

Die mittleren Abflüsse über die ganze Schweiz Ein optimierter Datensatz im 500x500 m Raster¹

Pfaundler Martin¹, Zappa Massimiliano²

¹ *Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern*

² *Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf*

Zusammenfassung

Es wird ein optimierter Datensatz der mittleren jährlichen und mittleren monatlichen Abflüsse über die ganze Schweiz (für die Periode 1981-2000) im 500 m Raster vorgestellt. Er ist das Produkt aus dem Abgleich zweier Ursprungsdatensätze. Der eine bringt aus einer Modellierung zeitlich und räumlich fein aufgelöste, aber unsichere, der andere grob aufgelöste, dafür zuverlässigere Information ein. Aus der Kopplung resultiert ein Datensatz mit erhöhtem Informationsgehalt. Eine Validation zeigt die erzielte Verbesserung bei der Abschätzung und gibt Hinweise auf die zu erwartende Genauigkeit bei der Anwendung an ungemessenen Gewässern. Abschliessend wird auf die Bezugsbedingungen des Datensatzes und Anwendungsgrenzen resp. -empfehlungen eingegangen.

Résumé

Les débits moyens annuels et mensuels (période 1981-2000) sont représentés pour toute la Suisse sous la forme d'une grille composée de cellules de 500 m. Celle-ci est issue de la combinaison de deux jeux de données originales de nature différente. Le premier fournit une information avec une haute résolution spatiale et temporelle mais présente une certaine incertitude, car les données sont tirées d'une modélisation. Le deuxième est composé de données plus fiables mais sa résolution spatiale est réduite. Ce couplage produit un jeu de données riche d'information. Un exercice de validation démontre l'amélioration des valeurs estimées et fournit d'autre part quelques indications sur l'exactitude probable lors de l'application à des cours d'eau non jaugés. Finalement, les conditions d'obtention du jeu de données ainsi que des recommandations concernant les limites d'application sont présentés.

1 Einleitung

Der mittlere jährliche Abfluss MQ kann wohl als die klassische Kenngrösse zur Charakterisierung der hydrologischen Verhältnisse an einem Gewässer bezeichnet werden. Obwohl MQ eine fundamentale Grösse des Wasserhaushaltes und insbesondere des Abflussregimes darstellt, und da man weiters vermuten darf, dass die Modellierung dieser Grösse als auch regionalisierte Aussagen im Vergleich zu den hydrologischen Extrema Niederwasser und Hochwasser „einfacher“ sei, wurde diesem Parameter in der Schweiz verhältnismässig wenig Beachtung seitens der Wissenschaft geschenkt. Zu erwähnen sind hierzu die Arbeiten von Aschwanden und Weingartner (1985), welche eine Typisierung der Abflussregimes mittels Pardé-Koeffizienten (=auf MQ bezogene monatliche Abflüsse) vorgenommen haben (vgl. Tabelle 1).

Dazu hat Aschwanden (1986) regional differenzierte Regressionsbeziehungen zur Bestimmung von MQ aufgestellt, welche klimatische und geographische Einzugsgebietsparameter benötigen (siehe auch HADES-Tafel 5.2). In Pfaundler et al. (2006) wurden Untersuchungen zur Variabilität der Jahres- und Monatsabflüsse, insbesondere in Abhängigkeit des Abflussregimetyps, gemacht. Weiters liegen mit der HADES-Tafel 6.3

¹ Dieser Artikel wird Ende 2006, anfangs 2007 in der Fachzeitschrift «Wasser Energie Luft» unter selbem Titel erscheinen.

(„Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961-1990“, Schädler und Weingartner, 2002) Aussagen zu MQ für die Bilanzgebiete der Schweiz vor. Letztere besitzen zwar eine hohe Zuverlässigkeit (da soweit möglich sich auf Messdaten abstützend und auf Einhaltung der Wasserhaushaltsbilanz hin überprüft), weisen aber nur eine geringe räumliche (eben die erwähnten Bilanzgebiete) und zeitliche (Jahresabflüsse, aber keine Aussagen zur monatlichen Verteilung) Auflösung auf.

Regime - Code	Regime - Name
1	a-glaciaire
2	b-glaciaire
3	a-glacio-nival
4	b-glacio-nival
5	nivo-glaciaire
6	nival alpin
7	nival de transition
8	nivo-pluvial préalpin
9	pluvial supérieur
10	pluvial inférieur
11	nivo-pluvial jurassien
12	pluvial jurassien
13	nival méridional
14	nivo-pluvial méridional
15	pluvio-nival méridional
16	pluvial méridional

Tabelle 1. Bezeichnung und Code der 16 Abflussregimetypen der Schweiz

Zur Abschätzung von mittlerem jährlichem MQ und mittleren monatlichen Abflüssen MQ^i (mit $i = 1..12$) an ungemessenen Fliessgewässern sind die erwähnten Grundlagen für viele Fragestellungen unbefriedigend. Aus diesem Grund wurden beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) Abklärungen zu möglichen Verbesserungen getroffen.

2 Ziel und Ausgangslage

Vor dem eingangs erwähnten Hintergrund wurde das Ziel formuliert, eine räumlich wie zeitlich besser aufgelöste Grundlage zu schaffen, welche auch in der Anwendung Erleichterungen bringt und eine zufrieden stellende Genauigkeit aufweist. Als geeigneter Ausgangspunkt erwiesen sich dabei die im Rahmen von Zappa (2002) publizierten Arbeiten. In dessen Rahmen wurde unter Verwendung des hydrologischen Einzugsgebietsmodells PREVAH in einem Simulationsexperiment die Wasserbilanz auf der Basis von Tageswerten für den 20-jährigen Zeitraum von 1981 bis 2000 modelliert. Dies wurde für die ganze Schweiz mit einer Auflösung in Rasterzellen von 500 m Länge durchgeführt (dieser Datensatz wird in der Folge als Ausgangsdatsatz bezeichnet, und ist in Kapitel 2.1 näher beschrieben). Mit der damit berechneten natürlichen Abflussbildung liegt für jede Rasterzelle die Information über den mittleren Jahresabfluss, die mittleren monatlichen Abflüsse und in Folge der Abflussregimetyp und die Pardé-Koeffizienten vor. Damit wäre grundsätzlich die als Ziel formulierte höhere räumliche und zeitliche Auflösung gegeben. Da diese Information in Form eines Rasterdatensatzes vorliegt, ist es auch für Anwendungszwecke attraktiv. Unabhängig voneinander wurde der Datensatz sowohl in Zappa (2002) als auch durch das BAFU auf seine Genauigkeit bei der Abschätzung von MQ und MQ^i untersucht, indem für eine Reihe mesoskaliger Gebiete (Einzugsgebietsgrösse ca. 5-500 km²) unterschiedlicher Regimetypen die damit gewonnenen Schätzwerte mit den aus Messdaten berechneten Werten verglichen wurden. Dabei stellte sich heraus, dass die Schätzwerte die Form der Abflussverteilung über das Jahr (d.h. die Pardé-Koeffizienten) gut wiedergeben. Die Resultate dieser Validationen zeigten aber teilweise deutliche Unterschiede in den Absolutwerten von MQ und MQ^i . Der Datensatz erfüllt damit eines der o.a. Teilziele nicht und wurde damit in der Ausgangsform als nicht geeignet für den Einsatz in der Praxis erachtet.

Es wurde daher ein BAFU-WSL Projekt mit dem Ziel lanciert, den erwähnten Datensatz zu optimieren und in eine Fassung zu überführen, welche für Endbenutzer von praktischem Nutzen ist und der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt werden kann.

