

Heisse Sommer – feuchte Winter

Der Klimawandel hat Auswirkungen auf die Wasservorkommen in der Schweiz. Am deutlichsten ist die Verschiebung der Niederschläge von Schnee zu Regen, wodurch es zu einer Verlagerung in der zeitlichen Verteilung des Abflusses kommt. Darüber hinaus wird die Schweiz indirekt auch von Veränderungen der weltweiten Wasserverfügbarkeit betroffen sein.

von Jan Seibert

Foto: Robert Couise-Baker

Der Juli 2019 war weltweit der wärmste, jemals gemessene Monat¹⁾. In der Schweiz waren in den letzten drei Jahrzehnten sämtliche Jahre wärmer als der Durchschnitt der Periode 1961 bis 1990. Der beobachtete Anstieg der Jahresmitteltemperaturen in den letzten 100 Jahren beträgt weltweit etwa ein Grad, für die Schweiz sind es etwa zwei Grad. Es gibt keinen Zweifel daran, dass sich die Temperaturen aufgrund menschl-

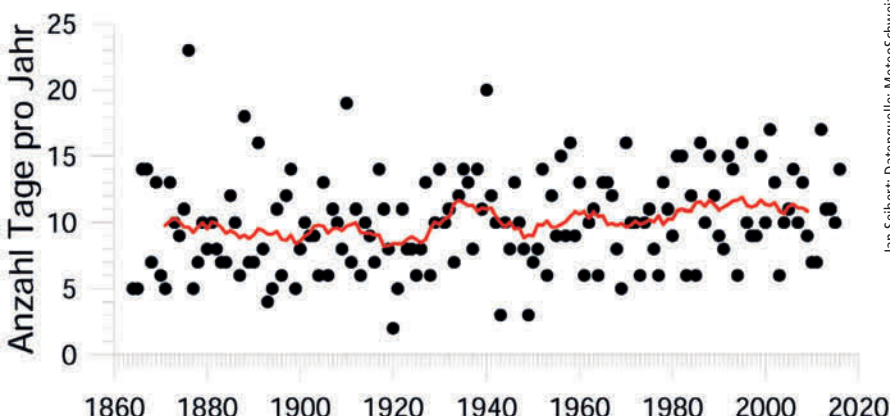
cher Aktivitäten, vor allem des Ausstosses von CO₂ und anderen Treibhausgasen, deutlich erhöht haben und auch weiter erhöhen werden. Weniger klar ist, was diese Temperaturerhöhung für hydrologische Grössen wie Niederschlag oder Abfluss bedeutet. Die Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Wasserressourcen sind vielfältig und Vorhersagen teilweise sehr unsicher.

Deutlich sind jene Veränderungen, die direkt mit der Temperatur in Verbindung stehen. In der Schweiz sind dies insbeson-

dere abschmelzende Gletscher und kürzere Zeiten mit Schneebedeckung. Andere Veränderungen sind schwieriger eindeutig festzustellen. Dies gilt insbesondere für den Niederschlag; bei den Jahressummen lässt sich ein leichter Anstieg beobachten, allerdings ist dieser Anstieg eher gering im Vergleich zur natürlichen Variation von Jahr zu Jahr. Ähnliches gilt für grössere Niederschlagsereignisse. In Zürich, beispielsweise, ist die Anzahl der Tage mit mehr als 20 Millimeter Niederschlag in den letzten 150 Jahren leicht angestiegen. Die Anzahl solcher Tage schwankt aber stark von Jahr zu Jahr (siehe Abb. 1).

¹⁾ Vorläufige Daten, <https://climate.copernicus.eu/another-exceptional-month-global-average-temperatures>

▼ Abbildung 1: Anzahl der Tage pro Jahr mit mehr als 20 Millimeter Niederschlag für Zürich (Station Fluntern). Die rote Linie zeigt das gleitende Mittel über jeweils 15 Jahre an.



Jan Seibert, Datenquelle: MeteoSchweiz

Grundsätzlich wird für die Zukunft erwartet, dass sowohl mittlere Niederschlagsmengen als auch Starkniederschlagsereignisse ansteigen. Dies ist eine direkte Folge des Temperaturanstieges, da wärmere Luft grössere Wassermengen aufnehmen, transportieren und freisetzen kann. Wie sich der Niederschlag jedoch im Einzelnen verändert, ist weit schwieriger vorherzusagen. Aufgrund veränderter Wetterlagen kann es auch vermehrt zu längeren Trockenperioden kommen. Für die Schweiz werden unterschiedliche Veränderungen im Jahresverlauf erwartet. So wird für die Periode 2070 bis 2099 eine Niederschlags-

abnahme von über 20 Prozent im Sommer und eine etwas geringere Zunahme im Winter vorhergesagt (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2012). Extremereignisse wie Starkniederschläge oder Trockenperioden werden wahrscheinlich häufiger auftreten. Verlässliche quantitative Prognosen hierzu sind aber noch nicht möglich.

