

Tafel 6.5 Wasserhaushalt ausgewählter mittelgrosser Einzugsgebiete 1961–2007

Einleitung

Die Kenntnis der Charakteristiken von Komponenten des Wasserkreislaufs (Niederschlag, Abfluss, Verdunstung und Speicheränderungen) in unbeeinflussten mittelgrossen Einzugsgebieten ist sehr wichtig, da deren Wasserbilanzen unmittelbar die klimatischen Bedingungen widerspiegeln und damit mögliche Veränderungen deutlicher erkennen lassen. Wegen der zahlreichen Eingriffe an Oberflächengewässern (Wasserkraftnutzung, Trink- und Brauchwassernutzung sowie Seeregulierung) findet man in der Schweiz aber nur wenige Einzugsgebiete mit unbeeinflussten natürlichen Abflussverhältnissen, in denen diese Wasserhaushaltskomponenten auch zuverlässig bestimmt werden könnten. Die Vorgängerinstitution der Abteilung Hydrologie des Bundesamtes für Umwelt BAFU begann 1957 mit der Errichtung eines Netzes von hydrologischen Untersuchungsgebieten (HUG). Dabei stand das Ziel im Vordergrund, mit Langzeitmessungen die natürlichen Veränderungen im Wasserkreislauf erfassen zu können. Damit in möglichst allen Landschafts- und Klimaregionen der Schweiz Aussagen zum Wasserkreislauf gemacht werden können, wurde darauf geachtet, bezüglich Regimetyp, Höhenlage etc. ganz verschiedenartige Einzugsgebiete in das Netz der HUG aufzunehmen.

Entwicklung von Niederschlag und Abfluss

Für zwölf über die ganze Schweiz verteilte Einzugsgebiete sind der langfristige Verlauf und das saisonale Verhalten der Wasserhaushaltsglieder Niederschlag und Abfluss dargestellt. Die Einzugsgebietsniederschläge wurden aus räumlichen Niederschlagsanalysen des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz geschätzt. Diese gesamtschweizerischen Analysen haben eine räumliche Auflösung von ca. 2 km und nutzen Daten von rund 430 Messstationen. Die Auswertungen wurden mit einem modifizierten SYMAP-Algorithmus durchgeführt [4,6], wobei als Ausgangsdaten nicht die Niederschlagswerte selber, sondern die relativen Abweichungen vom Langzeitmittel verwendet wurden. Dieses Vorgehen reduziert den systematischen Fehler aus der nicht repräsentativen Höhenverteilung der Messstationen. Aus den gerasterten Niederschlägen wird ein Gebietsmittelwert gebildet. Die so geschätzten Gebietsniederschläge entsprechen nicht immer den wahren Niederschlägen, da in einigen exponierten Einzugsgebieten der Niederschlag stark unterschätzt wird. Sie eignen sich aber ausgezeichnet für die Darstellungen des relativen Verlaufs.

Die Diagramme zum Verlauf des 10-jährigen gleitenden Mittelwerts von Niederschlag und Abfluss beschreiben einerseits die Zu- oder Abnahme des Mittelwerts der Perioden von 1961–1970 bis 1998–2007 (x-Achse) und andererseits die Veränderung der Variabilität für den gleichen Zeitraum (Standardabweichung; y-Achse). Zur besseren Lesbarkeit sind die einzelnen Punkte durch eine Linie verbunden und ausgewählte Perioden hervorgehoben. Vor der Schätzung der Standardabweichung wurde das betrachtete Zeitfenster jeweils trendbereinigt, um trendbedingte Variabilität zu eliminieren (vgl. [2,5]). Zur besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen Einzugsgebiete wurden die Werte schliesslich relativ zur Ausgangs- bzw. Referenzperiode 1961–1970 standardisiert. Ein Bootstrap-Ansatz [3] diente zur Berechnung des 95 %-Signifikanzbereichs (schattierte Fläche): Zunächst wurden aus der Referenzperiode durch Ziehen und Zurücklegen 1000 künstliche Zeitreihen generiert (inkl. Trendbereinigung), aus welchen wiederum die Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet wurden. Anschliessend konnte um diese künstlichen Werte mit Hilfe eines zweidimensionalen Gauss'schen Kerndichteschätzers der Signifikanzbereich berechnet werden.

Im unteren linken Teil der Figuren wird das saisonale Verhalten gezeigt, indem für drei verschiedene Perioden (ganze Periode 1961–2007; früh: 1961–1970; spät: 1998–2007) für Niederschlag und Abfluss die mittleren Pardé-Koeffizienten dargestellt werden. Mit Hilfe dieser

Diagramme kann abgeschätzt werden, wie sich eine Veränderung des Niederschlagsregimes auf das Abflussregime auswirkt.

