

Welchen Einfluss hat der Klimawandel auf die Wasserkraft in der Schweiz bis 2100?

[Viola Dülly, Julia Dworzak, Sophie Eisenring, Annina Napierala, Henrike Nelissen, Chiara Wülser]

Zusammenfassung

Mehr als die Hälfte des in der Schweiz genutzten Stroms wird durch die inländische Wasserkraft generiert (21), wobei dieser Anteil im Sinne der Energiestrategie 2050 noch weiter ausgebaut werden soll (19). Unter dem Einfluss des Klimawandels ergeben sich folgende Prognosen für den Wasserzufluss und die entsprechend mögliche Stromproduktion von Wasserkraftwerken in der Schweiz:

Aufgrund des Klimawandels wird in der Schweizer Alpenregion die sommerliche Niederschlagsmenge in Zukunft um bis zu 29% ab- und im Winter um bis zu 25% zunehmen (5). Das Klima verändert sich zudem von gemässigten Wetterphänomenen hin zu Starkniederschlagsereignissen und extremeren Trockenperioden (1).

Auch ein Rückgang der Gletscher ist eine Folge des Klimawandels (10). Die Verlustrate an Gletschermasse für die Jahre 2000 bis 2014 über die gesamte Alpenkette hinweg gerechnet, wird auf 1.3Gt pro Jahr geschätzt (7). Simulationen zur Entwicklung kleiner Gletscher (<0.5km²) kamen zum Ergebnis, dass, gestützt auf Durchschnittswerte verschiedener Klimaszenarien, 71% aller kleinen Gletscher bis ins Jahr 2040 verschwinden werden (9).

Das klimawandelbedingte Abschmelzen der Gletscher resultiert in einer kurzfristigen Zunahme des Abflusses (11). Dieser Peak nimmt jedoch nach kurzer Zeit wieder ab (11), wie dies bei kleineren Schweizer Gletschern bereits der Fall ist (13). Besonders im August wird der Abflussanteil aus Gletschern stark abnehmen (11)(12).

Schätzungen zufolge wird sich das Abschmelzen der Gletscher und die damit verbundene, langfristige Abnahme im Abfluss von Flüssen in der Wasserkraft ab dem Jahre 2050 (21) durch einen Verlust von bis zu 30% bemerkbar machen (25). Es wird mit einem jährlichen Energieverlust von 0.56TWh gerechnet (21), welcher selbst durch Starkniederschlagsereignisse und kurzweilige Peaks im Abfluss von Flüssen nicht ausgeglichen werden kann (25). Zugleich können Starkniederschläge auch zum Überlaufen von Wasserwerken führen, wodurch weiteres Wasser verloren geht und nicht zur Energiegewinnung verwendet werden kann (25). Im Gegensatz dazu wurde in den letzten Jahren eine vermehrte Bildung von Seen in den Alpen beobachtet (4), die ein Potential von ungefähr 2.7% für den Gewinn von Wasserkraft aufweisen (20) (24).

Teilrecherche 1: Auswirkungen des Klimawandels auf die jährliche Niederschlagsverteilung und Häufigkeit von extremen Niederschlagsbedingungen (Trockenheit und Starkniederschläge)

[Julia Dworzak]

Kurzzusammenfassung

In der Alpenregion wird laut Berechnungen aus regionalen Klimamodellen die sommerliche Niederschlagsmenge um bis zu 29% abnehmen (5). Im Winter soll die Niederschlagsmenge um bis zu 25% zunehmen (5). Dabei soll insbesondere die Intensität von Niederschlagsereignissen zunehmen, während die tägliche und stündliche Frequenz abnimmt (2). Daraus folgt, dass auch das Risiko von extremen Niederschlags-Konditionen, also Starkniederschlägen sowie Trockenperioden, ansteigt (1). Insgesamt sind genaue Prognosen allerdings mit einer grossen Unsicherheit verbunden, die u.a. daher kommen, dass der Alpenraum in einer Übergangszone zwischen Nord- (mehr Niederschlag im Winter) und Südeuropa (weniger Niederschlag im Sommer) liegt (4). Ausserdem sind in höheren Lagen aufgrund von steigendem Potential für konvektiven Niederschlag noch kleinskalige Niederschlagsveränderungen nicht auszuschliessen, die eine einheitliche Prognose für den gesamten Alpenraum zusätzlich erschweren (3).

Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region (1)

Untersucht Veränderung von Niederschlag und Extremen im 21. Jh. in Europa und Alpenregion anhand von RCMs. Das Risiko für das häufigere Auftreten von extremen Niederschlags-Konditionen steigt (Trockenperioden und Starkniederschlägen).

Analysis of Alpine precipitation extremes using generalized extreme value theory in convection-resolving climate simulations (2)

Projektionen für zukünftigen Niederschlag mit COSMO-CLM Modell. Im Sommer nimmt mittlere Niederschlag ab und Anzahl Extremen zu. Abnahme der Frequenz von stündl. Niederschlag ist höher als Abnahme von tägl. Über Alpen nimmt im Winter mittlere Niederschlag ab und in Umgebung zu. Die tägl. und stündl. Frequenz nimmt ab, Intensität zu.

Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming (3)

Vergleich zwischen globalen und regionalen Klimamodellen in Alpen. Regionale Modelle deuten auf einen Anstieg von Niederschlag in hohen Lagen in den Alpen hin. Grund dafür sind steigender konvektiver Niederschlag aufgrund erhöhter potentieller Instabilität. Die Resultate stellen die Gültigkeit einer einheitlichen Prognose (weniger Niederschlag im Sommer) in Frage.

21st century climate change in the European Alps-A review (4)

Kritische Betrachtung bisherigen Wissensstands über Auswirkungen Klimawandels in Alpen. Entstehen grosse Unsicherheiten der Niederschlagsänderung in Alpenregion, da diese in Übergangszone zwischen Nord- (mehr Niederschlag im Winter) und Südeuropa (weniger Niederschlag im Sommer) liegt. Jährliche Niederschlagszyklus wird ähnlich wie Zyklus RH und globalen Strahlung ändern.

Precipitation and temperature statistics in high-resolution regional climate models: Evaluation for the European Alps (5)

Vergleich zwischen mehreren regionalen Klimamodellen und Veränderung aufgrund Emissionsszenarien. Niederschlag nimmt im Sommer um bis zu 29% ab (manche Regionen bis zu 40%). Im Winter reichen die Prognosen der verschiedenen RCM von 4.5% bis 25% Zunahme. Alle Modelle stimmen bei Zunahme der Frequenz von Starkniederschlägen im Winter überein.

Teilrecherche 2: Auswirkungen des Klimawandels auf Gletscher

[Annina Napierala]

Kurzzusammenfassung

Der Rückgang der Gletscher ist eine Folge des Klimawandels (10). Das Schmelzen der Gletscher im Alpenraum ist nicht nur unglaublich schnell, sondern beschleunigt zunehmend aufgrund von Rückkopplungs- und selbstverstärkenden Effekten (z.B. Albedo) (8). Insgesamt wird der Verlust an Gletschermasse über die gesamte Alpenkette hinweg auf 1.3 gt pro Jahr geschätzt, dies für die Jahre zwischen 2000 und 2014 (7). Kann die Klimaerwärmung auf 1-2.5°C beschränkt werden und werden CO₂ Emissionen auf ein Minimum reduziert, so bleibt selbst der größte Gletscher im Europäischen Alpenraum, der Große Aletsch Gletscher, lediglich bis zur Jahrhundertwende bestehen (6). Bis zu 80% aller Gletscher im Alpenraum sind jedoch nicht von so einer großen Dimension, wie dies der Große Aletsch Gletscher ist. Für bis zu 71% aller kleinen Gletscher (<0.5km²) bedeutet der Klimawandel eine komplette Entgletscherung bis ins Jahre 2040 (9). Bei Zukunftsmodellen des Gletscherrückgangs muss die Trägheit der Gletscher berücksichtigt werden: die Antwort eines Gletschers aufsteigende Temperaturen kann bis zu Jahrzehnten dauern. Folglich wird der Gletscherschwund im europäischen Alpenraum von größerer Dimension sein als dies Modelle vorhergesagt haben (10).

