

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 49 (2008)
Heft: 1

Artikel: Abflussbildung und Abflusskonzentration : entscheidende Prozesse für den diffusen Nährstoffeintrag
Autor: Schneider, Philipp
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1088290>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Abflussbildung und Abflusskonzentration – entscheidende Prozesse für den diffusen Nährstoffeintrag

Philipp Schneider

Zusammenfassung

Präferenzielle Fliesswege im Boden sind potenziell ein wichtiger diffuser Eintragspfad für Nährstoffe aus der Landwirtschaft in die Gewässer. Verbinden sich z. B. vertikale Makroporen und laterale Röhrensysteme im Boden, führt dies zu beschleunigter Infiltration und schneller Entwässerung. Entsprechend erfolgt der laterale Transport von Stoffen zum Gewässer hin – die Abflusskonzentration – überwiegend unterirdisch. Da Abfluss insbesondere an Grünlandstandorten primär im Boden gebildet wird, dominiert bei Hochwasser der schnelle unterirdische Abfluss (SSF) und der beschleunigte Grundwasserabfluss (GWR). Der schnelle Transport verschiedener Markierstoffe bei Niederschlagsereignissen und Experimenten belegt eine ausgeprägte hydrologische Vernetzung in den Böden des Bergseegebiets bei Bad Säckingen.

1 Einleitung

Anhand von Bilanzierungsrechnungen wurde festgestellt, dass vor allem die Emission von Phosphor (P)- und Stickstoff (N)-Verbindungen aus der Landwirtschaft erheblich zur Gewässerbelastung beitragen (Prasuhn & Braun 1994, Prasuhn et al. 1997, Sharpley et al. 1995, Braun et al. 1997). Die Quantifizierung bzw. die messtechnische Erfassung der transportierten Stoffmengen bereitet erhebliche Schwierigkeiten, da Nährstoffeinträge in die Gewässer vorwiegend über diffuse Pfade erfolgen. Jedoch sind derartige Erkenntnisse erforderlich, um gezielt Minderungsstrategien entwickeln zu können bzw. die Wirksamkeit von bereits vorgenommenen Massnahmen zu prüfen (Meissner 2005).

Ziel dieser Feldstudie war es, mit Experimenten diffuse Pfade zu untersuchen, insbesondere präferenzielle Fliesswege im Boden, und diese bezüglich ihres P-Eintragspotenzials zu bewerten. Basierend auf hydrologischem Systemverständnis über Abflussbildung- und Abflusskonzentration sollten P-Eintragspfade identifiziert und soweit möglich quantifiziert werden.

2 Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Einzugsgebiete des Bergsees – Rüttebach und Schneckenbach (Karte siehe *Katterfeld* 2008, in dieser Ausgabe) – sind geprägt von hohen Jahresniederschlägen (1300–1800 mm/Jahr) sowie hoher Infiltrations- und Speicherkapazität der Böden und des tiefgründig verwitterten Albtalgranits. Die mittlere Abflussspende der Quellbäche ist insgesamt hoch, wobei die Abflussextrême relativ stark gedämpft sind. Infolge der Höhenlage, des humiden Klimas und des gebirgigen Reliefs sowie der silikatischen Braunerden überwiegen Wald und Dauergrasland als Landnutzungsformen.

2.2 Monitoring, Probenahme und analytische Methoden

Um die hydrologische und stoffliche Vernetzung zu untersuchen, wurden folgende Methoden angewandt:

- Abfluss: 4x Pegel (0.5, 0.7, 2.2, 3.2 km²), 5 Min. davon, 1x 90°-Überfall, 1x Wehr mit Niedrigwasserrinne und 2x HL-Flume (3x EcoTech Drucksensor und 1x OTT Thalimedes)
- Grundwasserstand: 3x Piezometer, 5 Min. (3x EcoTech Drucksensor)
- Niederschlag: 1x Ombrograph, 15 Min., 2x Totalisator (Isotopenanalyse)
- Probenahme Fließgewässer: Probenahmegeräte (2x Isco 2900, 2x Isco 6700), Flowmeter (2x Isco 2870)
- Probenahme Grundwasser (manuelle Beprobung)
- Probenahme Niederschlag (Totalisator, manuelle Beprobung)
- Leitfähigkeitsanalytik (Metrohm Conductometer 660)
- Phosphor-Analytik: *Murphy & Ridley* (1962), UV/VIS Spektralphotometer (Perkin-Elmer Lambda II) bei 824 nm
- Anionenanalytik (Cl, NO₃, SO₄): Ionenchromatographie (Metrohm Ion Chromatograph 690)
- TOC-Analytik: Katalytische Hochtemperaturoxidation (Shimadzu TOC-5000A)
- Silikatanalytik: UV/VIS Spektralfluorometer, 810 nm (Perkin-Elmer Lambda II)
- Uraninanalytik: Synchronscanmethode (*Käss* 1992), Spektralfluorometer (Perkin-Elmer LS50B)
- Isotopenanalytik: ¹⁸O und ²H Massenspektrometrie (Finnigan/Mat Delta XP)
- Ganglinienseparation: Rekursive digitale Filter (*Eckhardt* 2005), Zwei-Komponentenseparation (*Sklash & Farvolden* 1979) für Silikat und ¹⁸O.

