

Identifikation hanghydrologischer Prozessräume – Experimentelle Studien zur Abflussbildung im Mittelgebirge (Sauerland)

¹Chiffard, P., ²Zepp, H. & ³Schumann, A.

¹Technische Universität Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

²Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Physische Geographie

³Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik

1. Einleitung und Problemstellung

Mit den Geographischen Informationssystemen (GIS) wurde die Entwicklung flächendeckender hydrologischer Modelle möglich. Deren Grundlage bildet die Ausweisung von Raumeinheiten, die hinsichtlich ihrer hydrologischen Eigenschaften oder ihrer Abflussbildung homogen sind. Eingehende Arbeiten mit einer an dominierenden Abflussbildungsprozessen angepassten Modellierung wurden unter anderem von UHLENBROOK (1999) im Brugga-Einzugsgebiet (Südschwarzwald), von ZILLGENS et al. (2005) im Löhnersbach-Einzugsgebiet oder von REZZOUG et al. (2005) im Einzugsgebiet der „Oberen Brachtpe“ durchgeführt. Das wissensbasierte System WBS (FLAB) (PESCHKE et al. 1999) kann ebenfalls aufgrund von umfangreichen Prozess-Studien die jeweils dominanten Abflussbildungsprozesse in verschiedenen Naturräumen in Abhängigkeit von den physiographischen Gebietseigenschaften und den Anfangsbedingungen (Gebietsvorfeuchte) ausweisen.

Eine wichtige Flächeneinheit in einem Einzugsgebiet stellen die Hänge dar, die die räumliche Grundlage zahlreicher hydrologischer Prozess- und Modellstudien bilden (TROCH et al. 2003). Gerade „...die Fließvorgänge in und auf Hängen sind von besonderem Interesse, da man sich alle reliefierten Einzugsgebiete als ein aus Einzelhängen zusammengesetztes Mosaik vorstellen kann, wobei die Vernetzung durch die lateralen Austauschprozesse zwischen den Hängen und durch das Vorfluternetz hergestellt wird“ (BRONSTERT 1997:66). Eine Diskretisierung eines Einzugsgebietes in einzelne Hangeinzugsgebiete als grundlegende hydrologische Einheiten erscheint daher sehr sinnvoll, um die Prozesse der Abflussbildung zu beschreiben (MAURER 1997, ICHIKAWA & SHIBA 2002).

Die Hänge können dabei aufgrund ihrer Wölbungstendenz als konvergent, divergent oder uniform beschrieben werden (FAN & BRAS 1998, WOODS et al. 1995). Während in der

Geomorphologie mit diesen drei Begriffen ausschließlich die Horizontalwölbung bezeichnet wird (DIKAU 1988), werden in der Hydrologie die genannten Hangformen im Wesentlichen über das Breitenverhältnis zwischen Ober- und Unterhang differenziert. Konvergente Hänge weisen am Oberhang eine größere Breite auf als am Unterhang, bei divergenten Hängen ist das Verhältnis umgekehrt. Erst anschließend erfolgt eine Untergliederung der jeweiligen Hangformen hinsichtlich ihrer vertikalen und horizontalen Wölbungstendenz (konkav, konvex und gestreckt) (FAN & BRAS 1998).

Innerhalb eines Hangeinzugsgebietes gilt es aber auch zwischen dem hanghydrologischen System und den vorfluternahen Sättigungsflächen zu differenzieren, denn insbesondere die Ausbildung eines flachen Talgrundes und die dort auftretenden Sättigungsflächen sind als transformierendes Zwischenglied zwischen Hang und Vorfluter von Bedeutung für die Abflussbildung (SEIBERT et al. 2003). Bisher liegen aber nur wenige detaillierte Prozess-Studien vor, die die Interaktionen zwischen diesen hydrologischen Umsatzräumen analysieren (z.B. MCGLYNN & SEIBERT 2003, MCGLYNN & McDONNELL 2003, WENNINGER et al. 2004).

Um diesen Defiziten in der Prozessforschung zur Hangwasserdynamik gerecht zu werden, führt das Institut für Angewandte Physische Geographie der Ruhr-Universität Bochum in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik seit Juli 1999 experimentelle Untersuchungen an Hängen mit unterschiedlicher Form in den Einzugsgebieten „Obere Brachtpe“ (2,5 km²) und „Bohläse“ (0,7 km²) (Sauerland) durch (REZZOUG et al. 2005, CHIFFLARD 2006). Ziel ist es, die Abflussbildung an Hängen mit unterschiedlicher Hangform qualitativ und quantitativ zu erfassen. Hangeinzugsgebiete sollen als hydrologische Prozessräume identifiziert werden und als Grundlage für eine prozessorientierte Raumgliederung dienen.