Nach der Beschreibung des Ausgangsdatsatzes enthält das Folgekapitel die Methodik zur Optimierung des Datensatzes. Im Anschluss werden die gewonnenen Resultate beschrieben. Danach gibt ein Kapitel über die Validation des optimierten Datensatzes Auskunft über die Verbesserung und die erwartete Genauigkeit. Es folgen Angaben zum Vorgehen und den Grenzen bei der Verwendung für die Abschätzung an ungemessenen Gebieten mit illustrativen Beispielen. Nach der abschliessenden Diskussion werden Hinweise zu den Bezugsbedingungen des Datensatzes gegeben.

2.1 Der Ausgangsdatsatz

PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration HRU related Model, <http://www.wsl.ch/hazards/prevah>) ist ein räumlich verteiltes hydrologisches Modell, welches seit dem Forschungsprogramm NFP31 Mitte der 90er-Jahre als Forschungsmodell im Alpenraum eingesetzt wird (Gurtz et al., 1997, Zappa et al., 2003, Verbunt et al., 2005). PREVAH erfordert die Untergliederung eines Einzugsgebietes in Teilflächen mit ähnlichen hydrologischen Eigenschaften (HRUs). Diese Gliederung erfolgt durch ein auf Rauminformationen bezogenes Clustering-Verfahren (Zappa, 2002). Das eher konzeptionell aufgebaute Modell umfasst als wesentliche Grundbestandteile: ein Schneemodul, ein Gletscherschmelzmodul, ein Interzeptionsmodul, ein Modul zur Feuchteausschöpfung durch Evapotranspiration, ein Bodenspeicher- und Abflussbildungsmodul sowie ein Grundwasser- und Abflusskonzentrationsmodul.

Zappa (2002) und Perl (2002) realisierten ein Simulationsexperiment (Tabelle 2) zur Ermittlung der realen Evapotranspiration *ET*, der natürlichen Abflussbildung und der Wasserbilanz der gesamten Schweiz für den 20-jährigen Zeitraum von 1981 bis 2000. Als räumliche Grundauflösung wurde eine Maschenweite von 500 x 500 m² gewählt.

Untersuchungszeitraum	1981 – 2000
Räumliche Auflösung	500x500 m ² , nach HRUs zusammengefasst
Zeitschritt	Eingangsdaten: 1 Tag Integrationschritt: 1 Stunde
Bodenbedeckung	17 Kategorien
Regionalisierung	9 Klimaregionen nach Zappa (2002)
Ergebnisse	Bis zu eine Karte pro Tag der Hauptkomponenten des Wasserhaushaltes

Tabelle 2. Eckdaten der Konfiguration des Simulationsexperimentes für die räumlich differenzierte Bestimmung der natürlichen Wasserbilanz der Schweiz

Die Schweiz wurde ausgehend von der Niederschlagsklimatologie von Schwarb et al. (2001) in neun Klimaregionen unterteilt, die dann als Grosseinzugsgebiete betrachtet wurden. Die Klimaregionen wurden zur genaueren Berücksichtigung der horizontalen Variabilität der Klimaelemente in kleinere mesoskalige Teileinzugsgebiete untergliedert. Für die Berücksichtigung der vertikalen Variabilität der Klimaelemente, wie zum Beispiel die für die Akkumulation und Schmelze von Schnee äusserst wichtige Temperaturgradienten, wurden die Teileinzugsgebiete weiter in Höhenzonen von 200 m unterteilt, welche als meteorologische Grundeinheiten definiert wurden. Innerhalb der meteorologischen Grundeinheiten wurden die einzelnen Rasterelemente zu HRUs zusammengefasst.

Die räumlich differenzierte und weitestgehend automatische Grundparametrisierung des Modells erfolgte über die Rauminformationen zur Topographie (Digitales Geländemodell), zur Landnutzung/Bodenbedeckung (Arealstatistik) und zu den Bodencharakteristika (Bodeneignungskarte). Die einzugsgebietsbezogenen Parameter wurden regionsspezifisch

manuell kalibriert. Die Simulation wurde separat für jede Klimaregion mit räumlich auf die meteorologischen Grundeinheiten interpolierten Tageswerten der benötigten Klimaelemente (Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Sonnenscheindauer) vorgenommen.

Die Simulationsergebnisse konnten in ihrer räumlichen Differenzierung für jedes Rasterelement (Standort), beliebige Einzugsgebiete, für jede Region und/oder die gesamte Schweiz sowohl für den Gesamtzeitraum, jedes Jahr, jede Jahreszeit, jeden Monat und/oder jeden Tag ausgewertet werden.

Für die Verifikation der Simulationsergebnisse wurde eine Vielzahl von Datensätzen herangezogen (Zappa, 2002). Dabei handelte es sich sowohl um lokale Messdaten an einzelnen Standorten, wie auch um integrale Daten für Einzugsgebiete und räumliche Daten für die gesamte Schweiz. Unterschiedliche Aspekte der Simulationsergebnisse wurde einzeln und kreuzweise verifiziert. Man spricht dabei von einem „Multiple-Response Verification“ Ansatz. Im Detail wurden folgende Datensätze verwendet:

- Messwerte der Verdunstung und der Bodenfeuchte eines wägbaren Lysimeters
- Messwerte des Wasseräquivalentwertes der Schneedecke an rund 100 Standorten in der Schweiz
- Monatliche Abflüsse von rund 30 Einzugsgebieten unterschiedlichen Abflussregimetyps
- Daten und Ergebnisse aus mehreren Arbeiten, welche als Themen im Hydrologischen Atlas der Schweiz, HADES, publiziert sind (z.B. Tafel 6.3, Schädler und Weingartner 2002)
- Bearbeitete Satellitenaufnahmen der räumlichen Muster der Schneebedeckung

Über diese Verifikation konnte auf eine gute Qualität der Simulationsergebnisse geschlossen werden. Die Nachbildung des gemessenen MQ resultierte als das am wenigsten zufrieden stellende Teilergebnis, wie auch eine unabhängige Verifikation durch das BAFU bestätigte.

Die mit diesem Simulationsexperiment entstandenen Darstellungen der natürlichen Abflussregimetypen und der realen Evapotranspiration sind in die 2. Version des „Digitalen Atlases der Schweiz“ (www.atladerschweiz.ch) eingegliedert und können dort auch in Verbindung mit anderen Landschaftsmerkmalen in ihrer räumlichen und zeitlichen Dynamik betrachtet werden. An eine Publikation von MQ im Digitalen Atlas der Schweiz wurde vorerst verzichtet, weil die Unsicherheit der absoluten MQ -Werte gegenüber den relativen Werten (Pardé-Koeffizienten, Pardé, 1920) zu gross war.

3 Methodik zur Optimierung des Datensatzes

Dieses Kapitel besteht aus einem einleitenden Teil mit der Grundidee sowie einem anschliessenden Teil mit den Einzelschritten der Optimierungsmethodik.

