

Tagungsbeitrag zu :  
Jahrestagung der DBG – Kommission I  
Titel der Tagung:  
Böden verstehen – Böden nutzen – Böden  
fit machen  
Veranstalter:  
DBG, September 2011, Berlin  
Berichte der DBG (nicht begutachtete  
online Publikation)  
<http://www.dbges.de/>

## **Abflussprozesse auf der Mesoskala? – Grenzen und Möglichkeiten multiva- riater Tracer Methoden**

Holger Fröhlich<sup>1</sup>, Lutz Breuer<sup>2</sup>, Kellie  
Vaché<sup>3</sup>, Hans-Georg Frede<sup>2</sup>

### **Zusammenfassung**

Auf Grundlage von hydrochemischen Zeitreihen wurden tracer basierte Mischungsmodelle zur Ableitung von Abflussprozessen zwischen Teileinzugsgebieten des Dill-Einzugsgebiets (Hessen) miteinander verglichen. Hierzu wurden die Grundwasserabflüsse von Teileinzugsgebieten mit Einzugsgebietseigenschaften, wie mittlere Hangneigung, in Beziehung gesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Tracerkombinationen und die Metrik der Tracerdaten (z.B. PCA) einen erheblichen Einfluss auf die Aussage zu den Einflussgrößen des hydrologischen Verhaltens eines Einzugsgebiets haben.

### **Schlüsselwörter**

Mischungsmodelle, Tracer, Einzugsgebietseigenschaften, Skalenabhängigkeit

<sup>1</sup> Sonderforschungsbereich 564, Universität Hohenheim, Garbenstrasse 13, 70593 Stuttgart  
[holger.froehlich@uni-hohenheim.de](mailto:holger.froehlich@uni-hohenheim.de)

<sup>2</sup> Institute for Landscape Ecology and Resources Management, Justus-Liebig-University Giessen, Heinrich-Buff-Ring 26, D-35392 Giessen.

<sup>3</sup> Oregon State University, Department of Forest Engineering, 015 Peavy Hall, Corvallis OR 97331-5706, USA

## **1 Einleitung und Motivation**

Bis heute sind Fragen nach der Herkunft, der Verweilzeit und den Fließwegen des Wassers eine Herausforderung bei der Ableitung von generalisierbaren Regeln für das hydrologische und hydrochemische Verhalten von Einzugsgebieten (EZG). Dies resultiert aus der Komplexität einer Vielzahl von hydrologischen Prozessen, die das Abflussgeschehen abhängig von der betrachteten Skala dominieren. Ein Untersuchungsansatz für Abflussprozesse und deren Skalenabhängigkeit basiert auf der stofflichen Prägung des Wassers im Durchgang durch chemisch unterschiedliche Boden- und Gesteinsschichten. Die Nutzung dieser natürlichen Tracer als Proxies für Prozessinformationen wird mit zunehmender Skala kritisch, da zunehmend unklar wird, welche Prozesse durch die Tracer repräsentiert werden (Ambrose 2004):

- (1) Die Komplexität im EZG wird zu einem vereinfachten Signal am Gebietsauslass integriert (Wolok et al. 1997, Uchida et al. 2005, Hrachowitz et al. 2010)
- (2) Dies führt zu äquifinalen Tracerinformationen, d.h. ein Signal kann durch unterschiedliche Mechanismen und Prozesskombinationen hervorgerufen werden. (Walling & Webb 1980; Buttle 1994).

Wie kann man Aussagen zu dominanten Abflussprozessen validieren, wenn sie auf Tracerinformationen beruhen, die mit zunehmender Skala schwieriger interpretierbar werden? (Soulsby et al. 2006, Didszun & Uhlenbrook 2008, Ali et al. 2010)

Der vorliegende Ansatz zur Lösung dieser Frage beinhaltet die Untersuchung,

- (1) der Repräsentanz hydrologischer Einheiten in der hydrochemischen Zeitreihe am Gebietsauslass,
- (2) wie sich diese Einheiten im Fließgewässernetz integrieren, um ein vereinfachtes Gesamtsignal zu erzeugen,
- (3) von Modellalternativen hinsichtlich der Beziehung zwischen Abflussprozessen und Einzugsgebietseigenschaften.

