

EXtreme Trockenheit in der Schweiz: Regionale und lokale Perspektiven einer globalen Herausforderung

Seit dem Weckruf durch den Hitze- und Trockensommer 2003 hat in der Schweiz eine sehr intensive Auseinandersetzung mit dem Thema Trockenheit stattgefunden. Mehr als 20 Jahre später haben Forschung und Folgeereignisse bestätigt, dass auch das Wasserschloss Europas, die Alpen, von extremer Trockenheit betroffen sein können. Auch globale Studien weisen auf die zunehmende Gefahr von mehrjähriger Trockenheit hin, die heute noch kaum vorstellbare Folgen für Umwelt und Gesellschaft haben könnten. Die Schweiz ist nur ungenügend vorbereitet, doch seit 2012 arbeiten Forschung und Verwaltung enger zusammen um auf Trockenereignisse besser vorbereitet zu sein.

Massimiliano Zappa¹, Dirk Nikolaus Karger¹ und Fabia Hüsler²

¹ Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf

² Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern

1 Einleitung

1.1 Trockenheit in der Schweiz: klingt noch exotisch?

Machen wir einen Sprung 27 Jahre zurück ins Jahr 1998. Der Winter 1998/1999 markierte den Beginn einer eindrücklichen Serie von extremen Naturereignissen, welche die Forschung und die Umsetzung von Naturgefahrenmassnahmen in den folgenden Jahrzehnten prägten. Am Anfang stand ein aussergewöhnlich schneereicher Winter, der als Lawinenwinter in die Geschichte eingegangen ist (SLF 2000). Die Kombination von Schmelzwasser des Winters 1998/1999 und starken Regenfällen im Mai 1999 führte in weiten Teilen der Nordschweiz zu Überschwemmungen und Schäden (BWG 2000; Stähli *et al.* 2024). Nur wenige Monate später, am 26. Dezember 1999, traf der Orkan Lothar auf die Schweiz (WSL und BUWAL 2001). Durch den Sturm wurden riesige Holzmassen zu Fall gebracht, was die Verbreitung von Schädlingen wie dem Borkenkäfer begünstigte (Wohlgemuth *et al.* 2017). Die eindrückliche Serie endete im Oktober 2000, als schwere Unwetter im Wallis und im Tessin Schäden und Verwüstungen anrichteten und 16 Todesopfer forderten (Badoux *et al.* 2016; BWG 2002).

Überschwemmungen, Stürme und Lawinen trafen auf eine mit diesen Naturgefahren bereits vertraute Schweizer Gesellschaft. Ende 2000 hätte aber kaum jemand erwartet, dass das nächste bedeutende Naturereignis ein Sommer mit Hitze, Trockenheit und Wasserknappheit sein würde. Die Rede ist vom Hitzesommer 2003 (BUWAL *et al.* 2004; Schär *et al.* 2004).

1.2 Trockenheit: die Erkenntnis

Stephan *et al.* (2021) haben eine Datenbank zur Auswirkung von Dürre und Trockenheit im Alpenraum seit 1915 zusammengestellt. Vor 2003 enthält diese Datenbank für die Schweiz nur Einträge für die Jahre 1947

und 1976. Seit 2003 sind jedoch weitere Trockenheitsereignisse in den Jahren 2015, 2018, 2020 und 2022 aufgetreten. Mittlerweile ist anerkannt, dass Trockenheitsereignisse und Wasserknappheit zu den bedrohlichsten Gefahren für die Schweiz gehören (BABS 2023; Brunner *et al.* 2019a,b). Neben den direkten Auswirkungen werden auch immer mehr indirekte Folgen der Wasserknappheit (z. B. fehlende Redundanz in der Trinkwasserversorgung oder unzureichende Verdünnung der Klärwasser) sichtbar, die mehrere Sektoren betreffen. Im Jahr 2003 standen die Fichten verbreitet unter grossem Trockenstress. Darüber hinaus waren die Sommertemperaturen und die Borkenkäferpopulationen extrem hoch. Diese Kombination führte dazu, dass grosse Mengen an Fichten befallen wurden (Jakoby *et al.* 2015). Im Jahr 2018 starben aufgrund der Hitzewelle und des tiefen Flusspegels mehrere Tonnen Fische im Rhein (Bonaglia *et al.* 2024). Weitere Auswirkungen waren zum Beispiel lokale und regionale Engpässe in der Trinkwasserversorgung, Wasserentnahmeverbote für Bewässerung und Notschlachtungen von Tierbeständen auf den Alpenweiden.

Es wird erwartet, dass der Klimawandel die Häufigkeit und Schwere von Trockenheitsextremen erhöhen wird. Die CH2018-Klimaszenarien liefern Klimainformationen für die Schweiz, die Aufschluss darüber geben, wie sich der Klimawandel zukünftig auf das Land auswirken wird (NCCS 2018).

1.3 Trockenheit: Bewältigung der Extreme – Fokus dieses Artikels

Dieser Artikel beleuchtet drei Aspekte der aktuellen Herausforderungen im Umgang mit extremer Trockenheit. In einem ersten Teil definieren wir das Konzept der Megadürren und setzen aktuelle Erkenntnisse aus einer globalen Analyse (Chen *et al.* 2025) zu deren zunehmenden Häufigkeit und Ausbreitung in den Kontext des Alpenraums (Brunner und Tallaksen 2019).

Im zweiten Teil kategorisieren wir eine Reihe extremer Trockenperioden im Vergleich zu den Ereignissen der jüngsten Vergangenheit, die gemäss der aktuellen CH2018-Klimaszenarien in naher Zukunft auftreten könnten.

Der dritte und letzte Teil befasst sich mit der neuen Früherkennungs- und Warnplattform für Trockenheit, die im Frühling 2025 für die Schweiz lanciert wird. Ein Forschungsschwerpunkt des Nationalen Programms NPF 61 «Nachhaltige Wassernutzung» (Leitungsgruppe NFP 61 2015) hat auf die Realisierung eines solchen nationalen Warnsystems hingearbeitet (Seneviratne *et al.* 2013). Diese Arbeiten zeigen, wie ein Forschungsinstrument wie die Forschungsplattform *drought.ch* zur Früherkennung von Trockenheit (Zappa *et al.* 2014) in enger Zusammenarbeit zwischen dem Bund und der Forschung zu einem wichtigen Instrument für die Information, die Warnung und die Bewältigung von zukünftigen Trockenheitsereignissen in der Schweiz geworden ist. Dieses soll sicherstellen, dass die Schweiz den künftigen Herausforderungen im Zusammenhang mit zunehmender Trockenheit proaktiv begegnen kann. Die neue Trockenheitsplattform des Bundes soll die betroffenen Sektoren dabei unterstützen, die Auswirkungen von Trockenheit zu minimieren.

