

# Trockenheit in der Schweiz: Vergleich der Jahre 2003, 2015 und 2018

Massimiliano Zappa, Katharina Liechti, Adam H. Winstral, Martin Barben

## Zusammenfassung

In den Jahren 2003, 2015 und 2018 haben sich ausserordentlich trockene Sommer ereignet. Dieser Beitrag vergleicht diese drei Trockenjahre, unter Einbezug von Modelsergebnissen, aus unterschiedlichen Perspektiven. Die Auswertungen zeigen, dass sich die Trockenheit im Osten des Landes jeweils früher ausprägte als im Westen. Auch die Entspannung der Lage setzte im Osten früher ein als im Westen. Durch ihre Gletscher blieben die regionalen Abflussanomalien im Wallis und im Engadin unter denjenigen der anderen Grossregionen des Landes. Sowohl 2003 (Juni und August) als auch 2015 (Juli) bestand ein starker Zusammenhang zwischen Schmelzraten in den hohen Lagen und dem Auftreten einer Hitzewelle. 2018 sorgte vor allem der trockene und warme April für eine starke Ausschöpfung der Wasserressourcen, welche dann ab Mitte Juli wegen erneutem Regendefizit weiter schrumpften. Sowohl 2003 als auch 2018 kumulierte sich zwischen April und September in den Regionen unterhalb von 1300 m ü. M. ein starkes Abflussdefizit. Dieses Defizit beeinträchtigte unter anderem die Quellschüttungen, die Ökologie der Flüsse, die Seepegelstände, die Landwirtschaft, die Trinkwasserversorgung, die Wasserkraft und die Schifffahrt. Die Früherkennung von kritischen Trockenperioden und die Erarbeitung weiterer Grundlagen sind essenziell, um besser auf kommende Trockenheiten vorbereitet zu sein.

## 2. Eignung des verwendeten Modells

Sämtliche hier gezeigten Analysen basieren auf Modellexperimenten mit dem hydrologischen Modell PREVAH [15] in seiner räumlich expliziten Version [13,11]. Diese Version wurde im Rahmen der Studie CCHYDRO des BAFU [2] als Werkzeug für die Bereitstellung zeitlich und räumlich hoch aufgelöster Szenarien des Wasserkreislaufs für das 21. Jahrhundert für verschiedene Klimaregionen und Höhenstufen der Schweiz entwickelt und validiert [1, 13, 17]. Die Ergebnisse der Modellexperimente bestehen aus Gitterdaten (200×200 m-Gitterpunkte für die gesamte hydrologische Schweiz) und aus Zeitreihen der verschiedenen Komponenten des Wasserhaushaltes für die Jahre 1981 bis 2018. Gitterdaten stehen als Monatswerte zur Verfügung, während die integrierten Zeitreihen für die Grosseinzugsgebiete und die ausgewählten Messstandorte des Bundesamtes für Umwelt als Tageswerte vorliegen. Letztere können jeweils zur Bestimmung der Modelleignung verwendet werden, indem die Modelsergebnisse mit den entsprechenden Beobachtungen verglichen werden (Bild 1).

Das hydrologische Modell kann den Jahresverlauf des Abflusses des Rheins in Basel (BAFU-Station 2289) gut bis sehr gut nachbilden. Während 2003 kaum Hochwasser stattfanden, gab es sowohl 2015 (Mai) als auch 2018 (Januar und Dezember) Phasen mit stark erhöhtem Abfluss, welche das Modell realitätsnah wiedergeben konnte. Auch die Niedrigwasserphasen wurden bezüglich des zeitlichen Auftretens und des Abflussvolumens vom Modell gut simuliert.

Wenn man die durchschnittliche Niedrigwasserkenngrosse NM7Q<sup>1</sup> (494.1 m<sup>3</sup>/s, Bild 1) der Auswertungsperiode für den Pegel in Basel bezieht, erkennt man, dass 2003 die akute Niedrigwasser-

## 1. Aussergewöhnliches häuft sich

In den letzten 50 Jahren wurde die Schweiz wiederholt von Hochwasserereignissen heimgesucht. Der Umgang mit der Hochwasserproblematik und deren Früherkennung beschäftigen Ämter und Forschende schon seit längerer Zeit. Die Trockenheit jedoch nahm bisher unter den Naturereignissen in der Schweiz eine eher untergeordnete Rolle ein. Der Sommer 2003 war ein erster Weckruf in Sachen möglicher Auswirkungen von kritischen Trockenperioden in der Schweiz [6]. Die aktuellen Klimaszenarien deuten auf eine Häufung solcher Situationen hin [11], was den Umgang mit Trockenheit zu einer der Kernaufgaben im Sinne der Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz macht [3].

