

Abflussbildungsprozesse und Stofftransport - Erkenntnisse und Forschungsdefizite

Dr. Andreas Krein, Dipl.-Geogr. Andreas Kurtenbach, Prof. Dr. Wolfhard Symader, Abteilung Hydrologie, Universität Trier, Behringstraße, 54286 Trier, email: krein@uni-trier.de

Dr. Steffen Möller, Physische Geographie, Freie Universität Berlin, 12249 Berlin

1 Kenntnisstand und Ausgangsfragestellung

Untersuchungen zur Abflussbildung und Herkunft einzelner Stoffe im Verlauf von natürlichen Hochwasserereignissen finden aufgrund der zahlreichen steuernden Faktoren häufig in kleinen homogenen Einzugsgebieten statt. Daher können räumliche Verteilungen vorhandener Stoffquellen nicht berücksichtigt werden. Die Übertragung von Erkenntnissen auf größere, in der Regel heterogene Einzugsgebiete wird somit erschwert. Die in einzelnen Fallstudien gewonnenen Ergebnisse sind zudem aufgrund unterschiedlicher hydrologischer Randbedingungen, unterschiedlicher Messprogramme und unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Betrachtungsmaßstäbe nur schwer zu regionalisieren. Eine weitere Problematik beim Verständnis der Abflussbildung ergibt sich aus der Tatsache, dass in unterschiedlichen Raumskalen sowohl unterschiedliche Abflussbildungsprozesse als auch Stofftransportprozesse dominieren (Blöschl & Sivapalan, 1995; Chapman et al. 1993). Die Chemographen einzelner Substanzen können nicht zwingend nur einem Prozess zugeordnet werden, und weder konservative noch zeitlich konstante Verhaltensweisen sind typisch. Beispielsweise rufen differierende Bodenkontaktzeiten und deutliche Änderungen des Wasserkörpers entlang hydrologischer Fließwege diese Variabilitäten im Stofftransport hervor (Chapman et al. 1993). Ein empfindliches Forschungsdefizit besteht gerade bei der Erfassung dieser Skalenabhängigkeit hydrologischer Prozesse und in dem Mangel an skalenabhängigen Daten, was bei der Validierung von Modellen auf Einzugsgebietsebene zu erheblichen Problemen führt (Peschke, 1999).

Der Abflussbildungsprozess als Grundlage des Stofftransportes ist zwar in seinem Grundprinzip geklärt (Trudgill 1995), allerdings müssen die steuernden Prozesse in jedem Landschaftstyp gesondert erfasst werden. Der Schritt vom in einer Theorie formulierten Grundprinzip zur Umsetzung in physikalisch basierte Modelle ist lang und weist deutliche Forschungsdefizite auf. So ist offen, wie weit sich die Annahme von Abflusskomponenten, wie sie von Christophersen et al. (1990) in der endmember mixing analysis verfolgt wird, der Realität entspricht. Anderson et al. (1997) bestreiten das Vorkommen von „endmembern“. Der Stofftransport wird ebenfalls im Grundsatz verstanden. In Abhängigkeit von den Eigenschaften der Stoffe sind die wichtigsten Prozesse die Mischung und die Aktivierung der Stoffquellen, welche durch Speicherung oder chemische Veränderungen im Gewässer weiter modifiziert werden. Die Konzentrationsgänge vieler Stoffe sind ereignisgesteuert, aber weder beobachtete Unterschiede zwischen Wellen noch die hohen Variationen innerhalb

von Wellen werden verstanden. Das gilt vor allem für die partikelgebundenen Schadstoffe, da der Schwebstofftransport von der Verfügbarkeit der Quellen abhängt. Ebenfalls ist ungewiss, ob das Signal an einer Pegelstation als eine komplexe Reaktion des gesamten Einzugsgebietes gedeutet werden kann. So ist die Relevanz von Gerinneprozessen für den Stofftransport und für die Korrelation von Hydrograph und Chemograph an einer Messstation insbesondere in kleinen Einzugsgebieten nicht hinreichend geklärt (Krein & DeSutter 2001). Aus diesen Forschungsdefiziten ergeben sich folgende drei Ausgangsfragestellungen für unsere regionale Untersuchung:

- Wie repräsentativ sind die Messungen an einer Pegelstation für das Einzugsgebiet ?
- Welche Gemeinsamkeiten des ereignisbezogenen Stofftransports lassen sich in unterschiedlichen Raumskalen nachweisen ?
- Was geschieht in der Welle während des Ablaufes im Gerinne ?

2 Untersuchungsgebiete, Messprogramm und Analysemethoden

Die vier von der Abteilung Hydrologie untersuchten Einzugsgebiete stellen typische Einzugsgebiete für die Mittelgebirge in der Region dar und umfassen mehrere Maßstabsebenen (Kartelbornsbach (3 km²), Olewiger Bach (35 km²), Ruwer (238 km²) und Sauer (4.259 km²)). Die Einzugsgebiete sind durch einen deutlichen anthropogenen Einfluss gekennzeichnet und unterscheiden sich hauptsächlich in der geologisch - pedologischen Ausprägung sowie der räumlichen Verteilung der Landnutzung. Nähere Informationen zu den Einzugsgebieten finden sich bei Kurtenbach & Krein (2003).