2 Extreme Trockenheit im Alpenraum

2.1 Die Alpen werden trockener

Die Alpen werden oft als das «Wasserschloss Europas» bezeichnet, da sie Millionen von Menschen mit frischem Wasser versorgen und die Landwirtschaft, den Tourismus und die Wasserkraft unterstützen. Mit dem globalen Temperaturanstieg werden Dürreperioden jedoch immer häufiger und heftiger, was die Frage aufwirft, wie sich Wasserknappheit auf das Leben der

Menschen, die Wirtschaft und die Natur in der Region auswirken wird.

Die Alpen waren in den letzten Jahren (z.B. 2015, 2018, 2020) bereits von mehreren Dürreereignissen betroffen. Doch wie oft kommt es in den Alpen zu grösseren Dürren? Und macht der Klimawandel solche Ereignisse in Zukunft wahrscheinlicher? Um diese Fragen zu beantworten, haben wir die weltweiten Dürreereignisse der letzten 40 Jahre analysiert und dabei globale Wetterdaten verwendet, um deren Ausmass und Häufigkeit zu verfolgen (Chen *et al.* 2025). Die Ergebnisse zeigen: Zwischen 1980 und 2018 wurden weltweit 1061 grosse Dürreereignisse registriert, die grösser waren als die Fläche der Schweiz (>41 000 km²). In den 1980er-Jahren waren Dürren von diesem Ausmass noch relativ selten: 1980 traten weltweit nur acht grosse Ereignisse auf. Anfang der 2000er-Jahre hatte sich die Anzahl solcher Ereignisse auf 36 pro Jahr mehr als vervierfacht und erreichte im Jahr 2002 mit 41 Dürren ihren Höhepunkt. Um eine bessere Vorstellung davon zu bekommen, wie häufig Dürren im Alpenraum auftreten können, analysierten wir zunächst, wie häufig extreme Dürren weltweit pro Jahr auftreten. Damit können wir abschätzen, wie wahrscheinlich solche Ereignisse die Alpen betreffen werden, die mit 191 000 Quadratkilometern nur einen kleinen Teil der weltweiten Landfläche ausmachen.

Im 39-jährigen Zeitintervall von 1980 bis 2018 entsprechen die 1061 grossen Dürreereignisse weltweit einer mittleren Häufigkeit von 27,2 Dürren pro Jahr weltweit (ohne Wüstenregionen). Wir können dann berechnen, wie oft eine dieser grossen Dürren die Alpen treffen würde, wenn wir die jährliche Häufigkeit von 27 grossen Dürren mit dem Anteil der Alpen an der weltweiten Landfläche (ausgenommen der Wüsten) multiplizieren. Daraus ergibt sich ein geschätztes Wiederkehrintervall von 19,2 Jahren, d.h. die Alpen werden nach dieser Berechnung alle zwei Jahrzehnte von einer grossen Dürre heimgesucht, die mindestens eine Fläche grösser als die Schweiz betrifft. Da solche Ereignisse jedoch von vielen Faktoren abhängen, sind solche Abschätzungen natürlich mit einer entsprechend hohen Unsicherheit behaftet. Ebenso beruhen diese Abschätzungen auf einer globalen Erwärmung von etwa 1,5°C gegenüber der vorindustriellen Zeit, während sich die Schweiz tatsächlich bereits um etwa 2,5°C erwärmt hat (NCCS 2018). Das Wiederkehrintervall könnte also noch kürzer sein.

Dürren treten aber nicht nur häufiger auf, sondern nehmen auch in der Fläche zu (Chen 2025). Die grösste zwischen 1980 und 2018 beobachtete Dürre betraf rund 280 000 Quadratkilometer, und im Durchschnitt nahm die jährlich betroffene Fläche stetig zu. In den frühen 1980er-Jahren betraf die typische Dürre nur etwa 60 000 Quadratkilometer, in jüngster Zeit sind es immer häufiger über 100 000 Quadratkilometer. Die Gesamtfläche, die weltweit von Dürren betroffen ist, nimmt jährlich um etwa 50 000 Quadratkilometer zu. Je mehr Land von Dürren betroffen ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese Extremereignisse auch

MaLeFiX

Im WSL-Projekt MaLeFiX (Machine-Learning-aided Forecasting of drought-related eXtremes) wurden verschiedene, teilweise bereits bestehende oder neu entwickelte WSL-Modelle zu möglichen Auswirkungen von Trockenheit in eine benutzerfreundliche Plattform integriert. Ziel war es, diese Modelle zu vereinheitlichen und Prognosen für die nächsten 4 bis 6 Wochen zu erstellen. Dabei wurden neue Methoden des Machine Learning eingesetzt, um den Benutzerinnen und Benutzern ein möglichst zuverlässiges Informations- und Entscheidungsinstrument zur Verfügung zu stellen, das auch den Einsatz und die Vorteile von probabilistischen Vorhersagen aufzeigt.

