Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 115 (2023)

Heft: 1

Artikel: Verringert ein höherer Q347-Wert die Wasserkraftproduktion? : Die schweizerischen Restwasserbestimmungen anhand von vier Lauftkraftwerken

Autor: Wechsler, Tobias / Lustenberger, Florian / Schaefli, Bettina

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1043739

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 27.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Verringert ein höherer Q_{347}-Wert die Wasserkraftproduktion?

Die schweizerischen Restwasserbestimmungen anhand von vier Laufkraftwerken

Tobias Wechsler, Florian Lustenberger, Bettina Schaefli, Regula Muelchi, Massimiliano Zappa

Zusammenfassung

Durch den Klimawandel verändern sich die Abflussmengen sowie die Abflussverteilungen in der Schweiz. Abflussveränderungen im Niedrigwasserbereich haben Auswirkungen auf den Niedrigwasserindikator Q_{347}, der nach dem Gewässerschutzgesetz (GSchG) als Richtwert zur Herleitung von Restwassermengen dient. In der vorliegenden Studie zeigen wir anhand von vier exemplarischen Laufkraftwerken, wie sich ein veränderter Q_{347}-Wert auf die Restwasserbestimmungen und auf die Wasserkraftproduktion bei einer Neukonzessionierung auswirkt.

Eine Veränderung des Q_{347}-Werts bedeutet laut Artikel 31 GSchG eine Veränderung der Restwassermenge, die jedoch von einem 1:1-Zusammenhang abweicht: Bei einer Zunahme von Q_{347} nimmt die Restwassermenge weniger stark zu. Bis Ende Jahrhundert wird für höhergelegene Kraftwerke (>2000 m ü. M.) ein höherer Q_{347}-Wert erwartet, was bei einer Neukonzessionierung eine höhere Restwassermenge bedeuten würde. Für tiefergelegene Kraftwerke (<1500 m ü. M.) nimmt Q_{347} ab und somit auch die Restwassermenge. Eine Abschätzung zukünftiger Produktionsveränderungen kann jedoch nicht aufgrund der Veränderung des Grenzwerts Q_{347} hergeleitet werden, sondern erfordert die Berücksichtigung des gesamten für die Wasserkraft nutzbaren Abflussvolumens. Für zukünftige Produktionsveränderungen spielen die Restwasserbestimmungen eine untergeordnete Rolle, entscheidend sind primär die klimabedingten Abflussveränderungen sowie die Ausbauwassermenge eines Kraftwerks.

Résumé

Le changement climatique modifie les volumes d'écoulement ainsi que la répartition des débits en Suisse. Les modifications de débit en période d'étiage entraînent des répercussions sur l'indicateur d'étiage Q_{347} qui, selon la Loi sur la protection des eaux (LEaux), sert de valeur de référence pour la détermination des débits résiduels. Dans la présente étude, nous utilisons quatre exemples de centrales au fil de l'eau pour montrer comment une modification de la valeur Q_{347} se répercute sur les dispositions relatives aux débits résiduels et sur la production hydroélectrique dans le cas d'une nouvelle concession.

Selon l'article 31 de la LEaux, une modification de la valeur Q_{347} implique une modification du débit résiduel, qui s'écarte toutefois d'une relation 1:1 : si Q_{347} augmente, le débit résiduel augmente moins fortement. D'ici la fin du siècle, on s'attend à une valeur Q_{347} plus élevée pour les centrales situées à plus haute altitude (>2000 m), ce qui signifierait un débit résiduel plus élevé en cas d'octroi d'une nouvelle concession. Pour les centrales situées à une altitude inférieure (<1500 m), Q_{347} diminue et donc aussi le débit résiduel. Cependant, une estimation des futurs changements de production ne peut pas être déduite sur la base de la modification de la valeur limite Q_{347}, mais nécessite la prise en compte de l'ensemble du volume d'écoulement utilisable pour la force hydraulique. Pour l'évolution future de la production, les dispositions relatives aux débits résiduels ne jouent qu'un rôle secondaire. Ce sont en premier lieu les modifications des débit inhérentes au climat ainsi que le débit équipé d'une centrale qui sont déterminants.

Einleitung

Der Abflusswert Q_{347} ist jener Wert, der an 347 Tagen im Jahr (95 Prozent der Zeit) erreicht oder überschritten wird. Er dient in der Schweiz als massgebender Niedrigwasserindikator. Im Gewässerschutzgesetz (Art. 31 Abs. 1) dient Q_{347} als Ausgangsgrösse für die Bestimmung der Restwassermenge. Dieses sieht vor, dass bei Wasserentnahmen aus Fliessgewässern eine Mindestabflussmenge (Restwassermenge) eingehalten werden muss, um die ökologischen Funktionen der Gewässer zu gewährleisten *(Uhlmann & Wehrli, 2006)*. Die Restwassermenge kann gemäss Zusatzbestimmungen (Art. 31 Abs. 2, Art. 32 und Art. 33 GSchG) erhöht oder herabgesetzt werden. Grundsätzlich gelten die im GSchG definierten Restwasserbestimmungen für Wasserkraftwerke, die nach 1992 entweder gebaut oder neu konzessioniert wurden (BAFU, 2022a).

Im Zuge des Klimawandels verändern sich die jährlichen Abflussmengen und deren saisonale Verteilungen, was auch eine Veränderung von Q_{347} bedeutet *(Weingartner & Schwanbeck, 2020; Muelchi et al., 2021b)*. Für höhere Gebietslagen wird eine Zunahme von Q_{347} vorhergesagt. Dies würde laut GSchG bei einer Neukonzessionierung eine Erhöhung der Restwassermenge bedeuten, was wiederum eine Reduktion der Wasserkraftproduktion vermuten lässt. Zurzeit fehlt aber eine Grundlage, um den Zusammenhang zwischen einer klimabedingten Veränderung der Q_{347}-Werte und der Schweizer Wasserkraftproduktion bestimmen zu können. In der vorliegenden Studie wird anhand von vier exemplarischen Laufkraftwerken *(Bild 1, Tabelle 1)* gezeigt, was ein klimabedingt veränderter Q_{347}-Wert für die Restwasserbestimmung laut Art. 31 GSchG bedeutet und welchen Einfluss dies auf die zukünftige Wasserkraftproduktion hat.