Da wie erwähnt die Raster-Modellergebnisse des Ausgangsdatsatzes zwar den relativen Verlauf des Abflusses zufrieden stellend wiedergeben, dies bei den Absolutmengen des Abflusses aber nicht zutrifft, wurde ein Weg zur Optimierung der Genauigkeit gesucht. Ausgangspunkt bei den Überlegungen war dabei, dass mit dem vorhandenen Datensatz eine Grundlage vorliegt, die räumlich sehr fein aufgelöst ist und auch die monatliche Verteilung enthält, deren Manko die Genauigkeit des absoluten Niveaus der Abflüsse ist. Deshalb war der Ansatz eine Verknüpfung mit einer anderen Datenquelle, welche die gewünschte Korrektur auf das richtige „Abflussniveau“ beisteuert. Diese Information wurde in der HADES-Tafel 6.3 gefunden (Schädler und Weingartner, 2002), in welcher die Abflussmengen zwar „nur“ in der groben räumlichen Auflösung der Bilanzgebiete der Schweiz und als Jahreswerte vorliegen, die Zuverlässigkeit dieser Information wurde aber als

hoch eingestuft (weil mehrheitlich auf Messdaten und Wasserbilanzerwägungen basierend). Die Grundidee ist also die Verknüpfung in Form eines Abgleichs zweier Datensätze, wobei jeder „seine Stärke einbringt“: Der Ausgangsdatsatz weist eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung mit gut modellierter relativer Abflussverteilung auf, der HADES-Bilanzgebietdatsatz steuert eine relativ zuverlässige Angabe über die absoluten Abflusshöhen bei.

Formal ist dieser Abgleich in den nachfolgenden drei Gleichungen beschrieben. Es handelt sich dabei im Grunde um eine Bilanzgleichung, welche eine Disaggregation der Abflusswerte aus den HADES-Bilanzgebieten mit den Rasterwerten aus dem Ausgangsdatsatz beinhaltet.

Der mit dem hydrologischen Modell PREVAH berechnete Rasterdatsatz (Zappa, 2002) enthält pro Zelle für jeden Monat i einen Schätzwert des mittleren Abflusses MQ_j^i . Daraus berechnet sich der mittlere Abfluss für ein Bilanzgebiet j aus allen sich darin befindlichen Zellen (w) gemäss:

$$MQ_j^i - PREVAH = \frac{1}{n} \sum_{w=1}^n MQ_j^{i,w}$$

Aus dem Vergleich mit dem aus der HADES-Tafel 6.3. abgeleiteten Abflussmittelwert (da diese noch aufbereitet werden mussten mit $HADES^*$ bezeichnet) wird pro Monat und für jedes Bilanzgebiet eine Skalierungsgrösse A bestimmt:

$$A_j^i = \frac{MQ_j^i - HADES^*}{MQ_j^i - PREVAH}$$

Damit ergibt sich schliesslich der gesuchte optimierte mittlere Abfluss pro Rasterzelle:

$$MQ_j^{i,w} = MQ_j^{i,w} - PREVAH \cdot A_j^i$$

Für den Abgleich des Ausgangsdatsatzes mit den HADES-Daten mussten letztere noch einer Aufbereitung unterzogen werden. Zum einen liegt dies darin begründet, dass der Ausgangsdatsatz für die Periode 1981-2000 berechnet wurde, während dem HADES-Datsatz die Periode 1961-1990 zugrunde liegt. Weiters sind im HADES-Datsatz nur mittlere jährliche Abflüsse angegeben, der Abgleich (vgl. o.a. Gleichungen) erfolgt aber auf monatlicher Basis. Die folgenden zwei Teilabschnitte beschreiben das Vorgehen zur Lösung dieser beiden Punkte.

Umrechnung der jährlichen Abflüsse der HADES-Bilanzgebiete von der Periode 1961-1990 auf die Periode 1981-2000

Das gewählte Vorgehen zur Anpassung der Mittelwerte der Periode 1961-1990 an jene der Periode 1981-2000 lässt sich folgendermassen beschreiben: Einerseits wird für jedes Bilanzgebiet der Abflussregimetyp nach geographischen Kriterien bestimmt (vgl. Aschwanden und Weingartner, 1985).

Andererseits wurde eine Auswahl an Abflussmessstationen als Referenzstationen getroffen, welche eine nur geringe anthropogene Beeinflussung aufweisen und deren Messreihen möglichst die gesamte Periode 1961-2000 abdecken. Neben der Bestimmung des Abflussregimetyps wurde für diese Referenzstationen der mittlere jährliche Abfluss der beiden interessierenden Teilperioden berechnet und daraus der Verhältniswert bestimmt. Der kleinste Wert betrug dabei 0.95, der grösste 1.11, meistens bewegten sie sich zwischen 0.98-1.02, d.h. der mittlere Abfluss zwischen den Perioden 1961-1990 und 1981-2000 schwankte nur geringfügig. Die Umrechnung der mittleren Abflüsse der Bilanzgebiete für die Periode 1981-2000 erfolgt durch Zuweisung von Referenzstationen und damit des Verhältniswertes, welcher mit den ursprünglichen mittleren Jahresabflüssen 1961-1990 multipliziert wurde. Die

wichtigsten Kriterien für die Zuweisung von Referenzstationen zu Bilanzgebieten waren die Übereinstimmung des Abflussregimetyps und die Lage im gleichen Flussgebiet.

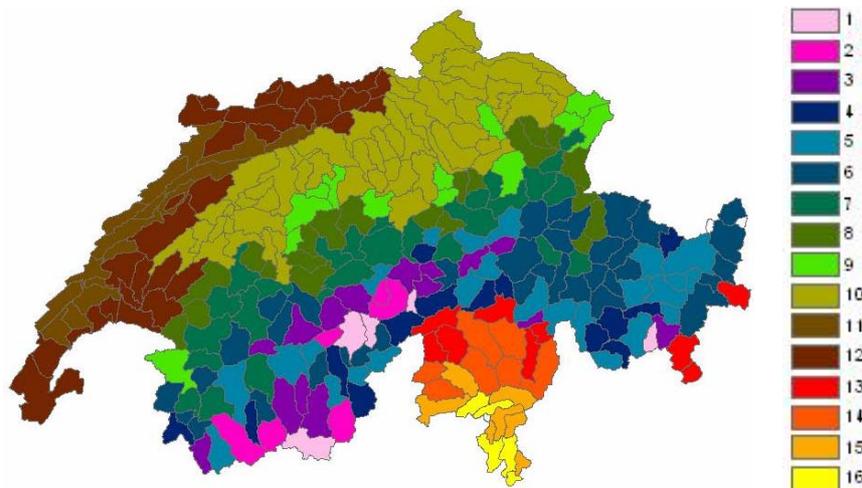


Bild 1. Bilanzgebiete der Schweiz: Zuweisung des Abflussregimetyps

Herunterbrechen der Jahresabflüsse der HADES-Bilanzgebiete auf monatliche Abflüsse

Der Abgleich des Ausgangsdatensatzes mit den HADES-Abflussdaten der Bilanzgebiete geschieht auf Monatsbasis. Da aber die HADES-Tafel 6.3 nur jährliche Abflüsse für die Bilanzgebiete liefert, war ein geeigneter Ansatz zum Herunterbrechen auf Monatswerte gefragt. Das gewählte Vorgehen benutzt dazu die bereits im Vorschrift durchgeführte Bestimmung des Abflussregimetyps für die einzelnen Bilanzgebiete (vgl. Bild 1). Die Regimetypisierung von Aschwanden und Weingartner (1985), welche aus Repräsentativstationen abgeleitete charakteristische Pardé-Koeffizienten pro Regimetyp enthält, wurde in einer BAFU-internen Arbeit (BAFU, 2005) mit einem erweiterten Stationsset und neueren Daten auf einen aktuellen Stand gebracht (vgl. Tabelle 3). Mittels dieser Pardé-Koeffizienten wurden die mittleren monatlichen Abflüsse für die Bilanzgebiete ermittelt.