Future retreat of Great Aletsch Glacier (6)

Anhand der Klimaszenarien CH2018 wird die Veränderung des Grossen Aletsch Gletschers (grösster Gletscher der Europäischen Alpen) in den kommenden Jahrzehnten modelliert. Es zeigt sich, dass selbst durch drastische Reduktion der CO₂ Emissionen und einer Stabilisation der Temperatur ein Rückgang des Grossen Aletsch Gletschers nicht verhindert werden kann. Grund dafür ist die Trägheit der Gletscherantwort auf Klimaveränderungen. Kann die Temperaturerhöhung auf 1-2.5°C beschränkt werden, so bleibt der Grosse Aletsch Gletscher bis ins Jahre 2100 bestehen. Rechnet man mit dem schlimmsten Klimaszenario, sprich 4-8°C Temperaturerhöhung im Jahresmittel, so wird der Grosse Aletsch Gletscher dem Klimawandel völlig unterlegen sein.

Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century (7)

Untersuchung des Gletscherrückgangs im Zeitraum von 2000 bis 2014 über den gesamten Alpenraum: Verschiedene Remote Sensing Techniken (z. B. Radar) wurden angewendet, um Veränderungen in der Gletscherverteilung, Eismasse und Oberflächenhöhe zu bestimmen. Es wird von einem durchschnittlichen Gletscherverlust von ca. 39km² pro Jahr gesprochen, in der Eisdicke variiert der Verlust je nach Region von 0.5-0.9m pro Jahr. Insgesamt wird der Verlust an Gletschermasse über die gesamten Alpenkette hinweg auf 1.3Gt pro Jahr geschätzt, dies im Zeitraum von 2000 bis 2014.

Integrated monitoring of mountain glacier as key indicators of global climate change: The European Alp's by Haeberli and others (8)

Der Massen- und Volumenverlust von Gletschern beschleunigt zunehmend. Dies liegt nicht nur an den direkten klimatischen Veränderungen, sondern auch Effekten wie dem abnehmenden Albedo-Effekt, welcher zunehmend selbstverstärkend wirkt. Dabei wird auch vom vertikalen Volumen- bzw. Massenverlust im Vergleich zum horizontalen Rückgang des Gletschers gesprochen. Modelle lassen auf eine nahezu vollständige Entgletscherung des Alpenraums bis zum Jahre 2100 schliessen. Zwischen 1850 und 1975 schätzt man den Gletscherrückgang im Alpenraum auf bis zur Hälfte des Gesamtvolumens, zwischen 1975 und 2000 nochmals 25% dieses Volumens und 10-15% bis zum Jahr 2005.

Sensitivity of Very Small Glaciers in the Swiss Alps to Future Climate Change (9)

Kleinere alpine Gletscher (<0.5 km²) machen mehr als 80% aller Gletscher in den mittleren Breitengraden aus. Modellierungen vergangener Datenanalysen zeigen, dass im Zeitraum von 1980 bis 2010 sehr kleine Gletscher (<0.5 km²) bereits 60% ihres Totalvolumens verloren haben. Zukunftsszenarien zeigen, dass im Zeitraum von 2010 bis 2040 die meisten kleinen Gletscher mit einem Volumenverlust von bis zu 90% zu rechnen haben und, dass 71% aller kleiner Gletscher verschwunden sein werden. Diese Daten stützen sich auf ein Klimaszenario, welches auf Durchschnittswerten der Modelle des CH2014-Impacts Report basiert. Committed retreat: Controls on glacier disequilibrium in a warming climate (10)