Die Untersuchung stützt sich auf Daten, die im Rahmen des SFB 299 „Landnutzungs-konzepte für periphere Regionen“ der Uni-versität Gießen im EZG der Dill (Hessen) erhoben wurden.

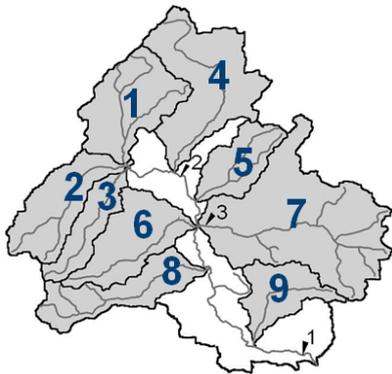


Abbildung 1. Dill-EZG mit neun Teil-EZG

## 2 Repräsentanz hydrologischer Einheiten am Gebietsauslass

Die Repräsentanz von hydrologischen Einheiten unterschiedlicher Skala am Gebietsauslass kann durch eine von Hooper (2003) vorgestellte Prozedur untersucht werden.

Hier wird die hydrochemische Zeitreihe am Gebietsauslass einer PCA unterzogen. Aus der Korrelationsmatrix der hydrochemischen Variablen werden Eigenvektoren extrahiert. Diese stellen ein Koordinatensystem der Fließgewässervariabilität dar, die auf zeitlich variierende Mischungsverhältnisse von abflusswirksamen Pools zurückgeführt wird. Wenn Projektionsresiduen der Zeitreihen von Teileinzugsgebieten, die in dieses Koordinatensystem projiziert werden, Struktur aufweisen, lässt dies Rückschlüsse auf andere Abflusskomponenten oder andere geochemische Eigenschaften auf Skala der Teil-EZG zu. Ein skalares Maß für die Struktur in den Residuen, also die systematische Abweichung der Mischungsräume der Teil-EZG vom Gesamt-EZG ist der relative Bias (1).

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^n e_{ij}}{\bar{x}_j} \quad (1)$$

mit Probe  $i$  und Tracer  $j$  der Residuen  $e$  und dem Mittelwert der Zeitreihe des Gesamt-EZG  $x$ . Der Zusammenhang zwischen Projektionsresiduen und EZG-Eigenschaften auf Skala der Teil-EZG kann die Deutung der systematischen Unterschiede zwischen den Skalen und Teil-EZG unterstützen:

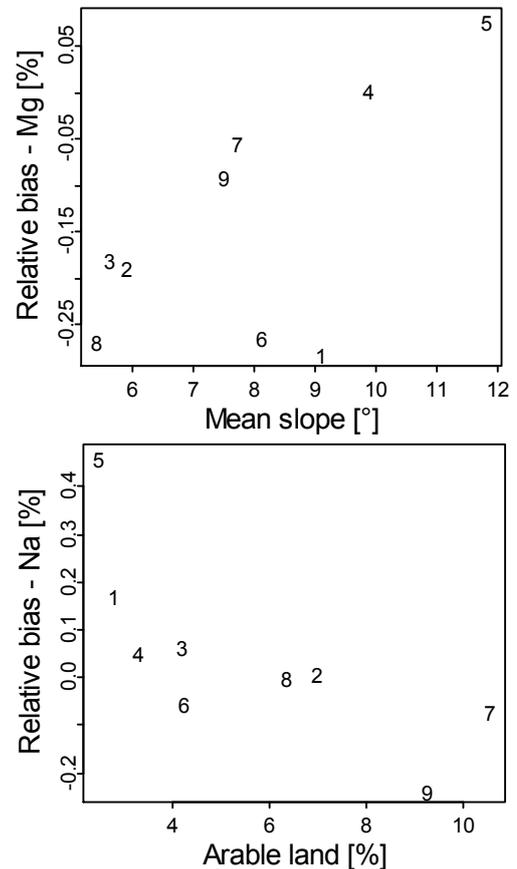


Abbildung 2. Beziehungen zwischen Strukturen in den Projektionsresiduen und EZG-Eigenschaften der Teil-EZG im Dill-EZG.