3 Ergebnisse

Zur Identifikation zentraler Abflussbildungsprozesse bei Hochwasser wurden im Teileinzugsgebiet Rüttebach Markierstoffexperimente durchgeführt. Ziel war die Überprüfung der Arbeitshypothese, die von einer Dominanz des schnellen unterirdischen Abflusses (*subsurface stormflow*, SSF) bei mittleren, für den Stoffhaushalt relevanten Ereignissen mit Niederschlagssummen von 15–30 mm und Intensitäten > 4 mm/0.5 h ausgeht (Abb. 1). In Kooperation mit einem Landwirt wurde ein gerinnenahes Flurstück (0.73 ha) mit gebietstypischer Grünlandnutzung (Mähwiese) im oberen Rüttebacheinzugsgebiet ausgewählt. Im Anschluss an die erste Nutzung (Schnitt am 24.05.2004) wurde am folgenden Tag ein Experiment mit dem Fluoreszenzmarkierstoff Uranin durchgeführt.

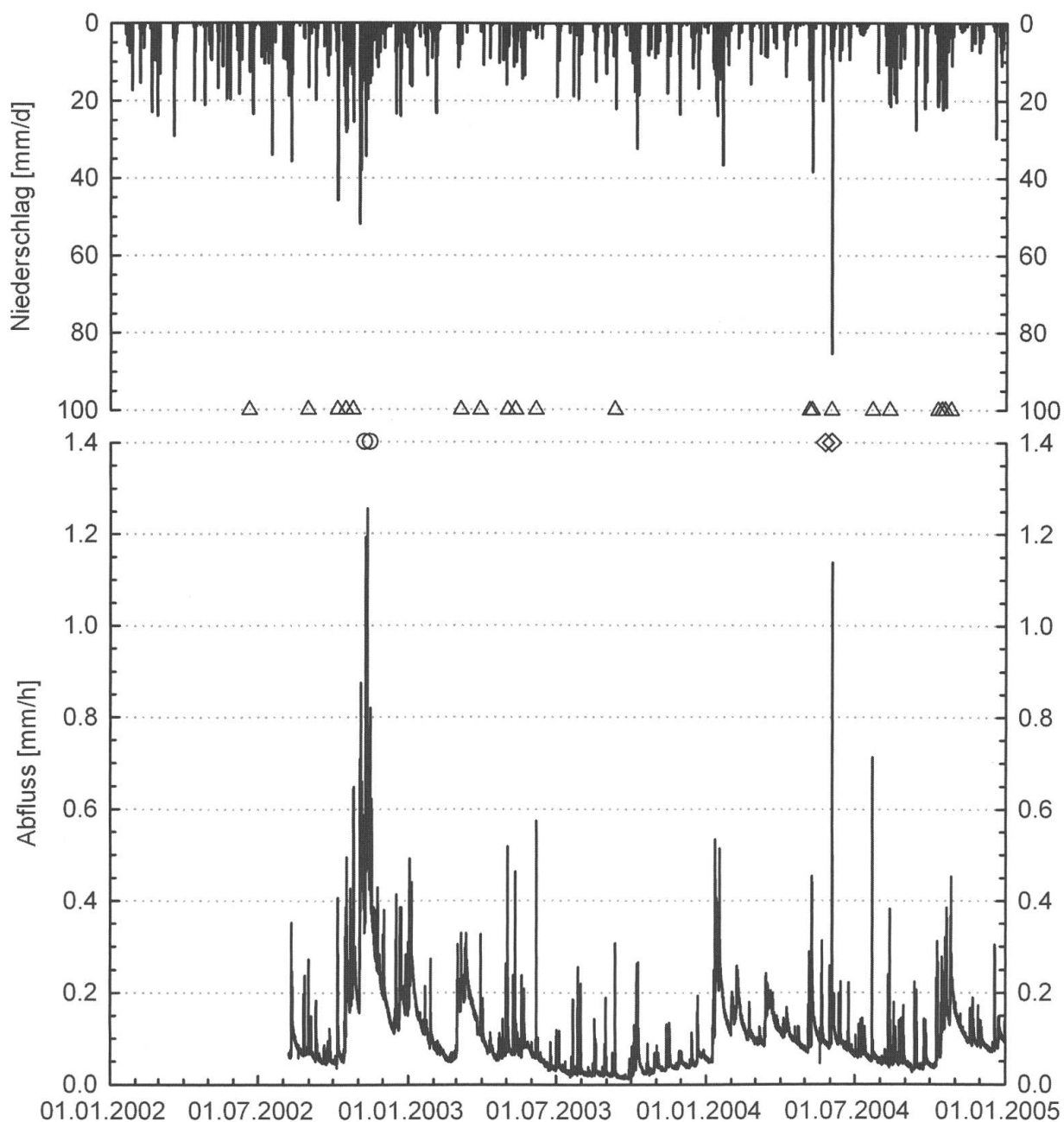


Abb. 1 Übersicht der beprobten Ereignisse, Niederschlag und Abfluss des Pegels Rüttebach-Mündung für die Jahre 2002–2004. Dreiecke: beprobte Ereignisse (Probenahmeintervall 15 Min.), Kreise (Probenahmeintervall 2 h bzw. 4 h), Rauten: Markierexperimente (Uranin bzw. Deuterium).

3.1 Uraninexperiment

Um ein charakteristisches Niederschlagsereignis zu simulieren, wurde das betreffende Flurstück 1 h vor und 1 h nach der Markierstoffapplikation jeweils mit 12'000 Liter Bachwasser auf einem 12 m breiten und 200 m langen gerinneparallelen Streifen gewässert (entspricht 10 mm Niederschlag).