2. Hydrologisch-landschaftsökologische Untersuchungsgebiete im Sauerland

Für die experimentellen Studien zur Abflussbildung stehen die zwei hydrologisch-landschaftsökologischen Untersuchungsgebiete „Obere Brachtpe“ (2,5 km²) und „Bohläse“ (0,7 km²) zur Verfügung (Abb. 1). Beide Gebiete befinden sich im südlichen Sauerland in der Nähe der Biggetalsperre. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 9,1° C, der Jahresniederschlag liegt im Mittel bei 1227,8 mm (DEUTSCHER WETTERDIENST 2004). Den geologischen Untergrund bilden überwiegend Ton- und Siltschiefer des Unter- und Mitteldevons, im Gebiet „Obere Brachtpe“ treten feinkörnige Sandsteineinlagerungen hinzu (GRABERT & HILDEN 1972). Als Bodentypen treten in der „Bohläse“ neben dem Ranker vor allem gering- bis mittelmächtige Braunerden auf, die sich aus periglazialen Deckschichten gebildet haben. Im Gebiet „Obere Brachtpe“ kommen hierzu noch Staunässeböden auf Flächen mit dichten quartären Fließerden, in kleinen flachen Hangmulden An-

moorgley und Niedermoore, in den Talgrundbereichen Gley und Nassgley und an den Unterhängen aufgrund historischen Ackerbaus Kolluvisole. Hinsichtlich des Reliefs und der Landnutzung steht dem stark reliefierten, ausschließlich als Forst genutzten Gebiet „Bohlöse“ das Gebiet „Obere Brachtpe“ mit durchschnittlich geringeren Hangneigungen und überwiegend Grünlandnutzung gegenüber.

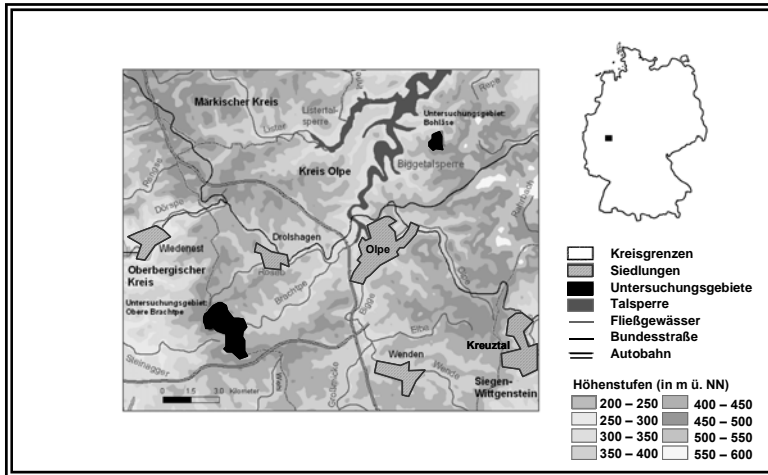


Abb. 1: Lage der Untersuchungsgebiete „Obere Brachtpe“ und „Bohlöse“ (CHIFFLARD 2006).

Die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse zur Identifikation hanghydrologischer Prozessräume fanden an dem gut instrumentierten Messhang „Husten“ statt (Abb. 2). Dabei handelt es sich um einen etwa 300 m langen konvergenten Hang mit überwiegend konkaver Horizontal- und Vertikalwölbung, dem ein ca. 60 m breiter, flacher Talgrund vorgelegt ist. Die Hangbreite nimmt vom Oberhang bis zum Hangfuß ab und weitet sich im Talgrund wieder etwas aus. Der Messhang umfasst eine Fläche von 66700 m² und die Hangneigungen variieren zwischen 0° und 15°.

3. Methodik

Für die Analyse der Abflussbildung in der Hangskala stehen am Messhang „Husten“ vier bodenhydrologische Mess-Stationen, 14 Piezometer und eine Klimastation zur Verfügung. Die bodenhydrologischen Mess-Stationen sind nach dem Catena-Prinzip angeordnet (Station Oberhang, Station Mittelhang (=Rinne), Station Hangfuß und Station Aue nahe des Vorfluters) und mit Druckaufnehmertensiometern je nach Bodenaufbau in 4 bis 6 Messtiefen (20 bis 200 cm) ausgestattet (Abb. 3). Über Loggerbetrieb wird die Saugspannung im 10 min-Intervall automatisch aufgezeichnet. Die Piezometer sind zum einen in zwei Transekten und zum anderen nach dem Catena-Prinzip in der Tiefenlinie des Messhanges „Husten“ angeordnet (Abb. 3). Während sich Transekt I in Verlängerung des Messhanges „Husten“ (konkave Hangrinne) befindet, ist Transekt II, ca. 100 m versetzt,