Regime -typ	Pardé-Koeffizienten											
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
1	0.07	0.06	0.07	0.17	0.76	2.00	3.21	3.09	1.61	0.57	0.19	0.11
2	0.13	0.12	0.17	0.37	1.08	2.19	2.86	2.52	1.46	0.57	0.29	0.19
3	0.18	0.17	0.21	0.46	1.35	2.44	2.58	2.04	1.25	0.67	0.37	0.23
4	0.24	0.20	0.20	0.40	1.41	2.68	2.34	1.58	1.20	0.85	0.51	0.33
5	0.21	0.20	0.26	0.62	1.69	2.64	2.15	1.60	1.10	0.71	0.48	0.29
6	0.33	0.34	0.49	0.99	2.16	2.29	1.61	1.15	0.89	0.70	0.58	0.43
7	0.44	0.52	0.81	1.44	1.90	1.73	1.34	1.08	0.85	0.66	0.66	0.56
8	0.59	0.71	1.06	1.65	1.59	1.34	1.12	0.97	0.79	0.70	0.80	0.66
9	0.96	1.11	1.27	1.25	1.03	1.12	0.94	0.79	0.84	0.70	0.89	1.11
10	1.14	1.33	1.30	1.16	1.05	1.02	0.77	0.67	0.69	0.75	0.96	1.17
11	1.10	1.27	1.47	1.61	1.12	0.83	0.61	0.54	0.61	0.69	1.01	1.16
12	1.39	1.52	1.54	1.28	0.95	0.84	0.55	0.35	0.48	0.75	0.97	1.42
13	0.29	0.25	0.29	0.59	1.79	2.49	1.79	1.22	1.13	1.04	0.70	0.39
14	0.07	0.06	0.07	0.17	0.76	2.00	3.21	3.09	1.61	0.57	0.19	0.11
15	0.13	0.12	0.17	0.37	1.08	2.19	2.86	2.52	1.46	0.57	0.29	0.19
16	0.18	0.17	0.21	0.46	1.35	2.44	2.58	2.04	1.25	0.67	0.37	0.23

Tabelle 3. Pardé-Koeffizienten für die 16 Abflussregimetypen (BAFU, 2005)

4 Resultate

Als Ergebnis der Optimierung liegen dreizehn Rasterdatensätze vor. Jeweils einer pro Monat, sowie einer mit den mittleren jährlichen Abflusswerten (vgl. Bild 2). Der Wert der Rasterzelle gibt die Menge der lokalen Abflussbildung wieder (und nicht eine etwaige akkumulierte Menge aus dem Einzugsgebiet). Neben dem zumeist bekannten Muster des Jahresabflusses mit den grossen Abflüssen in den Alpen (ausgenommen die inneralpiner Täler) und den

kleineren Beiträgen im Mittelland, lassen sich vor allem aus den Monatsgrafiken der zeitliche Verlauf, wann in welchen Regionen wie viel Abfluss generiert wird, gut ablesen.

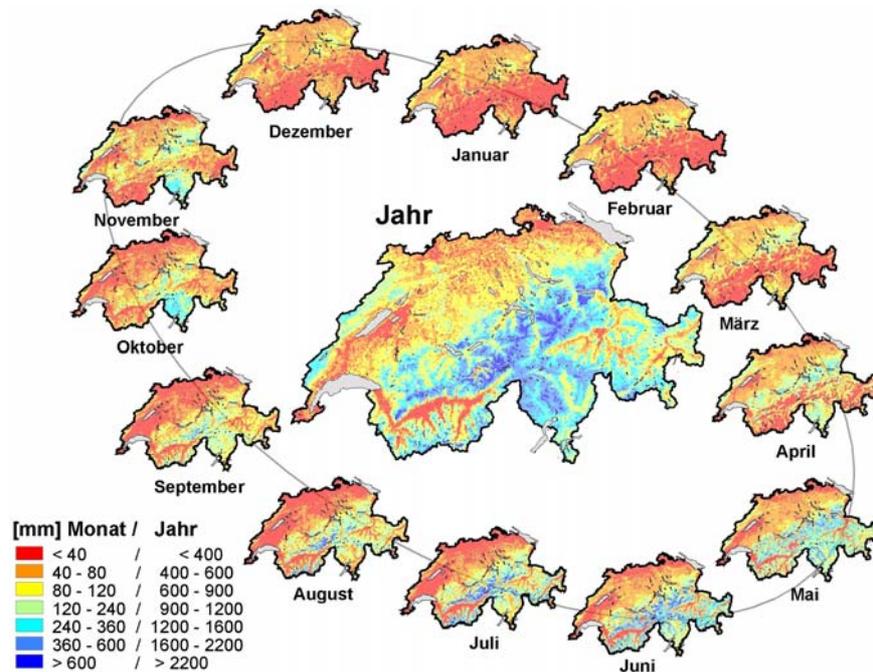


Bild 2. Grafische Darstellung der optimierten Rasterdatensätze (mittlere monatliche und der mittlere jährliche Abfluss der Periode 1981-2000 [mm])

Als Gebiete mit den kleinsten Jahresabflüssen erweisen sich die Talsohle des Wallis und vereinzelte Regionen des Mittellandes, in der Romandie und in der Nordschweiz. Das Tessin und die Voralpen und Alpen der Zentralschweiz sind deutlich „feuchter“. In diesen Regionen wird an keinem Ort ein lokales natürliches MQ kleiner als 600 mm erwartet.

Ein interessantes Phänomen ist in den Firnregionen um die Jungfrau und an der Grenze zwischen Wallis und Italien zu beobachten. Infolge hohen Niederschlags, aber über das ganze Jahr hindurch relativ tiefer Temperaturen, ist nur ein geringer Teil des meist in Form von Schnee gefallenen Niederschlags abflusswirksam. Es gibt eine grosse Akkumulation von Wasser in Form von Firn und damit lokal gesehen sehr kleine MQ um die 500 mm.

Die 12 Darstellungen der mittleren monatlichen MQ zeigen der Vielfalt der Abflussregime der Schweiz und lassen schnell die Regionen erkennen, wo das Regime durch Schneeschmelze geprägt wird. Auch das spezielle meridionale Regime des Tessins mit zwei Abflussmaxima (Mai-Juni und September-Oktober) ist klar zu erkennen. Vor allem die regenreichen Herbstmonate, in welchen sich häufig extreme Hochwasser ereignen, sind ein klares Indiz für den signifikanten klimatologischen Unterschied zwischen den Südalpen und der übrigen Schweiz, welche sich eben auch im Verlauf der monatlichen MQ erkennen lassen.

Was das Mittelland betrifft, erkennt man, dass im Winter mehr Abfluss als im Sommer gebildet wird. Im Sommer wird die Abflussbildung stark durch die Verdunstung limitiert (Perl, 2002).

5 Validation

Das Ziel der Validation ist zum einen die Güte des optimierten Datensatzes bei der Abschätzung der mittleren Abflüsse an ungemessenen Einzugsgebieten zu überprüfen. Zum anderen soll aufgezeigt werden, welche Verbesserung durch den Abgleich der Daten erzielt worden ist. Diese Evaluation wird einerseits anhand einer Auswahl von Abflussmessstationen vorgenommen (in der Folge als Validationsstationen bezeichnet), für welche mittels des optimierten Datensatzes Abflüsse geschätzt und mit den aus Messdaten abgeleiteten Werten verglichen werden. Dies ist im Kapitel 5.1-3 beschrieben. Andererseits wird eine Validation auch anhand der Bilanzgebiete mittels einer Gegenüberstellung der „als wahre Abflusswerte“

betrachteten Werte aus HADES 6.3 mit den entsprechenden Werten, welche aus der Abschätzung mit dem Rasterdatensatz gewonnen werden, durchgeführt. Dies geschieht mit dem Ausgangs- und dem optimierten Datensatz, um die erzielte Verbesserung aufzuzeigen (vgl. Kapitel 5.4).