Abbildung 2 zeigt, dass die Teil-EZG mit abnehmender mittlerer Hangneigung in den Konzentrationen des Grundwasser dominierten Tracers Mg zunehmend unterschätzt und damit am Gebietsauslass des Gesamt-EZG schlechter repräsentiert werden. Dies ist auf abweichende Grundwassersignaturen Kalziumcarbonat ärmerer Grundwasserfazies zu erklären, deren Teil-EZG gleichzeitig geringere Hangneigungen aufweisen. Resultat ist ein vom Gesamtgebietsauslass abweichendes Ca/Mg Verhältnis.

Die Na Konzentrationen der Zeitreihen der Teil-EZG werden mit zunehmender ackerbaulicher Fläche am Gebietsauslass des Gesamt-EZG unterschätzt. Dies kann auf relativ Na-reiche Abflusskomponenten der Ackerbaulich genutzten Flächen zurückzuführen sein.

Insgesamt stellt sich mit den beobachteten Abweichungen im Mischungsverhalten der Teil-EZG vom Gesamt-EZG die Frage, wie sich diese im Fließgewässernetz integrieren und trotz dieser systematischen Abweichungen ein vereinfachtes Signal des Gesamt-EZG erzeugen.

### 3 Signalintegration im Fließgewässernetz

Dazu wurde systematisch nach Mischungsproportionen gesucht, mit denen die Signaturen der Teil-EZG den hydrochemischen Fingerabdruck am Gebietsauslass in gegebenen Toleranzen treffen. Diese vorwärtsgerichtete Lösung eines Mischungsmodells ist dann nötig, wenn es mehr Abflusskomponenten (hier Teil-EZG) gibt als durch die Variabilität eines vereinfachten Signals am Gebietsauslass beschrieben werden kann und damit das zugrundeliegende Gleichungssystem unterdeterminiert ist (*Phillips and Gregg, 2003*). Die Ergebnisse (Abbildung 3) zeigen die Quantilsbereiche für Kombinationen, die die Bedingung erfüllt haben und den multivariaten Clustermedoid der Mischungsproportionen als Zentralitätsmaß, dargestellt in Ihrer Beziehung zum Abfluss. Gemessene Abflüsse treffen die Modellergebnisse z.T. sehr gut und bestätigen die kalkulierten Mischproportionen. Die Teil-EZG bleiben weitgehend zwischen 5% und 15% Anteil am Gesamtabfluss und zeigen damit mit Ausnahme der Kläranlagenabflüsse (STP) eingeschränkte Mischungsverhältnisse. Ein komplexes Gesamt-EZG erzeugt ein vereinfachtes Ausgangssignal, indem nur ein eingeschränkter Bereich aller möglichen Mischungsverhältnisse abflusswirksamer Pools realisiert wird, was die Gesamtvariabilität deutlich einschränkt.

Dies führt aber zur Frage, ob das Signal am Auslass des Gesamt-EZG mit bekannten Abflussprozessen auf kleiner EZG-Skala vergleichbar ist, wenn sich ganze Teil-EZG mit eingeschränkten Proportionen zum Gesamtabfluss mischen.

### 4 Bewertung von Modellalternativen

Hierzu ist es sinnvoll, verschiedene Modelle, die Abflusskomponenten beschreiben, miteinander zu vergleichen. Z.B. auch klassische Verfahren der Ganglinienseparation, wie rekursive Filter zur Ableitung des grundwasserbürtigen Basisabflusses.

