

Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter Klimawandel: eine regionale Defizitanalyse

Jürg Fuhrer und Pierluigi Calanca

Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH, 8046 Zürich, Schweiz

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



Mobile Wasserentnahme zur Bewässerung aus einem Kanal im Broyetal (Foto: Jürg Fuhrer, Agroscope)

Einleitung

Die Betriebszählung des Bundesamts für Statistik ergab, dass 2010 rund 36 000 ha der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) bewässert wurden (BFS 2012). Dies entspricht 3,4 % der gesamten LN. Die meisten Betriebe verwendeten Wasser aus Bächen, Flüssen und Seen (46 %) oder Grundwasser (37 %). Die «bewässerungsbedürftige» Fläche ist aber wesentlich grösser. Modellrechnungen für die ganze Schweiz ergaben für 26 % der gesamten LN eine «potenzielle» Bewässerungsbedürftigkeit, was bedeutet, dass auf dieser Fläche eine Bewässerung durchschnittlich mindestens in jedem dritten Jahr eine positive Wirkung auf den Ertrag hat (Fuhrer und Jasper

2009). Effektiv bewässert werden aber nur Kulturen, bei denen sich der Aufwand wirtschaftlich lohnt, z.B. bei Kartoffeln, Zuckerrüben, Mais oder Spezialkulturen.

In den nächsten Jahrzehnten könnten viele Landwirte zur Sicherung von Ernteertrag und -qualität mit einem steigenden Bewässerungsbedarf konfrontiert sein. Klimaprojektionen für die Zeit um 2050 gehen bei einer Zunahme des atmosphärischen CO₂ auf 530 ppm (A1B Emissionsszenario) von einer Temperaturerhöhung im Mittel um 3–4 °C und einer Niederschlagsabnahme im Sommer von 5–20 % aus (CH2011 2011). Gleichzeitig nehmen in vielen Gewässern die Abflüsse im Sommer deutlich ab (BAFU 2012). Zur Vermeidung von Konflikten bei Wasserknappheit bedarf es deshalb neuer

Lösungsansätze und Strategien der Wassernutzung, besonders in Regionen, in welchen sich das Verhältnis von Bedarf und Dargebot durch den Klimawandel in einen kritischen Bereich verschiebt. Die vorliegende Studie hatte zum Ziel, dieses Verhältnis für mittelgrosse Einzugsgebiete der Schweiz unter heutigen Klimabedingungen zu modellieren, um im Sinne einer Defizitanalyse besonders betroffene Regionen auszuscheiden. Für diese Gebiete wurde die Veränderung unter zwei Klimaszenarien für den Zeithorizont um 2050 berechnet.

Methoden

Simulationen mit dem hydrologischen Modell WaSim-ETH

Die Berechnungen für den Bewässerungsbedarf wurden mit Hilfe des hydrologischen Abfluss- und Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH (www.wasim.ch) durchgeführt. Das Modell erlaubt eine zeit- und flächendetaillierte Simulation aller hydrologisch relevanten Wasserflüsse. Die Berechnung des Bewässerungsbedarfs entspricht einer bedarfsgesteuerten Simulation, bei welcher der Bedarf anhand der Reduktion der aktuellen Evapotranspiration (ET) gegenüber der potenziellen Evapotranspiration (ETP) bestimmt wird. Dazu wird über die mittlere Bodenfeuchte im durchwurzelten Bodenprofil das Verhältnis ET/ETP berechnet. Wie bereits in früheren Studien (Fuhrer und Jasper 2009; Fuhrer 2010) wurde eine bodenfeuchteabhängige Reduktion der aktuellen ET um 20 % als Auslöser für die Bewässerung festgelegt ($ET/ETP = 0,80$). Der Beginn von Trockenstress wird über einen vegetationspezifischen Grenzwert der Bodenwasserspannung bestimmt. Dieser Grenzwert wurde für alle betrachteten Landnutzungsarten einheitlich auf 350 hPa festgelegt (pF-Wert: 2,54) (Fuhrer und Jasper 2009). Die Bewässerungsmenge ermittelt sich aus der Differenz zwischen der über die Wurzeltiefe gemittelten Bodenfeuchte beim Zielwert ($ET/ETP = 1$) und dem aktuellen Wert. Bewässerungsverluste wurden im Gegensatz zu Fuhrer (2012) berücksichtigt, indem die berechneten Mengen mit einer Bewässerungseffizienz von 70 % korrigiert wurden.

