

SELTENE HOCHWASSER BESSER VORHERSEHEN

Damit Strom aus Wasserkraft sicher und verlässlich erzeugt werden kann, muss man die Wasserpegel der Flüsse möglichst gut kennen. Ein Forschungsteam der Universitäten Zürich, Bern, Grenoble und Graz hat mit Unterstützung der Bundesämter für Energie und Umwelt (BFE, BAFU) eine neue Methode entwickelt, um die Bedrohung durch seltene, aber grosse Hochwasser entlang der Schweizer Flüsse noch zuverlässiger als bisher abschätzen zu können. Die Ergebnisse helfen bei der Dimensionierung von Hochwasserschutzanlagen, aber auch bei der Sicherheitsüberprüfung von Stauanlagen.



Bild der Reuss, wie sie im August 2005 bei Gebensdorf/Windisch über die Ufer trat. Solche «dynamischen» Hochwasser in Fließgewässern standen im Zentrum des EXCH-Projekts. Foto: Bildarchiv ETH-Bibliothek Zürich

Weltweit betrachtet sind Hochwasser praktisch an der Tagesordnung. Oft fordern sie Menschenleben in grosser Zahl, wie die Überschwemmungen auf Sumatra im November 2025 mit über 700 Toten, oder der Starkregen, der im Juli 2022 über Gebiete Pakistans niederging und mehrere Hundert Menschen in den Tod riss. Auch die Schweiz kennt die zerstörerische Kraft des Wassers. Im Juni 2024 forderte ein Hochwasser im Alpenraum mindestens acht Tote. Die Jahreszahlen 2013, 2007, 2005 oder 1999 stehen für grosse Hochwasser, von denen die Schweiz zumindest mitbetroffen war und die Menschenleben und grosse Sachschäden forderten. Die Erinnerung an Hochwasser reicht weit zurück: In den Juni 1910 zum Beispiel, als ein Hochwasser in der Schweiz und in Österreich allein im Mittelland 27 Tote forderte, oder zum Starkregen vom September 1868 mit 51 Toten.

Maximale Gefahr abschätzen

Dort, wo die Menschen die nötigen Mittel haben, schützen sie sich gegen Hochwasser. Infrastrukturen wie Brücken und Wasserbauten wie Stauwehre werden so ausgelegt, dass sie auch grossen Wassermassen standhalten. Mit Dämmen und Rückhalteräumen versucht man Flüsse so zu zähmen, dass sie keine Schäden anrichten. Gebiete, wo Gefahren drohen, werden durch Gefahrenkarten und andere raumplanerische Massnahmen geschützt.

«Um diese Vorkehrungen treffen zu können, braucht es eine möglichst genaue Abschätzung, welche Spitzenabflüsse in Schweizer Flüssen bei grossen Hochwasserereignissen zu erwarten sind», sagt Daniel Viviroli, Hydrologe an der Universität Zürich. «Das gilt insbesondere für Ereignisse, die zum Beispiel statistisch gesehen nur einmal alle Hundert Jahre (Jahrhunderthochwasser) oder alle Tausend Jahre (Jahrtausendhochwasser) zu erwarten sind.» Um die Grösse solcher Ereignisse genauer abschätzen zu können, hat Viviroli im Projekt «Extremhochwasser Schweiz» (Kürzel: EXCH) zusammen mit weiteren Forschenden der Universitäten Zürich, Bern, Grenoble und Graz eine neue Methode entwickelt. Die Untersuchung baut auf einem Projekt mit ähnlicher Fragestellung auf, das sich auf die Aare bezogen hatte (EXAR).

