Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 109 (2017)

Heft: 3

Artikel: Wasserhaushalt der Schweiz 2.0 : eine validierte, modellgestützte Methode für die Bilanzierung der Wasserressourcen der Schweiz

Autor: Zappa, Massimiliano / Liechti, Katharina / Deller, Mattias

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941623

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 06.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Wasserhaushalt der Schweiz 2.0

Eine validierte, modellgestützte Methode für die Bilanzierung der Wasserressourcen der Schweiz

Massimiliano Zappa, Katharina Liechti, Mattias Deller, Martin Barben

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt eine neue, modellgestützte Methode zur jährlichen Bilanzierung des Wasserhaushalts der Schweiz vor. Damit ist es nun möglich, Aussagen zur Wasserbilanz auf regionaler Ebene und für die einzelnen Monate zu machen. Ausserdem wird, im Unterschied zu bisher verwendeten Methoden, die jährliche Dynamik der Speicher (Grundwasser und Boden) nicht über die Verdunstung kompensiert, sondern explizit berücksichtigt. Damit eignet sich die neue Methode besser für Vergleiche einzelner Jahre. Im Allgemeinen sind die Ergebnisse der neuen Methode konsistent mit jenen aus früheren Studien.

Für die Modellierungen wurde die Gitterversion des hydrologischen Modells PREVAH verwendet und mit einem einfachen und zweckmässigen Routingschema kombiniert. Die Ergebnisse der neuen Methode wurden an 71 Einzugsgebieten verifiziert. Für diese 71 Einzugsgebiete sowie für 25 Grossregionen und die gesamte Schweiz liegen nun Zeitreihen der Wasserbilanzkomponenten ab dem Jahr 1981 vor. Vergleiche der Bilanzwerte der einzelnen Jahre oder Monate mit den Werten der Normperiode 1981–2010 sind somit einfach möglich.

Die präsentierte modellgestützte Methode ist ein zeitgemässes Instrument, welches die effiziente Berechnung von Wasserbilanzen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung erlaubt.

1. Einführung

In den Schweizer Alpen entspringen bedeutende Flüsse Europas. Ihr Wasservorkommen ist eine wichtige Ressource für viele Wirtschaftssektoren der Schweiz und ihrer hydrologischen Unterlieger. Für eine optimale Nutzung dieser Ressourcen müssen wir in der Lage sein, ihre Verfügbarkeit zu quantifizieren (*Zappa et al.*, 2012; *Jörg-Hess et al.*, 2014). Die Bilanzierung des Wasserhaushalts eines Einzugsgebiets liefert eine Antwort auf diese Frage und ist eine der klassischen Aufgaben der Hydrologie. In einem hydrologischen System, welches im Gleichgewicht steht, sollte im langjährigen Mittel die Summe von Abfluss und Verdunstung dem Niederschlag entsprechen. Werden jedoch einzelne Jahre betrachtet, so ist zu erkennen, dass durch jährliche Unterschiede in den Schneeverhältnissen sowie im Bodenfeuchte- und Grundwasserspeicher Wasserressourcen von einem Jahr ins nächste verlagert werden. In hochalpinen Gebieten wird zudem seit rund 30 Jahren eine stetige Abnahme der gespeicherten Wassermengen in den hiesigen Gletschern beobachtet (e. g. *Farinotti et al.*, 2011). Im Falle von kleinen und gut instrumentierten Einzugsgebieten gelingt eine Bilanzierung mit verhältnismässig wenig Aufwand. *Schädler* und *Weingartner* (2002a) präsentierten eine weitgehend auf Messungen basierte Methode, um die Wasserbilanz von mesoskaligen Bilanzgebieten der Schweiz zu erstellen. In ihrer Arbeit wurde dabei ein besonderer Fokus auf die Abschätzung von jährlichen Niederschlagsmengen im Gebirge gelegt. Auf diese Weise gelang den Autoren die Realisierung einer regional aufgelösten Darstellung des Wasserhaushalts der politischen Schweiz für die Periode 1961–1990 (*Schädler* und *Weingartner*, 2002b). Auf einer grösseren Skala lieferten *Hubacher* und *Schädler* (2010) eine Abschätzung des Wasserhaushalts der Grosseinzugsgebiete der Schweiz für die Periode 1901–2000. Sie verwendeten und erweiterten dabei eine von *Schädler* und *Bigler* (1995) eingeführte Methode. Neben dem Niederschlag und dem gemessenen Abfluss werden die Änderung der Seestände und der Gletschervolumina berücksichtigt. Die Verdunstung bildet dabei den Rest-Term in der Bilanzgleichung.

Seit mehr als 20 Jahren werden nun für solche Berechnungen auch hydrologische Modelle eingesetzt. *Menzel et al.* (1999) veröffentlichten im Hydrologischen Atlas der Schweiz (HADES) eine gegitterte Karte der mittleren Verdunstung der politischen Schweiz für die Periode 1973–1992. Die Karte basiert auf Berechnungen eines physikalischen Modells (*Menzel*, 1997). *Zappa* (2002) lieferte die erstmalige modellbasierte Berechnung des Wasserhaushalts der politischen Schweiz für die Periode 1981–2000. Dabei wurde das Wasserhaushaltsmodell PREVAH (*Viviroli et al.*, 2009) angewendet. Die Schweiz wurde in 9 Klimaregionen unterteilt und mit einer Basisauflösung von 500 × 500 m räumlich diskretisiert. Die gegitterten Ausgaben der Berechnung wurden unter Einbezug von monatlichen Abflussmessungen und der Ergebnisse von *Schädler* und *Weingartner* (2002) plausibilisiert. Basierend auf *Zappa* (2002), erfolgte 2006 (*Pfaundler* und *Zappa*, 2006) die Einführung der Karten zum mittleren jährlichen und monatlichen Abfluss der Schweiz, welche vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) als Produkt für die Praxis aufgenommen wurde.

Für die jährliche Bilanzierung des Wasserhaushalts wird aber bis heute die von *Hubacher* und *Schädler* (2010) eingeführte Methode Jahr für Jahr angewandt. Im Rahmen mehrerer wissenschaftlicher Arbeiten und Projekte (*BAFU*, 2012) wurden nach und nach immer detailliertere Modellrechnungen für die politische und neu auch für die hydrologische Schweiz *(Bild 1)* möglich (*Zappa et al.*, 2012; *Bernhard et al.*, 2013). Daraus ergab sich die Frage, ob nun die Zeit gekommen sei, Modelle auch für die kontinuierliche Bilanzierung des Wasserhaushalts der Schweiz einzusetzen. Dieser Beitrag zeigt nun, wie es durch die Anwendung eines hydrologischen Modells möglich ist, monatliche Aussagen zur Wasserbilanz der Schweiz zu machen. Die Ergebnisse des Modells wurden gegenüber täglichen Abflussmessungen validiert und mit den Ergebnissen von *Hubacher* und *Schädler* (2010) ver-

glichen. Der Beitrag wird mit ausgewählten Ergebnissen und Visualisierungen ergänzt. In dieser Ausgabe von «Wasser, Energie, Luft» werden, neben dem vorliegenden Beitrag zur Methodik, auch die Ergebnisse für das Jahr 2016 publiziert. Auf diesem Weg soll in den folgenden Jahren über den Wasserhaushalt der Schweiz berichtet werden.

2. Klimatologie des Wasserhaushalts 1981–2010

Der Wasserhaushalt der Schweiz wurde bisher jährlich mit der Methode von *Hubacher* und *Schädler* bestimmt. Dabei wurde der gesamte Abfluss der Schweiz mit gemessenen und geschätzten Zuflüssen aus dem Ausland ergänzt. Im Folgenden wird die Methode von *Hubacher* und *Schädler* als HADES-Methode bezeichnet. Im Rahmen der Studie CCHYDRO des BAFU (*BAFU* 2012) wurden für die verschiedenen Klimaregionen und Höhenstufen der Schweiz zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufs für das 21. Jahrhundert bereitgestellt (*Bernhard et al.*, 2013). Für die Modellrechnungen auf der Skala der hydrologischen Schweiz wurde die Gitterversion des hydrologischen Modells PREVAH verwendet (*Viviroli et al.*, 2009; *Speich et al.*, 2015; *Stähli et al.*, 2011). *Bild 2* veranschaulicht die verwendete Modellkonfiguration für die Berechnungsperiode 1980–2009. Im Folgenden wird diese Methode als CCHYDRO-Methode bezeichnet. PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU related Model) ist ein räumlich verteiltes hydrologisches Modell, welches seit dem Forschungsprogramm NFP31 Mitte der 1990er-Jahre als Forschungsmodell im Alpenraum eingesetzt wird (*Viviroli et al.*, 2009). Für CCHYDRO wurde die räumlich explizite (gegitterte) Version von PREVAH für das gesamte Einzugsgebiet der hydrologischen Schweiz mit einer Auflösung von 200 × 200 m aufgesetzt. Insgesamt wurde die Schweiz in 25 Grossregionen unterteilt. Für jede Grossregion wurden Ergebnisse für mehrere Teileinzugsgebiete ausgegeben, sodass die Ergebnisse für kleinere Regionen mit einem einfachen Routing berechnet werden konnten (*Bernhard* und *Zappa*, 2012).