Modell-Setup

Analog zu Fuhrer und Jasper (2009) sowie Fuhrer (2010) wurden in einem ersten Schritt Modellrechnungen für die Einzugsgebiete von Thur, Emme, Broye, Rhone, Ticino und des Dischmabachs durchgeführt. Zur Identifizierung der Flächen (Acker, Grasland und Obstanbau) wurden die Daten der Arealstatistik 2004/09 (Stand: August 2011) und für noch nicht erfasste Gebietsanteile der Datensatz der Arealstatistik 1992/97 (BFS 2001) genutzt. In letzterem müssen Ackerflächen mittels Ablei-

Zusammenfassung

Mit dem Klimawandel nimmt der Wasserbedarf landwirtschaftlicher Kulturen tendenziell zu. Dies führt zu einem höheren Bewässerungsbedarf. Gleichzeitig sinkt die Wasserverfügbarkeit, da im Sommer die Wasserstände in vielen Einzugsgebieten des Mittellandes zurückgehen. Um Gebiete mit einem erhöhten Risiko für Wasserknappheit zu identifizieren, wurde mit Hilfe eines hydrologischen Modells das Verhältnis des potenziellen Bewässerungsbedarfs zum Dargebot (verfügbares Wasser, Gebietsabfluss) für 39 Einzugsgebiete während 1981–2010 berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass in Extremjahren wie 2003 in einzelnen Regionen das Dargebot schon heute ungenügend ist. Mit dem Klimawandel spitzt sich diese Situation zu und führt vermehrt zu Wasserknappheit, wie Modellierungen für ausgewählte Gebiete anhand von zwei Klimaszenarien für die Periode 2036–2065 zeigen. In den Einzugsgebieten von Glatt-Töss, Birs, oder Broye-Mentue steigt die Häufigkeit der Jahre mit Wasserknappheit im Falle eines starken Klimawandels um ein Vielfaches an. In diesen Gebieten sind Massnahmen für eine angepasste Wasserbewirtschaftung angesagt, die sowohl den Schutz der Gewässer als auch die Ansprüche der Landwirtschaft berücksichtigen.

tungsverfahren bestimmt werden (Fuhrer und Jasper 2009). Man spricht daher auch von «potenziell nutzbarem Ackerland», das in seiner Lage und Ausdehnung von den tatsächlich ackerbaulich genutzten Flächen abweichen kann. Die Modellrechnungen erfolgten als kontinuierliche Tageswertsimulationen in einer Auflösung von 500 m × 500 m, ohne spezifische Parameterwerte für einzelne Kulturarten, d.h. mit mittleren Parameterwerten zur phänologischen Beschreibung des Bewuchses von Ackerkulturen und Grasland sowie von Obstanbauflächen. Für Grasland wurden jeweils drei Grasschnitte pro Vegetationsperiode vordefiniert, wobei diese Termine je nach Höhenlage variierten.

Kalibrierung und Verifikation des Modells erfolgten aufgrund gemessener Abflussdaten (Fuhrer und Jasper 2009). Für die Aufskalierung der gebietspezifischen Bewässerungsmengen auf die gesamte LN wurde im zweiten Schritt die in Fuhrer (2010) beschriebene

Tab. 1 | Landwirtschaftlich genutzte Flächenanteile (LN) in den ausgewählten Hotspot-Gebieten

| Gebiet | | Thur | Emme | Glatt-Töss | Birs | Broye-Mentue |
|--------------|--------------------|--------|--------|------------|--------|--------------|
| Gesamtfläche | (km ²) | 1758 | 939 | 862 | 911 | 755 |
| Anteil LN | (%) | 57 | 52 | 42 | 42 | 67 |
| Ackerland | (ha) | 36 100 | 17 800 | 18 400 | 10 500 | 35 000 |
| Grasland | (ha) | 60 300 | 30 500 | 16 200 | 27 000 | 14 900 |
| Obstanbau | (ha) | 4 200 | 800 | 1 200 | 700 | 700 |

Methode der Mehrfachregression verwendet. Diese berücksichtigt die Abhängigkeit des Wasserbedarfs von Klima, Topographie und Bodeneigenschaften.

Einzugsgebiete

Die Ausgrenzung individueller Einzugsgebiete wurde auf Basis von zwei Flächendatensätzen durchgeführt: Mit Hilfe des RIMINI-Höhenmodells (swisstopo 2004) wurden für ausgewählte Abflusstationen die zugehörigen Entwässerungsgebiete bestimmt und mit Daten aus der «Einzugsgebietsgliederung Schweiz» (BAFU 2011) ergänzt. Hierzu wurden Datensätze aus der Aggregationsebene 1000 km² berücksichtigt. Insgesamt wurden 39 Regionen ausgegrenzt mit Flächen zwischen 526 und 1722 km² und einem Anteil der LN zwischen 6 % und 66 %.