Thematisierung des Disequilibriums der Gletscher, sprich der Trägheit in der Antwort auf die Klimaerwärmung. Bis Gletscher auf eine Klimaerwärmung reagieren, vergehen mehrere Jahrzehnte. Folglich ist der volle Umfang der Gletscherschmelze noch ausstehend. Diese Verzögerung der 'Gletscherantwort' muss bei Modellierungen miteinbezogen werden.

Teilrecherche 3: Die Auswirkungen der Gletscherschmelze auf Flüsse in der Schweiz

[Viola Dülly]

Kurzzusammenfassung

Vergletscherte Einzugsgebiete haben auch bei kleinem Eisvolumen einen grossen Einfluss auf das Abflussregime eines Flusses (14). Die Gletscherschmelze trägt vor allem im August zum Abfluss bei. Sie hat eine ausgleichende Wirkung in warmen und trockenen Sommern (13). Durch den Klimawandel bedingte Schmelzen der Gletscher nimmt der Abfluss zuerst zu und nach einem Peak wieder ab (11). Dieser Peak wurde bei den kleinen Gletschern in der Schweiz bereits erreicht (13) und wird bei den grösseren in den nächsten Dekaden erreicht werden (12). Das Abflussregime wird sich ändern mit einer Zunahme im Juni und Abnahme im August und September (11)(12). Die Berechnungen des Gletscherabflusses beinhalten viele Unsicherheiten (15).

Global-scale hydrological response to future glacier mass loss (11)

Analysiert Gletscherabflussänderungen in 56 vergletscherten Einzugsgebieten bis 2100. Der Abfluss nimmt bis zu einem Peak zu und dann wieder ab. Je nach Gletschergösse wurde der Peak bereits erreicht. Höhere Saisonalität des Abflusses mit einem Peak im Sommer als bei eisfreien Gebieten.

Runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios (12)

Abfluss bis 2100 in 9 Einzugsgebieten der CH-Alpen mit GERM Model und Klimaszenarien aus European ENSEMBLE Projekt untersucht. Grössere Änderung bei mehr Vereisung. Abflussregime ändert von glazial zu nival mit Abflussmaxima früher im Jahr (Juni). Abflusspeak bei allen Gletschern bis 2050 erwartet.

Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels (13)

Gletscherschmelze-Abflussanteil im Rhein 1901-2006 analysiert. Durchschnittlicher Anteil von 8%, was stromabwärts abnimmt. Anteil grösser in Trockenjahren. Nicht stark verändert über Zeit, da der Rückgang der Gletscher die stärkere Schmelze kompensiert. Peak bei kleinen Gletschern erreicht.

Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe (14)

Beitrag von Gletschern zum Abfluss in Rhein, Rhone, Po und Donau über Gletscherspeicherveränderung. Besonders in trockenen Sommern wichtig. Der Schnee auf den Gletschern ist wichtig. Anteil ist nicht linear von der Gletschergösse abhängig. Beitrag im August nimmt um 75% ab bis 2100.

High uncertainty in 21st century runoff projections from glacierized basins (15)

Analysiert Unsicherheiten in zukünftigen Abflussmodellen von vergletscherten Einzugsgebieten. Modellierung am Findelengletscher in CH-Alpen. Wahl des Klimaszenarios sowie die korrekte Abbildung des anfänglichen Eisvolumens und der Schneebedeckung beeinflussen prognostizierte Abflussänderungen.

