



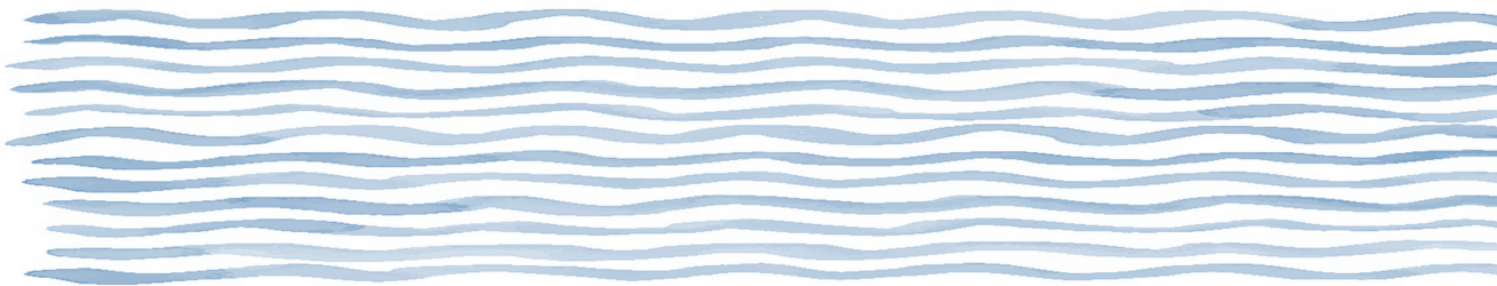
Eidg. Forschungsanstalt für Wald,  
Schnee und Landschaft WSL



**HSR**  
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL  
FHO Fachhochschule Ostschweiz

# Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit?

M. BRUNNER, A. BJÖRNSÉN GURUNG, J. SPEERLI, S. KYTZIA, S. BIELER, D. SCHWERE  
UND M. STÄHLI



IM AUFTRAG DES BUNDESAMTES FÜR UMWELT BAFU – OKTOBER 2019

EIN FORSCHUNGSPROJEKT IM RAHMEN DES NCCS THEMENSCHWERPUNKTES  
“HYDROLOGISCHE GRUNDLAGEN ZUM KLIMAWANDEL” DES NATIONAL CENTRE FOR  
CLIMATE SERVICES

# Hydro-CH2018 Wasserspeicher

Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit?

25.10.2019



Manuela Brunner<sup>1</sup>, Astrid Bjørnsen Gurung<sup>1</sup>, Jürg Speerli<sup>2</sup>, Susanne Kytzia<sup>2</sup>, Sara Bieler<sup>2</sup>, Dominik Schwere<sup>2</sup> und Manfred Stähli<sup>1</sup>

1



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,  
Schnee und Landschaft WSL

2



**HSR**

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK  
RAPPERSWIL

FHO Fachhochschule Ostschweiz

## Impressum

**Auftraggeber:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Hydrologie, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

**Auftragnehmer:** WSL und HSR

**Autor/Autorin:** Manuela Brunner, Astrid Björnsen Gurung, Jürg Speerli, Susanne Kytzia, Sara Bieler, Dominik Schwere und Manfred Stähli

**Begleitung BAFU:** Petra Schmocker-Fackel und Fabia Hüsler

**Begleitgruppe:** Martin Barben (BAFU), Jan Béguin (BFL), Thomas Putzi (BFE), Guido Federer (BFE), Christian Holzgang (BAFU), Andreas Inderwildi (BAFU), Elke Kellner (Universität Bern), André Olschewski (Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfachs SVGW), Roger Pfammatter (Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband SWV), Ulrich Sieber (BAFU), Stefan Vollenweider (Wasseragenda 21)

**Hinweis:** Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

**Zitiervorschlag:** Brunner M., Björnsen Gurung A., Speerli J., Kytzia S., Bieler S., Schwere D. und Stähli M. 2020. Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit?. Hydro-CH2018 Projekt. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern, Schweiz, 68 S.

## Zusammenfassung

Mit dem Klimawandel werden Schneedecke und Gletschermasse abnehmen, was die Saisonalität der natürlichen Abflüsse aus den alpinen Gebieten verändern wird. Gleichzeitig dürfte die Nachfrage nach Wasser, insbesondere durch die Landwirtschaft, in den Sommermonaten zunehmen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie gross das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit ist. Die vorliegende Studie hat für 307 mittelgrosse Einzugsgebiete der Schweiz die heutige und zukünftige Sommerwasserknappheit abgeschätzt und dem nutzbaren Speichervolumen von natürlichen Seen und künstlichen Reservoirien gegenübergestellt. Zur Berechnung der Sommerwasserknappheit wurde das verfügbare Wasserdargebot mit der vorliegenden Wassernachfrage verglichen. Das Wasserdargebot wurde mit dem hydrologischen Modell PREVAH simuliert unter Verwendung beobachteter meteorologischer Daten (heute) sowie der Klimaszenarien CH2018 (Zukunft). Die Wassernachfrage wurde für die Kategorien Trinkwasser, Industrie- und Dienstleistungen, künstliche Schneeproduktion, Landwirtschaft, Ökologie und Wasserkraft abgeschätzt.

Die Resultate zeigen, dass sich das Gesamtdargebot in Zukunft gegenüber heute nur gering verändern wird, während sich die Saisonalität des Abflusses insbesondere in den Regionen mit Schnee- und Gletschereinflüssen relativ stark verändern wird. Sommerwasserknappheit ist sowohl unter heutigen wie auch zukünftigen Bedingungen v.a. im Mittelland und nur bedingt in alpinen Regionen zu erwarten. Unter extremen Bedingungen können aber auch Gebiete in den Alpen von Wasserknappheit betroffen sein. Die schweizweite, totale Kapazität der Wasserspeicher ist grösser als die erwartete Wasserknappheit im Sommer. Während bei künstlichen Wasserspeichern beinahe die volle Speicherkapazität auch tatsächlich nutzbar ist, heute aber vorwiegend für die Wasserkraftproduktion reserviert ist, beträgt der Anteil des Speichervolumens am Gesamtvolumen natürlicher Seen im Durchschnitt lediglich 3.5%. Ausserdem liegen die Speicher oft nicht dort, wo Wasserknappheit zu erwarten ist. Aus diesen Gründen ist das lokale Potenzial von bestehenden Speichern zur Verminderung von Wasserknappheit meist gering. Vergleicht man das nutzbare Speichervolumen hingegen auf regionaler Ebene mit der dortigen Wasserknappheit, besteht ein beträchtliches Potenzial zur Verminderung von Wasserknappheit. Sollen Speicher also zur Verminderung von Sommerwasserknappheit beitragen, ist eine regionale Betrachtung notwendig.

Das heute bestehende Potenzial kann nur dann ausgeschöpft werden, wenn die bestehenden Rahmenbedingungen und Nutzungskonzessionen angepasst werden. Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Wasserknappheit könnte vergrössert werden, indem im Mittelland, dort wo Wasserknappheit vorwiegend zu erwarten ist, neue Speicher gebaut würden. Der Bau von neuen Speichern in post-glazialen Gebieten bringt in den meisten Regionen einen geringen Mehrwert, da die unmittelbar unterliegenden Regionen auch in Zukunft eher weniger von Wasserknappheit betroffen sein werden.

## Résumé

Avec le changement climatique, la couverture neigeuse et la masse des glaciers vont diminuer, ce qui modifiera la saisonnalité du ruissellement naturel des zones alpines. Au même temps, la demande en eau, notamment de l'agriculture, devrait augmenter pendant les mois d'été. Dans ce contexte, la question se pose de savoir quelle est l'importance du potentiel des réservoirs d'eau pour réduire les pénuries d'eau en été. Cette étude a estimé la pénurie d'eau estivale actuelle et future pour 307 bassins versants de taille moyenne en Suisse et l'a comparée au volume de stockage utilisable des lacs naturels et des réservoirs artificiels. Pour calculer la pénurie d'eau en été, l'approvisionnement en eau disponible a été comparé à la demande actuelle en eau. L'approvisionnement en eau a été simulé avec le modèle hydrologique PREVAH en utilisant les données météorologiques observées (aujourd'hui) et les scénarios climatiques CH2018 (futur). La demande en eau a été estimée pour les catégories suivantes : eau potable, industrie et services, production de neige artificielle, agriculture, écologie et hydroélectricité.

Les résultats montrent que l'offre totale ne changera que légèrement à l'avenir par rapport à aujourd'hui, tandis que la saisonnalité du ruissellement changera assez fortement, en particulier dans les régions où la neige et les glaciers ont une influence. Dans les conditions actuelles et futures, il faut s'attendre à des pénuries d'eau en été, principalement sur le plateau central et seulement dans une mesure limitée dans les régions alpines. Toutefois, dans des conditions extrêmes, certaines régions des Alpes peuvent également être touchées par la pénurie d'eau. La capacité totale des réservoirs d'eau dans toute la Suisse est supérieure à la pénurie d'eau prévue en été. Alors que la capacité de stockage des réservoirs artificiels peut être utilisée presque entièrement, mais qu'elle est actuellement réservée principalement à la production d'énergie hydroélectrique, la proportion du volume utilisable par rapport au volume total des lacs naturels n'est en moyenne que de 3,5 %. En outre, les réservoirs ne sont souvent pas situés là où l'on s'attend à une pénurie d'eau. Pour ces raisons, le potentiel local des réservoirs existants pour réduire la pénurie d'eau est généralement faible. Si, en revanche, le volume de stockage utilisable est comparé au niveau régional avec la pénurie d'eau locale, il existe un potentiel considérable de réduction de la pénurie d'eau. Si les installations de stockage doivent contribuer à réduire la pénurie d'eau en été, une approche régionale est nécessaire.

Le potentiel qui existe aujourd'hui ne peut être exploité que si les conditions cadres et les concessions d'utilisation existantes sont adaptées. Le potentiel des réservoirs d'eau pour réduire la pénurie d'eau pourrait être accru par la construction de nouveaux réservoirs sur le Plateau central, où la pénurie d'eau est principalement attendue. La construction de nouveaux réservoirs dans les zones postglaciaires n'apporte que peu de valeur ajoutée dans la plupart des régions, car les régions directement sous-jacentes auront tendance à être moins touchées par la pénurie d'eau à l'avenir.

## Inhaltsverzeichnis

|       |                                                                                         |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Einführung.....                                                                         | 7  |
| 2     | Gesamtkonzept.....                                                                      | 8  |
| 3     | Methoden .....                                                                          | 9  |
| 3.1   | Studiengebiet .....                                                                     | 9  |
| 3.2   | Dargebot .....                                                                          | 11 |
| 3.3   | Speicher.....                                                                           | 12 |
| 3.3.1 | Natürliche Seen.....                                                                    | 12 |
| 3.3.2 | Künstliche Reservoirs.....                                                              | 14 |
| 3.3.3 | Trinkwasserspeicher .....                                                               | 15 |
| 3.3.4 | Grundwasser .....                                                                       | 15 |
| 3.3.5 | Zukünftige Speichermöglichkeiten .....                                                  | 15 |
| 3.4   | Nachfrage.....                                                                          | 16 |
| 3.4.1 | Trinkwasser .....                                                                       | 16 |
| 3.4.2 | Industrie- und Dienstleistungssektor.....                                               | 17 |
| 3.4.3 | Künstliche Schneeproduktion .....                                                       | 17 |
| 3.4.4 | Landwirtschaft .....                                                                    | 17 |
| 3.4.5 | Ökologie .....                                                                          | 18 |
| 3.4.6 | Wasserkraft.....                                                                        | 18 |
| 3.4.7 | Saisonale und zukünftige Wassernachfrage .....                                          | 21 |
| 3.5   | Wasserknappheit/-überschuss .....                                                       | 21 |
| 3.6   | Potenzial von Speichern zur Verminderung von lokaler Wasserknappheit.....               | 23 |
| 3.7   | Potenzial von Speichern zur Verminderung von Wasserknappheit in unterliegenden Gebieten | 23 |
| 4     | Resultate .....                                                                         | 24 |
| 4.1   | Dargebot .....                                                                          | 24 |
| 4.2   | Speicher.....                                                                           | 25 |
| 4.3   | Nachfrage.....                                                                          | 29 |
| 4.4   | Grössenordnungen Wasserbilanzelemente.....                                              | 33 |
| 4.5   | Wasserknappheit/-überschuss .....                                                       | 34 |
| 4.6   | Potenzial zur Verminderung von lokaler Sommerwasserknappheit .....                      | 37 |
| 4.7   | Potenzial zur Verminderung von Sommerwasserknappheit in unterliegenden Gebieten.....    | 41 |
| 5     | Diskussion und Ausblick.....                                                            | 48 |
| 6     | Schlussfolgerungen .....                                                                | 53 |
| 7     | Referenzen .....                                                                        | 54 |
| 8     | Anhang.....                                                                             | 58 |
| 8.1   | Modellketten.....                                                                       | 58 |

|     |                                                        |    |
|-----|--------------------------------------------------------|----|
| 8.2 | Füllungsgrad Speicherseen .....                        | 59 |
| 8.3 | Herleitung maximaler und minimaler Wasserspiegel.....  | 59 |
| 8.4 | Speicherkapazitäten und Nutzvolumen grosser Seen ..... | 60 |
| 8.5 | Quellen Nutzvolumen & Pegelstände.....                 | 61 |
| 8.6 | Literaturstudien .....                                 | 62 |
| 8.7 | Glossar.....                                           | 67 |

# 1 Einführung

Die neuen Klimaszenarien CH2018 sprechen eine klare Sprache: im Laufe des 21. Jahrhunderts werden die Sommermonate niederschlagsarmer, die Schneeschmelze wird geringer und verschiebt sich in den Frühling, und die Gletscher ziehen sich stark zurück (National Centre for Climate Services, 2018). Als Folge davon sinkt im Sommer das natürliche Wasserdargebot. Gleichzeitig gibt es Hinweise auf eine zunehmende Nachfrage nach Wasser in den Sommermonaten: Die Energiestrategie 2050 des Bundesrats sieht eine Zunahme der Wasserkraftproduktion vor (UVEK, 2014), der landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf nimmt zu (Fuhrer & Calanca, 2014), und zuletzt lässt auch die Bevölkerungsentwicklung einen höheren Trinkwasserbedarf erwarten.

Vor diesem Hintergrund zeichnet sich ab, dass es zukünftig häufiger zu Situationen lokaler und regionaler Wasserknappheit kommen wird. Folglich dürften natürliche sowie künstliche Wasserspeicher - wie Seen, Wasserkraftreservoirs, Beschneungsteiche und Trinkwasserreservoirs - in Zukunft mehr Bedeutung für die Deckung temporärer Wasserknappheit gewinnen. Aber welchen Beitrag können natürliche und künstliche Wasserspeicher in solchen Situationen tatsächlich leisten? Um diese Frage zu beantworten, hat das Bundesamt für Umwelt im Rahmen des NCCS verschiedene Forschungsprojekte initiiert, z.B. zur Rolle des Grundwassers (Federal Office for the Environment FOEN, 2016) oder zum Beitrag der Oberflächen-Wasserspeicher zur Verminderung von Wasserknappheit. Regionale Fallstudien zu diesem Thema liegen zwar vor, eine nationale Übersicht zum Potenzial von Wasserspeichern fehlte bisher aber (Federal Office for the Environment FOEN, 2014b).

Die Eidg. Forschungsanstalt WSL und die HSR Hochschule für Technik Rapperswil haben diese Frage aufgenommen und erarbeiteten eine nationale Gegenüberstellung von regionaler Wasserknappheit und regionalen Speichervolumen. Berücksichtigt wurden natürliche Seen, Stauseen, Trinkwasserreservoirs und Beschneungsteiche. Damit sollen insbesondere die folgenden Fragen beantwortet werden:

- Wie viel Wasser kann in den bestehenden Wasserspeichern der Schweiz gespeichert werden und welcher Anteil kann genutzt werden?
- Welchen Beitrag können Wasserspeicher zur Minderung aktueller und zukünftiger Situationen mit Wasserknappheit leisten?
- Welchen Beitrag können sie in Extremsituationen leisten, wie zum Beispiel im Sommer 2003?
- Wie unterscheiden sich ihre Beiträge in verschiedenen Schweizer Regionen?
- Besteht ein Bedarf für zusätzliche Wasserspeicher? Falls ja, wo liegt er?

Der vorliegende Bericht vermittelt eine theoretische, wasserbilanzbezogene Sicht auf das Potenzial von Wasserspeichern zur Bewältigung von Wasserknappheit unter Einhaltung der heute gültigen Reglemente und Konzessionen. Aussagen zur Wirtschaftlichkeit, zu ökologischen Auswirkungen, zu technischen Aspekten oder zur politischen Akzeptanz werden keine gemacht. Diese müssen in einem weiteren Schritt untersucht werden (Etappe 3 des Projektes mit Beginn Sommer 2019).

## 2 Gesamtkonzept

Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit wurde für 307 mittelgrosse, hydrologische Gebiete in der Schweiz abgeschätzt. Dazu wurde die geschätzte, regionale Wasserknappheit dem nutzbaren Speichervolumen gegenübergestellt. Wasserknappheit tritt auf, wenn das natürliche Wasserdargebot in einem Gebiet kleiner ist als die Wassernachfrage. In einem ersten Schritt wurden deshalb das natürliche Wasserdargebot in einem Gebiet und dessen Saisonalität abgeschätzt (Abbildung 1 A). Zweitens wurde die Wassernachfrage für verschiedene Kategorien berechnet und falls möglich, saisonal abgebildet (B). Die berücksichtigten Kategorien umfassten Trinkwasser, Industrie, Landwirtschaft, Wasserkraftproduktion, künstliche Schneeproduktion und Ökologie. Die Kühlung von Atomkraftwerken oder anderen Anlagen wurde nicht betrachtet. In einem dritten Schritt wurde die saisonale Wasserknappheit (C) abgeschätzt, indem der totale Wasserverbrauch vom natürlichen Dargebot abgezogen wurde. Ist diese Zahl negativ, ist ein Gebiet temporär von Wasserknappheit betroffen, ist sie positiv, besteht ein Wasserüberschuss. Basierend auf den saisonalen Wasserknappheitsschätzungen wurde mittels statistischer Modelle extreme Sommerwasserknappheit berechnet. Diese extreme Wasserknappheit wurde schliesslich dem im Gebiet verfügbaren Speichervolumen von Wasserspeichern gegenübergestellt, um damit deren Potenzial zur Verminderung von Sommerwasserknappheit zu bestimmen (D). Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit wurde definiert als das Verhältnis zwischen dem Speichervolumen in einem Gebiet und dessen Wasserknappheit. Diese Definition des Potenzials erlaubte, im Gegensatz zu absoluten Grössen, Aussagen darüber wie viel Prozent der Wasserknappheit in einem Gebiet über Wasserspeicher gedeckt werden können.

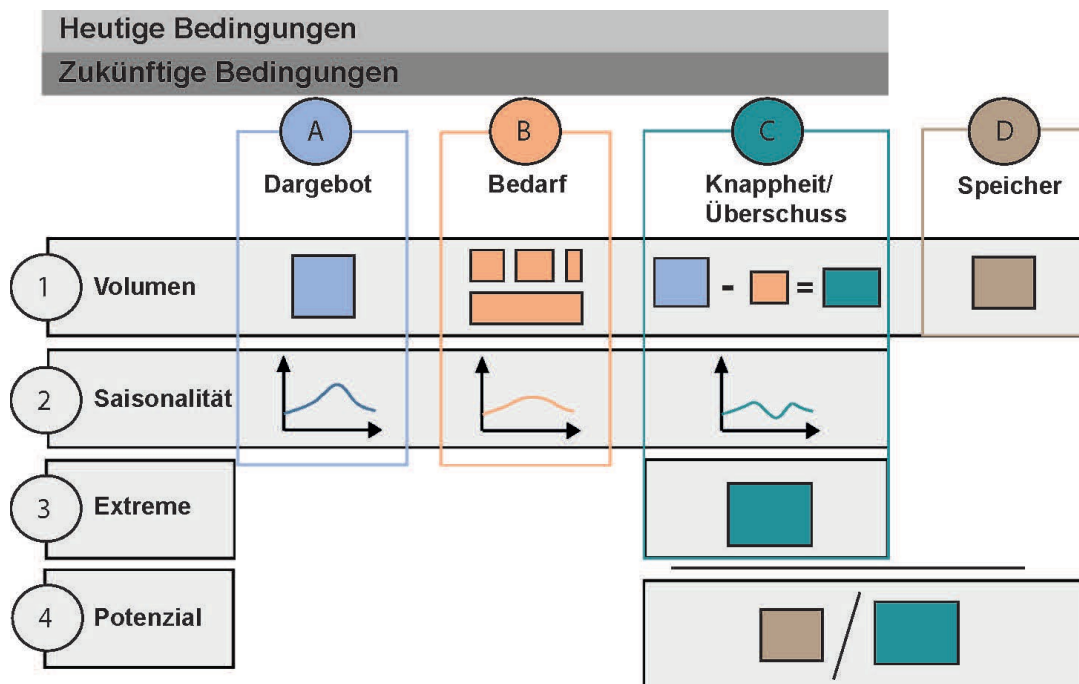


Abbildung 1: Gesamtkonzept zur Berechnung des Potenzials von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit.

Der Fokus der Potenzialabschätzung lag auf natürlichen Seen und künstlichen Wasserspeichern. Zusätzlich wurde aber auch der Grundwasserspeicher in Relation zu anderen Wasserspeichern gesetzt um dessen Grössenordnung zu zeigen.

Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommertrockenheit wurde sowohl für heutige normale und extreme Bedingungen wie auch für zukünftige normale und extreme Bedingungen abgeschätzt. Für die zukünftige Abschätzung des natürlichen Wasserdargebots betrachteten wir den Zeitraum 2071-2100, da sich allfällige Veränderungen im Wasserdargebot bis Ende Jahrhundert am deutlichsten zeigen; der Beitrag aus der Gletscherschmelze wird bis dann stark zurückgegangen sein. Die erwarteten Veränderungen im Wasserdargebot, in der Nachfrage und in der Wasserknappheit wurden exemplarisch in vier der insgesamt 307 untersuchten Gebiete illustriert und diskutiert.

### **3 Methoden**

#### **3.1 Studiengebiet**

Die Studie wurde für 307 mittelgrosse Schweizer Einzugsgebiete durchgeführt (Abbildung 2). Der Fokus lag auf einer lokalen Skala, weil Brunner et al. (2018) gezeigt haben, dass landesweite Wasserknappheitsanalysen auf einer lokalen anstatt einer regionalen Skala durchgeführt werden sollten. Dies insbesondere dann, wenn eine hohe Variabilität an physiographischen und meteorologischen Gebietseigenschaften vorliegt, was für die Schweiz klar der Fall ist. Die 307 Gebiete haben eine mittlere Einzugsgebietsgrösse von 117 km<sup>2</sup> und liegen auf mittleren Höhen zwischen 300 und 3000 m ü. M. Der jährliche Niederschlag variiert zwischen 500 mm und 3000 mm (Federal Office of Meteorology and Climatology, 2018). Die Unterschiede in Topographie, Niederschlagssummen und -saisonalität und weiteren Gebietseigenschaften haben verschiedene Abflussregime zur Folge, welche sowohl niederschlagsdominierte Regime wie auch schmelzdominierte Regime umfassen (Blanc & Schädler, 2014).

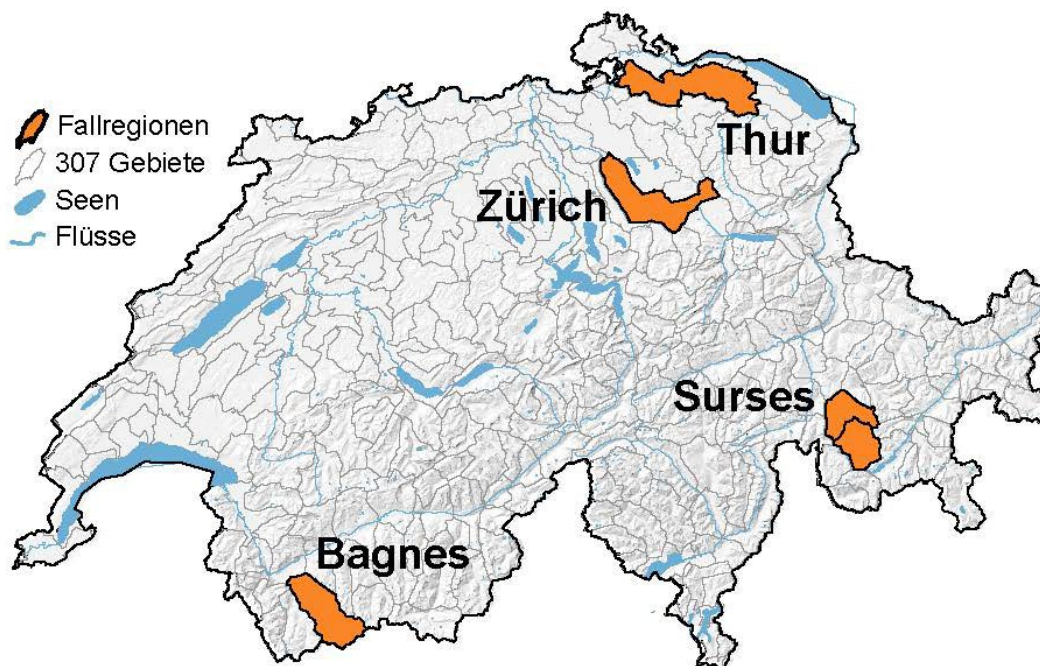


Abbildung 2: Für die Potenzialabschätzung wurden insgesamt 307 Studiengebiete und vier Fallregionen: Bagnes, Surses, Thur und Zürich berücksichtigt.

Um die saisonalen Veränderungen der Wasserbilanzelemente darzustellen, wurden vier der 307 Regionen ausgesucht, welche sich in ihren Gebiets- und Abflusseigenschaften unterscheiden (orange Gebiete Abbildung 2). Das Gebiet *Bagnes* im Wallis und die Region *Surses* (Oberhalbstein) in Graubünden sind alpine Gebiete. Deren Abflussregime werden zurzeit vorwiegend durch die Gletscher- und Schneeschmelze geprägt. Charakteristisch sind folglich ein hoher Abfluss im Sommer und ein niedriger Abfluss im Winter. Der grösste Speicher in der Region *Bagnes* ist der Lac de Mauvoisin, ein in die Rhône entwässernder Stausee. Daher ist die Wasserkraft ein Faktor, der die Nachfrage nach Wasser entscheidend beeinflusst. In dieser Region wird zum einen Landwirtschaft betrieben, zum anderen ist sie touristisch geprägt, insbesondere durch den Wintersportort Verbier. In der Region *Surses* befindet sich der Lai da Marmorera, ein Stausee, der via Gelgia (Julia) in die Albula und schliesslich in den Rhein mündet. Die dünn besiedelte Region ist durch den Tourismus und die Landwirtschaft geprägt. Auch hier gehört die Wasserkraft zu einer wichtigen Wassernutzung.

Bei den beiden Regionen im Mittelland, *Thur* und *Zürich*, dominiert der Niederschlag das Abflussregime. Dies führt zu eher kleinen Abflüssen im Sommer und grösseren Abflüssen im Winter. In der Region *Thur* sind keine Speicher vorhanden. Bekannt sind daher - insbesondere nach dem Sommer 2018 - die Bilder einer trockenen Thur. Die landwirtschaftliche Bewässerung dominiert in dieser Region die Nachfrage nach Wasser. Die Region *Zürich* beinhaltet speziell den regulierten Zürichsee, inklusive Obersee, sowie den Sihlsee. Ein Teil des Wassers aus dem Sihlsee wird zwecks Wasserkraftnutzung in den Zürichsee umgeleitet. Umgekehrt wird auch Wasser aus dem Zürichsee zurück in den Sihlsee gepumpt. Ausserdem befinden

sich der Wägitaler-, der Klöntaler- sowie der Limmerensee in dieser Region. Die Pumpspeicherwerke können das vorhandene Wasser mehrmals turbinieren und wieder zurückpumpen. Die Wasserkraft macht daher einen beachtlichen Teil der Nachfrage aus. Die Region ist sehr stark besiedelt, und ein grosser Anteil des Trinkwassers wird aus dem See gewonnen. In der Stadt Zürich sind viele Dienstleistungsbetriebe angesiedelt, entlang der Limmat auch einige Industriebetriebe. Der Tourismus und der See als Naherholungsort stellen weitere Anforderungen an die Wasserbewirtschaftung.

### 3.2 Dargebot

Für die Berechnung des lokalen Wasserdargebotes wurden mit dem hydrologischen Modell PREVAH Abflusszeitreihen in täglicher Auflösung simuliert. Das PREVAH Modell ist ein konzeptionelles, prozessbasiertes Modell und besteht aus mehreren Teilmodellen, welche verschiedene Teile des hydrologischen Systems abbilden (Viviroli et al., 2009). Dazu gehören Interzeptions- und Bodenwasserspeicherung, Evapotranspiration, Schneeakkumulation, Gletscherschmelze, Grundwasser, Abfluss und Basisabflussgeneration sowie die Abflusskonzentration. Für die Simulationen wurde eine gegitterte Version des Modells für das Gebiet der Schweiz aufgesetzt. Dazu wurde das Modell mit Zeitreihen von 140 Messstationen, welche verschiedene Abflussregime umfassten, kalibriert und validiert (Köplin et al., 2010). Die Kalibration wurde mittels der Zielfunktionen volumetrische Abweichung (Viviroli et al., 2007) und Benchmark Effizienz (Schaeffli & Gupta, 2007) auf der Zeitperiode 1984-1996 durchgeführt und die Validation auf den Perioden 1980-1983 und 1997-2009. Die für die 140 Gebiete ermittelten Parameter wurden in einem Regionalisierungsverfahren, das auf *ordinary Kriging*, beruht auf die einzelnen Gitterzellen im Modell übertragen (Viviroli et al., 2009). Das kalibrierte und validierte Modell wurde schliesslich mit meteorologischen Daten (Niederschlag, Temperatur, Strahlung und Wind) der Referenz- und Zukunftsperiode angetrieben. Die **Referenzperiode** umfasst die Jahre **1981-2010**, die **zukünftige Periode** die Jahre **2071-2100**, wenn die grössten Änderungen im Klima und im Abfluss zu erwarten sind.

