



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

UNIVERSITÄT BERN | **Mobilair Lab**
OESCHGER CENTRE | **for Natural Risks**



sc | nat 

Geosciences
Platform of the Swiss Academy of Sciences
Atmospheric Chemistry and Physics ACP



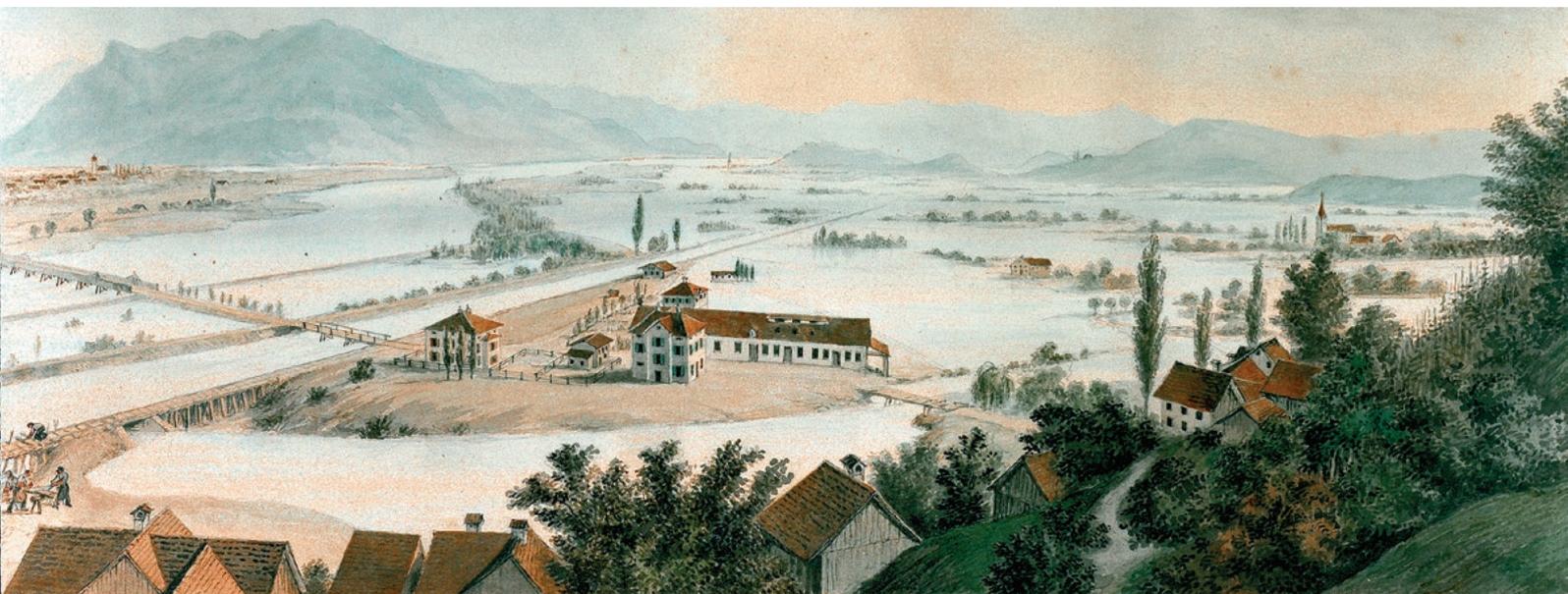
UNIVERSITÄT
BERN

OESCHGER CENTRE
CLIMATE CHANGE RESEARCH



1868 – das Hochwasser, das die Schweiz veränderte

Ursachen, Folgen und Lehren für die Zukunft



GEOGRAPHICA BERNENSIA

1868 – das Hochwasser, das die Schweiz veränderte

Ursachen, Folgen und Lehren für die Zukunft

Vorwort

Dieses Heft ist aus einer Idee entstanden, die ihren Ursprung am Oeschger-Zentrum für Klimaforschung der Universität Bern hat und auf eine weit zurückreichende Berner Tradition aufbaut: der Untersuchung historischer Hochwasser und ihrer Relevanz für die Gegenwart. Unter Beteiligung mehrerer Forschungsgruppen des Oeschger-Zentrums und des Mobiliar Labs für Naturrisiken sowie in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz, der Firma Meteotest und der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft wurde aus der Idee im Verlauf der letzten zwei Jahre ein eigentliches Forschungsprojekt.

Am Anfang stand die Frage, wie gut wir vergangene Starkniederschlagsereignisse, Hochwasser und deren Folgen nachbilden können, um daraus Lehren für die Zukunft zu ziehen. Bald rückten dabei die Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Gesellschaft ins Zentrum. Von Seite der Atmosphärenwissenschaften ging es darum, Wettersituationen und Starkniederschlagsereignisse möglichst detailliert in einem Wettermodell nachzubilden. Die derart rekonstruierten Starkniederschlagsereignisse sollten dann in ein hydrologisch-hydraulisches Modell einfließen, mit dem die relevanten Faktoren, die zu Hochwasser führen, abgeschätzt werden können. In der wissenschaftlich-historischen Betrachtung ging es darum, Informationen über die Schäden und die gesellschaftlichen Auswirkungen dieser Hochwasser zusammenzutragen und zu bewerten. Der Beitrag der Risikoforschung schliesslich bestand darin, den heutigen Umgang mit Hochwassern zu skizzieren und dessen Bezug zu historischen Ereignissen zu verdeutlichen. Diese unterschiedlichen Herangehensweisen führten zu einem äusserst fruchtbaren Austausch von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern verschiedenster Disziplinen, aus dem schliesslich dieses Heft hervorging.

Der Blick zurück bis weit ins 19. Jahrhundert erlaubt die Analyse vieler einzelner Ereignisse – und ermöglicht damit viel belastbarere Aus-

sagen, als wenn bloss die letzten 30 Jahre untersucht worden wären. Der Blick reicht auch in eine Zeit zurück, die den Umgang mit Hochwassern in der Schweiz bis heute prägt. Die damals getroffenen Massnahmen sind noch heute raumwirksam. Gleichzeitig ist der Blick ins 19. Jahrhundert auch mit einem wissenschaftlichen Rätsel verbunden: Hochwasser waren damals offenbar häufiger als während des grössten Teils des 20. Jahrhunderts. Warum war das so, und warum schwankt die Hochwasserhäufigkeit überhaupt? Dies zu verstehen, war eines der Ziele dieses Projekts.

Von Anfang an stand jedoch ein besonderes Ereignis im Vordergrund: das katastrophale Hochwasser von 1868 (Abb. 1) – ein Ereignis, das die Schweiz bis heute veränderte. Erst spät realisierten wir, dass das Ereignis im September 2018 genau 150 Jahre zurückliegen würde, und wählten dieses Datum zur Publikation des vorliegenden Berichts. Jahrestage vergangener Extremereignisse spielten traditionell eine wichtige Rolle in der Bewältigung und Prävention von Extremereignissen. In diesem Sinn reiht sich dieses Heft in die Tradition einer «Erinnerungskultur» ein, die wir aber auf eine gänzlich andere Weise – mit einem interdisziplinären, wissenschaftlichen, quantitativen Ansatz – angehen (für ein fotografisch greifbares kollektives Hochwassergedächtnis vgl. die Website des Mobiliar Labs für Naturrisiken der Universität Bern: www.ueberschwemmungsgedaechtnis.ch).

Die Arbeiten stützen sich unter anderem auf mehrere durch den Schweizerischen Nationalfonds und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) geförderte Projekte.² Die Drucklegung wurde durch das Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, das BAFU und durch die Kommission Atmosphärenphysik und -chemie der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz unterstützt.

Redaktion:

Kaspar Meuli

Lektorat:

Jean-Paul Käser

Layout:

Alexander Hermann

Bibliographische Angaben:

Brönnimann, S., C. Rohr, P. Stucki, S. Summermatter, M. Bandhauer, Y. Barton, A. Fischer, P. Froidevaux, U. Germann, M. Grosjean, F. Hupfer, K. Ingold, F. Isotta, M. Keiler, O. Martius, M. Messmer, R. Mülchi, L. Panziera, L. Pfister, C. C. Raible, T. Reist, O. Rössler, V. Röhliberger, S. Scherrer, R. Weingartner, M. Zappa, M. Zimmermann, A. P. Zischg (2018) 1868 – das Hochwasser, das die Schweiz veränderte. Ursachen, Folgen und Lehren für die Zukunft. *Geographica Bernensia*, G94, 52 S., doi:10.4480/GB2018.G94.01.

Übersetzungen:

Italienisch (doi:10.4480/GB2018.G94.02)

Französisch (doi:10.4480/GB2018.G94.03)

Englisch (doi:10.4480/GB2018.G94.04)

© GEOGRAPHICA BERNENSIA 2018
Geographisches Institut der Universität Bern, Schweiz



Druck: Publikation Digital AG



Abb. 1: Das Hochwasser von 1868 in Lustenau, Vorarlberg (vgl. Karte¹ im Anhang). Das Foto ist typisch für Aufnahmen von Hochwassern vor 1900: Aufgrund der langen Belichtungszeiten mussten die Menschen wie in einem Fotostudio Aufstellung nehmen und stillhalten. Die Abbildung von reissenden Fluten war damals technisch noch nicht möglich. Zudem betonen die Boote in den Strassen die Dramatik des Ereignisses. Allerdings dürfte das Wasser für Bootsfahrten in der Realität zu wenig tief gewesen sein, denn selbst den Kindern auf dem Foto steht das Wasser nicht einmal bis zu den Knien. Der Fotograf befand sich mit seiner Kamera wohl schon auf trockenem Grund (vgl. auch Abb. 5).

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	6
Stefan Brönnimann, Christian Rohr	
Hochwasserwetterlagen im Alpenraum	8
Peter Stucki, Moritz Bandhauer, Martina Messmer, Paul Froidevaux, Christoph Raible, Olivia Martius	
Starkniederschläge, atmosphärische Flüsse und Hochwasserereignisse in der Schweiz	10
Olivia Martius, Regula Mülchi, Paul Froidevaux, Christoph Raible, Peter Stucki	
Orographischer Niederschlag und Konvektion	12
Paul Froidevaux, Olivia Martius, Peter Stucki, Tom Reist, Luca Panziera	
Entstehung von Hochwassern – Grunddisposition	14
Rolf Weingartner, Ole Rössler	
Entstehung von Hochwassern – Variable Disposition und Auslösung	16
Rolf Weingartner, Ole Rössler, Peter Stucki	
Dokumentendaten zu 1868 und anderen historischen Hochwassern	18
Christian Rohr	
Lange Messreihen	20
Stefan Brönnimann, Peter Stucki, Rolf Weingartner, Francesco Isotta	
Vom Radarbild zur Hochwasserwarnung	22
Urs Germann, Olivia Martius, Yannick Barton, Massimiliano Zappa, Franziska Hupfer	
Wetterrekonstruktion	24
Stefan Brönnimann, Moritz Bandhauer, Peter Stucki	
Downscaling: Rekonstruktion des lokalen Wetters	26
Paul Froidevaux, Peter Stucki, Lucas Pfister	
Hydrologische Modellierung	28
Ole Rössler, Rolf Weingartner	
Rekonstruktion historischer Hochwasser mit hydrologischen und hydraulischen Modellen	30
Andreas Zischg, Ole Rössler, Massimiliano Zappa	
Wildbach und Hochwasser: Spurensuche im Gelände	32
Markus Zimmermann, Margreth Keiler	
Hochwasserschäden	34
Veronika Röthlisberger, Andreas Zischg, Margreth Keiler, Moritz Bandhauer, Stephanie Summermatter, Peter Stucki	
Gesellschaftliche Auswirkungen: Bewältigung und Prävention	36
Andreas Zischg, Stephanie Summermatter, Veronika Röthlisberger	
Schweizer Hochwasserschutz im Wandel	38
Christian Rohr, Stephanie Summermatter, Karin Ingold	
Langfristedynamik: Seesedimente als Archive für Hochwasser	40
Martin Grosjean	
Starkniederschlag und Hochwasser seit Messbeginn	42
Stefan Brönnimann, Christoph Raible, Simon C. Scherrer	
Hochwasser am Ende des 21. Jahrhunderts	44
Stefan Brönnimann, Ole Rössler, Martina Messmer, Christoph Raible, Andreas Fischer	
Schluss	46
Stefan Brönnimann	
Anmerkungen	47
Bildnachweis	51

Einleitung

Wenn ein theures Familienglied in's Grab steigt, so pflegen ihm die Hinterbliebenen ein Andenken zu widmen. (...) Die Katastrophe von 1868, welcher viele Menschenleben, Hab und Gut von ausserordentlichem Betrage zum Opfer gefallen sind, trägt gewiss auch den Stempel eines Grabes. Tausende und abermal Tausende von Leidtragenden haben sich um dasselbe geschaart. Auf das also umstandene Grab ein Vergissmeinnicht zu pflanzen, den Lebenden zur Erinnerung und den Nachkommen zur Erbauung, ist der Zweck dieser Blätter. (Kaiser und Killias, 1870)³

Dieses Vorwort zu einer zeitgenössischen Schrift über die Hochwasser von 1868 zeugt vom Leid der Betroffenen, blickt aber auch in die Zukunft. Heute, 150 Jahre später, können wir den Blick zurückrichten, die Ereignisse rekonstruieren und neu bewerten. Wir können uns fragen, wie sich Natur, Landschaft und Gesellschaft seither verändert haben und was wir daraus über heutige Hochwasser lernen können. Die Autoren des 1870 geschriebenen Vorworts konnten noch nicht wissen, dass dieses Hochwasser die Schweiz bis weit ins 21. Jahrhundert verändern würde.⁴ Während die Spuren des Hochwassers längst verschwunden sind, prägen die damals getroffenen Massnahmen und ein zu jener Zeit angestossenes Umdenken die Landschaft der Schweiz – Bergwälder, Flussläufe, Siedlungsflächen – bis heute. Das Hochwasser von 1868 wurde zur landschaftsgestaltenden Kraft und gestaltete auch die Gesellschaft. Es blieb nicht das einzige Hochwasser mit derartigen Auswirkungen. Die Ereignisse von 1978, 1987, 1999 und 2005 führten erneut zu einem Umdenken im Hochwasserschutz – wiederum mit Auswirkungen auf die Landschaft.

Auch heutige und künftige Ereignisse sowie die Reaktion der Gesellschaft darauf werden die Landschaft prägen. Das Hochwasser von 1868 ist somit nicht nur ein Lehrbeispiel eines Hochwassers, das uns hilft, die Vorgänge in der Atmosphäre besser zu verstehen und den Abfluss besser zu modellieren, sondern es führt uns gleichsam als Spiegel auch die Wechselwirkungen zwischen Gesellschaft und Umwelt vor Augen.

Das vorliegende Heft bezieht sich vor allem auf die Gegenwart. Es leuchtet die Vorgänge aus, die zu Hochwasser führen, zeigt die Folgen für die Gesellschaft und diskutiert mögliche Strategien zur Bewältigung. An einem Hochwasser sind viele Faktoren beteiligt (Abb. 2): Notwendig dafür ist ein Starkniederschlagsereignis, das wiederum an bestimmte Wettersituationen gebunden ist. Der starke Niederschlag führt zu hohen Abflüssen – allerdings nur dann, wenn weitere Vorbedingungen erfüllt sind. So müssen beispielsweise die Böden mit Wasser gesättigt, die Seespiegel bereits hoch oder eine schmelzende Schneedecke vorhanden sein. Ob hoher Abfluss zu einer Überschwemmung führt, hängt vom Gerinne und den sich darin abspielenden Prozessen

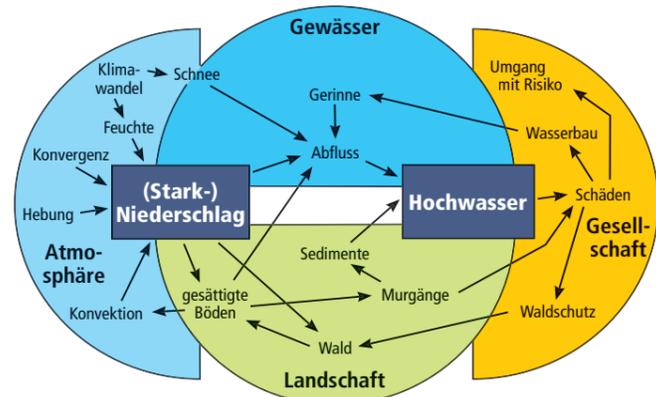


Abb. 2: Starkniederschläge und Hochwasser hängen auf vielfältige Weise von meteorologischen, hydrologischen, geomorphologischen und gesellschaftlichen Prozessen ab.

ab. Dabei spielen Dämme, Böschungen, bestehende Verbauungen, aber auch sich verkeilende Bäume eine Rolle. Starkniederschlagsereignisse können Murgänge auslösen, die wiederum die Gerinne und Sedimentzufuhr verändern. Hochwasser bringen Tod und Verletzungen mit sich und verursachen Schäden an Gebäuden, Infrastrukturanlagen und Kulturland. Das Ausmass dieser Schäden seinerseits hängt davon ab, wie der Mensch die Gefahrenzonen nutzt – und damit auch von früher getroffenen Entscheiden. Ein extremes Ereignis kann zu neuen Entscheidungen führen, die Wirkung in der Zukunft zeigen. So hat das Hochwasser von 2005 das Warnsystem in der Schweiz verändert, die Abläufe in der Verwaltung verbessert und zur Realisierung von Hochwasserschutzmassnahmen geführt.

All diese Aspekte werden im vorliegenden Heft behandelt, wobei jedem Thema eine Doppelseite gewidmet ist. Der Fokus dieser Beiträge liegt auf dem heutigen Wissensstand zum Thema. In einem zweiten Textelement auf jeder Doppelseite wird das gleiche Thema am Beispiel des Ereignisses von 1868 diskutiert. Es wird aufgezeigt, wie sich die Prozesse in diesem konkreten Fall abgespielt haben. Wenn es gelingt, die Vorgänge von 1868 zu rekonstruieren und zu modellieren, lassen sich Einflussfaktoren wie die Vorbedingungen abschätzen – Wissen, das uns auch heute als Entscheidungsgrundlage dienen kann.

Im ersten Teil dieses Hefts werden die naturwissenschaftlichen Prozesse vorgestellt, angefangen mit atmosphärischen Vorgängen. Hochwasser gehen meist auf ein Starkniederschlagsereignis zurück, wofür wiederum drei Hauptzutaten nötig sind: Feuchte, Konvergenz und Hebung (grossräumig in Wettersystemen oder kleinräumig in Form von Konvektion). Drei Kapitel zu den Prozessen in der Atmosphäre betrachten die Wetterlagen, die Herkunft des Wasserdampfes sowie die Konvektion. Zwei Kapitel beleuchten die Entstehung von Hochwassern, wobei zuerst die von räumlichen Faktoren abhängige Grunddisposition diskutiert wird, danach die auslösenden Faktoren.

Aber wie kommen wir zu diesem Wissen? Der zweite Hauptteil der Broschüre beschreibt die Methoden, mit denen wir Starkniederschläge und Hochwasser heute und in der Vergangenheit untersuchen können. Die Basis für die Untersuchung der Vergangenheit bilden ei-

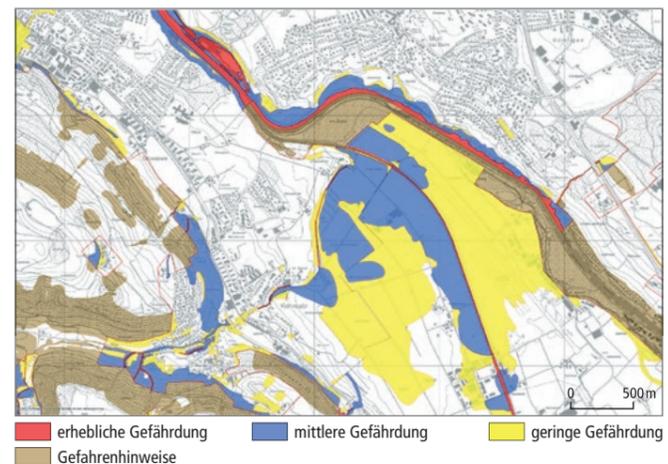


Abb. 3: Ausschnitt aus der Naturgefahrenkarte des Kantons Bern, Bereich Kehrsatz-Belpmoos.

nerseits historische Dokumente, aus denen mit Hilfe der Quellenarbeit wertvolle Informationen gewonnen werden. Wichtige Informationen liefern andererseits auch lange meteorologische und hydrologische Messreihen. Ein Kapitel des Hefts skizziert das heutige Mess-, Vorhersage- und Warnsystem. Um heute ein Ereignis wie 1868 quantitativ nachzubilden, ist eine ganze Kette von Methoden notwendig. Um das Wetter aus vergangenen Messdaten zu rekonstruieren, verwendet die Wissenschaft sogenannte Reanalysen, Wetterdatensätzen aus der Kombination von Messdaten und Wettervorhersagemodellen, die in einem Kapitel vorgestellt werden. In jeweils eigenen Kapiteln werden die räumliche Verfeinerung dieser Reanalysen mittels Downscaling sowie die hydrologische Modellierung und schliesslich die hydraulische Modellierung dargelegt, welche die Überschwemmungswahrscheinlichkeit sehr kleinräumig berechnet. Dies sind die Werkzeuge, mit denen die sich in der Natur abspielenden Vorgänge erfasst, bewertet, analysiert und nachgebildet werden.

Der dritte Teil des Hefts thematisiert die Auswirkungen von Hochwassern. Es geht dabei um folgende Fragen: Wie verändern Starkniederschläge und Hochwasser das Gelände? Welche Schäden treten an Bauten und Infrastrukturen auf? Aber auch: Was passiert danach? Wie bewältigt die Gesellschaft Hochwasserereignisse? Welche Präventionsmassnahmen sind möglich und sinnvoll (vgl. Abb. 3)? Und wie verändern Hochwasser unsere Gesellschaft langfristig?



Abb. 4: Aufräumen nach einem Hochwasser

Der vierte und letzte Teil der Broschüre beschäftigt sich mit Änderungen der Hochwasserhäufigkeit. Dabei werden zunächst ganz langfristige Veränderungen betrachtet und es wird die Frage gestellt, ob warme Epochen eigentlich hochwasserreicher oder -ärmer sind. Dann wird der Fokus auf Veränderungen in den letzten 200 Jahren gerichtet. Diese Zeitspanne ist nicht nur für die heutige Gesellschaft besonders relevant, sondern auch für die Zukunft: Denn wenn die Hochwasserhäufigkeit, wie die Analyse zeigt, über mehrere Jahrzehnte schwankte, wird sie es auch in Zukunft tun. Das letzte Kapitel betrachtet schliesslich Veränderungen in den kommenden 50 Jahren: Worauf müssen wir uns einstellen? Werden Starkniederschläge in der Zukunft noch intensiver werden? Welche Auswirkungen haben diese Veränderungen auf die Häufigkeit und Stärke von Hochwassern in der Zukunft?

Das schwere Hochwasser von 1868

Nach einem ohnehin bereits regenreichen September 1868 (und entsprechend hohen Seeständen) traten innerhalb einer Woche zwei sehr starke Niederschlagsereignisse auf. Die erste Niederschlagsphase am 27. und 28. September betraf vor allem die Kantone Tessin, Graubünden und St. Gallen, die zweite Phase vom 1. bis 5. Oktober das Tessin, das Wallis und Uri. Die über acht Tage aufsummierte Niederschlagsmenge am San-Bernardino-Pass von 1118 Millimeter ist für die Schweiz rekordverdächtig.

Die Niederschläge führten auf beiden Seiten des Alpenkamms zu Überschwemmungen. Zahlreiche Flüsse traten über die Ufer. Rheintal und Magadinoebene standen unter Wasser. Der Lago Maggiore erreichte am 4. Oktober 1868 den höchsten je gemessenen Stand von 199,98 m ü.M. (Abb. 5).

Die Schäden des Ereignisses waren gewaltig. Insgesamt starben 51 Menschen. Zahlreiche Brücken wurden weggeschwemmt, Teile des Dorfs Vals wurden mit einem Meter Geschiebe zugedeckt. Gemäss einer Schätzung von Christian Pfister rangiert das Ereignis mit einem Schaden von knapp einer Milliarde Franken (umgerechnet auf das Jahr 2000) als teuerste Katastrophe in der Zeit zwischen 1800 und dem Hochwasser von 1978.⁵

Die Schäden überstiegen die finanziellen Kapazitäten der betroffenen Ortschaften und Kantone. Umfangreiche Spenden aus weniger betroffenen Gegenden und sogar aus dem Ausland ermöglichten den Gemeinden den Wiederaufbau.^{3,4} Aber die Auswirkungen des Hochwassers gingen noch weiter. Sie reichen von der Realisierung bereits vorher diskutierter flussbaulicher Massnahmen⁵ und einem entsprechenden Paradigmenwechsel im politischen Umgang mit Überschwemmungen bis zur Debatte über die Rolle der Entwaldung beim Zustandekommen von Hochwassern, die schliesslich dem Forstgesetz zum Durchbruch verhalf.^{4,7}

In den blau unterlegten Textelementen in diesem Heft werden die im Haupttext diskutierten Vorgänge exemplarisch am Beispiel 1868 erläutert. Diese Kurztexte diskutieren die grossräumige Wetterlage, die Abflussmengen und Seespiegelstände. Sie zeigen quantitative Rekonstruktionen der atmosphärischen Vorgänge, der Abflussmengen und der Überschwemmungen von 1868. Und sie analysieren die Schäden und deren Bewältigung durch die Gesellschaft sowie die längerfristigen Auswirkungen. Schliesslich betten die Textboxen das Hochwasser von 1868 auch in die langfristigen klimatischen Schwankungen ein.



Abb. 5: Hochwasser des Lago Maggiore von 1868 in Verbania¹ (links). Zum Zeitpunkt des höchsten Pegels reichte das Wasser bis über die Laubengänge der Altstadt Häuser (Hochwassermarken im Foto rechts).

Hochwasserwetterlagen im Alpenraum

Das Wetter im Alpenraum hängt von der Anordnung von Hoch- und Tiefdruckgebieten über dem Ostatlantik und Europa ab. Diese Druckmuster bestimmen die grossräumige Zirkulation und damit die Temperaturverteilung, die Windrichtung oder die Luftfeuchtigkeit im Alpenraum. Für Hochwasser im Alpenraum sind insbesondere drei Wetterlagen verantwortlich. Sie werden Vb-Lage, PV-Streamer und Blocking genannt.

Wetterlagen

In der Meteorologie werden typische, immer etwa ähnliche Druckmuster oft zusammenfassend als sogenannte Wetterlagen bezeichnet.^{8,9} Geläufige Beispiele für die Schweiz sind Bisen-, Westwind- oder Föhnlagen. Dabei bilden die Alpen eine Wetterbarriere, so dass die grossräumigen Wetterlagen regional sehr unterschiedliche Auswirkungen haben können: Wolken und Regen auf der einen Seite der Alpen, Sonne und Trockenheit auf der anderen.^{10,11}

Für detaillierte und zuverlässige Vorhersagen des Niederschlags braucht es zwar moderne Wettervorhersagemodelle (vgl. S. 22), doch auch die vereinfachte Betrachtung der Wettersysteme mit Wetterlagen hat bedeutende Vorteile. Erstens bestimmen grossräumige Wettersysteme die regionalen Niederschlagsintensitäten und -räume oft über mehrere Tage. Entsprechend kann mit Wetterlagen der Zusammenhang zwischen der grossräumigen atmosphärischen Zirkulation und dem regionalen Niederschlag im Alpenraum veranschaulicht werden. Zweitens können typische atmosphärische oder hydrologische Entwicklungen (z. B. hin zu Extremereignissen) für einzelne Wetterlagen leichter analysiert und verstanden werden als für jede individuelle Wettersituation. Und drittens sind die schweren und extremen Hochwasserereignisse im Alpenraum über die letzten 150 Jahre oft auf jeweils ähnliche Wetterlagen zurückzuführen.^{12,13} Hydrometeorologische Untersuchungen solcher Analogfälle können darum helfen, typische Konstellationen für extremes Hochwasser zu verstehen und frühzeitig zu erkennen.

Früher beruhte die Zuordnung für Wetterlagen meist auf der subjektiven Analyse von Boden- und Höhenwetterkarten und eingezeichneten Wetterfronten. Heute werden dafür verschiedene objektive, statistische Verfahren verwendet, die sich auch auf Stationsdaten anwenden lassen.^{14,15} Zur Beschreibung von Hochwasserwetterlagen im Alpenraum tauchen sowohl subjektive als auch objektive Begriffe immer wieder auf. Im Folgenden betrachten wir drei gängige Begriffe etwas genauer.

Vb-Lage, PV-Streamer und Blocking

Der Name Vb-Lage geht auf eine subjektive Klassierung aus dem Jahr 1891 zurück,¹⁶ die Wetterlagen aufgrund von Zugstrassen von Tiefdruckgebieten einteilte (Abb. 6). Aus dieser Auflistung wird heute nur noch die Bezeichnung Vb manchmal verwendet, so zum Beispiel

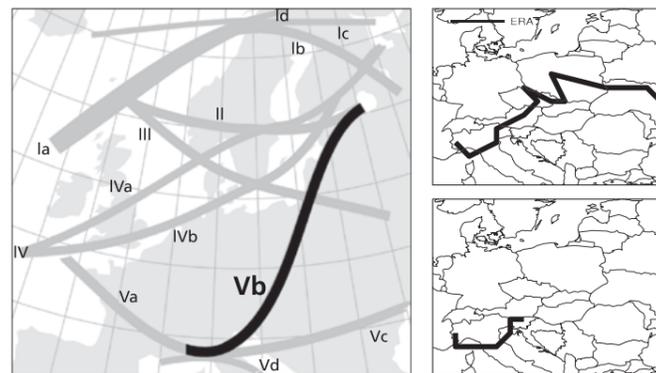


Abb. 6: Links: Klassifikation der Zugbahnen von Tiefdruckgebieten zwischen 1876 und 1880¹⁷ nach W. J. van Beber.¹⁶ Rechts: Zugbahnen der Tiefdruckgebiete während der Hochwasserereignisse vom 10. bis 13. August 2002 (oben) und vom 20. bis 24. August 2005 (unten).¹⁸

für die Wetterlagen, die während der Alpenhochwasser im August 2002 oder im August 2005 bestimmend waren.^{17–19} Vb-Zyklonen entstehen typischerweise über dem Mittelmeer südlich von Frankreich und intensivieren sich im Raum Genua (Genuatief). Gesteuert von einer südlichen Höhenströmung, ziehen sie in einem Bogen um die östlichen Alpen und dann weiter nordwärts. Auf der Vorderseite der Höhenströmung wird sehr warme und zunehmend feuchte Luft nordwärts über das Mittelmeer geführt. Je nach genauer Position, Zuggeschwindigkeit und Zugrichtung der Vb-Zyklone werden die feuchten Luftmassen schliesslich aus nordöstlicher Richtung gegen die Alpennordseite geführt, so wie beispielsweise während des Hochwassers im August 2005.^{12,17–19} Eine Kombination von Faktoren wie dem Aufgleiten über bodennahe Kaltluft, dem erzwungenen Auftrieb der feuchten Luft durch die Alpen und von Konvektion kann dann zu gleichzeitig sehr starken und sehr anhaltenden Niederschlägen nördlich der Alpen führen.

Sogenannte PV-Streamer (PV für «potenzielle Vortizität» oder Wirbelstärke) gelten als meteorologische Wegbereiter für Extremniederschläge auf der Alpensüdseite. Ein Streamer bezeichnet eine schmale (100–500 km), langgezogene (rund 2000–3000 km) Zunge aus stratosphärischer Luft, die sich von der Polarregion südwärts über Westeuropa weit in den Mittelmeerraum erstreckt^{20–22} (Abb. 7, vgl. auch Abb. 44). Streamer kommen meist nur langsam ostwärts voran. Auf ihrer Vorderseite (oft über den Westalpen) richten sich die Höhenwinde nord- oder nordostwärts aus. Darunter, im Bereich der

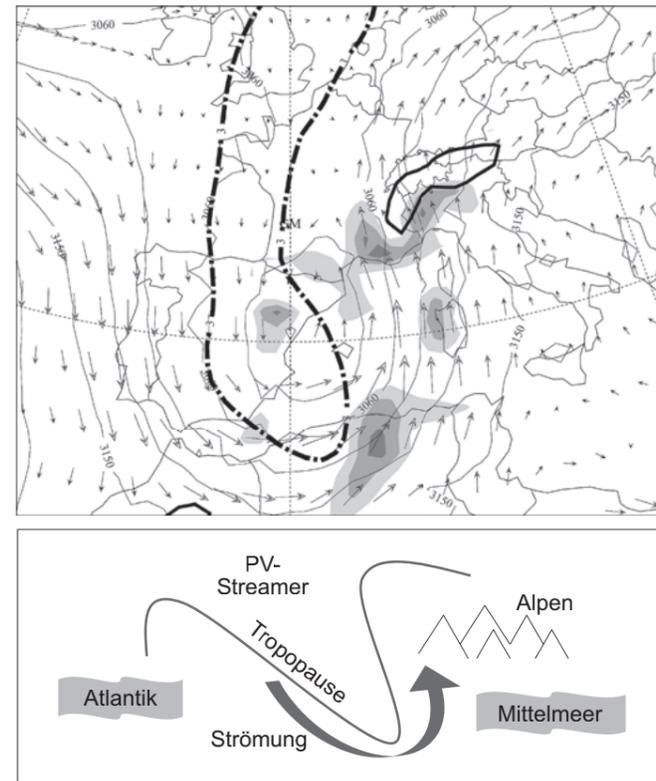


Abb. 7: Wetterlage während des Hochwasserereignisses vom September 1993. Oben: Tropopause (fett gestrichelt), geopotenzielle Höhe (auf 200 hPa; durchgezogene Linien), Hebung der Luftmassen (Grauschattierung; Pals) und Wind (Pfeile) in der oberen Troposphäre. Unten: Entsprechendes Konzept der Anströmung.²⁰

unteren und mittleren Troposphäre, nimmt die Stabilität der Luftschichten ab und grossräumige Hebung setzt ein. Zudem wird in einem ständigen Fluss warme und feuchte Luft aus dem südlichen Mittelmeer zu den Alpen geführt. Als Folge dieser quasistationären Wetterlage fliessen die feuchten Luftmassen am südlichen Alpenbogen zusammen, steigen auf und können sich als Starkniederschläge entladen, oft immer wieder über der gleichen Region und über mehrere Tage.

Auch sogenanntes atmosphärisches Blocking kann zu grossräumigen, langanhaltenden und extremen Niederschlagsereignissen führen. «Blocks» sind langlebige (mind. 3–5 Tage), quasistationäre Hochdruckgebiete, die das Vorwärtskommen von Tiefdrucksystemen von West nach Ost blockieren. Ein Tiefdruckgebiet kann dabei angehalten werden, oder mehrere aufeinanderfolgende Störungszonen werden zu einer ähnlichen Umweg-Zugbahn gezwungen. Blockierende Wetterlagen können auf der Vorderseite (d.h. östlich), aber auch rückseitig (d.h. westlich) eines Tiefdruckgebiets auftreten, und auch beide Phänomene gleichzeitig sind möglich (siehe Abb. 8). Ein Omega-Block kann zwischen zwei Tiefdrucksystemen entstehen (die Isobaren zeichnen dann den Buchstaben Ω). Nicht zuletzt können blockierende Wetterlagen auch zur Bildung von PV-Streamern beitragen. Blocking spielte während verschiedener Phasen der Hochwasser 1993 und 2000 auf der Alpensüdseite eine Rolle²³ oder 2005 und 2011 auf der Alpennordseite.^{12,24}

Abbildung 8 zeigt das Hochwasserereignis im August 2005 als Beispiel für verschiedene Blickwinkel auf Wetterlagen. Das quasiblockierte Genuatief befindet sich hier in der ersten Phase einer Vb-Zugbahn (Abb. 6). Dabei sind die Definitionen subjektiv und oft nicht ganz eindeutig: So wird die Zyklone die eigentliche Vb-Zugbahn nach dem Überqueren der Alpen verlassen,^{10,12} d.h. nicht weiter nordwärts ziehen. Einige Experten betrachten die Wetterlage im August 2005 aber auch als (mehr oder weniger definitionstreu) Blocking (vgl. Spalte rechts).

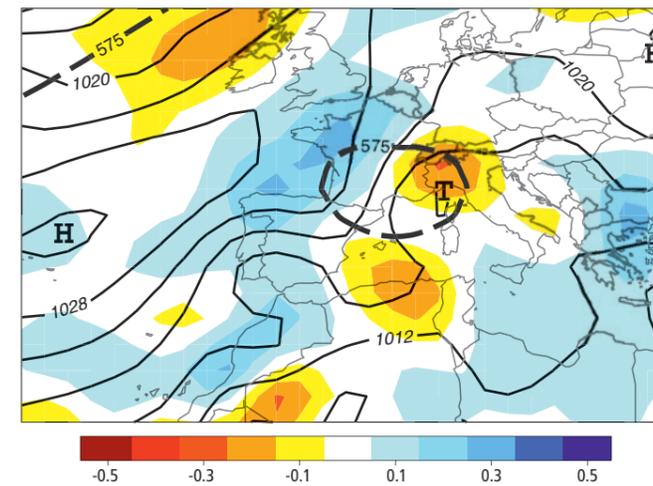


Abb. 8: Wetterlage während des Hochwasserereignisses am 21. August 2005.²⁵ Unter einem Kaltlufttropfen auf 500 hPa (ca. 5 km, fett gestrichelt¹²) entwickelt sich ein Genuatief (T; durchgezogene Linien markieren den Luftdruck am Boden in hPa), das zwischen zwei Hochdruckgebieten (H) blockiert ist. Farblich schattiert ist die Vertikalbewegung (Pals; rot bedeutet Hebung) in ca. 5 km Höhe (500 hPa).

Wetterlagen im Herbst 1868

Für das Hochwasserereignis im September/Oktober 1868 sind noch keine Originalwetterkarten verfügbar (vgl. S. 23), aus denen man subjektive Wetterlagen ableiten könnte. Allerdings können die Wetterlagen einerseits aus Stationsdaten identifiziert werden¹⁴ oder andererseits aus Reanalysedatensätzen gerechnet werden (vgl. S. 24). Obwohl es im Jahr 1868 noch nicht sehr viele Luftdruckmessungen gab, finden wir hier mit beiden Methoden sehr plausible Wetterlagen für das Hochwasserereignis.

Es war geprägt durch die Abfolge von vier mehr oder weniger blockierten Höhentiefs, wobei sich zwei davon zu weit nach Süden reichenden, langsam vorankommenden PV-Streamern entwickelten. Damit einher gingen Höhenwinde aus südlichen bis sogar südöstlichen Richtungen im Bereich der Alpen – ein solches Umkehren der Höhenwinde wird oft als Kriterium für ein Blocking genannt (vgl. Text links). Für die Episode um den 3. Oktober 1868 (Abb. 9) zeigt der Datensatz deutlich die grossräumige Hebung der Luftmassen über dem Mittelmeer und entlang der Westalpen. Der dazugehörige bodennahe Luftmassenstrom (vgl. S. 10) nahm offenbar Feuchtigkeit aus dem warmen Mittelmeer auf, bevor er auf die Alpen traf. Entsprechend führte der erste PV-Streamer zu langanhaltenden Starkniederschlägen auf der Alpensüdseite, die den Pegel des Lago Maggiore um etwa 2 Meter steigen liessen, der zweite, entscheidende, um weitere knapp 3 Meter (vgl. S. 21).

Die Wetterlagen vor und während des Hochwasserereignisses waren also sehr typisch für die Alpensüdseite. Aus meteorologischer Sicht ergibt sich die ausserordentliche Schwere des Ereignisses aus einer Verquickung von vier aufeinanderfolgenden, zum Teil langanhaltenden und sehr regenintensiven Wetterlagen, die von PV-Streamern geprägt sind. Aufgrund der klaren atmosphärischen Muster könnte dieses extreme Hochwasser heute wohl sehr früh vorhergesagt werden. In den nachfolgenden blau unterlegten Textstellen werden einzelne dieser Aspekte noch vertieft untersucht.

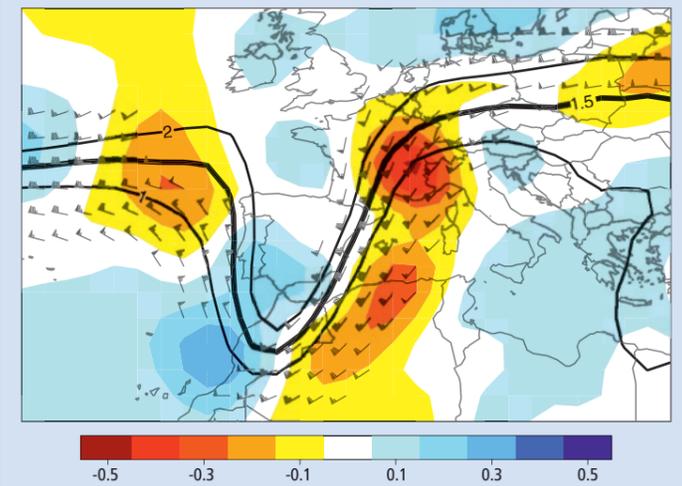


Abb. 9: Wetterlage mit PV-Streamer am 3. Oktober 1868 am Mittag.²⁵ Durchgezogene Linien zeigen PV-Units (1.5 PVU fett als Tropopause). Die Pfeile mit Bart zeigen das Starkwindband in der oberen Troposphäre (auf 250 hPa; nur Geschwindigkeiten von mind. 50 Knoten sind dargestellt). Farbschattierungen zeigen die Vertikalbewegung (Pals; negativ bedeutet Hebung) der Luftmassen in der mittleren Troposphäre (500 hPa).

Starkniederschläge, atmosphärische Flüsse und Hochwasserereignisse in der Schweiz

Grosse Niederschlagsmengen, die über mehrere Tage an einem Ort fallen, bedingen einen grossen Nachschub an Luftfeuchtigkeit in Form von Wasserdampf, der zu Regen umgewandelt werden kann. Die Transportmechanismen und die Herkunft dieses Wasserdampfs werden nachfolgend beschrieben.

Niederschlag setzt eine ausreichende und beständige Zufuhr von atmosphärischer Feuchte voraus. Diese Feuchte stammt entweder aus Verdunstung vor Ort oder sie wird mit den vorherrschenden Winden von entfernteren Quellen ins Niederschlagsgebiet transportiert. Die lokale Verdunstung erfolgt entweder durch Pflanzen, aus dem Boden oder direkt von offenen Wasserflächen. Die weiter entfernten Feuchtequellen von Niederschlägen in der Schweiz sind vielfältig und umfassen nach absteigender Relevanz geordnet den Nordatlantik, das Mittelmeer, die Landoberfläche und die Nord- und Ostsee.²⁶ Auf der Alpennordseite stammt die Feuchte primär vom Atlantischen Ozean und auf der Alpensüdseite hauptsächlich aus dem Mittelmeer.²⁶ Im Winter ist die vorherrschende Feuchtequelle ozeanischen Ursprungs, während im Sommer auch Feuchte, die über dem Festland verdunstet wird, eine wichtige Rolle spielt.