Q_{347} heute und in Zukunft

Zur Festsetzung von Restwassermengen wird der Abflusswert Q_{347} nach der Definition im Gewässerschutzgesetz (Art. 4 Bst. h.) als Mittelwert über 10 Jahre bestimmt. Bei einem Neubau oder einer Neu-

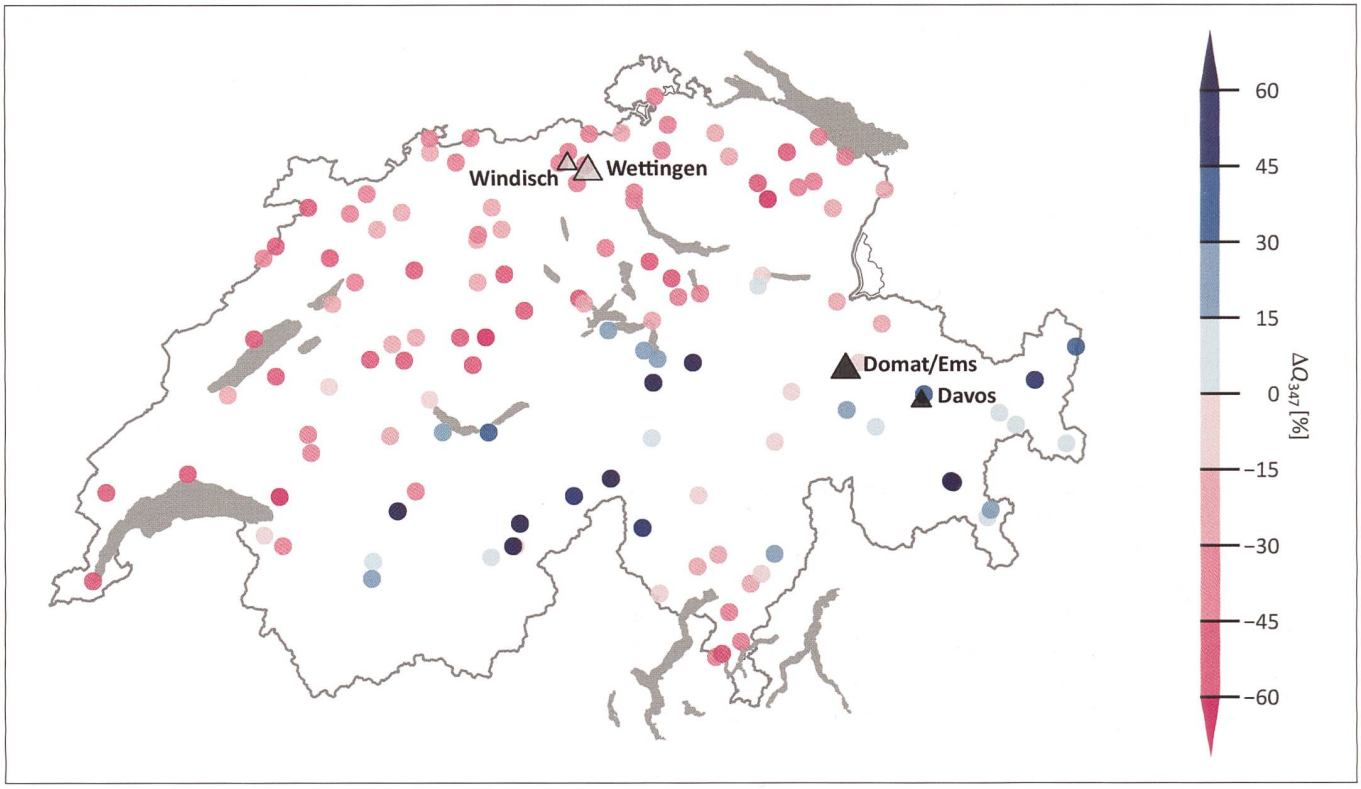

Bild 1: Standorte der vier in dieser Studie analysierten Laufkraftwerke in der Schweiz. Die zwei schwarzen Dreiecke repräsentieren die höhergelegenen Kraftwerke (Davos und Domat/Ems), die zwei grauen Dreiecke die zwei tiefergelegenen (Windisch und Wettingen). Die grossen Dreiecke repräsentieren Kraftwerke mit grosser Ausbauwassermenge, die kleinen Dreiecke solche mit einer kleinen. Im Hintergrund ist die prozentuale Veränderung des Q_{347}-Werts (ohne Klimaschutzmassnahmen, RCP8.5) zwischen der Referenzperiode und Ende Jahrhundert dargestellt. Die Abbildung wurde angepasst aus der Publikation Muelchi et al. (2021b).

Kraftwerk	Fluss	*MQ* [m³/s]	*ØEZG-h* [m ü. M.]	*ØE* [GWh/Jahr]	Q_d [m³/s]
Davos	Landwasser	6	2209	7,5	2,1
Domat/Ems	Rhein	123	2015	111,8	120
Windisch	Reuss	136	1249	12,3	55
Wettingen	Limmat	93	1131	134,7	133

Tabelle 1: Die vier Laufkraftwerke und deren Fliessgewässer, mittlerer modellierter Abfluss (*MQ*), durchschnittliche Einzugsgebietshöhe (*ØEZG-h*), mittlere Produktion (*ØE*) und Ausbauwassermenge (Q_d).

konzessionierung eines Wasserkraftwerks wird Q_{347} aufgrund von gemessenen oder simulierten Daten der Vergangenheit bestimmt (Art. 59 GSchG). Seit über 35 Jahren ist bekannt, dass für die Landschaftsästhetik und Gewässerökologie eine saisonal abgestufte Restwasserbestimmung wichtig wäre *(Bundeskanzlei, 1987; BUWAL, 2000)*. Bei Neukonzessionierungen wird dies aber nur selten berücksichtigt *(Uhlmann & Wehrli, 2007)*. Aus diesem Grund stützen wir uns einzig auf den Q_{347}-Wert und berücksichtigen keine saisonalen Abflussveränderungen. Um die Veränderung von Q_{347} von der Gegenwart bis in die Zukunft zu bestimmen, werden in der vorliegenden Studie hydrologische Szenarien verwendet. Die hydrologischen Szenarien wurden im Rahmen von Hydro-CH2018 *(BAFU, 2021)*, basierend auf den Schweizer Klimaszenarien CH2018 des National Centre for Climate Services *(CH2018, 2018)*, erstellt. Wir verwenden die hydrologischen Szenarien aus den Arbeiten von *Muelchi et al. (2021a)* und *Brunner et al. (2019)*. Beide Datensätze basieren auf dem konzeptionellen, prozessbasierten Modell PREVAH *(Viviroli et al., 2009; Zappa et al., 2017)*. Die Daten sind auf täglicher Basis für drei Emissionsszenarien und verschiedene Klimamodellketten verfügbar.

