

Die alpine Wasserlandschaft im Wandel

Rolf Weingartner

Einleitung

Dominante Berge

Die Autorin Anaïs Meier veröffentlichte kürzlich ihren ersten Erzählband *Über Berge, Menschen und insbesondere Bergschnecken*. Der Einstieg provoziert: «Berge sind hoch und fies. Sie sind aus sehr grossem Stein, stehen da und zwingen sich auf. Berge sind ungemein selbstbezogen und dominant. Wenn man einen Berg ärgert, schickt er Lawinen. Im Winter aus Schnee und im Sommer aus Schlamm und Geröll. Die kleinen Freunde der Berge sind die Bergbäche. Einzig sie werden vom Berg geduldet.» Und zum Schluss der ersten Erzählung meint die Autorin, dass eigentlich nur das Meer die Gebirge in ihrer Eitelkeit beleidigen könne: «Das liegt daran, dass das Meer eine sehr viel höhere sexuelle Anziehungskraft hat als der Berg. Am Meer werden Lieder mit beruhigendem Klang geschrieben, dass sich sofort alle Dinge der Welt in den Hüften wiegen.»

Abb. 1: Fragiler Alpenraum: Lawinen
im Grimselgebiet, Januar 2021.
Foto: © Daniel Bürki



Meier zeichnet ein Bild der Berge, das deren Eigenständigkeit und Ausserordentlichkeit hervorhebt, aber gleichzeitig auf deren Unberechenbarkeit und Fragilität hinweist, eine Fragilität nota bene, die sich im Zuge der Klimaänderung weiter verstärken wird. Genau diesem Aspekt ist der vorliegende Aufsatz gewidmet, bei dem wir uns – prototypisch für die Gebirgsräume der Erde – auf den Alpenraum fokussieren.

Mit der Metapher «Bergbäche sind die kleinen Freunde der Berge» unterstreicht

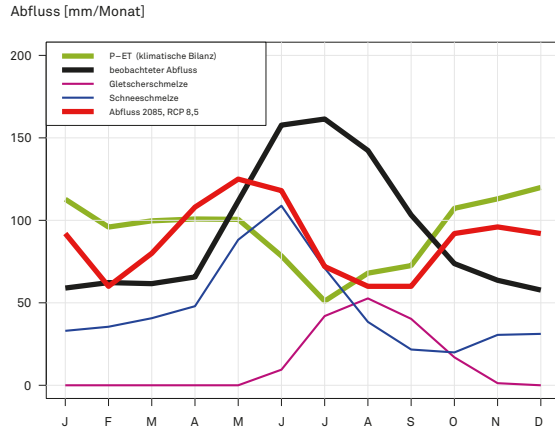
die Erzählung die besondere Bedeutung des Wassers im Gebirge als verbindendes Element zwischen Berg und Tal, als landschaftsformende Kraft, als Ressource und Energiequelle. Mit ihrer Formenvielfalt und einzigartigen Klangkulisse tragen die Gewässer wesentlich zur Harmonie und Schönheit von Gebirgslandschaften bei.

Grundzüge der alpinen Hydrologie

Die Alpen spielen im Wasserkreislauf Mittel- und Südeuropas eine herausragende Rolle. Sie bilden für den atmosphärischen Wasserdampftransport ein grosses Hindernis, das zur Hebung der Luftmassen führt und dadurch die Wolken- und Niederschlagsbildung begünstigt. Der mittlere Jahresniederschlag im Alpenraum ist deshalb mit 1500 Millimetern/Jahr rund 1,5–3-mal höher als im ausseralpinen Umland. Vom Jahresniederschlag verdunsten im Mittel 500 Millimeter/Jahr. Somit bleiben für den Abfluss 1000 Millimeter/Jahr. Das bedeutet, dass von jedem Quadratmeter durchschnittlich 1000 Liter pro Jahr abfliessen. Das ist viel Wasser und der Grund, wieso die Alpen aus hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Sicht als «Wasserturm Europas» bezeichnet werden: Wie bei einem Wasserturm der öffentlichen Trinkwasserversorgung befinden sich beträchtliche Wasservolumen in grosser Höhe und fliessen der Schwerkraft folgend den Tälern und Vorländern zu, wo sie genutzt werden.

Betrachten wir nun die Saisonalität des Abflusses der Rhone, eines charakteristischen alpinen Fliessgewässers (Abb. 2): Der Abfluss (R) kann theoretisch aus der Differenz zwischen Niederschlag (P) und Verdunstung (ET) bestimmt werden, also $R = P - ET$ (klimatische Wasserbilanz). Der aus dieser Gleichung resultierende Monatsabfluss ist in der Abbildung als grüne Linie dargestellt. In den Wintermonaten ist der Abfluss relativ hoch, weil die Verdunstung sehr gering ist. Im Sommer hingegen sind die Monatsabflüsse kleiner, obschon die Monatsniederschläge eigentlich höher sind als im Winter. Dafür sind die hohen sommerlichen Verdunstungswerte verantwortlich, wie die klimatische Bilanz für den Monat Juli veranschaulicht: Einem mittleren Gebietsniederschlag von 120 Millimetern steht eine Verdunstung von 70 Millimetern gegenüber, sodass ein Abfluss von 50 Millimetern resultiert. Bemerkenswert ist, dass

Abb. 2: Mittlerer monatlicher Abfluss der Rhone beim Zufluss in den Genfer See. Saisonales Verhalten verschiedener Parameter und Prozesse. Fläche des Einzugsgebiets: 5238 km², mittlere Gebietshöhe: 2127 m ü. M., Vergletscherung: 11% (2020). Die rote Linie zeigt die mittleren Verhältnisse der Periode 2070–2099 bei einem Emissions-szenario ohne Klimaschutz. © Rolf Weingartner, Daten: Bundesamt für Umwelt, Hydrologischer Atlas der Schweiz



dieser «theoretische» Abfluss dreimal kleiner ist als der beobachtete. Mittels des Schnees und der Gletscher als zentrale und temperatursensitive Elemente im alpinen Wasserhaushalt kann dieser Unterschied erklärt werden: Die Zwischenspeicherung des Niederschlags in Form von Schnee in den kalten Wintermonaten mit negativen Lufttemperaturen hat sehr kleine Monatsabflüsse zur Folge. Hingegen führen die Schneeschmelze zwischen April und Juli und die Gletscherschmelze zwischen Juli und September bei hohen Temperaturen zu sehr grossen Monatsabflüssen (vgl. Schneeschmelze und Gletscherschmelze in Abb. 2). Bei der Rhone stammt rund die Hälfte des Gesamt-abflusses aus der Schneeschmelze, etwa 15 Prozent aus der Gletscherschmelze und nur rund ein Drittel direkt aus dem Niederschlag. Diese Anteile sind für alpine vergletscherte Gebiete charakteristisch. Aber auch beim Rhein in Basel, der die nordalpine Schweiz entwässert und seine Wurzeln in den Hochalpen hat, liegt der Schneeanteil noch bei rund 40 Prozent, während der Gletscheranteil gerade mal 1–2 Prozent umfasst.