Gebiete mit einem erhöhten Bedarf relativ zum Dargebot unter heutigen Klimabedingungen, einem bedeutenden Anteil LN (42–67 %) und mit allen drei Nutzungskategorieen (Ackerland, Grünland und Obstanbau), wurden erweiterten Modellrechnungen und Analysen unterzogen («Hotspot»-Gebiete; Tab. 1).

Zwei dieser Gebiete (Emme und Birs) wurden unverändert aus der ursprünglichen Einteilung übernommen. Die restlichen drei Gebiete (Thur, Glatttal-Töss und Broye-Mentue) erfuhren hingegen eine Gebietsausdehnung. Für Thur und Töss wurden auch ihre jeweiligen Mündungsareale, bei Broye-Mentue zusätzlich auch die Zuflussbereiche zum Murten- und Neuenburgersee, auf-

genommen. Für diese Gebiete wurde eine eigene Modellkalibration und -verifikation durchgeführt und anschliessend Bedarf und Dargebot für zukünftige Klimabedingungen (2036–2065) berechnet.

Abschätzung des Dargebots

Das Dargebot an Bewässerungswasser in öffentlichen Fließgewässern wurde anhand von beobachteten Abflussvolumina abgeschätzt (Daten: <http://www.bafu.admin.ch>). Dazu wurden von den Abflusstationen für jede Region die monatlichen Abflusssummen bestimmt. Neu wurde eine gesetzlich vorgeschriebene Restwassermenge verwendet, welche die Abflussmenge definiert, die in 95 % aller Fälle erreicht oder überschritten wird (Q347; BUWAL 2000). Die Berechnung des Q347 erfolgte auf Basis einer 30-jährigen Reihe mit Tageswerten. Für den Projektionszeitraum 2036–2065 wurden die Q347-Werte für die Hotspot-Gebiete anhand der simulierten Abflussreihen bestimmt.

Klimadaten und -szenarien

Für das Referenzklima wurde das Zeitfenster 1981–2010 gewählt, das die aktuelle Referenzperiode in der Klimamodellierung darstellt (CH2011 2011). Die Projektionen für die Zeitspanne 2036–2065 basierten auf dem Emissionsszenario A1B (Nakicenovic und Swart 2000). Im EU-Projekt ENSEMBLES (van der Linden und Mitchell 2009) kamen mehr als 30 verschiedene Modellkombinationen, d.h. Modellketten bestehend aus einem globalen Klima-

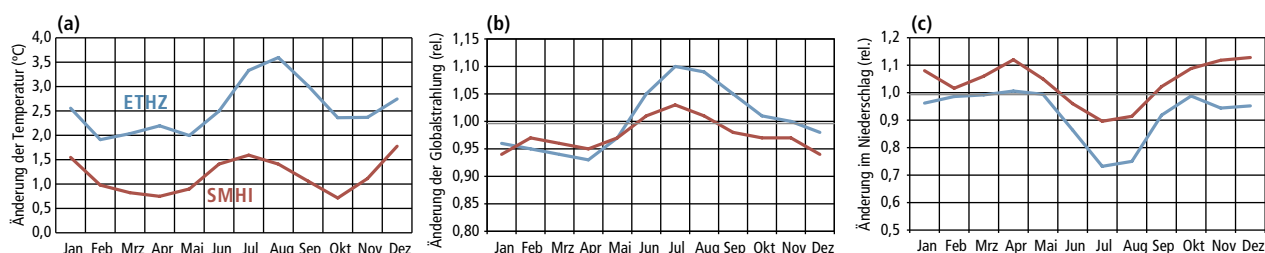


Abb. 1 | Monatsmittel der erwarteten Änderung in Temperatur (a), Globalstrahlung (b) und Niederschlag (c). Dargestellt sind die Mittelwerte der fünf Hotspot-Regionen für den Zeitraum 2036–2065 aufgrund der zwei Klimaszenarien ETHZ (blau) und SMHI (rot).