Das Messprogramm enthält die Module Hochwasserbeprobung, tägliche Beprobung bei Trockenwetterabfluss und wöchentliche Sedimententnahme. Zusätzlich werden Längsprofile zur räumlichen Charakterisierung der Stoffquellen analysiert sowie Ablaufproben von Kläranlagen, Straßenabflüsse, Niederschlagswasser und Bodenwasser zur Beschreibung unterschiedlicher Herkunftsräume des Wassers untersucht. Die Entnahme von Oberboden- und Uferbankproben, Straßenmaterial sowie Kläranlagenschwebstoffen dient der Beschreibung möglicher Quellen suspendierter Partikel. Die Erfassung des Stofftransports insbesondere im Verlauf von Hochwasserereignissen erfordert sowohl eine hohe Probenahmedichte als auch ein umfangreiches Messprogramm, um die Aktivierung von Stoffquellen über Merkmalskombinationen charakterisieren zu können. Analysiert wurden in der gelösten und suspendierten Phase Nährstoffe, geogene Elemente und Schadstoffe. Eine genaue Auflistung auch der erfassten schwebstoffbeschreibenden Messgrößen findet sich bei Krein (2000). Weiterhin wurden Beregnungsversuche in hydraulisch angebundenen Flächen durchgeführt, um Stofftransportprozesse im Boden zu charakterisieren, Fließwege zu identifizieren und die Bedeutung des Bodens für den Stofftransport und die Abfluss-

bildung im Fließgewässer zu erfassen (Kurtenbach & Niebes 2002). Für die Probenahme sowie die anorganischen und organischen Analysen konnte auf bewährte Methoden der eigenen Abteilung zurückgegriffen werden (Krein 2000). Neben natürlichen Hochwasserereignissen wurden im Kartelbornsbach, dem Olewiger Bach und der Ruwer kontrollierte künstliche Hochwasserwellen erzeugt (Kurtenbach et al. 2002).

3 Ergebnisse und ihre Bedeutung

Im folgenden wird insbesondere auf die Frage eingegangen, wie repräsentativ Messungen an einer Pegelstation für das gesamte Einzugsgebiet sind. Dies ist von besonderer Bedeutung für die effektive Gestaltung und Implementierung von Monitoringprogrammen, für die Ausarbeitung von Managementstrategien für Flussgebiete sowie für die Anwendung flächendetaillierter Einzugsgebietsmodelle.

3.1 Die Repräsentativität der Messstelle bei Trockenwetter

Die heterogene Geologie und vielfältigen anthropogenen Einflüsse im Einzugsgebiet des Kartelbornsbaches führen zu einer komplexen Verteilung potentieller Stoffquellen. Diese haben einen deutlichen Einfluss auf die Chemographenvariabilität und den Transport gelöster Stoffe. Insbesondere im Verlauf von sommerlichen Trockenwetterbedingungen sind drei wichtige Quellen entlang des Längsprofils für die Variabilität des Stofftransportes entscheidend. Die erste Quelle mit einem bedeutenden Einfluss ist der Auslauf einer Kläranlage (Abb. 1, A). Das in den Kartelbornsbach eingeleitete Abwasser ist in erster Linie durch hohe Phosphatgehalte sowie hohe Ammoniumgehalte gekennzeichnet. Die zweite Quelle ist eine Grundwasserquelle,

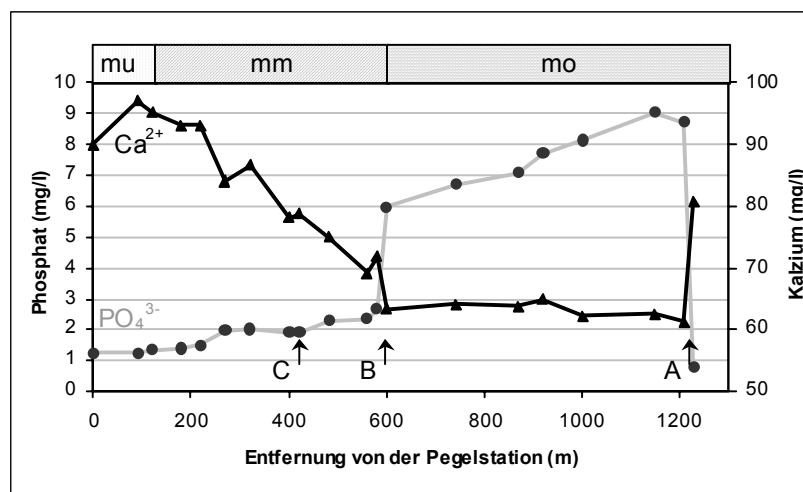


Abb. 1: Variabilität von Kalzium und Phosphat in einem Längsprofil im Kartelbornsbach, 19.06.2000. Der Kartelbornsbach passiert im Längsprofil Schichten des Oberen Muschelkalks (mo), des Mittleren Muschelkalks (mm) und des Unteren Muschelkalks (mu).

der Kartelborn (Abb. 1, B), der zwischen der Grenzschicht oberer und mittlerer Muschelkalk liegt. Diese Quelle liefert Wasser mit hohen Konzentrationen an Kalzium,