Starkniederschlagsereignisse, die Hochwasserereignisse auslösen können, benötigen eine intensivere und je nach Dauer beständigere Feuchtezufuhr verglichen mit normalen Niederschlagsereignissen. In der Tat sind Episoden mit einer sehr starken und anhaltenden Feuchtezufuhr ein wichtiger Indikator für Starkniederschläge und Hochwasserereignisse in der Schweiz.^{27,28} Die feuchte Luft wird dabei über der Schweiz gegen die Alpen gedrückt, zum Aufsteigen und Kondensieren gezwungen und regnet schliesslich aus.

Der Feuchtetransport erfolgt in der Atmosphäre weder gleichmässig noch chaotisch, sondern oft organisiert in langgestreckten Strukturen entlang der Kaltfront von Tiefdruckgebieten. Diese Strukturen werden «atmosphärische Flüsse», englisch «atmospheric rivers», genannt. Ein Beispiel eines solchen atmosphärischen Flusses über dem Atlantik ist in Abbildung 10 gezeigt. Zu sehen ist der vertikal aufsummierte Feuchtetransport in der Atmosphäre am 10. Oktober 2011 um 6 UTC (7.00 Uhr mitteleuropäische Zeit). Der Feuchtetransport berechnet sich aus der Kombination (Multiplikation) von Wind und Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Die Einheit gibt an, wie viele Kilogramm Wasser-

dampf pro Sekunde über eine Länge von 1 Meter in der gesamten Atmosphäre oberhalb dieser Distanz transportiert werden. Der Name atmosphärischer Fluss ist durchaus gerechtfertigt, da die transportierte Wassermenge in einem solchen Band über dem Nordatlantik der Abflussmenge der grössten Flüsse der Erde entspricht (z. B. des Amazonas oder des Ganges).

Im Unterschied zu Flüssen wird die Feuchte in einem atmosphärischen Fluss durch Regnen und Verdunsten während des Transports ständig erneuert.²⁹ Diese Erneuerung geschieht primär über den Ozeanen, da die Verdunstung über Land deutlich kleiner ist. Somit stammt die Feuchte eines atmosphärischen Flusses grösstenteils aus den Ozeanen und entsprechend nimmt der Feuchtetransport ab, sobald ein atmosphärischer Fluss auf einen Kontinent trifft, da nun mehr Feuchte ausregnet als verdunstet (Abb. 10). Trotzdem transportieren diese atmosphärischen Flüsse noch grosse Mengen Wasserdampf ins Innere der Kontinente und führen dort zu starken Niederschlägen.

Das Beispiel vom 10. Oktober 2011, das ein Hochwasserereignis im Kander- und Lötschental zur Folge hatte, illustriert das eindrücklich.²⁴ Das Wasser, das schliesslich im Berner Oberland und im Wallis ausregnete, stammte teilweise aus dem Nordostatlantik und teilweise aus dem subtropischen Atlantik.²⁴ Der Feuchtetransport gegen die Alpen am 10. Oktober 2011 (Abb. 10) war aussergewöhnlich stark. In den vergangenen dreissig Jahren haben sich auf der Alpennordseite nur eine Handvoll ähnlich starker Feuchtetransportepisoden ereignet, und diese haben alle zu grösseren Hochwasserereignissen geführt.²⁸ Besonders gefährlich für die Nordwestschweiz ist ein starker Feuchtetransport aus Richtung Nordwest bis Nord – und für die Nordostschweiz ein starker Feuchtetransport aus Richtung Nordost. Auf der Alpensüdseite erreicht die feuchte Luft die Schweiz von Süden her. Die absoluten Werte des Feuchtetransportes sind dort in der Regel etwas höher, da das Mittelmeer wärmer ist als der Nordatlantik und somit mehr Wasser verdunsten kann. Das spiegelt

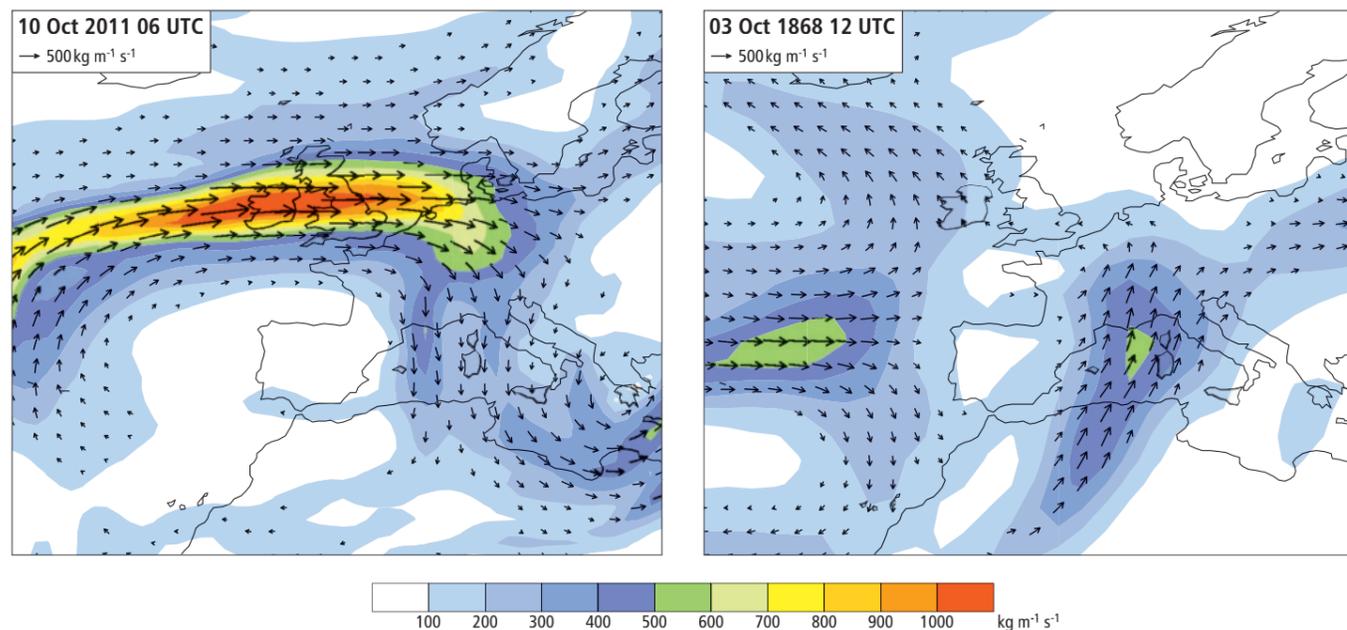


Abb. 10: Vertikal integrierter atmosphärischer Feuchtetransport ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$, Farbschattierung) am 10. Oktober 2011 am Morgen (6 UTC, links) und 3. Oktober 1868 am Mittag (12 UTC, rechts). Die Pfeile zeigen die Transportrichtung. Der atmosphärische Fluss ist links als lange, schmale Struktur über dem Atlantik erkennbar. Im Oktober 2011 erreichte die feuchte Luft die Alpen von Norden, am 3. Oktober 1868 aus Süden.²⁵

sich auch in den etwas grösseren Niederschlagsmengen auf der Alpensüdseite wieder.

Neben der Intensität des Feuchtetransports kann auch die Dauer des starken Feuchtetransports eine wichtige Rolle für die totale Niederschlagsmenge spielen. Während die Episoden mit einem extrem intensiven Feuchtetransport selten länger als 12 Stunden dauern, können auch über mehrere Tage grosse Mengen an Feuchte gegen die Alpen transportiert werden.²⁸ Das geschah so auch im Herbst 1868 (vgl. Box rechts).

Prognostizierte Feuchteflüsse aus Wettervorhersagen können im Umkehrschluss für die Vorhersage von Flutereignissen genutzt werden. Heutige numerische Wettermodelle können Feuchteflüsse zu einem früheren Zeitpunkt besser vorhersagen als Niederschläge.³⁰ Vor allem für die Mittelfristvorhersage (5–10 Tage) von Starkniederschlägen und potenziellen Flutereignissen werden Informationen zur Richtung und zur Intensität von atmosphärischen Flüssen und dem Wasserdampftransport in der Atmosphäre genutzt. Sehr hohe Feuchteflüsse gegen die Alpen sind demnach Vorwarnsignale für spätere Flutereignisse.

Erste Abschätzungen zeigen, dass sich der atmosphärische Feuchtetransport in einem wärmeren Klima intensivieren wird. Abbildung 11 zeigt die prozentuale Veränderung von extremen Feuchtetransporten (99. Perzentil) bis Mitte Jahrhundert und bis Ende Jahrhundert berechnet durch drei unterschiedliche globale Klimamodelle. Die Modellrechnungen gehen von einem kontinuierlichen Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre ohne Reduktionsmassnahmen aus. Je nach Modell fallen die Veränderungen unterschiedlich aus, doch alle drei Modelle zeigen eine deutliche Zunahme der Feuchte Transporte aus der für potenzielle Hochwasser relevanten Windrichtung. Diese Zunahme wird sich gegen Ende des 21. Jahrhunderts zusätzlich verstärken.

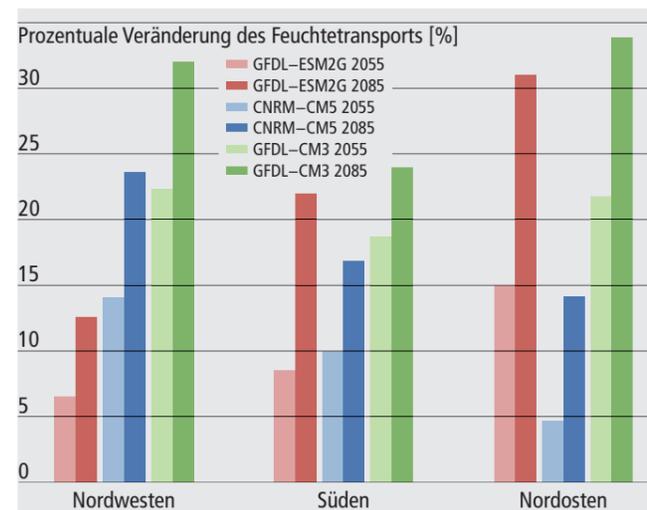


Abb. 11: Prozentuale Veränderung der extremen Feuchtetransportepisoden in der Nordost-, in der Nordwestschweiz und auf der Alpensüdseite berechnet mit drei verschiedenen globalen Klimamodellen. Die helleren Farben zeigen die Veränderung bis Mitte, die dunkleren Farben bis Ende des 21. Jahrhunderts. Alle drei Klimamodelle zeigen eine deutliche Zunahme der extremen Feuchtetransporte.

Woher kam das Wasser des Hochwassers von 1868?

Es gibt verschiedene Ansätze, um diese Frage aus meteorologischer Sicht zu beantworten. Man kann zum Beispiel den vertikal integrierten atmosphärischen Feuchtetransport über einem gewissen Gebiet und über eine bestimmte Zeit betrachten. Abbildung 10 zeigt für das Ereignis von 1868 einen hohen Feuchtetransport über dem westlichen Mittelmeerraum, die Windpfeile zeigen in Richtung Alpensüdseite. Das ist ein Hinweis darauf, dass der Wasserdampf teilweise aus dem Mittelmeer stammte.

Ein zweiter Ansatz setzt auf so genannte Trajektorien. Dabei wird angenommen, dass ein Luftpaket als Ganzes wie eine Art Ballon mit dem Wind transportiert wird. Dementsprechend zeigt Abbildung 12 die dreitägigen «Luftfahrten» von Paketen, die mit sehr starkem Niederschlag (27. September und 3. Oktober 1868) auf der Alpensüdseite ankamen. In Bodennähe kamen die Luftpakete über das Tyrrhenische Meer langsam in Richtung Norden voran, in grösseren Höhen führte der Weg über das westliche Mittelmeer oder allenfalls sogar über den subtropischen Atlantik. Alle Luftpakete erfuhren am Schluss eine Hebung. Das bedeutet, dass über mehrere Tage viel Wasserdampf über dem noch warmen Mittelmeer aufgenommen werden konnte, der dann beim Aufsteigen über der Alpensüdseite kondensierte.

Ein dritter Ansatz ist für das Hochwasser von 1868 nicht praktikabel. Er setzt auf die direkte Analyse von Regenwasser, das je nach Ursprung des Wasserdampfs unterschiedliche Isotopen aufweist. So eine Analyse ist in unserem Fall nicht möglich, da selbstredend kein Regenwasser des 1868er-Ereignisses mehr vorhanden ist. Aus Studien von modernen Analogfällen weiss man aber, dass ein Teil des Wasserdampfs wohl von Wasser auf der gesättigten Erdoberfläche stammt, also durch wiederholte Konvektion quasi regional rezykliert wird.³¹

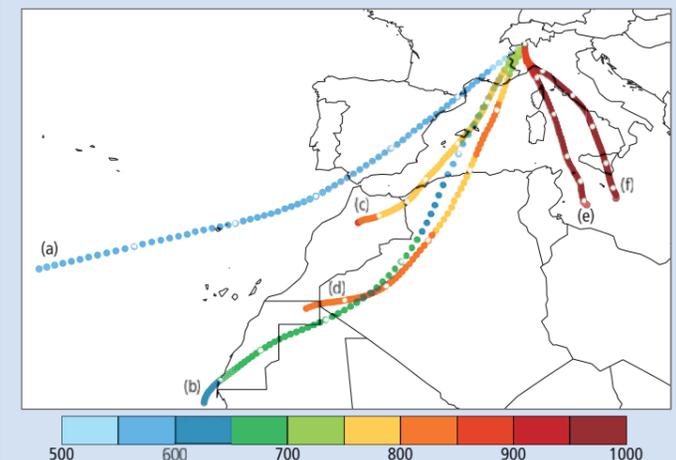


Abb. 12: Rückwärtstrajektorien über 3 Tage in 20CR (S. 24). Der Transport der Luftpakete endet jeweils am Gitterpunkt $46^\circ \text{E } 8^\circ \text{N}$ zu den Zeitpunkten 27. September 1868 am Mittag (12 UTC), für die Linien (a), (c) und (e), und 3. Oktober 1868 am Mittag (12 UTC), für die Linien (b), (d) und (f). Gezeigt sind Endpunkte auf unterschiedlichen Höhen, nämlich auf ca. 5,5 km über dem Meeresspiegel (entspricht 500 hPa) für die Linien (a) und (b), 3 km (700 hPa) für die Linien (c) und (d) und 1,5 km (850 hPa) für die Linien (e) und (f). Farbige Liniensegmente zeigen die Druckwerte in hPa entlang der Trajektorien. Zeitschritte von jeweils 12 Stunden sind durch weisse Punkte gekennzeichnet.³² Ein hoher Druck bedeutet, dass sich das Luftpaket sehr nahe am Boden, ein tiefer Druck hingegen, dass sich das Luftpaket in der Höhe befindet.

Orographischer Niederschlag und Konvektion

In den vorangegangenen Kapiteln haben wir gesehen, dass die grossräumige Strömung zu anhaltend starken Feuchteflüssen in Richtung der südlichen Zentralalpen führen kann. Eine orographische Barriere wie die Zentralalpen kann die Strömung blockieren oder sie muss um- oder überströmt werden. Beim Überströmen steigt die Luft auf, dehnt sich aus und kühlt ab. Kalte Luft kann weniger Wasserdampf enthalten als warme Luft, so dass beim Aufsteigen 100 Prozent relative Luftfeuchtigkeit erreicht werden kann. Ab diesem Wert kondensiert Wasserdampf, es bilden sich Wolkentröpfchen, die Niederschlag erzeugen können.

Um- oder Überströmen?

Die Strömung einer Luftmasse, die eine Bergkette erreicht, kann durch die Froudezahl charakterisiert werden. Ist der Wind schwach, der Berg hoch und die Atmosphäre stabil geschichtet, dann ist die Froudezahl kleiner als eins, und die Strömung wird blockiert (oder muss das Hindernis umströmen). Ist der Wind hingegen stark, der Berg niedrig und die Stabilität gering, kann die Bergkette überströmt werden. So entsteht beispielsweise eine Föhnwind-Situation (Abb. 13). Gesättigte Luft steigt leichter auf als ungesättigte. Ob eine Strömung eine Bergkette überquert, hängt also von ihrer Temperaturschichtung, der Feuchtigkeit und dem Wind ab.

Dabei spielt die Stabilität eine wichtige Rolle: Ist die Atmosphäre «stabil», sinkt die Luft, die den Berg zu überqueren versucht, wieder nach unten. Der horizontale Wind muss dann besonders stark sein, damit die Strömung der Stabilität entgegenwirken und die Bergkette trotzdem überqueren kann. Ist die Atmosphäre «neutral» geschichtet, steigt die Luft widerstandslos über den Berg. In einer «bedingt instabilen» Schichtung muss die Luft erst zur Sättigung gelangen, dann kann sie von selbst in Form von warmen Blasen (konvektiven Zellen) weiter aufsteigen. Diese atmosphärische Konvektion ist auch für Gewitter verantwortlich. Die Luft kann dann schnell grosse Höhen erreichen. Daher kann Konvektion die lokale Intensität und Menge des Niederschlags deutlich erhöhen.



Abb. 13: Bild einer «Föhnmauer» über der Jungfrau.¹ Die aus dem Süden kommende Luft kondensiert beim Aufsteigen über die Alpen und bildet eine Wolke. Während die Luft auf der anderen Seite absinkt, verdunstet die Wolke. Das Ergebnis ist eine stationäre Wolke, die einer Mauer ähnelt.

Die Vertikalstruktur der Strömung ist im Zusammenhang mit den jüngsten Starkniederschlagsereignissen am Lago Maggiore untersucht worden. Die Daten dazu stammten von Ballonsondierungen vom Flughafen Milano Linate, Radarbildern vom Monte Lema (Tessin) und einer Messkampagne des Mesoscale Alpine Program.³³ Dabei wurden gleichzeitig Flugzeuge und verschiedene Instrumente am Boden eingesetzt, um die Atmosphäre über den Alpen im Detail zu beobachten. Bei starken Niederschlägen am Lago Maggiore³⁴ (vgl. Abb. 14) wurden folgende Merkmale gefunden: (1) südöstliche Winde in der Poebene unter ca. 1000m ü.M. und südwestliche Winde oberhalb, (2) eine relative Luftfeuchtigkeit von 100 Prozent in der Schicht von ca. 500 Meter bis 4 Kilometer über Grund (d.h. Südwinde transportieren die Feuchte in Richtung der südlichen Zentralalpen) und (3) eine neutrale oder sogar bedingt instabile Schichtung.

Konvektion und Hagel

Den Unterschied zwischen «extremen» und nur «intensiven» Niederschlägen hängt vor allem davon ab, ob eine bedingte Instabilität und damit Konvektion vorliegt.³⁴ Die durch Konvektion oder durch erzwungenes Anheben der Luft über einer Bergflanke entstehenden Wolken liegen innerhalb der allgemeinen Wolkendecke. Die lokalen Wolken können den Niederschlag auf verschiedene Weise weiter beeinflussen. Typischerweise leben die konvektiven Zellen einige Stunden und erstrecken sich nur über wenige Quadratkilometer. Wenn mehrere Zellen am gleichen Ort aufeinanderfolgen, kann es dennoch zu einer grossen Niederschlagsmenge kommen (Abb. 14).

Starke Konvektion kann mit Hagel verbunden sein. Hagel entsteht bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt in sogenannten gemischtphasigen Wolken, wo Schneeflocken Tröpfchen sammeln und dann wieder gefrieren. Es bilden sich Eiskugeln, an denen sich weitere Tröpfchen anlagern, und die mit anderen Eiskugeln verschmelzen und dann wieder einfrieren und so weiter. Hagelkörner können so gross werden, wie es die Stärke der aufsteigenden Winde zulässt. Aufwinde, die stark genug sind, um grosse Hagelkörner in Schwebelage zu halten, sind nur in konvektiven Wolken zu finden.

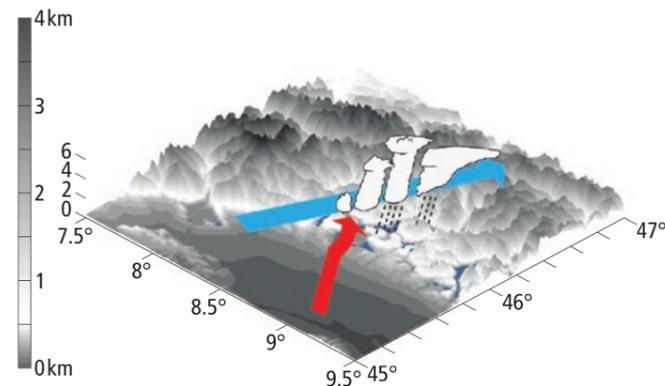


Abb. 14: Konzept der Konvektion über dem Lago Maggiore.³⁴ Die bedingt instabile und feuchte Luft in Bodennähe (rot) wird zum Aufstieg gezwungen. Konvektive Zellen werden initiiert und durch die Strömung auf mittlerem Niveau (blau) transportiert. Die konvektiven Zellen folgen nahezu identischen Bahnen und produzieren Niederschläge am gleichen Ort. Diese Abfolge führt lokal zu grossen Niederschlagsmengen.

Wassernot im Emmental, 1837

Am 13. August 1837 löste ein Gewitter in einem Seitental das grösste bekannte Hochwasser der Emme aus. Bekannt geworden ist es durch eine Erzählung von Jeremias Gotthelf, «Die Wassernot im Emmental am 13. August 1837». Gotthelf, der die Schrift aufgrund seiner Eindrücke und Gespräche beim Besuch des Tals unmittelbar nach der Katastrophe verfasst hat, beschreibt darin, wie das zerstörerische Hochwasser durch eine Folge von Gewittern ausgelöst wurde. 2002 haben Modellierungen gezeigt, dass neben Intensität und Menge des Niederschlags vor allem die Vorgeschichte entscheidend gewesen war: Ohne die Gewitter der Vortage wäre es nicht zur grossen Wassernot gekommen.

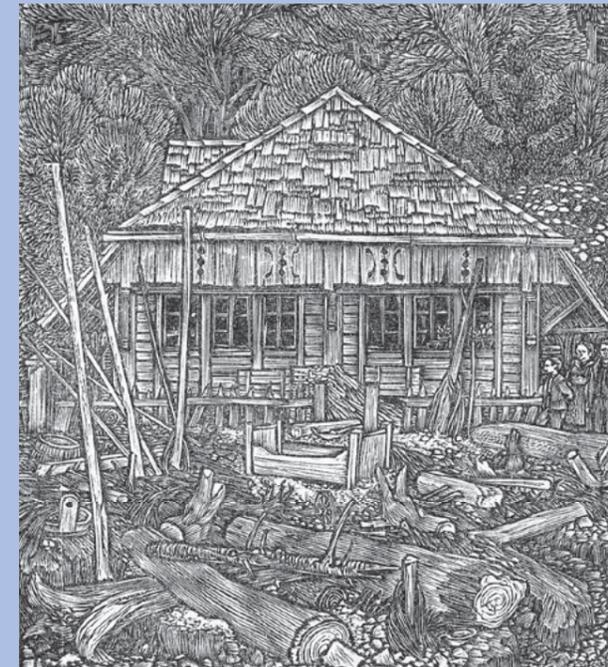


Abb. 15: Holzschnitt von Emil Zbinden; Illustration zur Werkausgabe der Büchergilde Gutenberg (1951).

Wie wichtig war Konvektion für das Ereignis von 1868?

Die nebenstehend beschriebenen Prozesse liefen so oder ähnlich auch während des Hochwasserereignisses von 1868 ab. Dies ist aus verschiedenen Quellen belegt und mit Simulationen erhärtet.³² Während der zwei Hauptniederschlagsphasen zwischen dem 26. September und dem 4. Oktober 1868 wird unter anderem von anhaltendem Regen und schweren Gewittern mit einzelnen Hagelzügen berichtet.^{3,35} Auch die täglichen Niederschlagssummen während dieser Zeit (zum Beispiel am 3. Oktober 1868, vgl. Abb. 33) lassen auf Gewitteraktivität schliessen. Die Regenmengen sind ziemlich unabhängig von der Höhe über Meer, und starke sowie schwache Niederschlagsintensitäten finden sich oft nebeneinander auf engem Raum.³²

Abbildung 16 veranschaulicht die Bedeutung der Konvektion für das Ereignis von 1868, wie es durch das WRF-Modell (vgl. S. 26) simuliert wird. Die Luftmasse unterhalb von 4 Kilometer Höhe (600hPa) bewegt sich nach Norden (in der Figur von links nach rechts), die Luftmasse oberhalb davon nach Osten (zum Leser gerichtet). Die hellgrüne Farbe oberhalb von 900 Hektopascal über Genua zeigt an, dass der Luftstrom dort nicht gesättigt ist. Wenn diese Strömung die Poebene durchquert und auf die südlichen Zentralalpen trifft, wird sie angehoben und gesättigt. Eine tiefe Wolkendecke bildet sich über den Alpen und erzeugt Regen. Die graugrüne Farbe entspricht mehr oder weniger der Wolkendecke, Niederschläge werden nicht angezeigt. Die zahlreichen roten Konturen zwischen Locarno und Genua zeigen die aufsteigende Strömung eines konvektiven Gewitters, das sich Locarno nähert. Das Gewitter befeuchtet die oberen Schichten und erzeugt eine sehr hoch reichende Wolke. Die Luft ist vom Boden bis 300 Hektopascal (9km Höhe) am Ort des Gewitters gesättigt. Im Modell bewegt sich der Sturm dann weiter nach Norden und erzeugt vier Stunden später starke Niederschläge über dem Lago Maggiore (vgl. S. 27).

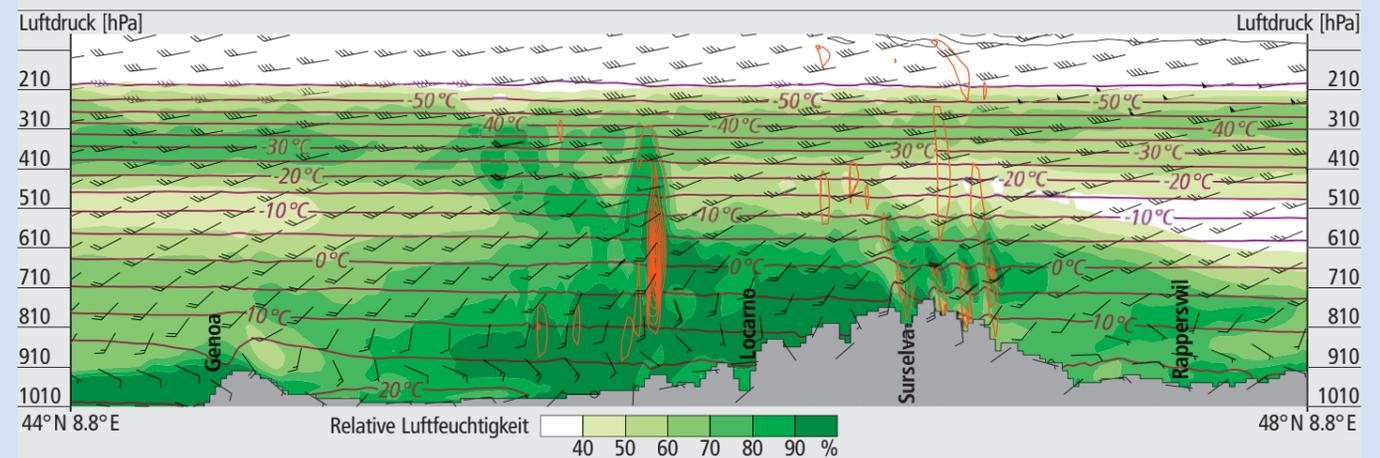


Abb. 16: Querschnitt durch die Alpen am 26. September 1868 am Abend (21 UTC) von Süden (links) nach Norden (rechts). Die Daten stammen aus einer Simulation mit dem Wettermodell WRF (vgl. S. 26) in 2 km Auflösung und 40 Schichten. Die Topographie (dunkelgraue Fläche) entspricht der Modelltopographie. Farben zeigen die relative Luftfeuchtigkeit an. Windspitzen zeigen den horizontalen Wind an: nach oben für Südwind (Wind aus Süden), nach rechts für Westwind usw. Je mehr Seitenbalken die Windspitzen haben, desto stärker ist der Wind (10 Knoten, also etwa 20 km/h pro Balken). Die orangen Konturen stellen Bereiche aufsteigender Luft dar. Die Temperatur wird durch rotviolette Linien mit Beschriftung angezeigt. Die Nullgradgrenze liegt bei ca. 630 hPa (ca. 4000 m ü.M.).

Entstehung von Hochwassern – Grunddisposition

Hochwasser entstehen aus dem komplexen Zusammenspiel zwischen Grunddisposition, variabler Disposition und auslösendem Niederschlag. Boden, Geologie, Landnutzung und Topographie bestimmen die Grunddisposition eines Einzugsgebietes. Sie beschreibt, wie ein Einzugsgebiet auf Starkniederschläge reagiert, welcher Anteil des Niederschlags zum Abfluss gelangt und wie die Hochwasserwelle abfließt. Um die Grunddisposition eines Einzugsgebietes für Hochwasser zu erfassen, müssen Menge, Dauer und Intensität des auslösenden Niederschlags und weitere variable Faktoren mitberücksichtigt werden.

Abflussbildung – Hochwasser entstehen

Für die Ausprägung eines Hochwassers ist entscheidend, welcher Anteil des gefallenen Niederschlags direkt abfließt, ob dies 10 oder 70 Prozent des Niederschlags sind, macht einen grossen Unterschied. Man spricht in diesem Zusammenhang von abflussbildenden Prozessen. Sie variieren innerhalb eines Einzugsgebietes je nach Bodenart und geologischen Verhältnissen. Im Wesentlichen lassen sich vier Typen dieser Prozesse unterscheiden: (1) Ist der Boden schlecht durchlässig, kann der Niederschlag nicht versickern und fliesst oberflächlich ab. (2) Ist der Boden gesättigt (z. B. Feuchtwiesen), kann das Niederschlagswasser ebenfalls nicht infiltrieren. Bei beiden Prozessstypen fliesst somit ein grosser Teil des Niederschlags direkt und zeitlich wenig verzögert ab. (3) Wenn der Niederschlag in den Boden infiltriert, sei es durch das Bodensubstrat, sei es durch Makroporen, stellt sich die Frage, ob es innerhalb des Bodens undurchlässige Schichten gibt. Ist dies der Fall, fliesst das Wasser im Boden seitlich ab, und der Niederschlag trägt nur

in einem geringeren Ausmass und zeitlich verzögert zum Hochwasser bei. (4) Aus Sicht des Hochwasserschutzes besonders günstig ist es, wenn das Niederschlagswasser durch den Boden sickert und in einen durchlässigen geologischen Untergrund infiltriert. Der Niederschlag gelangt dann erst nach Tagen oder gar Wochen zum Abfluss und trägt somit nicht direkt zum Hochwasser bei.

Aufgrund der räumlichen Anordnung und Verbreitung dieser vier Prozessstypen, kann die Hochwasser-Grunddisposition eines Einzugsgebietes beurteilt werden. Beim Allenbach in Adelsboden (Abb. 17) bestimmen die Typen (1) und (2) einen grossen Teil der Flächen, die sich zudem in steilen und bachnahen Bereichen befinden. Grosse Hochwasser treten im Sommer nach intensiven Gewitterniederschlägen auf.

Neben der dominierenden Rolle von Boden und Geologie üben weitere Faktoren wie die Landnutzung und die Hangneigung einen Einfluss auf die Abflussbildung aus. Viel und kontrovers diskutiert wird die Rolle des Waldes. Durch den Rückhalt des Niederschlags in der Baumkrone und durch die oftmals günstigen Versickerungseigenschaften des Waldbodens besitzt der Wald durchaus eine hochwasserdämpfende Wirkung, die vor allem bei kleineren Ereignissen zum Tragen kommt. Bei grossen Niederschlagsereignissen sind diese Faktoren aber nur noch von untergeordneter Bedeutung.

Abflusskonzentration – Hochwasser laufen ab

Die Abflusskonzentration beschreibt, wie der an Ort und Stelle gebildete Abfluss über das Gewässernetz abfließt. Faktoren wie die Hangneigung, die Dichte des Gewässernetzes und die Beschaffenheit des Fluss- oder Bachbettes sind dabei massgebend. Auch die Form des Einzugsgebietes beeinflusst die Art und den Verlauf des Hochwassers. Wird ein kreisförmiges Einzugsgebiet beregnet, fliesst das Wasser aufgrund der gleich langen Fliesswege im Gewässernetz gleichzeitig zusammen. Es resultieren höhere Hochwasserspitzen als in länglichen Einzugsgebieten.

In der Schweiz weisen die voralpinen Einzugsgebiete auf der Alpen- und Nordseite und die höher gelegenen süd-alpinen Einzugsgebiete eine Grunddisposition auf, die zu heftigen Hochwasserreaktionen führen. Sie sind steil und verfügen über ein dichtes Gewässernetz. In der Kombination mit intensiven oder lang andauernden Niederschlägen resultieren in diesen beiden Regionen die höchsten Hochwassermengen pro Quadratkilometer (Abflusspende; vgl. Abb. 18).

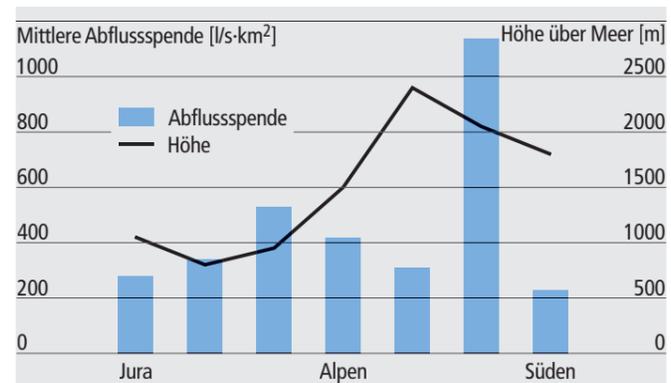
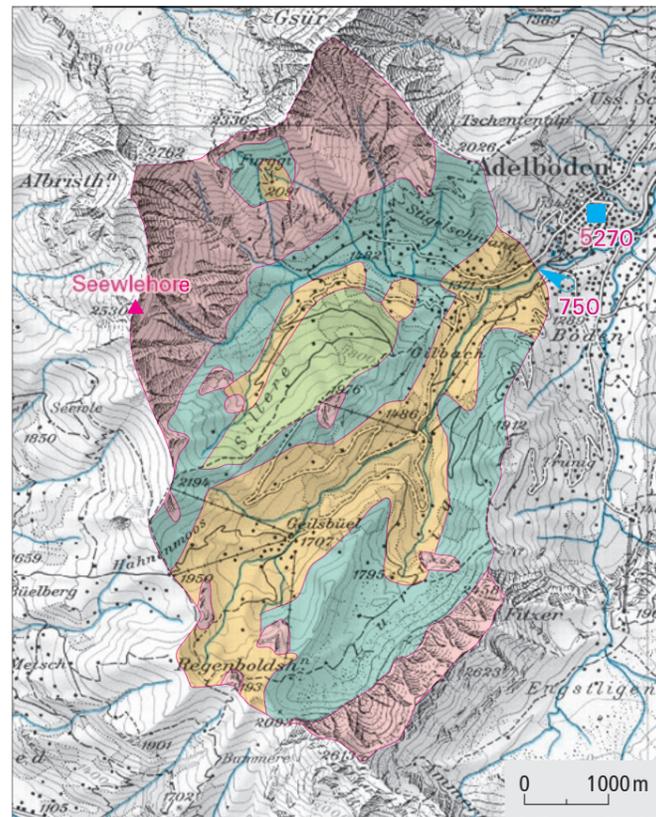


Abb. 18: Die Abflusspende eines Hochwassers mittlerer Grösse entlang eines Nord-Süd-Profiles durch die Schweiz.³⁷



- Typ 1: schnell reagierend
- Typ 2: leicht verzögert reagierend
- Typ 3: verzögert reagierend
- Typ 4: stark verzögert reagierend

Hochwasserentstehung im Allenbach (aus HADES-Tafel 5.7)

Abb. 17: Abflussbildung beim Allenbach in Adelsboden.¹ Beurteilung der Grunddisposition.³⁶

In den letzten 200 Jahren wurden die meisten Bäche und Flüsse eingedämmt und begradigt. Diese wasserbaulichen Massnahmen haben den Schutz vor Hochwasser bis zu einer bestimmten Grösse verbessert. Doch sie haben auch zur Verschärfung der Hochwasserspitzen beigetragen, und zwar aus zwei Gründen: (1) Hochwasser fließen in begradigten Gerinnen wesentlich schneller ab als in natürlichen, verzweigten Gerinnen, was zu grösseren Hochwasserspitzen führt. (2) Flächen entlang eines Flusses, die früher regelmässig überflutet wurden, sind heute durch Dämme geschützt und bieten Raum für Siedlungen, Industrie und Verkehr. Dadurch gingen wertvolle Rückhalteräume verloren, in denen die Hochwasser zwischengespeichert und die Hochwasserspitzen gedämpft wurden.

Auch ein See vermag die Hochwasserspitzen in Abhängigkeit seines Speichervermögens zu dämpfen (vgl. Abb. 19). Letzteres variiert von See zu See (vgl. Tab. 1). Entscheidend für das Ausmass der dämpfenden Wirkung ist das Verhältnis zwischen Speichervermögen und Zufluss. Eine geringe dämpfende Wirkung weisen Seen auf, bei denen die Speicherung im Vergleich zu den Tageszuflüssen klein ist. Das ist besonders beim Thuner- und Sarnersee der Fall. Mit dem im Jahr 2009 eröffneten Hochwasserstollen wurde für den Thunersee nun aber zusätzlicher Speicherraum geschaffen.

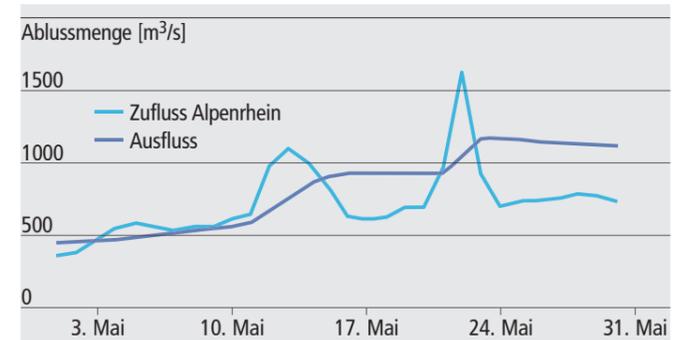


Abb. 19: Die dämpfende Wirkung des Bodensees bei den beiden Hochwasserereignissen im Mai 1999 (Daten: BAFU)

Diese Beispiele zeigen, wie der Mensch die Grunddisposition bis zu einem bestimmten Mass – etwa bei der Gestaltung der Gewässer oder der Ausweisung von Retentionsräumen (Räume in den Wasser zurückgehalten werden kann) – mitbestimmen kann. Für andere entscheidende Faktoren wie das Gefälle oder die Beschaffenheit des Untergrunds ist das nicht möglich.

Seename	Fläche Zufluss [km²]	Seefläche [km²]	Speicherung [mm] ¹⁾	Zufluss bei einem 100-jährlichen Ereignis [mm/d]	Verhältnis Speicherung zu Zufluss [d]
Bodensee	11887	541,2	69	24	2,88
Zürichsee	1840	90,1	32	30	1,07
Vierwaldstättersee	2251	113,6	44	43	1,02
Sarnersee	267	7,5	30	60	0,50
Zugersee	259	38,3	151	49	3,08
Brienzersee	1129	29,8	40	35	1,14
Thunersee	2490	48,4	12	24	0,50
Jurarandseen	8217	280,7	41	19	2,16

1) Volumen zwischen der Reguliergrenze (bzw. mittlerem Seestand) und der Hochwassergrenze, bezogen auf die Einzugsgebietsgrösse

Tab. 1: Hochwasserrelevante Kennwerte einiger Schweizer Seen.³⁸

Grunddisposition 1868

Die Grunddisposition für Hochwasser ist im Einzugsgebiet des Lago Maggiore gegenüber anderen Regionen der Schweiz deutlich erhöht. Abbildung 20 vergleicht drei wesentliche Grössen der Grunddisposition in den Hauptflussgebieten der Schweiz. Das Flussgebiet des Ticino – das Einzugsgebiet des Lago Maggiore – weist eine steile Topographie auf. Zudem besteht der geologische Untergrund aus kristallinen Gesteinen, die kein Wasser zu speichern vermögen und damit abflussbildend wirken. Schliesslich liegt das Gebiet in einer hydro-klimatischen Region, in der die höchsten Niederschlagsintensitäten der Schweiz auftreten. Diesen abflussfördernden Faktoren steht einer der grössten Waldanteile der Schweiz und die Retentionswirkung des Lago Maggiore gegenüber. Seine Seespeichermenge bezogen auf sein Einzugsgebiet (6386 km²) beträgt rund 50 Millimeter.

Im Gegensatz zu Geologie und Topographie variiert die Landbedeckung im Lauf der Zeit. So war der Waldanteil 1868 tiefer als heute. Ginzler und Koautoren³⁹ berichten von einer etwa halb so grossen Waldfläche, die mit einer deutlichen Erhöhung der Grunddisposition einhergeht. Allerdings war die Seeretention durch eine andere Seespiegel-Auslauf-Beziehung erhöht (vgl. S. 31).⁴⁰

Führt man diese Faktoren der Grunddisposition zusammen, entsteht das Bild einer zu Hochwassern neigenden Region – heute und mehr noch um 1868. Allerdings sind Flüsse und Gerinnebetten durch die jahrhundertlange höhere Abflussneigung an diese erhöhte Grunddisposition «angepasst», so dass zwar sehr hohe Abflüsse auftreten, aber nicht unbedingt Hochwasser, die das Bachbett verlassen. Deutlich zu sehen ist dieser Umstand an den relativ breiten Flussbetten der Region. Zudem ist im Hinblick auf das Hochwasserereignis von 1868 festzuhalten, dass die Grunddisposition vor allem auf die kurzfristige Reaktion des Einzugsgebietes auf Niederschläge wirkt, während der Effekt bei mehrtägigen Daueregen – wie dies 1868 der Fall war – geringer ausfällt.

