höhe gegliederten Einzugsgebieten der Alpen. Als Folge der Klimaerwärmung wird die Nullgradgrenze steigen und grössere Teile der Einzugsgebiete können überregnet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Starkniederschlag mit einer hohen Nullgradgrenze zusammenfällt und

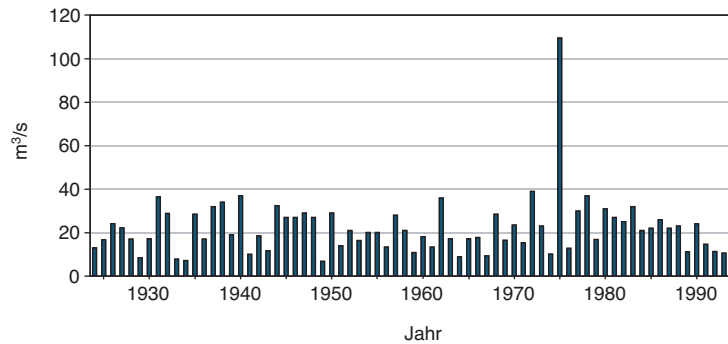


Abbildung 40: Grösste Sommer- und Winterhochwasserabflüsse der Langeten während der Beobachtungsperiode 1924–1993.¹

einen extremen Hochgebirgsabfluss verursacht, nimmt zu. Erhöht sich mit der Klimaänderung gleichzeitig die Niederschlagsmenge pro Ereignis, nehmen sowohl der Spitzenabfluss als auch die Wahrscheinlichkeit für ein Hochwasser zu. Sofern keine Schutzmassnahmen getroffen werden, kann die Hochwassergefahr im Sinne von häufigeren und grösseren Schadenereignissen zunehmen.

Veränderungen beim Niederschlag

Gemäss neusten Modellrechnungen ist im Alpenraum eine Zunahme der Niederschläge im Winter als Folge der Klimaänderung wahrscheinlich. In tiefen und mittleren Höhenlagen wird es vermehrt regnen und weniger schneien, weshalb im Mittelland die Häufigkeit der Winterhochwasser zunehmen wird. Davon ist vor allem der Rhein unterhalb von Basel betroffen. In der Schweiz sind begrenzte Flächen in den Kantonen Aargau, Thurgau, Basel-Landschaft, Jura und Zürich gefährdet. Ob die Zunahme nur die häufigen oder auch die extremen Ereignisse betrifft, hängt von der Veränderung der Häufigkeit und Intensität der frontalen Wetterlagen ab.

Im Frühling entstehen Hochwasser, wenn die Schneeschmelze mit Niederschlägen zusammentrifft. Die Wärmezufuhr im Frühjahr wird sich mit der Klimaänderung wahrscheinlich wenig ändern. Deshalb wird die Veränderung der Niederschläge einen grösseren Einfluss auf Hochwasser haben als die Schneeschmelze. Die Zunahme der mittleren Winterniederschläge führt in den hochalpinen Lagen zwar zu grösseren Schneemengen. Gleichzeitig wird aber die Schneebedeckung in den tieferen Lagen wegen höheren Wintertemperaturen abnehmen. Welcher Effekt für die Hochwasserbildung wichtiger ist,

hängt von der Höhengliederung des Einzugsgebiets, der mengenmässigen Zunahme der Winterniederschläge und der Häufigkeit von Wechsellagen zwischen Schneefall und Schneeschmelze ab. Die wegen der tiefen Wintertemperaturen „Hochwasser-freien“ Perioden werden jedenfalls verkürzt.

Kleine Einzugsgebiete sind meist im Zusammenhang mit Sommergewittern von Hochwassern betroffen. Für die Intensität und die Menge des Niederschlages ist die lokale Thermik entscheidend. Hypothesen über eine Zu- oder Abnahme sind spekulativ. Häufigkeitsänderungen aufgrund der Wetterlagen machen sich eher bei den Hagelschäden (vgl. Kapitel 2.6.) als beim Hochwasser bemerkbar.

Veränderungen im Einzugsgebiet

Als Folge der Klimaänderung ziehen sich in hochalpinen Lagen Gletscher und Permafrost zurück. Dadurch kann mehr Geschiebe mobilisiert werden. Zusätzlich beeinflussen Veränderungen der Vegetation, wie beispielsweise eine Erhöhung der Waldgrenze, die Bodenbildung. Diese Vorgänge können Flussläufe umgestalten und die Hochwassergefahr verändern. Sie sind aber sehr langsam: Veränderungen beim Permafrost erfolgen über Jahrzehnte bis Jahrhunderte, Veränderungen bei der Bodenbildung dauern Jahrhunderte bis Jahrtausende.

Schneller bemerkbar wird der Effekt sein, dass Pflanzen bei höheren Temperaturen mehr

Wasser verdunsten. Die Bodenspeicher leeren sich dadurch rascher, was sich dämpfend auf die Hochwasserbildung auswirken kann. Diese dämpfende Wirkung wird vor allem bei den häufigen Hochwassern spürbar sein sowie in alpinen und voralpinen Lagen, wo Sommerhochwasser auftreten und keine signifikanten Änderungen der Sommerniederschläge erwartet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Eine erhöhte Hochwassergefahr ist vor allem in jenen Gebieten des Mittellandes zu erwarten, in denen zurzeit Winterhochwasser massgebend sind. Die vorhergesagten höheren Winterniederschläge und ein geringerer Schneeanteil in Höhenlagen zwischen 1000 und 1500 m lassen das Hochwasserrisiko steigen. In hochalpinen Lagen mit typischen Sommerhochwassern kann der Anstieg der Nullgradgrenze zu einer Verlängerung der Periode führen, in der Niederschlag ohne Schneeanteil fällt und Hochwassergefahr besteht. Wieweit eine erhöhte Evapotranspiration in den tieferen Lagen diese Effekte wieder kompensiert, ist schwer vorhersehbar.

- 1 Spreafico M. und K. Stadler, Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern: Abflussmessreihen mit mehr als 30 Jahren in den Einzugsgebieten des Rheins und der Aare. Band I, Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7, Bern, 1986.
- 2 Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft [Hrsg.], Hochwasser, Spektrum Wasser 1, München, 80 S., 1998.

2.8. Massenbewegungen: Rutschungen, Fels- und Bergstürze

Hugo Raetzo und Olivier Lateltin

Ein grosses Wasserangebot über längere Zeit kann Massenbewegungen auslösen. Ungefähr 7% der Gesamtfläche der Schweiz weisen instabile Hänge auf. Die Zunahme der Niederschläge in der Westschweiz seit den 1970er Jahren hat in verschiedenen Rutschgebieten zu einer Zunahme der Bewegungen geführt. In jüngster Vergangenheit haben zunehmende Winterniederschläge in Kombination mit grossen Schmelzwassermengen ebenfalls mehr Rutschungen ausgelöst. Hanginstabilitäten könnten wegen des Gletscherrückzugs, der auftauenden Permafrostböden, zunehmender Winterniederschläge und der steigenden Schneefallgrenze allgemein zunehmen.

Definition

Massenbewegungen sind hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fest- und/oder Lockergesteinen. Sie umfassen zur Hauptsache Sturzprozesse (Stein- und Blockschlag, Fels- und Bergsturz), Rutschungen und Hangmuren. Sie können schnell und plötzlich auftreten oder als langsame, kontinuierliche Prozesse ablaufen.

Schätzungsweise 7% der Gesamtfläche der Schweiz sind von Hanginstabilitäten betroffen. Ausgedehnte Rutschgebiete sind insbesondere in Flyschformationen¹ häufig, wo ein hoher Ton- und Siltanteil Hanginstabilitäten begünstigt. In diesen Gebieten erschweren feinkörnige Böden das Versickern von Regenwasser, weshalb die Feuchtigkeit ganzjährig hoch ist. Der hohe Wassergehalt in Erde und Fels erhöht diejenigen Kräfte, die eine Instabilität verursachen.

Kleinere Massenbewegungen ereignen sich oft unbemerkt in unbesiedeltem Gebiet. Grössere Massenbewegungen werden als extrem wahrgenommen, wenn sie Schäden verursachen. Aber auch schon kleinere Hangmuren können lokal verheerende Auswirkungen haben (vgl. Gondo am 14.10.2000, Lutzenberg am 1.9.2002, Schlans am 16.11.2002). In diesem Kapitel werden starke und seltene Beschleunigungen von grossen Rutschhängen (Volumen grösser als 1 Mio. m³) oder das konzentrierte Auftreten mehrerer kleiner Rutschungen (bis mehrere 100'000 m³) als Extremereignis bezeichnet. Zum Beispiel ereigneten sich nach ausgiebigen Niederschlägen im Sommer 2002 in der ganzen Schweiz schätzungsweise tausend spontane Rutschungen, davon einige hundert in der Zentral- und Ostschweiz.