Teilrecherche 4: Klimawandel-induzierte Auswirkungen auf Seen und Flüsse in der Schweiz

[Henrike Nelissen]

Kurzzusammenfassung

Bäche und Flüsse erwärmen sich in Zukunft aufgrund des Klimawandels im Sommer um bis zu 5.5 Grad verglichen mit heute. Daher wird sich der Lebensraum für Wasserlebewesen stark verändern (16). Endorheische Seen sind am anfälligsten gegenüber dem Klimawandel, weil sie sensitiv auf Veränderungen im Zufluss und der Verdunstung sind (17). AKWs und thermische Kraftwerke werden aufgrund der Erwärmung der Gewässer weniger Kühlleistung aus den Gewässern beziehen können, was eine Anpassung der Kühlsysteme erfordert (18). In den letzten Jahren wurde die vermehrte Bildung von Seen in den Alpen beobachtet, welche neue Perspektiven für die Wasserkraft und den Tourismus bieten (4). Diese bis zu 500 neu gebildeten Seen könnten eine Fläche von bis zu 50km² und ein Volumen von 2 km³ haben, was 3% des heutigen Gletschervolumens der Schweiz entspricht (20).

Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft (16)

Fokus auf das Kapitel "Einfluss des Klimawandels auf die Temperaturen von Fliessgewässern und Seen: Wie entwickeln sich die Wassertemperaturen der Schweizer Fliessgewässer und Seen in Zukunft?" Für dieses Projekt wurden mit den Modellen Snowpack/Alpine 3D und StreamFlow Temperaturszenarien für insgesamt zehn Fliessgewässer in der Schweiz, davon vier in den Alpen (Inn, Kander, Landwasser, Lonza) berechnet.

Climate change and water - Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change (17)

Technischer Bericht des IPCC zu Frischwasser-Ressourcen. Klima und Frischwasser sind eng miteinander verbunden. Themen, die mit Frischwasser zu tun haben, sind daher sehr wichtig, um Schwachstellen zu erkennen, fasst der Bericht zusammen. Jegliche Änderung der Frischwasser-Ressourcen hat Auswirkungen auf die menschliche Gesellschaft und ist daher von grossem Interesse.

Die Schweiz im Jahr 2050: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft [...] (18)

Bericht des OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung), den die Schweizer Regierung in Auftrag gegeben hat, um Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Sektoren der Schweiz zu untersuchen und Handlungsempfehlungen für die Politik zu formulieren.

21st century climate change in the European Alps—A review (4)

Kritische Zusammenstellung der state-of-knowledge Studien zum Klimawandel in den europäischen Alpen. Da die Alpen topologisch komplex sind, sind hochaufgelöste Klimamodelle (RCM) nötig, um Vorhersagen machen zu können; diese Veränderungen werden grosse Auswirkungen auf Ökosysteme wie zB. schmelzende Gletscher und dadurch neu entstehende Lebensräume haben.

Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen - Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft (20)

Aufgrund des Klimawandels werden sich die heutigen Gletscher-Landschaften der Schweizer Alpen zu Fels-Schutt-Seen-Landschaften mit stark erhöhter Abtragsdynamik entwickeln. Im Projekt NELAK (Neue Seen als Folge der Entgletscherung in den Alpen) des Nationalen Forschungsprogramms 61 «Nachhaltige Wassernutzung» werden Grundlagen für den Umgang mit dieser absehbaren Entwicklung erarbeitet.

Teilrecherche 5: Einfluss der klimawandelbedingten Veränderungen von Wasserverfügbarkeit auf die Nutzung der Wasserkraft

[Chiara Wülser]

Kurzzusammenfassung

Schweizer Wasserkraftwerke wurden und werden stark von der Wasserverfügbarkeit aus dem alpinen Raum beeinflusst (23). Zukünftig wird dies mit dem voraussichtlichen Verschwinden der Gletscher zwischen 2040 und 2060 zu einem Verlust von 0.5TWh/Jahr führen (21). Dieser Verlust ist auch mit künftig häufiger auftretenden Extremereignissen nicht zu kompensieren, weshalb bis 2100 mit einem Verlust in der Abflussmenge von bis zu 30% gerechnet wird (25). Betreffend Sedimenttransport kann die Änderung im Wasservorkommen positiv als auch negativ sein, da sich dieser Transport generell reduziert, bei Extremereignissen aber problematisch sein kann (22). Zukünftig gletscherfreie Gebiete könnten für neue Wasserkraftwerke genutzt werden und haben ein Potential von 2.7% für neue Wasserenergie (24).

