

Beitrag von Wasserspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit?

Manuela Brunner, Astrid Björnsen Gurung, Jürg Speerli, Susanne Kytzia, Sara Bieler, Dominik Schwere, Manfred Stähli

Zusammenfassung

Im Kontext des Klimawandels und der bereits aufgetretenen Sommertrockenheiten in der Schweiz wird in dieser Studie untersucht, in welchem Umfang Wasserspeicher, wie natürliche Seen, Speicherseen und andere künstliche Wasserreservoirs Wasserknappheit vermindern können. Dazu wurde für 307 mittelgrosse Einzugsgebiete für heutige und zukünftige Bedingungen die Differenz zwischen dem Wasserdargebot und der Nachfrage abgeschätzt. Damit konnten Gebiete mit temporärer Wasserknappheit identifiziert werden, für welche diese schliesslich dem nutzbaren Volumen der Wasserspeicher gegenübergestellt wurde.

Die Resultate zeigen, dass Wasserknappheit vor allem im Sommer auftreten kann, sowohl heute wie auch in Zukunft. Vorwiegend ist das Mittelland betroffen, doch auch in alpinen Regionen ist unter extremen Bedingungen mit Wasserknappheit zu rechnen. Natürliche Seen und Speicherseen können bei lokalen Engpässen nur bedingt Abhilfe leisten, da gemäss den bestehenden Reglementen nur ein kleiner Teil der Speicherkapazität natürlicher Seen, rund 3.5 %, tatsächlich nutzbar ist. Zudem befinden sich Speicherseen oft nicht dort, wo Wasserknappheit zu erwarten ist. Sollen Speicherseen zukünftig vermehrt zur Verminderung von Wasserknappheit beitragen, ist daher zwingend eine regionale Betrachtung notwendig. Diese sollte neben einer optimierten Mehrfachnutzung der Ressourcen ebenfalls Anpassungen auf der Nachfrageseite berücksichtigen.

1. Einführung

Die neuen Klimaszenarien CH2018 zeigen ein klares Bild: im Laufe des 21. Jahrhunderts werden die Sommermonate niederschlagsärmer, die Schneeschmelze 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, während der Nutzungsdruck auf das verfügbare Wasser steigen wird durch eine Zunahme der Wasserkraftproduktion (UVEK, 2014), des landwirtschaftlichen Bewässerungsbedarfs (Führer and Calanca, 2014) und des Trinkwasserbedarfs infolge wachsender Einwohnerzahlen.

Vor diesem Hintergrund kann es zukünftig häufiger zu Situationen mit lokaler und regionaler Wasserknappheit kommen. Natürliche Seen sowie künstliche Wasserspeicher wie Speicherseen, Beschneiungsteiche und Trinkwasserreservoirs tragen zukünftig zur Deckung temporärer Wasserknappheit bei. Welchen Beitrag können sie aber tatsächlich zur Verminderung von Wasserknappheit leisten?

Diese Studie zeigt auf, in welchem Ausmass Wasserspeicher zur Verminderung von Wasserknappheit beitragen können, falls die heutigen Wehrreglemente und Konzessionen auch in Zukunft gelten.

2. Methoden

Das «Potenzial von Wasserspeichern» zur Verminderung von Sommerwasserknappheit wird hier definiert als das Verhältnis zwischen dem nutzbaren Speichervolumen und der lokalen Wasserknappheit. Für insgesamt 307 mittelgrosse hydrologische Gebiete in der Schweiz wurde dieses Verhältnis für heutige und zukünftige Bedingungen abgeschätzt. Grundlagen waren das hydrologische Modell PREVAH (Viviroli et al., 2009), die CH2018-Klimaszenarien des NCCS (National Centre for Climate Services, 2018) sowie eigens entwickelte Modelle zur Schätzung des nutzbaren Speichervolumens und der Wassernachfrage. Der Fokus lag auf natürlichen und künstlichen Seen. Grundwasser wurde nicht betrachtet. Wenn das natürliche Wasserdargebot in einem Gebiet kleiner ist als die Wassernachfrage, tritt Wasserknappheit auf. Konkret wurde in einem ersten Schritt das natürliche Wasserdargebot und dessen Saisonalität in einem Gebiet abgeschätzt (Bild 1 A). Zweitens wurde die gesamte Wassernachfrage für verschiedene Kategorien abgeschätzt

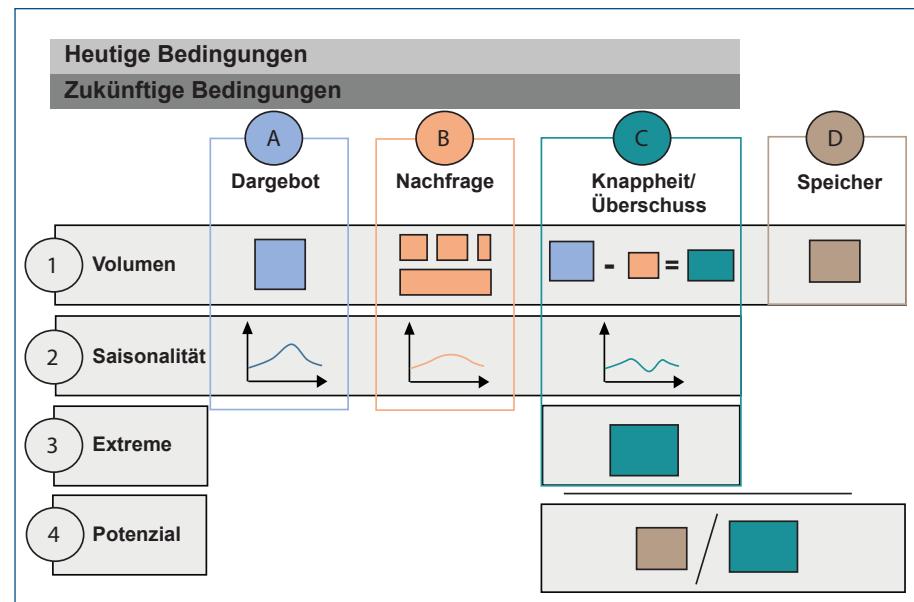


Bild 1. Gesamtkonzept zur Berechnung des Potenzials von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit.



und, falls möglich, auch saisonal abgebildet (B). In einem dritten Schritt wurde die saisonale Wasserknappheit (C) ermittelt, indem der totale Wasserverbrauch vom natürlichen Dargebot abgezogen wurde. Ein negativer Wert bedeutet, dass das Gebiet temporär von Wasserknappheit betroffen ist. Ein positiver Wert steht für einen Wasserüberschuss. Um neben den normalen Bedingungen auch Extremsituationen darzustellen, wurde, basierend auf den saisonalen Wasserknappheitsschätzungen, mittels statistischer Modelle eine extreme Sommerwasserknappheit berechnet, die im Durchschnitt nur alle 10 bzw. 100 Jahre auftritt. Die daraus resultierende extreme Wasserknappheit wurde dann dem verfügbaren Speichervolumen gegenübergestellt, um damit das Potential von Wasserspeichern zur Verminde rung von Sommerwasserknappheit zu bestimmen (D).

