

# Online-Prognosen für Wasserknappheit

Jürg Fuhrer<sup>1</sup>, Murielle Thomet<sup>2</sup>, Pascalle Smith<sup>1</sup>, Frédéric Jordan<sup>2</sup> und Peter Thomet<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften, 8046 Zürich, Schweiz

<sup>2</sup>e-dric, 1052 Le Mont-sur-Lausanne, Schweiz

<sup>3</sup>Pro Agricultura Seeland, 3232 Ins, Schweiz

Auskünfte: Jürg Fuhrer, E-Mail: juerg.fuhrer@agroscope.admin.ch



Dank der Berechnung von Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot in der Drei-Seen-Region (Broye/Seeland) können Wasserknappheiten bis zehn Tage im Voraus erkannt werden. (Foto: Gabriela Brändle, Agroscope)

## Einleitung

Mit dem Klimawandel ändert sich die Verfügbarkeit von Wasser (Dargebot) für die Landwirtschaft, weil in Einzugsgebieten des Alpenvorlandes die Abflussmengen im Sommer zurückgehen (BAFU 2012a) und damit die Entnahme von Wasser aus natürlichen Gewässern für die Bewässerung eingeschränkt wird (Fuhrer *et al.* 2014). Bereits heute muss aus Rücksicht auf die Gewässerökologie in einzelnen Regionen die Wasserentnahme während Trockenperioden untersagt werden, so zuletzt im Jahr 2015. Häufig betroffen von behördlichen Entnahmebeschränkungen ist die landwirtschaftlich genutzte Region Broye/Seeland. Andererseits steigt aufgrund höherer Verdunstungsraten und

rückläufiger Niederschläge im Sommer der Bedarf an Bewässerungswasser (Fuhrer und Calanca 2014). Das bedeutet, dass zur Ertragssicherung die Nutzung der verfügbaren Wassermengen den veränderten Bedingungen angepasst werden muss. Dazu dienen (a) Informationen über den momentanen Zustand von Dargebot und Bedarf sowie kommende Engpässe in der Wasserverfügbarkeit im Sinne einer kurzfristigen Prognose und (b) eine räumliche Defizitanalyse für die längerfristige Planung der Wasserentnahmen. Um diesen beiden Bedürfnissen gerecht zu werden, wurde ein Online-System für die Region Broye/Seeland entwickelt, das Verwaltung und Praxis bei der Bewirtschaftung der öffentlichen Wasserressourcen unterstützen kann.

## Material und Methoden

### Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt zwischen Neuenburger-, Murten- und Bielersee. Für das Einzugsgebiet der Broye wurde nur die Talebene berücksichtigt, wo Bewässerung mit Wasser aus Seen und Flüssen (Broye, Petite Glâne, Lembe, Arbogne, Chandon sowie Bibera) verbreitet ist. Die Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets beträgt ca. 480 km<sup>2</sup> und umfasst 66 Gemeinden. Davon sind 309 km<sup>2</sup> Landwirtschaftsland ohne und 89 km<sup>2</sup> mit Bewässerung. In den Berechnungen wurden für Kartoffeln, Gemüse und Tabak maximal 100 % der Fläche als bewässerungswürdig betrachtet, für Zuckerrüben nur 10 %. Mais wird üblicherweise nicht bewässert und deshalb hier weggelassen. Die Flächenangaben für die Kulturen auf Gemeindeebene wurden der AGIS-Datenbank des Bundesamts für Landwirtschaft BLW für das Jahr 2013 entnommen.

### Konzept der Modellierung

Das Konzept der Modellierung beruht auf der Integration von je einem Modell für den Bewässerungsbedarf und für das Wasserdargebot in Flüssen und Seen. Mit dem kombinierten Modell wurde die zeitliche Entwicklung des Bewässerungsbedarfs und des Dargebots für eine definierte Bewässerungszone unter Berücksichtigung des Entwicklungszustands der angebauten Kulturen und der Bodeneigenschaften berechnet (Abb. 1). Die Bodeneigenschaften stammten aus der Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200 000 (BEK200). Beim Dargebot wurde die zur Bewässerung entnommene Menge und eine minimale, gesetzlich vorgeschriebene Abflussmenge (Q347) berücksichtigt.

Die Berechnungen mit dem kombinierten Modell erfolgten aufgrund von meteorologischen Inputdaten. Für die Vergangenheit wurden die Daten für Niederschlag, Strahlung und Temperatur von Stationen des automatischen Messnetzes von Meteoschweiz (Swiss-MetNet) genutzt. Für jede Höhenstufe im Dargebots-Modell, respektive jede Gemeinde im Bedarfs-Modell wurden die Messdaten mit der Methode der inversen Distanz interpoliert. Für die Prognosen für die nächsten zehn Tage wurde das europäische Wettervorhersagemodell des *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) genutzt, wobei die Daten der nächstgelegenen Gridpunkte mit der gleichen Methode interpoliert wurden.