The Role of glacier retreat for Swiss hydropower production (21)

Modellierung Gletscherschmelze und Einfluss auf CH Wasserwerke. Gletscherverlust in der Vergangenheit 3-4% der Energieproduktion, Stagnation dieses Trends zwischen 2040-2060. Diese Stagnation führt zu einem Verlust von 0.56 TWh/Jahr. Betrifft alpine Wasserwerke stärker.

Climate Change impacts on bedload transport in alpine drainage basins with hydropower exploitation (22)

Kopplung regionaler Klimamodellen mit hydrologischen und Sedimenttransportmodellen. Sedimenttransport wird abnehmen und abhängiger sein von Extremereignissen. Ersteres ist positiv für Wasserwerke, letzteres weniger.

Variations in Discharge Volume for Hydropower Generation in Switzerland (23)

Modellierung von Abflüssen für Wasserkraftwerken, gespeist durch Wasser aus mesoskaligen CH - Einzugsgebieten. Verfügbares Wasser wurde und ist beeinflusst vom Klima, aber weniger Wasser ist nicht gleich weniger Strom. Die Änderungen im Wasservorkommen im alpinen Bereich sind am relevantesten für die CH Wasserkraftwerke.

Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins (24)

Berechnung potentieller Wasserspeicherkapazität, Wasserkraftpotential und Eignungswert in Berücksichtigung von umwelt- und technikrelevanten Faktoren für Gebiete, die zukünftig keine Gletscher mehr aufweisen werden. Das Potential der Schweiz beträgt dabei 2.7%.

Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century (25)

Kombination regionaler Klimamodelle und Gletscherrückgang für Modellierung zukünftiger Energieproduktion von Wasserwerken. Weniger verfügbares Wasser, keine Kompensation durch Extremereignisse. Abnahme der totalen Abflussmenge von bis zu 30% bis 2100.

Teilrecherche 6: Welchen Einfluss hat die Wasserkraft auf die Umwelt?

[Sophie Eisenring]

Kurzzusammenfassung

Wasserkraft ist nicht so umweltfreundlich wie allgemein angenommen wird (26). Dabei sind Wasserkraftwerke in alpinen Regionen viel klimafreundlicher (10x mehr), da benötigte Materialien direkt vor Ort vorzufinden sind und Transportwege minimiert werden (27)(28). Pumpwasserkraftwerke haben einen negativen Effekt, da das Ökosystem See gestört wird (29). Stauseen haben flussabwärts einige negative Folgen wie Störung von Fischmigration, Umleitung von Flüssen oder Fluktuationen des Wasserspiegels (30).

Hydropower in the Context of Sustainable Energy Supply: A Review of Technologies and Challenges (26)

Baut auf Grundlagen auf, gibt einen Überblick über die Nachhaltigkeit von Wasserkraft und die Herausforderungen. Es werden ökonomische, soziale, kulturelle Aspekte genannt, sowie Umweltrisiken, auch in Bezug auf den Klimawandel.

Environmental sustainability assessment of hydropower plant in Europe using life cycle assessment (27)

Damit Wasserkraft so umweltfreundlich wie möglich wird, ist es wichtig, Acht auf die Ressourcen, welche für den Bau und Betrieb der Anlage verwendet werden, zu geben. Dabei gibt es signifikante Unterschiede zwischen den Standorten der Wasserkraftwerke: Alpine Anlagen sind umwelttechnisch freundlicher, da sich die Ressourcen oftmals direkt vor Ort befinden und infolgedessen nicht weit transportiert werden müssen.