2.1 Studiengebiet

Die Studie wurde für 307 mittelgrosse Schweizer Einzugsgebiete mit einer durchschnittlichen Fläche von 117 km² durchgeführt. Sie liegen auf mittleren Höhen zwischen 300 und 3000 m ü.M., und der jährliche Niederschlag variiert zwischen 500 und 3000 mm (*Federal Office of Meteorology and Climatology*, 2018). Die Unterschiede in Topografie, Niederschlagssummen und -saisonalität und weiteren Gebietseigenschaften haben verschiedene Abflussregime zur Folge, welche sowohl regen dominierte Regime mit Niedrigabflussperioden im Sommer wie auch schmelz dominierte Regime mit Niedrigabflussperioden im Winter umfassen (*Blanc and Schädler*, 2014).

2.2 Dargebot

Für die Berechnung des lokalen Wasserdargebotes wurden mit dem hydrologischen Modell PREVAH (*Viviroli et al.*, 2009) Abflusszeitreihen in täglicher Auflösung simuliert. Das PREVAH-Modell ist ein konzeptionelles, prozessbasiertes Modell und bildet verschiedene Teile des hydrologischen Systems ab. Dazu gehören Interceptions- und Bodenwasserspeicherung, Evapotranspiration, Schneekakkumulation, Gletscherschmelze, Grundwasser, Abfluss und Basisabflussgeneration sowie die Abflusskonzentration. Für die Simulationen wurde eine gegitterte Version des Modells für das Gebiet der Schweiz aufgesetzt. Das kalibrierte und evaluierte Modell wurde schliesslich mit meteorologischen Daten (Niederschlag, Temperatur, Strahlung und Wind) der Referenzperiode 1981–2010 und Zukunftsperiode 2071–2100, wenn die grössten Änderungen im Klima und im Abfluss zu erwarten sind, angetrieben. Die meteorologischen Daten für die Zukunft wurden den CH2018-Klimaszenarien entnommen, welche vom Nationalen Zentrum für Klimadienstleistungen (NCCS) zur Verfügung gestellt wurden (*National Centre for Climate Services*, 2018). Um die Unsicherheit in den Zukunftsprojektionen abschätzen zu können, wurden 39 Klimaketten verwendet. Zukünftige Gletscherveränderungen wurden mit einem Gletscherevolutionsmodell abgebildet (*Zekollari et al.*, 2019).

2.3 Speicher

Mit dem Begriff Wasserspeicher werden in der vorliegenden Studie natürliche regulierte und unregulierte Seen, künstliche Reservoirs (Speicherseen), Beschnei-

ungsteiche und Trinkwasserspeicher verstanden. Während die grossen natürlichen Seen vor allem im Mittelland liegen, sind die künstlichen Reservoirs grösstenteils in den Alpen zu finden (*Bild 2*). Für diese Speicherseen wurde neben der Speicherkapazität auch das Nutzvolumen bestimmt, also jener Teil der Speicherkapazität, der technisch bedingt und gemäss den geltenden Reglementen (z.B. Wehrreglementen oder Konzessionen) tatsächlich genutzt werden könnte. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden, welche für die Abschätzung der nutzbaren Speicher-volumen verwendet wurden, befindet sich in *Brunner et al.* (2019a).

2.4 Nachfrage

Die heutige und zukünftige Wassernachfrage wurde für folgende Kategorien abgeschätzt: Trinkwasserversorgung (Haushalte und Tourismus), Industrie und Gewerbe (zweiter Sektor), Dienstleistungen (dritter Sektor), künstliche Schneeproduktion, Landwirtschaft (Bewässerung und Grossvieh), ökologische Rest- und Mindestwassermengen und Wasserkraftproduktion. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden, welche für die Abschätzung der verschiedenen Nachfragekategorien verwendet wurden, befindet sich in *Brunner et al.* (2019b) oder *Brunner et al.* (2019a). Die gesamte Wassernachfrage in einem Teilgebiet wurde aus den Nachfrageschätzungen der einzelnen Nutzungskategorien berechnet. In dieser Studie wurden alle Nutzungen als verbrauchend betrachtet, d.h., das Wasser stand lokal nach der Nutzung nicht mehr für andere Nutzungen zur Verfügung. Erweitert man die Systemgrenze, kann das Wasser nach gewissen Nutzungen (z.B. Wasserkraftproduktion) am Gewässerunterlauf natürlich abermals genutzt werden. Wassertransfers zwischen den untersuchten Gebieten wurden in dieser schweizweiten Studie – obwohl sie relevant sind – nicht genauer betrachtet. Ebenfalls wurde nicht unterschieden, ob und in welchem Ausmass eine Nachfrage über das Grundwasser oder über Oberflächenwasser gedeckt wird. Der Grundwasserbeitrag zum Abfluss wurde beim Dargebot berücksichtigt.

2.5 Wasserknappheit und -überschuss

Die Wasserknappheit respektive der Wasserüberschuss wurde aus dem natürlichen Wasserdargebot und der geschätzten Wassernachfrage ermittelt, auf einer monatlichen sowie jährlichen Skala für heutige und zukünftige Bedingungen. Lokale

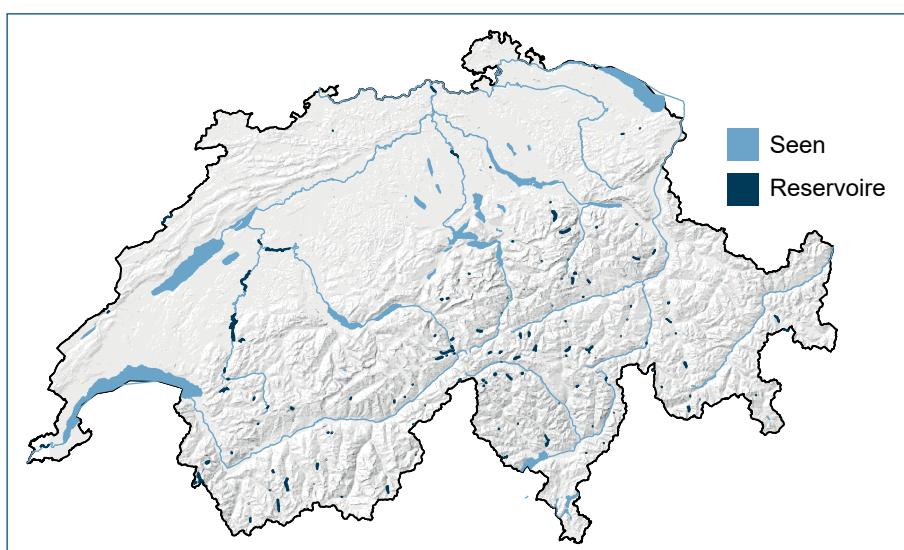


Bild 2. Die grossen natürlichen Seen (hellblau) liegen vorwiegend im Mittelland, während die kleineren, künstlichen Reservoir (dunkelblau) in alpinen Gebieten zu finden sind (*Federal Office of Topography swisstopo*, 2018).