Hier wurde die Aussage zur Abflussdynamik von Grundwasserabfluss auf Skala der Teil-EZG mit zwei unterschiedlichen Modellen untersucht. Für das PCA-Modell wurden alle neun verfügbaren Tracer (Li, B, Na, Mg, K, Ca, Rb, Sr, U) verwendet. Die Zeitreihen der Teil-EZG wurden in das Koordinatensystem

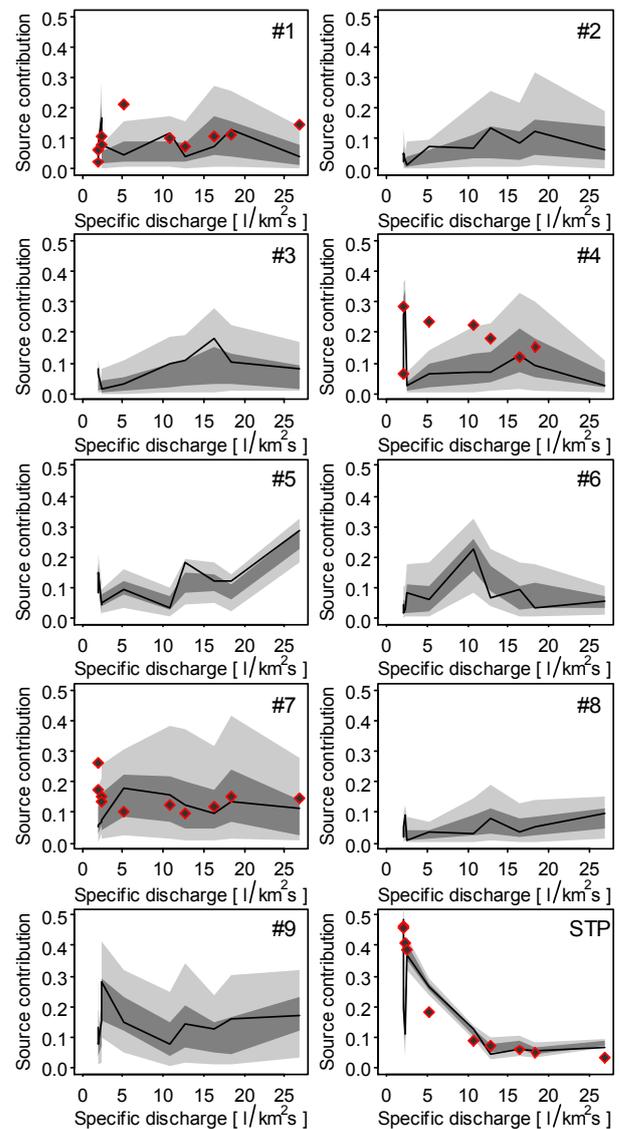


Abbildung 3. Abflussbeziehung der Mischproportionen der Teil-EZG und Kläranlagenabläufe (STP) im Gesamt-EZG; graue Bänder: 50% und 90% Interquantil, schwarze Linie: Clustermedoid, Rauten: Proportionen gemessener Abflüsse am Abfluss des Gesamt-EZG.

des Gesamt-EZG projiziert und auf dieser Basis die mittleren Grundwasserabflüsse berechnet. Für das alternative Modell wurden nur die zwei aussagekräftigsten Tracer Mg und Rb gewählt. Beide Modelle wurden dann gemeinsam mit EZG-Eigenschaften, wie mittlere Hangneigung und Größe des EZG, in Beziehung gesetzt (Abbildung 4).

In Beziehung mit der mittleren Hangneigung der Teil-EZG zeigt das PCA-Modell einen linearen Trend zu mehr grundwasserbürtigem Abfluss, je höher die mittlere Hangneigung. Dieser Trend war schon bei den Projektionsresiduen zu beobachten (Abbildung 2), ist aber mit dem Mg-Rb Modell nicht zu sehen.