Für das Ausbringen des Markierstoffs wurde ein gereinigtes Güllefass zur Hälfte (6'000 Liter) mit Bachwasser gefüllt und mit 2 kg Uranin dotiert. Anschliessend wurde der Markierstoff flächenhaft (Abb. 2) auf einem 6 m breiten und 200 m langen gerinneparallelen Streifen innerhalb des Vorwässerungstreifens ausgebracht (entspricht 5 mm Niederschlag).



Abb. 2 Ausbringen des Markierstoffs Uranin mit Schleppverteiler bei Nacht am 25.05.2004.

Dabei wurde ein Mindestabstand zum Gerinne von 5 m eingehalten, um entsprechend der “guten landwirtschaftlichen Praxis” Direkteinträge zu vermeiden. Der Markierstoff wurde nicht auf die Vegetationsdecke, sondern in den obersten Wurzelraum aufgetragen, da der Schleppverteiler seine Ventile erst bei einem gewissen Anpressdruck öffnet. Dieser Anpressdruck führt zu ca. 5–8 cm breiten und 1–2 cm tiefen Strukturen im Wurzelfilz, in die dann das Füllgut läuft und anschließend infiltriert (Abb. 2).

Der Durchbruch bzw. das Erstauftreten des Markierstoffs erfolgt nach nur 27 Min.; das Maximum der Uraninkonzentration (195 ppb Uranin) wird nach 41:45 Min. erreicht (Abb. 3). Zu berücksichtigen ist, dass Uranin aufgrund seiner Eigenschaften im Boden leicht retardiert wird und somit zu verzögertem Durchbruch neigt (*Harden et al. 2003*). Bei den untersuchten Ereignissen von 2002–2004 (Abb. 1) lagen die P-Maxima fast durchgängig im Bereich des ansteigenden Astes, meist in weniger als 30 Min. nach Niederschlagsbeginn (*Schneider 2007*).

Aufgrund des Nachwässerns 1 h nach dem Ausbringen des Markierstoffs wurde ein weiterer, kleinerer Konzentrationsanstieg (*Peak*) erzeugt (Abb. 3, 160 ppb Uranin, Durchbruch nach 19 Min., Maximum nach 28 Min.). Der Rückerhalt des Markierstoffs innerhalb des Messzeitraums von 14 h nach Einspeisung beträgt 1.5 % (29.7 g von 2 kg Uranin). Der Versuch wurde bei Nacht durchgeführt, da Uranin lichtempfindlich ist. Auswertung und Bestimmung der wichtigsten Kenndaten erfolgte nach der C_{peak} -Methode nach Maloszewski (siehe *BWG 2002*).