Diese Beispiele belegen, dass der Schnee mit seiner grossflächigen Ausdehnung im alpinen Wasserhaushalt weit bedeutender ist als die Gletscher, deren hydrologischer Einfluss vor allem in vergletscherten Einzugsgebieten sehr gross ist.

Die ausseralpiner Vorländer sind im Sommer stark von den Zuflüssen aus den Alpen abhängig, südlich der Alpen mehr als nördlich davon. Die alpinen Schmelzwasser leisten substanzielle Beiträge zur landwirtschaftlichen Bewässerung, dienen zur Kühlung bei industriellen Prozessen und der Stromerzeugung und sorgen für den für aquatische Ökosysteme notwendigen Basisabfluss.¹ Der hydrologische Einflussraum der Alpen ist also um einiges grösser als der aufgrund der Topografie definierte Alpenraum, wie das folgende Beispiel des Rheins belegt: Das alpine Teileinzugsgebiet trägt wegen seiner grossen «Abflussfreudigkeit» im Mittel 34 Prozent zum Gesamtabfluss im Unterlauf bei. Das ist 2,3-mal mehr Wasser als aufgrund seines Flächenanteils zu erwarten ist. Im Juni stammt sogar mehr als die Hälfte des Wassers (52 Prozent) aus dem Alpenraum.²

Alpine Wasserlandschaften in einer immer wärmeren Atmosphäre

Metamorphosen verändern Form und/oder Eigenschaften von Objekten. Der Alpenraum ist und wird durch zwei grosse temperaturgesteuerte Metamorphosen geprägt, eine im Inneren, eine an der Erdoberfläche. Im Zuge der Auffaltung der Alpen vor 135–30 Millionen Jahren führten heisse Wärmeströme aus dem Erdinneren mit Temperaturen zwischen einigen 100°C bis um die 1000°C und im Zusammenspiel mit hohem Druck grossräumig zu Gesteinsverformungen und zur Umwandlung der mineralogischen Zusammensetzung der Gesteine; so entstanden beispielsweise aus Graniten Gneise. Gegenwärtig sehen wir uns mit einer zweiten grossen Metamorphose konfrontiert. Ursache sind die menschengemachten Treibhausgasemissionen, die im Alpenraum bisher zu einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur von über 2°C seit Mitte des 19. Jahrhunderts geführt haben. Diese gegenüber dem globalen Mittel doppelt so hohe Temperaturzunahme hat im Wesentlichen zwei Gründe: Die Erwärmung ist über den Ozeanen geringer als über Land. Die Ozeane, die 71 Prozent der Erdoberfläche bedecken, steuern und dämpfen gleichzeitig den Anstieg der globalen Lufttemperatur. Die Schweizer Alpen als meeresferne Region liegen somit im Bereich der allgemein stärkeren Erwärmung. Zudem wird die Erwärmung im Alpenraum

1 Wilfried Haeberli, Rolf Weingartner, «In Full Transition. Key Impacts of Vanishing Mountain Ice on Water-Security at Local to Global Scales», in: *Water Security*, 11, Dezember 2020, <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100074>.

2 siehe Rolf Weingartner et al., «Die Alpen als Wasserturm Europas», in: *Flüsse der Alpen*, Bern 2019.

durch die Schnee/Eis-Albedo-Rückkoppelung, einem sich selbst verstärkenden Prozess, weiter erhöht. Auslöserin dieses Prozesses ist die Klimaerwärmung, die zu einer Schrumpfung der mit Eis bzw. Schnee bedeckten Flächen führt. Schneefreie Flächen absorbieren – im Gegensatz zu Schnee und Eis – bis zu 90 Prozent der eingestrahlten Energie und erwärmen sich dadurch. Diese Erwärmung führt zu einer weiteren Abnahme der schnee- und eisbedeckten Flächen. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer positiven Rückkoppelung.

Wir stehen aber erst am Anfang einer beunruhigenden Entwicklung. Die Erwärmung im Alpenraum schreitet nämlich unerbittlich voran. So werden sich die Jahresmitteltemperatur und entsprechend die saisonalen Temperaturmittel bis Ende des Jahrhunderts um weitere 1,5–5°C erhöhen. Das Ausmass dieser Zunahme hängt davon ab, wie gut es uns gelingt, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren.

Die Klimaerwärmung trifft auf einen Alpenraum, dessen zentrale Elemente besonders temperatursensitiv sind. Die Abnahme der Schneehöhen und des Zeitraums mit einer Schneedecke, das Abschmelzen der Gletscher und des Permafrosts sowie die steigende Nullgradgrenze verändern nicht nur die hydrologischen Prozesse, sondern bilden auch den Ausgangspunkt von Folgeprozessen mit komplexen Wechselwirkungen und oftmals weitreichenden Auswirkungen auf Natur, Gesellschaft und Wirtschaft. Aus hydrologischer Sicht müssen vor allem drei Prozesse thematisiert werden:

1. Die Verflüssigung des Wasserhaushalts

Mit der Temperaturzunahme im Winter nimmt der Anteil des Niederschlags, der in Form von Schnee und Eis temporär gespeichert wird, ab. Die Übertragung des Niederschlags in den Abfluss erfolgt häufiger direkt, also ohne Zwischenspeicherung als Schnee. Als Folge davon nimmt einerseits der Abfluss im Winter zu (Abb. 2), andererseits steht im Frühling weniger Schnee für die Schmelze zur Verfügung. Zusätzlich beginnt und endet die Schneeschmelze früher im Jahr. Insgesamt verkleinert sich der dämpfende Effekt der Schneedecke; der Schnee verflüssigt sich.

3 «Hydrologische Szenarien (Hydro-CH2018). L04 Gletscherentwicklung bis 2100», in: *Hydrologischer Atlas der Schweiz* (online), <http://hydromapscc.ch>.