Kritische Wetterlagen und

Disposition zur Instabilität

Massenbewegungen ereignen sich, wenn über längere Zeit ein grosses Wasserangebot vorliegt. Im Gebirge ist dies nur bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt der Fall, da sonst die Niederschläge in Form von Schnee und Eis gespeichert werden. Ein grosses Wasserangebot liegt im Frühling beim Zusammenfallen einer starken Schneeschmelze und heftiger Niederschläge vor



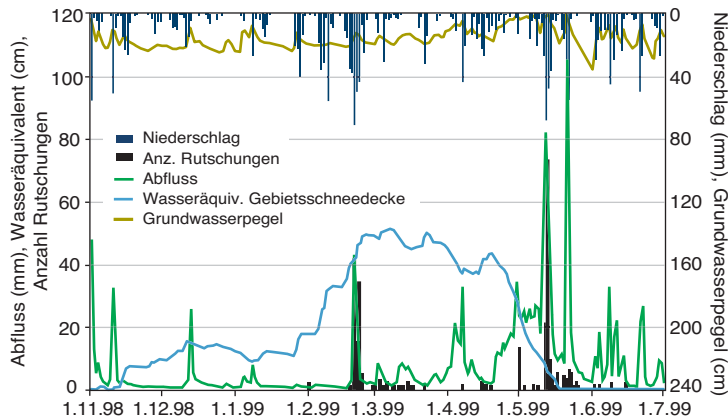


Abbildung 41: Niederschlags- und Grundwasserverlauf im Unwetterjahr 1999.² Dargestellt sind der Niederschlag (blau, oben), der Grundwasserspiegel (olivgrün, oben), der Abfluss (grün, unten) und das Wasseräquivalent der Schneedecke (hellblau, unten) aus dem Alptal im Kanton Schwyz (WSL-Daten). Zum Vergleich sind die Hanginstabilitäten in Tagesintervallen aufgezeichnet (schwarz, unten). Die erste Periode mit hoher Rutschaktivität ereignete sich vom 20.–23. Februar 1999 nach den letzten Schneefällen im Gebirge. Eine zweite Rutschperiode folgte zwischen dem 12. und 17. Mai 1999 während Starkniederschlägen, die zeitgleich mit dem Ende der Schneeschmelze fielen.

und im Sommer und Herbst bei heftigen und lange anhaltenden Niederschlägen (vgl. Kapitel 2.5., 2.7.):

- In den Lawinenwintern 1888/89, 1950/51 und 1998/99 (vgl. Kapitel 2.9.) lagen im Spätwinter grosse Schneemengen. Warme Temperaturen im Frühling führten dazu, dass die Schneemassen sehr schnell schmolzen. Gleichzeitig regnete es ausgiebig während längerer Zeit. In der Folge beschleunigten sich zahlreiche Rutschhänge und Murgänge brachen aus (vgl. Abbildung 41). Eine ähnliche, aber lokale Situation mit grossen Schmelzwassermengen verursachte im Frühling 1994 die Beschleunigung der Rutschung Falli Hölli im Kanton Freiburg. 40 Häuser wurden 200 Meter talwärts verschoben und zerstört.
- In den Jahren 1987, 1993 und 2000 wurden im Sommer und Herbst zahlreiche Alpentäler von mehrtägigen intensiven Niederschlägen heimgesucht (vgl. Kapitel 2.5., 2.7.). Sie brachten grosse Wassermengen und verursachten Hanginstabilitäten und Überschwemmungen. Eine Extremsituation ereignete sich am 13./14. Oktober 2000 im Simplongebiet. Eine Südlage führte während 8 Tagen feucht-warme Luft aus Süden gegen die Alpen. Innert zwei Tagen fielen nahezu 500 mm Regen, was statistisch gesehen einem 300-

bis 1000-jährigen Ereignis entspricht. Am 14. Oktober 2000 brach die Stützmauer oberhalb von Gondo. Die Rutschung mit Hangmure forderte 13 Menschenleben.

Hanginstabilitäten in der Vergangenheit

Prähistorische Phase

Die grossen Rutschgebiete in den Alpen waren am Ende der letzten Eiszeit, als sich die Gletscher zurückzogen, und am Anfang des Holozäns vor ca. 11'600 Jahren sehr aktiv (Abbildung 42). In den durch die Gletscher geformten Tälern kam es ohne die zurückhaltenden Kräfte der Eismassen zu einer Entspannung der Talflanken. Gleichzeitig verschwanden ausgedehnte Permafrostgebiete, die in

Fels- und Lockergesteinsmassen stabilisierend wirkten. In der Folge ereigneten sich am Ende der letzten Eiszeit und in geringerem Mass am Ende der kleinen Eiszeit neben Rutschungen auch zahlreiche Felsstürze.^{3,4} Die Alpentäler wurden mit Talzuschüben aufgefüllt und mancherorts haben Massenbewegungen Flüsse gestaut und es entstanden Seen und Sümpfe (Davos, Flims, Pfywald, Schwarzsee etc.).

In den letzten 9000 Jahren (Holozän) waren die Temperaturen ziemlich konstant. Hanginstabilitäten wurden vermutlich hauptsächlich durch Schwankungen bei den Niederschlägen verursacht. Die Temperatur- und Niederschlagskurven für das Holozän sind aber nach wie vor lückenhaft und ungenau und ein Zusammenhang zwischen Hanginstabilitäten und Klima lässt sich nur mit grossen Unsicherheiten herstellen. Markant mehr Rutschungen gab es zum Beispiel in den Lösskaltphasen vor zirka 3000 Jahren. In dieser niederschlagsreichen Epoche ereigneten sich in ganz Europa zahlreiche Massenbewegungen (Abbildung 42).

Historische Phase und 20. Jahrhundert

Für die Zeit nach dem 15. Jahrhundert können Klimadaten relativ genau rekonstruiert werden. Die so genannte „Kleine Eiszeit“ (Ende 13. bis Mitte 19. Jahrhundert) ist in Länge und Verlauf ziemlich genau bekannt. Für die historische

Phase können niederschlagsreiche Jahre mit Jahren hoher Rutschaktivität korreliert werden.

Seit den 1970er Jahren haben mehr Niederschläge in der Westschweiz in verschiedenen Rutschgebieten eine Zunahme der Bewegungen verursacht. In jüngster Vergangenheit sind es vor allem die zunehmenden Winterniederschläge, die mit dem Schmelzwasser mehr Rutschungen auslösen.

Statistisch gesehen handelt es sich bei den Ereignissen in den Jahren 1951 (Lawinenwinter), 1987 (Sommerniederschläge im Alpenraum), 1993 (Unwetter Brig), 1999 (Schneesmelze und Frühlingsniederschläge) und 2000 (Herbststunwetter Wallis und Tessin) um Extremereignisse.

Veränderungen als Folge der Klimaänderung

Die Häufigkeit von Massenbewegungen wird durch Veränderungen der Temperatur, des Wasserkreislaufs, der Gletscher und des Permafrosts beeinflusst. Die Zunahme der Winter- und Frühlingstemperaturen verändert die Form des Niederschlags, die Schneedeckenhöhe und die Bodentemperaturen. Die Klimaänderung verändert langfristig die Stabilität grosser Rutschvolumen. Kleinere Rutschungen und Hangmuren können dagegen kurzfristig durch Extremereignisse wie Starkniederschläge oder Gewitter instabil werden.

Gletscher und Permafrost

Durch den Gletscherrückzug und auftauenden Permafrost werden grosse Schuttmassen freigelegt. Dies kann unter Einfluss von Wasser zu Massenbewegungen führen. Die globale Erwärmung wird massive Auswirkungen auf die glazialen und periglazialen Gebirgsgebiete haben.³ Quantitative Prognosen bezüglich Auswirkungen der Klimaänderung auf den Permafrost sind jedoch schwierig.

Generell ist bei einer langfristigen Temperaturzunahme das verzögerte Aufschmelzen des Permafrosts wahrscheinlich. Dieser Trend wird von saisonalen Schwankungen überlagert, die hauptsächlich von der Mächtigkeit der Schneedecken abhängig sind. Im Herbst und Frühwinter verzögert eine frühe Schneedecke das Auskühlen

