

Zur Problematik der Prozessabbildung in kleinen Einzugsgebieten: Prozessstudien und Modellvergleich

Jun.-Prof. Dr.-Ing. Markus Casper, Universität Trier, Physische Geographie, Campus II, 54286 Trier

1 Einleitung und Problemstellung

Die Simulation von Niederschlags-Abfluss-Prozessen in kleinen Einzugsgebieten stellt große Anforderungen an den Modellierer (Bergström, 1991). Ohne Prozesskenntnis können meist (vor allem mangels längerer Messreihen) keine sinnvolle Modellauswahl und Kalibrierung vorgenommen werden. Zudem lässt sich nur in kleinen Einzugsgebieten die Übereinstimmung von Realsystem und Modellsystem genauer studieren.

Im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs "Ökologische Wasserwirtschaft" an der Universität Karlsruhe wurden die Abflussbildungsprozesse im 7 km² großen bewaldeten Einzugsgebiet des Dürreychbaches (600-950 m NN, vgl. Abb. 1 & 2) untersucht. Die Ergebnisse dieses Projektes bildeten eine solide Grundlage für umfangreiche Modellvergleiche (Casper, 2002; Casper & Zehe, 2001), deren Ergebnisse auszugsweise in diesem Beitrag enthalten sind.

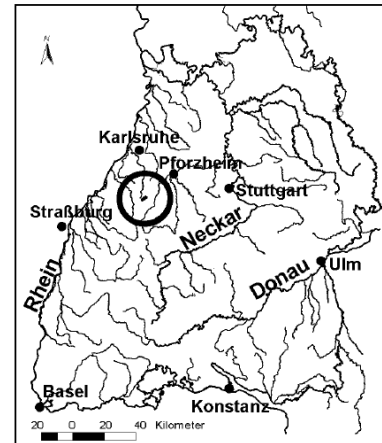


Abb.1: Lage des Untersuchungsgebietes

2 Das Untersuchungsgebiet

Das enge Kerbtal des Dürreychbaches hat sich mit 15-25° steilen Hängen in die flachen Hochlagen des mittleren Buntsandsteins nahezu bis auf den Grundgebirgssockel eingeschnitten. Die Hänge sind von mächtigen periglazialen Schuttdecken bedeckt, aus denen sich v.a. skelettreiche Podsole mit unterschiedlich ausgeprägten Ortsteinhorizonten entwickelt haben. Die Hochlagen neigen bei einem mitt-