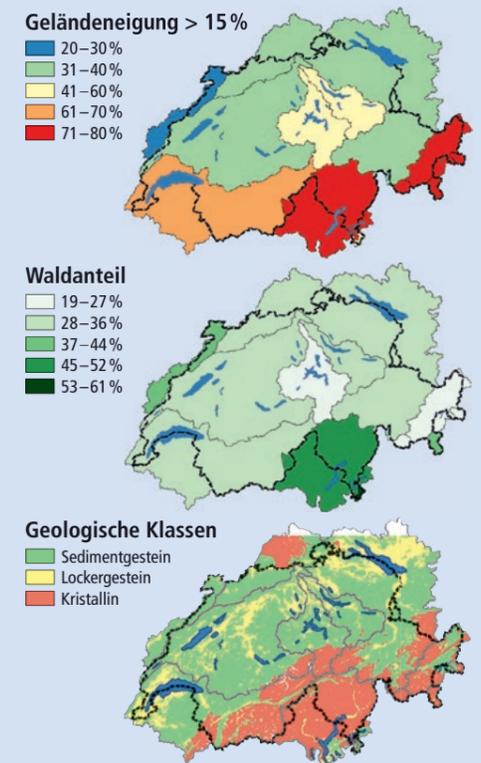


Abb. 20: Faktoren der Grunddisposition im Schweizer Vergleich. Anteil von Geländeneigung von 15% (oben) und wasserableitende, kristalline Geologie (unten), steht einem hohen Waldanteil gegenüber (Mitte).

Entstehung von Hochwassern – Variable Disposition und Auslösung

Neben der über die Zeit unveränderten Grunddisposition sind bei Hochwasserereignissen auch verschiedene zeitlich variable Faktoren und insbesondere der auslösende Niederschlag von entscheidender Bedeutung. Wichtige variable Faktoren sind die Bodensättigung, die Schneeschmelze sowie die Höhe der Nullgradgrenze. Der auslösende Niederschlag lässt sich aufgrund der Menge, Dauer und Intensität einteilen.

Komplexität von Hochwassern

Hochwasser entstehen im komplexen Zusammenspiel von Grunddisposition, variabler Disposition und Auslösung, wie das Beispiel des alpinen Einzugsgebiets der Kander (Berner Oberland) verdeutlicht. Seit 1999 ist dort eine Häufung grosser Hochwasser zu beobachten, deren Spitzen auch grösser sind als im Zeitraum davor (Abb. 21). Spontan könnte man vermuten, dass dafür die Veränderung eines einzelnen hochwassersteuernden Faktors verantwortlich sei. Die genauere Analyse zeigt dann allerdings, dass dies nicht zutrifft (vgl. Abb. 22). Die grössten Hochwasser sind durch ganz unterschiedliche Kombinationen von Faktoren zustande gekommen: 1999 (vgl. S. 8) und 2011 (vgl. S. 10) war der Beitrag der Schneeschmelze zum Hochwasserabfluss substantiell. Beim Hochwasser im August 2005 (vgl. S. 8) – dem grössten seit 1903 – war die dreitägige Niederschlagsmenge sehr gross. Beim 2007er-Ereignis, das ebenfalls im August auftrat, war vor allem der eintägige Niederschlag gross; dank der relativ tiefen Nullgradgrenze fiel in höheren Lagen jedoch Schnee, so dass nicht das gesamte Einzugsgebiet direkt zum Hochwasserabfluss beitrug. Das in Abbildung 22 ebenfalls betrachtete Hochwasser von 1987 unterscheidet sich deutlich von den anderen Hochwassern. Der Boden war bei Ereignisbeginn weniger gesättigt und die auslösenden Niederschläge waren deutlich kleiner. Einzig die Nullgradgrenze lag sehr hoch.

Hochwasser entstehen also aus dem komplexen Zusammenspiel verschiedener Faktoren. Die grössten Hochwasser kommen dann zu-

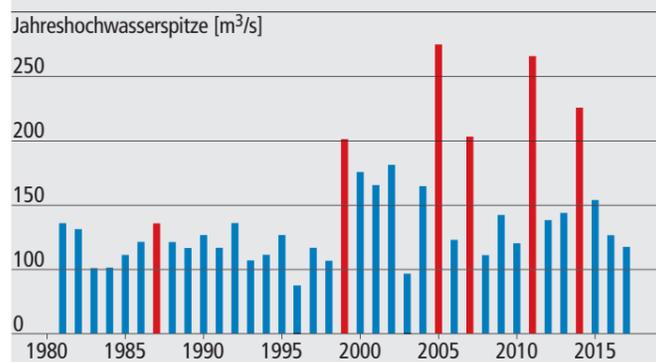


Abb. 21: Jährliche Hochwasserspitzen der Kander. Rot: Hochwasser, die in Abb. 22 analysiert werden.

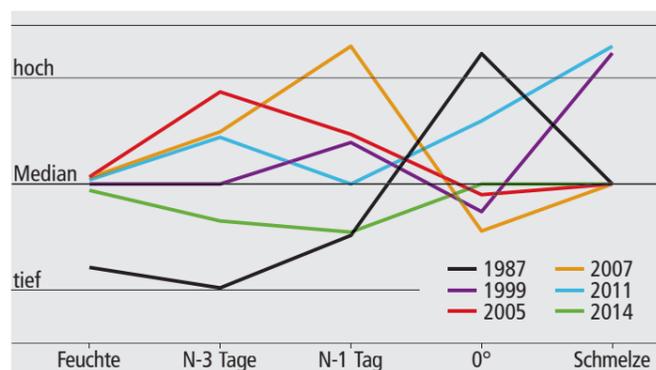


Abb. 22: Variable Disposition und Auslösung der grössten Kander-Hochwasser (vgl. Abb. 21). Feuchte: Bodensättigung bei Ereignisbeginn; N-3Tage, N-1Tag: Niederschlagsmenge über 3 Tage bzw. 1-Tag; 0°: Höhe der Nullgradgrenze; Schmelze: Beitrag der Schneeschmelze

stande, wenn die Konstellation der Faktoren besonders ungünstig ist, wenn also der auslösende Niederschlag auf bereits gesättigte Böden trifft, die Nullgradgrenze während des Ereignisses sehr hoch liegt und auch die Schneeschmelze zum Hochwasser beiträgt.

Auslösender Niederschlag

Robert Diezig⁴¹ hat in 39 Einzugsgebieten in der Schweiz die auslösenden Niederschläge der grössten Hochwasser untersucht und eingeteilt, insgesamt über 1000 Ereignisse im Zeitraum 1974–2003. Rund ein Drittel der auslösenden Niederschläge dauerten zwischen 12 und 24 Stunden und wiesen eine relativ hohe Intensität (mm Niederschlag pro Stunde) auf. Diese «Kurzregen» sind somit bei der Hochwasserauslösung sehr wichtig. Je rund 20 Prozent der Ereignisse wurden durch «Dauerregen» bzw. «Schauer» ausgelöst. Erstere dauern zwei und mehr Tage und sind sehr ergiebig. Schauer sind meist von kurzer Dauer (Minuten bis wenige Stunden) und treten vor allem bei Gewittern auf. Ihre Niederschlagsintensität ist gross bis sehr gross.

Abbildung 23 vermittelt einen Überblick über das räumliche Auftreten der Niederschlagstypen. Im Voralpenraum spielen die Schauer eine bedeutende Rolle, da Gewitter hier häufig sind. Dauerregen sind im zentralen Alpenraum, aber auch im Tessin sehr wichtig. Auffällig ist, dass der bezogen auf die ganze Schweiz häufigste Typ, der Kurzregen, im Alpenraum nur von geringer Bedeutung ist. Im Jura finden wir sogenannte Regen-auf-Schnee-Ereignisse. Wenn Regen auf eine bestehende Schneedecke fällt, können durch den Eintrag von Schmelzwärme zusätzliche Wassermassen aktiviert werden. Die Kombination von auslösendem Niederschlag und Schneeschmelze führte im Mai 1999 im Alpenraum zu sehr grossen Hochwassern (Abb. 24), die allerdings nur aufgrund einer aussergewöhnlichen Kombination verschiedener variabler Faktoren zustande gekommen sind. Tiefe Lufttemperaturen bis Mitte April verhinderten das Abschmelzen der überdurchschnittlichen Schneemengen, und nach einem Wärmeeinbruch setzte eine intensive Schneeschmelze ein, was zur Sättigung der Böden führte. Diese Faktorenkombination allein hätte allerdings noch nicht genügt, um sehr grosse Hochwasser zu bilden, wie das Jahr 2018 belegt. Was im Mai 1999 schliesslich zu den grossen Hochwasserspitzen und zu Überschwemmungen an den Seen (z. B. am Thunersee) führte, waren erst

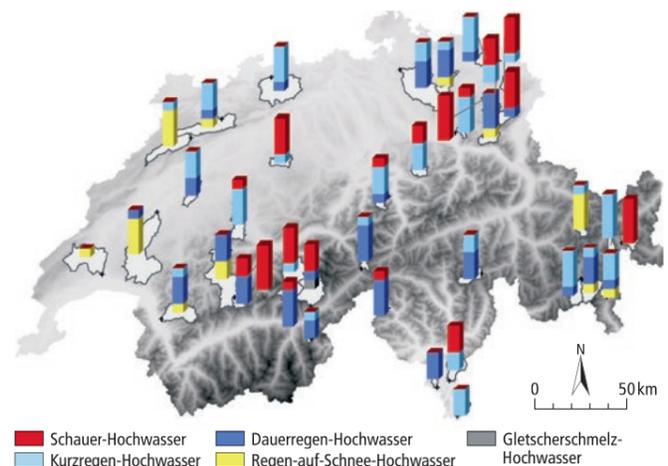


Abb. 23: Gewichte Häufigkeit der auslösenden Niederschlagstypen in ausgewählten Einzugsgebieten. Bei der Gewichtung wird einem Niederschlagstyp, der zu einem sehr grossen Hochwasser führt, ein grösseres Gewicht beigemessen als einem Typ, der nur ein kleineres Hochwasser erzeugt.

die relativ grossen Dauerregen. Der Schneeschmelzanteil am Gesamt-abfluss variierte je nach Einzugsgebiet zwischen 15 und 30 Prozent.⁴²

Rolle der Nullgradgrenze

Im Alpenraum genügen gute Kenntnisse der Grunddisposition und der auslösenden Niederschlagsintensität nur bedingt, um ein Hochwasserereignis beurteilen oder vorhersagen zu können. Eine massgebliche Rolle spielt nämlich auch die Höhe der Nullgradgrenze. Sie entscheidet, in welchen Gebieten Niederschlag in Form von Regen fällt und damit abflusswirksam ist. Bei der Kander beispielsweise kommen sehr grosse Hochwasser nur zustande, wenn mindestens 80 Prozent des Einzugsgebiets überregnet werden. Das ist dann der Fall, wenn die Nullgradgrenze bei rund 2400m ü.M. liegt.

Die Nullgradgrenze ist in der Schweiz im Zeitraum 1961–2016 in allen Jahreszeiten signifikant gestiegen. Der Gesamtanstieg liegt zwischen 200 Metern im Herbst und 400 Metern im Frühling und Sommer.⁴³ Dadurch hat sich die variable Disposition für Hochwasser generell erhöht. Bei einer weiteren Temperaturerhöhung steigt aber nicht nur die Nullgradgrenze, auch die Niederschlagsintensität nimmt zu (vgl. S. 44). Mit der Klimaerwärmung verändern sich also wichtige Faktoren im Hochwassergeschehen in eine ungünstige Richtung. Das Thema Hochwasser wird uns deshalb auch in Zukunft weiter beschäftigen.



Abb. 24: Das Hochwasser vom Mai 1999 in Bern.

Variable Disposition 1868

Dem Hochwasser von 1868 ging ein regenreicher September voraus,³⁵ der die Wasserspeicherkapazität der Böden erschöpfte und den Seespiegel ab Mitte September deutlich anhub (vgl. Abb. 34). So wies der Seespiegel den sechsthöchsten jemals gemessenen Wert für den Monat September auf. Für die Bodensättigung gibt es keine vergleichbaren Aufzeichnungen, jedoch bestätigen hydrologische Modellierungen³² die naheliegende Vermutung ausgeschöpfter Speicher ab Ende September 1868.

Auf diese sehr feuchten Vorbedingungen folgten Ende September und Anfang Oktober dann zweimal erhebliche Regenmengen, mit Mehrtagessummen über den langjährigen Maxima für diese Jahreszeit (vgl. S. 21), die bedingt durch die konstant hohe Nullgradgrenze in dieser Periode (Abb. 25) vollständig zum Abfluss beitragen konnten. Positiv für die Hochwassersituation von 1868 ist sicherlich die geringe Rolle der Schneeschmelze zu bewerten. Sie spielte trotz der positiven Temperaturen bis in grösste Höhen nur eine marginale Rolle, da keine signifikanten Schneereste aus dem letzten Winter mehr vorhanden waren und auch keine relevanten Schneemengen mehr vor dem Ereignis fielen. Abbildung 26 zeigt zusammenfassend den Einfluss der variablen Faktoren für das Hochwasserereignis von 1868.

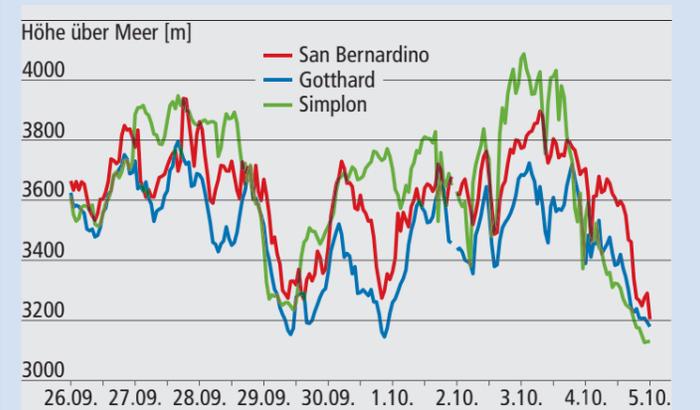


Abb. 25: Die mittels regionalen Wettermodells (vgl. S. 26) rekonstruierte Nullgradgrenze an drei ausgewählten Standorten¹ zeigt die hohe Nullgradgrenze von Ende September bis Anfang Oktober 1868.³²

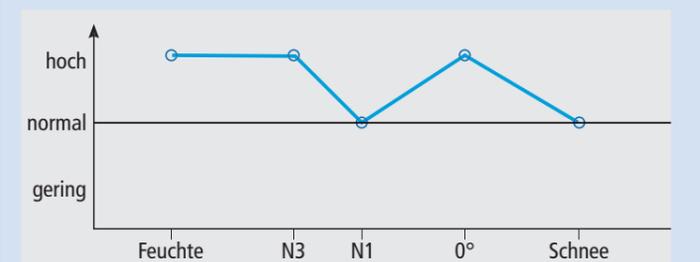


Abb. 26: Schematische Darstellung des Einflusses der Faktoren (Beschreibung vgl. Abb. 22) der variablen Disposition auf das Hochwasserereignis von 1868.

Dokumentendaten zu 1868 und anderen historischen Hochwassern

Schriftliche und bildliche Quellen einschliesslich Planzeichnungen, aber auch Inschriften wie Hochwassermarken gehören zu den detailliertesten Zeugen historischer Hochwasser. Sie geben vor allem Auskunft über die Wahrnehmung der betroffenen Bevölkerung sowie Hilfs- und Präventionsmassnahmen.

Die wichtigsten Hochwasserereignisse der Schweiz seit Ausgang des Mittelalters lassen sich in erster Linie durch historische Dokumentendaten rekonstruieren. Darunter sind Quellen zu verstehen, die von Menschen ohne den Einsatz von Messinstrumenten aufgezeichnet wurden. Dokumentendaten lassen sich wiederum in mehrere Gruppen unterteilen, was ihren Entstehungskontext, ihr Publikationsmedium und ihre Intention betrifft.

Zum einen gibt es individuelle, zum andern administrativ-serielle Quellen. Die erste Gruppe umfasst Einzelnachrichten in Chroniken und Zeitungen, persönliche Dokumente wie Briefe oder Postkarten, die von einer einzelnen Person entweder auf der Basis eigener Anschauung oder unter Verarbeitung der Berichte anderer aufgezeichnet wurden. Je nachdem kann es sich dabei um sehr kurze Nachrichten zum Ausmass oder den Folgen des Ereignisses handeln oder aber um zum Teil sehr detaillierte Berichte, ja zeitgenössische Gesamtdarstellungen zum Ereignis in Buchform.^{3,35} Für die Hochwasserforschung sind in solchen Quellen vor allem Angaben relevant, die berichten, bis zu welchem Referenzpunkt sich das Hochwasser erstreckte, zu welchen Schäden es kam, welche Präventions- und Bewältigungsmassnahmen die Menschen unternahmen, aber auch, wie nach den Ursachen des Ereignisses gesucht wurde. Dem gegenüber handelt es sich bei seriell-administrativen Quellen um solche, die über einen langen Zeitraum hinweg meist aus einem allgemeinen verwaltungstechnischen Grund heraus verfasst wurden und dabei auch über Jahrzehnte, oft sogar Jahrhunderte hinweg ihren Aufbau und Charakter behielten. Die Verfasser waren Verwaltungsbeamte, die diese Rechnungsbücher über mehrere Jahre hinweg führten und dann einen Fortsetzer fanden. In den Wochenausgabebüchern von Basel oder den Seckelmeisterrechnungen aus Fribourg und Solothurn etwa wurde penibel Woche für Woche dokumentiert, welche Summen etwa zur Reparatur von Brücken und Schutzbauten nach Hochwassern ausgegeben wurden.⁴⁴

Die Quellen unterscheiden sich aber auch nach dem Publikationsmedium: Dienten handschriftliche Chroniken in Klöstern oder auch Städten eher dem individuellen Gedächtnis einzelner Gruppen, die Zugang zu diesen Aufzeichnungen hatten, so waren zunächst frühneuzeitliche Flugblätter und später Zeitungsberichte, wie sie seit dem 18. Jahrhundert in immer grösserer Dichte existieren, von vornherein an eine lesekundige Allgemeinheit gerichtet. Je spektakulärer, dramatischer, einzigartiger, ja katastrophaler ein Ereignis war, desto eher und ausführlicher wurde davon in den Zeitungen berichtet. Im Laufe des 19. Jahrhunderts wurden die Zeitungen aber nicht nur zu Medien, die von den Ereignissen selbst berichteten, mitunter auch unter Einbezug von Einzelschicksalen, sondern sie wurden auch zu einer der wesentlichen Plattformen für Spendenaufrufe (Abb. 27); umgekehrt veröffentlichten vor allem regionale Zeitungen auch Listen von Wohltätern, die mit ihren Spenden zur Linderung der materiellen Schäden beigetragen hatten. Rasch auch erkannten Politiker, dass ein Erscheinen im Katastrophengebiet ihre Popularität steigern konnte und dies über die Berichte in den Zeitungen weithin bekanntgemacht wurde. Für die Überschwemmungen des 19. Jahrhunderts und insbesondere für die des Jahres 1868 gehören Zeitungsberichte daher zu den wichtigsten und detailliertesten Quellen überhaupt, auch wenn bei ihrer Verwendung auch der Entstehungshintergrund mit analysiert werden muss; besonders sensationelle Begebenheiten sind dort überrepräsentiert, weniger spektakuläre hingegen werden mitunter nicht oder nur am Rande berücksichtigt.

Eine weitere wesentliche Quellengruppe sind gesetzliche Bestimmungen zum Umgang mit Hochwassern sowie zu Präventionsmassnah-

men, etwa zum Schutz des Waldes im Gebirge. Diese entstanden zwar in der Regel erst einige Jahre nach extremen Ereignissen, lassen sich aber direkt darauf zurückführen (vgl. S. 38). Dazu kommen während des Ereignisses entstandene regionale Verordnungen, die dem Katastrophenmanagement direkt vor Ort dienten, etwa zur Regelung des provisorischen Fährverkehrs, wenn Brücken weggerissen wurden, oder zur Versorgung mit reinem Trinkwasser.



Abb. 27: Hilfsaufruf des neu gegründeten Hilfskomitees von Lugano zur Unterstützung der Hochwasseropfer in der Leventina und im Bleniotal, verbunden mit einem Situationsbericht aus der hauptbetroffenen Region. Es wird dabei festgehalten, dass auch drei Tage nach dem Ereignis erst schrittweise das Ausmass der Zerstörungen bekannt wird. *Gazzetta Ticinese* vom 1. Oktober 1868: S. 897.

Zu den historischen Dokumentendaten zählen aber nicht nur schriftliche Aufzeichnungen, sondern auch Bilder aller Art. Mit dem Einsetzen der Flusskorrekturen im 18. und 19. Jahrhundert sowie der genauen Kartierung des Landes in Form der sogenannten Kataster wurden alte und neue Flussverläufe festgehalten, Querschnittsprofile von Flüssen erstellt und genaue Konstruktionszeichnungen zu Brücken angefertigt, für die wiederum ein genauer hydrologischer Befund zur Durchflussmenge im Durchschnitt sowie zu Spitzenzeiten oder zum Geschiebe wesentlich war.⁴⁵ Die Hochwasser und der von ihnen verursachte Schaden wurde in Gemälden ebenso festgehalten wie in Zeichnungen und Kupferstichen (Abb. 28), wobei Letztere im späten 19. Jahrhundert auch vermehrt zur Illustration in Zeitungen verwendet wurden. Die Technik der Fotografie entstand zwar schon in den späten 1830er Jahren, war aber aufgrund der langen Belichtungszeit zunächst noch nicht geeignet, Bewegungen wie das reissende Wasser bei Überschwemmungen wiederzugeben. Die ersten Fotos zum Hochwasser von 1868 (vgl. Abb. 1) sind daher fast wie Studioaufnahmen arrangiert. Erst in der Mitte der 1880er Jahre verringerte sich die Verschlusszeit bei professionellen Kameras so stark, dass auch bewegtes Wasser oder Menschen bei Aufräumarbeiten scharf abgebildet werden konnten. Kurz vor 1900 waren die Druckverfahren dann auch in der Lage, Fotos in Zeitungsberichte zu integrieren.

Einen Grenzbereich zu den instrumentellen Messungen zu Wasserhöhen und Starkniederschlägen (vgl. S. 21) bilden Hochwassermarken, wie sie über Jahrhunderte weg von den Menschen an privaten und öffentlichen Häusern, an Kirchen, Stadttoren und Brücken angebracht

wurden. Aufgrund der zahlreichen anthropogenen Eingriffe in die Flussläufe selbst, aber auch in die Landnutzung des Einzugsgebietes sind sie heute für rein hydrologische Berechnungen nur bedingt von Bedeutung, können aber als Zeichen einer aktiv gelebten Erinnerungskultur interpretiert werden. Sie zeigten der Bevölkerung im Alltag das Risikopotenzial des Lebens am Fluss oder See auf. Im 20. Jahrhundert verschwanden derartige Hochwassermarken immer mehr; sie wurden bei Renovierungen von Häusern oft nicht mehr erneuert, in manchen Fällen wohl auch, um den Preis der Immobilie nicht zu schmälern. Die

1868 in Dokumentendaten

Die Dichte an Dokumentendaten für die Überschwemmungen von 1868 ist exzellent, wenn auch nicht für alle betroffenen Regionen gleich gut. Für den Kanton Graubünden sind wir durch zwei fast zeitgleiche Publikationen von Fachleuten bestens informiert, sowohl zu den technisch-hydrologischen Aspekten als auch zu den Bewältigungsstrategien, Hilfsmassnahmen und Spendentätigkeiten. Der Bündner Kantonsforstinspektor Johann Coaz, der später zum führenden Fachmann für Aufforstungs- und Lawinenschutzfragen der Schweiz werden sollte, fasste drei Inspektionsreisen ins Hinter- und Vorderrheingebiet zu drei Vorträgen zusammen, die 1869 als Buch erschienen.³⁵ Die genau beschriebenen Auswirkungen des Hochwassers werden auch durch Bildtafeln illustriert. Während sich Coaz mit hydrologische Fragen und dem Zustand der Wälder im Gebirge auseinandersetzte (vgl. S. 29), war Johann Arpagaus in seinem Buch von 1870 stärker an den materiellen Schäden in den einzelnen Gemeinden interessiert.³ Ausführlich schildert er die Hilfsmassnahmen und legt dabei einen Schwerpunkt auf die Spendentätigkeit innerhalb der Region, aus der übrigen Schweiz und aus dem Ausland. Die Fachdiskussion zu den Ereignissen wurde auch in wissenschaftlichen Zeitschriften wie der «Schweizerischen Zeitschrift für Forstwesen», in Broschüren und gedruckten Vorträgen geführt.



Abb. 28: Die Überschwemmung von 1868 bei Au (SG)¹ (Aquarell). Ganz links wird die beschädigte Bahnbrücke wiederhergestellt. Das als sehr zuverlässig und zeitgenössisch einzustufende Bild kann deutlich besser als jede schriftliche Quelle das Ausmass der Überschwemmungen im Rheintal veranschaulichen, insbesondere, wenn sie mit Detailaufnahmen, etwa der frühen Fotografie aus Lustenau (Abb. 1, auf dem Aquarell links im Hintergrund), kombiniert werden. Allerdings bleibt unklar, ob das Bild den Höchstwasserstand wiedergibt oder – aufgrund der schon einsetzenden Reparaturarbeiten – wohl eher einen bereits sinkenden Wasserstand.

schweren Hochwasser in der Schweiz im letzten Viertel des 20. Jahrhunderts und zu Beginn des 21. Jahrhunderts zeigen aber deutlich auf, dass Erinnerungskulturen sehr wohl weiterhin von Bedeutung sind. Heute lebt diese wieder in Form von Blogs⁴⁶ oder der kürzlich installierten Internetplattform «Kollektives Überschwemmungsgedächtnis» (vgl. S. 3) auf. Fachleute wie auch Laien können dort historische und aktuelle Fotos von Hochwasserereignissen hochladen.

Die regionalen und überregionalen Zeitungen zum Herbst 1868 sind wahre Fundgruben für die Rekonstruktion des Hochwassers und seiner Auswirkungen, doch ist gerade in diesem Bereich die Forschung bei weitem noch nicht abgeschlossen. Die Redaktionen bauten für ihre Nachrichten auf einem Netz von offiziellen Informanten und Rückmeldungen aus der Bevölkerung auf. Aufgrund der Zerstörung der Verkehrsinfrastruktur konnte oft erst mit vielen Tagen Verspätung von den Ereignissen in entlegenen Regionen berichtet werden (Abb. 27). Aus drucktechnischen Gründen waren Illustrationen zu den Beiträgen damals noch nicht üblich.

Im Bundesarchiv sowie in den Staatsarchiven der betroffenen Kantone finden sich heute interne Berichte, Schadenslisten, Gutachten von Experten und Korrespondenzen zwischen den verantwortlichen Stellen, die die administrativen Abläufe des Hochwassermanagements genau rekonstruieren lassen. Ergiebig ist dabei der Bestand des Eidgenössischen Zentralhilfskomitees von 1868–1870, das eigens für die Hilfsaktionen von 1868 einberufen wurde und die Massnahmen auf gesamtschweizerischer Ebene koordinierte.⁴

Lange Messreihen

Forschung, Risikoabschätzung, Überwachung, Warnung: Verschiedenste Anwendungsbereiche sind auf Messdaten zu Starkniederschlägen und Hochwassern angewiesen. Die Schweiz verfügt heute über dichte Messnetze sowohl für den Niederschlag als auch für die Abflussmengen. Inwiefern können wir hier auch auf Langzeitmessungen zurückgreifen, um historische Ereignisse zu untersuchen?

Niederschlagsmessungen

Niederschlag variiert kleinräumig. Entsprechend wichtig ist eine hohe räumliche Dichte an Stationen. Das heutige Schweizer Niederschlagsmessnetz wird von MeteoSchweiz betrieben. Neben den herkömmlichen automatischen Wetterstationen besteht ein engmaschiges Netz aus automatischen und manuellen Niederschlagsstationen (Abb. 29), dazu kommen weitere Messstationen der Kantone und Privater sowie Radardaten (vgl. S. 22).

In der Vergangenheit war die Stationsdichte geringer. Das Ereignis von 1868 fällt in die Zeit vor dem Aufbau eines Niederschlagsmessnetzes, aber nach der Errichtung eines schweizerischen meteorologischen Netzes. Es stehen daher Messungen von herkömmlichen Wetterstationen zur Verfügung. Der Aufbau eines zusätzlichen Netzes von Niederschlagsstationen (zusätzlich zu den Klimastationen) begann in den 1880er Jahren und erreichte 1900 die Zahl von 247 Stationen. Die Niederschlagsmenge wurde täglich (in der Regel gegen 6 Uhr morgens) abgelesen.

Für die Messung von Niederschlag gab es lange Zeit nur manuelle Instrumente. Eine präzise automatische Messung ist nicht trivial. Abbildung 30 zeigt links eine automatische Messstation. Der gemessene Wert hängt stark vom lokalen Windfeld und Verwirbelungen am Behälter ab. Solche Messfehler beeinflussen auch die Langzeitstabilität von Niederschlagsmessungen. Bereits kleinere Veränderungen im Umfeld einer Station können die Messungen beeinflussen und beispielsweise zu einem Sprung in den Daten führen. Mit statistischen Metho-



Abb. 30: Links: Niederschlagsmessung an der meteorologischen Station Zollikofen, rechts: Hydrometrische Station Liène-Tseuzier.

den, beispielsweise durch den Vergleich von benachbarten Stationen, lassen sich solche Sprünge zumindest auf Monatsbasis korrigieren. Aus so bereinigten Monatsdaten kann die Niederschlagsverteilung im September und Oktober 1868 rekonstruiert werden (Abb. 31).

Abflussmessungen

Die Abflussmessstationen werden vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) betrieben. An rund 260 Stellen wird an Flüssen der Durchfluss respektive an Seen der Pegel gemessen. Die systematische Messung geht in der Schweiz bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts zurück. Lange Reihen sind gerade für den Hochwasserschutz zentral. Die Abflussstationen werden wöchentlich geprüft und fünf bis sechs Mal jährlich geeicht.

Zur Abflussbestimmung werden der Wasserstand und in der Regel die Fließgeschwindigkeit eines Gewässers gemessen. Der Abfluss wird dann durch eine Pegel-Abfluss-Beziehung ermittelt oder er kann direkt volumetrisch mit einem Dreiecksüberfall (vgl. Abb. 30) bestimmt werden. Der Wasserstand wird dabei entweder mit registrierenden Pegeln, Drucksonden oder berührungslos mit Radar gemessen, die Fließgeschwindigkeit mit hydrometrischen Flügeln oder akustischen Sensoren.

Die Niederschlags- und Abflussdaten wurden lange Zeit auf Papier aufgezeichnet und archiviert (Abb. 32). Erst in den letzten Jahrzehnten wurden sie elektronisch erfasst – die früheren Daten wurden teilweise, aber nicht vollständig nacherfasst, so dass vor allem aus der früheren Zeit immer noch viele Daten nur in Papierform vorliegen. Eine Digitalisierung dieser historischen Daten würde zu deutlich verbesserten Rekonstruktionen vergangener Extremereignisse führen. Mit solchen Daten könnten dann aktuelle Ereignisse verglichen und damit eingeordnet werden. Das BAFU und MeteoSchweiz stellen zusammen eine öffentlich verfügbare Plattform bereit, welche die Einordnung von Extremniederschlägen möglich macht: www.climate-extremes.ch.

Der Hydrologische Atlas der Schweiz HADES

Der «Hydrologische Atlas der Schweiz» HADES (hydrologischeratlas.ch) ist ein Gemeinschaftswerk der Schweizer Hydrologie und stellt seit mehr als 30 Jahren hydrologische Grundlageninformationen, Spezialwissen und didaktische Medien einem breiten Kreis von Nutzerinnen und Nutzern zur Verfügung. Neben dem ursprünglichen Kartenwerk mit 63 gedruckten Tafeln umfasst der Hydrologische Atlas eine breite Palette von Produkten wie Exkursionsführer und Lehrmittel.

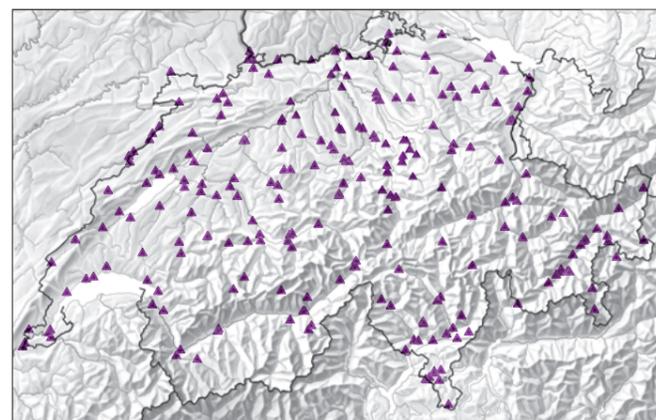
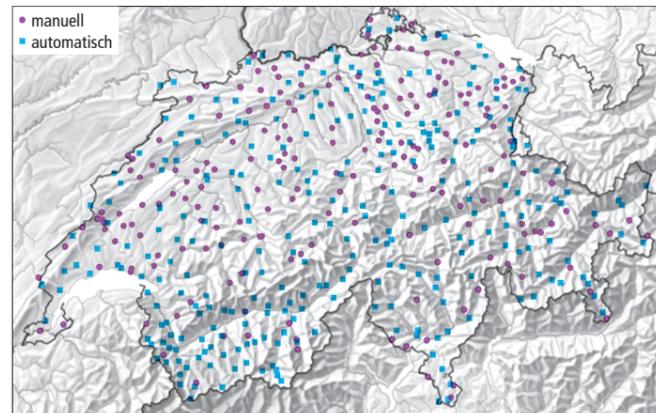


Abb. 29: Das Schweizer Messnetz. Oben: Manuelle und automatische Niederschlagsstationen von MeteoSchweiz (Stand 2017). Unten: Hydrometrisches Messnetz des BAFU.

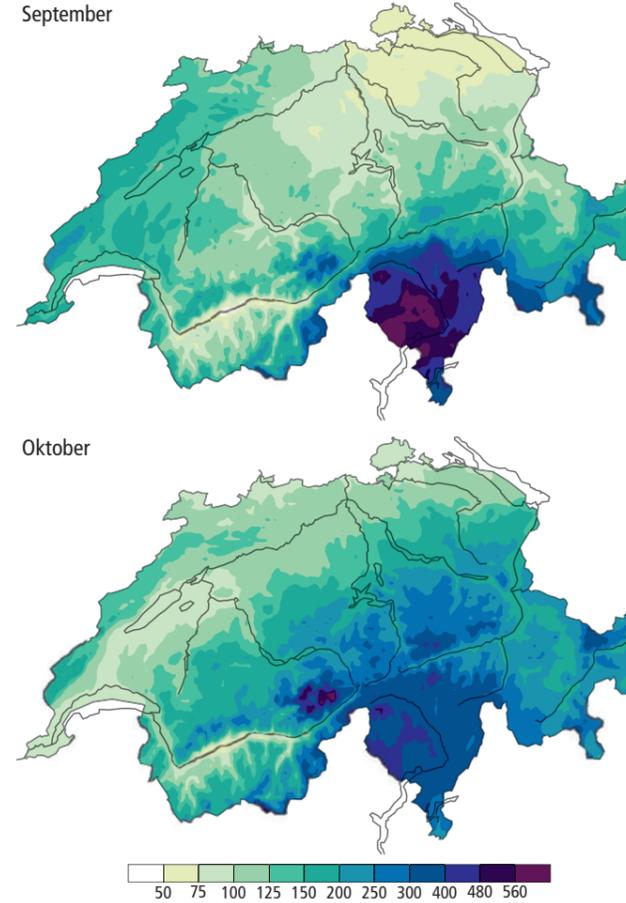


Abb. 31: Monatssumme des Niederschlags im September und Oktober 1868.⁴⁷

Jahr 1868		Thermometer		Barometer		Windrichtung und Stärke	Zug der Wolken	Bewölkung	Witterungscharakter	Ombrometer	Hydrometeor.	
Tag	Stunde	Trocken	Feucht	Therm.	Bar.						Natur.	Dauer.
1	7	10.4	12.4	14.5	885.0	0	11	11			Zagen	
1	1	15.0	14.5	15.0	884.8	1	11	11		1.85	Zagen - Regen	
9	1	14.8	13.2	15.1	884.0	0	10	10	ganz bedeckt		Zagen - Regen	
7	1	14.0	12.0	14.5	885.7	0	10	10			Zagen	
2	1	15.0	13.5	15.0	886.8	10	10	10		2.86		
9	1	14.0	12.0	15.0	886.0	0	10	10	bedeckt			
7	1	16.3	14.0	15.0	885.1	10	10	10			Zagen	
3	1	16.0	15.1	15.0	885.0	10	10	10		2.7.0	Zagen	
9	1	15.0	13.0	15.0	885.7	10	10	10	ganz bedeckt		Zagen	
7	1	16.0	15.8	15.0	885.1	0	10	10			Zagen - Regen	
4	1	13.0	12.0	14.5	881.1	0	10	10		2.08	Zagen	
9	1	13.0	12.0	14.5	881.1	0	10	10	ganz bedeckt		Zagen	
7	1	14.0	8.0	14.0	884.5	0	0	0				
5	1	14.0	12.1	15.0	882.0	0	0	0		13.0		

Abb. 32: Meteorologische Messungen im Oktober 1868 und der Station Brusio¹ (die Spalte «Ombrometer» gibt die Niederschlagsmenge pro Tag an).

Das 1868er Ereignis in Messungen

Zwar spielte sich das Ereignis in einer frühen Phase der Messnetze ab (vgl. S. 23), aber es gab bereits eine respektable Anzahl von Stationen mit Niederschlagsmessungen, auch im internationalen Vergleich, so dass gewisse Aspekte des Ereignisses direkt in Messdaten analysiert werden können.¹² Es gab zwei markante Phasen mit extremen Niederschlagsmengen über mehrere Tage (Abb. 33 und 34). Am 28. September 1868 wurde an der Station San Bernardino Ospizio¹, auf rund 2000 m ü.M., ein Tagesniederschlag von 254 Millimeter gemessen, der höchste je erreichte Wert hier, und auch die 5-Tagessummen erreichten langjährige Höchstwerte. Das Maximum der zweiten Phase wurde am 3. Oktober mit 170 Millimetern in Platte¹ unweit des Lukmanierpasses gemessen. Über beide Phasen (acht Tage) betrug die Niederschlagsmenge auf dem San-Bernardino-Pass unglaubliche 1118 Millimeter – mehr als der Jahresniederschlag in Bern.

Auch der Pegel des Lago Maggiore¹ wurde gemessen. Abbildung 34 zeigt, wie der Seespiegel bereits einige Tage vor dem Hauptereignis deutlich erhöht war. Der Seespiegelhochstand dauerte drei Wochen. Das Hochwasserereignis von 1868 führte zum höchsten je gemessenen Wasserstand.

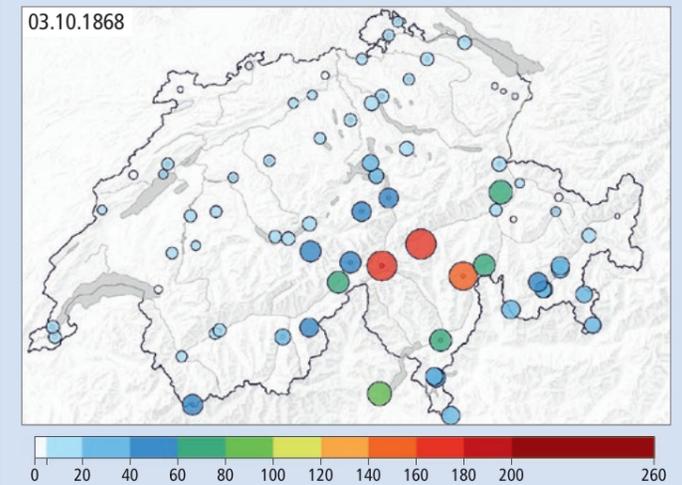


Abb. 33: Messungen der täglichen Niederschlagssumme (Millimeter oder Liter pro Quadratmeter innerhalb von 24 Stunden) in der Schweiz am 3. Oktober 1868.^{12,32}

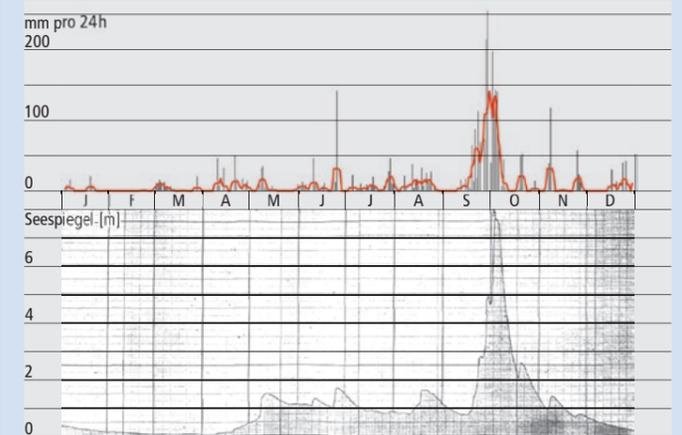


Abb. 34: Oben: Tagessummen (Balken) und 5-Tagessummen (rote Linie) des Niederschlags für die Station San Bernardino Ospizio auf der Passhöhe. Unten: Seespiegel des Lago Maggiore in Verbania, 1868.⁴⁸

Vom Radarbild zur Hochwasserwarnung

Niederschlagsinformationen in Echtzeit in möglichst hoher räumlicher und zeitlicher Dichte sind unentbehrlich für kurzfristige Starkniederschlags-, Überschwemmungs- und Flutwarnungen.

In der Schweiz wird Niederschlag in Echtzeit, kontinuierlich und automatisiert an Bodenwetterstationen (vgl. S. 20) und mit Wetterradaren gemessen. Für Bodenwetterstationen in komplexer Topographie sind die gemessenen Niederschlagswerte jedoch nur für die nähere Umgebung repräsentativ. Das Wetterradarnetz von MeteoSchweiz besteht aus fünf vollautomatischen Radarstationen mit Doppler- und Dual-Polarisations-Technologie und erfasst in Echtzeit ein detailliertes dreidimensionales Bild sämtlicher Niederschlagswolken und Gewitter über der Schweiz und dem angrenzenden Ausland (Abb. 35).^{49,50} Daraus lässt sich eine Karte der Niederschlagswerte am Boden ableiten.^{51,52}

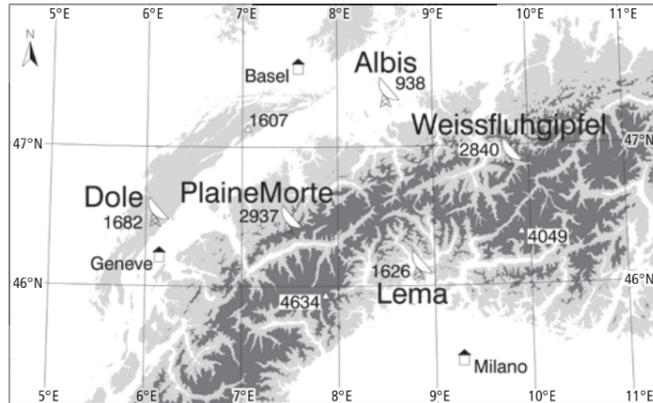


Abb. 35: Das MeteoSchweiz Wetterradarnetz mit den fünf Stationen auf La Dôle¹ (seit 1959), dem Albis¹ (seit 1959), dem Monte Lema¹ (seit 1993), der Pointe de la Plaine Morte¹ (seit 2014) und dem Weissfluhgipfel¹ (seit 2016).