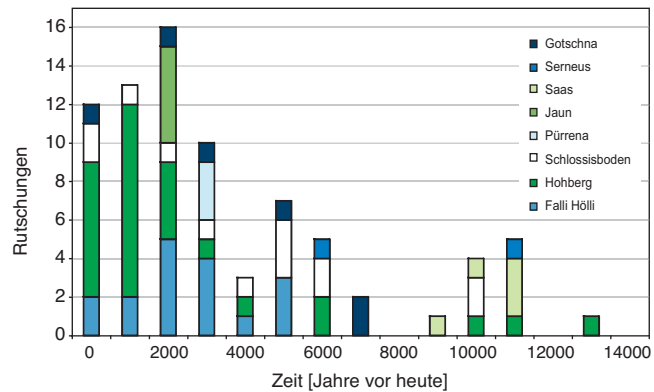


Abbildung 42: Häufigkeit von Rutschungen in der Schweiz im Holozän.^{5,6} Ausgewählt wurden grosse Rutschhänge mit einem Volumen von mehreren Mio. m³. Diese tiefgründigen Rutschungen haben seit der letzten Eiszeit mehrere Beschleunigungsphasen erlebt. Durch die C14-Datierung von fossilen Holzstämmen, die bei früheren Ereignissen in die Rutschmasse eingelagert wurden, kann für das Holozän eine qualitative Aussage über die Aktivität und bedingt über die klimatischen Voraussetzungen gemacht werden. Weil die Wahrscheinlichkeit grösser ist, mittels Bohrungen oder Grabungen jüngere Hölzer zu finden, die weniger tief unter der Erdoberfläche liegen, als ältere fossile Hölzer, sind für die letzten 2 bis 3 Jahrtausende mehr C14-Datierungen verfügbar als für die Zeit davor. Die älteste Datierung auf der Rutschung Hohberg liegt noch vor der Jüngeren Dryas (vor 12'700 Jahren). Nach dem Rückzug der Gletscher ereigneten sich im 12. und 11. Jahrtausend mehrere grosse Talzuschübe in den Freiburger und Bündner Alpen (Hohberg, Schlossisboden, Saas und Serneus). Diese Epoche ist durch eine Klimaerwärmung gekennzeichnet. Viele Hanginstabilitäten waren vor 7000 bis 5000 Jahren in einer Phase mit variablem Klima zu verzeichnen. Nach einer relativ ruhigen Phase nahm die Rutschaktivität vor ca. 3400 Jahren in mehreren Gebieten markant zu: Falli Hölli, Hohberg, Schlossisboden, Pürrena und Gotschna. Klimatisch ist das Ende des Subboreals in ganz Europa ein wichtiges Ereignis. Die Kaltphasen „Löbber“ (vor 3500 bis 3100 Jahren) und „Göschenen I“ (vor 2830 bis 2270 Jahren) sind ebenfalls durch die Gletschervorstösse gekennzeichnet. Die Phase hoher Rutschaktivität dauert bis ins zweite Jahrhundert vor Christus, danach nimmt die Häufigkeit leicht ab, aber sie variiert entsprechend den feuchten Phasen.

des Bodens. Die Erdwärme kann gespeichert werden, wodurch im darauf folgenden Sommer ein Trend zum Aufschmelzen unterstützt wird. Umgekehrt wird der kühle Boden im Frühling durch eine andauernde Schneedecke isoliert. Grosse Schneemengen haben ein spätes Ausapern zur Folge. Durch die kürzere Auftauphase kann im Sommerhalbjahr weniger Wärme in den Boden gelangen. Diese saisonalen Schwankungen dürften am langfristigen Schmelzen des Permafrosts jedoch wenig ändern.

Das System Permafrost reagiert sehr träge, da die Wärmekapazitäten von Eis und Boden grösser sind als diejenige von Luft. Somit haben nur langfristige Änderungen eine Auswirkung, die ihrerseits aber lange Zeit andauern wird. Er-

wärmen wird sich der Permafrost zuerst in den oberflächennahen Schichten, in schneefreien Zonen und in kleinen Permafrostgebieten geringer Mächtigkeit. In solchen Gebieten können Block- und Felsstürze, Erosion, Rutschungen und Murgänge zunehmen. Beispielsweise brachen am Ritigraben (VS) in den letzten zehn Jahren mehrmals Murgänge aus, die ihren Ursprung im Blockgletscher auf 2500 m hatten. Ebenfalls aus Permafrostzonen stürzten in den letzten Jahren kleinere und gelegentlich auch grössere Felsmassen zu Tal (Tschierva, Piz Scerscen, Mättenberg, Monte Rosa [ital. Seite], Gruben^{8,9}).

Niederschlag

Die Intensivierung des Wasserkreislaufs (vgl. Kapitel 2.5.) wirkt sich negativ auf die Hangstabilität aus. Durch die Zunahme der Winterniederschläge könnten die Rutschprozesse in Zukunft zunehmen. Bei höheren Temperaturen wird es mehr regnen und weniger schneien. Durch die gesteigerte Wasserverfügbarkeit im Winterhalbjahr nimmt die Hangstabilität ab.

Südlagen, die beispielsweise zur Extremsituation vom 13./14. Oktober 2000 im Simplongebiet geführt haben, werden gemäss Klimaszenarien zunehmen, wenn zukünftig mehr Luftfeuchtigkeit aus dem Mittelmeerraum Richtung Alpen transportiert wird. Liegt die Nullgradgrenze während solcher Staulagen von mehreren Tagen sehr hoch, dann muss vermehrt mit Rutschungen und Murgängen gerechnet werden.

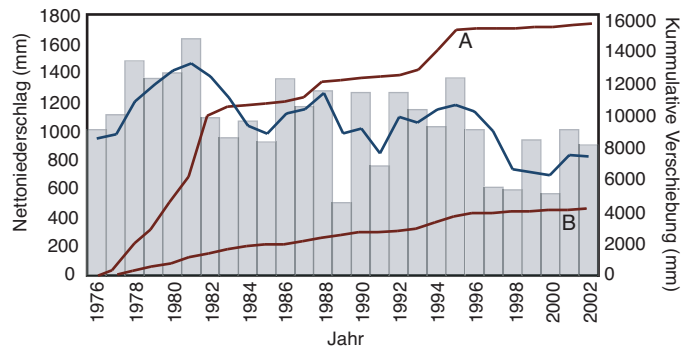
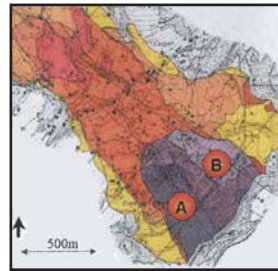


Abbildung 43: Rutschung La Frasse bei Aigle.⁷ Von 1976–2002 sind die Nettoniederschläge (graue Balken) und die kumulativen Verschiebungen (rote Linien) der Zonen A und B zum Vergleich dargestellt. Die blaue Linie zeigt den Dreijahresdurchschnitt der Nettoniederschläge. Wenn dieser über 1150 mm liegt, dann beschleunigt sich die Rutschfront, die in das Flussbett der Grande Eau vorstösst. Die Zone A reagiert jeweils mit einer markanten Beschleunigung (v.a. 1977– 82), während die Zone B nur geringfügige Geschwindigkeitsänderungen aufweist. Die Rutschfront reagiert somit mehr oder weniger sensibel auf den Niederschlag und den Grundwasserdruck, also indirekt auf klimatische Veränderungen.

1 Sedimente, die während der Gebirgsbildung von über den Meeresspiegel herausgehobenen Schwellenzonen in schmale Tröge verfrachtet worden sind (marine, oft glaukonitreiche Sandsteine, Mergel, Schiefertone und Kalke in Wechselagerung).
 2 Nach Bollinger D., C. Hegg, H.-R. Keusen und O. Lateltin, Ursachenanalyse der Hanginstabilitäten 1999, Bulletin für angew. Geologie Nr. 5/1, 5-38, 2000.
 3 Käab A., J. M. Reynolds and W. Haerberli, Glacier and permafrost hazards in high mountains. In: Huber U. M., M. A. Reasoner, and B. Bugmann [Eds], Global change and mountain regions: a state of knowledge overview. Advances in global change research. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003 (in press).

4 Haerberli W., A. Käab, M. Hoelzle, H. Bösch, M. Funk, D. Vonder Mühl und F. Keller, Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Schlussbericht NFP31, vdf, ETH Zürich, 1999.
 5 Raetzo H., Massenbewegungen im Gurnigelflysch und Einfluss der Klimaänderung. Bericht des NFP31, vdf, ETH Zürich, 256 S., 1997.
 6 Dapples F., Instabilités de terrain dans les Préalpes fribourgeoises (Suisse) au cours du Tardiglaciaire et de l'Holocène: influence des changements climatiques, des fluctuations de la végétation et de l'activité humaine. Thèse 1395 UNIFR, Multiprint S.A. Fribourg, 2002.
 7 Bonnard, persönliche Mitteilung.
 8 Noetzi J. , M. Hoelzle, and W. Haerberli, Mountain permafrost and recent Alpine rock-fall events: A GIS-based approach to determine critical factors. In: Phillips M. , S. M. Springman, and L. U. Arenson [Eds.], 8th International Conference on Permafrost, Zurich/Switzerland; Proceedings 2, 827 - 832, 2003.
 9 Haerberli, W., C. Huggel, A. Käab, A. Polkvoj, I. Zotikov, and N. Osokin, Permafrost conditions in the starting zone of the Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002 in North Osetia (Russian Caucasus). In: Haerberli W. and D. Brandova [Eds.], 8th International Conference on Permafrost, Zurich/Switzerland, Extended abstracts reporting current research and new information, University of Zurich, 49 - 50, 2003.

2.9. Lawinen

Walter J. Ammann

Lawinenkatastrophen mit vielen Schadenlawinen verursachen grosse Schäden. In der Schweiz werden sie in der Regel durch rasch aufeinander folgende Nordwest- oder Südostlagen ausgelöst, die heftige Niederschläge mit Neuschneehöhen von weit über 1 m bringen. Im 20. Jahrhundert hat die winterliche Schneedecke bei ausgewählten alpinen Stationen weder eindeutig zu- noch abgenommen. Auch die Schadenlawinenaktivität zeigt keine Veränderung. Eindeutige Prognosen zur Veränderung der Schadenlawinenaktivität als Folge der Klimaänderung sind nicht möglich.

