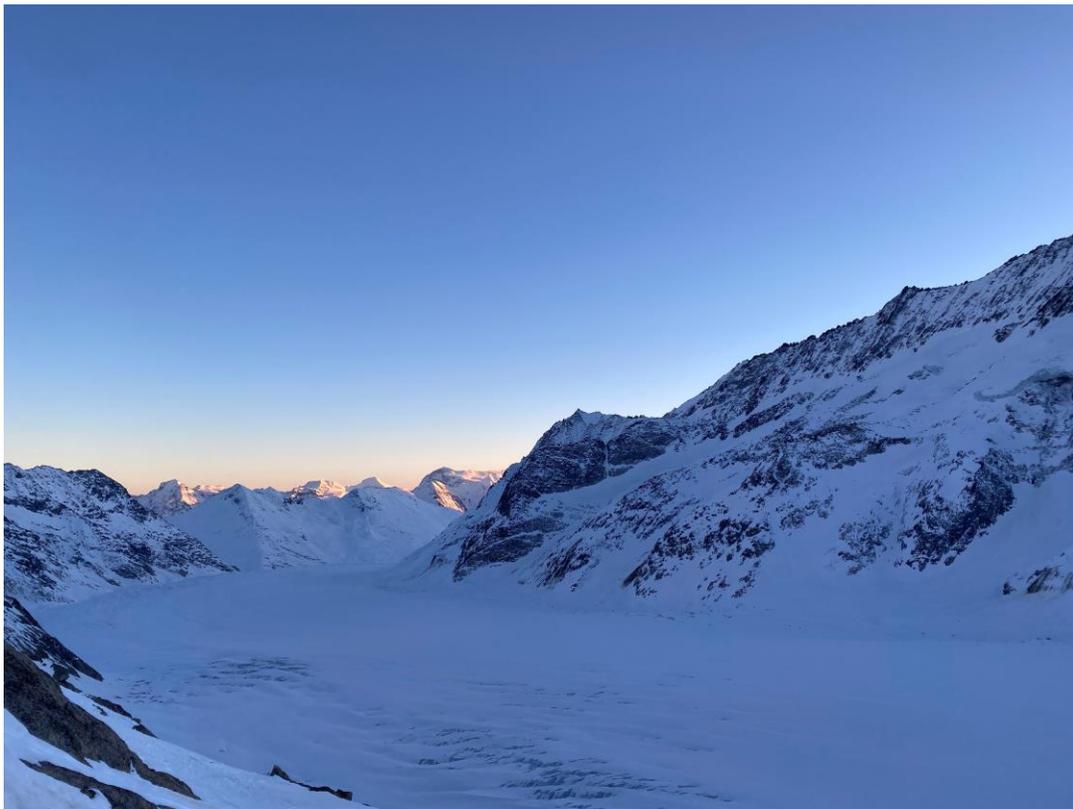


# Welche Auswirkungen sind auf Grund der Veränderung der Abflüsse in glazialen Einzugsgebieten der Schweiz in Bezug auf die Nutzung und den Umgang mit Gewässern in den kommenden hundert Jahren zu erwarten?

*Silas Schweizer, Rebekka Estermann, Carole Sattler, Tobia Lezuo, Juliette Aymon, Philipp Tandler, Daniel Wiedler*



*Quelle: Eigene Aufnahme*

## Zusammenfassung

Die Erwärmung wird in den nächsten Jahrzehnten zu mehr glazialelem Schmelzwasser führen. Ab Mitte Jahrhundert werden die glazialen Abflüsse durch den Gletscherschwund stark abnehmen.<sup>6</sup> Der monatliche Höchstwert der Abflüsse wird früher im Jahr erwartet<sup>3,9,10</sup> und der Abfluss im Winter wird zunehmen weil mehr Niederschlag in flüssiger Form fällt<sup>2</sup>.

Dies bedeutet für die Wasserkraft eine grössere Variabilität, da das Schmelzwasser als Puffer wegfällt<sup>11</sup>. Auf die Trinkwasserversorgung hat der veränderte Abfluss insofern Auswirkungen, als dass die Grundwasseranreicherung je nach Region bis zu 30% vermindert wird<sup>17</sup>, was insbesondere im Flachland zu Wasserknappheit führen könnte<sup>18</sup>. Zudem führen die vermehrt auftretenden Starkniederschlagsereignissen öfters zu verschmutztem Trinkwasser<sup>20</sup>. Extremere hydrologische und meteorologische Bedingungen können für die Landwirtschaft tiefere Bodenwassergehalte heissen, was die Qualität und Produktivität von Gras- und Ackerländer negativ beeinflussen wird<sup>25</sup>. Dadurch wird die Bewässerungsnachfrage steigen<sup>23</sup>. Auch der Gletscher-Tourismus ist von wärmeren Temperaturen und abschmelzenden Gletscher betroffen<sup>27</sup>. Jedoch kann durch die künstliche Schneeproduktion den Mangel an natürlichen Schnee entgegenwirken. Dies stellt jedoch keine langfristige und nachhaltige Lösung dar<sup>28</sup>.

Nicht zuletzt bringt der in den nächsten Jahren zunehmende und von Starkniederschlägen geprägte Abfluss auch Gefahren für die Bevölkerung in Form von Hochwasser mit sich. Um ausreichend davor zu schützen, müssen neue Hochwasserverbauungen geplant und umgesetzt werden, welches auch oft in Zusammenhang mit Revitalisierungsprojekten vollzogen wird.<sup>30,31,33</sup> Alles in allem sind aufgrund des veränderten Abflussregimes einiges an Anpassungen und Massnahmen nötig, mit einem guten Management und regionaler Zusammenarbeit, kann die Schweizer Bevölkerung die Probleme aber sicherlich erfolgreich meistern.<sup>31</sup>

# Teilrecherche 1: Abflussänderung Niederschlag

Philipp Tandler

## Kurzzusammenfassung

Das Abflussregime der Schwizer Alpen ist abhängig von der Höhe des Einzugsgebiet <sup>1</sup>. Aufgrund der wärmeren Temperaturen wird der Niederschlag vermehrt in flüssiger Form fallen <sup>2</sup>. Dadurch wird das Abflussregime in tieferen Einzugsgebieten durch Regen dominiert, was zu einem erhöhten Abfluss in den Wintermonaten führt <sup>2,3</sup>. Der monatliche Höchststand der Abflüsse wird früher wie bisher erwartet <sup>2-4</sup>. Insgesamt ist eine signifikante Verminderung der jährlichen Abflüsse zu erwarten <sup>4</sup>. Bei extremen Hitzewellen wird in wenig vergletscherten Einzugsgebieten nur noch 60% der gegenwärtigen Abflussmengen erwartet <sup>5</sup>. Ab etwa 15% Vergletscherung kompensiert in Hitzeperioden das zusätzliche Schmelzwasser der Gletscher die ausbleibenden Niederschläge. Die Abnahme des Schmelzwassers aus Gletschern wird unvermeidlich eintreten. <sup>1,5</sup>