drought.ch/de/impakt-vorhersagen-malefix

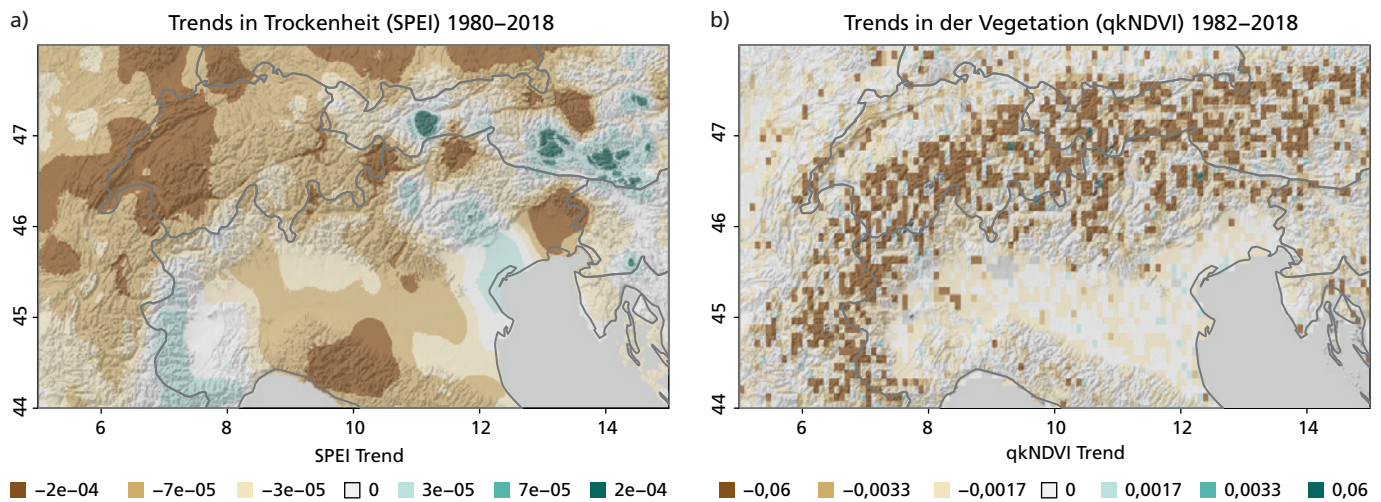


Abb. 1. Entwicklung der Dürrebedingungen und der Reaktion der Vegetation in den Alpen (1980–2018). Die linke Karte zeigt die Entwicklung des «Standardized Precipitation Evapotranspiration Index» (SPEI) von 1980–2018, der Veränderungen in der Intensität der Trockenheit anzeigt. Negative Werte (braun) stehen für zunehmende Trockenheit, während positive Werte (blau) auf feuchtere Bedingungen hinweisen. Das rechte Feld zeigt die Entwicklung des «Kernel Normalized Difference Vegetation Index» (qkNDVI) von 1982–2018 an und veranschaulicht, wie die Vegetation im Laufe der Zeit auf die Trockenheit reagiert hat. Negative Werte (braun) weisen auf eine Verschlechterung des Zustands der Vegetation hin, während positive Werte (blau) auf eine Verbesserung hindeuten. Beide Karten sind zur besseren Veranschaulichung der topografischen Gegebenheiten mit einem schraffierten Relief überlagert. Die Ländergrenzen sind in Grau markiert.

die Alpen treffen. Wenden wir diesen Trend auf unsere Berechnungen an, stellen wir fest, dass bis 2070 grosse Dürren in den Alpen viel häufiger auftreten werden als heute. Das Wiederkehrintervall von derzeit 19,2 Jahren wird in den nächsten Jahrzehnten voraussichtlich unter 19 Jahre sinken. Abbildung 1 zeigt, wie sich die Trockenheit im Laufe der Zeit intensiviert hat.

Dieser Trend hat schwerwiegende Folgen. Wasserknappheit in den Alpen kann sich auf alles auswirken, von der Trinkwasserversorgung über die Ernteerträge bis hin zur Stromerzeugung aus Wasserkraft. Trockenperioden schwächen die Wälder (siehe Hobi *et al.* in diesem Band, S. 49) und machen sie anfälliger für Krankheiten und Waldbrände (siehe Pezzatti *et al.* in diesem Band, S. 61). Die Alpen sind bereits heute erheblichen klimabedingten Veränderungen ausgesetzt, und die zunehmende Häufigkeit von Trockenheitsereignissen wird diesen Druck noch verstärken.

Diese Ergebnisse decken sich mit den allgemeineren Trends des «Intergovernmental Panel on Climate Change» (IPCC), der davor warnt, dass schwere und extreme Dürreperioden aufgrund des Klimawandels weltweit häufiger werden (IPCC). Das IPCC stellt fest, dass sich die historischen 50-jährigen Wiederkehrintervalle von Dürren in einigen Regionen bereits auf 20–30 Jahre verkürzt haben, was auf steigende Temperaturen und damit verbundene erhöhte Evapotranspiration zurückzuführen ist (IPCC). Dieses globale Muster spiegelt sich in unserer Analyse der Alpen wider und untermauert die Schlussfolgerung des IPCC, dass das Dürrierisiko in den gemässigten Bergregionen zunimmt.

2.2 Extreme Storylines

Obwohl das Auftreten von mehrjährigen Dürren im Alpenraum noch die Ausnahme ist (Brunner und Tallaksen 2019), sollte die Entwicklung des in Abschnitt 2.1 beschriebenen Phänomens der Megadürre genau beobachtet werden. Damit wird vermieden, dass wir unvorbereitet sind, sollte ein solches Szenario eintreten (Matte *et al.* 2024). Basierend auf den Erfahrungen aus früheren aussergewöhnlichen Dürreperioden in der Schweiz (Brunner *et al.* 2019a) gilt es aufzuzeigen, was unter solchen Extrembedingungen in der Schweiz zu erwarten wäre. Zu diesem Zweck werden zunehmend meteorologische Storylines entwickelt, die in sich konsistente und plausible Wetterabläufe für physikalisch mögliche Extrembedingungen abbilden (Fischer *et al.* 2023). Zur Beschreibung einer Megadürre können nach Gessner *et al.* (2022) hierfür extreme Trockenperioden mit einem Niederschlagsdefizit von mehr als 80 % über drei Jahre simuliert werden. Für die Schweiz wäre dies ein Wert von 280 mm Niederschlag pro Jahr anstelle der klimatologischen Erwartungswerte von 1400 mm pro Jahr. Ergänzend zu diesen numerischen Experimenten können auch aus den Klimaszenarien CH2018 (2018) geeignete Storylines mit mehrjähriger Trockenheit identifiziert und analysiert werden. Im Rahmen des WSL-Extreme-Programms hat Calixto (2024) eine Reihe von sehr trockenen Jahren aus dem von Brunner *et al.* (2019b) publizierten Datensatz für hydrologische Szenarien in der Schweiz identifiziert und ausgewertet. Die Daten aus 39 Modellen für den Zeitraum (1981–2099) wurden auf Trockenheit in den Jahren zwischen 2025 und 2040 analysiert. Dazu wurde der standardi-