Ein Radar sendet elektromagnetische Wellen in die Atmosphäre. Diese werden in Niederschlagswolken und Gewittern zum Radar zurückgestreut, und das Radar misst die empfangene Energie in Funktion der Distanz, des Azimuts und des Elevationswinkels. Die Rückstreuung erfolgt an Regentropfen, Schneeflocken, Hagel, Graupel und Eiskristallen, den sogenannten Hydrometeoren, aber auch an Flugzeugen, Vögeln und Insekten. Trifft die Radarwelle auf einen Berg, wird ebenfalls ein Teil der Energie zurückgestreut. Mit aufwändigen Rechenverfahren lassen sich diese Störechos herausfiltern. Zurück bleiben die meteorologischen Echos. Aus dem Verhältnis von ausgestrahlter und zurückgestreuter Energie wird die Niederschlagsintensität ermittelt. Der von der Antenne ausgesandte Radarstrahl ist nur gerade ein Grad breit und erlaubt daher eine feinskalige Erfassung der Niederschlags-

systeme und Gewitter. Um die Atmosphäre vertikal bis auf eine Höhe von 18 Kilometern und horizontal bis in eine Distanz von 246 Kilometern abzutasten, dreht sich die Antenne nach einem festen Muster und macht pro 5 Minuten 20 Umdrehungen. Die Daten werden von den fünf Radarstationen auf den zentralen Rechner übermittelt und dort zusammengefügt zu fertigen Niederschlagskarten, zu Hagel- und Gewitterwarnungen weiterverarbeitet und an eine Vielzahl von Anwendern verschickt. Eingesetzt werden diese Produkte in der Flugsicherung, für den Schutz der Bevölkerung vor Naturgefahren, in der Hydrologie, in der Versicherungs- und Energiebranche, im Freizeitsowie in vielen anderen Bereichen. Die Radarprodukte werden alle 2,5 Minuten aktualisiert und haben eine räumliche Auflösung von 1 Kilometer. Daraus ergibt sich ein Bild davon, wie sich Niederschlagsysteme und Gewitter in Zeit und Raum verändern (Abb. 36 oben rechts). Dank dem Einsatz der Doppler- und Dual-Polarisations-Technologie und raffinierten Computerprogrammen kann das Radar zwischen Echos von Tropfen, Schneeflocken, Hagelkörnern, Eiskristallen, Insekten, Vögeln, Flugzeugen und Bergen unterscheiden und aus Niederschlagswolken zusätzlich zur Intensität des Niederschlags auch Windfelder ableiten.

Für eine optimale Bestimmung der Niederschlagsmengen am Boden werden die Daten des Radars (Abb. 36 oben rechts) in Echtzeit statistisch mit den Messungen der Bodenstationen (Abb. 36 oben links) verschmolzen (Abb. 36 unten links).⁵³ Die Kombination von Radar-, Satelliten-, Blitz- und Modelldaten bildet die Grundlage für Kurzfristvorhersagen von Niederschlägen, Gewittern und Hagel, das sogenannte Nowcasting.

Niederschlagsvorhersagen für längere Zeiträume (mehrere Stunden bis mehrere Tage) basieren auf den Berechnungen von numerischen Wettervorhersagemodellen. Diese Modelle liefern flächendeckende Informationen zu Niederschlägen (Abb. 36 unten rechts). Dazu lösen numerische Wettervorhersagemodelle die physikalischen Grundgleichungen der Atmosphäre und benutzen mittels Datenassimilation (vgl. S. 24) Beobachtungen, um eine möglichst gute Beschreibung des Zustandes der Atmosphäre zum Startpunkt der Modellberechnung zu erhalten. Es bleiben jedoch Unsicherheiten bestehen, da auch Beobachtungen fehlerbehaftet sind und den Zustand der Atmosphäre nicht in allen Details abbilden. Die Auswirkungen dieser Unsicherheiten auf die Modellvorhersage werden mit Hilfe von sogenannten Ensemblevorhersagen quantifiziert. Für eine Ensemblevorhersage werden viele Modellvorhersagen mit leicht unterschiedlichen Start- und Rahmenbedingungen gerechnet. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Ensemblevorhersagen geben Informationen zur Unsicherheit der Prognose.⁵⁴ Die Berechnung der Modellvorhersagen wird mit Hilfe von Supercomputern durchgeführt, trotzdem ist die benötigte Rechenzeit so hoch, dass nur eine beschränkte Anzahl von Vorhersagen gerechnet werden kann.

Mit den Radarbeobachtungen und den Informationen aus den Wettermodellen können Starkniederschlags- und Hochwasserwarnungen erstellt werden. So beruhen beispielsweise Kurzfristwarnungen für Starkniederschläge und Sturzfluten auf der Kombination von Radarmessungen der vergangenen Stunden und den Niederschlagsvorhersagen für die kommenden Stunden.^{55,56} Für die Abschätzung von Unsicherheiten werden Ensemblemethoden eingesetzt.^{57,58} Diese Starkniederschlagswarnungen sind wichtig für die Bewältigung lokaler Überschwemmungen in Städten oder die Abschätzung der Murganggefahr in den Bergen.

Hochwasserwarnungen für die nächsten Tage beruhen auf den Niederschlagsberechnungen der Wettervorhersagemodelle. Diese Be-

rechnungen werden an numerische hydrologische Modelle weitergegeben (vgl. S. 28), die den Transfer des Niederschlagswassers durch den Boden in Flüsse und Bäche berechnen (Abb. 37).^{59,60} Für die Berechnung von Überschwemmungsflächen werden die hydrologischen mit hydraulischen Modellen gekoppelt (vgl. S. 30).⁶¹ Hydrologische Modelle liefern bessere Abflussvorhersagen, wenn sie mit Abflussmessungen geeicht werden. Dafür sind qualitativ hochstehende Niederschlagsinformationen (Radar, CombiPrecip und Bodenmessungen) unerlässlich.⁶² Abbildung 37 zeigt für eine Periode in Mai 2016, wie die hydrologischen Berechnungen variieren, je nachdem welches Regenprodukt für die Simulation verwendet wird. Im spezifischen Fall schneidet CombiPrecip gegenüber Beobachtungen am besten ab.

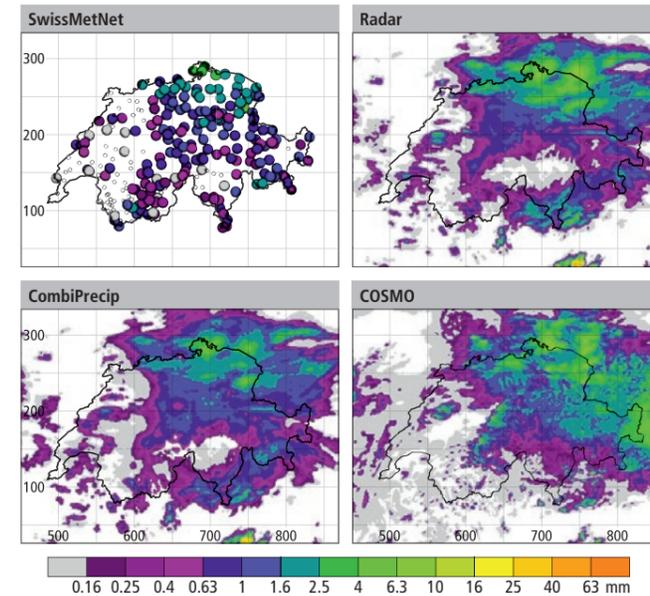


Abb. 36: Niederschlagsmenge in mm vom 12. Mai 2016, 11–12 UTC gemessen an den Stationen des SwissMetNet (oben links), geschätzt mit dem Radar (oben rechts), geschätzt aus der Kombination von Stations- und Radardaten (CombiPrecip, unten links) und in der Analyse des Wettervorhersagemodells COSMO.

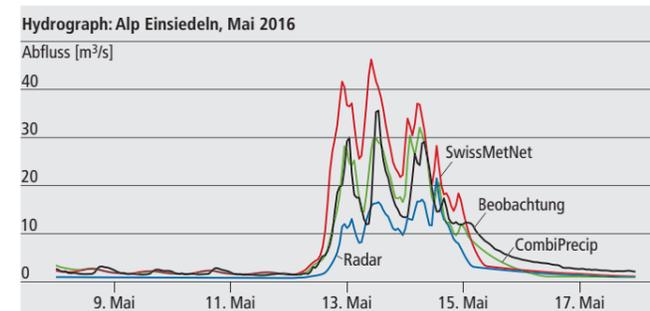


Abb. 37: Abflusssimulation der Alp bei Einsiedeln [$m^3 s^{-1}$] mit dem hydrologischen Modell PREVAH für die Periode vom 8. bis 17. Mai 2016. Drei Regenprodukte wurden für die Simulationen verwendet: interpolierte SwissMetNet-Daten (rot), Radardaten (blau) und das CombiPrecip Produkt (grün).

Die Anfänge von MeteoSchweiz

Die Geschichte der heute in der Schweiz betriebenen Messnetze beginnt in den frühen 1860er Jahren. Damals organisierte die Schweizerische Naturforschende Gesellschaft systematische meteorologische Beobachtungen in allen Landesteilen. Ab Dezember 1863 wurden an rund 80 Standorten dreimal täglich Temperatur und Druck sowie täglich Niederschlag und andere Grössen erfasst. Die Idee dahinter war, mit langjährigen Durchschnitten und Extremwerten das Klima besser beschreiben zu können. Für die Koordination des Projekts wurde in Zürich ein Büro eingerichtet, die Schweizerische Meteorologische Zentralanstalt, Vorgängerin des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz).

Anders als heute hatte die Institution anfangs noch nicht die Aufgabe, vor Wettergefahren zu warnen. So beschränkte sich ihre Tätigkeit auch beim Ereignis von 1868 darauf, die Regenmengen zu erfassen. Die räumliche Variabilität konnte sie nur sehr ungenau darstellen. In diesem Kontext gab das Hochwasser von 1868 – zusammen mit demjenigen von 1876 – einen Anstoss, das Messnetz zu verdichten. Während 1868 schweizweit nur 76 Stationen den Niederschlag massen, waren es 1900 bereits 380.

Mehr und mehr stellte sich die Frage, ob die Zentralanstalt neben klimatologischen Daten nicht auch Wettervorhersagen anbieten sollte. Einige Länder, insbesondere die seefahrenden Nationen, verfügten bereits über Sturmwarndienste. Deren Zentralen erhielten jeden Morgen per Telegraf die aktuellen Stationswerte. Auf einer Europakarte zeichneten sie Hoch- und Tiefdruckgebiete ein und sagten dann – mithilfe von Erfahrungssätzen zur Beziehung zwischen Luftdruckverteilung und Wind – die Wetterentwicklung der nächsten Stunden voraus.

Die so erstellten Prognosen waren umstritten, weil ihnen eine solide wissenschaftliche Basis fehlte. Doch die Befürworter argumentierten, Vorhersagen seien ein grosses Bedürfnis der Landwirtschaft und anderer wetterabhängiger Branchen. Der Schweizer Bundesrat unterstützte dieses Anliegen, was es der Zentralanstalt ermöglichte, eigene Prognosen einzuführen. Ab 1880 publizierte sie täglich einen Wetterbericht zur aktuellen Lage und «Aussichten» für den Folgetag. Diese neue Dienstleistung veranlasste den Bundesstaat dazu, die bisher von der Naturforschenden Gesellschaft geführte Zentralanstalt zu übernehmen. Von 1881 an waren in der Schweiz sowohl die Klimabeobachtung als auch die Wettervorhersage eine staatliche Aufgabe.

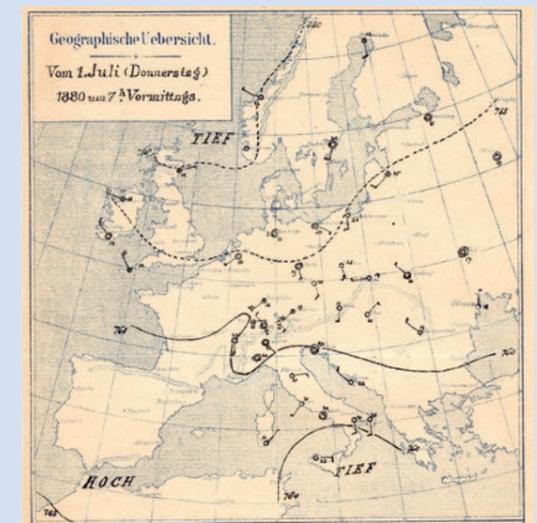


Abb. 38: Ausschnitt aus dem ersten «Wetterbericht der Schweiz. Meteorolog. Centralanstalt» vom 1. Juli 1880.

Wetterrekonstruktion

Wie können wir das Wetter des Ereignisses von 1868 rekonstruieren? Es gibt aus dieser Zeit zwar einige Wettermessungen, aber sie erlauben keine flächendeckende Interpretation. Wettertagebücher enthalten zusätzliche Informationen, so dass sich, kombiniert mit Expertenwissen, einiges über das Wetter dieser Zeit aussagen lässt. Es gibt aber auch einen quantitativen Ansatz: die numerische Wetterrekonstruktion mit der sogenannten Datenassimilation. Damit lassen sich brauchbare dreidimensionale Wetterdaten der Vergangenheit erstellen.

Reanalysen als Zeitmaschinen

Unter Datenassimilation versteht man die Kombination von Messdaten mit einem numerischen Wettervorhersagemodell. Dabei wird die Simulation so verändert, dass sie alle Messungen innerhalb ihrer Fehlerbreite (und derer des Modells) wiedergibt. Gleichzeitig behält das Modell seine Charakteristika wie die physikalische Konsistenz.⁶³

Man kann sich den Vorgang als ein stetiges leichtes Korrigieren vorstellen, wie in Abb. 39 verdeutlicht ist. Zuerst wird mit einem Modell eine Wettervorhersage über eine kurze Zeit (6 Stunden) gerechnet. Über eine so kurze Zeitspanne sind Vorhersagen meist präzise. Die Vorhersage wird nun mit den vorliegenden Messungen zu diesem Zeitpunkt abgeglichen. Dabei wird anhand der statistischen Beziehungen aller Variablen und Gitterzellen untereinander der gesamte dreidimensionale Modellzustand korrigiert. In der Fachsprache nennt sich dies Analyse; jede Wetterkarte entsteht auf diese Weise. Nun wird diese Analyse zum Ausgangspunkt für die nächste Vorhersage genommen und der Vorgang wiederholt. Wenn dieser Vorgang rückwirkend über eine lange Zeit gerechnet wird, spricht man von Reanalyse.

Reanalysedatensätze sind zu den meistverwendeten Daten in den Geowissenschaften geworden. Die meisten in diesem Heft gezeigten meteorologischen Karten stammen aus Reanalysen. Manche Reanalysen wie ERA-Interim⁶⁴ des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage liefern Daten für die Zeit ab 1979, also die Zeit, für welche auch Satellitendaten vorhanden sind.

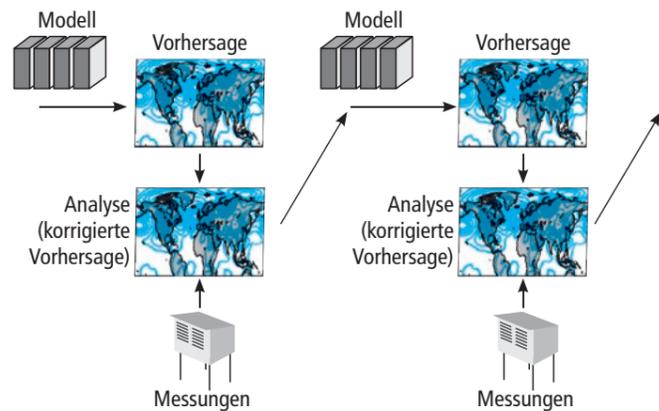


Abb. 39: Schematischer Ablauf einer Reanalyse.

Der Ansatz der Datenassimilation wurde in den letzten Jahren so weit entwickelt, dass eine brauchbare Nachbildung des dreidimensionalen Atmosphärenzustands für einen bestimmten Zeitpunkt in der Vergangenheit bereits aus wenigen Messungen möglich ist.⁶³ Verwendet werden dabei fast ausschliesslich Luftdruckmessungen. Diese erlauben es, zurück bis ins 19. Jahrhundert das Wetter zu rekonstruieren, denn seit Beginn der staatlichen Wetterdienste um die Mitte des 19. Jahrhunderts (vgl. S. 23) stehen zumindest für Europa und Nordamerika Luftdruckdaten zur Verfügung. Diese sind in zahlreichen Archiven weltweit vorhanden, allerdings oft nur auf Papier. Daher sind immer noch grosse Anstrengungen nötig, um diese Daten zu digitalisieren und nutzbar zu machen (vgl. S. 20). Ein Beispiel für eine nur auf Luftdruckmessungen gestützte Reanalyse ist die Twentieth-Century-Reanalyse (20CR), die bis 1851 zurückreicht.²⁵

Was diese Datensätze zu leisten vermögen, ist nebenstehend am Beispiel des Ereignisses von 1868 zu erkennen und wird im Folgenden

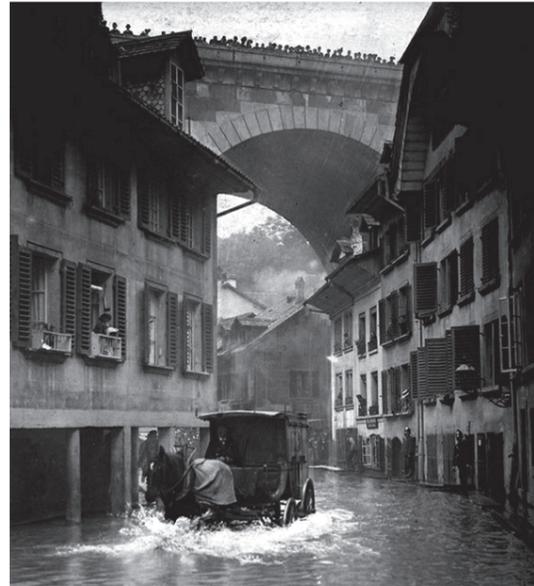


Abb. 40: Hochwasser im Mattequartier in Bern am 14. Juni 1910.

am Beispiel des Hochwassers vom 14. Juni 1910 auf der Alpennordseite (Abb. 40) erläutert. Dieses Hochwasserereignis ähnelt jenem von 2005 sehr stark (vgl. S. 8). Da solche Ereignisse selten sind, ist es wertvoll, mehrere Einzelereignisse studieren zu können.

Obschon 1910 bereits recht viel gemessen wurde, ist nur ein kleiner Teil dieser Messdaten elektronisch verfügbar und konnte für die Reanalyse verwendet werden (Abb. 41). Es wäre also noch eine weit genauere Wetterrekonstruktion möglich. Neben den meteorologischen Stationen auf dem Land zeigt die Abbildung auch Daten von Schiffen, die eine besonders wichtige Rolle spielen. Sie zeigen ausserdem

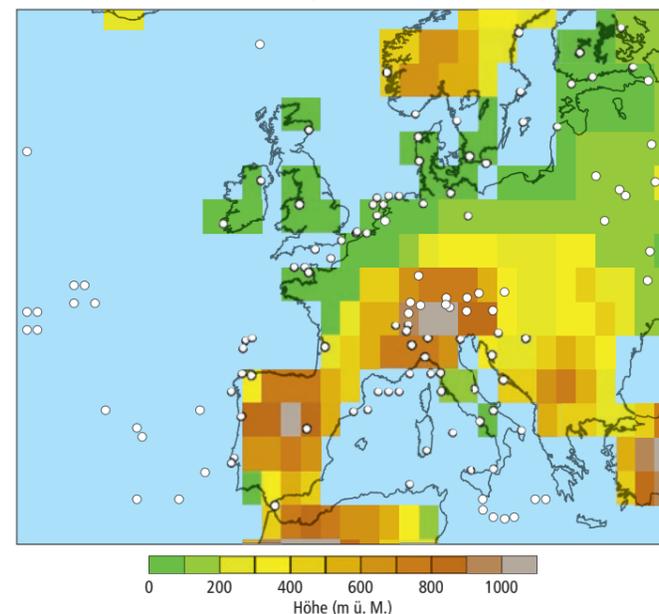


Abb. 41: Druckmessungen (weisse Punkte) für die 20CR-Reanalyse²⁵ vom 14. Juni 1910, Mittag (12 UTC) sowie Topographie der Reanalyse.

die recht grobe Topographie des Modells, was nur eine grossräumige Rekonstruktion ermöglicht (vgl. S. 26).

Die anhand dieser Daten gewonnen Wetterkarten werden in Abb. 42 (aus 20CR) und 43 (CERA-20C Reanalyse⁶⁵) gezeigt. Die Karte der 500-Hektopascal-Fläche zeigt zum Zeitpunkt des Ereignisses ein Hö-

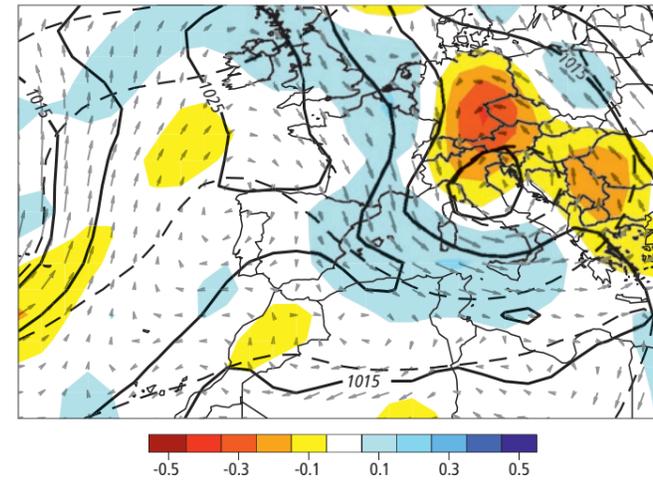


Abb. 42: Wetterkarte aus der 20CR-Reanalyse²⁵ für den 14. Juni 1910 Mittag (12 UTC): reduzierter Bodendruck (hPa; fette schwarze Linien), Windfeld auf 850 hPa (ca. 1,5 km Höhe; graue Pfeile), Druck auf 500 hPa (ca. 5 km Höhe; fette gestrichelte Linien), vertikale Bewegung der Luftmassen auf 500 hPa (negativ bedeutet Hebung).

hentief über Norditalien. Auf seiner Vorderseite zeigt der Datensatz grossräumige Hebung. Die Karte des Windes am Boden sowie der Temperatur (Abb. 43) zeigt eine Vb-Situation (vgl. S. 8), bei der feuchte Luft um die Alpen herumgeführt wird, wo sie sich dann durch die Steigung an den Alpen und das Aufgleiten auf dort liegende Kaltluft ausregnet.

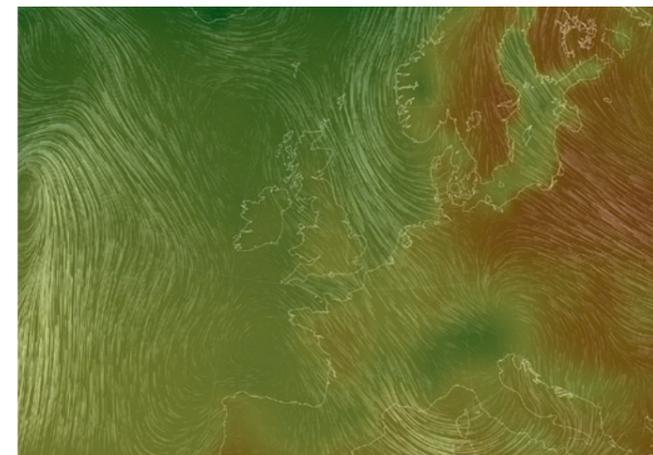


Abb. 43: Temperatur am Boden und Stromlinien des Windes am 14. Juni 1910 am Mittag (12 UTC) in der CERA-20C-Reanalyse (aus der interaktiven Visualisierung: earth.fdn-dev.iwi.unibe.ch).

Die Analyse historischer Extreme hilft bei der Beurteilung heutiger Ereignisse, denn je länger die rekonstruierten Wetterdatensätze sind, desto mehr Fälle decken sie ab. Da die Daten quantitativ und dreidimensional vorliegen, erlauben sie auch die weitere Verwendung in der Klimafolgenforschung: Sie können beispielsweise mithilfe regionaler Wettermodelle (vgl. S. 26) herunterskaliert und dann für die Modellierung von Klimafolgen verwendet werden. Allerdings ist die Qualität des Datensatzes längst nicht überall so gut wie in Mitteleuropa. Und auch hier ist insbesondere bei Trendrechnungen Vorsicht geboten.

Rekonstruiertes Wetter für 1868

Es gibt zurzeit nur einen Reanalyse-Datensatz, der das Jahr 1868 abdeckt: die Twentieth-Century-Reanalyse, abgekürzt 20CR. 20CR beruht allein auf Luftdruckmessungen (siehe Haupttext). Für 1868 sind für West- und Zentraleuropa bisher zwar nur wenige Druckmessungen verfügbar, noch weniger als für 1910 (Abb. 41), doch sie sind räumlich relativ gut verteilt (Abb. 44).

Die Wetterkarte aus 20CR für den 22. September 1868 (Abb. 44) zeigt ein grossräumiges Tiefdruckgebiet über Zentraleuropa mit einem Ausläufer über den Alpen und einer Tiefdruckrinne bis Nordafrika. Eine Besonderheit von 20CR ist, dass sie die gesamte Bandbreite an möglichen Lösungen angibt, die sich aus der Unsicherheit der Messungen, des Modells und der Verteilung der Messungen ergibt. Diese Bandbreite wird als Ensemble von 56 gleich wahrscheinlichen Varianten errechnet. Oft wird nur deren Mittelwert und Streuung dargestellt; in Abbildung 44 werden alle 56 Varianten für die 1008-Hektopascal-Isobare gezeigt. Über Mitteleuropa haben diese nur eine geringe Streuung. Der Unsicherheitsbereich ist also vergleichsweise klein, während er über Afrika oder dem Nordatlantik wegen der fehlenden Stationsdaten grösser wird.

20CR kann Wetterdaten nicht nur für Bodendruck, sondern auch für weitere Parameter und Höhenlagen liefern. Zum Beispiel zeigt die Reanalyse, dass der Wind auf etwa 1,5 Kilometern Höhe über dem Mittelmeer aus südlicher Richtung kommt und gegen die Alpensüdseite gerichtet ist. Zudem zeigt sich hier ein Trog auf etwa 5 Kilometern Höhe (500 hPa), und die Luftmassen werden stark angehoben, was zu Abkühlung und Konvektion führt. Sogar komplizierte Wettervariablen für grosse Höhen wie die Tropopause (vgl. S. 8) lassen sich aus 20CR ableiten.

Der relativ kleine Unsicherheitsbereich und die erstaunlich gute Übereinstimmung von Bodenwetterkarte und Zirkulation in der Höhe zeigen, dass 20CR in der Lage ist, die grossräumigen physikalischen Variablen für dieses Gebiet der Welt und für die Mitte des 19. Jahrhunderts konsistent und plausibel darzustellen (vgl. auch Abb. 9, 10, 12).

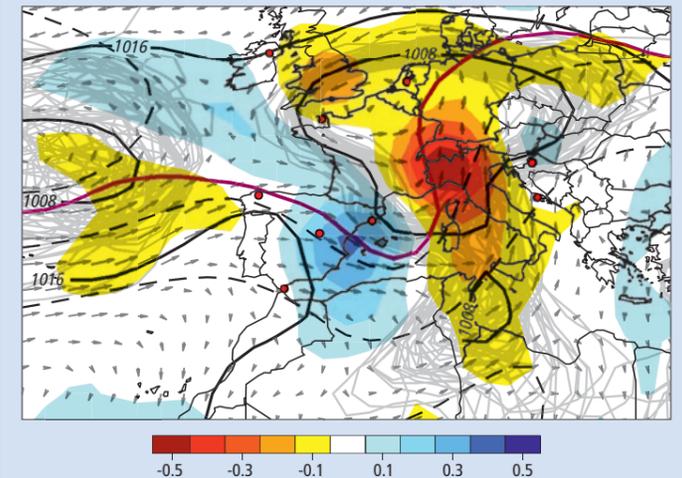


Abb. 44: Reduzierter Bodendruck (hPa; durchgezogene schwarze Linien; graue Linien für das Ensemble), Wind auf 850 hPa (1,5 km Höhe; graue Pfeile), Druck auf 500 hPa (ca. 5 km Höhe; gestrichelte schwarze Linien), vertikale Bewegung der Luftmassen auf 500 hPa (negativ bedeutet Hebung) und Tropopause (1,5 PVU; rote Linie) aus 20CR für den 22. September 1868 am Mittag (12 UTC). Die eingeflossenen Messungen sind als rote Punkte markiert.

Downscaling: Rekonstruktion des lokalen Wetters

Globale Wetterprodukte sind nicht in der Lage, wichtige Merkmale des alpinen Wetters und Klimas aufzulösen. Dies gilt insbesondere für historische Reanalyseprodukte. Verschiedene Downscaling-Techniken werden eingesetzt, um aus globalen Produkten lokal relevante Information zu gewinnen. Dynamische Methoden verwenden dazu numerische Wettervorhersagemodelle, während statistische Methoden auf Informationen lokaler Messungen beruhen.

Dynamisches Herunterskalieren

Es ist bemerkenswert, dass eine globale Reanalyse die Wettersituation für das Hochwasserereignis von 1868 realistisch darstellt. Die Reanalyse-Daten haben jedoch nur einen Wert alle 200 Kilometer, und die Alpen werden als ein einziger grosser, sanfter Hügel dargestellt (Abb. 41). Wichtige Wetterphänomene wie Fronten, Gewitter, Konvektion oder die Windkanalisierung in den Alpentälern sind kleinskaliger und können durch die Reanalyse nicht rekonstruiert werden.

Das dynamische Downscaling basiert auf regionalen Wettermodellen wie dem WRF-Modell.⁶⁶ Zur Simulation braucht es Startbedingungen sowie für jeden Zeitschritt Randbedingungen. Zur Vorhersage des Wetters wird dazu eine Analyse (vgl. S. 24) sowie eine globale Wettervorhersage verwendet. Um ein historisches Ereignis herunterzukalieren, wird das WRF-Modell mit einer Reanalyse gestartet und an den Rändern angetrieben. Zuerst wird das WRF-Modell für einen Ausschnitt über dem Raum Nordatlantik/Europa gerechnet. Dann wird diese Simulation selbst als Randbedingung für eine weitere Verfeinerung genommen. Abbildung 45 zeigt am Beispiel des Ereignisses von 2005, wie in vier Verfeinerungsschritten eine hohe Auflösung erreicht werden kann.

Wenn aus Beobachtungen bekannt ist, dass Gewitter wesentlich zum Niederschlag eines historischen Ereignisses beigetragen haben, muss die höchste Auflösung genügend fein sein, um Gewitter darzustellen zu können; sie darf nicht gröber sein als einige Kilometer.⁶⁷ Ausgehend von der Reanalyse mit Auflösung von 200 Kilometer können wir also Simulationen mit 81, 27, 9 und schliesslich 3 Kilometer erstellen. Die einzigen Zusatzinformationen sind Landbedeckung und Topographie – trotzdem sind Ergebnisse durch die Verfeinerung viel besser als in der ursprünglichen Reanalyse (Abb. 45, unten rechts).

Dynamisches Downscaling ermöglicht die Rekonstruktion des lokalen Wetters historischer Ereignisse mit einer Auflösung, die mit den besten modernen Wettervorhersagen vergleichbar ist. Die hohe Auflösung der Topographie erlaubt es beispielsweise zu untersuchen, wie die Luftmassen in die wichtigsten Alpentäler eindringen (Abb. 46).

Natürlich sind die Ergebnisse für ein historisches Ereignis weniger zuverlässig als für ein aktuelles Ereignis. Dies liegt vor allem an den spärlichen Beobachtungen. Das dynamische Downscaling zeigt, wie das lokale Wetter während eines historischen Ereignisses ausgesehen haben könnte. Für jeden Fall ermöglicht das dynamische Downscaling vierdimensionale Untersuchungen von lokalen meteorologischen Phänomenen, die zum extremen Wetter beigetragen haben. Historische Wetterereignisse können so mit modernen verglichen werden.

Statistisches Herunterskalieren

Neben der aufwändigen numerischen Simulation gibt es auch statistische Ansätze. Einer der sehr einfachen ist das Analogverfahren. Die verfügbare Information eines Tages in der Vergangenheit wird mit derselben Information aller Tage in einer modernen Zeitperiode verglichen, für welche tägliche, hochaufgelöste Felder vorliegen. Der ähnlichste Tag – gemessen anhand ausgewählter Kriterien – wird als Rekonstruktion für den Tag in der Vergangenheit genommen. Wenn eine ausreichende Menge an möglichen Analogfällen zur Verfügung steht, liefert diese Rekonstruktion gute Resultate. Allerdings sind verschiedene Optimierungsschritte nötig. Je nach Verfahren können die erhaltenen Felder auch noch anhand der Messungen korrigiert werden.

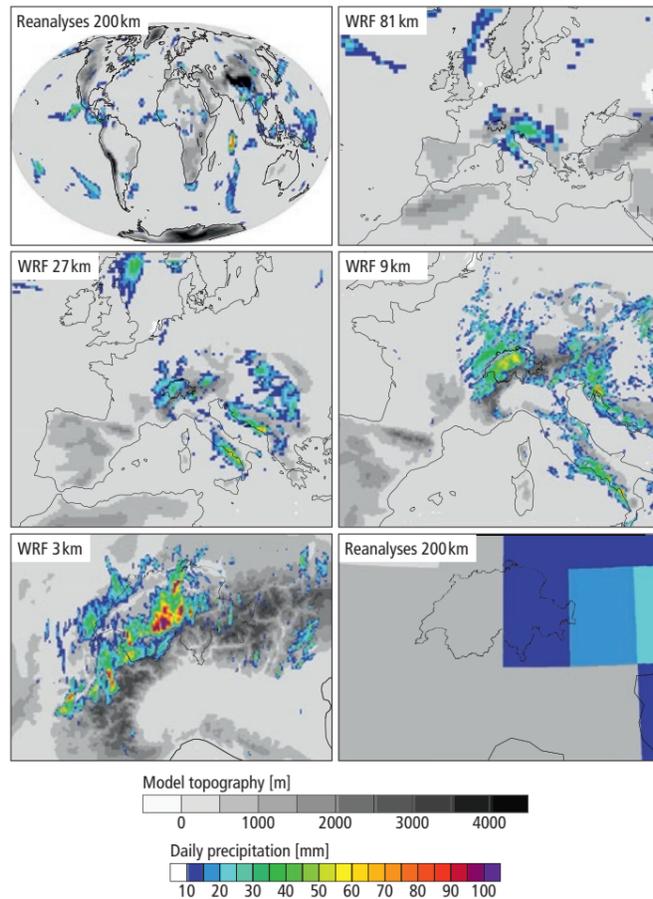


Abb. 45: Dynamisches Downscaling. Von der 20CR-Reanalyse werden WRF-Simulationen mit 81, 27, 9 und 3 km Rastergrösse durchgeführt. Dargestellt ist der simulierte Tagesniederschlag vom 22. August 2005. Als Vergleich zeigt das untere rechte Feld die 20CR-Daten im selben Ausschnitt.

MeteoSchweiz hat anhand der Wetterstationsdaten tägliche Felder der Temperatur und des Niederschlags in einem Gitter von 2 Kilometer ab 1960 erstellt.^{68,69} Das sind über 20000 Tage. Dank dieser grossen Zahl möglicher Analogfälle liefert die Methode für geringe bis durchschnittliche Niederschläge sehr gute Ergebnisse. Bei Extremniederschlägen unterschätzt sie jedoch die Menge, weil Extremereignisse selten sind und Analogfälle dazu oft schwächer. Ausserdem sind die Resultate in Regionen mit geringer Datenabdeckung weniger präzise.

Herunterskalieren des Niederschlagsereignisses von 1868

Dynamisches Downscaling

Das Ereignis von 1868 wurde sowohl dynamisch als auch statistisch herunterskaliert. Das dynamische Downscaling beruht auf dem WRF-Modell. Die Ausschnitte sind mit denen von Abbildung 45 vergleichbar, jedoch für den Zeitraum vom 26. September bis 4. Oktober 1868. Die endgültige Auflösung beträgt in diesem Fall 2 Kilometer.³² Während der 9 Tage produziert das Modell nahezu ununterbrochene, ausgedehnte und intensive Niederschläge über dem Tessin, die durch den anhaltenden Feuchtigkeitstransport von Südwesten, orographische Hebung und die Entwicklung von Gewittern erklärt werden können. Im Modell wie in den historischen Beobachtungen gab es am 29. und 30. September 1868 nur eine kurze Unterbrechung der Starkniederschläge.

In der hochauflösenden Simulation entwickeln sich über der Poebene Gewitter und breiten sich im Tessin aus. Abbildungen 46 und 47 zeigen eine solche Momentaufnahme. In den höheren Schichten strömt feuchte Luft von Süden über die Alpen (mit verbreiteter Bewölkung, vgl. Abb. 47, unten links). In Bodennähe strömt feuchte Luft aus Südosten über die Poebene. Wo diese im Tessin auf die ersten Voralpen trifft, wird sie angehoben, es bilden sich niedrige Wolken (oben links). Dadurch werden hochreichende konvektive Zellen initiiert, aus denen organisierte Gewitter entstehen (oben rechts). Die Gewitter ziehen mit der mittleren Strömung nach Norden, und der Niederschlag erreicht das südliche Tessin (unten rechts). In den folgenden Stunden dringt die instabile Strömung weiter in die Alpentäler vor (siehe Abb. 46), und die starken Niederschläge erreichen auch das nördliche Tessin. Die Entwicklung der Gewitter ähnelt in bemerkenswerter Weise den jüngeren Starkregenereignissen in der Region Lago Maggiore.³⁴ Das durch Downscaling reproduzierte lokale Wetter ist daher plausibel.

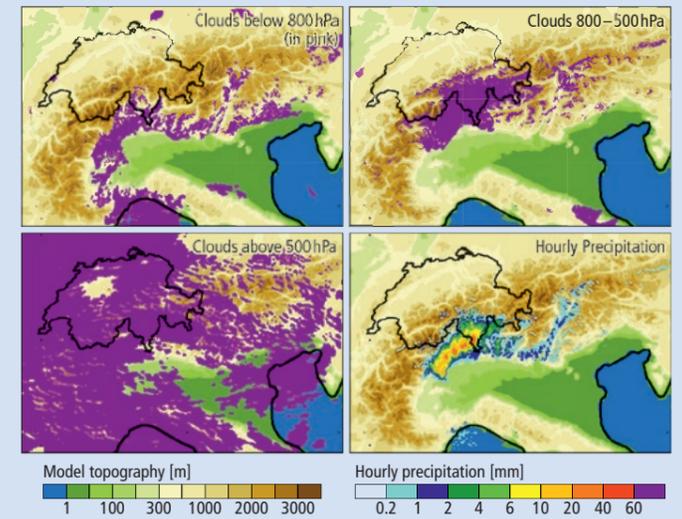


Abb. 47: Wolkendecke und stündliche Niederschlagssumme (unten rechts) im WRF-Modell (2-km-Gitter) für den 27. September 1868 in der Nacht (3 UTC). Die Wolkendecke (violett) zeigt niedrige (oben links), mittlere (oben rechts) und hohe Wolken (unten links).

Statistisches Downscaling

Die statistische Herunterskalierung des Niederschlags für das Ereignis von 1868 wurde mit einer für extreme Niederschläge optimierten Analogmethode gemacht (vgl. links). Da Lugano¹ die einzige Station in der betroffenen Region ist, sind die Ergebnisse im südlichen Tessin am zuverlässigsten, während sie im nördlichen Teil mehr Unsicherheit aufweisen. Die über 5 Tage summierten Niederschlagsfelder über dem Tessin für den Zeitraum vom 26. bis 30. September und vom 1. bis 5. Oktober sind in Abbildung 48 dargestellt.

Die Niederschlagsmengen über das Gesamt ereignis sind in der statistischen und der dynamischen Methode fast identisch. Die erste Episode ist in der dynamischen Methode stärker ausgeprägt, die zweite in der statistischen. Auch Einzeltage sehen sehr ähnlich aus, obwohl die beiden Methoden völlig unterschiedlich sind.

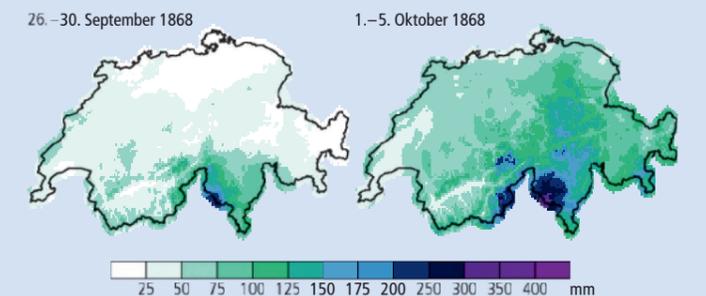


Abb. 48: Niederschlagsfelder für das Tessin für die 5-Tages-Perioden 26.–30. September und 1.–5. Oktober aus der Analogmethode auf einem 2-km-Raster.