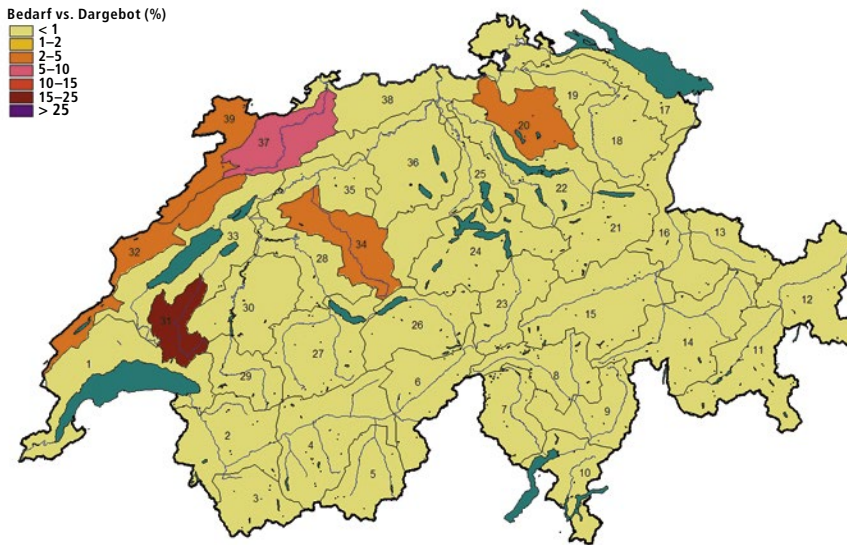


Abb. 2 | Verteilung des regionalen Verhältnisses von Bewässerungsbedarf und Dargebot (Abflussvolumen) für die Sommermonate (Juni–August) der Periode 1981–2010 (mit Regionsnummerierung).

modell (GCM) und einem daran gekoppelten regionalen Klimamodell (RCM) zum Einsatz (<http://ensemblesrt3.dmi.dk>; Christensen *et al.* 2010). Die Klimaprojektionen von zwei dieser Modellketten wurden hier verwendet, um eine obere beziehungsweise untere Grenze möglicher Klimaentwicklungen darzustellen: ETHZ-CLM (nachfolgend als ETHZ bezeichnet) und SMHIRCA-BCM (nachfolgend als SMHI bezeichnet).

Die Szenarien standen in einer Auflösung von 25 km als mittlere monatliche Abweichung zur Referenz (Delta-Werte) für Temperatur, Niederschlag und Strahlung zur Verfügung (Abb. 1). Mit ETHZ sind die Sommermonate deutlich wärmer und auch niederschlagsärmer. Mit SMHI sind die Tendenzen ähnlich, aber deutlich weniger stark ausgeprägt. Der stärkste Temperaturanstieg wird mit ETHZ für August berechnet, mit SMHI für Dezember. Die jahreszeitliche Mitteltemperatur erhöht sich bei ETHZ um etwa 2,6 °C; bei SMHI liegt diese Schätzung bei etwa 1,2 °C. Im Mittel über alle Hotspot-Gebiete beträgt der Rückgang des Niederschlags mit ETHZ 22 % (Juni–August). Im Vergleich dazu fällt die sommerliche Niederschlagsabnahme im SMHI-Szenario deutlich geringer aus (–8 %). Der Jahresgang der Änderung zeigt für SMHI eine markante Erhöhung ausserhalb der Sommerzeit. Fürs ganze Jahr wird von SMHI eine leichte Zunahme der Jahresniederschläge (+4 %), mit ETHZ eine mittlere Abnahme um 8 % projiziert. Für die Verdunstung ist zusätzlich zur Temperatur auch die Zunahme der Strahlung während der Sommermonate mit maximal 10 % im Juli (ETHZ) relevant.

Resultate

Bedarf vs. Dargebot – Referenzperiode

Im Durchschnitt der Jahre 1981–2010 liegen die Werte für den potenziellen Bedarf während der kritischen Sommermonate Juni–August in der Mehrzahl der Einzugsgebiete unter 1 % des Dargebots und maximal bei 16 % (Broye-Mentue). Die Lage der Gebiete mit Werten über 1 % ist aus Abbildung 2 ersichtlich.

Im Extremjahr 2003 sieht die Situation anders aus; in mehreren Gebieten werden Werte von über 100 % erreicht (Abb. 3). Aufgrund der Rangfolge für 2003 lassen sich Regionen mit einem besonders hohen Risiko für Wasserknappheit leicht erkennen.

Die Lage der Gebiete mit erhöhten Werten ist in Abbildung 4 erkennbar. Gebiete mit einem potenziellen Bedarf von 30–60 % gegenüber dem Dargebot sind insbesondere das Glatt-Töss-Gebiet, die Zuflussgebiete zum Neuenburger- und Bielersee (Orbe-Areuse-Seyon-Suze) und das Doubs-Gebiet. Der Vergleich von Bedarf und Dargebot setzt allerdings voraus, dass jede landwirtschaftliche Fläche durch Flusswasser bewässert werden kann, was in der Praxis jedoch kaum gewährleistet sein dürfte (lange Transportwege etc.), und keine Grundwasservorkommen genutzt werden.