### Internet Plattform

Auf einer neu geschaffenen Internet-Plattform (<http://isb.swissrivers.ch>) kann der Benutzer den Verlauf des

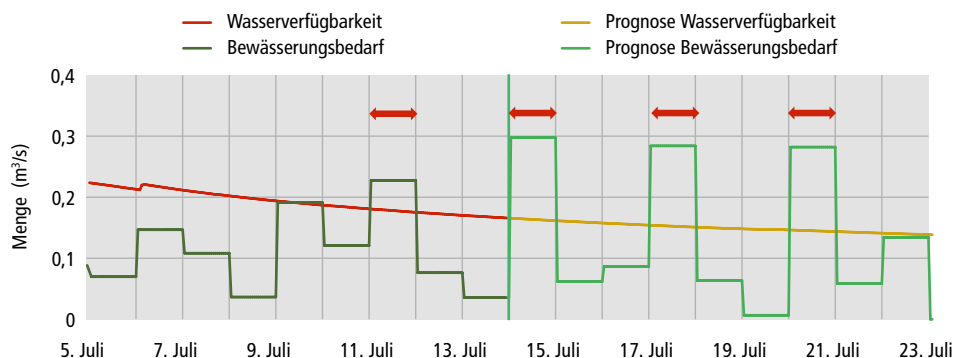
### Zusammenfassung

Mit dem Klimawandel steigt in Regionen mit intensiver Landwirtschaft das Risiko von Wasserknappheit. Als Hilfsmittel für die Prognose kritischer Situationen und für die längerfristige Planung der Wassernutzung zur Anpassung an den Klimawandel wurde ein Modell für die Drei-Seen-Region (Broye/Seeland) geschaffen. Es erlaubt, gleichzeitig das Wasserdargebot in natürlichen Gewässern wie auch den Wasserbedarf der angebauten Kulturen räumlich explizit und zeitlich hochaufgelöst zu berechnen und einander gegenüberzustellen. Das Modell berücksichtigt die Meteorologie, die Bodeneigenschaften und die Eigenschaften der bewässerten Kulturen. Auf einer Internet-Plattform werden die momentane Situation und die Entwicklung über die nächsten zehn Tage visualisiert sowie Daten vergangener Zeitperioden gespeichert. Auswertungen für die letzten 15 Jahre zeigen, dass der Bewässerungsbedarf das Wasserdargebot in Trockenjahren wie 2015 in einzelnen Gebieten der Untersuchungsregion an über 60 % der Tage übersteigt. Diese Online-Informationen sind als Grundlage für kurz- und langfristige Handlungsoptionen nutzbar.

Bedarfs für jede Kombination von Kultur und Bodentyp sowie das Dargebot und den Nutzungsindex für jede Bewässerungszone während der letzten Tage wie auch die Prognose für die nächsten zehn Tage abrufen. Diese Angaben können für die kurzfristige Regulierung von Wasserentnahmen verwendet werden. Ebenso sind die Daten vergangener Zeitperioden verfügbar und können statistisch ausgewertet werden. Damit sind für die einzelnen Bewässerungszonen und die ganze Untersuchungsregion Defizitanalysen möglich.

### Berechnung des Dargebots

Das Modell für die hydrologische und hydraulische Simulation basierte auf dem Routing System (RS), das ursprünglich an der ETH Lausanne entwickelt und anschliessend von e-dric.ch weiterentwickelt worden ist. Einzelheiten zur Parametrisierung sind im Handbuch zu RS 3.0 dokumentiert (e-dric.ch 2010). RS berücksichtigt alle wichtigen hydrologischen Prozesse in alpinen und voralpinen Einzugsgebieten und ermöglicht die Berechnung der wichtigsten Wasserzuflüsse und -abflüsse der



**Abb. 1 |** Illustration des Modellprinzips auf Tagesbasis für die Zeitperiode vom 5. bis 23. Juli 2015. Tage mit Wasserknappheit (d. h. Bedarf > Verfügbarkeit) sind mit horizontalen Pfeilen markiert. Am 13. Juli erliess der Kanton Freiburg einen Entnahmestopp für Wasser aus Oberflächengewässern.

Teileinzugsgebiete, die Wasserführung einzelner Flussabschnitte innerhalb der Teileinzugsgebiete sowie das Niveau der Seen.

Das modellierte Gebiet wurde unter Berücksichtigung der wichtigsten Geländeeigenschaften wie Seen, Flussläufe, Geomorphologie, Orographie und Einrichtungen zur Wassernutzung topographisch in 14 Bewässerungszonen von 1–10 km<sup>2</sup> Grösse eingeteilt (Abb. 2). Jede dieser Zonen ist durch einen Zu- und einen Abfluss sowie den Wasserbedarf für die Bewässerung charakterisiert.

Jede Zone wurde in Höhenstufen von 300 m unterteilt, um die Höhenabhängigkeit der Temperatur zu berücksichtigen (Jordan *et al.* 2008). In jedem Höhenabschnitt wurden die hydrologischen Prozesse aufgrund

des Konzeptes GSM-SOCONT (Schäfli *et al.* 2005; Jordan 2007) berechnet. Schliesslich wurden die Einzugsgebiete über die Wasserflüsse miteinander verbunden.