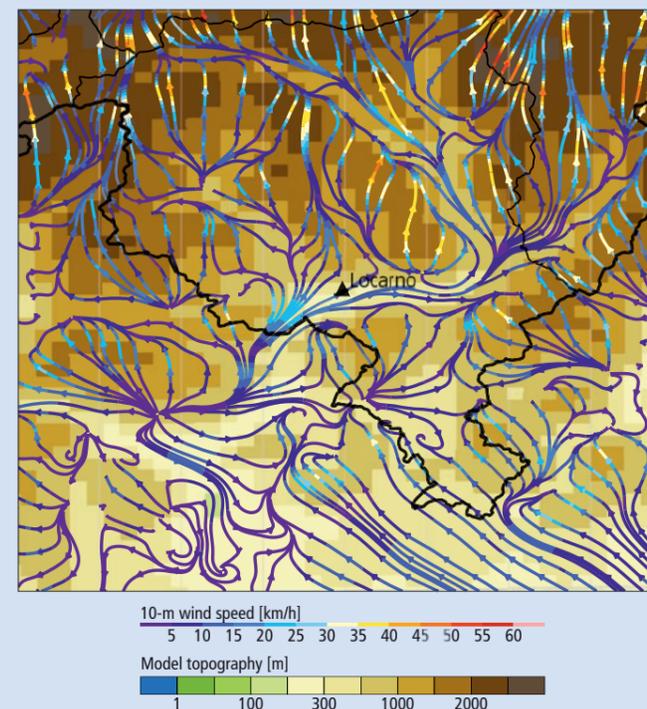


Abb. 46: Der Wind in 10m Höhe über dem Tessin am Sonntag, 27. September 1868 am Mittag (12 UTC), rekonstruiert durch das WRF-Modell mit einer Rasterweite von 2 km. Die Topographie des Modells wird durch die Farbe, der Wind durch Pfeile dargestellt (Pfeilfarben stellen die Windgeschwindigkeit dar).³²

Hydrologische Modellierung

Wann immer für die Beurteilung eines Hochwassers Beobachtungen nicht oder nicht ausreichend vorhanden sind, Prognosen oder Rekonstruktionen benötigt werden oder das Systemverständnis verbessert werden soll, kommen hydrologische Modelle zum Einsatz. Diese Modelle beschreiben die Prozesse des hydrologischen Kreislaufs aus Niederschlag, Wasserspeicherung, Abfluss und Verdunstung im Gesamten oder auch nur Teile davon. Besonders wichtig ist dabei die Wirkungskette Niederschlag-Abfluss. Die Hydrologie kennt dabei eine Vielzahl an Modellen unterschiedlicher Komplexität, die je nach Fragestellung, Datenverfügbarkeit und vorhandenen Computerressourcen angewendet werden.

Man unterscheidet deterministische von stochastischen Modellen, wobei erstere absolute Werte (z. B. Abflussmenge) berechnen und letztere Wahrscheinlichkeitsangaben generieren. Bei den deterministischen Modellen wird je nach Detaillierungsgrad ihrer Prozessbeschreibungen zwischen drei Untertypen unterschieden⁷⁰ (Abb. 49): Sogenannte Black-Box-Modelle bilden beispielsweise nur den Zusammenhang zwischen Niederschlag und Abfluss ab, ohne auf die abflussbildenden Faktoren im Einzelnen einzugehen. Sie bedienen sich dabei also vor allem empirisch gefundener Zusammenhänge. Grey-Box-Modelle hingegen beschreiben einen Teil der Prozesse des Wasserkreislaufs auf physikalischer Basis, wenn auch häufig in vereinfachter Weise, und greifen teilweise auch auf empirisch gefundene Zusammenhänge zurück. White-Box-Modelle schliesslich bilden alle Prozesse mittels fundamentaler physikalischer Gesetze ab. Sie stellen somit die komplexesten Modelle dar.

Mit ihrer Komplexität steigen auch die Anforderungen der Modelle an die Datengrundlage. Während einfache Niederschlags-Abfluss-Modelle (Black Box) ihrem Namen entsprechend nur Niederschlags- und Abflussdaten benötigen, ist der Datenbedarf bei komplexeren Modellen weit grösser: Benötigt werden meteorologische Grössen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung, Bodenparameter wie Gründigkeit, Korngrösse und Lagerungsdichte, Landnutzungsparameter wie Vegetationsart, -höhe, Wurzeltiefe und Blattflächenindex. Daher ist bei der Auswahl der Modelle immer die vorhandene Datengrundlage im Auge zu behalten. Um es überspitzt zu formulieren: Es macht wenig Sinn, die Karosserie eines Ferraris (komplexes Modell) mit dem Motor eines Rasenmähers (wenig Daten) zu betreiben. Mit diesen Unterschieden in der Datenanforderung geht die räumliche Auflösung einher. Einfache Black-Box-Modelle basieren auf räumlichen Gebietsmittelwerten, White-Box-Modelle verwenden räumlich differenzierte Rasterzellen oder finite Elemente, welche die räumliche Variabilität in einem Einzugsgebiet erfassen.

Modelle zur Rekonstruktion historischer Hochwasser

Für die Rekonstruktion von Hochwasserereignissen ergeben sich dafür folgende Empfehlungen: a) bei der Analyse extremer Hochwasserereignisse sind komplexere Modelle vorzuziehen. Black-Box-Modelle sind ungeeignet, da sie nicht in der Lage sind, die aussergewöhnlichen

Prozesse zu erfassen; b) die Datengrundlage bei Rekonstruktionen ist üblicherweise limitiert; sehr datenintensive Modelltypen schliessen sich daher aus; folglich eignen sich vor allem Modelle, die zwar weniger datenintensiv, aber gleichwohl vorwiegend physikalisch basierte Algorithmen verwenden.

Die notwendige Kalibration eines hydrologischen Modells erfolgt in Zeitperioden, die über eine gute Datenlage verfügen. Dabei sollte sich jedoch die strukturelle Qualität der Eingangsdaten nicht wesentlich von der des Rekonstruktionszeitraumes unterscheiden: Soll beispielsweise bei der Rekonstruktion mit dynamisch herunterskalierten Klimamodelldaten gearbeitet werden (vgl. S. 26), so müssen auch die während der Kalibration verwendeten meteorologischen Daten diesem Ansatz entstammen – selbst wenn für den Kalibrationszeitraum eigentlich Stationsbeobachtungen vorlägen. Wichtig für den Erfolg der Rekonstruktion ist allerdings, ob das hydrologische Modell auch unter den extremen Bedingungen eines Hochwassers vertrauenswürdige Ergebnisse liefert. Dies kann mit Messdaten, aber auch qualitativen Beobachtungen überprüft werden. Spannend wird es auch, wenn das Modell die Beobachtungen nicht abzubilden vermag. Denn mittels Was-wäre-wenn-Szenarien können die Eingangsdaten, die Vorgeschichte oder die Prozessabläufe im Modell künstlich so verändert werden, dass sich das Hochwasser rekonstruieren lässt. Die notwendigen Änderungen können dann Aufschluss über das wirkliche Prozessgeschehen während des Hochwasserereignisses geben.

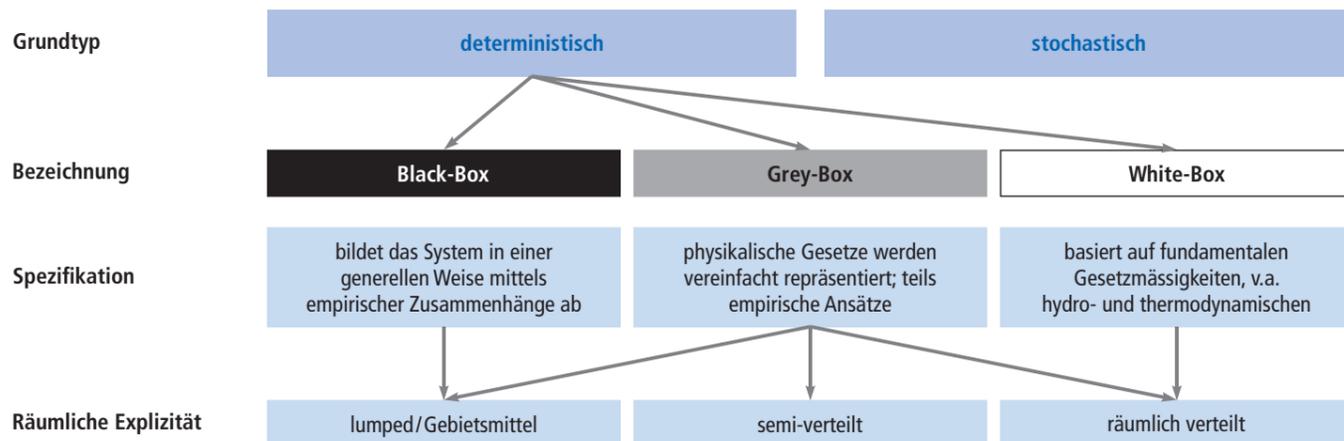


Abb. 49: Zusammenfassung der verschiedenen Modelltypen in der Hydrologie. Für die Rekonstruktion von Hochwasserereignissen sind Grey-Box Modelle zumeist die richtige Wahl.⁷⁰

Hydrologische Modellierung des Hochwassers von 1868

Nachdem wir das grossräumige wie auch das lokale Wetter des 1868er Ereignisses rekonstruiert haben, stellt sich die Frage, ob wir auch in der Lage sind, Abfluss und Seespiegel zu simulieren. Für die hydrologische Modellierung des Hochwassers von 1868 kam das Grey-Box-Modell PREVAH zum Einsatz. Das gesamte Einzugsgebiet des Lago Maggiore (6368 km²) wurde in 37 Teileinzugsgebiete unterteilt, die sich aus insgesamt 735 sogenannten «hydrological response units» (HRUs) zusammensetzen. HRUs sind Flächen, die sich hydrologisch sehr ähnlich verhalten und für die daher eine gemeinsame standörtliche Simulation durchgeführt wird. Das verwendete Modell wurde ursprünglich zur Kurzfristvorhersage auf Stundenbasis im Lago-Maggiore-Einzugsgebiet entwickelt.⁶² Das heutige komplexe Abflussverhalten mit zahlreichen anthropogenen Einflüssen (Wasserkraft) wurde in dieser Modellversion mit dem speziellen Routing-Modell RSMInerve realisiert. Zur Zeit des Hochwassers von 1868 gab es diese Eingriffe nicht, weswegen für die Hochwassersimulation kein Routing-Modell verwendet wurde.

Da für die Rekonstruktion nur Temperatur- und Niederschlagsdaten in täglicher – diese allerdings in einer hohen räumlichen Auflösung – vorlagen, wurde das Modell entsprechend angepasst. Mit diesem vereinfachten Modell wurde der Abfluss für die Zeitperiode 1961–2010 simuliert und mit Messdaten verglichen. Es konnte nur eine geringe Abweichung gegenüber dem ursprünglichen Modell festgestellt werden. Schliesslich wurde noch eine Seespiegel-Abfluss-Beziehung erarbeitet, die anhand der Abflussmessstation unterhalb des Lago Maggiore validiert wurde. Die Beziehung ist notwendig, um den Seespiegelstand korrekt simulieren zu können. Sie beschreibt, wie viel Wasser bei welchem Seespiegelstand abfließt. Mit ihr können allerdings nur die mehrwöchigen Mittelwerte gut erfasst werden. Grund dafür ist die starke Regulierung des Sees, die darauf abzielt, während des Winters ausreichend Bewässerungswasser für die Poebene zurückzuhalten. Die genaue Regulierung ist allerdings unbekannt, weswegen auf kurzfristiger Basis keine hohe Modellgüte erreicht werden konnte.

Abbildung 50 zeigt die Rekonstruktion des Seespiegels für das Hochwasser von 1868 unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Klimarekonstruktionsansätzen (analog: orange, WRF: hellblau, vgl. S. 26) sowie die gemessene Seespiegellinie (dunkelblau). Erkennbar sind die zwei starken Niederschlagsereignisse, die zu einem deutlichen Anstieg des Seespiegels in zwei Etappen führten. Interessanterweise sind beide Niederschlagsrekonstruktionen in der Summe praktisch identisch (278 bzw. 279 mm), doch sehr unterschiedlich in ihrem zeitlichen Verlauf. Beide Rekonstruktionen führen allerdings in der hydrologischen Simulation zu einem deutlichen Unterschätzen des Seespiegels. Verschiedene Was-wäre-wenn-Szenarien wurden durchgespielt, unter anderem eine eher unwahrscheinliche Verklausung am Ausfluss

des Sees. Der wahrscheinlichste Grund für die starke Unterschätzung stellt eine veränderte Seespiegel-Abfluss-Beziehung dar, die durch eine während des Hochwassers von 1868 vorgefallene Erosion der Seeschwelle zustande gekommen ist.⁴⁰

Ein Szenario, das den gegenüber heute stark ausgedünnten Waldbestand von 1868 aufgreift (minus 50 Prozent)³⁹ und mit dem WRF-Klimadaten gerechnet wurden, zeigt einen kaum wahrnehmbaren Unterschied im Seespiegel. Grund dafür ist, dass die Böden ohnehin schon gesättigt waren und der Kronenspeicher der Bäume (5–8 mm) im Gegensatz zum gefallenem Niederschlag (280 mm) minimal ist.

Das Abholzungsparadigma

Der Zusammenhang von Abholzungen im Gebirge und Überschwemmungen in den Tälern wurde schon im 16. Jahrhundert gelegentlich erkannt, als die Hochblüte des Bergbaus in den Ostalpen und in den deutschen Mittelgebirgen zu einer massiven Abholzung geführt hatte. Im 18. Jahrhundert interessierte sich die aufkommende Forstwirtschaft vermehrt für eine nachhaltige Waldnutzung. Am Ende des Jahrhunderts waren es daher französische Forstingenieure, die einen Zusammenhang zwischen Rodungen und Hochwassern in den Pyrenäen herstellten. Alexandre Moreau de Jonnès betonte schliesslich 1825, dass die Abholzung die Bodenerwärmung und -austrocknung fördere und somit auch die Erosion:⁷¹ «Sobald einmal die Bäume den Boden den Einflüssen der Atmosphäre nicht mehr verschliessen und die Wechselwirkung zwischen beiden nicht mehr hemmen, so steigt die Wärme durch die Strahlenbrechung der Flächen, durch die Wärmeaufnahmefähigkeit ihrer mineralischen Bestandteile, (...) und endlich dadurch, dass die Ausdunstung der Waldungen gänzlich mangelt; durch alles dieses bleibt eine grosse Menge Wärmestoffs, statt gebunden zu werden, frei in der Atmosphäre.»

Der zunächst nur in Frankreich verbreitete Diskurs wurde durch die Übersetzung der Studie ins Deutsche auch in Mitteleuropa populär und vom 1843 gegründeten Schweizerischen Forstverein aufgegriffen. Da der Zustand der Schweizer Gebirgswalden durch jahrhundertelange Abholzung und Nutzungskonflikte mit der bäuerlichen Bevölkerung damals erbärmlich war, lag die Verbindung mit Überschwemmungen wie 1834, 1852 oder 1868 für die Forstingenieure auf der Hand. Die führenden Köpfe des Forstvereins, insbesondere Karl Kasthofer (1777–1853) und Elias Landolt (1821–1896), versuchten in dieser Frage die Öffentlichkeit und die Politik zu mobilisieren, was endgültig erst nach den Überschwemmungen von 1868 gelang.⁷

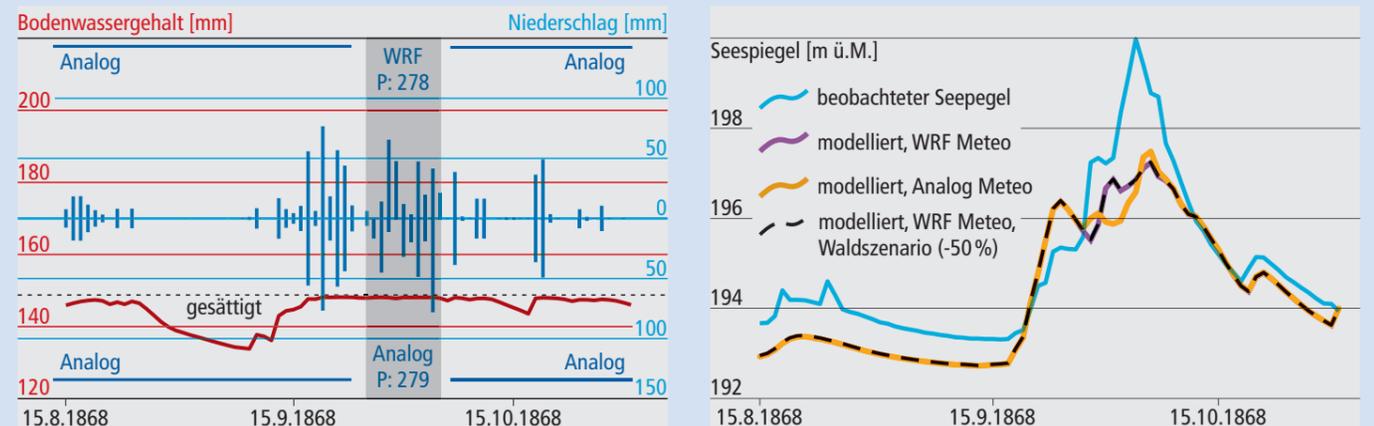


Abb. 50: Rekonstruktion von Niederschlag und Bodensättigung (jeweils Gebietsmittelwerte, links) sowie Seespiegel rechts. Nach oben weisende Balken zeigen die Niederschläge der WRF-Simulationen (dunkelgrau hinterlegt), nach unten weisende Balken und Balken ausserhalb der dunkelgrauen Fläche stammen aus der Analogmethode (vgl. S. 27).

Rekonstruktion historischer Hochwasser mit hydrologischen und hydraulischen Modellen

Ein hoher Abfluss muss nicht immer über die Ufer treten. Ob Überschwemmungen auftreten, kann durch eine hydrologisch-hydraulische Simulation ermittelt werden. Entscheidend dabei ist die genaue Abbildung des Gerinnebettes und der angrenzenden Uferzonen. Bei einer Hochwasserrekonstruktion muss daher auch die ursprüngliche Geländeform exakt rekonstruiert werden.

Rekonstruktion von historischen Extremereignissen

Die Rekonstruktion von historischen Hochwasserereignissen kann die Aufzeichnungen in den instrumentellen Messperioden ergänzen und deshalb wichtige Grundlagen für die Abschätzung von Extremereignissen liefern. Extremereignisse sind eine wichtige Eingangsgröße bei der Dimensionierung und Planung von Schutzbauten^{72,73} sowie für die Raumplanung. Einerseits erlauben die Extremereignisse das Studium der Prozesse, die zu Katastrophen führen können. Andererseits verringern gut dokumentierte Hochwasserereignisse die Unsicherheiten in der Beurteilung von Gefahren und Risiken.

Frühere Hochwasserereignisse hinterlassen Spuren, die entweder im Gelände als Erosionskanten und Sedimentablagerungen^{74,75} sichtbar sind, in Jahrringen von Bäumen,⁷⁶ in historischen Dokumenten (vgl. S. 18) oder als Hochwassermarken an Gebäuden.⁷⁷ Anhand dieser Quellen können frühere Hochwasserereignisse rekonstruiert werden. Diese Rekonstruktionen stellen ein grosses Potenzial dar für die Analyse der Variabilität des regionalen Klimas und für die Erweiterung von Daten aus der instrumentellen Messperiode. Entsprechend beschäftigen sich viele Forschungsgruppen mit der Rekonstruktion von früheren Hochwasserereignissen, mit sehr unterschiedlichen Methoden und Daten.^{78–81}

Historische Hochwasserereignisse sind in der Schweiz vergleichsweise gut dokumentiert, neben Dokumenten und Hochwassermarken gab es bereits früh Vermessungen und gute kartographische Quellen.⁸² Im Zuge der grossen Flusskorrekturen wurden erstaunlich exakte Aufzeichnungen wie Vermessungspläne, topographische Karten und Flussquerprofilaufnahmen erstellt und Wasserstandsmessungen durchgeführt (vgl. S. 20). Im Vergleich zu anderen Regionen erlaubt diese Fülle an historischen Daten eine recht detaillierte Analyse historischer Ereignisse.⁸³

Bei der Übertragung der rekonstruierten historischen Abflüsse, Wasserstände und Überflutungsflächen auf die heutige Situation und Landschaft ist aber mit Bedacht vorzugehen. Neben klimatischen Schwankungen hat der Mensch mit Landnutzungsänderungen in den Einzugsgebieten⁸⁴ oder direkt schon sehr früh in das Gewässersystem eingegriffen: Flussumleitungen, Flusskorrekturen, Staudämme und Hochwasserschutzprojekte haben unmittelbare Auswirkungen auf die hydrologische Situation im gesamten Gewässersystem und vor allem auf die lokale Gefährdungssituation. Typische Beispiele für eine veränderte Situation sind Sohleneintiefungen oder -auflandungen sowie seitliche Dämme, die den Flussquerschnitt und damit die Pegel-Abfluss-Beziehung relevant verändern.⁸⁵ Hochwasserschutzbauten im Oberlauf können die Hochwasserspitzen im Unterlauf erhöhen.⁸⁶ Bevor eine Hochwassermarken in weiterführenden statistischen Analysen und Gefahrenbeurteilungen berücksichtigt werden kann, muss deshalb die hydraulische Situation zu dieser Zeit rekonstruiert werden.⁸⁷ Insbesondere wenn der Einfluss des Klimawandels auf die Frequenz und Magnitude von Hochwasserereignissen über längere Perioden analysiert werden soll, ist die Änderung der hydraulischen Situation unbedingt zu berücksichtigen.⁸⁸

Aufzeigen der Veränderungen über die Zeit

In derzeit laufenden Arbeiten am Geographischen Institut der Universität Bern wurden die in den historischen Archiven vorhandenen Vermessungen und Lagepläne aus dem frühen 19. Jahrhundert digi-

talisiert und georeferenziert. Diese Grundlagen in Kombination mit den neu verfügbaren, hochauflösenden digitalen Geländemodellen, in denen die Spuren früherer Hochwasserprozesse sichtbar gemacht werden können, erlauben eine detaillierte Rekonstruktion der historischen Geländeoberfläche. Diese wird in Form eines digitalen Geländemodells dargestellt und kann für hydraulische Simulationen verwendet werden. Mit den heute verfügbaren Simulationsmodellen, welche die Flachwassergleichungen zweidimensional auflösen, lassen sich aus Hochwassermarken robuste Angaben zu den entsprechenden Hochwasserabflüssen ableiten. Mit dieser Simulation können die historischen, meist qualitativen Quellen plausibilisiert, quantifiziert und interpretiert werden. Ein weiterer Vorteil der Rekonstruktion von früheren Geländeoberflächen ist, dass sie einen Vergleich mit der heutigen Situation ermöglichen. Dieser Vergleich erlaubt es, den Einfluss der veränderten Flussmorphologie von anderen den Abfluss beeinflussenden Faktoren zu isolieren und den Einzeleffekt zu analysieren⁸⁹ (www.risikodynamik.ch).

Für das Risikomanagement allgemein, also die integrale Betrachtung aller Massnahmen zur Vermeidung und Reduktion von Hochwasserrisiken, haben rekonstruierte Hochwasserereignisse noch einen weiteren Vorteil: Vor allem bei Vorhandensein von historischen Dokumenten und Bildern kann die Hochwassergefährdung lokal eindrücklich beschrieben werden. Dies erleichtert eine Sensibilisierung der Bevölkerung (www.ueberschwemmungsgedaechtnis.ch).



Abb. 51: Blick auf den Fluss bei Giubiasco¹ und auf die Magadinoebene. Fotografie aus den 1880er Jahren. Die Korrekturarbeiten wurden bereits in Angriff genommen, aber der ursprüngliche Lauf ist noch sichtbar.

Das Hochwasserereignis vom Oktober 1868 im hydraulischen Modellexperiment

Basierend auf Vorarbeiten⁶² wurden in einem Modellexperiment die mit dem hydrologischen Modell (vgl. S. 28) rekonstruierten Seepegel im Bereich des oberen Lago Maggiore und Hochwasserabflüsse in der Magadinoebene in einem hydraulischen Modell verwendet, um den Unterschied in den überfluteten Flächen zu simulieren. Das hydraulische Modell umfasst die digitalen Geländemodelle zu einem natürlichen Zustand (um 1864) und zum heutigen Zustand (um 2003). Neben dem simulierten Seepegel wurde auch der beobachtete Seepegel verwendet.

Das Modellexperiment zeigt, dass der damals beobachtete Seehöchststand mit der heutigen Pegel-Abfluss-Beziehung am Seeausfluss des Lago Maggiore nicht mehr erreicht werden kann. Während des damaligen Ereignisses hat sich die Flusssohle beim Seeausfluss deutlich eingetieft, wodurch sich der Abfluss stark erhöhte.⁴⁰ Dies führt heute dazu, dass der See nicht mehr so stark gestaut werden kann wie damals. Das Modellexperiment zeigt ausserdem, dass die Flusskorrekturen in der Magadinoebene die überfluteten Flächen stark reduziert haben. Das Beispiel demonstriert eindrücklich, wie unterschiedlich die Auswirkungen desselben Abflussereignisses sein können und dass die Veränderungen in der Flussmorphologie bei der Interpretation von historischen Quellen zu berücksichtigen sind.

Auswirkungen des Hochwassers 1868 früher und heute

Seit 1868 haben sich nicht nur der Flusslauf und der Seeausfluss verändert, sondern auch der Siedlungsbestand. Unterhalb von Bellinzona und in Ufernähe des Lago Maggiore auf Schweizer Seite standen im Oktober 1868 in der rekonstruierten Überflutungsfläche des gemessenen Seepegels und des simulierten Hochwasserabflusses 436 Gebäude. Betrachtet man den Gebäudebestand von 2016, würde dieselbe überflutete Fläche (historisches Geländemodell) 3934 Gebäude in Mitleidenschaft ziehen. Das bedeutet, dass der exponierte Siedlungsbestand um den Faktor 9 zugenommen hat. Berücksichtigt man hingegen den heutigen Flusslauf (heutiges Geländemodell, simulierter Seepegel und simulierter Abfluss in Bellinzona¹), sind 944 Gebäude betroffen. Dies bedeutet, dass der Hochwasserschutz und die Vergrösserung des Seeauslasses durch die Sohlenerosion während des Ereignisses von 1868 eine positive Wirkung nach sich gezogen haben. 2990 Gebäude profitieren heute von diesen geplanten und ungeplanten Veränderungen im Gewässersystem. Rekonstruktionen früherer Hochwasserereignisse können somit eine wichtige Grundlage für die Abschätzung von Hochwasserhäufigkeit und -magnitude darstellen. Sie können ausserdem eine Basis für die Analyse der räumlichen und zeitlichen Dynamik in der Entwicklung des Hochwasserrisikos liefern.

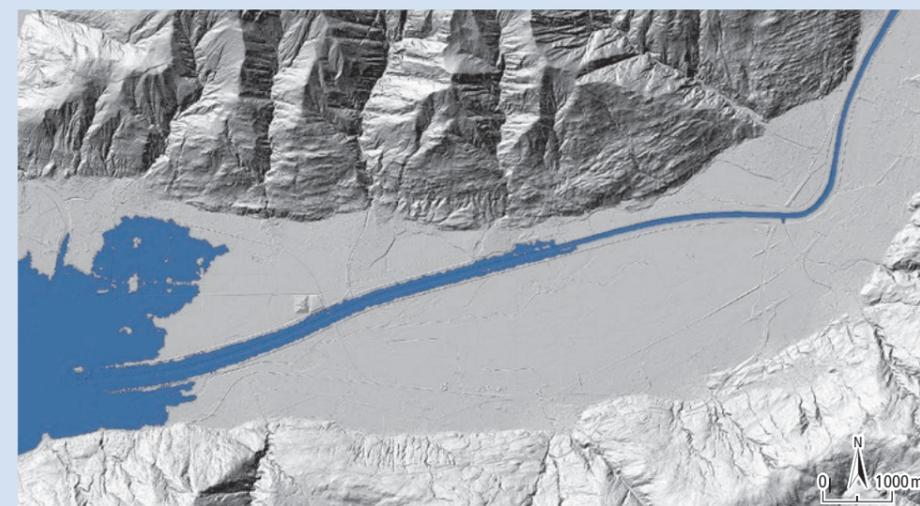
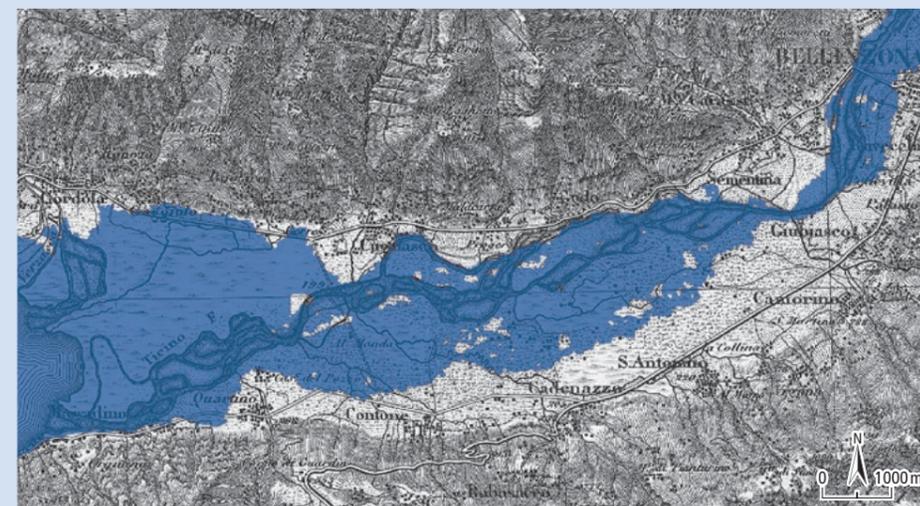


Abb. 52: Vergleich der Überflutungsflächen des rekonstruierten Hochwasserereignisses 1868 (oben) und die simulierten Auswirkungen des selben Ereignisses auf die heutige Situation (unten).

Wildbach und Hochwasser: Spurensuche im Gelände

Grosse Hochwasserereignisse führen nicht nur zu Überschwemmungen. Sie werden begleitet von Rutschungen, Murgängen (in den kleineren und steilen Einzugsgebieten) sowie von Veränderungen entlang der Flussverläufe durch Abtrag der Ufer und Ablagerung von mitgeführten Sedimenten. Die Erosion und die Ablagerungen der mitgeführten Feststoffe verändern die uns bekannte Landschaft und verursachen grosse Schäden an Gebäuden, Infrastruktur und in der Landwirtschaft. Die Hochwasserereignisse im August 2005 oder die Murgänge im Lötschental¹ im Oktober 2011 haben dies deutlich aufgezeigt.

Prozesse

Bäche und Flüsse transportieren bei Hochwasser Geröll, Kies, Sand und Schlamm und oft auch Holz. Das Material gelangt durch Rutschungen, Murgänge, Uferabbrüche oder durch die Gerinneerosion in die Fließgewässer und lagert sich in den flacheren und breiteren Flussläufen wieder ab. Während bei Überflutungen das Wasser nach einer gewissen Zeit wieder abfließt, bleiben die Sedimente zurück, entweder in Form von Kiesbänken oder als Schutttablagerungen auf Feldern oder in Siedlungen. In den grossen Ebenen haben früher die Flüsse bei Hochwasser in Folge solcher Ablagerungen oft die Richtung gewechselt und ein neues Bett erodiert. Heute ist dies mit den kanalisierten Flussläufen kaum mehr möglich; erkennbar sind die alten Formen im Gelände aber immer noch (Abb. 53).



Abb. 53: Spuren von alten Flussläufen am Alpenrhein (bei Trübbach).

Während grossen Hochwasserereignissen mit starken Regenfällen wie 1868, 1987, 2005 oder 2011 waren auch kleine Einzugsgebiete betroffen. In gesättigten Hängen traten grosse Rutschungen auf, und in den steilen Wildbächen kam es zu Murgängen oder zu intensivem Geschiebetransport. Die mitgeführten Feststoffe lagerten sich ab und liessen typische Formen wie Schuttkegel und Schwemmfächer oder Rinnen und Runsen zurück. Murgänge sind besonders effektiv bei der Gestaltung der Landschaft. Sie sind ein schnell fließendes Gemisch aus Wasser, Steinen und feinem Material.⁹⁰ Sie können grosse Mengen an



Abb. 54: Hochwasser und Murgänge in Zignau 1868 (links)³⁵ und 1987 (rechts).

Feststoffen, darunter auch grosse Felsblöcke, über lange Strecken transportieren und zählen deshalb zu den gefährlichen Wildbachprozessen.

Während der Geschiebetransport durch Flüsse bereits in den 1940er Jahren wissenschaftlich untersucht und in entsprechende Formeln beschrieben wurde, sind Murgänge in der Schweiz von der Wissenschaft bis in die späten 1980er Jahre kaum wahrgenommen worden. Die grossen Ereignisse im Sommer 1987 haben den Forschungsbedarf eindrücklich aufgezeigt. Mit der Dokumentation und Analyse dieser Ereignisse setzte eine intensive Forschungstätigkeit ein.⁹¹ Fragen der Murgangdynamik, zu den Auslösebedingungen von Rutschungen und Murgängen (auch im Zusammenhang mit der Klimaänderung⁹²) oder zur Simulation dieser Prozesse^{93,94} rückten in der Forschung in den Vordergrund; nicht zuletzt ging es darum, Werkzeuge für die Praxis bereitzustellen.^{95,96} Seit den Hochwasserereignissen vom Frühjahr 1999 und schliesslich vom August 2005 mit zahlreichen zerstörerischen Rutschungen und Murgängen (Sörenberg, Glarus, Guttannen, Brienz)¹ ist die Bezeichnung Murgang auch in den Medien geläufig und zählt heute zu den Standardbegriffen beispielsweise bei Warnungen.

Betroffen war oft auch die Zavrägia (Zignau¹, GR), wo bereits bei zahlreichen früheren Hochwasserereignissen Murgänge stattfanden. Besonders starke Murgänge ereigneten sich 1868 (vgl. Abb. 54 links) und 1987 (vgl. Abb. 54 rechts).

Massnahmen

Die grossen Hochwasserereignisse von 1868, 1987, 1999 und 2005 haben jeweils die Strategien zur Reduktion der Gefahren und der Risiken durch Hochwasser oder durch die mit dem Wasser transportierten Feststoffe beeinflusst (vgl. S. 36). Während nach 1868 ein Schwerpunkt auf die Stabilität der Einzugsgebiete sowie auf bauliche Massnahmen zur Kanalisation von Bächen und Flüssen gelegt wurde, verlagerte sich die Schutzstrategie nach 1987 auf einen integralen Ansatz mit planerischen (Gefahrenzonen meiden), biologischen (Aufforstungen), baulichen (Schutzbauten) und organisatorischen Massnahmen. Nach den Hochwasserereignissen von 1999 und 2005 wurde zudem ein Schwerpunkt auf die Warnung der Bevölkerung gelegt.

Bauliche Massnahmen im Hochwasserschutz basieren auf drei grundsätzlich verschiedenen Konzepten, um Wasser und vor allem Feststoffe in den Griff zu bekommen: Rückhalten, Umleiten, Durchleiten. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde erkannt, dass das Verhalten der Wildbäche für die Hochwassersituation entscheidend



ist⁹⁷ und diese entsprechend gezähmt werden müssen. Der schlechte Zustand des Waldes und das Fehlen von Schutzbauten an den Gewässern wurden damals für die immer wieder auftretenden Schäden durch Wildbäche verantwortlich gemacht, so auch durch die Expertenkommissionen, die das Hochwasser von 1868 analysierten.⁹⁸ Die von ihnen vorgeschlagenen Wildbachverbauungen zielten darauf ab, im Oberlauf die Erosion zu vermindern und im Unterlauf das Transportvermögen für Feststoffe zu erhöhen. Mit diesen Überlegungen erfolgte eine Verschiebung von der Symptom- zur Ursachenbekämpfung.⁹⁹ Neben den Aufforstungen wurden auch massive Konsolidierungs- und Rückhaltesperren sowie ganze Sperrtreppen in steilen Bächen errichtet (Abb. 55), so auch in der Zavrägia.

Gleichzeitig mit den Stabilisierungsmassnahmen in den kleineren Einzugsgebieten wurden im Tal auf den Ablagerungskegeln kanalisierte Flussbetten und Bachgerinne, eigentliche Kanäle oder Schussrinnen erstellt, um Hochwasserabflüsse oder Feststoffe in die unterliegenden Abschnitte durchzuleiten oder in weniger genutzte Gebiete umzuleiten. Auch in der Zavrägia wurde in den 1960er Jahren das Gerinne auf dem Kegel vollständig kanalisiert. Dies dürfte beim Hochwasser 1987 dazu geführt haben, dass keine wesentlichen Schäden im Dorf Zignau auftraten. Damit Feststoffe nicht bis auf den Ablagerungskegel gelangen können, wurden in den letzten Jahrzehnten zusätzlich viele kleinere und auch sehr grosse Sammler für die Feststoffe erstellt.

Heute ist bei vielen Schutzbauwerken die Lebensdauer erreicht oder überschritten. Gerade bei grossen Rückhaltebauwerken im Einzugsgebiet (z. B. Sperrtreppen) stellt sich die Frage, ob die Bauwerke ersetzt werden sollten oder ob andere Strategien allenfalls nachhaltiger wären. Heute werden die Feststoffen nicht mehr im Einzugsgebiet zurückgehalten, sondern auf dem Kegel oder im Vorfluter gemanagt oder in Gebiete gelenkt, die wenig genutzt werden.¹⁰⁰



Abb. 55: Unterschiedliche Massnahmenkonzepte in Wildbacheinzugsgebieten¹⁰⁰

Spuren des 1868er Ereignisses

Die Niederschläge vom Herbst 1868 haben in den Talebenen von Rhein, Reuss und Ticino zu grossen Überschwemmungen geführt; teilweise wurden Ufer erodiert, oder der Fluss verlagerte seinen Lauf. Gemäss dem «Bündner Tagblatt» vom 1. Oktober 1868 haben insbesondere der Hinterrhein, der Glenner und die Nolla grosse Schäden an den Ufern und im angrenzenden Gelände verursacht. Die Wasser haben in diesen Flüssen die Ufer erodiert, die Wuhren (Längsbauwerke zum Schutz der Ufer) mitgerissen und manche Brücke zerstört.

Nicht nur die grossen Flusstäler waren betroffen. Die starken und langanhaltenden Niederschläge verursachten auch zahlreiche Rutschungen, Murgänge und Wildbachausbrüche in kleineren Flüssen und Bächen. Gemäss dem Bericht der Expertenkommissionen⁹⁸ «sind die Gebirgswasser zu Strömen angewachsen und haben, nicht genügend durch Thalsperren und Wälder aufgehalten, solche Geschiebemassen, Steinlawinen und Felsen mit sich geführt, dass Berggelände herabgerissen, Täler überschwemmt und verschlammmt, ganze Dörfer zerstört oder verschüttet und viele ihrer Bewohner unter ihnen begraben worden sind». Die Rolle der von Bächen und Flüssen mitgeschleppten Feststoffe wird betont. So ist der Peilerbach bei Vals durch die mitgeführten Feststoffe aus seinem Bachbett ausgebrochen: «die ganze Nacht hindurch stürzten Erdschlipfe in das Valsertobel, die das Wasser aufstauten; sieben Mal wälzte das Tobel diese Schuttmassen den Berg hinunter in den Glenner».⁹⁸

Das wohl am besten dokumentierte Ereignis ist der Murgang (Rüfe) in der Val Zavrägia (12 km²) (siehe Abb. 54): «Unter furchtbarem Gedonner wälzt sich ein Berg von Rüfematerial mitten durch die Gasse. Kaum hatte man in stockfinsterner Nacht sich angeschiedt, wie gewohnt nordwärts in die Güter und Gärten zu fliehen, als auch in jener Richtung bereits ein Theil der Rüfe sich Bahn gebrochen hatte.»³ Johann Coaz hat diese massiven Verwüstungen in einem Stich festgehalten. Obschon in der Zavrägia bereits in den Jahren 1748 und 1834 grössere Hochwasser und Murgänge dokumentiert sind, war der Schwemmkegel dicht besiedelt (Abb. 56).

Die im Nachgang der Ereignisse vom September und Oktober 1868 einberufenen Expertenkommissionen äusserten sich zur Frage der präventiven Massnahmen. Die Experten Landolt, Culmann und Escher von der Linth befanden, es sei am zweckmässigsten, wenn möglichst grosse Summen für Verbauungen in den Seitentälern aufgewendet würden. Sie wiesen darauf hin, dass die Flusskorrekturen in der Ebene nicht sicher genug wären, wenn nicht auch im Ursprungsgebiet der Hochwasser und der Feststofflieferungen Massnahmen ergriffen würden. Die neuen Gesetze (Forst- und Wasserbaugesetze) fordern klar die Prävention von Hochwassern, insbesondere von Wildbacherereignissen.

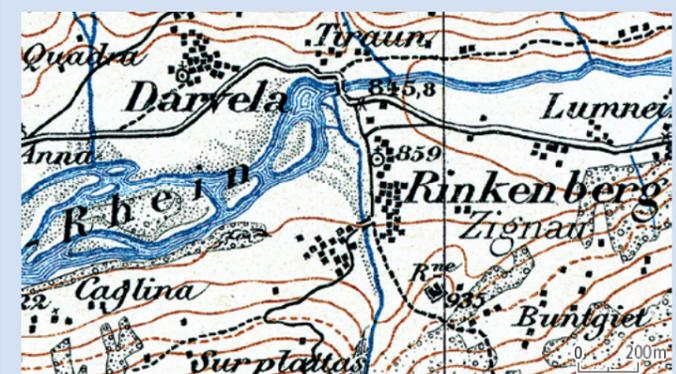


Abb. 56: Zignau auf dem Siegfriedatlas 1881; die Spuren des Ereignisses sind deutlich erkennbar.

Hochwasserschäden

Hochwasser und deren begleitende Prozesse wirken auf vielfältige Weise auf Menschen und ihre Lebensräume ein. Positive Effekte wie Nährstoffeintrag und Bewässerung sind in der modernen Schweiz von untergeordneter Bedeutung. Ungleich wichtiger sind die negativen Auswirkungen, die Schäden.

Aus Statistiken von Versicherungen und der öffentlichen Hand wie auch aus Medienberichten und Ereignisdokumentationen lässt sich abschätzen, dass Hochwasser in der Schweiz während der letzten fünfzig Jahre Schäden von rund 300 Millionen Franken pro Jahr verursachten.¹⁰¹ In diesen Abschätzungen berücksichtigt sind direkte, monetäre Schäden an Gebäuden und deren Inhalt, an Fahrzeugen, Infrastruktur und Kulturen.

Die Schäden entstehen durch statische und dynamische Druckeinwirkungen des Wassers und der mitgeführten Feststoffe, durch Gelände- und Gerinneveränderungen (siehe vorhergehendes Kapitel), aber auch durch Nässe und Schmutz.^{102,103} Die Höhe der direkten, monetären Schäden errechnet sich aus den Kosten der Reparatur oder des Ersatzes des beschädigten Objektes.

Über die letzten fünfzig Jahre lässt sich eine Zunahme dieser Schäden beobachten, wobei die Zunahme in erster Linie auf den Ausbau und die Wertsteigerung der gebauten Umwelt zurückzuführen ist. Abbildung 57 zeigt exemplarisch den Verlauf von vergüteten Hochwasserschäden und versicherten Gebäudewerten von 18 kantonalen Gebäudeversicherungen in den Jahren 1960 bis 2017. Weiter lässt sich feststellen, dass in den letzten Jahrzehnten ein zunehmender Anteil neuer Wohnbauten in potenziellen Überschwemmungsgebieten erstellt wurde (vgl. Abb. 58).¹⁰⁴ Von den 110000 Wohngebäuden, die zwischen 1971 und 1980 erstellt wurden und für die heute eine Gefahrenkarte gemäss den Vorgaben des Bundes vorliegt, befinden sich 14 Prozent in Gefahrenzonen. Für die darauffolgenden Bauperioden steigt dieser Anteil stetig an und liegt für den jüngsten untersuchten Zeitraum (2001 bis 2012) bei 16 Prozent.

