TROCKENHEIT IN DER SCHWEIZ

ERGEBNISSE DES NFP-61-PROJEKTS DROUGHT-CH

Infolge des Klimawandels wird in der Schweiz eine Zunahme von Trockenperioden und Hitzewellen erwartet. Trockenperioden können gravierende Auswirkungen auf Wasservorräte, Ökosysteme, Gesundheitswesen und verschiedene Wirtschaftssektoren haben. Noch fehlen relevante Informationen als Basis für angemessene Strategien im Umgang mit solchen Ereignissen. Im Rahmen des NFP-61-Projektes «DROUGHT-CH» wurde eine erste umfassende Untersuchung von Trockenperioden in der Schweiz durchgeführt. Dieser Artikel stellt die wichtigsten Erkenntnisse vor.

Sonia I. Seneviratne, René Orth, ETH Zürich; Stefanie Jörg-Hess, Sylvia Kruse, Irmi Seidl, Manfred Stähli, Massimiliano Zappa, WSL; Jan Seibert und Maria Staudinger, Universität Zürich; Kerstin Stahl und Markus Weiler, Universität Freiburg im Breisgau*

RÉSUMÉ

ÉVALUATION DU RISQUE DE SÉCHERESSE EN SUISSE – RÉSULTATS DU PROJET NFP 61 DROUGHT-CH, GESTION DURABLE DE L'EAU

Les scénarios de changement climatique prévoient pour les décennies à venir des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes en Europe centrale. Pour la Suisse, les conséquences de la sécheresse de l'été 2003 combinée avec une vague de forte canicule ont été graves, mettant ainsi en évidence combien notre pays était mal préparé à ce type de risque naturel. Les sécheresses causent d'importants dommages à la nature et aux écosystèmes, dûs au tarissement des réserves d'eau. Par ailleurs, leur disponibilité est également critique pour l'agriculture et la production d'énergie, la gestion des eaux des habitats, la stabilité des bâtiments (associée aux risques de subsidence des sols) et le tourisme. Les périodes de sécheresse peuvent aussi affecter négativement la santé humaine lorsqu'elles aggravent l'intensité des vagues de chaleur.
Prédire les périodes de sécheresse est rendu difficile par la complexité des interactions entre les conditions atmosphériques et les ressources en eau. C'est ce qui a amené la Suisse à prendre plusieurs initiatives ayant pour but d'acquérir une meilleure compréhension des tenants et aboutissants des périodes de sécheresse pour les êtres humains et la nature et de se donner ainsi les moyens de les prévoir. Le projet *Drought-CH* (2010-2013, *www.nfp61.ch/E/projects/cluster-hydrology/droughts/*)

> S. 47

HINTERGRUND

Gemäss Szenarien zum Klimawandel werden in Zentraleuropa die Trockenperioden in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich zunehmen [1, 2]. Der Schweiz wurden im Sommer 2003 die schwerwiegenden Konsequenzen einer Trockenperiode und Hitzewelle sowie die mangelnde Vorbereitung des Landes aufgezeigt [3]. Zu den Folgen für Natur und Ökosysteme gehören Auswirkungen auf den Vorrat und die Verfügbarkeit von Wasser und folglich auf die Landwirtschaft, Energieproduktion, Siedlungswasserwirtschaft, Gebäude (Bodensubsidenz) und den Tourismus [3, 4, 5]. Trockenperioden können ausserdem die Intensität von Hitzewellen verstärken und sich somit auch negativ auf die menschliche Gesundheit auswirken [1, 6, 7].
Im 20. Jahrhundert gab es in der Schweiz nur selten Trockenperioden [8], entsprechend unzureichend ist das Land auf diese Herausforderung vorbereitet. Die Vorhersage von Trockenperioden ist wegen des komplexen Zusammenspiels von Klima und Wasserressourcen anspruchsvoll. Deshalb wurden in der Schweiz auf diversen Ebenen verschiedene neue Initiativen ergriffen, um Trockenperioden und die damit verbundenen Auswirkungen auf Mensch und Natur besser zu verstehen und vorherzusagen.

** Kontakt: sonia.seneviratne@env.ethz.ch*

ZUNEHMENDE RELEVANZ VON TROCKENHEITSFORSCHUNG

In den Jahren 2010 bis 2013 wurde das Projekt *Drought-CH* (*www.nfp61.ch/E/projects/cluster-hydrology/droughts/*) im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms (NFP) 61 des Nationalfonds durchgeführt. Es untersuchte zum ersten Mal in umfassender Weise Charakteristiken von Trockenperioden in der Schweiz. Damit wurde eine Grundlage geschaffen, um den Auswirkungen der zukünftigen Klimaveränderung entgegenzutreten. Ziel des Projekts war ein verbessertes Verständnis von Trockenperioden, sowohl aus naturwissenschaftlicher wie aus sozialwissenschaftlicher Sicht, um die Früherkennung von Trockenperioden zu verbessern und deren Auswirkungen besser abschätzen zu können. Zusammen mit interessierten Nutzergruppen wurde ein Prototyp einer internetbasierten Informationsplattform für Trockenperioden entwickelt. Nachfolgend werden die Hauptergebnisse dieses Projekts vorgestellt.

Es ist ausserdem erwähnenswert, dass die Herausforderung Trockenheit auch in anderen Zusammenhängen kürzlich in der Schweiz thematisiert wurde:

- Das Postulat 10.353 von Nationalrat *Hansjörg Walter* forderte den Bundesrat auf, eine Strategie zur Bewältigung von Trockenperioden in der Schweiz zu entwickeln. Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) erarbeitete daraufhin eine Antwort, worin zahlreiche Massnahmen und Empfehlungen zur Vorbereitung auf Trockenperioden in der Schweiz genannt und erläutert werden [9].
- Der Risikobericht 2012 des Bundesamts für Bevölkerungsschutz (BABS) beinhaltet neu das Gefährdungsdossier Trockenheit [10].
- Sowohl in der Nationalen Klimaanpassungsstrategie [11] als auch in der Klimastrategie Landwirtschaft [12] gilt Trockenheit als wichtiger Handlungsbereich.

Diese verschiedenen Entwicklungen zeigen die zunehmende Relevanz von Trockenheitsforschung in der Schweiz und unterstreichen die Bedeutung der Ergebnisse des *Drought-CH*-Projektes für die Klimaanpassung hierzulande.

TROCKENHEIT

Trockenheit kann ein Defizit von Niederschlag, Bodenfeuchte, Abfluss oder Grundwasser sein. Obwohl diese verschiedenen Trockenheitsaspekte miteinander verbunden sind, treten sie nicht zwingend gleichzeitig und in gleicher Intensität auf. Für gesellschaftliche und wirtschaftliche Folgen ist vor allem eine Knappheit an gespeichertem Wasser (Bodenfeuchte, Grundwasser) und Abfluss kritisch (*s. S. 43*). Bodenfeuchte ist speziell wichtig für die Landwirtschaft, besonders wenn keine Bewässerungssysteme existieren, wohingegen Grundwasser und Abfluss eher für Wasserversorgung und Energieproduktion von Bedeutung sind.

Als Beispiel für die Vielschichtigkeit von Trockenheit und deren Einflussfaktoren wird in diesem Kapitel die Entstehung von Boden- und Grundwassertrockenheit diskutiert. Sie kann mit der terrestrischen Wasserbilanzgleichung beschrieben werden:

$$S_{n+\Delta t} = S_n + N_n - Q_n - V_n \qquad (1)$$

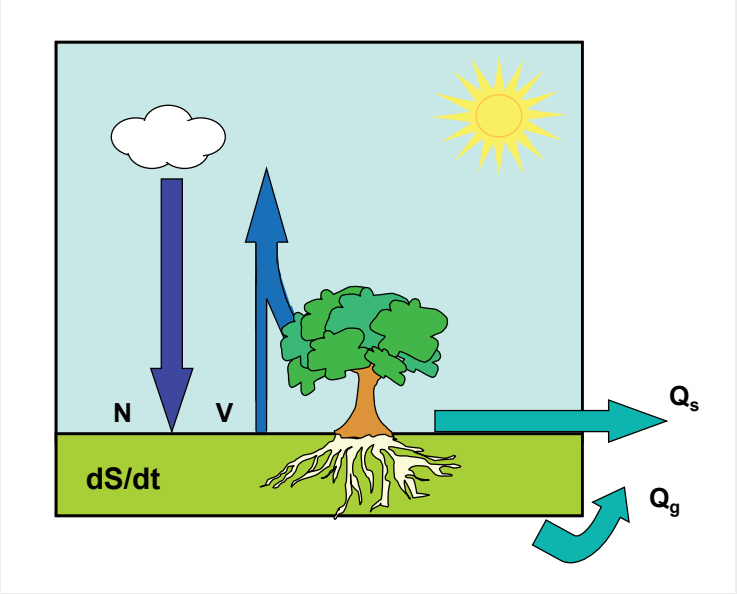

Fig. 1 Landwasserbilanz. S steht für den Wasserspeicher (Bodenfeuchte, Grundwasser, Schnee, Eis), N steht für Niederschlag, V für Verdunstung, Q_s für den Oberflächenabfluss und Q_g für den Grundwasserabfluss (modifiziert von [6])