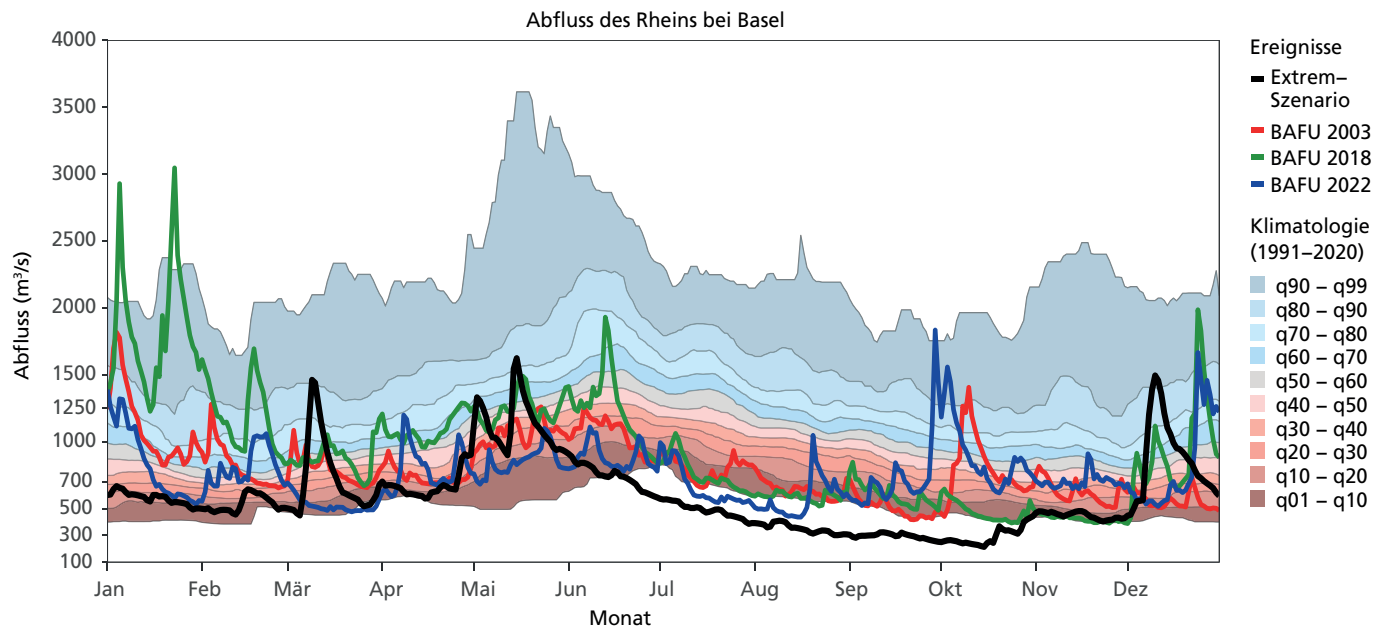


Abb. 2. Abfluss des Rheins bei Basel. Vergleich eines sehr trockenen Szenarios/Jahr aus CH2018 (schwarz) mit beobachteten Trockenheitsereignissen (BAFU 2003, BAFU 2018, BAFU 2022). Die Klimatologie 1991–2020 des vom Bundesamt für Umwelt BAFU gemessenen Abflusses ist der Ganglinie der Einzeljahre mit Quantilen hinterlegt. (Quelle: Calixto, 2024, erweitert)

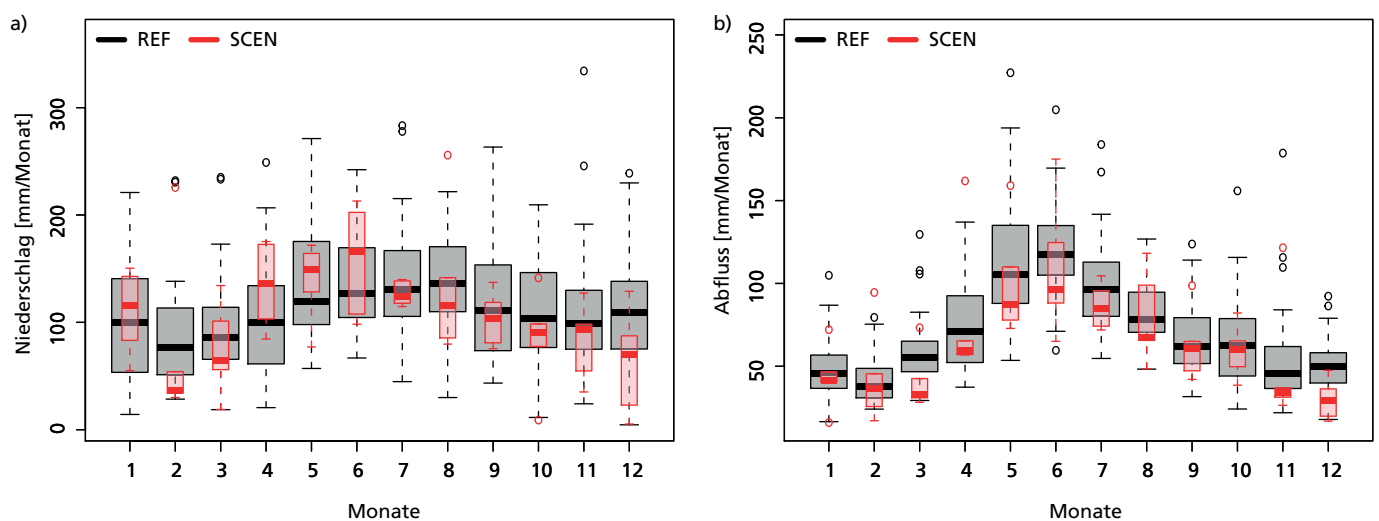


Abb. 3. a) Monatswerte hydrologischer Kenngrößen für die Schweiz für den Niederschlag und b) den Abfluss. Die grauen Boxplots fassen die Daten der beobachteten Periode 1981–2022 zusammen, die roten Boxplots diejenigen eines fünfjährigen Trockenszenarios.

sierte Niederschlagsindex (SPI) berechnet (Pieper *et al.* 2020). Perioden mit einem stark negativen Index ($SPI < -2,0$) gelten dabei als sehr trocken und bedeuten eine Abweichung der Niederschlagsmenge um mehr als zwei Standardabweichungen (Svoboda *et al.* 2012) von den Normalbedingungen. Calixto (2024) hat in diesem Ensemble an Klimaszenarien 13 Fünfjahres-Perioden mit sehr grosser Trockenheit identifiziert (SPI zwischen $-3,10$ und $-2,11$). Im Folgenden werden nur zwei Perioden betrachtet.

Ein Szenario stammt aus der hydrologischen Datengrundlage für die CH2018-Modellrealisierung «SMHI-RCA-NCC-NorESM1-M-EUR44-RCP85» (Brunner *et al.*

2019b). Zentriert um das Szenariojahr 2029 zeigt der SPI einen Wert von $-2,64$. Der resultierende Abfluss für den Rhein bei Basel in diesem Szenario ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Szenario zeigt in den Herbstmonaten Tiefstwerte von weniger als $250 \text{ m}^3/\text{s}$ im Abfluss. Das ist weniger als der niedrigste gemessene Wert an dieser Stelle im März 1921 mit $318 \text{ m}^3/\text{s}$. Wie Abbildung 2 zeigt, liegen auch die Sommerabflüsse des Szenarios deutlich unter den Werten der kritischen Trockenperioden 2003, 2018 und 2022. Ebenso bleibt das Szenario auch an 130 aufeinanderfolgenden Tagen unter dem 1%-Perzentil der Klimatologie für den Zeitraum 1991–2020.