Ein Vergleich zwischen der Referenzperiode (1981 bis 2010) und der fernen Zukunft (2070 bis 2099, auch als «2085» oder «Ende Jahrhundert» bezeichnet) wird mit dem Emissionsszenario RCP8.5 durchgeführt. RCP8.5 ist das klimatologische Worst-Case-Szenario, in dem keine Klimaschutzmassnahmen ergriffen werden und die Treibhausgasemissionen weiterhin zunehmen *(CH2018, 2018)*. Dieses Worst-Case-Szenario zeigt eine Abnahme von Q_{347} bis Ende Jahrhundert in Gebieten unterhalb von 1500 m ü. M. (im Mittelland, im Jura sowie auch in tiefen Lagen im Tessin). In Gebieten zwischen 1500 und 2000 m ü. M. sind die Veränderungen gering und können sowohl positiv wie negativ ausfallen. In Gebieten über 2000 m ü. M. nimmt Q_{347} zu *(Bild 1)*. Durch den Klimawandel verändert sich die Niederschlagsart: Höhere Temperaturen führen im Winter dazu, dass Niederschlag häufiger als Regen statt als Schnee fällt, auch in höheren Lagen. Das bedeutet, dass in Zukunft Niederschlag öfter direkt abfliesst und seltener als Schnee gespeichert wird. Zudem beginnt die Schneeschmelze im Frühling früher. Insgesamt führt dies schweizweit zu einer Abflusszunahme im Winter und im Frühling. In hohen Lagen liegen die Niedrigwasserperioden weiterhin im Winter. Bedingt durch die erhöhten Winterabflussmengen nimmt aber auch Q_{347} zu. Für die Wasserkraftproduktion ist das zusätzliche Wasser im Winter (in der kalten, dunklen Jahreszeit) als Vorteil anzusehen. In tieferen Lagen kommen Niedrigwasserperioden meist im Sommer vor. Mit dem Klimawandel verlängern sich die Niedrig-

wasserperioden bis in den Spätsommer/Herbst *(Weingartner & Schwanbeck, 2020; BAFU, 2021; Muelchi et al., 2021b)*.

Vier Fallbeispiele

Hier zeigen wir die Veränderung von Q_{347} an den Standorten von vier Laufkraftwerken in der Schweiz auf *(Bild 1, Tabelle 1)*. Dafür wurden zwei Kraftwerke mit einer mittleren Gebietshöhe von mehr als 2000 m ü. M. (Davos und Domat/Ems) und zwei mit einer mittleren Gebietshöhe von weniger als 1500 m ü. M. (Windisch und Wettingen) ausgewählt. Jeweils eines der beiden Kraftwerke hat eine verhältnismässig hohe Ausbauwassermenge (Domat/Ems und Wettingen), das andere eine tiefe (Davos und Windisch). Die Ausbauwassermenge ist die maximale Abflussmenge, die, bedingt durch die Zuleitungs- und Turbinengrösse, für die Wasserkraftproduktion genutzt werden kann. Für den Vergleich der vier Kraftwerke zeigen wir den Median und die Standardabweichung der 18 Modellketten des Worst-Case-Szenarios. Beim Kraftwerkstandort in Davos ist für Q_{347} bis Ende Jahrhundert mit einer Zunahme von

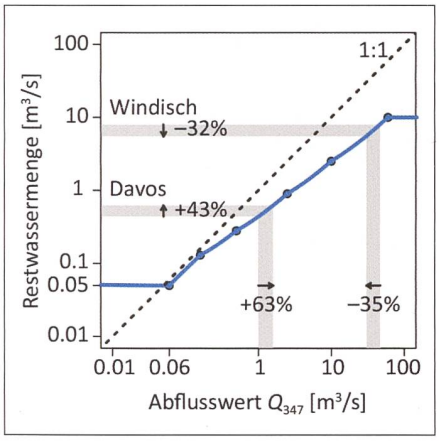

Bild 2: Bestimmung der Restwassermenge basierend auf dem Abflusswert Q_{347} nach Art. 31 Abs. 1 des Gewässerschutzgesetzes. Die blauen Punkte zeigen die definierten Schwellenwerte, die blaue Linie den tatsächlichen Zusammenhang zwischen Q_{347} und der Restwassermenge, der von einem 1:1 Zusammenhang (gestrichelte schwarze Linie) abweicht. Anhand von zwei Kraftwerkbeispielen sind die Veränderungen beider Grössen bis Ende Jahrhundert dargestellt. Die Pfeile zeigen die Zu- oder Abnahme, die Prozentzahlen das Ausmass der Veränderungen. Die Abbildung wurde inspiriert von der Botschaft zur Volksinitiative «Rettet unsere Gewässer» und zur Revision des GSchG (Bundeskanzlei, 1987).

Kraftwerk	ΔQ_{347} [%]	Δrw [%]
Davos	+63	+43
Domat/Ems	+9	+8
Windisch	-35	-32
Wettingen	-32	-28

Tabelle 2: Prozentuale Veränderung des Abflusswerts Q_{347} (ΔQ_{347}) und der Restwassermenge (Δrw) zwischen der Referenzperiode und der Zukunftsperiode (2085, RCP8.5) an allen vier Kraftwerkstandorten.