Wasserknappheit entsteht, wenn der lokale Abfluss die anfallende Nachfrage nicht zu decken vermag.

Die normale monatliche Wasserknappheit wurde mit den mittleren Abflussbedingungen berechnet. Der Fokus dieser Studie lag auf der Sommertrockenheit. Extreme Sommertrockenheit wurde mittels einer extremwertstatistischen Analyse abgeschätzt. 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 wurde eine generalisierte Extremwertverteilung verwendet. Die Verteilung wurde genutzt, um Wasserknappheits-überschussereignisse mit Jährlichkeiten von 10 und 100 Jahren abzuschätzen, welche für Planungsprozesse oft von Interesse sind (Camezind-Wildi, 2005).

2.6 Potenzial von Speichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit

Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von lokaler Wasserknappheit wurde als das Verhältnis zwischen dem nutzbaren Volumen von Wasserspeichern und der geschätzten absoluten Sommerwasserknappheit berechnet. Das Potenzial wurde sowohl für normale wie auch extreme heutige und zukünftige Bedingungen abgeschätzt. Werte von 1 oder grösser bedeuten, dass das verfügbare Speichervolumen die lokale Wasser-

knappheit beheben kann, allenfalls mit Überschuss. Werte kleiner als 1 bedeuten, dass nur ein Bruchteil der Wasserknappheit über lokale Wasserspeicher gedeckt werden kann. Hier gilt hervorzuheben, dass nur für Gebiete mit Wasserknappheit ein Wert berechnet werden konnte (Potenzial). Folglich besteht ohne Knappheit auch kein Potenzial.

Ist das nutzbare Speichervolumen grösser als die lokale Wasserknappheit, besteht auch ein Potenzial zur Verminderung von Wasserknappheit in unterliegenden Gebieten. Um ein solches «regionales Potenzial» zu untersuchen, wurde für die Einzugsgebiete Rhône, Rhein-Diepoldsau, Aare und Ticino die regionale Knappheit dem regional verfügbaren Nutzvolumen gegenübergestellt.

3. Resultate

3.1 Dargebot

Das mittlere natürliche Wasserdargebot hängt stark von der Topografie ab. Hohe mittlere Abflüsse liegen in alpinen Gebieten und der Südschweiz vor, eher niedrige mittlere Abflüsse im Mittelland. Dieses räumliche Muster wird sich auch in Zukunft kaum verändern, obwohl die Projektionen der verschiedenen Modellketten relativ stark voneinander abweichen. Hingegen dürfte sich die Saisonalität der Abflüsse verändern. In alpinen, durch Schmelzwasser beeinflussten Gebieten wird sich die Abflussspitze von den späteren Sommermonaten in die frühen Sommermonate verlagern. Bedingt durch die erhöhten Niederschläge, wird der Abfluss im Winter eher etwas zunehmen. Die regendominierten Abflüsse im Mittelland werden im Sommer abnehmen und im Winterhalbjahr eher zunehmen.

3.2 Speicher

Die Schweizer Seen speichern rund 130000 Mio m³ Wasser. Eine beträchtliche Menge, wovon allerdings durchschnittlich nur gerade 3.5% tatsächlich zur Verfügung stehen, weil die Nutzung durch heutige geltende Reglemente eingeschränkt ist (u.a. motiviert durch bestehende Schutz- und Nutzungsansprüche) (Bild 3). Im Gegensatz dazu ist das Wasser in Stauseen, insgesamt mehr als 3500 Mio m³, zum grössten Teil tatsächlich auch nutzbar, eingeschränkt nur durch bestehende Konzessionen. Trinkwasserreservoir (4.5 Mio m³) und Beschneiungsteiche (4 Mio m³) weisen nur sehr kleine Speichervolumina auf und sind daher für die Bewältigung regionaler Wasserknappheit ungeeignet. Diese Speicher sind ungleichmässig über die Schweiz verteilt. Während die Speicherseen sich hauptsächlich in den Alpen und Voralpen befinden, liegen die grossen, natürlichen Seen v.a. im Mittelland. Diese räumliche Verteilung wird wichtig, wenn es um die tatsächliche Nutzung der Speicher zur Verminderung von Wasserknappheit geht.

3.3 Nachfrage

Die Wassernachfrage variiert mit der Nutzungskategorie (Bild 4, links). Den höchsten Anspruch erhebt die Ökologie zur Deckung der Rest- und Mindestwassermenge in den Flüssen. An zweiter Stelle steht die Wasserkraftnutzung. Beide Nutzungen sind nicht verbrauchend, jedoch steht auch hier das Wasser lokal nicht für andere Nutzungen zur Verfügung, sondern erst wieder verzögert weiter bach-, bzw. flussabwärts. Eine deutlich kleinere Menge wird für die Bewässerung, die Trinkwasserversorgung und den Wasserbedarf im Dienstleistungssektor benötigt

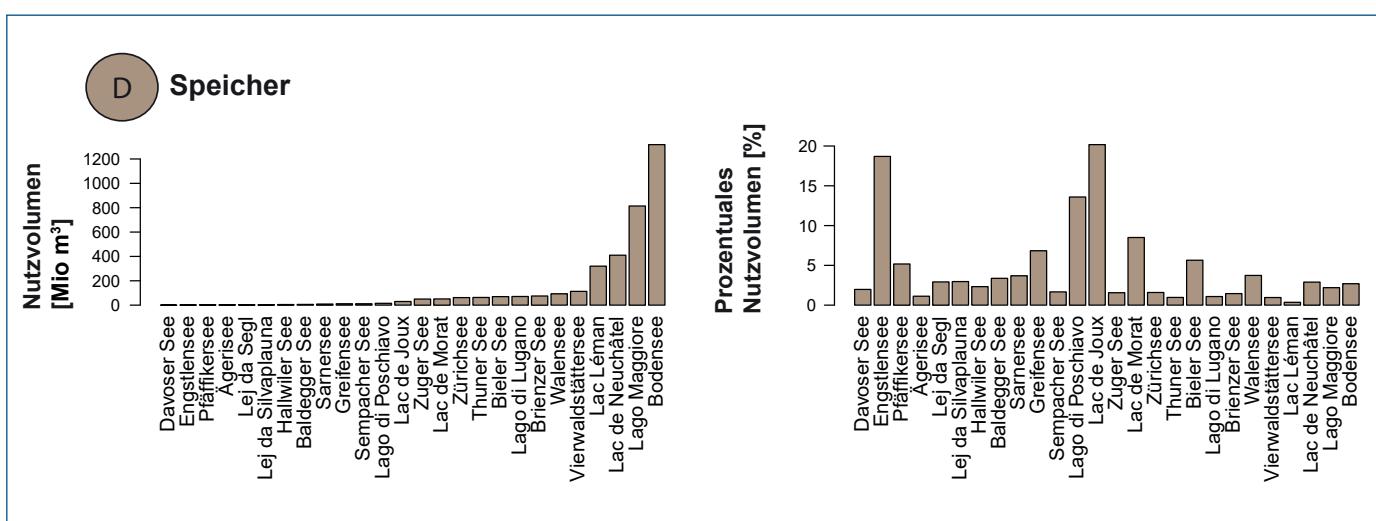


Bild 3. Absolutes Nutzvolumen und prozentuales Nutzvolumen für die grössten Schweizer Seen. Die Seen sind horizontal nach dem absoluten Nutzvolumen geordnet.