Bedarf vs. Dargebot – 2050

Für diese Defizitanalyse gilt es zu berücksichtigen, dass die Belastungssituation in Extremjahren nicht nur von der Zunahme der Verdunstung, sondern auch stark vom

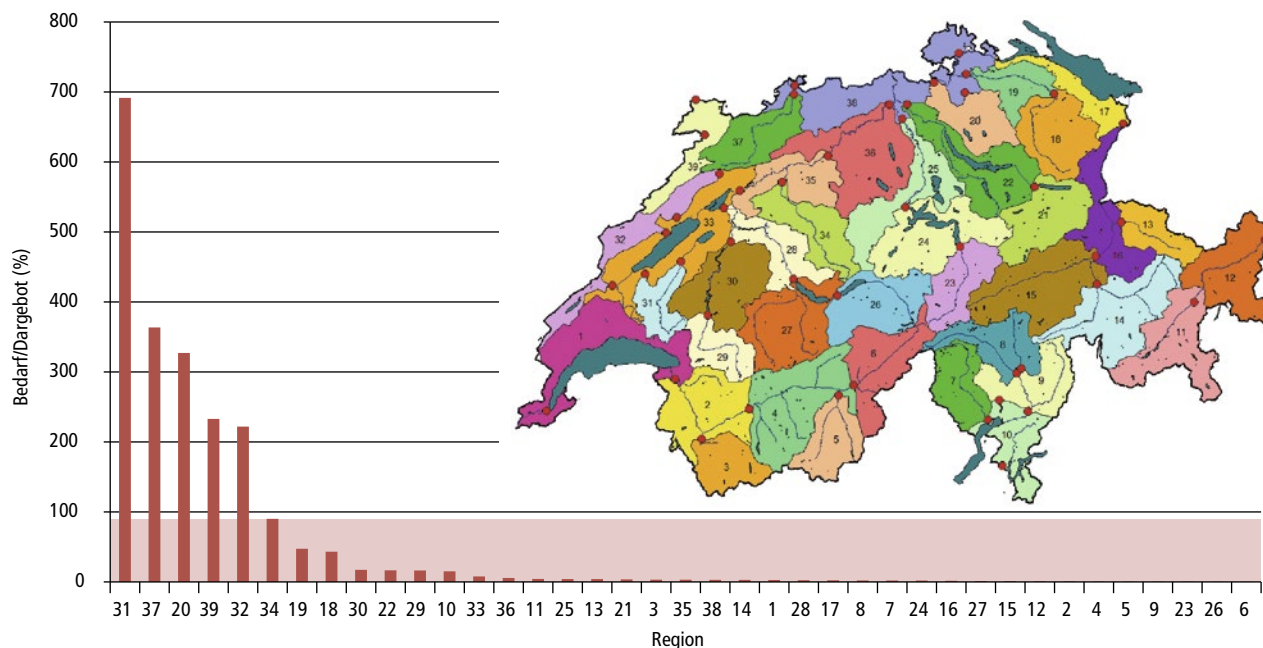


Abb. 3 | Rangfolge des Verhältnisses von Bedarf und Dargebot für die einzelnen Einzugsgebiete im Trockenjahr 2003. Karte: Lage der ausgegrenzten Einzugsgebiete mit den zugehörigen Abflussstationen (Kreise).

Abflussregime abhängt. Da in einzelnen Monaten das Dargebot (= Abfluss) auf 0 sinkt, wurde hier die Differenz von Dargebot und Bedarf (= Defizit) betrachtet. Wird diese Differenz negativ, so bedeutet dies, dass unter Berücksichtigung von Q347 der Bedarf an Bewässerungswasser nicht mehr durch Entnahmen aus den Flüssen gedeckt werden kann. In der Mehrzahl der betrachteten 30 Jahre (Medianwert) ist dies in keiner

Region der Fall, auch nicht in den Szenarien-Simulationen mit SMHI (Abb. 5). Einzelne kritische Jahre während der Referenzperiode treten in den Regionen der Birs und der Broye-Mentue auf und widerspiegeln die Situation im Jahr 2003. Mit dem «extremen» Szenario (ETHZ) nimmt die Anzahl der Unterschreitungen deutlich zu, insbesondere in den beiden oben erwähnten Regionen. Betrachtet man die Häufigkeit (%) der Jahre, in welchen