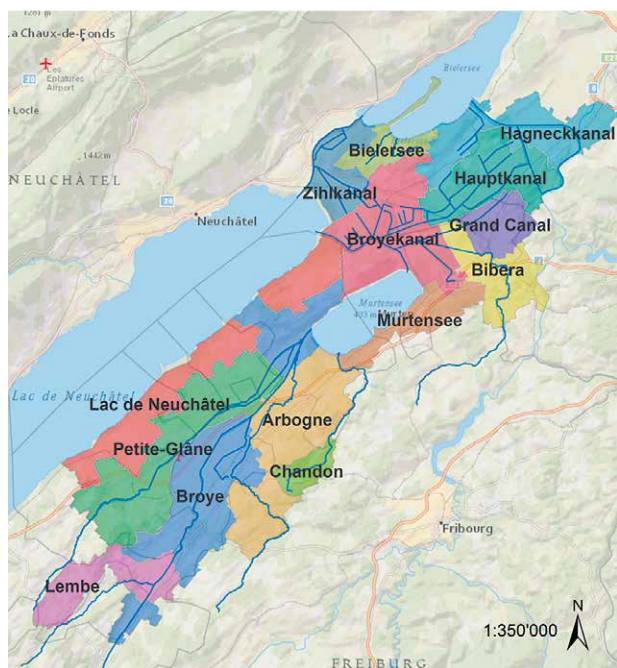
Für die Berechnung des Wasserdargebots wurde berücksichtigt, dass das Untersuchungsgebiet hydrologisch in ein weit grösseres Gebiet eingebettet ist. Deshalb wurde mit RS die Hydrologie des gesamten Einzugsgebiets der Drei-Seen-Region simuliert und dabei alle Zuflüsse von Aare, Broye, Orbe und Suze einbezogen.

**Berechnung des Bewässerungsbedarfs**

Die Berechnung der täglichen, zur vollständigen Deckung des Bedarfs benötigten Bewässerungsmenge beruht auf den Arbeiten von Smith *et al.* (2012, 2014). Sie orientiert sich an der Methode der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen FAO (Allen *et al.* 1998) und basiert auf der Referenz-Evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) und der vertikalen Wasserbilanz (Bucket-Ansatz) in einer homogenen Bodenschicht. Die aktuelle Evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) wurde ausgehend von ET<sub>o</sub> (nach Turc) berechnet, indem die spezifischen Bedürfnisse der Kultur über den Kulturkoeffizienten (K<sub>c</sub>) und die variable Wasserverfügbarkeit im Boden über den Trockenstresskoeffizienten (K<sub>s</sub>) berücksichtigt wurden.