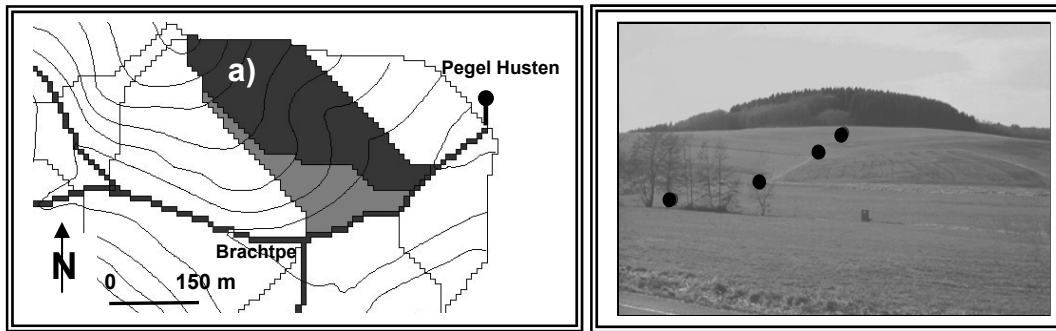


Abb. 2: Messhang „Husten“ a) mit Hangeinzugsgebietsgrenze. Das Foto zeigt den Messhang aus südöstlicher Richtung und die Lage der bodenhydrologischen Mess-Stationen.

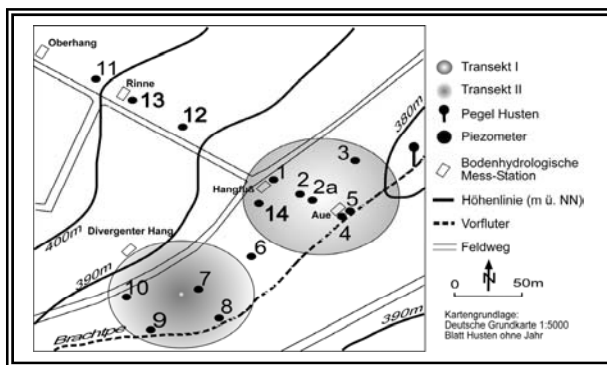


Abb. 3: Messnetz am Messhang „Husten“ .

im Vorfeld eines divergenten Hanges angelegt. Die Datenaufzeichnung erfolgt an acht Piezometern mit Drucksonden im 10 min-Intervall (Nr. 1, 2, 5, 7, 9, 10, 11 und 12), an den restlichen mit einem Kabellichtlot im wöchentlichen Rhythmus. An der Klimastation Rinne, neben der bodenhydrologischen Mess-Station Mittelhang, wird seit 1999 der Freilandniederschlag mit einer Kippwaage im 10 min-Intervall gemessen. Als weitere Klimaparameter werden im gleichen Intervall die relative Luftfeuchte, die Lufttemperatur, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung aufgezeichnet. Der Vorfluterabfluss aus dem 2,5 km² großen Einzugsgebiet wird am Pegel Husten im 15 min-Intervall mit einer pneumatischen Pegelstation erfasst.

4. Identifikation der Abflussbildung im hydrologischen Prozessraum „Konvergenter Hang mit breitem Talgrund“

Aufgrund von bivariat-statistischen Auswertungen kann das konvergente Hangeinzugsgebiet Messhang „Husten“ in die beiden Bereiche unterschiedlicher Abflusswirksamkeit „hanghydrologisches“ und „vorfluternahes System“ differenziert werden (CHIFFLARD 2006). Aus der Verknüpfung von Ganglinien zum Vorfluterabfluss, Saugspannung und Grundwasser während verschiedener Niederschlags-Abfluss-Ereignisse zeigen sich drei

typische hydrologische Reaktionsmuster, die eine unterschiedliche Abflussbereitschaft am Messhang „Husten“ begründen und die Interaktionsmechanismen zwischen den beiden Systemen qualitativ aufzeigen.

4.1 Reaktionsmuster 1

Bei Niederschlagsereignissen mit geringer Bodenvorfeuchte – die Saugspannung im Oberboden ist vor dem Ereignis an allen Mess-Stationen >60 hPa (Δ Feldkapazität)(Abb. 4) – und niedrigem Grundwasserstand (Abb. 5) trägt nur ein schmaler vorfluternaher Bereich zum Vorfluterabfluss bei, die Abflussbildungsprozesse Hortonscher Oberflächenabfluss und „groundwater ridging“ dominieren. Die entsprechenden Abflussereignisse zeichnen sich meist durch eine kurze Dauer mit raschem Abflussrückgang aus (Abb. 6).