Wie jedes konzeptionelle Niederschlags-Abfluss-Modell enthält PREVAH mehrere freie Modellparameter, welche üblicherweise an gemessenen Abflussdaten kalibriert werden. Die kalibrierten Parameter für die Teileinzugsgebiete wurden von Arbeiten der Universität Bern (GIUB) übernommen (*Köplin et al.*, 2010). Die Resultate der vorgängig durchgeführten Kalibrierung an über 200 mesoskaligen Gebieten der Schweiz dienten als Datengrundlage für eine Regionalisierung durch räumliche Interpolation der Parameter mittels «Ordinary Kriging». PREVAH wurde durch interpolierte Tageswerte der meteorologischen Variablen angetrieben. Es wurden dabei Informationen der nationalen Wetterdienste der Schweiz, Deutschlands und Österreichs beigezogen. Die räumliche Interpolation besteht aus einer Kombination von höhenabhängiger Regression und einem inversen Distanzverfahren. Dies resultiert in einer trendbereinigten Interpolation. Für die Berechnungen mit PREVAH werden die folgenden Variablen benötigt: Niederschlag, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Sonnenscheindauer.

In der Schweiz sind zahlreiche Oberflächengewässer durch verschiedenste wasserwirtschaftliche und -bauliche Eingriffe beeinflusst. Für eine erfolgreiche Simulation der Abflussganglinien der

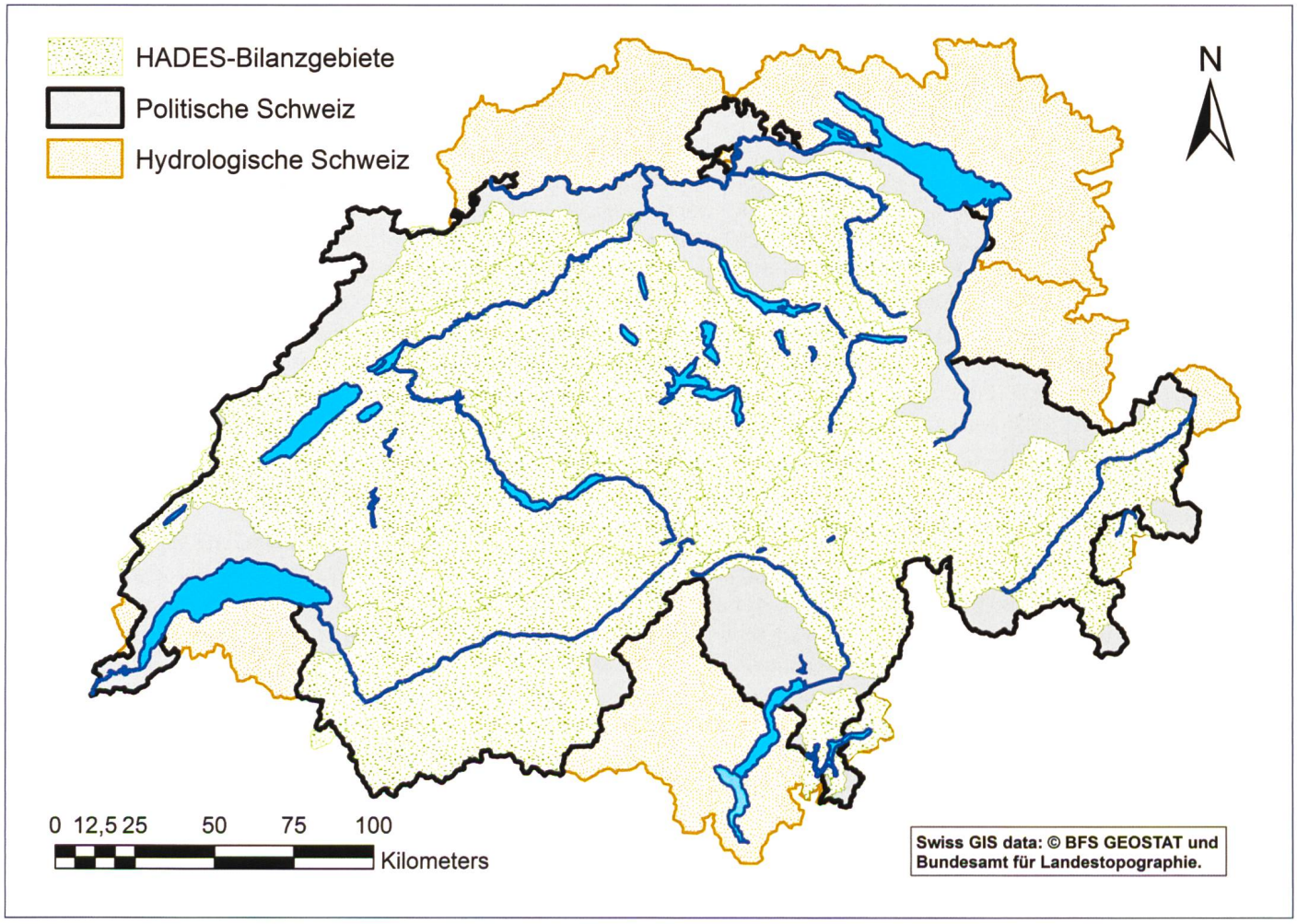

Bild 1. Grenzen und Flächenausdehnungen der politischen Schweiz (grau, 41 285 km²), der hydrologischen Schweiz (orange, 53 566 km²) und der im Hydrologischen Atlas der Schweiz relevanten Bilanzgebiete (grün, HADES).

schweizerischen Grosseinzugsgebiete ist eine Berücksichtigung solcher Eingriffe unumgänglich, wurde bis heute jedoch kaum realisiert. Die Abflusskonzentration von den 25 Grossregionen zu den Grosseinzugsgebieten sowie die Ausgabe von Abflusszeitreihen für die 71 in der Verifikation berücksichtigten Einzugsgebiete erfolgte darum unter Verwendung eines zweckmässigen, aber stark vereinfachten Routing-Schemas (*Bernhard* und *Zappa*, 2012). Die grösseren natürlichen und regulierten Seen wurden als einfache lineare Speicher definiert.

Nach dem Routing standen für viele vom BAFU betriebene Abflussmessstationen tägliche Modellwerte für die Jahre 1980–2009 bereit.

Zur weiteren Plausibilisierung der Ergebnisse wurde die Simulation des Wasserwertes der Schneedecke (SWE) mit dem entsprechenden Schneeprodukt des SLF (*Jonas*, 2012) für jede der 25 Grossregionen erfolgreich verglichen (siehe exemplarisches Beispiel auf *Bild 2*).

Die Berechnungen von CCHYDRO lieferten somit validierte Grundlagen zur Berechnung der Wasserbilanz der hydrologischen Schweiz. Nach CCHYDRO wurden die Berechnungen so erweitert, dass nun Mittelwerte für die Normperiode 1981–2010 (*CH2011*, 2011) bereitstehen (vgl. später *Tabelle 1*).

3. Methode zur jährlichen Aktualisierung des Wasserhaushalts der Schweiz

Die im vorherigen Abschnitt erläuterte Modellkonfiguration wurde nun erweitert, um jeweils den jährlichen (Januar bis Dezember) Wasserhaushalt der Schweiz eines Berichtsjahres mit jenem der Referenzperiode (1981–2010) vergleichen zu können.

Bild 3 (links) veranschaulicht die dafür nötigen Arbeitsschritte. Zur vollständigen Abdeckung der politischen Schweiz wurden zusätzlich kleine Einzugsgebiete, im selben Stil wie in *Bild 2* gezeigt, nachberechnet. Damit wird eines der Bedürfnisse des BAFU erfüllt, welches der Europäischen Umweltagentur (EUA) für die jährliche Berichterstattung flächendeckende Wasserhaushaltsdaten für die grossen Flussgebiete liefert.

Die im CCHYDRO-Projekt verwendeten hydrologischen und meteorologischen Datengrundlagen wurden bis zum aktuellen Jahr ergänzt. Für die Simulationen ab dem Jahr 2009 wurde mittels eines halbautomatischen iterativen Verfahrens der Volumenfehler gegenüber der Beobachtung optimiert. Die Methode folgt dabei einer in *Weingartner et al.* (2007) aufgeführten Idee. Es wird angenommen, dass die Abflussmessungen (R) exakt sind und dass die jährliche und monatliche Verdunstung (E) in ihrer Menge vom Modell plausibel eingeschätzt wird. Darum werden alle Unsicherheiten, welche zum Fehler zwischen beobachtetem (R) und berechnetem Abfluss (R*) beitragen, auf den Niederschlagsinput übertragen.