Bilan des ressources en eau. S désigne les quantités d'eau stockées (humidité du sol, eaux souterraines, neige, glace), N désigne les précipitations, V l'évaporation, Q_s le ruissellement des eaux de surface et Q_g le ruissellement des eaux souterraines (modifié d'après [6])

Dabei ist S_n die gesamte im Untergrund und an der Oberfläche gespeicherte Wassermenge zum Zeitpunkt n, und N_n, Q_n und V_n stehen für Niederschlag, Abfluss und Verdunstung akkumuliert ab Zeitpunkt n über die Dauer Δt (*Fig. 1*). S_n beinhaltet Bodenfeuchte (Bodenwassergehalt oberhalb des Wasserspiegels), Grundwasser, Schnee und Eis (Gletscher). Bodenfeuchte und Grundwasser zeigen oft eine ähnliche Dynamik [13], Schnee spielt vor allem im Winter und Frühling eine direkte Rolle für die Bodenfeuchte. Q_n setzt sich zusammen aus Oberflächenabfluss (Q_s in *Fig. 1*) und Grundwasserabfluss (Q_g in *Fig. 1*).

Aus *Gleichung 1* folgt, dass der Wasserspeicher nicht nur austrocknen kann durch (i) das Ausbleiben von Niederschlag (N), sondern auch durch (ii) hohe Verdunstung (V). Die Verdunstung wird durch Strahlung und Vegetation bestimmt. Mit einem Beitrag von etwa 60% zur gesamten Bodenaustrocknung in der Nordwestschweiz im Juni 2003 [13] spielte die Verdunstung beispielweise eine massgebliche Rolle bei der extremen Trockenheit im besagten Hitzesommer. Solche komplexen Zusammenhänge bestimmen auch Niedrigwasser in Flüssen, da der Wasserspeicher (Bodenfeuchte, Grundwasser, Schnee) den Abfluss in trockenen Perioden direkt beeinflusst *(s. Kap. Abflusspersistenz)*.

TROCKENHEITSPERSISTENZ

Während Niederschlag kurzfristig stark variieren kann, entwickeln sich Bodentrockenheit und Niedrigwasser meist über mehrere Wochen und Monate. Deshalb wird Trockenheit oft als «schleichendes Klimaextrem» bezeichnet, dessen Entwicklung erst (zu) spät erkennbar wird. Grund dafür ist, dass die Wasserspeicher (Bodenfeuchte, Grundwasser) langsam und verzögert auf Wetteranomalien *(s. Kap. Trockenheit)* reagieren. Solche so-

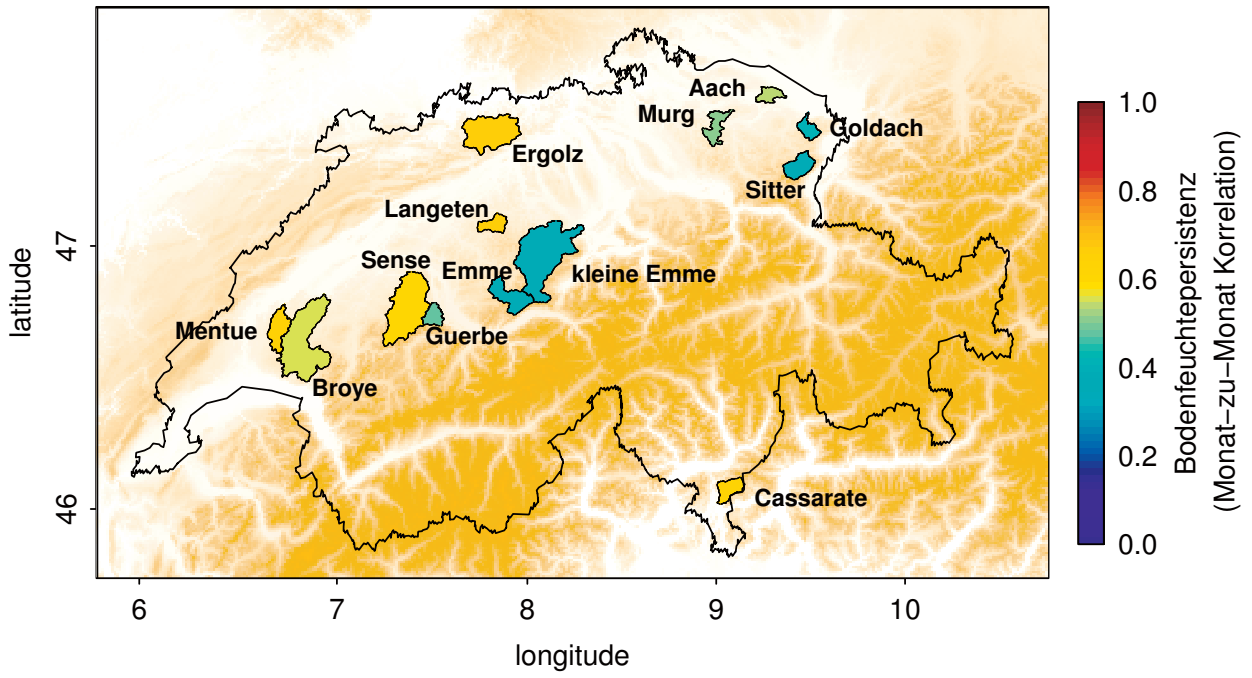

Fig. 2 Stärke der Bodenfeuchtepersistenz in verschiedenen Einzugsgebieten der Schweiz (< 1500 m). Berechnet als jährliches Mittel. Ausgedrückt als Autokorrelation mit einer zeitlichen Verschiebung von 30 Tagen. Ein Wert von 0,5 bedeutet, dass mittelstarke Bodenfeuchteanomalien im Mittel etwa 30 Tage bestehen (bei 0,2 etwa 10 Tage) (berechnet mit einem Wasserbilanzmodell [14], kalibriert auf jedes Einzugsgebiet; nach [14])

Niveau d'intensité et de persistance de l'humidité du sol dans différentes unités hydrologiques de Suisse (< 1500 m). Calculé sous forme de moyenne annuelle. Exprimé en autocorrélation avec un décalage temporel de 30 jours. La valeur de 0,5 indique des anomalies de moyenne intensité de l'humidité du sol sur une durée de 30 jours (0,2 correspondant à une dizaine de jours) (calculé d'après un modèle de bilan des ressources en eau [14] préalablement calibré pour chacune des unités hydrologiques observées [14])

genannten Persistenzen wurden ausführlich im Projekt *Drought-CH* untersucht, insbesondere in Bezug auf Bodenfeuchte und Abfluss. Die Persistenz ist ein wichtiges Mass, weil sie erlaubt Aussagen zu treffen, wie weit in die Zukunft die Vorhersagbarkeit von Abfluss, Bodenfeuchte oder anderen hydrologischen Grössen (und damit auch Trockenheit) reicht *(s. Kap. Trockenheitsvorhersage)*.