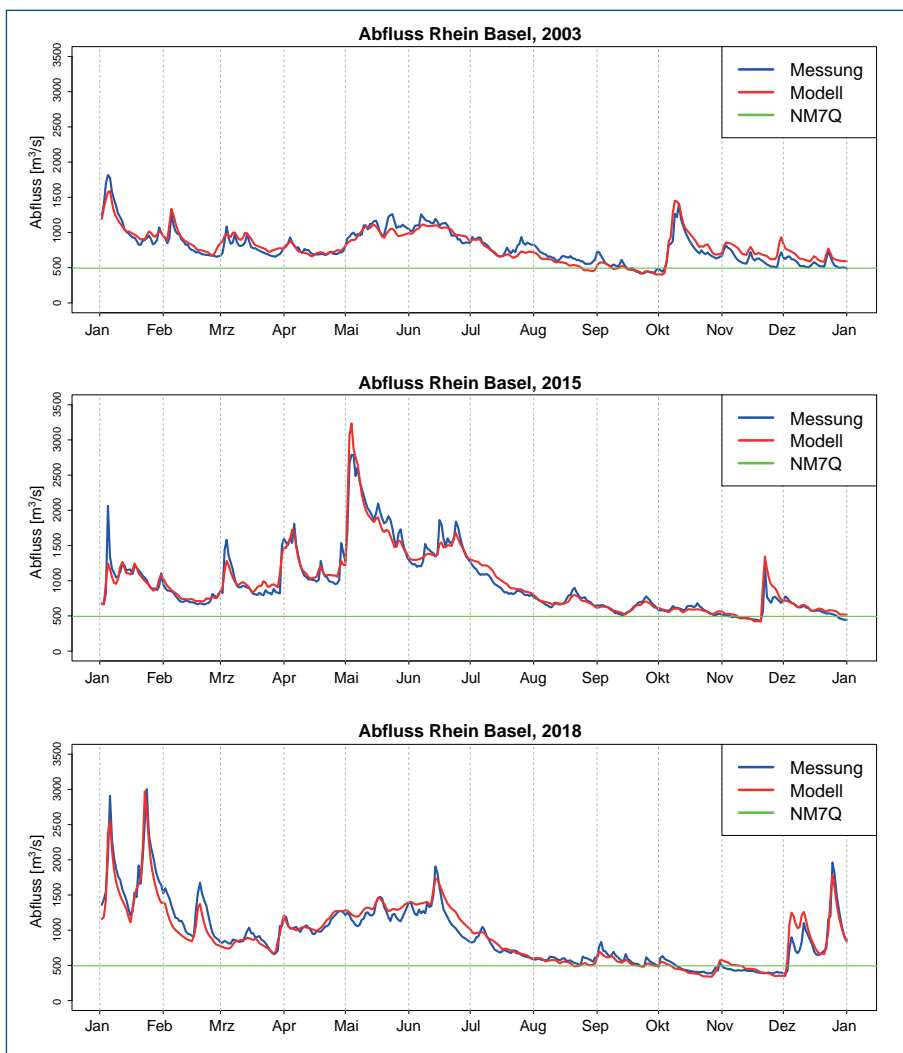
Nach 2003 [6,16] haben sich 2015 [4] und 2018 [5,7,10] weitere ausserordentlich trockene Sommer ereignet. Dieser Beitrag beleuchtet verschiedene Aspekte der drei genannten Sommer-Trockenheiten. Dafür werden die in Zappa et al. [17] erarbeiteten Grundlagen zum Was-

serhaushalt der Schweiz aus fünf Perspektiven ausgewertet:

- Ein Vergleich der Hauptkomponenten des Wasserhaushaltes (Niederschlag, Abfluss, Verdunstung, Schneespeicher, «Niedrigwasserspeicher» und Bodenfeuchte) gegenüber ihrer monatlichen Klimareferenz als Integral für die gesamte hydrologische Schweiz, d. h. inklusiv die Zuflüsse aus dem Ausland [17].
- Ein Vergleich der Abflüsse des Rheins in Basel. Und damit verbunden ein Vergleich von beobachteten und simulierten Ganglinien zur Beurteilung der Eignung des verwendeten Modells.
- Eine Betrachtung der Schneeresourcen [9].
- Ein räumlicher Vergleich der Anomalien des Abflusses für jeden Monat des Jahres in ausgewählten Grossregionen.
- Eine Auswertung der monatlichen Abflussanomalien für die gesamte hydrologische Schweiz, aufgelöst nach Höhenstufen.

<sup>1</sup> Kleinstes 7-Tagesmittel des Abflusses innerhalb eines Niedrigwasserjahres (1. Mai bis 30. April).





**Bild 1. Vergleich der gemessenen (blau) und simulierten (rot) Abflussganglinien des Rheins in Basel (BAFU-ID 2289) für die drei von trockenen Sommern betroffenen Jahre 2003 (oben), 2015 (Mitte) und 2018 (unten). Die grüne Linie stellt die Niedrigwasserkenngrosse NM7Q dar, welche das kleinste 7-Tagesmittel des Abflusses innerhalb eines Niedrigwasserjahres (1. Mai bis 30. April) beschreibt (Durchschnittswert der Auswertungsperiode: 494.1 m<sup>3</sup>/s, Daten: BAFU).**

phase des Rheins zwischen Mitte September und Anfang Oktober knapp über zwei Wochen andauerte. 2015 dauerte diese Phase auch gut zwei Wochen ab Anfang November. Danach fiel der Abfluss auch Ende Dezember unter die NM7Q-Schwelle. 2018 bewegte sich der Abfluss des Rheins in Basel ab Anfang Oktober bis Anfang Dezember während gut sieben Wochen (mit einem kleinen Unterbruch) unter dem mittleren NM7Q-Wert. Während dieser Phase wurde die Schifffahrt im Rhein stark eingeschränkt. Das Modell konnte das unterschiedliche Abflussgeschehen gut wiedergeben, wobei das Modell für 2003 bereits Ende August einige Tage Abflusswerte unterhalb des NM7Q errechnete.