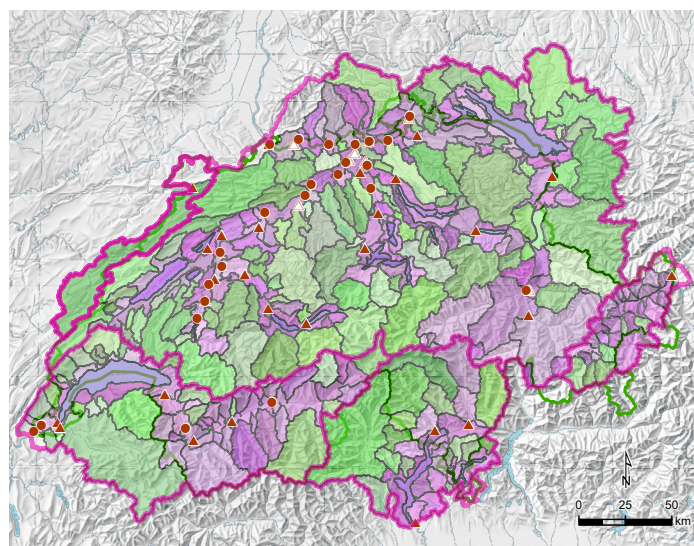
Neue Methode beruht auf Niederschlägen

Bisher werden Hochwasserereignisse im Allgemeinen abgeschätzt, indem entlang von Flüssen die Abflussmessungen ausgewertet werden. Solche Beobachtungen liegen für manche Stellen seit ca. 60 bis 70 Jahren vor, bisweilen sogar seit gut 100 Jahren. Gemessen werden die Abflussmengen

JAHRHUNDERTHOCHWASSER

Ein «Jahrhunderthochwasser» ist ein grosses Hochwasser, das in jedem Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu 100 auftreten kann. Um ein Jahrhunderthochwasser zu bestimmen, ziehen Hydrologen den Wasserabfluss (Kubikmeter pro Sekunde) an einem bestimmten Bezugspunkt heran (also nicht die Fläche des überschwemmten Gebiets oder die Höhe der Schäden). Im Projekt EXCH lag der Fokus auf Hochwasserereignissen, die noch seltener und damit stärker sind als Jahrhunderthochwasser, also zum Beispiel 300-jährige Hochwasser, Jahrtausend-Hochwasser und 10'000-jährige Hochwasser.

unter anderem an Messstellen des BAFU oder der Kantone. Aus diesen Messreihen lässt sich durch Extrapolation (mathematischen Berechnungen) abschätzen, wie oft mit seltenen, starken Abflussmengen bzw. Hochwassern zu rechnen ist. Diese Methode stösst aber an ihre Grenzen, wenn es um sehr seltene Hochwasserereignisse geht, und ihre Aussagekraft ist eingeschränkt, wenn Flussläufe verändert werden (wie



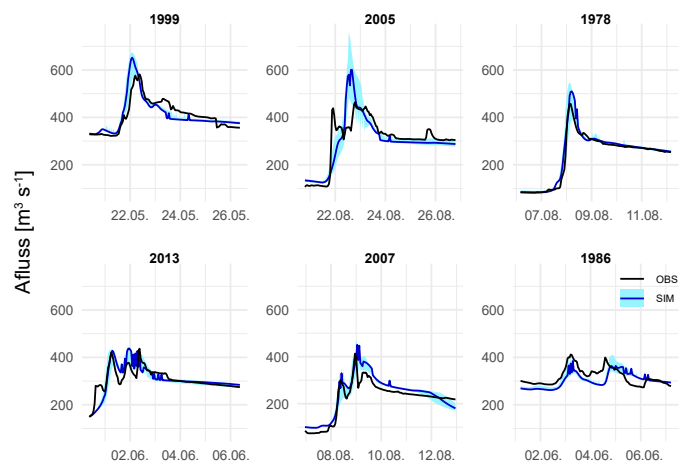
Die roten Linien markieren die Einzugsgebiete von Rhein, Rhone, Ticino, Doubs und Inn. Jedes Einzugsgebiet unterteilt sich in Teil-Einzugsgebiete. Die roten Markierungen sind Ausgabepunkte für Wehranlagen des BFE (Kreise) und für Messstellen des BAFU (Dreiecke). Jede dieser Ausgabepunkte erfasst den Wasserabfluss aus dem jeweiligen Einzugsgebiet: Das grösste Einzugsgebiet hat der Messpunkt in Basel mit 35'900 km². Das entspricht ca. 7/8 der Fläche der Schweiz und umfasst auch Gebiete in Deutschland, Österreich und Liechtenstein. Das kleinste Einzugsgebiet im betrachteten Grössenbereich hat der Messpunkt in Weesen an der Linth mit 1'061 km². Grafik: Schlussbericht EXCH