Magnesium und Hydrogenkarbonat, die insbesondere für die hohen sommerlichen Leitfähigkeitswerte bis maximal 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ verantwortlich sind. Die dritte Quelle ist ein diffuser Eintrag von kalziumsulfatreichem Boden- und Grundwasser des mittleren Muschelkalks, das aus zahlreichen Drainagen in den Bach gelangt. Die wichtigste Drainage (Abb. 1, C) zeigt Sulfat-Konzentrationen von mehr als 600 mg/l und im Verlauf trockener Sommer Maximalwerte bis 1200 mg/l Sulfat. Neben dem Kartelborn und der Kläranlage ist diese Drainage für die deutlichen Veränderungen in den Leitfähigkeits-, Kalzium- und Sulfat - Chemographen verantwortlich (Möller 2002).

Der Kartelbornsbach weist somit in seinem Mittellauf von der Kläranlage bis zum Kartelborn deutliche Spuren einer anthropogenen Belastung durch Nährstoffe auf. Der Unterlauf ab dem Kartelborn dagegen ist geprägt von geogenen Stoffquellen mit hohen Kalzium- und Sulfat-Konzentrationen, die die Nährstoffe verdünnen. Doch wie weit reicht der Fließabschnitt, für den die Pegelstation repräsentativ ist?

Eine Repräsentativitätsuntersuchung wurde für den Summenparameter Leitfähigkeit durch Berechnung des Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen den an einer Station im Längsprofil gemessenen Leitfähigkeiten und den Leitfähigkeiten am Pegel durchgeführt. Die Korrelationskoeffizienten zwischen der Leitfähigkeit am Pegel und der Leitfähigkeit an den Messstellen im Bach wiesen bis etwa 490 m oberhalb des Pegels Werte von >0.7 und somit einen sehr hohen Zusammenhang auf (Abb. 2). Dieser Grenzwert von 0.7 scheint zwar willkürlich gewählt, doch er bedeutet eine Varianzaufklärung von $(0.7)^2 = 0.49$, d.h. dass nur 49% und damit weniger als die Hälfte der Varianz am Pegel auf die Varianz an der betrachteten Messstelle zurückgeführt werden können. Zusätzlich wurden die Korrelationskoeffizienten der Leitfähigkeiten an den Messstellen mit dem Abfluss am Pegel berechnet. Hintergrund dieser Analyse war die Tatsache, dass eine Beprobung am Pegel sich meist am Abfluss orientiert und somit eine Beziehung zwischen Pegelabfluss und Wasserqualität angenommen wird. Der Fließabschnitt mit einem Korrelationskoeffizienten $> |0.7|$ reichte jedoch nur bis 270 m oberhalb des Pegels. Eine Probe, die unter Trockenwetterbedingungen am Pegel entnommen wurde, war somit nur für einen Fließabschnitt bis maximal 490 m repräsentativ, die Annahme des Zusammenhangs zwischen Wasserqualität im Längsprofil und Abfluss am Pegel galt nur für eine Strecke bis 270 m oberhalb des Pegels. Diesen Umstand bedingt einerseits die Kläranlage, deren Abwässer eine erhebliche Belastung des Gewässers darstellten, andererseits die hohen Kalzium- und Sulfat-Konzentrationen geogener Stoffquellen.