Die meteorologischen Daten stammen aus den CH2018 Klimaszenarien, welche vom Nationalen Zentrum für Klimadienstleistungen (NCCS) zur Verfügung gestellt werden (National Centre for Climate Services, 2018). Diese basieren auf dem EURO-CORDEX Datensatz (Jacob et al., 2014), welcher die neusten Fortschritte in der Entwicklung von Klimamodellen abbildet und transiente Simulationen basierend auf einer kontinuierlichen Änderung der Treibhausgase erlaubt. Die Szenarien basieren auf den *representative concentration pathways* (RCPs) Szenarien (Moss et al., 2010) und dem regionalen Downscalingansatz *quantile mapping*. Die RCP Szenarien beschreiben mögliche, zukünftige Entwicklungen der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre. Die meteorologischen Daten, inklusive relative Feuchte, Strahlung und Wind, stehen für 39 Modellketten für verschiedene meteorologische Stationen zur Verfügung und wurden auf ein 500-Meter-Gitter interpoliert. Eine vollständige Liste der 39 Klimaketten findet sich in Tabelle 2 im Anhang.

Zukünftige Gletscherausdehnungen wurden mit einem Gletscherevolutionsmodell abgebildet. Für Gletscher kürzer als 1 km per 2003 wurde das Modell GloGEM (Huss & Hock, 2015) verwendet, für Gletscher länger als 1 km das Modell GloGEMflow (Zekollari et al., 2019). Die simulierten Gletscherausdehnungen wurden auf das PREVAH Modellgitter umgerechnet.

Das mittlere Abflussregime repräsentiert normale Abflussbedingungen und wurde für heutige Bedingungen über die **Periode 1981-2010** und für zukünftige Bedingungen über die **Periode 2071-2100** berechnet. Neben den normalen Bedingungen wurden auch extreme Bedingungen betrachtet. Das Jahr 2003 repräsentiert heutige, trockene Bedingungen (Rebetez et al., 2006; Schär et al., 2004; Zappa & Kan, 2007). Für zukünftige Bedingungen, wurde jenes Jahr identifiziert, welches den niedrigsten monatlichen Abfluss aufwies. Die verschiedenen Regimes wurden zusammen mit den Wassernachfrageabschätzungen verwendet, um Gebiete und Saisons mit Wasserknappheit/-überschuss zu bestimmen.

### 3.3 Speicher

Unter dem Begriff Wasserspeicher wurden die unterschiedlichen Speichertypen, natürliche regulierte und unregulierte Seen, künstliche Reservoirs (Stauseen), Beschneidungsteiche, Trinkwasserspeicher und der Grundwasserspeicher verstanden. Während die grossen natürlichen Seen vor allem im Mittelland liegen, sind die künstlichen Reservoirs grösstenteils in den Alpen zu finden (Abbildung 3). Für die natürlichen Seen wurde neben der Speicherkapazität auch das Nutzvolumen bestimmt. Das Nutzvolumen stellt jenen Teil der Speicherkapazität dar, der technisch und gemäss den geltenden Reglementen tatsächlich genutzt werden kann.



Abbildung 3: Räumliche Verteilung Seen und künstliche Reservoirs.

#### 3.3.1 Natürliche Seen

Bei natürlichen Seen wurde zwischen regulierten und nicht regulierten Seen unterschieden. Der grösste Teil der natürlichen Schweizer Seen ist reguliert. Hauptgrund dafür ist der Hochwasserschutz. Die Seen werden mittels Wehranlagen reguliert. Die Bewirtschaftung erfolgt gemäss den Wehrreglementen. Bereits heute erfüllen viele natürliche Seen mehrere Funktionen. So decken sie teils die Trinkwassernachfrage, erfüllen touristische oder ökologische Ansprüche, oder werden für Kühl- oder Heizzwecke genutzt. Nur wenige natürliche Seen sind nicht reguliert, besitzen also keine Wehranlagen und können nicht gezielt gestaut oder abgesenkt werden. Dazu zählen der Bodensee, als einziges nicht reguliertes Grenzgewässer,

der Walensee, der Sarnersee, der Greifensee und der Baldeggersee. Für den Sarnersee ist eine Regulierung in Planung (Kanton Obwalden, 2016). Die Pegelstände von natürlichen regulierten und unregulierten Seen schwanken saisonal (Abbildung 4). Die Pegel sinken im Winter und steigen im Frühling und Sommer aufgrund der Schneeschmelze.

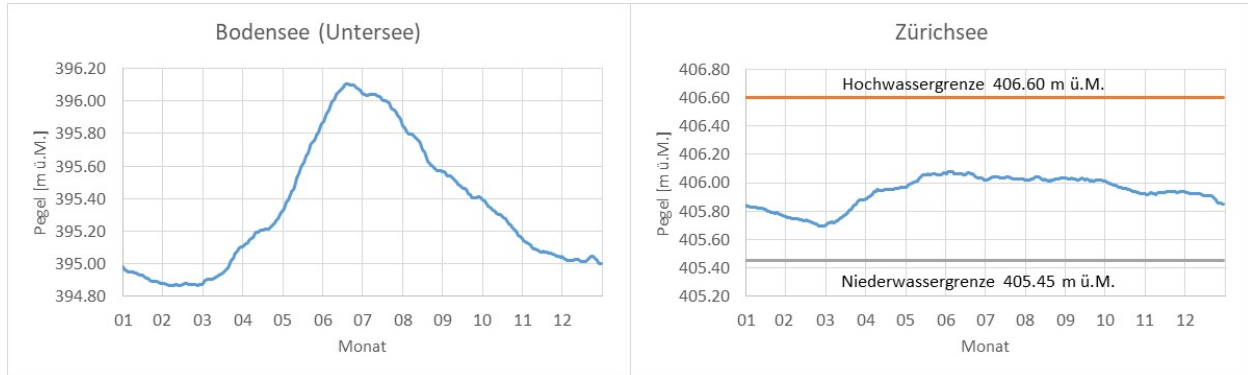


Abbildung 4: Mittlere Pegelganglinie (Periode 1981-2010) vom unregulierten Bodensee (Untersee) und dem regulierten Zürichsee (Hoch- und Niederwassergrenze gemäss Faktenblatt BAFU Regulierung Zürichsee (Federal Office for the Environment FOEN, 2014a).

Beim unregulierten Bodensee steigt der Pegel im Sommer auf ein Maximum und nimmt danach kontinuierlich ab. Im Gegensatz dazu wird beim regulierten Zürichsee durch die Wehranlage der Pegelstand so geregelt, dass die unterschiedlichen Bedürfnisse von See- und Limmatanliegern, sowie weiteren Akteuren (Fischerei, Schifffahrt, Naturschutz, Energiegewinnung etc.) vereinbart werden können. Der Pegel des Zürichsees schwankt aufgrund der Regulierung im Mittel nur um knapp 0.4 m, während der Pegel des Bodensees eine mittlere Schwankung von rund 1.25 m aufweist.

Für beide Kategorien, die natürlich regulierten und nicht regulierten Seen, wurden sowohl die Speicherkapazität als auch das Nutzvolumen abgeschätzt. Für natürliche Seen grösser als 0.5 Mio m<sup>3</sup> Seehalt wurden die abgeschätzten Speicherkapazitäten vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) zur Verfügung gestellt. Zur Bestimmung der Speicherkapazitäten der kleineren natürlichen Seen wurde über das digitale Höhenlinienmodell der Schweiz (Federal Office of Topography swisstopo, 2018) die mittlere Seetiefe bestimmt und mit der Seeoberfläche multipliziert.

Neben den Speicherkapazitäten wurden auch die Nutzvolumen berechnet. Nicht für alle natürlichen Seen waren dazu die gleichen Datengrundlagen vorhanden, weshalb für die Bestimmung der Nutzvolumen nach einem Regelschema vorgegangen wurde (Abbildung 5).

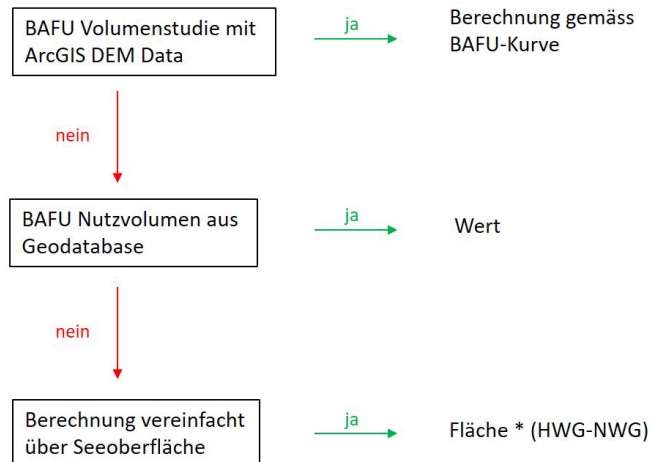


Abbildung 5: Vorgehen zur Bestimmung der Nutzvolumen von natürlichen Seen in der Schweiz.

Waren für die natürlichen Seen Wehrreregimente vorhanden, wurde das Nutzvolumen über die minimalen, respektive maximalen erlaubten Pegelstände in Kombination mit den vorhandenen Volumenpegelkurven des BAFU berechnet. Gab es keine Wehrreregimente, wurde das Nutzvolumen über einen Datensatz mit berechneten Nutzvolumen des BAFU ermittelt. Hatten die beiden vorher erwähnten Methoden keinen Erfolg, wurde das Nutzvolumen über die maximalen Pegeldifferenzen in Kombination mit der Seeoberfläche berechnet. Für die vereinfachte Berechnung des Nutzvolumens über die Seeoberfläche mussten der maximale Wasserspiegel (Hochwassergrenze = HWG) und der minimale Wasserspiegel (Niedrigwassergrenze = NWG) bestimmt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlage wurde erneut ein Vorgehen nach Flussdiagramm gewählt (sh. Anhang Abbildung 31). Für die Bestimmung der Hochwassergrenze wurde zuerst versucht, diese über die Pegelstände bei der entsprechenden Gefahrenstufe zu ermitteln. Falls keine vorhanden waren, wurden kantonale Regelungen oder Konzessionen nach Hochwassergrenzen gesichtet. War auch damit kein Wert zu ermitteln, wurden die historischen Seestandsdaten (Federal Office for the Environment FOEN, 2018b) herangezogen und deren 99%-Quantile verwendet. Für die Niedrigwassergrenze wurde ab der zweiten Stufe gleich wie bei der Hochwassergrenze vorgegangen. Die ermittelten Nutzvolumen der nicht regulierten natürlichen Seen sind mit Vorsicht zu betrachten. Es handelt sich dabei um maximale Nutzvolumenabschätzungen, welche aufgrund fehlender Wehre nicht aktiv eingestaut werden können, wie beispielsweise beim regulierten Zürichsee. Somit ist das zur Verfügung stehende Nutzvolumen von nicht regulierten Seen allein vom natürlichen Zu- und Abfluss abhängig und nur selten so hoch wie theoretisch möglich. Wie das Nutzvolumen für die einzelnen Seen bestimmt wurde, ist im Anhang in Tabelle 4 ersichtlich.

### 3.3.2 Künstliche Reservoirs

Zu den künstlichen Reservoirs gehören alle Seen, welche erst durch den Bau einer Talsperre, sei es eine Staumauer oder ein Damm, eingestaut wurden. Diese Kategorie besteht hauptsächlich aus alpinen Speicherseen, welche v.a. für die Wasserkraftproduktion vorgesehen sind. Die Speicherkapazitäten für die Stauseen wurden vom Bundesamt für Energie (BFE) (Panduri & Hertach, 2013) zur Verfügung gestellt. Als weitere Kategorie künstlicher Reservoirs wurden Beschneidungsteiche betrachtet.

### 3.3.3 Trinkwasserspeicher

Trinkwasserspeicher sind ebenfalls künstliche Reservoirs, die sich durch ihre grosse Anzahl und die kleinen Speicherkapazitäten der einzelnen Speicher auszeichnen. Die Trinkwasserspeicher sind für eine Mehrtag- bis hin zu einer Wochennachfrage ausgelegt. Bereits heute sind Trinkwasserspeicher meistens einer Mehrfachnutzung zugeordnet: Einerseits für die Speicherung und Abgabe von Trinkwasser ins Wasserversorgungsnetz, andererseits für den Rückhalt eines definierten Wasservolumens als Löschwasserreserve, welches im Brandfall von der Feuerwehr bezogen werden kann.

### 3.3.4 Grundwasser

Da Grundwasser ein grosser und wichtiger Wasserspeicher ist, wurde dieser als Vergleichsgrösse zu anderen Speichern herangezogen. Ein Teil der Nachfrage, insbesondere nach Trinkwasser, wird heute direkt über den Grundwasserspeicher gedeckt. Deshalb wurde bei der Berechnung des Wasserdargebots der Beitrag des Grundwassers zum Abfluss berücksichtigt. Die Grenze zwischen Oberflächen- und Grundwasser lässt sich nicht immer scharf ziehen. Ein Beispiel für die Komplexität des Themas Grundwasser ist die Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen nahe der Rhône, wo einige Meter neben dem Flussbett Wasser gepumpt wird, welches vom Fluss infiltriert. Am Bundesamt für Umwelt, BAFU sind mehrere Projekte in Bearbeitung, welche das Grundwasservolumen quantifizieren und beschreiben.

Das schweizerische Gesamtvolumen für das Grundwasser beträgt 150 000 Mio m<sup>3</sup> (Sinreich et al., 2012). Weil nicht das gesamte Volumen rechtlich, technisch und wirtschaftlich nutzbar ist oder die notwendige Wasserqualität besitzt, wird hier kein direkter Vergleich mit dem nutzbaren Volumen in den natürlichen Seen und den Stauseen angestellt.

### 3.3.5 Zukünftige Speichermöglichkeiten

Neben den bestehenden Speichermöglichkeiten wurden zum Vergleich zwei Arten von zukünftigen Speichermöglichkeiten betrachtet: mögliche Sperrenerhöhungen und neue Gletscherseen. Eine Gruppe von Studierenden um David Felix (VAW ETH Zürich) hat für die 38 grössten Schweizer Wasserkraftwerke die Möglichkeit einer Dammerhöhung um 5 bis 20% untersucht. Dabei wurden technische, ökologische, ökonomische und soziale Aspekte betrachtet. Für die vorliegende Studie wurden lediglich jene Erhöhungen berücksichtigt, die als vielversprechend eingestuft wurden, und die entsprechenden Volumengewinne den heutigen Speichervolumen gegenübergestellt. Volumen von möglichen neuen Gletscherseen wurden der Studie von Farinotti et al. (2016) entnommen. Dabei handelt es sich um Reservoirs, welche in Gebieten gebaut werden könnten, wo sich durch den Gletscherrückzug natürliche Seen bilden. Diese natürlichen Seen könnten durch neue Talsperren in künstliche Reservoirs umgewandelt werden. Bei der Analyse der Gletscherseen handelt es sich um ein Gedankenexperiment, welches keine ökologischen, wirtschaftlichen oder sozialen Aspekte berücksichtigt. Die Volumen der zukünftigen Speichermöglichkeiten werden deshalb auch nur als Vergleichsgrössen hinzugezogen, bei der Berechnung des Potenzials von Speichern zur Verminderung von Wasserknappheit aber nicht betrachtet.

**Mehrwecknutzung von Schweizer Seen: Kein neues Thema**

Der Sihlsee wird bereits heute als Mehrzweckspeicher genutzt. In erster Linie wird er für die Produktion von Wasserkraft verwendet. Gleichzeitig dient er als Pumpspeicher der Speicherung von überschüssigem Strom, indem er Wasser aus dem Zürichsee in den Sihlsee befördert. Neben der energetischen Nutzung wird er weiteren Ansprüchen gerecht. So darf im Sommer der Seespiegel nicht zu tief abgesenkt werden, um die Erhaltung des touristischen Nutzens zu gewährleisten, aber auch um Mückenplagen zu verhindern (Mückengrenze). Nicht zuletzt dient der Sihlsee auch dem Hochwasserschutz im Sihltal.

Ein weiteres prominentes Beispiel für Mehrwecknutzung ist der Mattmark Stausee im Kanton Wallis. Der Seestand wird unter den zwei Aspekten Energiegewinnung durch Wasserkraft und dem Hochwasserschutz für die Unterlieger bewirtschaftet.

**3.4 Nachfrage**

Die Wassernachfrage wurde für folgende Kategorien abgeschätzt: Trinkwasser (Haushalte und Tourismus), Industrie (zweiter und dritter Sektor), künstliche Schneeproduktion, Landwirtschaft (Bewässerung und Grossvieh), ökologische Rest- und Mindestwassermengen und Wasserkraftproduktion. Die gesamte Wassernachfrage in einem Gebiet wurde berechnet, indem die Nachfrageschätzungen der einzelnen Nutzungskategorien aufsummiert wurden. Lokal sind alle diese Nutzungen verbrauchend, d.h. das Wasser steht lokal nach der Nutzung nicht mehr für andere Nutzungen zur Verfügung. In einer ganzheitlichen Betrachtung, kann das Wasser nach gewissen Nutzungen, wie z.B. Wasserkraftproduktion, aber am Gewässerunterlauf abermals genutzt werden. Wassertransfers zwischen den hier untersuchten Gebieten wurden in dieser Studie nicht genauer betrachtet. Gemäss einer Studie über die Grundlagen für die Wasserversorgung 2025 (Federal Office for the Environment FOEN, 2014b) wird in den meisten Kantonen ein Grossteil des Wassers für die Wassernutzung direkt aus dem Grundwasser bezogen. Einzig in den Kantonen Zürich, Thurgau und Genf werden über 40% des genutzten Wassers aus Seen bezogen. Die Landwirtschaft entnimmt das Bewässerungswasser in den meisten Gebieten aus Oberflächengewässern (>90%) (Weber & Schild, 2007). Es wurde in dieser Studie jedoch nicht unterschieden zwischen Nachfrage, welche über das Grundwasser und über Oberflächenwasser gedeckt wird, da der Grundwasserbeitrag zum Abfluss beim Dargebot berücksichtigt wurde.

Viele Nutzungen basieren auf alten Wasserrechten und Konzessionen. Die tatsächlich verbrauchte Wassermenge ist oft nicht bekannt (z.B. Wiesenbewässerung). Selbst wenn der Verbrauch gemessen wird, sind die Zahlen oft nicht öffentlich zugänglich. Daher wurde hier die Wassernachfrage für verschiedene Kategorien abgeschätzt.

**3.4.1 Trinkwasser**

Für die Trinkwassernachfrage wurden sowohl Haushalte wie auch der Tourismussektor berücksichtigt. Für Haushalte wurde die Trinkwassernachfrage abgeschätzt, indem der Wasserverbrauch von 142 l pro Person und Tag (Freiburghaus, 2015) mit der Anzahl Bewohner pro Gebiet (Swiss Federal Statistical Office FSO, 2017) multipliziert wurde (Loukas et al., 2007). Dabei wurde ein konstanter Trinkwasserverbrauch über das Jahr angenommen.

Die Trinkwassernachfrage im Tourismussektor wurde in ähnlicher Weise abgeschätzt, indem der Wasserverbrauch pro Person mit der Anzahl Logiernächte (Swiss Federal Statistical Office FSO, 2015) in einem

Gebiet multipliziert wurde. Die geschätzte Trinkwassernachfrage für den Tourismussektor wurde auf diejenigen Monate verteilt, welche für die Tourismusbranche am relevantesten sind (Wintersaison: Dezember-Februar und Sommersaison: Juni-September).

### 3.4.2 Industrie- und Dienstleistungssektor

Die Wassernachfrage für den Industrie- und Dienstleistungssektor wurde abgeschätzt, indem der Wasserverbrauch pro Mitarbeiter mit der Anzahl Mitarbeiter pro Gebiet (Swiss Federal Statistical Office, 2018) multipliziert wurde. Die Wassernachfrage für Industrie und Dienstleistungen wurde über das Jahr als konstant angenommen. Bei Industriestandorten mit hohem Automatisierungsgrad kann der Wasserverbrauch deutlich über dem Durchschnitt liegen, was hier aber nicht berücksichtigt wurde. Beim zweiten und dritten Sektor wurden zwei verschiedene Wasserverbrauchsraten unterschieden: 148 m<sup>3</sup> pro Mitarbeiter/in und Jahr für den zweiten Sektor und 85 m<sup>3</sup> pro Mitarbeiter/in und Jahr im dritten Sektor (Freiburghaus, 2009).

### 3.4.3 Künstliche Schneeproduktion

Die Wassernachfrage für die Produktion von künstlichem Schnee wurde durch die Multiplikation der Pistenfläche mit dem Wasserverbrauch pro Fläche ermittelt. Die künstlich beschneiten Pistenflächen wurden aus der Anzahl Pistenkilometern, welche von MySwitzerland (2018) gesammelt und von den Skidestinationen zur Verfügung gestellt wurden, und einer mittleren Pistenbreite von 30 m (Iseli, 2015) berechnet. Die Wassernachfrage für die Beschneigung ergab sich aus der Multiplikation der berechneten Pistenflächen mit dem mittleren Wasserverbrauch pro ha von 1200 m<sup>3</sup> (Teich et al., 2007). Die Nachfrage wurde auf die Monate Dezember (zwei Drittel), Januar und Februar verteilt (je ein Sechstel).

### 3.4.4 Landwirtschaft

Die Wassernachfrage der Landwirtschaft setzt sich zusammen aus der *Bewässerung* und der *Versorgung von Grossvieh*. Letzteres berechnet sich aus dem Wasserverbrauch von 110 l pro Grossvieheinheit und Tag (Freiburghaus, 2009) und der Anzahl Grossvieheinheiten pro Gebiet (Swiss Federal Statistical Office, 2018). Es wurde eine über das Jahr konstante Wassernachfrage angenommen.

Die Nachfrage für *Bewässerung* ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Pflanzenwasserbedarf und dem effektiven Niederschlag (Allen et al., 1998) und kann somit aus den Zeitreihen berechnet werden, welche mit dem hydrologischen Modell simuliert wurden (Abschnitt 3.2). Der Pflanzenwasserbedarf wurde als die potenzielle Verdunstung definiert, welche aus der Penman-Monteith Gleichung abgeleitet wird (Allen et al., 1998). Die Verdunstung hängt neben den meteorologischen Bedingungen auch von der Landnutzungs-kategorie ab. So weisen alpine Weiden bei trockenen Bedingungen kleinere Verdunstungswerte auf als Ackerflächen, was einen Teil der räumlichen Variabilität in der Nachfrage nach Bewässerung erklärt (z.B. Unterschied zwischen alpinen Gebieten und Mittelland). Der effektive Niederschlag beschreibt jenen Teil des Niederschlages, der zur Deckung des Pflanzenwasserbedarfs beiträgt (Patwardhan et al., 1990). Er wurde mittels des *current precipitation index*, der die Vorfeuchtebedingungen beschreibt, berechnet (Smakhtin & Masse, 2000). Diese Schätzmethode führt zu Nachfrageabschätzungen, welche leicht höher liegen als jene in Weber & Schild (2007) und jene in Fuhrer (2010). Die Bewässerungsnachfrage variiert mit der Saison in Abhängigkeit der Verdunstung und des Niederschlages. Sie wurde auf die

Monate April bis September beschränkt, da davon ausgegangen wird, dass in der Wintersaison keine Notwendigkeit für eine Bewässerung besteht. Diese Berechnungsmethode geht davon aus, dass all jene Flächen bewässert werden, welche eine positive Nachfrage aufweisen, was in Realität kaum der Fall ist. D.h. die Bewässerungsnachfrage wird hier eher überschätzt und stellt einen oberen Benchmark dar.

### 3.4.5 Ökologie

Die Wassernachfrage der Natur wurde hier stark vereinfacht als die Restwassermenge definiert, welche vom Gesetzgeber in der Schweiz vorgeschrieben wird (Aschwanden & Kan, 1999) und dem 5%-Perzentil des Abflusses ( $Q_{347}$ ) entspricht. Die Nachfrage wurde über das Jahr als konstant angenommen. Wir weisen darauf hin, dass diese Restwassermengen in gewissen Gebieten nicht eingehalten werden, da bei einigen Reservoirs eine Sanierung in Bezug auf Restwassermengen ökonomisch nicht sinnvoll war. Analog zu den Restwassermengen wurde in Gebieten ohne künstliche Reservoirs eine Mindestwassermenge berücksichtigt. Die sehr enge Betrachtung der Restwassermenge/Mindestwassermenge gilt also als sehr rudimentäres Mass für den ökologischen Wasserbedarf, da der Gewässerraum in einem hohen Mass von einer naturnahen Abflussdynamik abhängig ist. Ebenso wurden weitere spezifische ökologische Ansprüche wie der Erhalt von Moorlandschaften oder die Vermeidung von Schwall und Sunk hier ausgeklammert. Der ökologische Bedarf der Seen wurde über die Minimalwasserstände miteinbezogen, welche der Berechnung der Nutzvolumen zugrunde lagen.

### 3.4.6 Wasserkraft

Weil eine Nachfrageabschätzung für Laufwasserkraftwerke schwierig ist, haben wir den Fokus auf die Stromproduktion der Speicherkraftwerke gelegt. Laufwasserkraftwerke können in der Regel nur so viel Wasser turbinieren, wie im natürlichen Gewässer gerade verfügbar ist (Schaepli, 2015). Im Gegensatz dazu, lässt sich Speicherwasserkraft steuern. Der Grossteil des Wassers wird nicht dann turbiniert wenn es natürlich in den Kreislauf kommt, sondern im Sommer gespeichert und erst im Winter turbiniert (Abbildung 6). So werden in der Schweiz während der Schneeschmelze im Frühling und Sommer die künstlichen Reservoirs gefüllt und nur Wasser zur Spitzenstromdeckung, Netzstabilität oder beim Ausfall einer Anlage turbiniert. Der Grossteil des Wassers wird gespeichert, sodass im Herbst das künstliche Reservoir nach Möglichkeit seinen maximalen Betriebswasserspiegel erreicht. Damit kann im Winter der erhöhte Strombedarf aufgrund von zusätzlicher Beleuchtung, dem Beheizen von Gebäuden und die erhöhte Nachfrage der Produktionsbetriebe gedeckt werden (Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE), 2012).

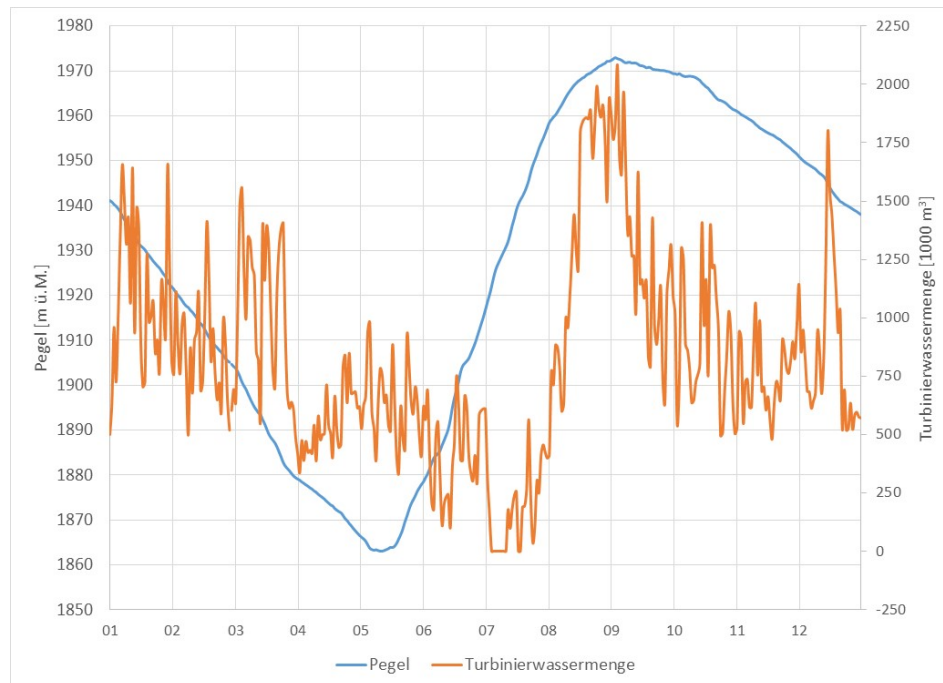


Abbildung 6: Gegenüberstellung von Pegelstand und Turbinierwassermenge für ein spezifisches künstliches Reservoir in den Alpen (2009).

Die Wassernachfrage für die Wasserkraftproduktion wurde für alle Speicherkraftwerke innerhalb eines Gebietes aggregiert abgeschätzt. Die monatliche Wassernachfrage wurde bestimmt, indem die monatliche, prozentuale Speicheränderung mit der Speicherkapazität des Reservoirs multipliziert und der monatliche Reservoirzufluss hinzugefügt wurde. Die monatlichen Speicheränderungen wurden aus den monatlichen Speicherkurven abgeleitet (Abbildung 30), welche vom Bundesamt für Energie für vier grosse Regionen, welche den Kanton Wallis, den Kanton Graubünden, den Kanton Tessin, und alle anderen Regionen umfassen, bereitgestellt werden (Swiss Federal Office of Energy, 2017). Die monatlichen Zuflüsse wurden basierend auf den Abflusssimulationen berechnet, welche mit dem hydrologischen Modell PREVAH generiert wurden (Abschnitt 3.2), indem er proportional zu der Gebietsfläche, welche direkt zum Reservoirzufluss beiträgt, vermindert wurde. Indirekte Einzugsgebiete, die sich aus zusätzlichen Wasserfassungen in den Nachbartälern ergeben, wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Der Reservoirzufluss wurde deshalb tendenziell unterschätzt. Lokal ist das Wasser, welches turbiniert wird, nicht mehr verfügbar für andere Nutzungen, da es vom natürlichen Flussbett weggeleitet wurde. Regional steht es flussabwärts wieder für andere Nutzungen zur Verfügung, da es nach der Turbinierung wieder in ein Gewässer geleitet wird (Johnson, 2009).