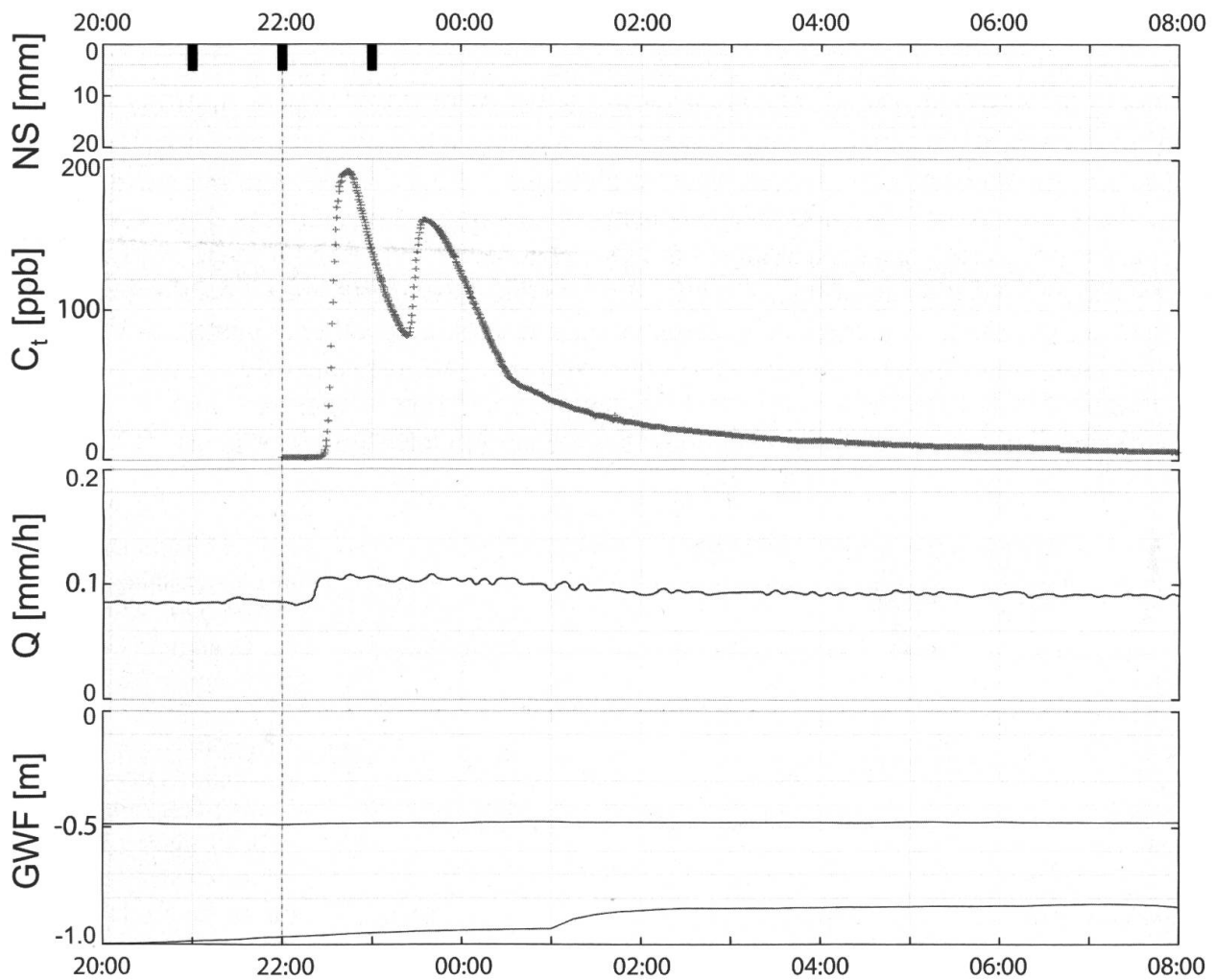


Abb. 3 Künstlicher Niederschlag (N), Uranin-Durchgangskurve (C_t), Abfluss (Q) am Pegel Rüttebach-Brücke und Grundwasserflurabstand (GWF, jeweils ein GW-Pegel im oberen und unteren Bereich der Versuchsfläche) für das Uranin-Experiment am 25.05.2004.

Das Fehlen des Direkteintrags ist ein starkes Indiz dafür, dass Oberflächenabfluss kein bedeutender Eintragspfad im Rüttebachtal darstellt (Abb. 3 u. 4). Die Ergebnisse des Düngeexperiments bestätigen dies auch für intensive Niederschlagsereignisse (Abb. 4, 5 u. 6). Die schnelle Antwort – Durchbruch nach weniger als 30 Min. bei mindestens 5 m Fließstrecke – bestätigt den erwarteten unterirdischen Abfluss (SSF). Im Vergleich zu anderen Gebieten (Weiler et al. 2005, u. a. Panola/USA und Maimai/Neuseeland) ist der Schwellenwert für SSF sehr niedrig. Gründe hierfür sind in erster Linie die hohe Makroporosität des Bodens und der dadurch auch bei mittleren Niederschlägen bedeutende Anteil an präferenziellem Abfluss.

Das gleichzeitige Ansteigen des Abflusses mit dem Erstnachweis des Markierstoffs deutet darauf hin, dass die Abflusskonzentration massgeblich von präferenziellen Fließwegen bestimmt wird (Abb. 3). Ob im weiteren Verlauf auch gesättigter lateraler Matrixfluss – z. B. durch Ausdehnung der gesättigten Zone in Bereiche hoher hydraulischer Leitfähigkeit – stattfindet, kann weder bestätigt noch ausgeschlossen werden. Der zweite Anstieg der Uraninkonzentration mit seinem im Vergleich zum ersten Abflussscheitel (Abb. 3) nur leicht beschleunigten Eintrag des Markierstoffs nach dem Nachwässern deutet jedoch darauf hin, dass der Transport durch Makroporen erfolgt. Bei vorherrschendem beschleunigtem Grundwasserabfluss wäre eine noch schnellere Antwort für den zweiten Anstieg zu erwarten gewesen, da der gerinnenah positionierte Markierstoff durch den Nachwässer-Impuls nur noch *ausgedrückt* werden müsste.

3.2 Deuterium/Gülle

Als Basis für das Deuterium(D)/Gülle-Experiment am 02.06.2004 dienten die Resultate des Uranin-Experiments an gleicher Stelle, das ca. eine Woche zuvor durchgeführt wurde. Bezüglich Vegetation, Bodenfeuchte etc. ist von einer vergleichbaren Situation auszugehen, während sich Unterschiede vor allem in Niederschlagsintensität, -dauer und -menge ergaben. Das Ausbringen des Markierstoffs erfolgte nach Abklingen des ersten Niederschlags (Abb. 4). Da jedoch ein zweiter, ergiebiger Niederschlagsabschnitt folgte, stiegen Niederschlagssumme und Abflussvolumen markant an. Die damit einhergehende Verdünnung war dadurch deutlich höher als erwartet, so dass das Deuterium-Signal im Gerinne (= Bachwasser bzw. Abfluss) nur schwach war (Abb. 4). Im Grundwasser konnte Deuterium jedoch eindeutig identifiziert werden und auch im Gerinne selbst finden sich Hinweise auf den Zeitpunkt des Deuteriumdurchbruchs (Abb. 4).