BODENFEUCHTEPERSISTENZ

Die Bodenfeuchte ist nicht nur eine zentrale Variable zur Beschreibung des terrestrischen Wasservorrats, sie weist auch eine herausragende Persistenz (oft auch engl. «*memory*», Gedächtnis) auf. Das heisst, die Bodenfeuchte spiegelt durch die Wasserspeicherkapazität des Bodens vergangene Wetterereignisse und -anomalien lange wider. Diese Persistenz kann Wochen oder Monate andauern, sie übersteigt damit deutlich die Persistenz anderer Grössen wie Niederschlag, Temperatur oder Abfluss, ist aber meist geringer als die Persistenz des Grundwassers. Zur Abschätzung der räumlichen Verteilung von Bodenfeuchtepersistenz in der Schweiz wurde ein an der ETH entwickeltes Wasserbilanzmodell verwendet [14], das auf Basis von Einzugsgebieten kalibriert und angewendet wird. Dieses Modell erlaubt es, den bestehenden Mangel von langzeitigen Bodenfeuchtemessungen auszugleichen. Das Modell beinhaltet kein Gletschermodul und wurde deshalb nicht in hoch gelegenen Regionen (>1500 m) angewandt.

Wie in *Figur 2* dargestellt, ist die Bodenfeuchtepersistenz im Mittelland sowie im Südtessin am stärksten, wohingegen sie in den Bergregionen (unterhalb 1500 m) schwächer ausgeprägt ist. Dieses landesweite Muster wird bestimmt durch die beiden wesentlichen Einflussgrössen der Bodenfeuchtepersistenz: (i) die Variationen der Bodenfeuchte selbst (grössere Anomalien können beispielsweise zu längeren Trockenperioden im Boden führen) und (ii) die Variationen des atmosphärischen Antriebs (Niederschlag, Strahlung). Die starke Persistenz der Bodenfeuchte im Mittelland und im Südtessin kann also mit einer hohen Bodenfeuchtevariabilität erklärt werden, die aus mächtigeren Böden und grösserer Verdunstung resultiert (beides begünstigt grössere Anomalien und damit längere Abweichungen vom Mittelwert). In den Alpen hingegen sind die Böden weniger mächtig und die Verdunstung wird in grösseren Höhen zunehmend kleiner (bedingt durch weniger Vegetation). Dadurch kann die Bodenfeuchte weniger stark variieren und auch Niederschlag nur begrenzt gespeichert werden, daher sinkt die Persistenz. Zu beachten ist dabei, dass dieser Zusammenhang sich für das Gesamtjahr ergibt, aber im Winter umgekehrt ist. Denn dann gibt es in höher gelegenen Regionen den grössten Teil des Niederschlags in Form von Schnee und die Verdunstung ist sehr niedrig. Dadurch verändert sich die Bodenfeuchte kaum noch *(Gl. 1)*, und es entsteht eine hohe Persistenz.

ABFLUSSPERSISTENZ

Die Trockenheitsdynamik der Abflüsse von Einzugsgebieten wird hauptsächlich durch das Zusammenspiel von Speichergrössen (Bodenfeuchte, Grundwasser, Schnee und Eis), deren Füllstand (Anfangsbedingungen) und deren Entlee-

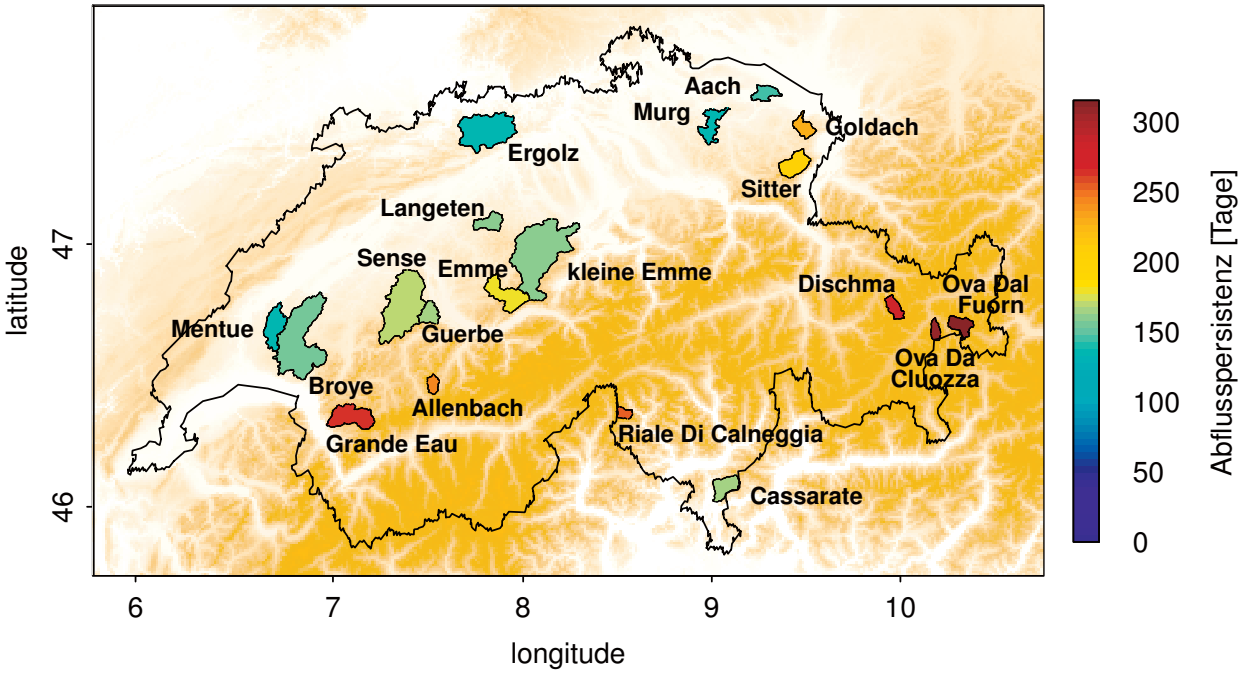

Fig. 3 Wie in Figur 2, nur für Abfluss. Persistenz hier angegeben als Anzahl Tage und berechnet über das ganze Jahr (mit Modell HBV [15, 16])
Même analyse que la Fig. 2, mais pour l'écoulement d'eau. Sa persistance est indiquée ici en nombre de jours et calculée pour toute l'année (avec le modèle HBV [15,16])

rungsdynamik beeinflusst. Die Abflusspersistenz [in Tagen] wurde im Projekt über ein Modellexperiment mit dem hydrologischen Modell HBV [15,16] ermittelt und ist in *Figur 3* für verschiedene Einzugsgebiete dargestellt (auch für Einzugsgebiete höher als 1500 m).

Die berechneten Werte für die Persistenz variierten für die verschiedenen Gebiete zwischen wenigen Wochen bis zu fast einem Jahr. Bei den Gebieten mit sehr langer Persistenz (~1 Jahr) handelt es sich vor allem um höher gelegene Gebiete (>1500 m). Mit zunehmender Höhe konnte eine leichte Tendenz zu grösseren Persistenzwerten festgestellt werden, die vor allem durch den grossen Einfluss des Schneespeichers erklärt werden kann. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen für Bodenfeuchte, denn der Einfluss des Schnees im Winter hat dabei zwar die gleiche Wirkung, er wird aber vom Einfluss der weniger mächtigen Böden und der geringeren Verdunstung im Rest des Jahres überlagert.

TROCKENHEITSVORHERSAGE

Neben der Evaluation von Persistenzmerkmalen, welche die Trockenheitsdynamik beeinflussen *(s. Kap. Trockenpersistenz)*, wurde im Projekt *Drought-CH* untersucht, inwieweit es möglich ist, diese Eigenschaft für Trockenheitsvorhersagen zu nutzen. Dazu wurde erstmals die Vorhersagbarkeit von Bodenfeuchte in der Schweiz untersucht. Ausserdem wurden bestehende Echtzeit-Abflussvorhersagen in Bezug auf Niedrigwasser verbessert, beispielsweise durch die Nutzung von Informationen über die Schneemenge zu Vorhersagebeginn.

BODENTROCKENHEIT

Durch ihre starke Persistenz ist die Bodenfeuchte eine der wenigen Variablen des Klimasystems, die potenziell auf einer (sub-)saisonalen Zeitskala vorhersagbar sind. Dies ist besonders bei Trockenheitsereignissen relevant, da Bodentrockenheit zu deren wichtigsten Auswirkungen zählt, mit grosser Relevanz für beispielsweise die Landwirtschaft (*s. Tab. 1, S. 44*). Um diese Vorhersagbarkeit und deren Einflussfaktoren auf einer täglichen Zeitskala zu untersuchen, wurde das bereits erwähnte ETH-Wasserbilanzmodell [14] verwendet. Zu beachten ist, dass dabei die potenzielle Vorhersagbarkeit untersucht wird, das heisst, mangels langzeitiger Bodenfeuchtemessungen wird die vorhergesagte Bodenfeuchte mit einer modellierten Bodenfeuchte aus einem Modelllauf, der mit beobachteten meteorologischen Eingangsdaten (Niederschlag, Strahlung) angetrieben wurde, verglichen.