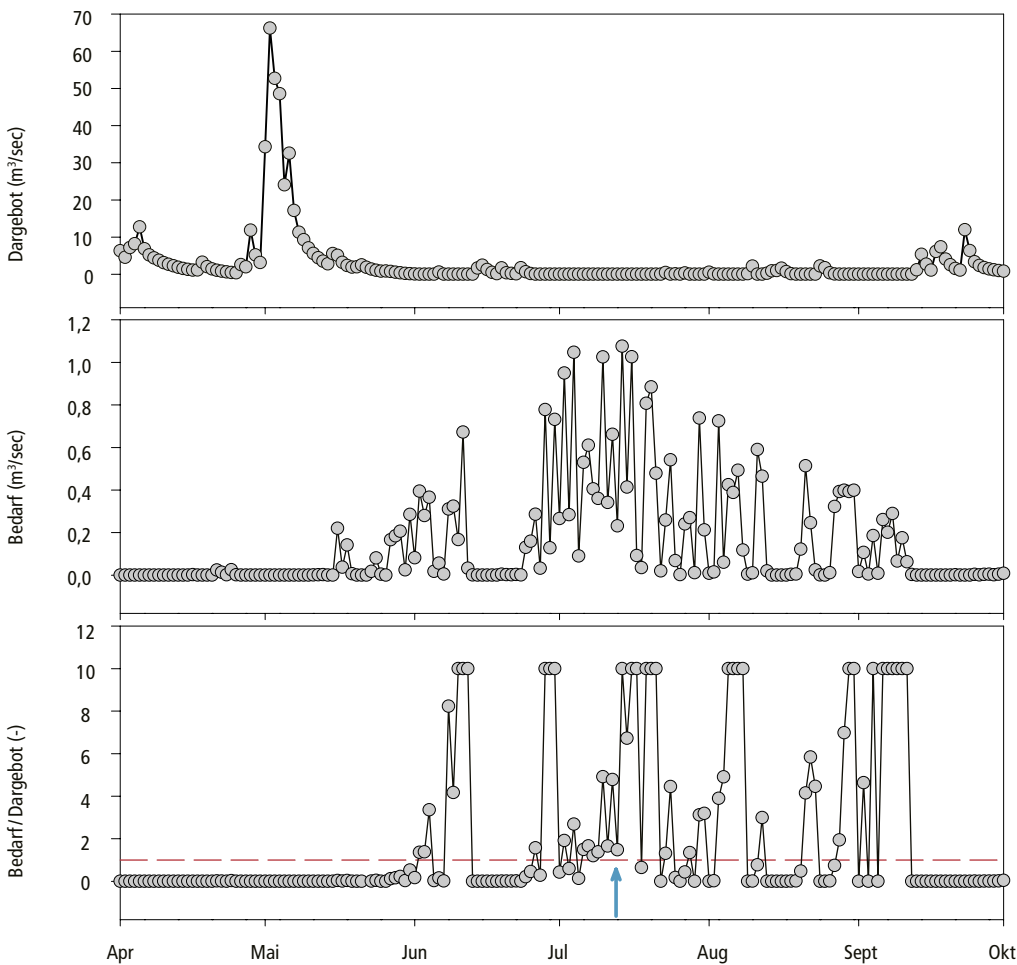
$$ET_a = K_s \times K_c \times ET_o$$

Mit K<sub>c</sub> wurde der spezifische Entwicklungszustand einer Kultur berücksichtigt. Dabei flossen Dauer und Amplitude einzelner Phasen der Pflanzenentwicklung ein, das heisst die Daten von Aussaat und Ernte (oder dem Bewässerungsende) sowie die phasenspezifische Wachstumsabweichung im Vergleich zu einer sogenannten Referenzkultur. K<sub>c</sub> nimmt Werte zwischen 0 und >1 an, z.B. 1,2 für Zuckerrüben während der Phase mit der grössten Bestandesentwicklung.



**Abb. 2 |** Lage der Bewässerungszonen im Untersuchungsgebiet Broye-Seeland.





**Abb. 3** | Verlauf der simulierten Tages-Mittelwerte für das verfügbare Wasserdargebot und den Bewässerungsbedarf, zusammen mit dem Verhältnis von Bedarf/Dargebot (Werte beschränkt auf den Wert 10 bei einem Dargebot von 0 m³/sec) während der Periode April bis Oktober 2015 in der Bewässerungszone Broye. Kritische Werte liegen über der gestrichelten Linie. Der Pfeil markiert den Zeitpunkt des Entnahmestopps durch den Kanton Freiburg.

Für jede Kultur wurden typische Saat- und Erntezeitpunkte festgelegt und die wichtigen Kenngrößen wie Durchwurzelungstiefe und Toleranz gegenüber Bodenwasserdefizit aus Literaturquellen verwendet. Das Wasserdefizit hängt von der nutzbaren Feldkapazität eines Bodens und der täglichen Bodenwasserbilanz ab. Fällt  $ET_a$  unter 80% ihres potenziellen Niveaus ( $ET_p$ ), d.h.  $K_s = 0,8$ , so wird die minimale Menge Wasser berechnet, die zusätzlich zu den Niederschlägen gebraucht wird, um das potenzielle Niveau wieder herzustellen.

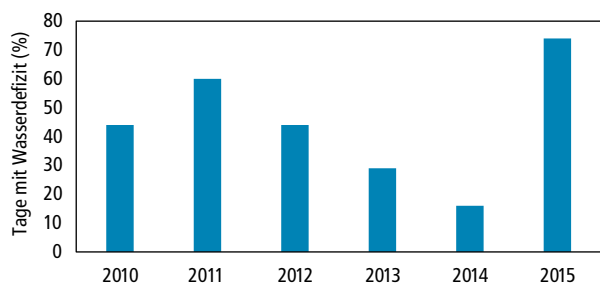
$$ET_a = K_s \times ET_p K_s$$

widerspiegelt die Wirkung der Entwicklung des Bodenwasserdefizits in der Wurzelregion in Abhängigkeit von Niederschlagsmenge, Bilanz der anderen Wasserflüsse sowie der Trockenheitstoleranz der Kultur.  $K_s$  liegt zwischen 0 (vollständige Hemmung der ET) und 1 (keine Begrenzung der ET). Für die Berechnung von  $K_s$  ist das für einen Boden charakteristische Wasserrückhaltevermögen

und die spezifische Durchwurzelungstiefe zu berücksichtigen. Für jede Kombination aus Kultur und Bodentyp wurde von den beiden Größen Durchwurzelungstiefe ( $Z$ ) und Bodentiefe ( $Z_{max}$ ) die limitierende Grösse ( $Z = \min [Z_r, Z_{max}]$ ) für die Berechnung des relevanten Bodenvolumens herangezogen, aus dem die Kultur das erforderliche Wasser beziehen kann. Das Wasserrückhaltevermögen pro Bodenvolumen hängt von der Textur des Bodens ab und entspricht der Differenz zwischen dem Wassergehalt des Bodens bei Feldkapazität (FK) und dem permanenten Welkepunkt (PWP). Typische Werte für die einzelnen Bodentypen wurden der Literatur entnommen. Die nutzbare Feldkapazität (nFK) wurde schliesslich an die effektive Durchwurzelungstiefe  $Z$  angepasst.

$$nFK = Z \times (FK - PWP) [mm]$$

Für die Berechnung der potenziellen Bewässerungsmenge wurde eine Bewässerungseffizienz von 70% angenommen.



**Abb. 4 |** Anteil der Tage mit einem Bewässerungsdefizit im Gebiet der Broye. Die Daten stellen den flächengewichteten Mittelwert der Zonen Arboigne, Chandon, Petite Glâne, Broye und Lembe dar.