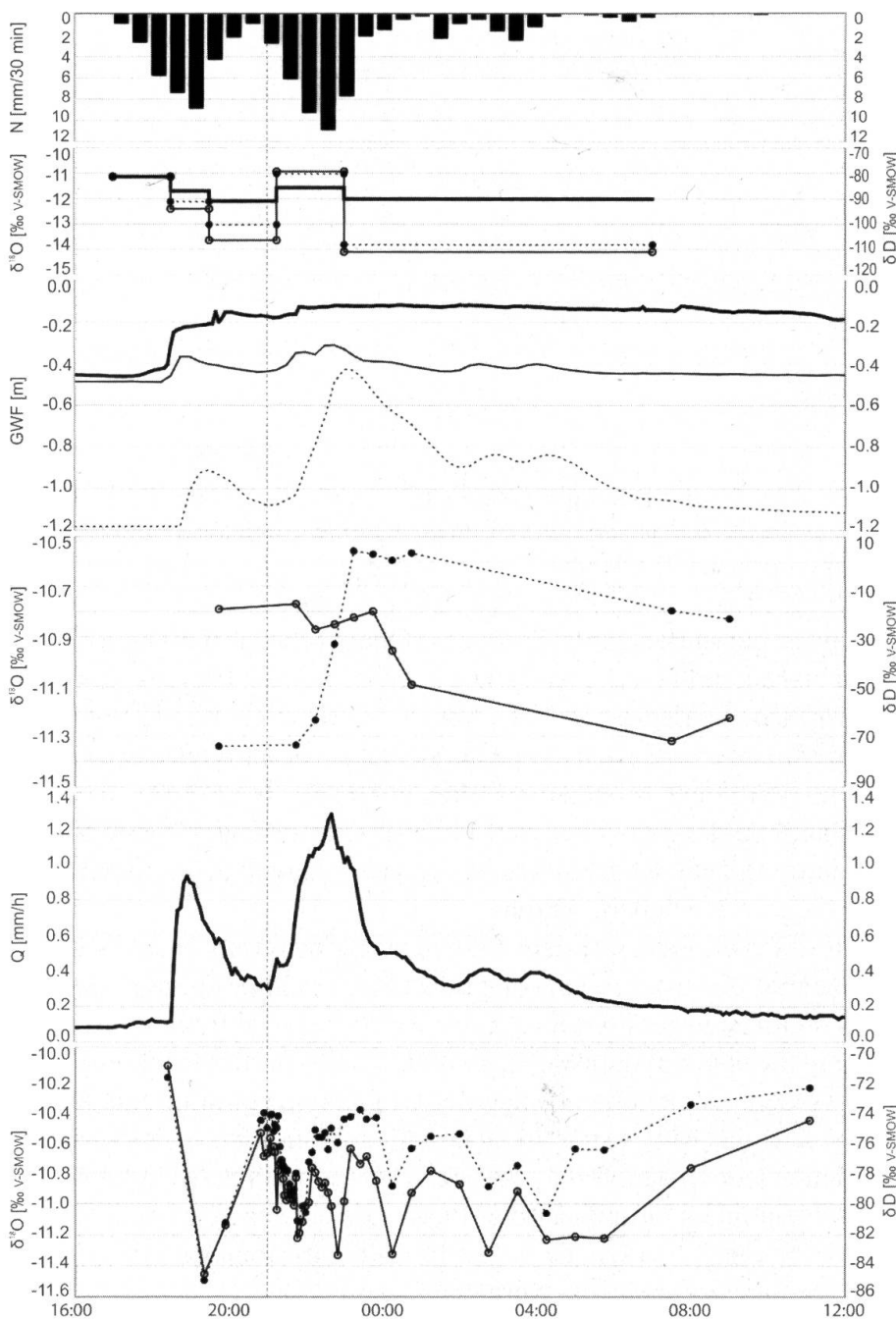


Abb. 4 Isotopengehalte in Niederschlag, Grundwasser und Abfluss für das Deuterium/Gülle-Experiment am 02.06.2004.

1. Graph: Niederschlag.
 2. Graph: Isotopengehalte im Niederschlag, ^{18}O (o bzw. dünne Linie), ^{18}O Inkrementaler Mittelwert (dicke Linie), D (• bzw. gepunktet).
 3. Graph: Grundwasserstandsganglinie im oberen (dünne Linie), mittleren (dicke Linie, diese wurde beprobt) und unteren (gepunktet) Bereich der Versuchsfläche.
 4. Graph: Isotopengehalte im Grundwasser ^{18}O (o bzw. durchgezogene Linie), D (• bzw. gepunktet).
 5. Graph: Abflussganglinie am Pegel Rüttenbach-Brücke.
 6. Graph: Isotopengehalte im Abfluss, ^{18}O (o bzw. durchgezogene Linie), D (• bzw. gepunktet).
- Die gestrichelte Linie (vertikal über alle Graphen) markiert den Zeitpunkt der Markierstoffapplikation bzw. der Gülleausbringung.

Deuterium lässt sich nach kurzer Zeit im Grundwasser in hoher Konzentration eindeutig nachweisen (Abb. 4). Die hohen Transportgeschwindigkeiten sind ein starkes Indiz für präferenzielle Infiltration durch Makroporen. Da die beprobte Grundwassermessstelle in mehr als 2 m Horizontaldistanz vom nächsten Eintragungspunkt liegt, deutet dies auf laterale präferenzielle Fliesswege hin. Ein Eintrag über schnellen vertikalen Transport via Makroporen in die gesättigte Zone und anschliessenden lateralen Transport in der Bodenmatrix lässt sich jedoch nicht ausschliessen, besonders wenn in Folge des Anstiegs des Grundwasserspiegels Bereiche mit erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit gesättigt werden.

Möglicherweise kommt grösstenteils das Wasser des ersten Niederschlags zum Abfluss. Es handelt sich dabei auch um Ereigniswasser, das sich isotopisch nur schwer vom Wasser des zweiten Niederschlags unterscheiden lässt (Abb. 4 u. 5). Die Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Schnelle Infiltration und lateraler Transport zum Gewässer führen zu hohen Konzentrationen im Grundwasser (Leitfähigkeit, D, Abb. 4),
- Das Deuterium-Signal ist im Gerinne aufgrund der grossen Verdünnung nur schwach nachweisbar, zeigt aber den vom Uranin-Experiment bekannten schnellen Durchbruch (Abb. 4).
- Der Ereigniswasseranteil ist mit ca. 60 % ungewöhnlich hoch (Abb. 5). Dennoch ist der P-Austrag am Pegel Rüttebach-Brücke gering (zwischen 0.1–0.3 mg/l Gesamtphosphor) (Abb. 6).