Hydrologische Extremereignisse sind nicht etwas grundsätzlich Neues. In der Schweiz gab es immer schon Perioden mit zu wenig oder zu viel Wasser, wie historische Berichte von Trockenheiten und Überschwemmungen belegen (siehe Abb. 2). Es wird jedoch befürchtet, dass solche Ereignisse als Folge der Klimaveränderung häufiger auftreten werden. Quantitative Aussagen hierzu sind allerdings sehr unsicher.

In der Schweiz, dem Wasserschloss Europas, wird es auch in Zukunft grundsätzlich genug Wasser zum Leben geben. Dennoch können die Auswirkungen der Klimaveränderung bedeutend sein, teilweise gerade weil es in der Schweiz so grosse Wasserressourcen gibt. So wird zum Bei-

spiel mehr als die Hälfte des Schweizer Stroms durch Wasserkraft produziert; dies bedeutet, dass Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit spürbare Auswirkungen auf die nationale Stromproduktion haben können. Ein Beispiel ist die Bedeutung der Gletscherschmelze für die Wasserkraft: In den vergangenen Jahrzehnten stieg der Abfluss aus vergletscherten Einzugsgebieten an, da das Gletschereis Jahr für Jahr weiter abschmilzt. Das heisst, dass pro Jahr deutlich mehr Wasser aus den Einzugsgebieten abfließt, als es allein durch den Jahresniederschlag möglich wäre. Schaefli et al. (2019) haben abgeschätzt, dass dieses zusätzliche Wasser etwa 1 bis 1.4 TWh pro Jahr oder drei bis vier Prozent der Energiegewinnung aus Wasserkraft in der Schweiz entspricht. Wenn das «Eiskapital» aufgebraucht ist, wird dieser Beitrag wegfallen.

Klimamodelle

Um besser abzuschätzen, wie sich die Wasserverfügbarkeit in der Zukunft ändern könnte, werden Klimamodelle mit hydrologischen Modellen kombiniert. Hierzu werden hydrologische Modelle ver-

wendet, die mit historischen Wetterdaten den beobachteten Abfluss gut simulieren können. Anschliessend werden die simulierten Niederschlags- und Temperaturdaten aus Klimamodellen für heutige und zukünftige Bedingungen als Eingangsgrößen für die hydrologischen Modelle verwendet. Die zukünftigen Bedingungen gelten dabei für verschiedene Emissionsszenarien, die sich aus Annahmen über die zukünftige sozioökonomische Entwicklung ergeben. Aus dem Vergleich der hydrologischen Simulationen mit diesen Zeitserien, die heutige bzw. zukünftige Bedingungen widerspiegeln, können dann Aussagen über veränderte hydrologische Bedingungen getroffen werden. Ein grundsätzliches Problem sind die Niederschlagsimulationen der Klimamodelle, die häufig grosse Fehler aufweisen. Dies hängt unter anderem mit der räumlichen Auflösung der Klimamodelle zusammen. In Klimamodellen werden die Wetterprozesse in einem Gitternetz simuliert, wobei die einzelnen Gitterzellen typischerweise eine Länge von zwölf bis 50 Kilometer aufweisen. Diese Auflösung ist zu grob, um wichtige Prozesse für die Nie-

▼ Abbildung 2: Darstellung des Hochwassers im Jahr 1562 an der Sihl in Zürich in der Wickiana. (Quelle: Wick, Johann Jakob: [Sammlung von Nachrichten zur Zeitgeschichte aus den Jahren 1560-87 (mit älteren Stücken)]. [Zürich], [ca. 1563]. Zentralbibliothek Zürich, Ms F 14, <http://doi.org/10.7891/e-manuscripta-16408>)





Foto: Jan Seibert

▲ Abbildung 3: Um den Rückgang des Schnees auszugleichen wird vielerorts künstlicher Schnee für Skipisten und Loipen produziert, wie hier Im Engadin. Lokal kann der zusätzliche Wasserbedarf zu Nutzungskonflikten führen.