(zu etwa gleichen Teilen). Nur ein Bruchteil des Wasserbedarfs wird durch die restlichen Nutzungskategorien beansprucht. Sowohl die Gesamtwassernachfrage wie auch ihre Verteilung auf die verschiedenen Nutzungskategorien ist räumlich sehr heterogen (Bild 4, rechts, und Bild 5). Die Nachfrage für die Wasserkraftnutzung ist besonders hoch mit einem deutlichen

Schwerpunkt auf die Bergregionen. Hier fällt auch der Wasserverbrauch für die Schneeproduktion an. Im Mittelland hingegen dominieren die Bewässerung, die Trinkwasserversorgung, die Unternehmen im Industrie- und Dienstleistungssektor sowie das Tränken von Grossvieh den Wasserverbrauch. Der Anspruch der Ökologie zur Deckung der Rest- und Mindest-

wassermenge in den Bächen und Flüssen fällt in der ganzen Schweiz an, mit einem Schwerpunkt auf Regionen mit grossen Niederschlagsmengen und Abflüssen.

Die Nachfrage in den jeweiligen Nutzungskategorien unterscheidet sich nicht nur räumlich, sondern auch saisonal. Betrachtet man die Gesamtnachfrage, ist diese wegen des starken Einflusses der

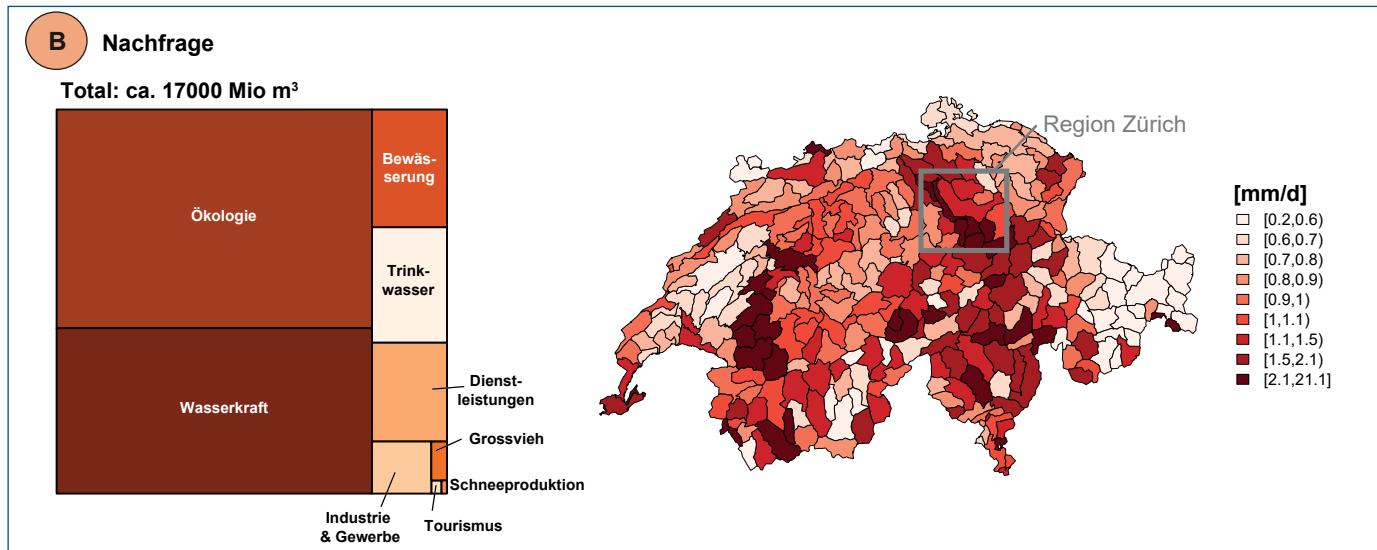


Bild 4. Gesamtwassernachfrage pro Nutzungskategorie und Jahr: Ökologie (Rest- und Mindestwasser), Wasserkraft, Bewässerung, Trinkwasser, Industrie & Gewerbe (Sektor zwei), Dienstleistungen (Sektor drei), Grossvieh, Trinkwasser Tourismus und Schneeproduktion (links) und die räumliche Verteilung der Gesamtnachfrage. Das graue Rechteck zeigt die Region Zürich mit einer vergleichsweise hohen Wassernachfrage.