Wie in *Figur 4* gezeigt, wurden so verschiedene Vorhersageexperimente durchgeführt, um die relative Wichtigkeit der Anfangsbedingungen (von Bodenfeuchte und Schneemenge) und der meteorologischen Vorhersagen des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) zu bestimmen. Zunächst wird nur die anfängliche Bodenfeuchte für die Bodenfeuchtevorhersage in Verbindung mit der Klimatologie (d.h. der langjährigen Mittelwerte) von Schneehöhe und meteorologischen Eingangsdaten benutzt *(obere Grafik in Fig. 4)*. Die Vorhersagegüte ist demnach im Frühjahr während des Vorhersagezeitraums von 32 Tagen sehr hoch, im Sommer und Herbst ist sie in der ersten Woche sehr hoch und bis hin zur vierten Woche immer noch deutlich besser als die Klimatologie (Vorhersagegüte = 0). Wenn zusätzlich die anfängliche Schneehöhe *(zweite Reihe in Fig. 4)* oder die Vorhersage von Strahlung oder Temperatur vom EZMW *(vierte und fünfte Reihe)* verwendet wird, bleibt die Vorhersagegüte der Bodenfeuchte in etwa gleich (lediglich in höher gelegenen Einzugsgebieten ist ein Einfluss von Schneehöhe und Temperaturvorhersage

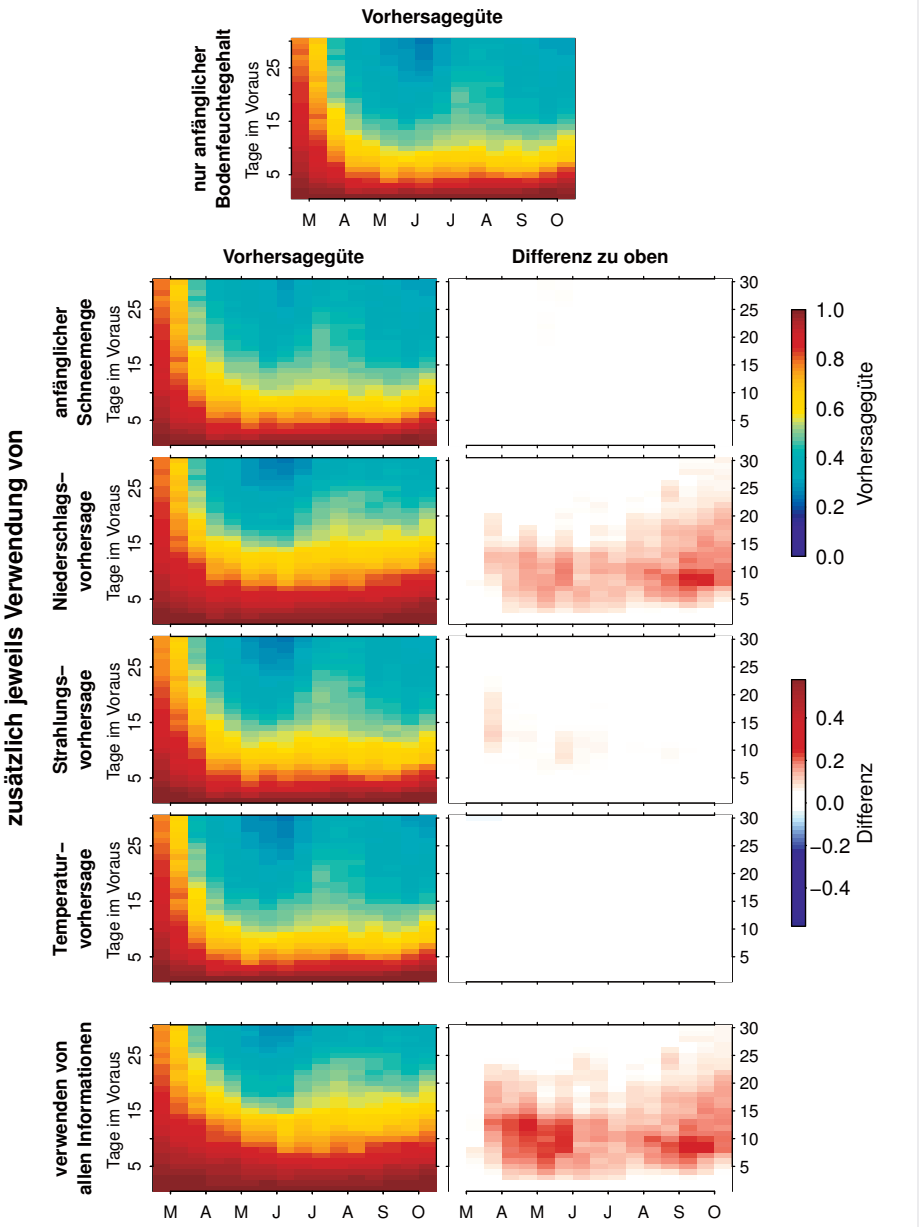

Fig. 4 Mittlere potenzielle Vorhersagbarkeit von Bodenfeuchte in der Schweiz unter Benutzung von Anfangsbedingungen und/oder meteorologischen Vorhersagen. Vorhersagegüte wird berechnet als Korrelation zwischen vorhergesagten und beobachteten Anomalien (0 heisst, die Vorhersage ist genauso gut wie die Klimatologie, 1 heisst perfekte Vorhersage) und angegeben als Durchschnitt von 22 Schweizer Einzugsgebieten (berechnet mit einem Wasserbilanzmodell [14], kalibriert auf jedes Einzugsgebiet)

Prédictabilité moyenne de l'humidité du sol en Suisse, basée sur les conditions initiales et/ou des prévisions météorologiques. La pertinence des prévisions météorologiques est calculée au moyen de la corrélation entre les anomalies prévues et observées (0 indique que la prévision est de même qualité que la climatologie, 1 désigne une prévision parfaitement exacte) et est indiquée sous forme de moyenne obtenue pour 22 unités hydrologiques de Suisse (calculée d'après un modèle de bilan des ressources en eau [14], préalablement calibré pour chacune des unités hydrologiques)

vorhanden). Die Verwendung der Niederschlagsvorhersage *(dritte Reihe)* hingegen führt zu einer klaren Verbesserung der Bodenfeuchtevorhersage, speziell ab dem späten Frühjahr.

Zusammenfassend zeigen diese ersten Ergebnisse, dass die Vorhersage von täglicher Bodenfeuchte für etwa zwei Wochen im Voraus sehr gut und bis zu vier Wochen im Voraus immer noch besser als die Klimatologie sein kann. Die Vorhersagegüte hängt massgeblich von der Genauigkeit der anfänglichen Bodenfeuchte ab, aber auch die Niederschlagsvorhersage spielt eine Rolle. Diese Vorhersagen werden noch nicht operationell (d. h. in Echtzeit) berechnet, aber sie könnten möglicherweise in Zukunft auf *www.drought.ch* (*s. S. 44*) zu Verfügung gestellt werden.

NIEDRIGWASSER IN ECHTZEIT

Aufbauend auf einem bestehenden Vorhersagesystem für Hochwasser wurde im Projekt *Drought-CH* untersucht inwieweit es möglich ist, Echtzeit-Vorhersagen von Niedrigwasser zu realisieren [17]. Ein erster Ansatz untersuchte, ob Informationen über Schneeressourcen zur Früherkennung von Niedrigwasser im Spätfrühling und Frühsommer verwendet werden können [18]. Mit Hilfe eines hochaufgelösten, täglichen Schneedatensatzes von 1971–2009 konnte gezeigt werden, dass die niedrigen Wasserstände der grösseren Seen des Schweizer Mittellandes im Juni 2011 nicht allein durch das Ausbleiben von Regen im Frühling ausgelöst wurden, sondern auch durch unterdurchschnittliche Schneeressourcen in den Bergen im Frühjahr [19].