## Resultate

### Defizitanalyse

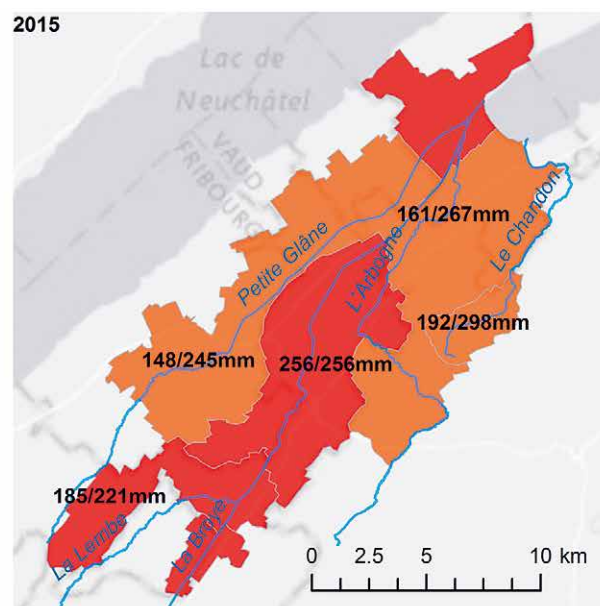
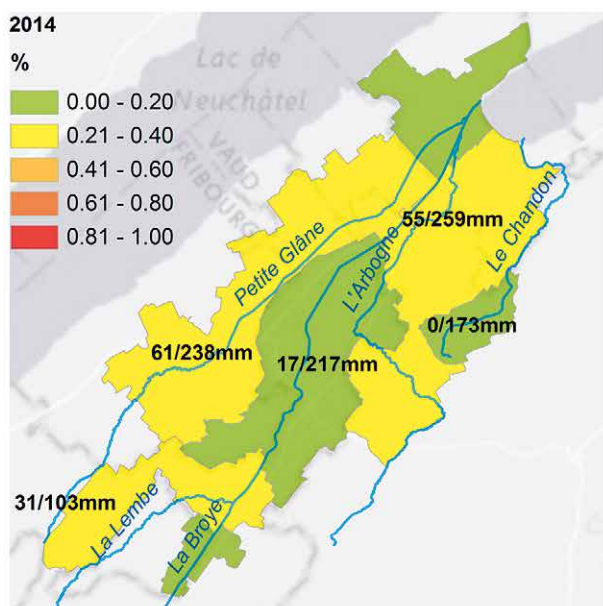
Wird der momentane Wasserbedarf in einzelnen Bewässerungszonen mit dem gleichzeitig verfügbaren Dargebot in Beziehung gesetzt, so kann das Risiko von Wasserknappheit im Sinne einer Defizitanalyse bestimmt werden. Aus dem zeitlichen Verlauf der täglich gemittelten Werte für Bedarf und Dargebot in der Zone Broye (Abb. 2) ergab sich für 2015, dass das Verhältnis von Bedarf zu Dargebot unter Einhaltung der Restwassermenge den kritischen Wert von 1,0 an 110 Tagen überstieg (Abb. 3).

In der ganzen Region der Broye trat diese Situation sogar an 70 % aller Tage mit Bewässerungsbedarf auf und im Jahr 2011 mit einer ausgeprägten Frühjahrs-trockenheit an 60 % der Tage. Im Gegensatz dazu ist der Anteil kritischer Tage in eher feuchten Jahren wie 2014 erwartungsgemäss deutlich tiefer (Abb. 4).

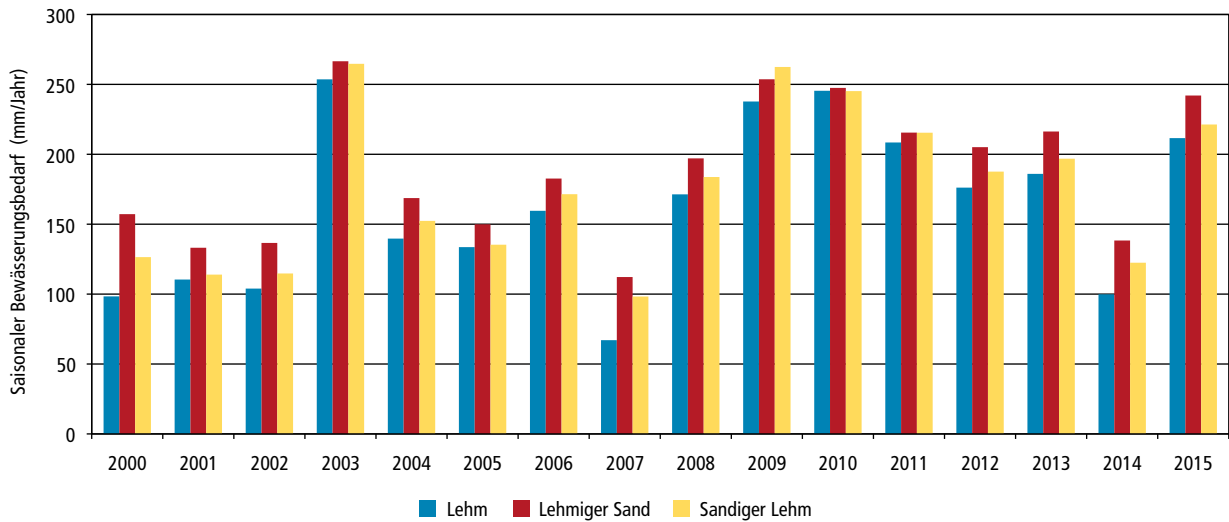
Das Risiko von Wasserknappheit verteilte sich innerhalb der betrachteten Region ungleich auf die verschiedenen Bewässerungszonen, wie dies in Abbildung 5 vergleichsweise für die Jahre 2014 (feucht) und 2015 (trocken) für die ganze Region der Broye exemplarisch anhand des saisonalen Bewässerungsdefizits dargestellt ist. Im trockenen 2015 war besonders die Ebene im Broye-Tal betroffen (Zonen Lembe und Broye), wo die Wasserführung der Flüsse den Bedarf der Landwirtschaft nicht zu decken vermochte. 2014 lagen die saisonalen Defizitwerte in allen Bewässerungszonen der Region deutlich tiefer, da die Flüsse in diesem feuchten Sommer mehr Wasser führten.