A strategic impact assessment of hydropower plants in alpine and non-alpine areas of Europe (28)

Die Relevanz des Transportweges für Wasserkraftwerke zeigt sich darin, dass alpine Anlagen nur 8% des "normalen" CO₂-Ausstosses generieren. Dieselbe Größenordnung kann dabei auch bei Methan beobachtet werden.

Combined effects of pumped-storage operation and climate change on thermal structure and water quality (29)

Untersucht den Einfluss von Pumpen von Wasser und Klimaerwärmung auf die Ökologie des Sihlsees. Dabei wurde festgestellt, dass die Sommerschichtung signifikant länger dauert und somit die Sauerstoffkonzentration sinkt, womit die Verfügbarkeit von Fischhabitaten reduziert wird.

Green Hydropower: The contribution of aquatic science research to the promotion of sustainable electricity (30)

Das Paper beschreibt die Problematik und Geschichte der Wasserkraft und die Entstehung des Green Hydropower Projekts. Dabei wird beschrieben, dass das Stauen von Wasser zu vielerlei Problemen führt, darunter die Umleitung von Flüssen, die Störung von Fischmigration, Fluktuationen von Wasserspiegel, etc. Um diese Probleme zu bekämpfen, müssen Betreiber von Wasserkraftwerken mit Wissenschaftlern und Umweltorganisationen zusammenarbeiten.

Literaturliste

1. Rajczak, J., Pall, P., & Schär, C. (2013). Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(9), 3610–3626. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50297>
2. Ban, N., Rajczak, J., Schmidli, J., & Schär, C. (2020). Analysis of Alpine precipitation extremes using generalized extreme value theory in convection-resolving climate simulations. *Climate Dynamics*, 55(1–2), 61–75. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4339-4>
3. Giorgi, F., Torma, C., Coppola, E., Ban, N., Schär, C., & Somot, S. (2016). Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nature Geoscience*, 9(8), 584–589. <https://doi.org/10.1038/ngeo2761>
4. Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps-A review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
5. Smiatek, G., Kunstmann, H., Knoche, R., & Marx, A. (2009). Precipitation and temperature statistics in high-resolution regional climate models: Evaluation for the European Alps. *Journal of Geophysical Research*, 114(D19), D19107. <https://doi.org/10.1029/2008JD011353>
6. Juvet, G., & Huss, M. (2019). Future retreat of Great Aletsch Glacier. *Journal of Glaciology*, 65(253), 869–872. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.52>
7. Sommer, C., Malz, P., Seehaus, T. C., Lippl, S., Zemp, M., & Braun, M. H. (2020). Rapid glacier retreat and downwasting throughout the European Alps in the early 21st century. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16818-0>
8. Lüthi, M. P., Funk, M., & Bauder, A. (2008). 'Integrated monitoring of mountain glacier as key indicators of global climate change: The European Alp's by Haeberli and others. *Journal of Glaciology*, 54(184), 199–200. <https://doi.org/10.3189/S0022143000210009>
9. Huss, M., & Fischer, M. (2016). Sensitivity of very small glaciers in the swiss alps to future climate change. *Frontiers in Earth Science*, 4(April), 1–17. <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00034>
10. Christian, J. E., Koutnik, M., & Roe, G. (2018). Committed retreat: Controls on glacier disequilibrium in a warming climate. *Journal of Glaciology*, 64(246), 675–688. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.57>
11. Huss, M., & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
12. Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A., & Funk, M. (2012). Runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, 26(13), 1909–1924. <https://doi.org/10.1002/hyp.8276>