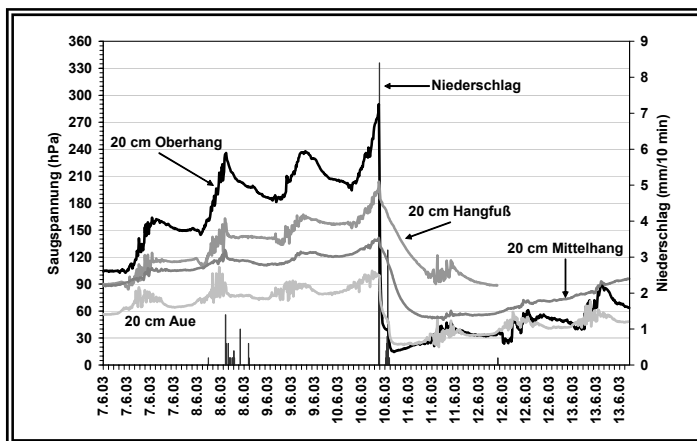


Abb. 4: Saugspannungen im Oberboden (20 cm Tiefe) an den bodenhydrologischen Mess-Stationen Oberhang, Mittelhang, Hangfuß und Aue im Zeitraum 07.07.2003 bis 13.07.2003.

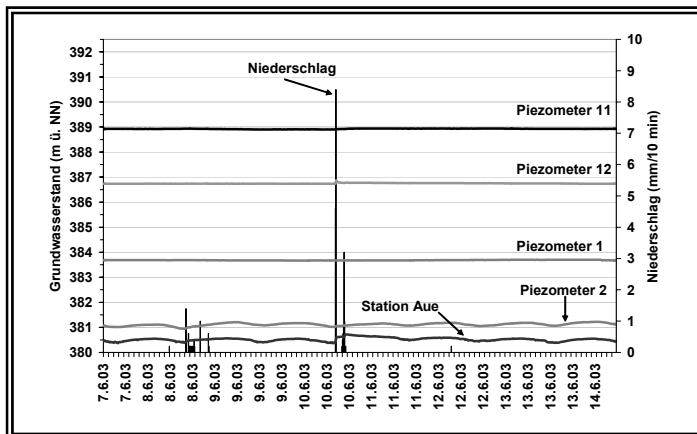


Abb. 5: Grundwasserstände an den Piezometern 1, 2, 11, 12 und Station Aue im Zeitraum 07.07.2003 bis 13.07.2003 (wenn von den Piezometern 4 und 5 keine Messdaten vorliegen, wird der Grundwasserstand aus den Saugspannungen der bodenhydrologischen Mess-Station Aue berechnet).

Abbildung 7 zeigt eine schematische Darstellung zur Abflussbildung am Messhang „Husten“ bei geringer Bodenvorfeuchte und niedrigen Grundwasserständen. Im hanghydrologischen System überwiegen zu diesem Zeitpunkt vor allem vertikale Fließprozesse (Tiefenversickerung), wobei keine bedeutende Grundwasserneubildung stattfindet, wie die weitgehend konstanten Grundwasserstände an den Piezometern 11 und 12 zeigen (Abb. 5). Diese fehlenden Grundwasseranstiege deuten auch auf eine ausbleibende unterirdische laterale Wasserzufuhr von den Hangflanken zur Tiefenlinie hin.

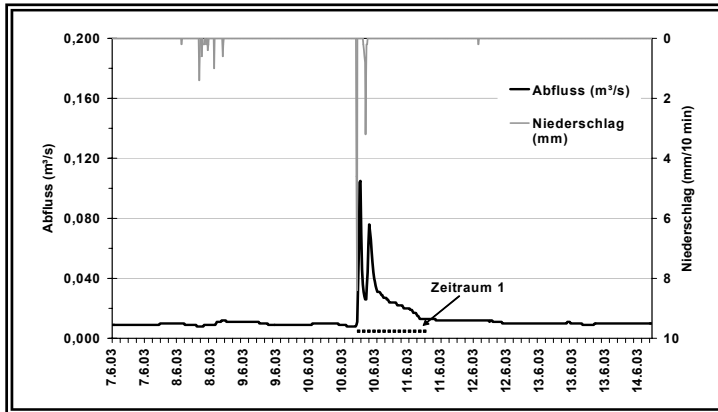


Abb. 6: Abfluss am Pegel Husten und Niederschlag (Klimastation Rinne) im Zeitraum 07.07.2003 bis 13.07.2003.