### 3. Vergleich zur Klimareferenz

Die monatlichen Werte der Wasserhaushaltskomponenten und deren Abweichung von der Klimareferenz (1981–2010)

sind in *Bild 2* dargestellt. Trotz überdurchschnittlichen Schneeresourcen Ende Januar, kam es 2003 und 2018 zu einem starken Abflussdefizit gleich nach Ende der Hauptphase der Schneeschmelze. 2003 konnte dies auch nicht der vom nassen Herbst 2002 gefüllte Niedrigwasserspeicher (*siehe Box, Seite 97*) verhindern. 2018 folgte auf einen ausserordentlich nassen Januar [7] mit Hochwasser (*Bild 1*) auch eine verfrühte, starke Schneeschmelze im April und damit ein rascher Rückgang der verfügbaren Wasserressourcen. 2015 war der Frühling eher nass und im Mai sorgten ergiebige Regenfälle dafür, dass bis Ende Juni keine Defizite an Wasserressourcen bestanden. 2003 lagen die Niederschlagsmengen zwischen Februar und September, mit Ausnahme des Julis, stets deutlich unter den Werten der Klimareferenz. 2018 begann die meteorologische Trockenheit im April [10]. Diese setzte sich bis Ende No-

vember fort, wobei im Mai (Westschweiz), August (Ostschweiz) und Oktober (Tessin) regional so viel Regen fiel, dass der Wert für die gesamte Schweiz nahe (Mai und August) resp. über (Oktober) demjenigen der Klimareferenz lag.

Ein Hauptmerkmal der Trockenheit 2018 ist das frühe Ausapern in tiefen Höhenlagen. Dies und die warme Witterung [7,10] führte zu erhöhten Verdunstungswerten und zu einer frühen Austrocknung der Böden, welche schon Ende Mai deutlich ausgeprägter als die Klimareferenz war. Dieses Phänomen wurde durch die Hitzewelle und das Regendefizit in der zweiten Hälfte des Julis so weit verstärkt, dass die modellierte Bodenfeuchte bis Ende 2018 nie mehr den Bereich der Klimareferenz erreichte.

2003 folgte auf eine erste Hitzeperiode im Juni eine Hitzewelle im August [6]. Dazwischen sorgte etwas Regen im Juli für Feuchtigkeit im Boden, die dann der Verdunstung zur Verfügung stand. Das Bodenfeuchtedefizit wuchs bis Ende August, erholte sich aber bis Ende Dezember rascher und stärker als 2015 und 2018. Dasselbe gilt für die im Niedrigwasserspeicher gebundenen Wasserressourcen.

2015 begann die Trockenheit erst mit der Hitzewelle und dem gleichzeitigen Regendefizit zwischen Ende Juni und Ende Juli [3]. Im Vergleich zu den Jahren 2003 und 2018 entspannte sich die Lage aber im August und September relativ rasch, bevor ein erneutes Regendefizit von Oktober bis Dezember zu stark sinkenden Pegeln (*Bild 1*) und Wasserressourcen führte.

Zu den Gemeinsamkeiten der drei Sommer-Trockenheiten zählen kaum unterbrochene Perioden mit Regendefizit, die akute Bodentrockenheit im Juli und die dadurch gehemmten Verdunstungswerte im selben Monat. Gemeinsam ist auch die Tatsache, dass in keinem der drei Jahre zu Jahresbeginn ein Defizit bestand.

### 4. Schneeresourcen im Frühjahr

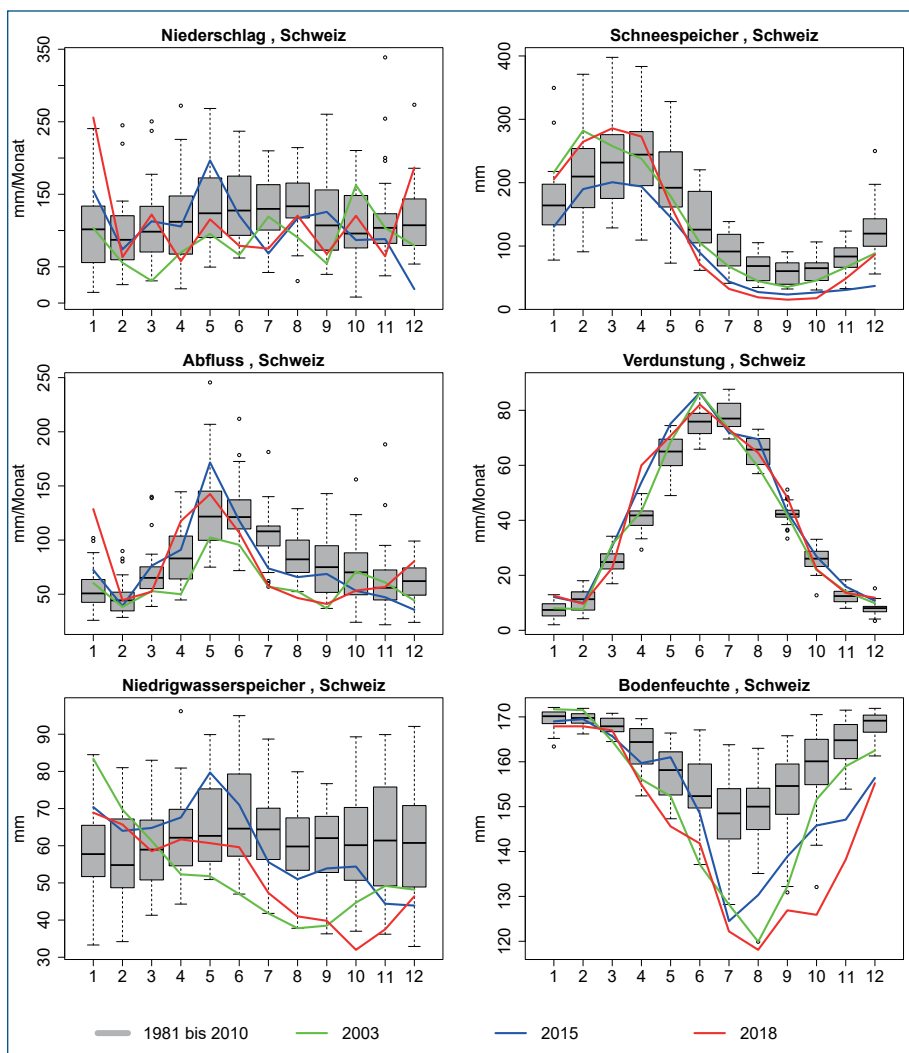
Es gibt einen relevanten Zusammenhang zwischen den verfügbaren Schneeresourcen in den Einzugsgebieten der Schweizer Alpen und dem Verhalten des Niedrigwasserspeichers im Frühling und Sommer [8,9]. Eine Analyse der Schneeresourcen bietet darum zusätzliche Informationen für die Gegenüberstellung der Trockenheit in den drei untersuchten Jahren. Neben dem von Modellen berechneten Schneespeicher (*Bild 2, or*) werden am WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF seit einigen Jahren de-