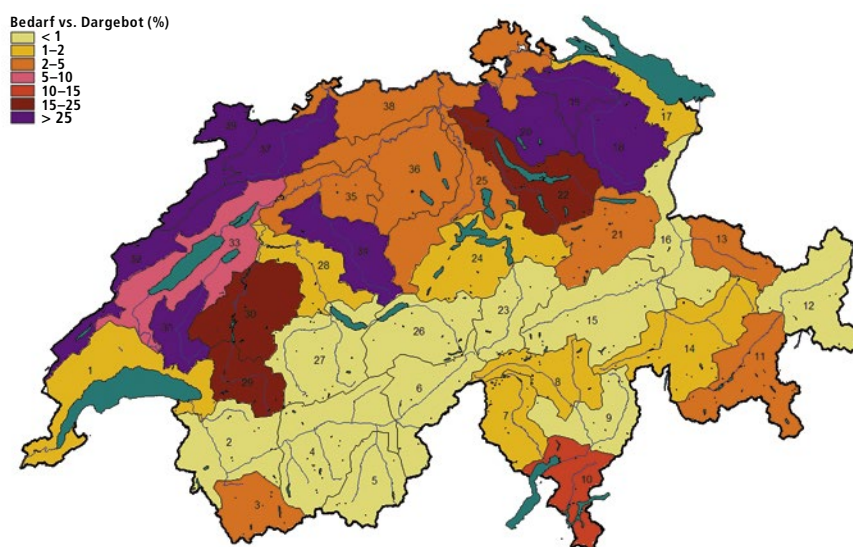


Abb. 4 | Regionale Verteilung des Verhältnisses von Bewässerungsbedarf und Dargebot (Abflussvolumen) im Sommer (Juni–August) des Jahres 2003 (mit Regionsnummerierung).

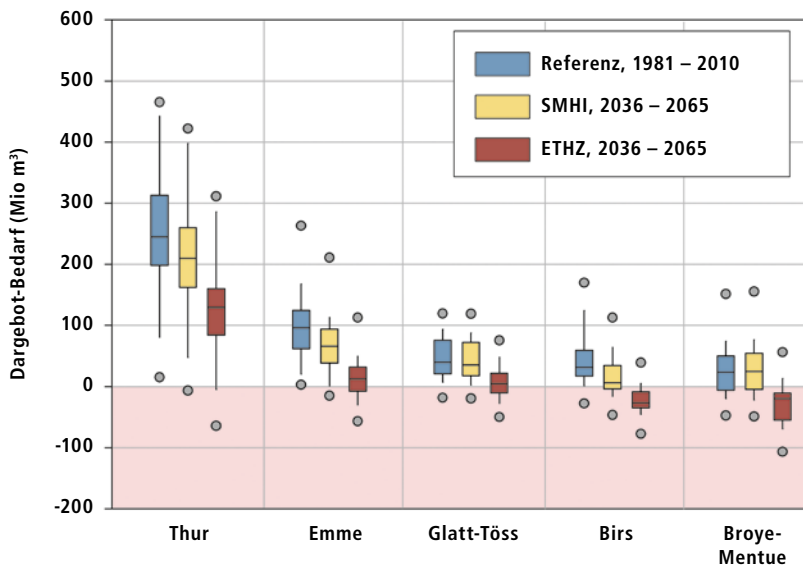


Abb. 5 | Differenz zwischen Dargebot und Bedarf in den Hotspot-Gebieten für die Referenzperiode und unter dem milden (SMHI) und dem starken (ETHZ) Klimaszenario. Dargestellt sind Median, 25/75%-Quantile (Box), 5/95%-Quantile (Whiskers) sowie die Extremwerte (Punkte). Werte im farblich hinterlegten Bereich bedeuten Wasserknappheit.

die Differenz negativ ist, so ergibt dies eine Quantifizierung des regionalen Risikos für Wasserknappheit. Mit dem ETHZ-Szenario steigt dieses Risiko stark an, z.B. in der Birs-Region von ca. 7 % auf 83 %. Mit dem SMHI-Szenario gibt es keinen oder einen geringen Anstieg.

Diskussion

Insgesamt ist der Wasserbedarf für die Bewässerung in der Schweizer Landwirtschaft bescheiden. Schätzungen gehen von jährlich 144 Mio m³ (Weber und Schild 2007) beziehungsweise 150 Mio m³ (Fuhrer 2010) aus. Zum Vergleich: Die gesamte Wasserabgabe der öffentlichen Wasserversorgungen im Jahr 2012 betrug 935 Mio m³ (<http://www.svgw.ch>), und der Gesamtabfluss des Landes beträgt durchschnittlich 53 km³ pro Jahr (Blanc und Schädler 2013). Trotz dieses scheinbaren Überangebots an Wasser kommt es periodisch zu regionalen Engpässen, verbunden mit zeitlich beschränkten Entnahmeverboten. Diese Situationen könnten im Zuge des Klimawandels häufiger werden. Mit der vorliegenden Studie wurde versucht, anhand einer

Defizitanalyse besonders betroffene Regionen zu eruieren. Dazu wurde ein Vergleich zwischen dem potenziellen Bewässerungsbedarf und dem nutzbaren Wasserdargebot durchgeführt. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit wurde das Dargebot vereinfachend mit der Wasserführung in den Flüssen gleichgesetzt (ohne Berücksichtigung von Seen oder Grundwasserreservoirs), und es wurde keine Einschränkung im Zugang zu Wasserquellen berücksichtigt. Durch die Berücksichtigung einer Restwassermenge (Q347) wird im Vergleich zu den Daten von Fuhrer (2012) die nutzbare Wassermenge kleiner und mit nur 70 % Bewässerungseffizienz der Bedarf entsprechend höher.