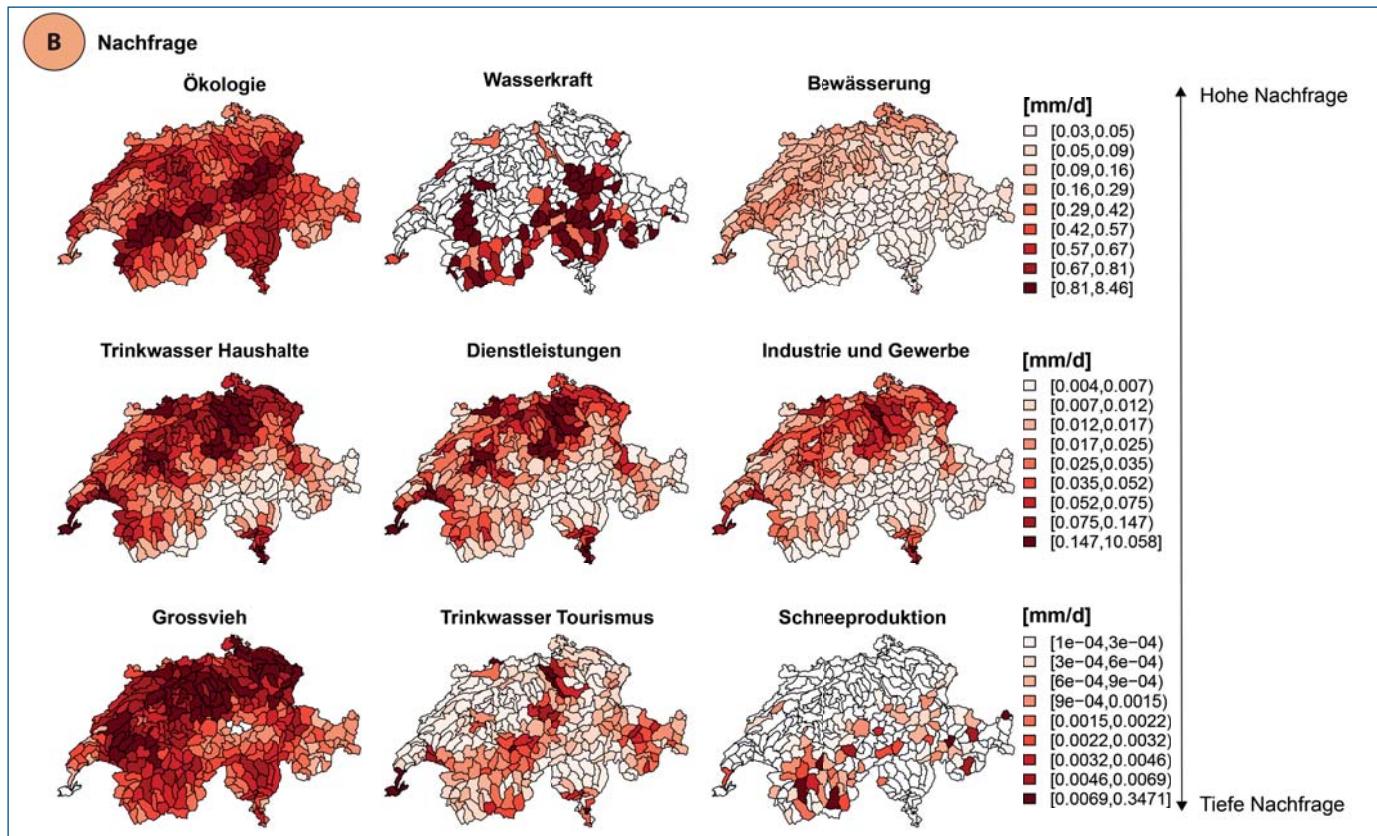


Bild 5. Räumliche Verteilung der Wassernachfrage pro Nutzungskategorie: Ökologie (Rest- und Mindestwassermenge), Wasserkraft, Bewässerung, Trinkwasser Haushalte, Industrie & Gewerbe (Sektor zwei), Dienstleistungen (Sektor drei), Grossvieh, Trinkwasser Tourismus und Schneeproduktion. Die Wassernachfrage nimmt von oben nach unten ab. Jede Kartenreihe hat eine eigene Skala.

Wasserkraftproduktion im Winter, wenn am meisten Strom aus Wasserkraftwerken benötigt wird, am grössten. Die Nachfrage für Bewässerung ist in den Sommermonaten am grössten, und die Schneeproduktion findet ausschliesslich im Winter statt. Für alle anderen Nutzungskategorien wird

eine im Jahresverlauf konstante Nachfrage angenommen.

3.4 Wasserknappheit und -überschuss

Die relativ hohe Wassernachfrage im Mittelland widerspiegelt sich in den Schätz-

ungen von Wasserknappheit und -überschuss für heutige Bedingungen. Unter normalen Bedingungen treten Wasserdifizite kaum auf. Unter extremen Bedingungen können jedoch einige Regionen im Mittelland bereits heute von Wasserknappheit betroffen sein. Unter normalen

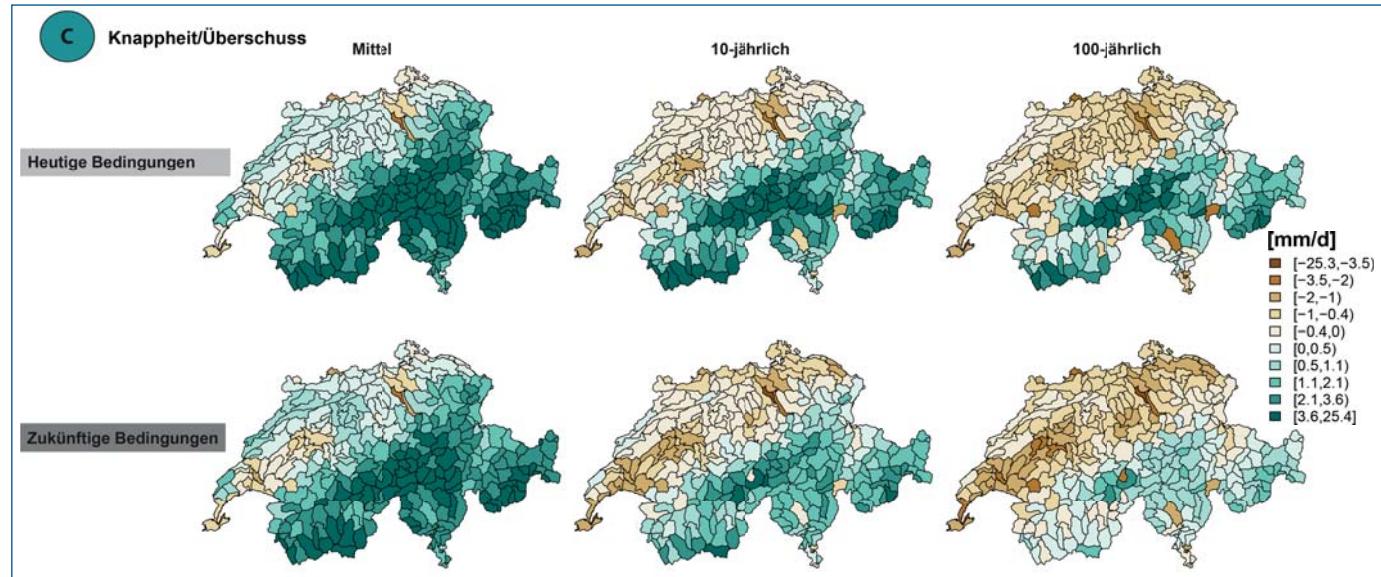


Bild 6. Mittlere und extreme Sommerwasserknappheit, abgebildet durch die 10- und 100-jährliche Knappheit unter heutigen und zukünftigen Bedingungen über alle 39 Klimamodellketten.