Dieser Zusammenhang wurde dann mit einem einfachen statistischen Modell dargestellt [18], um damit den niedrigsten möglichen Wasserstand des Rheins bei Neuhausen in den Monaten Mai bis Juli aus den Schneeinformationen vom 15. April zu bestimmen. *Figur 5* zeigt die Vorhersage für 2013. Bei normaler Witterung (gemäss langjährigem Durchschnitt) wäre der zu erwartende Niedrigwasser-Abfluss im Mai 2013 etwa 300 m³/s und im Juni und Juli etwa 400 m³/s gewesen. Bei trockener Witterung oder ausbleibender Schneeschmelze hätte man laut Modell im Mai einen Wert von unter 200 m³/s erreichen können, für Juni und Juli etwa 250 m³/s. Doch Anfang Juni gab es in grossen Teilen des Alpenrhein-Einzugsgebietes sehr grosse Regenmengen. Diese bewirkten sowohl einen kritisch hohen Wasserstand des Bodensees als auch eine drastische Erhöhung der Durchflussmengen in Neuhausen. Daher konnte man für den Sommer 2013 herleiten, dass keine kritischen Niedrigwasser-Abflüsse zu befürchten waren, welche allenfalls die Schifffahrt im Rhein hätten beeinträchtigen können.

Neben statistischen Modellen wurden weiterhin Niedrigwasservorhersagen mit dem hydrologischen Modell *Prevah* [20] getestet. Dieses wurde angetrieben mit monatlichen Wettervorhersagen des Europäischen Zentrums für Mittelfristvor-

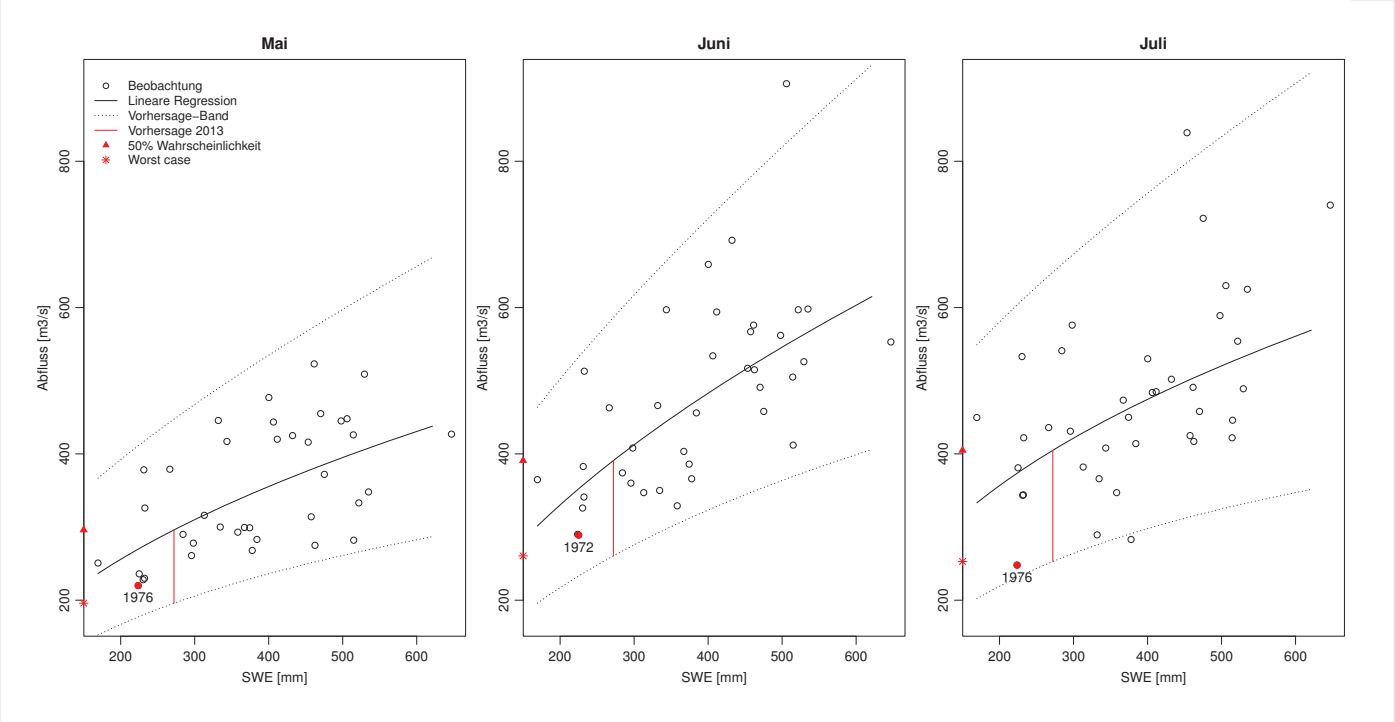

Fig. 5 Niedrigwasservorhersage für den Rhein bei Neuhausen für Mai, Juni und Juli 2013 als Funktion von Schneeressourcen (angegeben als Schneewasseräquivalent, SWE) im Alpenrhein-Einzugsgebiet. Die Punkte zeigen Beobachtungen aus der Periode 1971 bis 2009 und die roten Linien zeigen Abschätzungen für 2013

Prévision de l'étiage minimal du Rhin à Neuhausen pour les mois de mai, juin et juillet 2013 en fonction des ressources en neige (indiquées sous forme d'équivalent des eaux de fonte, SWE) dans l'unité hydrologique du bassin du Rhin alpin. Les points indiquent les observations datant de la période allant de 1971 à 2009 et les lignes rouges représentent les estimations pour 2013

hersagen [21] . Die Ergebnisse zeigten, dass Niedrigwasser drei Wochen im Voraus gut vorhergesagt werden kann. Für Hochwasser hingegen kann man erst fünf bis sieben Tage im Voraus eine zuverlässige Prognose realisieren. Dabei sind die Vorhersagen für die Grosseinzugsgebiete unterhalb der Alpenrandseen am zuverlässigsten. Ausserdem konnte gezeigt werden, dass die Vorhersagegüte hauptsächlich von den Anfangsbedingungen der Vorhersagen und der Güte der Regenvorhersage abhängig ist [22], ähnlich wie die Vorhersagegüte der Bodenfeuchte *(Fig. 4)*. Daher wird in Zukunft der Fokus stärker auf die Verbesserung der Datenqualität der Anfangsbedingungen gelegt. Dies umfasst Beobachtungen von Schneeressourcen, Abfluss und Bodenfeuchte. Zudem wurden die ersten operationellen Vorhersagen für die Einzugsgebiete der Thur, der Emme und der Dischma (Davos) implementiert. Die Ergebnisse werden täglich auf der Website *www.drought.ch* veröffentlicht.

INFORMATIONSBEDÜRFNISSE FÜR DIE FRÜHERKENNUNG VON TROCKENHEIT

Welche Variablen (i. S. von Kategorie) und Indikatoren (i. S. von Ausprägung) geeignet sind, damit wassernutzende Gruppen und Sektoren tatsächliche und potenzielle Trockenheit frühzeitig erkennen und Massnahmen zur Schadensbegrenzung ergreifen können, ist von deren Bedürfnissen (Strukturen, Voraussetzungen) abhängig. Für die Hydroenergieproduktion sind es z. B. andere als für die Forstwirtschaft oder die Schifffahrt [23]. Hinzu kommt, dass mancher Indikator der Früherkennung dienen könnte, von der Wissenschaft aber (noch) nicht gemessen oder berechnet wird. Um den Informationsbedarf zur Früherkennung zu ermitteln und allenfalls die Trockenheitsforschung auf jene Indikatoren auszurichten, für die ein Bedarf besteht, wurden im *Drought-CH*-Projekt Vertreter von trockenheitssensitiven Sektoren befragt. Es bestätigte sich der unterschiedliche Bedarf, weiter wurden keine bislang unbekannten Variablen genannt; bei Präzisierung und Vorhersagedauer der Indikatoren gibt es allerdings Entwicklungsbedarf. *Tabelle 1* zeigt die genannten Variablen und Indikatoren, die aus Sicht verschiedener Nutzergruppen für die Früherkennung notwendig sind, ergänzt durch die räumliche Ausdehnung und den Vorhersagezeitraum sowie Vorhersagegenauigkeit, die derzeit aus Sicht der Forschung möglich sind. Die Befragungen zeigten auch, dass Information für die Früherkennung dann Schaden vermeiden oder reduzieren kann, wenn die Nutzergruppen Massnahmen realisieren können. Dafür bedarf es materieller Voraussetzungen (z. B. Bewässerungsanlage) und des Wissens, wie gehandelt werden kann oder muss (z. B. wann, wie viel bewässern, Strom produzieren) [24].