#### 3.4.6.1 Validierung Wassernachfrage Wasserkraftproduktion

Für die Validierung der Methodik zur Abschätzung der Wassernachfrage für die Wasserkraftproduktion wurden die künstlichen Reservoirs Klöntaler-, Wägitaler-, Sihlsee, Marmorera, Albigna und Mauvoisin verwendet (Abbildung 7). Für diese Reservoirs wurden die von den Kraftwerkbetreibern zur Verfügung gestellten Messdaten ausgewertet und mit den Nachfrageabschätzungen (Kapitel 3.4.6) verglichen. Bei der Methode 1 wurden die effektiv gemessenen Turbinierwassermengen der Kraftwerkbetreiber verwendet. Da die Abschätzung keine Pumpwassermengen berücksichtigt, wurde in Methode 2 von der gemessenen

Turbinierwassermenge die gemessene Pumpwassermenge abgezogen. Weil der Klöntalersee nicht als Pumpspeicher betrieben wird und nur ein direktes Einzugsgebiet besitzt, wurde für diesen eine zusätzliche Vergleichsrechnung nach dem gleichen Prinzip wie bei der Abschätzung durchgeführt. Jedoch mit dem Unterschied, dass die Volumendifferenzen nicht über die monatlichen Speicherkurven aus den vier Grossregionen berechnet wurden, sondern aus der gemessenen Speicherkurve des Klöntalersees. Viele künstliche Reservoirs besitzen ausserdem indirekte Einzugsgebiete. Aus diesen wird künstlichen Reservoirs via Stollen zusätzliches Wasser aus den Seitentälern zugeführt. Dieser Anteil wird aber nicht immer separat im Zufluss erfasst. Daher wurde die Annahme getroffen, dass der Zufluss pro Flächeneinheit aus dem direkten sowie indirekten Einzugsgebiet gleich gross ist. Bei Methode 4 wurde der Anteil der indirekten Einzugsgebiete vom Wert der Methode 3 abgezogen. Die Methode 4 liefert damit einen bereinigten Wert. Daher sollten die Ergebnisse dieser Methode der Abschätzung am nächsten sein. Dies ist beim künstlichen Reservoir Marmorera gut erkennbar.

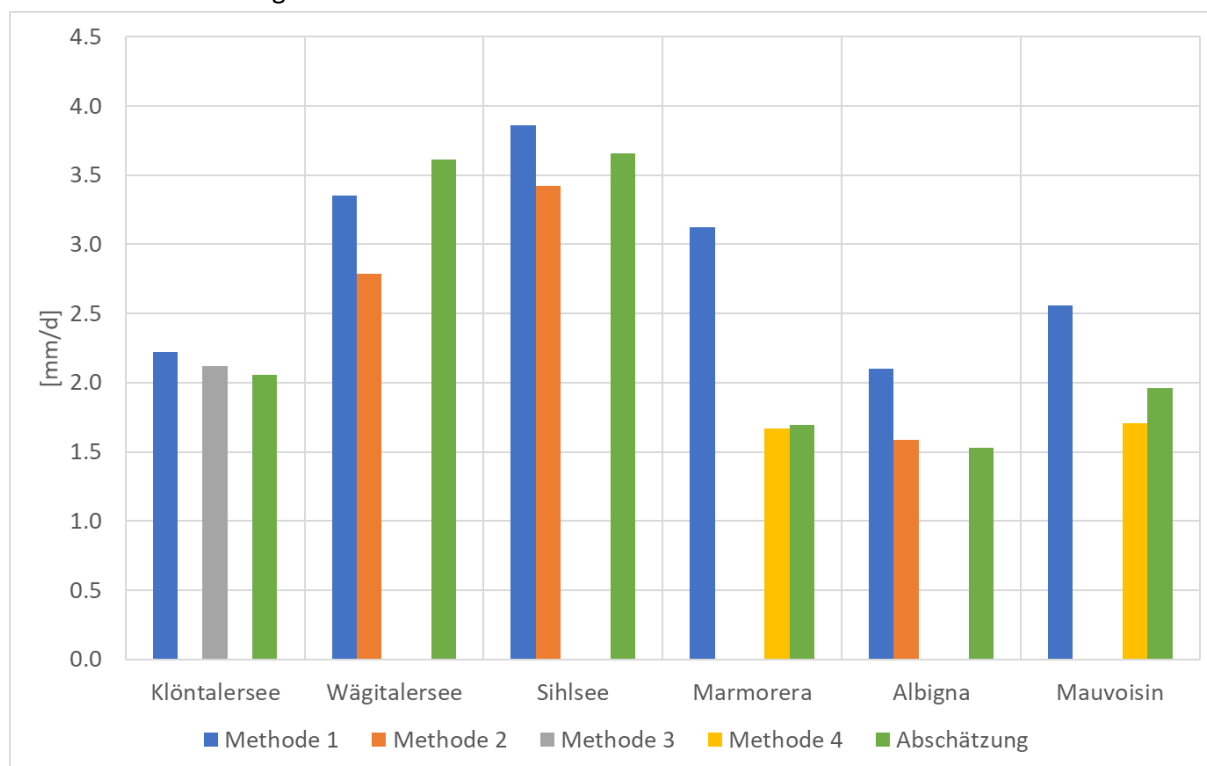


Abbildung 7: Vergleich Messwerte vs. Abschätzung (Kapitel 3.4.6) für die sechs Speicher Klöntalersee, Wägitalersee, Sihlsee, Marmorera, Albigna und Mauvoisin. Die Messwerte wurden für vier verschiedene Methoden quantifiziert: Methode 1 nur Turbinierwassermenge berücksichtigt, Methode 2 Pumpwassermenge von Turbinierwassermenge abgezogen, Methode 3 Turbinierwassermenge über Volumendifferenz im Speicher und natürlichen Zufluss berechnet (Messwerte), Methode 4 Anteil der indirekten Einzugsgebiete abgezogen (Annahme Zufluss aus direktem und indirektem Einzugsgebiet ist gleich pro Flächeneinheit).

Beim Klöntalersee handelt es sich um ein künstliches Reservoir, welches nur über ein direktes Einzugsgebiet verfügt. Der Vergleich zwischen der Abschätzung und den beiden Methoden 1 und 3 zeigt auf, dass die Resultate sehr nahe bei einander liegen. Beim Wägitalersee gibt es neben dem direkten Einzugsgebiet noch ein indirektes Einzugsgebiet, über welches mittels Pumpen Wasser in den Wägitalersee gefördert werden kann. Die Abschätzung überschätzt in diesem Beispiel die Wassernachfrage. Der Sihlsee funktioniert ähnlich wie der Wägitalersee nur mit dem Unterschied, dass durch das Pumpen aus dem Obersee ein viel grösseres indirektes Einzugsgebiet zur Verfügung steht. Auch hier konnte die Abschätzung mittels

zwei unterschiedlicher Methoden bestätigt werden. Im Falle von Marmorera und Mauvoisin handelt es sich beide Male um künstliche Reservoirs, welche beide über gravitative indirekte Einzugsgebiete verfügen. Wenn die indirekten Einzugsgebiete, welche in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden, abgezogen werden, kommt man den Abschätzungen sehr nahe. Das künstliche Reservoir Albigna zeichnet sich durch ein sehr grosses indirektes Einzugsgebiet aus, welches nur über Pumpen erschlossen wird. Unter der Berücksichtigung der Pumpmenge erhält man ebenfalls einen Wert nahe der Abschätzung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Abschätzung bei künstlichen Reservoirs, welche nur über ein direktes Einzugsgebiet verfügen, nahe an der Realität sind. Bei künstlichen Reservoirs mit einem indirekten Einzugsgebiet wird die Wassernachfrage für die Wasserkraftproduktion unterschätzt, weil eben diese indirekten Einzugsgebiete in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden.

### 3.4.7 Saisonale und zukünftige Wassernachfrage

Für das Trinkwasser im Tourismussektor, die Bewässerung und die Wasserkraft wurden die saisonalen Werte explizit berechnet. Für die übrigen Kategorien wurden gemittelte Werte von den jährlichen Werten abgeleitet, da historische Wasserverbrauchswerte oft auf die jährliche Skala beschränkt sind.

Für die Berechnung des zukünftigen Wasserverbrauchs wurden Änderungen in der Bevölkerungsdichte und in den hydrologischen Verhältnissen berücksichtigt. Die Trinkwassernachfrage wurde mit den Bevölkerungsprojektionen des Bundesamtes für Statistik berechnet, welche aufzeigen wie sich die Bevölkerung bis 2045 entwickeln könnte (Swiss Federal Statistical Office FSO, 2016). Um ein maximales Szenario abzubilden, wurde das Szenario mit dem stärksten Bevölkerungsanstieg gewählt. Die Industriewassernachfrage wurde gegenüber heute nicht angepasst, da zur Entwicklung der Industrie keine Zahlen vorliegen.

Für die künstliche Schneeproduktion wurde angenommen, dass Skigebiete unterhalb einer gewissen Höhe in Zukunft verschwinden werden, da sich der Skibetrieb nicht mehr lohnt (Uhlmann et al., 2009). Des Weiteren wurde davon ausgegangen, dass der Wasserverbrauch pro ha beschneite Piste auf 1500 l zunimmt (obere Limite, welche in Teich et al. (2007) angegeben wird). Dies beruht auf der Annahme, dass die erhöhte Beschneiungsnachfrage nicht durch verbesserte Technologien kompensiert werden kann. Die kritische Höhe für eine Beschneiung wurde auf 2000 m ü. M. festgelegt.

Die Wassernachfrage für die Haltung von Grossvieh wurde im Vergleich zu heute konstant gehalten. Die Wassernachfrage für die Bewässerung wurde in Abhängigkeit der sich verändernden Verdunstungsverhältnisse berechnet.

Die zukünftige Wasserkraftproduktion wurde mit Zuflüssen berechnet, welche die zukünftigen Klimabedingungen widerspiegeln. Veränderungen im saisonalen Produktionsmuster wurden hingegen nicht berücksichtigt, da die Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Strompreise und anderer Faktoren sehr gross sind (Gaudard et al., 2014; Ranzani et al., 2018). Ausserdem wurde nicht berücksichtigt, dass die Energiestrategie 2050 zum Ziel hat, den Anteil der Wasserkraft an der Stromproduktion zu vergrössern (UVEK, 2014)

## 3.5 Wasserknappheit/-überschuss

Die Wasserknappheit, respektive der Wasserüberschuss, wurde aus dem natürlichen Wasserdargebot (Abschnitt 3.2) und der geschätzten Wassernachfrage (Abschnitt 3.4) sowohl auf einer jährlichen wie monatlichen Skala für heutige wie zukünftige Bedingungen berechnet. Beim Dargebot handelt es sich um den

lokal in einem Gebiet generierten Abfluss. Zuflüsse aus anderen Gebieten werden nicht berücksichtigt. Lokale Wasserknappheit entsteht, wenn lokal nicht genügend Abfluss generiert werden kann, um die anfallende Nachfrage zu decken. Hohe Wassertemperaturen oder eine mangelnde Wasserqualität können ebenfalls zu Wasserknappheit führen oder diese zusätzlich verschärfen. Auch diese Aspekte wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Der Aspekt Wassertemperatur wird aber in einer anderen Teilstudie des Hydro-CH2018 Projektes durch die EPFL und die Eawag untersucht.

Die normale monatliche Wasserknappheit wurde mit den mittleren Abflussbedingungen berechnet. Im Gegensatz dazu wurde extreme monatliche Wasserknappheit mit den extremen Hydrographen berechnet (Abschnitt 3.2). Der Fokus dieser Studie lag auf der Sommertrockenheit, weshalb wir zusätzlich zu dieser monatlichen Betrachtung eine Extremwertstatistische Analyse auf der Sommertrockenheit durchgeführt haben. Dazu wurden in einem ersten Schritt für jedes Jahr in der analysierten Zeitperiode die Wasserknappheits-, respektive Überschusswerte der **Sommermonate Juni bis September** aggregiert. Diese Werte wurden dann in einer univariaten Häufigkeitsanalyse genutzt, um extreme Sommerwasserknappheit mit einer vorgegebenen Jährlichkeit abzuschätzen. Für die zukünftigen Bedingungen wurden die Wasserknappheitswerte aller 39 Klimamodellketten kombiniert. Für die Häufigkeitsanalyse verwendeten wir eine generalisierte Extremwertverteilung (GEV), welche gemäss des *Anderson-Darling-Tests* (Chen & Balakrishnan, 1995) nicht ungeeignet (engl. «non-rejected») war, um die rechtsschiefe Verteilung der Wasserknappheitswerte abzubilden. Die Verteilung wurde verwendet, um Wasserknappheits-/überschussereignisse mit Jährlichkeiten von 10 und 100 Jahren abzuschätzen, welche für Planungsprozesse oft von Interesse sind. Diese Schätzwerte dienten anschliessend zur Bestimmung des Potenzials von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit.

### 3.6 Potenzial von Speichern zur Verminderung von lokaler Wasserknappheit

Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Wasserknappheit wurde als das Verhältnis zwischen dem Volumen von Wasserspeichern und der geschätzten **absoluten Sommerwasserknappheit** (nicht Überschuss) berechnet. Das Potenzial wurde sowohl für normale wie auch extreme heutige und zukünftige Bedingungen abgeschätzt, indem die absoluten Schätzwerte für Sommerwasserknappheit, welche normale und extreme Bedingungen repräsentieren (Abschnitt 3.5) verwendet wurden. Werte von 1 oder grösser bedeuten, dass das Speichervolumen ausreicht oder sogar grösser ist als die lokale Wasserknappheit, und dass das Speichervolumen allenfalls auch in unterliegenden Gebieten zur Verminderung von Wasserknappheit verwendet werden kann. Werte kleiner als 1 bedeuten, dass nur ein Teil der Wasserknappheit über das Volumen in lokalen Wasserspeichern gedeckt werden kann. Falls in einem Gebiet keine Wasserknappheit auftritt, kann auch kein Wert berechnet werden (kein Potenzial). Für die Potenzialberechnungen wurden zwei unterschiedliche (extreme) Annahmen getroffen: a) die **gesamte Kapazität der Speicher** kann zur Deckung der Wasserknappheit verwendet werden, und b) nur das reglementarisch festgelegte, **nutzbare Volumen der Speicher** steht zur Verfügung.

### 3.7 Potenzial von Speichern zur Verminderung von Wasserknappheit in unterliegenden Gebieten

Reservoirs mit Speicherkapazitäten oder nutzbaren Volumen, die grösser als die Wasserknappheit sind, können ein Potenzial zur Verminderung von Wasserknappheit in unterliegenden Gebieten aufweisen. Um die natürliche Reichweite eines Wasserspeichers abzuschätzen, haben wir den Anteil des Speicherausflusses am Abfluss unterliegender Flüsse untersucht. Exemplarisch wurden dafür drei Untersuchungsgebiete mit grossen Wasserkraftreservoirs analysiert (für Karten sh. Abbildung 26 im Resultateteil): 1) *Wallis* mit den Speichern Mattmark, Grande Dixence, Mauvoisin und den hydrologischen Messstationen Drance-Martigny, Rhône-Sion, Rhône Porte du Scex, 2) *Surses* mit dem Marmorera Stausee und den Messstationen Hinterrhein-Fürstenaun und Rhein Domat-Ems und 3) Zürichsee mit den Wasserspeichern Zürichsee, Sihlsee, Wägitalersee, Klöntalersee, Muttsee, Limmerensee und der Messstation Unterhard-Zürich.

Für die Untersuchungsgebiete Wallis und Surdes wurde angenommen, dass ein bestimmter Speicher innerhalb eines Monates, innerhalb zweier Monate oder innerhalb dreier Monate geleert wird und berechnet, wie gross das daraus generierte Wasserdargebot relativ zum Abfluss einer Referenzstation am Unterlauf ist. Das Volumen eines Speichers wurde über einen Monat, respektive zwei oder drei Monate, konstant ins Fliessgewässer abgegeben ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Der daraus resultierende Abfluss wurde mit dem Abfluss an verschiedenen Messstationen am Gewässerunterlauf verglichen. Der Vergleich fand jeweils pro Monat statt, da das Reservoir je nach Nachfrage in einem beliebigen Monat geleert werden könnte. In der Realität könnte der Speicher nur einmal geleert werden. Als Referenzabfluss wurden pro Messstation zwei Ganglinien betrachtet: 1) die mittlere Ganglinie über die Beobachtungsperiode, und 2) die Ganglinie zusammengesetzt aus den Monatsminima in der Beobachtungsperiode. Ganglinie 1 repräsentiert normale Abflussbedingungen, während Ganglinie 2 extreme Abflussbedingungen beschreibt.

Beim Untersuchungsgebiet Zürichsee wurde nicht die Wirkung von einzelnen Wasserspeichern betrachtet, sondern die Wirkung von allen Wasserspeichern zusammen. Weiter wurde neben dem Effekt der Entleerung des gesamten Nutzvolumens, auch der Effekt der Entleerung eines Teilvolumens untersucht (25

%, 50 % und 75 % des Nutzvolumens). Ausserdem wurde für die Repräsentation der extremen Ganglinie das Referenzjahr 2003 verwendet und nicht die Monatsminima aus der Beobachtungsperiode wie in den Beispielen Wallis und Surses.

Am Untersuchungsgebiet Zürichsee wurde die Wirkung von Pumpspeicherkraftwerken genauer betrachtet. Dabei handelt es sich um die Speicher Muttsee mit dem Limmerensee und um den Sihlsee mit dem Obersee des Zürichsees.

## 4 Resultate

### 4.1 Dargebot

Das mittlere natürliche Wasserdargebot hängt stark von der Topographie ab (Abbildung 8), mit hohen Abflüssen in den alpinen Gebieten und der Südschweiz aber eher niedrigen Abflüssen im Mittelland. Dieses räumliche Muster verändert sich auch in Zukunft im Vergleich zu heute kaum. Je nach Modellkette der Klimaszenarien, kann es sich in Zukunft aber akzentuieren oder abschwächen. Die Variabilität des mittleren Wasserdargebots schwankt über die verschiedenen Modellketten relativ stark. So ist die Unsicherheit bezüglich des zukünftigen Wasserdargebots z.B. im Tessin oder dem Seeland grösser als in anderen Gebieten. Mehr als das räumliche Muster, verändert sich aber die Saisonalität des Abflusses.

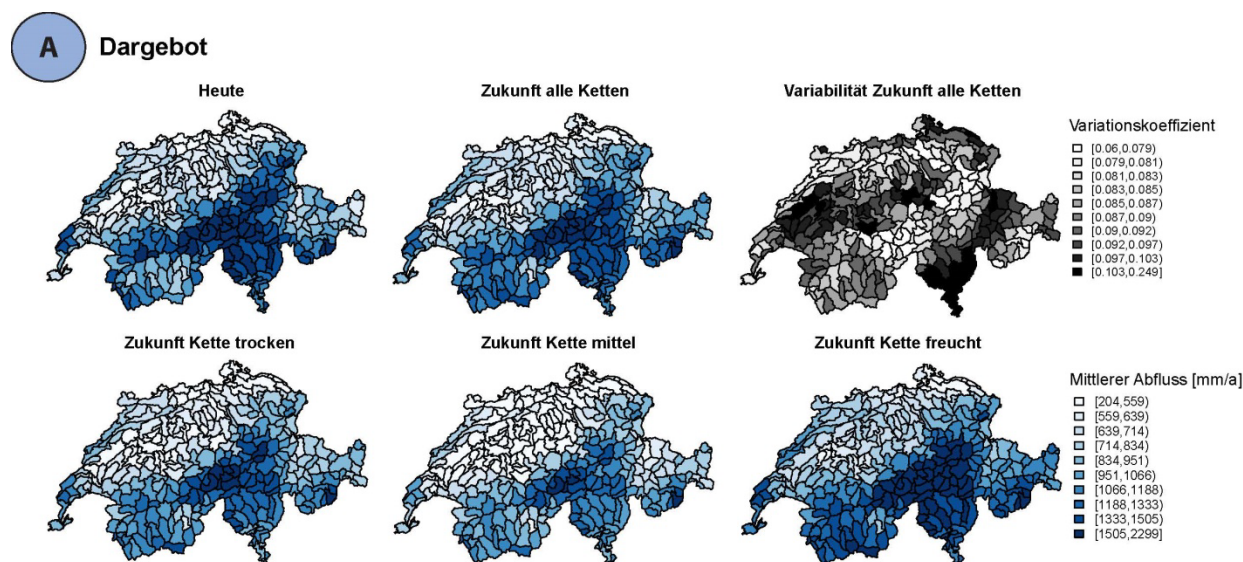


Abbildung 8: Mittlerer Jahresabfluss für heutige (Karte oben links) und zukünftige Bedingungen. Die zukünftigen Bedingungen werden als Mittel über alle 39 Klimaketten dargestellt (mittlere Karte oben) und für die drei Beispielsketten trocken, mittel und feucht (Karten unten). Die Karte oben rechts zeigt den Variationskoeffizienten (Standardabweichung/Mittelwert) des Jahresabflusses über die 39 Klimaketten.

In Abhängigkeit der geografischen Lage werden Abflussregime hauptsächlich von Schmelzprozessen oder durch Niederschlag beeinflusst (Abbildung 9). Regime in alpinen Gebieten (z.B. Bagnes und Surses) werden vorwiegend von der Gletscher- und Schneeschmelze geprägt und weisen daher hohe Abflüsse im Sommer und niedrige Abflüsse im Winter auf. Im Gegensatz dazu sind die Regime im Mittelland (z.B. Zürich und Thur) durch den Einfluss des Niederschlags bestimmt, was zu tiefen Abflüssen im Sommer und

hohen Abflüssen im Winter führt. Die Modellsimulationen zeigen, wie sich die hydrologischen Regime beider Typen in Zukunft verändern. In alpinen Gebieten wird sich die Abflussspitze von den späteren Sommermonaten in die frühen Sommermonate verlagern und der Abfluss im Winter eher etwas zunehmen. In den Mittellandgebieten wird der Abfluss in der Niedrigwassersaison Sommer weiter abnehmen, im Winterhalbjahr aber auch eher zunehmen. Diese Veränderungen wirken sich direkt auf die erwartete zukünftige Wasserknappheit aus.

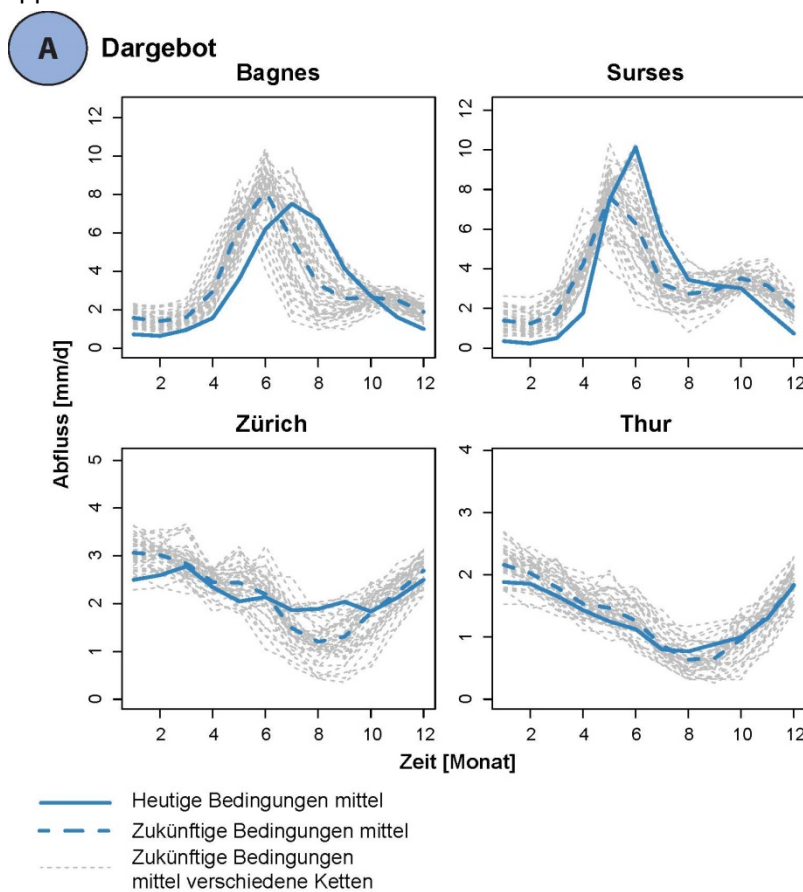


Abbildung 9: Abflussregime für die vier Fallregionen Bagnes, Surses, Zürich und Thur für heutige (durchgezogene, blaue Linie) und zukünftige (gestrichelte, blaue Linie) Klimabedingungen. Die Unsicherheit der zukünftigen Bedingungen wird über die mittleren Ganglinien der 39 Klimaszenario-Modellketten abgebildet (graue Linien). Die Einheit mm/d gibt an wie viel Wasser pro Tag und Fläche zum Abfluss kommt. Sie kann unter Verwendung der Gebietsgrösse in  $\text{m}^3/\text{s}$  umgerechnet werden.

## 4.2 Speicher

Beim Vergleich der einzelnen Speicherkategorien fällt auf, dass sich die Speicherkapazität des Grundwassers sowie der Seen mit 150'000, respektive 130'000 Mio  $\text{m}^3$ , schweizweit in derselben Grössenordnung bewegen (Abbildung 10). Alle anderen Speicherkategorien weisen deutlich kleinere Volumen auf. Stauseen haben eine Speicherkapazität von 3'500 Mio  $\text{m}^3$ . Trinkwasserreservoirs und Beschneigungsteiche weisen mit 4.5, respektive 4 Mio  $\text{m}^3$ , mit Abstand die kleinsten Speichervolumen auf und sind aufgrund ihrer Grösse für viele Nutzungen vernachlässigbar. Betrachtet man anstatt der Speicherkapazitäten die Nutzvolumen sieht das Bild anders aus. In natürlich regulierten Seen sind lediglich 3.5 % (gemittelt Verhältnis der einzelnen Seen), respektive 1.5 % (Total Nutzvolumen geteilt durch das Total Speicherkapazität) des

gesamten Volumens nutzbar, was ca. 2'000 Mio m<sup>3</sup> entspricht. Dieses Volumen ist kleiner als das Speichervolumen aller Schweizer Stauseen. Im Vergleich dazu sind die möglichen zusätzlichen Speichervolumen mittels Dammerhöhung oder neuen Gletscherseen relativ gross: 500 Mio m<sup>3</sup> für potenzielle Dammerhöhungen (gemäss Studie VAW ETH Zürich) und 4'000 Mio m<sup>3</sup> für potenzielle neue Gletscherseen (Farinotti et al. 2016).

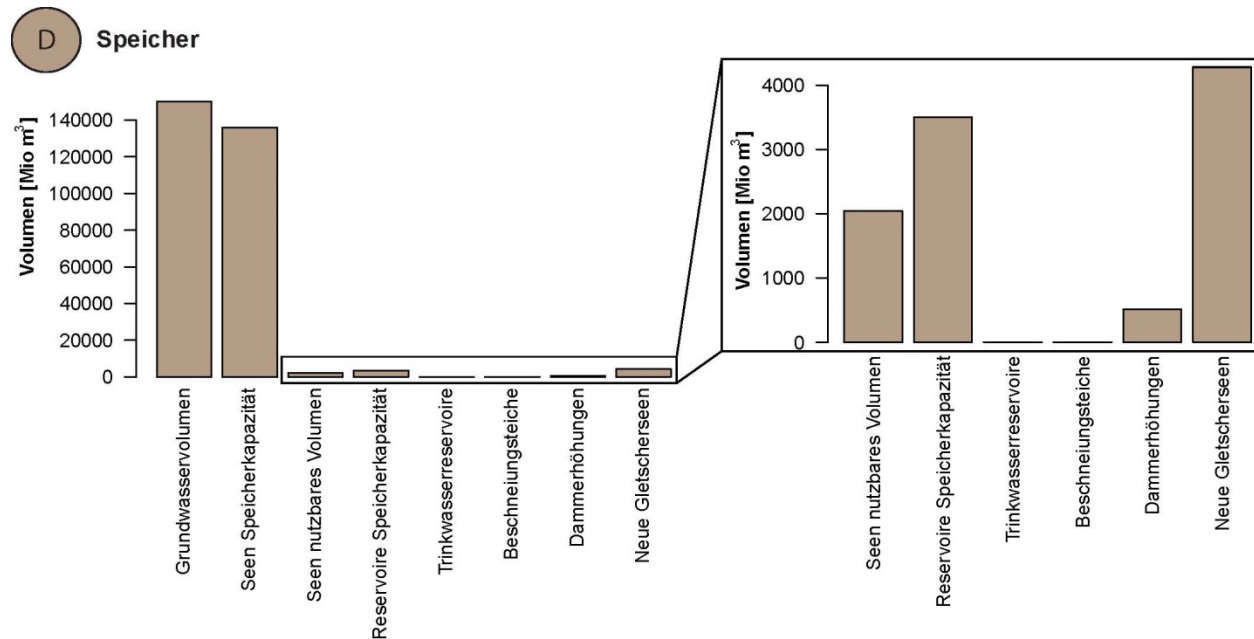


Abbildung 10: Gesamtvolumen der verschiedenen Wasserspeicher über die ganze Schweiz.

Einschränkend gilt zu erwähnen, dass die einzelnen Speicherkategorien nicht homogen über die gesamte Schweiz verteilt sind (Abbildung 11) und kleine Gewässer gerade für den Nutzungsanspruch der Ökologie besonders wertvoll sind, auch wenn ihre Speicherkapazität vergleichsweise gering ist.

Die grössten absoluten Nutzvolumen sind grundsätzlich auch bei den Seen mit den grössten Speicherkapazitäten zu finden. Diese liegen vorwiegend im Mittelland und in den Voralpen. Der grössere Anteil der Speicherkapazität der Reservoirs ist im Gebiet der Alpen zu finden, ein kleiner Anteil befindet sich jedoch auch im Mittelland und Jura. Bei den Trinkwasserreservoirs sind die grösseren Volumina in der Nähe von dicht besiedelten Gebieten, sprich Städten und deren Agglomerationen, zu finden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese Volumina basierend auf der Bevölkerungsdichte berechnet wurden. Die Beschneungsteiche weisen im direkten Vergleich nur kleine Volumina auf. Zusätzliche Volumina durch Dammerhöhungen sind grundsätzlich in den Alpen zu erwarten, da dort die meisten Stauseen liegen.