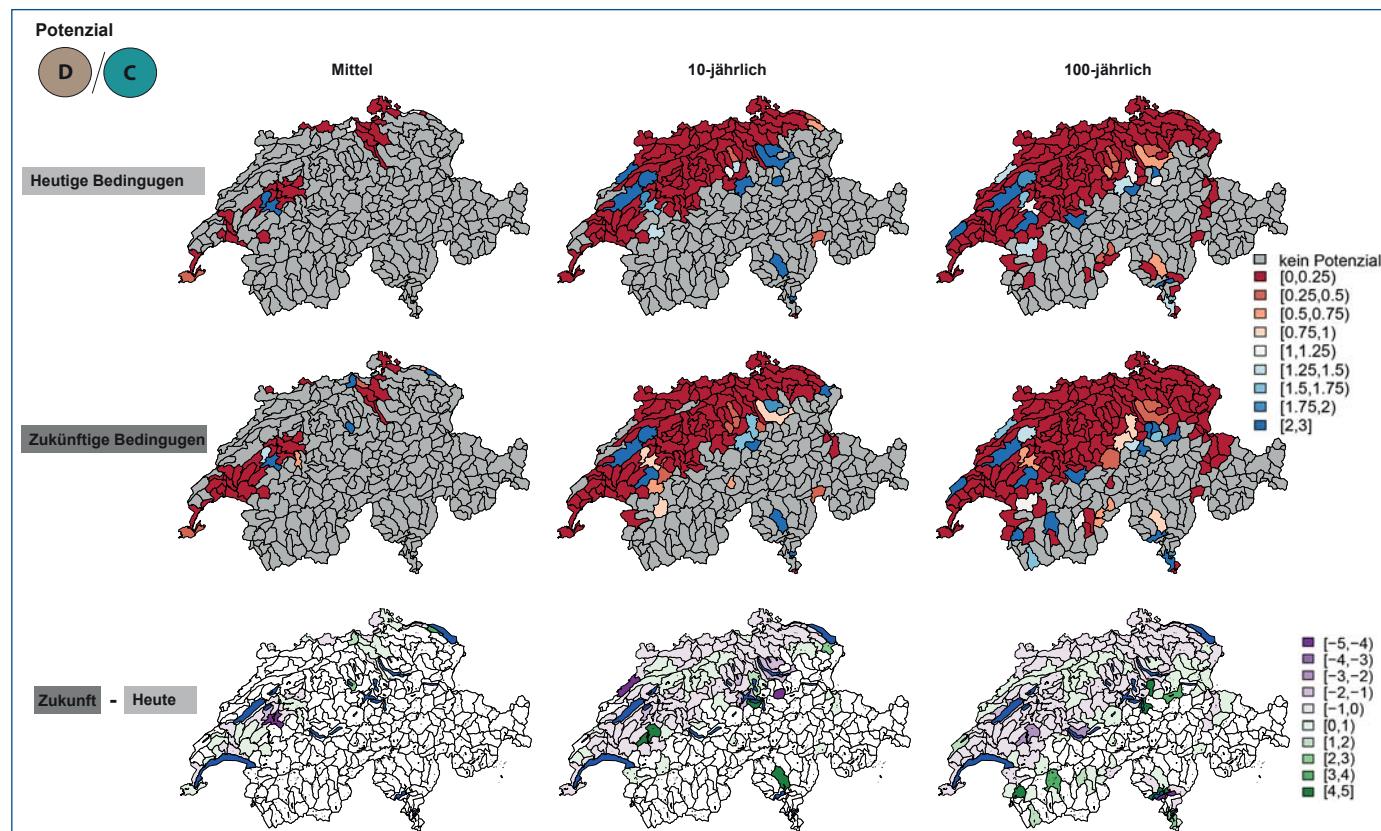


Bild 7. Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit unter heutigen und zukünftigen Bedingungen für ein normales (mittleres), ein 10-jährliches und ein 100-jährliches Wasserknappheitereignis unter der Annahme, dass nur das reglementarisch festgelegte, nutzbare Volumen zur Verfügung steht. In farbigen Gebieten besteht 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 des Defizits über das nutzbare Volumen der Speicher gedeckt werden. Die unterste Kartenreihe zeigt den Unterschied zwischen heutigem und zukünftigem Potenzial: In violetten Gebieten nimmt das Potenzial im Vergleich zu heute ab, in grünen Gebieten nimmt es zu.

Bedingungen ist nur für einzelne Monate und auch nur in wenigen Gebieten Wasserknappheit zu erwarten. Im Dezember ist die lokale Wasserknappheit hauptsächlich über die Nachfrage nach Wasser zur Stromproduktion zu erklären. Unter extremen Bedingungen werden hingegen v.a. im Sommer viele Gebiete im Mittelland von Wasserknappheit betroffen sein, wenn die Niederschläge klein sind oder ausbleiben. Nichtsdestotrotz kann Wasserknappheit auch in einigen alpinen Gebieten lokal auftreten, wie der Sommer 2018 gezeigt hat.

Die Sommertrockenheit der Zukunft unterscheidet sich von jener der Gegenwart v. a. unter extremen Bedingungen (Bild 6). Bei einem 10-jährlichen Ereignis sind unter zukünftigen Bedingungen neben den Gebieten im Mittelland auch einige alpine Gebiete betroffen. Die Flä-

che der betroffenen Einzugsgebiete dehnt sich bei einem 100-jährlichen Ereignis weiter aus.

3.5 Potenzial zur Verminderung von lokaler Sommerwasserknappheit

Das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Sommerwasserknappheit beschreibt das Verhältnis zwischen dem nutzbaren Speichervolumen und der absoluten Sommerwasserknappheit in einem Teilgebiet. Bild 7 stellt dieses Potenzial für heutige und zukünftige Bedingungen für ein normales (mittleres), ein 10-jährliches und ein 100-jährliches Ereignis dar. Unter heutigen wie zukünftigen mittleren Bedingungen ist das Potenzial in den meisten Gebieten null; nur in wenigen Gebieten wird Wasserknappheit erwartet.

Selbst unter extremen Bedingungen ist das Potenzial gering. Unter heutigen und zukünftigen extremen Bedingungen bleibt in den meisten Gebieten das Verhältnis von Nutzvolumen zu Wasserknappheit kleiner als 1:4 (0.25), d. h., nicht einmal ein Viertel der Wasserknappheit kann über die Speicher gedeckt werden. Eine Ausnahme bildet das Seeland mit dem Neuenburgersee. Selbst bei einem 100-jährlichen Knappheitsereignis weist die Region immer noch ein grosses Potenzial zur Verminderung von Wasserknappheit auf, weil der Neuenburgersee ein grosses Nutzvolumen aufweist. Vergleicht man das heutige mit dem zukünftigen Potenzial, ist nur eine geringe Veränderung sichtbar (Bild 7, unterste Spalte).