Ein weiteres Szenario stammt aus der hydrologischen Datengrundlage für die CH2018-Modellrealisierung «KNMI-RACMO- ICHEC-EC-EARTH -EUR44-RCP85» (Brunner *et al.* 2019b). Der SPI zeigt einen Wert von $-2,20$ um das Szenariojahr 2036. Abbildung 3 vergleicht den modellierten fünfjährigen Szenariozeitraum mit dem ebenfalls modellierten Zeitraum von 1981–2022 für die gesamte politische Schweiz. Das Szenario zeigt ein Niederschlagsdefizit von rund 100 mm pro Jahr über fünf Jahre (Norm ist 1385 mm/Jahr). Das daraus resultierende Abflussdefizit beträgt rund 85 mm pro Jahr (Norm 974 mm/Jahr). Bei den Abflüssen fallen die sehr niedrigen Werte des Szenarios zwischen November und April auf (Abb. 3, rechts). Fünf Jahre mit derart niedrigen Winterabflüssen stellen eine enorme Herausforderung dar, insbesondere in Bezug auf Energie (Otero *et al.* 2023) und Transport. Die Schweiz ist darauf angewiesen, mit den grossen Stauseen Wasser vom Sommer in den Winter zu «schieben». Extreme Winter-trockenheit gefährdet den Gütertransport auf dem Rhein und die Wasserkraftproduktion der Alpen- und Flusskraftwerke (Wechsler *et al.* 2023).

Dies sind nur zwei von vielen extremen Storylines, die mittels aktuell verfügbaren Klimaszenarien durchgespielt werden können. Sie zeigen, wie wichtig solche Analysen sind, um extreme Ausprägungen und deren Auswirkungen zu konkretisieren. Solche Informationen unterstützen beispielsweise die ständige Überprüfung der Gefährdungsdossier «Trockenheit» des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz (BABS 2020) und dienen als Grundlage für die Massnahmenplanung der Behörden.

Neben Storylines und Szenarien geht es vor allem darum, konkrete Handlungsstrategien zur Krisenbewältigung zu entwickeln. Dazu dienen auch Vorhersagen und Warnungen, wie im folgenden Abschnitt näher erläutert wird.

2.3 Nationales Früherkennungs- und Warnsystem vor Trockenheit: Eine erfolgreiche Kooperation zwischen Wissenschaft und Verwaltung

Die Zunahme von trockenen Sommern (Scherrer *et al.* 2022) und die deutliche Zunahme von Trockenheitseignissen in der Schweiz seit 2003 sind auch in der Politik nicht unbeachtet geblieben (siehe Abb. 4). Bereits in der 2012 vom Bundesrat verabschiedeten Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (BAFU 2012) wurde auf den Handlungsbedarf hingewiesen. Auch das Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS hat in seiner regelmässigen Katastrophen- und Risikoanalyse Trockenheit als ernstzunehmendes Risiko für die Schweiz identifiziert (BABS 2020). Im April 2018 beauftragte der Bundesrat die zuständigen Departemente mit der Erarbeitung eines Antrags zur Umsetzung der Massnahme «Entwicklung von Trockenheitswarnungen» aus dem zweiten Folgeberichts zur Optimierung der Warnung und Alarmierung OWARNA (LAINAT 2018). Am 30. Ok-

tober 2018 forderte auch die Motion 18.4099 «Bereitstellung von Ressourcen zur Aufrechterhaltung und Weiterentwicklung der Systeme zur Warnung und Alarmierung vor Naturgefahren» der UREK-N des Bundesrats, dass die nötigen Mittel für die Umsetzung eines Früherkennungs- und Warnsystems vor Trockenheit freigegeben werden. Dies ebnete den Weg, dass der Bundesrat am 18. Mai 2022 das Bundesamt für Umwelt, die MeteoSchweiz und die swisstopo beauftragte, gemeinsam ein solches System aufzubauen. Damit soll eine wichtige Lücke im Bereich der Information und Warnung vor Naturgefahren geschlossen werden.

Für die Umsetzung dieses Auftrags konnte auf die bereits bestehende und bewährte Forschungsplattform *drought.ch* zurückgegriffen werden, für die im Forschungsprojekt DROUGHT-CH klimatologische und hydrologische Grundlagen für eine Forschungs- und Informationsplattform zur Trockenheit in der Schweiz erarbeitet wurden (Kruse *et al.* 2010). Sie basiert auf Grundlagen für den nachhaltigen Umgang mit den Schweizer Wasserressourcen, die im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramm NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung» erarbeitet wurden (siehe auch *nfp61*). Die Plattform zur Früherkennung kritischer Trockenheitseignisse *drought.ch* wurde 2013 als Pilotprojekt an der WSL in Betrieb genommen (Stähli *et al.* 2013; Zappa *et al.* 2014). Sie liefert bis heute Informationen zur aktuellen Trockenheitssituation und Hinweise zu saisonalen Defiziten bezüglich Abfluss, Niederschlag, Bodenfeuchte, Grundwasser, Schnee, Trockenheit im Wald, Seen und Speicher sowie Wassertemperatur.

Das laufende Trockenheitsprojekt des Bundes (2022–2031) hat in einem ersten Schritt zum Ziel, die Forschungsplattform *drought.ch* in den operationellen Betrieb zu überführen und anschliessend gezielt weiterzuentwickeln. Zusätzlich werden auch Daten von Erdbeobachtungs- und Wettersatelliten integriert. MeteoSchweiz wird zudem ein neues Messnetz zur Bodenfeuchte aufbauen, das zusammen mit anderen Messsystemen die Informationen über Trockenheit verbessern wird. Eine weitere wichtige und neue Komponente sind offizielle Warnungen vor Trockenheit. Im Unterschied zur Lagedarstellung auf der Plattform werden diese Warnungen aufgrund regelmässiger Einschätzungen der aktuellen Lage sowie der Prognosen durch erfahrene Experten der MeteoSchweiz und des Bundesamts für Umwelt herausgegeben. Diese Warnungen orientieren sich im Grundsatz an den bereits bestehenden Warnungen vor Naturgefahren (z.B. bezüglich Warnstufen und Warnregionen).