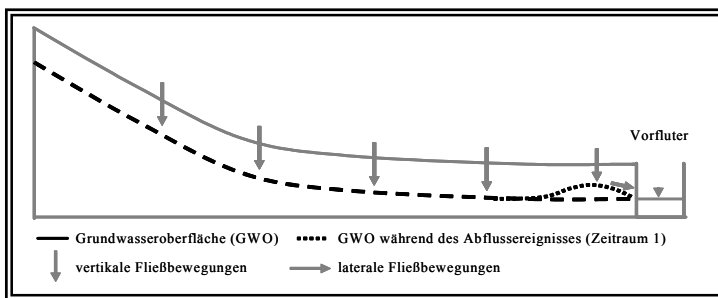


Abb. 7: Schematische Darstellung der Abflussbildung am konvergenten Messhang „Husten“ für das Reaktionsmuster 1.

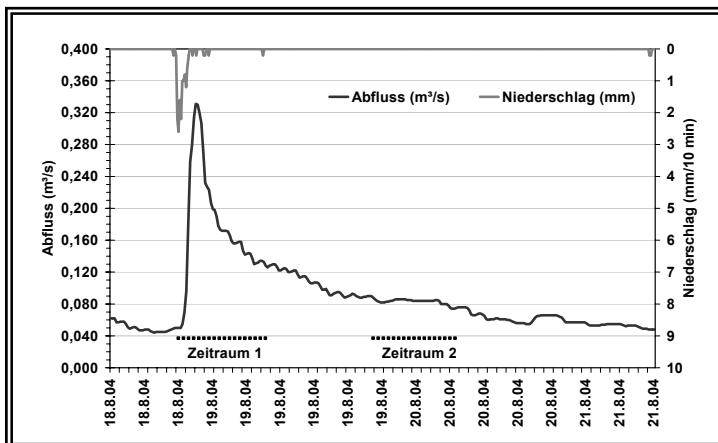


Abb. 8: Abfluss am Pegel Husten und Niederschlag (Klimastation Rinne) im Zeitraum 18.08.2004 bis 21.08.2004.

4.2 Reaktionsmuster 2

Bei einer etwas erhöhten Gebietsvorfeuchte treten zum Teil zeitlich verzögerte Abflusserhöhungen auf, die nicht durch ein entsprechendes Niederschlagsereignis hervorgerufen werden (Abb. 8 und 10; dort jeweils Zeitraum 2). Zu Beginn eines Niederschlages tragen ähnlich dem Reaktionsmuster 1 Hortonscher Oberflächenabfluss und „groundwater ridging“ zum Abfluss bei (entspricht dem Zeitraum 1 in den Abb. 8 und 12).

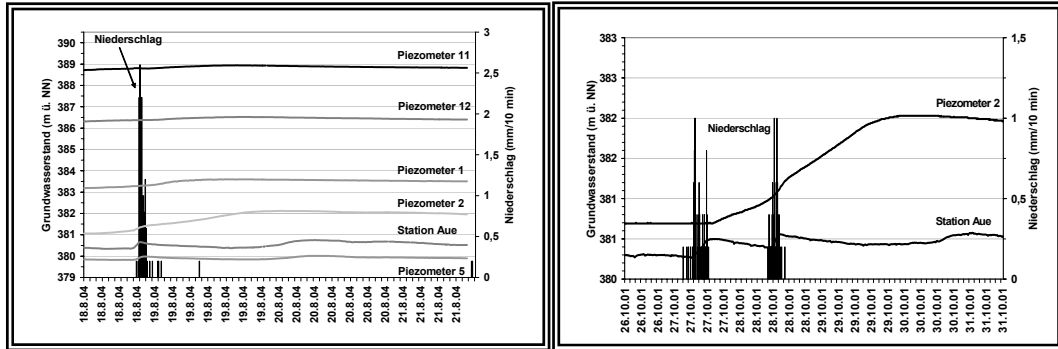


Abb. 9: Grundwasserstände an den Piezometern 1, 2, 5, 11, 12 und Station Aue im Zeitraum 18.08.2004 bis 21.08.2004.

Abb. 11: Grundwasserstände an den Piezometern 2 und Station Aue im Zeitraum 26.10.2001 bis 31.10.2001.