z.B. bei den beiden Juragewässerkorrekturen in den Jahren 1868–1891 und 1962–1973).

«Um die Abschätzung von extremen Hochwassern weiter zu verbessern, haben wir eine neue Methodik entwickelt, die ergänzend zur bisher benutzten Methode einen zusätzlichen Blick auf mögliche Gefahren erlaubt», sagt Viviroli. Die neue Methode basiert nicht primär auf der Messung von Abflussmengen, sondern auf Daten zu Niederschlag (Regen, Schnee) und Temperatur. Diese Daten werden unter Einbezug eines Wettergenerators künstlich erzeugt, und aus ihnen lassen sich in der Folge Flusspegel und damit die Hochwassergefahr über sehr lange Zeiträume abschätzen (vgl. Textbox unten auf der Seite).

Den schlimmsten Fall denken

Die Untersuchung wurde von den Bundesämtern für Energie und Umwelt begleitet und unterstützt. Für die diese Bun-



Zeitreihen der Wasserabflüsse («Abflussganglinien») der Limmat während der sechs grössten gemessenen Hochwasserereignisse in Zürich. Die im Rahmen des Forschungsprojekts erstellten Simulationen (blaue Linien; die blauen Bänder zeigen die Unsicherheit) haben eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen (schwarze Linien). Grafik: Schlussbericht EXCH/bearbeitet D. Viviroli

REGENDATEN AUS DEM ZUFALLSGENERATOR

Um künftige Hochwasser abzuschätzen, werden im Projekt EXCH hauptsächlich Niederschlags- und Temperaturdaten herangezogen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler gehen methodisch in drei Schritten vor:

Schritt 1: Am Anfang steht ein Wettergenerator. Dieser stützt sich auf reale Wetterdaten aus der Vergangenheit (gemessen an einigen hundert ausgewählten Meteostationen in der Schweiz und im angrenzenden Ausland) und generiert daraus mit Hilfe statistischer Zufallsverfahren neue Niederschlags- und Temperaturdaten für die ganze Schweiz. Im Projekt EXCH wurden auf diese Weise stündliche Niederschlags- und Temperaturwerte für alle ausgewählten Meteostationen erzeugt, und dies für einen sehr langen synthetischen Zeitraum von 300'000 Jahren. Synthetisch bedeutet hier, dass die Daten des Wettergenerators nicht das Wettergeschehen der letzten 300'000 Jahre dokumentieren, und auch keine Prognose für die kommenden 300'000 Jahre sind. Vielmehr zeigen sie, mit welchen Niederschlagsmengen bei extrem seltenen Ereignissen zu rechnen ist, wenn man das heutige Klima zugrundelegt. Bei solchen Extremereignissen entstehen die grossen Wassermengen in einem Fluss vor allem durch aussergewöhnlich intensive Starkniederschläge. Andere ungünstige Einflussfaktoren wie z. B. Schneeschmelze können den Abfluss beeinflussen, sind aber vor allem bei vergleichsweise häufigeren Hochwassern von Bedeutung.

Schritt 2: Mit einem erprobten hydrologischen Modell werden die vom Wettergenerator erzeugten Niederschlags- und Temperaturwerte in Wasserabflussmengen umgerechnet (unter Berücksichtigung z.B. von Verdunstung, Versickerung, Schneeschmelze und weiteren Einflussgrössen). Dies geschieht für 330 Teilgebiete, welche die gesamte Schweiz abdecken. Als Ergebnis weiss man nun, welche Abflussmengen in diesen Teilgebieten über einen synthetischen Zeitraum von 300'000 Jahren auftreten können.