Die Auswertung der Simulationen zeigt, dass in Trockenjahren wie 2003 Regionen wie Broye-Mentue, Glatt-Töss und Birs vor Problemen in der Deckung ihres landwirtschaftlichen Wasserbedarfes stehen könnten. Mit dem Klimawandel nimmt das Risiko für solche Situationen zu und betrifft auch andere Regionen mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung. Die Klimaszenarien weisen in Richtung eines mittleren Niederschlagsdefizits im Sommer, was bei einer Zunahme der potenziellen Ver-

Tab. 2 | Häufigkeit (%) der Jahre, in denen der Wasserbedarf regional höher ist als das -dargebot in der jeweils 30-jährigen Periode

| Szenario | Thur | Emme | Glatt-Töss | Birs | Broye-Mentue |
|----------------------|------|------|------------|------|--------------|
| Referenz (1981-2010) | 3,3 | 3,3 | 6,7 | 6,7 | 26,7 |
| SMHI (2036-2065) | 3,3 | 10 | 6,7 | 33,3 | 26,7 |
| ETHZ (2036-2065) | 10 | 36,7 | 53,3 | 83,3 | 83,3 |

dunstung den Bedarf an Zusatzbewässerung steigert, bei gleichzeitiger Abnahme des Abflussvolumens. Im Extremfall (ETHZ) tritt Wasserknappheit bis zur Mitte des Jahrhunderts in 10 % (Thur) bis über 80 % (Birs, Broye-Mentue) der Jahre auf. Besonders betroffen vom Rückgang der Abflüsse im Sommer sind Regionen mit einem mittelländischen oder jurassischen Abflussregime (BAFU 2012; Blanc und Schädler 2013).

Allerdings ist zu beachten, dass es sich hier um Schätzungen eines potenziellen Bewässerungsbedarfs handelt. Genauere Abschätzungen des aktuellen Bewässerungsbedarfs wären unter Verwendung kulturspezifischer Inputdaten möglich, und müssten sich auf die bewässerungswürdigen Kulturen beschränken. Zudem bestehen Unsicherheiten bei den landesweit verwendeten Daten zu Bodeneigenschaften und auch bezüglich der Klimaszenarien. Unberücksichtigt bleibt ausserdem die Niederschlagsverteilung, beziehungsweise die von den Szenarien angegebene Zunahme in der Länge der Trockenphasen (aufeinander folgende Tage ohne nennenswerte Niederschläge) im Sommer, und schliesslich die Möglichkeit, dass mit steigender CO₂-Konzentration die Effizienz der Wasserausnutzung der Pflanzen steigt.

Die Ergebnisse sollten dementsprechend nicht in ihrer Absolutheit, sondern eher als Basis für regional differenzierte Risikobetrachtungen verwendet werden.

Schlussfolgerungen

Trotz methodischer Einschränkungen ergeben sich aus den Ergebnissen Erkenntnisse, die für die weitere Diskussion möglicher Massnahmen im Bereich der Gewässerbewirtschaftung und insbesondere der landwirtschaftlichen Ansprüche wertvoll sein können. Zur Vermeidung von möglichen Konfliktsituationen und zur Schonung der Gewässer sind in Risikoregionen angepasste, vorsorgliche Massnahmen vordringlich. Dazu gehören Anpassungen bei der Bewirtschaftung (u.a. Kulturen-, Sorten- und Standortwahl, Bodenbearbeitung etc.) (Fuhrer *et al.* 2013) oder im Bereich der Infrastruktur (u.a. Zuleitungen) für zusätzliche Bewässerung mit Wasser aus grösseren Reservoirien (Seen, grosse Flüsse). ■

Dank

Die Modellrechnungen wurden mit Unterstützung von Karsten Jasper durchgeführt und vom Bundesamt für Landwirtschaft finanziell gefördert.

Literatur

- BFS, 2001. Bodennutzung im Wandel: Arealstatistik Schweiz. Bundesamt für Statistik, Neuenburg. 32 S. Zugang: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/news/publikationen.html?publicationID=796> [03.03.14].
- BFS, 2012. Landwirtschaftliche Betriebszählung: Zusatzerhebung 2010. Medienmitteilung. Bundesamt für Statistik, Neuenburg. Zugang: <http://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=de&msg-id=44014> [03.03.13].
- BAFU, 2011. EZGG-CH – Einzugsgebietgliederung Schweiz. Produktdokumentation. Bundesamt für Umwelt, Bern. 27 S.
- BAFU, 2012. Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHydro). Umwelt-Wissen Nr. 1217. Bundesamt für Umwelt, Bern. 76 S.
- Blanc P. & Schädler B., 2013. Das Wasser in der Schweiz – ein Überblick. Schweizerische Hydrologische Kommission, Bern. 28 S.
- BUWAL, 2000. Angemessene Restwassermengen – Wie können sie bestimmt werden? Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 139 S.
- CH2011, 2011. Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Hrsg: C2SM, MeteoS-wiss, ETH, NCCR Climate, und OcCC, Zürich. 88 S. Zugang: <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00402/index.html?lang=de> [03.03.14].
- Fuhrer J., 2010. Abschätzung des Bewässerungsbedarfes in der Schweizer Landwirtschaft. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 26 S. Zugang: <http://www.agroscope.admin.ch/publikationen/einzelpublikation/index.html?lang=de&aid=26436&pid=26884&vmode=fancy> [03.03.14].
- Fuhrer J., 2012. Bewässerungsbedarf und Wasserdargebot unter heutigen und künftigen Klimabedingungen. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 46 S. Zugang: <http://www.agroscope.admin.ch/publikationen/einzelpublikation/index.html?lang=en&aid=29699&pid=29493> [03.03.14].
- Fuhrer J. & Jasper K., 2009. Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung* **16**, 396–401.
- Fuhrer J., Tendall D., Klein T., Lehmann N. & Holzkämper A., 2013. Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change. *ART Schriftenreihe* **19**, 56 S.
- Nakicenovic N. & Swart R., 2000. IPCC Special Report on Emission Scenarios, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 570 S.
- Nash J.E. & Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology* **10**, 282–290.
- Swisstopo, 2004. RIMINI – Das preisgünstige digitale Höhenmodell der ganzen Schweiz. Bundesamt für Landestopografie, Wabern.
- van der Linden P. & Mitchell J.F.B. (eds.), 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 S.
- Weber M. & Schild A., 2007. Stand der Bewässerung in der Schweiz. Bericht zur Umfrage 2006. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern. S. 17ff.

Riassunto

Esigenza d'irrigazione e disponibilità di risorse idriche in presenza di cambiamenti climatici: un'analisi dei deficit a livello regionale

Con i cambiamenti climatici, il fabbisogno idrico delle colture tenderà ad aumentare, accrescendo l'esigenza d'irrigazione. Allo stesso tempo la disponibilità di risorse idriche diminuirà, poiché in estate il livello d'acqua in molti bacini idrografici dell'altopiano è destinato a calare. Al fine di identificare le regioni a maggior rischio di penuria d'acqua, è stato calcolato con l'aiuto di un modello idrologico il rapporto fra il fabbisogno irriguo potenziale e la disponibilità di risorse (deflusso regionale) per 39 bacini idrografici, nel periodo compreso fra il 1981 e il 2010. I risultati rivelano che in anni estremi come il 2003 le risorse idriche di alcune regioni sono già oggi insufficienti. Il cambiamento climatico non farà che aggravare questa situazione, riducendo ulteriormente la disponibilità d'acqua, come mostrano simulazioni effettuate sulla base di due scenari climatici validi per il periodo 2036–2065. Nei bacini idrografici dei fiumi Glatt-Töss, Birs o Broye-Mentue la frequenza di anni caratterizzati da penuria d'acqua aumenterà notevolmente in presenza di un cambiamento climatico marcato. In queste regioni è pertanto necessario adottare misure volte a un utilizzo oculato delle risorse idriche, al fine di tutelare i corsi d'acqua e soddisfare le esigenze dell'agricoltura.

Summary

Irrigation requirement and available water supply under changing climatic conditions: a regional deficit analysis

As the climate changes, the water requirement of agricultural crops tends to increase. This leads to a higher irrigation requirement. At the same time, water availability falls, since water levels in many catchment areas of the Swiss Central Plateau decline in the summer. In order to identify areas with an increased risk of water shortage, a hydrological model was used to calculate the ratio of the potential irrigation requirement to the available supply (regional outflow) for 39 catchment areas during the period 1981–2010. The results show that in years with extreme climatic events such as 2003, the available supply in individual regions is already insufficient. Climate change causes this situation to intensify, leading in many cases to water shortages, as shown by modelling for selected areas based on two climate scenarios for the period 2036–2065. In the catchment areas of Glatt-Töss, Birs and Broye-Mentue, the frequency of water-shortage years rises many times in the event of dramatic climate change. In these areas, there is a demand for measures for appropriate water management which take account of the protection of waters as well as the demands of agriculture.

Key words: agriculture, climate change, irrigation, water availability.