Diese allgemeinen Erkenntnisse wurden durch eine Befragung von Obstbetrieben in der Nordwest- und Nordostschweiz im Jahr 2013 (801 Antworten) vertieft. Obwohl die Umfrage noch nicht vollständig ausgewertet ist, zeigen erste Resultate, dass über 80% der antwortenden Betriebe Niederschlagsinformationen für die Früherkennung nutzen, fast 40% nutzen Temperatur und fast 35% nutzen Bodenfeuchte. Angaben zu Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und Verdunstung (Evapotranspiration) werden jeweils von weniger als 15% genutzt. Allerdings wünschen sich 21% der Betriebe zusätzliche Information zu Verdunstung und 15% der Betriebe zu Bodenfeuchte. Für diese beiden Variablen besteht bei den Obstbauern der grösste Bedarf für die Verbesserung von Informationen zur Früherkennung von Trockenheit.

Von Wassernutzern verwendete Variablen	Nutzergruppen	Indikatoren / Indizes / Schwellenwerte für Monitoring und Vorhersage	Räumliche Ausdehnung potenzieller Anomalien	Vorhersagezeitraum Vorhersagegenauigkeit
Niederschlag	Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Schifffahrt, Fischerei, Wasserkraft, Wasserwirtschaft	Niederschlagsmenge der vergangenen/nächsten x Tage [mm]/ Abweichung der Niederschlagsmenge der letzten x Tage vom langfristigen Mittel [%]	lokal – regional	< 10 Tage hoch< 5 Tage; gering für längerfristige Vorhersagen
Luftfeuchtigkeit	Landwirtschaft, Forstwirtschaft	–	lokal – regional	< 10 Tage hoch < 5 Tage; gering für langerfristige Vorhersage
Verdunstung (Evapotranspiration)	Landwirtschaft	Abweichung der letzten/nächsten x Tage von langfristigen saisonalen Mittel [mm]	lokal – national	< 10 Tage niedrig wegen geringer Anzahl Messungen und Abhängigkeit von vielen Parametern
Bodenfeuchte	Naturschutz, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Bafu	Abweichung der letzten/nächsten x Tage vom langfristigen saisonalen Mittel [mm]	lokal – national	< 1–3 Monate hoch < 2 Wochen; mittel < 2 Monate (hängt vom momentanen Bodenfeuchtezustand ab)
Streufeuchte	Forstwirtschaft	3–5 qualitative Kategorien (sehr trocken, trocken, leicht feucht, feucht)	lokal - national	< 10 Tage nicht abgeschätzt
Windgeschwindigkeit	Forstwirtschaft	–	< 40 km	< 5 Tage hoch < 5 Tage; gering für längerfristige Vorhersagen
Wassertemperatur	Naturschutz, Fischerei, Energiesektor	max. Temperatur	regional	< 10 Tage nicht abgeschätzt
Grundwasserspiegel	Landwirtschaft (Bewässerung), Wasserwirtschaft	Abweichung vom langfristigen saisonalen Mittel [m oder %]	regional	< 2–3 Monate hoch über diesen Zeitraum
Wasserstand von Oberflächenwasser	Schifffahrt, Landwirtschaft (Bewässerung)	Abweichung vom langfristigen saisonalen Mittel [m oder %]	regional	< 15 Tage hoch über diesen Zeitraum
Abflussmenge von Flüssen	Naturschutz, Fischerei, Wasserwirtschaft, Wasserkraft, Bafu	Q_{347} (= Abfluss, der an 347 Tagen überschritten wird), Abweichung der letzten x Tage vom langfristigen saisonalen Mittel [mm oder m^3/s]	lokal - national	< 15 Tage hoch über diesen Zeitraum
Abflussmenge von Flüssen	Naturschutz, Fischerei, Wasserwirtschaft, Wasserkraft, Bafu	Q_{347} (= Abfluss, der an 347 Tagen überschritten wird), Abweichung der letzten x Tage vom langfristigen saisonalen Mittel [mm oder m^3/s]	lokal - national	< 15 Tage hoch über diesen Zeitraum

Tab. 1 Variablen und Indikatoren, die von Vertreter/innen trockenheitssensitiver Sektoren genannt wurden [24]
Variables et indicateurs cités par des représentant(e)s de secteurs affectés par les sécheresses [24]

ENTWICKLUNG EINER TROCKENHEITSPLATTFORM

Das Forschungsprojekt *Drought-CH* hat erstmals vertieft aufgezeigt, welche Prozesse zur Trockenheitsdynamik in der Schweiz beitragen, sowie die vielfältige Sicht der verschiedenen Wassernutzungssektoren dargelegt. Es ist im Rahmen dieses Projekts ausserdem gelungen, einen Prototypen einer Informationsplattform zu entwickeln, der die Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz unterstützt [25]: Unter Einbezug von Vertretern verschiedener Wassernutzungssektoren und mit Unterstützung des Bundesamts für Umwelt BAFU und der MeteoSchweiz ist *www.drought.ch* entstanden – eine Internet basierte Test-Informationsplattform, die Abschätzungen der aktuellen Situation bezüglich Trockenheit und Niedrigwasser sowie Trockenheitsprognosen für die kommenden Tage darstellt [25] *(Fig. 6)*. Dabei werden die aktuellen und prognostizierten Abflüsse und Schneevorräte anhand von langjährigen Klimatologien eingeordnet (basierend auf dem *Prevah*-Modell [20], *s. Kap. Niedrigwasser in Echtzeit*). Erste *Prevah* basierte Informationen zur Bodenfeuchte werden testweise zur Verfügung gestellt und derzeit anhand von Beobachtungen [26, 27] und dem ETH-Modell [14] *(s. Kap. Bodentrockenheit)* evaluiert. Fundierte Bodenfeuchteprodukte sind speziell in Bezug auf die Nachfrage der Öffentlichkeit von besonderer Relevanz (*s. S. 43*). Eine Erweiterung der Plattform in diesem Bereich wird deshalb für zukünftige Anwendungen geprüft. Der Plattformprototyp steht seit dem 1. Juni 2013 im Rahmen eines Testbetriebs interessierten Nutzern zur Verfügung. Notwendig dazu ist eine einmalige Registrierung auf der Einstiegsseite. Der Entstehungsprozess und die grundsätzlichen Merkmale dieser ersten Version sind in einem Artikel in der Schweizer Fachzeitschrift *Wasser Energie Luft* [25] ausführlich beschrieben.