Das Modellieren von Niederschlag und Abfluss hängt stark von der Aufzeichnungsqualität der Messstationen ab. Ungenauigkeiten bei der Niederschlagsmessung können verschiedene Ursachen haben (*Sevruk*, 1985; *Sevruk* und *Kirchhofer*, 1992). So kommt es beispielsweise stark darauf an, wie die Messstationen in Bezug auf Windbedingungen und Nie-

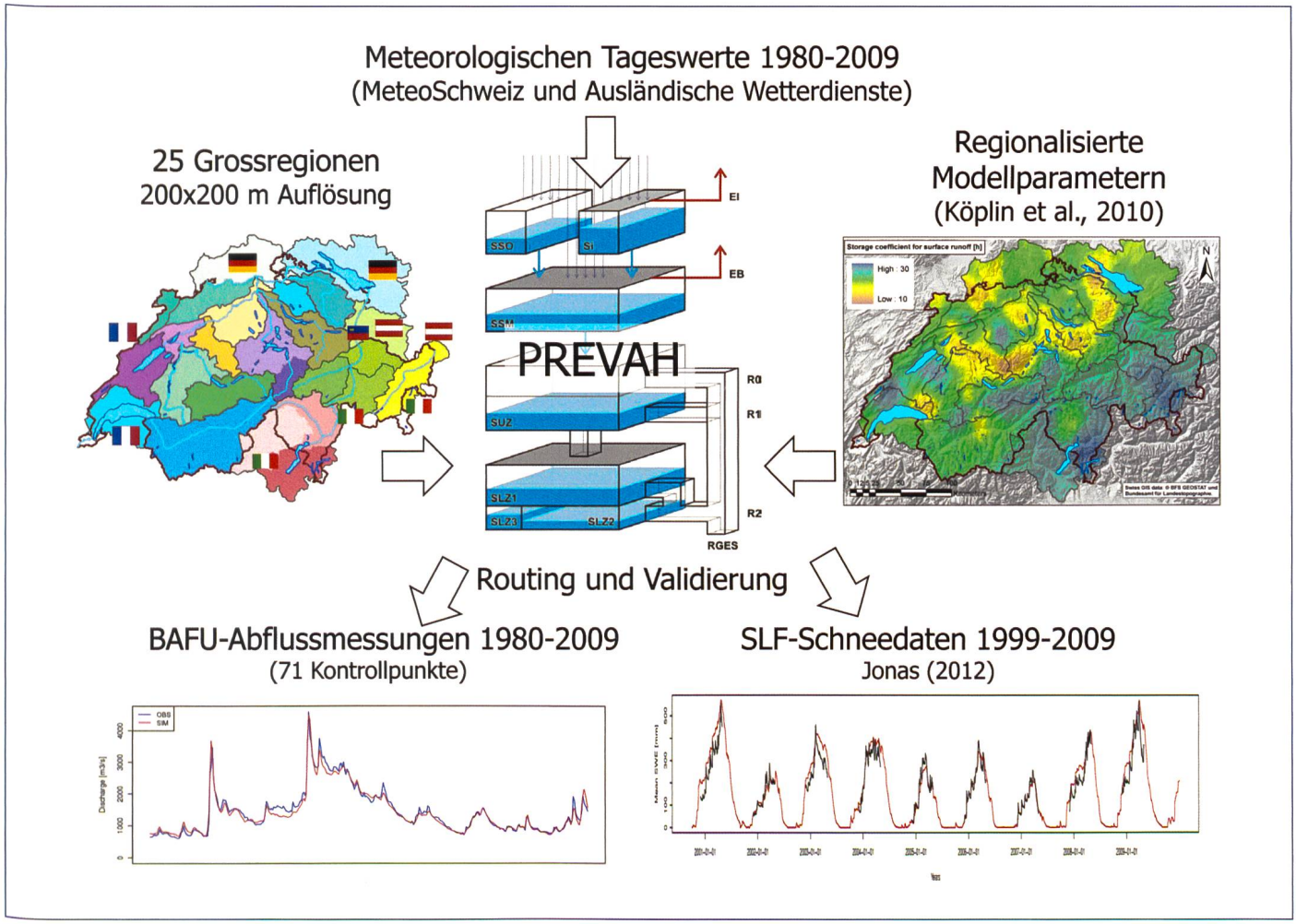

Bild 2. Übersicht der Konfiguration des hydrologischen Modells PREVAH für die CCHYDRO-Berechnungen (BAFU, 2012). Für die Ermittlung des Wasserhaushalts an jedem der 200 × 200-m-Gitterpunkte der hydrologischen Schweiz wurden tägliche meteorologische Daten als Antrieb für die Periode 1980–2009 verwendet. Siehe Abschnitt 2 von Bernhard und Zappa (2012) für weiterführende Informationen.

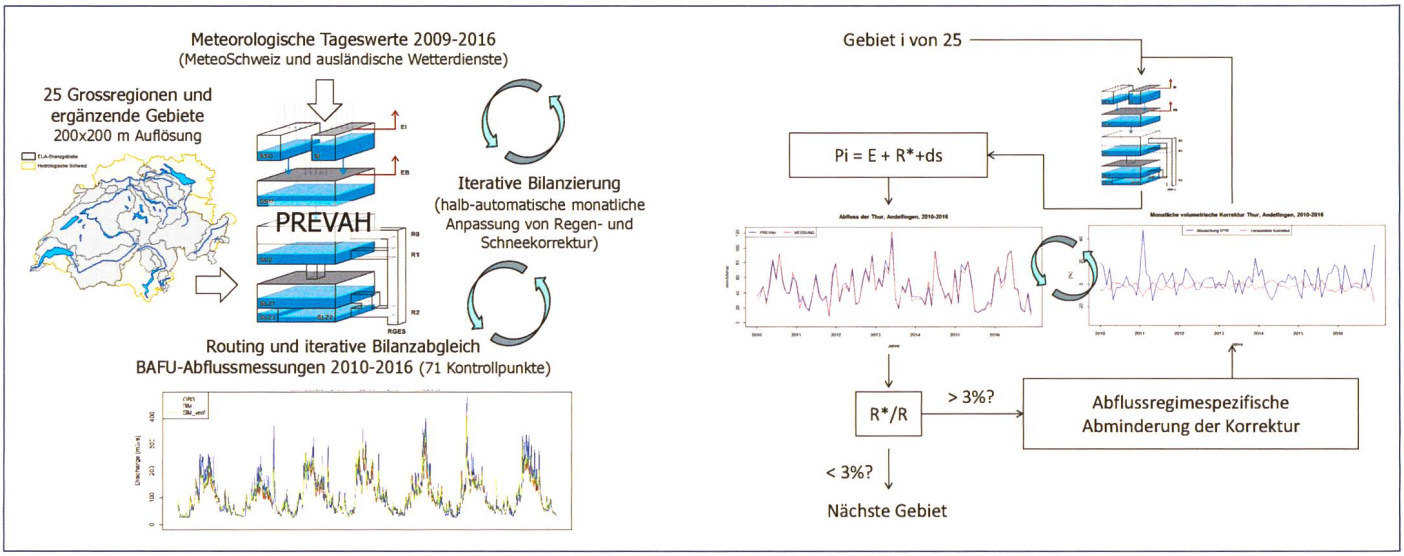

Bild 3. Links: Übersicht der Konfiguration von PREVAH für die jährliche Fortführung der Modellrechnungen zum Wasserhaushalt der Schweiz. Gegenüber Bild 2 wurden zusätzliche Einzugsgebiete berücksichtigt. Rechts: Schema zur iterativen Bilanzierung. Modellparameter, welche das Niederschlagsvolumen beeinflussen, wurden für jede Grossregion auf Monatsbasis angepasst, um eine verbesserte Bilanzierung der 71 Kontrollgebiete zu erzielen. Siehe Text für weiterführende Informationen.

derschlagsintensität gebaut sind. Weiter können Fehler durch das Verdunsten des gesammelten Niederschlags entstehen. PREVAH bietet die Möglichkeit, den Niederschlag durch das Einstellen von zwei Parametern anzupassen (*Viviroli et al.*, 2009). Durch die beiden Parameter werden die Niederschlagsmengen variiert und die Differenzen zwischen beobachteten und simulierten Abflussraten minimiert und damit Messfehler, räumliche Repräsentativität, Assimilierung und Interpolation der Niederschlagsdaten korrigiert. Zudem werden damit auch indirekt die Fehlschätzung der Verdunstung und die Fehler in der Abflussmessung korrigiert. Es handelt sich darum nicht um eine einfache Niederschlagskorrektur, sondern eher um eine «globale» Bilanzkorrektur. Diese Korrekturfaktoren werden nun für die 25 Grossregionen monatlich angepasst (*Bild 3*, rechts), um die Unterschiede zwischen den gemessenen und beobachteten monatlichen Abflusssummen an den 71 Kontrollpunkten zu minimieren (höchstens 3 % Volumenfehler für nicht oder wenig beeinflusste Einzugsgebiete). Besonderes Augenmerk gilt dabei der Übereinstimmung an den Hauptpegeln des Rheins in Basel (*Bild 4*, oben links), des Inns in Martina, der Rhone in Porte du Scex und des Ticino in Bellinzona (*Bild 4*, unten links). Es ist zu vermerken, dass bei der Bestimmung der monatlichen Korrekturfaktoren auch das Abflussregime des Einzugsgebiets berücksichtigt wurde. Im Falle eines von der Schneeschmelze dominierten Einzugsgebiets wird die Volumenabweichung nicht für jeden Monat separat ermittelt, sondern für die Gesamtdauer der Periode, welche sowohl die Schneeakkumulation als auch die Hauptschneeschmelze umfasst (z. B. Dezember bis Mai für den Ticino in Bellinzona). Die entsprechende Niederschlagsanpassung wird auf alle Monate verteilt.