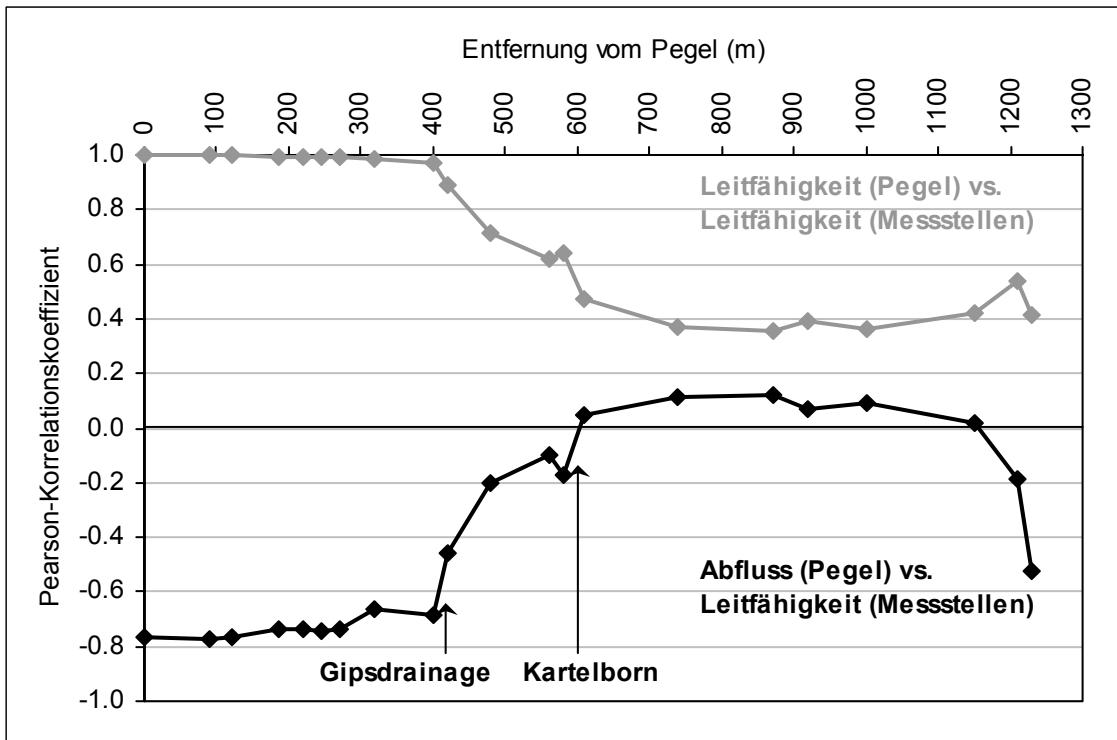


Abb. 2: Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen der Leitfähigkeit bzw. dem Abfluss am Pegel und den Leitfähigkeiten der Messstellen im Bach (n=20).

Es ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Lage der Stoffquellen entlang des Gewässerlaufes die Repräsentativität einer Pegelprobe für das Einzugsgebiet steuert. Die Untersuchung am Kartelbornsbach macht damit deutlich, dass für ein effektives Gewässermonitoring in Fließgewässern zuvor eine räumliche Analyse der Stoffquellen im Einzugsgebiet vorgenommen werden muss.

3.2 Die Repräsentativität im Verlauf von natürlichen Hochwasserereignissen

Die Abbildung 3 zeigt ein typisches sommerliches Hochwasserereignis im Kartelbornsbach (3 km²) vom 29.08.1996, das durch einen kurzen, intensiven Niederschlag ausgelöst wurde. Die zeitliche Abfolge der Maxima von Kalzium, Mangan und Eisen ist in vielen Wellen des Kartelbornsbaches zu beobachten. Sie resultiert aus dem Beitrag von Wasser aus unterschiedlichen Bodentiefen. Dabei spendet der Oberboden Kalzium, mittlere Bodenschichten Mangan und aus dem Unterboden tritt Eisen hinzu. Die Intensität dieses Einflusses ist von der Bodenfeuchte sowie dem Niederschlagsvolumen abhängig. Bei wenig ergiebigen Sommerniederschlägen zeigen Eisen und Mangan keine bedeutenden Konzentrationsanstiege, während Kalzium als Indikator für einen oberflächennahen Abfluss auch bei geringen Niederschlagsvolumina reagiert. Das sukzessive, verzögerte Eintreffen der drei Elemente konnte im Kartelbornsbach mit Beregnungsversuchen auf gewässernahen, hydraulisch ange-

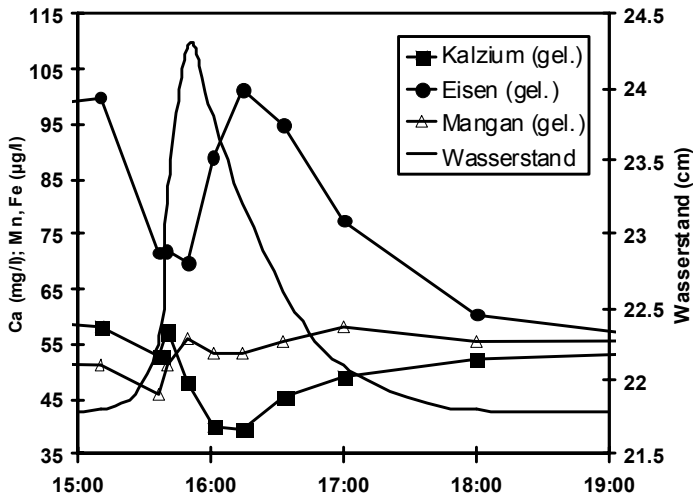


Abb. 3: Kalzium, Mangan und Eisen im Verlauf einer Hochwasserwelle im Kartelbornbach.

238 km² großen Ruwer - Einzugsgebiet gefunden, trotz der wachsenden Bedeutung der räumlichen Niederschlagsverteilung und der Überlagerung von Wellen aus Teil-einzugsgebieten mit zunehmender Einzugsgebietsgröße. Auch im Ruwer-Einzugsgebiet bestätigten Beregnungsversuche die besondere Bedeutung des Flussauenwassers für den Stofftransport im Verlauf natürlicher Hochwasserwellen (Kurtenbach & Niebes 2002).

Die deutliche Verzögerung und der Anstieg von Eisen im Rezessionsast von Sommerwellen tritt im Verlauf von Hochwassern im Winterhalbjahr in allen Raumskalen deutlich zurück. Im Gegensatz zu den Sommerereignissen erfolgt im Winter durch relativ hohe Bodenfeuchten und der damit verbundenen hydraulischen Anbindung