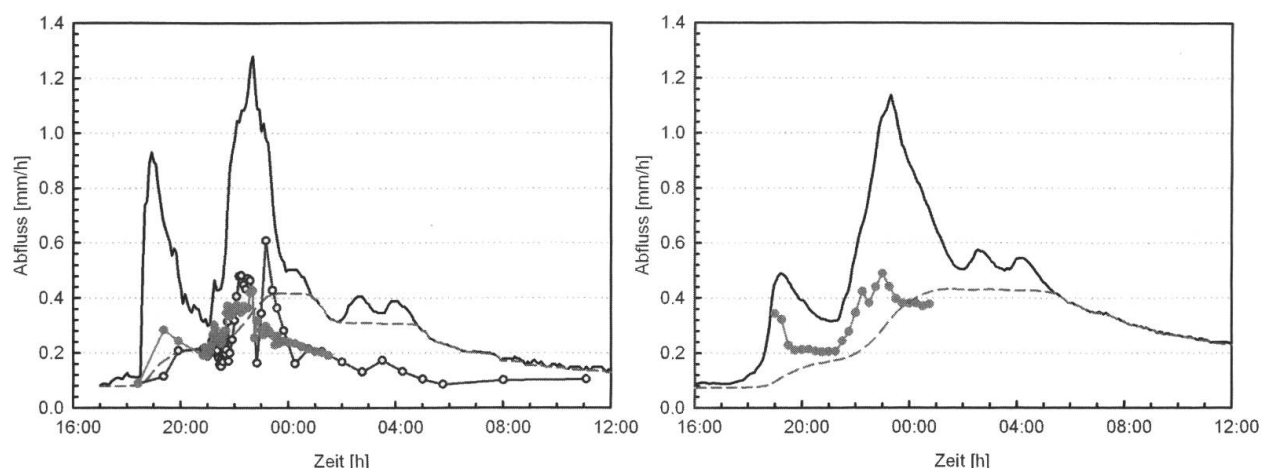


Abb. 5 Ganglinienseparation für das Ereignis am 02.06.2004 an den Pegeln Rüttebach-Brücke (1. Graph) und Rüttebach-Mündung (2. Graph). Erklärung: Abfluss (durchgezogene Linie), Ganglinienseparation mit Silikat (•), ^{18}O (o) und mit rekursivem Filter berechnet (gestrichelt).

4 Diskussion

Bezüglich der Konsequenzen von präferenziellem Abfluss für den P-Austrag von Wiesenböden finden sich in der Literatur gegensätzliche Aussagen. *Haygarth et al. (1998)* stellen fest, dass bei drainierten Wiesen der P-Verlust im Vergleich zu undrainierten Böden deutlich reduziert ist, was auf schnelle P-Sorption beim Vertikaltransport im Boden zurückgeführt wird. Andere Autoren belegen in ihren Arbeiten, dass hohe P-Austräge durch Makroporen und Drainagen erheblich zur Phosphorbelastung von oberirdischen Gewässern beitragen können (*Stamm et al. 1995, 1998; Gächter et al. 1996, 1998; Heathwaite & Dils 2000 sowie Djodjic et al. 2004*).