Definition, Bedeutung und Ausmass

Lawinen sind für das Gebirgsland Schweiz eine bedeutende Naturgefahr. Jeden Winter gibt es eine Vielzahl von Lawinen. Als Lawine wird der gesamte Bewegungsvorgang der Schneemassen vom Anrissgebiet über die Sturzbahn bis ins Ablagerungsgebiet bezeichnet. Jede Lawine kann aufgrund von rein äusserlichen, morphologischen Merkmalen im Anrissgebiet, in der Sturzbahn und im Ablagerungsgebiet klassifiziert werden. Lawinen unterscheiden sich zudem wesentlich in ihrer Grösse.

Lawinen mit relativ kleinen beteiligten Schneemassen, kurzen Bahnen und vorwiegend fliessender Bewegungsform treten jeden Winter auf und werden als Schneebrettlawinen bezeichnet. Sie treten über den ganzen Winter zeitlich und räumlich regelmässig verteilt auf. In der Schweiz fallen ihnen im langjährigen Mittel jedes Jahr 23 Personen zum Opfer (vgl. Kapitel 1.6.2.).

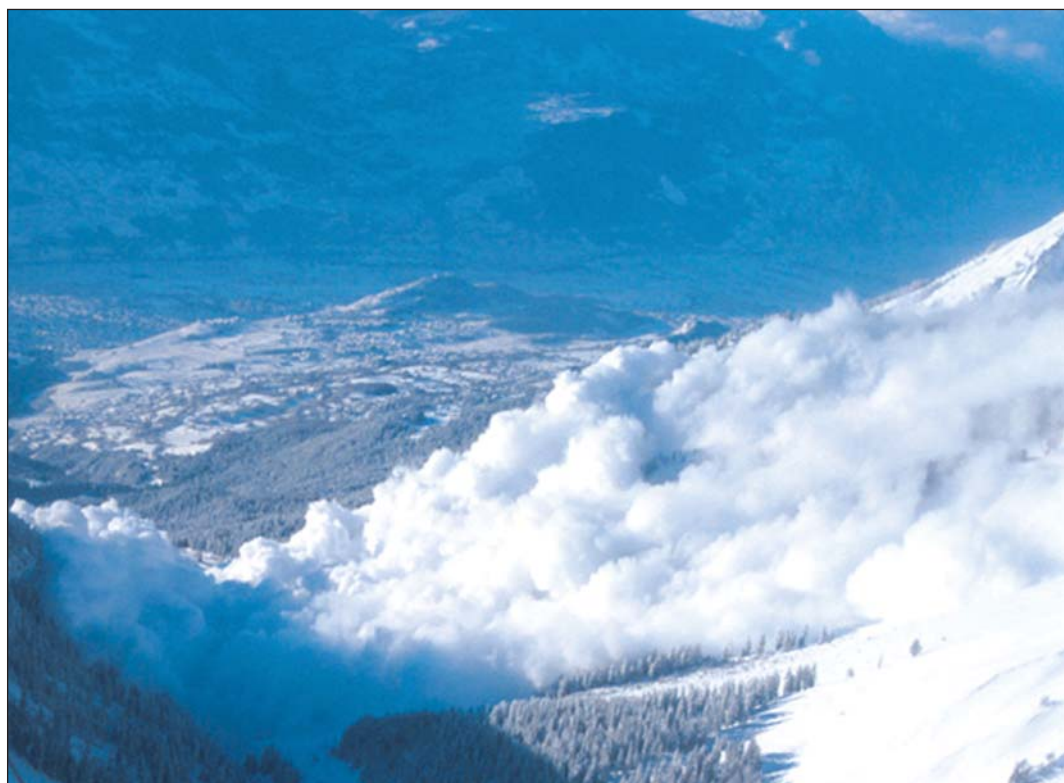
Lawinen mit grossen beteiligten Schneemassen und langen – oft einige Kilometer – Sturzbahnen werden Katastrophenlawinen, Grosslawinen oder Tallawinen genannt. Neben Fliesslawinen kommt es dabei häufig auch zu Staublawinen oder zu einer Kombination von beiden. Unter Fliesslawinen versteht man dabei kompakt abstürzende Schneemassen, bei den Staublawinen kommt es zu einer Aufwirbelung und einem Mitreissen der Schneemassen durch die Luft.

Extreme Lawinen treten in einem bestimmten Gebiet relativ selten auf.

Ihre Wiederkehrperiode beträgt 10 bis 30 Jahre, für extrem grosse Lawinen gar über 100 Jahre. Sie werden Schadenlawinen genannt, wenn sie Menschen, Siedlungen und Verkehrswege gefährden. In der Vergangenheit haben sie immer wieder zu grossen Opferzahlen und Sachschäden geführt, zum letzten Mal im Februar 1999. Damals forderten über 1200 Schadenlawinen insgesamt 17 Todesopfer und verursachten Sachschäden von über 600 Mio. SFr.¹ Man spricht dann von eigentlichen Lawinenkatastrophen.

Ursachen und Voraussetzungen

Katastrophensituationen mit sehr vielen, im gleichen Zeitraum und verteilt über ein grosses Gebiet abgehenden Schadenlawinen werden stets von besonderen Wetterlagen verursacht. In der Regel sind es für das Gebiet der Schweizer Alpen eine oder mehrere rasch aufeinander folgende Nordwest- oder Südostlagen, die zu heftigen Schneefällen während mehreren Tagen führen und Neuschneehöhen von weit über 1 m verursachen. Solche Wetterlagen können während des ganzen



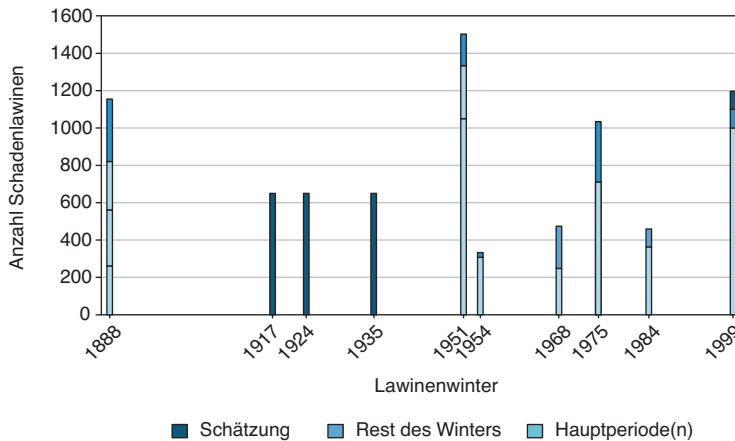


Abbildung 44: Die katastrophalen Lawinenwinter in den Schweizer Alpen seit 1887/88. Als Vergleichskriterium dient die Anzahl Schadenlawinen. Als Schadenlawine wird sowohl eine Lawine gezählt, die z.B. einen Alpstall beschädigt, als auch eine Lawine, die ein Haus zerstört oder eine Nationalstrasse verschüttet. Die Balken sind jeweils unterteilt in die Hauptlawinenperioden. 1888 gab es drei markante Lawinenperioden (zwischen Mitte Februar und Ende März), 1951 waren es zwei (im Januar und im April). Die Angaben für 1916/17, 1923/24 und 1934/35 sind geschätzt.^{2,3}

Winters von Dezember bis April auftreten, aber nicht alle dieser Starkschneefälle führen zwangsläufig auch zu einer katastrophalen Lawinensituation. Im Lawinenwinter 1999 verursachten die ergiebigen Schneefälle während des Monats Februar gebietsweise akkumulierte Neuschneehöhen von über 5 m.¹ Oft sind solche Niederschlagsperioden mit stürmischen Winden verbunden, was zu umfangreichen Verfrachtungen des Neuschnees und vor allem in kammnahen Steilhängen zu zusätzlichen Schneeakkumulationen führt. In solchen Situationen können Grosslawinen entstehen mit Anrissmächtigkeiten, d.i. die Dicke der losbrechenden Schneeschicht, von mehreren Metern, mit Anrissbreiten bis über 1 km sowie einem losbrechenden Volumen von bis zu 1 Mio. m³ Schnee.

Das Anrissgebiet von Grosslawinen liegt in der Regel deutlich über der Waldgrenze. Im Lawinenwinter 1999 lag es im Mittel auf etwa 2300 m.¹ Grosslawinen stürzen mit sehr hohen Geschwindigkeiten zu Tal: Bei Fliesslawinen werden über 100 km/h erreicht und bei Staublawinen gegen 300 km/h. Die zerstörerische Kraft von Grosslawinen ist sehr gross. Es können Drücke bis zu 1000 kN/m² entstehen. Gegen diese Kräfte ist ein Schutz von Bauwerken illusorisch. Die abstürzenden Schneemassen verlieren entlang der Sturzbahn Energie durch Reibungsvorgänge. Weil die Reibung zwischen den abgleitenden Schnee-

massen und dem Boden gering ist, werden Fliesslawinen aber erst in flachem Gelände bei weniger als 12° Hangneigung abgebremst. Die Reichweite und der zerstörerische Einfluss einer Lawine ist deshalb sehr gross.