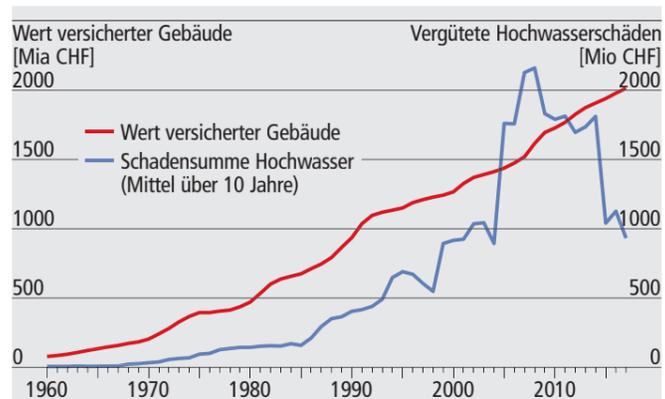


Abb. 57: Wert versicherter Gebäude (in Mia. CHF, linke Achse) und vergütete Hochwasserschäden (Mittel über die jeweils letzten 10 Jahre in Mio. CHF, rechte Achse) 1960–2017 von 18 kantonalen Gebäudeversicherungen, die rund 70 Prozent des Gebäudebestandes in der Schweiz versichern.¹⁰⁵

Schliesslich steht die Vermutung im Raum, dass potenziell hochwassergefährdete Objekte, insbesondere Gebäude, heute hochwasserempfindlicher gebaut und genutzt werden. Erhöhte Hauszugänge mit zwei, drei Stufen in einen schmutz- und wasserunempfindlichen Eingangsbereich sind schwellenlosen Übergängen vom Gartensitzplatz direkt ins Wohnzimmer gewichen. Statt Kartoffeln und Äpfel lagern heute Heizölvorräte im Kellergeschoss, oder die Vorratsräume wandelten sich zu Steuerungszentralen der Haustechnik.

Es ist eine grosse Herausforderung, die Empfindlichkeit von Gebäuden und anderen gefährdeten Objekten für Hochwasser zu quantifizieren

und damit für Schadenabschätzungen zukünftiger Ereignisse nutzbar zu machen. Die Resultate der wenigen wissenschaftlichen Arbeiten in diesem lange vernachlässigten Bereich der hochwasserbezogenen Risikoforschung weisen erhebliche Unsicherheiten auf^{106,107} und zeigen den Bedarf nach weiteren Untersuchungen auf.

Die negativen Auswirkungen eines Hochwassers umfassen jedoch mehr als die beschriebenen direkten, monetären Schäden. Oft sind die Kosten für Ersatz oder Reparatur sogar von untergeordneter Bedeutung. So stehen bei Infrastrukturbauten, Produktionsketten oder Kommunikationsnetzen meist die indirekten Kosten eines Unterbruchs im Vordergrund. Einer von Hochwasser betroffenen Bäckerei beispielsweise können zwar erhebliche Kosten für den Ersatz von Mehl, Backofensteuerung oder Lieferfahrzeugen entstehen. Ungleich höher sind aber die indirekten Kosten eines Betriebsunterbruchs, insbesondere die Gewinneinbussen. Diese treten nicht nur während des Hochwasserereignisses auf, sondern auch danach, wenn die Kundschaft ihr Brot neu bei der Konkurrenz einkauft. Die Höhe dieser indirekten Schäden ist oft schwierig abzuschätzen. Noch schwieriger ist die Abschätzung von Schäden, die sich kaum in Geldwerten ausdrücken lassen, wie bei in den Fluten ertrunkenen Personen oder durch das Wasser zerstörten Kulturgütern.

Hochwasser verursachen monetäre und nichtmonetäre, direkte und indirekte Schäden. Die sehr unterschiedlichen Schäden vergleichbar zu erfassen und als solide Entscheidungsgrundlagen aufzuarbeiten, ist Gegenstand aktueller Forschung. Diese Entscheidungsgrundlagen helfen mit, das Hochwasserrisiko auf dem anhaltenden Wachstumspfad unserer Gesellschaft angemessen zu berücksichtigen.

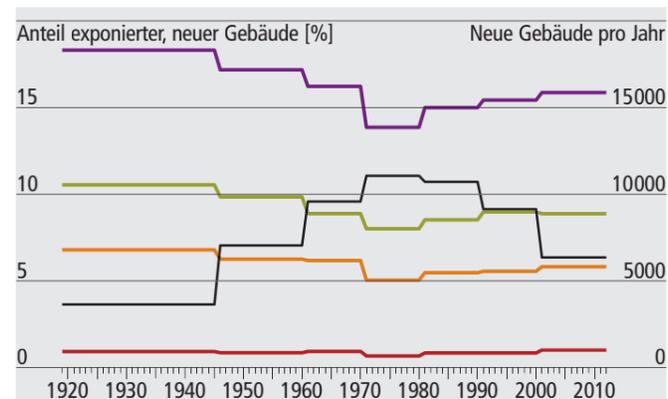


Abb. 58: Neu erstellte Gebäude mit Wohnnutzung nach Bauperiode. Der Anteil exponierter neuer Gebäude (linke Achse, in Prozent) entspricht dem Verhältnis von neu erstellten Gebäuden in Hochwassergefahrengemeinden entsprechender Gefahrenstufe zu allen neu erstellten Gebäuden, für die eine Gefahrenkarte gemäss Bundesvorgaben vorliegt. Letztere sind zusätzlich in absoluten Zahlen pro Jahr dargestellt (rechte Achse).¹⁰⁴

Abb. 58: Neu erstellte Gebäude mit Wohnnutzung nach Bauperiode. Der Anteil exponierter neuer Gebäude (linke Achse, in Prozent) entspricht dem Verhältnis von neu erstellten Gebäuden in Hochwassergefahrengemeinden entsprechender Gefahrenstufe zu allen neu erstellten Gebäuden, für die eine Gefahrenkarte gemäss Bundesvorgaben vorliegt. Letztere sind zusätzlich in absoluten Zahlen pro Jahr dargestellt (rechte Achse).¹⁰⁴

Die Verteilung der Schäden von 1868

Das Hochwasser von 1868 zog besonders auf der Alpensüdseite ausserordentliche Schäden nach sich.^{3,32,35,108} Da es noch keine systematischen Verfahren zur Erhebung solcher Schäden gab, wurde eigens zu diesem Zweck vom Bundesrat eine Schätzungskommission einberufen, die in den Monaten nach den Überschwemmungen in den fünf betroffenen Kantonen Tessin, Graubünden, St. Gallen, Wallis und Uri detailliert die Schäden erhob.⁴

Die Gesamtkosten beliefen sich auf dem Gebiet der Schweiz auf 14 Millionen Franken, davon alleine 6,5 Millionen im Kanton Tessin (Abb. 59). Teuerungsbereinigt wären dies auf das Jahr 2000 bezogen 915 Millionen bzw. 425 Millionen Franken.¹⁰⁹ Der langanhaltende und intensive Niederschlag hatte ausserdem den höchsten je gemessenen Pegelstand des Lago Maggiore zur Folge.¹⁰⁸ Es ist denn auch nicht verwunderlich, dass der Kanton Tessin am stärksten betroffen war. Der grösste Schaden entstand in Blenio¹ und in der Leventina¹ mit insgesamt 4,1 Millionen Franken; ausserdem beklagten diese Regionen 41 von insgesamt 51 Todesopfern.³ Im Kanton Graubünden war beinahe jede Gemeinde entlang des Rheins durch das Hochwasser betroffen, und mehrere Murgänge erhöhten die Schäden beträchtlich. Zum Beispiel wurde das Dorf Vals¹ (in Abb. 59 VL) von einer durchschnittlich 45 Zentimeter dicken Sand- und Geröllschicht bedeckt (Abb. 60). Auch das Dorf Zignau¹ (in Abb. 59 ZI) ereilte ein ähnliches Schicksal (Abb. 54).³⁵ Weiter stromabwärts entstanden im Kanton St. Gallen aufgrund der Wassermassen vier temporäre Seen. Im Kanton Wallis fielen hauptsächlich entlang der Rhone hohe Kosten an, im Kanton Uri entlang der Reuss.^{32,108}

Die eingangs erwähnte Schätzungskommission erhob die Schäden sehr detailliert, einerseits nach Schadenart, andererseits nach Geschädigten. Insgesamt trugen die Privaten mit gut 59 Prozent den grössten Teil der Schäden, während gut ein Drittel auf Gemeinden und Korporationen und nur etwa 8 Prozent auf die Kantone entfiel. Diese Verteilung lässt sich durch die Art der Schäden erklären: 55 Prozent davon betrafen landwirtschaftliche Nutzflächen, teilweise auch die Ernte, und damit die existenzielle Grundlage vieler Betroffener in den fünf vornehmlich bäuerlich geprägten Kantonen. Gut ein Viertel der Schäden entfiel auf Brücken, Strassen und vor allem auch auf Wasserbauten. Aus heutiger Sicht erstaunt deshalb, dass die Kantone nicht



Abb. 60: Foto der von Sand verschütteten Talebene bei Vals kurz nach dem Hochwasser und den darauffolgenden Murgängen³ (vgl. S. 32).

stärker betroffen waren. Aber anders als heute kamen die Kantone zu jener Zeit lediglich für Strassen und Brücken von kantonaler Bedeutung auf sowie für einige wenige überregionale Flussbauprojekte beispielsweise an Rhein und Rhone. Die übrigen Infrastrukturen dieser Art wurden von den Gemeinden alleine finanziert. Bedenkt man, dass viele dieser Arbeiten von den Gemeindebewohnern in Gemeinwerk ausgeführt wurden, wird deutlich, dass viele Private doppelt betroffen waren. Neben den Schäden an der landwirtschaftlichen Nutzfläche und an Infrastrukturen machten Schäden an Gebäuden und an sogenannter Fahrhabe – darunter fallen vor allem Mobilien, Vieh und Vorräte – nur einen kleinen Teil aus. Das zeigt, dass Gefahrenzonen 1868 noch kaum besiedelt waren.

Insgesamt zählte die Schätzungskommission über 18000 geschädigte Personen – davon mehr als 8000 im Tessin –, von denen mehr als die Hälfte mit einem steuerbaren Einkommen von weniger als 1000 Franken zur Bedürftigkeitsklasse der Armen gezählt wurden. Auf diese armen Betroffenen entfiel ein Drittel der Privatschäden, ohne dass sie vom heutigen Versicherungssystem geschützt waren. Lediglich die überaus erfolgreiche Spendensammlung konnte zumindest einen Teil ihrer Not lindern (vgl. S. 37).

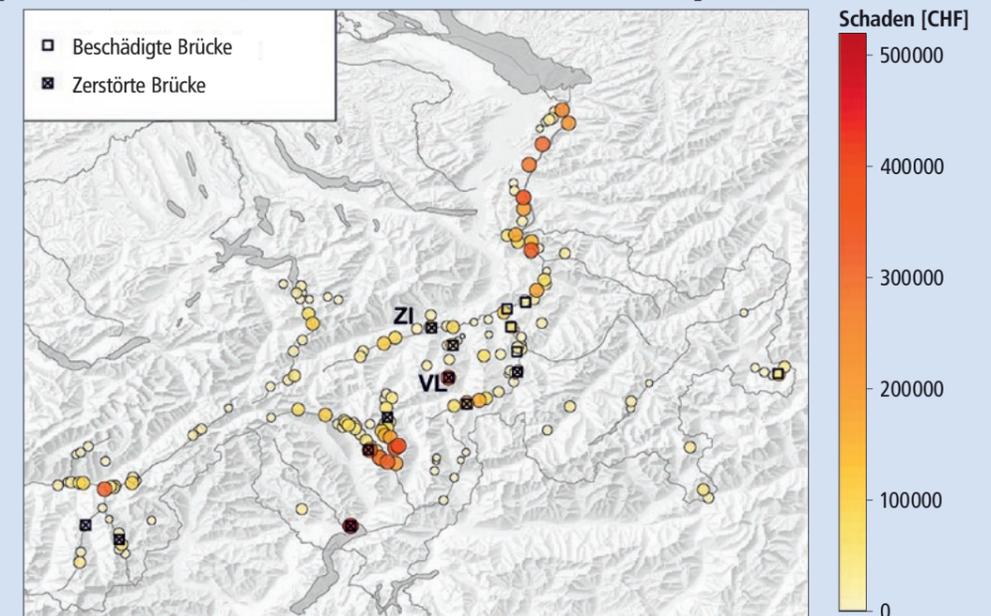


Abb. 59: Schadenssummen (in CHF) laut zeitgenössischen Untersuchungen pro Gemeinde in den fünf betroffenen Kantonen der Südostschweiz. Rechtecke zeigen beschädigte, Rechtecke mit Kreuz zerstörte Brücken. VL: Vals, ZI: Zignau.

Gesellschaftliche Auswirkungen: Bewältigung und Prävention

Überregionale Hochwasserereignisse prägen seit jeher gesellschaftliche Anpassungs- und Transformationsprozesse, beispielsweise im Bereich des Hochwasserschutzes und des Risikomanagements. Sie können Lerneffekte und damit auch Innovations- oder Optimierungsprozesse bei der Bewältigung und Prävention von Katastrophen auslösen oder beschleunigen. Voraussetzung für solche Innovationen ist, dass neue Strategien und Lösungen auf den jeweils aktuellen Erfahrungshorizont aufbauen.

Auch das 19. Jahrhundert kannte Extremereignisse, deren Ausmasse und Auswirkungen die Bewältigungs- und Regenerationsfähigkeit der lokalen Gemeinwesen, aber auch der Kantone überstiegen. 1868 schaltete sich deshalb zum ersten Mal der junge Bundesstaat in die Katastrophenbewältigung ein (vgl. rechts). Erstmals kamen 1868 auch Militärtruppen aus den Kantonen zum Einsatz (Abb. 61), verstärkt war dies auch 1876 und 1910 wieder der Fall.¹¹⁰ Durch die vereinten Anstrengungen in der Katastrophenbewältigung wurde in dieser Zeit die Solidarität zwischen den Regionen in der Schweiz gestärkt.

Die drei Hochwasserereignisse erhöhten auch den nach Gewitterstürmen und Lawinnenniedergängen lokal entstandenen Druck auf die Gebäudeversicherungen, ihre bis dahin auf Feuerschäden begrenzten Leistungen auszuweiten. 1926 schloss die öffentlich-rechtliche Sachversicherung des Kantons Waadt als erste Anstalt ausgewählte Naturgefahren in ihre Deckung ein.¹¹¹ Innerhalb dreier Jahrzehnte zogen sämtliche in der Schweiz tätigen Gebäude- und Fahrhabeversicherungen nach. Aus den Ad-hoc-Lösungen mit Spenden, Staatsbeiträgen und freiwilligen Versicherungsleistungen entwickelten sich bis Mitte der 1950er Jahre schweizweit die heute bekannten flächendeckenden, stark regulierten Versicherungssysteme.¹¹² In 19 Kantonen sind alle Gebäude obligatorisch bei einer kantonalen Monopolanstalt gegen Feuer- und Naturgefahren versichert. In den übrigen Kantonen führt der bundesgesetzlich vorgeschriebene Einschluss von Naturgefahren in jede Feuerversicherung zu einer Abdeckung von nahezu 100 Prozent. Schäden durch Hochwasser und andere Naturgefahren an Gebäudestruktur und -inhalt tragen in der Schweiz die Versicherungen. Die Kosten für Reparatur oder Ersatz werden zum Neuwert vergütet, der Selbstbehalt der Versicherten ist minimal.^{113,114}

Auch heute spielen grosse Hochwasserereignisse eine wichtige Rolle bei Innovationen. Auf lokaler Ebene sind sie heute noch der häufigste Auslöser für die Erstellung von Notfallplänen und Präventionsmassnahmen.¹¹⁵ Nach dem Hochwasserereignis von 2005 wurden die Wettervorhersage- und Frühwarnsysteme sowie die Notfallplanung und die Kommunikationsstrategien für den Krisenfall ausgebaut. Insgesamt findet seit den 1990er Jahren ein Paradigmenwechsel von der Naturgefahrenabwehr hin zu einem risikobasierten Umgang mit Naturgefahren statt: Technische Massnahmen werden mit organisatorischen und raumplanerischen Massnahmen kombiniert. Im sogenannten integralen Risikomanagement wird versucht, eine Kombination der wirksamsten Massnahmen umzusetzen. International wird vermehrt der Ansatz zur Stärkung der Resilienz gegen die Auswirkungen von Naturgefahren verfolgt, und Unsicherheiten in den Grundlagen und Prognosen werden zunehmend quantitativ in Entscheidungsprozesse mit einbezogen. Den Aspekten der Widerstands-, Regenerations- und Anpassungsfähigkeit wird auch in der neuen Strategie der Plattform Naturgefahren PLANAT für den Umgang mit Risiken aus Naturgefahren Rechnung getragen. Diese ausserparlamentarische Kommission koordiniert in der Schweiz die Aktivitäten im Risikomanagement und fördert die Umsetzung neuer Ansätze. Solidarität und Lernen aus Naturereignissen spielen damit auch heute noch eine grosse Rolle.

Die Schweizer Bevölkerung profitiert heute von den Innovationen der letzten 200 Jahre. Durch die Raumplanung werden die Besiedelung von gefährdeten Gebieten und damit neue Risiken vermieden (Gefahrenzonenplanung). Die Bauordnungen sorgen dafür, dass in den gering gefährdeten Gebieten Objektschutzmassnahmen an Gebäuden angebracht werden, die im Hochwasserfall die Schäden verringern. In vielen Gefahrengebieten schützen bauliche Massnahmen

Siedlungsgebiete und Infrastruktur. Übersteigt ein Ereignis trotzdem die Kapazität der Schutzbauten, schützen die lokalen Interventionskräfte wie Feuerwehren und Zivilschutz die wichtigsten Objekte mit mobilen Schutzmassnahmen. Sie stützen sich auf ein gut funktionierendes Frühwarn- (Wettervorhersage und Gefahrenprognosen, darunter www.gin.admin.ch) und Kommunikationssystem. Ausserdem wurde vielerorts eine fundierte Notfallplanung mit situationsangepassten Strategien zur Ereignisbewältigung erarbeitet. Schäden an Gebäuden und Fahrhabe werden durch die Elementarversicherungen vergütet. Die Bevölkerung trägt somit nur mehr einen geringen Anteil der Risiken.



Abb. 61: Bei der Bewältigung der Hochwasser von 1927 halfen eidgenössische Truppen auch in Liechtenstein, das daraufhin als Dank eine Briefmarkenserie herausgab. Oben trägt Pontonier Siegrist aus Schaffhausen die Knaben Oskar und Martin Kind ans Land; unten die Briefmarke mit diesem Motiv.¹¹⁶

Die «Liebesgabensammlung» von 1868

Die Betroffenheit im Land war gross, als weite Gebiete im Schweizer Alpenbogen im Herbst 1868 in den Fluten versanken.^{4,109} Bereits zwei Tage nach den Überschwemmungen gab es Hilfsangebote aus der ganzen Schweiz, und der Bundesrat entsandte ein Ratsmitglied in die betroffenen Gebiete, um seine Betroffenheit angesichts dieses «Landesunglücks» zu zeigen. Dem Bundesrat fehlte zwar ein entsprechender Verfassungsauftrag, nach dem Motto «ausserordentliche Lagen und Verhältnisse bedingen auch ausserordentliche Mittel zur Abwendung der Noth» berief er aber eine Konferenz ein, um die Hilfstätigkeiten zu organisieren und ihnen «Stimmung und Halt, Einheit und Zusammenhang zu verleihen». Damit ergriff er erstmals seit seinem Bestehen die Initiative bei der Bewältigung einer Katastrophe, obwohl es auch vorher schon Gelegenheit dazu gegeben hätte. Diese Konferenz beauftragte den Bundesrat am 12. Oktober 1868 mit einem nationalen Spendenaufruf, berief ein Zentralhilfskomitee und setzte eine Expertenkommission zur Schadensschätzung ein. Ein ähnliches Vorgehen hatte sich bereits 1834 bewährt.¹¹⁷

Die folgende Spendensammlung belebte die «alt bewährte Liebe und ewige Treue» der Miteidgenossen und wurde unter dem Wahlspruch «Einer für alle und alle für einen!» zur wohl erfolgreichsten Sammlung der Schweizer Geschichte, die auch heutige Aktionen der Glückskette in den Schatten stellt: Es wurden 3,63 Millionen Franken gespendet, zusammen mit Naturalien beliefen sich die Spenden auf eine Summe von etwa 4 Millionen Franken.¹¹⁸ Unter den Naturalien befanden sich gut 3160 Tonnen Lebensmittel, davon allein 2560 Tonnen Kartoffeln.⁴ Die Geldspenden stammten von Privaten, aus Benefizveranstaltungen oder aus Firmen-, Kirchen-, Schul- und Gemeindekollekten, aber auch von bekannten Persönlichkeiten wie

Kaiser Napoleon III., dem preussischen König Wilhelm I. oder Papst Pius IX. Zürich, Bern und Basel-Stadt waren die wichtigsten Geberkantone, und die Westschweizer Bevölkerung setzte sich vor allem in der Waadt, in Genf und in Neuenburg trotz der räumlichen und kulturellen Distanz stark ein (Abb. 62).

Das Zentralhilfskomitee war Dreh- und Angelpunkt der gesamten Hilfsaktion. Sein Informationsmonopol und das Bundesmandat sicherten ihm die Weisungskompetenz. Es kämpfte aber auch mit Schwierigkeiten: Die Massen an Lebensmitteln und Kleidungsstücken brachten einen gewaltigen administrativen und logistischen Aufwand mit sich, etwa bezüglich Lagerung, Transport und Verpackung; so waren Kartoffelsäcke schon bald Mangelware. Gerade die Naturalien entsprachen zudem nicht den Bedürfnissen der Betroffenen, die sich vielmehr um ihre längerfristige Existenzsicherung sorgten. Vor allem über den Kartoffelberg freute sich bald niemand mehr so richtig, und die betroffenen Kantone baten eindringlich, keine Kartoffeln mehr übernehmen zu müssen.

Dieselben Probleme kennen auch heutige Hilfsaktionen:¹¹⁹ Hilfsgüter entsprechen nicht immer den Bedürfnissen am Bestimmungsort, sondern sind aufgrund der aufwendigen Verwaltung von Naturalien manchmal eher hinderlich. Vor Ort führen die Hilfsgüter zudem oft zu einem Preisverfall der entsprechenden Produkte. Wie 1868 sind die lokale Infrastruktur und die Verwaltung angesichts der Hilfsangebote auch heute noch oft überfordert, und die Hilfswerken behalten selten die volle Kontrolle über die Verteilung, da den Verteilsystemen damals wie heute weniger Aufmerksamkeit geschenkt wird als den Sammelsystemen.

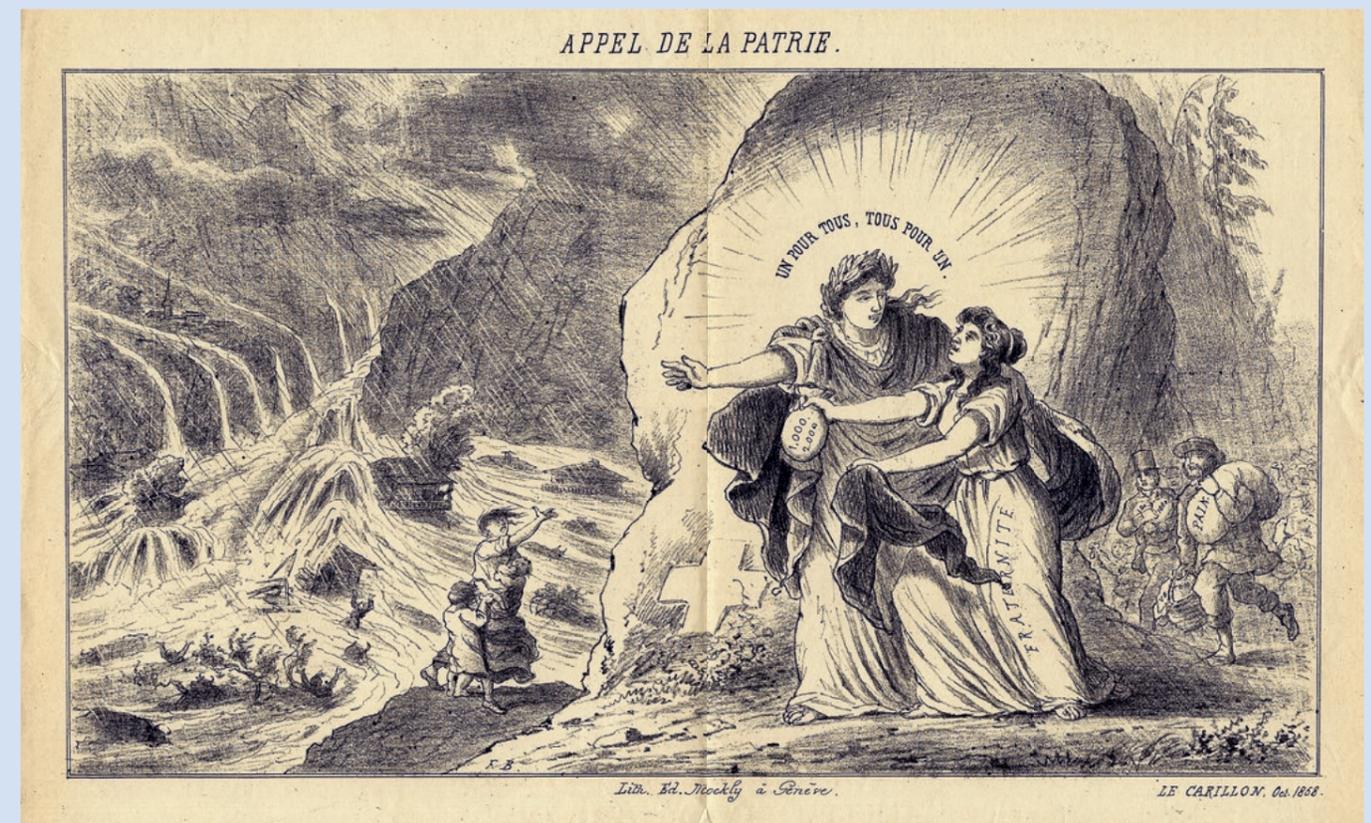


Abb. 62: Das Bild «Appel de la patrie» wurde 1868 in Genf zugunsten der Betroffenen verkauft und spiegelt mit seiner Zweiteilung die zentralen Elemente der Spendensammlung: Links streckt eine Frau mit zwei Kindern flehend ihre Hand nach Helvetia aus, im Hintergrund reissen die Fluten Häuser, Bäume und Menschen mit sich. Rechts eilen ein Bauer und ein Bürger zu Helvetia, der Bauer mit Brot und Kleidern, der Bürger mit Geld. Helvetia in der Mitte weist bereits der Fraternité den Weg, gekrönt vom Motto «Un pour tous, tous pour un».

Schweizer Hochwasserschutz im Wandel

Als der Schweizer Bundesstaat 1848 gegründet wurde, war Hochwasserschutz längst keine Neuheit mehr: Überschwemmungen bilden seit Jahrhunderten eine Konstante in der Geschichte des Gebietes der heutigen Schweiz. Bereits zwei Jahrzehnte nach seiner Gründung übernahm der Bund in diesem Bereich selbst eine aktive Rolle, die er seither schrittweise ausgebaut hat. Extreme Hochwasserereignisse waren dabei immer wieder eine treibende politische Kraft und stehen oft wenn nicht am Ursprung, so doch an den Wendepunkten zu neuen Ansätzen im Hochwasserschutz.

Die Verankerung des Infrastrukturegimes (1848–1877)

Bis zu Beginn des 19. Jahrhunderts war der Hochwasserschutz geprägt von rein lokalen Massnahmen. Mit der Linthkorrektur (1807–1816) wurde schliesslich ein erstes eidgenössisches, überregionales Projekt in Angriff genommen, auf das sich auch die Bundesverfassung von 1848 mit ihrem Infrastrukturartikel (Art. 21 BV) stützte, Grundlage für die in den 1860er Jahren beschlossenen Juragewässer-, Rhein- und Rhonekorrekturen^{109,120–123} (vgl. Abb. 63 links). Diese Grossprojekte galten als «Werke im Interesse der Eidgenossenschaft» und waren prestigeträchtige Infrastrukturbauten, mit denen der junge Bundesstaat die Gestaltung der landschaftlichen Verhältnisse der Schweiz dominierte und die Kantone mit beträchtlichen finanziellen Mitteln an sich band.

Der Hochwasserschutz an sich blieb aber in den Händen der Kantone. Das frühe Infrastrukturegime beschränkte sich denn auch auf die Hauptflüsse, ohne Berücksichtigung der Zuflüsse und der Quellgebiete. Bereits in den 1850er Jahren wurden Stimmen laut, die diesen Mangel beheben und den Hochwasserschutz als Bundesaufgabe verankern wollten. Sie stützten sich auf die Ursachendiskussion, die seit den 1820er Jahren und vermehrt nach den katastrophalen Überschwemmungen von 1834 davon ausging, dass Abholzungen im Hochgebirge zu Überschwemmungen in der Ebene führten (vgl. S. 29), und verlangten als Gegenmassnahme Wildbachverbauungen und Aufforstungen. Die Experten – zuvorderst Vertreter des 1843 gegründeten Schweizerischen Forstvereins – stiessen aber mit ihren Forderungen bei den politischen Entscheidungsträgern zunächst auf wenig Gehör. Erst die Überschwemmungen von 1868 führten zu einem Umdenken, das mit der Verfassungsrevision von 1874 die Wasserbau- und Forstpolizei in die Kompetenz des Bundes überführte (vgl. rechts). Sie trugen massgeblich dazu bei, einerseits den Hochwasserschutz als Bundesaufgabe zu verankern und andererseits das Infrastrukturegime von einem sektoriellen zu einem ganzheitlichen Regime auszuweiten, das dem gesamten Einzugsgebiet eines Flusses Rechnung trug.

Der lange Weg zum Raumplanungsregime (1950er Jahre bis 1991)

Das Wasserbaugesetz von 1877 blieb bis 1991 der Referenztext des Schweizer Wasserbaus. Das wird teilweise mit dem sogenannten «disaster gap» erklärt, dem Fehlen von schweren Hochwasserereignissen von 1882/1910 bis 1976.⁵ Die These einer «Katastrophenlücke» unterschätzt aber den Einfluss von lokalen Ereignissen. Dies zeigen etwa die Überschwemmungsserie der 1920er Jahre im Wallis als Auslöser der zweiten Rhonekorrektur oder die häufigen Ereignisse an alpinen Wildbächen wie der Gürbe¹ südlich von Bern.^{109,115,124} Dass der Hochwasserschutz zu Beginn des 20. Jahrhunderts nach solchen Ereignissen unverändert blieb, liegt nicht zuletzt daran, dass das Wasserbaugesetz von 1877 ein sehr flexibles Rahmengesetz war. Zudem stand auch die Schweiz unter dem Eindruck von Weltwirtschaftskrise und Weltkriegen. Und schliesslich fehlte eine ausgedehnte Ursachendiskussion, die den Boden für neue Lösungen bereitet hätte.

Das änderte sich ab den 1950er Jahren mit der Umweltschutzdebatte, in deren Zug Gewässerschutz (1953), Raumordnung (1969) und Umweltschutz (1971) in die Bundesverfassung aufgenommen wurden.¹⁰⁹ Unter diesem Eindruck entstand 1975 auch der Wasserrechtsartikel, der erstmals Wasser in seiner Gesamtheit als eigenes Politikfeld verstand.¹⁰⁹

Diese Entwicklungen bildeten den Nährboden für eine neue Verwaltungspraxis im Wasserbau. Der Hochwasserschutz sollte nun auch umweltschutzkompatibel gemacht werden. Vorläufiger Höhepunkt war die Wegleitung «Hochwasserschutz an Fließgewässern» von 1982, die einen nachhaltigen Hochwasserschutz mit raumplanerischen Elementen propagierte (vgl. Abb. 63 rechts). Eine neue Gesetzgebung war nicht nötig, bot doch das bestehende Gesetz den zuständigen Bundesämtern einen grossen Gestaltungsspielraum. Erst im Rahmen der finanzpolitischen Diskussion um die Neuverteilung der Aufgaben zwischen Bund und Kantonen wurde auch der

Wasserbau wieder vom Gesetzgeber diskutiert. Mitten in diese politische Diskussion fiel das Überschwemmungsjahr 1987 mit seinem eigentlichen Katastrophensommer. Dasselbe Schweizer Parlament, das die Hochwasserschutzkredite zuvor im Rahmen von Sparrunden regelmässig gekürzt hatte, bemängelte nun die tiefen Beiträge. Das 1988 vorgelegte und 1991 verabschiedete neue Wasserbaugesetz erhielt nun unter dem Eindruck der Ereignisse von 1987 eine maximale Aufmerksamkeit, die dazu diente, das in der Praxis bereits angewandte Raumplanungsregime auch per Gesetz zu verankern.¹²⁵

Das integrierte Regime der Jahrtausendwende

Der Schritt vom Raumplanungs- zum integrierten Regime war im Vergleich zum vorangehenden Wechsel klein. Die neuerlichen Überschwemmungen von 1993 zeigten mit ihren hohen Schadenssummen sehr eindrücklich, dass nicht zwingend die hydrologischen Merkmale ein Ereignis zu einer Katastrophe werden lassen, sondern vielmehr die Raumnutzung durch den Menschen. Mit dem Motto «Mehr Raum den Fließgewässern» wird seither versucht, ein integriertes Regime einzurichten, das auch ein Restrisiko in Kauf nimmt und den Fließgewässern mehr Raum zugesteht, damit sie ihre vielfältigen Funktionen in den Bereichen Hochwasser- und Naturschutz, Wassernutzung und als Erholungsraum wahrnehmen können. Eine wichtige Etappe auf diesem Weg war einerseits die Gründung der nationalen Plattform Naturgefahren (PLANAT) 1997 und andererseits die neue Wegleitung zum Hochwasserschutz von 2001, an der neben dem Bundesamt für Wasser und Geologie drei weitere Bundesämter beteiligt waren und die differenzierten Schutzziele und dem Raumbedarf der Gewässer Priorität einräumt. Das Katastrophenjahr 2005 verlieh diesem Kurs deutlichen Nachdruck – so wie es die Überschwemmungen von 1868 und 1987 in ihrer Zeit getan hatten.^{109,126}

Eine politikwissenschaftliche Studie analysierte 2016 anhand der zwölf grössten Hochwasserereignisse zwischen 1868 und 2015, unter welchen Bedingungen Überschwemmungen zu politischem Wandel führten.¹²⁶ Nur die Hochwasser von 1868, 1978, 1987 und 2005 konnten in diesem systematischen Ansatz als Auslöser-Ereignisse identifiziert werden. Weder das räumliche Ausmass noch die Schäden, die Todesopfer oder die mediale Präsenz konnten eindeutig erklären, weshalb gerade diese Hochwasserereignisse so prägend waren. Denn ausschlaggebend ist nicht nur, wie schwer ein Ereignis wiegt, sondern vielmehr, in welchem Kontext es sich ereignet: Neue Paradigmen entstehen nicht über Nacht, sondern entwickeln sich von langer Hand jenseits jeglichen politischen Handlungsdrucks als neue Lösungsansätze. Sind solche Ansätze vorhanden, kann ein Hochwasserereignis als Katalysator des politischen Wandels einen Raum der Aufmerksamkeit schaffen, der es den verschiedenen Akteuren ermöglicht, ihre Anliegen politisch durchzusetzen.¹²⁷

Der Wandel politischer Lösungsansätze um 1868

In ihren Berichten⁹⁷ über die Hochgebirgswälder und die Wildbäche schlugen die Experten Elias Landolt (1862) und Carl Culmann (1864) vor, den Einfluss des Bundes auf Wildbachverbauungen und Aufforstungen auszuweiten und die kantonalen Gesetze zu vereinheitlichen. Eine nationale Forst- oder Wasserbaugesetzgebung war zu diesem Zeitpunkt aus ihrer Sicht aufgrund der kantonalen Souveränität nicht realistisch.¹⁰⁹

Das änderte sich nach den Ereignissen von 1868. Immer lauter wurde der Ruf nach einem energischen Eingreifen des Bundes. Die Vorschläge verschoben sich damit von der kantonalen auf die nationale Ebene. Die Überschwemmungen von 1868 wurden im Sinn dieser Verschiebung instrumentalisiert und der Föderalismus an den Pranger gestellt, wenn gefordert wurde, die souveränen Kantone möchten aus ihrem Egoismus erwachen und Hand zu nationalen Gesetzen bieten. Während sich die Ursachendiskussion über Jahrzehnte stetig rund um das Abholzungsparadigma (vgl. S. 29) verfestigte, durchliefen die politischen Lösungsansätze nach 1868 also einen sprunghaften Wandel: Die Fluten des Katastrophenjahres spülten das Thema gewissermassen an die Oberfläche des Interesses der politischen Entscheidungsträger. Sie verliehen den Argumenten der Experten die nötige Bedeutung und ihren Forderungen die entsprechende Vehemenz. Während die vorsichtigen Vorschläge der frühen 1860er Jahre im Parlament noch keine Chance hatten, verhalfen die Überschwemmungen von 1868 den neuen, um einiges weiter reichenden Forderungen zum Durchbruch.

Die heftig geführte Diskussion um die Verwendung der Spenden war dabei ein wichtiger Zwischenschritt: Der viel beschworene Spenderwille stand den Wünschen der betroffenen Kantone diametral entgegen. Die betroffenen Kantone und die Experten wollten den Löwenanteil der Spenden nachhaltig für Präventionsarbeiten einsetzen – die Geberkantone wiederum betonten, die Spender wollten den armen Betroffenen helfen und nicht dem Staat den Schutzbau abnehmen. Als Kompromiss wurde schliesslich mit der «Wuhrmillion» zumindest ein Viertel der Spenden nachhaltig für Schutzbauten eingesetzt. Diese mit Vertretern aller Kantone geführte Diskussion zeigte aber deutlich, dass die Prävention inzwischen das Potenzial einer Bundesaufgabe aufwies. So war es naheliegend, dass 1871 auf die Wuhrmillion ein Subventionsbeschluss folgte, mit dem der Bund jährlich 100 000 Franken für Wildbachverbauungen und Aufforstungen im gesamten Hochgebirge zur Verfügung stellte.

Die 1870er Jahre waren günstig für die Verankerung dieser neuen Aufgabe in der Bundesverfassung, rangen doch Zentralisten und Föderalisten seit 1865 um eine Verfassungsrevision. Während viele der zur Debatte stehenden neuen Bundeskompetenzen gestrichen wurden – ein Kompromiss angesichts der föderalistischen Gegner –, liessen sich das Wasserbau- und das Forstwesen ohne nennenswerte Diskussion mit Artikel 24 der Bundesverfassung von 1874 zentralisieren. 1876 folgte das eidgenössische Forstpolizeigesetz und 1877 das eidgenössische Wasserbaupolizeigesetz.

Der von Experten lange propagierte Philosophiewandel weg vom Fokus auf die grossen Flusskorrekturen hin zu Wildbachverbauungen und Aufforstungen erlebte damit nach 1868 den politischen Durchbruch. Nicht nur Werte und Normen sowie die Relevanz, die dem Thema beigemessen wurde, änderten sich, sondern darauf aufbauend auch die rechtlichen Normen, der administrative Aufbau und die Praxis der Verwaltungsstellen.

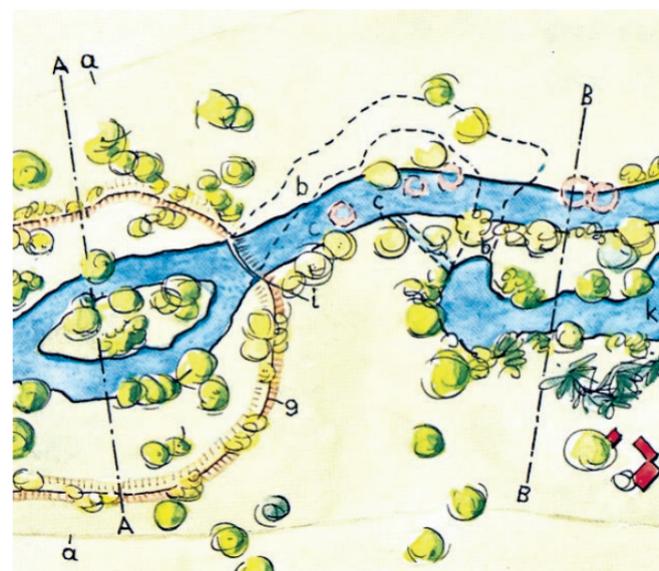
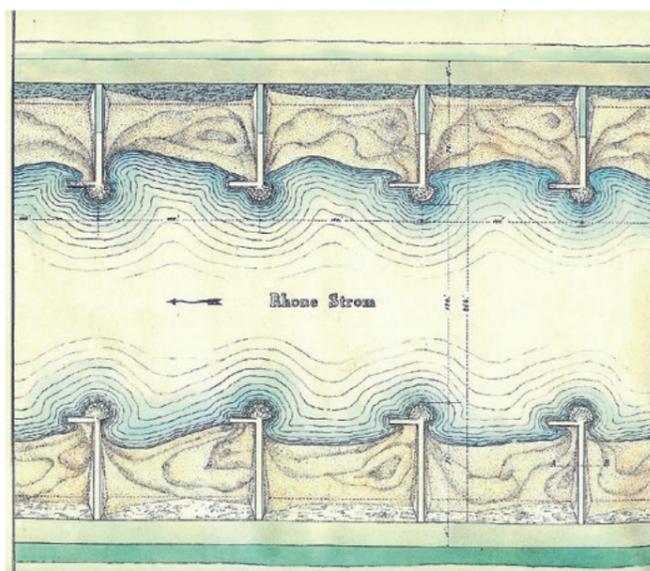


Abb. 63: Die Darstellung des engen Sporensystems, das im 19. Jahrhundert unter anderem an der Rhone angewendet wurde (Bild links), und des Konzepts «Mehr Raum den Fließgewässern» aus der Wegleitung «Hochwasserschutz an Fließgewässern» von 1982 (Bild rechts) zeigen deutlich den Wandel des Hochwasserschutzes vom 19. Jahrhundert bis heute.