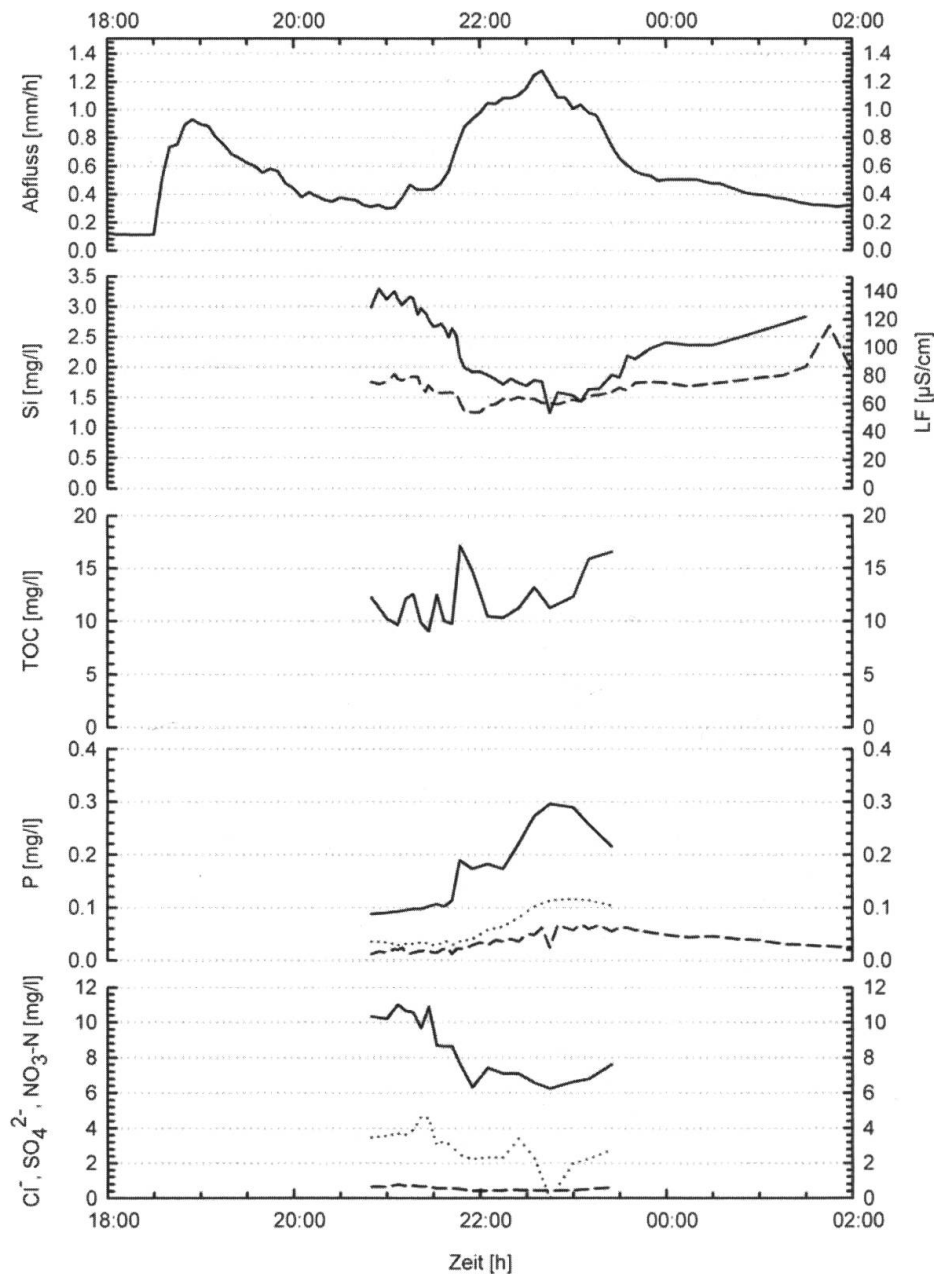


Abb. 6 Abfluss und Hydrochemismus für das Ereignis am 02.06.2004 (84.8 mm Niederschlag) am Pegel Rüttebach-Brücke.

1. Graph: Abfluss (durchgezogene Linie).
2. Graph: Silikat (durchgezogene Linie) und Leitfähigkeit (gestrichelt).
3. Graph: Gesamter organischer Kohlenstoff TOC (durchgezogene Linie).
4. Graph: Gesamtphosphor TP-P (durchgezogene Linie), gelöster Phosphor DP-P (gepunktet), bio verfügbarer Phosphor DRP-P (gestrichelt).
5. Graph: Chlorid Cl^- (durchgezogene Linie), Sulfat SO_4^{2-} (gepunktet), Nitrat $\text{NO}_3\text{-N}$ (gestrichelt).

Thomas et al. (1997) und Heckrath et al. (1995) schliessen auf P-Transport in Makroporen infolge der hohen, im Drainageabfluss gemessenen P-Konzentrationen. Die dortigen Böden haben jedoch ein sehr hohes P-Adsorptionspotenzial und auch in der Bodenlösung in grösseren Tiefen fanden sich nur sehr geringe P-Konzentrationen (Heathwaite & Dils 2000). Bis heute hat die überwiegende Mehrheit der Arbeiten, die auf Makroporenfluss als wichtigen P-Eintragspfad schliessen, keinen direkten Nachweis dieses Eintragspfads erbringen können (Heathwaite & Dils 2000). Die vorliegende Studie konnte anhand des hohen Ereigniswasseranteils am Abfluss die grosse Bedeutung präferenzzieller Fliesspfade bei Abflussbildung und Abflusskonzentration nachweisen (Abb. 4 u. 5). Dennoch wurden keine markanten Phosphoreinträge festgestellt, obwohl kurz zuvor Gülle mittels Schleppverteiler appliziert worden war (Abb. 6).

5 Fazit

Im Bergseegebiet stehen aufgrund der Gebietseigenschaften vor allem Stoffeinträge aus Dauergrünland im Vordergrund. Die Bodenerosion spielt wegen des sehr geringen Ackerlandanteils eine untergeordnete Rolle. Die Schwebstofffrachten sind folglich auch im Ereignisfall eher gering. Die Infiltrationskapazität der Böden übersteigt im Regelfall die Niederschlagsintensität (Ausnahme: Bodenfrost). Infiltrationsüberschuss spielt bzgl. der Abflussbildung keine Rolle.

Entsprechend ist die P-Abschwemmung als Eintragspfad in der Regel von geringer Bedeutung, wie das Düngeexperiment vom 02.06.2004 eindrücklich zeigt (Abb. 4). Die Sättigungsflächen sind aufgrund der Gebiets- und Bodeneigenschaften – hohe Infiltrationskapazität, hohe hydraulische Leitfähigkeit und hohes Porenvolumen der Böden – recht konstant, d. h. sie dehnen sich auch im Falle intensiver Niederschläge nur in geringem Umfang aus. Ihr Flächenanteil ist im Wesentlichen auf die organischen Böden der Uferzone begrenzt. Sättigungsflächenabfluss (SOF) ist folglich im Regelfall an der Abflussbildung kaum beteiligt. Selbst die intensiven Niederschläge am 02.06.2004 führten nicht zu erkenn- oder messbarem Oberflächenabfluss in der Uferzone.

Primärer Abflussbildungsprozess bei Hochwasser ist der schnelle laterale Abfluss im Boden (*subsurface stormflow*, SSF, Abb. 3, 4 u. 5). Beschleunigter Grundwasserabfluss (GWR) hat vor allem bei hohem Grundwasserstand vor dem Ereignis einen signifikanten Anteil am Hochwasserabfluss. Die Anteile von SSF und GWR hängen vor allem von den Faktoren Grundwasserstand, Bodenfeuchte, Niederschlagsintensität und Niederschlagsmenge ab. Die Abflusskonzentration – und somit auch der laterale Transport von Stoffen zum Gewässer hin – findet vorwiegend im Boden statt. Grundwasserbürtige Phosphoreinträge sind von untergeordneter Bedeutung. Präferenzielle Fliesswege im Boden sind potenzielle Haupteintragspfade für Phosphor aus diffusen Quellen (Auswaschung).