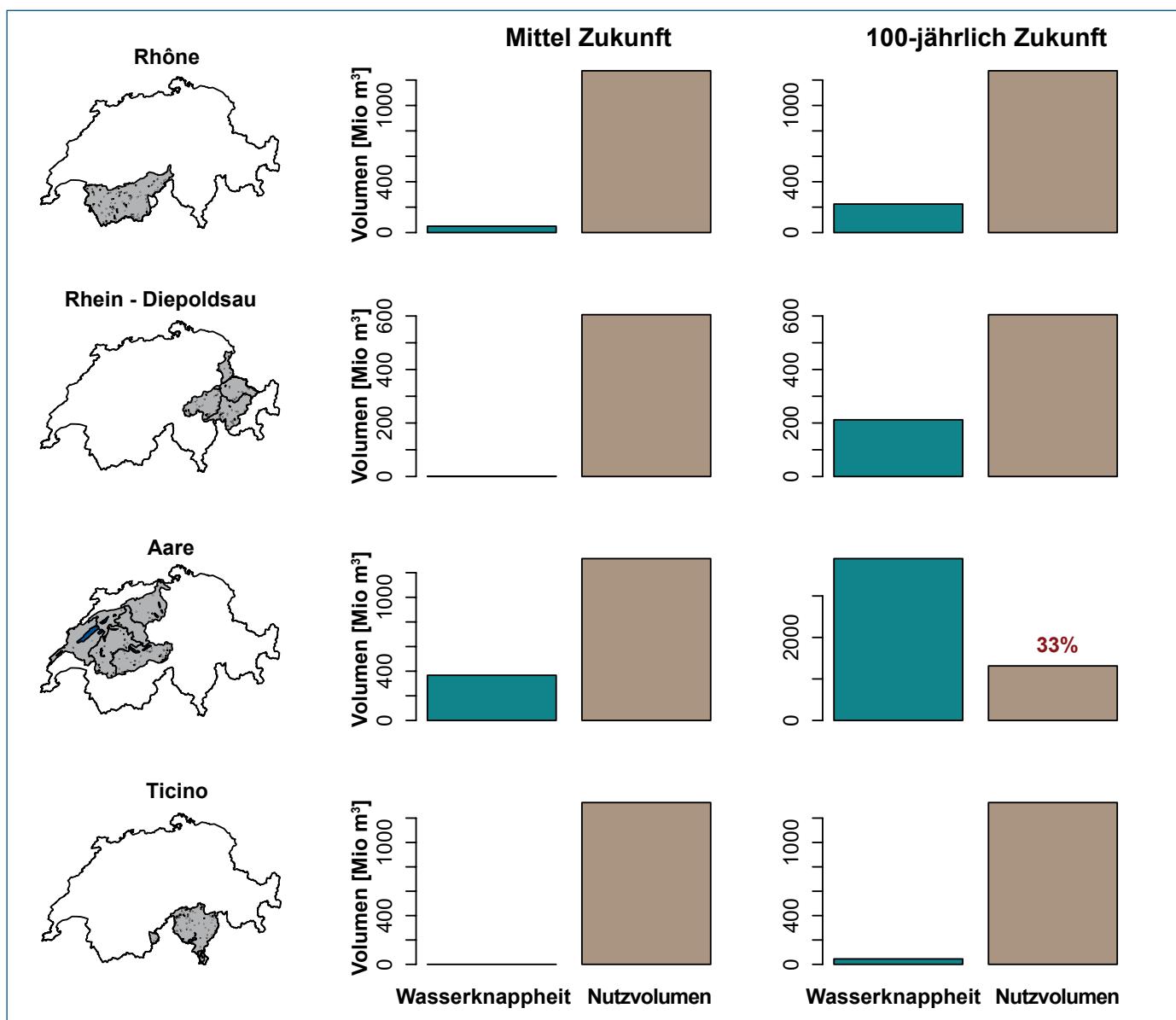


Bild 8. Wasserknappheit vs. Nutzvolumen unter zukünftigen mittleren und extremen (100-jährliche Knappheit) Bedingungen für die Grossregionen Rhône, Rhein-Diepoldsau, Aare und Ticino. Der prozentuale Deckungsgrad ist für Situationen angegeben, bei denen die Wasserknappheit das verfügbare Nutzvolumen übersteigt. Die einzelnen Grafiken werden auf unterschiedlichen Skalen gezeigt.

3.6 Potenzial zur Verminderung von Sommerwasserknappheit in unterliegenden Gebieten

Einzugsgebiete mit einem grossen Wasserüberschuss können ggf. in unterliegenden Gebieten Wasserknappheit vermindern, falls die Gebiete über einen natürlichen oder künstlichen Wasserlauf miteinander verbunden sind. Unter heutigen Bedingungen übersteigt das regional nutzbare Speichervolumen der meisten hydrologischen Grossregionen die zu erwartende Sommerwasserknappheit. Oberliegende Gebiete in den Regionen Rhône, Rhein und Ticino können also unter normalen (mittleren) Bedingungen zur Deckung von Sommerdefiziten in unterliegenden Gebieten beitragen, dies auch unter extremen Bedingungen (100-jährliche Wasserknappheit). Eine Ausnahme bildet die Aare-Region. Hier vermag das Nutzvolumen lediglich 13 % der extremen Wasserknappheit zu decken, womit das Potenzial der Wasserspeicher zur Verminderung von Wasserknappheit in unterliegenden Gebieten sehr gering ist.

Dasselbe gilt für die Zukunft. Auch zukünftig kann eine regionale Wasserknappheit über gespeichertes Wasser aus oberliegenden Gebieten gedeckt werden (Bild 8). Nicht überraschend stellt die Aare-Region wieder eine Ausnahme dar. Unter extremen Bedingungen ist neben der Aare-Region auch der Rhein bis Basel ein Gebiet, wo das Potenzial von Wasserspeichern unter 1 sinkt, d.h., nur ein Teil des Defizits kann durch gespeichertes, nutzbares Wasser gedeckt werden.

4. Diskussion und Ausblick

Heute sowie in Zukunft ist das Mittelland eher von Wasserknappheit betroffen als die Bergregionen. Dies hat mit dem Wasserdargebot zu tun, aber auch stark mit der Wassernachfrage. Gerade in den Sommermonaten profitieren alpine Gebiete von den verzögerten Abflussbeiträgen der Schnee- und Gletscherschmelze. Das Mittelland ist dagegen unmittelbar vom Niederschlag abhängig. In der ganzen Schweiz wird der Abfluss in den Sommermonaten abnehmen. Betrachtet man die Wassernachfrage, ist diese im Mittelland am grössten, insbesondere in grossen Ballungszentren (z.B. Region Zürich) und in Gebieten mit intensiver Landwirtschaft (z.B. Seeland). Auch in alpinen Gebieten kann die Nachfrage gross sein, v.a. wegen der Wasserkraftnutzung.

Unter normalen Bedingungen reicht das verfügbare Wasser zur Deckung der Nachfrage. Unter extremen Bedingun-

gen, insbesondere im Sommer, kann jedoch die Nachfrage das natürliche Dargebot übersteigen. In diesen Fällen könnten Wasserspeicher Abhilfe schaffen, da sie Wasserüberschüsse von einer Saison in eine Saison mit Wasserdefiziten transferieren. Die Analyse hat jedoch gezeigt, dass Speicher oft nicht dort liegen, wo die grössten Sommerdefizite auftreten. Sommerwasserknappheit ist im Mittelland am grössten, kann durch lokale Speicher aber nur bedingt vermindert werden, da nur ein kleiner Teil des Seewassers (<4 %) gemäss aktueller Wehrreglemente auch tatsächlich genutzt werden kann. 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 alpinen Reservoiren zur Verminderung von lokaler Wasserknappheit ist daher vielerorts gering, selbst wenn Wasser verfügbar wäre. Vergrössert man allerdings den Perimeter und betrachtet die gesamte Region, deren Zufluss durch diese Speicherseen beeinflusst wird (siehe Bild 8), dann ist das Potenzial dieser Speicher deutlich grösser.