5.1 Auswahl der Validationsstationen:

Folgende Kriterien lagen der Auswahl der Validationsstationen zugrunde:

- möglichst unbeeinflusstes Abflussregime
- Messdaten sollen soweit möglich die Periode 1981-2000 abdecken
- räumlich gut über die Schweiz verteilt
- möglichst gute Vertretung aller Abflussregimetypen
- mesoskalige Einzugsgebietsgrösse (ca. 5-500 km²)
- möglichst grosse Anzahl, damit statistisch fundierte Aussage

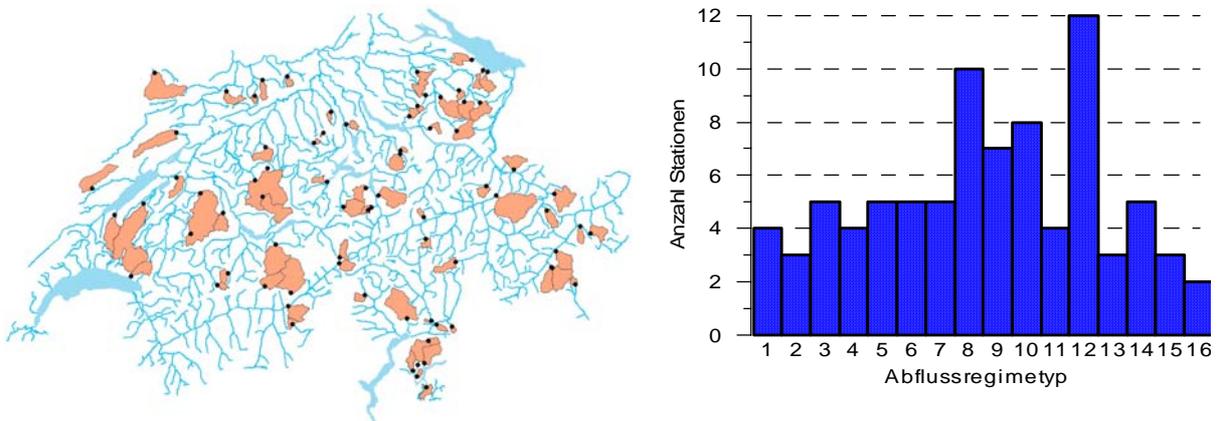


Bild 3. links: Karte mit der räumlichen Lage der Validationsstationen und ihren Einzugsgebieten (ohne diejenigen des Abflussregimetyps 12); rechts: Verteilung der Validationsstationen auf die 16 Abflussregimetypen

Wie im Kapitel über die Anwendung des gewonnenen Datensatzes beschrieben (vgl. Kap. 6.1), muss für die Abschätzung des Abflusses auch das Einzugsgebiet und seine Fläche bekannt sein. Der Grund für einen Schätzfehler kann also nicht nur im modellierten Rasterabflussdatensatz, sondern auch in einer fehlerhaften Einzugsgebietsfläche liegen. Insbesondere für die Stationen des Abflussregimetyps 12 (= pluvial jurassien, d.h. die tiefer gelegenen jurassischen Gebiete) mit den in diesen Gebieten dominierenden Karstvorkommen, ist das tatsächliche hydrologische Einzugsgebiet oft nicht bekannt, oder aber das aus der Oberflächentopographie abgeleitete Gebiet ist mit sehr grosser Unsicherheit behaftet (vereinzelt gilt diese natürlich auch bei Gebieten anderer Regimetypen). Die Gebiete des Regimetyps 12 wurden deshalb in den weiteren Analysen - weil für eine Validation unbrauchbar - ausgenommen. Mit dieser Einschränkung resultierten 73 Validationsstationen (vgl. Bild 3), anhand derer die nachfolgend beschriebenen Analysen zur Schätzgenauigkeit durchgeführt wurden. Grundsätzlich besteht diese Problematik der Genauigkeit bei der Bestimmung des Einzugsgebiets natürlich für alle Stationen, wird aber in der folgenden Fehleranalyse vernachlässigt. Damit werden als vereinfachende Annahme die nachfolgend beschriebenen Schätzfehler rein dem Abflussdatensatz zugeschrieben.

5.2 Validationsparameter - Analyse des Schätzfehlers

Für die Prüfung der Schätzgenauigkeit wurde zum einen der Fehler bei der Abschätzung des mittleren jährlichen Abflusses analysiert. Zum anderen wurde die Abweichung der

geschätzten monatlichen Abflussverteilung mit dem aus Messwerten berechneten Regimeverlauf untersucht.

Genauigkeit bei der Abschätzung des mittleren jährlichen Abflusses MQ

Berechnet wurde für alle Validationsstationen der relative Schätzfehler

$$\varepsilon_{MQ} = \frac{(MQ_{gemessen} - MQ_{simuliert})}{MQ_{gemessen}} \quad [\%], \text{ mit}$$

$MQ_{gemessen}$ der mittlere jährliche Abfluss aus den Messwerten berechnet

$MQ_{simuliert}$ der mittlere jährliche Abfluss aus dem Rasterdatensatz geschätzt

Abweichung der monatlichen Abflussverteilung

Um summarisch die Abweichungen zwischen den aus Messdaten berechneten und den aus dem Rasterdatensatz abgeschätzten monatlichen Abflüssen zu quantifizieren, wurde für jede Validationsstation folgender Kennwert berechnet:

$$R = \sum_{i=1}^{12} |\Delta MQ^i| / \sum_{i=1}^{12} MQ_{gemessen}^i, \text{ mit}$$

ΔMQ^i Differenz zwischen dem aus Messdaten berechneten und dem Rasterdatensatz geschätzten mittleren monatlichen Abflusses für den Monat i

$MQ_{gemessen}^i$ aus den Messdaten berechneter mittlerer monatlicher Abfluss des Monats i

R ist eine relative Grösse und bezieht die Summe der Absolutbeträge aller Differenzen zwischen den aus Abflussdaten und Modelldaten berechneten Monatsabflüsse, ΔMQ^i , auf die Summe der Messdaten-basierten Monatsabflüsse (vgl. Prinzipskizze in Bild 4).

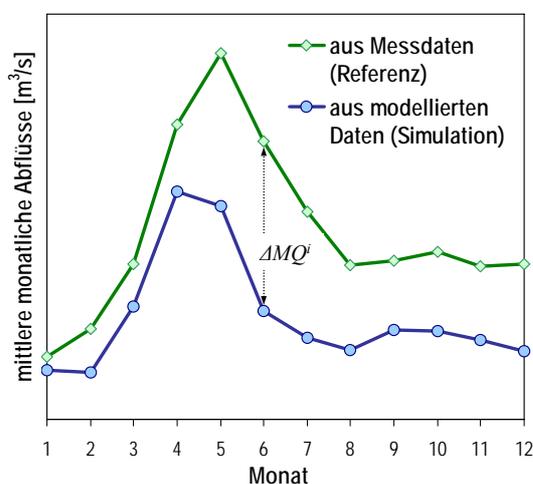


Bild 4. Skizze zur Herleitung der Kenngrösse R , welche die Differenz zwischen den auf Messdaten und Modelldaten basierten Verteilungen der monatlichen Abflüsse zum Ausdruck bringt

5.3 Validationsresultate

Bild 5 zeigt für die vorgestellten Validationsparameter die Ergebnisse in Histogrammform. Dargestellt sind sowohl die Ergebnisse aus der Anwendung des optimierten Datensatzes als auch des Ausgangsdatsatzes zur Illustration der erzielten Verbesserung der Schätzgenauigkeit. So zeigt sich z.B. beim jährlichen Abfluss, dass der Ausgangsdatsatz die Tendenz zu einer systematischen Unterschätzung aufweist, welche durch die Optimierung behoben werden konnte. Entsprechend konnte der mittlere Fehler von 17.2 % auf 11.2 % gesenkt sowie die extremen Schätzfehler deutlich reduziert werden. Führt man sich die natürliche Variabilität des jährlichen Abflusses von Jahr zu Jahr vor Augen (der

Variationskoeffizient des jährlichen Abflusses bewegt sich in der Größenordnung von ca. 10-25 %, (vgl. Pfaundler et al., 2006), wird der erwähnte mittlere Schätzfehler resp. die erzielbare Genauigkeit als gut eingestuft.