Bild 4 zeigt für zwei der 71 Kontrollpunkte, wie die Bilanzierungsprozedur den Volumenfehler (DV %) zu reduzieren vermag. Dabei verbessern sich die Gütemasse (NS, NSL und RMSE) der Abflusssimulation ebenfalls (*Bernhard* und *Zappa*, 2012). Über alle Kontrollpunkte hinweg zeigt sich eine deutliche Verringerung des Volumenfehlers (*Bild 4*, Box-Whisker-Plot unten rechts). Der Median der veredelten Ergebnisse liegt bei rund +1 % und zeigt weniger Spannweite als die Originalsimulationen, für welche der Median des Volumenfehlers bei –2.7 % liegt. Auch bei der Güte der simulierten Tageswerte der Abflüsse (Nash-Kriterium, Box-Whisker-Plot oben rechts) werden mit der veredelten Simulation bessere Ergebnisse erzielt als mit den Originaldaten. Die Ergebnisse der neuen modellgestützten Methode können darum neben räumlich hochaufgelösten Aussagen zu den Komponenten des Wasserhaushaltes auch tägliche Zeitreihen des Abflusses in den schweizerischen Gewässern plausibel wiedergeben.

4. Wasserbilanz ausgewählter Einzugsgebiete 1981–2010

Hauptziel der nun verfügbaren Methode ist die Bereitstellung von jährlich aktuellen Berechnungen zum natürlichen Wasserhaushalt der Schweiz, ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete und ausgewählter Bilanzgebiete. In *Tabelle 1* und im Kurzbericht zum Jahr 2016 (*Liechti et al.*, 2017) sind die Berechnungen für die Kontrollperiode 1981–2010 nach Bilanzierungsgebiet und Parameter aufgelistet. Die mittleren jährlichen Summen von Niederschlag (P), Verdunstung (E), Abfluss (R) sowie der Speicheränderung (dS) bestätigen die von *Zappa et al.* (2012) für die Periode 1980–2009 ermittelten Werte. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für die politische und für die hydrologische Schweiz sind klein und nachvollziehbar. Die Teileinzugsgebiete der hydrologischen Schweiz, welche sich nicht innerhalb der politischen Schweiz befinden, wie z. B. die Regionen um den Bodensee oder südlich des Lago Maggiore, befinden sich grösstenteils in verhältnismässig tiefgelegenem, flachem Gelände. Es ist darum nicht verwunderlich, dass die «hydrologische Schweiz» (Schweiz und orange Flächen in *Bild 1*, 53 566 km^2) eine leicht höhere Verdunstung und folglich einen kleineren Abfluss als die «politische Schweiz» (graue Fläche, 41 285 km^2) aufweist.

Der Zufluss aus den Flächen von ausserhalb der «politischen Schweiz» wurde von früheren Studien (*Hubacher* und *Schädler*, 2010) auf rund 318 mm pro Jahr geschätzt. In der vorliegenden Studie beläuft sich der Zufluss aus den ausländischen Teilgebieten, wenn der Abfluss aus der «hydrologischen Schweiz» auf die «politische Schweiz» verteilt wird, auf rund 295 mm pro Jahr. Der Unterschied ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass hier die Arve (*BAFU Station* 2170, 1976 km^2) nicht in die Fläche der hydrologischen Schweiz miteinbezogen wurde. Grund dafür ist die problematische Datenbeschaffung und der Umstand, dass die

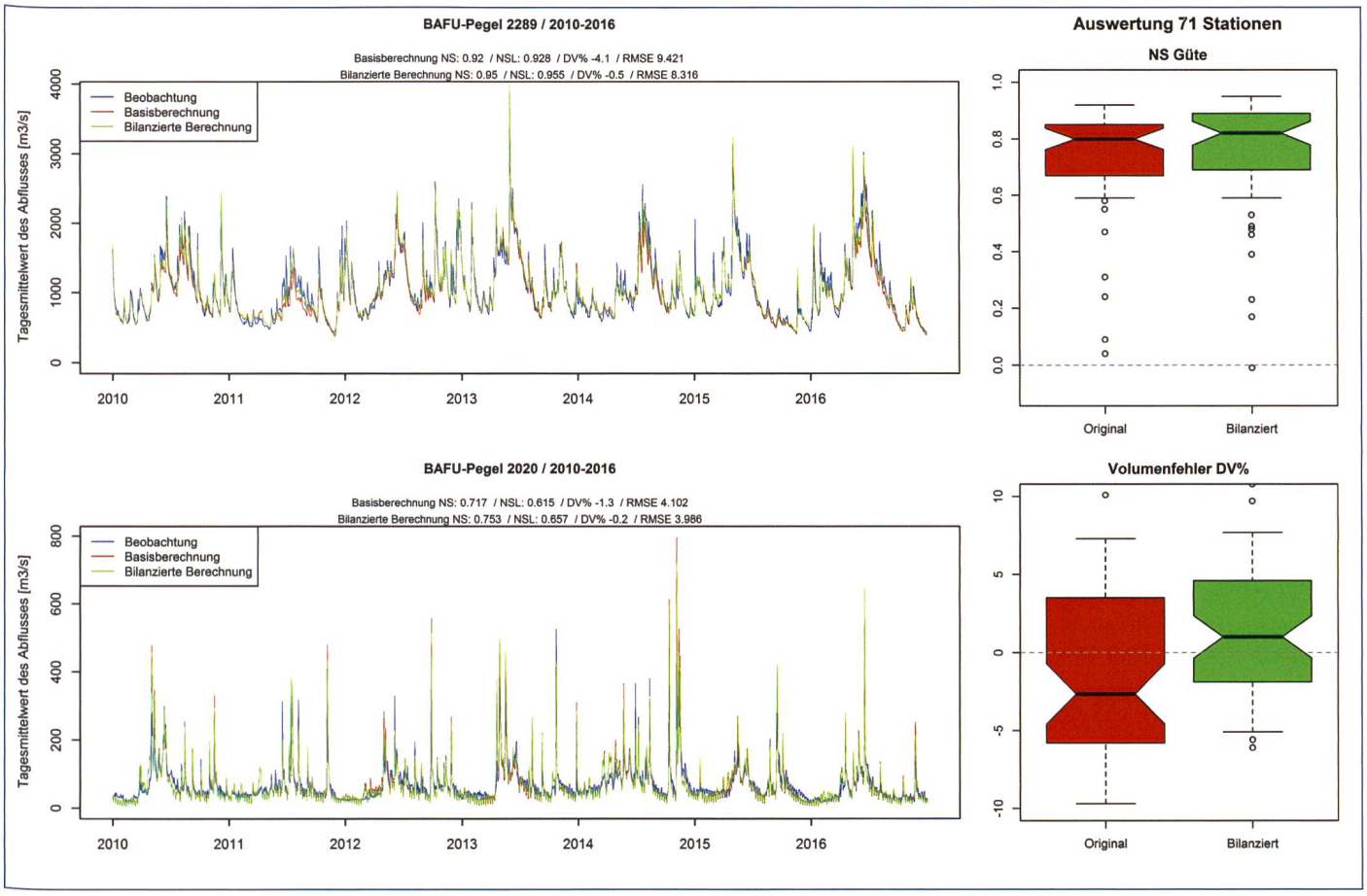

Bild 4. Oben links: Visualisierung der originalen (rot) und bilanzierten (grün) modellierten Abflussganglinie des Rheins in Basel (BAFU 2289) für die Periode 2010–2016. Die Messung ist in blau dargestellt. Unten links: Darstellung für den Ticino in Bellinzona (BAFU 2020). Die Boxplots auf der rechten Seite zeigen für das Nash-Kriterium (NS, oben) und den Volumenfehler (DV, unten) die Differenz der Ergebnisse zwischen den Originalberechnungen (rot) und den bilanzierten Berechnungen (grün) für alle ausgewerteten 71 BAFU-Stationen.

Arve nur wenige Kilometer auf Schweizer Boden fliesst. Weitere Differenzen stammen aus unterschiedlichen Betrachtungen der ausländischen Randeinzugsgebiete im Tessin (Toce), im Jura (Orbe und Doubs) und im Kanton Graubünden (Lago di Lei). Ein Detailvergleich mit den Auswertungen von Hubacher und Schädler folgt im nächsten Abschnitt *(Bild 5)*.

Im unteren Teil von *Tabelle 1* (links) sind Daten aus weiteren früheren Studien aufgelistet. Im Allgemeinen bestätigen die aktuellen Berechnungen die Werte der früheren Studien sowohl auf nationaler wie auch auf regionaler Ebene (*Bernhard* und *Zappa*, 2012). Methodische Unterschiede in der Bestimmung des Niederschlags erklären die deutlichen Unterschiede zwischen *Zappa* (2002) und der vorliegenden Studie. *Schädler* und *Weingartner* (2002a und 2002b) berechneten, bezogen auf die Periode 1961–1990, eine deutlich kleinere negative Speicheränderung (–2 mm pro Jahr) als der nun hier für die Periode 1981–2010 ermittelte Wert (–21 mm pro Jahr). Neben der Intensivierung der Gletscherschmelze (e.g. *Farinotti et al.*, 2011; *Stahl et al.*, 2016) seit den früheren 1980er-Jahren spielen auch hier methodische Unterschiede eine wichtige, aber nicht einfach nachvollziehbare Rolle. Die Ermittlung des «richtigen» Niederschlags in topografisch komplexen Gebirgsregionen war und ist immer noch eine der grössten Herausforderung in Studien dieser Art (*Isotta et al.*, 2014). Es ist darum sehr schwierig zu ermitteln, ob der in *Schädler* und *Weingartner* (2002b) höher angesetzte Niederschlag «plausibler» ist als die Abschätzung, welche für die vorliegende Studie verwendet wurde. Auch die Auswirkungen dieser Annahmen auf die Unterschiede der Speicheränderung sind schwierig zu ermitteln. Da alle Methoden entweder die Abflussmessungen direkt verwenden oder anhand der Messungen einen Modellansatz bilanzieren, ist es keine Überraschung, dass von allen Bilanzkomponenten der Abfluss die kleinsten Unterschiede aufweist. Beim neuen Modellansatz ist es auf den ersten Blick seltsam, dass für die Tessiner Einzugsgebiete eine positive Speicheränderung von 4 bis 10 mm pro Jahr bestimmt wird. Weil jedoch die Daten aus täglichen Modellergebnissen eines kontinuierlichen hydrologischen Modells stammen, kann aus den erweiterten Modellergebnissen der Grund dafür ermittelt werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass im Modell am 31. Dezember 2010 rund 130 mm mehr Schnee als am 1. Januar 1981 gespeichert sind. Dies entspricht einer durchschnittlichen Schneespeicherzunahme von jährlich rund 4.3 mm seit Beginn der Bilanzperiode. Um diese und andere «transitorischen» Speichereffekte (Bodenspeicher, Grundwasserspeicher) zu vermeiden, wird in der Regel für die Bilanzierung das hydrologische Jahr verwendet (1. Oktober bis 30. September des Folgejahres). Es ist aber bemerkenswert, dass solche Effekte auch auf eine so lange Zeitspanne (1981–2010) noch +/- 10 mm pro Jahr betragen können. Je nachdem wie stark der Aufbau der Schneedecke von Oktober bis Dezember gegenüber dem Vorjahr ist, können solche «transitorischen» Speichereffekte von Jahr zu Jahr mehr als +/- 200 mm betragen.

5. Vergleich mit den HADES-Zeitreihen

Bisher wurde aufgezeigt, dass die CC-HYDRO-Methode plausible Ergebnisse

HADES Bilanzgebiete (1981-2010)	P [mm/a]	R [mm/a]	E [mm/a]	dS [mm/a]
Rhein - Domat/Ems	1516	1171	349	-4
Thur - Andelfingen	1416	890	528	-2
Birs - Münchenstein	1076	564	513	-2
Aare - Bern	1708	1333	400	-25
Aare - Bern bis Brügg	1414	939	484	-10
Aare - Brügg bis Brugg	1337	838	506	-7
Reuss - Mellingen	1743	1298	460	-16
Limmat - Zürich	1869	1404	468	-3
Rhône - Porte du Scex	1395	1176	335	-117
Ticino - Bellinzona	1694	1322	367	5
Tresa - Ponte Tresa	1553	1058	485	10
Inn/En - Martina	1129	881	276	-29
Politische Schweiz - Inland	1392	979	434	-21
Zufluss aus dem Ausland		295		
Gesamtabfluss		1274		
Schädler & Bigler (1992), 1961-1980	1481	961	513	7
Schädler & Weingartner (2002), 1961-1990	1458	991	469	-2
Hubacher & Schädler (2010), 1901-2000	1431	981	464	-14

Weitere Gebiete (1981-2010)	P [mm/a]	R [mm/a]	E [mm/a]	dS [mm/a]
Verzasca - Lavertezzo	2125	1750	365	10
Maggia - Solduno	2048	1666	378	4
Ticino - Sesto Calende	1754	1317	433	5
Poschiavino - Le Prese	1368	1063	328	-23
Krummbach - Klusmatten	1385	1244	312	-170
Alpenrhein - Diepoldsau	1542	1160	387	-5
Töss - Neftenbach	1283	682	601	0
Ergolz - Liestal	992	454	538	0
Allaine - Boncourt	977	442	536	-1
Doubs - Ocourt	1131	663	471	-3
Aare-Thun	1820	1478	371	-29
Saane / Sarine - Fribourg	1334	834	504	-3
Venoge - Ecublens	1315	769	546	-1
Rhone - Chancy	1359	1012	422	-74
Hydrologische Schweiz	1426	983	459	-15

Tabelle 1. Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und bedeutender Grosseinzugsgebiete für die Periode 1981–2010 in mm pro Jahr. (P: Niederschlag; R: Abfluss; E: Verdunstung; dS: Speicheränderungen. Die Einzugsgebiete in der linken Tabelle sind eine Auswahl der «klassischen» Gebiete, welche im HADES bilanziert werden (Tafel 6.1, Schädler und Bigler, 1992). Ausserdem sind die Ergebnisse früherer Studien für die politische Schweiz aufgeführt. Die rechte Tabelle zeigt die Ergebnisse für weitere Bilanzgebiete und für die hydrologische Schweiz.

im Vergleich zu täglichen Abflussmessungen und zu früheren Studien zur Wasserbilanz der Schweiz liefert. Anders als mit der HADES-Methode von *Hubacher* und *Schädler* (2010), mit welcher Abschätzungen des Wasserhaushalts der Schweiz seit 1901 möglich sind, sind die Datengrundlagen für die Anwendung der CCHYDRO-Methode erst seit der Einführung des automatischen Messnetzes der MeteoSchweiz im Jahr 1981 möglich. In *Bild 5* zeigen wir eine Gegenüberstellung beider Ansätze.

Die in *Bild 5* dargestellten Daten beziehen sich jeweils auf die Bilanz für das hydrologische Jahr (Oktober bis September des Folgejahres), während in *Tabelle 1* und *Bild 6* die Werte für die (gemittelten) kalendarischen Jahre (Januar bis Dezember) aufgeführt sind. Für die gesamte Schweiz (*Bild 5*, oben) werden die mit der HADES-Methode berechneten Bilanzwerte für die Periode 1901–2016 gezeigt, während die durch die CCHYDRO-Methode ermittelten Werte erst 1981 beginnen. Die Abflussdaten sind mit ganz kleinen Abweichungen nahezu deckungsgleich. Dies bestätigt die Qualität der erzielten Ergebnisse mit dem hydrologischen Modell. Auch der Verlauf der jeweiligen Jahresreihen des Niederschlags ist überaus synchron. Was die absoluten Werte des Niederschlags betrifft (siehe auch *Tabelle 1*), so sind die HADES-Werte leicht höher als die CCHYDRO-Werte. Das gilt auch für die Zeitreihen der Verdunstung. Die HADES-Daten zeigen eine deutlich ausgeprägte Variabilität der Verdunstungssummen und kaum Variabilität, was die Speicheränderung betrifft. Bei CCHYDRO ist es genau umgekehrt. Bei der HADES-Methode wird angenommen, dass jedes Jahr am 1. Oktober das gespeicherte Wasser in den Böden, im Grundwasser und in Form von Schnee identisch ist wie der Wert ein Jahr zuvor. Laut *Sinreich et al.* (2012) beträgt der nutzbare Teil des Grundwasserspeichers jährlich ca. 18 km^3 Wasser, während höchstens 9 km^3 Wasser als Bodenwasser (zwischen-)gespeichert werden können (*Jörg-Hess et al.* 2014). Umgerechnet auf die Fläche der Schweiz ergibt dies eine Wassersäule von rund 430 mm für das nutzbare Grundwasser und von rund 215 mm für das Bodenwasser.