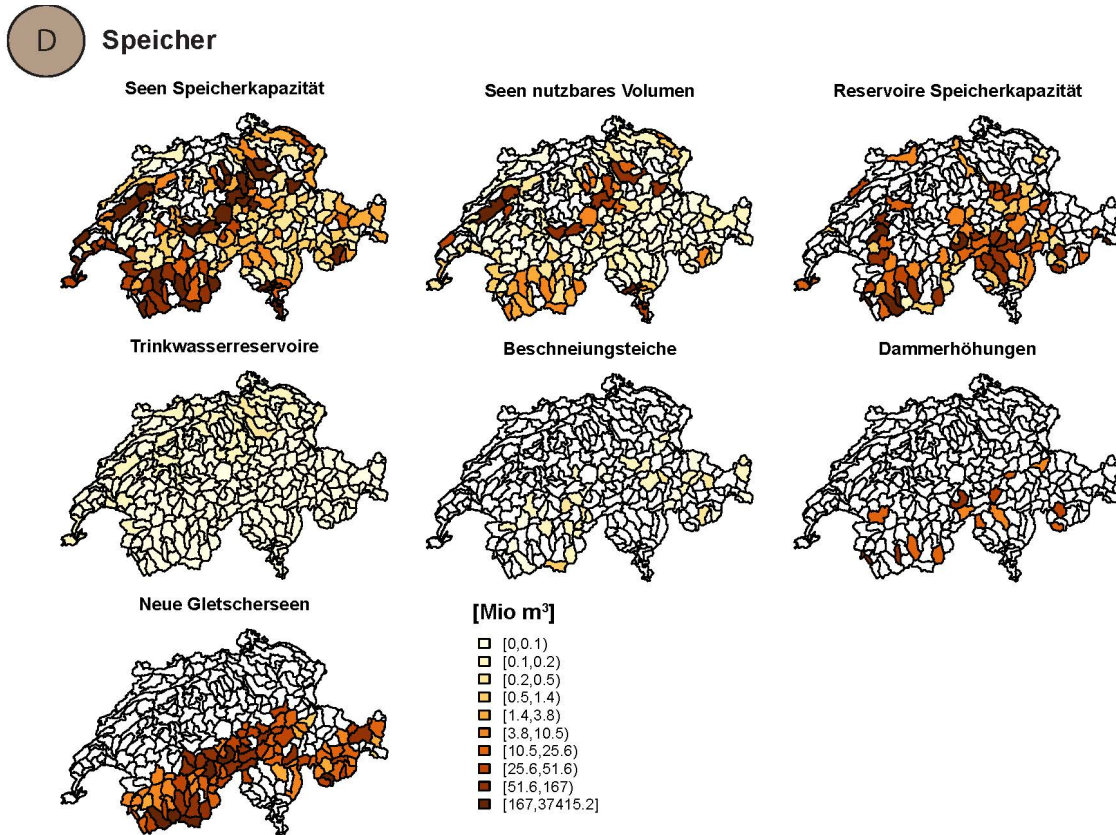


Abbildung 11: Räumliche Verteilung der Speicherkapazität in Seen (Karte oben links), des nutzbaren Seevolumens (oben Mitte), der Speicherkapazität in Reservoiren (oben rechts), des Volumens in Trinkwasserreservoiren (Mitte links), in Beschneidungsteichen (Mitte), des Volumens durch potenzielle Dammerhöhungen (Mitte rechts) und des Volumens durch potenzielle neue Gletscherseen (unten).

Die Auswertung der absoluten Nutzvolumen zeigt auf, dass die grössten *absoluten* Nutzvolumen bei den Seen mit sehr grosser Speicherkapazität und grosser Oberfläche zu finden sind (Abbildung 12). Dazu zählen der Bodensee, der Lago Maggiore, der Lac de Neuchâtel und der Lac Léman. Bei den *prozentualen* Nutzvolumen sind es hingegen eher kleinere Seen, welche einen grossen prozentualen Anteil an der Speicherkapazität als Nutzvolumen aufweisen. Dazu zählen der Lac de Joux, der Engstlensee und der Lago di Poschiavo. Bestes Beispiel dafür ist der Lac Léman. Gemessen am absoluten Nutzvolumen kommt er an vierter Stelle, beim prozentualen Nutzvolumen hingegen liegt er an letzter Stelle.

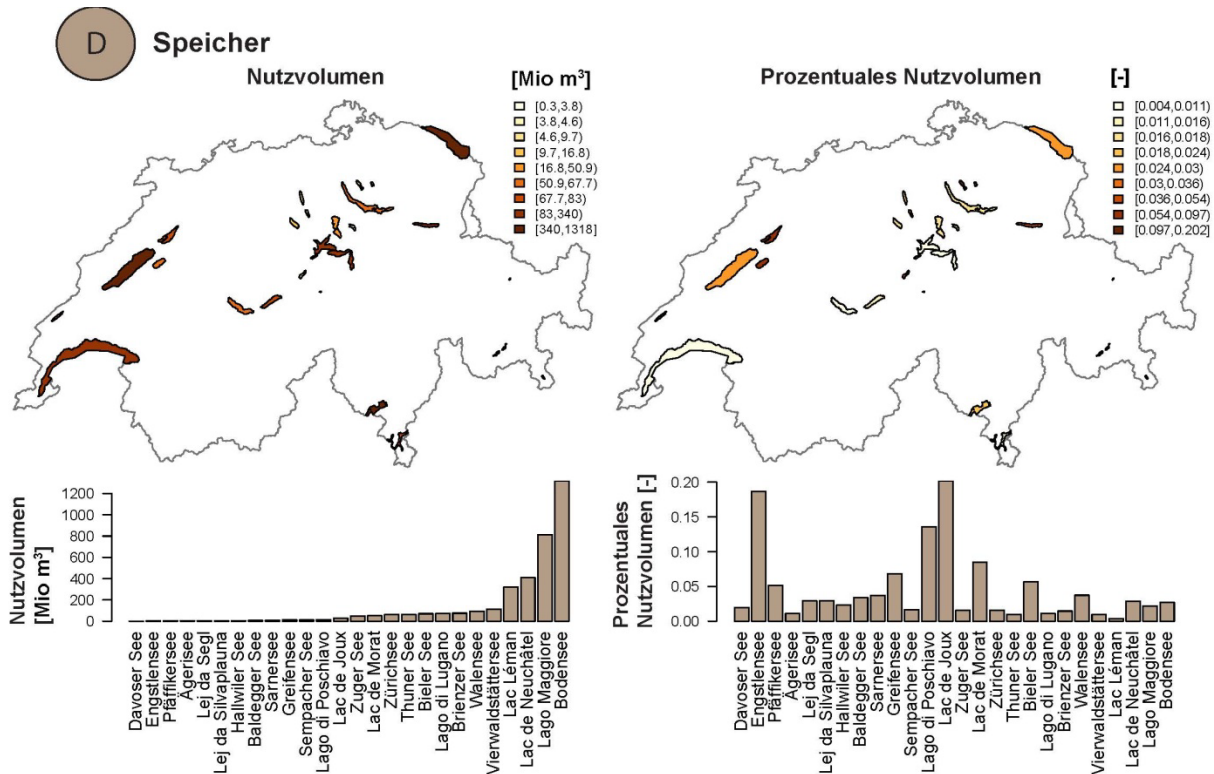


Abbildung 12: Absolutes Nutzvolumen und prozentuales Nutzvolumen für die grössten Schweizer Seen. Die Seen sind horizontal nach dem absoluten Nutzvolumen geordnet<sup>1</sup>.

In der untenstehenden Abbildung 13 sind die Nutzvolumen aus Konzessionen auf der horizontalen Achse gegen die Nutzvolumen aus historischen Pegelständen der Seen aufgetragen (Federal Office for the Environment FOEN, 2018b). Es wird ersichtlich, dass beispielsweise beim Vierwaldstättersee, Zürichsee und Lac de Joux in der bisherigen Beobachtungsperiode das gemäss Konzession nutzbare Volumen überschritten wurde. Das entspricht in der Regel einer Unterschreitung der minimalen Pegelstände, welche in den Reglementen vorgeschrieben sind.

<sup>1</sup> Am Beispiel des Davosersees illustriert sich die Schwierigkeit der Definition des Nutzvolumens: gemäss der aktuellen Konzession muss der Davosersee im Sommer ab einem bestimmten Zeitpunkt – für die touristische Nutzung – einen minimalen Pegel aufweisen. Daraus wurde das hier ausgewiesene (sehr geringe) Nutzvolumen von 0.02% abgeleitet. Im Winter und Frühling kann der See jedoch für die Stromproduktion fast vollumfänglich abgesenkt werden, was einem Nutzvolumen von über 90% entsprechen würde.

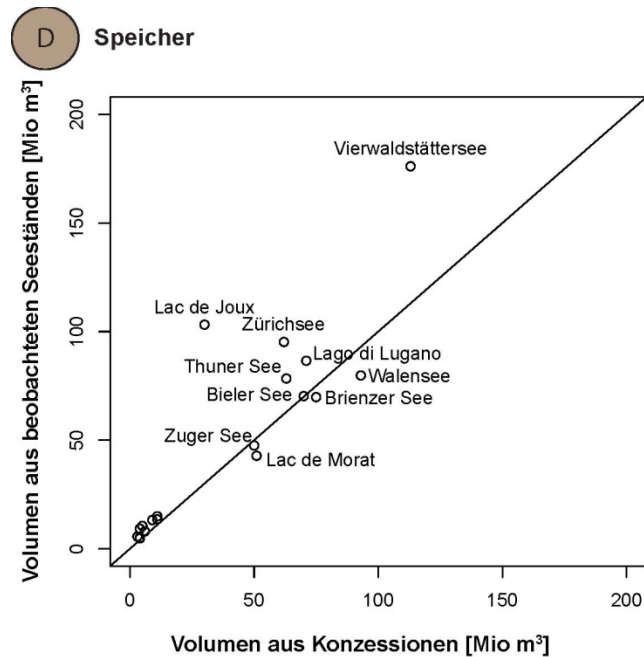


Abbildung 13: Vergleich der Nutzvolumen abgeleitet aus den Konzessionen und den beobachteten Seeständen. Bei den Seen oberhalb der Diagonalen wurden in der Vergangenheit die erlaubten Nutzungsvolumen überschritten, resp. die minimalen Seespiegelstände unterschritten.

### 4.3 Nachfrage

Die Wassernachfrage unterscheidet sich je nach Nutzungskategorie (Abbildung 14 links).

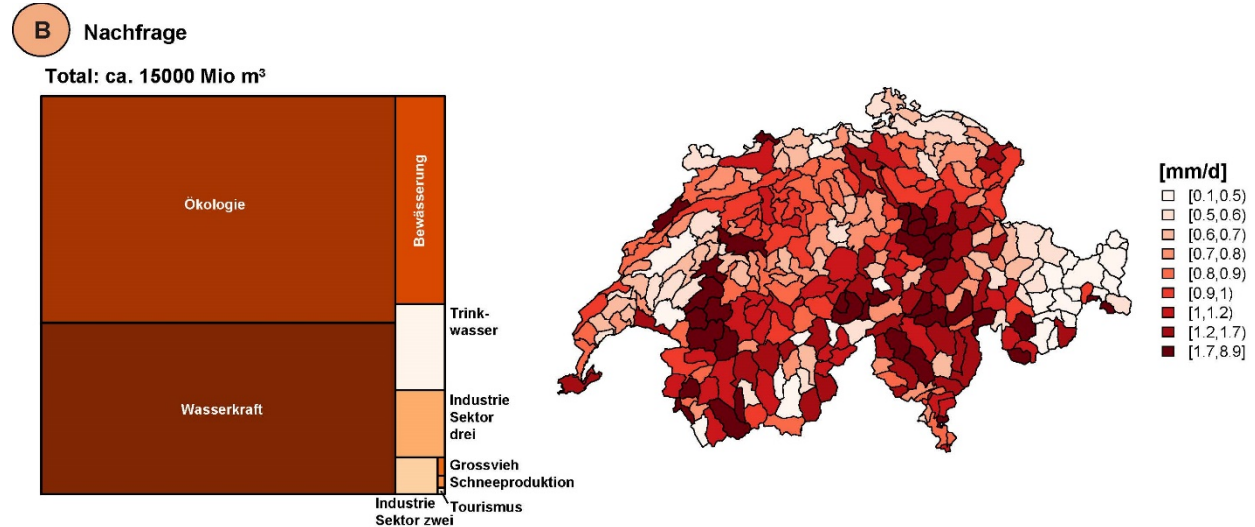


Abbildung 14: Gesamtwassernachfrage pro Nutzungskategorie und Jahr: Ökologie (Rest- und Mindestwasser), Wasserkraft, Bewässerung, Trinkwasser, Industrie Sektor drei (Dienstleistungen), Industrie Sektor zwei, Grossvieh, Schneeproduktion und Trinkwasser Tourismus (links) und die räumliche Verteilung der Gesamtnachfrage.

Den höchsten Anspruch erhebt die Ökologie zur Deckung der Restwassermenge/Mindestwassermenge (ca. 8000 Mio m<sup>3</sup>), welche für alle Flüsse berechnet wurde, gefolgt von der Wasserkraft (ca. 6000 Mio m<sup>3</sup>). Beide Nutzungen sind nicht verbrauchend. Wie erwähnt steht das Wasser lokal aber nicht für andere Nutzungen zur Verfügung, sondern erst verzögert weiter flussabwärts. Für die Bewässerung (ca. 1000 Mio

m<sup>3</sup>) wird etwa doppelt so viel Wasser benötigt wie für die Trinkwasserversorgung (ca. 425 Mio m<sup>3</sup>) und rund dreimal so viel wie für den dritten Sektor in der Industrie (ca. 330 Mio m<sup>3</sup>). Vergleichsweise wenig Wasser wird für den zweiten Sektor (Industrie) (ca. 156 Mio m<sup>3</sup>), für das Grossvieh (ca. 13 Mio m<sup>3</sup>), die Schneeproduktion (ca. 8 Mio m<sup>3</sup>) und die Trinkwasserversorgung im Tourismus (ca. 5 Mio m<sup>3</sup>) benötigt. Entsprechend der Nutzungsmuster ist auch die Gesamtwassernachfrage räumlich unterschiedlich (Abbildung 14 Karte rechts). Eine hohe Nachfrage fällt insbesondere in jenen Gebieten an, wo die Wasserkraft genutzt wird. Die räumlichen Unterschiede werden noch deutlicher, wenn einzelne Nutzungskategorien betrachtet werden (Abbildung 15). So ist der Wasserverbrauch für Bewässerung, Trinkwasser in Haushalten, in der Industrie und zum Tränken von Grossvieh vor allem im Mittelland gross. Im Gegensatz dazu sind andere Nutzungen wie Wasserkraftproduktion und Schneeproduktion auf die alpinen Regionen beschränkt. Die ökologische Wassernachfrage prägt sich hauptsächlich in den Alpen aus, weil dort die grössten Niederschlagsmengen fallen und somit am meisten Abfluss generiert wird. Die Nachfrage in den jeweiligen Nutzungskategorien unterscheidet sich nicht nur räumlich, sondern auch saisonal (Abbildung 16).

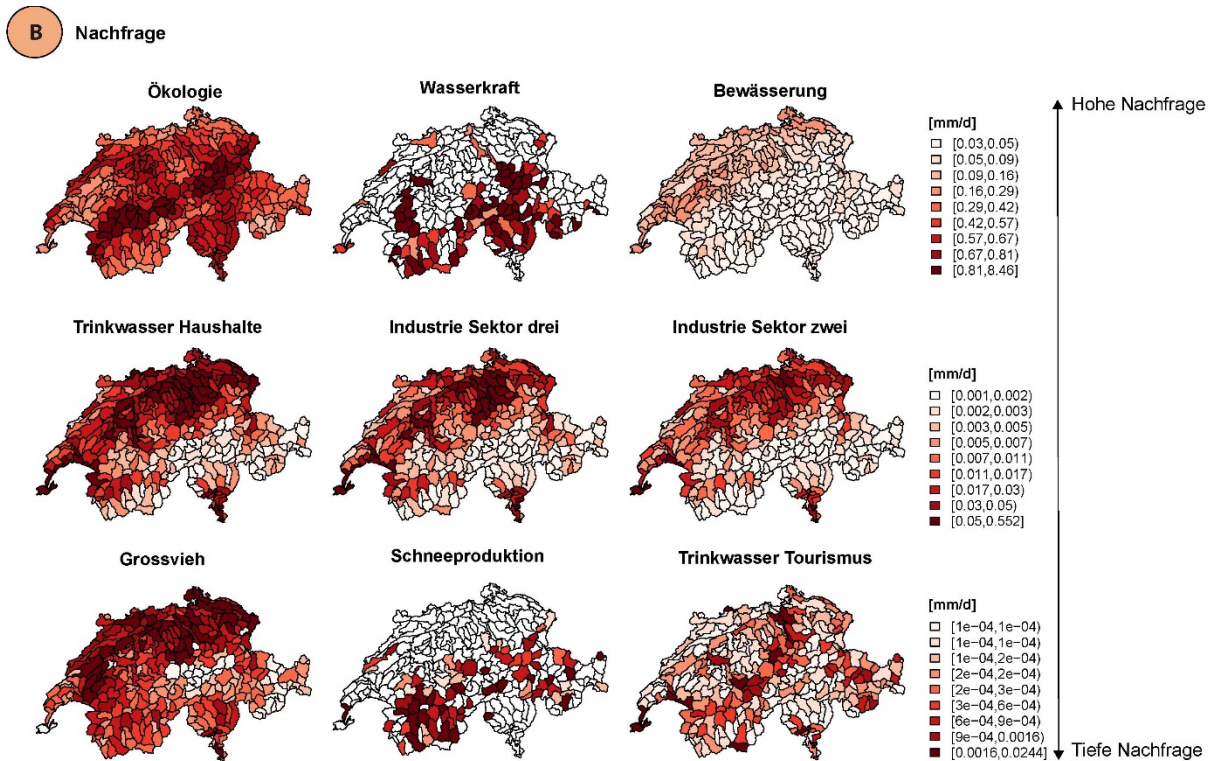


Abbildung 15: Räumliche Verteilung des Wasserverbrauchs pro Nutzungskategorie: Ökologie (Rest- und Mindestwassermenge), Wasserkraft, Bewässerung, Trinkwasser Haushalte, Industrie Sektor drei, Industrie Sektor zwei, Grossvieh, Schneeproduktion, Trinkwasser Tourismus. Die Wassernachfrage nimmt von oben nach unten ab, jede Kartenreihe wird auf einer eigenen Skala gezeigt.

Die Gesamtnachfrage ist wegen des starken Einflusses der Wasserkraftproduktion im Winter am grössten. Die Nachfrage für Bewässerung ist in den Sommermonaten am grössten, die Schneeproduktion findet ausschliesslich im Winter statt. Die Wassernachfrage für die Ökologie (Rest- und Mindestwassermenge), die Trinkwasserversorgung, die Industrie und das Grossvieh wurde wie beschrieben als konstant angenommen.

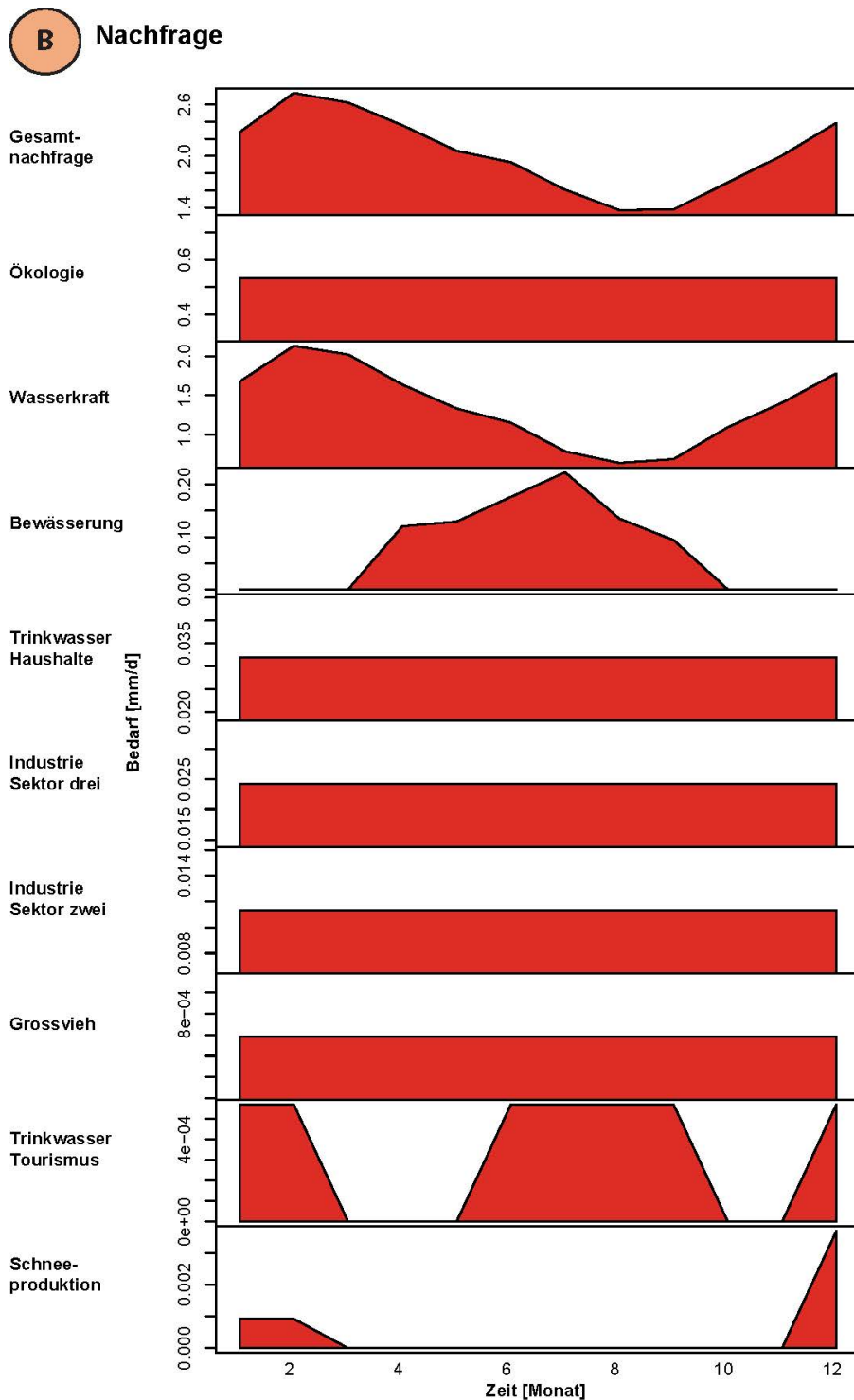


Abbildung 16: Saisonalität der Gesamtnachfrage und der verschiedenen Nutzungskategorien über alle Gebiete: Ökologie (Rest- und Mindestwassermenge, Wasserkraft, Bewässerung, Trinkwasser Haushalte, Industrie Sektor drei, Industrie Sektor zwei, Grossvieh, Trinkwasser Tourismus, Schnee-produktion). Jede Kategorie ist auf ihrer eigenen Skala gezeigt, die Nachfrage nimmt von oben nach unten ab.

Das relative Gewicht verschiedener Nutzungskategorien unterscheidet sich stark zwischen alpinen und Mittellandgebieten (Abbildung 17). Während in alpinen Gebieten (z.B. Bagnes und Surses) die Wasserkraft und die Ökologie (Rest- und Mindestwassermenge) das Bild der Nachfrage dominieren, sind in Mittellandgebieten (Zürich und Thur) verschiedene Sektoren wie Ökologie, Industrie, Trinkwasser und Bewässerung wichtig.

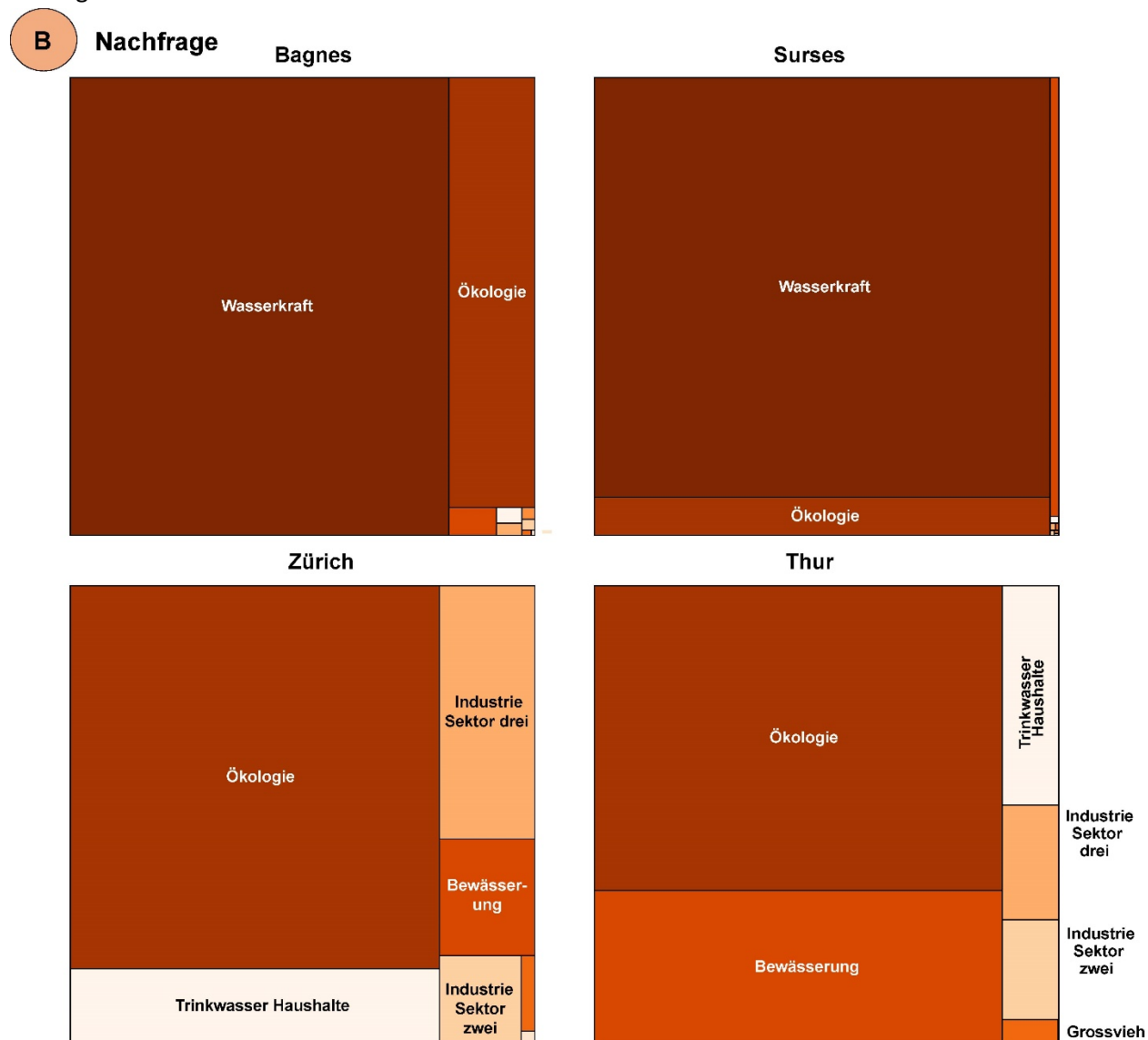


Abbildung 17: Wassernachfragesvolumen pro Kategorie für die vier Fallregionen Bagnes, Surses, Zürich und Thur.

Sozio-ökonomische Zukunftsszenarien sind nicht nur für die Schweiz mit vielen Unsicherheiten behaftet. Diese Studie erfolgte unter Annahme starker Vereinfachungen. Die zukünftige Wassernachfrage für die meisten Nutzungskategorien wurde in Ermangelung guter Prognosen als konstant angenommen. Die Nachfrage nach Bewässerung nimmt infolge von steigenden Temperaturen zu. Die Trinkwassernachfrage steigt gemäss der Bevölkerungsentwicklung. Die Schneeproduktion wird trotz des Rückgangs der Skigebiete leicht zunehmen. Die Wassernachfrage der Wasserkraft dürfte gemäss der Zielsetzungen durch die Energiestrategie 2050 und laut unseren Berechnungen ebenfalls leicht zunehmen.

Abbildung 18 stellt die Bewässerungsnachfrage unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen dar. Über alle 39 Klimaketten gemittelt nimmt die Nachfrage nach Bewässerung aufgrund der steigenden Temperaturen und der damit verbundenen höheren Verdunstung zu. Nicht berücksichtigt wird der Einfluss wassersparender Bewässerungstechnologien oder andere Anpassungsmassnahmen in der Landwirtschaft (z.B. vermehrter Anbau trockenheitsresistenter Kulturen).

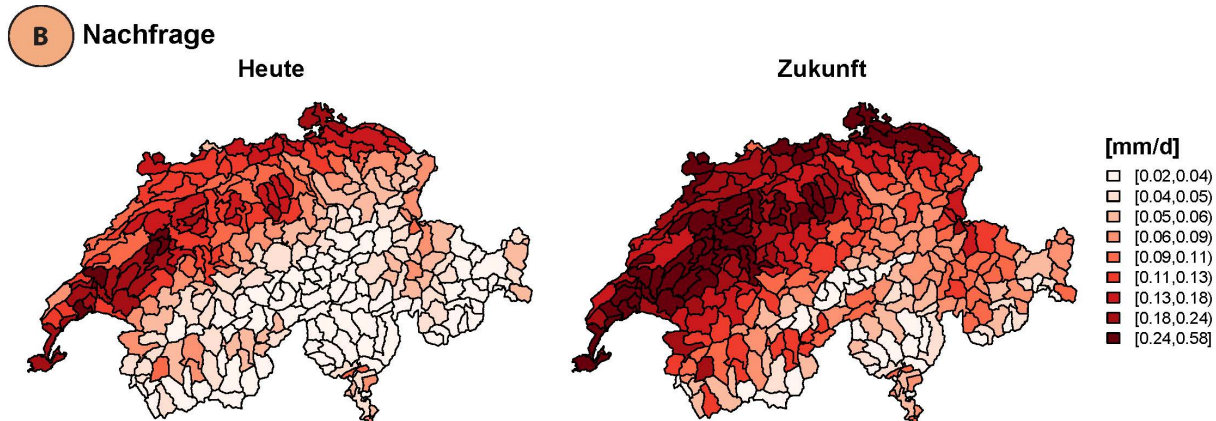


Abbildung 18: Bewässerungsnachfrage heute vs. Zukunft. Die Zukünftige Nachfrage wurde über alle 39 Klimaketten gemittelt.

#### 4.4 Grössenordnungen Wasserbilanzelemente

Abbildung 19 vergleicht die Grössenordnungen des jährlichen Wasserdargebots und der –nachfrage mit derjenigen der Wasserspeicher (ohne Grundwasser). Sowohl das natürliche Dargebot wie auch die Speicherkapazität sind über das Jahr betrachtet grösser als die Nachfrage nach Wasser. Vergleicht man jedoch die Nachfrage mit dem nutzbaren Speichervolumen, wird ersichtlich, dass dieses mit 5500 Mio m<sup>3</sup> deutlich kleiner ist als die Gesamtnachfrage von ca. 15000 Mio m<sup>3</sup>. Unter normalen Bedingungen wird diese Nachfrage jedoch über das natürliche Wasserdargebot gedeckt (ca. 30000 Mio m<sup>3</sup>). Diese Grössenordnungen ändern sich in der Zukunft nur wenig. Weil es sich um jährliche und über die ganze Schweiz gemittelte Werte handelt, ist ihre Aussagekraft begrenzt.

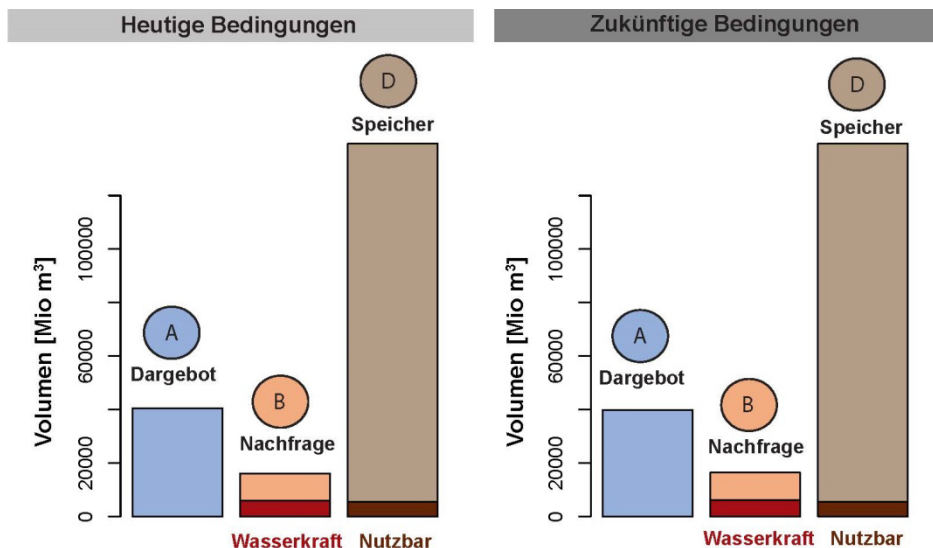


Abbildung 19: Jährliches Gesamtvolumen des Dargebots, der Nachfrage und der Speicher für heutige (links) und zukünftige Bedingungen (rechts). Für die Nachfrage ist die Wasserkraft als separate Kategorie aufgeführt, für die Speicherkapazität ist das nutzbare Volumen gekennzeichnet.

#### 4.5 Wasserknappheit/-überschuss

Die relativ hohe Wassernachfrage im Mittelland widerspiegelt sich in den Schätzungen von Wasserknappheit/-überschuss für heutige Bedingungen (Abbildung 20). Unter normalen Bedingungen ist auf einer jährlichen Skala kaum eine Region von Wasserknappheit betroffen. Jedoch können einige Regionen im Mittelland unter extremen Bedingungen bereits heute von Wasserknappheit betroffen sein. Während über das Jahr gemittelt nur relativ wenige Regionen von Wasserknappheit betroffen sind, können saisonal mehr Regionen betroffen sein. Abbildung 21 zeigt die geschätzte, monatliche Wasserknappheit, resp. den -überschuss, für die Monate April, August und Dezember.

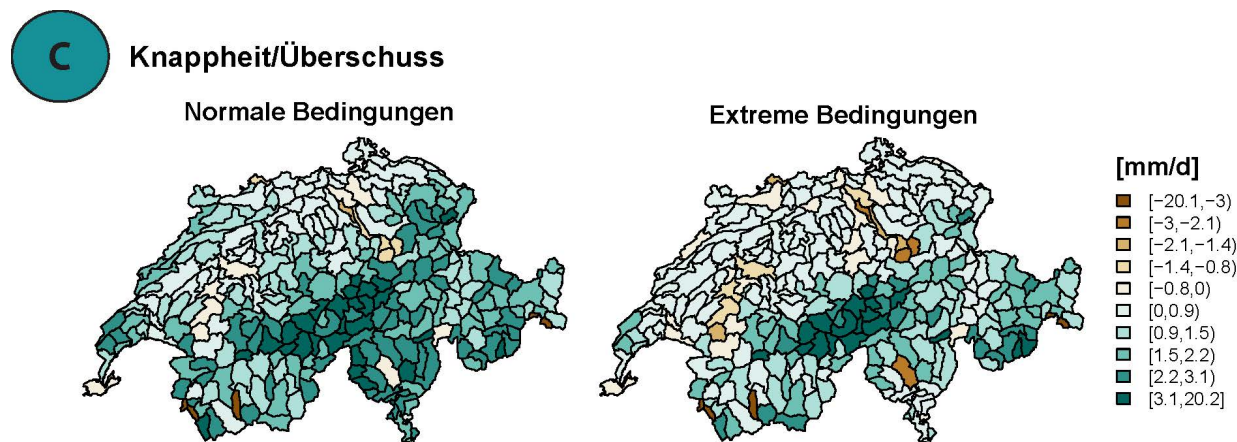


Abbildung 20: Geschätzte jährliche Wasserknappheit (braun), resp. -überschuss (grün), für heutige (1981-2010) mittlere und extreme Bedingungen, welche durch das Jahr 2003 repräsentiert werden.

Unter normalen Bedingungen ist auch für die einzelnen Monate nur in einigen wenigen Gebieten Wasserknappheit zu erwarten. Lokale Wasserknappheit im Dezember lässt sich hauptsächlich über die Nachfrage nach Wasser zur Stromproduktion erklären. Unter extremen Bedingungen sind hingegen v.a. im Sommer sehr viele Gebiete im Mittelland von Wasserknappheit betroffen, da das natürliche Wasserdargebot dort wegen geringer Niederschläge klein ist. Lokale Wasserknappheit kann aber auch in einigen alpinen Gebieten auftreten.

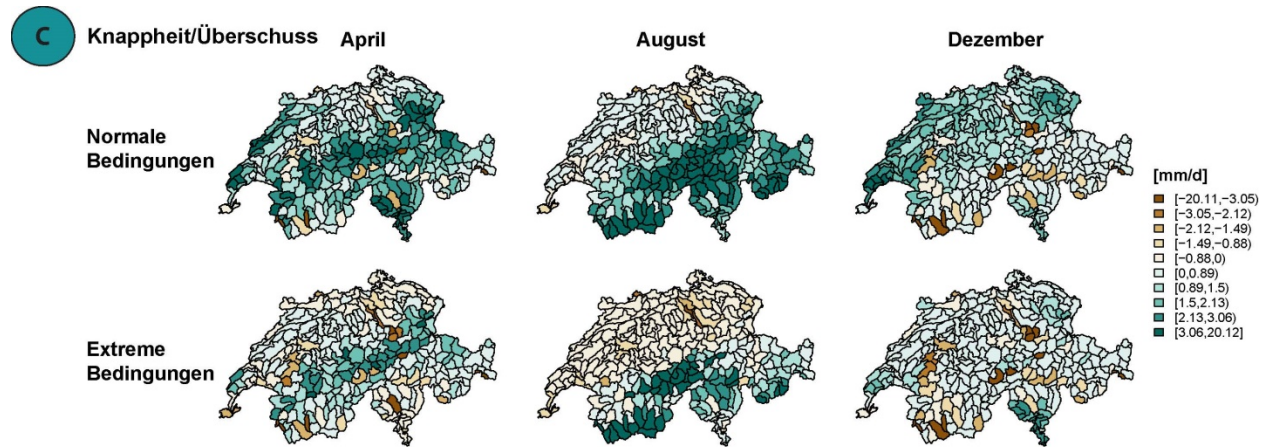


Abbildung 21: Geschätzte, monatliche Wasserknappheit (braun), resp. Wasserüberschuss (grün), für April, August und Dezember unter normalen und extremen Bedingungen.

Die Saisonalität von Wasserknappheit ist regional sehr unterschiedlich (Abbildung 22). In alpinen Gebieten wie Bagnes oder Surses ist das natürliche Wasserdargebot im Sommer ausreichend um die Nachfrage zu decken. Im Winter hingegen, wenn das natürliche Dargebot tief ist, ist die Nachfrage an Wasser zur Wasserkraftproduktion sehr hoch und es entsteht Wasserknappheit. Diese wird aber bereits heute vermieden, indem das reichliche Dargebot an Wasser im Sommer in Stauseen gespeichert wird, um es im Winter zu turbinieren. Während sommerliche Wasserknappheit in alpinen Gebieten heute kaum auftritt, könnte sich dies in Zukunft unter extremen Bedingungen ändern. Im Gegensatz zu den Alpen, ist das Mittelland bereits heute von Wasserknappheit betroffen, da die Nachfrage das lokale Dargebot übersteigen kann. Diese Knappheit wird in den Fallstudiengebieten nur geringfügig zunehmen.



## Knappheit/Überschuss

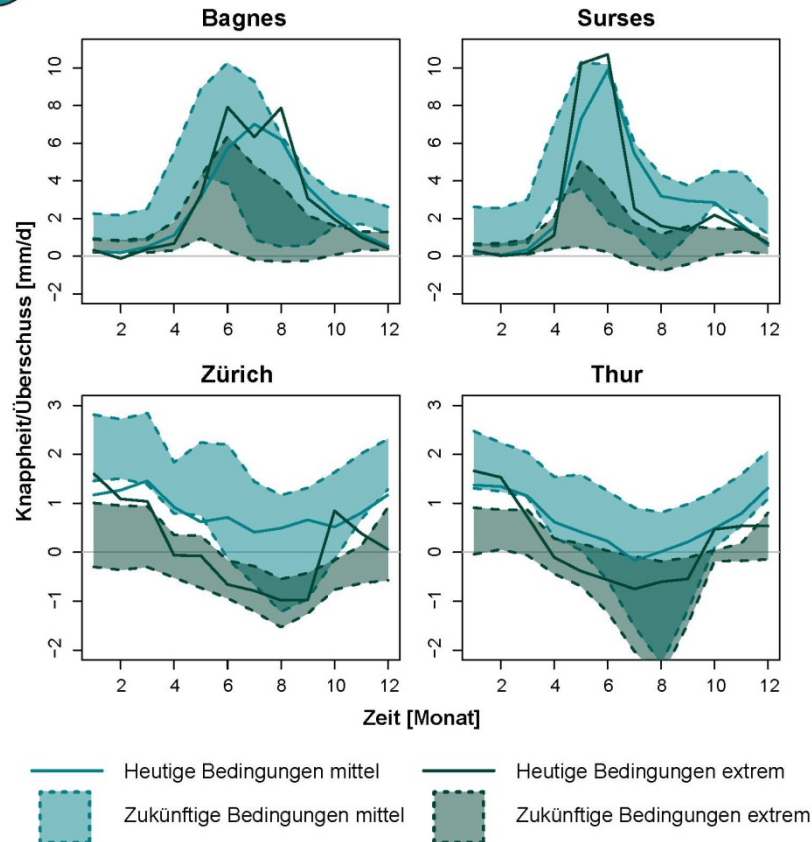


Abbildung 22: Wasserknappheit, resp. -überschuss, für heutige und zukünftige mittlere und extreme Bedingungen für die vier Fallregionen Bagnes, Surses, Zürich und Thur. Die Unsicherheit der Wasserknappheit /-überschuss unter zukünftigen Bedingungen wird durch die schattierten Polygone abgebildet.

Die Sommertrockenheit unter zukünftigen Bedingungen unterscheidet sich deutlich von jener unter heutigen Bedingungen sowohl für normale wie auch extreme Bedingungen (Abbildung 23). Bei einem 10-jährlichen Ereignis sind unter zukünftigen Bedingungen, zusätzlich zu den Gebieten im Mittelland, auch einige alpine Gebiete von Wasserknappheit betroffen. Die Fläche der betroffenen Einzugsgebiete dehnt sich weiter aus, je extremer das Ereignis ist. Dies macht die Karte für das 100-jährliche Ereignis (rechts) deutlich.

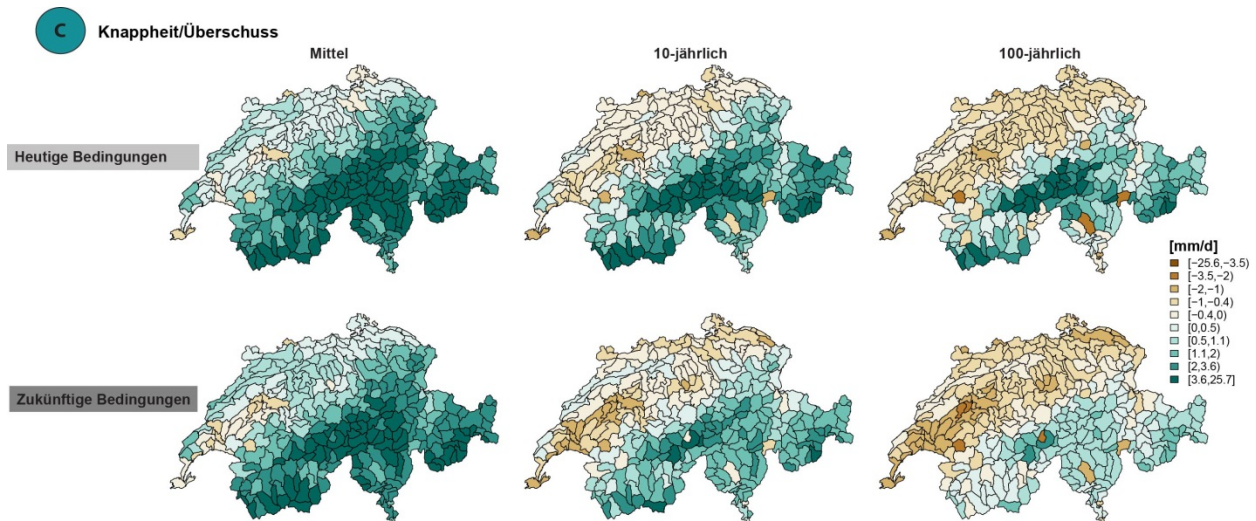


Abbildung 23: Mittlere und extreme Sommerwasserknappheit abgebildet durch die 10- und 100-jährliche Knappheit unter heutigen und zukünftigen Bedingungen über alle 39 Klimamodellketten.

#### 4.6 Potenzial zur Verminderung von lokaler Sommerwasserknappheit

Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit wurde durch das Verhältnis zwischen dem in einem Gebiet verfügbaren Speichervolumen und der absoluten Sommerwasserknappheit berechnet. Abbildung 24 stellt dieses Potenzial für heutige und zukünftige Bedingungen für ein mittleres, ein 10-jährliches und ein 100-jährliches Ereignis dar. Unter heutigen wie zukünftigen mittleren Bedingungen ist in den meisten Gebieten kein Potenzial vorhanden, da nur in wenigen Gebieten Wasserknappheit erwartet wird. In jenen Gebieten, wo Knappheit auftritt, ist das Potenzial in Gebieten mit natürlichen Seen gross, in allen anderen mit einem Speicher-Knappheitsverhältnis von  $<0.25$  aber klein. Unter extremen Bedingungen nimmt die Wasserknappheit und damit das Potenzial zu deren Verminderung zu. Ein grosses Potenzial besteht v.a. in jenen Gebieten im Mittelland mit einem natürlichen See. In vereinzelt alpinen Gebieten können Reservoirs und Seen einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung von Wasserknappheit leisten, allerdings nur unter sehr extremen Bedingungen (100-jährliche Knappheit).

Die unterste Kartenreihe von Abbildung 24 zeigt die Differenz zwischen zukünftigem und heutigem Potenzial. Unter mittleren Bedingungen nimmt dieses weder zu noch ab. Unter extremen Bedingungen kann es je nach Region zu- oder abnehmen. Im Seeland nimmt das Potenzial in Zukunft für eine 10-jährliches Ereignis ab, da die Wasserknappheit zunimmt, die Speicherkapazität aber gleich bleibt. In der Region Zug nimmt das Potenzial hingegen zu, da dort unter heutigen Bedingungen - im Gegensatz zur Zukunft - keine Knappheit und somit auch kein Potenzial besteht. Im Falle eines 100-jährlichen Ereignisses nimmt das Potenzial in dieser Region hingegen wieder ab, da auch die Knappheit zunimmt. In der Region Crans-Montana nimmt das Potenzial unter solch extremen Bedingungen zu.

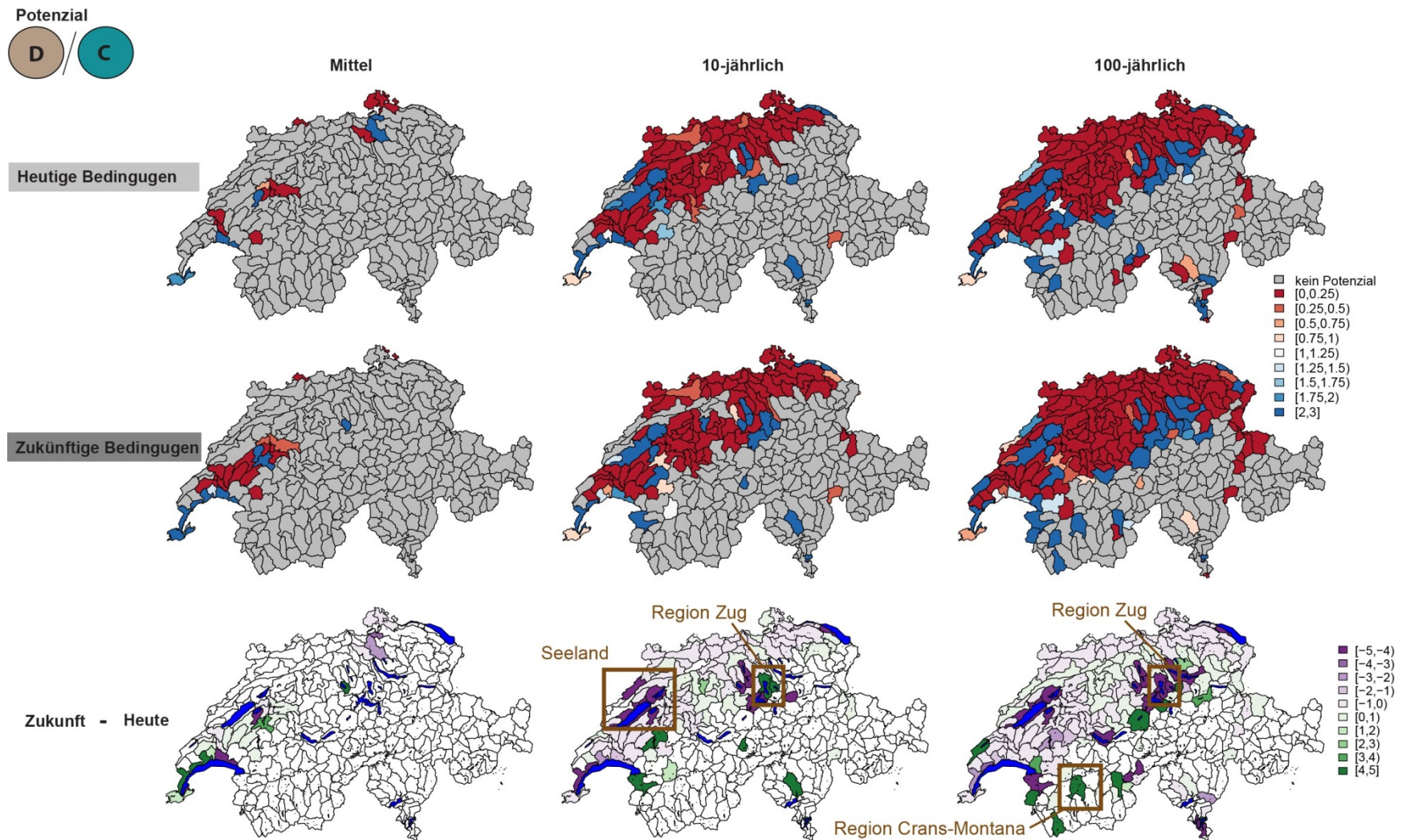


Abbildung 24: Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit für heutige und zukünftige Bedingungen für ein mittleres, ein 10-jährliches und ein 100-jährliches Wasserknappheitsereignis **unter der Annahme, dass die gesamte Kapazität der Speicher genutzt werden kann**. In farbigen Gebieten gibt es Wasserknappheit, in grauen nicht. In blauen Gebieten vermag das gespeicherte Wasser die gesamte Wasserknappheit oder mehr zu decken. In roten Gebieten kann nur ein Teil der Knappheit über Speicher gedeckt werden. Die untere Kartenreihe zeigt den Unterschied zwischen dem heutigen und zukünftigen Potenzial. In den violetten Gebieten nimmt das Potenzial im Vergleich zu heute ab, während es in grünen Gebieten zunimmt.

Im Gegensatz zu den Potenzialen, welche aus der Speicherkapazität berechnet wurden, sind die Potenziale unter Berücksichtigung des tatsächlichen **Nutzvolumens** sehr klein (Abbildung 25). In den meisten Gebieten ist das Verhältnis von Nutzvolumen zu Wasserknappheit kleiner als 0.25, d.h. weniger als ein Viertel der Wasserknappheit kann über die Speicher gedeckt werden. Eine Ausnahme bildet das Seeland mit dem Neuenburgersee, welches sogar unter einem 100-jährlichen Knappheitsereignis noch ein grosses Potenzial zur Verminderung von Wasserknappheit aufweist. Es gibt ein paar spezielle Einzugsgebiete, wie das Verzascatal oder die Region Luzern, wo in einem zukünftigen Normaljahr kein Potenzial besteht (weil keine Wasserknappheit besteht), bei einer 10-jährlichen Sommertrockenheit ein grosses Potenzial vorhanden ist, dieses aber bei einem sehr seltenen Ereignis (100-jährlich) wiederum stark abnimmt.

Potenzial

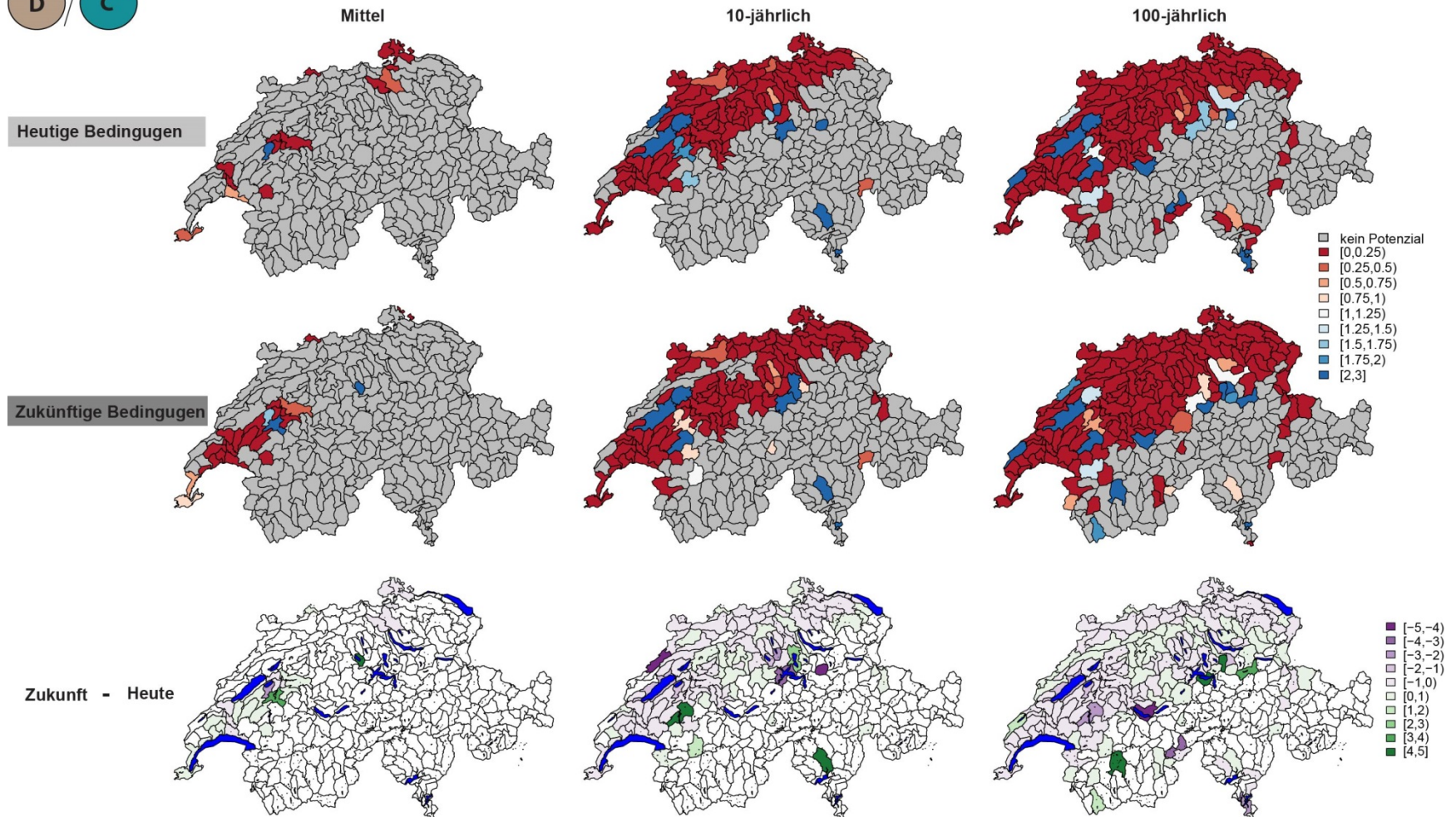
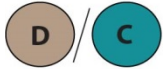


Abbildung 25: Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit für heutige und zukünftige Bedingungen für ein mittleres, ein 10-jährliches und ein 100-jährliches Wasserknappheitsereignis **unter der Annahme, dass nur das reglementarisch festgelegte, nutzbare Volumen zur Verfügung steht**. In farbigen Gebieten gibt es Wasserknappheit, in grauen nicht. In blauen Gebieten vermag das gespeicherte nutzbare Wasser die gesamte Wasserknappheit oder mehr zu decken, in roten Gebieten kann nur ein Teil der Knappheit über das nutzbare Volumen der Speicher gedeckt werden. Die untere Kartenreihe zeigt den Unterschied zwischen heutigem und zukünftigem Potenzial. In violetten Gebieten nimmt das Potenzial im Vergleich zu heute ab, während es in grünen Gebieten zunimmt.

#### **4.7 Potenzial zur Verminderung von Sommerwasserknappheit in unterliegenden Gebieten**

Einzugsgebiete mit einem grossen Potenzial zur Verminderung von Wasserknappheit in Bezug auf die Speicherkapazität können ggf. auch in unterliegenden Gebieten zur Verminderung von Wasserknappheit beitragen, solange die Gebiete über einen natürlichen Wasserlauf miteinander verbunden sind. Der Abfluss aus einzelnen Speichern kann sich wesentlich auf den Abfluss des gespiesenen Flusses auswirken. Abbildung 26 zeigt den Beitrag aus Reservoiren zum Abfluss am Unterlauf bei normalen und extremen Bedingungen für die Speicher Mauvoisin, Grande Dixence, Mattmark und Marmorera. Wird der gesamte Speicherinhalt des Mauvoisin Stausees bei normalen Abflussbedingungen über einen Monat kontinuierlich ins Gewässer abgegeben, steigt der Abfluss bei der nahegelegenen Station Drance-Martigny je nach Monat um mehr als das Fünffache des normalen Abflusses. Wird der Speicherinhalt jedoch über drei Monate abgegeben, steigt der Abfluss in einem Sommermonat noch um das Zweifache. Betrachtet man die Station Rhône-Porte du Scex weiter flussabwärts, ist der Effekt viel kleiner mit Beiträgen von 20 Prozent in einem Sommermonat bei einer Abgabe über einen Monat, und mit Beiträgen kleiner als 10 Prozent bei einer Abgabe über drei Monate. Unter extremen Abflussbedingungen jedoch können diese Beiträge zum Abfluss an weiter entfernten Stationen zunehmen, da der Referenzabfluss kleiner ist. So kann der Beitrag aus dem Mauvoisin Reservoir am Sommerabfluss der Rhône je nach Abgabedauer auf 50 bis über 100 Prozent steigen. Die relativen Beiträge am Abfluss einer Referenzstation hängen von der Speicherkapazität des betrachteten Reservoirs ab. Im Fall des Grande Dixence Reservoirs können die Beiträge am Abfluss der Rhône grösser sein als jene vom Mauvoisin, während die Beiträge vom Mattmarkstausee kleiner sind. Für die Region Surses liegen die Beiträge des Abflusses aus dem Marmorera Stausee am Hinterrhein bei Fürstenu bei 20 bis 40 Prozent in einem normalen Sommermonat und bei 100 bis 200 Prozent in einem extremen Sommermonat. Für den Rhein bei Domat/Ems liegen die Werte wegen des höheren Referenzabflusses tiefer.

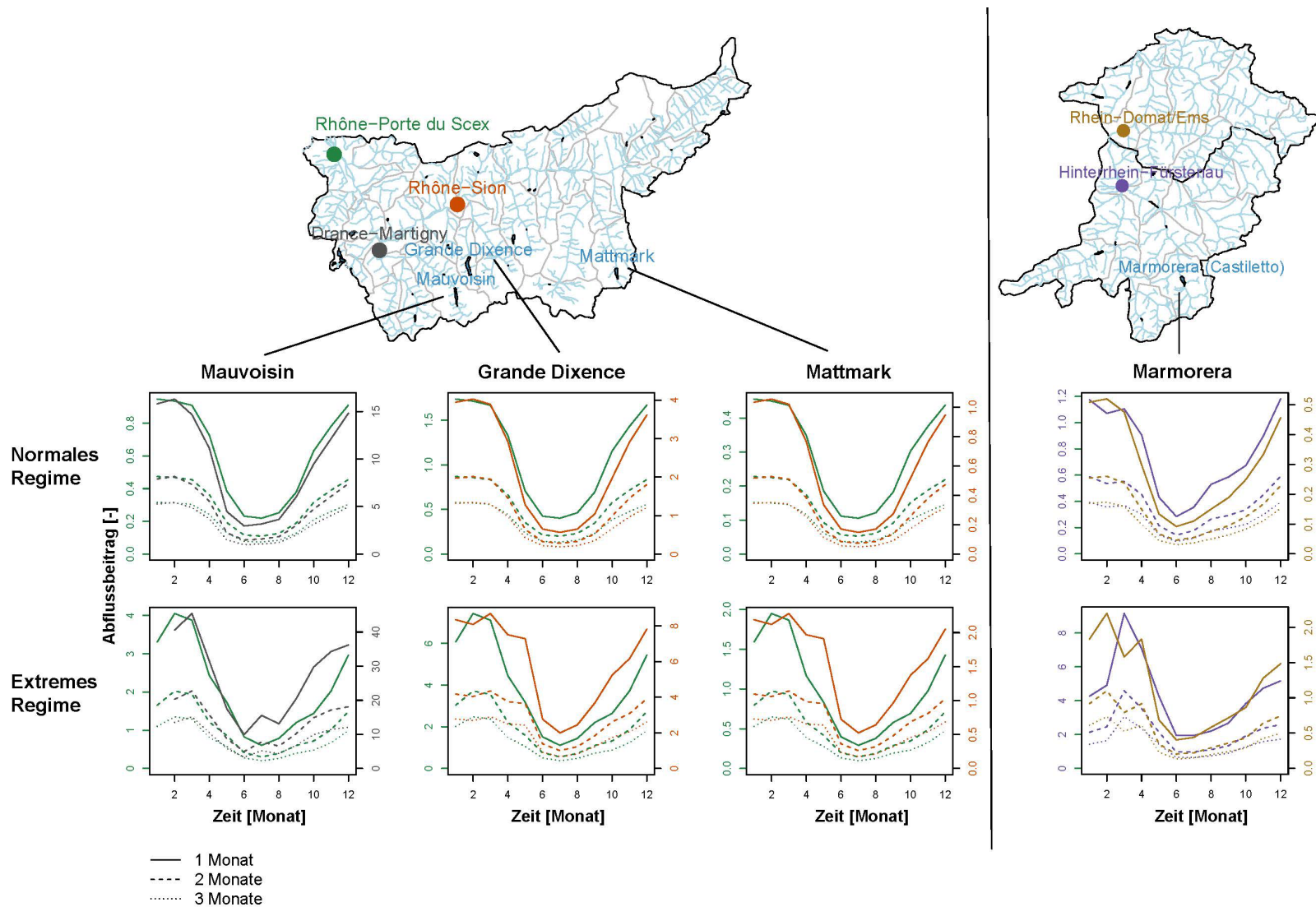


Abbildung 26: Beitrag des Abflusses generiert aus Reservoiren am Abfluss an Referenzstationen für die zwei Regionen Wallis und Surses. Für das Wallis werden die Reservoirs Mauvoisin, Grande Dixence und Mattmark und für die Region Surses das Reservoir Marmorera betrachtet. Als Referenzstationen im Wallis dienen Rhône-Porte du Scex (grösstes Einzugsgebiet), Rhône-Sion und Drance-Martigny (kleinstes Einzugsgebiet). In der Region Surses wurden die Referenzstationen Rhein-Domat/Ems und Hinterrhein-Fürstenu betrachtet. Der Abfluss aus den Reservoiren wurde über 1, 2 und 3 Monate berechnet und mit einem normalen (mittleren) und einem extremen (minimalen) Monatsabfluss verglichen.

In Abbildung 27 wird aufgezeigt, wie gross der zusätzliche Abfluss aus den Wasserspeichern an der Referenzstation Limmat Unterhard Zürich ist. Bei einem geringen natürlichen Abfluss hat die Zugabe aus den Wasserspeichern einen grösseren Einfluss auf den Gesamtabfluss. Deshalb sind die Werte aus dem Extremjahr 2003 im Sommer/Frühherbst um einiges grösser als in einem mittleren Jahr der Referenzperiode von 1938-2016 (Federal Office for the Environment FOEN, 2018a). Je nach Bedarf für die Abgabe an den Unterlauf direkt nach der Talsperre, kann ein Teil des gespeicherten Wassers für die Limmatzugabe turbinieren. Der Effekt ist im Sommer respektive Frühherbst am grössten, in dieser Zeit ist es für die Kraftwerksbetreiber aber aufgrund von geringer Stromnachfrage nicht interessant Wasser im grossen Stil zu turbinieren. Dies könnte sich ändern, falls in Zukunft zur Kühlung von Gebäuden mehr Strom im Sommer benötigt wird.

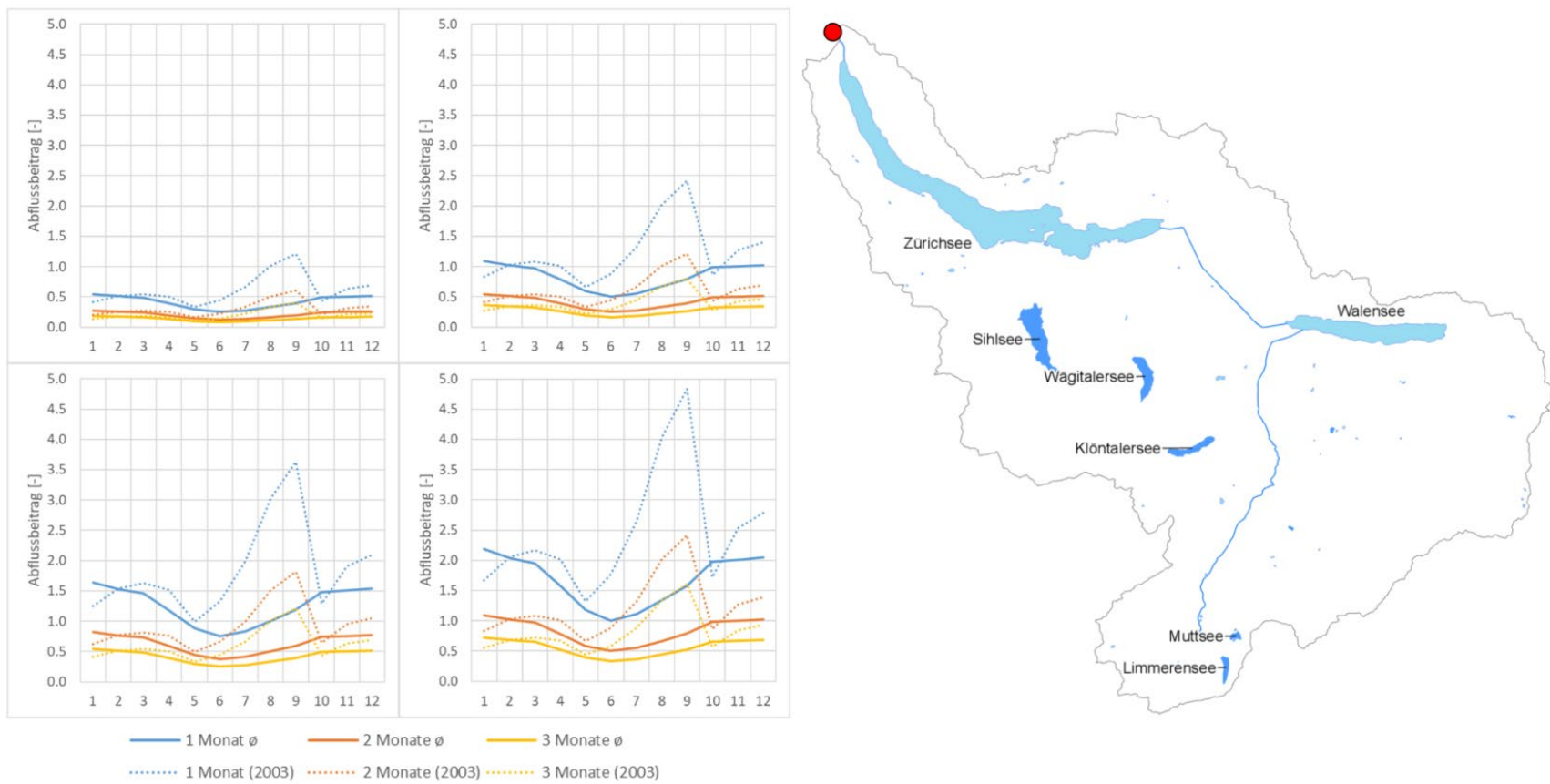


Abbildung 27: Beitrag des Abflusses generiert aus dem Nutzvolumen aller Reservoire am Abfluss der Referenzstation Limmat Unterhard Zürich (roter Punkt). Oben links 25 % Nutzvolumen, oben rechts 50 % Nutzvolumen, unten links 75 % Nutzvolumen, unten rechts 100 % Nutzvolum

Die in der Region Zürichsee zur Verfügung stehenden Nutzvolumen, sowie die maximalen Pumpwassermengen der Reservoirs in dieser Region sind in der untenstehenden Tabelle zusammengestellt.

| Wasserspeicher | Seevolumen<br>[Mio m <sup>3</sup> ] | Nutzvolumen<br>[Mio m <sup>3</sup> ] | max. Pumpwassermenge<br>[m <sup>3</sup> /s] | theor. Pumpmenge<br>pro Tag [Mio m <sup>3</sup> /d] | theor. Anzahl Tage<br>um Speicher zu füllen |
|----------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Sihlsee        | 96.5                                | 91.8                                 | 10                                          | 0.86                                                | 106                                         |
| Wägitalersee   | 148.8                               | 76.1                                 | 5                                           | 0.43                                                | 176                                         |
| Klöntalersee   | 56.4                                | 39.8                                 |                                             |                                                     |                                             |
| Limmerensee    | 93                                  | 92                                   | 13.7                                        | 1.18                                                | 78                                          |
| Muttsee        | 23.5                                | 23                                   | 140                                         | 12.10                                               | 2                                           |
| Zürichsee      | 3900                                | 62                                   |                                             |                                                     |                                             |

*Tabelle 1: Zusammenstellung Seevolumen, Nutzvolumen, max. Pumpwassermenge (Swiss Federal Office of Energy SFOE, 2018), theoretische Pumpwassermenge pro Tag und theoretische Dauer um den Wasserspeicher komplett zu füllen.*

Gesamthaft stehen 384.7 Mio m<sup>3</sup> Nutzvolumen im Einzugsgebiet Zürichsee zur Verfügung. Auch wenn nicht mehr der gesamte Nutzinhalt der künstlichen Reservoirs für die Wasserkraft zur Verfügung stehen würde, so könnte weiterhin Strom produziert werden. Das Füllen der künstlichen Reservoirs im Pumpendauerbetrieb in der berechneten Dauer (Tabelle 1) ist nur beim Sihl- und Muttsee möglich, da das Unterbecken ein genügend grosses Volumen aufweist. Sowohl beim Wägitalersee als auch beim Limmerensee ist diese Voraussetzung nicht gegeben. Besonders wertvoll erweisen sich Pumpspeicherkraftwerke wie Sihlsee / Obersee und Limmerensee / Muttsee. Der Sihl- und Muttsee fungieren dabei als Oberbecken und der Ober- respektive Limmerensee ist dabei das Unterbecken. Im Falle von Linth-Limmern gibt es nochmals eine Stufe mit dem Ausgleichsbecken in Tierfehd als Unterbecken und dem Limmerensee als Oberbecken. Durch die Möglichkeit das turbinierete Wasser wieder in den Speicher hoch zu fördern, könnte die Wasserkraft auch nur mit einem Teil des gesamten Nutzinhaltes auskommen. Dieser Teil des gesamten Nutzvolumens könnte immer wieder abturbiniert und anschliessend wieder hochgepumpt werden (Kreislauf). Mithilfe von intelligenten Managementsystemen könnte eine Kompromisslösung für die Neuverteilung des Nutzvolumens ermittelt werden.

Die Resultate in Abschnitt 4.6 haben gezeigt, dass das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von lokaler Wasserknappheit unter Berücksichtigung des Nutzvolumens klein ist. Das Potenzial auf regionaler Skala ist hingegen grösser. In den meisten hydrologischen Grossregionen übersteigt das regional nutzbare Volumen in Wasserspeichern unter heutigen Bedingungen die regional zu erwartende Sommerwasserknappheit (Abbildung 28). Oberliegende Gebiete können in den Regionen Rhône, Rhein, Aare und Ticino unter normalen (mittleren) Bedingungen zur Deckung von Sommerdefiziten in unterliegenden Gebieten verwendet werden. Sogar unter extremen Bedingungen (100-jährliche Wasserknappheit) kann lokale Wasserknappheit in den meisten Regionen über in der Region gespeichertes und nutzbares Wasser gedeckt werden. Eine Ausnahme bildet die Region Aare, wo das Nutzvolumen lediglich 52% der extremen Wasserknappheit zu decken vermag. In diesem Gebiet ist das Potenzial der Wasserspeicher zur Verminderung von Wasserknappheit in unterliegenden Gebieten gering.

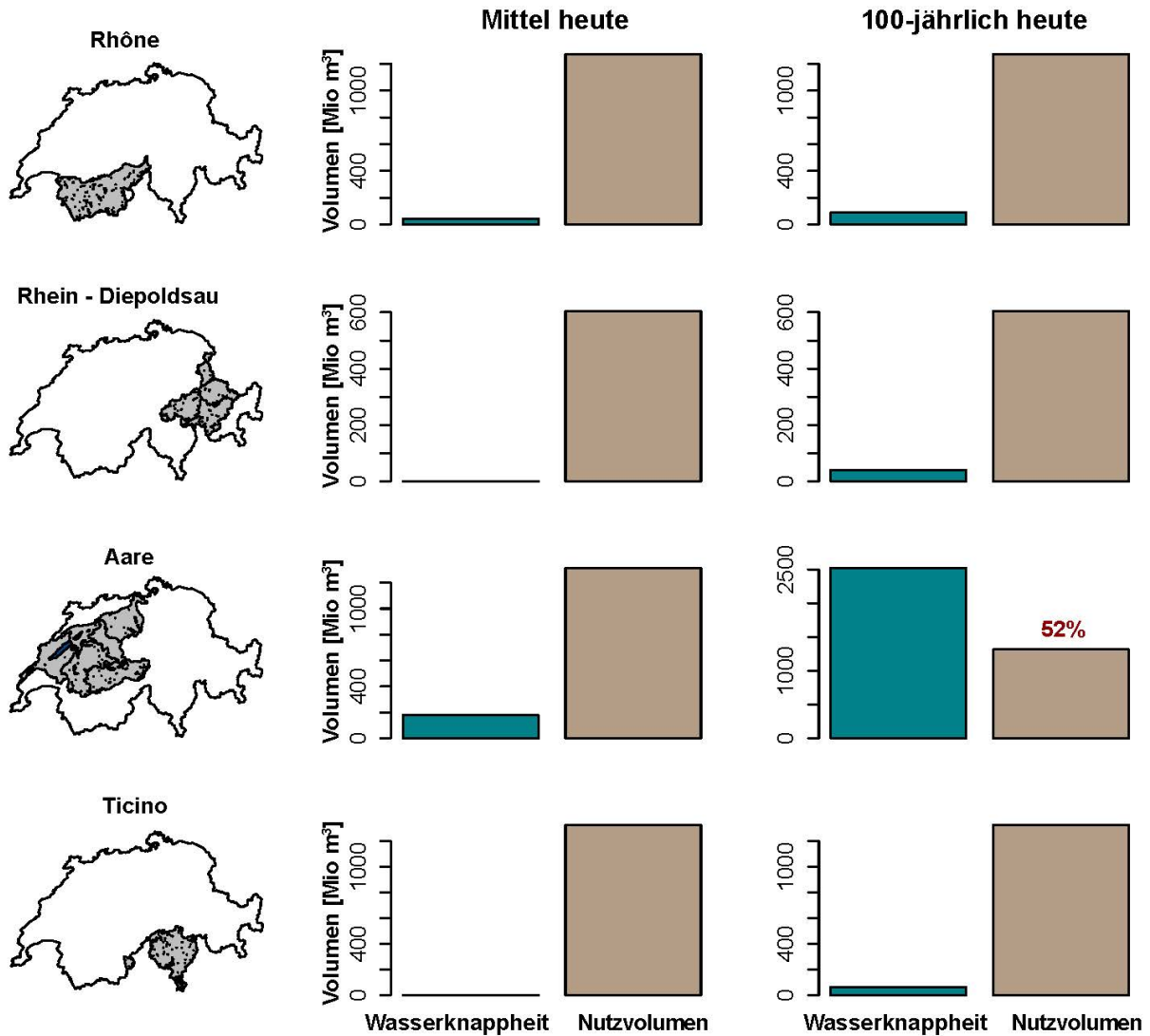


Abbildung 28: Wasserknappheit vs. Nutzvolumen unter **heutigen** mittleren und extremen (100-jährliche Knappheit) Bedingungen für die Grossregionen Rhône, Rhein-Diepoldsau, Aare und Ticino. Der prozentuale Deckungsgrad ist für Situationen angegeben, wo die Wasserknappheit das verfügbare Nutzvolumen übersteigt. Die einzelnen Grafiken werden auf unterschiedlichen Skalen gezeigt.

Auch unter zukünftigen Bedingungen kann regional entstehende Wasserknappheit über gespeichertes Wasser in oberliegenden Gebieten gedeckt werden (Abbildung 29). Eine Ausnahme bildet die Region Aare, wo ein Teil der entstehenden Wasserknappheit regional nicht ohne Grundwasserentnahmen gedeckt werden kann.

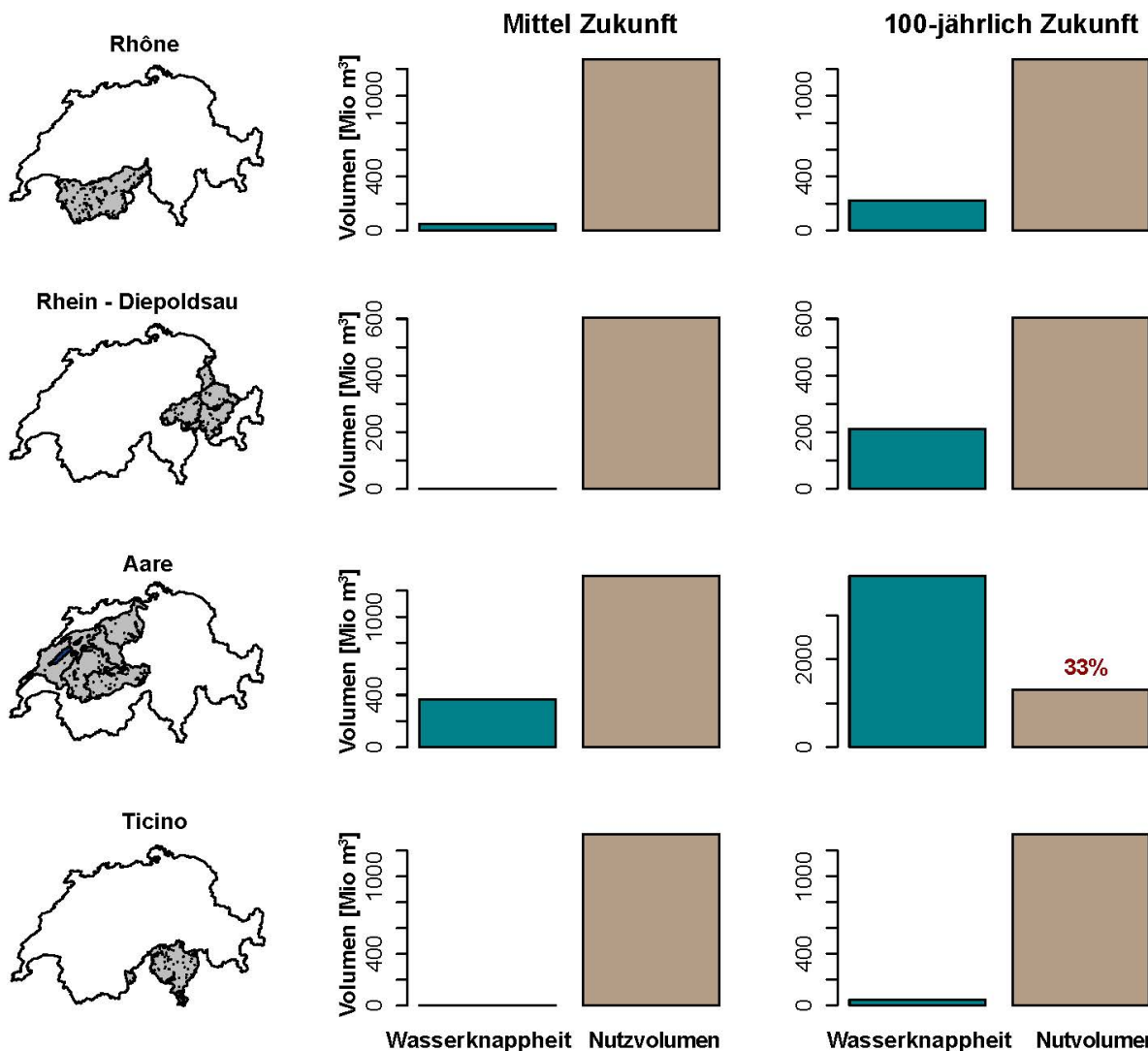


Abbildung 29: Wasserknappheit vs. Nutzvolumen unter **zukünftigen** mittleren und extremen (100-jährliche Knappheit) Bedingungen für die Grossregionen Rhône, Rhein-Diepoldsau, Aare und Ticino. Der prozentuale Deckungsgrad ist für Situationen angegeben, wo die Wasserknappheit das verfügbare Nutzvolumen übersteigt. Die einzelnen Grafiken werden auf unterschiedlichen Skalen gezeigt.

## 5 Diskussion und Ausblick

### Diskussion der Resultate

Obwohl auf der Skala Schweiz und unter Berücksichtigung von Jahresmittelwerten kein Handlungsbedarf in Bezug auf Wasserknappheit offensichtlich wird, lohnt sich der Blick auf regionale und saisonale Unterschiede, besonders in extremen Trockenheitssituationen.

Unter heutigen wie zukünftigen Bedingungen sind Gebiete im Mittelland eher von Wasserknappheit betroffen als Regionen in den Alpen. Dies hat sowohl mit den natürlichen Abflussbedingungen wie auch mit der Wassernachfrage zu tun. Alpine Gebiete profitieren in den Sommermonaten von den verzögerten Abflussbeiträgen aus der Schnee- und Gletscherschmelze. Gebiete im Mittelland sind unmittelbar vom Niederschlag abhängig, obwohl auch viele Flüsse im Mittelland vom Schmelzwasser profitieren. In Zukunft wird sich der Abfluss in den Sommermonaten sowohl in den alpinen wie den Mittellandgebieten verringern und sich die Abflussspitze ins Frühjahr verschieben. Die Wassernachfrage ist im Mittelland am grössten, insbesondere in grossen Ballungszentren (z.B. Region Zürich) und in Gebieten, wo intensiv Landwirtschaft betrieben wird (z.B. Seeland). In alpinen Gebieten ist die grosse Nachfrage v.a. auf die Wasserkraftproduktion zurückzuführen. Wasserkraftspeicher verlagern schon heute die Wasserverfügbarkeit vom Sommer in den Winter. In Zukunft könnten diese Speicher zusätzlich zur Verminderung der Sommerwasserknappheit genutzt werden.

Unter normalen Bedingungen reicht die Wasserverfügbarkeit zur Deckung der Nachfrage aus. Unter extremen Bedingungen, oder lokal in Zukunft auch in normalen Sommermonaten, kann jedoch die Nachfrage das natürliche Dargebot übersteigen. In diesen Fällen könnten Wasserspeicher Abhilfe schaffen, da sie einen zeitlichen Transfer von Wasser aus einer Saison mit Wasserüberschuss in eine Saison mit Wasserknappheit erlauben. Unsere Analyse hat jedoch gezeigt, dass die Speicher in der Regel nicht dort liegen, wo die grösste Sommerwasserknappheit besteht. Diese ist im Mittelland am grössten, kann dort aber nur bedingt vermindert werden, da nur ein kleiner Teil des Wassers (< 4%), welches in natürlichen Seen gespeichert ist, ohne Beeinträchtigung anderer Nutzungen oder der Gewässerökologie im Sommer auch tatsächlich genutzt werden kann. Ausserdem ist das zur Verfügung stehende Nutzvolumen von nicht regulierten Seen vom natürlichen Zu- und Abfluss abhängig und nur selten so hoch wie theoretisch möglich. In alpinen Gebieten hingegen, wo das nutzbare Volumen in den Wasserkraftspeichern gross wäre, tritt regional im Sommer nur in sehr extremen Fällen Wasserknappheit auf. Das Potenzial von Reservoirs zur Verminderung von lokaler Wasserknappheit ist daher sehr klein, wenn man die nutzbaren Volumen betrachtet. Betrachtet man die gesamte Speicherkapazität, ist das Potenzial in den Seeregionen im Mittelland relativ gross, weil dort mit der Bewässerung auch eine grosse Nachfrage vorliegt. In Gebieten, vorwiegend im Mittelland, wo die lokale Speicherkapazität die Knappheit übersteigt, könnte Wasser an unterliegende Gebiete mit Wasserknappheit abgegeben werden. Unsere Analysen haben gezeigt, dass künstlich hinzugefügte Abflussbeiträge aus Speichern für den natürlichen Abfluss wichtig sein können, insbesondere unter extremen Bedingungen. Bei extremer Wasserknappheit kann auch Grundwasser genutzt werden, falls nicht genügend Oberflächenwasser zur Verfügung steht. Lokal muss aber spezifisch abgeklärt werden ob genügend Grundwasser zur Verfügung steht, was eher in den Bereichen der grossen Schottergrundwasserleiter in den Talsohlen als in den Nebentälern mit relativ tiefen Grundwasserständen der Fall sein wird.

### Limitationen und Unsicherheiten

Die Berechnungen dieser Studie verwenden die aktuellsten Daten, welche zur Zeit auf nationaler Ebene vorliegen. Es fliessen beispielsweise die neusten Klimaszenarien (CH2018) und Gletscherrückzugszenarien ein. Trotzdem sind die Unsicherheiten und Vereinfachungen teilweise gross, was die Nachfragedaten und Modellergebnisse betrifft. Den Wassernachfrageberechnungen liegen, abgesehen vom ökologischen Bedarf und der Bewässerungsnachfrage, schweizweite Nutzungsdaten zugrunde. In der Realität schwankt der Wasserverbrauch pro Mitarbeiter z.B. im Industriesektor aber von Region zu Region. Auch die Nachfrageschätzungen für die Wasserkraft sind sehr grob, da sie mittels der kantonalen Speicherkurven, und nicht basierend auf tatsächlichen Turbinierwassermengen berechnet wurden. Ausserdem wurden nur direkte und keine indirekten Einzugsgebiete für die Berechnung der Wasserkraftnachfrage berücksichtigt. Die Nachfrage für die Wasserkraftproduktion wurde für diese Studie auf lokaler Ebene als verbrauchend betrachtet. Führt man eine ähnliche Analyse auf einer grösseren räumlichen Skala durch, müsste diese Nachfrage als nicht-verbrauchend betrachtet werden, da das Wasser in unterliegenden Gebieten wieder für andere Nutzungen zur Verfügung steht. Auch bei der Nachfrage nach Bewässerungswasser bestehen Unsicherheiten, z.B. wegen unsicherer zukünftige Trends in der Verdunstung (Barnett et al., 2005). Ein Grund für diese eher groben Schätzungen insbesondere der Nachfrage nach Bewässerung ist die limitierte Datenverfügbarkeit auf der Nachfrageseite, die eine detaillierte Validation der Nachfrageschätzungen unmöglich macht. Zuständig für die Erhebung und Bewirtschaftung der Daten zu Wassernutzung sind die Kantone (Federal Office for the Environment FOEN, 2014b). Daten zum Wasserverbrauch liegen selten vor und müssten auf lokaler Ebene erhoben werden. Die Wassernachfrage für Heiz- und Kühlzwecke wurde in dieser Studie nicht betrachtet, da dies eine Modellierung der Wassertemperatur voraussetzen würde. Des Weiteren wurde die Möglichkeit einer Mehrzwecknutzung in Bezug auf Hochwasserrückhalt nicht berücksichtigt (geo7, 2017; Volpi et al., 2018).

Neben den quantitativen Betrachtungen spielt die Wasserqualität (Nährstoffe, Temperatur, Verunreinigungen) eine wesentliche Rolle (Lissner et al., 2014), welche die Wasserverfügbarkeit für gewisse Nutzungen stark beeinflussen kann. Dieser Aspekt wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, sollte in zukünftigen Studien aber betrachtet werden.

Die Wassernachfrage wurde in dieser Studie entkoppelt vom Wasserdargebot betrachtet. In der Realität wäre die Nachfrage in gewissen Fällen, z.B. zu Kühlzwecken oder zur Gartenbewässerung, aber vom Dargebot abhängig. Solche Wechselwirkungen müssten in einem gekoppelten Nachfrage-Dargebotsmodell abgebildet werden, welche zurzeit jedoch nur in grober räumlicher Auflösung vorliegen und deshalb v.a. für globale Studien verwendet werden (Wada et al., 2016).

Neben den Schätzungen des Dargebots und der Nachfrage sind auch die berechneten Nutzvolumen mit Unsicherheit behaftet. Bei den Berechnungen wurde den Seen entweder über die Konzessionen oder aus den beobachteten Seepegeln ein Minimalwasserstand zugewiesen. In der Realität sind aber für gewisse Seen (z.B. Zürichsee) keine Minimalwasserstände, sondern Minimalabflussmengen definiert. Dem wurde hier keine Rechnung getragen.