Der Vergleich des Verhaltens von Niederschlag und Abfluss verschiedener Einzugsgebiete zeigt markante Unterschiede. So hat beispielsweise im Einzugsgebiet der Massa die Variabilität und vor allem die mittlere Jahresabflussmenge in den letzten über 40 Jahren deutlich zugenommen. Demgegenüber sind die Verhältnisse am Allenbach und am Hinterrhein sehr viel konstanter geblieben. Und während man beim Abflussregime der Massa, im Vergleich der frühen mit der späten Periode, wenig Unterschiede erkennt, sind die Abflüsse am Allenbach im Hochsommer zurückgegangen und in den Wintermonaten etwas angestiegen. Ein noch etwas anderes Bild zeigen tiefer gelegene Einzugsgebiete wie die Sense oder die Sitter. Die Start- und Endpunkte in den Verlaufsgrafiken liegen hier relativ nahe beieinander. In den Regimegrafiken machen sich jedoch deutliche Unterschiede beim Vergleich der frühen mit der späten Periode bemerkbar. Grössere Veränderungen erkennt man hier schon im Frühjahr während der Schneeschmelze. Im Mittel der letzten Jahre kommt der Niederschlag früher zum Abfluss (März); dadurch ergibt sich ein Rückgang des mittleren Abflusses in den Monaten April und Mai. Die angesprochenen Verschiebungen lassen sich allerdings nicht alleine mit den Veränderungen im Niederschlagsregime erklären, denn die Temperatur – und damit die Lage der Schneefallgrenze – spielt in höher gelegenen Einzugsgebieten ebenfalls eine sehr wichtige Rolle. In einem Einzugsgebiet mit grosser mittlerer Höhe fallen die Niederschläge auch bei erhöhten Temperaturen im Winter als Schnee und bei einem grossen Vergletscherungsgrad fliessen die höchsten Abflüsse im Hochsommer während der Gletscherschmelze ab. Das bedeutet, dass sich hier das Regime kaum ändert. In tieferen Lagen fallen in einem wärmeren Klima auch im Winter die Niederschläge vermehrt als Regen und fliessen damit unmittelbar ab. Die Speicherwirkung der Schneedecke nimmt ab und es kommt zu Verschiebungen beim Regime.

Als Ergänzung zu den Verlaufsgrafiken sind im unteren rechten Teil der Figuren die Abweichungen der Jahresmittelwerte des Niederschlags und des Abflusses von den langjährigen Mittelwerten für die ganze Periode 1961 bis 2007 dargestellt.

Charakterisierung der Einzugsgebiete

Die beiden Karten und die Tabelle in der rechten Spalte der Kartenseite liefern nützliche Informationen bei der Interpretation der Niederschlags- und Abflussgrafiken. Das bereits erwähnte Problem mit dem unsicheren absoluten Niveau des Niederschlags wird in der oberen Karte teilweise gelöst, indem der blaue Teil der Säulen den mittleren Abfluss und der rote Teil der Säulen die mittlere Verdunstung darstellen (modellierter Mittelwert der Periode 1973–1992 gemäss Tafel 4.1). Die Gesamthöhe der Säule steht also für eine Schätzung des mittleren Niederschlags; das Einzugsgebiet wird in der Karte entsprechend gekennzeichnet. Die Abflusswerte stammen aus dem Messnetz des BAFU und wurden wo nötig um die anthropogenen Einflüsse (Zu- und Ableitungen) korrigiert.

Die untere der beiden Karten ist eine Visualisierung von Tabelle 1. Die Parameter stammen aus [1] und stehen für alle HUG zur Verfügung.

Modellierung des Wasserhaushalts

Um genauere Einblicke in den Wasserhaushalt eines Einzugsgebietes zu erhalten, können hydrologische Modelle eingesetzt werden. Diese simulieren – je nach Modellkomplexität in unterschiedlichem Detaillierungsgrad – relevante Komponenten des Wasserkreislaufs (Fig. 1) und werden üblicherweise am gemessenen Abfluss kalibriert. Das hier als Beispiel dienende hydrologische Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-EVApotranspiration Hydrotope Model) [7] besteht aus Einzellinearspeichern, welche Schneedynamik (SSNO), Interzeption (SI), Bodenfeuchtdynamik (SSM) und Abflussbildung (SUZ, SLZ₁₋₃) abbilden (Fig. 2); für vergletscherte Gebiete steht zusätzlich ein Gletschermodule zur Verfügung. Die Speichermodule bilden wiederum den Ausgangspunkt für die modellierten Wasserflüsse, namentlich Schneeschmelze (SM), Verdunstung (ESM, EI), Infiltration (IF), Perkolation (PERC) sowie die einzelnen Abflusskomponenten (R_0 , R_1 , R_2) und den Gesamtabfluss (R_{TOT}). Als Modellantrieb

dienen stündlich beobachtete Werte von Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung.

Für sechs ausgewählte Einzugsgebiete zeigt Figur 3 jeweils links den monatlichen Verlauf der ausschlaggebenden Ein- und Ausgangsgrößen des Wasserhaushalts im Mittel der Jahre 1984 bis 2003.