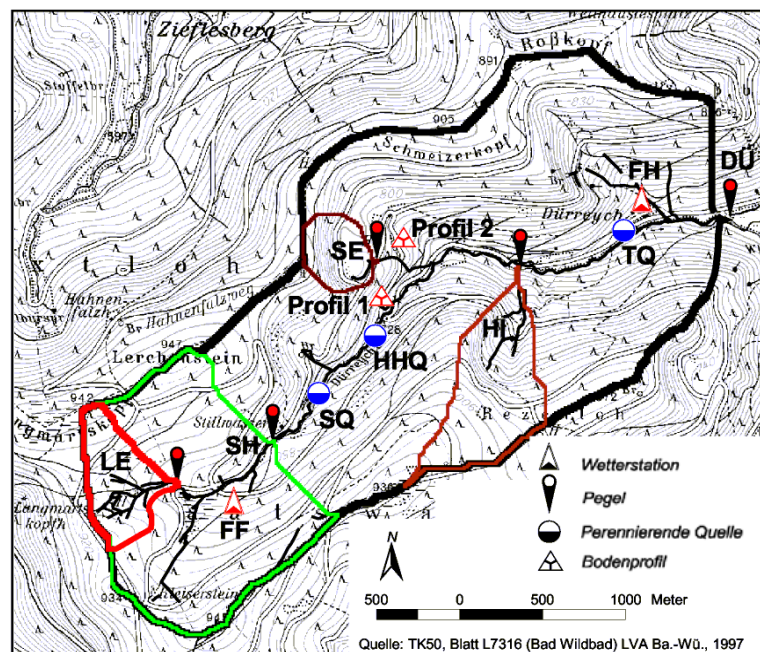


Abb. 2: Teileinzugsgebiete und Lage der Messstellen

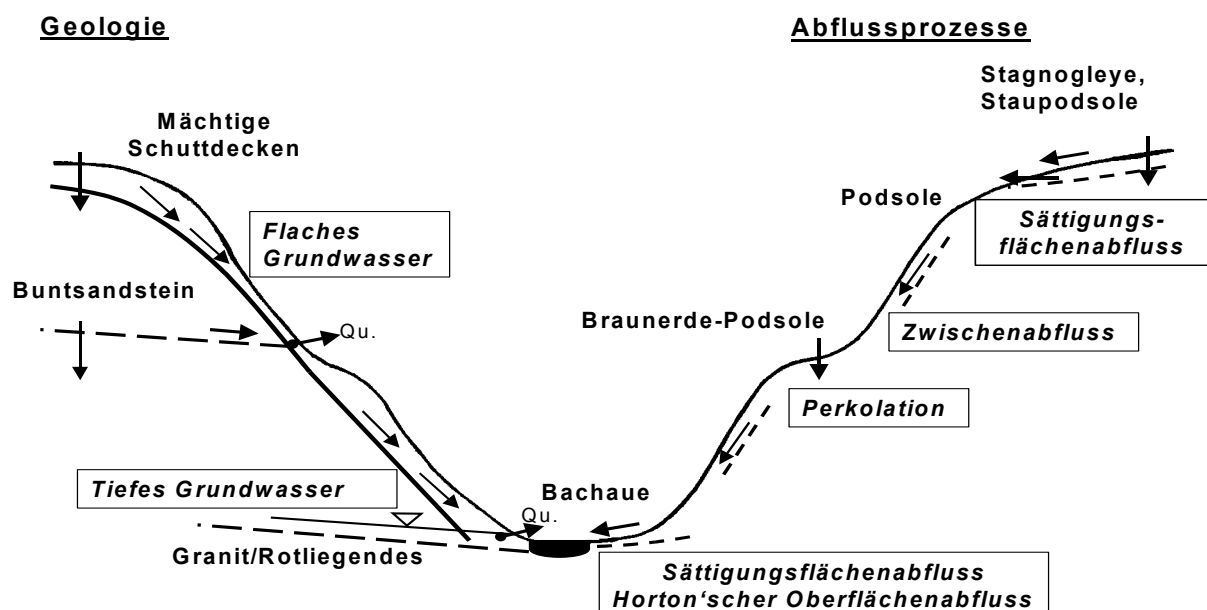
leren Jahresniederschlag von 1530 mm zur Staunässebildung und Vermoorung (Stagnogleye) und sind teilweise von Drainagegräben entwässert. Das Gewässernetz, sowie die Abgrenzungen des Gesamteinzugsgebiets (DÜ) und der Teileinzugsgebiete (LE, SH, SE, HI) mit den wichtigsten Messenrichtungen gehen aus Abb. 2 hervor.

Um die Abflussprozesse auf verschiedenen Raumskalen zu erfassen, wurde das Gebiet mit Pegelmesseinrichtungen an jedem Teileinzugsgebiet ausgestattet: Der Pegel am Gebietsauslass (DÜ) erfasst ein Einzugsgebiet von 7 km². Die für den Abfluss besonders bedeutsamen Hochlagen werden durch Pegel an 2 geschachtelten Kleineinzugsgebieten (LE: 0,27 km² und SH: 1,56 km²) erschlossen, die Seitentäler durch zwei weitere Pegel (SE und HI).

Zur Untersuchung von Abflussbildungsprozessen auf der Standortskala wurden die Profile 1 und 2 mit kontinuierlich aufzeichnenden TDR-Sonden zur Messung des Bodenwassergehalts, Tensiometern zur Messung der Saugspannung sowie Saugkerzen zur Gewinnung von Bodenwasser ausgerüstet. An den Klimastationen FF und FH wurde ebenfalls der Bodenwassergehalt in zwei Tiefen aufgezeichnet. Von den Wasserinhaltsstoffen wurde u.a. gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) regelmäßig und ereignisbezogen untersucht.

3 Abflussprozesse

Hydrometrische und hydrochemische Untersuchungen zeigten, dass die meisten beobachteten Ereignisse durch Oberflächenabfluss von den Sättigungsflächen der Hochlagen dominiert werden. Jedoch spielt auch im Bereich der Sättigungsflächen Interflow eine wichtige Rolle (vgl. auch Bonell, 1998). Mit zunehmender Gebietsfeuchte und Ereignisdauer – insbesondere bei Extremereignissen – werden auch die steilen Hänge selbst abflusswirksam. Für Ereignisse mit einer Jährlichkeit > 1 müssen auch signifikante Grundwasserbeiträge angenommen werden (u.a. durch Druckübertragung). Abbildung 3 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen Relief, Geologie und Abflussbildungsprozessen im Untersuchungsgebiet.



3.1 Hochflächen: Wechselwirkung von Sättigungsflächenabfluss- und Interflow

In den teilweise vermoorten Hochlagen dominiert Sättigungsflächenabfluss. Gestützt durch umfangreiche DOC-Tracermessungen, direkte Geländebeobachtungen und TDR-Messungen lässt der in Abbildung 4 dargestellte Fließprozess annehmen. Durch das dichte Drainagenetz können größere Bereiche schnell abflusswirksam werden. Insbesondere in Drainagenähe kann es dabei zu einer schnellen Druckreaktion des Bodenwasserspeichers kommen (Volkmann, 2003).

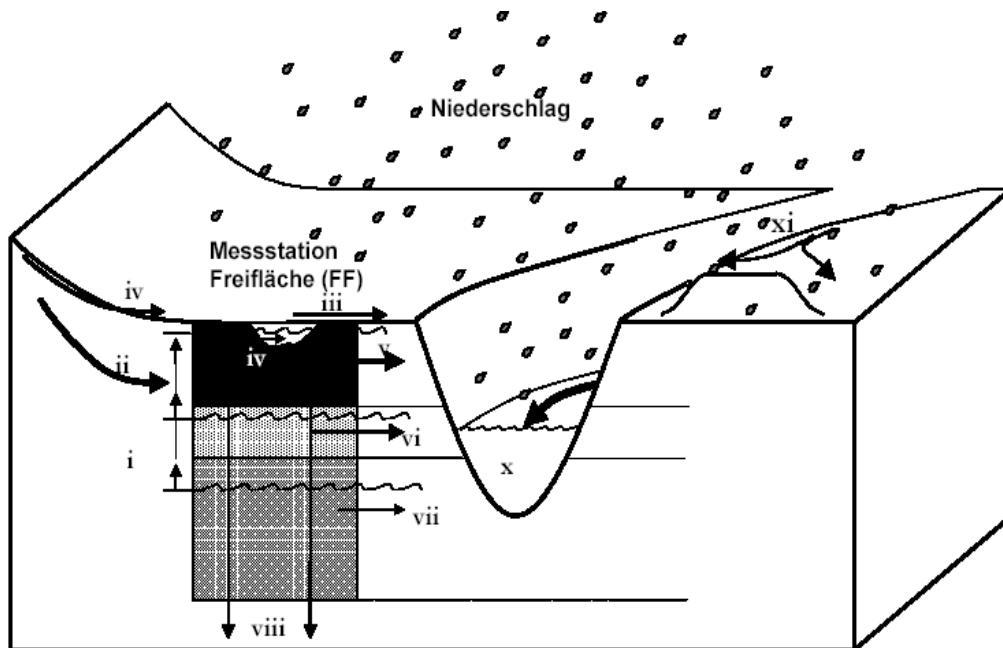


Abb. 4: Schematische Darstellung der dominierenden Abflussprozesse im Teil-EZG SH, LE (aus: Volkmann, 2003): (i) Anstieg des Wasserstandes bei Sättigung, (ii) lateraler Zufluss im Boden, (Interflow), (iii) Oberflächenabfluss durch Sättigungsüberschuss, (iv) return flow, (v) lateraler Abfluss aus dem O-Horizont, (vi) lateraler Abfluss aus dem Ah-Horizont, (vii) lateraler Abfluss aus dem B-Horizont, (viii) Grundwasserneubildung, (ix) Abfluss von Wegen, (x) Gewässerabfluss

3.2 Steile Hänge: Interflow und Druckübertragung

Interflow ist bei zunehmender Gebietsfeuchte und Ereignisdauer an den Steilhängen des Einzugsgebiets bereits makroskopisch durch Hangwasseraustritte an Weganschnitten zu beobachten. Der prinzipielle zweischichtige Bodenaufbau aus einem lockeren Bleichhorizont (Ae) über Ortstein (Bms) ist – bei stark variierender Stauwirkung des B-Horizonts – charakteristisch für das Dürreychgebiet und bildet die Grundlage für die Modellvorstellung von der Interflowbildung an den steileren Hängen (vgl. Abb. 5, aus: Waldenmeyer, 2003).

Insgesamt konnte diese nur aufgrund

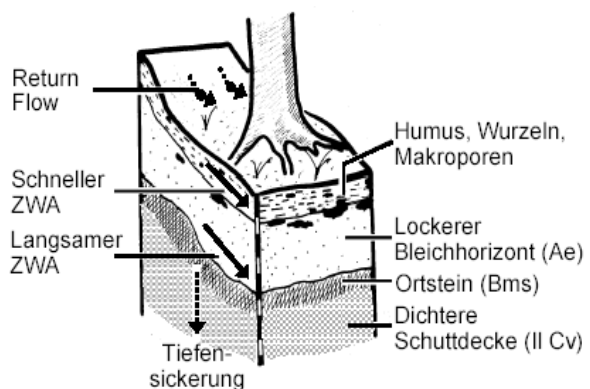


Abb. 5: Modellvorstellung für Zwischenabfluss (ZWA) auf den Hängen

struktureller Überlegungen gewonnene Modellvorstellung anhand verschiedener Messungen bestätigt werden:

- Der Stauwasserleiter oberhalb des Ortsteins ist der Haupt-Interflowhorizont (Langsamer ZWA).
- Der Stauwasserleiter wird bereits durch geringe Wassergehaltsänderungen abflussbereit. Schnelle Interflowreaktionen (subsurface storm flow) im gut durchlässigen Bleichhorizont werden durch eine Druckantwort des Hangwasserkörpers ermöglicht.
- Das Aufweichungsverhalten lässt auf schnellere Sickerungsprozesse schließen, als aus der Bodenart abgeleitet werden kann (Makroporensystem).
- Bei vollständiger Aufweichung des Profils ist auch schneller Interflow in der Humusaufgabe möglich.

3.3 Extreme Ereignisse

Für Ereignisse höherer Jährlichkeit (>1) geht der relative Anteil des Sättigungsflächenabfluss im Gebiet zurück. Neben einer Zunahme des Abflussbeitrags von den Hängen muss von einem größeren Beitrag aus dem Grundwasser ausgegangen werden (z.T. durch Druckübertragung / ground water ridging, hauptsächlich im Bereich der Bachaue nahe dem Gebietsauslass) .

4 Prozessabbildung mit Simulationsmodellen: Modellvergleich

In diesem Abschnitt werden 3 Modelle mit sehr unterschiedlichem Konzept verglichen. Sie unterscheiden sich signifikant in Ihrem Grad der Abstraktion vom Realsystem. Abbildung 7 soll stellt einen Zusammenhang zwischen Raumscale, Prozess, Modellkonzepten und Modellscale im Dürreychgebiet

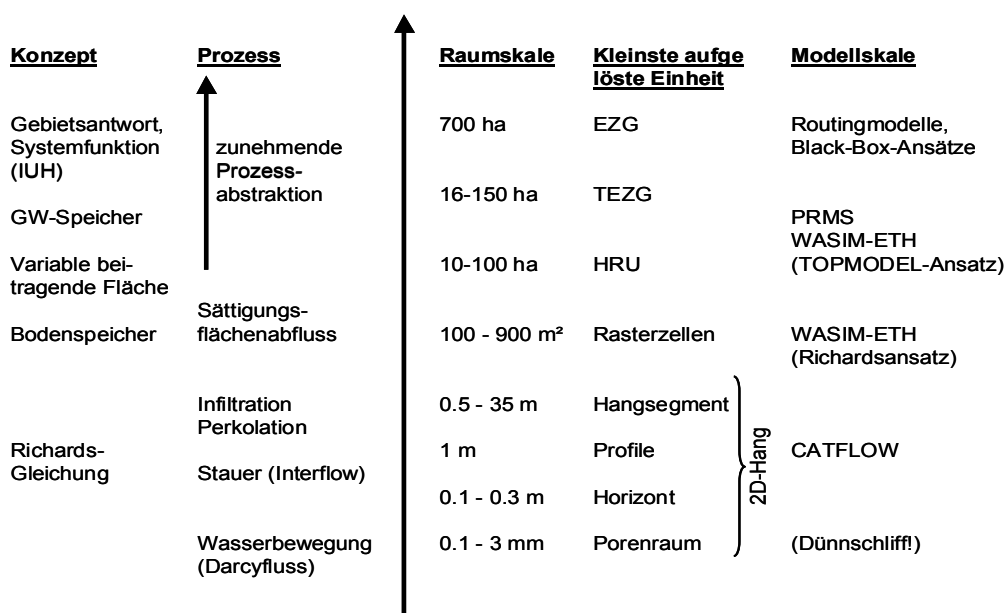


Abb. 7: Zusammenhang zw. Raumscale, Prozess, Modellkonzepten und Modellscale im Dürreychgebiet

allgemeinen Modellkonzepten und der Skale der im Dürreychgebiet verwendeten Modelle her (PRMS; WASIM-ETH / TOPMODEL; CATLFW). Diese Modelle werden im Folgenden genauer auf ihre Eignung, die beobachteten Abflussprozesse abzubilden untersucht.

4.1 PRMS

Das Wasserhaushaltsmodell PRMS („**P**recipitation **R**unoff **M**odelling **S**ystem“, weitere Details im Beitrag von M. Vohland in diesem Band) gehört zur Gruppe der konzeptionellen Simulationsmodelle: Es versucht mit einfachen (meist Speicher) Ansätzen die Prozesse im Gebiet nachzuvollziehen (LEAVESLEY ET. AL., 1983; LEAVESLEY & STANNARD, 1995). Über die Definition von HRU (Hydrologic Response Units) kann eine räumliche Differenzierung der Parameter vorgenommen werden. Innerhalb einer HRU wird von konstanten Parametern ausgegangen.

Auf einen Interzeptionsspeicher folgt ein Bodenmodell, das den Abflussbeitrag in Ab-

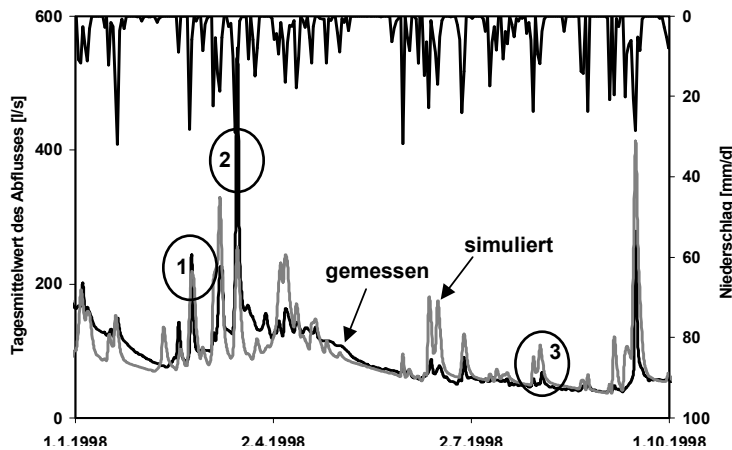


Abb. 8: Abflussganglinien am Gebietsauslass (DÜ)

hängigkeit von aktueller Bodenfeuchte und Niederschlag pro Rechenzeitschritt (Tag!) errechnet. Darunter finden sich zwei weitere Speicher in Serie, sie sollen mittel schnelle und langsame Abflusskomponenten abbilden. Schaut man sich die Simulationsergebnisse für das Dürreychbachgebiet an, so zeigt sich, dass die simulierte

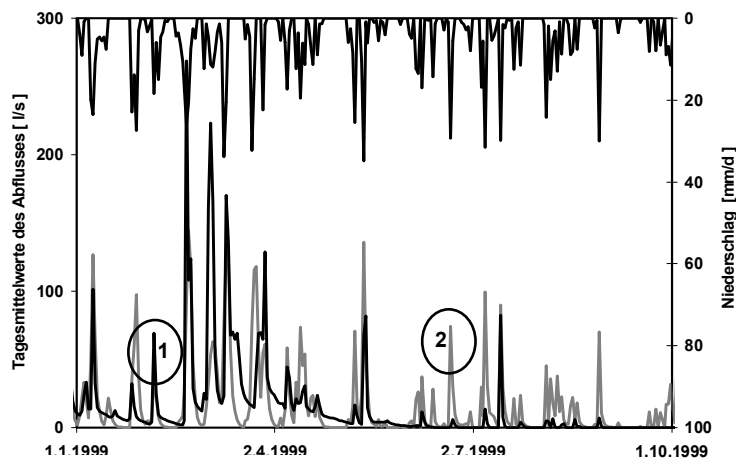


Abb.9: Abflussganglinien am Pegel SH

Ganglinie auf den ersten Blick sehr gut aussieht (1) (Abb. 8). Allerdings konnte die hohe Dynamik des Gebietes nur unzureichend abgebildet werden: Abflussspitzen am Pegel DÜ wurden systematisch unterschätzt (2), während die Abflussreaktion in Trockenphasen deutlich überschätzt

wurde (3). Es wurde zuerst vermutet, dass dies vor allem durch die schlechte Abbildung des Sättigungsflächenabflusses der Hochflächen hervorgerufen wurde. Um dies zu belegen, wurden einige Simulationsläufe mit einem Teilmodell bestehend aus den HRUs des Pegel SH durchgeführt (Abb. 9). Die Abflussbildung am Pegel SH

konnte nicht zufrieden stellend nachvollzogen werden: In Phasen hoher Vorsättigung wurden die Abflussspitzen gut nachgebildet (1), in Phasen geringer Vorsättigung jedoch wiederum stark überschätzt (2). Das liegt an der Abflussbildungsroutine des Modells, die aus aktuellem Bodenspeichereinhalt und der Tagessumme des Niederschlags („Bodenfeuchteindex“) die abflussbeitragende Fläche „abschätzt“. Da im Realsystem ein typischer Schwellwert existiert, unterhalb dessen gar keine Abflussbildung stattfindet, im Modell jedoch ein exponentieller Zusammenhang verwendet wird, ließ sich diese Funktion anhand gemessener Ereignisse nicht zufrieden stellend kalibrieren. Des Weiteren fällt an diesem Beispiel die große Diskrepanz zwischen der charakteristischen Zeitskala des Abflussbildungsprozesses „Sättigungsflächenabfluss“ und der Modellzeitskala auf. Durch die Aggregation der stündlichen Messwerte auf Tagesmittelwerte ging die in der Ganglinie enthaltene Information fast gänzlich verloren und stand somit bereits bei der Kalibrierung des Modells nicht mehr zur Verfügung (Abb. 10).

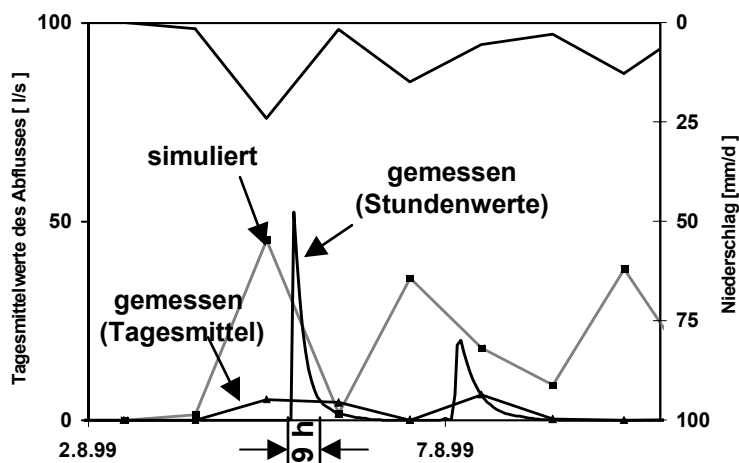


Abb. 10: Unterschied von Modell- und Prozesszeitskala

Durch die Gliederung in mehrere Speicher ist das Simulationsmodell in der Lage, Boden- und Grundwasserspeicher weitgehend zu entkoppeln, wie im Realsystem. Mit dem HRU-Ansatz lassen sich die wichtigsten Abflussbildungstypen räumlich voneinander trennen und eine gewisse Höhendiskretisierung vornehmen. Reliefbedingte Abflusskonzentration können

nur in Ansätzen nachgebildet werden, HRUs bleiben geneigte Flächen („planes“). Alle schnellen Prozesse (Sättigungsflächenabfluss, Horton'scher Oberflächenabfluss) können wegen der Rechenschrittweite von einem Tag nur mit einer sehr großen Unsicherheit simuliert werden. Langsame Prozesse (Deckschichtenabfluss, Grundwasserabfluss) werden durch die Speicheranalogie wesentlich besser abgebildet.

4.2 WASIM-ETH

WaSimM-ETH (SCHULLA, 1997; SCHULLA & JASPER, 1999) ist ein deterministisches, flächendifferenziert auf Rasterzellen arbeitendes hydrologisches Einzugsgebietsmodell zur Simulation des Wasserkreislaufs. Das Modell kann als eine Kombination aus physikalisch basierten, vereinfachten physikalischen und konzeptionellen Prozessbeschreibungen angesehen werden. Es werden alle wesentlichen Prozesse simuliert, die für die Abflussbildung auf der Skala des Einzugsgebiets wesentlich sind:

- Interpolation und Korrektur der meteorologischen Eingangsdaten
- Schneedeckenentwicklung (Akkumulation, Schmelze, Sublimation)
- Interzeption durch die Pflanzendecke
- Infiltration und Bildung von Oberflächenabfluss durch Infiltrationsüberschuss
- Wasserspeicherung in der Bodenzone, Evapotranspiration, Versickerung und kapillarer Aufstieg
- Bildung von Sättigungsflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss
- Abflusskonzentration im Gewässernetz

Trotz weiter Parametervariation gelang es nicht, einen Parametersatz zu finden, mit dem das Modell für alle Gebietszustände zumindest zufrieden stellende Simulationsergebnisse erbrachte. Die Nachformung des Basisabflusses war noch relativ einfach zu bewerkstelligen. Wurde versucht, die Abflussspitzen richtig zu treffen (2), so wurde

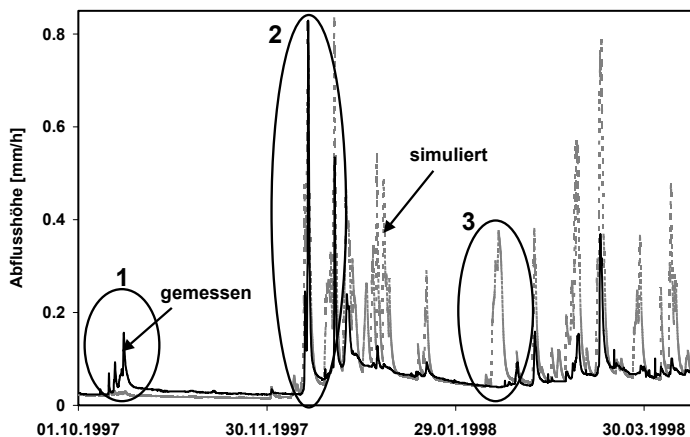


Abb. 11: Abflussganglinien am Gebietsauslass

de grundsätzlich die Gebietsreaktion bei trockenen Gebietszuständen unterschätzt (1) und unter feuchten Bedingungen überschätzt (3). Um dieses Verhalten zu verstehen, wurde in einem zweiten Schritt versucht, das Abflussverhalten am Pegel LE nachzubilden. Man erkennt deutlich, dass sich wiederum Phasen der Überschätzung (1), der richtigen

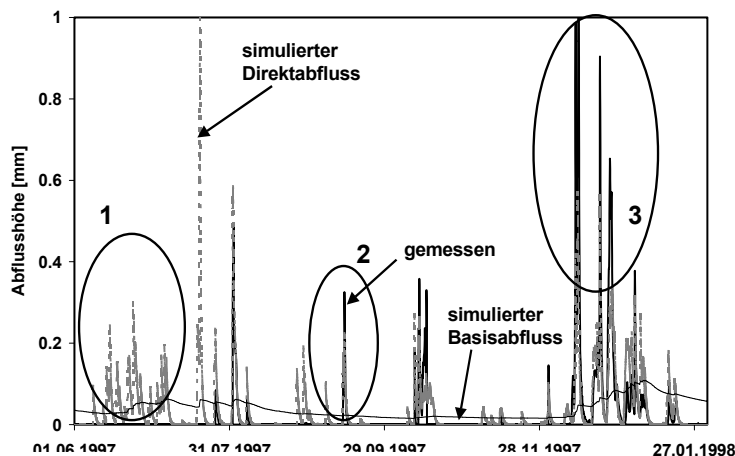


Abb. 12: Abflussganglinien für den Pegel LE

Schätzung (2) mit Phasen der deutlichen Unterschätzung (3) abwechseln. Die Ursache für dieses Verhalten liegt im Konzept des Modells begründet und ist auch durch geschickte Parametervariation nicht zu verändern: Der TOPMODEL-Ansatz (Beven & Kirkby, 1979) stellt einen direkten Zusammenhang zwischen (lokalem) Sättigungs-

defizit und der Abflussneigung einer Fläche her. Die Füllung des Grundwasserspeichers beeinflusst maßgeblich das Verhalten des Systems. Insbesondere die Bildung von Basisabfluss und die Auffüllbarkeit des Interflowspeichers hängen direkt vom Füllstand des Grundwasserspeichers ab.

Für den Sättigungsflächen-

abfluss der Hochlagen des Dürreychbacheinzugsgebietes besteht jedoch keinerlei

Zusammenhang zum Basisabfluss. Auch für das Gesamtgebiet konnte dieser Zusammenhang nicht gefunden werden. Somit ist die Schätzung der Abflussneigung des Einzugsgebietes aus der Füllung des Grundwasserspeichers nicht sinnvoll. Dieser Ansatz setzt grundsätzlich einen oberflächennahen Grundwasserspiegel voraus. Die Abbildung einer reliefbedingten Abflusskonzentration ist durch die 1D-Struktur des Bodenmodells nicht möglich. Die Module zur Verdunstungs- und Schneedeckensimulation basieren auf einer zellweisen Energiebilanz, die alle wichtigen durch Vegetation, Relief und Höhenlage bedingten Einflussfaktoren berücksichtigt. Alle schnellen Prozesse (v.a. Sättigungsflächenabfluss, Horton'scher Oberflächenabfluss) können wegen der Schätzung des Abflussbeiwertes aus dem Sättigungsdefizit nur sehr ungenau simuliert werden. Speicherkoeffizienten, Durchlässigkeiten bzw. Transmissivitäten lassen sich theoretisch aus Messdaten ableiten. Allerdings verlieren diese Parameter im Zuge der Modellkalibrierung ihren räumlichen Bezug, da der TOPMODEL-Ansatz eine starke Parameterkorrektur notwendig macht, um das Gebietsverhalten zumindest näherungsweise nachzuahmen.

4.3 CATFLOW

Das Simulationssystem CATFLOW wurde von MAURER (1997) und ZEHE (1999) für das Einzugsgebiet des Weiherbaches (PLATE, 1992, ZEHE ET AL., 2001) entwickelt. Es gehört der Gruppe der physikalisch begründeten Modelle an und erlaubt die zeitkontinuierliche Simulation des Wasser- und Stofftransportes in kleinen Einzugsgebieten.

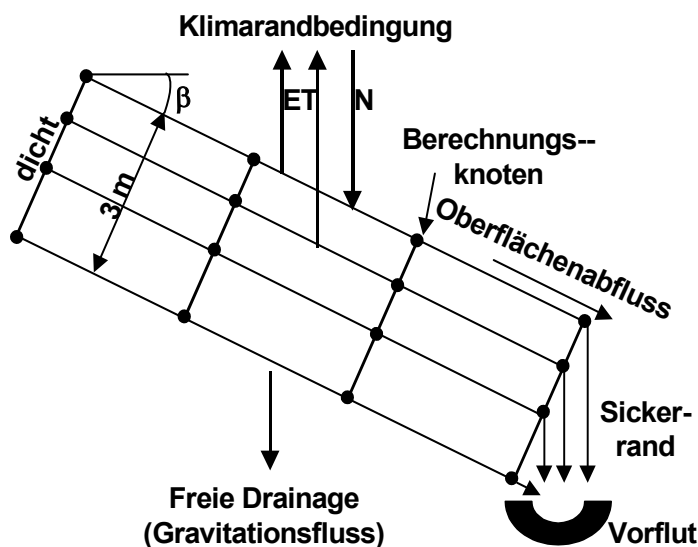


Abb. 13: 2D-Hangelement in CATFLOW

Dabei wird für den Matrixfluss im Bodenkörper die Richardsgleichung mit Hilfe eines Finiten-Differenzen-Verfahrens in einem krummlinigen, orthogonalen Koordinatensystem gelöst. Innerhalb eines Einzugsgebietes werden Hänge (Abb. 13) über ein Gewässernetz gekoppelt. Die Hänge selbst werden auf eine Hangfalllinie projiziert, so dass eine räumlich verteilte 2D-Struktur entsteht. Um das Verhalten des Simulationsmodells besser zu verstehen,

sollen hierzu zwei Ereignisse im Detail betrachtet werden (Abb. 14). Man erkennt, dass die Abflüsse vor allem am Pegel LE, dem Einzugsgebiet mit dem größten Anteil an Sättigungsflächenabfluss, sowohl in ihrer Höhe als auch ihrem zeitlichen Verlauf sehr schlecht nachgebildet werden. Diese fehlende Dynamik der Sättigungsflächen wurde durch die deutlich steileren (und damit in ihrer Abflussreaktion dynamischeren)

Hänge in den tiefer gelegenen Teilen der Einzugsgebiete der Pegel SH und DÜ deutlich überkompensiert: Die Abflüsse am Pegel DÜ werden für beide Ereignisse sehr stark überschätzt. Die große Abflussfülle lässt sich bereits aus der Geometrie der Hänge erklären. Der Sickerrand erfasst in unserem Fall auch die langsameren Komponenten aus tieferen Horizonten, während im Realsystem diese Komponenten wesentlich stärker verzögert als Basisabfluss in Erscheinung treten.