63 Prozent (±18 Prozent) zu rechnen. Beim zweiten höhergelegenen Standort (Domat/Ems) ist eher mit einer Zunahme von 9 Prozent (±12 Prozent) zu rechnen. An den beiden tieferen Standorten (Windisch und Wettingen) wird eine Abnahme um 35 Prozent (±16 Prozent) respektive 32 Prozent (±12 Prozent) erwartet *(Tabelle 2)*. Diese Veränderungen stimmen mit den zuvor beschriebenen Entwicklungen der künftigen Q_{347}-Veränderung überein *(Muelchi et al., 2021b; BAFU, 2021)*. Bei den weiteren Berechnungen bestehen Unsicherheiten in ähnlicher Grössenordnung, diese werden jedoch nicht aufgeführt.

Berechnete Restwassermengen

Die durch die Wasserentnahmen bedingte Restwassermenge an den vier Kraftwerkstandorten bestimmen wir nach Artikel 31 des Gewässerschutzgesetzes (GSchG). Dieser definiert, dass Gewässer mit einer ständigen Wasserführung ($Q_{347} > 0$; Art. 4 Bst. i. GSchG) von den Restwasserbestimmungen betroffen sind. Dies trifft auf alle vier Kraftwerke zu. Die Zusatzbestimmungen in Art. 31 Abs. 2, Art. 32 und Art. 33 werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. *Tabelle 3* gibt die gesetzlichen Bestimmungen wieder: Ist Q_{347} kleiner oder gleich 0,06 m³/s, müssen mindestens 0,05 m³/s als Restwasser gewährleistet werden. Darüber sind fünf weitere Q_{347}-Schwellenwerte und die dazugehörenden Restwassermengen definiert. Dieses Verhältnis folgt jedoch keinem 1:1-Zusammenhang: Mit zunehmendem Q_{347} nimmt die dazugehörige Restwassermenge weniger stark zu *(Bild 2)*, hingegen verringert sich der Abflusswert Q_{347} bei einer Abnahme stärker als die dazugehörige Restwassermenge.

Abflusswert Q_{347} [m³/s]	Restwassermenge [m³/s]
≤ 0,06 *danach je 0,01*	0,05 *+0,008 mehr*
0,16 *danach je 0,01*	0,13 *+0,0044 mehr*
0,5 *danach je 0,1*	0,28 *+0,031 mehr*
2,5 *danach je 0,1*	0,9 *+0,0213 mehr*
10 *danach je 1*	2,5 *+0,15 mehr*
≥ 60	10

Tabelle 3: Bestimmung der Restwassermenge basierend auf dem Abflusswert Q_{347} nach Artikel 31 des Gewässerschutzgesetzes.

Alle Restwassermengen werden in dieser Studie anhand von simulierten Abflüssen berechnet. Das bedeutet, dass die Berechnungen der Referenzperiode nicht genau den gemessenen Abflusswerten entsprechen. Die verwendeten Restwassermengen werden nach strikter Anwendung von Artikel 31 GSchG bestimmt, stimmen aber nicht mit den in den Konzessionen vermerkten Werten überein und sind in allen vier Fällen höher. Zukünftige Restwassermengen zeigen die selbe, jedoch abgeschwächte Entwicklung wie bei den Q_{347}-Werten: In Davos (+43 Prozent) und Domat/Ems (+8 Prozent) zeigen die simulationsbasierten Berechnungen eine Zunahme der Restwassermengen bis Ende Jahrhundert, in Windisch (-32 Prozent) und Wettingen (-28 Prozent) eine Abnahme *(Tabelle 2)*.

Veränderung des Restwasservolumens

Eine Grenzwertbetrachtung (Restwassermenge abgeleitet von Q_{347}) enthält keine zeitliche Information und erlaubt keine Abschätzung der Auswirkungen auf das für die Wasserkraft nutzbare Volumen (Q_{nutz}). Eine Abschätzung erfordert eine Volumenbetrachtung über eine bestimmte Zeit hinweg, was wir im Folgenden als Restwasservolumen (Q_{rw}) bezeichnen. Die Auswirkungen einer Veränderung bis Ende Jahrhundert werden anhand einer Dauerkurve (mit Werten über je 30 Jahre) pro Standort analysiert. Eine Dauerkurve zeigt die Auftretenswahrscheinlichkeit von Tagesabflusswerten *(Bild 3)*. Q_{nutz} wird durch die Ausbauwassermenge (Q_d) und das Restwasservolumen (Q_{rw}) begrenzt. Übersteigt der Abfluss zu einem Zeitpunkt die Ausbauwassermenge eines Kraftwerks, kann der überschüssige Teil nicht für die Produktion genutzt werden und fliesst als Überlauf ab. In dieser Studie werden jene Tage, an denen keine Produktion möglich ist (z.B. aufgrund von Hochwasserereignissen oder Wartungsarbeiten) nicht berücksichtigt. Zur Berechnung der Verän-

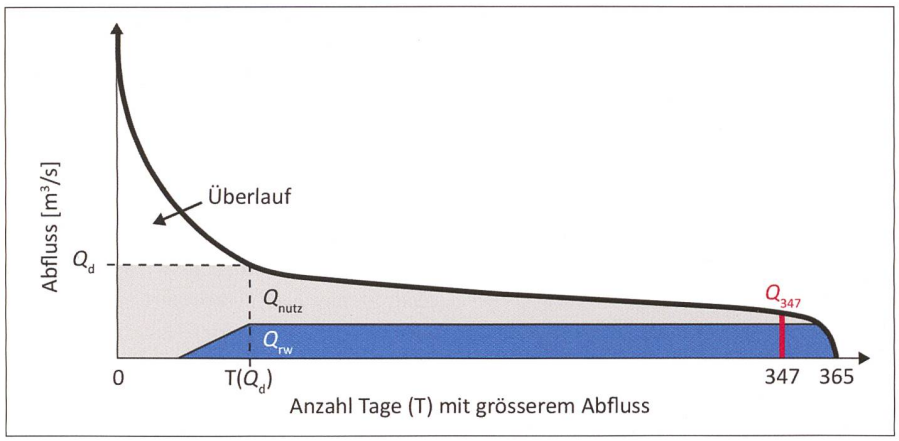

Bild 3: Illustration der Dauerkurve für die Analyse des Restwasservolumens (Q_{rw}, blau), des für die Wasserkraft nutzbaren Abflussvolumens (Q_{nutz}, grau) sowie des aufgrund der Limitierung durch die Ausbauwassermenge (Q_d) nicht genutzten Volumens (Überlauf). Q_{347} (rot) indiziert jenen Abflusswert, der an 347 Tagen erreicht oder überschritten wird. Die Abbildung wurde inspiriert von Hänggi et al. (2012).

