

Raphael Meyer, Bruno Schädler, Daniel Viviroli und Rolf Weingartner

Die Rolle des Basisabflusses bei der Modellierung von Niedrigwasserprozessen in Klimaimpaktstudien

The role of baseflow in modelling low-flow processes in climate impact studies

Hydrologische Modelle berücksichtigen die niedrigwasserspezifischen Prozesse in einem Einzugsgebiet meist noch zu wenig und ihr Parametersatz basiert zu stark auf den heutigen Klimaverhältnissen, so dass eine Anwendung für die wasserwirtschaftliche Planung in einer klimatisch veränderten Zukunft nur bedingt möglich ist. Dieser Beitrag überprüft die Verwendbarkeit der Basisabflusseparation als Grundlage für eine stärker auf den niedrigwasserspezifischen Prozessen basierte Modellkalibrierung. Die Resultate dreier Verfahren zur Basisabflusseparation an 59 Einzugsgebieten der Schweiz zeigen, dass der Basisabfluss eine physikalisch begründete Größe ist, die verwendet werden kann, um die Güte von konzeptuellen hydrologischen Modellen zu verbessern. Unsicherheiten bezüglich der Projektion von Niedrigwassern werden dadurch vermindert.

Schlagwörter: Basisabfluss, Klimaänderung, Modellierung von Niedrigwasserprozessen, Schweiz

Hydrological models do not yet appropriately represent the processes in catchments leading to low-flow situations. Further, the model-related parameters are strongly based on the present-day climate, so that the applicability of such models for water-resources planning under future climate conditions remains limited. This paper investigates the applicability of baseflow separation for improved model calibration that is relying more strongly on low-flow processes within catchments. Three different baseflow separation procedures were applied in 59 catchments in Switzerland. The results show that baseflow is physically determined and can be used to improve the performance of conceptual hydrological models. Thus, uncertainties in low-flow projections can be reduced.

Keywords: Baseflow, climate impact, modelling low-flow processes, Switzerland

1 Einleitung

Niederschlags- und insbesondere Temperaturmessungen der letzten 150 Jahre lassen keine Zweifel offen, dass der Klimawandel auch in der Schweiz stattfindet (BEGERT et al. 2005). Die beobachteten Trends hin zu wärmeren Temperaturen und veränderten Niederschlagsregimes werden durch verschiedene weitere Klimaindikatoren wie Anzahl warme Jahre, Hitzetage, Tropennächte, die Schneebedeckung im Schweizer Mittelland oder eine Zunahme der mittleren Winterniederschläge belegt. Neben diesen bereits feststellbaren Veränderungen werden für die Zukunft eine leichte Zunahme der Niederschläge im Winter und trockenere Bedingungen im Sommer erwartet (OCCC 2008), deren Auswirkungen insbesondere in der Schweiz durch die Lage in den Alpen deutlich hervortreten könnten (REBETEZ & REINHARD 2008). Das beratende Organ für Fragen der Klimaänderung in der Schweiz (OCCC 2008) geht auch davon aus, dass das Klima im Verlauf des 21. Jahrhunderts den heutigen Bereich der Schwankungen verlassen wird. Das Jahr 2003 könnte ein möglicher Vorgeschmack auf diese Veränderungen gewesen sein. Ein derartiges Ereignis ist auch unter Berücksichtigung der mittleren Erwärmung nicht zu erwarten gewesen, d.h. die Verschiebung der statistischen Verteilung hin zu höheren Temperaturen kann die im Sommer 2003 gemessenen Temperaturen nicht erklären. Dazu muss die Variabilität der Temperaturwerte, also die Spannweite an möglichen Temperaturen, ebenfalls zugenommen haben (SCHÄR et al. 2004).

Die Analyse der Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer (BUWAL et al. 2004) zeigt, dass viele Gebiete noch von Boden- und Grundwasservorräten aus dem niederschlagsreichen Herbst 2002 profitierten. Durch das Grundwasser und die Bodenfeuchte wurde offensichtlich vielerorts die Auswirkung der ausgeprägten meteorologischen Trockenheit auf die Oberflächenge-

wässer abgeschwächt (KUNDZEWICZ & DÖLL 2009). Insgesamt wurde die meteorologische Trockenheit des Sommers 2003 durch das hydrologische System in den Einzugsgebieten aufgefangen und die Auswirkung auf den Abfluss dadurch gemildert. Dennoch wurde deutlich, dass ausgeprägte Niedrigwasserabflüsse, also Perioden hydrologischer Trockenheit, in der ansonsten sehr wasserreichen Schweiz möglich sind. Fließgewässer außerhalb des Alpenraumes, insbesondere solche mit kleinen Einzugsgebieten im tieferen schweizerischen Mittelland, waren am stärksten betroffen. Hier trockneten rund 350 Fließgewässer auf einer Gesamtlänge von 245 Kilometern aus (BUWAL et al. 2004). In der Folge des Trockenjahres 2003 lagen die Grundwasserstände tiefer als das langjährige Mittel und erholten sich teilweise erst während den starken Niederschlägen im August 2005 (BAFU 2009).

Bislang hat sich das ganze hydrologische System in der Schweiz als genügend stabil auch gegenüber extremen Ereignissen erwiesen (FITZE 2008). Während des Hitzesommers 2003 beispielsweise wurden die Abflüsse in den oberirdischen Fließgewässern stark aus dem Grundwasser gespeist, wodurch ein Austrocknen dieser oberirdischen Gewässer vielerorts verhindert wurde. Auswirkungen der bisherigen Klimaveränderung auf die Gewässer wurden vor allem durch veränderte Abflussregimes – von glazialen zu nivalen und von nivalen zu pluvialen Regimes – bemerkbar (BIRSAN et al. 2005, SCHÄDLER & WEINGARTNER 2010). Das Verlassen des normalen klimatischen Schwankungsbereiches, wie es für die Zukunft erwartet wird (OCCC 2008, OCCC & PROCLIM 2007, SCHÄR et al. 2004), wirkt sich jedoch mit Sicherheit noch stärker auf den Abfluss von Fließgewässern aus. Die Frage stellt sich, wie genau das hydrologische System in der Schweiz auf die Veränderung reagieren wird.

Im Rahmen des Projektes CCHydro (Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz) (VOLKEN 2010), welches 2008 durch das

Bundesamt für Umwelt (BAFU) initiiert wurde, werden verschiedene Aspekte der Auswirkung der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt der Schweiz untersucht. Es sollen Grundlagen für die Entscheidungsfindung zur Anpassung an die Klimaänderung erarbeitet werden. Dazu werden zeitlich und örtlich hoch aufgelöste hydrologische Projektionen benötigt. Das hier vorgestellte Teilprojekt Niedrigwasser hat zum Ziel, mögliche Entwicklungen im Niedrigwasserbereich aufzuzeigen. Die wissenschaftlichen Fragestellungen lauten:

- Welche Auswirkungen auf die Niedrigwasserverhältnisse in der Schweiz (Dauer, Abflussminima, Intensität) sind durch die Klimaveränderung zu erwarten?
- Wie wirken sich die zu erwartenden Veränderungen bei Niederschlag und Temperatur insbesondere auf das Sommerniedrigwasser im Mittelland aus?
- Welches sind die zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Projektionen des Niedrigwassers für die Zeitfenster 2021–2050 und 2070–2099, basierend auf den heutigen Klimaszenarien?

Das Schweizer Mittelland steht im Zentrum der Untersuchung, weil hier die Auswirkungen von tiefen Wasserständen während Niedrigwasserperioden wohl am stärksten zum Tragen kommen. Tiefe Wasserstände in Fließgewässern des Mittellandes führen aufgrund der dichten Besiedlung und der intensiven Landwirtschaft relativ rasch zu Nutzungskonflikten und problematischen Auswirkungen auf die Gewässerökologie während der Sommermonate (BUWAL et al. 2004). Glazial geprägte Einzugsgebiete in höheren Regionen der Alpen hingegen profitieren während heißen Sommern in den nächsten Jahrzehnten noch vom starken Abschmelzen der Gletscher (OCCC & PROCLIM 2007) und werden daher nicht in die Projektionen des Niedrigwassers mit einbezogen.

Ziel dieses Beitrages ist es aufzuzeigen, dass sich der aus der gemessenen Abflusskurve mathematisch bestimmte Basisabfluss eines Einzugsgebietes als zusätzliche Kalibrierungsgröße für konzeptuelle hydrologische Modelle eignet. Die oft geforderte multi-kriterielle Kalibrierung (GUNTNER 1999, YAPO et al. 1998) stellt konzeptuelle Modelle vor folgendes Problem: Obwohl sie physikalisch basiert sind, können gemessene Größen, wie beispielsweise der Grundwasserspiegel, nicht als Kriterium für eine Zweitkalibrierung neben dem Abfluss verwendet werden. Die Modelle kennen durch ihren konzeptuellen Charakter keinen Speicher, dessen Inhalt beispielsweise direkt mit dem Grundwasserstand korreliert (GUNTNER 1999, WAGENER & GUPTA 2005). Es ist also notwendig aufzuzeigen, dass der Basisabfluss sich in der Schweiz physikalisch begründen lässt. Der Basisabfluss kann in der Folge für eine multi-kriterielle Kalibrierung von konzeptuellen hydrologischen Modellen verwendet werden. Die Parameterunsicherheiten werden dadurch verringert und die Vertrauenswürdigkeit des Modells in Bezug auf die Anwendung in einer klimatologisch unbekanntem Zukunft erhöht (BERGSTRÖM 1991, SCHÄR et al. 2004, WAGENER & GUPTA 2005). Die korrekte Wiedergabe der physikalischen Prozesse durch den mit den verwendeten Verfahren bestimmten Basisabfluss soll durch die Überprüfung der folgenden Hypothese belegt werden: Der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss wird durch verschiedene Einzugsgebietsspeicher wie dem Boden, dem Grundwasser, den Seen, der Schneedecke und der Gletscher, gesteuert.

Im zweiten Kapitel folgt ein Überblick zum Stand der Forschung zum Niedrigwasser. Die verwendeten Basisabflusseparationsverfahren werden im dritten Kapitel vorgestellt. Die Ergebnisse aus deren Anwendung werden ausführlich im Kapitel vier diskutiert und im fünften Kapitel werden Schlüsse zur aufgestellten Hypothese gezogen.