Der Niederschlag bildet die primäre Eingangsgröße und speist das System mit Wasser. In Abhängigkeit der räumlichen Lage des Gebietes besitzt er im langjährigen Mittel eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Saisonalität. Der Schneespeicher (SSNO) übernimmt im Winter die Funktion einer Ausgangsgröße (Schneerücklage), während er von Frühjahr bis Sommer eine Eingangsgröße (Schneesmelze) darstellt. Die Schneedynamik zeigt in den nival bis glazial geprägten Gebieten Allenbach (nival alpin), Dischmabach (b-glacio-nival) und Minster (nival de transition) einen markanten Einfluss auf die saisonale Wasserbilanz. Ebenfalls jahreszeitlich differenziert ist das Verhalten des Grundwasserspeichers (SLZ_{1-3}), welcher in den Monaten mit grösserem Wasserdargebot eine Ausgangsgröße ist (Rücklage in Grundwasserspeicher), in der übrigen Zeit im Mittel hingegen eine Eingangsgröße (Aufbrauch aus Grundwasserspeicher). Während die Rücklage in den Grundwasserspeicher in alpinen Gebieten mit der Schneesmelze verknüpft ist (z.B. Dischmabach), findet sie in mittelländischen und jurassischen Gebieten im Winter statt, wenn die Verdunstung gering ist (z. B. Mentue). Die Verdunstung selbst ist eine Ausgangsgröße. Sie setzt sich aus Interzeptions- (EI) und Bodenverdunstung (ESM) zusammen und besitzt in allen Gebieten eine ausgeprägte Saisonalität mit Maximalwerten im Sommer. Der Abfluss schliesslich ist im wesentlichen eine Funktion der oben genannten Ein- und Ausgangsgrößen und bildet diejenige Ausgangsgröße, welche das hydrologische Verhalten des Gebietes als ganzes charakterisiert. Das Modell simuliert getrennte Werte für Oberflächen- (R_0), Zwischen- (R_1) und Basisabfluss (R_2), welche sich zum Gesamtabfluss (R_{TOT}) summieren. Die modellierten Änderungen des Bodenfeuchte- (SSM) und des oberen Abflussspeichers (SUZ) sind aus Gründen der Lesbarkeit nicht dargestellt. Deshalb entsprechen sich die Beträge von Ein- und Ausgangsgrößen in den einzelnen Monaten nicht exakt. Über das ganze Jahr gesehen ist die simulierte Wasserbilanz jedoch geschlossen.

Da PREVAH sich am Prinzip der hydrologisch ähnlich reagierenden Teilflächen (Hydrotope) orientiert, sind neben punktuellen Aussagen für den Gebietsauslass auch räumlich differenzierte Analysen aller modellierten Größen möglich. Die Ergebnisse für den modellierten jährlichen Gesamtabfluss sind in Figur 3 jeweils rechts in der hier für das Modell gewählten Auflösung von $500\text{ m} \cdot 500\text{ m}$ dargestellt. Deutlich erkennbar ist in allen Gebieten die Höhenabhängigkeit des Gesamtabflusses, welche im wesentlichen durch die Niederschlagszunahme mit steigender Höhe über Meer bedingt ist und durch die gleichsinnige Abnahme der aktuellen Verdunstung weiter verstärkt wird. Aufgrund der grösseren Reliefunterschiede ist die Höhenabhängigkeit des Abflusses in den alpinen und voralpinen Gebieten (Allenbach, Dischmabach, Minster) besonders gut erkennbar, während sie im Mittelland (Murg, Mentue, Scheulte) weniger ausgeprägt in Erscheinung tritt.

Literatur

- [1] **Aschwanden, H. (1996):** Einzugsgebietskenngrößen der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Hydrologische Mitteilungen Nr. 23, Bern.
- [2] **Della-Marta, P.M. et al. (2007):** Doubled length of western European summer heat waves since 1880. In: J. Geophys. Res., Vol. 112(D15), Washington.
- [3] **Efron, B., Tibshirani, R. (1993):** An introduction to the bootstrap. New York.
- [4] **Frei, C., Schär, C. (1998):** A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations. In: Int. J. Climatol. 18 (8):873–900, Chichester.
- [5] **Scherrer, S.C. et al. (2005):** European temperature distribution changes in observations and climate change scenarios. In: Geophysical Research Letters, 32(L19705), Washington.
- [6] **Shepard, D.S. (1984):** Computer Mapping: The SYMAP Interpolation Algorithm. In: Gaile G.L., Willmott, C.J. (Ed.): Spatial Statistics and Models:133–145, Dordrecht.
- [7] **Viviroli, D., Gurtz, J., Zappa, M. (2007):** The Hydrological Modelling System PREVAH. Geographica Bernensia P40. Bern.