Soll in Zukunft das vorhandene Potenzial von Wasserspeichern – insbesondere der Speicherseen im alpinen Raum – ausgeschöpft werden, wäre der Betrieb als Multifunktionspeicher für eine Gruppe verschiedener Nutzer eine mögliche Option. Dies könnte aber eine Reduktion der Stromproduktion bedeuten, was allenfalls der Energiestrategie 2050 entgegenlaufen könnte. Solche Nachteile müssten klug verhandelt und finanziell abgegolten werden, was beispielsweise die Entwicklung alternativer Businessmodelle der Kraftwerksbetreiber unterstützen könnte. Mehrzweckspeicher könnten ausserdem die Resilienz einer Region als Ganzes erhöhen (Jossen and Björnsen Gurung, 2018). In der Schweiz liegen im Vergleich mit anderen Gebirgsländern sehr wenige Erfahrungen für eine Entwicklung und Regelung der Mehrzwecknutzung von Speicherseen 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 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 zunimmt und die saisonale Umlagerung von Wasser in den Speicherseen an Bedeutung gewinnt (UVEK, 2014). Während die Energiestrat-

egie die Produktion von erneuerbaren Energien priorisiert, legen andere Regelwerke den Fokus auf landwirtschaftliche Nutzungen oder auf den Schutz natürlicher Abflussbedingungen und der Biodiversität (Clavis 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 (Clavis et al., 2014).

Um Wasserknappheit zu vermindern, müsste gleichzeitig bei der Nachfrage angesetzt werden. Eine grosse Nachfrage bedeutet nämlich, dass auch der Handlungsspielraum für Spar- und Effizienzmassnahmen entsprechend gross ist. Auch kann ein allfälliger Spareffekt auf der Nachfrageseite lokal direkt seine Wirkung zeigen.

5. Schlussfolgerungen

Bereits heute, aber noch verstärkt gegen Ende des Jahrhunderts, kann in niederschlagsarmen Sommermonaten in grossen Teilen des Mittellandes lokale Wasserknappheit auftreten. In den Alpen und im Tessin dürfte es nur vereinzelt zu Sommerwasserknappheit kommen. Trotz einer Vielzahl natürlicher und künstlicher Speicher muss deren Potenzial zur Minde rung zukünftiger Sommerwasserknappheit als eher gering eingestuft werden. Dies ist einerseits dadurch zu erklären, dass die Wasserspeicher zu weit entfernt von den trockenen Regionen mit erhöhtem Wasserbedarf liegen. Andererseits erlauben die aktuell gültigen Wehrreglemente lediglich eine Nutzung von durchschnittlich 3.5 % des Seewassers der regulierten natürlichen Seen.

Während Speicher lokal oft ein kleines Potenzial aufweisen, da die nutzbare Wasserverfügbarkeit und die Nachfrage örtlich nicht übereinstimmen, ist das Potenzial von Wasserspeichern zur Verminderung von Wasserknappheit sehr viel grösser, wenn eine grössere Region betrachtet wird, d.h., wenn Speicherwasser über den Abfluss auch den unterliegenden Gebieten zur Verfügung gestellt werden kann. Nicht nur darum sollte Wassermanagement integral betrieben, die Möglichkeit von Mehrfachnutzungen sorgfältig geprüft und gleichzeitig nach Steuermöglichkeiten auf der Nachfrageseite gesucht werden.

Dank

Die vorliegenden Ergebnisse sind Teil eines Forschungsprojekts, welches durch das Bundes-



amt für Umwelt, BAFU, als Beitrag zum National Centre for Climate Services (NCCS) im Rahmen des Programms Hydro-CH2018 finanziert wurde (Vertrag: 15.0003.PJ/Q292-5096). Wir bedanken uns bei *Michaela Erni, Daniel Farinotti, Matthias Huss, Massimiliano Zappa und Harry Zekollari* sowie beim NCCS für wichtige Berechnungen und Daten.

Literatur

Björnsen Gurung, A., Brunner, M., Stähli, M., Kellner, E., Clivaz, M., Reynard, E., Douarche, M., Gökler, G., Schmocker-Fackel, P., 2019. Alpine multi-purpose reservoirs: Future potential and relevance, in: Proceedings of the ForumAlpinum 2018 and the 7th Water Conference. Austrian Academy of Sciences Press, Breitenwang (Tyrol), pp. 77–78.

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., Björnsen Gurung, A., Speerli, J., Kytzia, S., Bieler, S., Schwere, D., Stähli, M., 2019a. Hydro-CH2018 Wasserspeicher: Welchen Beitrag leisten Mehrzweckspeicher zur Verminderung zukünftiger Wasserknappheit? Birmensdorf ZH.

Brunner, Manuela, Björnsen Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., Stähli, M., 2019b.

Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes. *Sci. Total Environ.* 666, 1033–1047. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.169>

Camezind-Wildi, R., 2005. Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren.

Clarvis, M.H., Fatici, S., Allan, A., Fuhrer, J., Stoffel, M., Romerio, F., Gaudard, L., Burlando, P., Beniston, M., Xoplaki, E., Toreti, A., 2014. Governing and managing water resources under changing hydro-climatic contexts: The case of the upper Rhone basin. *Environ. Sci. Policy* 43, 56–67. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.11.005>

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 hochauflöste Terrainmodell der Schweiz. Bern.

Fuhrer, J., Calanca, P., 2014. Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: Eine regionale Defizitanalyse. *Agrar. Schweiz* 5, 256–263.

Jossen, L., Björnsen Gurung, A., 2018. Mehrzweckspeicher in der Schweiz und ihr Beitrag zur regionalen Resilienz. «Wasser Energie Luft» Heft 2, 108–112.

National Centre for Climate Services, 2018. CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland, CH2018. Zurich.

UVEK, 2014. Prioritäten der Energiestrategie 2050. Bern.

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R., 2009. An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ. Model. Softw.* 24, 1209–1222. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.04.001>

Zekollari, H., Huss, M., Farinotti, D., 2019. Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *Cryosph.* 13, 1125–1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>

Anschrift der Verfasser

Manuela Brunner¹, Astrid Björnsen Gurung¹, Jürg Speerli², Susanne Kytzia², Sara Bieler², Dominik Schwere² und Manfred Stähli¹

¹: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL

²: HSR, Hochschule für Technik Rapperswil

Kontakt

Manuela Brunner, WSL
manuela.brunner@wsl.ch

PROJEKTPLUS



- Projektmanagement
- Inspektionen und Abnahmen
- Zustandsexperten und Optimierungen
- Qualitätssicherung vor Ort
- deutsch · französisch · englisch



Thomas Blau
Maschinentechniker, CAS Hydro

PROJEKTPLUS AG
Rosenstrasse 2, CH-6010 Kriens
078 638 06 78
www.projekt-plus.ch