Schritt 3: Die Ergebnisse der hydrologischen Simulationen in allen Teilgebieten werden anschliessend zusammengeführt, um die Abflussmengen in den grossen Gewässern abzuleiten. Dabei wird berücksichtigt, wie sich die Abflüsse durch weitere Einflussfaktoren verändern, beispielsweise durch Seen, die Wasser zurückhalten, oder durch Talebenen und Seeufer, die bei Hochwasser temporär überschwemmt werden und so die Spitzenabflüsse reduzieren. Im Projekt EXCH wurden auf diese Weise Abflussmengen für 60 Flusstandorte berechnet, deren Einzugsgebiete unterschiedlich gross sind. Die Daten zeigen beispielsweise, wie viel Wasser bei Luzern aus dem Vierwaldstättersee abfließt, und dies in stündlicher Auflösung über einen synthetischen Zeitraum von 300'000 Jahren.

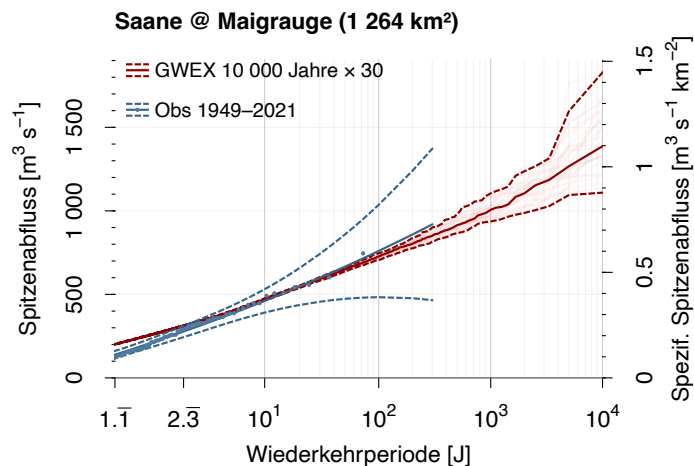
desstellen sind möglichst verlässliche Abschätzungen von Hochwasserereignissen unentbehrlich. «In der Schweiz hat die Sicherheit der Stauanlagen eine zentrale Bedeutung. Sie müssen extrem seltenen Hochwasserereignissen standhalten können, bis hin zu den schlimmsten Szenarien, die nach heutigem Stand der Wissenschaft vorstellbar sind», sagt Alexandre Pachoud, Experte für Stauanlagensicherheit beim Bundesamt für Energie.

Weil im Bereich der Stauanlagen in den Alpen umfassende historische hydrologische Daten meist fehlten, ist es laut Pachoud von grosser Relevanz, wenn das EXCH-Projekt nun dabei helfe, noch nie beobachtete Extremszenarien abzuschätzen. Der BFE-Experte verweist auf einen aktuellen technischen Bericht der Internationalen Kommission für grosse Talsperren (Paris). Dort heisst es, das Ziel der in EXCH eingesetzten Methode bestehe darin, «Mutter Natur nachzubilden», um sicherzustellen, dass keine noch so unwahrscheinliche Situation übersehen wird. Konkret bedeutet das, dass Wasserbauingenieurinnen und -ingenieure auf Basis der EXCH-Szenarien das Verhalten von Stauanlagen und ihrer hydraulischen Strukturen modellieren, um nachzuweisen, dass die Bauwerke Hochwasser ohne Beeinträchtigung ihrer Sicherheit ableiten können.