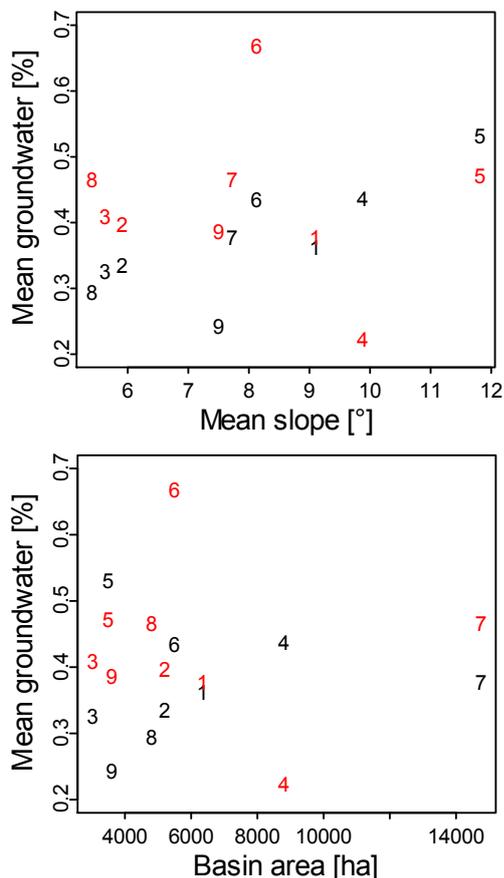


Abbildung 4: Beziehung zwischen mittlerem Grundwasserbeitrag (hydrologisches Jahr 2005) und EZG-Eigenschaften der Teil-EZG für die zwei alternativen tracerbasierten Mischungsmodelle PCA-Modell (schwarz): Li-B-Na-Mg-K-Ca-Rb-Sr-U; „Best-Choice“ Modell (rot): Mg-Rb.

Der Grundwasser dominierte Tracer Mg wird in den weniger steilen Teil-EZG mit carbonatarmer Grundwasserbeschaffenheit unterschätzt und damit auch die Grundwasserbeiträge dieser Gebiete am Gesamtabfluss. Die mittlere Hangneigung beeinflusst also in diesem Fall nicht die mittleren Grundwasserabflüsse der Teil-EZG.

Hingegen scheinen beide Modelle die These zu bestätigen, dass die Variabilität der Grundwasserabflüsse mit zunehmender Skala abnimmt und sich einem zentralen Maß annähert (Shaman et al. 2004). Dies legt auch die Beobachtung aus Abbildung 2 nahe, dass sich die Teil-EZG insgesamt in immer ähnlichen Proportionen zum Abfluss des Gesamt-EZG mischen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Tracerkombinationen und die Metrik der Tracerdaten (z.B. PCA) einen erheblichen Einfluss auf die Aussage zu den Einflußgrößen des hydrologischen Verhaltens

eines Einzugsgebiets haben. Kolineares Verhalten von Teil-EZG führt dazu, dass ein Komplexes EZG eine vereinfachte Systemantwort erzeugt. Dabei müssen die auf Skala des Gesamt-EZG sichtbaren Abflusskomponenten daraufhin überprüft werden (z.B. mit Modellalternativen), inwieweit sie dem hydrologischen Konzept eines abflußwirksamen Pools, wie Grundwasserabfluss, entsprechen.

## Dank

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des SFB 299 von der DFG und von der Forschungsbeihilfe für Jungwissenschaftler der JLU Gießen gefördert.

## Literatur

- Ali, GA, et al. (2010) *J. Hydrol.*, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.049
- Ambroise, B (2004) *Hydrol. Processes*, doi:10.1002/hyp.5536
- Buttle, JM, (1994) *Prog. Phys. Geogr.*, 18, 16– 41
- Didszun, J, Uhlenbrook, S (2008) *Water Resour Res*, doi: 10.1029/2006WR005242
- Hooper, R (2003) *Water Resour Res*, doi: 10.1029/2002WR001528
- Hrachowitz, M, et al. (2010) *Hydrol. Processes*, doi: 10.1002/hyp.7510
- Phillips, DL, Gregg, JW (2003) *Oecologia*, doi: 10.1007/s00442-003-1218-3
- Shaman, J, et al. (2004) *Hydrol. Processes*, doi: 10.1002/hyp.5739
- Soulsby, C, et al. (2006) *Hydrol. Processes*, doi: 10.1002/hyp.6338
- Uchida, T, et al. (2005) *Hydrol. Processes*, doi: 10.1002/hyp.6004
- Walling, DE, Webb, BW (1980) *J. Hydrol.*, 47, 129– 149.
- Wolok, DM, Fan, J, Lawrence, GB (1997) *Hydrol. Processes*, 11, 1273–1286.