2 Stand der Forschung

Die Namensvielfalt, mit der sich Forschende schon vor längerer Zeit der Problematik Niedrigwasser angenähert haben zeigt, dass es gänzlich verschiedene Ansätze gibt, diese Abflussercheinung zu untersuchen. "Among the names that have been used are groundwater flow, low flow, percolation flow, under run, seepage flow, and sustained flow" (HALL 1968). Viele dieser Begriffe beruhen auf dem Prozess, welcher als Ursache dieser Abflussercheinung vermutet wird. Übersichten zu den vielfältigen Niedrigwasseranalyseverfahren bieten TALLAKSEN (2004), SMAKHTIN (2001) und MCMAHON (1982). Auf europäischer Ebene wurde mit der Verknüpfung der Trockenperioden mit den Großwetterlagen (STAHL 2001) ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit welchem Abschätzungen zum Einfluss der Klimaänderung auf Trockenperioden möglich sind (DEMUTH 2004). Auch wurden Trendanalysen zur Zunahme von Trockenperioden in verschiedenen europäischen Räumen durchgeführt (HISDAL et al. 2001). Für Projektionen des Niedrigwassers wurde in Baden-Württemberg das Modell LARSIM (BREMICKER 2008) verwendet (HENNEGRIFF & KOLOKOTRONIS 2009). Die Modellergebnisse zeigen eine deutliche Abflussabnahme bei den Niedrigwasserabflüssen bis 2050. In der Schweiz wurden auf der Grundlage von früheren Klimaszenarien, unter Zuhilfenahme des Modells WaSIM-ETH (SCHULLA & JASPER 1998), Einflüsse der Klimaänderung auf das Abflussverhalten der Thur untersucht (SCHULLA 1997). Auch diese Untersuchung zeigt sinkende Niedrigwasserabflüsse. Beide genannten Wasserhaushaltsmodelle bilden das bestehende Prozesswissen in der Modellstruktur ab, und die für das heutige Klima relevanten hydrologischen Prozesse werden – mittels entsprechender Parametrisierung – berücksichtigt.

Im Bezug auf Niedrigwasser bestehen aber noch erhebliche Wissenslücken bei den physikalischen Steuergrößen (DEMUTH 2004). Die heutigen hydrologischen Modelle berücksichtigen folglich die niedrigwasserspezifischen Prozesse in ihrer Modellstruktur vermutlich nur ungenügend. Für die Schweiz gibt es wenige Untersuchungen, welche das Wissen um den Prozess, der zu Niedrigwasser führt, verbessern würden. PEREIRA & KELLER (1982) verglichen das Rezessionsverhalten, also das Leerlaufen während Zeiten ohne Niederschlag, in elf Schweizer Einzugsgebieten mit den entsprechenden Gebietseigenschaften. Obwohl die geringe Anzahl der untersuchten Gebiete keine Verallgemeinerungen zulässt, belegen die Ergebnisse der Studie einen starken Einfluss des geologischen Untergrundes auf das Niedrigwasser. Im Weiteren zeigten PEREIRA & KELLER (1982) eine starke Abhängigkeit des Abflussprozesses von der Jahreszeit. Im Zusammenhang mit der neuen gesetzlichen Festlegung der Restwassermenge im Gewässerschutzgesetz von 1991 entstand ein neuer Zweig der Niedrigwasserforschung in der Schweiz. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der flächendeckenden Bestimmung jenes Abflusswertes eines Fließgewässers, der natürlicherweise an durchschnittlich 347 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird (Q347 oder Q95%). Mit diesem Wert

kann, gemäß den Bestimmungen im Gewässerschutzgesetz, die einzuhaltende Restwassermenge eruiert werden. Die Untersuchungen von ASCHWANDEN & KAN (1999) zeigen, dass die Größe Q347 im Alpenraum vorwiegend klimatisch gesteuert ist, wohingegen im Mittelland und Jura, wahrscheinlich bedingt durch den Einfluss der Speicherung von Wasser im Untergrund, komplexere Verteilungsmuster vorliegen. Vor allem in der von ASCHWANDEN & KAN (1999) ausgeschiedenen Region Zentrales Mittelland liegen Einzugsgebiete mit hohen Q347-Werten nahe bei solchen mit niedrigen Werten. Im Mittelland lassen sich gemäß dieser Studie keine räumlichen Strukturen erkennen, die Hinweise auf die bei der Entstehung von Niedrigwasser maßgeblichen Prozesse geben würden. Eine große räumliche Variabilität des Niedrigwassers fand auch SCHRÖDER (1992). Er erklärte sich diese vor allem durch die Inhomogenität der Niederschlagsverteilung sowie des geologischen Untergrundes und den daraus resultierenden unterschiedlichen Speichermechanismen, welche den Niedrigwasserabfluss beeinflussen.

Durch die bestehenden Unsicherheiten in der korrekten Wiedergabe der Niedrigwasserprozesse in hydrologischen Modellen liegt mehr Gewicht auf den Modellparametern. Da die Kalibrierung der Modelle mittels des gemessenen Abflusses zu einer Konditionierung des Modells auf heutige Verhältnisse der Klimatologie und des Abflusses führt, ist es wahrscheinlich, dass der derart bestimmte Parametersatz in einer veränderten Zukunft nicht zu korrekten Ergebnissen führt (BLASCHKE et al. 2011). Vertrauenswürdige quantitative Projektionen in die Zukunft sind mit ihnen demzufolge noch nicht möglich. Die multi-kriterielle Kalibrierung mittels Abfluss und Basisabfluss bietet hier die Möglichkeit, die Verlässlichkeit der Modellparameter unter veränderten klimatischen Bedingungen deutlich zu erhöhen.

3 Methode

Nach FRÖHLICH et al. (1994) ist der Basisabfluss derjenige Teil des Abflusses, der nicht eine unmittelbare Konsequenz des Niederschlages ist. Basisabfluss kann daher auch als Ausfluss aus dem Grundwasser angesehen werden, das ein oberirdisches Fließgewässer während niederschlagsloser Perioden mit Wasser versorgt. Weil der Grundwasserspeicher, der mit dem Fließgewässer hydraulisch in Verbindung steht, einen starken Verzögerungs- und Rückhalteeffekt ausübt, kann der Basisabfluss aus dem Gesamthydrographen separiert werden.

Für Schweizer Einzugsgebiete müssen neben dem Ausfluss aus dem Grundwasser auch Schnee- und Gletscherschmelze zum Basisabfluss gerechnet werden, da auch sie nicht eine unmittelbare Konsequenz des Niederschlages sind. Die Definition von FRÖH-

LICH et al. (1994) wird daher dahingehend ergänzt. Im Gegensatz zum Gesamtabfluss, der an einem bestimmten Punkt an einem Fließgewässer exakt gemessen werden kann, muss der Basisabfluss mit geeigneten Verfahren abgeschätzt werden. Mit der Basisabflusseparation lässt sich eine synthetische Basisabflusskurve herleiten. Zur Basisabflusseparation bestehen eine Vielzahl von Verfahren (DEMUTH 1993). Hier werden drei etablierte Verfahren angewendet, welche die Separation für die gesamte Ganglinie vornehmen – also nicht nur einzelne Niederschlagsereignisse betrachten: i) das Verfahren Demuth (DEMUTH 1993), ii) das Verfahren des Institute of Hydrology (IH) (INSTITUTE OF HYDROLOGY 1980) und iii) das Verfahren Wittenberg (WITTENBERG 1999). Die Untersuchung basiert auf den Tagesmitteln der Abflussdaten der Jahre 1974 bis 2008 von 59 Abflussmessstationen des Bundesamtes für Umwelt. Einzelne Stationen weisen eine kürzere Messreihe auf; alle sind jedoch mindestens 15 Jahre lang. Alle gewählten Stationen weisen, nach Angaben in der Niedrigwasserdatenbank NQ-Stat (BWG 2005), explizit eine hohe Messgenauigkeit bei Niedrigwasser und eine schwache bis mittlere Beeinflussung des

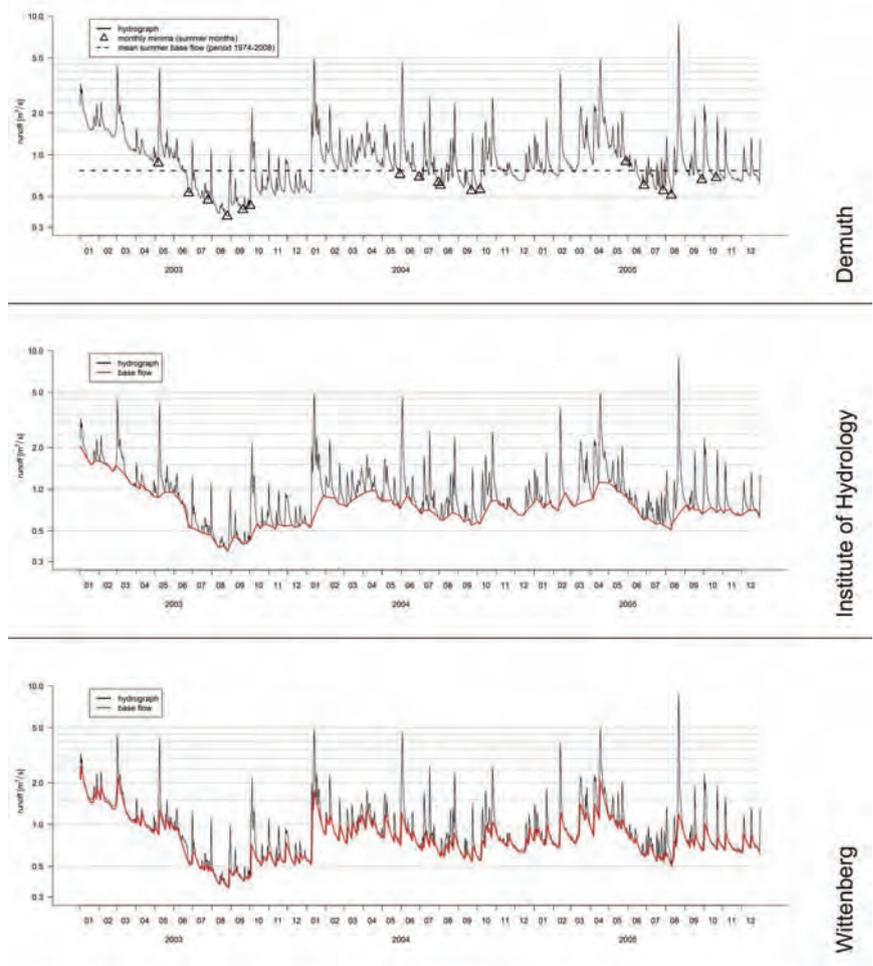


Abbildung 1

Anwendung der drei Basisabflusseparationsverfahren am Beispiel der Langeten in Huttwil, Häberenbad, dargestellt für die Tageswerte der Jahre 2003 bis 2005 (logarithmische y-Achse). Abflussdefizite im trocken-heißen Sommer 2003 und der Spitzenabfluss während den ergebnissen Niederschlägen im August 2005 sind zu erkennen.

Application of the three baseflow-separation procedures shown at the example of the River Langeten in Huttwil, Häberenbad, with daily values of the years 2003 to 2005 (logarithmic y-axis). The runoff shortfall during the hot, dry summer 2003 and the August 2005 peak-flow event due to heavy rainfall are recognizable.

natürlichen Abflusses auf. 35 der 59 Einzugsgebiete befinden sich im Schweizer Mittelland. Die Abflussseparation wird für das ganze Jahr durchgeführt, in die Analyse fließen aber nur die Ergebnisse für die Sommermonate Mai bis Oktober ein, um nicht verschiedene Prozesse, die zu Niedrigwasser führen (Sommer- und Winterniedrigwasser), zu vermischen.