Das neue System wird ab Frühjahr 2025 in den operationellen Betrieb gehen. Ab diesem Zeitpunkt werden Trockenheitswarnungen auch über die offiziellen Warnkanäle des Bundes (*naturgefahren.ch*, Website und App der MeteoSchweiz, später auch Alertswiss) verbreitet. Die Plattform *drought.ch* der WSL wird nach der Inbetriebnahme der neuen Trockenheitsplattform als experimentelle Forschungsplattform weitergeführt. Mit der Übergabe der operationellen Aktivitäten an den Bund kann sich die WSL wieder vollumfänglich ih-

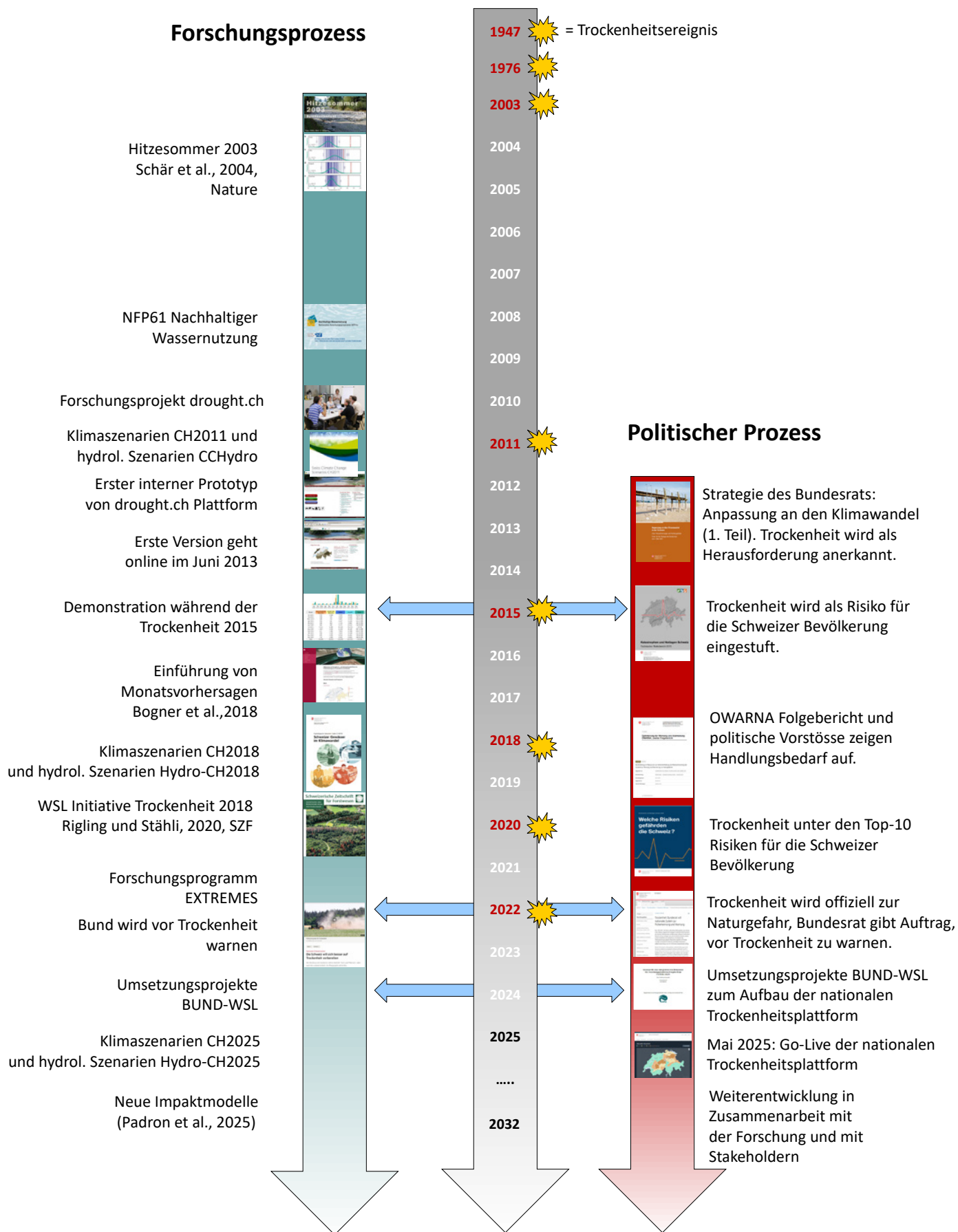


Abb. 4. Auf dem Weg einer nationalen Warnplattform für Trockenheit. Links: Forschungsprozess 2003–2025. Mitte: Trockenheitsereignisse 1947–2024. Rechts: Politischer Prozess 2012–2031. (Quelle: M. Zappa und F. Hüsler)

rem Auftrag der angewandten Forschung widmen. So kann die experimentelle Plattform *drought.ch* künftig genutzt werden, um neue Erkenntnisse aus der Forschung in einer bestehenden Umgebung zu testen, um sie dann gegebenenfalls in die operationelle Plattform des Bundes zu integrieren.

Dieses Projekt zeigt exemplarisch, wie sich Forschung und Verwaltung optimal ergänzen und gegenseitig optimieren können (siehe auch Bjørnsen *et al.* in diesem Band, S. 87). Die politische und die akademische Geschichte sind in diesem Fall eng verzahnt (siehe Abb. 4): Im Laufe der Zeit begannen politische Planungen und Entscheidungen zunehmend wissenschaftliche Erkenntnisse in ihre Überlegungen einzubeziehen. Gleichzeitig beeinflusste die politische Dimension der Trockenheitsproblematik auch die wissenschaftliche Forschung. Die Politik hat deutlich gemacht, dass verlässliche Überwachungssysteme und Früherkennungsmechanismen für Trockenheit erforderlich sind. Dies führte zum Ausbau und zur Verbesserung der Forschungsplattform *drought.ch*, deren Grundlagen und Aufbau mit Forschungsgeldern der öffentlichen Hand finanziert wurden, dient nun als Basis für das System des Bundes. Dies, weil *drought.ch* seit Jahren verlässliche und wissenschaftlich solide Daten zur Trockenheit bereitstellt und bei Trockenheitsereignissen konstant hohe Besucherzahlen verzeichnet. Die Verwaltung wiederum sorgt für die Anwendung und Umsetzung dieses über Jahre erarbeiteten und etablierten Wissens in den operationellen Betrieb und in der Praxis. Mit der Integration der Forschungsdaten in ein behördliches Informationssystem steht den Entscheidungsträgern auf kantonaler und nationaler Ebene ein verlässliches Instrument zur Einschätzung und Bewältigung von Trockenheitssituationen zur Verfügung.