taillierte Auswertungen realisiert, welche das Wasseräquivalent der Schneedecke (SWE) durch räumliche Interpolation und Kombination von Messungen der Schneehöhe und der Schneedichte ermitteln [9].

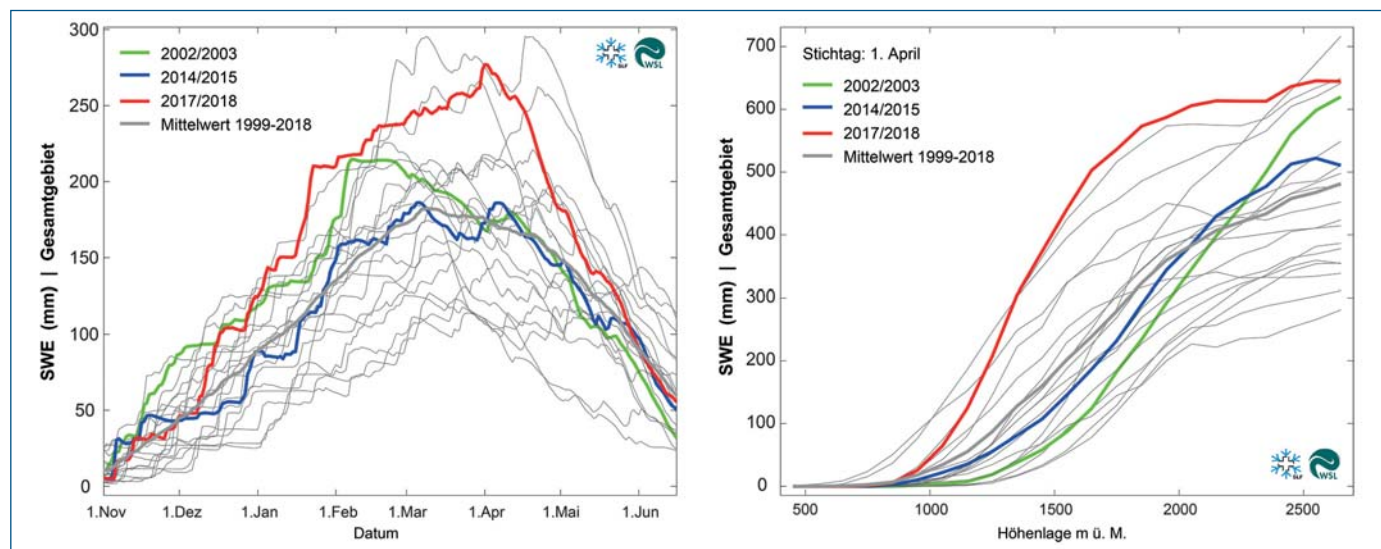
Die Situation der Schneeresourcen wird in Bild 3 veranschaulicht. 2014/15 war für die Schweiz ein sehr durchschnittlicher Winter. Das SWE blieb immer nahe am Mittelwert. Die Betrachtung nach Höhenlage weist für den 1. April auf ein leichtes Defizit unterhalb von 2000 m ü. M. und auf einen Schneeüberschuss oberhalb hin. Der Winter 2002/03 galt bis Mitte Februar als eher schneereich. Danach setzte die Schmelze früh ein und weitere Schneekumulation in den tieferen Lagen blieb aus. Ab Anfang Mai war das SWE kleiner als die Referenz. Am 1. April 2003 war das SWE unterhalb von 2000 m ü. M. tiefer als im Jahr 2015, während oberhalb von 2000 m ü. M. überdurchschnittlich viel Schnee lag. Der Winter 2017/18 war sehr schneereich. Am

#### Niedrigwasserspeicher

Das hier verwendete Konzept des «Niedrigwasserspeichers» bezeichnet den dynamischen Teil des Grundwasserspeichers, der mit dem Gewässernetz interagiert, d. h. eine hydraulische Verbindung mit dem Flussbett hat. Dieser Speicher ist Teil der Struktur des verwendeten hydrologischen Modells [15]. Er kann leerlaufen und sagt nichts über den tatsächlichen Füllstand der mächtigen Grundwasserträger des Mittellandes aus, welche noch über ausreichend Wasser verfügen können.