### Bewässerungsbedarf

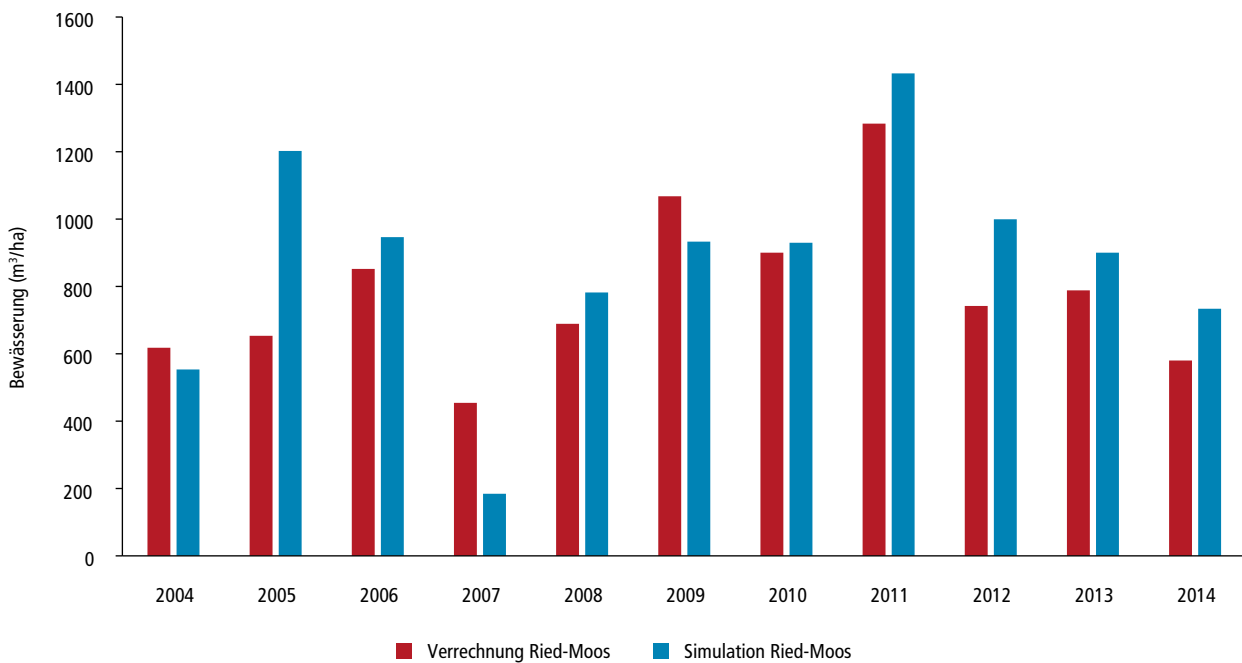
Der berechnete, saisonale Bewässerungsbedarf unterscheidet sich zwischen verschiedenen Bodenarten und schwankt in Abhängigkeit der Witterung von Jahr zu Jahr. Abbildung 6 illustriert dies für die letzten 16 Jahre anhand der über alle Kulturen gemittelten Daten für den Bewässerungsbedarf in mm (= l/m<sup>2</sup>), aufgeteilt nach den drei häufigsten Bodenarten. Die Jahressummen schwankten zwischen ca. 100 mm (2007) und >300 mm (2003) bei 70 % Bewässerungseffizienz. Die höchsten Werte wurden für die Jahre 2003, 2009 und 2015 berechnet. Unterschiede zwischen den Bodenarten ergeben sich aus den bodenphysikalischen Eigenschaften sowie dadurch, dass die Trockenphasen zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftraten und die betroffenen Kulturen bei der Mittelung unterschiedlich ins Gewicht fielen.



**Abb. 5 |** Saisonales Bewässerungsdefizit in Prozent (100 % = 1) des Bewässerungsbedarfs in fünf Bewässerungszonen der Broye-Region für die Jahre 2014 (feucht) und 2015 (trocken).



**Abb. 6 |** Durchschnittlicher, saisonaler Bewässerungsbedarf (mm) für alle Kulturen (39 % Kartoffeln, 46 % Gemüse, 8 % Tabak, 7 % Zuckerrüben) aufgeteilt nach drei häufigen Bodenarten im Untersuchungsgebiet.