derschlagsbildung explizit abzubilden. In der Zukunft könnten Modelle mit einer Auflösung im Kilometerbereich aber verbesserte Simulationen erlauben (Leutwyler et al., 2017). Für die Verwendung in hydrologischen Modellen müssen die Niederschlagssimulationen der Klimamodelle häufig zunächst korrigiert werden. Dies ist trotz modernen statistischen Verfahren nur begrenzt möglich und es ist mit grossen Unsicherheiten zu rechnen. So bleiben Niederschlagssummen über mehrere Tage häufig auch nach der Korrektur der täglichen Werte fehlerhaft (Addor & Seibert, 2014); gleichzeitig sind gerade diese mehrtägigen Niederschläge für Überschwemmungen entscheidend. Trotz dieser Unsicherheiten erlauben derartige Studien Aussagen zur klimabedingten Veränderung des Abflusses (Addor et al., 2014).

Einfluss der Schneeschmelze

Im Hitzesommer 2003 wurde in manchen Medien die Befürchtung zum Ausdruck gebracht, dass mit dem Abschmelzen der Gletscher solche Hitzeperioden in Zukunft zum Austrocknen des Rheins führen

könnten. Es stimmt, dass Gletscher eine ausgleichende Wirkung auf den Abfluss haben und gerade in trockenen, heissen Sommern besonders viel Eis abschmilzt. Allerdings spielt der Beitrag der Gletscher auf grösserer Skala meistens eine geringe Rolle. Für den Rhein zeigen Schätzungen, dass der Anteil der Gletscher am Abfluss des Rheins bei Basel im Jahresdurchschnitt zwei Prozent beträgt und im Sommer auf fünf bis sieben Prozent steigt (Stahl et al., 2016). Nur in extrem trockenen Sommermonaten beträgt der Anteil an einzelnen Tagen bis zu einem Viertel. Der Beitrag der Gletscher zum Abfluss des Rheins bei Basel hat sich in den letzten hundert Jahren übrigens überraschend wenig geändert (Stahl et al., 2016). Kleinere Gletscherflächen wurden weitgehend durch stärkere Abschmelzraten von den verbleibenden Flächen ausgeglichen. Selbstverständlich ist diese Kompensation nur bis zu einem gewissen Zeitpunkt möglich. Für die Zukunft muss mit einem deutlich verringerten Beitrag der Gletscher zum Abfluss gerechnet werden.

Das Volumen der jährlichen Schneeschmelze ist in der Schweiz mit circa 20 Kubikkilometer viel grösser als dasjenige der Gletscherschmelze (1 km³) (Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.), 2012). Für den Rhein bei Basel trägt die Schneeschmelze etwa 40 Prozent zum Abfluss bei. Änderungen in der Schneeakkumulation haben damit auch weit grössere Auswirkungen auf den Abfluss. In Höhenlagen unter 3500 Meter wird die maximale Schneeakkumulation bis Ende des Jahrhunderts um etwa die Hälfte abnehmen. Der Zeitraum mit Schneebedeckung wird in den verschiedenen Höhenlagen jeweils um etwa einen Monat kürzer als heute sein. Dadurch wird sich der Abfluss grundsätzlich vom Sommer in den Winter verschieben, da ein grösserer Anteil des Niederschlages als Regen und nicht mehr als Schnee fallen wird. Die feuchteren Winter haben auch zur Folge, dass es während eines grösseren Teils des Jahres potentiell zu Überschwemmungen kommen kann und insbesondere Regen-auf-Schnee-Ereignisse wahrscheinlicher werden könnten. In derzeit schneereichen Gebieten wird das Frühjahrshochwasser früher im

Jahr auftreten und aufgrund der geringeren Schneemengen weniger stark ausgeprägt sein. Als Folge werden Niedrigwasserperioden im Sommer wahrscheinlicher, da mehr Wasser bereits früher im Jahr abfließt. Man kann davon ausgehen, dass gleichzeitig der Wasserbedarf verschiedener Nutzerinnen und Nutzer während wärmeren und trockeneren Sommermonaten steigen wird, wodurch es zu Nutzungskonflikten kommen kann. Teilweise können Zeiten mit Wassermangel durch Speicherung in natürlichen und künstlichen Seen ausgeglichen werden (Brunner et al., 2019). Dies wird jedoch dadurch erschwert, dass sich die Seen häufig nicht dort befinden, wo die Wasserspeicherung am meisten benötigt wird. Der Wasserbedarf ist nördlich der Alpen besonders gross, viele Stauseen befinden sich aber auf der Alpensüdseite.