13. Stahl, K., Weiler, M., Freudiger, D., Kohn, I., Seibert, J., Vis, M., Gerlinger, K., & Böhm, M. (2016). Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. In *Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)*.
https://www.researchgate.net/publication/305317035_Abflussanteile_aus_Schnee-und_Gletscherschmelze_im_Rhein_und_seinen_Zuflüssen_vor_dem_Hintergrund_des_Klimawandels
14. Huss, M. (2011). Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research*, 47(7), 1–14.
<https://doi.org/10.1029/2010WR010299>
15. Huss, M., Zemp, M., Joerg, P. C., & Salzmann, N. (2014). High uncertainty in 21st century runoff projections from glacierized basins. *Journal of Hydrology*, 510, 35–48.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.017>
16. BAFU. (2021). Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. In *Bundesamt für Umwelt* (Vol. 2101).
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/auswirkungen-des-klimawandels-auf-die-schweizer-gewaesser.html>
17. Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & J.P. Palutikof. (2008). *Climate change and water. Intergovernmental Panel on Climate Change. Part VI*.
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-en.pdf>
18. Schädler, B. (2007). *Die Schweiz im Jahre 2050: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft und andere wichtige Bereiche*.
19. Bundesamt für Energie. (2020). *Wasserkraft*.
<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/wasserkraft.html>
20. Haeberli, W., Schleiss, A., Linsbauer, A., Künzler, M., & Bütler, M. (2012). Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen. *Wasser Energie Luft*, 104(2).
<https://doi.org/https://doi.org/10.5167/uzh-140414>
21. Schaefli, B., Manso, P., Fischer, M., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). The role of glacier retreat for Swiss hydropower production. *Renewable Energy*, 132(January), 615–627.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.104>
22. Raymond Pralong, M., Turowski, J. M., Rickenmann, D., & Zappa, M. (2015). Climate change impacts on bedload transport in alpine drainage basins with hydropower exploitation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(12), 1587–1599. <https://doi.org/10.1002/esp.3737>
23. Hänggi, P., & Weingartner, R. (2012). Variations in Discharge Volumes for Hydropower Generation in Switzerland. *Water Resources Management*, 26(5), 1231–1252. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9956-1>

24. Farinotti, D., Round, V., Huss, M., Compagno, L., & Zekollari, H. (2019). Large hydropower and water-storage potential in future glacier-free basins. *Nature*, 575(7782), 341–344. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1740-z>
25. Finger, D., Heinrich, G., Gobiet, A., & Bauder, A. (2012). Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century. *Water Resources Research*, 48(2). <https://doi.org/10.1029/2011WR010733>
26. Kaunda, C. S., Kimambo, C. Z., & Nielsen, T. K. (2012). Hydropower in the Context of Sustainable Energy Supply: A Review of Technologies and Challenges. *ISRN Renewable Energy*, 2012, 1–15. <https://doi.org/10.5402/2012/730631>
27. Mahmud, M. A. P., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2018). Environmental sustainability assessment of hydropower plant in Europe using life cycle assessment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 351, 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/351/1/012006>
28. Mahmud, M. A. P., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2019). A strategic impact assessment of hydropower plants in alpine and non-alpine areas of Europe. *Applied Energy*, 250, 198–214. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.007>
29. Kobler, U. G., Wüest, A., & Schmid, M. (2019). Combined effects of pumped-storage operation and climate change on thermal structure and water quality. *Climatic Change*, 152(3–4), 413–429. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2340-x>
30. Truffer, B., Bratrich, C., Markard, J., Peter, A., Wüest, A., & Wehrli, B. (2003). Green Hydropower: The contribution of aquatic science research to the promotion of sustainable electricity. *Aquatic Sciences*, 65(2), 99–110. <https://doi.org/10.1007/s00027-003-0643-z>
31. National Centre for Climate Services, Zurich. (2018). CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/technical-report.html>
32. Bundesamt für Energie (BFE). (2020). Anzahl der Elektrowärmepumpen in der Schweiz von 1990 bis 2019. Statista. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/291824/umfrage/anzahl-der-elektrowaermepumpen-in-der-schweiz/>