Von praktischem Nutzen ist die neue Studie auch aus Sicht des Bundesamts für Umwelt. Nur wer die möglichen Hochwasserstände kenne, könne wirksame Schutzanlagen entlang von Flüssen zum Schutz von Menschen, Tieren und Gebäuden bauen, sagt BAFU-Hydrologe Emmanuel Brocard. Die Ergebnisse der neuen Studie würden in die Arbeit von Ingenieurbüros ebenso einfließen wie in die Tätigkeit der Behörden. Sie würden beispielsweise eine wertvolle Grundlage für die periodische Überarbeitung der Hochwassergefahrenkarten durch die Gemeinden bilden.

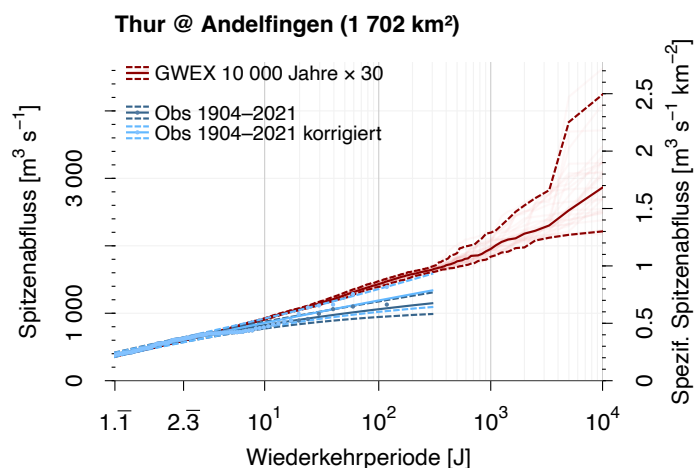
Klimawandel ausgeklammert

Eine wichtige Frage, die sich im Zusammenhang von Hochwassern stellt, beantwortet die neue Studie nicht, die Frage nämlich, ob solche Ereignisse mit dem Klimawandel häufiger und gefährlicher werden. «Wir haben diesen Aspekt bewusst nicht untersucht, weil es den Rahmen der Studie gesprengt hätte», sagt Daniel Viviroli. Für ihren methodischen Ansatz klammerten die Wissenschaftler die Klimaänderung gezielt aus: Die Temperaturdaten wurden so bereinigt und auf das heutige Niveau angepasst, dass die Ergebnisse keine langfristigen Trends enthalten und immer die gegenwärtigen Bedingungen widerspiegeln.



Die sogenannte «Überschreitungskurve» zeigt, mit welchen Wassermengen bei seltenen und sehr seltenen Hochwasser-Ereignissen auf lange Sicht zu rechnen ist, hier dargestellt für die Saane bei Maigrage südlich der Stadt Fribourg. In diesem Beispiel stimmt die Simulation über 300'000 Jahre (rot) sehr gut mit den Beobachtungen aus den Jahren 1949 bis 2021 (blau) überein. Die simulierten Werte stützen sich auf die komplette Modellkette aus Wettergenerator, hydrologischem Modell und hydrologischem Routing. Die 300'000 Jahre Simulationen sind in 30 Blöcke à je 10'000 Jahre aufgeteilt. Grafik: Schlussbericht EXCH/bearbeitet D. Viviroli

«Unsere Studie stellt eine neue Grundlage zur Gefahrenabschätzung zur Verfügung, aber wer ein Gesamtbild für die Zukunft bekommen will, der muss den Einfluss des Klimawandels zusätzlich berücksichtigen», sagt Viviroli. Wie gross dieser Einfluss ist, ist Gegenstand der Forschung. So wurden