3 Schlussbemerkungen

Die enge Zusammenarbeit beim Aufbau eines nationalen Warnsystems für Trockenheit zeigt, wie Wissenschaft und Verwaltung gemeinsam tragfähige Lösungen für aktuelle Herausforderungen entwickeln können. Während die Forschung innovative Methoden und Erkenntnisse liefert, stellt die Verwaltung sicher, dass diese in der Praxis genutzt werden können – ein Modell, das auch in anderen Umweltbereichen richtungsweisend sein kann.

In den kommenden Jahren wird die Forschung an neuen Modellen arbeiten, die neben der Trockenheit auch deren Auswirkung auf Umweltsysteme antizipiert. Auf der Forschungsversion von *drought.ch* wert den Impaktmodelle zu Demonstrationszwecken aufgeschaltet. Padrón *et al.* (2024) zeigen wegweisend, wie man künftig mit neuartigen Ansätzen des maschinellen Lernens die Wassertemperatur in Schweizer Gewässern bis zu vier Wochen im Voraus vorhersagen kann. Dies ermöglicht beispielsweise die Beurteilung und Vorhersage des thermischen Stresses von Fischpopulationen (Bonaglia *et al.* 2024).

Nach der erfolgreichen Implementierung des neuen Warnsystems wird der Bund sukzessive Weiterentwicklungen umsetzen und an der Verfeinerung des Umgangs mit Trockenheitsprognosen arbeiten. Dabei ist zu beachten, dass der Schlüssel zum Erfolg in Zukunft darin liegt, die Warnungen durch die kontinuierliche Schätzung des aktuellen Wasserbedarfs auf regionaler Ebene und die zeitnahe Erfassung der Trockenschäden (wie Stephan *et al.* 2021 wegweisend für den Alpenraum realisiert haben) auf die möglichen Auswirkungen abzustimmen.

Die in dem ersten Teil dieses Beitrages antizipierten extremen Trockenheitsereignisse werden das Warnsystem und die Ereignisbewältigung in Zukunft mehrmals auf die Probe stellen. Es wird sich zeigen, ob es im Falle einer Megadürre gelingt, das Gut Wasser vor und während einer akuten Mangellage richtig zu bewirtschaften, um die in Konflikt stehenden Bedürfnisse von Mensch, Wirtschaft und Umwelt adäquat zu bedienen. Der Bevölkerungsschutz und seine Verbundpartner sind sich der Herausforderungen zukünftiger Trockenheit bewusst und haben erste Schritte zur Vorsorge unternommen (siehe Bjørnsen *et al.* in diesem Band, S. 73).

4 Literatur

- Badoux A., Andres N., Techel F., Hegg C. (2016) Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015. *Nat. Hazards Earth System Sci.* 16, 12: 2747–2768. doi.org/10.5194/nhess-16-2747-2016
- BAFU (Hrsg.) (2021) Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer. Hydrologie, Gewässerökologie und Wasserwirtschaft. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Wissen. 2101: 134 S.
- BAFU (Hrsg.) (2012) Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates vom 02.03.2012. Bern, 64 S.
- Bjørnsen A., Fischer A., Hüsler F., Lienert C., McCarthy M., Muccione V., ... (2025) Dialog zur Bewältigung extremer Trockenheit in der Schweiz. In: Bjørnsen A. (Red.) *Forum für Wissen 2025: Extremes*. WSL Ber. 164, 87–98.
- Bjørnsen A., Bischof V., Baur A., Kamberaj J. (2025) Tabletop «Drought»: Wo steht der Schweizer Bevölkerungsschutz im Umgang mit langanhaltender Trockenheit? In: Bjørnsen A. (Red.) *Forum für Wissen 2025: Extremes*. WSL Ber. 164, 73–86.
- Bogner K., Liechti K., Bernhard L., Monhart S., Zappa M. (2018) Skill of hydrological extended range forecasts for water resources management in Switzerland. *Water Resour. Manage.* 32, 3: 969–984. doi.org/10.1007/s11269-017-1849-5
- Bonaglia, A., *et al.* Sub-seasonal forecasting of thermal stress for Swiss river fishes during heatwaves, *Ecological Modelling*. Submitted 2024.