Veränderte Wasserverfügbarkeit weltweit

Neben den direkten Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Wasserverfügbarkeit in der Schweiz sind aber auch indirekte Auswirkungen zu erwarten. In vielen Regionen mit knappen Wasserressourcen können bereits kleine klimabedingte Veränderungen zu Versorgungsproblemen führen. Auch wenn alarmistische Prognosen über sogenannte Wasserkriege der Zukunft häufig überzogen sind, führt der Wassermangel in Teilen der Erde doch zu Spannungen und Migrations-

bewegungen, die weltweite Folgen haben können (Brzoska & Fröhlich, 2016). Es gibt aber auch ganz konkrete Beispiele, wie die Schweiz von klimabedingten Veränderungen im Ausland betroffen sein kann. Ein Drittel des jährlichen Mineralölbedarfs wird über die Rheinschifffahrt in die Schweiz transportiert. Niedrigwasserperioden, die wahrscheinlich häufiger auftreten werden, können diesen Transportweg stark beeinträchtigen. Die Schweiz importiert auch viele Nahrungsmittel, deren Produktion Wasser benötigt. Der Nahrungsmittelimport ist damit auch ein Import von «virtuellem» Wasser. Mehr als die Hälfte des Wasserbedarfs zur Produktion der in der Schweiz verbrauchten Lebensmittel wird im Ausland verursacht, häufig in Regionen, in denen weit geringere Wasserressourcen als in der Schweiz zur Verfügung stehen. Klimabedingte Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit können hier Auswirkungen auf die Nahrungsmittelproduktion haben, die dann auch den Export in die Schweiz betreffen würden.

Die Klimaveränderung wird Änderungen in der Wasserverfügbarkeit und erhöhte Risiken für Überschwemmungen aber auch Wassermangel mit sich bringen. Auch wenn die Schweiz durch diese hydrologischen Auswirkungen des Klimawandels nicht existenziell bedroht sein mag – das Leben im Wasserschloss könnte ungemütlicher werden. ♦

Literatur

- Addor, N., & Seibert, J. (2014). Bias correction for hydrological impact studies – beyond the daily perspective. *Hydrological Processes*, 28(17), 4823–4828. <https://doi.org/10.1002/hyp.10238>
- Addor, N., Rössler, O., Köplin, N., Huss, M., Weingartner, R., & Seibert, J. (2014). Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. *Water Resources Research*, 50, 1–22. <https://doi.org/10.1002/2014WR015549>
- Brunner, M. I., Björnsen Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., & Stähli, M.

- (2019). Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Science of the Total Environment*, 666, 1033–1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>
- Brzoska, M., & Fröhlich, C. (2016). Climate change, migration and violent conflict: vulnerabilities, pathways and adaptation strategies. *Migration and Development*, 5(2), 190–210. <https://doi.org/10.1080/21632324.2015.1022973>
- 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. Retrieved from <http://www.bafu.admin.ch/wasser/01444/01991/10443/index.html?lang=de>
- Leutwyler, D., Lüthi, D., Ban, N., Fuhrer, O., & Schär, C. (2017). Evaluation of the convection-resolving climate modeling approach on continental scales. *Journal of Geophysical Research*, 122(10), 5237–5258. <https://doi.org/10.1002/2016JD026013>
- Schaeffli, B., Manso, P., Fischer, M., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). The role of glacier retreat for Swiss hydropower production. *Renewable Energy*, 132, 615–627. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.104>
- Stahl, K., Weiler, M., Freudiger, D., Kohn, I., Seibert, J., Vis, M., et al. (2016). Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) - Enderfassung 08/2016. Bericht CHR 00-2016. www.chr-khr.org/en/publications. Retrieved from <http://www.chr-khr.org/de/veroeffentlichung/>



Jan Seibert

Prof., hat an der Universität Uppsala in Schweden promoviert und ist seither in der hydrologischen Forschung tätig. Seit 2009 ist er Professor am Geographischen Institut der Universität Zürich und leitet dort die Gruppe für Hydrologie und Klima.

Jan Seibert

Universität Zürich
Geographisches Institut
Hydrologie und Klima
Winterthurerstrasse 190
8057 Zürich
044 635 52 00
jan.seibert@geo.uzh.ch