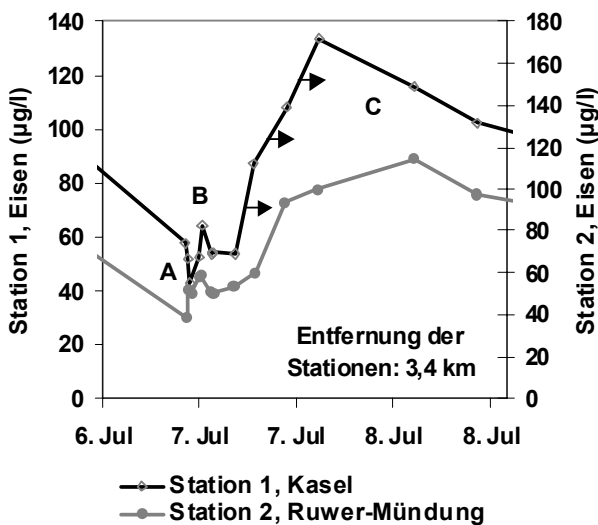


Abb. 4: Eisenchemographen in einer Ruwer-Welle am 07.07.2001.

tiefere Bodenschichten in beiden Einzugsgebieten infolge eines Druckimpulses ein schneller Anstieg der Eisenkonzentration im Anstieg bzw. Maximum der Wellen (Kurtenbach & Krein 2003). Wie sich dabei lokale Einträge und Transportprozesse im Gerinnebett überlagern zeigt die Abbildung 4 in einer Ruwer Welle vom 7.7.2001. Die Abflussmaxima im Verlauf der Beprobung wurde an beiden Messstellen um ca. 10:40 Uhr erreicht. Die Maxima der Eisenchemographen treten jedoch erst deutlich verzögert auf. Lokale Quellen in der Nähe der jeweiligen Messstellen sind für den zeitgleichen Abfall der Ei-

bundenen Auenflächen verifiziert werden. Die aus dem B-Horizont austretende gelöste Phase war durch Kalzium, die Wasserphase des C-Horizontes durch Kalzium und Mangan sowie die Komponente aus dem Ausgangsgestein durch Kalzium, Mangan und hohe Eisengehalte charakterisiert (Krein 2000). Vergleichbare Transportmuster im Verlauf natürlicher Hochwasserereignisse wurden auch im 35 km² großen Olewiger - Bach Einzugsgebiet (Symader et al. 1999) und im

senkonzentrationen in Kasel und dem Anstieg der Eisen-Konzentration an der Station 2, Ruwer – Mündung zu Beginn des Ereignisses verantwortlich (Abb. 4, A). Die ersten kleineren Eisen-Peaks treten ebenfalls nahezu zeitgleich auf (Abb. 4, B), wohingegen der markante Eisenanstieg und das zweite deutliche Maximum verspätet an der Ruwer - Mündung auftritt (Abb. 4, C). Die ersten Peaks werden durch lokale Eisen - Quellen hervorgerufen. Der zweite Peak resultiert aus dem Transport der gelösten Phase von der flussaufwärts gelegenen Station 1, Kasel.

Um die Frage zu klären, ob solche Gerinneprozesse auch in kleineren Einzugsgebieten für den Stofftransport im Verlauf natürlicher Hochwasser relevant sind, wurden während einer Hochwasserwelle am 07.03.2001 fünf Längsprofile der Leitfähigkeit am Kartelbornsbach gemessen. Die Messung der Längsprofile begann jeweils im Abstand von 45 bis 60 Minuten. Die ersten beiden Profile wurden im ansteigenden Ast der Welle gemessen, das dritte Profil während des Scheitels am Pegel und zwei Messungen fanden im Rezessionsast der Welle statt. Das Niederschlagsereignis dauerte von 5:00 bis 10:30 Uhr und wies eine mittlere Intensität von ca. 1.2 mm/h auf. Die Messungen der Leitfähigkeit zeigten, dass das Minimum der Leitfähigkeit im Längsprofil (Abb. 5, gekennzeichnet mit den Ziffern 1-4) sich flussabwärts verlagerte. Das erste Längsprofil um 8:30 Uhr wies ein Minimum auf, das sich unterhalb der Kläranlage bei 1200 m befand (Abb. 5, 1). Dieses Minimum hatte sich eine Stunde später 330 m flussabwärts verlagert (Abb. 5, 2). Ein Zustrom von Oberflächenwasser zwischen den beiden Messstellen, an denen jeweils das Minimum auftrat, wurde nicht beobachtet. Während des dritten Profils um 10:25 Uhr befand sich das Minimum der Leitfähigkeit 245 m oberhalb des Pegels (Abb. 5, 3). Zu diesem Zeitpunkt