Im Folgenden wird auf die methodischen Unterschiede der Verfahren eingegangen. Um diese Unterschiede zu verdeutlichen, wird die Anwendung der Verfahren auf das Einzugsgebiet der Langeten in Huttwil, Häberenberg, aufgezeigt. Es handelt sich dabei um ein 60 km² großes Einzugsgebiet im Schweizer Mittelland. Die mittlere Einzugsgebietshöhe liegt bei 766 m ü. M., der mittlere Abfluss an der Station beträgt rund 1,3 m³/s und der Jahresgang des Abflusses ist pluvial geprägt.

3.1 Verfahren Demuth

Das Verfahren DEMUTH (1993) basiert auf dem graphischen Ansatz von KILLE (1970). Die Kille-Methode zur Abschätzung des Basisabflusses aus beobachteten Niedrigwasserabflüssen wurde von Demuth automatisiert und objektiviert. Das Verfahren Demuth benötigt die minimalen Tagesmittelwerte jedes Monats (vgl. Dreiecke in Abb. 1, oben) einer mindestens zehnjährigen Abflussreihe. Diese Werte werden der Größe nach geordnet und in aufsteigender Folge aufgezeichnet (Abb. 2). Aus der derart geordneten Kurve der monatlichen Minimalwerte lässt sich der Knickpunkt zwischen Abflusswerten, die dem Basisabfluss zuzuordnen sind, und den Abflusswerten anderer Abflusskomponenten bestimmen (Abb. 2a).

In einigen Fällen ist dieser grafische Ansatz nicht anwendbar, nämlich dann, wenn kein Knickpunkt bestimmt werden kann (Abb. 2b). Laut DEMUTH (1993) ist das meist in Einzugsgebieten mit geringen Reliefunterschieden der Fall. Das Verfahren Demuth liefert in diesen Fällen kein Ergebnis für den Basisabfluss. Die Anwendung des Verfahrens geschah in der vorliegenden Studie wie in DEMUTH (1993) beschrieben. Der so bestimmte mittlere Basisabfluss der Sommermonate der gesamten Zeitreihe 1974–2008 ist in Abbildung 2 als gestrichelte horizontale Linie

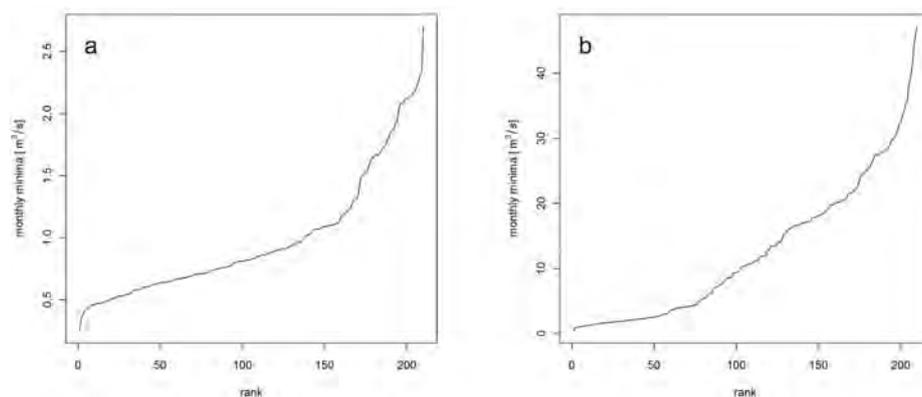


Abbildung 2

Der Einfluss der Form der „Dauerkurve der monatlichen Abflussminima“ auf die Anwendbarkeit des Verfahrens Demuth. a) S-förmiger Kurventyp, bei dem der Knickpunkt zwischen Basisabfluss und anderen Abflusskomponenten bestimmt werden kann; b) parabolischer Kurventyp, bei dem kein Knickpunkt bestimmt werden kann.

The influence of the shape of the “monthly runoff minima duration curve” on the applicability of the Demuth-procedure. (a) S-shaped curve type: the inflexion point is detectable between baseflow and other flow components; (b) parabolic curve type: no inflexion point is detectable.

nie ersichtlich. Aus dem geschilderten Vorgehen entsteht, im Gegensatz zu den anderen beiden verwendeten Verfahren, keine Tagesganglinie des Basisabflusses, es wird lediglich der mittlere Basisabfluss bestimmt. In seiner Untersuchung stellt Demuth fest, dass der durch sein Verfahren bestimmte Basisabfluss kleiner ist als der Basisabfluss anderer Verfahren. Den Grund dafür sieht er in der strikten Trennung des reinen Basisabflusses von anderen Abflusskomponenten. Als Steuergrößen für die Variabilität des Basisabflusses identifiziert er den geologischen Untergrund, Bodeneigenschaften und klimatische Faktoren.

3.2 Verfahren IH

Das wohl bekannteste Verfahren zur Abtrennung des Basisabflusses vom Gesamtabfluss ist dasjenige des Institute of Hydrology aus dem Jahre 1980 (INSTITUTE OF HYDROLOGY 1980). Es wurde hier angewandt wie in TALLAKSEN (2004) beschrieben. Die minimalen Abflüsse eines gleitenden nicht überlappenden Zeitfensters von fünf Tagen bilden die Ausgangslage für die Bestimmung des Basisabflusses. Aus diesen minimalen Abflüssen werden Stützpunkte des Basisabflusses ermittelt, zwischen denen anschließend linear interpoliert wird. Es entsteht so eine Ganglinie des Basisabflusses in täglicher Auflösung (Abb. 1, Mitte). Die Separation mit dem Verfahren IH trennt kurzfristige Abflusszunahmen vollständig vom Basisabfluss ab. So nimmt der Basisabfluss im Jahr 2003 von Anfang Juni bis Ende August beinahe kontinuierlich ab, obwohl einzelne kurzfristige Hochwasserereignisse aufgetreten sind. Ein sehr starkes Niederschlagsereignis wie dasjenige Ende August 2005 bewirkt jedoch eine Erhöhung des Basisabflusses.

3.3 Verfahren Wittenberg

Das Verfahren WITTENBERG (1999) trägt dem Umstand Rechnung, dass der Basisabfluss nicht nur aus dem Grundwasser stammt. Die Verknüpfung verschiedener Quellen des Basisabflusses (Grundwasser, Boden, Schnee, Gletscher etc.) muss zu einer nichtlinearen Gleichung zur Bestimmung des Basisabflusses führen (HALL 1968). Wittenberg errechnet auf der Grundlage eines nichtlinearen Algorithmus den Basisabfluss ausgehend vom letzten Abflusswert einer Zeitreihe rückwärts gegen die

Zeit. Die Rückgangskurven des Basisabflusses sind dabei von der mittleren saisonalen Rückgangskurve des Gesamtabflusses abhängig. Zwischen den Rückgangskurven des Basisabflusses – also im ansteigenden Ast des gemessenen Abflusses – kommt eine einfache Übergangsfunktion (FRÖHLICH et al. 1994) zum Tragen. Das Verfahren wurde angewendet wie in WITTENBERG (1999) und FRÖHLICH et al. (1994) erläutert. Abbildung 1 (unten) zeigt auch hier die Auswirkungen dieser Basisabflussabtrennung. Die Besonderheit der Methode liegt im nichtlinearen Ansatz zur Abtrennung des Basisabflusses: $S = aQ^b$. Nichtlinearität – in diesem Fall eine Exponentialfunktion mit dem Exponenten $b = 0,5$ – soll zwischen dem Speicherinhalt (S) eines Einzugsgebietes und dem Produkt aus Rezessionskonstante (a) und Basisabfluss (Q) be-

stehen. Der Basisabfluss ist überproportional höher bei einem hohen Füllungsgrad im Vergleich zu einem tiefen Füllungsgrad. Damit umgeht Wittenberg die seiner Meinung nach unsinnige Trennung in mehrere unterirdische Speicher. Der Boden und der geologische Untergrund sind nach dieser Auffassung ein kommunizierendes System. Daher steigt der Basisabfluss während des Anstieges des gemessenen Abflusses ebenfalls rasch an (Abb. 1, unten) und liegt deutlich näher bei der gemessenen Abflusskurve.

Allen Verfahren ist gemeinsam, dass der Basisabfluss aus Tagesmittelwerten der gemessenen Abflussganglinie, ohne Zuhilfenahme weiterer Größen, extrahiert wird. Bei den Verfahren Demuth und IH handelt es sich um Filtermethoden. Sie wählen aus dem Hydrographen spezifische Tageswerte heraus und verarbeiten diese weiter, wohingegen das Verfahren Wittenberg den Basisabfluss vom letzten Abflusswert der Zeitreihe ausgehend rückwärts mittels eines Algorithmus berechnet. Mit den beiden Verfahren IH und Wittenberg erhalten wir eine komplette Zeitreihe des Basisabflusses (Abb. 1). Die beiden Methoden scheiden auf den ersten Blick auch einen ähnlichen Anteil des Gesamtabflusses als Basisabfluss aus. Langandauernde Anstiege des Gesamtabflusses führen bei beiden Verfahren zu einem Anstieg des Basisabflusses, wohingegen kurzzeitige Anstiege keinen Einfluss auf den Basisabfluss haben. Vor allem im Sommerhalbjahr 2005 werden die Unterschiede zwischen den Verfahren deutlich: das Verfahren Wittenberg ergibt einen deutlich höheren Anteil des Basisabflusses. Das Starkniederschlagsereignis Ende August 2005 führt zwar auch beim Verfahren IH zu einem Anstieg des Basisabflusses, der Großteil des Abflussvolumens dieses Ereignisses wird aber dem Direktabfluss zugerechnet.

4 Resultate

Zur Charakterisierung von Einzugsgebieten in Bezug auf den Basisabfluss wird meist der Basisabflussindex (BFI – base flow index) verwendet. Dadurch kann das Gebiet mit einer einzigen Maßzahl beschrieben werden. „Of primary importance to low-flow studies is the base flow index (BFI). (...) It is a non-dimensional ratio which is defined as the volume of baseflow divided by the volume of total streamflow“ (SMAKHTIN 2001). In der vorliegenden Studie ist der BFI der Quotient des mittleren täglichen Basisabflusses und des mittleren täglichen Gesamtabflusses. Der Index ist unabhängig von der Einzugsgebietsgröße und beschreibt, welcher Anteil des Gesamtabflusses stark verzögert zum Abfluss gelangt. Einzugsgebiete mit BFI-Werten nahe bei 1 haben einen großen Anteil Basisabfluss, wohingegen Einzugsgebiete mit BFI-Werten nahe bei 0 sehr wenig Basisabfluss haben (VOGT & SOMMA 2000).

Die durch die drei Verfahren abgetrennten Basisabflussvolumen der Sommermonate Mai bis Oktober unterscheiden sich für ein und dasselbe Einzugsgebiet. Der BFI für die Station Kleine Emme-Littau, Reussbühl beispielsweise beträgt beim Verfahren Demuth lediglich 0,26, beim Verfahren IH 0,41 und beim Verfahren Wittenberg 0,61. Je nach Verfahren würde man also bei demselben Gebiet von einer eher schlechten Speicherung – bei einem BFI von 0,26 – bis zu einer eher guten Speicherung – bei einem BFI von 0,61 – sprechen (VOGT & SOMMA 2000). Aufgrund der methodischen Unterschiede ist diese Abstufung der Ergebnisse

zu erwarten. In allen untersuchten Einzugsgebieten präsentiert sich diese Abfolge vom tiefsten BFI-Wert beim Verfahren Demuth über den BFI-Wert nach dem Verfahren IH hin zum größten Wert, bestimmt nach dem Verfahren Wittenberg. Die drei Verfahren spannen insgesamt einen Bereich für den BFI zwischen 0,12 und 0,88 auf (Abb. 3).