Kraftwerk	ΔMQ [%]	ΔQ_{nutz} [%]	ΔQ_{rw} [%]	ΔE [%]	ΔE_{rw} [%]
Davos	*-7*	*+7*	*+0*	*+7*	*+3*
Domat/Ems	*-9*	*-3*	*+23*	*-3*	*+23*
Windisch	*-10*	*-4*	*+3*	*-4*	*+4*
Wettingen	*-8*	*-7*	*-27*	*-7*	*-27*

Tabelle 4: Prozentuale Veränderung des mittleren modellierten Abflusses (ΔMQ), des nutzbaren Wasservolumens (ΔQ_{nutz}), des Restwasservolumens (ΔQ_{rw}), der mittleren Wasserkraftproduktion (ΔE) und der mittleren Produktionseinbussen durch Restwasser (ΔE_{rw}) zwischen der Referenzperiode und der Zukunftsperiode (2085, RCP8.5) der vier Kraftwerksstandorte.

derung von Q_{nutz} zwischen der Referenzperiode und der Zukunftsperiode (2085) werden die Abflussveränderungen und die Veränderung der Restwasservolumen (Q_{rw}) berücksichtigt. Die Ausbauwassermengen (Q_d) werden als konstant angenommen.

Die zwei höhergelegenen Kraftwerke (Davos *(a)* und Domat/Ems *(b)*, *Bild 4*) zeigen eine klimabedingte Zunahme des Q_{347}-Werts sowie der Niedrigwasserabflüsse bis Ende Jahrhundert. Die Zunahme von Q_{347} bedeutet, dass im Niedrigwasserbereich Q_{nutz} zunimmt und somit einen Einfluss auf die Wasserkraftproduktion haben wird. Bei den zwei tiefergelegenen Kraftwerken (Windisch *(c)* und Wettingen *(d)*, *Bild 4*) nimmt die Abflussmenge im Niedrigwasserbereich bis Ende Jahrhundert ab. Laufkraftwerke mit einer höheren Ausbauwassermenge (Q_d) nutzen einen grösseren Teil des Abflussvolumens für die Produktion. Somit besteht bei diesen Kraftwerken ein stärkerer Zusammenhang zwischen Q_{nutz} und den Veränderungen der mittleren Abflüsse *(Tabelle 4)*. Dies betrifft das höhergelegene Kraftwerk Domat/Ems (-3 Prozent Q_{nutz}) und das tiefergelegene Kraftwerk Wettingen (-7 Prozent Q_{nutz}).

Die klimabedingte Veränderung des Restwasservolumens (Q_{rw}) zeigt einen stärkeren Zusammenhang mit der relativen Ausbauwassermenge als mit der Gebietshöhe: Die beiden Kraftwerke mit einer hohen Ausbauwassermenge (Domat/Ems und Wettingen) sind bis Ende Jahrhundert von stärkeren Änderungen (+23 Prozent, -27 Prozent) des Restwasservolumens (Q_{rw}) betroffen *(Tabelle 4)* als die beiden kleineren Kraftwerke (Davos: +0 Prozent, Windisch: +3 Prozent). Das Verhältnis zwischen Restwasservolumen und Abflussvolumen