Die Speicheränderung wird aber bei der HADES-Methode nur über die Bilanzierung der grösseren Seen und über eine Abschätzung der Wasserbilanz der Gletscher ermittelt. Diese Vereinfachung führt dazu, dass sich z. B. ein gegenüber dem Vorjahr besonders trockener Boden am 1. Oktober als niedrigere Verdunstungsmenge in der HADES-Bilanz manifestiert. Dasselbe geschieht, wenn Ende September sehr viel Regen fällt und die Böden und die Grundwasserkörper gegenüber dem Vorjahr deutlich nasser sind. Dieser Wasserüberschuss wird nun von der HADES-Methode als zusätzlich verdunstetes Wasser taxiert. Bezogen auf die Zahlen von *Jörg-Hess et al.* (2014), bedeutet dies, dass wenn der Bodenwassergehalt gegenüber dem Vorjahrwertes um 10 % abweicht, es in der Wasserbilanz einen Betrag von +/– 20 mm gibt, welcher der Speicheränderung zugewiesen werden müsste. Weicht der nutzbare Grundwasserspeicher um 5 % vom Vorjahreswert ab, dann wird mit der HADES-Methode der Verdunstung ebenfalls fälschlicherweise +/-20 mm zugeschrieben. Folglich eignet sich die HADES-Methode hervorragend für lange Bilanzperioden; sie kann aber nur bedingt für die Bereitstellung jährlicher Bilanzsummen empfohlen werden.

Die modellbasierte CCHYDRO-Methode kann eine solche Dynamik der Speicher berücksichtigen. Die (modellierten) Boden- und Grundwasserspeicher werden explizit quantifiziert und können als Speicheränderung in der Jahresbilanz ausgewiesen werden. Die vier weiteren Grafiken in *Bild 5* (HADES versus CCHYDRO für weitere Bilanzierungsgebiete und die hydrologischen Jahre seit 1980/1981) vermitteln den Eindruck, dass die CCHYDRO-Methode auch auf regionaler Ebene konsistent mit den HADES-Ergebnissen ist. Bei der näheren Betrachtung der Daten für den Ticino in Bellinzona ist zu erkennen, dass in den Jahren, in denen CCHYDRO eine positive Speicheränderung aufweist, der HADES-Verdunstungswert auffällig höher ist als der entsprechende CCHYDRO-Wert. Ähnliches ist auch in den Zeitreihen der Thur und der Limmat zu beobachten.

Für das Bilanzgebiet der Rhône bis Porte du Scex, in welchem die Speicheränderung stark von Eisschmelze und Wasserkraftnutzung beeinflusst ist, sind die Ergebnisse der beiden Methoden sehr ähnlich.

6. Regionale Wasserbilanz der Jahre 2013–2015

Aus den verfügbaren Daten kann für die Jahre 1981 bis und mit dem aktuellen Jahr für jeden Monat die Abweichung der Hauptkomponenten des Wasserhaushalts

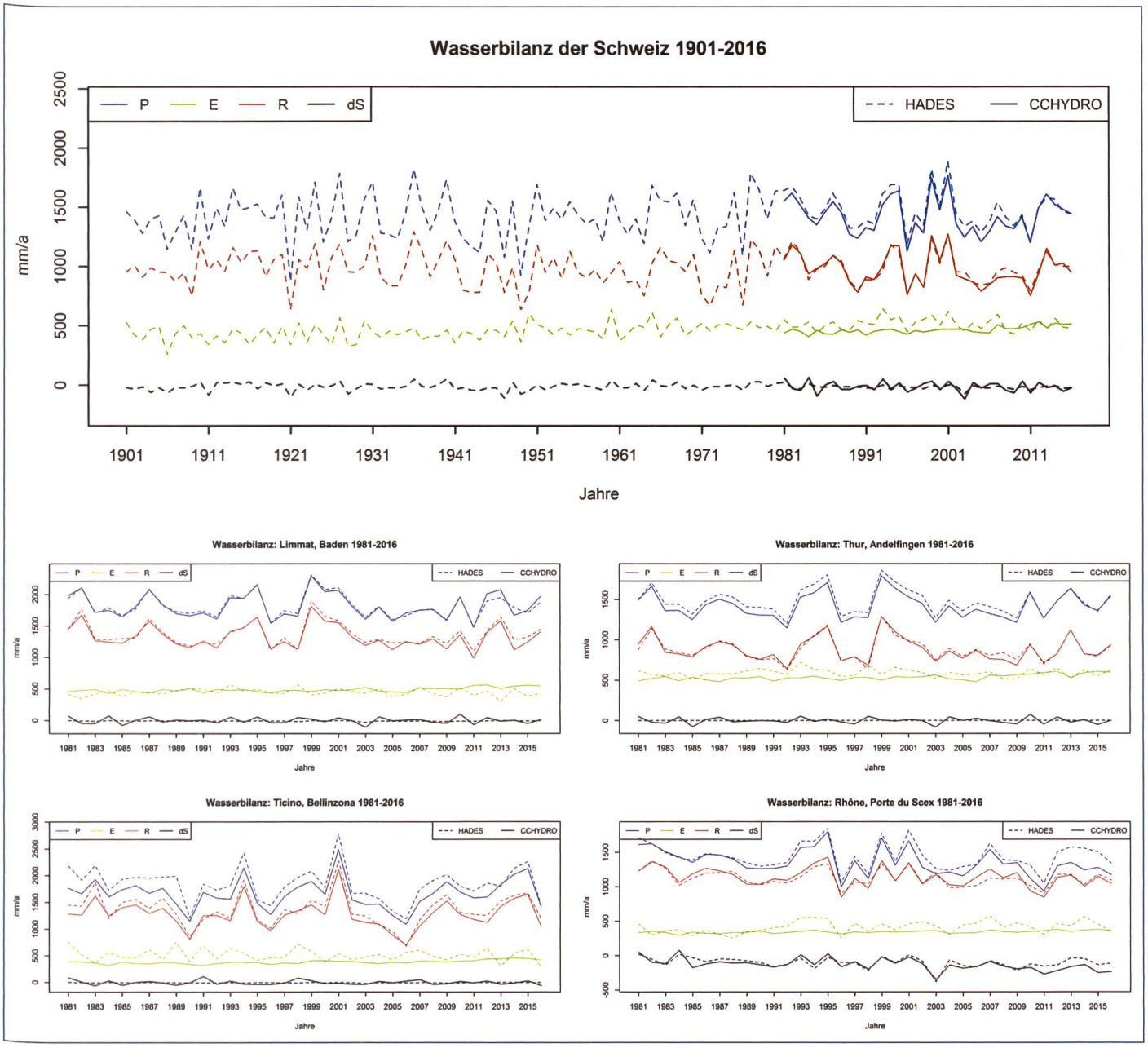

Bild 5. Gegenüberstellung der jährlichen Variabilität der Wasserbilanz, wie sie mit der klassischen HADES-Methode (gestrichelte Linien) und der CCHYDRO-Methode (durchgezogene Linien) ermittelt wurde. Oberste Grafik: Ergebnisse für die politische Schweiz gemäss HADES (1901–2016) und CCHYDRO (1981–2016). Die vier Diagramme unten zeigen den Vergleich zwischen HADES und CCHYDRO für weitere «HADES-Bilanzierungsgebiete» (Periode 1981–2016); P = Niederschlag, E = Verdunstung, R = Abfluss, dS = Speicheränderung. Angaben als Jahressummen in mm.

von der Normperiode 1981–2010 ermittelt werden. Da die zugrunde liegenden Daten auf 200 × 200-m-Gitter abgelegt sind, ist der theoretisch mögliche Detaillierungsgrad sehr hoch. Die Anwendbarkeit solcher Gitterdaten, vor allem für die unteren Skalenbereiche, ist jedoch begrenzt (*Pfaundler* und *Zappa*, 2006), deshalb sollten auf der Basis dieser Gitterdaten keine punktbezogenen Aussagen gemacht werden. Es ist davon abzuraten, die Daten für Gebiete kleiner als 10 km^2 auszuwerten. Es ist aber umso spannender, die Daten auf überregionaler Skala zu analysieren und zu vergleichen. *Bild 6* zeigt ein typisches Anwendungsbeispiel der Gitterdaten für drei Jahre (2013–2015) und zwei Variablen (Abfluss und Verdunstung). Zur Veranschaulichung der Aggregierungsmöglichkeiten (vgl. *Bild 1* und *Bild 3* links) wird in *Bild 6* für 2013 die Gliederung gemäss CCHYDRO gezeigt (hydrologische Schweiz), für 2014 die Gliederung nach HADES und für das Jahr 2015 eine regionale Untergliederung der politischen Schweiz. Was den Abfluss betrifft, ist aus den Graphiken zu erkennen, dass 2013 gegenüber der Normperiode leicht mehr Abfluss verzeichnet wurde. Im Jahr 2014 wurde nördlich der Alpen hingegen leicht weniger Abfluss ermittelt als in der Normperiode. Vor allem im Einzugsgebiet der Limmat blieb der Abfluss bei lediglich rund 80 % des Normwertes. Starkniederschläge im Sottoceneri (Einzugsgebiete der Tresa und des Lago di Lugano) im November und Dezember 2014 führten zu bedeutenden Schäden (*Andres et al.*, 2015) und auch zu stark erhöhten Abflusssummen gegenüber der Normperiode. Das Jahr 2015 wurde von einer aussergewöhnlichen Trockenheit geprägt (*BAFU*, 2016). Dies widerspiegelt sich in den regionalen Anomalien des Jahresabflusses (überall eher negativ) und, interessanter, in regional stark unterschiedlichen Anomalien in der Verdunstung. In der Birs bleibt der Abfluss bei rund 90 % des Normwertes, während die Verdunstung knapp 85 % der Norm erreicht. Bei Ausbleiben bedeutender Niederschlagsmengen erreicht das Wasserdargebot nicht die po-