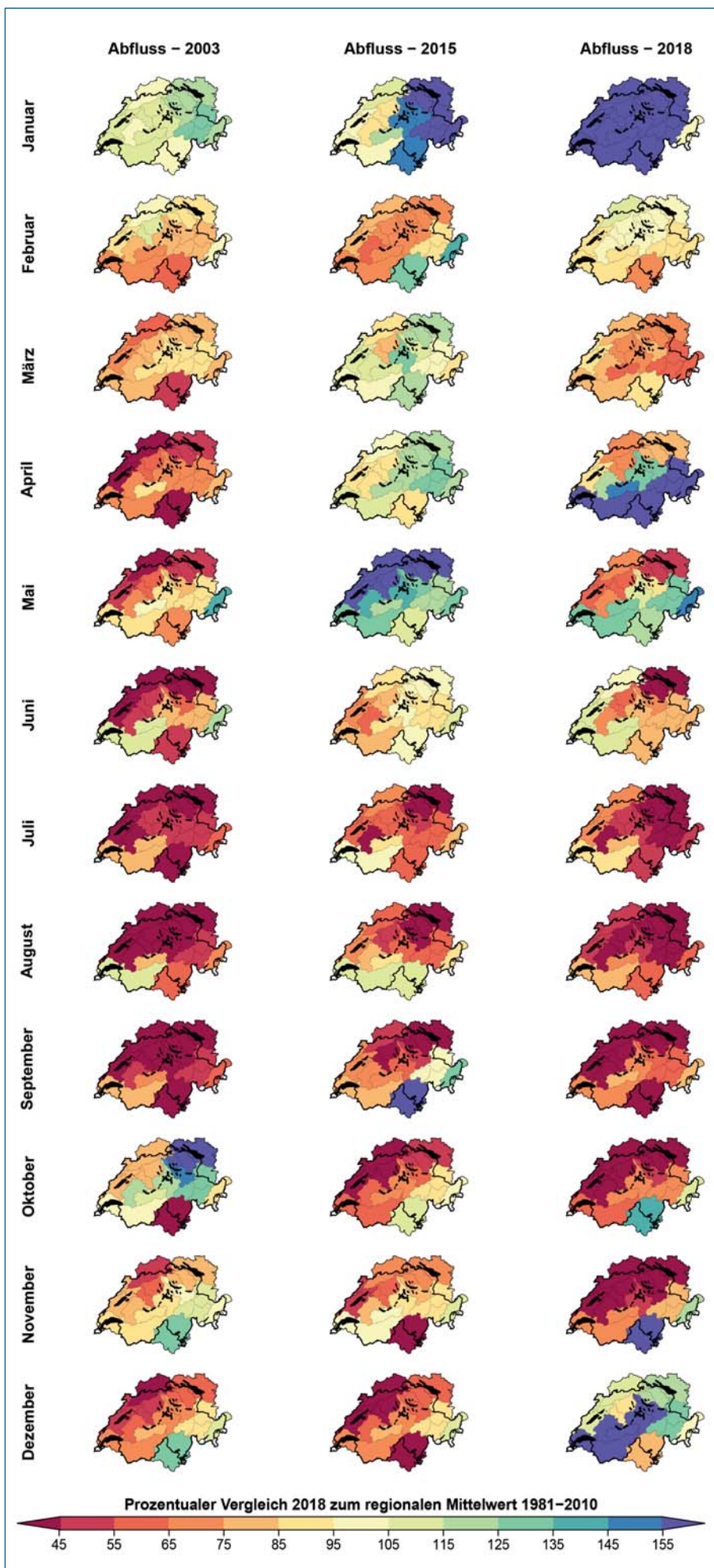


**Bild 2. Monatswerte für den Niederschlag (ol), den Schneespeicher (or), den Abfluss (ml), die Verdunstung (mr), den Niedrigwasserspeicher (ul, siehe Box, links) und die Bodenfeuchte (ur). Die Boxplots fassen die Daten der Jahre 1981 bis 2010 zusammen. Die grauen Boxen umfassen die mittleren 50% der Werte, die horizontale schwarze Linie markiert den Median. Die grüne (2003), blaue (2015) und rote (2018) Linie repräsentieren die Werte für die Einzeljahre.**



**Bild 3. Verlauf der geschätzten Schneeresourcen in der Schweiz. Links: Verlauf des täglichen Wasseräquivalents der Schneedecke (SWE) in Millimeter zwischen dem 1. November und dem 15. Juni. Rechts: Höhenverteilung der Schneeresourcen am 1. April. Die dünnen grauen Linien stellen den Verlauf aller Winter zwischen 1998/99 und 2017/18 dar. Die dickere graue Linie ist die Referenz (Mittelwert aller Winter). Die grüne, blaue und rote Linie repräsentieren die Werte für die Winter 2002/03, 2014/15 und 2017/18. Daten und Darstellung: operationeller schneehydrologischer Dienst des SLF.**





1. Februar 2018 war das SWE sogar höher als im Lawinenwinter 1998/99. Noch am 1. April war die Schneedecke oberhalb 1400 m ü. M. die mächtigste im Vergleich mit allen anderen in *Bild 3* gezeigten Wintern. Ein starker Wärmeüberschuss im April [10] schmolz nach und nach die Schneedecke. Anfang Juni lag das SWE im Bereich der Jahre 2003, 2015 und der Referenz.

Das Verhalten der SWE-Abschätzungen vom SLF deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Abflussmessung (*Bild 1*) und aus den Berechnungen des hydrologischen Modells (*Bilder 2, 4 und 5*).