Das Verfahren Demuth deckt einen Bereich von 0,11 bis 0,63 ab und hat einen Median von 0,35. Das Verfahren IH ergibt BFI-Werte zwischen 0,11 und 0,78 bei einem Median von 0,53. Das Verfahren Wittenberg schließlich ergibt BFI-Werte zwischen 0,44 und 0,88 bei einem Median von 0,7. Die Distanz zwischen den BFI-Werten der verschiedenen Verfahren für ein Einzugsgebiet kann daher nicht pauschal von einem Einzugsgebiet auf das andere übertragen werden. Beim Verfahren IH sind beispielsweise nicht alle BFI-Werte um denselben Betrag höher als die BFI-Werte beim Verfahren Demuth. Im folgenden Kapitel werden die Resultate der Basisabflussanalyse anhand des BFI unter drei Blickwinkeln vorgestellt: Neben einer Darstellung der räumlichen sowie zeitlichen Variabilität der BFI-Werte erfolgt ein Vergleich dieser Werte mit verschiedenen Gebietskenngrößen.

4.1 Räumliche Variabilität

Die räumliche Analyse gibt einen ersten Überblick über mögliche Zusammenhänge zwischen Speicherung im Einzugsgebiet und dem abgeschätzten Basisabfluss. Der Vergleich der einzugsgebietspezifischen Basisabflussindices mit den entsprechenden Abflussregimes (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992) und der Zuteilung zu Niedrigwasserregionen einer früheren Untersuchung (ASCHWANDEN & KAN 1999) bieten im Weiteren die Möglichkeit einer summarischen Beurteilung des Einflusses von ganzen Prozessgruppen auf den Basisabflussindex.

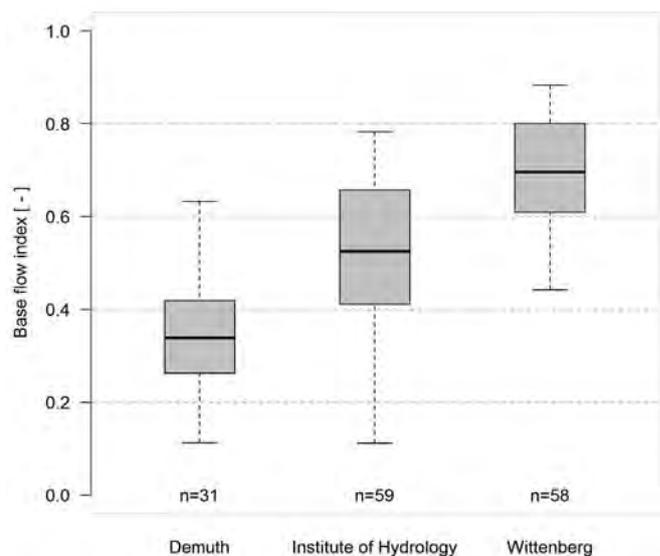


Abbildung 3

Verteilung der ermittelten Werte für den Basisabflussindex aller untersuchter Einzugsgebiete, dargestellt pro Basisabflusseparationsverfahren. Die Anzahl erfolgreich analysierter Einzugsgebiete ist mit n angegeben.

Distribution of the baseflow indices of all catchments under investigation, shown for each baseflow-separation procedure separately. The number of successful applications is indicated with n.

Die Karten in Abbildung 4 zeigen für alle drei Basisabflusseparationsverfahren die räumliche Verteilung der BFI-Werte. Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Verfahren werden durch die Farbkodierung und das Symbol verdeutlicht, grau hinterlegt ist das Mittelland. Die Farben teilen die Werte eines Verfahrens in vier Klassen von tiefen BFI-Werten (rot), über zwei mittlere Klassen (orange und hellblau) zu einer Klasse mit sehr hohen BFI-Werten (dunkelblau) ein. Die Unterteilung geschieht relativ anhand der Quartile der Resultate eines jeden Verfahrens (vgl. dazu die Graphiken links der Karten in Abb. 4). Die Verteilung präsentiert sich für die Verfahren IH und Wittenberg sehr ähnlich, nur in einzelnen Fällen weichen die Farben in den beiden Karten voneinander ab. Das Verfahren Demuth weist bereits größere Abweichungen auf, aber auch hier stimmt die Farbverteilung größtenteils mit den anderen beiden Karten überein. Eine Häufung der jeweils kleinsten Werte (rote Farbe) entlang der Alpen und im östlichen Mittelland (vgl. Abb. 5, Region 5 und 3) fällt auf. Eine mögliche Erklärung dafür ist das Fehlen von großen Speichern in diesen Gebieten. Durch den voralpinen Charakter der Einzugsgebiete gibt es hier einerseits keine großen Grundwasservorkommen und andererseits keine Gletscher. Deren Einfluss wird in den Alpen deutlich, wo sich nur hohe BFI-Werte finden (hellblau und dunkelblau). Hier bewirken Gletscher- und auch Schneeschmelze von Mai bis Oktober einen ausgeglichenen Abfluss und damit einen hohen Anteil Basisabfluss am Gesamtabfluss. BFI-Werte der höchsten Klasse (dunkelblau) kommen aber auch in den anderen Regionen vor. Im Mittelland kann eine günstige Beeinflussung durch Boden- und Grundwasserspeicherung vermutet werden. Die geringe Speicherleistung des Bodens im durch Karst dominierten Jura würde nicht so hohe BFI-Werte erwarten lassen wie alle drei Verfahren für diese Region ergeben. In der Region Jura spricht der hohe BFI-Wert daher für einen starken Beitrag der großen Karstgrundwässer (BUWAL et al. 2004). Die Symbole in Abbildung 4 teilen die Ergebnisse der Verfahren ebenfalls in vier Klassen ein. Die Zuordnung erfolgt aber anhand von fixen Grenzen, wodurch beispielsweise das Symbol Kreis in allen drei Karten für BFI-Werte zwischen 0,5 und 0,75 steht (vgl. dazu die Graphiken links der Karten in Abb. 4).

Das Verfahren Wittenberg ergibt fast ausschließlich Werte größer als 0,5. BFI-Werte kleiner als 0,5 kommen nur im Mittelland in einem Band entlang der Alpen vor. Diese Einzugsgebiete werden durch das Verfahren IH mit ähnlich kleinen oder sogar noch kleineren Werten wiedergegeben. Übereinstimmungen finden sich bei diesen beiden Verfahren auch bei den höchsten Werten (Dreieck auf der Spitze): mehrere Gebiete im Alpenraum und ein Gebiet im Mittelland (Langeten Huttwil, vgl. Abb. 5, Karte rechts unten) weisen einen BFI von mehr als 0,75 auf. Bei den hohen BFI-Werten findet sich beim Verfahren Demuth keine Übereinstimmung mit den anderen beiden Verfahren. Insbesondere kann für die Langeten in Huttwil kein BFI-Wert abgeschätzt werden.

Der Vergleich der BFI-Werte mit den Abflussregimes (Abb. 5, links) ist ein Vergleich mit den mittleren saisonalen Abflussschwankungen eines Einzugsgebietes. Dominante Steuergröße bei den Regimes ist der Jahresgang von Temperatur und Niederschlag (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992). Beim Vergleich der Basisabflussindizes mit Niedrigwasserregionen (Abb. 5, rechts) werden in erster Linie Vergleiche mit sich – in Bezug auf

die Bestimmung des Q347 – ähnlich verhaltenden Einzugsgebieten gemacht (ASCHWANDEN & KAN 1999). Diese basieren zumindest teilweise auf den Klimaregionen der MeteoSchweiz (SCHÜEPP et al. 1978).

Eine Gegenüberstellung der BFI-Werte mit den Abflussregimes ergibt beim Verfahren Wittenberg den klarsten Zusammenhang (Abb. 5, links unten). In Gebieten, in denen ein starker Einfluss von Gletschern- und Schneespeicherung besteht (Regimes *aglaciare* (1) bis *nival-alpin* (6)), ist der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss in den Sommermonaten durchwegs groß. Das Niveau liegt hier bei einem BFI von rund 0,8 und die Streuung ist in allen sechs Regimes sehr klein. Hier kann eindeutig die Schnee- und Gletscherschmelze als dominanter Prozess identifiziert werden. Zu den Regimes der Alpensüdseite (Regimes 13 bis 16) ist mangels ausreichender Anzahl Stationen (4) keine Aussage möglich. Die Regimes des Mittellandes und des Juras (Regimes 7 bis 12) zeichnen sich durch eine höhere Streuung aus. Innerhalb dieser Gruppe findet sich bei den Regimes *pluvial inférieure* (10) bis *nivo-pluvial jurassien* (12) eine vergleichbare Streuung im gleichen Wertebereich. Die Dominanz stark ausgeprägter Untergrundspeicherung kann beides erklären: Die hohen Mittelwerte zeugen, in Ermangelung einer anderen Speichergröße, vom Vorhandensein einer ausgeprägten Speicherung der Niederschläge im Untergrund. Die große Streuung ist einerseits durch die hohe räumliche Variabilität des geologischen Untergrundes und andererseits durch die zu vermutende hohe Variabilität des pedologischen Untergrundes, die bereits frühere Untersuchungen festgestellt haben, erklärbar.

Das kleinste Mittel der BFI-Werte findet sich beim Regime *pluvial supérieure* (9). Alle Einzugsgebiete dieses Regimetypes finden sich wiederum in einem Band entlang der Alpen. In diesem Regime wird einerseits der Übergang von den schneedominierten, mit winterlichen Abflussminima, zu den niederschlagsdominierten Abflussregimes, mit Abflussminima im Sommerhalbjahr, deutlich (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1985). Andererseits fehlen in diesen voralpinen Einzugsgebieten meist große Untergrundspeicher. Die kleinen BFI-Werte entstehen daher durch das Nichtvorhandensein eines Gletscher- oder eines ausreichenden Schneespeichers in Kombination mit dem Fehlen von großer Untergrundspeicherung.

Die Ergebnisse für das Verfahren IH sind auf einem leicht tieferen Niveau wiederum beinahe identisch mit den Ergebnissen des Verfahrens Wittenberg (Abb. 5, links Mitte). Das methodenbedingte Wegfallen rund der Hälfte aller Stationen beim Verfahren Demuth wirkt sich sehr stark auf die Aussagemöglichkeit aus (Abb. 5, links oben). Zu den glazial und nival geprägten Gebieten ist keine Aussage mehr möglich. Für die Regimes *nivo-pluvial préalpin* (8) bis *nivo-pluvial jurassien* (12) entstehen, wiederum auf einem tieferen Niveau, vergleichbare Mittelwerte des BFI.