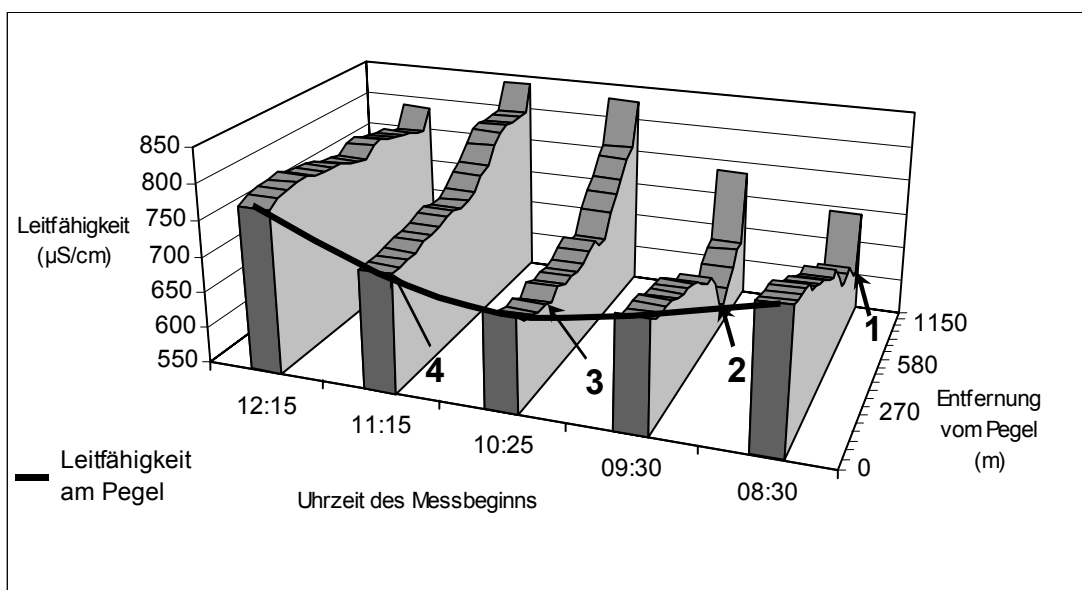


Abb. 5: Längsprofile der Leitfähigkeit während der Hochwasserwelle vom 7.3.2001. Die Ziffern 1 bis 4 kennzeichnen die Lage des absoluten Leitfähigkeitsminimums im gesamten Längsprofil.

trat jedoch das Maximum des Abflusses auf. Damit wurde nachgewiesen, dass das Maximum des Abflusses am Pegel vom Minimum der Leitfähigkeit in der Hochwasserwelle entkoppelt ist. Bei Beginn des vierten Längsprofils um 11:15 Uhr trat das Minimum der Leitfähigkeiten im gesamten Längsprofil am Pegel ein (Abb. 5, 4). Bei Betrachtung der fünf Leitfähigkeitsmessungen am Pegel fiel jedoch auf, dass nicht dieser vierte Wert das absolute Minimum darstellte. Dieses war bereits um 10:25 Uhr gemessen worden, als sich das Minimum der Leitfähigkeit im Längsprofil noch 245 m vor dem Pegel befand. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass das Leitfähigkeitsminimum am Pegel hauptsächlich durch Zuflüsse aus der Umgebung bis 245 m vor dem Pegel gebildet wurde, nicht jedoch von der ablaufenden Welle.

Der Chemismus, der während einer Hochwasserwelle an einer Station gemessen wird, setzt sich somit aus zwei Prozessen zusammen. Einerseits wird er durch den Stoffzufluss aus Quellen in der unmittelbaren Umgebung der Station und deren Mischung bestimmt, andererseits durch die Welle, die sich vom Oberlauf flussabwärts bewegt. Es erhebt sich wiederum die Frage, für welchen Bereich eines Einzugsgebietes eine Messstelle repräsentativ ist. Im Falle des hier untersuchten Hochwasserabflusses erwies sich der Pegel nur für eine Fließstrecke von maximal 245 m als repräsentativ. Eine zum Zeitpunkt des Abflussmaximums entnommene Wasserprobe setzt sich hauptsächlich aus den Inhaltsstoffen des in diesem pegelnahe Fließabschnitt zuströmenden Grund-, Boden- und Oberflächenwässer sowie aus Vorereigniswasser aus dem Bach zusammen. Wird die Probe im Rezessionsast der Welle entnommen, enthält sie Anteile des Hochwasserabflusses aus dem gesamten Einzugsgebiet. Doch auch hier ist die Frage, wie sich der Anteil der aus den Teileinzugsgebieten zuströmenden Wässer durch die longitudinale Dispersion in der Welle verteilt. Damit ist bei der Probenahme die Repräsentativität der Pegelprobe für das Einzugsgebiet sowohl bei Trockenwetterabfluss (vgl. Kapitel 3.1) als auch unter Hochwasserabfluss zu beachten (Symader et al. 2002).

Diese Ergebnisse sind im Hinblick auf die Anwendung flächendetaillierter Abflussmodelle wichtig. Einzelmessungen an einer Pegelstation sind in Abhängigkeit von den hydrologischen Randbedingungen nur für geringe Fließabschnitte repräsentativ und können daher nur bedingt als Gesamtreaktion des Einzugsgebietes aufgefasst werden. Insbesondere im Verlauf von Sommerereignissen, mit berechneten Abflusskoeffizienten von 2-3 % im Kartelbornsbach (Symader et al. 1992) sind nur wenige Teilflächen aktiv, die hydraulisch ans Fließgewässer angeschlossen sein müssen und deren Bedeutung in Abhängigkeit von den jeweiligen Randbedingungen variiert.

3.3 Die Repräsentativität im Verlauf von künstlichen Hochwasserwellen

Nachdem für den Transportprozess ein kinematischer Welleneffekt mit künstlich induzierten Hochwasserwellen im Olewiger Bach (35 km²) nachgewiesen werden konnte, wurden ähnliche Geländeexperimente auch an der Ruwer (238 km²) durchgeführt.