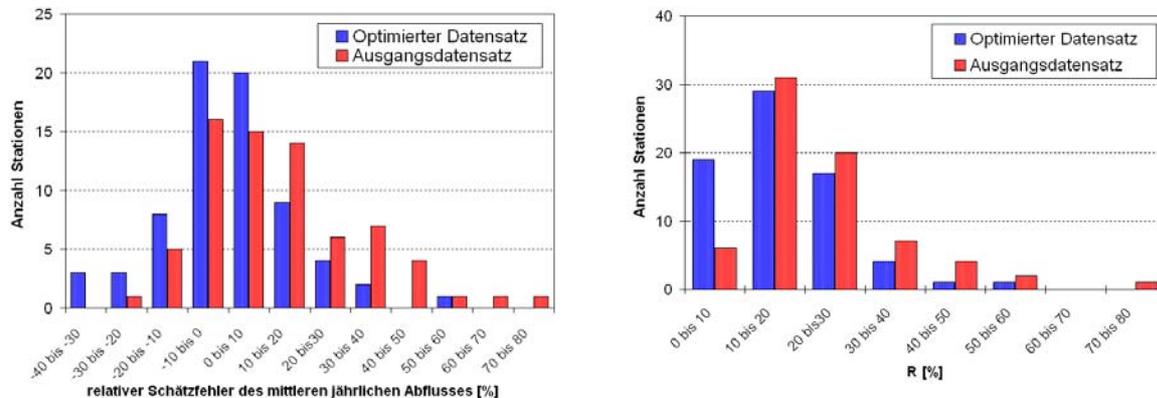


Bild 5. Histogramme der Schätzfehleranalyse für den mittleren Jahresabfluss (links) und die Kenngröße R (rechts)

Analoges kann zur Analyse der Abweichungen der Ganglinien der monatlichen Abflüsse gesagt werden: Im Vergleich zum Ausgangsdatensatz konnte der mittlere R-Wert von 23.2% auf 17.2% vermindert und die grossen Abweichungen grossteils vermieden werden. Mit diesem Wert liegt man deutlich innerhalb dessen, was natürlicherweise die monatlichen Abflüsse von Einzeljahren um die mittleren monatlichen Abflüsse schwanken (vgl. Pfaundler et al., 2006). Zur Veranschaulichung von R sind in den Fallbeispielen von Bild 7 die entsprechenden R-Werte eingetragen. Tabelle 4 gibt summarisch einen Überblick über die mittleren Fehler der untersuchten Parameter und den Vergleich zwischen Ausgangsdatensatz und optimiertem Datensatz.

	optimierter Datensatz	Ausgangsdatensatz
Mittelwert von ϵ_{MQ}	11.2 %	17.2 %
Mittelwert von R	17.2 %	23.2 %

Tabelle 4. aus der Validation gewonnene Angaben zur Schätzgenauigkeit

Um zu prüfen, ob die Güte der verwendeten Abflussdatensätze räumlich homogen ist oder aber regional variiert, wurde eine nach Abflussregimetyyp differenzierte Auswertung der Validation gemacht, deren Ergebnisse in Form von Box-Plots in Bild 6 dargestellt sind.

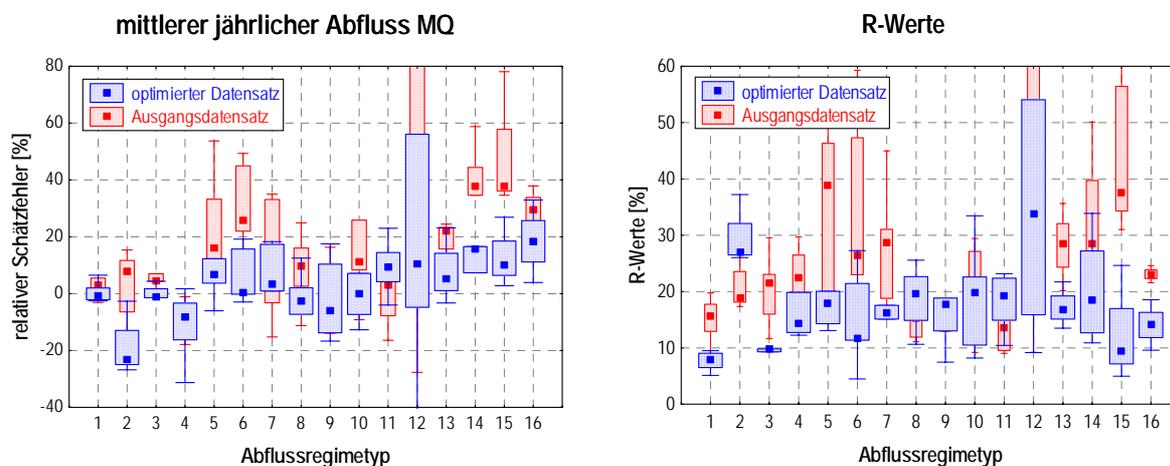


Bild 6. Nach Abflussregimetyypen differenzierte Analyse der Schätzgenauigkeit; die Boxplots geben auf der Basis der Validationsstationen pro Abflussregimetyyp die Verteilung (Median,

25/75% Quantil und Min/Max) der Schätzfehler wieder

Hierzu ist zu vermerken, dass auch Stationen des Regimetyps 12 aufgenommen wurden. Wie erwartet, weisen diese die grössten Fehler auf, was aber – wie bereits weiter oben erläutert – nicht auf die modellierten Datensätze, sondern auf die Problematik der Bestimmung des Einzugsgebiets in verkarsteten Gebieten zurückgeführt wird. Abgesehen davon kommt die verbesserte Genauigkeit des optimierten Datensatzes im Vergleich zum Ausgangsdatsatz deutlich heraus; einzig beim Regimetyp 2 („b-glaciaire“) resultiert eine Verschiebung des Schätzfehlers zum Schlechteren, was hauptsächlich in einer Überschätzung des Jahresabflusses, d.h. des generellen Abflussniveaus und nicht der Verteilung über das Jahr begründet ist.

Zur Veranschaulichung sind in Bild 7 exemplarisch für drei Gebiete (je ein Vertreter des alpinen, des voralpinen Regimetyps und aus dem Mittelland) die geschätzten monatlichen Abflüsse den aus Messdaten berechneten Werten gegenübergestellt.