**Abb. 7 |** Vergleich von simuliertem Bewässerungsbedarf mit den verrechneten Bewässerungsmengen der Bewässerungsgemeinschaft Ried-Moos mit einer bewässerten Fläche von 320 ha (vor 2010: 280 ha). Davon sind 80 % Gemüse und 20 % Kartoffeln.

Eine Verifikation der Daten für den Bewässerungsbedarf war nur beschränkt möglich, da wenige Aufzeichnungen des effektiven Wasserverbrauchs verfügbar waren. Eine Ausnahme bildet die Bewässerungsgemeinschaft Ried-Moos. Hier konnten die simulierten Werte des Bewässerungsbedarfs mit den verrechneten Mengen verglichen werden. Der Vergleich in Abbildung 7 zeigt eine gute Übereinstimmung, mit Ausnahme der Jahre 2005 und 2007, aber eine Tendenz zur Überschätzung

durch die Simulation, was durch die Annahme einer höheren Bewässerungseffizienz reduziert würde.

## Diskussion

Mit dem Klimawandel ändert sich das Verhältnis von Wasserdargebot und -bedarf für die Bewässerung in wichtigen Produktionsgebieten. Aufgrund rückläufiger Niederschläge wird im Verlauf der nächsten Jahrzehnte

in den meisten Gebieten des Mittellandes eine deutliche Abnahme der mittleren Abflüsse sowie eine zeitliche Verlängerung der Niedrigwasserabflüsse erwartet (BAFU 2012a), was zunehmend zu Engpässen in der regionalen Wassernutzung führen kann (Fuhrer und Calanca 2012). Daraus entsteht ein Konfliktpotenzial unter verschiedenen Wassernutzern (Lanz *et al.* 2014). Um dies zu verhindern, sind Anpassungen bei der künftigen Wassernutzung durch die Landwirtschaft nötig, die einerseits die Ertragsicherheit erhöhen und andererseits die vorhandenen, natürlichen Wasserressourcen vor übermässiger Nutzung schützen.

Eine wichtige Grundlage für die längerfristige Planung der Bewässerung ist die Kenntnis über die Schwankungsbreite des Wasserbedarfs sowohl in zeitlicher wie auch in räumlicher Hinsicht. Dieses Wissen erlaubt es, Gebiete mit einem hohen Risiko für Wasserknappheit auszuscheiden. In diesen Risikogebieten ist entweder ein Ausbau der Wasserversorgung oder die Reduktion des Bedarfs angezeigt. Letzteres kann theoretisch durch Umstellungen auf Betriebsebene oder Änderungen in der Bewirtschaftung erreicht werden (Fuhrer *et al.* 2013). Das hier entwickelte Modellsystem liefert dazu einen Beitrag, denn es ermöglicht, gleichzeitig das Dargebot wie auch den Bedarf räumlich explizit und mit hoher zeitlicher Auflösung aufgrund der klimatischen Bedingungen über mehrere Jahre zu berechnen.

Die Anwendung des Modells in Kombination mit gemessenen Klimadaten ermöglicht die statistische Auswertung der Wasserknappheit unter heutigen Bedingungen. Die hier dargestellten Ergebnisse belegen diese Möglichkeit anhand ausgewählter Berechnungsbeispiele. Eine weitere Anwendung wäre die Kombination des Modells mit Klimaprojektionen, um abzuschätzen, wie sich das Verhältnis von Bedarf und Dargebot durch Veränderungen in Temperatur und Niederschlag verändert, so wie dies für einzelne Einzugsgebiete im Mittelland aufgrund vereinfachter Annahmen bezüglich der Kulturen durchgeführt wurde (Fuhrer und Calanca 2014). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Berechnungen mit Unsicherheiten behaftet sind. In Bezug auf den Wasserbedarf beruhen diese u.a. auf ungenauen Angaben über die Bodeneigenschaften und die angebauten Kulturen, die Wurzeltiefe, den Saattermin oder den Entwicklungsverlauf der Kulturen. Dementsprechend ist die Überprüfung der Plausibilität der Simulationsergebnisse wichtig. Die Simulationen des Dargebots kann aufgrund von Pegelmessungen überprüft werden (Daten hier nicht gezeigt), während jene des Bedarfs mangels Messungen ungleich schwieriger ist. Die wenigen, bisher verfügbaren Daten liefern ein positives Bild indem die berechneten Wassermengen mit punktuell

dokumentierten Wasserentnahmen im Einklang sind. Die Berechnungen gehen allerdings davon aus, dass alle Flächen mit Kartoffeln, Gemüse und Tabak bei Bedarf bewässert werden, was in Wirklichkeit kaum der Fall ist. Die berechneten Werte stellen somit für eine Region einen maximalen Bedarfswert dar, an welchem sich die Planung orientieren kann.