Am 12.07.2001 wurde aus dem Ablauf der Riveristalsperre im Ruwer - Einzugsgebiet für eine Stunde ein Abfluss von 1000 l/s erzeugt. Die Lage der Messstellen ist aus Abbildung 6 ersichtlich. In der kleineren Riveris (Abb. 7, Messstelle 1) ist parallel zum ansteigenden Wasserstand ein nahezu zeitgleiches Absinken der Leitfähigkeit aufgrund des schnell eintreffenden Talsperrenwassers zu beobachten. In der größeren Ruwer (Abb. 7, Mess-



Abb. 6: Lage der Messstellen im Ruwer - Einzugsgebiet.

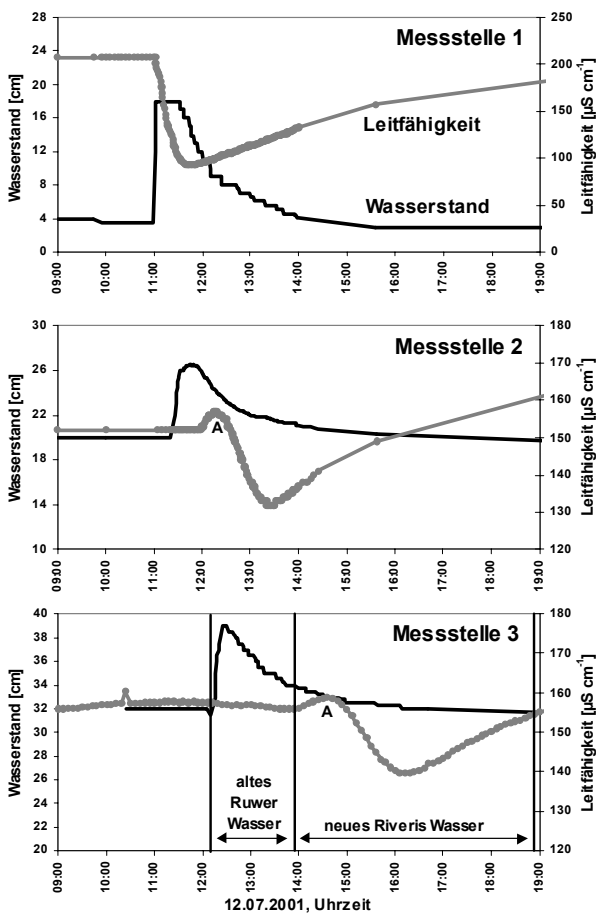


Abb. 7: Künstliche Welle im Ruwer – Einzugsgebiet am 12.07.2001.

stellen 2 & 3) zeigt sich hingegen eine deutliche Entkoppelung von Abflussreaktion und Stofftransport. An der Messstelle 3 beträgt die zeitliche Trennung des Wasserstandsanstiegs von der ersten deutlichen Änderung in der Leitfähigkeit nach nur 3,3 Kilometern Fließstrecke bereits 110 Minuten (!). Die künstliche Welle nimmt somit im ansteigenden Ast in der Ruwer mit zunehmender Fließlänge verstärkt „alten“ Trockenwetterabfluss auf. Der kurzfristige Anstieg der Leitfähigkeit an den Messstellen 2 und 3 (Abb. 7, A) wird mit einem höheren Eintrag von ionenreicherem Wasser der Riveris in die Ruwer zum Zeitpunkt des Wellenbeginns an der Messstelle 1 erklärt. Der Abflussscheitel setzt sich als kinematische Welle fort, während sich die gelöste Phase langsamer ausbreitet und daher erst nach dem Abflussscheitel

an einer bachabwärts gelegenen Messstelle eintrifft. Die Fließstrecke, bis zu der eine völlige Entkoppelung eintritt, ist dabei abhängig von der Größe des Gewässers, seinem Abfluss sowie von dem Volumen des induzierten Abflusses der künstlichen Welle (Krein & De Sutter 2001).

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der kinematische Welleneffekt auch in kleinen Fließgewässern und auf sehr kurzen Fließstrecken in Abhängigkeit der hydrologischen Randbedingungen eine bedeutende Rolle spielt. Die nachgewiesenen Transportphänomene im Verlauf der künstlichen Hochwasserwellen stellen zudem die Ergebnisse traditioneller Mischungsmodelle in Frage (Krein & De Sutter 2001).