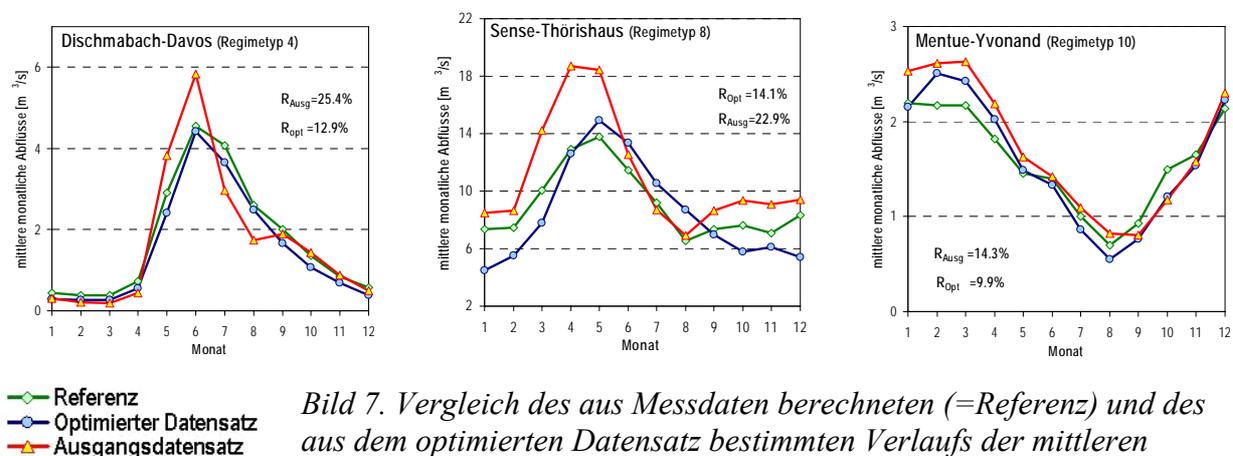


Bild 7. Vergleich des aus Messdaten berechneten (=Referenz) und des aus dem optimierten Datensatz bestimmten Verlaufs der mittleren monatlichen Abflüsse mit Fallbeispielen einer alpinen, einer voralpinen und einer Validationsstation aus dem Mittelland; zusätzlich ist auch die mit dem Ausgangsdatsatz ermittelte Ganglinie dargestellt und die Verbesserung des R-Wertes durch die Optimierung angeführt

5.4 Validation anhand der Bilanzgebiete

Wie im Falle des Ausgangsdatsatzes (Zappa, 2002), wurde auch mit dem optimierten Datensatz ein Vergleich mit den Werten der Schweizerischen Bilanzgebiete von Schädler und Weingartner (2002) durchgeführt (vgl. Bild 8).

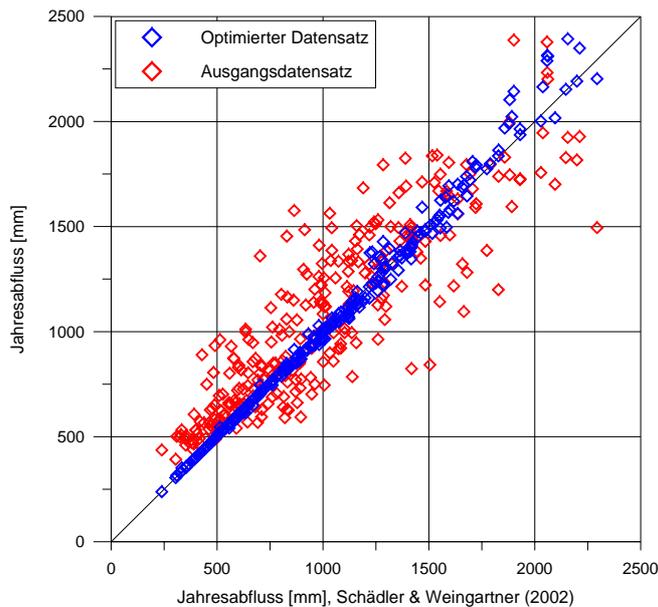


Bild 8. Ausgangsdatensatz und optimierter Datensatz zur Abschätzung des Jahresabflusses der Bilanzgebiete: Vergleich der Schätzwerte mit den Originalwerten der Bilanzgebiete der Schweiz (HADES 6.3)

Die ursprünglich starke Streuung ist durch den Abgleich wie erwartet minimiert worden. Die Reststreuung ist eine Darstellung der Unterschiede zwischen der Periode 1961-1990 einerseits (Originalwerte HADES 6.3) und der Periode 1981-2000 andererseits. Was man daraus vor allem sieht, ist eine Zunahme der Abflüsse in Gebieten mit hohem Abfluss und einem deutlichen Anteil an vergletscherten Flächen. Diese Feststellung stimmt überein mit der allgemein bekannten Tatsache, dass die 90er Jahre des 20. Jahrhunderts das wärmste Jahrzehnt gewesen ist, seit Datenreihen aus Instrumentenmessungen vorhanden sind (IPCC, 2001). Die höheren MQ -Werte sind u.a. durch intensivere Eisschmelze verursacht (Birsan et al., 2005).

6 Anwendung des Rasterdatensatzes zur Schätzung der mittleren Abflüsse

Der Datensatz kann an ungemessenen Fließgewässern für die Abschätzung des mittleren jährlichen und der monatlichen Abflüsse eingesetzt werden – und mittelbar daraus auch für die Pardé-Koeffizienten und den Abflussregimetyp.

6.1 Anwendungsprozedere

Der Abfluss an einem bestimmten Ort ergibt sich aus der Summierung der Abflussbeiträge der im Einzugsgebiet liegenden Rasterzellen. Operationell ist daher zunächst das Einzugsgebiet zu bestimmen und dieses mit dem Rasterdatensatz zu überlagern. Der Mittelwert der Rasterzellenwerte multipliziert mit der Einzugsgebietsfläche ergibt den gesuchten Abflusswert:

$$MQ_{simuliert} = k \cdot \sum_{w=1}^n A_w \cdot Q_w = k \cdot n \cdot A \cdot \bar{Q}_w = k \cdot EZG \cdot \bar{Q}_w$$

$MQ_{simuliert}$ die geschätzte Abflussmenge

$A_w = konst. = A$ die Fläche der Rasterzelle $w = 500 \cdot 500 \text{ m}^2$

Q_w der Abflusswert der Rasterzelle w [mm]

\bar{Q}_w der Mittelwert der Rasterzellenwerte im untersuchten Einzugsgebiet

n die Anzahl der Rasterzellen im untersuchten Einzugsgebiet

EZG die Einzugsgebietsfläche

k Umrechnungsfaktor, um MQ in m^3/s oder l/s zu erhalten

Wie bereits im Abschnitt über die Validation vermerkt, spielt bei der Würdigung des gewonnenen Schätzwertes auch die Einschätzung der Zuverlässigkeit der ermittelten Einzugsgebietsfläche eine Rolle (insbesondere dort, wo die Unsicherheit gross ist, dass die aus der Oberflächentopographie abgeleitete Einzugsgebietsfläche mit der hydrologischen Einzugsgebietsfläche übereinstimmt, wie z.B. in Karstregionen oder in sehr flachem Terrain).

6.2 Grenzen der Anwendung

Der empfohlene Einsatzbereich liegt bei Einzugsgebietsflächen im Bereich 10-1000 km^2 . Darunter wächst die Unsicherheit aufgrund der räumlichen Auflösung (v.a. in engen Alpentälern mit grossen Höhengradienten), darüber müsste man zunehmend die Frage des „Routings“ berücksichtigen (v.a. wenn das Gewässer durch einen grösseren See eine massgebliche Retention erfährt). Unterhalb der empfohlenen Obergrenze wird die direkte Superposition der Abflussbeiträge der einzelnen Zellen ohne Translations- und Retentionsüberlegungen als zulässig eingeschätzt, da man ja auf der zeitlichen Skala von Monats- und Jahresabflüssen operiert. Deswegen kann ohne grössere Seeretention die Obergrenze auch höher angesetzt werden.