Bei frühlinghaften Bedingungen oder wenn Regen in die Schneedecke eindringt, kann die Lawinenaktivität ebenfalls steigen. Diese Nassschneelawinen haben aber einen grösseren Reibungswiderstand zu überwinden. Deshalb ist ihre Reichweite im Vergleich zu den trockenen Hochwinterlawinen bedeutend kürzer, auch wenn die Kubaturen der abstürzenden Schneemassen vergleichbar sind.

Historische Lawinenkatastrophen und allfällige Trends

Lawinenwinter in der Vergangenheit

Katastrophale Lawinensituationen, die mit dem Lawinenwinter 1999 vergleichbar sind, ereigneten sich im Winter 1950/51 mit 95 Todesopfern⁴ und im Winter 1887/88 (Abbildung 44). Aber auch aus früheren Jahrhunderten sind ähnliche Katastrophen-Situationen verteilt über den gesamten Alpenraum bekannt.⁵

Für den Zeitraum nach 1500 sind grosse Lawinenereignisse mit zunehmender Vollständigkeit dokumentiert. Ab 1888 sind alle grösseren Schadenereignisse erfasst. Davor sind die Aufzeichnungen selektiv und unvollständig. Seit 1945 werden alle gemeldeten Schadenlawinen einzeln in einem Schadenlawinen-Archiv des SLF registriert. Diese Datenbasis ermöglicht eine detaillierte Übersicht über die zeitliche und räumliche Verteilung der Schadenlawinen im Gebiet der Schweizer Alpen. Kombiniert mit meteorologischen Daten kann die Wahrscheinlichkeit von Schadenlawinen bei gewissen Witterungssituationen abgeschätzt werden. Dazu wurden im Rahmen des NFP31⁵ für die Stationen Andermatt, Bever und Davos möglichst weit zurückreichende meteorologische Datenreihen zusammengetragen. Diese Stationen liegen ungefähr auf gleicher Höhe (ca. 1500 m) in klimatisch unterschiedlichen

Regionen der Schweizer Alpen. Angaben zur Mächtigkeit der Schneedecke mit täglicher Auflösung existieren für Davos seit 1896, für Bever seit 1910 und für Andermatt seit 1947.

Basierend auf diesen Daten wurde die Entwicklung der Schneedecke im 20. Jahrhundert untersucht. Für die Station Davos wurde auch ein potentieller Schadenlawinenaktivitäts-Parameter berechnet, der nur von meteorologischen Daten abhängt. Die wichtigsten Schlussfolgerungen der Auswertungen sind (vgl. auch Abbildung 45):

- Die Schneehöhe ist von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich. Ein eindeutiger zeitlicher Trend ist aber nicht feststellbar, vermutlich deshalb, weil die mittlere Wintertemperatur auch heute noch deutlich unter 0°C liegt. Die letzten Jahre waren an den untersuchten Stationen bezüglich der Schneehöhe nicht aussergewöhnlich. Bezüglich der mittleren Schneehöhe ist in den 1990er Jahren ein leicht abnehmender Trend feststellbar. Schneearme Jahre traten gehäuft aber bereits auch in den 1920er Jahren auf.
- Die Schadenlawinenaktivität hat z.B. in Davos weder zu- noch abgenommen (vgl. Abbildung 45).
- Schadenereignisse haben ein regional beschränktes Ausmass. Während der vergangenen 600 Jahre wurde noch nie der gesamte schweizerische Alpenraum gleichzeitig von einer Lawinenkatastrophe heimgesucht. Es lässt sich kein Trend zu verstärkter oder verminderter Lawinenaktivität erkennen.

Schutzmassnahmen und Schadenausmass

Bereits nach dem Lawinenwinter 1887/88 wurde mit ersten Lawinenverbau-Massnahmen zum Schutz von Siedlungen vor Lawinen begonnen. Anfänglich wurden Blocksteinmauern zur Terrassierung der Hänge gebaut, später vor allem Stützverbauungen aus Stahl zur Stabilisierung der Schneemassen im Anrissgebiet. Diese Anstrengungen wurden nach dem Katastrophenwinter 1950/51 massiv verstärkt. Bis heute hat der Bund rund 1.5 Mrd. SFr. in den baulichen Lawinenschutz investiert.

Das grosse Schadenausmass im Lawinenwinter 1999 darf nicht dazu verleiten, die in den letzten Jahrzehnten getätigten Schutzmass-

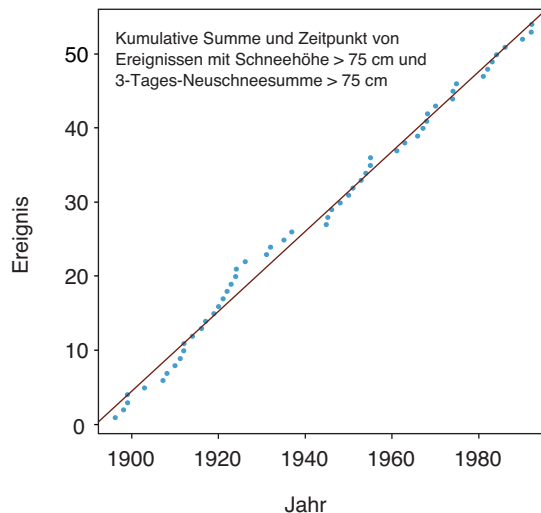


Abbildung 45: Summe und Zeitpunkt der Ereignisse mit Schneehöhe und 3-Tages-Neuschneesumme je grösser als 75 cm. Die gerade Linie zeigt den mittleren Trend von 1896–1993 für Davos. Potentiell lawinenaktive Zeitabschnitte sind steiler als lawinenarme.⁵

nahmen in Frage zu stellen. Im Gegenteil: die seit vielen Jahren in enger Zusammenarbeit von Gemeinden, Kantonen und Bund verrichtete Präventionsarbeit hat ihre Bewährungsprobe bestanden! Die Verletzlichkeit von Menschen und Sachwerten hat seit 1950/51 um ein Vielfaches zugenommen und das Risiko ist somit gestiegen.¹ Trotzdem waren 1999 etwa sechsmal weniger Todesopfer zu beklagen als 1950/51. Die Sachschäden stiegen im Vergleich zu den Versicherungssummen für Bauten und Infrastrukturanlagen nur leicht überproportional an. Dank technischer, raumplanerischer und organisatorischer Massnahmen, aber auch dank der grossflächigen Schutzwirkung der schweizerischen Gebirgswälder konnten die Schäden in Grenzen gehalten werden.

Einfluss der Klimaänderung

Extreme Lawinensituationen entstehen als Folge ausserordentlicher Wetterlagen, die oberhalb von rund 1200 m während einiger Tage massive Schneefälle verursachen.

Als Folge der Klimaänderung wird in Zukunft eine Erwärmung der mittleren Lufttemperatur sowie eine Zunahme der Winterniederschläge und der Häufigkeit extremer Wetter-situationen im Winter erwartet. Bisher existieren nur wenige Studien, die zudem ausschliesslich den Einfluss der Temperaturerhöhung auf die

Schneedecke und die Lawinenaktivität untersuchen.⁶ Der Einfluss anderer Veränderungen und ihres Zusammenwirkens auf die Schneebedeckung und die Lawinenaktivität ist noch nicht untersucht. Somit sind nur qualitative Abschätzungen möglich⁷:

- (a) Die Schneefallgrenze wird als Folge der Erwärmung um einige hundert Meter ansteigen. Der Einfluss der Erwärmung führt isoliert betrachtet zu weniger mächtigen und kürzeren Schneebedeckungen.⁶
- (b) Andererseits führt die Zunahme der Winterniederschläge oberhalb der Waldgrenze, d.h. in potentiellen Lawinenanrissgebieten, zu mächtigeren Schneedecken. Passiert die Niederschlagszunahme hauptsächlich während einer ausserordentlichen Wetterlage und nicht verteilt über den ganzen Winter, wird das Potential für eine extreme Lawinensituation gegenüber heute vergrössert.
- (c) Heute führt im Winter etwa jede dritte ausserordentliche Wetterlage auch zu einer extremen Lawinensituation.¹ Mit der Zunahme der Häufigkeit von ausserordentlichen Wetterlagen während der Wintermonate steigt damit auch die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Winter eine extreme Lawinensituation auftritt.
- (d) In tieferen Lagen kann häufigerer Regen auf eine vorhandene Schneedecke vermehrt Nassschneelawinen verursachen. Solche

Situationen treten aber bereits heute im Frühling auf, weshalb das Risiko kaum zunehmen wird.

- (e) Generell dürfte mit der Klimaerwärmung das Gleiten der Schneedecke auf dem bewachsenen Boden ausgeprägter werden, was zu vermehrten Gleitschnees Schäden an Vegetation und Boden führen könnte.