Langfristedynamik: Seesedimente als Archive für Hochwasser

Als Folge von Hochwassern werden in Seesedimenten Flutlagen abgelagert. Diese Flutlagen lassen sich genau datieren, Seesedimente stellen also natürliche Klimaarchive dar, aus denen sich die Häufigkeit von Hochwassern in der Vergangenheit über Tausende von Jahren rekonstruieren lässt. Rekonstruktionen zeigen, dass die Häufigkeit von Hochwassern im Alpenraum während der letzten 10 000 Jahre in Phasen von kühlen und feuchten Sommern besonders hoch war. In den Südalpen und im Engadin ist das Hochwasser von 1868 in Flutlagen sehr gut sichtbar.

Seesedimente registrieren vergangene Hochwasser

Starkniederschläge im Einzugsgebiet eines Sees führen zu Oberflächenabfluss, Erosion sowie Mobilisierung und Transport von Sedimenten in den Zuflüssen. Im See angelangt, nimmt die Transportkraft der trüben Zuflüsse ab, und die Gesteinspartikel lagern sich auf dem Seegrund in Form von Flutlagen ab. Dabei sinken grosse und dichte Partikel schneller ab als kleine und leichte. Flutlagen haben typischerweise eine Mächtigkeit von einigen Millimetern bis einigen Zentimetern und werden innerhalb von Stunden rasch abgelagert (Abb. 64). Flutlagen sind daran zu erkennen, dass sie gegenüber der «normalen» Sedimentation generell eine grössere Körnung und eine Korngrössensortierung aufweisen: grobe Sandkörner lagern sich im See schneller ab als feinere Silt- und Tonkörner. Flutlagen unterscheiden sich von der normalen (ruhigen) Sedimentation auch in der chemischen Zusammensetzung, in der höheren Dichte und oftmals in einem tieferen Gehalt an organischem Kohlenstoff.

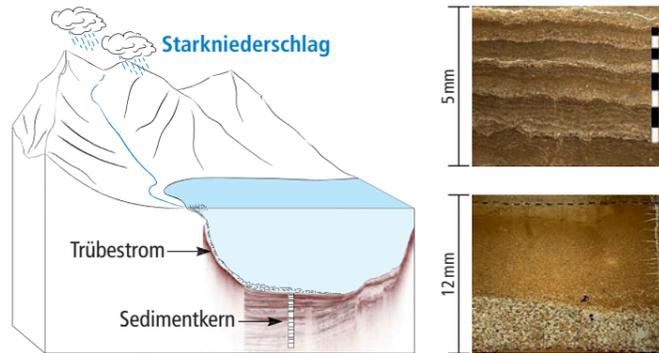


Abb. 64: Schema eines Einzugsgebiets mit der Ablagerung einer Flutlage und der Position eines Sedimentkerns (Diagramm links)¹²⁹; Sedimente aus dem Oeschinensee¹ zeigen (rechts oben) normale, ruhige Sedimentation mit vier Jahreslagen (die helle Schicht repräsentiert jeweils den Frühling mit der Schneeschmelze) und (rechts unten) eine 12 mm mächtige Flutlage mit groben Sandkörnern an der Basis und einem feinen Silt-/Tondeckel.¹²⁸

Lange Seesedimentkerne mit den eingelagerten Flutlagen lassen sich mittels Radionukliden (¹⁴C, ²¹⁰Pb) oder Zählung von Jahresschichten (Varven) genau datieren. Somit ist es möglich, aus Seesedimenten eine Chronologie von Hochwassern im jeweiligen Einzugsgebiet für Tausende von Jahren zu erstellen und daraus die Häufigkeit von Hochwassern über sehr lange Zeiträume zu errechnen (Abb. 65). Dabei gilt es zu beachten, dass Seen in tiefen Lagen (Mittelland und Poebene) Hochwasser in allen Jahreszeiten registrieren können, während Seen im Alpenraum nur Hochwasser in der warmen Jahreszeit aufzeichnen, wenn sie eisfrei sind. Weil ausserdem Niederschläge lokal und regional variieren können und die Bildung von Hochwassern stark von spezifischen Eigenschaften im jeweiligen Einzugsgebiet eines Sees (Grösse, Geologie, Topographie, Vegetationsbedeckung usw.) bestimmt wird, ist auch zu erwarten, dass die Hochwasserchronologie von See zu See unterschiedlich ausfällt. Der Lago Maggiore beispielsweise registriert bereits kleine Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von etwa 2 Jahren. Der Oeschinensee registriert Hochwasser mit einer Wiederkehrperiode von 5 bis 10 Jahren, der Silvaplanersee solche mit einer Wiederkehrperiode von durchschnittlich 10 bis 20 Jahren. Grosse regionale Hochwasser sind in der Regel gut abgebildet. In den Seen der Voralpen und im südlichen und nördlichen Alpenvorland reichen die

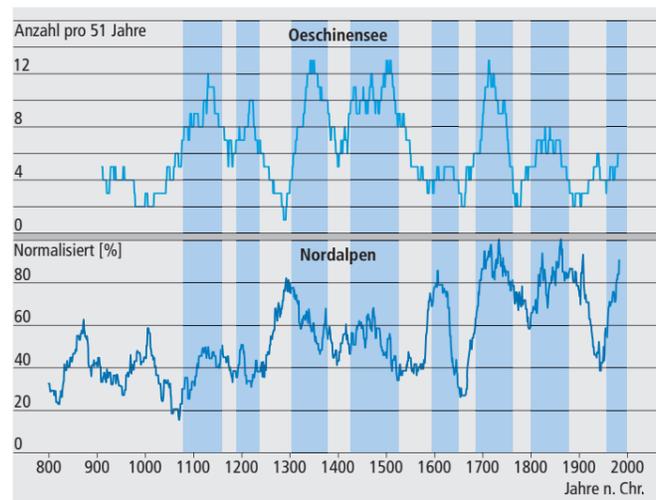


Abb. 65: Hochwasserhäufigkeit der letzten 1000 Jahre im Oeschinensee¹²⁸ und in den Nordalpen (Mittelwert aus 10 Seen).¹²⁹

Hochwasserrekonstruktionen bis 10 000 Jahre zurück. Zeigen mehrere Seen in einer Region unabhängig voneinander eine erhöhte Hochwasseraktivität kann man davon ausgehen, dass die Gründe dafür klimatischer Natur sind. Der Zusammenhang zwischen der Mächtigkeit einer Flutlage und der Grösse des Hochwassers ist nicht schlüssig und statistisch oft nicht signifikant. Mächtige Flutlagen deuten aber in der Regel auf grosse Hochwasser hin.

Die Langzeitdynamik von Hochwassern im Alpenraum

Im westlichen und zentralen Alpenraum gibt es mittlerweile rund zwei Duzend detaillierte Hochwasserrekonstruktionen aus Seesedimenten, die mehr als 1000 oder sogar bis 10 000 Jahre zurückreichen. Die Häufigkeit der Hochwasser (Anzahl Hochwasser pro 50 oder 100 Jahre) zeigt über die letzten 1000 Jahre eine ausgeprägte multidekadische Variabilität. Das 20. Jahrhundert war insgesamt eine relativ ruhige Periode. Die Rekonstruktionen zeigen sehr konsistent, dass Hochwasser im Alpenraum und im nördlichen und südlichen Vorland während Perioden mit kühlen und feuchten Sommern am häufigsten waren. Das ist besonders deutlich erkennbar während der Kleinen Eiszeit mit Spitzenwerten in der Hochwasseraktivität im 14., 15. und 18. Jahrhundert (Abb. 65). Auch das 19. Jahrhundert wies eine sehr hohe Hochwasserhäufigkeit auf. Aus den französischen Alpen gibt es vereinzelt Hinweise, dass Hochwasser in warmen und trockenen Perioden zwar seltener, aber in der Intensität stärker waren. Gut dokumentiert ist im Oeschinensee eine Periode in der ersten Hälfte des 13. Jahrhunderts, die ausnahmsweise häufige Flutlagen während einer Phase mit generell warmen und trockenen Sommern zeigt. Dieses Hochwassermaximum zu Beginn des 13. Jahrhunderts fehlt in den Rekonstruktionen aus den Vorlandseen und in den östlichen Schweizer Alpen, was darauf hindeutet, dass es sich beim Oeschinensee um lokale Hochwasser aus konvektiven Sommergewittern in den Hochalpen gehandelt haben könnte. Modellrechnungen zeigen, dass in zukünftigen Klimaszenarien im Alpenraum mit ähnlichen Prozessen zu rechnen ist.

Bei der Betrachtung der letzten 10 000 Jahre (Abb. 66) ist eine gewisse Vorsicht geboten, weil auch anthropogene Einflüsse wie Abhol-

zung und Beweidung und die damit verbundenen Änderungen der Landnutzung und Vegetationsbedeckung die Hochwasserfrequenz beeinflussen können.¹³⁰ So überlagern sich oftmals massive Landnutzungsänderungen in der Bronzezeit mit Klimaänderungen hin zu feuchteren und kühleren Bedingungen mit Gletschervorstössen im 2. Jahrtausend v. Chr. Die Ursachen für erhöhte Hochwasserhäufigkeiten sind damit sehr komplex und schwer auseinanderzuhalten. In der Summe kann aber auch hier festgehalten werden, dass sowohl in den Südalpen wie auch in den Nordalpen Hochwasser während kühlen Klimaphasen im Holozän häufiger waren.

Eine quantitative Untersuchung mit 2000 Varvenjahren (Bronzezeit bis Ende Römerzeit) aus dem Silvaplanersee¹ im Engadin hat gezeigt, dass eine langfristige Abkühlung der sommerlichen Mitteltemperaturen um 1 Grad Celsius zu einer Vervierfachung der Frequenz von Flutlagen geführt hat.¹³¹ Für die Südalpen kann festgehalten werden, dass die Hochwasserfrequenz im Früh- und Mittelholozän sehr tief war und vor rund 4000 Jahren (Frühbronzezeit) rasch und signifikant anstieg. Spitzenwerte wurden vor rund 2600 Jahren, im 10. Jahrhundert sowie während der Kleinen Eiszeit erreicht. In den Nordalpen ging die Hochwasserhäufigkeit vom Frühholozän bis ins mittelholozäne Wärmeoptimum leicht zurück. Die Rekonstruktionen zeigen einen graduellen, aber deutlichen Anstieg ab der späten Bronzezeit mit mehreren Maxima während der Kleinen Eiszeit. Auch in der Perspektive der letzten 10 000 Jahre zeigt sich eine starke multidekadische und Jahrtausend-Variabilität in der Hochwasseraktivität. Verschiedene Autoren brachten Erstere mit Schwankungen der Sonnenaktivität und Letztere mit Schwankungen der Erdbahnparameter in Zusammenhang. Andere Autoren vermuten in der multidekadischen Variabilität der Hochwasserhäufigkeit auf der Alpennordseite eher einen Zusammenhang mit Meeresoberflächentemperaturen im Nordatlantik (atlantische multidekadische Oszillation AMO, vgl. S. 43) oder der nordatlantischen Oszillation NAO.

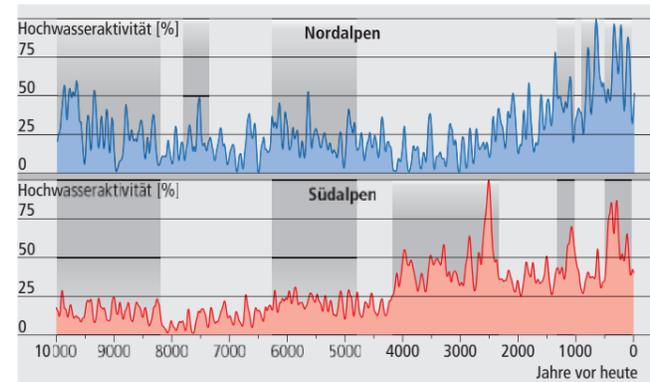
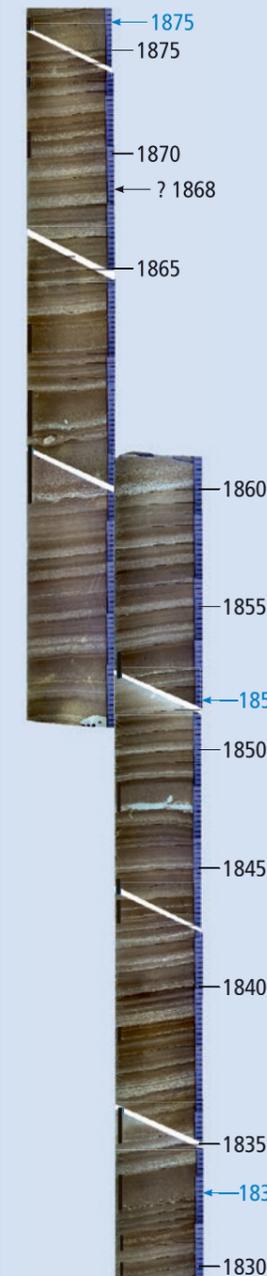


Abb. 66: Hochwasserhäufigkeit in den Nord- (10 Seen) und den Südalpen (5 Seen) während der letzten 10 000 Jahre.¹³⁰

Das Hochwasser von 1868 in Seesedimenten

Das Oktober-Hochwasser von 1868 ist in den Sedimenten des Palanza-Beckens vom Lago Maggiore (vgl. Abb. 5) und im Silvaplanersee im Engadin deutlich abgebildet. Im Lago Maggiore handelt es sich bei der 12 Millimeter mächtigen Flutlage von 1868 um die mächtigste Flutlage der instrumentellen Periode. Sie ist in rund 71 Zentimeter Sedimenttiefe zu finden. Der Seespiegel war 6,94 Meter höher als im Mittel, und die Herkunft der Sedimente deutet darauf hin, dass das Hochwasser vor allem vom Fluss Toce aus dem Valle d'Ossola kam.¹³² Im Silvaplanersee ist die Flutlage von 1868 nur 2 Millimeter mächtig und somit deutlich kleiner als diejenigen der Hochwasser von 1888 (4 mm) und insbesondere des starken überregionalen Hochwassers vom August 1834 (12 mm). In den Sedimenten des Silvaplanersees sind ebenfalls die kleineren Hochwasser von 1850, 1860, 1871 und 1874 (insgesamt 9 Hochwasser zwischen 1850 und 1900) registriert. Sie sind alle durch lokale historischen Dokumente belegt.¹³³ Die über-



regionalen Hochwasser vom Februar und September 1862 fehlen im Silvaplanersee, weil – gemäss den Dokumentenaufzeichnungen – die Niederschläge in höheren Lagen als Schnee fielen und somit im Fextal (Hauptzufluss zum Silvaplanersee) wohl nicht zu einem hohen Abfluss führten.

Auf der Alpennordseite liegen negative Befunde für eine Flutlage von 1868 aus Süddeutschland (Ammersee) vor sowie aus dem Toggenburg (Schwendisee), dem Berner Oberland (Oeschinensee) und den französischen Alpen (Lac Blanc bei Grenoble). Dafür sind im Oeschinensee die grossen Hochwasser von 1834, 1852 und 1860 gut abgebildet (Abb. 67). Das Jahr 1868 zeigt nichts Besonderes.

Abb. 67: Flutlagen im Oeschinensee 1830–1875.¹²⁸

Starkniederschlag und Hochwasser seit Messbeginn

Die an anderer Stelle in diesem Heft vorgestellten Faktoren, die Hochwasser verursachen können, wandeln sich über die Zeit. Gewässer, Landnutzung, Böden und Vegetation verändern sich, Siedlungsräume breiten sich aus. Nicht zuletzt verändert sich das Klima. In den letzten 100 bis 200 Jahren, also seit systematische Messungen durchgeführt werden, haben sich diese Faktoren überlagert.

Veränderung der Hochwasserhäufigkeit

Die hundertjährige Reihe des maximalen jährlichen Abflusses der Aare in Bern (Abb. 68) zeigt besonders in den letzten 20 Jahren hohe Spitzenabflüsse. Die fünf höchsten Werte – 1999, 2005 (vgl. S. 8), 2015, 2007 und 2004 – stammen alle aus den letzten 20 Jahren. Ist dies auf den Einfluss der Klimaerwärmung zurückzuführen? Tatsächlich verzeichnen insbesondere alpine Flüsse einen Anstieg der Jahresspitzenabflüsse,¹³⁴ der auf die wärmeren Temperaturen und die dadurch bedingte höhere Nullgradgrenze zurückgeführt werden kann. Europäische Studien zeigen hingegen, dass sich zwar die Hochwassersaison geändert hat,¹³⁵ ein genereller Trend zu mehr Hochwassern liess sich jedoch nicht finden.¹³⁶

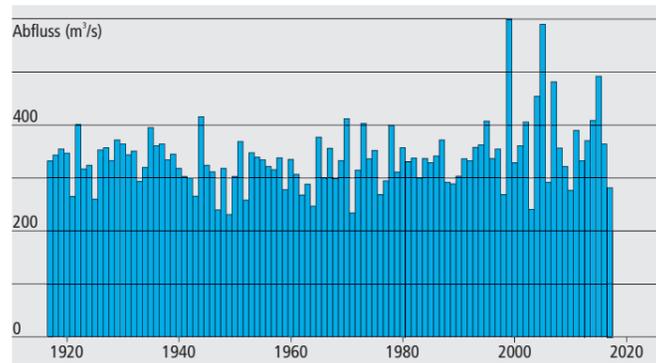


Abb. 68: Jährlicher maximaler Abfluss der Aare in Bern (Schönau): Trend oder nicht? (Daten: BAFU).

Veränderung der Starkniederschläge

Wie beeinflusst der Klimawandel die Abflussspitzen? In der Schweiz hat die Temperatur seit 1900 um etwa 1,5 Grad Celsius zugenommen.¹³⁷ Dies verändert direkt die Schneeschmelze, die früher eintritt, und sorgt für weniger Schnee und mehr Regen im Winter, wodurch je nach Abflussregime der Jahresgang des Abflusses ausgeglichener wird.¹³⁸ Für die Hochwasser dürfte diese Entwicklung allerdings nur eine geringe Rolle spielen. Wichtiger ist hier vor allem die Tatsache, dass wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen kann als kältere, und zwar um etwa 7 Prozent mehr pro Grad Celsius Erwärmung. Wenn alle anderen Faktoren gleich bleiben, müsste dies zu stärkeren Niederschlagsereignissen führen. Zwar nimmt der mittlere Niederschlag in der Schweiz seit 1901 nicht deutlich zu, aber die jährlichen maximalen Niederschläge haben zwischen 1901 und 2014 an gut 90 Prozent der Schweizer Stationen zugenommen, und zwar um meist 5 bis 20 Prozent (Abb. 70). Dies entspricht recht genau der aus der Theorie erwarteten Beziehung.¹³⁹ Starke Niederschläge sind zwischen 1901 und 2014 nicht nur intensiver, sondern auch häufiger geworden, und dies um meist 10 bis 50 Prozent (Abb. 70). Das heisst, dass Ereignisse, die sich Anfang des 20. Jahrhunderts etwa dreimal pro Jahr ergaben, heute etwa viermal pro Jahr auftreten.

Dekadische Schwankungen

Neben der langfristigen Veränderung zeigt das Klima aber auch Schwankungen auf der Skala von Jahrzehnten (vgl. Box). Diese sind besonders bei der Temperatur ausgeprägt. So waren in der Schweiz die 1940er Jahre warm, die 1960er Jahre kühl. Auch die Hochwasserhäufigkeit zeigt Schwankungen auf der Skala von Jahrzehnten (vgl. S. 40). Hochwasserereignisreiche und -arme Phasen wechseln sich ab. Die Ursache für diese Häufung ist noch unbekannt.⁸² So zeigte sich

Multidekadische Variabilität

Warum gibt es Schwankungen im Klimasystem über Jahrzehnte? Die Ursache dafür wird oft im Ozean gesucht. Der ist zum einen ein riesiger Wärmespeicher. Er gleicht kurzfristige Temperaturschwankungen aus und gibt das geglättete Signal zurück an die Atmosphäre. Zum anderen ist der Ozean selber in Bewegung und transportiert Wärme. Es zeigt sich, dass Meeresoberflächentemperaturen auf Zeitskalen von Jahrzehnten schwanken und damit das globale Klima beeinflussen. Die beiden wichtigsten Klimaschaukeln der Ozeane auf dieser Zeitskala sind die Pazifische Dekadale Oszillation (PDO) und die Atlantische Multidekadale Oszillation (AMO).

Die PDO ist eng verknüpft mit dem El-Niño-Phänomen im Pazifik. Wenn über rund 20 Jahre El-Niño-Ereignisse häufig vorkommen, dann ist dies der Ausdruck einer positiven PDO. Die AMO ist nichts anderes als die Temperatur des Nordatlantiks, die ausgeprägte multidekadale Schwankungen zeigt (Abb. 69). PDO und AMO beeinflussen die globale Temperatur. So war eine negative PDO-Phase in den 2000er Jahren zu einem grossen Teil dafür verantwortlich, dass die Erderwärmung etwas langsamer wurde – und sich dann um 2015 wieder abrupt beschleunigte.

Die AMO hat Auswirkungen auf Hurrikane, auf die Monsune in Indien und Afrika, aber auch auf Hitzewellen und Dürren in Europa.¹⁴⁰ Die Maximalphase der AMO in den 1940er Jahren ging mit heissen Sommern und verheerenden Dürren in Mitteleuropa einher – es kam zu Hitzerekorden, die erst 2003 gebrochen wurden.¹⁴¹ Ob sich die AMO und PDO auch auf Starkniederschlagsereignisse auswirken, ist nicht bekannt.

Allgemein können dekadale Variabilitätsmodi die Risikoabschätzungen aber beträchtlich beeinflussen. Oft werden nämlich die Beobachtungen der letzten 30 Jahre als Basis von Schätzungen für die nächsten 30 Jahre herangezogen. Würden wir dies beim AMO-Index tun, lägen wir systematisch daneben (Abb. 69). Dies zeigt, dass man entweder dekadale Schwankungen berücksichtigen oder lange Zeiträume betrachten sollte.

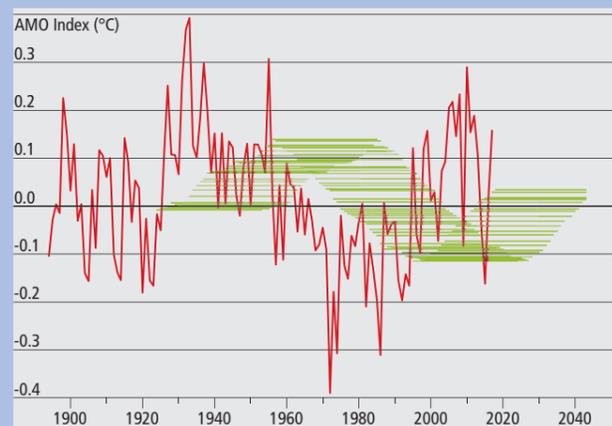


Abb. 69: Der AMO-Index (Meeresoberflächentemperatur des Nordatlantiks nach Abzug des globalen Mittels, rot) sowie Vorhersagen davon (grün), bei denen jeweils das Mittel der vorangegangenen 30 Jahre als Vorhersage für die nächsten 30 Jahre genommen wurde.

im 19. Jahrhundert eine Häufung von Hochwassern (vgl. rechts), die auch zu politischen Diskussionen führte, nicht nur in der Schweiz.¹⁴² Dagegen war die Zeit zwischen ungefähr 1920 und 1980 eher hochwasserarm.⁵ In diese Zeit fielen auch der Wirtschaftsaufschwung nach dem zweiten Weltkrieg, die Ausdehnung der Siedlungsfläche und die Errichtung grosser Infratrakturanlagen.¹⁴³ Hochwasser traten damit während einer für die Gegenwart wichtigen Phase in den Hintergrund. Mit den Hochwassern von 1978 und 1987 begann wieder eine Zeit mit häufigeren Hochwassern (vgl. S. 38).

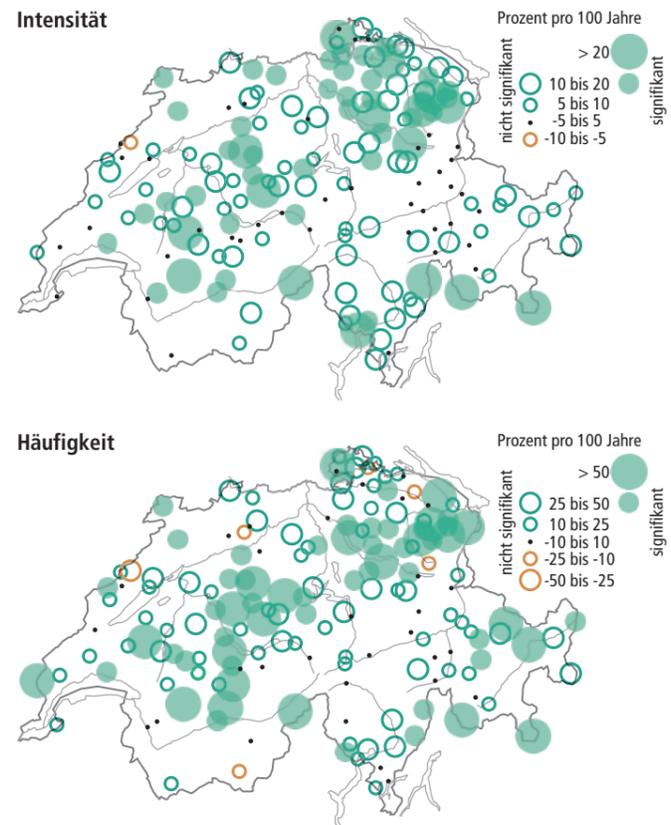


Abb. 70: Trend (in Prozent pro Jahrhundert) der Intensität (oben; jährlicher maximaler Tagesniederschlag) und der Häufigkeit (unten; Tage über dem 99. Perzentil des Tagesniederschlags) an Stationen von MeteoSchweiz, 1901–2014.¹³⁹



Abb. 71: Zeitgleich mit dem Aufschwung der 1950er Jahre rückten Hochwasser in den Hintergrund. Ein neuer Lebensstil kam auf. Stellvertretend dafür zeigt das Bild einen Campingplatz. Oft wurden diese auf hochwassergefährdeten Flächen errichtet.

Häufung von Hochwassern im 19. Jahrhundert

Im Jahr 1834 wurden die Kantone Wallis, Graubünden, Tessin, Uri und Glarus von schweren Hochwassern heimgesucht. 1837 wurde das Emmental Schauplatz eines Jahrhunderthochwassers (vgl. S. 13). 1852 erreichte die Aare den höchsten je verzeichneten Stand. Bereits nach dem Hochwasser von 1868 mehrten sich Stimmen, Hochwasser seien häufiger geworden. Weitere Hochwasser folgten 1876 (Abb. 72), 1881 und 1886.

Wie ist der Stand der Forschung diese Frage betreffend heute? Gab es überhaupt eine Häufung von Hochwassern, oder ist dies der zeitgenössischen Wahrnehmung geschuldet? Und was war deren Ursache? Diese Fragen sind noch heute aktuell, nicht nur für die Interpretation vergangener, sondern auch für die Beurteilung künftiger Hochwasser. Denn wenn es Schwankungen der Hochwasserhäufigkeit in der Vergangenheit gab, wird es sie auch in Zukunft geben.

Die Häufung von Hochwassern im 19. Jahrhundert ist eine Tatsache, wenngleich Hochwasser oft nur einzelne Einzugsgebiete betrafen (Abb. 73 zeigt die Hochwasserreihe des Rheins in Basel sowie die maximalen Seespiegel des Bodensees und des Lago Maggiore).³² Dies dürfte mindestens teilweise an der atmosphärischen Zirkulation liegen. Hochwasseranfällige Wetterlagen (vgl. S. 8) waren im 19. Jahrhundert häufiger als im 20. Jahrhundert (Abb. 73). Die Ursache dafür bleibt aber bisher unbekannt.



Abb. 72: Hochwasser in Schaffhausen, 1876.

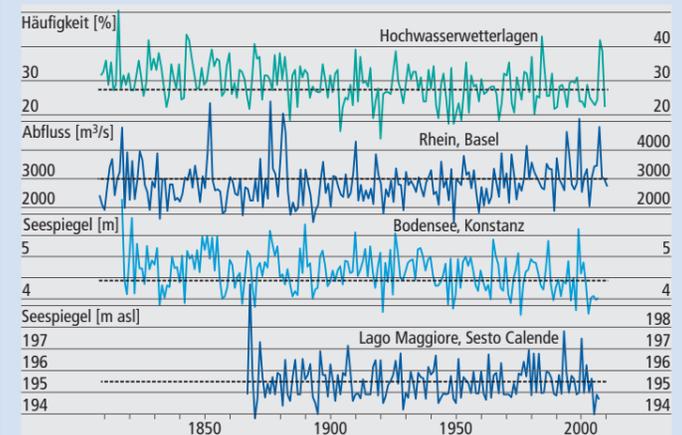


Abb. 73: Jährlicher maximaler Abfluss des Rheins in Basel sowie maximale Seespiegel des Bodensees und des Lago Maggiore.³² Die oberste Linie zeigt die Häufigkeit der Wetterlagen¹⁴ «Nord, zyklonal» und «West über Südeuropa, zyklonal» (Mai–Okt.), die für Hochwasser auf der Alpennordseite typisch sind (gestrichelt: Mittel 1951–2000).

Hochwasser am Ende des 21. Jahrhunderts

Die Veränderung der verschiedenen hochwasserbeeinflussenden Faktoren wird weitergehen, Hochwasserhäufigkeit und -schäden werden sich ändern. Wie stark sich diese Änderungen ausprägen, hängt davon ab, wie Menschen in der Zukunft mit der Hochwassergefahr umgehen und in Gewässer und Gerinne eingreifen. Es hängt auch davon ab, wie sich die Landnutzung entwickelt, aber auch von natürlichen Prozessen, die Böden und Vegetation betreffen. Ganz sicher wird sich das Klima grundlegend wandeln. Können wir die daraus resultierenden Folgen abschätzen?

Eine wichtige Rolle wird die künftige Entwicklung der durch den Menschen eingebrachten Treibhausgase spielen. Je nach politischen Entscheidungen, die wir treffen, wird die zusätzliche Erwärmung stärker oder schwächer ausfallen. Im Falle von starken globalen Klimaschutzanstrengungen liesse sich der globale Temperaturanstieg zum Ende des 21. Jahrhunderts bei 1,5 bis 2 Grad Celsius gegenüber dem vorindustriellen Klima stabilisieren. Im Falle von weiter steigenden globalen Treibhausgasemissionen dürfte die globale Temperatur um ca. 3,5 Grad Celsius (gegenüber 1986–2005) zunehmen.¹⁴⁴ In der Folge betrachten wir genau dieses Szenario mit starker Veränderung (IPCC-Szenario RCP8.5). Dabei betrachten wir insbesondere die Auswirkungen, die ein solcher globaler Temperaturanstieg auf den Niederschlag und den Abfluss in der Schweiz haben wird.

Auf der regionalen Skala sind Abschätzungen der zukünftigen Klimaentwicklungen mit grossen Unsicherheiten verbunden. Dies gilt insbesondere für den Niederschlag, dessen korrekte Simulation auch durch ein unzureichendes Prozessverständnis zum Beispiel bei den Wolken erschwert wird. Die Auflösung von Modellen stösst zwar in einen Bereich vor, der es erlaubt, Konvektion und Wolkenbildung darzustellen, diese Entwicklung steht aber erst am Anfang.¹⁴⁵

Einige Veränderungen sind jedoch mit grösserer Sicherheit vorherzusagen, da sie eng mit der Temperatur gekoppelt sind. So wird nach dem Gesetz von Clausius-Clapeyron mit einer höheren Temperatur auch die Sättigungfeuchte stark ansteigen. Wir haben bereits festgestellt (vgl. S. 10), dass extreme Feuchtetransporte in Zukunft deutlich stärker ausfallen werden. Gleichzeitig wird sich die Nullgradgrenze noch weiter nach oben verschieben. Das bedeutet, dass erstens in Zukunft mehr Feuchte für Starkniederschläge vorhanden ist, zweitens Niederschlag vermehrt in Form von Regen anstelle von Schnee niedergeht und drittens im Frühling die Schneeschmelze früher eintritt. Zu diesen direkten Folgen eines Temperaturanstiegs kommen weitere, indirekte Effekte der Klimaänderung wie beispielsweise Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation (darunter Veränderungen der Wetterlagenhäufigkeiten). Ihre Folgen für die Schweiz: längere Trockenphasen lösen sich wahrscheinlich mit kurzen, aber heftigen Niederschlägen ab.

Die intensivsten Niederschläge werden weiter zunehmen. Als Beispiel zeigt Abbildung 74 die Veränderung des maximalen 5-Tages-Niederschlags über Europa im Sommer und Winter basierend auf aktuellen regionalen Klimasimulationen. In weiten Teilen Europas werden demnach die winterlichen Maximalniederschläge intensiver werden. Für die Alpen liegt dieser Anstieg bei etwa 15 Prozent. Auch die maximalen Tagesniederschläge eines Jahres werden zunehmen. Abbildung 75 zeigt dies für das Aare-Einzugsgebiet, hier mit statistischem Downscaling von globalen Modellen (CMIP5) ermittelt. Über alle Simulationen hinweg zeigt sich eine deutliche Verstärkung. Gleichzeitig wird sich die Saisonalität starker Niederschläge verändern. Während der maximale Tagesniederschlag im heutigen Klima oft im Hochsommer vorkommt, projizieren die Modelle eine Verschiebung in den Frühsommer respektive Frühherbst. Modelle, die für die Zukunft Sommertrockenheit vorhersagen, zeigen diesen Effekt stärker als andere. Vb-Zyklone, die heute oft im Juni und Juli auftreten, werden sich gemäss Simulationen gegen Ende des 21. Jahrhunderts in die Randmonate Mai und September verschieben.¹⁴⁶ Ausserdem zeigen die Klimasimulationen, dass die Zahl solcher Vb-Ereignisse in Zukunft abnehmen und damit die Häufigkeit dieser Wetterlage im Sommer reduziert wird.

Was bedeutet dies für Abfluss und Hochwasser? Der Abfluss des Rheins in Basel (Abb. 76) wird in Zukunft im Winter etwas höher aus-

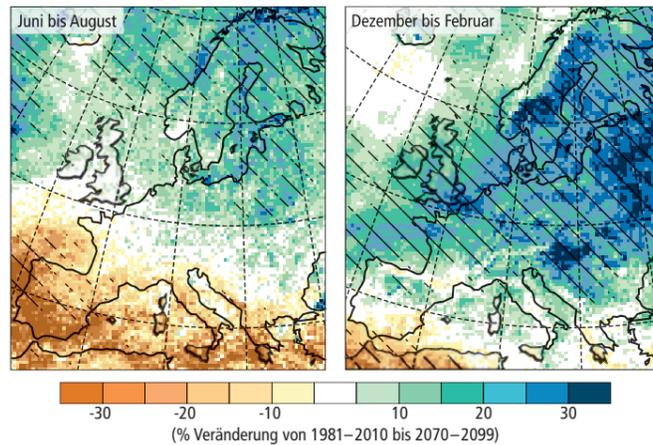


Abb. 74: Änderungen des maximalen 5-Tages-Niederschlags über Europa (in Prozent) für Winter und Sommer um 2070–2099 gegenüber heutigen Werten (1981–2010). Gezeigt sind die Medianänderungen über 15 regionale Klimamodelle von Euro-CORDEX auf einer Auflösung von ca. 12 km.¹⁴⁷

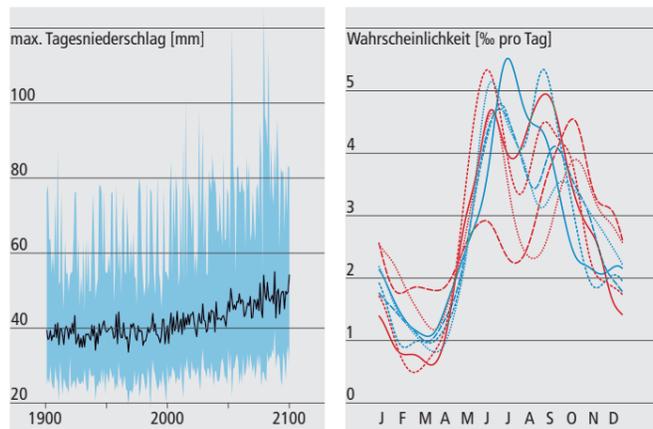


Abb. 75: Entwicklung der maximalen Tagesniederschläge pro Jahr für das Aare-Einzugsgebiet aus den CMIP5-Simulationen (dunkelblau: Mittelwert aller Simulationen, hellblau: Maxima und Minima) (links). Kalendertag des maximalen Tagesniederschlags eines Jahres in der Gegenwart (1971–2005, blau) und der Zukunft (rot, 2065–2099, unterschiedliche Strichsignaturen stellen unterschiedliche Modellensembles dar) (rechts).¹⁴⁸

fallen, während sich im Sommer die Sommertrockenheit bemerkbar macht. Spitzenabflüsse, die oftmals im Juni auftreten, könnten noch leicht stärker ausfallen, während im Hochsommer hohe Abflüsse deutlich seltener werden. In stark von der Gletscherschmelze beeinflussten Einzugsgebieten wird die zunehmende Schmelze temporär den Abfluss erhöhen – bis die Gletscher nahezu verschwunden sind und der durch ihr Schmelzen verursachte Abfluss zurückgeht.

Zur Zeit werden im Rahmen des National Center for Climate Services (NCCS) neue Klimaszenarien für die Schweiz erstellt (CH2018, www.klimaszenarien.ch). Diese erscheinen Ende 2018 und stellen die Grundlage dar für eine Reihe von Klimafolgenstudien. Darauf aufbauend werden auch neue hydrologische Szenarien gerechnet (Hydro-CH2018). Diese werden insbesondere auch die klimabedingten Veränderungen der Hochwasser beleuchten.

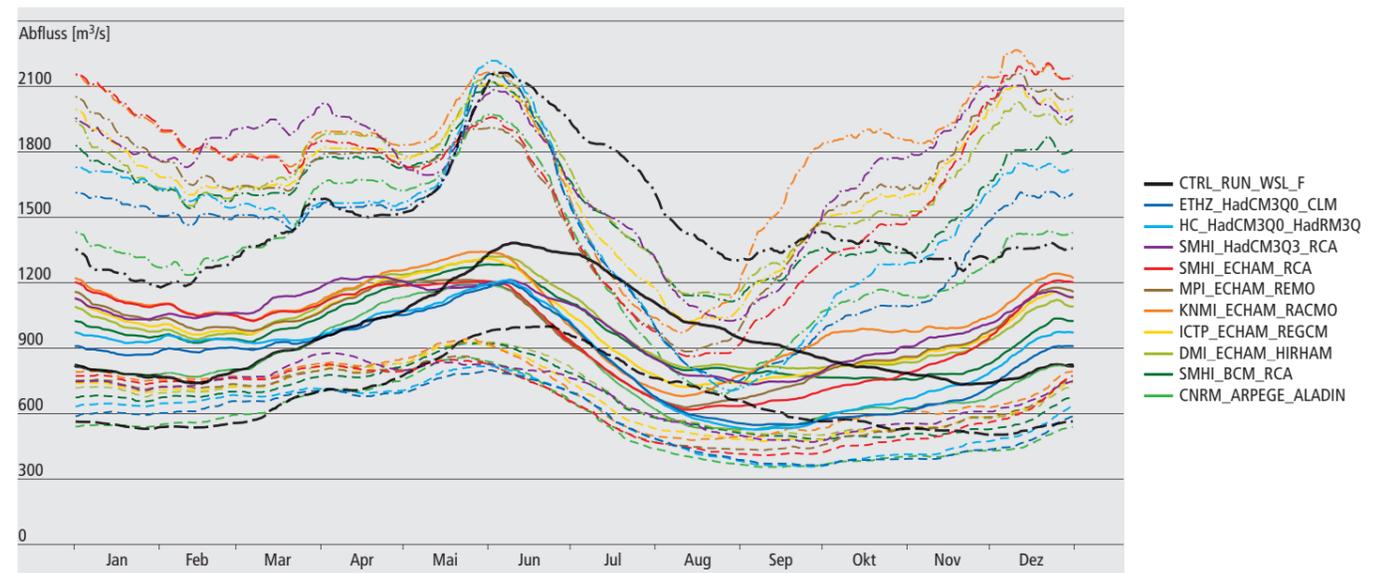


Abb. 76: Veränderung des Abflusses des Rheins in Basel. Darstellung der 10- (gestrichelt), 50- (durchgezogen) und 90-Perzentile (Punkt-Strich) für die Kontrollperiode (1980–2010, schwarz) und für zehn Klimaszenarien (farbig) für die Zeit um 2085.¹⁴⁹

Wie wir in diesem Bericht gesehen haben, tragen aber noch viele weitere Faktoren zu Hochwasser und Hochwasserschäden bei. Neben dem Klima wird sich auch die Landoberfläche verändern. So wird sich die Landnutzung weiterentwickeln, und anthropogene Eingriffe in Gerinne und Seerausflüsse sind wahrscheinlich. Berücksichtigt werden muss auch die Umgestaltung der Kulturlandschaft und die zunehmende Versiegelung der Böden, die das Abflussverhalten verändern. Schliesslich wandelt sich auch das Schadenspotenzial.

Als einfache Veranschaulichung der möglichen zukünftigen sozioökonomischen Veränderungen zeigt Abbildung 77 drei Szenarien für die Bevölkerungsentwicklung der Schweiz. Die ständige Wohnbevölkerung wird bis 2045 auf 9,4 bis 11,0 Millionen zunehmen. Damit steigt auch der Flächenbedarf; je nach Verdichtung sogar ungleich stärker. Abbildung 78 zeigt eines von vier in einem Nationalen Forschungs-

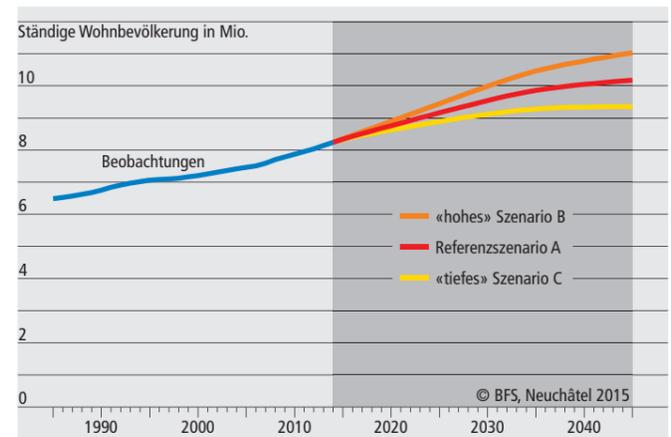


Abb. 77: Szenarien der Bevölkerungsentwicklung in der Schweiz bis 2045.¹⁵⁰

programm entwickelten Szenarien für die Siedlungsentwicklung der Schweiz. Der Siedlungsflächenzuwachs wird in diesem Szenario prozentual noch stärker ausfallen als der Bevölkerungszuwachs.