tenziell mögliche Verdunstungsmenge. Im Engadin kommt es durch die Trockenheit (und die damit verbundenen hohen Lufttemperaturen und die kurze Dauer der Schneebedeckung) zu aussergewöhnlich hohen Verdunstungsraten (mehr als 30 % höher als der Normwert). Im Engadin ist zudem zu beobachten, dass 2015 der Abfluss leicht über dem Normwert lag (rund +20 %). Wie im Hitzesommer 2003 wurden die ausbleibenden Niederschläge mit stärkerer Gletscherschmelze (über-)kompensiert (*Zappa* und *Kan*, 2007).

7. Ausblick

In der vorliegenden Studie haben wir aufgezeigt, dass die bisherige HADES-Methode für die Ermittlung jährlicher Wasserbilanzen nur bedingt zu empfehlen ist, weil die Speicheränderung ungenau quantifiziert wird. Mit der hier vorgestellten modellgestützten Methode besteht nun ein modernes Instrument, mit dem mit einer feinen räumlichen und zeitlichen Auflösung effizient Wasserbilanzen von guter Qualität gerechnet werden können. Wie bereits erwähnt, soll in Zukunft jedes Jahr im Sommer die Wasserbilanz der Schweiz für das Vorjahr publiziert werden. In dieser WEL-Ausgabe präsentieren *Liechti et al.* (2017) die Wasserbilanz für das Jahr 2016, inklusiv seiner Einordnung und Diskussion einiger regionaler und überregionaler Abweichungen gegenüber den hier erarbeiteten Daten für die Normperiode 1981–2010.

Da nun die Wasserbilanz plausibel mit Modellen ermittelt werden kann, eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Weiterverwendungen der Methode für Szenarien und operationelle Produkte. Die Ergebnisse aus

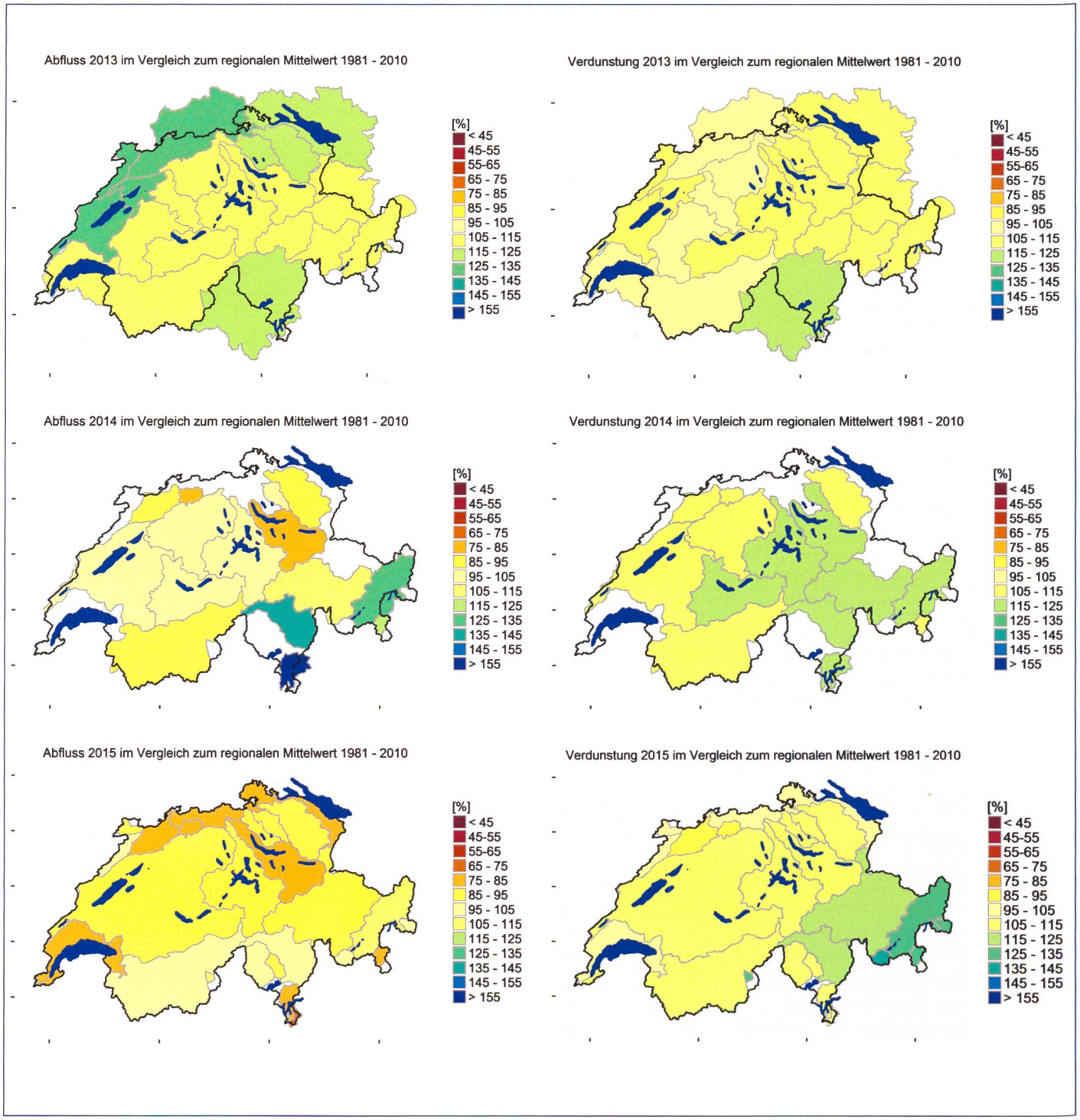

Bild 6. Links: Regionale Abweichung der Jahresabflusssummen gegenüber der regionalen mittleren Jahresabflusssumme der Normperiode (1981–2010). Rechts: Regionale Abweichung der Verdunstung. Oben: Angaben für die «hydrologische Schweiz» und das Jahr 2013. Mitte: Angaben für die HADES-Bilanzgebiete und das Jahr 2014. Unten: Angaben für die «politische Schweiz» und das Jahr 2015. Siehe auch Bild 1 für die Definition der Regionen.

der neuen Methode sind mit jenen von CCHYDRO (*BAFU*, 2012) konsistent. Demzufolge haben auch die durch CCHYDRO veröffentlichten möglichen Folgen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der hydrologischen Schweiz und ihrer Grosseinzugsgebiete weiterhin ihre Gültigkeit (siehe auch *Speich et al.*, 2015). Die Methode ist zudem auch identisch mit jener, die *Stähli et al.* (2011) für die Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf die Wasserkraftproduktion (*SGHL und CHY*, 2011) verwendet haben. Da sich aktuell nicht nur das Klima, sondern auch die Landschaft im Wandel befindet, fokussieren aktuelle Weiterentwicklungen in der hydrologischen Modellierung auf die Integration und Rückkoppelung relevanter Elemente des Landschaftswandels in den hydrologischen Kreislauf. *Schattan et al.* (2013) zeigten, wie sich z. B. eine Änderung der Biomasse und Artenzusammensetzung in den Wäldern von Tessin und Wallis auf den Wasserkreislauf auswirken dürfte. Dabei war eine interessante Rückkoppelung zwischen Höhenlage, Abflussbildung und Verdunstung zu beobachten. Parallel dazu werden immer genauere und physikalisch besser abgestützte Methoden entwickelt, welche den Rückgang der Gletscher voraussagen können (*Huss et al.*, 2008).

Betreffend der gegenwärtigen Wasserhaushaltsbilanzierung dürfte es demnächst möglich sein, operationelle Produkte zu den Schneeressourcen (*Jonas*, 2012) in die Berechnungen miteinzubeziehen. *Jörg-Hess et al.* (2015) zeigten für das Einzugsgebiet des Alpenrheins, dass die Berücksichtigung aktueller Schneeinformationen im Modell zu einer kleineren Differenz zwischen vorhergesagtem und gemessenem Abflussvolumen beiträgt. Allgemein sind Vorhersagen von zentraler Bedeutung für eine kurzfristige und langfristige Planung des Managements von Wasserressourcen in der Schweiz. Aktuell wird zunehmend zum Thema der Monatsvorhersagen geforscht (*Zappa et al.*, 2012; *Jörg-Hess et al.*, 2015). Zudem dienen neuerdings Modelle auch der Früherkennung kritischer Trockenheit (*Stähli et al.*, 2013; www.trockenheit.ch). Die Werkzeuge, welche hier für die Bilanzierung des Wasserhaushalts der Schweiz verwendet wurden, können mittelfristig auch für solche Vorhersagen konfiguriert werden.