-
- 1 SLF, Der Lawinenwinter 1999 – Ereignisanalyse. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 588 S., 2000.
 - 2 Quelle: SLF-Schadenlawinendatenbank.
 - 3 Calonder G. P., Ursachen, Wahrscheinlichkeit und Intensität von Lawinenkatastrophen in den Schweizer Alpen, Diplomarbeit Geographisches Institut der Universität Zürich, 1986.
 - 4 SLF, Schnee und Lawinen in den Schweizeralpen im Winter 1950/51, Winterbericht des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, Nr. 15, SLF Davos, 1952.
 - 5 Schneebeil M., M. Latenser, P. Föhn und W. Ammann, Wechselwirkungen zwischen Klima, Lawinen und technischen Massnahmen, Schlussbericht NFP31, vdf, Zürich, 132 S., 1998.
 - 6 Föhn P. M. B., Climatic change, snow-cover and avalanches, CATENA, Supplement 22, 11–21, 1992.
 - 7 Ammann W. J. and V. Stöckli, Economic consequences of climate change in Alpine regions: Impact and mitigation. In: Steiniger K. and H. Weck-Hannemann [eds.], Global environmental change in Alpine regions, impact, recognition, adaptation and mitigation, Edward Elgar Publishing, London, 2002.

2.10. Winterstürme

Heini Wernli, Stephan Bader und Patrick Hächler

Winterstürme entstehen im Zusammenhang mit intensiven Tiefdruckgebieten. In Mitteleuropa steigt die Häufigkeit von Sturmereignissen in Perioden mit hoher atlantischer Zyklonenaktivität. Die Häufigkeit der starken Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik hat seit den 1930er Jahren zugenommen. Als Folge der Klimaänderung sagen viele Modellrechnungen eine Zunahme der Zyklonenaktivität im östlichen Nordatlantik und über Westeuropa voraus. In Westeuropa werden intensivere Stürme vorsichtig als mögliche Entwicklung eingestuft. Über die zukünftige Veränderung der Föhnhäufigkeit liegen keine Abschätzungen vor.

Einleitung

Extreme Winterstürme wie Lothar (Dezember 1999) oder Vivian (Januar 1990) sind seltene Einzelfälle. Deshalb ist es nicht möglich, statistisch gesicherte Aussagen über die Veränderung von Häufigkeit und Intensität solcher Ereignisse zu machen. Trendangaben, ob die Ereignisse häufiger oder seltener werden, sind daher sehr unsicher.

Die Intensität eines Sturms wird über die Windgeschwindigkeit in Bodennähe (auf 10 m Höhe) bestimmt. Dabei ist konsequent zwischen Böenspitzen (Sekundenwerte) und dem mittleren Wind (meist über 10 Minuten) zu unterscheiden. Für die Berichterstattung in den Medien werden in der Regel die Böenspitzen verwendet. Auch hat sich die Versicherungswirtschaft zur Festlegung der Schadengrenze daran orientiert, und zwar bei 75 km/h. Der dabei verwendete Begriff „Sturm“ ist nicht glücklich gewählt und widerspricht den nachfolgenden Ausführungen. Die bekannteste und älteste Norm zur Klassierung von Winden ist wohl diejenige nach Beaufort. Dabei wird allerdings auf die gemittelten Werte zurückgegriffen. Und hier spricht man nun ab Windstärke 9 von Sturm, somit bei Mittelwerten ab 75 km/h. Der Begriff „Orkan“ (extremes Ereignis) entspricht der Stärke 12 der Beaufort-Skala und gilt ab mittleren Werten von 118 km/h, was im Binnenland in tiefen Lagen praktisch nicht vorkommt. Um aufgrund der Windmittelwerte auf die Böenspitzen schliessen zu können, müssen meist zwischen 30 und 80% zur Windstärke addiert werden.

Meteorologische Voraussetzungen

Winterstürme entstehen im Zusammenhang mit intensiven Tiefdruckgebieten (vgl. Kapitel 1.3.). Diese entstehen in Regionen mit grossen hori-

zontalen Temperaturunterschieden, d.h. im Übergangsbereich zwischen den warmen Subtropen und kalter Polarluft. Eine Region mit einem klimatologisch starken, von Norden nach Süden gerichteten Temperaturunterschied ist der westliche Nordatlantik, wo viele Tiefdruckgebiete entstehen, die dann oft nach Nordwesteuropa weiterziehen. Die Zugbahn der Tiefdruckgebiete führt selten direkt über Zentraleuropa, deshalb erreichen uns in der Schweiz meist nur die Kaltfronten als Ausläufer dieser Tiefdruckgebiete. Während Wetterlagen mit einem grossen Druckunterschied zwischen den Azoren und Island nimmt die atlantische Westwindströmung zu und



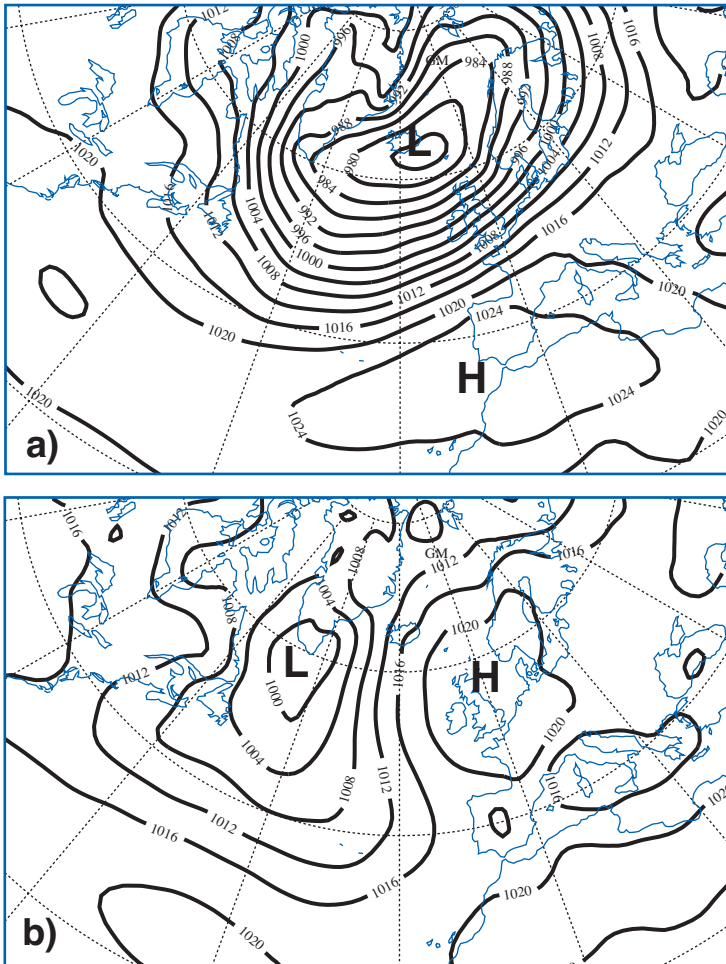


Abbildung 46: Bodendruckverteilung für (a) einen Monat mit einem stark positiven NAO-Index (Februar 1990) und (b) einen Monat mit einem stark negativen NAO-Index (Januar 1987). Der Abstand der Isobaren beträgt 4 hPa. Im Falle einer positiven NAO-Phase zeigt sich im Monatsmittel ein starkes Islandtief und ein über Spanien ausgedehntes Azorenhoch. In der negativen Phase ergibt sich im Monatsmittel ein Hoch über Nordwesteuropa und ein mässig starkes Tief an der Südspitze von Grönland.

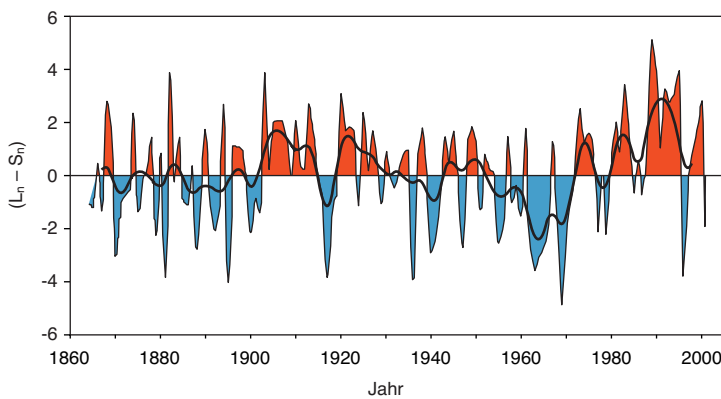


Abbildung 47: Rekonstruktion des NAO-Index seit 1864. Der NAO-Index bezeichnet den Druckunterschied zwischen den Azoren und Island.⁴ Bei hohem NAO-Index ist dieser Druckunterschied gross. Seit Beginn der 1970er Jahre ist der NAO-Index mehrheitlich positiv.

ebenso die Häufigkeit von Tiefdruckgebieten, die bis nach Europa hineinlaufen.