Gleichzeitig könnte durch eine vorausschauende Planung, durch Kartierung und Ausscheidung von Gefahrenzonen einer Ausbreitung des Siedlungsraums in gefährdete Gebiete entgegengewirkt werden, und durch flussbauliche Massnahmen liesse sich die Situation in manchen Gefahrengebieten verbessern. Durch bessere Prävention und Vorhersage, aber auch durch Warnsysteme und besseren Objektschutz könnten Schäden verringert werden. Das Wissen ist vorhanden – wir haben die künftige Hochwassersituation in der Schweiz also zum Teil selbst in der Hand. Gut möglich, dass – wie 1868 – einzelne Hochwasserereignisse diese notwendigen Schritte auslösen werden.

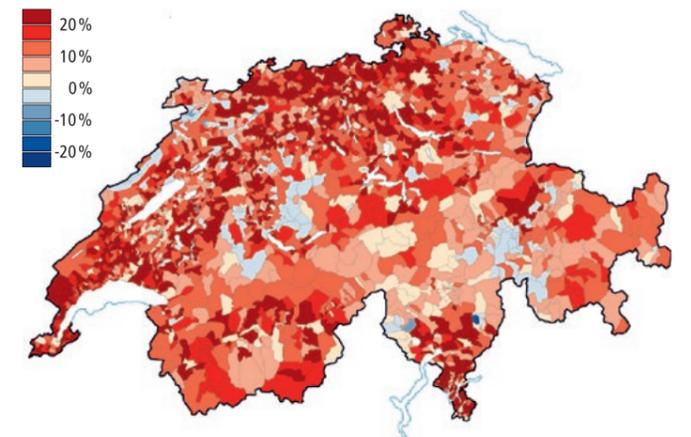


Abb. 78: Siedlungsflächenzuwachs von 2000 bis 2030 nach Szenario B (Metropolitane Expansion) der Siedlungsentwicklung der Schweiz.¹⁵¹

Im Herbst 1868 – vor genau 150 Jahren – waren Teile der Schweiz von schweren Hochwassern betroffen. Zwei Starkniederschlagsphasen am 27. und 28. September und vom 1. bis 5. Oktober liessen zahlreiche Flüsse und Seen über die Ufer treten. Die Bewältigung der enormen Schäden, die Verwaltung der umfangreichen Spenden und die Frage, wie sich solche Ereignisse in Zukunft verhindern lassen, waren für den jungen Bundesstaat eine grosse Herausforderung. Und sie stellten Weichen für den künftigen Umgang mit Naturkatastrophen.

Heute erlauben neue Methoden die detaillierte Rekonstruktion der Niederschlagsereignisse und der Überschwemmungen, während aus historischer Sicht die Bewältigung bewertet werden kann. Ein interdisziplinäres Forschungsprojekt des Oeschger-Zentrums für Klimaforschung der Universität Bern und des Mobiliar Labs für Naturrisiken, in Zusammenarbeit mit MeteoSchweiz, der Firma Meteotest und der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft ist in den letzten zwei Jahren diesen Fragen nachgegangen. Der meteorologische Hintergrund des Ereignisses ist verstanden und kann grossräumig recht gut rekonstruiert werden. Auch die lokale Wettersituation und die eingebetteten Gewitter lassen sich abbilden. Die Naturrisikoforschung bedient sich heute oft Modellketten, um Naturereignisse und deren Folgen nachzubilden und dann die Rolle einzelner Faktoren zu studieren. Dies ist auch für das 150 Jahre zurückliegende Hochwasser möglich. Die hydrologische Modellierung zeigt, dass aufgrund der während dieses Ereignisses eingetretenen Erosion ein derart hoher Seespiegel des Lago Maggiore wie 1868 heute nicht mehr erreicht werden könnte. Die hydraulische Modellierung schliesslich kann das Überflutungsgebiet sowie die gefährdeten Häuser in diesem Gebiet aufzeigen. Solche Simulationen sind wichtig und lehrreich, um auslösende Faktoren beurteilen und das Hochwasserereignis mittels Was-wäre-wenn-Szenarien besser verstehen zu können. Bei der Beurteilung von Schäden zeigt sich, dass auch langfristige Wirkungen einzubeziehen sind. Die Analyse der Bewältigung der Folgen des Hochwassers durch die Gesellschaft legt dar, wie sich Bund und Kantone organisieren mussten und welche weiteren Massnahmen angestossen wurden. Wie sich gezeigt hat, ist es insbesondere wichtig, in welches gesellschaftliche und politische Umfeld ein Hochwasserereignis wie jenes von 1868 fällt, damit es auf der politischen Ebene ein Umdenken in Gang zu setzen und langfristig die Weichen neu zu stellen vermag.

Das schwere Hochwasser von 1868 wirkt bis heute nach. Siedlungsflächen, Flussverbauungen, Bergwälder – die Schweiz sähe ohne das Ereignis von 1868 heute anders aus. Gleichzeitig lässt sich aus dem Ereignis auch für die Zukunft lernen, wie wir mit neuartigen Hochwassern umgehen können. Mit der Zunahme der Niederschlagsintensität als Folge des Klimawandels kommen hier vermutlich neue Herausforderungen auf uns zu. Und es werden wohl auch in Zukunft einzelne Ereignisse sein, die neuen Ansätzen im Hochwasserschutz zum Durchbruch verhelfen und so die Schweiz von übermorgen mitgestalten werden.



Abb. 79: Hochwasser am Vierwaldstättersee, 2005.

Endnoten

¹ Karte der im Text erwähnten Orte.



- ² Die diesem Bericht zu Grunde liegenden Arbeiten wurden unterstützt durch das Oeschger-Zentrum für Klimaforschung der Universität Bern, durch den Schweizerischen Nationalfonds (Projekte EXTRA-LARGE und CHIMES) und durch das Bundesamt für Umwelt und das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI (Projekt EXAR).
- ³ Arpagaus, J. B. (1870) Das Hochwasser des Jahres 1868 mit besonderer Berücksichtigung des Kantons Graubünden. Denkblätter. Chur, Senti & Casanova.
- ⁴ Summermatter, S. (2005) Die Überschwemmungen von 1868 in der Schweiz. Unmittelbare Reaktion und längerfristige Prävention mit näherer Betrachtung des Kantons Wallis. Nordhausen, T. Bautz.
- ⁵ Pfister, C. (2009) Die «Katastrophenlücke» des 20. Jahrhunderts und der Verlust traditionellen Risikobewusstseins. GAIA 18, 239–246.
- ⁶ Vischer, D. (2003) Die Geschichte des Hochwasserschutzes in der Schweiz. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 5, Bern.
- ⁷ Pfister, C., D. Brändli (1999) Rodungen im Gebirge – Überschwemmungen im Vorland: Ein Deutungsmuster macht Karriere, in: Sieferle, R. P. und H. Breuninger (Hrsg.) Natur-Bilder: Wahrnehmungen von Natur und Umwelt in der Geschichte. Frankfurt/New York, Campus Verlag, 297–321.
- ⁸ Gerstengarbe, P. C., F.-W. Werner, U. Rüge (1999) Katalog der Großwetterlagen Europas – nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Vol. 138.
- ⁹ Lamb, H. H. (1972) British Isles weather types and a register of daily sequence of circulation patterns, 1861–1971. *Geophysical Memoir* 116, London, HMSO.
- ¹⁰ MeteoSchweiz (2015) Typische Wetterlagen im Alpenraum. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz.
- ¹¹ Schiemann R., C. Frei (2010) Wetterlagen und Niederschlagsverteilung im europäischen Alpenraum. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.8.
- ¹² Stucki, P., R. Rickli, S. Brönnimann, O. Martius, H. Wanner, D. Grebner, J. Luterbacher (2012) Five weather patterns and specific precursors characterize extreme floods in Switzerland. *Meteorol. Z.* 21, 531–550.
- ¹³ Wehry, W. (1967) Hochwasser-Wetterlagen in den Alpen. In: Schram, K., J. C. Thams (Hrsg.): Neunte Internationale Tagung für Alpine Meteorologie, Brig und Zermatt, 14.–17. September 1966. Veröffentlichungen der SMA, Nr. 4.
- ¹⁴ Schwander, M., S. Brönnimann, G. Delaygue, M. Rohrer, R. Auchmann, Y. Brugnara (2017) Reconstruction of Central European daily weather types back to 1763. *Int. J. Climatol.* 37, 30–44.
- ¹⁵ Giannakaki, P., O. Martius (2015) Synoptic-scale flow structures associated with extreme precipitation events in northern Switzerland. *Int. J. Climatol.* 36, 2497–2515.
- ¹⁶ Van Bebber, W. (1891) Die Zugstrassen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875–1890. *Meteorol. Z.* 8, 361–366.
- ¹⁷ Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2015) Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe. *Earth Syst. Dyn.* 6, 541–553.
- ¹⁸ Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2017) Sensitivity experiments on the response of Vb cyclones to sea surface temperature and soil moisture changes, *Earth Syst. Dyn.* 8, 477–493.
- ¹⁹ MeteoSchweiz (2006) Starkniederschlagsereignis August 2005. *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz* 211.
- ²⁰ Massacand, A. C., H. Wernli, H. C. Davies (1998) Heavy precipitation on the alpine southside: An upper-level precursor. *Geophys. Res. Lett.* 25, 1438.
- ²¹ Martius, O., E. Zenklusen, C. Schwierz, H. C. Davies (2006) Episodes of Alpine heavy precipitation with an overlying elongated stratospheric intrusion: A climatology. *Int. J. Climatol.* 26, 1149–1164.
- ²² Wernli, H., M. Sprenger (2007) Identification and ERA-15 Climatology of Potential Vorticity Streamers and Cutoffs near the Extratropical Tropopause. *J. Atmos. Sci.* 64, 1569–1586.
- ²³ Barton, Y., P. Giannakaki, H. von Waldow, C. Chevalier, S. Pfahl, O. Martius (2016) Clustering of Regional-Scale Extreme Precipitation Events in Southern Switzerland. *Mon. Weather Rev.* 144, 347–369.

- 24 Piaget, N., P. Froidevaux, P. Giannakaki, F. Gierth, O. Martius, M. Riemer, G. Wolf, C. M. Grams (2015) Dynamics of a local Alpine flooding event in October 2011: Moisture source and large-scale circulation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 1922–1937.
- 25 Compo, G. P. et al. (2011) The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **137**, 1–28.
- 26 Sodemann, H., E. Zuber (2010) Seasonal and inter-annual variability of the moisture sources for Alpine precipitation during 1995–2002. *Int. J. Climatol.* **30**, 947–961.
- 27 Martius, O., E. Zenklusen, C. Schwierz, H. C. Davies (2006) Episodes of Alpine Heavy Precipitation with an Overlying Elongated Stratospheric Intrusion: A Climatology. *Int. J. Climatol.* **26**, 1149–1164.
- 28 Froidevaux, P., O. Martius (2016) Exceptional integrated vapour transport toward orography: an important precursor to severe floods in Switzerland. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **142**, 1997–2012.
- 29 Dacre, H. F., P. A. Clark, O. Martinez-Alvarado, M. A. Stringer, D. A. Lavers (2015) How Do Atmospheric Rivers Form? *Bull. American Meteor. Soc.* **96**, 1243–1255.
- 30 Lavers, D. A., F. Pappenberger, E. Zsoter (2014) Extending medium-range predictability of extreme hydrological events in Europe. *Nature Commun.* **5**, 5382.
- 31 Aemisegger, F., S. Pfahli, H. Sodemann, I. Lehner, S. I. Seneviratne, H. Wernli (2014) Deuterium excess as a proxy for continental moisture recycling and plant transpiration. *Atmos. Chem. Phys.* **14**, 4029–4054.
- 32 Stucki, P. et al. (2018) Reconstruction and simulation of an extreme flood event in the Lago Maggiore catchment in 1868. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* (in review).
- 33 Bougeault, P. et al. (2012) The MAP Special Observing Period. *Bull. American Meteor. Soc.* **82**, 433–462.
- 34 Panziera, L., C. N. James, U. Germann (2015) Mesoscale organization and structure of orographic precipitation producing flash floods in the Lago Maggiore region. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **141**, 224–248.
- 35 Coaz, J. F. (1869) Die Hochwasser im September und October 1868 im bündnerischen Rheingebiet. Vom naturwissenschaftlichen und hydrotechnisch-forstlichen Standpunkt betrachtet. Mit sechs Landschaftsbildern, zehn Bach- und Flußprofilen und einer graph. Darstellung der Wassermassen der atmosphärischen Niederschläge. Wilhelm Engelmann, Leipzig.
- 36 Naef, F., S. Scherrer, C. Zurbrügg (1999) Grosse Hochwasser – Unterschiedliche Reaktionen von Einzugsgebieten auf Starkregen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.7, Bern.
- 37 Weingartner, R., J. Fürst, K. Schulz (in Vorbereitung) Hydrologie der europäischen Alpenflüsse. Wien.
- 38 Bezzola, G. R., C. Hegg (Hrsg.) (2008) Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2. Umwelt-Wissen Nr. 0825, Bern.
- 39 Ginzler, C., U.-B. Brändli, M. Hägeli (2011) Waldflächenentwicklung der letzten 120 Jahre in der Schweiz. *Swiss Forestry Journal* **162**, 337–343.
- 40 Ambrosetti, W., L. Barbanti, R. de Bernardi, V. Libera, A. Rolla (1994) La piena del Lago Maggiore dell'autunno 1993: un evento di portata secolare. *Documenta dell'Istituto Italiano di Idrobiologia* **45**.
- 41 Diezig, R. (2006) Hochwasserprozesstypen in der Schweiz – Eine prozessorientierte Typisierung grosser Hochwasserereignisse in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Diplomarbeit, Universität Bern.
- 42 BWG (2000) Hochwasser 1999. Studienbericht Nr. 10. Bern.
- 43 MeteoSchweiz (2017) Klimareport 2016. Zürich.
- 44 Spycher, F. (2018) Witterungsbedingte Ausgaben des Basler Rates. Eine Untersuchung der Basler Wochen-Ausgabenbücher, 1600–1650. Masterarbeit, Universität Bern. Eine leicht überarbeitete Fassung soll noch 2018 im Rahmen der Online-Reihe «Berner Studien zur Geschichte» erscheinen und: Longoni, R. (2017) Saanehochwasser und kommunaler Hochwasserschutz in Freiburg i. Ü., 1387–1570, in: Freiburger Geschichtsblätter 94, 55–99. Die dieser Studie zugrundeliegende Berner Masterarbeit von 2016 wird in voller Länge 2018 im Rahmen der Online-Reihe «Berner Studien zur Geschichte» publiziert werden.
- 45 Zur Nutzbarkeit von historischen Planzeichnungen für die Hochwasserrekonstruktion vgl. zuletzt etwa Bolzern, M. (2017) Reconstruction of historical floods of the Aare River in Aarau. Masterarbeit Univ. Bern 2017. Eine leicht überarbeitete Fassung soll noch 2018 im Rahmen der Online-Reihe «Berner Studien zur Geschichte» erscheinen.
- 46 vgl. etwa Die Berner Matte – Archiv: Hochwasser 2005 – Aufbau-News: <https://www.matte.ch/archive-der-berner-matte/frischnotiert/1277-hochwasser-2005-aufbau-news> (19. Mai 2018)
- 47 Isotta, F. A., M. Begert, C. Frei (2018) Long-term consistent monthly temperature and precipitation grid datasets for Switzerland over the past 150 years (in Vorbereitung).
- 48 Ciampittiello, M. (2017) Grafico disegnato a mano dell'andamento dei livelli del Lago Maggiore nell'anno 1868. Istituto per lo Studio degli Ecosistemi (ISE-CNR) (pers. comm.).
- 49 Germann, U., M. Boscacci, M. Gabella, M. Sartori (2015) Peak performance – Radar design for prediction in the Swiss Alps. *Meteorological Technology International*, April 2015, 42–45.
- 50 Germann, U., D. Nerini, I. Sideris, L. Foresti, A. Hering, B. Calpini (2017) Real-time radar – A new Alpine radar network. *Meteorological Technology International*, April 2017, 88–92.
- 51 Joss, J., R. Lee (1995) The Application of Radar-Gauge Comparisons to Operational Precipitation Profile Corrections. *J. Appl. Meteorol.* **34**, 2612–2630.
- 52 Germann, U., G. Galli, M. Boscacci, M. Bolliger (2006) Radar precipitation measurement in a mountainous region. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **132**, 1669–1692.
- 53 Sideris, I. V., M. Gabella, R. Erdin, U. Germann (2014) Real-time radar-rain-gauge merging using spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **140**, 1097–1111.
- 54 Montani, A., D. Cesari, C. Marsigli, T. Paccagnella (2011) Seven years of activity in the field of mesoscale ensemble forecasting by the COSMO-LEPS system: main achievements and open challenges. *Tellus* **63**, 605–624.
- 55 Mandapaka, P. V., U. Germann, L. Panziera, A. Hering (2012) Can Lagrangian extrapolation of radar fields be used for precipitation nowcasting over complex Alpine orography? *Weather Forecast.* **27**, 28–49.
- 56 Panziera, L., M. Gabella, S. Zanini, A. Hering, U. Germann, A. Berne (2016) A radar-based regional extreme rainfall analysis to derive the thresholds for a novel automatic alert system in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **20**, 2317–2332.
- 57 Zappa, M., S. Jaun, U. Germann, A. Walsler, F. Fundel (2011) Superposition of three sources of uncertainties in operational flood forecasting chains. *Atmos. Res.* **100**, 246–262.
- 58 Germann, U., M. Berenguer, D. Sempere-Torres, M. Zappa (2009) REAL – Ensemble radar precipitation estimation for hydrology in a mountainous region. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **135**, 445–456.
- 59 Viviroli, D., M. Zappa, J. Gurtz, R. Weingartner (2009) An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ. Model. Softw.* **24**, 1209–1222.
- 60 Romang, H. et al. (2011) IFKIS-Hydro: an early warning and information system for floods and debris flows. *Nat. Hazards* **56**, 509–527.
- 61 Addor, N., S. Jaun, F. Fundel, M. Zappa (2011) An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): skill, case studies and scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **15**, 2327–2347.
- 62 Andres, N., G. Lieberherr, I. V. Sideris, F. Jordan, M. Zappa (2016) From calibration to real-time operations: an assessment of three precipitation benchmarks for a Swiss river system. *Meteorol. Appl.* **23**, 448–461.
- 63 Brönnimann, S., O. Martius, S. Dierer (2014) Die Wetter-Zeitmaschine. *Phys. unserer Zeit* **45**, 84–89.
- 64 Dee, D. P. et al. (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. R. Roy. Meteorol. Soc.* **137**, 553–597.
- 65 Lalouaux, P. et al. (2018) CERA-20C: A coupled reanalysis of the Twentieth Century. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **10**, 1172–1195.
- 66 Skamarock, W. C. et al. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note.
- 67 Guichard F., F. Couvreur (2017) A short review of numerical cloud-resolving models. *Tellus A* **69**, 1.
- 68 MeteoSwiss (2013) Documentation of Meteoswiss grid data products: Daily mean, minimum and maximum temperature: TabsD, TminD, TmaxD Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, 4 pp.
- 69 MeteoSwiss (2013) Documentation of Meteoswiss grid data products: Daily precipitation (final analysis): RhiresD Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss, 4 pp.
- 70 Nemeč, J. (1993) Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, CHR/KHR-Report No. II-7, secretariaat CHR/KHR, Maerlant 16, Postbus 17, Lelystad NL.
- 71 Moreau de Jonnès, A. (1828) Untersuchungen über die Veränderungen, die durch die Ausrottung der Wälder in dem physischen Zustand der Länder entstehen. Aus dem Französischen übersetzt von W. Widenmann, Prof. der Forstwissenschaft zu Tübingen. Tübingen, C. F. Osiander.
- 72 Cook, J. L. (1987) Quantifying peak discharges for historical floods. *J. Hydrol.* **96**, 29–40.
- 73 Hosking, J. R. M., J. R. Wallis (1986) The Value of Historical Data in Flood Frequency Analysis. *Water Resour. Res.* **22**, 1606–1612.
- 74 Baker, V. R. (1987) Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *J. Hydrol.* **96**, 79–99.
- 75 Schulte, L., J. C. Peña, F. Carvalho, T. Schmidt, R. Julià, J. Llorca, H. Veit (2015) A 2600-year history of floods in the Bernese Alps, Switzerland: frequencies, mechanisms and climate forcing. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**, 3047–3072.
- 76 Ballesteros-Cánovas, J. A., C. Rodríguez-Morata, V. Garófano-Gómez, J. M. Rubiales, R. Sánchez-Salguero, M. Stoffel (2015) Unravelling past flash flood activity in a forested mountain catchment of the Spanish Central System. *J. Hydrol.* **529**, 468–479.
- 77 Wetter, O. (2017) The potential of historical hydrology in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **21**, 5781–5803.
- 78 Benito, G., R. Brázdil, J. Herget, M. J. Machado (2015) Quantitative historical hydrology in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **19**, 3517–3539.
- 79 Bodoque, J. M., A. Díez-Herrero, M. A. Eguibar, G. Benito, V. Ruiz-Villanueva, J. A. Ballesteros-Cánovas (2015) Challenges in paleoflood hydrology applied to risk analysis in mountainous watersheds – A review. *J. Hydrol.* **529**, 449–467.
- 80 Herget, J., H. Meurs (2010) Reconstructing peak discharges for historic flood levels in the city of Cologne, Germany. *Glob. Planet. Change* **70**, 108–116.
- 81 Wilhelm, B., H. Vogel, C. Crouzet, D. Etienne, F. S. Anselmetti (2016) Frequency and intensity of palaeofloods at the interface of Atlantic and Mediterranean climate domains. *Clim. Past* **12**, 299–316.
- 82 Schmocker-Fackel, P., F. Naef (2010) Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **14**, 1581–1594.
- 83 Reist, T., R. Weingartner, J. Gurtz (2002) Wege bei der Beschreibung alter Hochwasser – «Die Wassernot im Emmental am 13. August 1837». *Wasser und Boden* **54**, 50–54.
- 84 Rogger, M. et al. (2017) Land-use change impacts on floods at the catchment scale – Challenges and opportunities for future research. *Water Resour. Res.* **53**, 5209–5219.
- 85 Bronstert, A. et al. (2007) Multi-scale modelling of land-use change and river training effects on floods in the Rhine basin. *River Res. Applic.* **23**, 1102–1125.
- 86 Pinter, N., R. R. van der Ploeg, P. Schweigert, G. Hoefler (2006) Flood magnification on the River Rhine. *Hydrol. Process.* **20**, 147–164.
- 87 Vermeer, J. A. M., P. A. Finke, A. Zwertvaegher, V. Gelorini, M. Bats, M. Antrop, J. Verniers, P. Crombé (2014) Reconstructing a prehistoric topography using legacy point data in a depositional environment. *Earth Surf. Proc. Land.* **39**, 632–645.
- 88 Munoz, S. E., L. Giosan, M. D. Therrell, J. W. F. Remo, Z. Shen, R. M. Sullivan, C. Wiman, M. O'Donnell, J. P. Donnelly (2018) Climatic control of Mississippi River flood hazard amplified by river engineering. *Nature* **556**, 95–98.
- 89 Zischg, A. P., P. Hofer, M. Mosimann, V. Röthlisberger, J. A. Ramirez, M. Keiler, R. Weingartner (2018) Flood risk (d)evolution: Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment. *Sci. Total Environ.* **639**, 195–207.
- 90 Iverson, R. M. (2005) Debris-flow mechanics, in: Debris-flow hazards and related phenomena (Jakob, M., O. Hungr). Berlin, Springer, 105–134.
- 91 Haeberli, W., D. Rickenmann, U. Rösli, M. Zimmermann (1990) Investigation of 1987 debris flows in the Swiss Alps: General concept and geophysical soundings. *IAHS Publ.* **194**, 303–310.
- 92 Zimmermann, M., P. Mani, P. Gamma, P. Gsteiger, O. Heiniger, G. Hunziker (1997) Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. NFP31. Schlussbericht. Zürich, Vdf Verlag.
- 93 Gamma, P. (1999) dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Dissertation Universität Bern.
- 94 Christen, M. et al. (2012) Numerische Simulation von gravitativen Naturgefahren mit «RAMMS» (Rapid Mass Movements). *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz* **169**, 282–293.
- 95 Rickenmann, D. (1999) Empirical relationships for debris flows. *Nat. Hazards* **19**, 47–77.
- 96 Horton, P., M. Jaboyedoff, B. Rudaz, M. Zimmermann (2013) Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.* **13**, 869–885.
- 97 vgl. Berichte von Landolt, E. (1862) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweizerischen Hochgebirgswaldungen, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859 und 1860. Bern, und: Culmann, C. (1864) Bericht an den hohen schweizerischen Bundesrath über die Untersuchung der schweiz. Wildbäche, vorgenommen in den Jahren 1858, 1859, 1860 und 1863. Zürich, Zürcher und Furrer.
- 98 Berichte der Expertenkommissionen über die Ursachen und den Betrag des durch die Ueberschwemmungen im Jahr 1868 in den Cantonen Uri, St. Gallen, Graubünden, Tessin und Wallis angerichteten Schadens. Bern, 1869 (Schweizerisches Bundesarchiv, Dossier BAR E 21 21724.)
- 99 Schmid, F. (2001) Politische Konsequenzen aus dem Unwetterereignis von 1868 – Anfänge des eidgenössischen Hochwasserschutzes.
- 100 Piton, G., S. Carladous, A. Recking, J. M. Tacnet, F. Liébault, D. Kuss, Y. Quefféléan, O. Marco (2017) Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. *Earth Surf. Process. Landforms* **42**, 91–108.
- 101 Bundesrat (2016) Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz – Bericht des Bundesrates, Bern.
- 102 Egli, T. (2005) Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren: Wegleitung, https://www.vkg.ch/media/1375/wegleitung_objektschutz_gegen_gravitativ_naturgefahren_d_v0-0.pdf.
- 103 Suda, J., M. Holub, J. Hübl, W. Jaritz, H. Starl, F. Rudolf-Miklau (2012) Gefährdungs- und Schadensbilder für Gebäude, in: Bauen und Naturgefahren: Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz (J. Suda, F. Rudolf-Miklau, Eds.). Wien/New York, Springer, 71–117.
- 104 Röthlisberger, V., A. Zischg, M. Keiler, M. Lang, F. Klijn, P. Samuels (2016) Spatiotemporal aspects of flood exposure in Switzerland. *E3S Web. Conf.* **7**, 8008
- 105 Schadenstatistik der Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen. Juli 2018.
- 106 Apel, H., G. T. Aronica, H. Kreibich, A. H. Thieken (2009) Flood risk analyses—how detailed do we need to be? *Nat. Hazards* **49**, 79–98.
- 107 Papatoma-Köhle, M., M. Kappes, M. Keiler, T. Glade (2011) Physical vulnerability assessment for alpine hazards: state of the art and future needs. *Nat. Hazards* **58**, 645–680.
- 108 Bandhauer, M. (2017) Historical reconstruction and numerical simulation of an extreme flood event on Lago Maggiore in 1868. Masterarbeit der Philosophisch-historischen Fakultät der Universität Bern.
- 109 Summermatter, S. (2012) Die Prävention von Überschwemmungen durch das politische System der Schweiz von 1848 bis 1991. Dissertation, Universität Bern. <https://boris.unibe.ch/id/eprint/97587>
- 110 Der Truppeneinsatz von 1868 erfolgte noch spontan und ohne Verfassungsgrundlage. Nachdem es auch 1876 und 1877 wieder zu solchen Spontanentscheidungen kam, wurde dieses Vorgehen 1877 vom Bundesrat formal gutgeheissen. Heute wird der Einsatz der Armee bei Katastrophen in die Spontanhilfe und in die militärische Katastrophenhilfe unterteilt. Spontanhilfe leisten Truppen, die sich in der Nähe des Ereignisorts befinden, und wird von den Truppenkommandanten selbst beschlossen; über militärische Katastrophenhilfe entscheidet hingegen das VBS auf Gesuche der Kantone. Weiterführende Einsätze, z. B. für Räumungs- und Wiederaufbauarbeiten, sind gesondert geregelt (vgl. Summermatter 2012, S. 220–221).
- 111 Wanner, C. (2003) Ein tragbares Risiko? Naturkatastrophen als Auslöser für Lernprozesse: die Entstehung der Elementarschadenversicherung in der Schweiz. *Traverse* **10**, 100–114.
- 112 Wanner, C. (2002) 100 Jahre zeitgemäss – Meilensteine in der Brand- und Elementarschadenversicherung in der Schweiz. Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen und Schweizerischer Pool für Erdbedeckung. Bern.
- 113 Fischer, M. (2004) Solidarität schafft Sicherheit. Die Kantonalen Gebäudeversicherungen als System. In: Pfister C., S. Summermatter (Hrsg.): Katastrophen und ihre Bewältigung, Perspektiven und Positionen. Bern, Haupt.

- ¹¹⁴ Von Ungern-Sternberg, T. (2004) Efficient Monopolies. The Limits of Competition in the European Property Insurance Market. Oxford University Press.
- ¹¹⁵ Thomi, L., A. Zischg, H. Suter (2015) Was macht Hochwasserschutzprojekte erfolgreich?: Eine Evaluation der Risikoentwicklung, des Nutzens und der Rolle privater Geldgeber, Geographisches Institut, Bern.
- ¹¹⁶ Fotografie abgebildet in «Rheinnot in Liechtenstein. Zum 50. Jahrestag der Rheinüberschwemmungen von 1927», herausgegeben von den Gemeinden Eschen, Gamprin, Mauren, Ruggell, Schaan und Schellenberg. Schaan 1977: 114; Briefmarke in Verband des Schweizerischen Briefmarken-Handels: Schweizer Briefmarken-Katalog: Schweiz, Liechtenstein, UNO Genf, Campione. Basel, 2007: 760.
- ¹¹⁷ Nienhaus, A. (2000) Naturkatastrophe und Modernisierungsprozess. Lizentiatsarbeit, Historisches Institut, Bern.
- ¹¹⁸ Diese Spendensumme von 3,63 bis 4 Mio. Fr. entspricht gemäss einer Hochrechnung mit einem historischen Lohnindex im Jahr 2009 gut 272 bis 300 Mio. Fr. Vgl. zur Hochrechnung (<http://www.swistoval.ch>, Stand 28. April 2018).
- ¹¹⁹ Knaup, H. (1996) Hilfe, die Helfer kommen. Karitative Organisationen im Wettbewerb um Spenden und Katastrophen.
- ¹²⁰ Vischer, D. L. (1986) Schweizerische Flusskorrekturen im 18. und 19. Jahrhundert (Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich 84). Zürich: Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie 1986;
- ¹²¹ Speich, D. (2003) Helvetische Meliorationen. Die Neuordnung der gesellschaftlichen Naturverhältnisse an der Linth (1783–1823), Zürich, Chronos.
- ¹²² Nast, M. (2006) Überflutet – überlebt – überlistet. Die Geschichte der Juragewässer-korrekturen. Nidau, Verein Schlossmuseum.
- ¹²³ Trottmann, J. (2017) Echte Kompromisse führen zu echten Lösungen. Der politische Entscheidungsprozess zur ersten Juragewässerkorrektur. Nidau, Verein Schlossmuseum.
- ¹²⁴ Salvisberg, M. (2017) Der Hochwasserschutz an der Gürbe. Eine Herausforderung für Generationen (1855–2010). Wirtschafts-, Sozial- und Umweltgeschichte 7, Basel.
- ¹²⁵ Zaugg, M. (2006) Philosophiewandel im schweizerischen Wasserbau. Zur Vollzugspraxis des nachhaltigen Hochwasserschutzes. Publication series in Human Geography, 20, Zurich.
- ¹²⁶ Gavilano, A., K. Ingold (2016) Under what conditions does an extreme event deploy its focal power? Paradigm change during one century of Swiss flood prevention. Presented at the Annual Conference of Swiss Political Science, Basel.
- ¹²⁷ Zur Medialität dieser Ereignisse vgl. Zemp, H. (2015) Von der Wassernot zu «SOS! Die Schweiz versinkt»: Wahrnehmung und Darstellung von Naturkatastrophen 1910–2005 in der Schweizer Presse, 2 Bde., Diss. Universität Zürich; siehe auch: Burger, L. (2008) Informationsbeschaffung bei Hochwassersituationen. Dokumentation der grössten überregionalen Hochwasserkatastrophen der letzten 200 Jahre in der Schweiz. Masterarbeit, Universität Bern.
- ¹²⁸ Amann, B., S. Szidat, M. Grosjean (2015) A millennial-long record of warm season precipitation and flood frequency for the North-western Alps inferred from varved lake sediments: implications for the future. *Quat. Sci. Rev.* **115**, 89–100.
- ¹²⁹ Glur, L., S. B. Wirth, U. Büntgen, A. Gilli, G. H. Haug, C. Schär, J. Beer, F. S. Anselmetti (2013) Frequent floods in the European Alps coincide with cooler periods of the past 2500 years. *Sci. Rep.* **3**, 2770.
- ¹³⁰ Wirth, S.B., L. Glur, A. Gilli, F.S. Anselmetti (2013) Holocene flood frequency across the Central Alps - solar forcing and evidence for variations in North Atlantic atmospheric circulation. *Quat. Sci. Rev.* **80**, 112-128.
- ¹³¹ Stewart, M. M., M. Grosjean, F.G. Kuglitsch, S.U. Nussbaumer, L. von Gunten (2011) Reconstructions of late Holocene paleofloods and glacier length changes in the Upper Engadine, Switzerland (ca. 1450 BC/AD 420). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **311**, 215-223.
- ¹³² Kämpf, L., A. Brauer, P. Dulski, A. Lami, A. Marchetto, S. Gerli, W. Ambrosetti, P. Guilizzoni (2012) Detrital layers marking flood events in recent sediments of Lago Maggiore (N. Italy) and their comparison with instrumental data. *Freshwater Biol.* **57**, 2076–2090.
- ¹³³ Caviezel, G. (2007) Hochwasser und ihre Bewältigung anhand des Beispiels Oberengadin 1750–1900. Masterarbeit, Universität Bern, Bern.
- ¹³⁴ Castellarin, A., A. Pistocchi (2012) An analysis of change in alpine annual maximum discharges: implications for the selection of design discharges. *Hydrol. Process.* **26**, 1517–1526.

- ¹³⁵ Blöschl, G. et al. (2017) Changing climate shifts timing of European floods. *Science* **357**, 588–590.
- ¹³⁶ Madsen, H. et al. (2014) Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *J. Hydrol.* **519**, 3634–3650.
- ¹³⁷ Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016) Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. *Swiss Academies Reports* **11(5)**.
- ¹³⁸ BAFU (2012) Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Bern.
- ¹³⁹ Scherrer, S. C., E. M. Fischer, R. Posselt, M. A. Liniger, M. Croci-Maspoli, R. Knutti (2016) Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland, *J. Geophys. Res.* **121**, doi:10.1002/2015JD024634.
- ¹⁴⁰ Sutton, R. T., D. L. Hodson (2005) Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science* **309**, 115–118.
- ¹⁴¹ Schär C., P. L. Vidale, D. Lütthi, C. Frei, C. Häberli, M. A. Liniger, C. Appenzeller (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**, 332–336.
- ¹⁴² Brückner, E. (1890) Klima-Schwankungen seit 1700 nebst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit, Wien.
- ¹⁴³ Pfister, C. (1995) Das 1950er Syndrom. Der Weg in die Konsumgesellschaft. Bern, Verlag Paul Haupt.
- ¹⁴⁴ Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- ¹⁴⁵ Ban, N., J. Schmidli, C. Schär (2015) Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophys. Res. Lett.* **42**, 1165–1172.
- ¹⁴⁶ Messmer, M., J. J. Gómez-Navarro, C. C. Raible (2018) The Impact of Climate Change on the Climatology of Vb-Cyclones. *Tellus*, submitted.
- ¹⁴⁷ Rajczak, J., C. Schär (2017) Projections of future precipitation extremes over Europe: A multimodel assessment of climate simulations. *J. Geophys. Res.* **122**, 10773–10800.
- ¹⁴⁸ Brönnimann, S., J. Rajczak, E. Fischer, C. C. Raible, M. Rohrer, C. Schär (2018) Changing seasonality of moderate and extreme precipitation events in the Alps. *Nat. Haz. Earth Sys. Sci.* **18**, 2047-2056.
- ¹⁴⁹ Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) (2012) Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217.
- ¹⁵⁰ Bundesamt für Statistik (2015) Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Schweiz 2015–2045. Neuchâtel.
- ¹⁵¹ Perlik, M., U. Wissen, M. Schuler, J. Hofschreuder, A. Jarne, M. Keiner, D. Cavens, W. A. Schmid (2008) Szenarien für die nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung in der Schweiz (2005–2030). Abschlussbericht NFP 54. Zürich und Lausanne.

Bildnachweis

Umschlag: Foto: Schweizer Armee/Luftwaffe; Aquarell: Privatbesitz/Reproduktion Staatsarchiv St. Gallen, ZMH 05/006

Abb. 1: Wikipedia, Urheber unbekannt

Abb. 3: © Kanton Bern

Abb. 4: Foto: Hansjörg Marbach.

Abb. 5: Foto links: Giacomo Imperatori, Foto rechts: Peter Stucki

Abb. 7: Aus Ref. 20 und einer Vorlesungsunterlage von M. Sprenger, ETH Zürich

Abb. 13: Foto: Ralph Rickli

Abb. 15: Holzstich von Emil Zbinden zu Jeremias Gotthelf: «Die Wassernot im Emmental» (Büchergilde Gutenberg 1951). Archiv Emil Zbinden, Graphische Sammlung, Schweizerische Nationalbibliothek, Bern. ©Limmat Verlag und K. Zbinden, Bern

Abb. 24: Foto: Blank

Abb. 28: Privatbesitz/Reproduktion Staatsarchiv St. Gallen, ZMH 05/006

Abb. 30: Foto links: Stefan Brönnimann, Foto rechts: BAFU

Abb. 35: Fotos: MeteoSchweiz

Abb. 38: ETH-Bibliothek Zürich, Alte und Seltene Drucke

Abb. 40: Aus Hinkender Bot 1911, e-periodica

Abb. 51: Archivio di Stato del Cantone Ticino

Abb. 53: Bundesamt für Landestopografie

Abb. 54: Foto rechts: Toni Venzin

Abb. 56: <https://map.geo.admin.ch/>

Abb. 60: Gemeindearchiv Vals

Abb. 61: Liechtensteinische Post AG

Abb. 62: Bundesarchiv, Signatur E 21 21715

Abb. 63: Expertenbericht von Leopold Blotnitzky und Friedrich Wilhelm Hartmann, Juni 1863, in Schweizerisches Bundesarchiv, Signatur E 19 1443 (Bild links); Bundesamt für Wasserwirtschaft (Hg.): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitung 1982. Bern 1982, 18 (Bild rechts).

Abb. 71: Interfoto / Alamy Stock Foto

Abb. 72: Foto: Louis-Alphonse Tronel (Bruno Sternegg, <http://www.schaffhausen-foto-archiv.ch/hochwasser.html>, und Stadtarchiv Schaffhausen, Ref. Code: J 02.01.207/047)

Abb. 79: Schweizer Armee/Luftwaffe



Brönnimann S, Krämer D. 2016. Tambora und das «Jahr ohne Sommer» 1816. Klima, Mensch und Gesellschaft. Geographica Bernensia G90, 48 S., doi:10.4480/GB2016.G90.02



Brugnara, Y., Brönnimann S., Zamuriano, M., Schild, J., Rohr, C., Segesser, D. (2016) Dezember 1916: Weisser Tod im Ersten Weltkrieg. Geographica Bernensia G91. ISBN 978-3-905835-48-9, doi:10.4480/GB2016.G91.02

Im Winter 1916/17 ereignete sich in den südöstlichen Alpen eine der folgenschwersten Wetterkatastrophen überhaupt. Auf ein massives Schneefallereignis folgten zahlreiche Lawinen, welche tausende von Soldaten und Zivilisten unter sich begruben. Eine anhand von Wettervorhersagemodellen erstellte, detaillierte Rekonstruktion des Ereignisses ermöglicht neue Einblicke und verdeutlicht das Potential, welches die Kombination von numerischen Techniken und historischen Dokumenten mit sich bringt. Extreme Wetterereignisse der Vergangenheit sowie in der Zukunft können damit besser verstanden werden.

Vor einem Jahrhundert befand sich Europa inmitten des Ersten Weltkriegs. An der italienischen Front standen sich die österreichisch-ungarische und die italienische Armee auf einem der rauensten Schlachtfelder der Geschichte, den Bergpfaden der südöstlichen Alpen, gegenüber (Box 1). Während eines Grossteils des Jahres ruhten die Gefechte allerdings weitgehend, denn es begann ein anderer Kampf – derjenige gegen Kälte, Eis und Schnee.^{1,2} Mit einem durchschnittlichen Niederschlag von 2 m pro Jahr gehört diese Region der Alpen zu den feuchtesten Gebieten des Kontinents. Die Soldaten wurden damals buchstäblich unter Schnee begraben. Noch heute geben die schmelzenden Gletscher jährlich Leichen dieses katastrophalen Ereignisses frei, eine traurige Erinnerung an das absurde Gemetzel des Ersten Weltkriegs.

Das Schicksal meinte es nicht gut mit jenen Männern, denn der Winter 1916/17 wurde, wie schon von Zeitgenossen bemerkt,^{3,4} zu einem der schneereichsten des Jahrhunderts (Abb. 1). Zwischen November 1916 und Januar 1917 verzeichnete ein Regenmesser, der sich heute auf der Grenze zwischen Italien und Slowenien befindet, 1432 mm Niederschlag, was rund 80 % der durchschnittlichen Jahresmenge entspricht. Zusätzlich fielen nach einem trockenen Februar nochmals 560 mm im März und April 1917.

Es war aber vor allem ein einzelner Tag, der tragischerweise in die Geschichtsbücher einging: der 13. Dezember 1916. Nach einer Woche reichlichen Schneefalls brachten an diesem Tag warme und leichte Luftmassen aus dem Mittelmeerraum starken Niederschlag, was zu einem Anstieg der Schneegrenze führte. Diese Bedingungen lösten in der ganzen Region zahlreiche Lawinen aus (Box 2). Die



Foto 1: Schützengraben nahe Monte Scarluzzo, Solfero Joch

Autoren: Yuli Brugnara¹, Stefan Brönnimann², Marco Zamuriano³, Jonas Schild⁴, Christian Rohr⁴, Daniel Marc Segesser⁵
¹ Deschger Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern, Bern, Schweiz
² Geographisches Institut, Universität Bern, Bern, Schweiz
³ Historisches Institut, Universität Bern, Bern, Schweiz
Zitieren als: Brugnara Y., Brönnimann S., Zamuriano M., Schild J., Rohr C., Segesser DM (2016) Dezember 1916: Weisser Tod im Ersten Weltkrieg. Geographica Bernensia G91. ISBN 978-3-905835-48-9, doi:10.4480/GB2016.G91.02