Überschreitungskurve, hier dargestellt für die Thur bei Andelfingen (ZH). Anders als beim Beispiel der Saane (vgl. Grafik oben) besteht in diesem Fall eine Kluft zwischen Simulation und Beobachtungen. Ein Grund dafür ist, dass die Beobachtungen nur den Wasserpegel des Flusses einbeziehen, nicht aber das Wasser, das während einigen Hochwasser-Ereignissen über die Ufer getreten ist. Korrigiert man dies und fügt das 'fehlende' Wasser hinzu, nähern sich die Beobachtungswerte den Simulationswerten an. Grafik: Schlussbericht EXCH/bearbeitet D. Viviroli

bei intensiven Niederschlägen in den letzten Jahrzehnten deutliche klimabedingte Zunahmen beobachtet. Wie stark sich diese Veränderungen in einer Verschärfung des Hochwassergeschehens ausdrückten bzw. ausdrücken werden, ist aber komplex, wie Viviroli betont: «Das Hochwassergeschehen wird von vielen Faktoren beeinflusst. Je nach Vorbedingungen und Gebietseigenschaften können Hochwasser unterschiedlich stark auf die Zunahme der Starkniederschläge reagieren. Für eine präzise Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse ist die Datenlage aktuell noch zu dünn.»

Schutzniveau festlegen

Was die Studie ebenfalls nicht leisten kann, ist die Beantwortung der Frage, wie die Bevölkerung auf die dargestellte Gefahrenlage reagieren bzw. welches Schutzniveau sie anstreben will. Das ist eine gesellschaftliche Entscheidung und damit eine Frage, die im politischen Diskurs beantwortet werden muss.

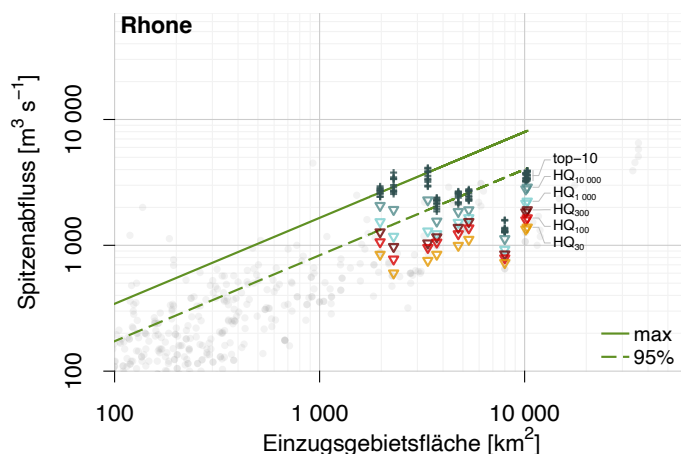
➤ **Projektschlussbericht** [«Extreme Floods in Switzerland – Hydrological scenarios for large catchments»](#).

➤ **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt [Amin Askarinejad](#), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Stauanlagensicherheit.

➤ Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich [Wasserkraft](#).



Beim Hochwasser 2005 trat der Vierwaldstättersee über die Ufer und setzte unter anderem den Schweizerhofquai in Luzern unter Wasser. Foto: Daniel Viviroli



Abflussmengen eines Flusses hängen von der Grösse des betrachteten Einzugsgebiets, aber auch von dessen Topografie und weiteren Faktoren ab. Die Grafik zeigt, welche Spitzenabflussmengen in unterschiedlich grossen Einzugsgebieten der Rhone auf lange Sicht zu erwarten sind. Dargestellt sind die folgenden Ergebnisse: Top-10 sind die 10 grössten Simulationen, HQ_{30} bis $HQ_{10'000}$ sind aus den Simulationen abgeleitete Hochwasser mit Jährlichkeit 30, ... 10'000. Um die Simulationen für die Rhone in einen landesweiten Vergleich zu setzen, zeigt die Grafik (graue Punkte) grösste beobachtete Spitzenabflüsse aus allen gemessenen Gebieten der Schweiz und die Hüllkurve (grüne Linien), die die Grenzwerte zusammenfasst (max: umfasst alle Daten; 95%: umfasst 95% der Daten). Die Grafik zeigt, dass die für die Einzugsgebiete der Rhone erstellten Simulationen gut mit den landesweiten Beobachtungen von Hochwasserereignissen zusammenpassen. Grafik: Schlussbericht EXCH/bearbeitet D. Viviroli