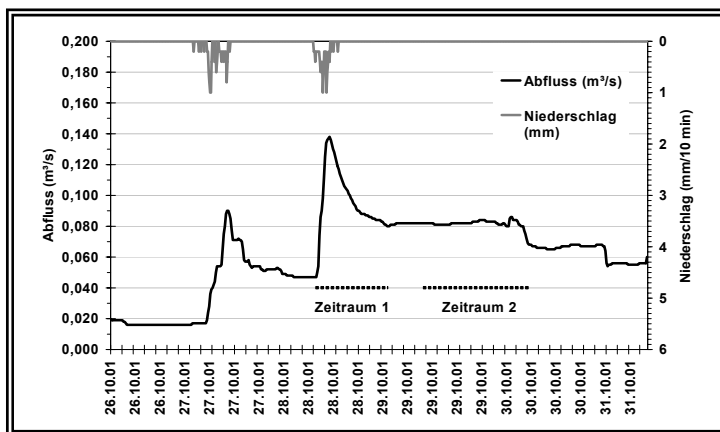


Abb. 10: Abfluss am Pegel Husten und Niederschlag (Klimastation Rinne) im Zeitraum 26.10.2001 bis 31.10.2001.

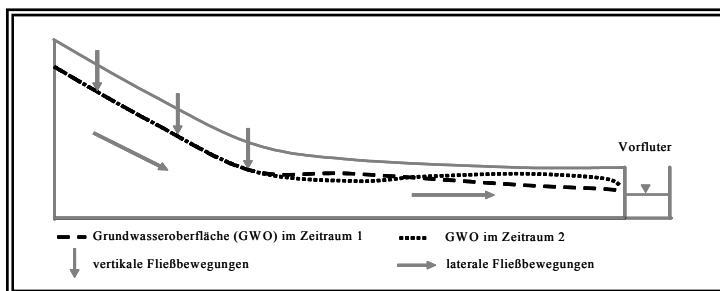


Abb. 12: Schematische Darstellung der Abflussbildung am konvergenten Messhang „Husten“ für das Reaktionsmuster 2.

Durch vertikale Fließprozesse (Tiefenversickerung) wird der Grundwasserstand im hanghydrologischen System deutlich erhöht (z.B. Piezometer 11 und 12 in Abb. 9). Die Potenzialgradienten in der gesättigten Zone verändern sich und verstärken einen lateralen Hanggrundwasserzufluss in den Talgrund. Ein Grundwasserfluss aus dem hanghydrologischen System in das vorfluternahe System setzt ein und das Hanggrundwasser trägt zum Abfluss bei. Bedingt durch die Ausbildung eines etwa 60 m breiten, flachen Talgrundes kommt es aber nicht zu einer unmittelbaren, sondern zu einer verzögerten Abflusserhöhung. Infolge des abnehmenden Fließgradienten am Hangfuß vollzieht sich ein Aufstau des Hanggrundwassers – belegt durch einen überproportionalen Anstieges des Grundwassers am Piezometer 2 (Abb. 9 und 11), wodurch der Potenzialgradient vom mittleren Talgrund in Richtung Vorfluter erhöht wird. Ist ein maximaler Gradient (hier: 5,8%) erreicht, tritt eine verzögerte Abflusserhöhung ein (entspricht dem Zeitraum 2 in den Abb. 8, 10 und 12).

4.3 Reaktionsmuster 3

Ist der vorfluternahe Bereich vollständig gesättigt, die Saugspannungen aller Messtiefen liegen an der Station Aue unter der Sättigungsgrenze von 0 hPa, kommt es zu Sättigungsabfluss mit „return flow“. Die Folge solcher hydrologischen Reaktionsmuster sind Abflussereignisse mit hohem Abflussvolumen und Abflussquotienten (99,2%) (Abb. 13). Durch den hohen Grundwasserstand ist das Hanggrundwasser zum einen hydraulisch gut an das Talgrundwasser angeschlossen, zum anderen tritt das lateral zufließende Hanggrundwasser aufgrund der vorfluternahen Sättigung etwa bei Piezometer 2 an die Geländeoberfläche aus und kann somit schneller dem Vorfluter zugeführt werden (schematisch in Abb. 15; Zeitraum 1). Während die Grundwasserstände im hanghydrologischen System (Piezometer 11 und 12) nach dem Ende des Niederschlagsereignisses bereits langsam absinken, steht das Grundwasser im vorfluternahen Bereich (Piezometer Station Aue) als Folge des „return flow“ noch etwa 2 Tage lang bis an die Geländeoberfläche an (Abb. 14).