Der diffuse P-Transport wird durch die geringe P-Verfügbarkeit aufgrund der hohen Sorptionskapazität der nicht P-gesättigten Böden begrenzt. Auch die grosse Intensität der Makroporen-Matrix-Interaktion, die ausreichend lange Kontaktzeit und die allgemein eher tiefe P-Sättigung im Boden sind für die erfreulich hohe Nährstoffretention verantwortlich. Das Ausbringen von Gülle mittels Schleppverteiler wirkte sich Verlust mindernd aus (Abb. 2). Trotz ungewöhnlich ergiebiger, intensiver Niederschläge (84.8 mm/24 h, Abb. 1) unmittelbar nach der Gülleapplikation am 02.06.2004 konnten keine Direkteinträge festgestellt werden (Abb. 4 u. 6). Diese Art des Ausbringens begünstigt die Infiltration der Gülle, reduziert somit auch spätere Direkteinträge und führt nicht zu signifikanter Verschlammung der Bodenoberfläche.

Literatur

- Braun M., Kopse-Rolli D. & Prasuhn V. 1997. Verminderung des Nährstoffeintrags in die Gewässer durch Massnahmen in der Landwirtschaft. BUWAL (Hrsg.), *Schrift. Umwelt* 293: 1–100.
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) 2002. *Praxishilfe: Einsatz künstlicher Tracer in der Hydrogeologie*. Berichte des BWG, Serie Geologie 3: 1–75.
- Djodjic F., Börling K. & Bergström L. 2004. Phosphorus leaching in relation to soil type and soil phosphorus content. *J. Env. Qual.* 33: 678–684.
- Eckhardt K. 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Process.* 19: 507–515.
- Gächter R., Mares A., Stamm C., Kunze U. & Blum J. 1996. Dünger düngt Sempacher See. *Agrarforschung* 3: 329–332.
- Gächter R., Nagatiah J.M. & Stamm C. 1998. Transport of phosphate from soil to surface waters by preferential flow. *Env. Sci. & Tech.* 32: 1865–1869.

- Harden H., Chanton J., Rose J., John D. & Hooks M. 2003. Comparison of sulfur hexafluoride, fluorecein and rhodamine dyes and the bacteriophage PRD-1 in tracing subsurface flow. *J. Hydrol.* 277: 100–115.
- Haygarth P.M., Hepworth L. & Jarvis S.C. 1998. Forms of phosphorus in hydrological pathways from soil under grazed grassland. *Euro. J. Soil Sci.* 49: 65–72.
- Heathwaite A.L. & Dils R.M. 2000. Characterising phosphorus loss in surface and subsurface hydrological pathways. *Sci. tot. Env.* 251: 523–538.
- Heckrath G., Brookes P.C., Poulton P.R. & Goulding K.W. 1995. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *J. Env. Qual.* 24: 904–910.
- Käss W. 1992. *Geohydrologische Markierungstechnik. Lehrbuch der Hydrogeologie.* Band 9, Berlin, 1–519.
- Meissner R. 2005. Methoden und Geräte zur Quantifizierung von diffusen Stoffeinträgen in Gewässer. *Wasserwirtschaft* 11: 33–38.
- Murphy J. & Ridley J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphorus natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27: 31–36.
- Prasuhn V. & Braun M. 1994. *Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kanton Bern.* Schriftenreihe der Eid. Forschungsanstalt für Agrochemie und Umwelthygiene 17, Bern, 1–113.
- Prasuhn V., Braun M. & Kopse-Rolli D. 1997. *Massnahmen zur Verminderung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft in die Gewässer.* Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft, Bern, 1–216.
- Schneider P. 2007. *Hydrologische Vernetzung und ihre Bedeutung für diffuse Nährstoffeinträge im Hotzenwald/Südschwarzwald.* Physiogeographica 36, Basel, 1–174.
- Sharpley A.N., Robinson J.S. & Smith S.J. 1995. Bioavailable phosphorus dynamics in agricultural soils and effect on water quality. *Geoderma* 67: 1–15.
- Sklash M.G. & Farvolden R.N. 1979. The role of groundwater in storm runoff. *J. Hydrol.* 43: 45–65.
- Stamm C., Gächter R., Flühler H., Leuenberger J. & Wunderli H. 1995. P input into a brook through tile-drains under grassland. In: *Proc. Int. workshop on phosphorus loss from agriculture to water.* Wexford, Ireland, 470–481.
- Stamm C., Flühler H., Gächter R., Leuenberger J. & Wunderli H. 1998. Preferential transport of phosphorus in drained grassland soils. *J. Env. Qual.* 27: 515–522.
- Thomas D, Heckrath G. & Brookes P.C. 1997. Evidence of phosphorus movement from broadland soils by preferential flow. In: Tunney H., Carton O.T, Brookes P.C. & Johnston A.E. (eds.) *Phosphorus loss from soil to water.* CAB int., Wallingford, 369–370.
- Weiler M.H., McDonnell J.J., Tromp-van Meerveld I. & Uchida T. 2005. Subsurface stormflow. In: Anderson M. & McDonnell J.J. (eds.) *Encyclopedia of hydrological sciences.* Weinheim, 1831–1846.