## 5. Regionale Abflussanomalien

Die in *Bild 2* diskutierten Auslöser und Auswirkungen der Trockenheit widerspiegeln sich auch im räumlichen Überblick der monatlichen Anomalien des Abflusses gegenüber der Klimareferenz (*Bild 4*). Wie bereits erwähnt, herrschte im Januar weder 2003, noch 2015 und 2018 Trockenheit. Im Gegenteil, es gab 2015 und vor allem 2018 grossräumig einen Abflussüberschuss. 2003 zeichnete sich aber die Trockenheit bereits ab März ab, vorerst mit stärkerem Fokus in der Nordwestschweiz. Das Abflussdefizit weitete sich schnell auch nach Osten aus und betraf bis Ende September die gesamte Schweiz. Nur in den stark vergletscherten Grossregionen (Wallis, Berner Oberland und Engadin) stieg das Abflussdefizit nicht allzu stark an. Wie bereits in früheren Studien erwähnt [16,7], ist dies eine Folge der verstärkten Gletscherschmelze, welche vor allem in den Tagen mit den grössten Hitzeüberschüssen stark zum Abfluss beitrug. Anders als 2018, vermochte die Schneeschmelze in den Jahren 2003 und 2015 nie den fehlenden Niederschlag zu kompensieren. Während die Trockenheit 2003 in der Westschweiz und im Tessin noch andauerte, sorgten in der Ostschweiz Regenfälle im Oktober für einen raschen Unterbruch der kritischen Lage. Im Tessin kam die Erlösung erst im November, während es in der Westschweiz bis Ende 2003 nur wenig Entspannung betreffend Abflussdefizit gab. Die Trockenheit 2015 begann erst im Juli und betraf bis Ende September vor allem die Nordostschweiz. Erst im Oktober verlagerte sich der Fokus auf

**Bild 4. Monatlicher Abfluss in den Jahren 2003, 2015 und 2018 im Jahresverlauf für Grossregionen der hydrologischen Schweiz. Dargestellt wird die Abweichung in Prozent gegenüber der Klimatologie 1981-2010.**

die Westschweiz und auf die Einzugsgebiete im Tessin. Zeitgleich entspannte sich die Lage im Osten. Die Trockenheit 2018 wies ein spezielles Muster auf. Während in den Regionen des Mittellands die Trockenheit gleich nach dem nassen Januar begann, sorgte der warme April im Alpenraum für eine beschleunigte Schneeschmelze im April und Mai. Damit wird der dort errechnete Abflussüberschuss begründet. Wie schon 2015 war auch 2018 vorerst die Ostschweiz stärker betroffen als die Westschweiz. Nach dem Ende der Schneeschmelze erreichte die hydrologische Trockenheit, d. h. das Abflussdefizit, auch den Alpenraum. Somit war die Situation im August und September 2018 sehr ähnlich wie im Jahr 2003. 2018 blieb es dann bis Anfang Dezember trocken [6]. Die starken Regenfälle im Dezember sorgten wie im Jahr 2003 vor allem im Osten und im Alpenraum für Entspannung. Der Jura profitierte weniger vom erlösenden Regen.

Aufgrund des Gletschereinflusses waren das Wallis und das Engadin weniger als andere Regionen von diesen drei trockenen Perioden betroffen. Dies gilt aber nur für das Wasser in den Hauptgerinnen, welche die Gletscherschmelze führen. Die gletscherfreien Teileinzugsgebiete im Wallis und Engadin litten ebenso unter der Trockenheit wie die benachbarten Regionen ohne grossen Gletschereinfluss.

## 6. Beitrag aus unterschiedlichen Höhenlagen

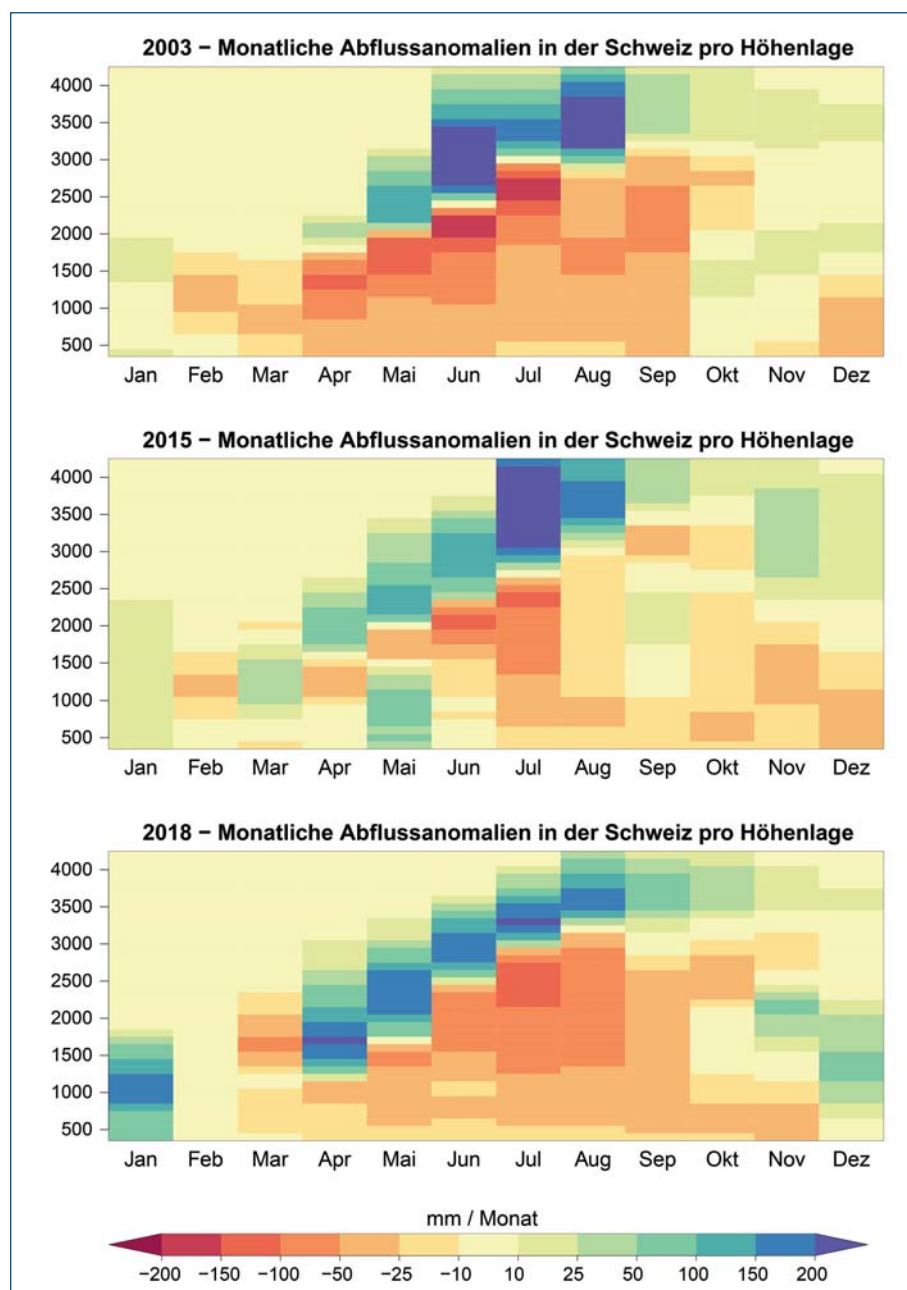
Weitere Hinweise zum räumlichen und zeitlichen Verlauf der Trockenheit in den drei hier untersuchten Jahren sind in *Bild 5* dargestellt. Hier wird der Fokus auf den Verlauf der monatlichen Abflussanomalien in den Höhenzonen gelegt. Die Muster deuten in allen drei Fällen auf einen frühen Beginn der Schneeschmelze auf allen Höhenlagen oberhalb von 1400 m ü. M. hin. Die Phase der Schneeakkumulation wies noch keine nennenswerten Anomalien gegenüber der Klimareferenz auf, danach folgte jedoch eine Periode mit deutlich positiven Anomalien. Auch das Ende der Schneeschmelze ist verfrüht, wodurch oberhalb 1400 m ü. M. nach und nach lange Phasen mit deutlichen Abflussdefiziten auftreten. Oberhalb von 3300 m ü. M. bleiben die Abflussanomalien schwach negativ bis deutlich positiv bis zum Jahresende. Dies ist ein eindeutiges Zeichen der starken Eisschmelze aus diesen Höhenlagen.

Die im *Bild 5* hervorgehobenen Muster weisen darauf hin, dass sich die Trockenheit 2015 deutlich von den Ereignissen in den Jahren 2003 und 2018 unter-

scheidet. Der extrem trockene und heisse Juli war der Grund für den Abflussüberschuss ab 3000 m ü. M. und für das anhaltende Defizit in den tieferen Lagen, welches bis und mit Dezember monatlich 20 bis 40 mm betrug. Im Juli reichte die Hitzewelle bis über 4000 m ü. M. und verursachte dort aussergewöhnlich hohe Schmelzwassermengen aus Eis, Schnee und Firn.

Die beiden Ereignisse in den Jahren 2003 und 2018 waren sehr ähnlich. Übereinstimmend mit *Bild 3*, dauerte 2003 die Schneeakkumulation in den höchsten Lagen rund zwei Monate weniger lange als 2018. Die Hitzephasen im Juni und August sind deutlich erkennbar. Die Hitze aktivierte die Schmelzprozesse oberhalb

von 3000 m ü. M. und löste dabei auch die Schmelze von Schneemassen aus, welche im Modell den «ewigen Schnee» darstellten. Es ist eine Reaktion des Modells auf die höheren Temperaturen [11]. Mit anderen Worten, das Modell hat vor den 90er-Jahren in den höchsten Lagen Schnee als Firn gespeichert, welcher nun wegen der Häufung von Hitzeperioden und der Verlagerung der Nullgradgrenze ähnlich wie die Gletscher schmilzt. Dies ist auch der Grund warum in *Bild 2* der Schneespeicher des Modells im September 2003 grösser ist als 2015 und 2018. Die starken positiven Anomalien auf unterschiedlichen Höhenlagen zwischen April und August 2018 (*Bild 5*) sind auf die ausserordentlich hohen



**Bild 5. Monatlicher Abfluss in den Jahren 2003, 2015 und 2018 im Jahresverlauf für die gesamte hydrologische Schweiz, aufgelöst nach 100 m Höhestufen zwischen 400 und 4200 m ü. M. Dargestellt wird die Abweichung in mm pro Monat gegenüber der Klimatologie 1981–2010.**



Schneevorräte oberhalb 1300 m ü. M. zurückzuführen (Bild 3). Zudem wirkt im April bereits der erwähnte Wärmeüberschuss [10], welcher für verstärkte Schmelzraten sorgt. Die Modellergebnisse deuten darauf hin, dass zwischen März und November 2018 unterhalb von 1300 m ü. M. im Vergleich zur Klimareferenz pro Monat mindestens 10 mm Abfluss zu wenig aufgetreten sind. Zwischen 700 und 1000 m ü. M. betrug das Defizit zwischen Juli und September, wie bereits 2003, mehr als 20 mm pro Monat.

## 7. Fazit

Dieser Beitrag vergleicht die Trockenheit der Jahre 2003, 2015 und 2018, unter Einbezug von Modellergebnissen, aus unterschiedlichen Perspektiven. Es gab vor allem in der regionalen Betrachtung einige Ähnlichkeiten. So trat die Trockenheit jeweils zuerst stärker im Osten als im Westen des Landes auf und auch die Entspannung der Lage setzte im Osten früher ein als im Westen. Durch ihre Gletscher blieben die regionalen Abflussanomalien im Wallis und Engadin unter denjenigen der anderen Grossregionen des Landes. Sowohl 2003 (Juni und August) als auch 2015 (Juli) bestand ein starker Zusammenhang zwischen Schmelzraten in den hohen Lagen und dem Auftreten einer Hitzewelle. 2018 sorgte vor allem der trockene und warme April für eine starke Ausschöpfung der Wasserressourcen, welche dann ab Mitte Juli wegen erneutem Regendefizit weiter schrumpften.

Sowohl 2003 als auch 2018 kumulierte sich zwischen April und September in den Regionen unterhalb von 1300 m ü. M. ein starkes Abflussdefizit. Der Bereich zwischen 400 und 800 Meter der hydrologischen Schweiz nimmt eine Fläche von rund 16 000 km<sup>2</sup> ein. Bei einem Abflussdefizit von 10 mm, fehlen im schweizerischen Gewässernetz rund 160 Millionen m<sup>3</sup> Wasser. Während des gesamten Sommers 2018 hat sich somit Monat für Monat ein ausserordentlich hohes Defizit akkumuliert. Dieses Defizit beeinträchtigte unter anderem die Quellschüttungen, die Ökologie der Flüsse, den Wasserstand der Seen, die Landwirtschaft, die Trinkwasserversorgung, die Wasserkraft und die Schifffahrt.

In der Schweiz besteht nach wie vor wenig Erfahrung im Umgang mit kritischer Trockenheit [6]. Es ist deshalb umso wichtiger, den vom Bund empfohlenen Massnahmenkatalog zur Klimaanpassung auch im Sinne der Bewältigung von trockenen Perioden umzusetzen. Die Früherken-

nung von Trockenheit ist für die Fachleute und die Allgemeinheit eine grosse Hilfe im Umgang mit solchen Ereignissen. So wurde die von der WSL auch im Sommer 2015 und 2018 betriebene Informationsplattform zur Früherkennung von kritischer Trockenheit [www.trockenheit.ch](http://www.trockenheit.ch) [14] rege genutzt und erwies sich als nützliches Werkzeug.

Die Erarbeitung weiterer Grundlagen in den nächsten Monaten und Jahren ist essenziell, um eine bessere Vorbereitung auf kommende hydrologische Trockenheiten sicherstellen zu können.

## Danksagung

Wir danken der MeteoSchweiz und dem Bundesamt für Umwelt BAFU für die Bereitstellung der Datengrundlagen. Diese Studie ist von der WSL-Initiative «Trockenheit 2018» mitfinanziert. Die Initiative strebt eine rasche Beantwortung von spezifischen Fragen an, welche aus dem extremen Trockenheits-Sommer 2018 hervorgegangen sind.

## Literatur

- [1] Bernhard L., Zappa M. 2012. Schlussbericht CCHydrologie: Teilprojekt WHH-CCHydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete. Technical Report, WSL, Birmensdorf.
- [2] Bundesamt für Umwelt BAFU, (Hrsg.) 2012. Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S.
- [3] Bundesamt für Umwelt BAFU, (Hrsg.) 2015. Anpassung an den Klimawandel. Bedeutung der Strategie des Bundesrates für die Kantone. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1509: 47 S.
- [4] Bundesamt für Umwelt BAFU, (Hrsg.) 2016. Hitze und Trockenheit im Sommer 2015. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1629: 108 S.
- [5] Bundesamt für Umwelt BAFU, (Hrsg.) 2019. Hitze und Trockenheit im Sommer 2018. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1909.
- [6] BUWAL, BWG, MeteoSchweiz, 2004. Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 174 S.
- [7] Liechti K., Barben M., Zappa M. 2019. Wasserhaushalt der Schweiz im Jahr 2018 – Einordnung und Besonderheiten. «Wasser Energie Luft», 111(2), 93–94.
- [8] Jenicek M., Seibert J., Zappa M., Stau-

dingler M., Jonas T. 2016. Importance of maximum snow accumulation for summer low flows in humid catchments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 859–874, <https://doi.org/10.5194/hess-20-859-2016>.

[9] Jörg-Hess S., Fundel F., Jonas T., Zappa M. 2014. Homogenisation of a gridded snow water equivalent climatology for Alpine terrain: methodology and applications, *The Cryosphere*, 8, 471–485, <https://doi.org/10.5194/tc-8-471-2014>.

[10] MeteoSchweiz, 2018. Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 – eine klimatologische Übersicht Fachbericht MeteoSchweiz, 272, 38 pp.

[11] NCCS (Hrsg.) 2018. CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich. 24 S. ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2.

[12] Pfändler M., Zappa M. 2006. Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz – Ein optimierter Datensatz im 500 × 500 m Raster. «Wasser Energie Luft», Heft 4/2006: S. 291–298.

[13] Speich M., Bernhard L., Teuling A.J., Zappa M. 2015. Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. *Journal of Hydrology*. Volume 523, April 2015, Pages 804–821, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.01.086.

[14] Stähli M., Kruse S., Fundel F., Zappa M., Stahl K., Bernhard L., Seidl I. 2013. drought.ch – auf dem Weg zu einer Trockenheits-Informationenplattform für die Schweiz. «Wasser Energie Luft», 105(2), 117–121.

[15] 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(10): 1209–1222. doi:10.1016/j.envsoft.2009.04.001.

[16] Zappa M., Kan C. 2007. Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7:375–389.

[17] Zappa M., Liechti K., 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.

## Anschrift der Verfasser

Dr. Massimiliano Zappa, Dr. Katharina Liechti  
Eidg. Forschungsanstalt WSL  
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf  
[massimiliano.zappa@wsl.ch](mailto:massimiliano.zappa@wsl.ch)

Dr. Adam H. Winstral  
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung  
SLF, CH-7260 Davos Dorf

Dr. Martin Barben  
Bundesamt für Umwelt, Abteilung Hydrologie  
CH-3003 Bern-Ittigen