Trotz der grossen Fortschritte, die in den letzten Jahren bei der hydrologischen Modellierung gemacht wurden und in Zukunft weiter zu erwarten sind, darf nicht vergessen werden, dass die Modelle auf qualitativ hochwertige Messungen des Niederschlags und des Abflusses angewiesen sind. Messwerte werden sowohl für die Eichung als auch für den Betrieb der Modelle benötigt. Es gilt auch hier die einfache Regel: Je besser die Qualität der Daten, die in das Modell einfliessen, desto besser sind die Resultate, die damit erzeugt werden. Es ist deshalb selbstverständlich, dass dem Aspekt Wasserhaushalt bei der Entwicklung von langfristigen Messnetzkonzepten beim Bund und bei den kantonalen Fachstellen eine besondere Bedeutung zukommen muss.

Danksagung

Wir danken der MeteoSchweiz und dem Bundesamt für Umwelt, BAFU, für die Bereitstellung der Datengrundlagen für die CCHYDRO-Studie und für die ergänzenden Daten seit 2009.

Literatur

Andres, N., Badoux, A., Hegg, C. (2016). Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2015. Rutschungen, Murgänge, Hochwasser und Sturzereignisse. «Wasser Energie Luft», 108. Jg., Heft 1: 1–8.

Bernhard, L., Zappa, M. (2012). Schlussbericht CCHydrologie: Teilprojekt WHH–CCHydro: Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete. Technical Report, WSL, Birmensdorf.

Bernhard, L., Pflugshaupt, C., Kotlarski, S., Zappa, M. (2013). Auswirkungen der CH2011 Klimaszenarien auf die Wasserresourcen – eine Abschätzung für die Schweiz. In: Weingartner, R.; Schädler, B. (eds) Wasserressourcen im globalen Wandel. Hydrologische Grundlagen – von der Messung zur Anwendung. Beiträge zum Tag der Hydrologie 4. bis 6. April 2013 an der Universität Bern. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung Heft 32.13. D-Hennef, DWA. 93–102.

Bundesamt für Umwelt, BAFU, (Hrsg.) (2012). Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt «Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz» (CCHYDRO). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217: 76 S.

Bundesamt für Umwelt, BAFU, (Hrsg.) (2016). Hitze und Trockenheit im Sommer 2015. Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1629: 108 S.

CH2011 (2011). Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978 3 033 03065 7.

Farinotti, D., Bauder, A., Funk, M. (2011). Veränderung der Gletscher und ihrer Abflüsse 1900–2100 – Fallstudien Gornergletscher und Mattmark. «Wasser Energie Luft», 103 (4), 273–278.

Hubacher, R., Schädler, B. (2010). Wasserhaushalt grosser Einzugsgebiete im 20. Jahrhundert. Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES), Tafel 6.6. Bern.

Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., Funk, M. (2008). Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. Hydrol. Process., 22: 3888–3902.

Isotta, F. A., Frei, C., Weilguni, V., Perčec Tadić, M., Lassègues, P., Rudolf, B., Pavan, V., Cacciamani, C., Antolini, G., Ratto, S. M., Munari, M., Micheletti, S., Bonati, V., Lussana, C., Ronchi, C., Panettieri, E., Marigo, G., Vertačnik, G. (2014). The climate of daily precipitation in the Alps: development and analysis of a high-resolution grid dataset from pan-Alpine rain-gauge data. Int. J. Climatol., 34: 1657–1675.

Jonas, T. (2012). Monitoring von Schneewasserressourcen in der Schweiz, Alpine Schnee- und Wasserresourcen gestern, heute, morgen. Forum für Wissen. 2012: 7-12. ISSN 1021–2256.

Jörg-Hess, S., Griessinger, N., Zappa M. (2015). Probabilistic Forecasts of Snow Water Equivalent and Runoff in Mountainous Areas. J. Hydrometeor, 16, 2169–2186.

Jörg-Hess, S., Björnsen Gurung, A., Stähli, M. (2014). Wasserressourcen der Schweiz. Thematische Synthese 1: Dargebot und Nutzung – heute und morgen. Aqua & Gas, 11, 18–22.

Köplin, N., Viviroli, D., Schädler, B., Weingartner, R. (2010). How does climate change affect mesoscale catchments in Switzerland? – A framework for a comprehensive assessment. Advances in Geosciences, 27, 111–119.

Liechti, K., Barben, M., Zappa, M. (2017). Wasserhaushalt der Schweiz im Jahr 2016 – Einordnung und Besonderheiten. «Wasser Energie Luft», Heft 3/2017: S. 213–214.

Menzel, L. (1997). Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Zürcher Geographische Schriften, Nr. 67. Zürich.

Menzel, L., Lang, H., Rohmann, M. (1999). Mittlere jährliche aktuelle Verdunstungshöhen 1973–1992. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 4.1, Landeshydrologie und -geologie, Bern.

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

Schädler, B., Bigler, R. (1995). Wasserhaushalt der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Hydrologische Mitteilungen der LHG, Nr. 21, Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Schädler, B., Weingartner, R. (2002b). Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961–1990. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.3, Bern, Tafel 6.1. Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Schädler, B., Bigler, R. (1992). Hydrologischer Atlas der Schweiz, Kap. Wasserhaushalt

grosser Einzugsgebiete, Tafel 6.1. Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Schädler, B., Weingartner, R. (2002a). Ein detaillierter hydrologischer Blick auf die Wasserressourcen der Schweiz. Niederschlagskartierung im Gebirge als Herausforderung. «Wasser Energie Luft», 94(7/8), 189–197.

Schattan, P., Zappa, M., Lischke, H., Bernhard, L., Thürig, E., Diekkrüger, B. (2013). An approach for transient consideration of forest change in hydrological impact studies. In: Climate and Land Surface Changes in Hydrology, Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013 (IAHS Publ. 359). pp 311–319.

Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie (SGHL) und Hydrologische Kommission (CHy) (Hrsg.) (2011). Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz. 38, 28 pp.

Sevruk, B. (1985). Systematischer Niederschlagsmessfehler in der Schweiz. In: Der Niederschlag in der Schweiz. Beitr. z. Geologie der Schweiz – Hydrologie, Nr. 31:65-86, Bern.

Sevruk, B., Kirchhofer, W. (1992). Mittlere jährliche Korrekturen der gemessenen Niederschlagshöhen 1951–1980. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.3, Landeshydrologie und -geologie, Bern.

Sinreich, M. et al. (2012). Grundwasserressourcen der Schweiz – Abschätzung von Kennwerten. In: Aqua & Gas Heft 9/2012.

Speich, M., Bernhard, L., Teuling, A.J., Zappa, M. (2015). Application of bivariate mapping for hydrological classification and analysis of temporal change and scale effects in Switzerland. Journal of Hydrology. Volume 523, Pages 804–821.

Stahl, K., Weiler, M., Freudiger, D., Kohn, I., Seibert, J., Vis,M., Gerlinger,K., Böhm, M. (2016). Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels. Abschlussbericht an die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR).

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

Stähli, M., Raymond Pralong, M., Zappa, M., Ludwig, A., Paul, F., Bosshard, T., Dupraz, Ch. (2011). Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit und Stromproduktion an den Beispielen Oberhasli und Mattmark. Wasser, Energie, Luft, Heft 4/2011: S. 285-291.

Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. Environmental Modelling & Software. 24(10): 1209–1222.

Weingartner, R., Viviroli, D., Schädler, B. (2007). Water resources in mountain regions: a methodological approach to assess the water balance in a highland-lowland-system. Hydrol. Process., 21: 578–585.

Zappa, M., Bernhard, L., Fundel, F., Jörg-Hess, S. (2012). Vorhersage und Szenarien von Schnee- und Wasserressourcen im Alpenraum. Forum für Wissen 2012, pp. 19-27. ISSN 1021-2256.

Zappa, M., Kan, C. (2007). Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. Natural Hazards and Earth System Sciences, 7:375-389.

Zappa, M. (2002). Multiple-Response Verification of a Distributed Hydrological Model at Different Spatial Scales. Dissertation No. 14895, ETH Zurich, Institute for Atmospheric and Climate Science. 161 pp.

Adresse der Verfasser:
Dr. Massimiliano Zappa, Dr. Katharina Liechti, Mattias Deller, Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
massimiliano.zappa@wsl.ch
Dr. Martin Barben, Bundesamt für Umwelt, Abteilung Hydrologie, CH-3003 Bern-Ittigen