Im Vergleich mit den Niedrigwasserregionen (Abb. 5, rechts) bestätigt sich die Schlussfolgerung aus der Regimeanalyse, dass im alpinen Raum die höchsten BFI-Werte vorkommen. Darüber hinaus gibt es, insbesondere im Mittelland, keine Indizien für eine Übereinstimmung der Niedrigwasserregionen zur Bestimmung der Q347 mit den BFI-Werten. Der Prozess, welcher zu einem hohen oder niedrigen Anteil des Basisabflusses am Ge-

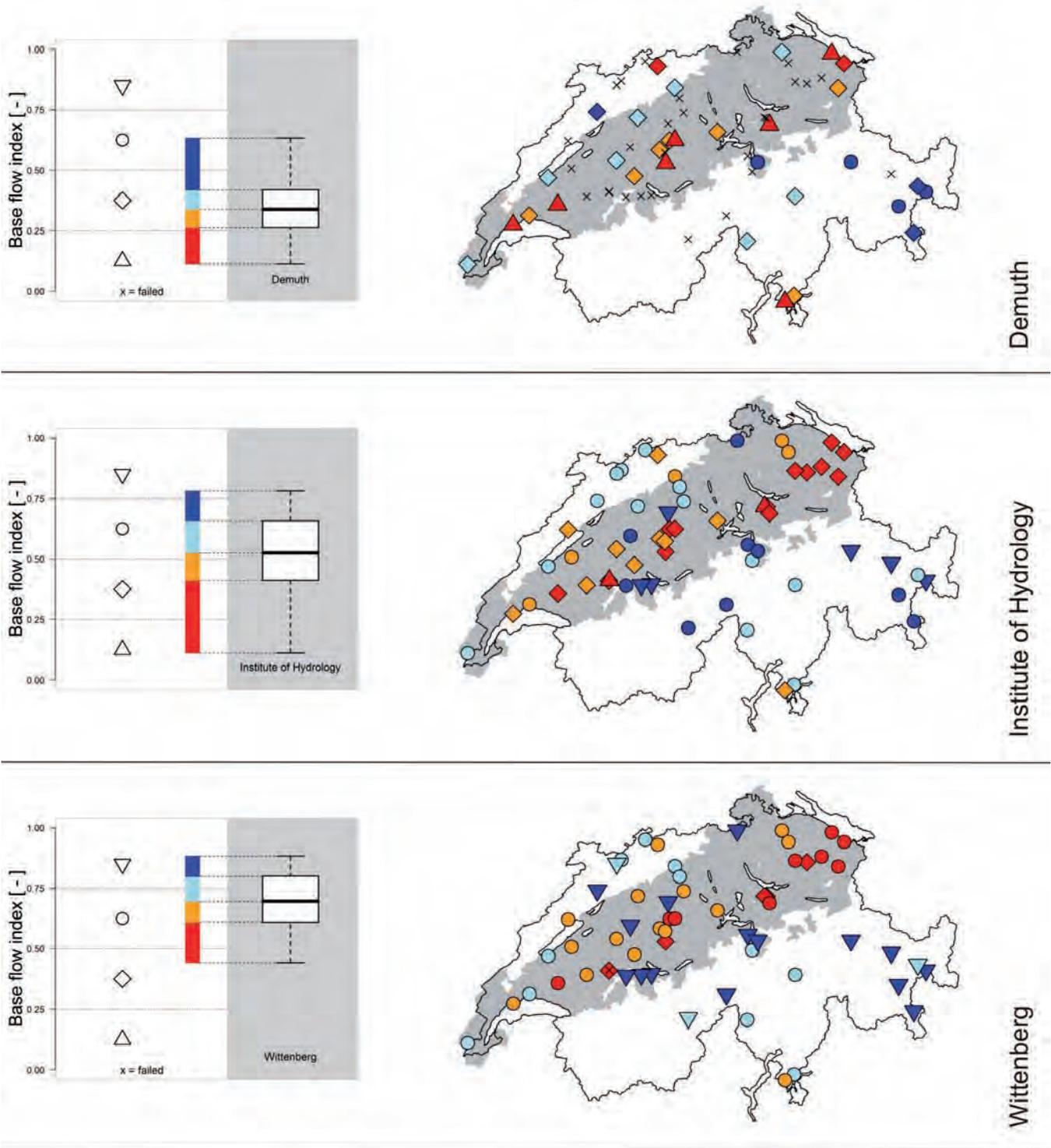


Abbildung 4

Räumliche Verteilung der Basisabflussindizes (Mai – Oktober) für die drei verwendeten Basisabflussseparationsverfahren. Farblich ist die relative Größe des BFI-Wertes innerhalb eines Verfahrens hervorgehoben. Bspw. zeigt die Farbe Rot in allen drei Karten BFI-Werte kleiner als das entsprechende 25 Prozent Quantil (vgl. auch roter Balken in den Graphiken links der Karten). Die verschiedenen Symbole stellen eine absolute Zuordnung der Werte dar. BFI-Werte zwischen 0,5 und 0,75 sind beispielsweise in allen Karten mit Kreisen dargestellt (vgl. Graphiken links der Karten).

Spatial distribution of the baseflow indices (May – October) according to the three separation procedures used. The colours show a relative classification based on the quartiles of each procedure and thus allow a relative allocation to high or low baseflow indices throughout the different separation methods (see inset on the left). The symbols show an absolute classification of the theoretically possible ranges of the baseflow index between 0 and 1. The circles in the map therefore stand for a value between 0.5 and 0.75.

samtabfluss führt, ist demnach nicht derselbe, der entscheidend ist für die Bestimmung des Abflusswertes Q347. Der Einfluss des Klimas auf den Basisabfluss beschränkt sich demnach offen-

sichtlich auf den Jahresgang der Temperatur, d.h. ob während den Sommermonaten Gletscher- und Schneeschmelze zum Abfluss gelangen.

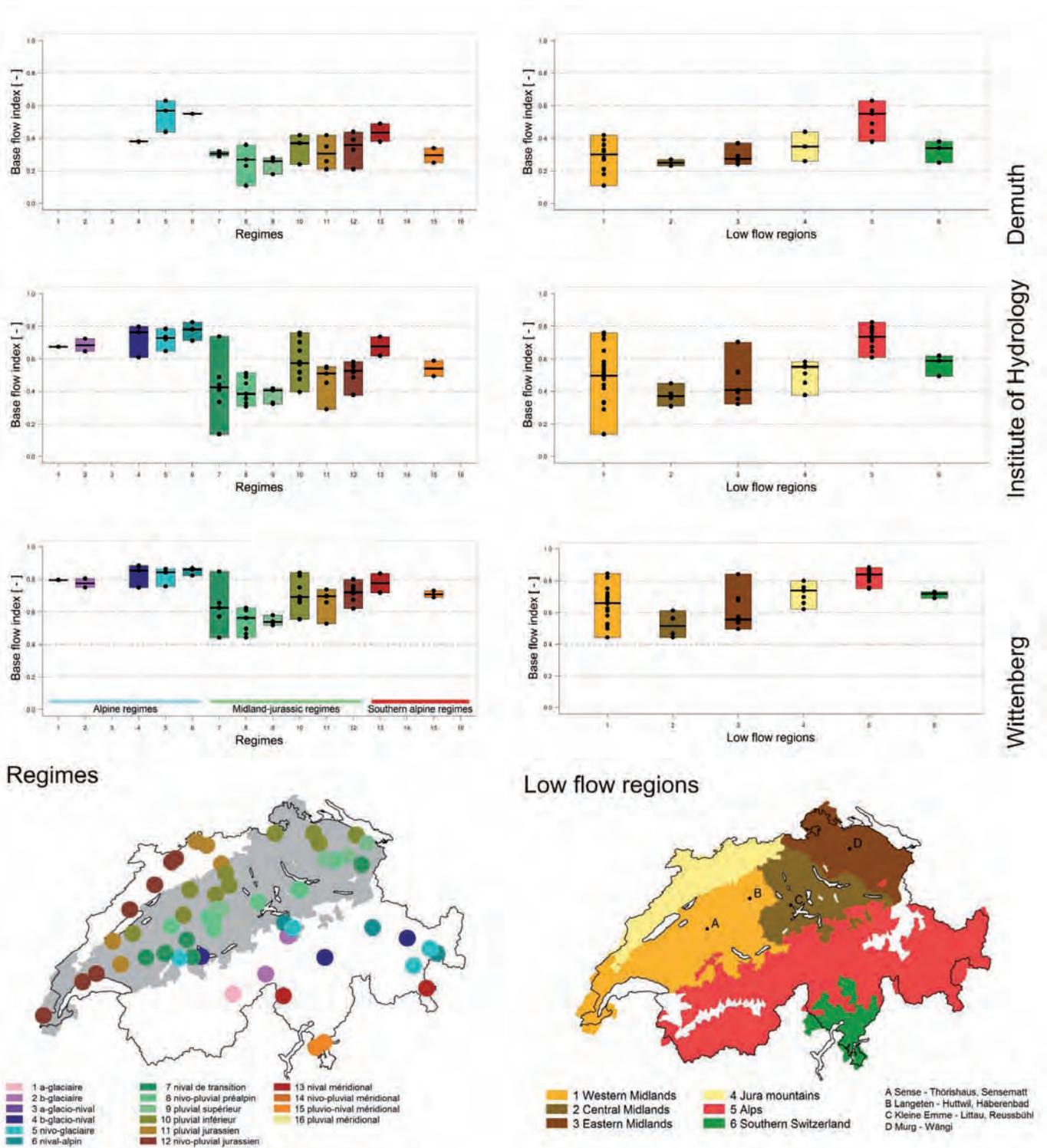


Abbildung 5
 Vergleich der Basisabflussindices mit den Abflussregimes der Schweiz (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992) links und den Niedrigwasserregionen von ASCHWANDEN & KAN (1999) rechts.
 Relationship of the baseflow indices with the runoff regimes (WEINGARTNER & ASCHWANDEN 1992) on the left-hand side and with the low-flow regions (defined in ASCHWANDEN & KAN 1999) on the right-hand side.

Aus der räumlichen Analyse lassen sich folgende Schlüsse ziehen: Die Schnee- und Gletscherschmelze ist bei der Entstehung des Basisabflusses der Sommermonate für Einzugsgebiete im Alpenraum entscheidend. Im Mittelland und Jura variieren die BFI-Werte stark von einem Gebiet zum anderen, was für Beeinflussung der BFI-Werte durch einzugsgebietspezifische Prozesse im Untergrund spricht. Die BFI-Werte zeigen hier

dann auch keinen Zusammenhang mit Klimaregionen. Die Häufung niedriger BFI-Werte entlang der Alpen zeigt, dass das Fehlen von abflussverzögernden Speichern in einem Einzugsgebiet zu einem geringeren Anteil von Basisabfluss am Gesamtfluss führt.

4.2 Zeitliche Veränderung

Die Veränderung des Basisabflusses über die Zeit zeigt die Veränderung des Füllungsgrades der relevanten Speicher und dadurch Veränderungen im Niedrigwasserprozess. Die Resultate werden hier nur für das Verfahren Wittenberg präsentiert, gelten aber auf einem tieferen Niveau sinngemäß auch für das Verfahren IH. Für das Verfahren Demuth ist die Bestimmung eines jährlichen BFI-Wertes aus methodischen Gründen nicht möglich.

Die interannuelle Veränderung des BFI (Abb. 6) ist bei der Langeten in Huttwil und der Murg in Wängi sehr klein. Selbst Sommer mit einer ausgeprägten Trockenheit wie 1976 und 2003 (BUWAL et al. 2004), in denen das Abflussvolumen deutlich verringert ist, verändern den Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss kaum. Im Vergleich dazu ist der Basisabflussindex an der Station Kleine Emme in Littau und an der Sense in Thörishaus stärkeren Schwankungen unterworfen, wobei auch hier die trockenen Sommer 1976 und 2003 nicht durch starke Abweichungen vom langjährigen Mittel auffallen (vgl. Abb. 5, rechts unten, für die Lage der Einzugsgebiete).

Die beiden letztgenannten Gebiete sind voralpine Einzugsgebiete mit einem nivo-pluvialen Abflussregime. Bei ihnen zeigt sich der Einfluss der Schneeschmelze auf den Basisabflussindex. Die unterschiedliche Ausprägung der Schneedecke von Jahr zu Jahr hat vermutlich einen Einfluss auf den Basisabflussindex, wodurch die interannuellen Schwankungen erklärt werden können. Die Abnahme des Fünfjahresmittels des Basisabflussindexes seit den 1970er Jahren lässt einen schwindenden Einfluss der Schneeschmelze auf den Sommerbasisabfluss vermuten, was durch die Zunahme der Temperatur seit den 1970er Jahren erklärt werden kann (BADER & BANTLE 2004, LATERNSEK & SCHNEEBELI 2003, SCHERRER 2004). Die Klimaänderung wirkt sich demnach über eine Veränderung des Schneespeichers auf den Basisabfluss aus. Einzugsgebiete mit einem nivalen Regime zeigen deshalb bereits heute eine Reaktion auf die Klimaveränderung. Extremereignisse wie die Hitzesommer 1976 und 2003 beeinflussen den Basisabfluss aber nicht, da die entscheidenden Prozesse nicht von kurzfristigen Veränderungen beeinflusst werden. Eine Analyse von langen Zeitreihen bestärkt den stabilen Charakter des Basisabflussindexes im Verlauf des 20. Jahrhunderts (Abb. 6, unten).

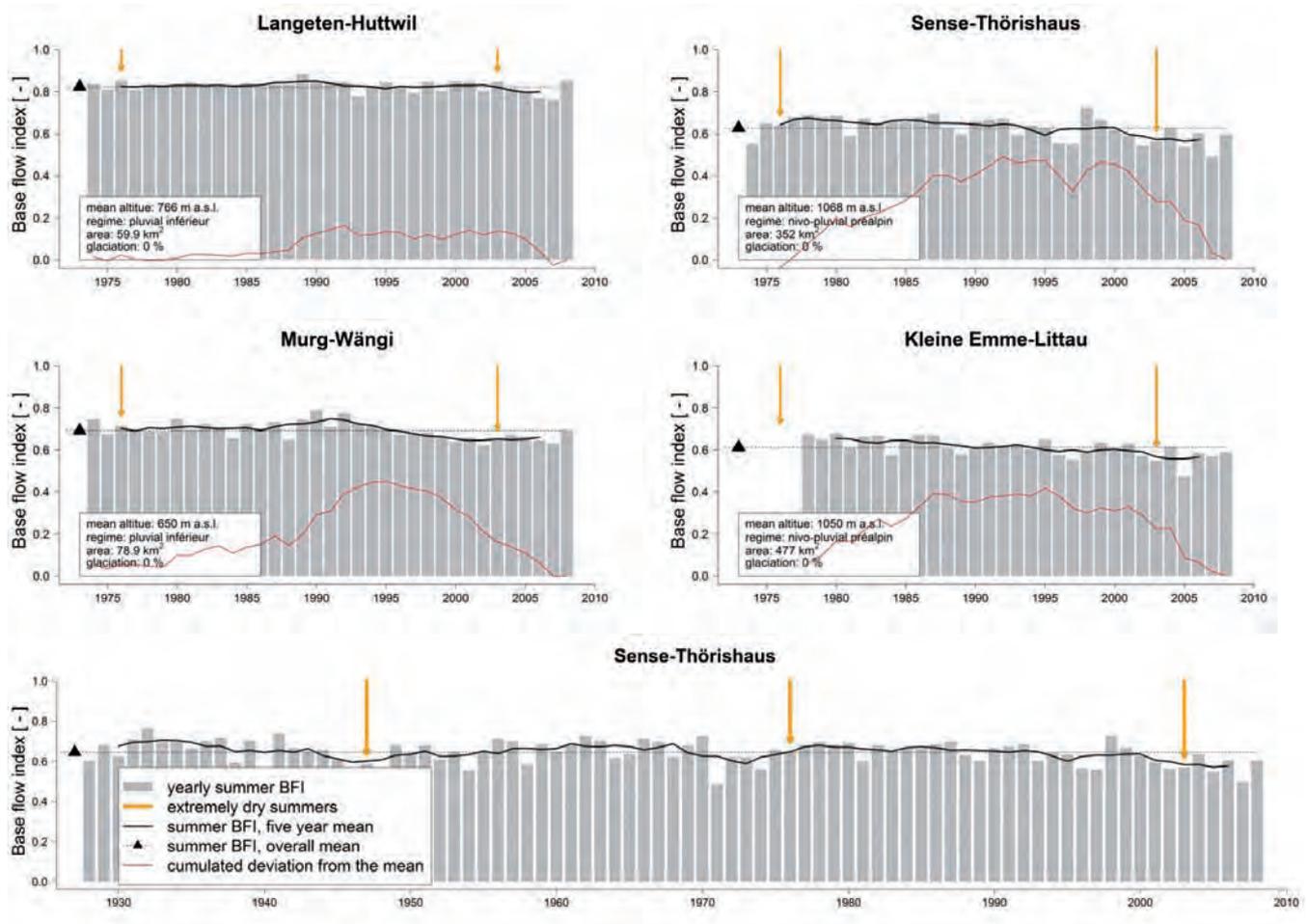


Abbildung 6

Zeitliche Veränderung des jährlichen (Mai – Oktober) und des fünfjährigen Mittels der Basisabflussindices (Verfahren Wittenberg) für vier ausgewählte Einzugsgebiete des Schweizer Mittellandes: Langeten-Huttwil, Sense-Thörishaus, Murg-Wängi, Kleine Emme-Littau (vgl. Abb. 5). In rot ist die kumulierte Abweichung vom jeweiligen Mittelwert aufgetragen: Ein Anstieg bedeutet eine Periode mit überdurchschnittlichen BFI-Werten und ein Absinken steht für eine Periode mit unterdurchschnittlichen BFI-Werten.

Temporal changes of yearly (May – October) and the five-year means of the baseflow indices (procedure Wittenberg) shown for four selected catchments in the Swiss Midlands: Langeten-Huttwil, Sense-Thörishaus, Murg-Wängi, Kleine Emme-Littau (see Figure 5). The red line is the cumulative deviation from the mean: an increase describes a period with values above the mean BFI and a decrease describes a period with values below mean.

Die Abflüsse an der Langeten und der Murg sind pluvial geprägt, wodurch die Speicherung von Niederschlag als Schnee keinen nennenswerten Einfluss auf den Sommerbasisabfluss haben kann. Es zeigt sich daher auch kein Rückgang der jährlichen BFI-Werte aufgrund der Temperaturzunahme seit den 1970er Jahren. Die sehr kleinen interannuellen Veränderungen sprechen für einen starken Einfluss der Untergrundspeicherung auf den Basisabfluss von Mai bis Oktober. Diese Untergrundspeicherung hat sich, insbesondere an der Langeten, in der Vergangenheit kaum verändert, auch nicht durch den Einfluss der Klimaveränderung.

Das heißt, dass in Einzugsgebieten des Mittellandes auch bei niedrigen Sommerabflüssen dieselben Prozesse bei der Entleerung der Speicher stattfinden, die auch bei höheren Abflussmengen zum Tragen kommen. Zumindest in Einzugsgebieten ohne nivalen Abflussverhalten widerspiegelt der Basisabflussindex diese über Jahre unveränderten Speicherprozesse im Untergrund.

4.3 Zusammenhang des Basisabflusses mit Einzugsgebietscharakteristika

Der Zusammenhang der BFI-Werte mit den mittleren Einzugsgebietshöhen, den Einzugsgebietsflächen, der Seefläche und der Fläche von Grundwasservorkommen verschiedener Mächtigkeit wurde im Hinblick auf ein besseres Verständnis der niedrigwasserrelevanten Prozesse im Schweizer Mittelland analysiert.

In Abbildung 7 werden die BFI-Werte nach Wittenberg der mittleren Einzugsgebietshöhe gegenübergestellt. Einzugsgebiete mit einer mittleren Höhe über 1.500 m ü. M. haben tendenziell

höhere BFI-Werte als Gebiete unterhalb dieser Grenze. Der Zusammenhang zwischen Höhe und BFI ist jedoch kein stetiger und klar nicht linear. Es besteht eine deutliche Diskontinuität bei rund 1.500 m ü. M.

Frühere Untersuchungen (ASCHWANDEN 1992, ASCHWANDEN & SCHÄDLER 1988) stellten bereits unterschiedliche Niedrigwasser-Abflussverhalten in Regionen oberhalb von 1.550 m ü. M. im Vergleich zu tiefer liegenden Einzugsgebieten fest. Die getrennte Auswertung der beiden Teildatensätze zeigt einen leicht negativen Zusammenhang oberhalb von 1.550 m ü. M. und einen deutlicheren negativen Zusammenhang unterhalb dieser Grenze. Ein Bestimmtheitsmaß nahe bei 0 für die Stichprobe oberhalb von 1.550 m ü. M. zeigt das Fehlen eines statistischen Zusammenhanges der BFI-Werte und der mittleren Höhe. Unterhalb von 1.550 m ü. M. werden 30 Prozent der Varianz der BFI-Werte durch die mittlere Höhe der Einzugsgebiete erklärt. In dieser Stichprobe werden die BFI-Werte mit zunehmender Höhe kleiner.

In der Literatur wird oftmals der grundwasserbürtige Abfluss mit dem Basisabfluss gleichgesetzt. Die Analyse von elf Grundwasserklassen der Hydrogeologischen Karte der Schweiz (SWISSTOPO 2008) zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der Fläche von Grundwasservorkommen verschiedener Mächtigkeit und dem Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss prinzipiell besteht. Als Grundwasserfläche wird hier die Ausdehnung des auf die Kartenebene projizierten Grundwasserkörpers verstanden. Abbildung 8 zeigt beispielhaft den Zusammenhang der Fläche von ergiebigen Grundwasservorkommen (Grundwassermächtigkeit von über 2 bis über 20 Metern) mit dem Basisabflussindex.

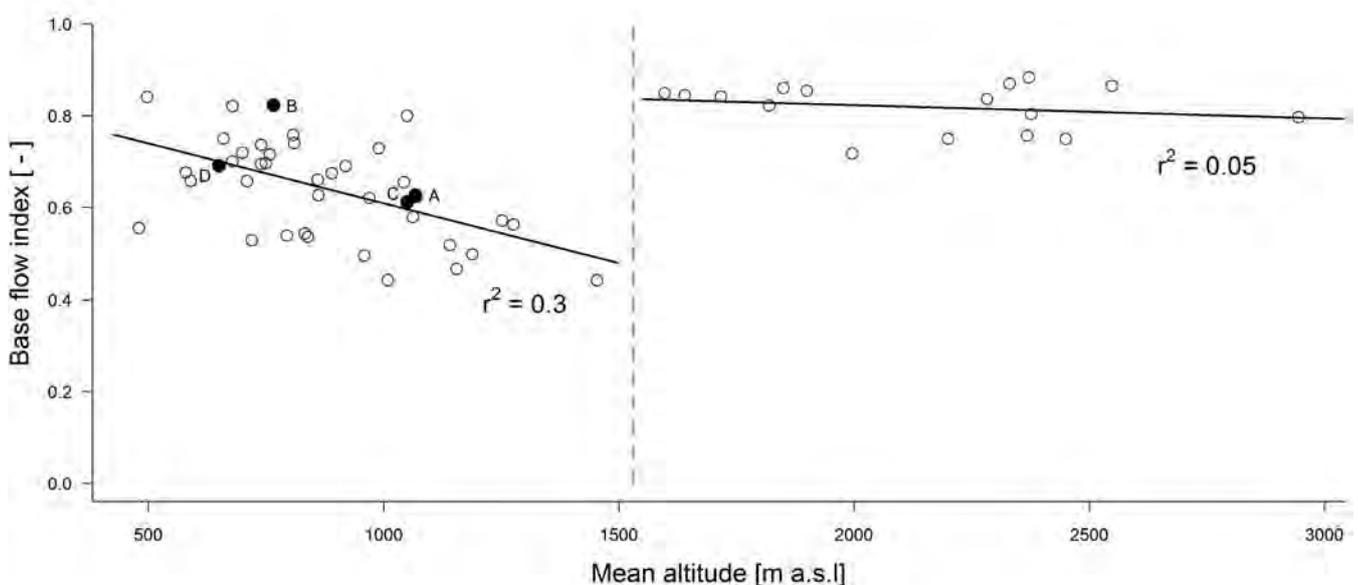


Abbildung 7

Gegenüberstellung des Basisabflussindex (Verfahren Wittenberg) und der mittleren Höhe der zugehörigen Einzugsgebiete (A – D: vgl. Abb. 5). Der Diskontinuität bei ca. 1.500 m ü. M. wurde mit der Unterteilung des Datensatzes in zwei Stichproben Rechnung getragen. R^2 : Pearsons Produktmoment Korrelationskoeffizient, signifikant auf dem 95 % Niveau.

Relation of baseflow indices (procedure Wittenberg) and the mean altitude of the corresponding catchments (A – D: see Figure 5). To account for the discontinuity around sea-level elevations of 1,500, the dataset was divided in two samples. R^2 : Pearson's product moment correlation coefficient, significant at the 95 % level.

Der Zusammenhang ist nicht sehr ausgeprägt, lediglich 32 Prozent der Varianz der BFI-Werte werden durch die lineare Regression mit dem Flächenanteil der Grundwasserleiter entsprechender Mächtigkeit erklärt. Der Grund dafür muss darin vermutet werden, dass die Grundwasserleiter nicht isoliert – d.h. ohne den Einfluss von Boden, Einzugsgebietsgröße und anderen Speichergrößen – betrachtet werden können.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden mangels eines geeigneten hochaufgelösten Datensatzes keine Vergleiche mit Bodenarten oder Bodeneigenschaften angestellt, ein Einfluss auf den Basisabfluss ist aber sehr wahrscheinlich. Ebenfalls besteht ein positiver Zusammenhang der BFI-Werte mit der oberirdischen Einzugsgebietsfläche, wobei hier auch Korrelationen mit der Ausdehnung der verschiedenen Grundwasserleiter bestehen. Die Auswirkung der Seefläche auf den Basisabfluss schließlich konnte nur anhand kleiner Seen untersucht werden, da der Abfluss an den Stationen unterhalb von großen Seen durch deren Regulierung stark beeinflusst ist. Mit den Flächen der kleinen Seen besteht ein deutlicher positiver Zusammenhang, der aber aufgrund der kleinen Anzahl Seen (5) keine Aussagekraft hat.

Die einzugsgebietsspezifischen Charakteristika zeigen, dass tiefer gelegene Gebiete des Mittellandes mit einem größeren Anteil der Fläche des Grundwasserleiters an der Gesamteinzugsgebietsfläche einen höheren BFI-Wert haben als höher gelegene voralpine Einzugsgebiete mit mehrheitlich kleineren prozentualen Grundwasserflächenanteilen. Das Grundwasser vermag aber nicht die gesamte Varianz der BFI-Werte zu erklären, weshalb ein Teil der Varianz durch die Speicherung von Niederschlag im Boden erklärt werden muss. Schlussfolgernd kann folgende Aussage gemacht werden: Der BFI-Wert steht im Mittelland mit großer Wahrscheinlichkeit für das Vermögen eines Einzugsgebietes, Niederschlag im Untergrund zu speichern und verzögert zum Abfluss gelangen zu lassen.

5 Diskussion

Die Basisabflussseparation bewährt sich auch bei Einzugsgebieten im Schweizer Mittelland zur Aufteilung des gemessenen Abflusses in die Abflusskomponenten Basisabfluss und Direktabfluss. Alle drei vorgestellten Verfahren zur Basisabflussseparation können für Einzugsgebiete im Schweizer Mittelland prinzipiell angewandt werden. Die beiden Verfahren Wittenberg und IH konnten vertieft untersucht werden und zeigen plausible Ergebnisse.

Die Hypothese, wonach der Anteil des Basisabflusses am Gesamtabfluss einen Zusammenhang mit dem Vorhandensein von verschiedenen Einzugsgebiets speichern hat, kann angenommen werden. Obwohl es nicht gelingt, den Basisabfluss im Schweizer Mittelland in den Monaten Mai bis Oktober eindeutig mehreren oder einem einzigen Speicher zuzuordnen, wie das bei Einzugsgebieten mit einer mittleren Höhe über 1.550 m ü. M. möglich ist, sprechen die Ergebnisse dennoch dafür, dass der Basisabfluss die Untergrundspeicherung im Mittelland korrekt repräsentiert. Am wahrscheinlichsten ist die Beeinflussung des Basisabflusses im Schweizer Mittelland über eine Verknüpfung von Grundwasservorkommen, Einzugsgebietsgröße sowie Bodeneigenschaften. In den vornehmlich pluvial geprägten Einzugsgebieten des Schweizer Mittellandes ist der BFI-Wert eine für ein Einzugsgebiet auch über lange Zeit stabile Größe. Insgesamt zeichnet sich für den Basisabflussindex (BFI) das Bild eines stabilen und mit den physikalischen Charakteristika eines Einzugsgebiets verbundenen Indexes ab. Der Basisabflussindex kann somit auch unter veränderten klimatischen Bedingungen – für pluvial geprägte Einzugsgebiete des Schweizer Mittellandes – als eine stabile Größe betrachtet werden. Im weiteren Fortgang des Teilprojekts CCHydro Niedrigwasser soll der berechnete Basisabfluss daher, neben dem gemessenen Abfluss, zur multi-kriteriellen Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells PREVAH (VIVIROLI 2007) verwendet werden. Mit der so erlangten verbesserten Anbindung des Modells an die tatsächlichen Speicher eines Einzugs-

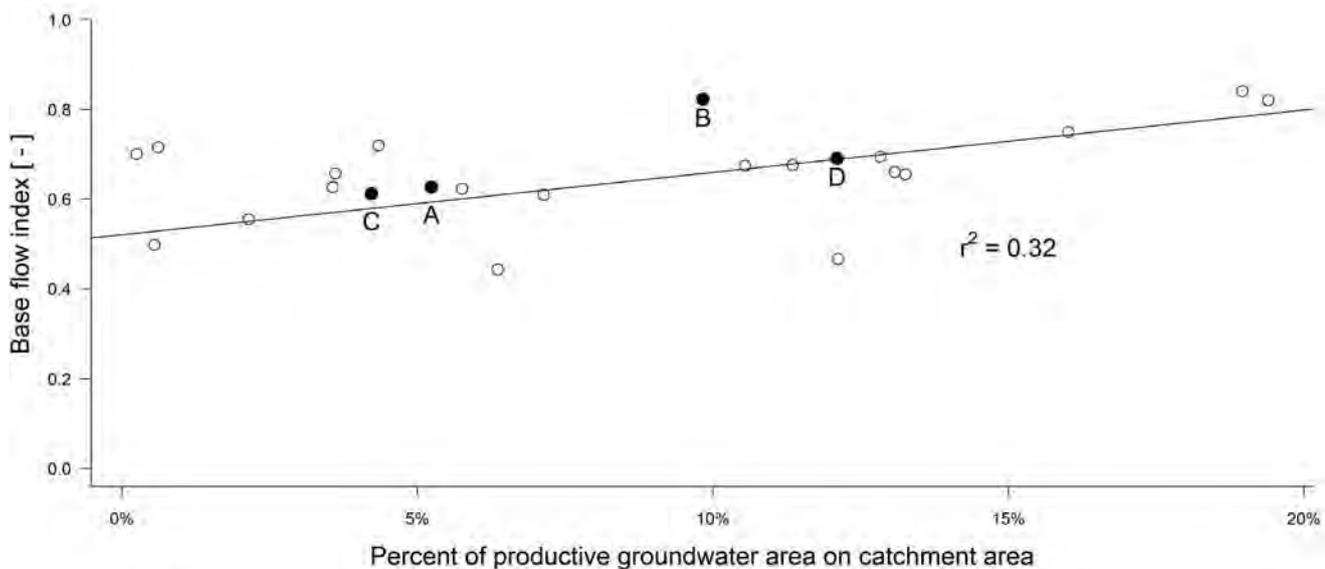


Abbildung 8

Vergleich der Basisabflussindices (Verfahren Wittenberg) mit den Flächenanteilen von Grundwasserleitern hoher Mächtigkeit an der Einzugsgebietsfläche (SWISSTOPO 2008) R^2 : Pearsons Produktmoment Korrelationskoeffizient, signifikant auf dem 95 % Niveau. A – D vgl. Abb. 5.

Comparison of baseflow indices (procedure Wittenberg) with the proportions of productive groundwater areas in the catchment areas (SWISSTOPO 2008) R^2 : Pearson's product moment correlation coefficient, significant at the 95 % level. A – D, see Figure 5.

gebietes kann seine Güte vermutlich deutlich verbessert werden. Im Niedrigwasserbereich erlangt PREVAH dadurch eine Modellgüte, welche es erlaubt, verlässlichere Projektionen für das zukünftige Abflussverhalten unter veränderten klimatischen Bedingungen zu rechnen.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes CCHydro (Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz) sollen Projektionen des Niedrigwassers für die Zeitfenster 2021–2050 und 2070–2099 für das Schweizer Mittelland erstellt werden. Bestehende hydrologische Modelle berücksichtigen die niedrigwasserspezifischen Prozesse vermutlich noch zu wenig und die zugehörigen Parametersätze basieren zu stark auf den heutigen Klimaverhältnissen, wodurch deren Anwendung in einer klimatisch stark veränderten Zukunft in Frage gestellt wird. Dieser Artikel zeigt die Ergebnisse einer Analyse der Basisabflussseparation mit dem Ziel, den Basisabfluss für eine verbesserte Modellkalibrierung zu verwenden, welche stärker auf den niedrigwasserspezifischen Prozessen in den Einzugsgebieten basiert. Drei verschiedene Verfahren zur Basisabflussseparation (DEMUTH 1993, INSTITUTE OF HYDROLOGY 1980 und WITTENBERG 1999) wurden auf 59 Einzugsgebiete der Schweiz angewandt. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung des Basisabflusses mit bekannten Speicherprozessen. Die korrekte Wiedergabe des Basisabflusses auch unter extremen meteorologischen Bedingungen, wie im trocken-heißen Sommer 2003, erlaubt es, die Basisabflussseparation für eine verbesserte Modellkalibrierung mit der genannten Zielsetzung zu verwenden. Der Basisabfluss birgt insgesamt das Potenzial, die Güte eines konzeptuellen hydrologischen Modells zu verbessern.

Summary

The project CCHydro (climate change and its impact on hydrology in Switzerland) includes also projections of low-flow in the Swiss Midlands during the two time windows from 2021–2050 and 2070–2099. The low-flow generating processes are probably not sufficiently represented in the usual hydrological models. Moreover, the underlying parameters are strongly based on today's climate conditions. Therefore, the use of such models under future climate conditions is questioned. This paper shows results of an analysis of three baseflow separation techniques with the aim of assessing the usability of baseflow separation for more strongly physically based, and therefore improved, model calibration. Three different procedures to separate baseflow (DEMUTH 1993, INSTITUTE OF HYDROLOGY 1980, and WITTENBERG 1999) are applied in 59 catchments in Switzerland. The results show a good coherence of baseflow with well-known storage processes. The correct representation of the baseflow even under extreme meteorological conditions, like those of the dry and hot summer of 2003, suggests the use of these procedures to improve model calibration in the sense of the above-mentioned objective. In total, baseflow separation bears the potential to improve the performance of a conceptual hydrological model.

Danksagung

Die Autoren danken: i) der Projektleitung und der Projektgruppe CCHydro für die wertvolle Zusammenarbeit, ii) dem Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung der Studie sowie für die

Bereitstellung der Abflussdaten und der Niedrigwasser-Datenbank NQStat, iii) Prof. Dr. Siegfried Demuth und Prof. Dr. Hartmut Wittenberg für die Zurverfügungstellung ihrer Programme zur Basisabflussseparation, iv) Prof. Dr. Hartmut Wittenberg für die Rückmeldungen und Hilfestellungen bei der Anwendung seines Verfahrens. Schließlich sei den beiden unbekanntem Gutachtern für ihre konstruktiven und wertvollen Anmerkungen gedankt.

Anschrift der Verfasser:

R. Meyer
Dr. B. Schädler
Dr. D. Viviroli
Prof. Dr. R. Weingartner
Gruppe für Hydrologie
Geographisches Institut, Universität Bern
Hallerstr. 12, 3012 Bern, Schweiz
Mitglied des Oeschger-Zentrums für Klimaforschung,
Universität Bern
raphael.meyer@giub.unibe.ch

Literaturverzeichnis

- ASCHWANDEN, H. (1992): Die Niedrigwasserabflussmenge Q347. Bestimmung und Abschätzung in alpinen schweizerischen Einzugsgebieten. – Mitteilung 18 der Landeshydrologie Bern, Bern
- ASCHWANDEN, H. & C. KAN (1999): Die Abflussmenge Q347. Eine Standortbestimmung. – Hydrologische Mitteilungen 27 der Landeshydrologie und -geologie Bern, Bern
- ASCHWANDEN, H. & B. SCHÄDLER (1988): Die Abflussmenge Q347 als Grundlage zur Bestimmung der Restwassermenge. Möglichkeiten der Berechnung in Gebieten ohne Messungen. – Gas Wasser Abwasser 68, 491–496
- BADER, S. & H. BANTLE (2004): Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864–2001. – Veröffentlichung / MeteoSchweiz, Nr. 68, Zürich
- BAFU (2009): Ergebnisse der Grundwasserbeobachtung Schweiz (NAQUA). Zustand und Entwicklung 2004–2006. – Schriftenreihe Umwelt-Zustand 0903, Bern
- BEGERT, M., T. SCHLEGEL & W. KIRCHHOFER (2005): Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. – International Journal of Climatology 25, 65–80
- BERGSTRÖM, S. (1991): Principles and Confidence in Hydrological Modelling. – Nordic Hydrology 22, 123–136
- BIRSAN, M.-V., P. MOLNAR, P. BURLANDO & M. PFAUNDLER (2005): Streamflow trends in Switzerland. – Journal of Hydrology 314, 312–329
- BLASCHKE, A.P., R. MERZ, J. PARAJKA, J. SALINAS & G. BLÖSCHL (2011): Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot von Grund- und Oberflächenwasser. – Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 63, 31–41

- BREMICKER, M. (2008): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM. Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. – Freiburger Schriften zur Hydrologie 11, Freiburg i.Br.
- BUWAL, BWG & METEOSCHWEIZ (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. – Schriftenreihe Umwelt 369, Bern
- BWG (2005): Die Niedrigwasser-Datenbank NQStat. – Bedienungsanleitung, Bern
- DEMUTH, S. (1993): Untersuchungen zum Niedrigwasser in West-Europa. – Freiburger Schriften zur Hydrologie 1, Freiburg i.Br.
- DEMUTH, S. (2004): Niedrigwasser und Dürre – eine europäische Perspektive. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 48, 160–161
- FITZE, U. (2008): Schnee im Fokus der Wissenschaft. – Geosciences actuel, 9–13
- FRÖHLICH, K., W. FRÖHLICH & H. WITTENBERG (1994): Determination of groundwater recharge by baseflow separation: regional analysis in northeast China. – In: FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data. – IAHS Publication 221. – Wallingford, Oxfordshire, UK, 69–75
- GUNTNER, A. (1999): Multi-criterial validation of TOPMODEL in a mountainous catchment. – Hydrological Processes 13, 1603–1620
- HALL, F.R. (1968): Base-Flow Recessions – A Review. – Water Resources Research 4, 973–983
- HENNEGRIF, W. & V. KOLOKOTRONIS (2009): Klimawandel und Niedrigwasserentwicklung in Baden-Württemberg – Ursachen und Projektionen. – WasserWirtschaft 99, 32–39
- HISDAL, H., K. STAHL, L.M. TALLAKSEN & S. DEMUTH (2001): Have Streamflow Drought in Europe become more severe or frequent? – International Journal of Climatology, 317–333
- INSTITUTE OF HYDROLOGY (1980): Low flow studies. – Research Report 1, Wallingford
- KILLE, K. (1970): Das Verfahren MoNMQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. – Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft, Sonderheft Hydrogeologie Hydrogeochemie, 89–95
- KUNDZEWICZ, Z.W. & P. DÖLL (2009): Will groundwater ease freshwater stress under climate change? – Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques 54, 665–675
- LATERNSER, M. & M. SCHNEEBELI (2003): Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). – International Journal of Climatology 23, 733–750
- MCMAHON, T.A. & A. DIAZ ARENAS (1982): Methods of computation of low streamflow. A contribution to the International Hydrological Programme. – Studies and Reports in Hydrology 36, Paris
- OCCC (2008): Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz. – Bern
- OCCC & PROCLIM (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. – Bern
- PEREIRA, L.S. & H.M. KELLER (1982): Factors affecting recession parameters and flow components in eleven small Pre-Alp basins. – In: Hydrological Aspects of Alpine and High-Mountain Areas. – IAHS Publication 138, 233–242
- REBETEZ, M. & M. REINHARD (2008): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. – Theoretical and Applied Climatology 91, 27–34
- SCHÄDLER, B. & R. WEINGARTNER (2010): Impact of Climate Change on Water Resources in the Alpine Regions of Switzerland. – In: Alpine Waters. – The Handbook of Environmental Chemistry 6. – Berlin-Heidelberg, 59–69
- SCHÄR, C., P.L. VIDALE, D. LÜTHI, C. FREI, C. HÄBERLI, M.A. LINIGER & C. APPENZELLER (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. – nature 427, 332–336
- SCHERRER, S.C. (2004): Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability. – Geophysical Research Letters 31, doi:10.1029/2004GL020255
- SCHRÖDER, U. (1992): Zur Abschätzung von Niedrigwasserabflüssen im Schweizer Mittelland. – Dissertation, Universität Bern, Bern
- SCHÜEPP, M., M. BOUËT, M. BIDER & C. URFER (1978): Regionale Klimabeschreibung. 1. Teil Gesamtübersicht, Westschweiz, Wallis, Jura und Juranordfuss sowie Mittelland. – Klimatologie der Schweiz II, Zürich
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. – Zürcher Geographische Schriften 69, 161 S.
- SCHULLA, J. & K. JASPER (1998): Modellbeschreibung WaSiM-ETH. – Wasserhaushalts-Simulations-Modell ETH, Zürich
- SMAKHTIN, V.U. (2001): Low flow hydrology: a review. – Journal of Hydrology 240, 147–186
- STAHL, K. (2001): Hydrological Drought – a Study across Europe. – Freiburger Schriften zur Hydrologie 15, 113 S., Freiburg i. Br.
- SWISSTOPO (2008): Hydrogeologische Karten der Schweiz. – Bundesamt für Landestopografie, Wabern

- TALLAKSEN, L.M. & H.A.J. VAN LANEN (2004): Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. – *Developments in water science* 48, 579 S., Amsterdam
- VIVIROLI, D. (2007): Ein prozessorientiertes Modellsystem zur Ermittlung seltener Hochwasserabflüsse für ungemessene Einzugsgebiete der Schweiz. – Weiterentwicklung und Anwendung des hydrologischen Modellsystems PREVAH. – *Geographica Bernensia*, G 77, Bern
- VOGT, J.V. & F. SOMMA (2000): Drought and drought mitigation in Europe. – *Advances in natural and technological hazards research* 14, Dordrecht
- VOLKEN, D. (2010): Projektbericht. CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 54, 143–146
- WAGENER, T. & H.V. GUPTA (2005): Model identification for hydrological forecasting under uncertainty. – *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 19, 378–387
- WEINGARTNER, R. & H. ASCHWANDEN (1985): Die Abflussregimes der Schweiz. – *Publikation Gewässerkunde* 65, Bern
- WEINGARTNER, R. & H. ASCHWANDEN (1992): Abflussregimes als Grundlage zur Abschätzung von Mittelwerten des Abflusses. Tafel 5.2. – In: *Hydrologischer Atlas der Schweiz*. Bern
- WITTENBERG, H. (1999): Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes. – *Hydrological Processes* 13, 715–726
- YAPO, P.O., H.V. GUPTA & S. SOROOSHIAN (1998): Multi-objective global optimization for hydrologic models. – *Journal of Hydrology* 204, 83–97 BfL.