Extreme Winterstürme werden durch das Zusammenspiel zahlreicher Prozesse (starke Nord-Süd-gerichtete Temperaturunterschiede; starker Jetstream; Störungen auf einer Höhe von ca. 9 km [Niveau der Tropopause]; Kondensation von Wasserdampf) ausgelöst, die für die einzelnen Fälle unterschiedlich wichtig sind. Im Falle von Lothar (Dezember 1999) zeigen Computersimulationen, dass die Kondensation von Wasserdampf eine ganz wesentliche Rolle spielte bei der Entstehung und Intensivierung des Systems über dem Atlantik¹ (vgl. Abbildung 10 und Kasten *Lothar – eine Prozessstudie*).

Beobachteter Trend im 20. Jahrhundert

In Perioden mit hoher atlantischer Zyklonenaktivität steigt auch die Häufigkeit von Sturmereignissen in Mitteleuropa. Ein Indikator für die Stärke der monatlichen Zyklonenaktivität über dem Nordatlantik und Europa ist der Index der Nordatlantischen Oszillation (NAO).^{2,3} Der NAO-Index entspricht dem Druckunterschied am Boden zwischen den Azoren (oder Portugal) und Island (Abbildung 46).⁴ In Perioden mit einem hohen NAO-Index ist dieser Druckunterschied gross.

Seit rund 30 Jahren dominiert ein hoher NAO-Index die winterlichen Strömungsverhältnisse über dem Nordatlantik und Europa (Abbildung 47). Auch die Winter 1989/90 und 1999/2000 mit den Stürmen Vivian und Lothar liegen in dieser Zeit. Ein gesicherter Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von starken Stürmen in Mitteleuropa und dem NAO-Index lässt sich jedoch nicht zeigen.

Statistische Untersuchungen aller starken und schwachen winterlichen Tiefdruckgebiete von 1958–1999 zeigen, dass diese über dem Nordatlantik etwas seltener geworden sind. Ihre Zugbahnen haben sich nach Norden verschoben.³ Im mitteleuropäischen Raum sind die Änderungen nicht signifikant. Die Häufigkeit der starken Tiefdruckgebiete über dem Nordatlantik hat seit den 1930er Jahren dagegen zugenommen⁵ (Abbildung 48). Ihre Zugbahnen haben sich ebenfalls nach Norden verschoben. Die Schweiz liegt deshalb heute vermehrt am südlichen Rand der Sturmfelder oder sogar ausserhalb davon.⁶ Zwischen 1880 und 1930 lag in der Nordostschweiz die Anzahl Tage mit hohen Windgeschwindigkeiten deutlich höher als in der jüngeren Zeit (Abbildung 49). Bemerkenswert ist auch, dass sich der Beginn der starken Stürme in der Schweiz im Laufe der Zeit immer mehr vom Oktober/November in den Dezember hinein verlegt hat. Global gesehen, gibt es bei Intensität und Häufigkeit von nicht tropischen Stürmen keine signifikanten Trends bezüglich der Klimaänderung.⁷

Zukunftsaussichten mit Klimaänderung

Die globale Klimaänderung könnte die Wahrscheinlichkeit der Voraussetzungen für die Entstehung von extremen Winterstürmen verändern. So wird zum Beispiel praktisch einhellig eine Zunahme des Wasserdampfs in der Atmosphäre vorausgesagt, was sich verstärkend auf Intensität und Häufigkeit von Sturmtiefs auswirken kann.

Viele Studien mit globalen Klimamodellen sagen voraus, dass die Zyklonenaktivität im östlichen Nordatlantik und über Westeuropa zunehmen wird.^{8,9} Die verantwortlichen physikalischen Prozesse sind jedoch noch nicht klar.⁷ So bleibt unbeantwortet, ob die Zyklonenaktivität wegen einer erhöhten Häufigkeit oder einer

erhöhten Intensität von Tiefdruckgebieten zunimmt.

Voraussagen über die Häufigkeit von starken (und extremen) Winterstürmen sind mit Vorsicht zu interpretieren. Die globalen Klimamodelle zeigen oft relativ grosse Fehler bei der Wiedergabe der Zugbahnen von einzelnen Tiefdruckgebieten.¹⁰ Zudem stellen sie möglicherweise einige der Prozesse, die bei relativ kleinen und sehr intensiven Tiefdruckgebieten (Lothar, Vivian) wichtig sind, noch nicht genügend gut dar. Die Maxima der bodennahen Windgeschwindigkeit sind z.B. stark durch die lokale Topographie beeinflusst und müssen mit aufwändigen numerischen Methoden abgeschätzt werden.¹¹

Sowohl aufgrund der Messungen als auch der Modelle werden intensivere Stürme in den mittleren Breiten (z.B. Westeuropa) deshalb vorsichtig

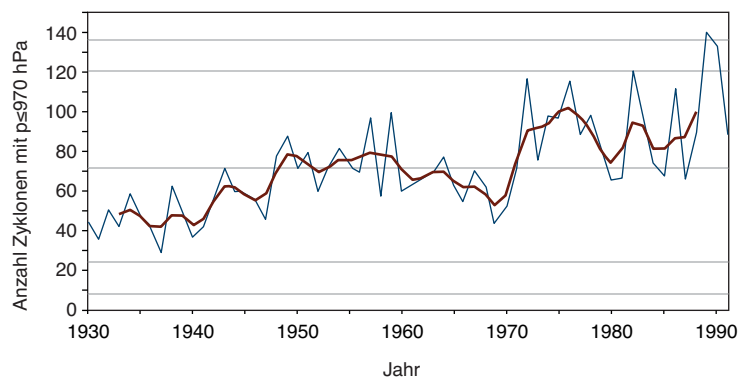


Abbildung 48: Zeitreihe der jährlichen Anzahl starker Tiefdruckgebiete im Nordatlantik und in Europa von 1930–1990. Ein Tiefdruckgebiet gilt als stark, wenn der minimale Luftdruck kleiner als 970 hPa ist.⁵ Die Abbildung zeigt eine deutliche Zunahme der Häufigkeit dieser starken Tiefdruckgebiete in der betrachteten Zeitperiode.

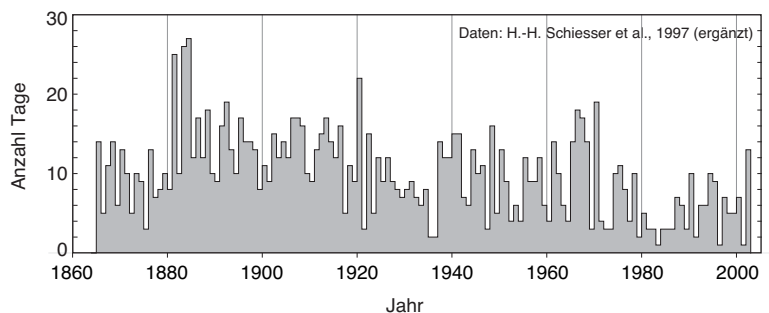


Abbildung 49: Anzahl Starkwindtage (Böenspitzen 90 km/h [50 Knoten] und mehr) im Winterhalbjahr für die Periode 1864/65–2001/02 an der Messstation Zürich⁶ (ergänzt). Die Station wird als repräsentativ für die Nordostschweiz angesehen. Einige umliegende Stationen wurden für Quervergleiche und für die Ergänzung fehlender Daten verwendet.

Föhn als Extremwind

Neben den klassischen Weststürmen gehören in der Schweiz auf der Alpennordseite auch Föhnstürme zu den Sturmrisiken. Auch hier sind Extremereignisse eingeschlossen. Der Föhnsturm vom 7./8. November 1982 hinterliess in den Alpen massive Waldschäden.

In unseren Alpentälern ist der Föhn ein sehr häufiges Phänomen. Meist liegen die Windspitzen, die bei Föhn erreicht werden, im Bereich unter 100 km/h. Eine Analyse der Jahreshöchstwerte zeigt aber, dass vor allem in Süd-Nord-Tälern, welche die Föhnströmung ideal kanalisieren und dadurch zusätzlich beschleunigen, immer wieder starke Stürme auftreten. Für die Messstelle in Altdorf muss jedes Jahr mit einer stärksten Föhnböe von mindestens etwa 110 km/h gerechnet werden. Alle 10 Jahre werden 140 km/h erreicht, und das geschätzte 50-jährige Maximum liegt bei knapp 160 km/h. Für Vaduz konnten ähnliche Werte ermittelt werden, sie liegen jedoch im Durchschnitt etwa 5 km/h tiefer als in Altdorf.

Generell muss davon ausgegangen werden, dass in den meisten Föhntälern Föhnstürme mit Spitzen von über 100 km/h auftreten können. In seltenen Fällen werden dabei auch Gebiete erfasst, die nicht besonders föhnexponiert sind (Appenzellerland, Zugerberg, Obwalden, Berner Oberland). In Höhenlagen von über ca. 2000 Metern erreicht der Föhn praktisch im gesamten nordalpinen Raum öfters Sturmstärke, und in exponierten Lagen in Alpenkammnähe (z.B. Gütsch/Andermatt) können gar 200 km/h überschritten werden.

Neben den Risiken durch Winddruck stellt der Föhn auch eine nicht zu unterschätzende Gefahr im Zusammenhang mit Bränden dar. Die mitunter über lange Zeit anhaltenden Föhnwinde können sowohl Brände entfachen als auch anderweitig entstandene Brände schnell verstärken. Entsprechend problematisch ist die Brandbekämpfung unter Föhneinfluss.