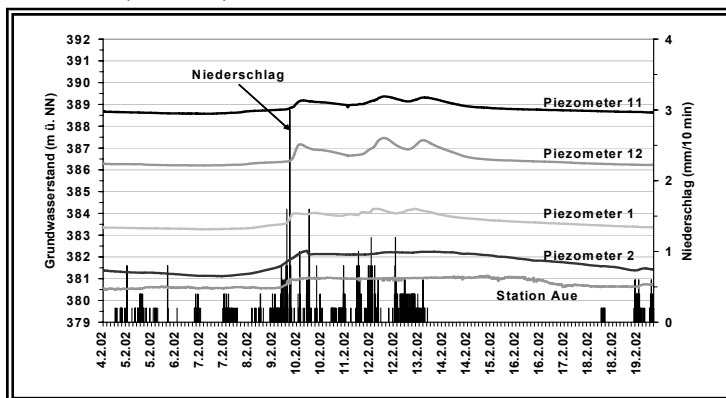


Abb. 14: Grundwasserstände an den Piezometern 1, 2, 11, 12 und Station Aue im Zeitraum 04.02.2002 bis 18.02.2002.

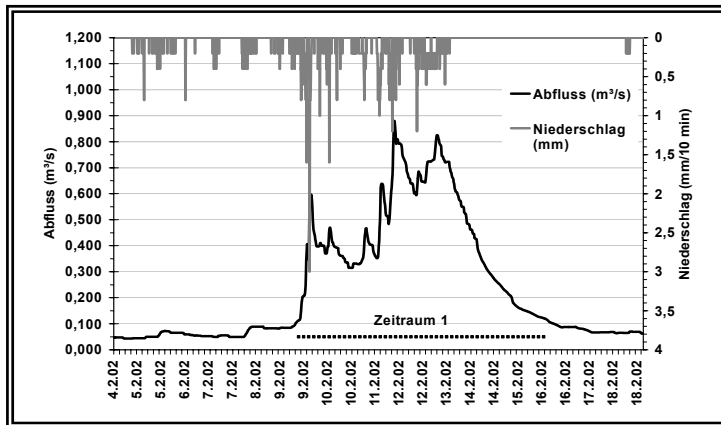


Abb. 13: Abfluss am Pegel Husten und Niederschlag (Klimastation Rinne) im Zeitraum 04.02.2002 bis 18.02.2002.

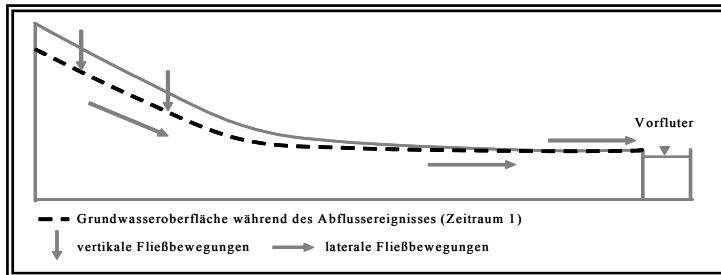


Abb. 15: Schematische Darstellung der Abflussbildung am konvergenten Messhang „Husten“ für das Reaktionsmuster 3.

5. Schlussfolgerungen

Die Analyse verschiedener Niederschlags-Abfluss-Ereignisse zeigt deutlich den Einfluss des Reliefs und der Vorfeuchte auf die Abflussbildung. Während die konvergente Hangform eine Konzentration des im hanghydrologischen System auftretenden Zwischenabflusses in der Tiefenlinie bewirkt, verursacht die Ausbildung eines breiteren, flachen Talgrundes eine Verzögerung des Hangabflusses in den Vorfluter. Der Beitrag des Hangabflusses ist wiederum abhängig von der noch verbleibenden Speicherkapazität im vorfluternahen System. Erst wenn bestimmte Grundwasserstände verbunden mit einer Änderung der Potenzialgradienten erreicht werden, spiegelt sich der Hangabfluss im Vorfluter eindeutig wider. Ist der vorfluternahe Bereich vollständig gesättigt, kommt es zu Sättigungsflächenabfluss mit „return flow“ und eine verzögerte Abflusserhöhung ist nicht feststellbar. Die Ergebnisse der detaillierten Analyse der Abflussbildung am konvergenten Messhang Husten machen zudem deutlich, dass die Betrachtung eines Hanges als eine Raumeinheit mit homogener Neigung, wie es bei verschiedenen Modellierungen verfolgt wird (z.B. TROCH et al. 2003), nicht sehr sinnvoll erscheint. Vielmehr bedarf es einer Untergliederung des Hanges in Bereiche unterschiedlicher hydrologischer Reaktion, wie es auch von SEIBERT et al. (2003) gefordert wird. Einer derartigen Gliederung eines Hanges in ein hanghydrologisches und vorfluternahes System sollte bei zukünftigen hydrologischen Modellierungen wesentlich mehr Beachtung geschenkt werden.