- Brunner M.I., Farinotti D., Zekollari H., Huss M., Zappa M. (2019b) Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. *Hydrol. Earth System Sci.* 23: 4471–4489. doi.org/10.5194/hess-23-4471-2019
- Brunner M.I., Liechti K., Zappa M. (2019a) Extremeness of recent drought events in Switzerland: dependence on variable and return period choice. *Nat. Hazards Earth System Sci.* 19, 10: 2311–2323. doi.org/10.5194/nhess-19-2311-2019
- Brunner M.I., Tallaksen L.M. (2019) Proneness of European catchments to multiyear streamflow droughts. *Water Resour. Res.* 55, 11: 8881–8894. doi.org/10.1029/2019WR025903
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) (2015) Katastrophen und Notlagen Schweiz 2015. BABS, Bern. news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/40200.pdf
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) (2020) Katastrophen- und Notlagenbericht Schweiz 2020: Risiken und Gefahren. BABS, Bern. blog.alertswiss.ch/de/gefahrenkennen/die-nationale-risikoanalyse-2020
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) (2023): Katalog der Gefährdungen. Katastrophen und Notlagen Schweiz. 3. Auflage. BABS, Bern
- Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) (2000) Hochwasser 1999 – Analyse der Ereignisse. BBL/EDMZ, Bern. Studienbericht 10: 148 S.
- Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG) (2002) Hochwasser 2000. Ereignisanalyse/Fallbeispiele. BBL, Bern. Berichte des BWG, Serie Wasser 2: 248 S.
- BUWAL, BWG, MeteoSchweiz (2004) Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. Schriftenreihe Umwelt 369: 174.
- Calixto I. (2024) Assessing climate impacts in Switzerland under extreme scenarios: Effects on streamflow, water temperature and bark beetle phenology
- Chen L., Brun P., Buri P., Fatichi S., Gessler A., McCarthy M., ... (2025) Global increase in the occurrence and impact of megadroughts. *Science*
- Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL (Eds.) (2001) Lothar. Der Orkan 1999. Ereignisanalyse. Birmensdorf; Bern. Eidg. Forschungsanstalt WSL; Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. 365 S.
- Fischer E.M., Beyerle U., Bloin-Wibe L., Gessner C., Humphrey V., ... (2023) Storylines for unprecedented heatwaves based on ensemble boosting. *Nat Commun.* 14: 4643. doi.org/10.1038/s41467-023-40112-4
- Gessner C., Fischer E.M., Beyerle U., Knutti R. (2022) Multi-year drought storylines for Europe and North America from an iteratively perturbed global climate model, *Weather Clim. Extrem.* 38: 100512. doi.org/10.1016/j.wace.2022.100512
- Hobi M., Brandes T., Bebi P., Helzel K., Bottero A., Bührle L., ... (2025) Bewirtschaftung von fichtendominierten Gebirgswäldern im Kontext extremer Störungen. In: Björnson A. (Red.) Forum für Wissen 2025: Extremes. WSL Ber. 164, 49–59.
- Jakoby O., Wermelinger B., Stadelmann G., Lischke H. (2015) Borkenkäfer im Klimawandel. Modellierung des künftigen Befallsrisikos durch den Buchdrucker (*Ips typographus*). Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 45 S. doi.org/10.3929/ethz-a-010532135
- Kruse S., Seidl I., Stähli M. (2010) Informationsbedarf für die Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz. Die Sicht potenziell betroffener Nutzergruppen. *Wasser Energ. Luft* 102, 4: 301–304.
- Leitungsgruppe NFP 61 (2015) Nachhaltige Wassernutzung in der Schweiz – NFP 61 weist Wege in die Zukunft. Gesamtsynthese im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61 «Nachhaltige Wassernutzung», Bern.
- Lenkungsausschuss Intervention Naturgefahren (LAINAT) (2018) Optimierung der Warnung und Alarmierung OWARNA: zweiter Folgebericht.
- Matte D., Coauthors (2024) How to Engage and Adapt to Unprecedented Extremes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 105: E1407–E1415. doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0138.1
- NCCS (2018) CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. Technical Report. Zurich, National Centre for Climate Services, 271 S. ISBN: 978-3-9525031-4-0
- Otero N., Horton P., Martius O., Allen S., Zappa M., Weschler T., ... (2023) Impacts of hot-dry conditions on hydropower production in Switzerland. *Environ. Res. Lett.* 18, 6: 064038 (13 S.). doi.org/10.1088/1748-9326/acd8d7
- Padrón R.S., Zappa M., Bernhard L., Bogner K. (2025) Extended-range forecasting of stream water temperature with deep-learning models, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 29, 1685–1702. doi.org/10.5194/hess-29-1685-2025
- Pezzatti G.B., Conedera M., Ferrioli D., Ghiringhelli A., Ballmer M., Beyeler S. (2025) Waldbrände im Klimawandel: ist die Schweiz bereit?. In: Björnson A. (Red.) Forum für Wissen 2025: Extremes. WSL Ber. 164, 61–72.
- Pieper P., Düsterhus A., Baehr J. (2020) A universal Standardized Precipitation Index candidate distribution function for observations and simulations, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 24: 4541–4565, doi.org/10.5194/hess-24-4541-2020
- Rigling A., Stähli M. (2020) Erkenntnisse aus der Trockenheit 2018 für die zukünftige Waldentwicklung. *Schweiz. Z. Forstwes.* 171, 5: 242–248. doi.org/10.3188/szf.2018.0242
- Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C. (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- Scherrer S.C., Hirschi M., Spirig C, Maurer F., Kotlarski S. (2022) Trends and drivers of recent summer drying in Switzerland. *Environ. Res. Commun.* doi.org/10.1088/2515-7620/ac4fb9
- Seneviratne S.I., Orth R., Jörg-Hess S., Kruse S., Seidl I., Stähli M., ... (2013) Trockenheit in der Schweiz. Ergebnisse des NFP-61-Projekts DROUGHT-CH. *Aqua & Gas* 9: 38–47.
- SLF, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Ed.) (2000) Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. Davos: Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. 588 p. doi.org/10.1016/j.cliser.2020.100196

- Stähli M., Badoux A., Jonas T. (2024) Das Frühlingshochwasser 1999. Geburtsstunde der modernen Schneehydrologie in der Schweiz. FAN Agenda, Fachleute Naturgefahren Schweiz 1: 13–16.
- Stephan R., Erfurt M., Terzi S., Žun M., Kristan B., Haslinger K., ... (2021) An inventory of Alpine drought impact reports to explore past droughts in a mountain region, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 21: 2485–2501. doi.org/10.5194/nhess-21-2485-2021
- Svoboda M., Hayes M., Wood D. (2012) Standardized precipitation index user guide, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 16 S.
- Wechsler T., Stähli M., Jorde K., Zappa M., Schaeffli B. (2023) The future of Alpine Run-of-River hydropower production: climate change, environmental flow requirements, and technical production potential. Sci. Total Environ. 890: 163934 (13 S.). doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163934
- Wohlgemuth T., Schwitter R., Bebi P., Sutter F., Brang P. (2017) Post-windthrow management in protection forests of the Swiss Alps. Eur. J. For. Res. 136, 5–6: 1029–1040. doi.org/10.1007/s10342-017-1031-x
- Zappa M., Bernhard L., Spirig C., Pfaundler M., Stahl K., Kruse S., ... (2014) A prototype platform for water resources monitoring and early recognition of critical droughts in Switzerland. In: IAHS publications. Evolving water resources systems: understanding, predicting and managing water-society interactions. Proceedings 364: 492–498. doi.org/10.5194/piahs-364-492-2014

Abstract

EXtreme drought in Switzerland: regional and local perspectives on a global challenge

Since the wake-up call of the heatwave and drought in Summer 2003, there has been a very intensive debate in Switzerland about drought. More than 20 years later, the understanding that Europe's water tower can also be affected by extreme drought has been confirmed by research and subsequent events. The global outlook also points to the increasing risk of multi years mega droughts, which is likely to have consequences for the environment and society that are difficult to imagine today. The yearly increase of areas affected by mega-droughts almost equal the area of Switzerland (~42'000 km²) Switzerland is not unprepared, because since 2012 research and administration have been working closely together on the foundations for coping with future extreme droughts. In May 2025 the Swiss confederation launches the new national drought early-warning and detection system. This will contribute to anticipate and mitigate future drought extremes that might affect among others the ecosystems, the energy system and the transportation of goods along the Rhine.

Keywords: Drought, Switzerland, extremes, science-administration, collaboration, warning



Diese Publikation ist Open Access und alle Texte und Fotos, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden.