

Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33, S. 57-68, 6 Abb., 3 Tab.  
Halle (Saale), Mai 2011

## Saisonale Variabilität des Einflusses von Karsttributären auf die hydrologische Entwicklung der Altmühl (Bayern)

Eva Olmo Gil, Martin Trappe & Michael Becht\*

Olmo Gil, E., Trappe, M. & Becht, M. (2011): Saisonale Variabilität des Einflusses von Karsttributären auf die hydrologische Entwicklung der Altmühl (Bayern). [Seasonal variability influence of karst tributaries to the hydrological behaviour of Altmühl River (Bavaria).] – Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 32/33: 57-68, Halle (Saale).

**Kurzfassung:** Im Bereich des Karstgebietes der Südlichen Frankenalb wurde der Einfluss der Schüttung verschiedener Karstquellen auf das hydrologische Verhalten der Altmühl untersucht. Jedoch lassen sich in Karstgebieten aufgrund der karsttypischen Besonderheiten keine einfachen N-Q- Beziehungen für die jeweiligen Quelleinzugsgebiete angeben. Daher wurden nur Schüttungsaufzeichnungen der Karstquellen als Inputdaten für die Modellierung des Abflussverhaltens der Altmühl herangezogen.

Mit Hilfe des ATV-DVWK-Gewässergütemodells wurden in mehreren Szenarien die Auswirkungen und die Bedeutung der Schüttung von Karstquellen und einigen Nebengewässern auf den Abfluss der Altmühl dargestellt. Insbesondere in den Sommermonaten tragen die Karstquellen erheblich zum Abfluss der Altmühl bei, während im Winter das Wasser überwiegend aus dem mittelfränkischen Vorland stammt.

**Abstract:** The influence of several karst springs and tributaries to the hydrological behaviour of a surface river was examined for the example of the Altmühl River (South Franconian Alb, Bavaria). Simple relations between precipitation and discharge of karst springs are uncommon for karst areas. Instead discharge hydrographs of the different karst springs were used for modelling of the hydrological properties of the surface river.

To evaluate the importance of the hydrological characteristics of karst springs and other tributaries to the Altmühl discharge the ATV-DVWK water quality model was applied. Especially during summer karst springs show a high contribution to the water quantity of the Altmühl River whereas in winter most water comes from the upper catchment, which is located outside the South Franconian Alb in the Mid-Franconian foreland.

**Schlüsselwörter:** Abflussmodellierung, ATV-DVWK-Gewässergütemodell, Hydrologie, Karsthydrologie

**Keywords:** runoff modelling, ATV-DVWK water quality model, hydrology, karst hydrology

---

\* Anschriften der Autoren:

Eva Olmo Gil (evaolmogil@ku-eichstaett.de), Martin Trappe, Michael Becht, Lehrstuhl für Physische Geographie, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Ostenstr. 18, D-85072 Eichstätt.

## 1. Einführung

Beziehungen zwischen Niederschlag (N) und Abfluss (Q) sind entscheidend für das Verständnis von Stoffeintrag und hydrologischen Austauschbeziehungen im Einzugsgebiet eines Flusses. Einzugsgebiete in Karstregionen bilden hierbei keine Ausnahme, doch die charakteristische Karsthydrologie mit verschiedenen unterirdischen Fließwegen und Strömungsmustern weist recht variable Niederschlags-Abfluss-Beziehungen auf (Trappe et al. 2010). Karstquellen zeigen nach Niederschlägen häufig unterschiedliche Schüttungsmuster in Bezug auf Niederschlagsereignisse (z.B. Glaser 1998, Valdes et al. 2007, Bonacci 2007, Fleury et al. 2007, Geyer et al. 2008, Moussu et al. 2009). Zur Untersuchung des Aquiferverhaltens und des Schüttungsverhaltens von Karstquellen sind daher längerfristige Datenreihen zu Niederschlag, Evapotranspiration, Witterungsentwicklung und der Quellschüttung ebenso nötig wie detaillierte Informationen zur Geomorphologie und Geologie des Einzugsgebietes der jeweiligen Quelle.

Zur Kennzeichnung der hydrologischen Auswirkung verschiedener Karstquellen und kleinerer Nebengewässer (Karsttributäre), die ebenso das Karstgebiet entwässern, auf den anschließenden Vorfluter müssen die jeweiligen Niederschlags-Abfluss-Beziehungen, die sich im Quellschüttungsverhalten widerspiegeln, berücksichtigt werden. Aufgrund des häufig abweichenden Verhaltens der einzelnen Quellen stellt sich das Problem, dass einerseits der Aufwand bei der Datenaufnahme für die jeweiligen Quelleinzugsgebiete erheblich zunimmt, andererseits sich der Arbeitsschwerpunkt von dem zu beobachteten Vorfluter entfernt. Insofern ist das Ziel der vorliegenden Arbeit quantitative Abflussbeziehungen eines Vorfluters zu seinen Karsttributären aufzuzeigen. Hierbei sollen mehrere Fragestellungen beantwortet werden:

1. Unterscheidet sich das hydrologische Verhalten eines Vorfluters von dem seiner Karsttributäre bzw. Karstquellen?
2. Wie variiert der hydrologische Einfluss des Karstgebietes auf den Vorfluter im Jahresverlauf bzw. bei unterschiedlichen Abflusssituationen?

Als Beispiel für die hydrologische Bedeutung der Zuflüsse für Oberflächengewässer in Karstgebieten wurde die Altmühl im Bereich der Südlichen Frankenalb mit ihren Karstquellen und Nebenbächen gewählt. Ein seit mehreren Jahren laufendes Messprogramm des Lehrstuhls

Physische Geographie der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt erfasst dabei die hydrologischen Rahmenbedingungen des Karstes der Südlichen Frankenalb und die Auswirkungen auf den Hauptvorfluter, die Altmühl. Hierbei ist das übergeordnete Ziel die Quantifizierung des Einflusses der Karsttributäre bzw. Karstquellen auf die Wasserqualität der Altmühl während verschiedener Witterungsszenarien.

Zukünftig wird sich damit die Frage nach dem jahreszeitlich unterschiedlichen Nährstoffeintrag in den Vorfluter Altmühl besser beantworten lassen, da diese Nährstoffe für die Geschwindigkeit einer alljährlichen Algenblütenentwicklung in der Altmühl verantwortlich sind.

## 2. Geographische, geologische und hydrologische Rahmenbedingungen des Untersuchungsgebietes

Geomorphologisch präsentiert sich die Südliche Frankenalb als eine leicht nach Süden geneigte, seicht-wellige Hochfläche, die von tief eingeschnittenen Tälern durchzogen wird. Im Norden grenzt sie sich mit dem Steilabfall der Jura-Schichtstufe gegen das schwach hügelige mittelfränkische Vorland ab. Das Donautal bildet im Süden die Grenze. Die Südliche Frankenalb ist Teil des schwäbisch-fränkischen Karstgebietes, das aus Kalksteinen und Dolomiten des Malm (Oberjura) aufgebaut ist. Die Basis dieser verkarsteten Karbonatgesteine bilden die wasserundurchlässigen Schichten des Doggers oder Mittleren Juras (Doppler et al. 2002). Die Region wird von kleineren Nebenflüssen der Donau entwässert, die weitgehend von Karstquellen gespeist werden. Zentraler Fluss ist die Altmühl, die die Region kreuzt (Abb. 1).

Hydrogeologisch zeigt sich in den Karbonatgesteinen ein Richtung Süden mächtiger werdender Karstaquifer, der im Liegenden von den Schichten des Doggers (Mittlerer Jura) weitgehend abgedichtet wird. Im Norden der Südlichen Frankenalb bestimmt die seichte Karstzone (Glaser 1998, Büttner et al. 2002) bei oberhalb der Talsohle gelegenen Dogger das Schüttungsverhalten der meisten Karstquellen, die rasch und heftig auf Niederschläge reagieren. Im Gegensatz dazu reagiert die Tiefe Karstzone im Süden deutlich gedämpfter oder je nach hydrologischen Randbedingungen gar nicht. Trappe et al. (2010) beschrieben anhand des Quellschüttungsmusters von Karstquellen der Südlichen

Frankenalb die Überlagerung von kurzfristigen Oberflächeneinflüssen (Schneeschnmelz- und Starkregenereignisse), die auf das Vorhandensein bevorzugter unterirdischer Fließwege im Einzugsgebiet hinweisen, und dem für die jeweilige Karstzone typischen jahreszeitlich bedingten Schüttungsverhaltens. Vor allem im Übergangsbereich zwischen seichtem und tiefem Karst, der zwischen Treuchtlingen und Eichstätt nördlich des Altmühltals verläuft, sind diese Wechselwirkungen im Quellschüttungsverhalten nachweisbar.

Die Altmühl stellt sich als ein polytropher, mäßig bis kritisch belasteter Fluss dar (Forstner et al. 2001). Ihr oberes Einzugsgebiet befindet sich im vorwiegend landwirtschaftlich geprägten Mittelfranken, von wo sie auch ihre Nährstoffbelastung ererbt. Nach dem Eintritt in die Südliche

Frankenalb bei Treuchtlingen ( $MQ=5,73m^3/s$ ) nimmt der Fluss Wasser der verschiedenen Karsttributäre auf (vgl. Tab. 1), am Pegel Eichstätt weist die Altmühl einen deutlich erhöhten Abfluss auf ( $MQ=9,93m^3/s$ ). Daten zur Schüttung von Karstquellen bzw. den Abflüssen kleinerer Zuflüsse liegen in unterschiedlichem, zumeist jedoch geringem Umfang vor (Unveröffentlichte Daten des Quellkatasters des WWA Ingolstadt, Zielhofer 2004). Sowohl für die Konzentration oder Verdünnung von Nährstoffen als auch für Abfluss und Fließgeschwindigkeit der Altmühl ist die Bestimmung des hydrologischen Verhaltens der in diesen Vorfluterschüttenden Karstquellen und kleineren Karsttributäre während verschiedener von entscheidender Bedeutung.

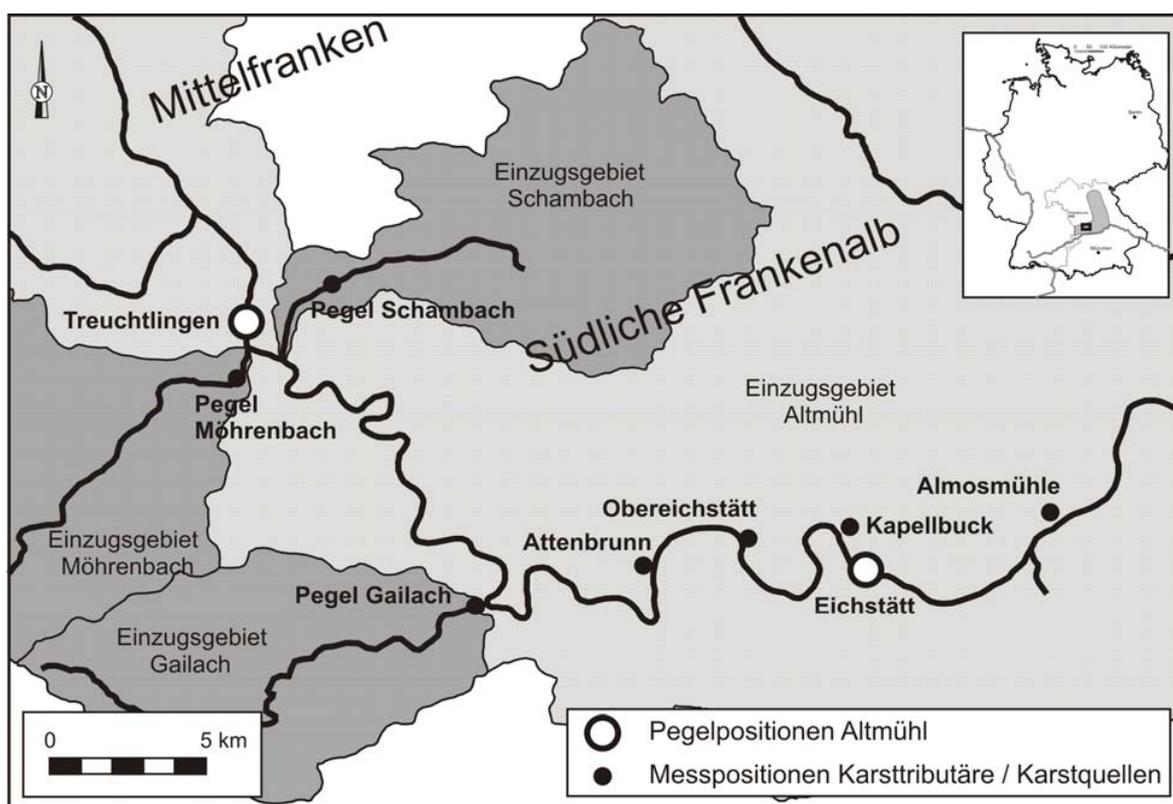


Abb. 1: Überblick zum Untersuchungsgebiet der Mittleren Altmühl, der Nebengewässer und ausgewählter Karstquellen (Bereich Treuchtlingen – Eichstätt).

	Zeitraum	Anzahl Daten	NQ [m <sup>3</sup> /s]	MNQ [m <sup>3</sup> /s]	MQ [m <sup>3</sup> /s]	MHQ [m <sup>3</sup> /s]	HQ [m <sup>3</sup> /s]	Quelle
<b>Pegel Treuchtlingen</b>	1941-2008	24837	0,28	1,16	5,73	53,5	183	HND Bayern
<b>Pegel Eichstätt</b>	1941-2008	24837	1,02	2,78	9,93	64,7	169	HND Bayern
<b>Schambach</b>	1990-2008	6575	0,01	0,03	0,42	2,79	7,76	HND Bayern
<b>Möhrenbach</b>	2007-2009	94	0,13	0,20	0,78	---	---	Eigene Daten
<b>Gailach</b>	2007-2009	149	0,20	0,27	0,76	---	---	Eigene Daten
<b>KQ Attenbrunn</b>	2006-2008	69	0,03	0,07	0,09	---	---	Eigene Daten
<b>KQ Obereichstätt</b>	2006-2009	253	0,40	0,66	0,95	---	---	Eigene Daten
<b>KQ Kapellbuck</b>	2005-2009	345	0,03	0,05	0,11	---	---	Eigene Daten
<b>KQ Almosmühle</b>	2005-2009	738	0,01	0,01	0,04	---	---	Eigene Daten

Tab.1: Gewässerkundliche Hauptzahlen der Altmühl (Pegel Treuchtlingen, Eichstätt), ihrer Nebengewässer und ausgewählter Karstquellen für den Bereich Treuchtlingen – Eichstätt. Aufgrund der zu kurzen eigenen Beobachtungszeiträume wurde auf die Angabe von Hochwasserdaten verzichtet (Quelle: LFU Bayern und eigene Daten).

### 3. Material und Methoden

Neben einer Datenrecherche zu bereits vorliegenden Daten wurde im Jahre 2006 ein umfangreiches und noch laufendes Dauermessprogramm zur Dokumentation der hydrologischen und chemischen Variabilität einzelner Positionen entlang der Altmühl zwischen Treuchtlingen und Eichstätt sowie verschiedener Tributäre (Oberflächengewässer und Karstquellen) begonnen. Zusätzlich zu den umfangreichen Beprobungen der Gewässer wurden insbesondere Abflussmessungen an den verschiedenen Karstquellen und Nebengewässern durchgeführt. Abhängig von der Größe der Gewässer wurden zur Abflussbestimmung ein hydrometrischer Kleinflügel bzw. der elektromagnetische Sensor FlowSense der Fa. SEBA Hydrometrie, der Tauchstab nach JENS und Verdünnungsmessungen nach punktueller Tracerinjektion (NaCl) eingesetzt. Da nach Brummeisl et al. (2007) Karstquellen oftmals wenig geeignet zur Einrichtung von aufzeichnenden Pegeln sind, musste an diesen Positionen auf ständige Einzelmessungen zurückgegriffen werden. Diese Messungen wurden ein- bis zwei mal wöchentlich vorgenommen, im Falle von niederschlags- oder schneeschnelzbedingten Schüttungsvariationen wurde das Messintervall für den Zeitraum des Abflussereignisses auf tägliche Messungen verkürzt. Kurzfristige Schüttungsschwankungen unterhalb des Messintervalls können zwar bei der Datenauswertung nicht berücksichtigt werden, sie fallen jedoch bei einer jahreszeitlichen Betrachtungsweise kaum ins Gewicht. Daten der bereits existierenden Pegelpositionen Treuchtlingen, Eichstätt (beide Altmühl) und Schambach wurden vom Landesamt

für Umwelt Bayern zur Verfügung gestellt, die verwendeten Niederschlagsdaten ausgewählter Klimastationen stammen vom Agrarmeteorologischen Messnetz Bayern ([www.lfl.bayern.de](http://www.lfl.bayern.de)).

Zur Charakterisierung der Auswirkungen und der Bedeutung der Schüttung der Karstquellen und der Nebengewässer auf den Abfluss der Altmühl wurden hydrologische Modellbilanzen erstellt. Weiterhin wurde das ATV-DVWK-Gewässergütemodell für Fließgewässer zur Abflusssimulation der Altmühl verwendet (ATV-DVWK 2002). Ziel des Modells ist die Beschreibung eines Gewässers hinsichtlich seiner räumlichen Variation und zeitlichen Dynamik von Abfluss und Gewässergüte sowie die quantitative Simulation von Reaktionen des Gewässers auf unterschiedliche Rahmenbedingungen (z.B. Schüttung verschiedener Zuflüsse). Das Modell wurde von Forstner et al. (2001) mit Hilfe morphologischer Daten, vermessener Flussquerprofile und ermittelter Fließzeiten auf die Situation an der Altmühl angepasst. Es bezieht neben dem Wassertransfer auch Wechselwirkungen mit Grundwasser ein. Neben dem Modul zur Abflusssimulation liegen weitere Bausteine zur Gütesimulation vor (ATV-DVWK-AG 2002). Letztere wurden in vorliegender Arbeit nicht berücksichtigt, werden jedoch zukünftig bei der gewässerökologischen Modellierung eingesetzt werden. Somit erfolgte in vorliegender Arbeit nur eine Beschränkung auf die Modellierung der Abflusses. Für verschiedene Abflussverhältnisse des Jahres 2008 (Hoch- und Niedrigwasser) wurde der Einfluss der Karstquellen und Karsttributäre auf den Abfluss der Altmühl überprüft, da kaum Abweichungen von den mittleren, langjährigen Mitteln beobachtet wurden (vgl. Tab. 1). Ledig-

lich im März 2008 traten an der Altmühl zwei kleinere Hochwasserspitzen auf, die sich über das Verhalten der Karsttributäre und Karstquellen zeigten.

## 4. Resultate

### 4.1. Karstquellen und Karsttributäre der Altmühl

Das Karstsystem der Südlichen Frankenalb weist komplexe Zusammenhänge zwischen den Niederschlägen in den Einzugsgebieten und dem jeweiligen Schüttungsverhalten der verschiedenen Karsttributäre bzw. der Karstquellen auf. Generell lassen sich die Beziehungen zwischen Niederschlag und Schüttung über die geologische Struktur des Gebietes beschreiben. Apel (1971) und

Glaser (1998) erklärten das hydrogeologische Verhalten der verschiedenen Karstquellen mit deren Lage im seichten bzw. tiefen Karst. Karstquellen des seichten Karstes (z. B. des Schambachtales, vgl. Schober 2009) weisen eine sehr rasche und deutliche Reaktion auf Niederschlagsereignisse auf. Demgegenüber zeigen sich im tiefen Karst (Quellen entlang oder südlich des Altmühltals gelegen) erheblich abgeschwächte Abflusspeaks und nur ein saisonaler Gang der Schüttung (vgl. Abb. 2). Im Extremfall können auch keine Schüttungsreaktionen nach Niederschlägen beobachtet werden. Prinzipiell bestätigen die eigenen Ergebnisse dieses Bild. Im Detail können sich jedoch erhebliche Abweichungen zeigen, die für den Einzelfall der jeweiligen Karstquelle überprüft werden müssen.

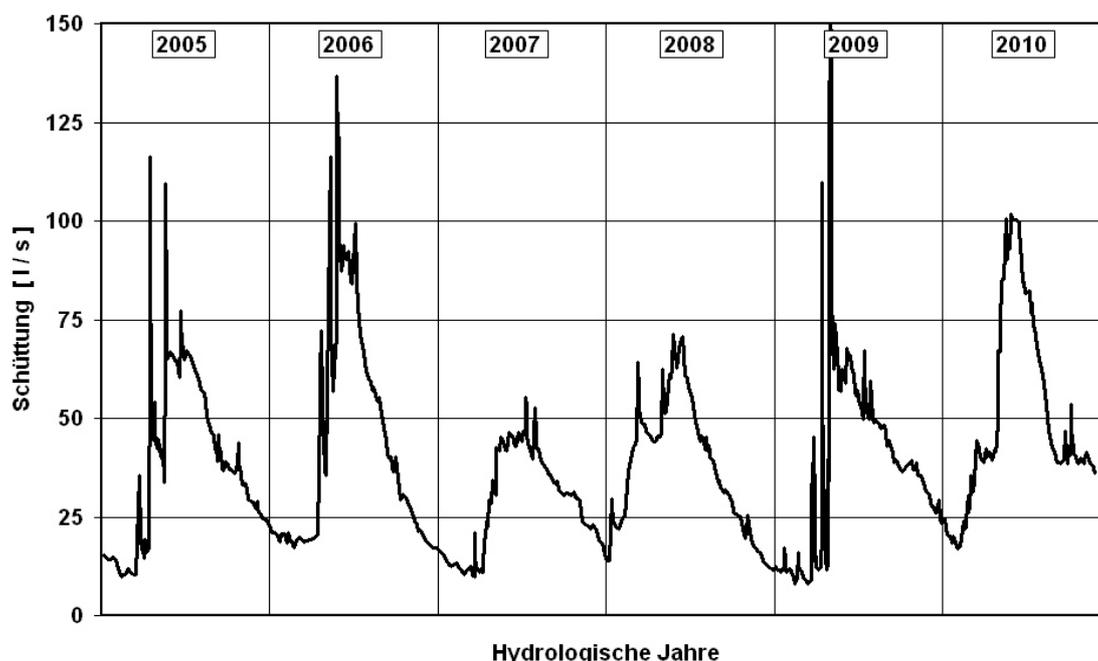


Abb. 2: Quellschüttung der Karstquelle Almosmühle östlich von Eichstätt für den Zeitraum 2005 bis 2010.

Nach Glaser (1998) kann die Karstquelle Almosmühle aufgrund der geologischen Struktur ihres Einzugsgebietes und der hydrogeologischen Rahmenbedingungen als eine typische Karstquelle des tiefen Karstes angesehen werden. Sie weist einen charakteristischen Jahresverlauf ihrer Schüttung mit einer etwa 2-3 monatigen Verzögerung des Basisabflusses auf. Die Schüttung ist jeweils im Frühjahr deutlich erhöht (ca. 60-100 l/s), im Herbst bis zum frühen Winter fallen die Werte bis auf 10-20 l/s ab (Trappe 2009). Diesem Jahresgang sind nur in den Frühjahresmonaten bei hohem Füllungsstand des Karstsystems kurz-

zeitige Abflusspeaks aufgesetzt, die auf Starkregen- bzw. Schneeschmelzereignisse zurückzuführen sind. In diesen Fällen zeigt sich über die Schüttung die karstbedingte Differenzierung zwischen kluftgebundenen Wegsamkeiten (Conduitflow) und dem langsam strömenden Karstwasser in den Poren der Dolomite im Einzugsgebiet der Quelle (Matrixflow), weiterhin scheinen bei hohem Füllungsstand des Karstsystems zusätzliche Fließwege aktiviert zu werden. Im Sommer und Herbst lassen sich normalerweise keine Reaktionen auf Niederschlagsereignisse erkennen (Abb. 2), eine Ausnahme bilden die

kurzzeitigen sommerlichen Schüttungspeaks nach Starkregenereignissen im August 2005 und August 2010. Aufgrund des sich überlagernden Einflusses von Witterungsereignissen und normalen jahreszeitlich bedingten Schüttungsschwankungen ordneten Trappe et al (2010) diese Effekte als Charakteristikum einer Übergangszone zwischen seichtem und tiefem Karst am Nordrand des Altmühltals zu. Vergleichbare Ergebnisse lassen sich auch für die Karstquelle Obereichstätt angeben. Letztendlich stellt sich jedoch jede Karstquelle als Individuum in Bezug auf Schüttung und den hydrogeologischen Rahmenbedingungen ihres Einzugsgebietes dar.

Die verschiedenen Nebenbäche der Altmühl zeigen je nach Größe des Einzugsgebietes, Anzahl und Schüttungsanteil der beteiligten Karstquellen ein ähnliches Bild, bei dem die Individualität jeder einzelnen Karstquelle jedoch nur abgeschwächt erkennbar ist. Die Schüttungsmuster dieser Karsttributäre gehorchen eher dem von Glaser (1998) beschriebenen jeweiligen hydrologischen Verhalten im seichten bzw. tiefen Karst.

Damit ergibt sich das Problem, dass bei einer Abflussmodellierung des Hauptvorfluters Altmühl die Niederschlags-Abfluss-Beziehungen der verschiedenen Teileinzugsgebiete aus dem Karstbereich separat betrachtet werden müssen. Um diese arbeitsintensive Untersuchung der Teileinzugsgebiete zu vermeiden wurde auf die Entwicklung derartiger Niederschlags-Abfluss-Beziehungen für jede Karstquelle bzw. jeden Karsttributär verzichtet. Alternativ bietet sich die Verwendung der aufgezeichneten Schüttungsganglinien der Karstquellen bzw. der Abflüsse der Karsttributäre als Eingangsgrößen für die Betrachtung der Altmühl an.

## 4.2. Altmühl

Die Altmühl weist alljährlich einen charakteristischen Verlauf mit Hochwässern jeweils im Spätwinter bis Frühjahr und Niedrigwassersituationen im Herbst auf. Je nach klimatischen Rahmenbedingungen können einzelne Abflusspeaks bereits Ende Herbst bzw. im frühen Winter auftreten, eher selten kommen Hochwässer auch im Hochsommer vor. Abb. 3e und 4 zeigen die Niederschlags- und Abflusssituation für das hydrologische Jahr 2008. Als Mengendifferenzen der

Abflüsse am Pegel Eichstätt und Treuchtlingen ergeben sich Abflusswerte, die dem Karsteinzugsgebiet im nordwestlichen Bereich der Südlichen Frankenalb zwischen Treuchtlingen und Eichstätt zuzuordnen sind (Abb. 4). Hierbei zeigt sich dessen besondere karstspezifische Ausprägung darin, dass trotz ähnlicher Niederschlagsbedingungen zwischen mittelfränkischem Vorland und der Südlichen Frankenalb auch im Winterhalbjahr erhöhte Abflusswerte auftreten, große Abflusspeaks aufgrund der dämpfenden Wirkung des Karstes jedoch nicht zu beobachten sind. Berechnet man die relativen Anteile des allochthonen Wassers (Pegel Treuchtlingen), das dem mittelfränkischen Vorland der Südlichen Frankenalb entstammt, bzw. des autochthonen Wassers aus der Karstregion (Abflussdifferenz der Pegel Eichstätt und Treuchtlingen), so zeigt sich für die Altmühl am Pegel Eichstätt für Januar bis April die verringerte Wasserzufuhr aus dem Karst (Abb. 4). Folglich lief in dieser Zeit eine Hochwasserwelle aus vorwiegend allochthonem Wasser durch das Altmühltal. Andererseits ist der Karstanteil in der Folgezeit (Mai bis September 2008) vergleichsweise hoch, da sich in dieser Zeit die verzögerten Karstquellschüttungen auswirken. Die Leerung der Karstspeicher führt anschließend auch zu einem Rückgang des Karstanteils zum Ende des Jahres.

Um den Beitrag einzelner Karstquellen und Karsttributäre zum Abfluss der Altmühl zu quantifizieren wurden für vier verschiedene Abflusssituationen (Mittelwert Januar/Februar 2008, Hochwassersituation an der Altmühl am 6.3.2008, Mittelwerte April/Mai bzw. August/September 2008) deren Schüttungsdaten mit dem Abfluss am Pegel Eichstätt verglichen (Tab. 2 und 3, Abb. 5). Bei dieser Berechnung wurde die Annahme zugrunde gelegt, dass weder Verluste noch Zugewinne an Wasser zwischen Treuchtlingen und Eichstätt zu verzeichnen sind. Somit wurde ein möglicher unterirdischer, talabwärts fließender Wasserstrom in den Schottern und Sanden des Altmühltals bei der Kalkulation nicht berücksichtigt. Es zeigte sich jedoch, dass für alle betrachteten Abflusssituationen zusätzliche Mengen an Wasser benötigt werden, um den Abfluss am Pegel Eichstätt darstellen zu können (Tab. 2).

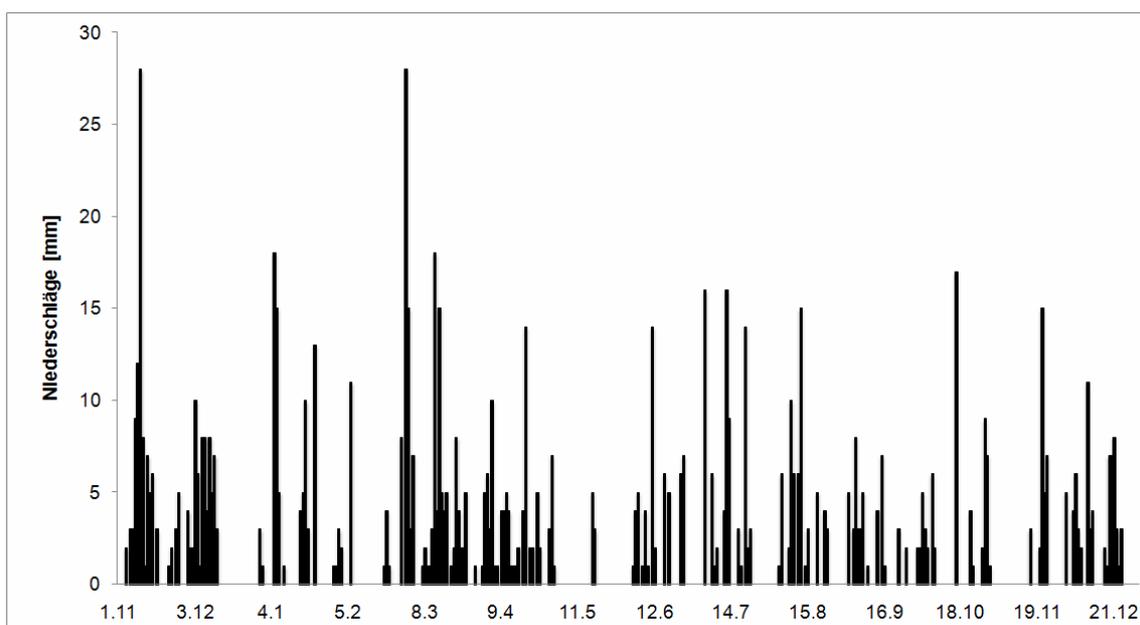


Abb. 3: Tagesniederschläge der Kläranlage Treuchtlingen für das hydrologische Jahr 2008 (Quelle: Jahresbericht 2008, Kläranlage Treuchtlingen, unveröffentlicht).

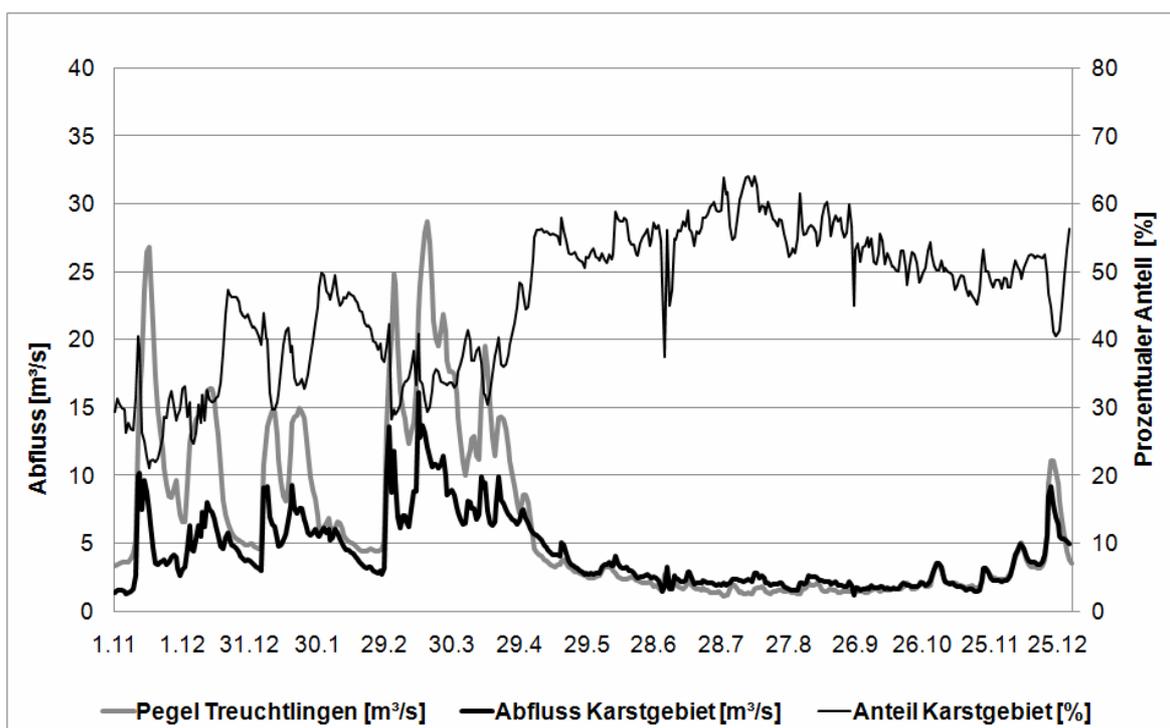


Abb. 4: Abflussdaten der Altmühl für die Pegel Treuchtlingen und Eichstätt im hydrologischen Jahr 2008 sowie Variationen des Abflussanteils aus dem Karsteinzugsgebiet zwischen Treuchtlingen und Eichstätt (bezogen auf die Pegelposition Eichstätt). Bei der Differenzberechnung des Karstabflusses wurde eine mittlere halbtägige Fließzeit zwischen den Pegeln Treuchtlingen und Eichstätt berücksichtigt. Datenquelle: LFU Bayern.

Dieses Wasser stammt aus diffusen Zutritten und kleineren Karstquellen, deren Anteil jedoch

gegenüber den Hauptquellen zurücktritt. Obwohl die meisten der bekannten Karstquellen im Ver-

laufe des durchgeführten Messprogrammes erfasst wurden, so existieren dennoch einige diffuse Quellaustritte und Hungerbunnen, die nur an wenigen Tagen im Jahr schütten. Der Einfach-

heit halber wurden in Tab. 2 und 3 nur die Anteile der Hauptquellen berücksichtigt, wogegen die kleineren Karstquellen in der diffus zugeführten Abflusskomponente verschwinden.

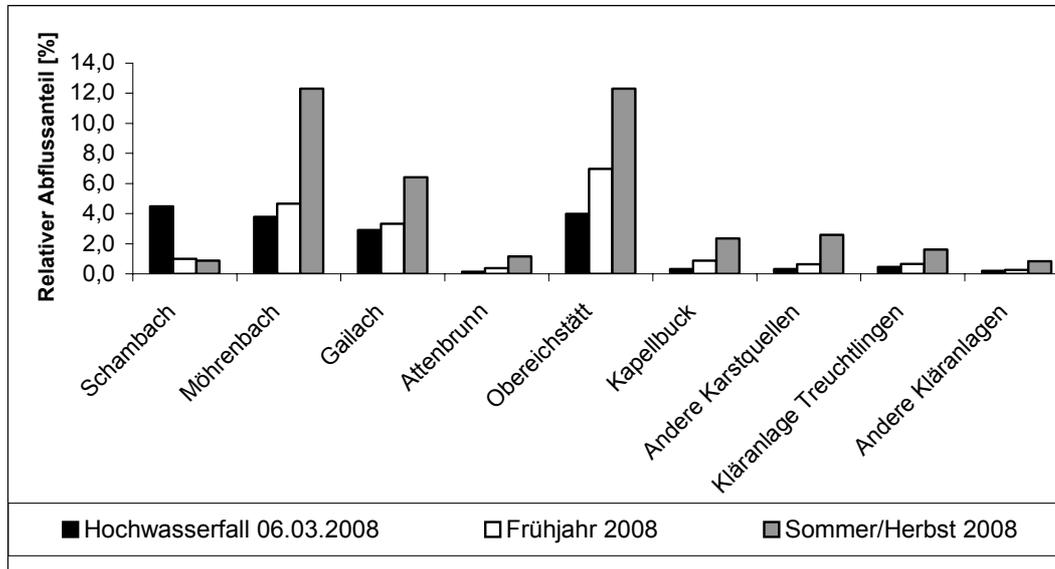


Abb. 5: Berechnete Anteile der verschiedenen Karsttributäre und Karstquellen am Abfluss der Altmühl für verschiedene Abfluss-Szenarien (Bezugsgrundlage: Abflussbilanz zwischen den Pegeln Eichstätt und Treuchtlingen), Quelle: LFU Bayern.

	01/02 2008	HW 06.03.2008	04/05 2008	08/09 2008
	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)	Q (m³/s)
<b>Pegel Eichstätt</b>	13,24	31,00	14,44	3,62
<b>Pegel Treuchtlingen</b>	8,00	19,60	8,26	1,54
<b>Karst-Nebengewässer</b>	2,07	3,23	2,09	0,66
<b>Große Karstquellen</b>	1,48	2,42	2,02	1,13
<b>Kläranlagen</b>	0,15	0,15	0,15	0,10
<b>Diffuse Zu-/Abgänge</b>	1,54	5,60	1,92	0,19

Tab. 2: Abflüsse der Altmühlpegel Treuchtlingen und Eichstätt sowie verschiedener Karsttributäre der Altmühl für verschiedene Abfluss-Szenarien (Januar/Februar 2008, Hochwasserereignis 6.3.2008, April/Mai 2008, August/September 2008).

	01/02 2008	HW 06.03 2008	04/05 2008	08/09 2008
	[%]	[%]	[%]	[%]
<b>Oberlauf Altmühl</b>	60,4	63,2	57,2	42,5
<b>Karst-Nebengewässer</b>	15,6	10,4	14,5	18,2
<b>Große Karstquellen</b>	11,3	7,8	14,0	31,2
<b>Kläranlagen</b>	1,1	0,5	1,0	2,8
<b>Diffuse Zu-/Abgänge</b>	11,6	18,1	13,3	5,3
<b>Summe</b>	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 3: Berechnete Anteile der verschiedenen Karsttributäre am Abfluss der Altmühl für die verschiedenen Abfluss-Szenarien (siehe Tab. 2). Bezugsgrundlage ist die Pegelposition Eichstätt.

Es zeigt sich, dass bei Berechnung der Anteile verschiedener Tributäre, die der Altmühl zugeführt werden, jahreszeitliche Schwankungen zu beobachten sind. Wie bereits Abb. 4 zeigte, wird der Anteil allochthonen Wassers aus Mittelfranken im Sommer und Herbst durch den verstärkten Karstwasseranteil reduziert. Hier spielen insbesondere die Hauptquellen im Karst eine Rolle (Tab. 2 und 3). Es ist ein relativ großer Anteil diffus in das Altmühltal zugeführten Wassers nachweisbar, der die Schüttung der bekannten kleineren Karstquellen erheblich übersteigt. Insbesondere in der ersten Jahreshälfte ist diese Komponente bedeutsam, während der Anteil im Spätsommer und Herbst zurückgeht. Mehr noch ist in Trockenheitsphasen auch mit diffusen Verlusten von Altmühlwasser im Bereich des Karstgebietes der Südlichen Frankenalb zu rechnen, sodass der bilanzierte Wert diffuser Zu-/Abgänge für August/September 2008 einen Wert nahe Null erreicht (Tab. 2).

Abb. 5 zeigt einen unterschiedlichen Einfluss der verschiedenen Karstquellen und Nebengewässer auf die Altmühl für die verschiedenen Szenarien. (Bezugsbasis ist der Karstwasseranteil am Altmühlpegel Eichstätt). Während die seichten Karstquellen, die die Schambach speisen, im Hochwasserfall bzw. im Frühjahr erhebliche Mengen an Wasser der Altmühl zuführen, so ist ihr Einfluss im Sommer und Herbst eher unbedeutend. Demgegenüber spielen die anderen beiden Karsttributäre (Möhrenbach, Gailach) sowie die Hauptquellen im Bereich des tiefen Karstes (Karstquellen Attenbrunn, Obereichstätt, Kapellbuck) für die Wasserführung der Altmühl insbesondere im Sommer und Herbst die entscheidende Rolle.

Mit Hilfe des ATV-DVWK-Gewässergütemodells (ATV-DVWK 2002) wurde der Altmühlabfluss modelliert, wobei als Inputdaten keine Niederschlagsdaten eingingen, sondern die jeweiligen Schüttungen der verschiedenen Karstquellen und Karsttributäre.

Für den Hochwasserfall 6. März 2008 stammt der größte Anteil des Wassers aus dem Oberlauf der Altmühl NW von Treuchtlingen (Abb. 6). Somit wird der Abfluss der Altmühl durch allochthones Wasser aus dem mittelfränkischen Vorland der Südlichen Frankenalb dominiert. Gemäß Tab. 3 ist die Wasserzufuhr über Karstquellen und Karsttributäre aus dem Gebiet zwischen Treuchtlingen und Eichstätt demgegenüber gering. Erhöhte Niederschläge Ende Februar/Anfang März 2008 und die einsetzende Schneeschmelze führten trotzdem zu erhöhten

Schüttungen der Karstquellen und Karsttributäre (Abb. 3 und Tab. 2).

Übliche Frühjahrsituationen werden über die Daten Januar/Februar bzw. April/Mai 2008 dargestellt. Bei angenähert ähnlichen Abflusswerten für den Pegel Treuchtlingen unterscheidet sich das hydrologische Verhalten der Altmühl in ihrem weiteren Verlauf durch das Karstgebiet bis nach Eichstätt (Abb. 6). Durch die 2-3 monatige Verzögerung der winterlichen Schüttungserhöhung der Karstquellen des tiefen Karstes ist der Anteil zugeführten Karstquellwassers im April/Mai erhöht (Tab. 3). Prinzipiell gilt Gleiches auch für die Karsttributäre Gailach und Möhrenbach des tiefen Karstes, die aus dem seichten Karst kommende Schambach zeigte ihr winterliches Abflussmaximum eher in den Monaten Januar bis Mitte April 2008.

Das spätsommerliche Abfluss-Szenarium der Altmühl wirkt scheinbar unspektakulär (Abb. 6). Tatsächlich ist der Anteil des aus dem Karstgebiet stammenden Wassers gemäß Tab. 3 jedoch deutlich erhöht. Zwar geht die Schüttung von Karstquellen und Karsttributären in diesen Monaten ebenso zurück (wiederum mit Zeitverzug), hat jedoch noch nicht Basisabflussbedingungen erreicht (vgl. Abb. 2). Im Vergleich zu den minimalen Mengen allochthonen Wassers aus Mittelfranken (Basisabfluss) ist die Schüttung von Karstwasser noch relativ hoch (Tab. 3).

Somit unterstreicht die Modellierung des Altmühlabflusses (Abb. 6) nochmals die Bedeutung der verschiedenen Karsttributäre und Karstquellen des Karstgebietes zwischen Treuchtlingen und Eichstätt auf das Abflussverhalten der Altmühl. Im Vergleich zum Gesamtabfluss der Altmühl ist die Karstwasserkomponente umso bedeutender je niedriger die Abflüsse der Altmühl sind. Bei höheren Anteilen allochthonen Wassers aus Mittelfranken nimmt der Anteil des Karstwassers am Altmühlabfluss ab. Trotzdem zeigt sich über den Verlauf des Modellabflusses der Einfluss der größeren Tributäre und Quellen im Karstgebiet zwischen Treuchtlingen und Eichstätt. Die jeweilige Bedeutung aller anderen kleineren Karstquellen ist dagegen geringer einzustufen. Würde man die Anteile diffuser Zuflüsse zur Altmühl jedoch unberücksichtigt lassen (nicht dargestellt), so ergäben sich erhebliche Differenzen zwischen den modellierten Abflüssen am Pegel Eichstätt im Vergleich zu den tatsächlich beobachteten Daten. Insofern stellt diese diffuse Zufuhr aus dem Karstgebiet in der Summe eine nicht unerhebliche Komponente dar.

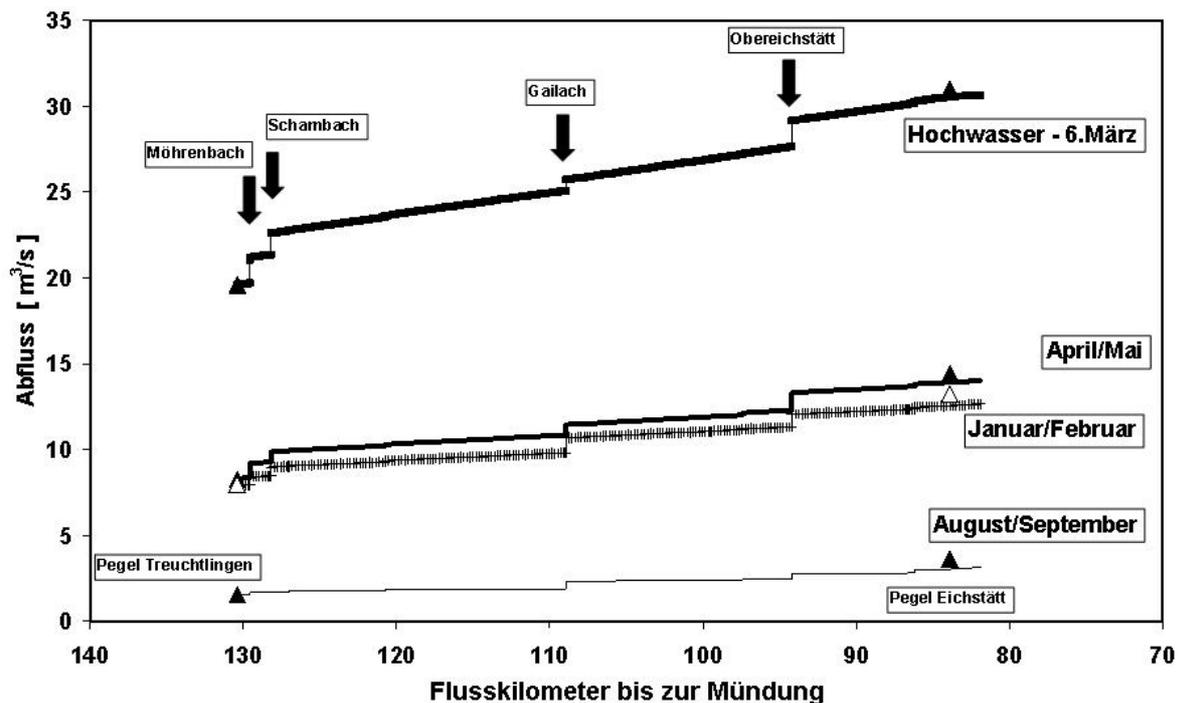


Abb. 6: Abflussmodellierung der Altmühl für verschiedene Abfluss-Szenarien im Jahre 2008 mit Hilfe des ATV-DVWK-Gewässergütemodells unter Verwendung der Schüttungen einzelner Karstquellen und kleinerer Nebengewässer. Diffuse Zuflüsse und Verluste wurden bei der Berechnung gemäß Tab. 2 berücksichtigt. Die Dreiecke geben die tatsächlichen Abflussdaten an den Pegeln Treuchtlingen bzw. Eichstätt wieder (Quelle: LFU Bayern).

## 7. Schlussfolgerungen und erste Diskussion

Für den Karst der Südlichen Frankenalb kann ein komplexer Zusammenhang zwischen den Niederschlägen in den verschiedenen Einzugsgebieten und dem jeweiligen Schüttungsverhalten von Karstquellen bzw. kleineren Karsttributären festgehalten werden. Einerseits reagieren je nach Jahreszeit die Karstquellen in unterschiedlichem Maße auf Niederschläge. Vergleichbare Verhaltensmuster wurden bereits von Glaser (1998) für diverse Quellen der Südlichen Frankenalb und von Armbruster & Selg (2006) für die Blautopfquelle in Baden-Württemberg beschrieben. Andererseits variieren aufgrund der hydrologischen Besonderheiten im Karst die Niederschlags-Abfluss-Beziehungen der verschiedenen Einzugsgebiete von Karstquellen und Karsttributären derart, dass es sinnvoller erscheint, anstelle einer Vielzahl unterschiedlicher und ungleich zu gewichtender Beziehungsmuster der einzelnen Karstquellen zu ihren jeweiligen Einzugsgebieten, die beobachteten quellspezifischen Schüttungsdaten zur Modellierung des Abflusses der Altmühl heranzuziehen. Es wurde daher darauf

verzichtet, für jede Karstquelle eigene Niederschlags-Abfluss-Beziehungen zu entwickeln. Auch die Studien zu Interaktionen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser aus Karstgebieten (Soulsby et al. 2007, Bailly-Comte et al. 2009, Musgrove et al. 2010) verzichteten auf separate hydrologische Detailbetrachtungen einzelner Teileinzugsgebiete und konzentrierten sich auf die unterschiedlichen Beiträge von Grundwasser zu Oberflächengewässern in verschiedenen hydrologischen Situationen (Hochwasser und Basisabfluss).

Beim Vergleich der Schüttungssummen der Karsttributäre mit dem aus Pegeldata der Altmühl errechneten Abflussanteil des Karstgebietes zwischen Treuchtlingen und Eichstätt ergaben sich Hinweise auf saisonal bedingte Schwankungen von nicht-quellgebundenen Zuflüssen der Altmühl bei ihrem Lauf durch die Karstregion (Tab. 2 und 3). Obwohl Abflussbilanzen für Karstgebiete generell als problematisch angesehen werden müssen, können jedoch die berechneten Daten auch Hinweise auf diffuse Zuflüsse bzw. gar Verluste liefern. Diese Daten wurden bei der Abflussmodellierung der Altmühl entsprechend berücksichtigt.

Im Winter und Frühjahr 2008 überwogen die Anteile an allochthonem Wasser aus dem mittelfränkischen Vorland der südlichen Frankenalb, während im Sommer und Herbst 2008 die Karsttributäre und Karstquellen für die Wasserführung der Altmühl die entscheidende Rolle spielten. Dies steht in Einklang mit den Ergebnissen von Soulsby et al. (2007), die für den Basisabfluss schottischer Oberflächengewässer eine Abhängigkeit der Alkalinität zur Geologie der Einzugsgebiete feststellten. Andererseits zeigen diverse Untersuchungen, dass sich im Falle ansteigender Karstwasserspiegel (Hochwasser im Karst) Karstquellen hydrologisch und chemisch ähnlich verhalten (Trappe 2007, Bailly-Comte et al. 2009, Musgrove et al. 2010). Leider konnten im vorliegenden Datenbestand trotz der verzögerten Schüttungsreaktionen der Karstquellen keine eindeutigen Hinweise des Einflusses von Hochwasserabflüssen im Karst auf den Hauptvorfluter Altmühl erkannt werden ohne dass gleichzeitig eine Zunahme allochthonen Wassers aus Mittelfranken auftrat.

Da die Arbeiten zur Abfluss- und Gewässergütemodellierung der Altmühl derzeit noch laufen, repräsentieren die gezeigten Daten zunächst nur einen vorläufigen Zwischenstand, ebenso müssen die vorgestellten Ergebnisse durch die Einbeziehung weiterer Laufabschnitte der Altmühl und größerer Zeitspannen überprüft werden. Insbesondere bei Betrachtung weiterer Aspekte (z. B. der Gewässergüte), bei denen der Abfluss als eine entscheidende Komponente zu berücksichtigen ist, erscheint jedoch der aufgezeigte Ansatz unter Verwendung von Quellschüttingsdaten ohne Berücksichtigung der jeweils zugrunde liegenden Niederschlagsdaten hilfreich. Letztendlich bestätigt sich derzeit noch die Feststellung von Bailly-Comte et al. (2009), dass die Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktionen in Karstaquiferen noch nicht gänzlich verstanden werden.

## 8. Literatur

- Apel, R. (1971): Hydrogeologische Untersuchungen im Malmkarst der Südlichen und Mittleren Frankenalb. – *Geologica Bavarica*, 64: 268-355.
- Armbruster, V. & Selg, M. (2006): Der Abfluss des Blautopfs im Spiegel der Grundwasserneubildung (Oberjura-Karst, Süddeutschland). – *Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten*, C 98: 1-16.
- ATV-DVWK-AG (2002) (Hrsg.): Handbuch ATV-DVWK-Gewässergütemodell, Version GB-4.2; Hennef.
- Bailly-Comte, V., Jorde, H. & Pistre, S. (2009): Conceptualization and classification of groundwater-surface water hydrodynamic interactions in karst watersheds: Case of the karst watershed of the Coulazou River (Southern France). – *Journal of Hydrology*, 376 (3-4): 456-462.
- Bonacci, O. (2007): Analysis of long-term (1878-2004) mean annual discharges of the karst spring Fontaine de Vaucluse (France). – Symposium "Time in Karst", 14.-18.3.2007, Postojna. – KWI Special Publication, 12: 151-156.
- Brummeisl, C., Schober, S. & Trappe, M. (2007): Possibilities and problems of discharge measurements in karst areas – examples from the South Franconian Alb (Germany). – Short Paper 15th Karstological School, Postojna: 5-8.
- Büttner, G., Diepolder, G., Dobner, A., Fritzer, T., Pukowitz, C., Sittles, E., Spörlein, T. & Wagner, B. (2002): Erläuterungen zur Hydrogeologischen Karte 1:100.000, Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 10 Ingolstadt. – Bayerisches Geologisches Landesamt: 127 S.; München.
- Doppler, G., Fiebig, M. & Meyer, R. K. F. (2002): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:100.000, Geowissenschaftliche Landesaufnahme in der Planungsregion 10 Ingolstadt. – Bayerisches Geologisches Landesamt: 172 S.; München.
- Fleury, P., Plagnes, V. & Balakowicz, M. (2007): Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France). – *Journal of Hydrology*, 345: 38-49.
- Forstner, S., Kaul, U. & Vennebusch, K. (2001): Abwasserentsorgung der Karstflächen zur Altmühl. Gewässergütesimulation im Bereich Treuchtlingen / Dietfurt. – LFU Augsburg: 15 S. – (Unveröffentlichter Bericht).
- Geyer, T., Birk, S., Liedl, R., & Sauter, M. (2008): Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs. – *Journal of Hydrology*, 348: 452-463.
- Glaser, S. (1998): Der Grundwasserhaushalt in verschiedenen Faziesbereichen des Malm der Südlichen und Mittleren Frankenalb. – *GSF-Bericht* 2/98: 135 S.; Neuherberg.
- Musgrove, M., Stern, L. A. & Banner, J. L. (2010): Springwater geochemistry at Honey Creek State Natural Area, central Texas: Implications for surface water and groundwater interaction in a karst area. – *Journal of Hydrology*, 388 (1-2): 144-156.
- Schober, S. (2009): Die Verletzlichkeit von Karstwasser im Seichten Karst der Südlichen Frankenalb. – Dissertation, Mathematisch-Geographische Fakultät der Katholischen Universität Eichstätt-Ingolstadt: 201 S.; Eichstätt.
- Soulsby, C., Tetzlaff, D., van den Bedem, N., Malcolm, I. A., Bacon, P. J. & Youngson, A. F. (2007): Inferring groundwater influences on surface water in montane catchments from hydrochemical sur-

- veys of springs and streamwaters. – *Journal of Hydrology*, 333 (2-4): 199-213.
- Trappe, M. (2007): Möglichkeiten und Probleme von Abflussmessungen in Karstgebieten. – in: VdHK (Hrsg.): Tagungsband „Untertage Alpin“ – Berchtesgaden, 9.-11.11.2007: 67-68; München.
- Trappe, M. (2009): Sedimentpetrographie, Gliederung und Genese von Karstsedimenten, dargestellt am Beispiel der Südlichen Frankenalb. – Habilitationsschrift, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt: 216 S. – (Unveröffentlicht).
- Trappe, M., Schober, S. & Brummeisl, C. (2010): Hydrological Observations in the transition zone between Shallow and Deep Karst of the Southern Franconian Alb (Germany). – *The Geological Society of America, Abstracts with Programs (Joint Meeting Northeastern & Southeastern, Baltimore 14-16 March 2010)*, 42 (1): 155.
- Valdes, D., Dupont, J.-P., Massei, N., Laignel, B. & Rodet, J. (2006): Investigation of karst hydrodynamics and organization using autocorrelations and T- $\Delta$ C curves. – *Journal of Hydrology*, 329: 432-443.
- Zielhofer, C. (2004): Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung im Karst der Mittleren Altmühlalb. – Dissertation Universität Eichstätt-Ingolstadt, Eichstätter Geographische Arbeiten, 13: 238 S.; Eichstätt.