## High-resolution distributed analysis of climate and anthropogenic changes on the hydrology of an Alpine catchment <sup>1</sup>

Das Paper zeigt eine hydrologische Analyse aufgrund zukünftiger Emissionsszenarien für das Einzugsgebiet der Schweizer Rhone. Für die Änderung des Abflussregimes wurde eine Abhängigkeit zur Höhe über Meer festgestellt. Die Konstruktion der existierenden hydraulischen Infrastruktur hat das Abflussregime der Rhone ähnlich stark beeinflusst wie die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels bis Mitte Jahrhundert. Der Beitrag der Gletscherschmelze wurde als wichtiger Prozess für zukünftige Vorhersagen der Abflüsse identifiziert, wobei die Verminderung von Gletscherwasser in Zukunft unvermeidlich ist.

## Simulating future trends in hydrological regimes in Western Switzerland <sup>2</sup>

Für die Abflüsse neun verschiedener Einzugsgebiete im Kanton Waadt wurden die mittelfristigen Einflüsse des Klimawandels analysiert. Wegen wärmeren Temperaturen wird eine erhöhte Menge an Niederschlag in flüssiger Form fallen und dadurch wird sich über den Winter weniger Schnee ansammeln. Der Höchststand des Schmelzwassers ist früher im Jahr zu erwarten (von Mai zu April), die Tiefststände der Abflüsse werden tiefer ausfallen. Es werden auch vermehrte Winterabflüsse erwartet.

## Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments <sup>3</sup>

Unsicherheiten in der Vorhersage zukünftiger Abflussregimes werden analysiert, diese stammen hauptsächlich aus den Klimamodellen und natürlicher Variabilität. Es werden dieselben Modelle auf sechs verschiedene Einzugsgebiete angewandt, um charakteristische Änderungen im Abflussregime festzustellen. Die Klimamodelle sind die Hauptquelle der Unsicherheiten, allerdings sind auch die Unsicherheiten der hydrologischen Modelle aufgrund der Schnee- und Gletscherschmelze relevant. Es ist ein verminderter Abfluss im Sommer, ein erhöhter Abfluss im Winter und eine Verschiebung zu mehr Regen dominierter Abflussregimes zu erwarten.

## Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty<sup>4</sup>

Die Studie analysiert die Unsicherheiten verschiedener Klimamodelle in der Vorhersage des Abflussregimes. Outputs von Klimamodellen werden verwendet, um hydrologische Modelle und Gletscher/Schneemodelle zu speisen für elf verschiedene charakteristische Einzugsgebiete in der Schweiz. Eine signifikante Verminderung des jährlichen Abflusses ist zu erwarten und grundsätzlich auch ein früherer Start der Schmelzwassersaison. Für die elf Flüsse werden zukünftige Abflussdiagramme gezeigt.

## Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps <sup>5</sup>

In diesem Paper werden die Auswirkungen extremer Hitzewellen auf den Abfluss verschieden stark vergletscherten Einzugsgebieten am Beispiel der Hitzewelle von 2003 untersucht. Es wurden Messdaten analysiert und eine hydrologische Modellierung (PREVAH) durchgeführt. Die hydrologischen Reaktionen, lassen sich zum grössten Teil durch die Meereshöhe und den Grad der Vergletscherung im Einzugsgebiet erklären. In kaum vergletscherten Einzugsgebieten wurden weniger als 60% des üblichen Abflusses gemessen. In Einzugsbecken mit <10% Gletscher kompensiert das Schmelzwasser z.T. die Abflussmenge. Bei etwa 15% Gletscher hielt sich der zusätzliche Abfluss durch Schmelzwasser und der limitierte Abfluss aufgrund der Hitze ungefähr die Waage. Wegen dem Schmelzen der Gletscher wird die Variabilität der Abflüsse auch in alpinen Einzugsgebieten zunehmen. Diese Reaktionen sind möglicherweise eine Eigenheit des 21. Jh., in der eine Transition zwischen Klima Ende 20.Jh. und Klima in der zweiten Hälfte des 21. Jh. auftritt.

## Teilrecherche 2: Abflussänderung - Gletscher

*Tobia Lezuo*

### Kurzzusammenfassung

Der beobachtete Gletscherrückgang im letzten Jahrhundert ist verursacht durch höhere Temperaturen (besonders im Sommer) und der somit steigenden Schneefallgrenze und Ablationslinie <sup>6,7</sup>. Dieser Trend wird sich laut Klimamodellen in Zukunft fortsetzen und in der Schweiz bis 2100 zum Verlust von 63-100% aller vergletscherten Flächen führen <sup>8</sup>. Dadurch werden viele Einzugsgebiete in der Schweiz vom glacio-nivalen zum nivalen Abflussregime übergehen und somit den maximalen Abfluss im Frühling anstatt im Sommer verzeichnen <sup>9</sup>. In den nächsten 2-3 Jahrzehnten wird der totale Abfluss (vor allem der sommerliche Abfluss) zunehmen, besonders in stark vergletscherten Gebieten <sup>6</sup>. Nach Erreichen eines Maximums wird der totale Abfluss bis 2100 kontinuierlich abnehmen (vor allem in den späten Sommermonaten) <sup>6</sup>. Je höher der Vergletscherungsgrad eines Einzugsgebiets, desto später wird dieses Maximum erreicht <sup>9</sup>. Die Unsicherheit dieser Modellvorhersagen beträgt nach Modell und Vorhersagezeitraum zwischen 5% und 100%, das Ausmass der Veränderungen bleibt unsicher <sup>8</sup>.

### Changes in glaciers in the Swiss Alps and impact on basin hydrology: Current state of the art and future research <sup>6</sup>

Fragestellung: Wo stehen wir im Bezug auf das Verständnis von vom Klimawandel verursachten glaziologischen Veränderungen? Methoden: Literaturrecherche; Massenbilanz-Modell ECHAM5-r3 GCM gefüttert mit A1B Emissionsszenario. Ergebnisse: Rückgang der vergletscherten Fläche bisher 1-3%/Jahr; vor allem kleine Gletscher sind verschwunden und haben einen grossen Anteil an den Rückgang gehabt; Probleme bei Modellierungen: Geröll beeinflusst Schmelze, Schlussfolgerungen: Schwierigkeit, Modellergebnisse von verschiedenen Modellen und unterschiedlicher Daten-Qualität, zu vergleichen; Kalibrierungs-Strategien, Gleichungen und Diskretisierungen sollten in allen Modellstudien identisch gewählt werden, um sie vergleichbar zu machen; für Abfluss-Simulationen sollten nicht Reservoir-Schemen sondern physikalische Modelle verwendet werden; zur Verbesserung der Bias klimatologischer Modelle sollten katabatische und boundary-layer -Effekte berücksichtigt werden.