### Mögliche Lösungsansätze

Der Wasserknappheit kann mit unterschiedlichen Ansätzen begegnet werden. Naheliegend ist (1) die *Erhöhung des Dargebots* (neue Speicher, Staumauererhöhungen, Regenwassersammlungen, etc.). Ein Lösungsansatz liegt auch in (2) der *besseren Nutzung und Verteilung bereits vorhandener Wasserressourcen*, also in Anpassungen auf der Dargebotsseite. Nicht zu vergessen ist aber auch das Einsparpotenzial durch (3) ein geeignetes *Nachfragemanagement*, d.h. die Frage, wie viel Wasser für welchen Zweck verwendet werden darf oder soll (Effizienzmassnahmen, Vermeidung von Leitungsverlusten, Anpassungen in der Landwirtschaft).

Die in dieser Studie vorliegenden Berechnungen des Potenzials von Wasserspeichern zur Bewältigung von Sommertrockenheit gehen davon aus, dass das Wasserdargebot in den Wasserspeichern uneingeschränkt für sämtliche Nutzungen zur Verfügung steht. Das ist heute aber so nicht der Fall. So sind Trinkwasserreservoirs primär für die Trinkwasserversorgung gedacht, und das Wasser der Stauseen steht den jeweiligen Konzessionsträgern zur Verfügung. Soll in Zukunft das vorhandene Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Wasserknappheit ausgeschöpft werden, müssten Speicher vermehrt als Multifunktionspeicher betrieben werden. Dies würde aber bedeuten, dass im Winter weniger Strom produziert werden könnte, was allenfalls mit Gewinneinbussen einhergehen würde. Für die Wasserkraft muss eine Mehrzwecknutzung aber nicht zwingend ein Nachteil sein. Im Gegenteil, die Mehrzwecknutzung könnte alternative Business-Modelle für die Speicher-Eigner bieten und die Resilienz der Region erhöhen (Jossen & Björnsen Gurung, 2018). In der Schweiz liegen, auch im Vergleich mit anderen Gebirgsländern, sehr wenige Erfahrungen für eine Regelung der Mehrzwecknutzung von Speichern vor (Björnsen Gurung et al., 2019). Es liegt auf der Hand, dass es für den Betrieb von Mehrzweckspeichern keine universelle Lösung gibt (Branche, 2015) und meist Kompromisse zwischen verschiedenen Akteuren gefunden werden müssten. In der Schweiz wäre die Berücksichtigung aller Akteure insbesondere wichtig, da aufgrund der Energiestrategie 2050 die Bedeutung von Winterstrom aus Wasserkraft und damit von der saisonalen Umlagerung in den Speicherseen zunimmt (UVEK, 2014). Während die Energiestrategie die Produktion von erneuerbaren Energien priorisiert, legen andere Regelwerke den Fokus auf landwirtschaftliche Nutzungen oder auf den Schutz natürlicher Abflussbedingungen und die Biodiversität (Clarvis et al., 2014). In diesem Spannungsfeld gilt es Prinzipien für das Management von Mehrzweckspeichern zu entwickeln, welche Bedürfnisse aus verschiedenen Sektoren wie Energie, Tourismus, Wasserversorgung und Ökologie berücksichtigen (Clarvis et al., 2014).

Neben der Mehrzwecknutzung von Speicherseen und natürlichen Seen beinhaltet die Strategie des Bundesrates zur Anpassung an den Klimawandel in Bezug zur Optimierung der Wasserverfügbarkeit (Götz et al., 2012) deshalb auch andere Massnahmen, wie die Anpassung der Seeregulierung, den Bau von Wasserspeichern für Bewässerungszwecke sowie die Optimierung der Verteilsysteme. Darüber hinaus sollen gemäss dieser Strategie klare Regeln für die Vorgehensweisen und für die Wasserverteilung bei Wassermangel erarbeitet werden.

Um Wasserknappheit zu vermindern, muss parallel bei der Nachfrage angesetzt werden. Ist nämlich die Nachfrage gross, ist auch dort der Handlungsspielraum für Spar- und Effizienzmassnahmen entsprechend gross. Auch kann ein allfälliger Spareffekt lokal direkt seine Wirkung zeigen. Hall und Borgomeo (2013) haben für verschiedene Massnahmen gezeigt, wie viel Wasser allenfalls eingespart werden könnte. Mit

einer intensiven Medienkampagne könnte die Wassernachfrage in Haushalten um rund 2% reduziert werden und mit einem privaten Bewässerungsverbot um rund 9%. Bei Massnahmen, welche beim Wasserverbrauch ansetzen, handelt es sich laut Hallegatte (2009) um so genannte *no regret* Strategien, welche reversibel und flexibel sind. Im Gegensatz dazu sind Massnahmen, welche bei den Reservoirs, d.h. Infrastrukturen, ansetzen weniger flexibel. Deshalb setzt die Strategie des Bundesrates zur Anpassung an den Klimawandel auf einen Paradigmenwechsel (Götz et al., 2012). Wassermanagement soll nicht vorwiegend angebotsorientiert, sondern mehr bedarfsorientiert ausgerichtet sein, um eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung zu ermöglichen. In Bezug zur Landwirtschaft heisst das, dass wo möglich trockenheitstolerante Kulturen und Sorten angebaut werden sollen, anstatt die bewässerten Flächen weiter auszudehnen.

### **Ausblick: Management? Bedeutung für Gesellschaft?**

Das Thema der Mehrzwecknutzung von Wasserspeichern ist in der Schweiz zwar nicht gänzlich neu, gewinnt durch die Auswirkungen des Klimawandels aber an Aktualität. Für die vorrausschauende Planung von Massnahmen zu zukünftig häufiger auftretenden Trockenheitssituationen zeichnen sich, wie bereits dargelegt, drei Handlungsstränge ab:

- (1) *Erhöhung der gespeicherten Wassermenge*, z.B. durch den Bau zusätzlicher Speicher (Dargebot erhöhen);
- (2) *Anpassungen der Wassernutzung und -verteilung* (Dargebot wird besser genutzt); und
- (3) *Anpassungen auf der Nachfrageseite*, z.B. Spar- und Effizienzmassnahmen insbesondere im Landwirtschaftssektor.

Die vorliegende Analyse macht deutlich, dass Option 1 v.a. für das Mittelland nicht aber für alpine Gebiete relevant ist, da die Wasserknappheit dort vergleichsweise gering ist. Schweizweit sind vor allem die Optionen (2) und (3) für die Schweiz zielführend. Statt neue Speicher zu bauen, gilt es in erster Linie sämtliche Möglichkeiten auszuschöpfen, wie durch kluge Vernetzung, vorausschauende Planung, technologische Fortschritte oder durch die sektorübergreifende Zusammenarbeit bestehende Wasserspeicher optimaler, d.h. auch ressourcenschonender, genutzt werden können. Es gilt die Mehrzwecknutzung so zu gestalten, dass bisherige und neue Nutzer möglichst als Gewinner hervorgehen und auch der Anspruch der Natur adäquat berücksichtigt wird. Dies bedarf eines gesellschaftspolitischen Verhandlungsprozesses, denn die Optionen der Mehrzwecknutzung wie auch die Möglichkeiten der Steuerung der Nachfrage sind vielfältig. Für welche Optionen wir uns letztendlich aussprechen, ist eine Frage der Priorisierung und gesellschaftlicher Werte: Bevorzugen wir eine möglichst kostengünstige Mehrzwecknutzung oder soll sie vor allem umweltschonend sein? Ist uns eine wirtschaftlich profitable Lösung wichtig oder bedingt deren Umsetzung in erster Linie eine hohe gesellschaftliche Akzeptanz? Übernehmen wir etablierte Gesetze oder Regelungen oder wagen wir eine grundlegende Anpassung oder Neugestaltung? Für die Wahl konkreter Optionen der zukünftigen Mehrzwecknutzung müssen zuerst die unterschiedlichen Möglichkeiten aufgezeigt und die entstehenden Kosten und Auswirkungen transparent dargestellt werden (z.B. Auswirkungen auf die Stromproduktion oder Ökologie). Nur so entsteht eine tragfähige Entscheidungsgrundlage für die Priorisierung verschiedener Optionen.

Nicht alles was wünschbar ist, ist tatsächlich machbar. Wie die vorliegende Analyse vielerorts angedeutet hat, vereint die Thematik der Mehrzwecknutzung eine Vielzahl an Akteuren, gesetzlichen Bestimmungen und Reglementen, baut nicht selten auf historisch verankerten Gegebenheiten auf (z.B. Konzessionen),

während sie gleichzeitig auf neue, teils widersprüchliche Ansprüche reagieren sollte (z.B. Zielkonflikte zwischen der Umsetzung der Energiestrategie 2050 und den Zielsetzungen der Landwirtschaft). Ob die gewünschten Optionen umsetzbar und erreichbar sind, hängt ferner davon ab, welche Datengrundlagen bestehen (z.B. was bedeutet eine nachhaltige Grundwassernutzung oder wie viel Bewässerungswasser wird in der Landwirtschaft tatsächlich verbraucht?) oder welche alternativen Handlungsoptionen vorliegen (z.B. Vernetzung von regionalen Wasserversorgungen). Es liegt eigentlich auf der Hand: Bevor sich eine Gemeinde, eine Region oder ein Kanton für oder gegen eine mögliche Mehrzwecknutzung entscheidet, muss sorgfältig geprüft werden, welche Variante rechtlich, wirtschaftlich, gesellschaftlich und aus der Sicht der Umwelt tatsächlich realisierbar ist.

Nicht zu unterschätzen ist der Weg zum Ziel. Sollen nämlich Konzessionen neu ausgehandelt, Wehrreglemente sowie Restwassermengen hinterfragt oder Nutzungsansprüche priorisiert werden, wird in anderen Worten am *Status quo* der heutigen Wassernutzung gerüttelt, bedingt dies einen Wandel. Dieser Wandel besteht eventuell nur aus einer geringen Anpassung, möglicherweise bedingt er aber auch einen fundamentalen Umbau des heutigen Wassermanagements. Klar ist, dass sich die Planung rund um das Thema Mehrzwecknutzung nicht auf den Sektor der Wasserwirtschaft beschränken darf, sondern sämtliche Bereiche (Raumplanung, Landwirtschaft, Energieversorgung, etc.) miteinschliessen muss. Die geplante Phase 3 des Projekt CH2018-Wasserspeicher soll dazu weitere Grundlagen erarbeiten.

## 6 Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Berechnungen des Wasserdargebots, der Wassernachfrage und des (nutzbaren) Volumens der bestehenden Wasserspeicher in 307 Teilgebieten der Schweiz haben aufgezeigt, dass bereits heute, aber noch verstärkt in Zukunft (Ende des 21. Jahrhunderts), in niederschlagsarmen Sommermonaten in grossen Teilen des Mittellandes mit regionaler Wasserknappheit zu rechnen ist. Auch in Zukunft stellt das Auftreten von Wasserknappheit aber eine Extremsituation und nicht den Normalfall dar. In den Alpen jedoch wird es regional kaum zu Sommerwasserknappheit kommen.

Die Ergebnisse haben deutlich gemacht, dass die Gesamtspeicherkapazität der bestehenden Wasserspeicher (künstliche Reservoirs und Seen) viel grösser ist als das totale potenzielle Wasserdefizit im Sommer – selbst in zukünftigen extremen Jahren. Die aktuell gültigen Wehrreglemente und Konzessionen erlauben durchschnittlich aber nur die Nutzung von 3.5% des in einem See gespeicherten Wasservolumens. Je nach See variiert der nutzbare Teil des Volumens am Gesamtvolumen zwischen fast 0 bis 20 Prozent. Ausserdem befinden sich bereits vorhandene Wasserspeichern weit entfernt von den Hotspots bezüglich Sommerwasserknappheit. Deshalb muss das Potenzial der bestehenden Wasserspeicher, lokale Wasserknappheit in zukünftigen trockenen Sommern abzufedern, als **eher gering** eingestuft werden, falls die aktuellen Reglemente und Konzessionen auch zukünftig gelten. Falls aber in aussergewöhnlich trockenen Sommern, wie z.B. 2018, eine Unterschreitung der reglementarisch vorgegebenen Pegeluntergrenze zugelassen wird, erhöht sich folglich auch das Potenzial zur Deckung von Wasserknappheit, insbesondere im Seeland, in der Region Zürichsee und in der Zentralschweiz, deutlich. Während Speicher und Seen lokal oft ein kleines Potenzial zur Verminderung von Wasserknappheit haben, da die Verfügbarkeit von Nutzvolumen und das Auftreten von Knappheit örtlich oft nicht übereinstimmen, ist das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Wasserknappheit in unterliegenden Gebieten in den meisten hydrologischen Grossregionen beträchtlich. Deshalb sollte Wassermanagement integral betrieben werden und allenfalls die Möglichkeit von Mehrfachnutzungen geprüft werden, um in Extremsituationen Regionen am Unterlauf der Stauseen versorgen zu können. Neue Speicherseen in post-glazialen Gebieten würden regional kein grosses Potenzial hinsichtlich der Bewältigung von Sommerwasserknappheit darstellen, weil in diesen und den unterliegenden Gebieten (auch in Zukunft) kaum Wasserknappheit besteht. Hingegen könnten neue (künstliche) Wasserspeicher im Mittelland bereits in zukünftigen „normalen“ Jahren sommerliche Wasserknappheit überbrücken.

## 7 Referenzen

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Aschwanden, H., & Kan, C. (1999). *Die Abflussmenge Q347*. Bern.
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303–309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- Björnsen Gurung, A., Brunner, M., Stähli, M., Kellner, E., Clivaz, M., Reynard, E., ... Schmocker-Fackel, P. (2019). Alpine multi-purpose reservoirs: Future potential and relevance. In *Forum Alpinum 2018* (p. in press). Reutte in Tirol: Austrian Academy of Sciences.
- Blanc, P., & Schädler, B. (2014). *Water in Switzerland - an overview*. Bern.
- Branche, E. (2015). *Multipurpose water uses of hydropower reservoirs*. Bourget du Lac Cedex.
- Brunner, M. I., Zappa, M., & Stähli, M. (2018). Scale matters : effects of temporal and spatial data resolution on water scarcity assessments. *Advances in Water Resources*, 123, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.11.013>
- Chen, G., & Balakrishnan, N. (1995). A general purpose approximate goodness-of-fit test. *Journal of Quality Technology*, 2, 154–161.
- Clarvis, M. H., Fatichi, S., Allan, A., Fuhrer, J., Stoffel, M., Romerio, F., ... Toreti, A. (2014). Governing and managing water resources under changing hydro-climatic contexts: The case of the upper Rhone basin. *Environmental Science and Policy*, 43, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.11.005>
- Farinotti, D., Pistocchi, A., & Huss, M. (2016). From dwindling ice to headwater lakes: could dams replace glaciers in the European Alps? *Environmental Research Letters*, 11(5), 054022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054022>
- Federal Office for the Environment FOEN. (2014a). *Faktenblätter zur Seeregulierung. Regulierung Zürichsee*. Ittigen. Retrieved from [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/fachinfo-daten/seeregulierung\\_zuerichsee.pdf.download.pdf/seeregulierung\\_zuerichsee.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/naturgefahren/fachinfo-daten/seeregulierung_zuerichsee.pdf.download.pdf/seeregulierung_zuerichsee.pdf)
- Federal Office for the Environment FOEN. (2014b). *Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken, Herausforderungen und Empfehlungen*. Bern.
- Federal Office for the Environment FOEN. (2016). *Research Concept: Climate Change and its consequences on Hydrology in Switzerland Hydro – CH2018, a NCCS Focus Area*. Ittigen. Retrieved from <https://www.bafu.admin.ch/bafu/en/home/topics/water/info-specialists/state-of-waterbodies/state-of-watercourses/water-flow-and-flow-regime-in-watercourses/climate-change-and-hydrology/hydro-ch2018.html>
- Federal Office for the Environment FOEN. (2017). Groundwater bodies of Switzerland. Retrieved December 11, 2018, from [https://map.geo.admin.ch/?layers=ch.bafu.permafrost,ch.bafu.grundwasserkoerper&topic=ech&lang=en&glayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&layers\\_opacity=0.75,0.75&E=2676762.08&N=1185961.25&zoom=2&layers\\_visibility=false,true](https://map.geo.admin.ch/?layers=ch.bafu.permafrost,ch.bafu.grundwasserkoerper&topic=ech&lang=en&glayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&layers_opacity=0.75,0.75&E=2676762.08&N=1185961.25&zoom=2&layers_visibility=false,true)
- Federal Office for the Environment FOEN. (2018a). Jahrestabelle Messstation Zürich Unterherd. Retrieved February 14, 2019, from [https://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/jahrestabellen/2099Q\\_16.pdf%0Ahttps://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/jahrestabellen/2099Q\\_03.pdf%0A](https://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/jahrestabellen/2099Q_16.pdf%0Ahttps://www.hydrodaten.admin.ch/lhg/sdi/jahrestabellen/2099Q_03.pdf%0A)
- Federal Office for the Environment FOEN. (2018b). Stationen und Daten. Retrieved February 1, 2018, from <https://www.hydrodaten.admin.ch/de/stationen-und-daten.html>
- Federal Office of Meteorology and Climatology. (2018). *Standard normals 1961 to 1990: Precipitation total. Normal*

*values per measured parameter.* Zurich.

- Federal Office of Topography swisstopo. (2018). *swissALTI3D. Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz.* Bern.
- Freiburghaus, M. (2009). Wasserbedarf der Schweizer Wirtschaft. *Gas-Wasser-Abwasser (Gwa)*, 12, 1001–1009.
- Freiburghaus, M. (2015). Wasserverbrauch. *Aqua & Gas*, 72–79.
- Fuhrer, J. (2010). *Abschätzung des Bewässerungsbedarfs in der Schweizer Landwirtschaft - Abschlussbericht.* Forschungsgruppe Lufthygiene/Klima. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Reckenholz.
- Fuhrer, J., & Calanca, P. (2014). Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: Eine regionale Defizitanalyse. *Agrarforschung Schweiz*, 5(6), 256–263.
- Gaudard, L., Romerio, F., Dalla Valle, F., Gorret, R., Maran, S., Ravazzani, G., ... Volonterio, M. (2014). Climate change impacts on hydropower in the Swiss and Italian Alps. *Science of the Total Environment*, 493, 1211–1221. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.012>
- geo7. (2017). *Multifunktionsspeicher im Oberhasli.* Bern.
- Götz, A., Burkhardt, A., Manser, R., Marendaz, E., Willi, H. P., Hohmann, R., ... Probst, T. (2012). Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012, 66.
- Hall, J., & Borgomeo, E. (2013). Risk-based principles for defining and managing water security. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(2002). <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0407>
- Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global Environmental Change*, 19(2), 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.12.003>
- Huss, M., & Hock, R. (2015). A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*, 3(September), 1–22. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00054>
- Iseli, G. (2015). *Künstliche Beschneidung in der Schweiz: Ausmass und Auswirkungen.* Bern.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Johnson, L. E. LE. (2009). *Geographic Information Systems in Water Resources Engineering.* Boca Raton: CRC Press.
- Jossen, L., & Björnsen Gurung, A. (2018). Mehrzweckspeichern in der Schweiz und ihr Beitrag zur regionalen Resilienz. *Energie Wasser Luft, Heft 2*, 108–112.
- Kanton Obwalden. (2016). Hochwassersicherheit Sarneraatal. Retrieved December 15, 2018, from [http://www.hochwasserschutz-ow.ch/fileadmin/download/sarneraa/U\\_Info\\_20161114\\_Praesentation\\_WEB\\_red.pdf](http://www.hochwasserschutz-ow.ch/fileadmin/download/sarneraa/U_Info_20161114_Praesentation_WEB_red.pdf)
- Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B., & Weingartner, R. (2010). How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? - A framework for a comprehensive assessment. *Advances in Geosciences*, 27, 111–119. <https://doi.org/10.5194/adgeo-27-111-2010>
- Lissner, T. K., Sullivan, C. A., Reusser, D. E., & Kropp, J. P. (2014). Determining regional limits and sectoral constraints for water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 4039–4052. <https://doi.org/10.5194/hess-18-4039-2014>
- Loukas, A., Mylopoulos, N., & Vasiliades, L. (2007). A modeling system for the evaluation of water resources management strategies in Thessaly, Greece. *Water Resources Management*, 21(10), 1673–1702. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9120-5>
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., ... Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756.

- <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- MySwitzerland. (2018). MySwitzerland snow reports. Retrieved August 25, 2018, from [https://snow.myswitzerland.com/snow\\_reports](https://snow.myswitzerland.com/snow_reports)
- National Centre for Climate Services. (2018). *CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland. CH2018*. Zurich.
- Panduri, R., & Hertach, M. (2013). *Dokumentation minimales Geodatenmodell Stauanlagen unter Bundesaufsicht*. Ittigen.
- Patwardhan, B. A. S., Nieber, J. L., & Johns, E. L. (1990). Effective rainfall estimation methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(2), 182–193.
- Ranzani, A., Bonato, M., Patro, E., Gaudard, L., & De Michele, C. (2018). Hydropower future: between climate change, renewable deployment, carbon and fuel prices. *Water*, 10(9), 1197. <https://doi.org/10.3390/w10091197>
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J. P., & Menzel, A. (2006). Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Annals of Forest Science*, 63(6), 569–577. <https://doi.org/10.1051/forest:2006043>
- Schaepli, B. (2015). Projecting hydropower production under future climates: a guide for decision-makers and modelers to interpret and design climate change impact assessments. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 271–289. <https://doi.org/10.1002/wat2.1083>
- Schaepli, B., & Gupta, H. V. (2007). Do Nash values have value? *Hydrological Processes*, 21, 2075–2080. <https://doi.org/10.1002/hyp.6825>
- Schär, C., Vidale, P. L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M. A., & Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer. *Nature*, 427(January), 332–336. <https://doi.org/10.1038/nature02230.1>
- Sinreich, M., Kozel, R., Lützenkirchen, V., Matousek, F., Jeannin, P.-Y., Löw, S., & Stauffer, F. (2012). Grundwasserressourcen der Schweiz. *Aqua & Gas*, 9, 16–28.
- Smakhtin, V. Y., & Masse, B. (2000). Continuous daily hydrograph simulation using duration curves of a precipitation index. *Hydrological Processes*, 14, 1083–1100.
- Swiss Federal Office of Energy. (2017). Electricity statistics: Füllungsgrad der Speicherseen. Retrieved June 1, 2018, from <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html>
- Swiss Federal Office of Energy SFOE. (2018). Statistik der Wasserkraftanlagen der Schweiz. Retrieved January 1, 2018, from [http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/index.html?lang=de&dossier\\_id=01049](http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/index.html?lang=de&dossier_id=01049)
- Swiss Federal Statistical Office. (2018). Arbeitsstätten und Beschäftigte nach Gemeinde, Wirtschaftssektor und Grössenklasse. Retrieved March 1, 2018, from [https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/industriedienstleistungen/unternehmen-beschaeftigte/wirtschaftsstruktur-unternehmen.assetdetail.px-x-0602010000\\_102.html](https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/industriedienstleistungen/unternehmen-beschaeftigte/wirtschaftsstruktur-unternehmen.assetdetail.px-x-0602010000_102.html)
- Swiss Federal Statistical Office FSO. (2015). Statistischer Atlas der Schweiz. Logiernächte. Gemeinden. Retrieved April 1, 2018, from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/regionalstatistik/atlanten/statistischer-atlas-schweiz.html>
- Swiss Federal Statistical Office FSO. (2016). *Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung der Kantone 2015-2045*. Bern. Retrieved from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/aktuell/neue-veroeffentlichungen.gnpdetail.2016-0374.html>
- Swiss Federal Statistical Office FSO. (2017). Ständige und nichtständige Wohnbevölkerung nach Kanton, Anwesenheitsbewilligung, Geburtsort, Geschlecht und Alter. Retrieved April 1, 2018, from <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.5887496.html>

- Teich, M., Lardelli, C., Bebi, P., Gallati, D., Kytzia, S., Pohl, M., ... Rixen, C. (2007). *Klimawandel und Wintertourismus: Ökonomische und ökologische Auswirkungen von technischer Beschneigung*. Davos.
- Uhlmann, B., Goyette, S., & Beniston, M. (2009). Sensitivity analysis of snow patterns in Swiss ski resorts to shifts in temperature, precipitation and humidity under conditions of climate change. *International Journal of Climatology*, 29, 1048–1055. <https://doi.org/10.1002/joc.1786>
- UVEK. (2014). *Prioritäten der Energiestrategie 2050*. Bern.
- Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE). (2012). *Strom 2011-2012. Zahlen und Fakten*. Lausanne.
- Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., & Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environmental Modelling & Software*, 24, 1209–1222. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.04.001>
- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., & Weingartner, R. (2009). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland—Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *Journal of Hydrology*, 377(1), 208–225. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.022>
- Viviroli, D., Gurtz, J., & Zappa, M. (2007). The hydrological modelling system PREVAH. Part II - Physical model description. *Geographica Bernensia*, 40, 1–89.
- Volpi, E., Di Lazzaro, M., Bertola, M., Viglione, A., & Fiori, A. (2018). Reservoir effects on flood peak discharge at the catchment scale. *Water Resources Research*, accepted for publication. <https://doi.org/10.1029/2018WR023866>
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., ... Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9(1), 175–222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>
- Weber, M., & Schild, A. (2007). *Stand der Bewässerung in der Schweiz- Bericht zur Umfrage 2006*. Bern.
- Weingartner, R., Reynard, E., Graefe, O., Herweg, K., Homewood, C., Kauzlaric, M., ... Schneider, F. (2014). *MontanAqua: Wasserbewirtschaftung in Zeiten von Knappheit und globalem Wandel – Wasserbewirtschaftungsoptionen für die Region Crans-Montana- Sierre im Wallis*. Bern.
- Zappa, M., & Kan, C. (2007). Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(3), 375–389. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-375-2007>
- Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*, 13, 1125–1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>

## 8 Anhang

### 8.1 Modellketten

Tabelle 2: Übersicht über die in der Studie verwendeten 39 Klimaketten: Globales Zirkulationsmodell (GCM), Regionales Klimamodell (RCM), representative concentration pathway (RCP) und räumliche Auflösung.

| GCM              | RCM               | RCP | Auflösung |
|------------------|-------------------|-----|-----------|
| ICHEC-EC-EARTH   | DMI-HIRHAM5       | 2.6 | EUR-11    |
| ICHEC-EC-EARTH   | DMI-HIRHAM5       | 4.5 | EUR-11    |
| ICHEC-EC-EARTH   | DMI-HIRHAM5       | 8.5 | EUR-11    |
| ICHEC-EC-EARTH   | SMHI-RCA4         | 2.6 | EUR-11    |
| ICHEC-EC-EARTH   | SMHI-RCA4         | 4.5 | EUR-11    |
| ICHEC-EC-EARTH   | SMHI-RCA4         | 8.5 | EUR-11    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | SMHI-RCA4         | 4.5 | EUR-11    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | SMHI-RCA4         | 8.5 | EUR-11    |
| MPI-M-MPI-ESM-LR | SMHI-RCA4         | 4.5 | EUR-11    |
| MPI-M-MPI-ESM-LR | SMHI-RCA4         | 8.5 | EUR-11    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | CLMcom-CCLM4-8-17 | 8.5 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | CLMcom-CCLM5-0-6  | 8.5 | EUR-44    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | CLMcom-CCLM5-0-6  | 8.5 | EUR-44    |
| MIROC-MIROC5     | CLMcom-CCLM5-0-6  | 8.5 | EUR-44    |
| MPI-M-MPI-ESM-LR | CLMcom-CCLM5-0-6  | 8.5 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | DMI-HIRHAM5       | 2.6 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | DMI-HIRHAM5       | 2.6 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | DMI-HIRHAM5       | 4.5 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | DMI-HIRHAM5       | 8.5 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | DNMI-RACMO22E     | 4.5 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | DNMI-RACMO22E     | 8.5 | EUR-44    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | DNMI-RACMO22E     | 2.6 | EUR-44    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | DNMI-RACMO22E     | 4.5 | EUR-44    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | DNMI-RACMO22E     | 8.5 | EUR-44    |
| CCma-CanESM2     | SMHI-RCA4         | 4.5 | EUR-44    |
| CCma-CanESM2     | SMHI-RCA4         | 8.5 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | SMHI-RCA4         | 2.6 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | SMHI-RCA4         | 4.5 | EUR-44    |
| ICHEC-EC-EARTH   | SMHI-RCA4         | 8.5 | EUR-44    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | SMHI-RCA4         | 2.6 | EUR-44    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | SMHI-RCA4         | 4.5 | EUR-44    |
| MOHC-HadGEM2-ES  | SMHI-RCA4         | 8.5 | EUR-44    |
| MIROC-MIROC5     | SMHI-RCA4         | 2.6 | EUR-44    |
| MIROC-MIROC5     | SMHI-RCA4         | 4.5 | EUR-44    |
| MIROC-MIROC5     | SMHI-RCA4         | 8.5 | EUR-44    |
| MPI-M-MPI-ESM-LR | SMHI-RCA4         | 2.6 | EUR-44    |
| MPI-M-MPI-ESM-LR | SMHI-RCA4         | 4.5 | EUR-44    |

|                  |           |     |        |
|------------------|-----------|-----|--------|
| MPI-M-MPI-ESM-LR | SMHI-RCA4 | 8.5 | EUR-44 |
| NCC-NorESM1-M    | SMHI-RCA4 | 2.6 | EUR-44 |
| NCC-NorESM1-M    | SMHI-RCA4 | 4.5 | EUR-44 |
| NCC-NorESM1-M    | SMHI-RCA4 | 8.5 | EUR-44 |

## 8.2 Füllungsgrad Speicherseen

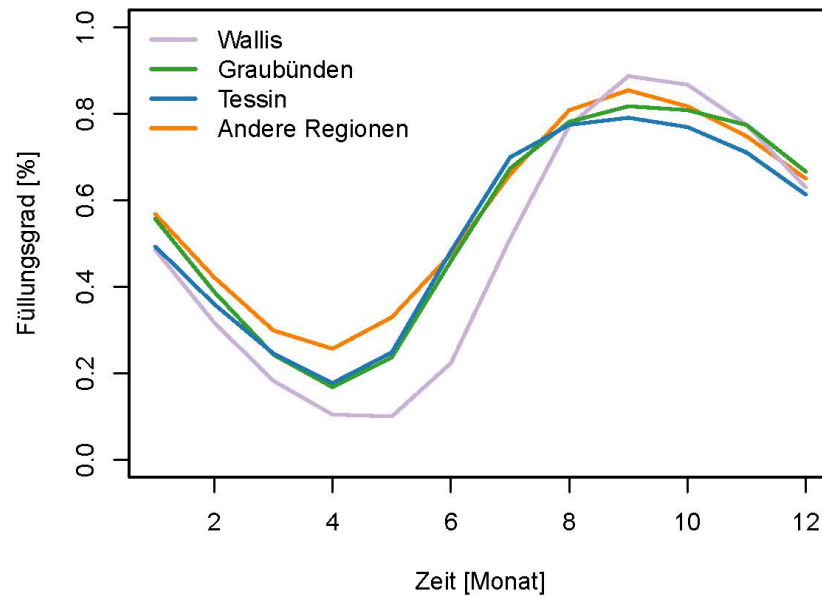
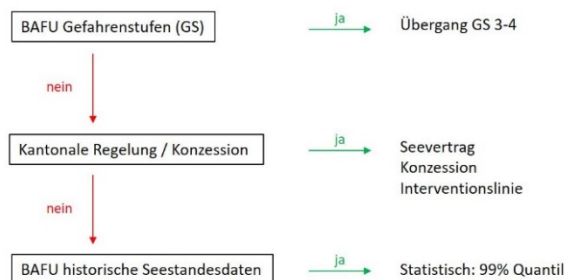


Abbildung 30: Mittlerer Füllungsgrad der Speicherseen über die Jahre 2005-2017 pro Region: Wallis, Graubünden, Tessin, andere Regionen (Swiss Federal Office of Energy, 2017).