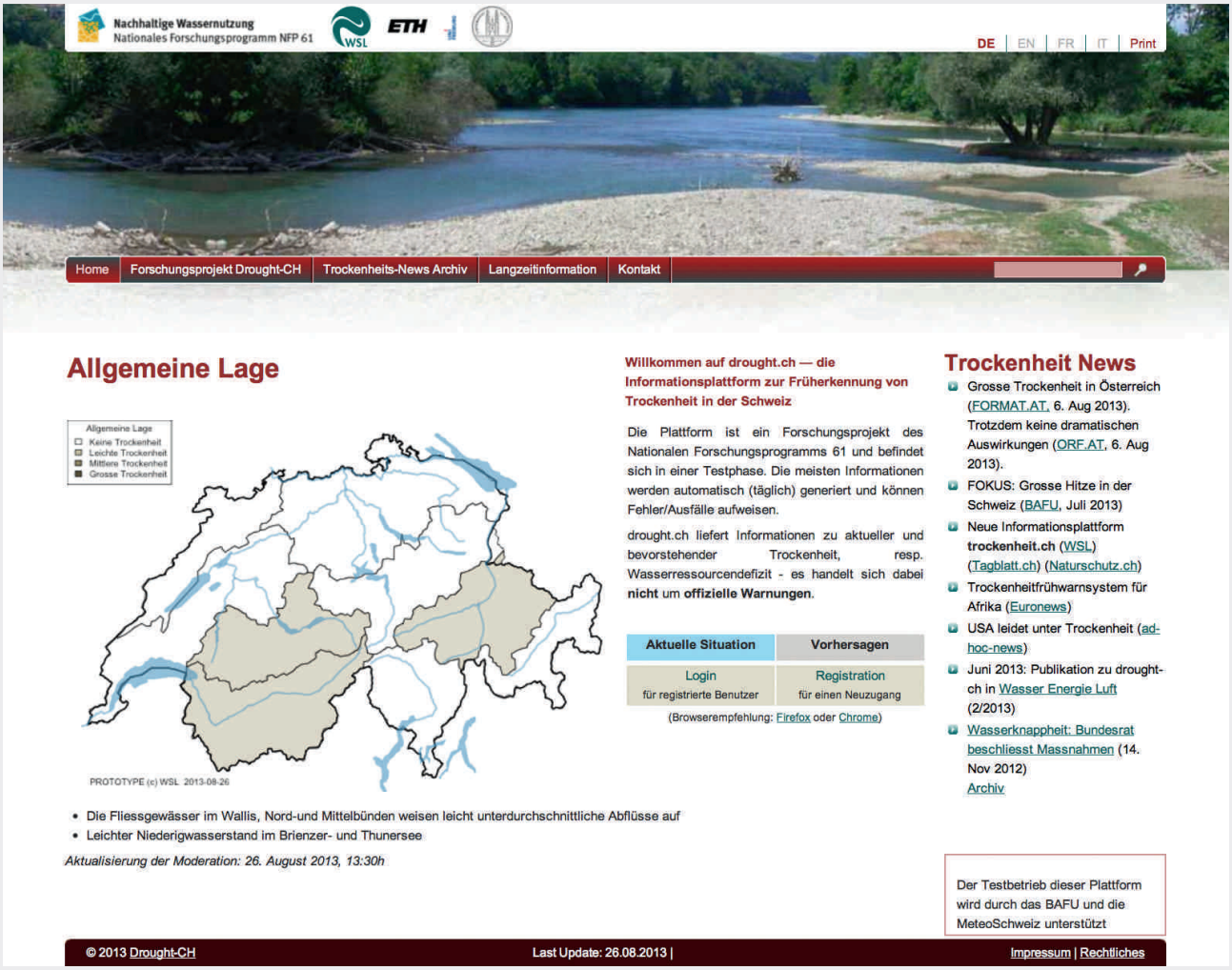

Fig. 6 Einstiegsseite der Prototyp-Informationsplattform drought.ch (Stand: 26. August 2013)
Page d'accès à la plateforme prototype d'information drought.ch (état au 26 août 2013)

RÜCKSCHLÜSSE UND AUSBLICK

Das Projekt *Drought-CH* hat zum ersten Mal vertieft untersucht und evaluiert, welche Prozesse zu Trockenheit und deren Auswirkungen in der Schweiz beitragen. Ergebnisse dieses Projekts haben eine hohe gesellschaftliche Relevanz, da Trockenperioden in der Schweiz zu einem ernsten Problem werden könnten und diese Problematik zunehmend ins Blickfeld von Öffentlichkeit, Politikern und Verbänden rückt. Diese Tatsache wurde deutlich durch das grosse Interesse bei zwei im Rahmen des Projekts organisierten Workshops und durch neuerliche politische Entwicklungen hin zu einer besseren Vorbereitung auf Trockenperioden (*s. Kap. Hintergrund*).

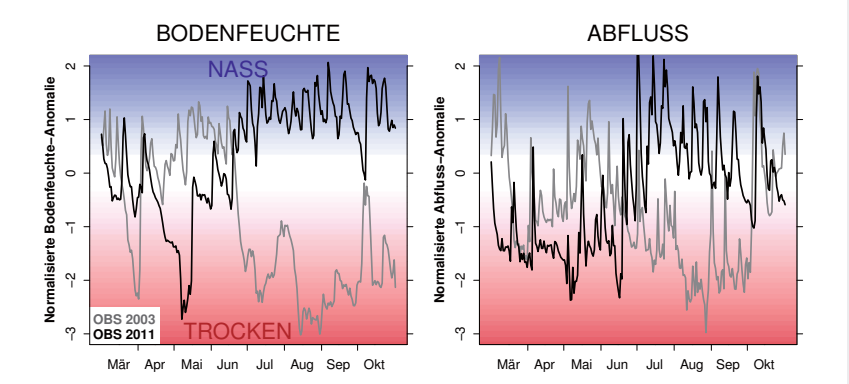

Fig. 7 Verlauf von Bodenfeuchte und Abfluss in den Jahren 2003 und 2011 im Rietholzbach-Einzugsgebiet [13]. Vergleich zwischen normalisierten Beobachtungen für beide Grössen (Analyse von R. Orth, ETH Zürich)
Etat de l'humidité du sol et des écoulements d'eau en 2003 et en 2011 dans l'unité hydrologique de Rietholzbach [13]. Comparaison entre les observations normalisées pour ces deux variables (Analyse de R. Orth, ETHZ)

Ausserdem wurde während des Projekts bestätigt, dass Trockenheit ein sehr komplexes Problem ist, was die Früherkennung solcher Ereignisse erschwert. Das Frühjahr 2011 war beispielsweise sehr trocken, mehr noch als das Frühjahr 2003 *(Fig. 7)*; wäre es im 2003 Frühjahr so trocken wie 2011 gewesen, wären die Auswirkungen des Hitzesommers 2003 also ungleich schlimmer gewesen. Das zeigt einerseits, dass der Füllstand der verschiedenen Wasserspeicher in (längerfristigen) Wettervorhersagen berücksichtigt werden muss, und dass andererseits Persistenz in den Wassersystemen von

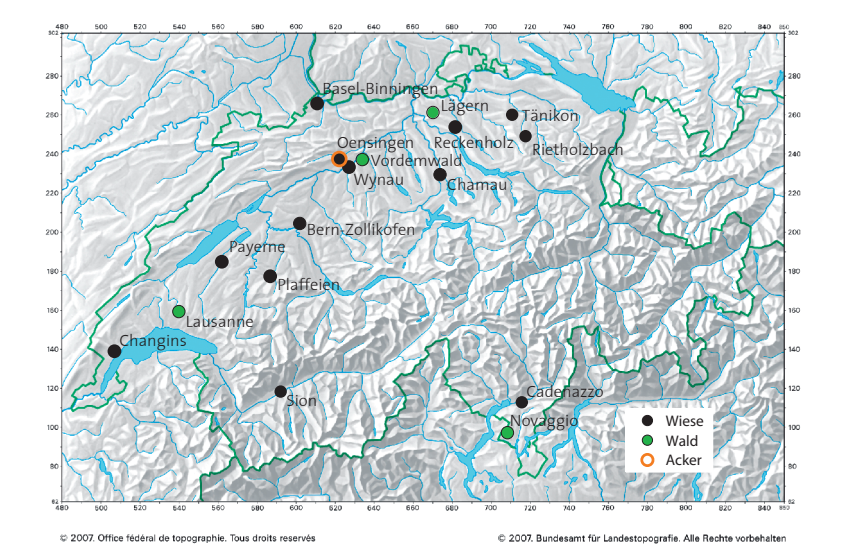

Fig. 8 SwissSMEX Bodenfeuchte-Messnetz [26, 27]
Réseau suisse de mesure de l'humidité du sol SwissSMEX [26, 27]

grossskaliger Wetterdynamik auch in wenigen Wochen zerstört werden kann. Ausserdem wird damit (entgegen der oft verbreiteten Meinung) deutlich, dass der Sommer 2003 eigentlich nicht das grösste anzunehmende Trockenheitsereignis bei heutigen Klimaverhältnissen war.