## Climate, glaciers and permafrost in the Swiss Alps 2050: scenarios, consequences and recommendations <sup>7</sup>

Fragestellung: Wie wird die alpine Kryosphäre auf klimatologische Veränderungen bis 2050 reagieren? Methoden: Synthese und Ergebnisse verschiedener klimatologischer Simulationen und Gletscher-Massenbilanzen für die Schweizer Alpen. Ergebnisse: Temperatur +1.8°C im Winter; Temperatur +2.8°C im Sommer; Schneefallgrenze +360m, Niederschläge +10% im Winter, Niederschläge -20% im Sommer; Gletscherfläche -50-75%; Hydrologie: Maximaler Abfluss früher und weniger markant, höhere Überflutungsgefahr im Winter, weniger Schmelz- mehr Niederschlagsbeitrag zum Abfluss. Schlussfolgerungen: Ernsthafte Folgen für viele alpine Gebiete sind bereits unvermeidbar. Beobachtung und Risikoabschätzungen für Hangstabilität, vor allem in vergletscherten Gebieten wird empfohlen.

## High uncertainty in 21st century runoff projections from glacierized basins <sup>8</sup>

Fragestellung: Welche sind die wichtigsten Unsicherheiten für die Modellierung vom zukünftigen Abfluss von vergletscherten Einzugsgebieten? Methoden: GERM- Modell; Unsicherheiten durch Input-Variation getestet. Ergebnisse: Die wichtigsten Unsicherheiten sind die Temperatur- und Niederschlagsvorhersagen mehrere klimatologische Modelle (globale und regionale) können Unsicherheit reduzieren; Verwendung von nur regionalen Klimamodellen oder delta-change-approach liefern ähnlich gute Ergebnisse; Schlussfolgerungen: Hohe Unsicherheiten für: August-Abfluss -94% bis -5%, Jährlicher Abfluss 57% bis +25%, Vergletscherte Fläche -100% bis -63%; Interpretation der Modellergebnisse mit Vorsicht; Feldmessungen und Grundlagenstudien sind wichtig, um die Modelle zu testen und die Unsicherheiten zu reduzieren.

## Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios <sup>9</sup>

Fragestellung: Wie wird sich der Abfluss in hochalpinen Einzugsgebieten in der Schweiz im nächsten Jahrhundert verändern? Methoden: Modell GERM; 9 Einzugsgebiete unterschiedlicher Grösse, Vergletscherungsgrad, jährlichem Niederschlag. Ergebnisse: Hoher Vergletscherungsgrad -> starke Veränderungen; Erste Phase mit höherem Abfluss gefolgt von Phase mit reduziertem Abfluss; Transition von glazio-nivalem zu nivalem Abflussregime; jährliches Maximum um 4 Tage/Jahrzehnt zu früher in der Saison; Rückgang der Dauer von Schneebedeckung; ELA (equilibrium line altitude) wird um 70m/Jahrzehnt steigen -> erreicht Berggipfel im Grossteil der untersuchten Gebiete. Schlussfolgerungen: Früherer Abflussmaximum im Jahresablauf; Maximaler jährliche Abfluss in allen Einzugsgebieten bis 2050 erreicht.

## Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate <sup>10</sup>

Fragestellung: Wie wird sich die vergletscherte Fläche und der Abfluss in einem stark vergletscherten Einzugsgebiet bis 2100 verändern? Methoden: Mit dem GERM-Modell wird für das Zinal-Tal im Wallis die Vergletscherung und der Abfluss für verschiedene Klimaszenarien modelliert. Ergebnisse: Massiver Gletscherrückgang für alle Szenarios. Jährlicher Abfluss nimmt in nächsten Jahrzehnten zu. Danach Verschiebung des maximalen Abflusses und Abflussrückgang. Maximaler jährliche Abfluss je nach Vergletscherungsgrad zwischen 2020 und 2040 erreicht: Je höher der Vergletscherungsgrad, desto später. Wichtigkeit des glazialen Schmelzwassers wird abnehmen, Evaporation wird an Bedeutung dazugewinnen. Schlussfolgerungen: Grosse Unsicherheiten bei Vorhersagen durch grosse Unsicherheiten in der klimatologischen Vorhersage.

## Teilrecherche 3: Wasserkraft

Silas Schweizer

### Kurzzusammenfassung

Aufgrund der grossen regionalen Unterschiede ist es schwierig, die Stromproduktion durch Wasserkraft in Zeiten des Klimawandels vorherzusagen. Unumstritten ist aber, dass die Pufferwirkung von Gletscherschmelzwasser abnehmen wird und die Stromproduktion künftig vom Niederschlagsmuster bestimmt wird.<sup>11</sup> Schweizweit wird die Stromproduktion durch Wasserkraft bis 2050 um 0.5 Twh/yr zurückgehen<sup>12</sup>. Eine Fallstudie für zwei Kraftwerke im Kanton Wallis prognostizierte in einem Rückgang der Stromproduktion um 50% bis 2100<sup>13</sup>. Eine andere Studie im italienischen Aostatal konnte keine verlässlichen Vorhersagen zur Stromproduktion machen, da die Unsicherheit bezüglich der künftigen Niederschlagsverteilung zu gross ist<sup>13,14</sup>. Künftig wird das Management von Pumpspeicherkraftwerke von essenzieller Bedeutung sein. Durch optimierte betriebliche Abläufe sollten sich die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Stromproduktion weitestgehend abfedern lassen.<sup>14,15</sup>

### Hydropower Potential in the Alps under Climate Change Scenarios. The Chavonne Plant, Val D'Aosta<sup>11</sup>

Die Auswirkungen des Klimawandels werden auf ein einzelnes Wasserkraftwerk und das dazugehörige Einzugsgebiet analysiert. Der Staudamm, den sie für die Fallstudie verwendeten, befindet sich im Aostatal. Für ihr Modell verwendeten sie die verschiedenen IPCC-Klimaszenarien und quantifizierten die daraus resultierende Veränderung der Wasserkraftproduktion. Die Ergebnisse sind aufgrund der Unsicherheit der Niederschlagsprognosen nicht eindeutig. Da die Eisschmelze nur 1,6 % zur Wasserkrafterzeugung in diesem Kraftwerk beiträgt, wird der Effekt einer weiteren Gletscherschmelze durch die wahrscheinlichen Änderungen im Niederschlagsmuster überlagert.

### The role of glacier retreat for Swiss hydropower production<sup>12</sup>

In diesem Paper werden die Auswirkungen der schmelzenden Gletscher auf die Wasserkraftproduktion der Schweiz modelliert. Sie fanden heraus, dass der Massenverlust der Gletscher seit 1981 für 3-4% der gesamten Schweizer Wasserkraftproduktion verantwortlich war. Dieser Beitrag wird abnehmen und bis 2050 zu einem Verlust von 0,5 TWh/Jahr führen. Dies steht im Gegensatz zur Schweizer Energiestrategie, die eine Steigerung der Wasserkraftproduktion um mindestens 1,5 TWh/Jahr vorsieht.

### 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<sup>13</sup>

In diesem Paper werden regionale Klimamodelle mit der Vorhersage des Gletscherrückgangs kombiniert, um die zukünftige Produktivität von Wasserkraftwerken im Kanton Wallis abzuschätzen. Sie fanden heraus, dass die steigenden Temperaturen zu weniger Flussabfluss durch Schneeschmelze führen werden. Auch die Saisonalität des Abflusses wird sich ändern, wobei die Spitze früher im Jahr auftreten wird. In den Sommermonaten wird der Abfluss deutlich zurückgehen. Zunehmende Niederschläge werden dies wahrscheinlich nicht kompensieren können, so dass die Stromproduktion abnehmen wird. Sie schätzen diesen Rückgang bis 2050 auf etwa 30 % und bis 2100 auf 50 % gegenüber dem heutigen Stand.

### Potentially modified hydropower production under climate change in the Italian Alps<sup>14</sup>

Die Studie von Bombelli et al. (2019) modellierte die Wasserkraftproduktion für die gesamte norditalienischen Alpen. Sie verwenden ein ähnliches Modell wie Durratorre et al. (2020). Sie stellen fest,

dass die zukünftige Stromproduktion durch Wasserkraft zunehmend vom Niederschlag bestimmt wird. Die Pufferwirkung von Gletscherschmelzwasser wird abnehmen. Grosser Stauseen in Verbindung mit optimierten Bewirtschaftungspraktiken können diesen Effekt etwas ausgleichen. Die gesamte jährliche Wasserkraftproduktion hängt vom Klimaszenario ab, aber es gibt einen klaren Trend zu einer höheren Produktion.

#### [Climate Change Impacts on Hydropower Management](#) <sup>15</sup>

Gauduard et al. (2013) analysierten den Einfluss des Klimawandels auf die Wasserkraftproduktion und die Stromnachfrage. Sie berechnen einen optimalen Turbinen-Zeitplan für ein Kraftwerk in der Schweiz, dessen Einzugsgebiet heute zu 40% von Gletschern bedeckt ist. Ihre Simulationen zeigen eine Abnahme der jährlichen Produktivität des Kraftwerks bis zum Jahr 2050. Für die Energienachfrage fanden sie heraus, dass ein verändertes Verbraucherverhalten einen grösseren Einfluss haben wird als die sich ändernden Temperaturen aufgrund des Klimawandels. Die veränderten Abflussmuster könnten zumindest teilweise durch optimiertes Management kompensiert werden.

## Teilrecherche 4: Trinkwasser

*Rebekka Estermann*

### [Kurzzusammenfassung](#)

Aufgrund der abschmelzenden Gletscher verschiebt sich die Abflussspitze in den Frühling, was zu einer Reduktion im verfügbaren Trinkwasser in Sommermonaten führt <sup>16</sup>. Dies wurde in einem Karst-Gebiet mittels Tracer-Methode bestätigt <sup>17</sup>, wobei dort eine Abnahme von 20-30% berechnet wird. Das sinkende Wasserangebot wird mit der Nachfrage nach Trinkwasser verglichen, wodurch je nach Region auf Wasserknappheit geschlossen werden kann. Dies ist insbesondere im Flachland der Fall. <sup>18</sup> Zudem kann es auch zur Verschmutzung vom Trinkwasser führen <sup>19</sup>. Die Schweizer Regierung reagiert vor allem reaktiv und mit lokalem Zusammenarbeiten, müsste aber noch mehr Transparenz schaffen und eine regionalere Zusammenarbeit anstreben, um das Problem gemeinsam lösen zu können. <sup>20</sup>

### [Wasserressourcen der Schweiz](#) <sup>16</sup>

Basierend auf den Daten des nationalen Forschungsprogramms "Nachhaltige Wassernutzung" (NFP 61) wird abgeschätzt wie viel Wasser gegenwärtig und zukünftig vorhanden sein wird und welchen Verwendungszweck es findet. Die Mehrheit des Abflusses der Alpen stammt von der Schnee- und Gletscherschmelze, deren Abnahme frühere Schmelzwasserspitzen und somit längere Trockenperioden bewirkt im Sommer. Das von den Flüssen gespiesene Grundwasser (Trinkwasserquelle) nimmt dadurch ab. Rund 21% vom Wasserverbrauch dient als Trinkwasser.

### [Geometry and drainage of retreating glacier overlying and recharging a karst aquifer, Tsanfleuron-Sanetsch, Swiss Alps](#) <sup>17</sup>

Welchen Einfluss hat der abschmelzende Gletscher auf den darunterliegende Karstgrundwasserspeicher (Region Tsanfleuron Sanetsch), welcher als Trinkwasserquelle dient? Die Untersuchung wurde mithilfe Multi-Tracer Tests und geophysikalischen und hydrogeologischen Methoden durchgeführt. Es konnte eine Abnahme von 20-30% des Abflusses vor allem im Sommer und Herbst festgestellt werden, was temporäre Wasserknappheit verursachen wird.

## Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes <sup>18</sup>

Um zukünftig der Trinkwasserknappheit vorzubeugen, werden Speicherseen in Erwägung gezogen. Die Berechnungen basieren auf hydrologischen Flussmessungen, Gletscherrückzugsraten, Klimadaten, (Trink-)Wasserverbrauch, demographische Daten. Die Trinkwassernachfrage wird in Zukunft zunehmen aufgrund des Bevölkerungswachstum, der sommerliche Abfluss hingegen wird abnehmen. Wasserknappheit wird vor allem im Flachland nördlich der Alpen und weniger in den Alpen selbst erwartet, wobei jedoch das Rückhaltepotential in den Alpen kleiner ist und es ein räumliches Missverhältnis zwischen dem Norden und Süden gibt bezüglich Speicherkapazität und Wasserknappheit.

## The Alps under climate change: implications for water management in Europe <sup>19</sup>

Das Paper zeigt die Bedeutung des Bergwassers im Flachland auf und untersucht die Auswirkung des Klimawandels auf den Wassersektor in den Bergen und dem Flachland. Berggebiete sind aufgrund geringer Bevölkerungsdichte und grundsätzlich grossem Wasserangebot kaum von Knappheit in Zukunft betroffen, trotz der Verschiebung des maximalen Abflusses weiter ins Frühjahr. Das Flachland ist aufgrund hoher Menschendichte und abnehmendem geringem Angebot im Sommer stärker betroffen von Trockenperioden. Durch die Zunahme der Überflutungen im Frühling und der steigenden Wassertemperatur wird es grössere Verschmutzung des Grundwassers (Trinkwasser) geben. Durch technische Massnahmen ist dieses Problem aber gut lösbar.

## Exploring water governance arrangements in the Swiss Alps from the perspective of adaptive capacity <sup>20</sup>

Wie reagiert die Schweizer Regierung auf Wasserknappheit und was könnte verbessert werden? Die Evaluierung fand aufgrund Interviews und Recherchen mit der Crans-Montana-Sierre Region als Fallbeispiel statt. Bisher wurde meist reaktiv reagiert, die Infrastruktur verbessert und lokale Zusammenarbeiten innerhalb des bisherigen rechtlichen Rahmens angestrebt. Selten wurde proaktiv auf regionaler Ebene nach Lösungen gesucht. Es werden Empfehlungen zur Verbesserung gegeben wie Transparenz, mehr Zusammenarbeit, klären der Wasserrechte unter anderem.

## Teilrecherche 5: Landwirtschaft

*Juliette Aymon*

### Kurzzusammenfassung

Die Abflussänderungen in glazialen Einzugsgebieten werden die Landwirtschaft in diesen Regionen beeinflussen. Es ist ein erhöhter Wasserverbrauch zur Bewässerung in den Sommermonaten zu erwarten (4-16% und bis 35% in trockenen Gebieten) <sup>21,22</sup>. Gründe dafür sind die unterschiedlich starke Abnahme der sommerlichen Abflüsse (bis zu -50-75% in der Rhone, VS) sowie das tiefere Bodenwassergehalt <sup>23 24</sup>. Andererseits werden extremere hydrologischen und meteorologischen Bedingungen sich auf die alpine Vegetation, die Graslandqualität sowie die Biodiversität negativ auswirken <sup>23 25</sup>. Die Mehrheit, der in den Alpen geernteten Arten, sind nämlich sehr empfindlich auf Niederschlagdefizite <sup>23</sup> und manche Ökosysteme, wie Feuchtgebiete und Grasland, sind empfindlich auf Dürren <sup>25</sup>.

### Governing and managing water resources under changing hydro-climatic contexts: The case of the upper Rhone basin <sup>21</sup>

Welche sind die Herausforderungen und Gelegenheiten für die Anpassung an den Wirkungen des Klimawandel auf die Hydrologie im Rhone-Einzugsgebiet im Wallis. Die Basis für das Paper sind Resultate des Projekts "EU-FP7 ACQWA". Dazu noch Begrenzung der räumlichen und zeitlichen Rahmen. Die gesetzlichen Rahmen der jeweiligen Einzugsgebiete werden untersucht und mit den zu erwartenden Änderungen verglichen. Zunahme der Wasserverbrauch für Ernten aufgrund höherer Evapotranspiration (ca +10% in Juli in Visp). Wasserknappheiten besonders in trockenen Gebieten häufiger --> zusätzliche Bewässerung der Ernten (max. + 35%). Während besonders trockenen Jahren wird die Bewässerungsnachfrage höher sein als das, was Oberflächengewässer anbieten.

### Implications of climate change scenarios for agriculture in alpine regions - A case study in the Swiss Rhone catchment <sup>22</sup>

Wie verändern sich Faktoren aufgrund von verschiedenen Klimaszenarien, die auf die Landwirtschaft des Rohnes Einzugsgebiets? Berechnung von Wasserbedarf für Viehhaltung, Länge der Vegetationsperiode, Bewässerungsbedarf, etc. Vergleich mit atmosphärischen Daten. Abfluss sollte zuerst (in nächsten Jahrzehnten) zunehmen, dann stark abnehmen. Zunahme des Wasserverbrauchs im Jahr 2021-2050 ca. = 4-16%. Stärker bei trockenen Jahren (wenig Schnee und Regen). Etwa 76% der landwirtschaftlichen Fläche ist Grasland; 17.2% Weinberg; 6.4% Ackerkultur.  $\frac{3}{4}$  des landwirtschaftlichen Einkommens kommen aus Wein- & Gartenbau. Erwartete Abnahme (etwa 20% im Sommer und bis 40% im Frühling) der möglichen Bewässerungsfläche. Im Frühling wegen frühere Vegetationszeit. Traditionelles Bewässerungssystem (Bisses) haben eine Leistung < 50%.

### Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps <sup>23</sup>

Was sind die aktuellen Kenntnisse über Auswirkungen des Klimawandels auf wirtschaftliche Aktivitäten in den Alpen? Analyse und Ansetzen des Projekts "AQWA" (Untersuchung der Änderung der alpinen Hydrologie sowie der sozio-ökonomischen und umweltbezogenen Reaktionen Wasserverfügbarkeitsänderungen) der Rhone. Einfluss von Bodenfeuchtigkeit, Grundwasseranreicherung, Evaporation & Runoff auf Wasserressourcen in Alpen. Die Hauptfaktoren, welche den Abfluss beeinflussen sind Zeit und Menge der Schneeschmelze. Wassernutzungskonflikte zw. Landwirtschaft & Kraftwerke → auch durch soziale Massnahmen behandelt werden müssen (Verhaltensänderungen). Verschiebung der Abflussspitze von Sommer zu früher im Jahr. Abnahme (bis 50-75%) der Abflussmenge im Sommer (Fall: Rhone). Zweite Abflussspitze im Sommer nur möglich, wenn genügend Beitrag von Gletscher (Eisschmelze).

### The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges <sup>24</sup>

Das Paper fasst die Kenntnisse über europäischen Permafrost, Gletscher und Schnee sowie die beobachteten Änderungen zusammen. Review-Paper. Abnahme des Wassergehalts wegen 1) weniger häufige sommerliche Überschwemmungen; 2) höhere Verdunstung; 3) dünnere Schneeschicht; 4) frühere Schneeschmelze. Kleinerer Beitrag von Gletscher zum Abfluss. Folge dazu sind höhere Bewässerungsbedürfnisse. Änderung der landwirtschaftlichen Produktion (Gras- & Ackerland) aufgrund 1) höherem Wasserbedarf & 2) tieferer Wasserverfügbarkeit. Mehrheit der in den Alpen geernteten Arten sind sehr Niederschlagsdefiziten empfindlich.

## Climate risks and their impact on agriculture and forests in Switzerland <sup>25</sup>

Was sind die zeitlichen und räumlichen Tendenzen für extreme Niederschläge, Temperaturen und Wind in der Schweiz. Wie beeinflussen diese Extremen die Landwirtschaft und die Wälder. Zusammensetzen von Kenntnissen über extreme Ereignisse (Temperatur, Niederschlag und Wind) und Untersuchung deren Auswirkungen auf die Landwirtschaft & die Wälder in der Schweiz. Falls extreme Bedingungen (T° und Hydrologie) → Wasser wird limitierender Faktor für Graslandproduktion. Einfluss von Dürren auf 1) Produktivität und 2) Qualität (mehr Unkräuter wegen Leerstellen in Rasen). Negative Auswirkung von Dürren auf Graslandvegetation wegen neuer Kolonisation und Aussterben von Arten → Biodiversitätsverlust (in manchen Grasländern und Feuchtgebiete hoch). Mgl. Lösungen wären: fixe Bewässerungssysteme für alle Grasländer (kostenintensiv) oder Futtermittelimport.

## Teilrecherche 6: Beschneigung & Gletscher-Tourismus

*Carole Sattler*

### Kurzzusammenfassung

Durch die Klimaerwärmung werden steigende Schneefallgrenzen erwartet und die Gletscherrückgänge werden beschleunigt. Diese Veränderungen haben grosse Auswirkungen auf den gesamten Alpen- und Gletschertourismus. Immer mehr Skigebiete werden durch die steigende Schneefallgrenze auf künstliche Schneeproduktion zurückgreifen müssen. <sup>26</sup> Für Gletschertourismus müssen verschiedene Aspekte in Betracht gezogen werden. Die Infrastruktur, welche zum Teil auf Eis befestigt ist, kann durch Verschiebungen im Eis in Gefahr geraten. <sup>27</sup> Durch den Rückgang der Gletscher verlieren der Tourismus an Attraktivität, was die Besucheranzahl reduziert und somit zu einem wirtschaftlichen Problem wird <sup>28</sup>. Die künstlichen Schneeproduktion kann lokal gegen Mangel an natürlichem Schnee aushelfen, aber ist keine nachhaltige und langanhaltende Lösung gegen Schnee- und Eisflächenverlust <sup>29</sup>. Jedoch sollte in den Alpen und Gletschergebieten auch in Zukunft kein Wassermangel entstehen <sup>18</sup>.

### Climate change-impacts on the tourism industry in mountain areas <sup>26</sup>

Der Klimawandel verursacht steigende Schneegrenzen, was wiederum gewisse Skigebiete schneeunsicher macht. Wenn die Schneegrenze auf 1'500 Meter über Meer geht, dann sind nur noch 63% der Skigebiete in der Schweiz schneesicher. Tiefgelegene Skigebiete haben ihre Strategie bereits jetzt gewechselt und investieren in Kunstschnee-Produktion. Sofern der Klimawandel weiter geht, werden auch immer höher gelegene Skigebiete (sowie Gletscher) sich anpassen müssen, und auf Kunstschnee zurückgreifen. Die Entwicklung der Skigebiete hängt auch von Kunden, Politik und Transportunternehmen ab.

### Glaciers, snow and ski tourism in Austria's changing climate <sup>27</sup>

Der Skitourismus wird von den Veränderungen der Kryosphäre durch die Klimaerwärmung beeinflusst. Dies wurde durch eine langjährige Untersuchung von verschiedenen Stationen und Parametern festgestellt. Gletscher-Skigebiete sind vom Rückgang des Gletschers stark betroffen. Die auf Eis befestigte Infrastruktur und der fehlende Schneefall im Sommer, machen den Skigebiet- üben Druck auf Betreiber von Skianlagen aus. Klimaanpassungen sind notwendig und folgen zwei Strategien; einerseits werden durch Modellierung mögliche Szenarien von Gletscherveränderung in Planungsphase bereits berücksichtigt. Andererseits kann der Gletscherrückgang lokal verzögert werden durch Gletscherabdeckung oder "Snow farming". Diese Anpassung und Instandhaltung der Infrastruktur ist

kostenintensiv. Durch diese Strategien im Gletscher-Tourismus kann den Veränderungen der Kryosphäre durch den Klimawandel etwas entgegenhalten werden.

#### [Integrated impacts of climate change on glacier tourism](#) <sup>28</sup>

Die Gletscherlandschaft und ihr Tourismus wird durch den Klimawandel beeinflusst. Mit einer Scoping-Review-Methode mit akademischer Literatur wurden die integrierten Auswirkungen des Klimawandels auf dem Gletscher untersucht. Das schnelle Abschmelzen und der Rückzug der Gletscherlandschaften führt zu enormen Auswirkungen auf wirtschaftliche und soziale Systeme. Einige Gletscherlandschaften werden an ihrer Ästhetik oder Attraktivität abnehmen. Ein rascher Gletscherrückgang oder gar das Verschwinden von Gletschern führt zu einem Verlust an Einnahmen aus dem Tourismus. Gegenwärtig ist es dringend notwendig, diese integrierten Auswirkungen zu antizipieren und sich darauf einzustellen.

#### [Mountain glacier tourism and climate change: Impacts and adaptations](#) <sup>29</sup>

Um ein langanhaltender und nachhaltiger Tourismus zu gestalten, braucht es Anpassungsmassnahmen und –Strategien. Aufgrund der extremen Klimasensibilität werden bei einem leichten Anstieg der Lufttemperatur die Eis- und Schneeflächen stark reduziert oder gehen ganz verloren. Die künstliche Beschneidung versucht den Mangel an natürlichen Schnee auszugleichen. Sie ist am weitesten verbreitet, scheint notwendig zu sein und die effektivste Anpassungsstrategie. Derartige Beschneidungsmassnahmen sind nur in Bezug auf die direkten finanziellen Kosten effektiv. Sie werden unrentabel, wenn man alle Kosten berücksichtigt; wie mögliche unbeabsichtigte Folgen für den Wasserverbrauch, den Energiebedarf und die Umweltqualität.

#### [Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes](#) <sup>18</sup>

Das Abflussregime wird sich aufgrund der zukünftigen Veränderung der Gletscher- und Schneebedeckung ändern. Anhand Berechnungen von hydrologischen Flussmessungen, Gletscherrückzugsraten, Klimadaten und Wasserverbrauch wurde die Wassernutzung für die Schneeproduktion untersucht. Die künstliche Schneeproduktion macht vom gesamten Wasserbedarf einen sehr kleinen Teil aus. Dazu kommt, dass Wasserknappheit eher im Tiefland nördlich der Alpen erwartet wird und weniger in den Alpen, wo es für Schneeproduktion gebraucht wird. Daher wird in der Zukunft nicht mit einem Wassermangel für die Schneeproduktion gerechnet.

## Teilrecherche 7: Revitalisierungsprojekte und Hochwasserschutz

*Daniel Wiedler*

### [Kurzzusammenfassung](#)

Der Gletscherschwund wird zukünftig ein vergrössertes Hochwasserrisiko mit sich bringen, was ein sorgfältiges Vorausplanen verlangen wird. Durch das stetig ändernde Klima wird es sehr schwierig sein konkrete Voraussagen zu treffen. <sup>30</sup> Durch Frühwarnsysteme kann versucht werden, das Schadenpotenzial zu verringern, wobei Gletschersee Entleerungen kaum voraussehbar sind, aufgrund der komplexen Dynamik im Inneren der Gletscher. Generell muss in Zukunft gute Zusammenarbeit zwischen Gesetzgebern auf allen Stufen geleistet werden, um Hochwasserschäden vorzubeugen und den Hochwasserschutz mit Umweltschutz zu vereinbaren. <sup>31</sup> So soll von einer defensiven Umweltschutzstrategie abgesehen werden und eine angepasste Strategie umgesetzt werden, welche

mehr Möglichkeiten zu kontrollierten Überschwemmungen schafft und die Revitalisierung der Gewässer begünstigt.<sup>32</sup> Auch wenn viele Dinge im Zusammenhang mit dem Gletscherschwund negativ erscheinen, wird durch das Ableben von Gletschern neuer Lebensraum für Pionierarten geschaffen.<sup>33</sup>

### Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen: Perspektiven und Optionen im Bereich Naturgefahren und Wasserkraft<sup>30</sup>

Durch das Abschmelzen der Alpengletscher werden sich in den nächsten Jahrzehnten vermehrt Seen bilden mit Volumen von mehreren Mio. Kubikmeter. Die Lage der Seen in alpinen Regionen macht sie sehr anfällig auf Ereignisse, wie beispielsweise Felsstürze, welche Flutwellen verursachen können, die den Menschen unmittelbar in Gefahr bringen. Die intensive Landschaftsnutzung des schweizerischen Alpenraumes erhöht diesen Konflikt, da die Alpen einem starken Siedlungsdruck unterstehen. Es liegt in den Interessen der Bevölkerung und der Stromproduzenten, wo möglich Staumauern zu bauen, welche die Retention der Seen ermöglicht und die Talregion vor Flutwellen schützt. Um Katastrophen zu verhindern, benötigt dieses Vorgehen eine stetige neu-beurteilung der Geologie der Berggebiete, in welchen neue Seen entstehen, da durch das Auftauen von Permafrost Felsflanken destabilisiert werden.

### Risk estimation for future glacier lake outburst floods based on local land-use changes<sup>31</sup>

Im kommenden Jahrhundert erwarten wir in der Schweiz vermehrt die Bildung von Gletscherseen und deren Entleerung, welche grosse Risiken mit sich bringt. Es bestehen gegenwärtig keine Methoden, welche die zukünftigen Risiken und das Schadenpotenzial passend beurteilen können. Aufgrund der Unberechenbarkeit der Ereignisse besteht die Strategie darin, Frühwarnsysteme zu entwickeln, welche den Schaden an Menschen vermindern soll, was jedoch Schäden an der Infrastruktur nicht verhindern kann. Die grosse Unsicherheit der Ereignisse erfordert starke Vereinfachung in der Modellierung möglicher Extremereignisse. Gegenwärtig wird weniger mit Rücksicht auf Infrastruktur aber auf Menschenleben geplant.

### Switzerland's transition from flood defense to flood-adapted land use—A policy coordination perspective<sup>32</sup>

Durch die zunehmende Landnutzung in der Schweiz sind Infrastruktur und Menschen anfälliger für Hochwasserereignisse geworden, da zunehmend in höher und gefährdeten Gebieten gebaut wird. Das vergangene halbe Jahrhundert hat gezeigt, dass eine rein defensive Hochwasser-Schutz Strategie zu einer Verschlechterung der Gewässerökologie, sowie zu einem höheren Risiko von schweren Schäden durch Hochwasserereignisse führt. Zukünftig strebt man in der Schweiz eine auf Hochwasser angepasste Landnutzung an, wo dies möglich ist. Dies verlangt die Zusammenarbeit von Policy-Machern aller Stufen sowie dem Privatsektor.

### Fließgewässer und ihre Auen Von der Siedlungsgeschichte zum vorbeugenden Hochwasser- und Biotopschutz in der Schweiz<sup>33</sup>

Auenlandschaften wurden seit Jahrhunderten wirtschaftlich genutzt, sind aber weitgehend verschwunden seit den grossen Flusskorrekturen in der Schweiz, welche im 18. Jahrhundert begannen und der kurz darauffolgenden Stromerzeugung aus Fliessgewässern. Der Verlust der Auenlandschaften, brachte eine Gefährdung vieler einheimischer Arten mit sich. Gegenwärtig wird versucht diese Lebensräume zu restaurieren und womöglich die Auenlandschaften zu schützen. Durch den Gletscherschwund werden neue Auenähnlichegebiete in Gletschervorfeldern entstehen. Wo durch Gletscherseen neue

Speicherkraftwerke entstehen, versucht man Auengebiete zu erhalten, um den Biotopschutz sicherzustellen.

Seven decades of hydrogeomorphological changes in a near-natural (Sense River) and a hydropower-regulated (Sarine River) pre-Alpine river floodplain in Western Switzerland <sup>34</sup>

Der Geschiebehaushalt wird stark durch die Wasserkraft beeinflusst, was wiederum zu einer Degradierung der Auenlandschaft der Flüsse führt. In Bezug auf das Gletscherschwinden werden keine Prognosen gemacht, da die Thematik sehr komplex ist und eine Auenentwicklung in einer Zeitspanne von 30-80 Jahren betrachtet werden muss. Durch Aufstauung des Flusses wird der Geschiebehaushalt des Flusses stark beeinflusst, was zu der längerfristigen Entwicklung des Flusses beitragen wird.

## Literaturliste

1. Fatichi, S., Rimkus, S., Burlando, P., Bordoy, R. & Molnar, P. High-resolution distributed analysis of climate and anthropogenic changes on the hydrology of an Alpine catchment. *J. Hydrol.* **525**, 362–382 (2015).
2. Milano, M., Reynard, E., Bosshard, N. & Weingartner, R. Simulating future trends in hydrological regimes in Western Switzerland. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **4**, 748–761 (2015).
3. Addor, N. *et al.* Robust changes and sources of uncertainty in the projected hydrological regimes of Swiss catchments. 7541–7562 (2014) doi:10.1002/2014WR015549.Received.
4. Horton, P., Schaefli, B., Mezghani, A., Hingray, B. & Musy, A. Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. *Hydrol. Process.* **20**, 2091–2109 (2006).
5. Zappa, M. & Kan, C. Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **7**, 375–389 (2007).
6. Pellicciotti, F., Carenzo, M., Bordoy, R. & Stoffel, M. Changes in glaciers in the Swiss Alps and impact on basin hydrology: Current state of the art and future research. *Sci. Total Environ.* **493**, 1152–1170 (2014).
7. Haeberli, W. & Hohmann, R. Climate, Glaciers and Permafrost in the Swiss Alps 2050: scenarios, consequences and recommendations. *9th Int. Conf. Permafrost.* 607–612 (2008).
8. Huss, M., Zemp, M., Joerg, P. C. & Salzmann, N. High uncertainty in 21st century runoff projections from glacierized basins. *J. Hydrol.* **510**, 35–48 (2014).
9. Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A. & Funk, M. Runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrol. Process.* **26**, 1909–1924 (2012).
10. Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A. & Funk, M. Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrol. Process.* **22**, 3888–3902 (2008).
11. Duratorre, T., Bombelli, G. M., Menduni, G. & Bocchiola, D. Hydropower Potential in the Alps under Climate Change Scenarios. The Chavonne Plant, Val D'Aosta. *Water* **12**, 2011 (2020).
12. Schaefli, B., Manso, P., Fischer, M., Huss, M. & Farinotti, D. The role of glacier retreat for Swiss hydropower production. *Renew. Energy* **132**, 615–627 (2019).
13. Finger, D., Heinrich, G., Gobiet, A. & Bauder, A. 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 Resour. Res.* **48**, W02521 (2012).
14. Bombelli, G. M., Soncini, A., Bianchi, A. & Bocchiola, D. Potentially modified hydropower production under climate change in the Italian Alps. *Hydrol. Process.* **33**, 2355–2372 (2019).
15. Gaudard, L., Gilli, M. & Romerio, F. Climate Change Impacts on Hydropower Management. *Water Resour. Manag.* **27**, 5143–5156 (2013).
16. Jörg-hess, S., Forschungsanstalt, E., Wsl, L., Gurung, A. B. & Stähli, M. Wasserressourcen der Schweiz. *Aqua Gas* **11**, 18–22 (2014).
17. Alpe, Š., Gremaud, V. & Goldscheider, N. Geometry and drainage of a retreating glacier overlying and recharging a karst aquifer , Tsanfleuron-Sanetsch , Swiss Alps. *Acta Carsologica* **39**, 289–300

(2010).

18. Brunner, M. I. *et al.* Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Sci. Total Environ.* **666**, 1033–1047 (2019).
19. Vanham, D. The Alps under climate change: Implications for water management in Europe. *J. Water Clim. Chang.* **3**, 197–206 (2012).
20. Schneider, A. Exploring Water Governance Arrangements in the Swiss Alps From the Perspective of Adaptive Capacity. *Mt. Res. Dev.* **33**, 225–233 (2021).
21. Clarvis, M. H. *et al.* Governing and managing water resources under changing hydro-climatic contexts: The case of the upper Rhone basin. *Environ. Sci. Policy* **43**, 56–67 (2014).
22. Fuhrer, J., Smith, P. & Gobiet, A. Implications of climate change scenarios for agriculture in alpine regions - A case study in the Swiss Rhone catchment. *Sci. Total Environ.* **493**, 1232–1241 (2014).
23. Beniston, M. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *J. Hydrol.* **412–413**, 291–296 (2012).
24. Beniston, M. *et al.* The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *Cryosphere* **12**, 759–794 (2018).
25. Fuhrer, J. *et al.* Climate risks and their impact on agriculture and forests in Switzerland. in *Climate Variability, Predictability and Climate Risks* vol. 79 79–102 (Springer Netherlands, 2007).
26. Bürki, R., Elsasser, H. & Abegg, B. Climate change-impacts on the tourism industry in mountain areas. *1st Int. Conf. Clim. Chang. Tour. Djerba, 9-11 April 2003* 9–11 (2003).
27. Fischer, A., Olefs, M. & Abermann, J. Glaciers, snow and ski tourism in Austria's changing climate. *Ann. Glaciol.* **52**, 89–96 (2011).
28. WANG, S. J. & ZHOU, L. Y. Integrated impacts of climate change on glacier tourism. *Adv. Clim. Chang. Res.* **10**, 71–79 (2019).
29. Wang, S. & Jiao, S. Mountain glacier tourism and climate change: Impacts and adaptations. *Tour. Dev. - Issues Challenges* 93–119 (2013).
30. Haeberli, W., Schleiss, A., Linsbauer, A., Künzler, M. & Bütler, M. Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen. *Wasser Energ. Luft* **104. Jahrg**, 93–102 (2012).
31. Nussbaumer, S., Schaub, Y., Huggel, C. & Walz, A. Risk estimation for future glacier lake outburst floods based on local land-use changes. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **14**, 1611–1624 (2014).
32. Löschner, L. & Nordbeck, R. Switzerland's transition from flood defence to flood-adapted land use—A policy coordination perspective. *Land use policy* **95**, (2020).
33. Siedlungsgeschichte, V. Der & Kuhn, N. Fließgewässer und ihre Auen. *Gaia Ecol. Perspect. Sci. Soc.* **2**, 102–109 (2006).
34. Tonolla, D., Geilhausen, M. & Doering, M. Seven decades of hydrogeomorphological changes in a near-natural (Sense River) and a hydropower-regulated (Sarine River) pre-Alpine river floodplain in Western Switzerland. *Earth Surf. Process. Landforms* **46**, 252–266 (2021).