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen verdeutlichen, dass insbesondere pegelnahe Quellen, die raumzeitliche Verteilung hydrologisch aktiver Teilflächen und Transportprozesse im Gerinne einen entscheidenden Einfluss auf den Stofftransport und die Abflussbildung in Mittelgebirgseinzugsgebieten haben. Im Verlauf von Trockenwetterbedingungen am Kartelbornsbach ist die Pegelprobe nur für eine Fließstrecke von 400 bis 500 m oberhalb des Pegels repräsentativ und wird somit entscheidend durch die raumzeitliche Variation pegelnahe Quellen gesteuert. Im Verlauf natürlicher Hochwasser sind einerseits die pegelnahe Quellen und andererseits der Wellenablauf im Gerinne für den Aufbau des Chemographen am Pegel verantwortlich. Da die Welle aus dem oberen Einzugsgebiet den Pegel erst verzögert erreicht, beschränkt sich die Repräsentativität der Pegelproben im Wellenscheitel auf die Erfassung pegelnahe Quellen. Im Rezessionsast der Hochwasserwelle überlagern sich dagegen die Stoffflüsse aus dem oberen Einzugsgebiet und aus der pegelnahe Umgebung. Speziell im Verlauf von Sommerereignissen sind nur wenige Prozent des gesamten Einzugsgebietes für die Abflussbildung und den Stofftransport relevant. Die Ergebnisse der künstlichen Hochwasserwellen zeigen, dass kinematische Wellen nicht auf große Fließgewässer beschränkt sind, sondern auch in kleinen Gerinnen und auf sehr kurzen Fließstrecken bedeutende Einflüsse haben. Die chemischen Variationen innerhalb einer Welle stammen vorwiegend von einem kurzen Fließabschnitt pegelaufwärts und sind somit nur für ein kleines Teileinzugsgebiet repräsentativ. Im Verlauf dieser Wellen steuern die chemischen Eigenschaften des Vorereigniswassers, die hydrologischen Randbedingungen und die longitudinale Dispersion den Chemographen am Pegel und schränken seine Repräsentativität ein. Die raumzeitliche Variabilität und Aktivierung der Stoffquellen, die kinematische Welle und die longitudinale Dispersion beeinflussen somit den Hydrographen und die Chemographen an einer Pegelstation. Damit bildet die Kenntnis der räumlichen Verteilung und der zeitlichen Variabilität der Stoffquellen und hydrologisch aktiven Teilflächen die Grundlage für ein effektives Gewässermonitoring und die erfolgreiche Anwendung flächendetaillierter Abflussmodelle.

5 Literatur

Anderson, S.P., Dietrich, W.E., Torres, R., Montgomery, D.R. & Loague, K. (1997): Concentration-discharge relationships in runoff from a steep, unchanneled catchment. *Water Resources Research*, 33, 211-225.

Blöschl, G. & Sivapalan, M. (1995): Scale issues in hydrological modelling: a review. – *Hydrological Processes*, Vol. 9., 251-290.

Chapman, P.J., Wheater, H.S., Reynolds, B. (1993): The effect of geochemical reactions along flow-paths on storm water chemistry in headwater catchments. - *IAHS-Publ.* 215, 23-30.

Christophersen, N., Neal, C., Hooper, R.P., Vogt, R.D. & Andersen, S. (1990): Modelling stream water chemistry as a mixture of soil water endmembers – a step towards second generation acidification models. - *J. of Hydrol.*, 116, 307-320.

Krein, A. (2000): Stofftransportbezogene Varianzen zwischen Hochwasserwellen in kleinen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung partikelgebundener toxischer Umweltchemikalien.- *Dissertation Universität Trier, Abt. Hydrologie, Aachen.*

Krein, A. & De Sutter, R. (2001): Use of artificial flood events to demonstrate the invalidity of simple mixing models. *Hydrological Sciences Journal*, 46, 4, 611-622.

Kurtenbach, A., Krein, A. & Symader, W. (2002): The dynamics of contaminant transport at different scales during natural and artificial flood events. - *CHR/KHR, Report II-17*, 165 - 174.

Kurtenbach A. & Niebes, D. (2002): Fließwege und Stofftransportprozesse in unterschiedlichen Raumskalen am Beispiel von natürlichen Hochwasserereignissen und Beregnungsversuchen. – In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 1, Fachgemeinschaft Hydrol. Wissenschaften in der ATV-DVWK, 48-54.

Kurtenbach, A. & Krein, A. (2003): Hochwasserereignisse in unterschiedlichen Raumskalen – eine Untersuchung des gelösten und partikulären Stofftransports in heterogenen Einzugsgebieten. - *Schriftenreihe GUG Geowissenschaften und Umwelt*, 105-117, Springer.

Möller, S. (2002): Räumliche und zeitliche Analyse von Stoffquellen und Abflussprozessen im Einzugsgebiet des Kartelbornsbaches. – *Dissertation Universität Trier, Berlin.*

Peschke, G. (1999): Skalenwechsel über Modelle. - In: *Kleeberg, H.B., Mauser, W., Peschke, G., Streit, U. (Hrsg.): Hydrologie und Regionalisierung. - Ergebnisse eines Schwerpunktprogramme. Forschungsbericht DFG*, 13-22.

Symader, W., Bierl, R., Strunk, N. & Hampe, K. (1992): Erosionsprozesse, Schwebstofftransport und partikelgebundene Umweltschadstoffe in kleinen Einzugsgebieten des Raumes Trier. - in: *Müller, M.J. (Hrsg., 1992): Beiträge zur Physischen Geographie und Landeskunde. Flensburger Regionale Studien, Sonderheft 2*, 131-170.

Symader W., Bierl R. & Gasparini F. (1999): Abflussereignisse, eine skalenabhängige, multiple Antwort von Einzugsgebieten auf Niederschläge. - *Acta hydrochim. Hydrobiol.*, 27, 2, 87-93.

Symader, W., Bierl, R., Gasparini, F. & Krein, A. (2002): Effective monitoring of small river basins. *Sci. World*. - *Internetzeitschrift*. (www.scientificworld.com)

Trudgill, S.T. (1995): *Solute modelling in catchment systems*. – Wiley, New York.