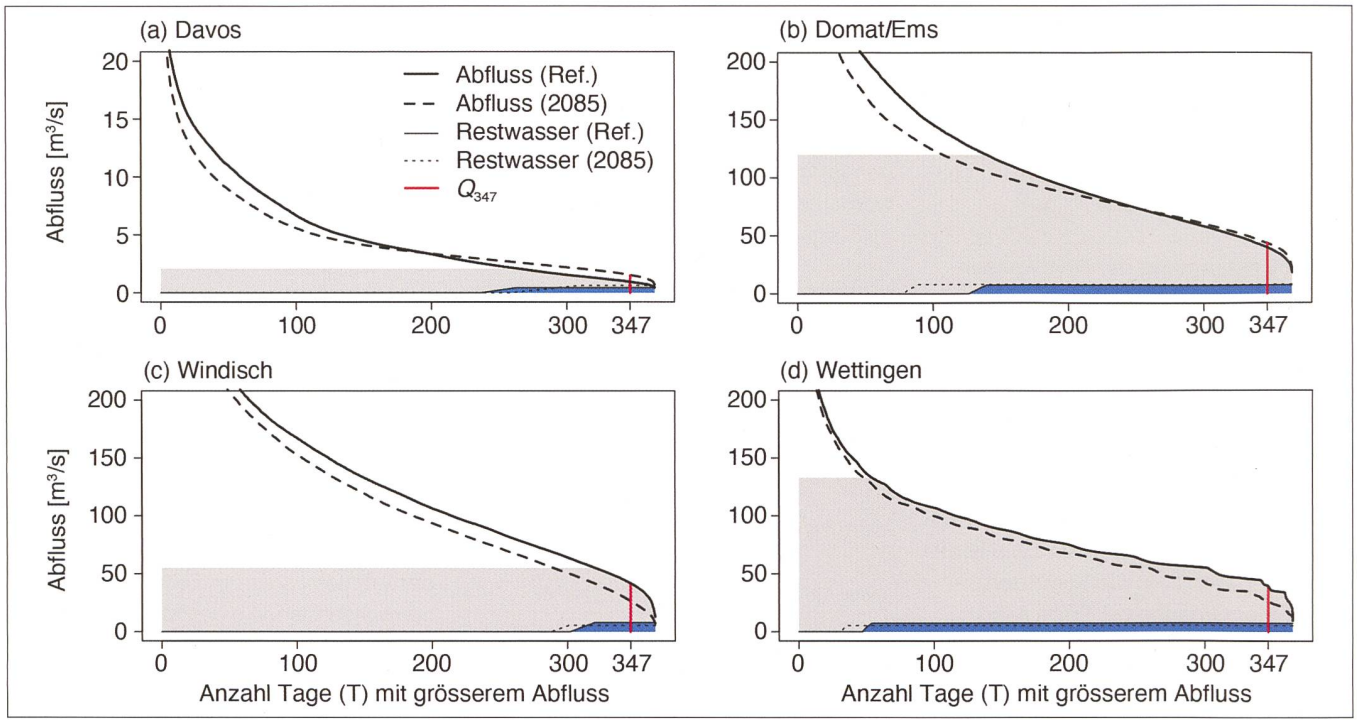

Bild 4: Dauerkurven der Kraftwerke (a) Davos, (b) Domat/Ems, (c) Windisch und (d) Wettingen. Dargestellt sind jeweils die Dauerkurven und Restwasservolumen (Q_{rw}, blau) der Referenzperiode (Ref.; ausgezogene Linie) und der Zukunftsperiode (2085; gestrichelte Linie) sowie das für die Wasserkraft nutzbare Abflussvolumen (Q_{nutz}, grau). Die rote Linie repräsentiert den Q_{347}-Wert. Die Abbildung wurde inspiriert von Hänggi et al. (2012) und SCCER (2019).

verändert sich bis Ende Jahrhundert nur geringfügig und beträgt für alle vier Kraftwerke rund 1 Prozent. Dies ist auch in der Produktionsveränderung ersichtlich (Kapitel Produktionsveränderung, *Bild 5*).

Restwasser und Abflussanteile

In Zusammenhang mit Artikel 31 des Gewässerschutzgesetzes wird häufig angeführt, dass «Kraftwerke 88 bis 94 Prozent des Wassers entnehmen dürfen und für die Natur gerade noch 6 bis 12 Prozent übrigbleiben» *(BAFU, 2022b; Bittner & Bischof, 2022)*. Unter Berücksichtigung des gesamten Abflussvolumens (inklusive des Überlaufs), ergeben sich für die vier von uns betrachteten Laufkraftwerke folgende Zahlen *(Bild 5)*: 1 bis 7 Prozent für das Restwasservolumen (Q_{rw}) und 32 bis 85 Prozent für das nutzbare Abflussvolumen (Q_{nutz}); 9 bis 66 Prozent bleiben aufgrund der Limitierung durch die Ausbauwassermenge (Q_d) ungenutzt (Überlauf). Anhand der vier Kraftwerke ordnen wir die oben erwähnte Aussage wie folgt ein: die Quantifizierung des Restwasservolumens (Q_{rw}) von 6 bis 12 Prozent ist zu hoch, da sie nur das Verhältnis zwischen dem für die Wasserkraft nutzbaren Abflussvolumen (Q_{nutz}) und dem Restwasservolumen (Q_{rw}) umfasst, anstatt das des gesamten Abflussvolumens.

Produktionsveränderung

Diverse Studien haben gezeigt, dass zwischen Abflussveränderungen und Produktionsveränderungen nicht von einem linearen Zusammenhang ausgegangen werden kann *(z.B. François et al., 2018; Savelsberg et al., 2018)*. Entscheidend sind die Veränderungen des für die Wasserkraft nutzbaren Abflussvolumens (Q_{nutz}). Die Produktionsveränderungen der vier Kraftwerke werden hier mit der in der Arbeit von *Hänggi et al. (2012)* beschriebenen Methodik berechnet. Dazu berücksichtigen wir die klimabedingten Abflussveränderungen, die Ausbauwassermenge der Kraftwerke sowie die Restwasserbestimmung nach Artikel 31.

Die Wasserkraftproduktion (E) [GWh] wird mit *Formel (1)* berechnet:

$$E = Q_{nutz} * H * F \qquad (1),$$

wobei Q_{nutz} [m³/s] dem Abflussvolumen über eine bestimmte Zeit hinweg (30 Jahre) entspricht, H [m] der hydraulischen Fallhöhe (Höhenunterschied zwischen der Wasserentnahme und der Turbinenachse) und F [kg/(m²s²)] dem Faktor, der den groben Wirkungsgrad eines spezifischen Kraftwerks bestimmt. H und F werden in dieser Studie unabhängig von der Abflussmenge als konstant angenommen. Weitere Details zu den Kraftwerken finden sich im Datensatz *RoRCC (2021)*, detaillierte Beschreibungen der Berechnungen in den Arbeiten von *Wechsler et al. (in Review)* und *SCCER (2019)*.

Obwohl der mittlere Abfluss an allen vier Standorten bis Ende Jahrhundert abnimmt, werden unter Anwendung von *Formel (1)* für die Wasserkraftproduktion unterschiedliche Produktionsveränderungen vorhergesagt *(Tabelle 4)*. Die Wasserkraftwerke mit einer hohen Ausbauwassermenge (Domat/Ems und Wettingen) zeigen eine bessere Übereinstimmung zwischen den Produktionsveränderungen (-3 Prozent, -7 Prozent) und den Veränderungen der mittleren Abflüsse (-9 Prozent, -8 Prozent). Die tiefergelegenen Kraftwerke (Windisch und Wettingen) zeigen beide einen Produktionsrückgang (-4 Prozent, -7 Prozent). In Domat/Ems ist ebenfalls mit einer leichten Abnahme zu rechnen (-3 Prozent). In Davos hingegen ist mit einer Produktionszunahme (+ 7 Prozent) zu rechnen.

Die sogenannten «Produktionseinbussen durch die Restwasserbestimmungen» (E_{rw}), die per Gesetz dem Schutz der Ökosysteme dienen und somit primär nicht als Einbussen verstanden werden dürfen, werden in dieser Studie analog zu *Formel (1)* berechnet. Anstelle von Q_{nutz} wird in *Formel (2)* jedoch das Restwasservolumen (Q_{rw}) verwendet:

$$E_{rw} = Q_{rw} * H * F \qquad (2).$$

Die Produktionseinbussen durch die Restwasserbestimmungen verändern sich insbesondere bei Kraftwerken mit einer hohen Ausbauwassermenge stark *(Tabelle 4)*: Beim höhergelegenen Kraftwerk (Domat/Ems) ist für E_{rw} bis Ende Jahrhundert mit einer Zunahme zu rechnen (+23 Prozent), beim tiefergelegenen (Wettingen) mit einer Abnahme (-27 Prozent). Für die Kraftwerke mit einer tiefen Ausbauwassermenge werden für E_{rw} geringfügige Veränderungen vorhergesagt (Davos: +3 Prozent, Windisch: +4 Prozent).