## Schlussfolgerungen

Das entwickelte Modellsystem leistet einen Beitrag an die vorsorgliche Anpassung der regionalen Landwirtschaft an den Klimawandel. Dies entspricht einem Ziel der Nationalen Anpassungsstrategie an den Klimawandel für den Sektor Landwirtschaft: «Die Bewässerung orientiert sich am Wasserangebot und erfolgt sparsam und effizient» (BAFU 2012b). Zusätzlich zur Unterstützung der längerfristigen Planung dient das Modell via die Internet-Plattform als Instrument für die kurzzeitige Anpassung der Wassernutzung. Mit einer Vorlaufzeit von zehn Tagen können Wasserknappheiten in den einzelnen Zonen rechtzeitig erkannt werden, was Optionen zum vorsorglichen Handeln eröffnet. Die noch vorhandenen Wasserreserven können durch Senkung der Bewässerungsintensität oder die Konzentration der Bewässerung auf weniger, aber besonders wichtige Flächen, gezielter und effizienter eingesetzt werden. Das Modell kann aber nicht direkt zur Steuerung der Bewässerung auf einer bestimmten Parzelle eingesetzt werden. ■

### Dank

Das Projekt wurde im Rahmen des Pilotprogramms «Anpassung an den Klimawandel» durchgeführt und vom Bundesamt für Landwirtschaft BLW und den Kantonen Bern, Freiburg und Waadt finanziert.

**Riassunto****Previsioni online sulla carenza idrica**

Con il cambiamento climatico, nelle regioni in cui si pratica un'agricoltura intensiva cresce il rischio di carenza idrica. Per la Regione dei Tre Laghi (Broye/Seeland) è stato creato un modello, che funge da strumento utile a prevedere situazioni critiche e a pianificare a lungo termine l'utilizzo dell'acqua adeguandosi ai cambiamenti climatici. Il modello consente di stimare, e al contempo di confrontare, le risorse idriche nei corsi d'acqua naturali così come il fabbisogno d'acqua delle colture coltivate con esplicito riferimento spaziale e ad alta risoluzione temporale. Il modello contempla la meteorologia, le caratteristiche del terreno e le caratteristiche delle colture irrigate. Su una piattaforma internet vengono visualizzati la situazione attuale e lo sviluppo dei prossimi dieci giorni nonché memorizzati i dati dei periodi passati. Le valutazioni relative all'ultimo quindicennio mostrano che negli anni di siccità, come il 2015, il fabbisogno irriguo in singole aree della regione esaminata supera le risorse idriche per oltre il 60 per cento dei giorni. Tali informazioni online sono utilizzabili come base per opzioni di intervento a breve e a lungo termine.

**Summary****Online water-shortage forecasts**

Climate change causes the risk of water shortage to increase in regions where intensive agriculture is practised. A model for the Three-Lakes Region (Broye/Seeland) was created as a tool for forecasting critical situations and for the longer-term planning of water use with a view to adapting to climate change. The model allows the resources in natural bodies of water as well as the water requirement of the crops cultivated to be simultaneously calculated and compared at a high temporal resolution and in a spatially explicit manner. The model takes account of the weather, soil properties, and characteristics of the irrigated crops. The current situation and the trend over the following ten days are visualised, and data from past time periods are logged on an Internet platform. Analysis for the past 15 years shows that in dry years like 2015, the irrigation requirement in individual areas of the region of the study exceeds water resources on over 60 % of the days. This online information can be used as the basis for short- and long-term courses of action.

**Key words:** agriculture, climate change, hydrological model, water use.

**Literatur**

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. & Smith M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- BAFU 2012a. Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Umwelt-Wissen Nr. 1217, 76 S. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- BAFU 2012b. Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Umwelt-Diverses Nr. UD-1055-D, 65 S. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- e-dric.ch, 2010. Système RS 3.0 – User Guide. Lausanne. Zugang: [http://www.e-dric.ch/images/techpdf/RS\\_USERS\\_GUIDE.pdf](http://www.e-dric.ch/images/techpdf/RS_USERS_GUIDE.pdf) [3.3.2016].
- Fuhrer J. & Calanca P., 2014. Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: eine regionale Defizitanalyse. *Agrarforschung Schweiz* 5 (6), 256–263.
- Fuhrer J., Tendall D., Klein T., Lehmann N. & Holzkaemper A., 2013. Water demand in Swiss agriculture – Sustainable adaptive options for land and water management to mitigate impacts of climate change. *ART-Schriftenreihe* 19, 61S. Agroscope, Zürich.
- Jordan F., 2007. Modèle de prévision et de gestion des crues – Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue. Thèse de doctorat n° 3711. ETH Lausanne. 261 S.
- Jordan F., García Hernández J., Dubois J. & Boillat J.-L., 2008. MINERVE: Modélisation des intempéries de nature extrême du Rhône valaisan et de leurs effets. Communication 38 (Ed. A. Schleiss), Laboratoire de Constructions Hydrauliques, ETH Lausanne. 111 S.
- Lanz K., Fuhrer J., Häberli W., Stamm C., 2014. Steigender Nutzungsdruck im Wasserschloss. *Aqua & Gas* 11, 24–29.
- Schäfli B., Hingray B., Niggly M., Musy A., 2005. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth Systems Science* 9, 95–109.
- Smith P., Calanca P. & Fuhrer J., 2012. A simple scheme for modelling irrigation water requirements at the regional scale applied to an alpine river catchment. *Water* 4, 869–886.
- Smith P.C., Heinrich G., Suklitsch M., Gobiet A., Stoffel M. & Fuhrer J., 2014. Irrigation water requirements in the Swiss Rhone catchment under climate change – Station-scale bias correction and uncertainty analysis. *Climatic Change* 127, 521–534.