Eine weitere wichtige Schlussfolgerung aus dem Projekt ist, dass eine bessere Beobachtung von trockenheitsrelevanten Grössen in der Schweiz erforderlich ist. Diese sollte die ganze Wasserbilanz erfassen, also neben Niederschlag und Abfluss auch Bodenfeuchte, Grundwasser und Verdunstung. Die Bodenfeuchte ist beispielweise von grosser Bedeutung für Landwirtschaft, Forstwirtschaft und natürliche Ökosysteme (*s. S. 43*). Aktuell werden lediglich Niederschlag (durch die MeteoSchweiz), Grundwasser in bestimmten Regionen (Kanton und BAFU) und Abfluss (BAFU) operationell und damit in Echtzeit erhoben und weitergegeben. Neue Netzwerke und langzeitige Einrichtungen zur Messung von Bodenfeuchte [13, 26, 27; *Fig. 8*] und Verdunstung [13, 28] wurden unter der Führung von universitären Forschungsgruppen aufgebaut. Ein Übergang zu operationellem Betrieb mit Datenverfügbarkeit auf einer regulären Basis wäre äusserst nützlich für verschiedenste Interessengruppen. Die Forschung des Projektes hat des Weiteren die starken Persistenzeigenschaften von Trockenperioden beleuchtet, speziell für Bodenfeuchte und Abfluss. Diese Persistenz wird verursacht durch die bedeutende Rolle von Wasserspeichern für Trockenheitsdynamik, vor allem von Bodenfeuchte, Grundwasser und – in höheren Lagen –auch Schnee und Eis. Diese Eigenschaft begründet die schleichende Entwicklung solcher Trockenheitsereignisse, aber sie ist gleichzeitig auch die Basis für eine potenziell gute Vorhersagbarkeit. Als Teil der im Testbetrieb befindlichen Internetplattform *www.drought.ch* sind Vorhersagen von Abfluss und Bodenfeuchte online verfügbar, basierend auf Simulationen eines hydrologischen Standardmodells [17]. Dieses Modell wurde speziell für Abflussvorhersagen getestet [21]. Ausführlichere Analysen bezüglich der Eignung dieses Modells zur Simulation von Bodenfeuchte werden momentan durchgeführt, inklusive Vergleichen mit dem ETH-Wasserbilanzmodell [14]. Zusammengefasst hat das NFP-61-Projekt *Drought-CH* nicht nur zu einem substanziellen Fortschritt im Verständnis von Trockenheit in der Schweiz geführt, sondern auch zu einer erhöhten Aufmerksamkeit in Bezug auf diese Thematik. Des Weiteren wurde eine sich im Testbetrieb befindliche öffentlich zugängliche Prototyp-Informationswebsite entwickelt. Das Projekt hat ausserdem aufgezeigt, welche wichtigen Fragen noch ausführlicher bearbeitet werden müssen, darunter die Erfassung der Bodenfeuchtedynamik, die zu Trockenperioden beiträgt, sowie das Verständnis von Prozessen, welche die hydrologische Persistenz begrenzen.

DANKSAGUNG

Wir danken dem Schweizerischen Nationalfonds für die finanzielle und administrative Unterstützung des NFP-61-Projekts *Drought-CH.* Einige komplementäre Analysen konnten durch das Europäische Projekt EU-FP7 *Drought-R&SPI* teilfinanziert werden. Wir danken dem BAFU und der MeteoSchweiz für Beiträge zur Entwicklung des Plattformprototyps *www.drought.ch.*

BIBLIOGRAPHIE

[1] *Seneviratne, S.I. et al. (2012): Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B. et al.] A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 109–230.*

[2] *CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, 88 pp.*

[3] *Organe Consultatif sur les Changements Climatiques (2005): Hitzesommer 2003 – Synthesebericht. ProClim, 28 pp., Bern*

[4] *Vogt, J. V.; Somma F. (Eds.) (2000): Drought and Drought Mitigation in Europe, Kluwer Academic Publishers. Dodrecht, The Netherlands*

[5] *Corti, T. et al. (2009): Simulating past droughts and associated building damages in France. Hydr. Earth Syst. Sci, 13, 1739–1747*

[6] *Seneviratne, S.I. et al. (2010): Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Science Reviews, 99, 3–4, 125–161, doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004*

[7] *Mueller, B.; Seneviratne, S.I. (2012): Hot days induced by precipitation deficits at the global scale. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109 (31), 12398–12403, doi: 10.1073/pnas.1204330109*

[8] *Organe Consultatif sur les Changements Climatiques (2000): Workshopbericht «Trockenheit in der Schweiz», Organe Consultatif sur les Changements Climatiques (OcCC) www.occc.ch/reports_e.html*

[9] *Bundesamt für Umwelt (2012): Umgang mit lokaler Wasserknappheit in der Schweiz. Bericht des Bundesrates zum Postulat «Wasser und Landwirtschaft. Zukünftige Herausforderungen». www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/28597.pdf*

[10] *Bundesamt für Bevölkerungsschutz (2012). Katastrophen und Notlagen, Risikobericht 2012. www.bevoelkerungsschutz.admin.ch/internet/bs/de/home/themen/gefaehrdungen-risiken/nat__gefaehrdungsanlayse.parsysrelated1.54713.downloadList.69292.DownloadFile.tmp/risikobericht2012.pdf*

[11] *Bundesamt für Umwelt (2012): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz - Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. Erster Teil der Strategie des Bundesrates. Bern. www.bafu.admin.ch/klima/00493/06573/index.html?lang=de&download=NHzLpZeg7t,Inp6I0NTU042I2Z6ln1acy*

4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCGfHx7fGym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A

[12] *Bundesamt für Landwirtschaft (2012): Klimastrategie Landwirtschaft. Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel für eine nachhaltige Schweizer Land- und Ernährungswirtschaft, Referenz/Aktenzeichen: 2011-05-26/138 /fed, 46 p.*

[13] *Seneviratne, S.I. et al. (2012): Swiss pre-alpine Rietholzbach research catchment and lysimeter: Analysis of 32-year hydroclimatological time series and 2003 drought. Water Resources Research, 48, W06526, doi:10.1029/2011WR011749*

[14] *Orth, R. et al. (2013). Inferring soil moisture from streamflow observations. Journal of Hydrometeorology, in press*

[15] *Bergström, S. (1992): The HBV Model: Its Structure and Applications, Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI), Hydrology, Norrköping, 35 pp.*

[16] *Seibert, J.; Vis, M. J. P. (2012): Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrol. Earth Syst. Sci., 16, 3315–3325, doi:10.5194/hess-16-3315-2012*

[17] *Zappa, M. (2012): Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum. Forum für Wissen 2012, pp. 19–27. ISSN 1021–2256*

[18] *Joerg-Hess, S. et al.: A statistical approach to refining snow water equivalent climatologies in Alpine terrain. Eingereicht für die Fachzeitschrift The Cryosphere*

[19] *Zappa, M. (2011): Aussergewöhnliche Trockenheit im 2011 – Neue Vorhersagesysteme für Wasserressourcen [published online December 2011]. www.slf.ch/dienstleistungen/newsletter/index_DE", 3/11: 5–6*

[20] *Viviroli, D. et al. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. Environmental Modelling & Software. 24(10): 1209–1222*

[21] *Fundel, F. et al. (2013): Monthly hydrometeorological ensemble prediction of streamflow droughts and corresponding drought indices. Hydrol. Earth Syst. Sci., 395–407, doi:10.5194/hess-17-395-2013*

[22] *Schmid, M. (2012): Verification of monthly probabilistic low-flow forecasts in the Swiss Rhine basin, Masterarbeit, ETH Zürich*

[23] *Kruse, S. et al. (2010): Informationsbedarf für die Früherkennung von Trockenheit in der Schweiz. Die Sicht potentiell betroffener Nutzergruppen. Wasser Energie Luft 102, 4: 301–04*

[24] *Kruse, S., Seidl, I. (2013): Social Capacities for Drought Risk Management in Switzerland. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions (1): 1355–81*

[25] *Stähli, M. et al. (2013): drought.ch – auf dem Weg zu einer Trockenheits-Informationsplattform für die Schweiz. Wasser, Energie, Luft, Heft 2/13: S. 117–121*

[26] *Mittelbach, H.; Seneviratne, S.I. (2012): A new perspective on the spatio-temporal variability of soil moisture: Temporal dynamics versus time invariant contributions. Hydr. Earth Syst. Sci, 16, 2169–2179, doi:10.5194/hess-16-2169-2012*

[27] *www.iac.ethz.ch/url/research/SwissSMEX*

[28] *www.swissfluxnet.ch*

> SUITE DU RÉSUMÉ

s'est déroulé dans le cadre du programme NFP-61 du Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS). Ce projet a entrepris pour la première fois une étude détaillée des caractéristiques des périodes de sécheresse en Suisse. Les connaissances ainsi acquises peuvent servir de base au développement de mesures permettant de parer aux répercussions des changements climatiques à venir. L'objectif était d'arriver à mieux saisir le processus inhérent aux périodes de sécheresse dans une perspective englobant aussi bien les sciences naturelles que sociales. En collaboration avec des segments d'utilisateurs intéressés, un prototype de plateforme d'information se rapportant à ces périodes a été créé sur Internet, s'inspirant du modèle américain, le North American Drought Monitor.