Und auch die Gletscher verflüssigen sich; ihre Massenbilanz wird zunehmend und immer stärker negativ. Das heisst, es schmilzt im Laufe des Sommers mehr Eis ab, als im Winter gebildet wird. Deshalb verlieren die Gletscher an Volumen und Fläche. Der Vergletscherungsgrad im Einzugsgebiet der Rhone bis zum Genfersee beträgt heute beispielsweise 11 Prozent; er wird sich gegen Ende des Jahrhunderts auf rund 7 Prozent bei einem Emissions-szenario mit und auf rund 1 Prozent bei einem Szenario ohne Klimaschutz reduzieren.³ Die Folgen dieser Verflüssigungen sind vielfältig und gegenläufig: In den letzten Jahrzehnten haben die sommerlichen Abflüsse vergletscherter Gebiete wegen des starken Abschmelzens des Gletschereises stark zugenommen. Ab einem bestimmten kritischen Gletschervolumen ist dann aber die Gletscherschmelze derart klein, dass sie nicht mehr substantiell zum sommerlichen Abfluss beiträgt. Wann dieses kritische Volumen erreicht wird, hängt von der Grösse eines Gletschers ab. In vielen Einzugsgebieten mit kleinen Gletscheranteilen wird diese Schwelle gerade aktuell erreicht oder wurde bereits überschritten. Ab diesem Zeitpunkt nehmen die sommerlichen Abflüsse stark ab und lösen den Winter allmählich als die Jahreszeit mit den kleinsten Monatsabflüssen ab. Die Sommertrockenheit wird zu einer neuen Herausforderung. Dieser Übergang vom Wasserüberfluss zum Mangel im Sommer geschieht innerhalb von einem bis zwei Jahrzehnten!

Mit der Klimaerwärmung entfernen sich die Abflüsse (Abb. 2, rote Linie) immer mehr von den heute beobachteten (schwarze Linie) und nähern sich mehr und mehr der grünen Linie an, die auf der klimatischen Wasserbilanz (P–ET) basiert und damit jeglichen Einfluss von Schnee und Eis ausschliesst.

Die Verflüssigung des Wasserhaushalts verändert nicht nur die Rahmenbedingungen der alpinen Wasserwirtschaft, sondern verschlechtert auch die Wasserversorgung der sommertrockenen ausseralpinen Gebiete. Aber nicht nur das. Die Forscher Barnett, Adam und Lettenmeier wiesen bereits im Jahr 2005

Abb. 3: Die Verflüssigung des Wasserhaushalts betrifft auch die Tourismuswirtschaft. Mit Fleeceabdeckungen versucht man auf der Diavolezza (Graubünden), das Abschmelzen der letzten Reste eines Gletschers zu stoppen und so einen frühen vorwinterlichen Start der Skisaison zu ermöglichen. Foto: © Rolf Weingartner



darauf hin, dass mehr als ein Sechstel der Weltbevölkerung vom Schmelzwasser der Gebirge abhängig ist.⁴ Und mit Blick auf den Klimawandel warnen sie: «Die Folgen dieser hydrologischen Veränderungen für die künftige Wasserverfügbarkeit werden wahrscheinlich schwerwiegend sein.»

Der Massenverlust der Gletscher in den Gebirgen der Erde trägt auch zum Anstieg des Meeresspiegels bei. Zwar sind hauptsächlich die schmelzenden Polkappen für den Gesamtanstieg von 26,5 Millimetern zwischen 1961 und 2016 verantwortlich, aber auch die Gebirgsgletscher haben einen Anteil von rund 20 Prozent.⁵ Die hydrologischen Veränderungen in den Gebirgsräumen, die rund ein Fünftel der Landoberfläche der Erde einnehmen, erhalten mit der Klimaerwärmung sogar eine globale Relevanz.

Die Verflüssigung des Wasserhaushalts im Alpenraum verändert das saisonale Abflussverhalten und stellt die Wassernutzung vor neue Herausforderungen. Allerdings besteht mit den bereits vorhandenen und mit neu zu bauenden künstlichen Speicherseen eine interessante Option, sich an die Veränderungen anzupassen. In ihnen lassen sich die im Winterhalbjahr zunehmenden Abflüsse speichern, um sie dann für die häufigeren trockenen Sommer verfügbar zu machen. Dies bedingt allerdings eine Neuausrichtung der Speichernutzung und damit einen Paradigmenwechsel im politischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Umgang mit dem Wasser im Alpenraum. Dienen die künstlichen Speicher heute typischerweise einzig und allein der Stromerzeugung, könnten sie in der Zukunft einer Mehrfachnutzung zugeführt werden, damit auch andere Nutzergruppen von diesem Wasser profitieren können. Mit dieser «neuen» Infrastruktur kann die Grundversorgung von Bevölkerung und (Land-)Wirtschaft sichergestellt werden. Die Stromerzeugung wird zwar auch in Zukunft die dominante Nutzung alpiner Speicherseen sein, was angesichts der CO₂-freien Erzeugungsart gerechtfertigt ist, aber mit der Mehrfachnutzung werden die Seen auch Teil des «Service public». Die Aufgabe des «Service public» besteht darin, die Grundversorgung der Bevölkerung mit standardmässiger Infrastruktur sicherzustellen.⁶

4 Tim P. Barnett, Jennifer C. Adam und Dennis P. Lettenmaier, «Potential Impacts of a Warming Climate on Water Availability in Snow-Dominated Regions», in: *Nature*, 438, 2005, S. 303–309.

5 Michael Zemp et al., «Global Glacier Mass Changes and Their Contributions to Sea-Level Rise From 1961 to 2016», in: *Nature*, 568, 2019, S. 382–386, <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1071-0>.

6 «Service public» ist ein in der Schweiz gebräuchlicher Begriff. Er «umfasst eine politisch definierte Grundversorgung mit Infrastrukturgütern und Infrastrukturdienstleistungen, welche für alle Bevölkerungsschichten und Regionen des Landes nach gleichen Grundsätzen in guter Qualität und zu angemessenen Preisen zur Verfügung stehen sollen». In: Bericht des Bundesrates «Grundversorgung in der Infrastruktur (Service public)».

Viele sind im Alpenraum von der Verflüssigung des Wasserhaushalts betroffen: Die Bewohnerinnen und Bewohner, die Tourismuswirtschaft, die Landwirtschaft, die Ökosysteme, die Landschaft, die Wasserkraftnutzung und die ausseralpinen Tiefländer. Diese Betroffenheit soll nun anhand von zwei Beispielen vertieft werden:

- **Tourismus:** Eine Analyse von Pascale Josi⁷ zum Wintersport in der Schweiz zeigt auf, dass 43 Prozent der Wintersportdestinationen stark bis sehr stark und weitere 28 Prozent ziemlich stark vom Schnee abhängig und entsprechend von den immer kürzer werdenden Zeiträumen mit Schneedecke betroffen sind. Im schweizerischen Alpenraum hat die Dauer der winterlichen Schneedecke zwischen 1970 und 2015 um rund einen Monat abgenommen.⁸ Mit der technischen Beschneigung versuchen die Skierte gegenzusteuern. 3600 Kilometer, rund die Hälfte der Pisten in der Schweiz, sind bereits technisch beschneit. Es wurden bisher Investitionen von rund CHF 3,6 Milliarden getätigt, also durchschnittlich CHF 1 Million pro Pistenkilometer. Dazu kommen beträchtliche Betriebs- und Unterhaltskosten: Der Betrieb eines grossen Skigebiets verursacht Kosten in der Grössenordnung von CHF 250 000 pro Tag.⁹ Davon entfallen allein 15–20 Prozent auf die technische Beschneigung. Die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels sind also beträchtlich.
- **Ausseralpine Tiefländer:** Trotz der geschilderten temperaturgesteuerten Veränderungen im saisonalen Wasserdargebot und dank der sich wenig verändernden langjährigen mittleren jährlichen Abflussvolumina werden die Alpen ihre Funktion als Wasserturm nicht verlieren, im Gegenteil: Angesichts der immer wärmer und sommertrockener werdenden Vorländer werden sie sogar an Bedeutung gewinnen. In der Konsequenz wird sich der Druck auf die Nutzung der alpinen Ressourcen erhöhen.

2. Die Destabilisierung des Raums

Mit der Klimaerwärmung verändern und intensivieren sich gewisse gefährliche Naturprozesse im Alpenraum. Oftmals sind Gebiete betroffen, die bisher als «sicher» galten. Dafür ist der Anstieg der Nullgradgrenze wesentlich verantwortlich. Eine Temperaturerhöhung von 1°C verschiebt die

7 Pascale Josi, *Wassermanagement in der technischen Beschneigung und Zukunftsvisionen des Schneesports in der Schweiz*, Masterarbeit, Universität Bern, 2018.

8 Geoffrey Klein et al., «Shorter Snow Cover Duration Since 1970 in the Swiss Alps Due to Earlier Snowmelt More Than to Later Snow Onset», in: *Climatic Change*, 139, 2016, S. 637–649.

9 www.seilbahnen.org/de/Branche/ Statistiken/Fakten-Zahlen.



Abb. 4: Murgangereignis vom 22. August 2005 in der Rotlouwi, Guttannen (Berner Oberland). Foto: © Beat Kehrl

Nullgradgrenze um 150–200 Meter nach oben. Der menschengemachte Temperaturanstieg führt also einerseits dazu, dass die Nullgradgrenze sowohl während allen Jahreszeiten wie auch bei einzelnen Hochwasserereignissen höher liegt als heute. Dies hat weitreichende Folgen. Die Erhöhung der sommerlichen Nullgradgrenze betrifft die Permafrostgebiete, die in den Alpen je nach Exposition oberhalb von 2500–2700 Meter ü. M. liegen.

Permafrost tritt auf, wenn die Temperaturen im Untergrund unterhalb der geringmächtigen Auftauschicht, die im Sommer auftaut und im Winter wieder gefriert, nicht über 0°C steigen. Der ständig gefrorene Untergrund verleiht dem Fels, den Schutthalden und Moränen Stabilität. Im Zuge der Klimaerwärmung erreicht die sommerliche Nullgradgrenze den Bereich des Permafrosts, der zu tauen beginnt. Mit dem Auflösen des Permafrosts geht diese Stabilität immer mehr verloren. Hangrutschungen, Murgänge und Steinschläge sind die Folge. Besonders verheerend sind Murgänge, weil sie in der Regel bis in die Täler vorstossen und Dörfer und Infrastrukturanlagen gefährden, wie das Beispiel des grössten in den letzten Jahrzehnten im Alpenraum aufgetretenen Murgangs in der Rotlouwi in Guttannen (Berner Oberland) zeigt (Abb. 4): Der Murgang transportierte mehr als 500 000 Kubikmeter Material¹⁰ in den Talgrund. Dort wurde nicht nur die Grimselpassstrasse überschüttet, sondern auch der Talfluss, die Aare, wurde zuerst zurückgestaut und dann nach dem Überfließen der stauenden Murgangwälle über die Grimselpassstrasse direkt ins Dorf Guttannen geleitet, wo es zu grossen Hochwasserschäden kam.

Auch bei den Hochwasserereignissen im Alpenraum beeinflusst die Lage der Nullgradgrenze das Prozessgeschehen massgeblich: Mit der Klimaerwärmung nimmt die Wahrscheinlichkeit zu, dass die Nullgradgrenze bei Starkniederschlagsereignissen höher liegt als heute. Bei einer höher liegenden Nullgradgrenze wächst der Flächenanteil eines Einzugsgebiets, der überregnet wird, weil die Niederschläge bis in hohe Lagen in flüssiger Form fallen und deshalb direkt zum Hochwasserabfluss beitragen, also nicht in Form von Schnee zwischengespeichert werden.

¹⁰ Zur Veranschaulichung dieses Volumens: Es könnten 40 Fussballfelder mit jeweils 2 Metern Schutt bedeckt werden.

Gleichzeitig werden durch das Auftauen des Permafrosts und das Abschmelzen der Gletscher Geröll- und Schuttf Flächen freigelegt, die bei Regenfällen bis in hohe Lagen mobilisiert werden, was zu einem erhöhten Geschiebetrieb in den Bächen und Flüssen führt. Wenn man zudem berücksichtigt, dass sich auch die Intensität der Starkniederschläge bei einer Temperaturerhöhung von 1°C um 7 Prozent erhöht,¹¹ wird klar: Die Hochwassergefahr im Alpenraum wird steigen, sodass bauliche und raumplanerische Anpassungen erforderlich sind.

3. Die Vergraugung der Landschaft

Die natur- und kulturräumliche Vielfalt ist für Gebirgsregionen charakteristisch. Sie entsteht aufgrund der alpinen Höhenstufen und der sich damit verändernden Vegetation und Landnutzung, aufgrund des kleingekammerten Reliefs, der Unterschiede in Exposition und Hangneigung und aufgrund gegensätzlicher klimatischer, pedologischer und geologischer Bedingungen. Wie der deutsche Geograf Werner Bätzing¹² treffend schreibt, sehen und erleben die meisten Menschen die Alpen mit ihren Gletschern, Felsen, Wäldern, Wiesen und Weiden als grossartige, gewaltige und intakte Naturlandschaft. Die Alpen waren und sind deshalb auch identitätsstiftend, so auch in der Schweiz, etwa bei deren Gründung im Jahr 1848. In der Gegenwart bilden die Alpen eine natürliche Gegenwart zum zunehmend unter Siedlungsdruck und Verdichtung leidenden ausseralpinen Umland. Das alpin geprägte Schweizbild wird weiterhin gehegt und gepflegt und auch der Welt vermittelt. So werden die am Flughafen Zürich eintreffenden Gäste bereits in der Verbindungsbahn zum Hauptterminal mit dem Gebimmel von Kuhglocken und volkstümlicher «alpiner» Musik auf das Alpenland Schweiz eingestimmt.

Siedlungen, Industrieanlagen, Stauseen, Bergbahnen, Hochspannungsleitungen und anderes mehr sind zwar diesem Alpenbild nicht zuträglich, aber sie vermögen das Bild der «heilen» Welt, des alpinen Arkadiens, nicht zu zerstören. Dabei ist auch zu bedenken, dass man der Vorstellung einer intakten Natur umso näherkommt, je mehr man sich auf den hochalpinen Raum fokussiert.

¹¹ Gesetz von Clausius-Clapeyron.

¹² Werner Bätzing, *Zwischen Wildnis und Freizeitpark. Eine Streitschrift zur Zukunft der Alpen*, 2. Aufl., Zürich 2016.



Abb. 5: Vergrauung der Landschaft, Diavolezza, Val Bernina, August 2018. Foto: © Rolf Weingartner

Mit dem Klimawandel, dem dadurch verursachten Verschwinden der Gletscher und der Abnahme der Schneedecke verändert sich aber auch die hochalpine Landschaft, die vom grandiosen und unvergleichbaren Wechselspiel zwischen dem Weiss von Schnee und Eis und den Grautönen der Fels- und Schuttflächen geprägt ist und seit Caspar Wolf (1735–1783), dem «Pionier der Alpenmalerei»,¹³ Generationen von Malern inspirierte. Mit

der Temperaturerhöhung verschwindet das Weiss mehr und mehr. Der Berner Geograf Paul Messerli bringt es auf den Punkt: «Die Erhabenheit schwindet und zurück bleiben Grautöne.»¹⁴ (Abb. 5) Dadurch entstehe ein Bild, bei dem die Bedrohlichkeit wieder in den Vordergrund rücke. «Wenn ich heute durch die Alpen gehe, interessieren mich andere Phänomene als noch vor dreissig Jahren. Die Erschliessung durch Skilifte ist weniger ein Problem als der Rückzug der Gletscher», so Messerli.

In den vergrauten Landschaften werden, bedingt durch das Zurückschmelzen der Gletscher, glazial erodierte topografische Hohlformen freigelegt, die sich rasch mit Wasser füllen. Das Gesamtvolumen dieser rund 500–600 Hohlformen beträgt etwa 2 Kubikkilometer (2 Billionen Liter), was ungefähr 3 Prozent des heutigen Gletschervolumens der Schweiz entspricht.¹⁵ Zum Vergleich: Das Nutzvolumen aller schweizerischen Stauseen beträgt rund 3,5 Kubikkilometer.¹⁶ Diese Hohlformen, oft als «Neue Seen» bezeichnet, besitzen ein grosses ökologisches, landschaftliches und touristisches Potenzial, eignen sich aber auch für die Wasserkraftnutzung (Abb. 6). Interessen- und Nutzungskonflikte scheinen unvermeidlich zu sein!

Was ist zu tun?

Verflüssigt, destabilisiert, vergraut: Die Alpen und mit ihnen viele Gebirgsräume sind also im wahrsten Sinne des Wortes Hotspots der Klimaerwärmung. Die Veränderungen sind für jedermann deutlich erkennbar, sichtbar und messbar. Sie bestätigen die Prognosen der Wissenschaft,

13 Susan Misicka, «Schweizer Alpenmaler erhält eigenes Museum», in: *Swissinfo*, 6. April 2019, https://www.swissinfo.ch/ger/caspar-wolf_schweizer-alpenmaler-erhaelt-eigenes-museum/44877038.

14 Bernhard Ott, «Die Menschen schaffen sich Natur in ihrer Nähe», in: *Der Bund*, 8. August 2017.

15 Wilfried Haeblerli et al., «Gletscherschwund und neue Seen in den Schweizer Alpen», in: *Wasser Energie Luft*, Januar 2012.

16 Tafel 5.3, in: *Hydrologischer Atlas der Schweiz* (Druckversion), Bern 1992.

17 OECD, *The Economic Consequences of Climate Change*, Paris 2015, <https://doi.org/10.1787/9789264235410-en>.

18 <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/dossiers/klimaschutz-und-co2-gesetz.html>.

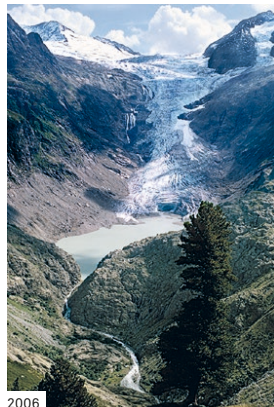
die über ein sehr gutes Verständnis der aktuell und zukünftig ablaufenden Prozesse verfügt. Um die Auswirkungen des Klimawandels im Alpenraum auf ein Minimum zu beschränken, braucht es ein sofortiges und konsequentes Handeln, das in eine weit vorausschauende und kohärente Massnahmenplanung eingebettet ist. Im Folgenden werden dazu drei grundlegende, sich ergänzende Wege diskutiert. Diese Diskussion mündet in die ultimative Aufforderung, sich für den Schutz der Alpen endlich aktiv einzusetzen.

Der Königsweg

Das Vermeiden des Ausstosses von Treibhausgasen ist der Königsweg, um die Veränderungsprozesse mittel- bis langfristig zu stoppen. An dieser Ursachenbekämpfung führt kein Weg vorbei, gar keiner. Nur so kann eine weitere Temperaturerhöhung zuerst reduziert und dann gestoppt werden. Klimaschutz ist der beste Alpenschutz (Abb. 7)!

Die Klimaerwärmung wird mittel- bis langfristig sehr grosse Kosten verursachen. Diese übersteigen die Kosten der Massnahmen zum Klimaschutz deutlich. Die OECD beziffert die Kosten einer ungebremsten Klimaerwärmung bis Ende des Jahrhunderts auf bis zu 10 Prozent ihrer Wirtschaftsleistung (BIP).¹⁷ Die Massnahmen hingegen, die notwendig sind, um die Erderwärmung auf 2°C zu begrenzen, liegen bei rund 1 Prozent des jährlichen BIP. Je früher man mit den Massnahmen beginnt, desto geringer werden die damit verbundenen Kosten sein.¹⁸

Abb. 6: Entstehung einer Hohlform am Triftgletscher im Berner Oberland. 1948 war das Gletscherbett noch komplett vom Gletscher bedeckt. Um 2006 war der Gletscher bereits stark geschmolzen, die mit Wasser gefüllte Hohlform unter dem Gletscher wurde sichtbar. Es ist nun geplant, sie als Reservoir für die Wasserkraft zu nutzen (unten rechts). Foto © Sammlung Gesellschaft für ökologische Forschung, München (Bilder 1948 und 2006), Kraftwerke Oberhasli (Bildmontage 2028)



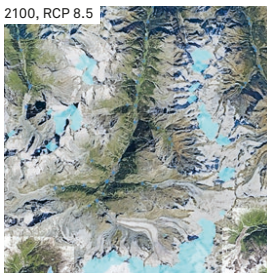
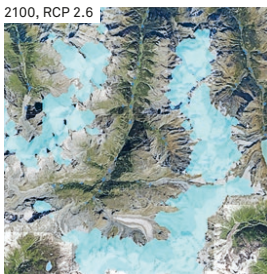
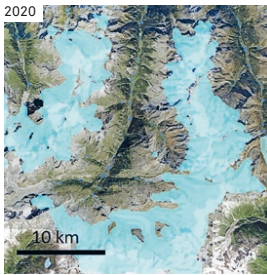


Abb. 7: Veränderung der Gletscherflächen (hellblau) in der Region Zermatt (Wallis) zwischen 2020 und 2100 in Abhängigkeit vom Emissionsszenario: RCP 2.6: Szenario mit Klimaschutz, RCP 8.5: Szenario ohne Klimaschutz. Aus: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Hydro-CH2018, Szenarien bis 2100

Vor diesem Hintergrund ist es unverständlich, dass eine Mehrheit der Schweizer Bevölkerung, nämlich 51,6 %, im Juni 2021 ein neues Gesetz, das auf eine weitere Reduktion der Treibhausgasemissionen zielte, ablehnte. Offenbar wurde nicht verstanden, dass es sich bei der Atmosphäre um einen Speicher handelt, von dem unser Leben (saubere Luft) und das Überleben der kommenden Generationen (Konzentration der Treibhausgase) abhängig ist. Die in diesen Speicher emittierten Abgase und Treibhausgase – vor allem jene, die sich nur langsam abbauen – reichern sich an und verändern die Eigenschaften dieses Speichers mit zum Teil fatalen Auswirkungen auf die Menschen und das Ökosystem. Das durch die Menschen emittierte CO₂ (Kohlendioxid) wird in der Atmosphäre nur sehr langsam abgebaut. Nach 1000 Jahren bleiben immer noch zwischen 15 und 40 Prozent übrig!¹⁹

Um das Zwei-Grad-Klimaziel von Paris zu erreichen, können maximal noch 420–1070 Gigatonnen zusätzliches CO₂ ausgestossen werden. Aktuell liegt der Ausstoss bei 42 Gigatonnen CO₂ pro Jahr, Tendenz steigend. Im schlechtesten Fall verbleiben noch weniger als zehn Jahre, bis diese Schwelle erreicht wird. Wird sie überschritten, ist das Zwei-Grad-Ziel endgültig verloren, und es sind trotzdem weitere Anstrengungen zur Reduktion notwendig, sonst werden auch die nächsten Ziele (2,5°C, 3,0°C etc.) verfehlt.

Anpassungsmassnahmen

Die Massnahmen zur Ursachenbekämpfung, die auf globaler bis nationaler Ebene angesiedelt sind, müssen unbedingt mit massgeschneiderten Anpassungsmassnahmen auf (inter-)regionaler und lokaler Ebene ergänzt werden. Denn: Auch wenn es der Staatengemeinschaft gelingt, die Treibhausgasemissionen schnell und nachhaltig zu reduzieren, kann die Erwärmung nicht unmittelbar gestoppt werden, da der «Bremsweg» mehrere Jahrzehnte dauert.

In der Schweiz wurde zwischen 2012 und 2015 das Nationale Forschungsprogramm NFP61 «Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz» vor dem Hintergrund des Klimawandels durchgeführt. Aus der reichen Palette an Ergebnissen und Erkenntnissen sind hinsichtlich der Anpassungsmassnahmen zwei Punkte hervorzuheben:

- Anpassungsmassnahmen dürfen nicht einseitig und ausschliesslich auf die Auswirkungen des Klimawandels ausgerichtet sein. Die durch den sozioökonomischen Wandel ausgelösten Veränderungen könnten je nach Region für die zukünftige Wassersituation sogar entscheidender sein als der Klimawandel.

- Wasserprobleme werden vor allem durch Managementprobleme verursacht, wie exemplarisch die Analysen in der Region Crans-Montana-Sierre zeigten: «Da die Wasserressourcen generell genügend gross sind, um alle Ansprüche decken zu können, müssen die zurzeit zu beobachtenden Probleme von [...] Wasserknappheit auf regionale Probleme der Wasserbewirtschaftung zurückgeführt werden. Es wurden grosse Unterschiede zwischen den Gemeinden festgestellt: wasserreiche und wasserarme Gemeinden, Wasserbedarf in der einen Gemeinde doppelt so hoch wie in einer anderen, sehr unterschiedliche Wasserpreise. Dies zeigt einen erheblichen Mangel an Gerechtigkeit auf regionaler Ebene, unter den Gemeinden und unter den Bürgerinnen und Bürgern auf. Zudem fehlt es an Transparenz bei den Kosten der Wasserbewirtschaftung, was zusätzlich die Nachhaltigkeit des heutigen Systems vermindert. Der ungleiche Zugang zum Wasser wird noch gefördert durch das Beharren auf alten Wasserrechten und durch eine gewisse rechtliche Unklarheit, welche die Entwicklung von visionären Zusammenarbeitsprojekten behindern. Die jeweils kurzfristig entwickelten technischen Lösungen verhindern einen echten politischen Ehrgeiz zur Lösung der wasserwirtschaftlichen Probleme.»²⁰

Diese zwei Punkte verdeutlichen, dass ein Paradigmenwechsel von der blossen Nutzung des verfügbaren Wassers zu einem Management des Wasserverbrauchs vollzogen werden muss. Es ist eine ganzheitliche Massnahmenplanung notwendig, die sowohl klimatische wie auch sozio-ökonomische Entwicklungen antizipiert. Ein solches proaktives Handeln war noch nie eine Stärke der Politik, ganz im Gegensatz zum gut funktionierenden reaktiven Handeln nach grossen Naturereignissen, mit dem es im Alpenraum in der Regel sehr gut gelingt, schnelle und effiziente Lösungen zu finden und umzusetzen.

19 Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, «Klimawandel: Wieviel CO₂ bleibt uns noch?», in: *Scinexx*, 12. November 2018, <https://www.scinexx.de/news/geowissen/klimawandel-wie-viel-co2-bleibt-uns-noch>.

20 Rolf Weingartner et al., *MontanAqua: Wasserbewirtschaftung in Zeiten von Knappheit und globalem Wandel. Wasserbewirtschaftungsoptionen für die Region Crans-Montana-Sierre im Wallis*, Forschungsbericht des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61, Bern 2014, http://www.nfp61.ch/SiteCollectionDocuments/nfp61_projekt_montan aqua_broschuere_d.pdf.

Nutzungskonflikte vermeiden

Der Klimawandel verändert den Alpenraum, erhöht den Druck auf dessen Ressourcen, schafft aber mit den «Neuen Seen», die ein grosses ökologisches, landschaftliches und touristisches Potenzial besitzen, auch interessante Optionen. In der Konsequenz werden sich die heute bereits bestehenden Nutzungskonflikte vor allem im Bereich des Wassers weiter verstärken. Dementsprechend ist es wichtig, alpenweit und sektorenübergreifend einen Klärungsprozess bezüglich des zukünftigen Umgangs mit der Ressource Wasser anzustossen und damit einen klaren formalen Rahmen zu setzen, der bisher höchstens in Ansätzen besteht. «Dabei geht es nicht um das Fortschreiben bestehender Nutzungen und Nutzungsansprüche, sondern um das Etablieren einer neuen Koexistenz dieser Nutzungen. Ein Beispiel dafür sind die sogenannten Vorrangräume, die bestimmten Nutzungen eine hohe Priorität einräumen, sodass deren Potenziale sich primär entwickeln können.»²¹ Die Abb. 8 vermittelt dazu ein (fiktives) Beispiel.

Endlich handeln

Am 11. Mai 1990, also vor fast 32 Jahren, fand an der ETH Zürich eine Internationale Fachtagung zum Thema «Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre» statt.²² Bezüglich des Klimawandels war dazumal zwar noch einiges vage, wie das folgende Zitat belegt: «[Der beobachtete Temperaturanstieg von 0,5°C] könnte bereits einen anthropogen verstärkten Treibhauseffekt enthalten.» Trotzdem wurden die entscheidenden Veränderungsprozesse im Alpenraum schon damals richtig verstanden: «Nach den besten zurzeit möglichen Schätzungen würde bei einem Temperaturanstieg von 3°C die Schneedeckendauer auf Kurortshöhe um rund einen Monat verkürzt und die Schneehöhe gleichzeitig auf rund die Hälfte reduziert werden, drei Viertel der heutigen Gletscherflächen würden verschwinden und viele Permafrosthänge unterhalb 3000 Meter würden langfristig destabilisiert.» Und in der Podiumsdiskussion der Tagung äusserte sich Kerry Kelts, der damalige Leiter von Proclim²³, wie folgt: «Die kausale Bedeutung des Klimas sowie die Irreversibilität einer Klimaänderung stellt ein ernstes Problem dar. Weltweit würde es sehr viel bedeuten, die Entwicklung rückgängig zu machen. Es wäre nötig, mit

21 Thomas Kissling et al., *Profilierung des Alpenraums. Projektskizze*, interner Bericht ETH Zürich, 2021.

22 *Mitteilungen der VAW 108*, <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/1990-1999/108.pdf>. Die nachfolgenden Zitate im Text stammen aus dieser VAW-Mitteilung.

23 <https://proclim.scnat.ch/de>.

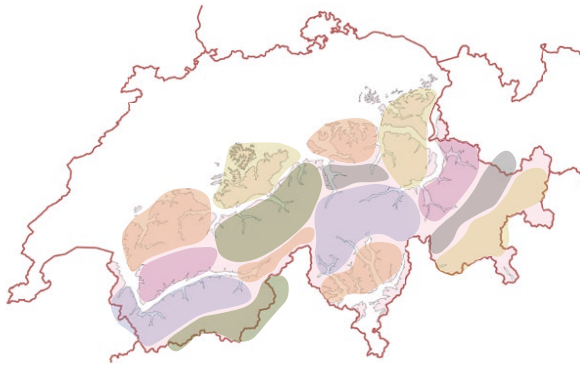


Abb. 8: Zur Notwendigkeit einer nationalen Planung im schweizerischen Alpenraum. Fiktive Kartenskizze zu einem möglichen Ergebnis. Quelle Karte geo.admin.ch. © Professur Günther Vogt, ETH Zürich

- Projektion
- Kooperationsräume
 - Vorrangräume Tourismus
 - Vorrangräume Wasserkraft
 - Vorrangräume Naturschutz
 - Vorrangräume Landwirtschaft
 - Vernakuläre Räume

aller Kraft daranzugehen, ohne auf weitere Beweise zu warten. Diese politische Aktivität wird zweifellos nicht sehr schnell geschehen. Was zählt, ist das Verständnis der Prozesse. Die nächsten 15 Jahren sind in der Frage der Massnahmen entscheidend.»

Mittlerweile sind aber bereits über 30 Jahre vergangen. Die Wissenschaft hat nun auch für den Alpenraum umfassende, in Raum und Zeit differenzierte quantitative Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels vorgelegt. Zudem blieben ihre Aussagen über den ganzen Zeitraum konsistent. Dies hängt auch damit zusammen, dass im Alpenraum – wie bereits mehrmals erwähnt wurde – die entscheidenden Prozesse temperaturgesteuert sind. Deshalb versteht man die Richtung der Veränderungen schon seit Langem sehr gut und mit immer detaillierteren Modellen auch deren Zeitpunkt und Intensität in Abhängigkeit von den Emissionsszenarien immer besser. Trotzdem stellen wir kein adäquates Handeln fest! Eigentlich sind wir seit nunmehr drei Jahrzehnten beobachtende Zeitzeugen, die die bereits ablaufenden Veränderungen akribisch aufzeichnen und darüber detailliert berichten. Die entscheidende Frage ist aber, ob der Schritt vom «Beobachtenden» zum «Handelnden» gelingt?

Ein wesentlicher Grund für die fehlende Bereitschaft zu handeln ist, dass es sich beim Klimawandel eigentlich um ein klassisches Allmendeproblem²⁴ handelt. Durch die Einleitung von Treibhausgasen werden die Grundfunktionen

²⁴ Elinor Ostrom, *Governing the Commons. The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge 1990.

der Atmosphäre derart verändert, dass das Leben aller gefährdet ist. Der US-amerikanische Ökologe Garrett Hardin, auf den der für die Allmendeproblematik treffende Begriff «tragedy of the commons»²⁵ zurückgeht, beschrieb 1968, wie individuelles, an der Durchsetzung der eigenen Interessen orientiertes Handeln für das Kollektiv verheerende Folgen habe. Zwar wisse im Grunde jede und jeder Einzelne, dass unkooperatives Verhalten allen schadet. Trotzdem wolle sich niemand selbst einschränken, um dann festzustellen, wie die anderen profitieren, indem sie die Ressourcen eigennützig weiter ausbeuten, also im Falle der Atmosphäre, sie weiter mit Treibhausgasen belasten. «Freiheit auf der Allmende», so das Fazit Hardins, «bringt allen Beteiligten den Ruin.»²⁶

Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU)²⁷ skizziert mit dem Leitbild des «gestaltenden Staats» einen interessanten Ausweg aus diesem Dilemma. Der Staat wird dabei zum entscheidenden «Transformationsakteur», der über Kompetenzen verfügt, die über die traditionelle Regulierungsfunktion hinausgehen, um der notwendigen Wende beim Klimaschutz zum Durchbruch zu verhelfen. Er spricht von einem «Gesellschaftsvertrag für eine Grosse Transformation». Für das Zustandekommen eines solchen Vertrags genügt es nicht, die bisherige Politik fortzuschreiben, sondern es braucht einen Paradigmenwechsel oder, wie es die junge Generation formuliert, einen Systemwechsel. Der gestaltende Staat setzt mit Gesetzen, Anreizen, Lenkungsabgaben, Verboten und weiteren geeigneten Instrumenten klare Leitlinien, stellt die erforderlichen Finanzen bereit und schafft für das notwendige konkrete Handeln auf regionaler bis lokaler Ebene einen verbindlichen Rahmen.

Grenzen verschieben sich

Mit dem Klimawandel verändern sich in den Gebirgsräumen Grenzen: Nullgradgrenze, Schneegrenze, Gleichgewichtslinien bei Gletschern, Untergrenze des Permafrosts, Beginn und Ende der Skisaison, Grenzen der Gefahrenggebiete. Mit der Verflüssigung des Wasserhaushalts verändern sich nicht nur die saisonalen Abflussmuster, sondern auch alpine Landschaften (Abb. 9). Letztere vergrauen, eröffnen neue Ein- und Ausblicke. Das Alpenbild wandelt sich im Inneren.

25 Garrett Hardin, «The Tragedy of the Commons», in: *Science*, 16, 1968.

26 https://www.wikiwand.com/de/Tragik_der_Allmende.

27 WBGU, *Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Grosse Transformation*, Berlin 2011.

28 Paul Messerli, «Neue Solidarität zwischen Berg und Tal», in: *Der Bund*, 30. Januar 2021.



Im 19. Jahrhundert verloren die Alpen als Randregionen an den Aussengrenzen der neu entstehenden Nationalstaaten und weit entfernt von den politischen und wirtschaftlichen Zentren an Bedeutung. Angesichts der klimatischen und sozioökonomischen Herausforderungen in den ausseralpinen Gebieten werden sie sich nun aber als Ressourcen-, Energie- und Erholungsraum, kurz als ökologische Insel, in Mittel- und Südeuropa profilieren. Gleichzeitig werden der Druck und die Begehrlichkeiten von aussen zunehmen. Deshalb muss sich eine neue Koexistenz zwischen alpinen und ausseralpinen Regionen etablieren oder sich eine «neue Solidarität zwischen Berg und Tal» entwickeln.²⁸

Abb. 9: Gamshiglescher (Berner Oberland) am 16. Juli 2011 (oben) und am 24. Juni 2018 (unten). Foto: © Simon Oberli, www.gletschervergleiche.ch

Aus hydrologischer Sicht gilt für den Alpenraum klar und eindeutig, dass Wasser nur zu einem Problemfeld wird, wenn man nichts tut. Die Lösungswege sind vorgezeichnet, aber meist nur auf dem Papier. Gesellschaft, Politik und Wirtschaft müssen ihren bisherigen Denkraum endlich verlassen und auf neue, innovative, nachhaltige und vor allem auch ganzheitliche Lösungen setzen. Ein solcher Wandel geschieht nicht innerhalb weniger Jahre. Beginnen wir deshalb besser jetzt als morgen.

S. 736

Bild: Rekompositionen, Valle Malvaglia, Martino Pedrozzi, 2000-2015, Foto: Pino Brioschi, 2014, <https://www.transfer-arch.com>.

S. 449, 741 - 750, 754 - 761, 764 - 811

Karten: Professur Günther Vogt, Institut für Landschaftsarchitektur, ETH Zürich.

Datengrundlage GIS:

SWISSTOPO: <https://www.swisstopo.admin.ch/>

ALPINE CONVENTION ATLAS: <https://www.atlas.alpconv.org/>

HYDROLOGISCHER ATLAS DER SCHWEIZ: <https://www.hydrologischeratlas.ch/>

SWISS CLIMATE CHANGE SCENARIOS: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/en/home/climate-change-and-impacts/swiss-climate-change-scenarios.html>

STATISTISCHER ATLAS DER SCHWEIZ: <https://www.atlas.bfs.admin.ch/>.