Literatur

- BRONSTERT, A. (1997): Physikalisch begründete und prozessorientierte Modellierung von Hängen und kleinen Einzugsgebieten: Möglichkeiten und Grenzen. – In: SCHMITZ, G.H. (Hrsg.): Modellierung in der Hydrologie, Symposium aus Anlass des 30-jährigen Bestehens der Dresdner Schule der Hydrologie vom 22. bis 24. September 1997 in Dresden, S.66-77
- CHIFFLARD, P. (2006): Der Einfluss der Reliefs, der Hangsedimente und der Bodenvorfeuchte auf die Abflussbildung im Mittelgebirge. Experimentelle Prozess-Studien im Sauerland. – Bochumer Geographische Arbeiten 76, 162 S.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2004): Langjährige Klimadaten der Stationen Reichshof-Eckenhagen, Bergneustadt-Hüngrighausen und Attendorn-Listertalsperre. – Offenbach
- DIKAU, R. (1988): Entwurf einer geomorphographisch-analytischen Systematik von Reliefeinheiten. – Heidelberger Geographische Bausteine 5:1-45
- FAN, Y. & BRAS, R.L. (1998): Analytical solutions to hillslope subsurface storm flow and saturation overland flow. – Water Resources Research 34(4):921-927
- GRABERT, H. & HILDEN, H.D. (1972): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:25000, Blatt 5012 Eckenhagen mit Erläuterungen. – 143 S.
- ICHIKAWA, Y. & SHIBA, M. (2002): Lumping of kinematic wave equation considering field capacity. – Third International Conference on Water Resources and Environment Research ICWRER 2002, Dresden, Vol. 1:61-65
- MAURER, T. (1997): Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransportes in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. – Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft Universität Karlsruhe 61, 238 S.
- MCGLYNN, B.L. & SEIBERT, J. (2003): Distributed assessment of contributing area and riparian buffering along stream networks. – Water Resources Research 39, 4, 1082, doi:10.1029/2002WR001521
- MCGLYNN, B.L. & MCDONNELL, J.J. (2003): Quantifying the relative contributions of riparian and hillslope zones to catchment runoff. – Water Resources Research 39(11):SWC 2-1 bis 2-20
- MCGLYNN, B. L., MCDONNELL, J.J., SEIBERT, J. & KENDALL, C. (2004): Scale effects on headwater catchment runoff timing, flow sources, and groundwater-streamflow relations. – Water Resources Research 40, doi:10.1029/2003WR002494
- PESCHKE, G., ETZENBERG, C., TÖPFER, J. & ZIMMERMANN, S. (1999): Das wissenschaftliche System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung. – IHI-Schriften 10
- REZZOUG, A., SCHUMANN, A., CHIFFLARD, P. & ZEPP, H. (2005): Field Measurement of soil moisture dynamics and numerical simulation using kinematic wave approximation. – Advances in Water Resources 28:917-926
- SEIBERT, J., BISHOP, K., RODHE, A. & MCDONNELL, J.J. (2003): Groundwater dynamics along a hillslope: A test of the steady state hypothesis. – Water Resources Research 39(1), 1014, doi:10.1029/2002WR001404
- TROCH, P., PANICONI, C. & VAN LOON, E.E. (2003): Hillslope-storage Business model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response. – Water Resources Research 39(11):SBH 3-1 bis 3-12
- UHLENBROOK, S. (1999): Untersuchung und Modellierung der Abflussbildung in einem mesoskaligen Einzugsgebiet. – Freiburger Schriften zur Hydrologie 10, 201 S.
- WENNINGER, J., UHLENBROOK, S., TILCH, N. & LEIBUNDGUT, C. (2004): Experimental evidence of fast groundwater responses in a hillslope/floodplain area in the Black Forest Mountains, Germany. – Hydrological Processes 18(17):3305-3322
- WOODS, R.A., SIVAPALAN, M. & DUNCAN, M. (1995): Investigating the representative elementary area concept: An approach on field data. – In: Kalma, J.B. & Sivapalan, M. (eds.): Scale issues in hydrological modelling:49-70
- ZILLGENS, B., MERZ, B. & KIRNBAUER, R. (2005): Tracing runoff generation processes through different spatial scales - data analyses and modelling approach. – International conference on Headwater Control VI, Bergen; 20.06.2005-23.06.2005; In: "Headwater 2005", Paper-Nr. 135