Abschätzungen zur zukünftigen Entwicklung der Föhnhäufigkeit unter dem Aspekt der globalen Klimaänderung liegen vorderhand noch keine vor. Es steht fest, dass der Föhn sehr eng an bestimmte Wetterlagen und deren regionale Charakteristiken gekoppelt ist. Deshalb sind zunächst verlässliche Resultate zur zukünftigen regionalen Wetterlagenentwicklung abzuwarten.

Patrick Hächler

als mögliche Entwicklung eingestuft. Andererseits lassen die meisten Klimamodelle in hohen Breiten eine grössere Erwärmung erwarten als in tieferen. Somit würden die Temperaturgegensätze und damit das Potential für starke Tiefdruckbildung geringer.

- 1 Wernli H., S. Dirren, M. Liniger, and M. Zillig, Dynamical aspects of the life-cycle of the winter storm 'Lothar' (24–26 December 1999). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 128, 405–429, 2002.
- 2 Wanner H., S. Brönnimann, C. Casty, D. Gyalistras, J. Luterbacher, C. Schmutz, D. B. Stephenson, and E. Xoplaki, North Atlantic Oscillation – concepts and studies. *Surveys in Geophysics*, 2002.
- 3 Gulev S. K., O. Zolina, and S. Grigoriev, Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data, *Clim. Dynam.*, 17, 795–809, 2001.
- 4 Hurrell J. W., Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science*, 269, 676–679, 1995.

- 5 Schinke H., On the occurrence of deep cyclones over Europe and the North Atlantic in the period 1930–1991, *Contrib. Atmos. Phys.*, 66, 223–237, 1993.
- 6 Schiesser H. H., C. Pfister, and J. Bader, Winter storms in Switzerland North of the Alps 1864/65–1993/94. *Theor. Appl. Climatol.*, 58, 1–19, 1997.
- 7 IPCC, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 881 p., 2001.
- 8 Sinclair M. R. and I. G. Watterson, Objective assessment of extratropical weather systems in simulated climates, *J. Climate*, 12, 3467–3485, 1999.
- 9 Ulbrich U. and M. Christoph, A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing, *Clim. Dynam.*, 15, 551–559, 1999.
- 10 Carnell R. E., C. A. Senior, and J. F. B. Mitchell, An assessment of measures of storminess: Simulated changes in northern hemisphere winter due to increasing CO₂, *Clim. Dynam.*, 12, 467–476, 1996.
- 11 Goyette S., M. Beniston, P. Junco, D. Caya, and R. Laprise, Numerical investigation of an extreme storm with the Canadian Regional Climate Model: The case study of windstorm Vivian, Switzerland, February 27, 1990. *Climate Dynamics*, 18, 145–168, 2001.

Anhang

A1. Impressum

Autoren des Berichts

Dörte Aller	Interkanonaler Rückversicherungsverband (IRV), Bern
Walter J. Ammann	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos
Stephan Bader	MeteoSchweiz, Zürich
Marco Conedera	WSL Sottostazione Sud delle Alpi, Bellinzona
Claudio Defila	MeteoSchweiz, Zürich
Christoph Frei	Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich
Patrick Hächler	MeteoSchweiz, Zürich
Christoph Hegg	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf
Roland Hohmann	ProClim-, Bern
Patricia Jungo	Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel
Ewa Kozłowski	Interkanonaler Rückversicherungsverband (IRV), Bern
Olivier Lateltin	Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Biel
Gerry Lemcke	Swiss Re, New York, USA
Urs Neu	ProClim-, Bern
Atsumu Ohmura	Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich
Armin Petrascheck	Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Biel
Christian Pfister	Historisches Institut, Universität Bern
Hugo Raetzo	Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Biel
Bruno Schädler	Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern
Christoph Schär	Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich
Hans-Heinrich Schiesser	Zürich
Franziska Schmid	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf
Heinz Wanner	Geographisches Institut, Universität Bern
Heini Wernli	Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich

Begutachter

Martin Beniston	Institut de Géographie, Université de Fribourg
Harald Bugmann	Departement Forstwissenschaften, ETH Zürich
Hans Elsasser	Geographisches Institut, Universität Zürich
Martin Grosjean	NCCR Climate, Bern
Wilfried Haeblerli	Geographisches Institut, Universität Zürich
Markus Nauser	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
Martin Schneebeli	Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), Davos

Projektleitung und Redaktion

Roland Hohmann

Redaktionelle Mitarbeit

Theres Grau, Bettina Büchler, Urs Neu, Christoph Ritz, Daniel Weyermann

Layout

Roland Hohmann und Gabriele Müller-Ferch

Korrektorat

Lektorama, Freyastrasse 26, 8036 Zürich

Übersetzung ins Französische

Jean-Jacques Dätwyler, Sciencepress, Wabernstrasse 34, 3007 Bern

Übersetzung ins Englische

Peter Case, en-solar, Hubel/Wangelen 153A, 3615 Heimenschwand

Der vorliegende Bericht wurde an den Sitzungen vom 27. Februar und 28. Mai 2003 vom OcCC gutgeheissen.

A2. Bildnachweis

Titelbild	Peter Schlegel/Keystone
Seite 14	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
Seite 16	Christoph Kull, Bern
Seite 21	Künstler unbekannt
Seite 25	Markus Hohmann, Zürich
Seite 34	Armin Petrascheck, BWG
Seite 38	Marcia Phillips, SLF
Seite 41	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
Seite 44	Hugo Raetzo, BWG
Seite 48	Walter Bieri/Keystone
Seite 51	Claudio Defila, MeteoSchweiz
Seite 54	Roland Hohmann, ProClim-
Seite 57	Marco Conedera, MeteoSchweiz
Seite 61	Walter Bieri/Keystone
Seite 65	Daniel Maurer/Keystone
Seite 69	Katharina Iseli-Reist, Biembach
Seite 73	Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen
Seite 77	Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF
Seite 81	Stephan Bader, MeteoSchweiz

A3. OcCC-Mitglieder

Mitglieder

Dr. Kathy Riklin (Präsidentin)
Nationalrätin
8001 Zürich

PD Dr. med. Charlotte Braun-Fahländer
Institut für Sozial- und Präventivmedizin
Universität Basel

Dr. Thomas Bürki
Thomas Bürki GmbH
8121 Benglen

Dr. Andreas Fischlin
Institut für Terrestrische Ökologie
ETH Zürich

Dr. Pamela Heck
Umweltgefahren, Swiss Re
8022 Zürich

Gabi Hildesheimer
Direktorin, Ökologisch bewusste Unternehmen
8035 Zürich

Prof. Ruth Kaufmann-Hayoz
Interfakultäre Koordinationsstelle für Allgemeine Ökologie
Universität Bern

Prof. Christian Körner
Botanisches Institut – Pflanzenökologie
Universität Basel

Prof. Urs Luterbacher
Institut Universitaire de Hautes Etudes Internationales
Université de Genève

Prof. Hansruedi Müller
Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus
Universität Bern

Dr. Ulrich Niederer
UBS Global Asset Management
8098 Zürich

Prof. Christian Pfister
Historisches Institut
Universität Bern

Prof. Gian-Reto Plattner
Ständerat
Vizekanzler Forschung, Universität Basel

Prof. Christoph Schär
Institute for Atmospheric and Climate Science
ETH Zürich

Prof. Heidi Schelbert-Syfrig
3457 Wasen

Prof. Thomas Stocker
Physikalisches Institut
Universität Bern

Prof. Hubert van den Bergh
Institut de Génie de l'Environnement
EPF Lausanne

Prof. Heinz Wanner
Direktor NFS Klima, Geographisches Institut
3012 Bern

Prof. Alexander Wokaun
Allgemeine Energieforschung
PSI, 5232 Villigen

Mitglieder mit beratender Stimme

Dr. Roger Biedermann
Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzamtstellen
8201 Schaffhausen

Claudia Guggisberg
Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)
3003 Bern

Dr. Bernd Hägele
Bundesamt für Bildung und Wissenschaft (BBW)
3003 Bern

Heinz Hänni
Bundesamt für Landwirtschaft (BLW)
3003 Bern

Daniel K. Keuerleber-Burk
Direktor MeteoSchweiz
8044 Zürich

Renato Marioni
Staatssekretariat für Wirtschaft (seco)
3003 Bern

Dr. Pascal Previdoli
Bundesamt für Energie (BFE)
3003 Bern

Dr. José Romero
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)
3003 Bern

Dr. Bruno Schädler
Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG)
3003 Bern – Ittigen

Dr. Dimitri Sudan
Schweizerischer Nationalfonds (SNF)
3001 Bern

Ursula Ulrich-Vöggtlin
Bundesamt für Gesundheit (BAG)
3003 Bern

Ex officio

Dr. Ingrid Kissling-Näf
Schweizerische Akademie der Naturwissenschaften (SANW)
3011 Bern

Geschäftsstelle

Dr. Christoph Ritz
Geschäftsführer ProClim-
3011 Bern

Dr. Roland Hohmann
Sekretär OcCC
3011 Bern