Weiters muss für eine sinnvolle Anwendung das Einzugsgebiet ausreichend genau bekannt bzw. bestimmbar sein (vgl. z.B. das bereits geschilderte Problem der Einzugsgebiets-Bestimmung in Karstgebieten).

Ein erwähnenswerter Punkt ist die Zuverlässigkeit der Schätzwerte einzelner Monate. Wie die Validation für die Abschätzung des Jahresabflusses und der monatlichen Abflussverteilung gezeigt hat, ergibt sich eine recht gute Schätzgenauigkeit. Will man die Schätzwerte einzelner Monate verwenden, so muss darauf hingewiesen werden, dass grosse relative Fehler resultieren können. Dieser Hinweis trifft insbesondere für die Wintermonate in den hochalpinen Gebieten zu, welche in dieser Jahreszeit äusserst geringe Abflüsse mit teilweise nahe an Null reichenden Werten aufweisen. Der Grund liegt darin, dass das hier gewählte Vorgehen zur Bestimmung der Monatsabflüsse die Zuweisung regimetypspezifischer Pardé-Koeffizienten war. Da diese aber innerhalb eines Typs eine gewisse Schwankungsbreite aufweisen, und insbesondere bei den hochalpinen Typen in den Wintermonaten Werte im Mittel um die 0.1 einnehmen, vereinzelt aber gegen Null tendieren, können daraus grosse *relative* Fehler resultieren (auch wenn in absoluten Abflussmengen betrachtet der Schätzfehler nicht erheblich ist).

7 Diskussion & Fazit

Es wurde ein optimierter Datensatz vorgestellt, der zur Abschätzung der mittleren Abflüsse an ungemessenen Gebieten in der Schweiz geeignet ist. Die Validation hat Hinweise auf die zu erwartende Schätzgenauigkeit gegeben, welche für viele Anwendungszwecke als ausreichend einzustufen ist. Die Autoren vertreten die Ansicht, dass der Datensatz damit die gestellten Anforderungen erfüllt (in Erinnerung gerufen werden die eingangs formulierten Ziele eines räumlich hoch aufgelösten, die ganze Schweiz abdeckenden Datensatzes, der verhältnismässig einfach in der Anwendung ist und für die gängigen Fragestellungen eine zufrieden stellende Genauigkeit aufweist). Auf die Grenzen wurden hingewiesen, insbesondere sei nochmals auf diejenigen Fälle verwiesen, wo die Bestimmung des hydrologischen Einzugsgebietes mit erheblichen Unsicherheiten verknüpft ist.

Bei einer allfälligen Verwendung des Datensatzes und der damit gewonnenen Schätzwerte von Abflussmengen sind eine Reihe von Punkten zu beachten (neben den genannten Anwendungsgrenzen):

- Sie repräsentieren das „natürliche“ Abflussregime. In Gebieten mit erheblichen anthropogenen Eingriffen können die realen Abflussverhältnisse mehr oder weniger stark davon abweichen.
- Sie geben die mittleren Abflüsse wieder, d.h. in Einzeljahren können die tatsächlichen Abflüsse mehr oder weniger davon abweichen (vgl. dazu Variabilität der Abflussregime in Pfaundler et. al., 2006).
- Sie spiegeln die Verhältnisse während der Periode 1981-2000 wieder. Inwieweit sich im Lichte der Klimaänderungsdebatte die Gültigkeit ändern wird, ist schwer vorausszusagen. Untersuchungen zu Trends in den Schweizer Abflüssen (siehe Birsan et. al, 2004/2005.) zeigen Hinweise von Instationaritäten (auch wenn bislang hauptsächlich auf alpine Gewässer in der Übergangsperiode Winter zu Sommer beschränkt).

Bezug des Datensatzes

Die beschriebenen Datensätze werden unentgeltlich zur Verfügung gestellt. Sie sind über die Internetseiten des BAFU (unter www.umwelt-schweiz.ch > Hydrologische Grundlagen und Daten) zu beziehen. Dort sind neben den Bezugsmodalitäten über die email-Adresse hydrologie@bafu.admin.ch auch allgemeine Hinweise zum Datensatz, Metadaten sowie Nutzungsbedingungen (Copyright, Haftungsausschluss, Zitiervorschlag etc.) enthalten.

Danksagung

Die aus Zappa (2002) stammenden Ergebnisse entstanden am Institut für Atmosphäre und Klima der ETH (Forschungsgruppe Prof. Ch. Schär) unter der Leitung von Dr. Joachim Gurtz. Thomas Wüthrich, Andreas Helbling, Caroline Kan, Dr. Hugo Aschwanden und Mario Keusen (alle BAFU) waren bei der Erstellung des optimierten Datensatzes und der Auswertungen beteiligt. Von MeteoSchweiz und dem Bundesamt für Umwelt - BAFU (ehemals BWG) wurden die nötigen hydrometeorologischen Messdaten geliefert.

Literatur

- Aschwanden H, 1986: Zur Abschätzung der Abflüsse in ungemessenen schweizerischen Einzugsgebieten. Publikation Gewässerkunde, Nr. 66. Bern.
- Aschwanden H, Weingartner R, 1985: Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde Nr. 65. Bern.
- BAFU, 2005: Aktualisierte Pardé-Koeffizienten für die Abflussregimetypen nach Aschwanden und Weingartner. Internes Papier, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Birsan M, Molnar P, Pfaundler M, Burlando P, 2004: Trends in schweizerischen Abflussmessreihen. Wasser Energie Luft. Heft 1/2, 2004.
- Birsan M, Molnar P, Burlando P, Pfaundler M, 2005: Streamflow trends in Switzerland. Journal of Hydrology 314, pp 312-329.
- Gurtz J, Baltensweiler A, Lang H, Menzel L, Schulla J, 1997: Auswirkungen von klimatischen Variationen von Wasserhaushalt und Abfluss im Flussgebiet des Rheins. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich: Schlussbericht NFP 31: "Klimaänderungen und Naturkatastrophen";1-147.
- HADES: Hydrologischer Atlas der Schweiz. Landeshydrologie (Hrsg. - jetzt Abteilung Hydrologie im Bundesamt für Umwelt). Bern.
- IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton, J.T. et al., eds), Cambridge and New York 2001,
- Pardé M, 1920: Le regime des cours d'eau en Suisse. Revue Geographie Alpine VII: 359-457.
- Perl M, 2002: Regionale Aspekte der Räumlich Differenzierten Verdunstungsberechnung in der Schweiz. Diplomarbeit ETH und UNI Zürich, 108 Seiten.

- Pfaundler M, Weingartner R, Diezig R, 2006: Versteckt hinter den Mittelwerten – die Variabilität des Abflussregimes“. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 3.
- Schädler B, Weingartner R, 2002: Komponenten des natürlichen Wasserhaushaltes 1961-1990, In: Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES), Tafel 6.3.
- Schwarb M, Daly C, Frei C, Schär C, 2001: Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971-1990. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz (HADES), Tafel 2.6.
- Verbunt M, Zappa M, Gurtz J, Kaufmann P, 2005: Verification of a coupled hydrometeorological modeling approach for alpine tributaries in the Rhine basin. *Journal of Hydrology* 324: 224-238.
- Zappa M, 2002: Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales In Institute for Atmospheric and Climate Science. Dissertation No. 14895, ETH Zurich [<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=diss&nr=14895>].
- Zappa M, Pos F, Strasser U, Warmerdam P, Gurtz J, 2003: Seasonal water balance of an Alpine catchment as evaluated by different methods for spatially distributed snowmelt modelling. *Nordic Hydrology* 34: 179-202.