Die Restwasserbestimmungen sorgen für Produktionseinbussen von 1 bis 7 Prozent *(Bild 5)*. Verglichen mit der Wasserkraftproduktion (32 bis 85 Prozent) und dem durch Überlauf bedingten ungenutzten Potenzial (9 bis 66 Prozent) bilden die Produktionseinbussen durch die Restwasserbestimmungen (E_{rw}) heute und auch in Zukunft den kleinsten Anteil *(Bild 5)*. Zwar vergrössert sich der prozentuale Anteil der Wasserkraftproduktion (E) im Verhältnis zum gesamten Energie-Potenzial bei allen vier Kraftwerken bis Ende Jahrhundert *(Bild 5)*; für die mittlere Produktion wird jedoch, mit Ausnahme des Kraftwerks Davos, eine Reduktion erwartet *(Tabelle 4)*.

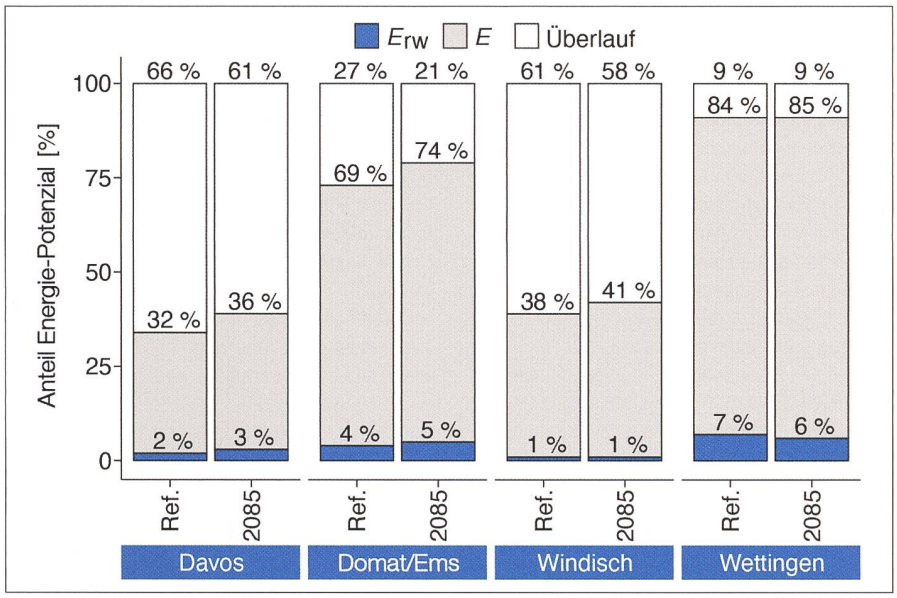

Bild 5: Prozentuale Anteile des Energie-Potenzials der vier Kraftwerkstandorte für die beiden Zeitperioden (Referenzperiode und 2085). Die Anteile unterscheiden zwischen den Produktionseinbussen durch Restwasserbestimmungen (E_{rw}, blau), der Wasserkraftproduktion (E, grau) und dem Potenzial, das aufgrund der Limitierung durch die Ausbauwassermenge für die Wasserkraftproduktion nicht genutzt werden kann (Überlauf, weiss).

Schlussfolgerung

In dieser Studie zeigen wir exemplarisch anhand von vier Laufkraftwerken in der Schweiz, wie sich ein durch den Klimawandel veränderter Q_{347}-Wert auf die Restwasserbestimmungen auswirkt und welche Folgen dies für die zukünftige Wasserkraftproduktion haben kann. Die vier Fallbeispiele zeigen stellvertretend für viele andere Kraftwerke in der Schweiz auf, wie sich die gesetzlichen Bestimmungen auf die klimabedingten Veränderungen von Restwassermengen auswirken. Ein höherer Q_{347}-Wert bedeutet nach Artikel 31 GSchG auch eine höhere Restwassermenge. Bei den zwei höhergelegenen Kraftwerken (Davos und Domat/Ems) sind ein höherer Q_{347}-Wert und eine höhere Restwassermenge zu erwarten, bei den zwei tiefergelegenen Kraftwerken (Windisch und Wettingen) ein tieferer Q_{347}-Wert und eine tiefere Restwassermenge. Zwischen dieser Entwicklung und der zukünftigen Wasserkraftproduktion besteht jedoch kein direkter Zusammenhang. Beim Kraftwerk mit der stärksten Zunahme der Restwassermenge (Davos) resultiert eine Zunahme in der Wasserkraftproduktion aufgrund der Zunahme der Niedrigwasserabflüsse. Beim zweiten Kraftwerk mit Restwasserzunahme (Domat/Ems) sowie bei den zwei Kraftwerken mit einer reduzierten Restwassermenge (Windisch und Wettingen) resultiert eine Produktionsreduktion *(Bild 6)*. Die Produktionsveränderung ist primär abhängig von klimabedingten Abflussveränderungen sowie von der Ausbauwassermenge eines Kraftwerks. Kraftwerke mit einer höheren Ausbauwassermenge (Q_d) nutzen einen grösseren Teil des Abflussvolumens, womit ein stärkerer Zusammenhang zwischen Abflussveränderungen und Produktionsveränderungen besteht. Die Produktionseinbussen durch die Restwasserbestimmungen sind verhältnismässig klein und spielen im Vergleich zum gesamten Energie-Potenzial eine untergeordnete Rolle. Abschliessend kann gesagt werden, dass eine Abschätzung zukünftiger Produktionsveränderungen nicht aufgrund der Veränderung des Q_{347}-Grenzwerts erfolgen darf. Eine solche Abschätzung erfordert die Berücksichtigung des gesamten für die Wasserkraft nutzbaren Abflussvolumens.