## 8.3 Herleitung maximaler und minimaler Wasserspiegel

### Maximaler Wasserspiegel (HWG)



### Minimaler Wasserspiegel (NWG)



Abbildung 31: Bestimmung Hochwassergrenze (HWG) und Niedrigwassergrenze (NWG).

## 8.4 Speicherkapazitäten und Nutzvolumen grosser Seen

Tabelle 3: Zusammenstellung ausgewählter Seen mit Fläche, Speicherkapazität und Nutzvolumen sowie das Verhältnis von Nutzvolumen zu Speicherkapazität.

| Gewässername                        | Fläche [km²] | Speicherkapazität [Mio m³] | Nutzvolumen [Mio m³] | Nutz-/ Speicherkapazität [%] |
|-------------------------------------|--------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|
| <b>Natürliche regulierte Seen</b>   |              |                            |                      |                              |
| Ägerisee                            | 7.2          | 357                        | 4                    | 1                            |
| Bielensee                           | 39.8         | 1240                       | 70                   | 6                            |
| Brienzersee                         | 29.8         | 5170                       | 75                   | 1                            |
| Hallwilersee                        | 10.3         | 215                        | 5                    | 2                            |
| Lac de Neuchâtel                    | 217.9        | 14170                      | 410                  | 3                            |
| Lac Léman                           | 581.3        | 89900                      | 320                  | 0.4                          |
| Lago di Lugano                      | 48.7         | 6560                       | 71                   | 1                            |
| Lago Maggiore                       | 212.3        | 37100                      | 814                  | 2                            |
| Lej da Segl                         | 4.1          | 137                        | 4                    | 3                            |
| Lei da Silvaplana                   | 3.2          | 135                        | 4                    | 3                            |
| Murtensee                           | 23           | 600                        | 51                   | 9                            |
| Pfäeffikersee                       | 3.3          | 58                         | 3                    | 6                            |
| Sempachersee                        | 14.5         | 660                        | 11                   | 2                            |
| Thunersee                           | 48.4         | 6500                       | 63                   | 1                            |
| Vierwaldstättersee                  | 113.6        | 11800                      | 113                  | 1                            |
| Zugersee                            | 38.3         | 3210                       | 50                   | 2                            |
| Zürichsee                           | 90.1         | 3900                       | 62                   | 2                            |
| <b>Natürliche unregulierte Seen</b> |              |                            |                      |                              |
| Baldeggersee                        | 5.3          | 178                        | 6                    | 3                            |
| Bodensee-Obersee                    | 472          | 47000                      | 1171                 | 2                            |
| Bodensee- Untersee                  | 62           | 800                        | 147                  | 18                           |
| Greifensee                          | 8.6          | 161                        | 11                   | 7                            |
| Sarnersee                           | 7.5          | 244                        | 9                    | 4                            |
| Walensee                            | 24.1         | 2490                       | 93                   | 4                            |
| <b>Speicherseen</b>                 |              |                            |                      |                              |
| Davoser See                         | 0.59         | 15.2                       | 0.3                  | 2                            |
| Engstlensee                         | 0.44         | 10.7                       | 2                    | 19                           |
| Lac de Joux                         | 9.56         | 148.7                      | 30                   | 20                           |
| Lago di Poschiavo                   | 1.98         | 111.1                      | 15                   | 14                           |

## 8.5 Quellen Nutzvolumen & Pegelstände

Tabelle 4: Quellen Nutzvolumen und Hoch- und Niedrigwassergrenzen

| GEWISS-Nr.               | Name               | Datenquelle                                                                                                                                                       | Bemerkung                                                                                                    |
|--------------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>regulierte Seen</b>   |                    |                                                                                                                                                                   |                                                                                                              |
| 9270                     | Aegerisee          | Unterlagen Zemp, Telefon 27.9.18                                                                                                                                  | NWG: intern mit KW geregelt; ab dann nur noch Restwasser erlaubt / HWG: Schwellengrenze gemäss Seevertrag    |
| 9148                     | Bielsee            | BAFU Daten Inderwildi; excel 'Kemdaten Seer', Faktenblätter zur Seeregulierung (bafu.admin.ch/naturgefahren), AWA Unterlagen Wehren; Diagramme mit HWG und NWG    | NWG: gemäss AWA Diagramm / HWG: BAUFU Faktenblatt, Übergang GS 3-4 = AWA Diagramm / Seevolumen nach BAUFU    |
| 9089                     | Brierzersee        | BAFU Gefahrenstufen (hydrodaten.admin.ch), AWA Unterlagen Wehren; Diagramme mit HWG und NWG                                                                       | NWG: gemäss AWA Diagramm / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4 = AWA Diagramm                         |
| 9172                     | Hallwilersee       | BVU Daten Lierert; Diagramm mit Interventionslinie und Solikurvenverlauf                                                                                          | NWG/HWG: Interventionslinien                                                                                 |
| 9151                     | Lac de Neuchâtel   | BAFU Daten Inderwildi; excel 'Kemdaten Seer', BAUFU Gefahrenstufen (hydrodaten.admin.ch), AWA Unterlagen Wehren; Diagramme mit HWG und NWG                        | NWG: gemäss AWA Diagramm / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4 = AWA Diagramm / Seevolumen nach BAUFU |
| 9510                     | Lej da Segl        | BAFU Historische Wasserstandsdaten                                                                                                                                | NWG/HWG: gemäss 1% resp. 99% Quantil                                                                         |
| 9497                     | Lej da Silvaplana  | BAFU Historische Wasserstandsdaten                                                                                                                                | NWG/HWG: gemäss 1% resp. 99% Quantil                                                                         |
| 9294                     | Murtensee          | BAFU Daten Inderwildi; excel 'Kemdaten Seer', BAUFU Gefahrenstufen (hydrodaten.admin.ch), AWA Unterlagen Wehren; Diagramme mit HWG und NWG                        | NWG: gemäss AWA Diagramm / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4 = AWA Diagramm / Seevolumen nach BAUFU |
| 9022                     | Pfäffikersee       | AWEL Daten Eisenhut; Reguliervvertrag 1989; BAUFU Historische Wasserstandsdaten                                                                                   | NWG: Sollwert Juli/August aus Grafik / HWG: gemäss 99% Quantil                                               |
| 9163                     | Sempachersee       | BAFU Historische Wasserstandsdaten                                                                                                                                | NWG/HWG: gemäss 1% resp. 99% Quantil                                                                         |
| 9073                     | Thunersee          | BAFU Gefahrenstufen (hydrodaten.admin.ch), AWA Unterlagen Wehren; Diagramme mit HWG und NWG                                                                       | NWG: gemäss AWA Diagramm / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4 = AWA Diagramm                         |
| 9179                     | Vierwaldstättersee | BAFU Daten Inderwildi; excel 'Kemdaten Seer', Faktenblätter zur Seeregulierung (bafu.admin.ch/naturgefahren), Wehrglement (Stand 2011)                            | NWG: niedrigster Wert des Toleranzbereichs / HWG: BAUFU Faktenblatt, Übergang GS 3-4 / Seevolumen nach BAUFU |
| 9175                     | Zugersee           | Unterlagen Zemp; Mail (3.5.18) und Telefon (27.9.18), BAUFU Gefahrenstufen (hydrodaten.admin.ch)                                                                  | NWG: Seespiegel entspricht Q347 / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4                                 |
| 9050                     | Zürchersee         | BAFU Daten Inderwildi; excel 'Kemdaten Seer', Faktenblätter zur Seeregulierung (bafu.admin.ch/naturgefahren), Wehrglement (2003), Bestimmung zum Reglement (1997) | NWG: minimaler Wasserstand im Sommer / HWG: BAUFU Faktenblatt, Übergang GS 3-4 / Seevolumen nach BAUFU       |
| 9234                     | Lungensee          | BAFU Daten Inderwildi; Lakedata-Geodatabase mit Nutzvolumenangaben                                                                                                | Nutzvolumen direkt aus Geodatabase                                                                           |
| 9751&9752                | Lac de Joux/Brenet | BAFU Daten Inderwildi; Lakedata-Geodatabase mit Nutzvolumenangaben                                                                                                | Nutzvolumen direkt aus Geodatabase                                                                           |
| 9417                     | Lago di Poschiavo  | BAFU Daten Inderwildi; Lakedata-Geodatabase mit Nutzvolumenangaben                                                                                                | Nutzvolumen direkt aus Geodatabase                                                                           |
| 9534                     | Davosersee         | AEV WRV DavoserseekonzeSSION RE 8.6.2001                                                                                                                          | NWG/HWG: gemäss Konzession für Staukoten im Sommer                                                           |
| 9646                     | Lago di Tremorgio  | BAFU Daten Inderwildi; Lakedata-Geodatabase mit Nutzvolumenangaben                                                                                                | Nutzvolumen direkt aus Geodatabase                                                                           |
| 9105                     | Ergstlersee        | BAFU Daten Inderwildi; Lakedata-Geodatabase mit Nutzvolumenangaben                                                                                                | Nutzvolumen direkt aus Geodatabase                                                                           |
| 9711                     | Lago Maggiore      | Faktenblätter zur Seeregulierung (bafu.admin.ch/naturgefahren)                                                                                                    | NWG: untere Regulierungsgrenze / HWG: BAUFU Faktenblatt, Übergang GS 3-4                                     |
| 9710                     | Lago di Lugano     | Faktenblätter zur Seeregulierung (bafu.admin.ch/naturgefahren)                                                                                                    | NWG: tiefster Stand seit 1963 / HWG: BAUFU Faktenblatt, Übergang GS 3-4                                      |
| 9757                     | Genfersee          | Accord intercantonal depuis 1884, BAUFU Gefahrenstufen (hydrodaten.admin.ch)                                                                                      | NWG: gemäss accord im Sommer (geschätzt) / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4                        |
| <b>unregulierte Seen</b> |                    |                                                                                                                                                                   |                                                                                                              |
| 9157                     | Baldeggersee       | BAFU Historische Wasserstandsdaten                                                                                                                                | NWG/HWG: gemäss 1% resp. 99% Quantil                                                                         |
| 9040                     | Greifensee         | BAFU Historische Wasserstandsdaten                                                                                                                                | NWG/HWG: gemäss 1% resp. 99% Quantil                                                                         |
| 9239                     | Sarnsee            | BAFU Historische Wasserstandsdaten                                                                                                                                | NWG/HWG: gemäss 1% resp. 99% Quantil                                                                         |
| 9267                     | Walensee           | BAFU Historische Wasserstandsdaten                                                                                                                                | NWG: gemäss 1% Quantil / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4                                          |
| 9326                     | Bodensee-Untersee  | BAFU Historische Wasserstandsdaten, BAUFU Gefahrenstufen (hydrodaten.admin.ch)                                                                                    | NWG: gemäss 1% Quantil / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4                                          |
| 9326                     | Bodensee-Obersee   | BAFU Historische Wasserstandsdaten, BAUFU Gefahrenstufen (hydrodaten.admin.ch)                                                                                    | NWG: gemäss 1% Quantil / HWG: BAUFU Gefahrenstufen, Übergang GS 3-4                                          |

## 8.6 Literaturstudien

Hier werden drei existierende Studien aufgegriffen, welche sich mit dem Thema Wasserknappheit in der Schweiz auseinandersetzen. Sie werden kurz zusammengefasst und der hier vorgelegten Studie gegenübergestellt. Die berücksichtigten Studien sind: MontanAqua, Oberhasli und Parc Ela.

### **MontanAqua: Wasserbewirtschaftung in Zeiten von Knappheit und globalem Wandel; Wasserbewirtschaftungsoptionen für die Region Crans-Montana-Sierre im Wallis**

Im Forschungsbericht des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung» von Weingartner et al. (2014) wird die Wasserbewirtschaftung in der Region Crans-Montana-Sierre im Wallis dargestellt und mögliche zukünftige Strategien für eine nachhaltige Bewirtschaftung aufgezeigt.

Das Untersuchungsgebiet umfasst 11 Gemeinden, mit teilweise unterschiedlichen geografischen/topografischen Ausprägungen und Wassernutzungsansprüchen. Für die Zukunft wurde der Einfluss von Klimaänderungen und veränderten wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt. Im Folgenden sind einige Erkenntnisse aus diesem Bericht zusammengefasst.

**Dargebot:** Das Projektteam quantifizierte die zur Verfügung stehenden Wasserressourcen heute und in Zukunft. Im Gebiet ist reichlich Wasser vorhanden; auch in Zukunft wird dies so sein. Allerdings werden Trockenperioden häufiger auftreten und es kann zeitweise zu Knappheit kommen. Insbesondere der Abfluss aus dem Plaine-Morte-Gletscher wird gegen Ende des Jahrhunderts kleiner sein und somit einen kleineren Beitrag zum Sommerabfluss, insbesondere in den Monaten August/September, leisten können.

**Nachfrage:** In der Region Crans-Montana-Sierre dominieren die Nachfrage an Trinkwasser, Bewässerung, Wasserkraftnutzung und die Nutzungen für touristische Zwecke. Zu diesen touristischen Zwecken gehören die künstliche Beschneigung (Winter) und die Bewässerung der Golfplätze (Sommer). Für die künftige Entwicklung der Wassernachfrage wurden in Zusammenarbeit mit der Begleitgruppe RegiEau verschiedene Möglichkeiten betrachtet, die sowohl Zu- als auch Abnahmen der Wassernachfrage der vier Nachfragekategorien in Betracht ziehen. Allgemein konnte aus den verschiedenen Szenarien geschlossen werden, dass in trockenen Jahren die Nachfrage insbesondere für die Bewässerung in den Monaten August/September stark zunehmen wird.

**Speicher:** Der Tseuzier-Stausee und der erwähnte Plaine-Morte-Gletscher stellen die zwei grossen Speicher im Studiengebiet dar, wobei der Stausee reguliert werden kann. Am Rand des Gletschers bilden sich kleine Seen, die jedoch bereits heute ausbrechen und zu Hochwassern führen. Diese können also nicht für die zuverlässige Überbrückung von Trockenzeiten in Betracht gezogen werden.

**Wasserbewirtschaftung heute:** Die Wasserbewirtschaftung im Projektgebiet ist komplex. Für die Wasserwirtschaft zeigte sich, dass verschiedene in der Praxis bewährte Vorgehensweisen sowie formelle und informelle Abmachungen die Steuerung beeinflussen. Für die Trinkwasserversorgung wurde klar, dass in einem Grossteil der Gemeinden Quersubventionen fliessen und der Preis für die privaten Haushalte sehr tief ist. Im untersuchten Gebiet wird versucht, das Angebot zu beeinflussen, das heisst die Wasserverfügbarkeit zu steigern. Im Gegensatz dazu wird nicht versucht, die Nachfrage zu reduzieren oder umzulagern.

**Nachhaltigkeit:** Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde die Nachhaltigkeit der Wasserbewirtschaftung heute und in Zukunft analysiert. Die heutige Wasserbewirtschaftung wird als teilweise nachhaltig einge-

stuft. Insbesondere ist jedoch die Gerechtigkeit für verschiedene Nachfrager nicht gegeben, da unter anderem die Wasserverfügbarkeit und der Wasserpreis zwischen den 11 Gemeinden stark schwanken. Je nach zukünftiger Entwicklung kann die Nachhaltigkeit verbessert werden oder aber sinken.

**Kernbotschaft:** Als Schlussfolgerung entwickelte das Projektteam 5 Botschaften. Kurz zusammengefasst sind dies:

1. Die Auswirkungen des sozioökonomischen Wandels werden für die Wassersituation um 2050 entscheidender sein als der Klimawandel.
2. Die jährlich verfügbaren Wassermengen sind heute und um 2050 insgesamt genügend, trotzdem kann in einzelnen Gebieten eine saisonale Wasserknappheit auftreten.
3. Wasserprobleme sind vor allem Managementprobleme auf regionaler Ebene, insbesondere da die Unterschiede zwischen den 11 Gemeinden sehr gross sind.
4. Gemeindeübergreifende Infrastrukturmassnahmen können zur nachhaltigen Sicherung der Wasserversorgung beitragen, aber nur, wenn sie in umfassende sozioinstitutionelle Reformen, insbesondere wasserrechtlich, eingebettet sind.
5. Für die effiziente Planung einer nachhaltigeren, regionalen Wasserversorgung sind die Datengrundlagen und die Transparenz unbedingt zu verbessern

**Vergleich mit Projekt Wasserspeicher:** Die Ausprägungen des sozioökonomischen Wandels und dessen Auswirkungen auf die Wassernachfrage (Punkt 1) sind schwierig zu definieren und quantifizieren. Im vorliegenden Projekt «Wasserspeicher» wird die ferne Zukunft um 2090 betrachtet und es wird darauf verzichtet, extreme Prognosen für die Wassernachfrage vorzunehmen. In Kapitel 3.4.7 sind die Annahmen für künftige Veränderungen aufgeführt. Die Erkenntnis unter Punkt 2 wird in Kapitel 4.5 des vorliegenden Berichts bestätigt: In der Region Crans-Montana-Sierre kann es lokal zu Wasserknappheit kommen, insbesondere in den trockenen Sommermonaten. Die Punkte 3,4 und 5 werden im vorliegenden Projekt «Wasserspeicher» noch nicht betrachtet, dies ist allenfalls Teil einer weiteren Etappe des Projektes.

### **Multifunktionsspeicher im Oberhasli**

Vom Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern wurde das geowissenschaftliche Büro geo7 AG in Bern beauftragt, Multifunktionsspeicher für das Gebiet Oberhasli zu betrachten. Es sollten Überlegungen zu Möglichkeiten und Grenzen der Bewirtschaftung der Speicherseen im Oberhasli als Multifunktionsspeicher im Hinblick auf Hochwasser und Trockenheit zusammengestellt werden. Untersucht wurden die drei Szenarien heutige Infrastruktur, künftige Ergänzung mit dem Triftstausee und keine Speicherseen.

Einige Erkenntnisse der Betrachtung von Trockenheitssituationen aus diesem Bericht von geo7 (2017) sind im Folgenden kurz zusammengefasst.

Das Untersuchungsgebiet der Studie umfasst das Einzugsgebiet der Aare bis zum Kraftwerk Hagneck. Unterhalb ist der Einfluss der Bewirtschaftung durch die Kraftwerke Oberhasli, KWO nicht mehr massgebend. Die Teileinzugsgebiete der verschiedenen Speicherseen sind relativ klein im Verhältnis zum gesamten betrachteten Einzugsgebiet.

**Dargebot:** Das Wasserdargebot wurde für heute und Szenarien in der Zukunft ermittelt. Es wurden einzelne Trockenjahre sowie eine Trockenperiode von 30 Jahren simuliert. Im Trockenjahr 2003 wurden aufgrund der Gletscherschmelze bei den höher gelegenen Messstationen grössere Abflüsse gemessen. Weiter abwärts jedoch waren die Abflüsse bedeutend kleiner und die Nachfrage grösser, was zu einem Defizit führte. Für dieses Jahr lag der Grundwasserpegel im betrachteten Gebiet jedoch höher als der Durchschnitt, was auf die komplexen Zusammenhänge hinweist. Insbesondere das Zukunftsszenario mit einem starken Gletscherrückgang zeigt, dass diese fehlende Gletscherschmelze zu einem raschen Rückgang des Wasserdargebotes im Sommer führt.

**Nachfrage:** Als Nachfrage wurde für diese Studie vor allem die Trinkwasserversorgung und die Landwirtschaft, also die Bewässerung, betrachtet. Im Seeland wäre eine Bewirtschaftung der Stauseen Oberhasli zugunsten der landwirtschaftlichen Bewässerung denkbar.

**Speicher:** In den bestehenden Stauseen Oberhasli können etwa 190 Mio m<sup>3</sup> gespeichert werden. Im geplanten Triftsee zusätzlich 85 Mio m<sup>3</sup>. Diese Seen sind regulierbar und können daher prognostizierte Starkniederschläge und Hochwasser dämpfen respektive als Mehrzweckspeicher differenziert bewirtschaftet werden und so andere Nutzungsansprüche als die Energieproduktion decken.

**Kernbotschaft:** Massnahmen für eine veränderte Bewirtschaftung der Speicherseen sind nicht sinnvoll, da sie eine sehr kleine Reichweite haben. Dies gilt sowohl für die heutigen als auch die künftigen Bedingungen. Im Talboden zwischen Meiringen und Brienzersee dürfte die Bewässerungsnachfrage zunehmen und daher die Wasserentnahmen aus der Aare entsprechend grösser werden. Im Seeland wird der Mehrbedarf signifikant sein sowohl von Seiten Trinkwasserversorgungen als auch insbesondere von Seiten der Landwirtschaft. Das in den Stauseen speicherbare Wasser reicht jedoch nicht aus, diese Nachfrage zu decken. Dies ist insbesondere auf das relativ kleine Einzugsgebiet der Speicherseen im Vergleich zum gesamten Studiengebiet zu begründen.

**Vergleich mit Projekt Wasserspeicher:** Die Resultate des vorliegenden Projekts «Wasserspeicher» zeigen, dass das Aaretal unterhalb des Thunersees in zukünftigen extrem trockenen Sommermonaten mit Wasserknappheit rechnen muss, siehe auch Kapitel 4.5. Die Schlussfolgerung der Studie von geo7, dass der Mehrwert der KWO-Speicher bis in den Bielersee nur sehr gering ist, wird in der vorliegenden Studie insofern relativiert, als das nutzbare Wasservolumen der KWO-Speicher ähnlich gross ist wie dasjenige des (reglementierten) Bielersees.

### **AquaFutura – Regionales Wassermanagement – Im Parc Ela**

Im Folgenden wird das Projekt AquaFutura im Parc Ela dargestellt. Das Projekt AquaFutura wurde vom Bund, dem Kanton Graubünden und dem Parc Ela selbst gefördert. Es behandelte die Anpassung an den Klimawandel und insbesondere den Umgang mit lokaler Wasserknappheit. Das Untersuchungsgebiet umfasst den Parc Ela bis in die Region Albula. Dies ist ein Trockental im Kanton Graubünden mit verschiedenen Nachfragern.

**Dargebot:** Die Region Parc Ela ist ein typisches inneralpines Trockental mit Wettereinfluss sowohl der Alpennordseite, wie auch der Alpensüdseite. Für solche Gebiete ist es äusserst schwierig vorauszusagen, ob sich mit dem Klimawandel eher die Niederschlagstendenz der Südschweiz oder diejenige der Nordostschweiz durchsetzen wird. Insgesamt werden in Zukunft mehr trockene und heisse Sommer erwartet, die Schneefallgrenze wird steigen und es wird allgemein weniger Schnee fallen. Im Winter wird daher der Abfluss zunehmen, insbesondere im Spätsommer oder Herbst wird weniger Abfluss erwartet.

**Nachfrage:** In dieser Region sind vier Nachfrager zu unterscheiden. Grösster Wassernutzer ist die Wasserwirtschaft. Für die Wasserwirtschaft werden in Zukunft finanzielle Einbussen erwartet, da teilweise zu wenig Wasser vorhanden sein kann. Aber auch die Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen wird vermehrt notwendig sein. Der Trinkwassernachfrage ist in der Region gedeckt. Die touristische Nachfrage (Beschneigung) jedoch wird in Zukunft aufgrund der verminderten Schneemengen zunehmen.

**Speicher:** In der Region Parc Ela befinden sich der Lai da Marmorera und der Lai Burvagn, die als Speicherkraftwerke genutzt werden. Ausserdem liegt der Solisstauee im Projektgebiet, wo das Wasser der beiden oberen Staueen erneut turbinert wird und dann in der Albula das Gebiet verlässt. Ein ganz kleiner Wasserspeicher ist der Badesee in Savognin, der nur im Sommerhalbjahr gefüllt ist.

**Kernbotschaft:** Ein regionales Wassermanagement ist schwierig, da zum einen die Wasserhoheit bei den Gemeinden liegt und da zum anderen verschiedene Nutzer vorhanden sind und diese oft nur individuell betrachtet werden. Das Projektteam weist darauf hin, dass nicht ausreichend Daten verfügbar sind, insbesondere für den Wasserverbrauch. Als Massnahme wird vorgeschlagen, dass Gemeinden und Kanton gegenseitig Daten zu Dargebot und Verbrauch austauschen. So können Knappheitssituationen oder Verunreinigungen der Wasserressourcen rechtzeitig erkannt werden. Ausserdem sind Entscheidungsgrundlagen (z. B. Eignungskarte für temporäre Wasserentnahmen) für Bewilligungen von Wasserentnahmen bereitzustellen und ein einheitliches Verfahren geschaffen werden.

**Vergleich mit Projekt Wasserspeicher:** Im Projekt AquaFutura wurden für die Region Parc Ela und den Kanton Graubünden konkrete Massnahmen gefunden, die ein verbessertes Wassermanagement ermöglichen ohne neue Infrastruktur zu erstellen. Durch die während der Projektdauer durchgeführten Gemeindefusionen (Gemeinden Albula und Surses) wurde bereits ein Schritt getan, da die Wassereinzugsgebiete und die Gemeinden nun deckungsgleich sind. So kann zumindest in diesen Gemeinden das Wassermanagement optimiert werden.

Die fehlenden Datengrundlagen, insbesondere im Bereich Nachfrage, sind auch im vorliegenden Projekt Wasserspeicher bekannt und ebenso problematisch. Die im Projekt AquaFutura gefundenen Massnahmen könnten in Etappe 3 evaluiert werden und beispielsweise für andere Trockenregionen überprüft werden.

## 8.7 Glossar

| Begriff                       | Definition                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dargebot                      | Wasservolumen, welches natürlicherweise aus Niederschlag, Schnee- und Gletscherschmelze sowie Verdunstung in einem bestimmten Einzugsgebiet zur Verfügung steht.                                                           |
| HWG                           | Hochwasssergrenze, siehe auch maximaler Wasserspiegel.                                                                                                                                                                     |
| Knappheit                     | Auch Wasserdefizit oder Wassermangel; Zustand bei dem das natürliche Dargebot kleiner ist als die Nachfrage; berechnet als Differenz von Dargebot zu Nachfrage.                                                            |
| Künstliche Reservoir          | Stausee, welcher erst durch den Bau einer Talsperre (Staumauer oder Damm) eingestaut wurde. Hauptsächlich im Alpenraum vorkommend und für die Produktion von Wasserkraft erstellt.                                         |
| Maximaler Wasserspiegel       | Auch Hochwasssergrenze; gesetzlich oder rechtlich vorgeschriebene höchste zulässige Wasserspiegellage.                                                                                                                     |
| Mindestabgabe                 | Minimale Abgaben an den Unterlauf, basierend auf $Q_{347}$ des jeweiligen Gewässers, zur Deckung minimaler ökologischer Anforderungen auch ohne Wasserkraftspeicher; ebenso auch Restwassermenge.                          |
| Minimaler Wasserspiegel       | Gesetzlich vorgeschriebener (z.B. aus Naturschutzgründen) Wasserspiegel auf Höhe des minimalen Speichervolumens. Liegt oberhalb oder mindestens auf Höhe des minimalen Betriebswasserspiegels bei Wasserkraftanlagen.      |
| Nachfrage                     | Auch Nutzung; Wasservolumen, welches zur Befriedigung einer bestimmten (temporär) dissipativen Nutzung benötigt wird.                                                                                                      |
| Natürlicher See (reguliert)   | Auf natürliche Weise entstandenes stehendes Gewässer, dessen Abfluss beim Seeausfluss mit einer Wehranlage gesteuert wird.                                                                                                 |
| Natürlicher See (unreguliert) | Auf natürliche Weise entstandenes, stehendes Gewässer, dessen Abfluss beim Seeausfluss frei abflieset (keine aktive Steuerung des Seepegels möglich).                                                                      |
| NWG                           | Niedrigwasssergrenze, siehe auch minimaler Wasserspiegel.                                                                                                                                                                  |
| Nutzvolumen                   | Teil der Speicherkapazität, der technisch und gemäss den geltenden Reglementen tatsächlich genutzt werden kann.                                                                                                            |
| Periode heute                 | Jahre 1981-2010                                                                                                                                                                                                            |
| Periode Zukunft               | Jahre 2071-2100                                                                                                                                                                                                            |
| Potenzial                     | Verhältnis (gebietsweise) zwischen Speichervolumen und Wasserknappheit. Grosse Speichervolumen im Verhältnis zu kleinen Wasserknappheiten bedeuten ein grosses Potenzial und vice versa.                                   |
| Sommerwasserknappheit         | Absolutes Wasserdefizit in den Monaten Juni bis September.                                                                                                                                                                 |
| Speicherkapazität             | Maximal speicherbares Volumen bedingt durch das Ausmass des Speichers.                                                                                                                                                     |
| Überschuss                    | Zustand bei dem das natürliche Dargebot grösser ist als die Nachfrage; berechnet als Differenz von Dargebot zu Nachfrage; Gegenteil von Knappheit.                                                                         |
| Wasserspeicher                | Stehendes natürliches oder künstliches Gewässer, welches für die Speicherung, Regulierung und Kontrolle von Wasserressourcen verwendet wird. Es wird unterschieden zwischen Oberflächenspeichern und Grundwasserspeichern. |