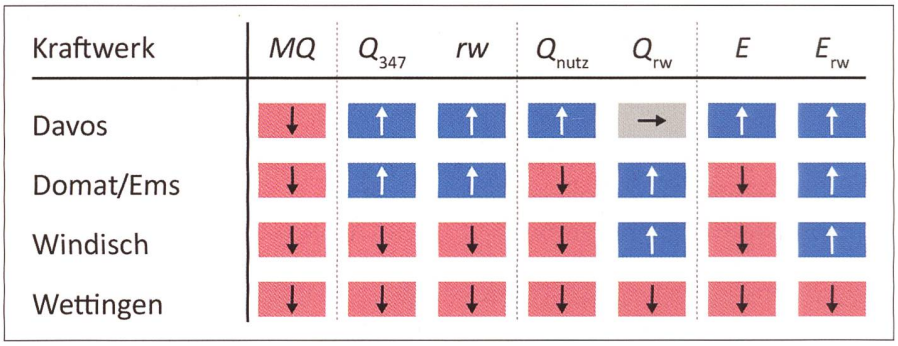

Bild 6: Graphische Zusammenfassung der Veränderungen zwischen Referenzperiode und Ende Jahrhundert für die vier Kraftwerke. Dargestellt sind die Veränderungen des mittleren Abflusses (*MQ*), des Q_{347}-Werts, der Restwassermenge (*rw*), des für die Wasserkraft nutzbaren Abflussvolumens (Q_{nutz}), des Restwasservolumens (Q_{rw}), der Wasserkraftproduktion (*E*) und der Produktionseinbussen durch Restwasserbestimmungen (E_{rw}). Ein Pfeil nach oben (blau) repräsentiert eine Zunahme, ein Pfeil nach unten (rot) eine Abnahme und ein horizontaler Pfeil (grau) gleichbleibende Verhältnisse.

Quellen:

BAFU (2021): Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2101.

BAFU (2022a): Restwasser. Internetseite: www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/fachinformationen/massnahmen-zum-schutz-der-gewaesser/renaturierung-der-gewaesser/restwasser.html. (Zuletzt besucht am 28.09.2022). Bundesamt für Umwelt. Bern.

BAFU (2022b): Restwasser – Gewässer brauchen Wasser. Internetseite: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/dossiers/restwasser.html (Zuletzt besucht am 28.09.2022). Bundesamt für Umwelt. Bern.

Bittner, D., Bischof, K. (2022): Restwasser. Schweizerischer Fischerei-Verband. Bern.

Brunner, M.I., Björnsen Gurung, A., Zappa, M., Zekollari, H., Farinotti, D., Stähli, M. (2019): Present and future water scarcity in Switzerland: Potential for alleviation through reservoirs and lakes, Sci. Total Environ. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.169.

Bundeskanzlei (1987): Botschaft zur Volksinitiative «Zur Rettung unserer Gewässer» und zur Revision des Bundesgesetzes über den Schutz der Gewässer. Bern. 87.036.

CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, ISBN: 978-3-9525031-4-0

BUWAL (2000): Wegleitung Angemessene Restwassermengen – Wie können sie bestimmt werden? Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. VU-2701-D.

François, B., Hingray, B., Borga, M., Zoccatelli, D., Brown, C., Creutin, J.D. (2018): Impact of climate change on combined solar and run-of-river power in Northern Italy, Energies. DOI: 10.3390/en11020290.

GSchG, 1991 (2011): Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz GSchG). https://fedlex.data.admin.ch/filestore/fedlex.data.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/20150908/de/pdf-a/fedlex-data-admin-ch-eli-cc-1992-1860_1860_1860-20150908-de-pdf-a.pdf.

Hänggi, P., Weingartner, R. (2012): Variations in Discharge Volumes for Hydropower Generation in Switzerland, Water Resources Management. DOI: 10.1007/s11269-011-9956-1.

Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., Martius, O. (2021a). An ensemble of daily simulated runoff data (1981–2099) under climate change conditions for 93 catchments in Switzerland (Hydro-CH2018-Runoff ensemble). Geoscience data journal, 9(1), 46-57. https://doi.org/10.1002/gdj3.117.

Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R., Martius, O. (2021b): River runoff in Switzerland in a changing climate – Changes in moderate extremes and their seasonality, HESS 25. DOI: 10.5194/hess-25-3577-2021.

Savelsberg, J., Schillinger, M., Schlecht, I., Weigt, H. (2018): The impact of climate change on Swiss hydropower, Sustain. DOI: 10.3390/su10072541.

SCCER (2019): Climate change impact on Swiss hydropower production: synthesis report. Swiss Competence Center for Energy Research – Supply of Electricity. Zurich.

Uhlmann, V., Wehrli, B. (2006): Wasserkraftnutzung und Restwasser. Standortbestimmung zum Vollzug der Restwasservorschriften. Kastanienbaum.

Uhlmann, V., Wehrli, B. (2007): Die Sicherung angemessener Restwassermengen: wie wird das Gesetz vollzogen? Wasser, Energie, Luft, 99(4), 307-310.

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. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.04.001.

Wechsler, T., 2021: RoRCC. EnviDat. DOI: 10.16904/envidat.259.

Wechsler, T., Schaefli, B., Zappa, M., Jorde, K., Stähli, M., (in Review): The future of Swiss run-of-river hydropower production: climate change, environmental flow requirements and technical production potential. DOI: //doi.org/10.31223/X5T92Q.

Weingartner, R., Schwanbeck, J. (2020): Veränderung der Niedrigwasserabflüsse und der kleinsten saisonalen Abflüsse in der Schweiz im Zeitraum 1961 – 2018. Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern.

Zappa, M., Liechti, K., Deller, M., Barben, M. (2017). Wasserhaushalt der Schweiz 2.0. Eine validierte, modellgestützte Methode für die Bilanzierung der Wasserressourcen der Schweiz. Wasser, Energie, Luft, 109(3), 203-212.

Autorinnen und Autoren:

Tobias Wechsler[1,2], Florian Lustenberger[1], Prof. Dr. Bettina Schaefli[2], Dr. Regula Muelchi[2], Dr. Massimiliano Zappa[1]

[1]Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, tobias.wechsler@wsl.ch

[2]Universität Bern, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern bettina.schaefli@giub.unibe.ch