Der stark unterschätzte Abflussbeitrag von den Hochflächen kann hingegen dadurch erklärt werden, dass durch das relativ geringe laterale Gravitationspotential keine hohen lateralen Flussdichten möglich sind. Im Realsystem ist die Anbindung an das

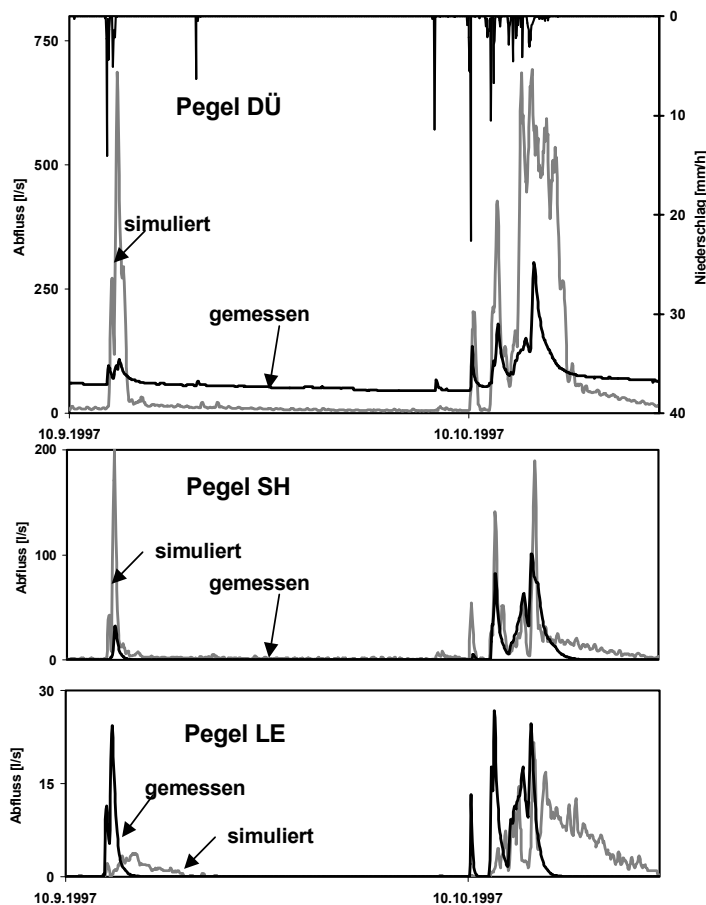


Abb. 14: Ganglinien für die Pegel DÜ, SH und LE

Gerinnenetz wesentlich besser: Flache, weitverzweigte Gräben drainieren die makroporenen Oberböden. Modelltechnisch ließe sich dies durch eine kürzere Hanglänge nachvollziehen. Interessant ist noch ein anderes Phänomen: Die Dynamik der lateralen Flüsse hängt sehr stark von der räumlichen Diskretisierung der Hänge ab. Sind die lateralen Abstände der Knoten zu groß, kommt es zu einer starken Reduktion der lateralen Flüsse. Dabei gehen je nach Hangneigung durch numerische Instabilitäten bzw. Ungenauigkeiten unterschiedliche Wassermengen in der Bilanz verloren. Will man schnelle laterale Prozesse (Pipe Flow, Return Flow, Reinfiltration) abbilden, ist eine

enge laterale Kopplung der Berechnungsknoten sicherzustellen. Diese Kopplung ist nur gegeben, wenn Prozessgeschwindigkeiten bzw. Flussdichten und räumliche Diskretisierung aufeinander abgestimmt sind (MERZ, 1996).

Durch die Verwendung eines 2D-Hanges als Grundstruktur sind Hänge als kleinste Einheiten zu betrachten. Ihre Länge und ihre Anbindung an ein Gewässer sind individuell zu ermitteln, da die Nachbildung der Abflusskonzentration auf Hangmaßstab stark skalenabhängig ist. Hänge dürfen also nur diejenigen Hangbereiche verbinden, die auf Ereignisskala in irgendeiner Weise miteinander in Bezug stehen. Im gewählten Beispiel entsprach die räumliche Diskretisierung in vielen Fällen nicht der realen

Struktur. Auch die Dichte des Drainagenetzes und auch die Tiefe der Drainagewirkung sind wichtige Kriterien für den Aufbau des Modells. Eindimensionale Strukturen (Bodenprofile) werden auf den Hängen in einen räumlichen Bezug gesetzt. Durch die modelltechnisch begrenzte Mächtigkeit der Hänge kann die Struktur eines Grundwasserleiters nicht abgebildet werden. Alle schnellen Prozesse (v.a. Sättigungsflächenabfluss, Horton'scher Oberflächenabfluss) können durch das Modell simuliert werden. Oberflächenabfluss wird jedoch als (sehr träger) Schichtabfluss simuliert, was den realen Verhältnissen vor allem auf den zur Sättigung neigenden Flächen der Hochlagen nicht entspricht. Der Grundwasserabfluss kann durch das Modell nur als flacher Deckschichtenabfluss nachvollzogen werden. Der Übertritt von Hangwasser ins Gewässer (in Realität: oberflächennaher Abfluss und Druckreaktion des Grundwasserleiters) sind durch die Annahme eines Sickerrandes am Hangfuß nicht abbildbar. An diesem Rand kommt es zu einer ungewollten Drainage des Hangfußes („Leerlaufen“).

Die meisten Modellparameter stellen messbare Größen dar (Geometrie Größen, hydraulische Leitfähigkeiten), können jedoch nicht flächendeckend erhoben werden. Durch die Annahme repräsentativer Bodenprofile zur Parametrisierung wird die räumliche Variabilität der bodenhydraulischen Parameter nicht berücksichtigt. Auch birgt die Schätzung der bodenhydraulischen Parameter dieser repräsentativen Bodenprofile bereits so große Unsicherheiten, dass eine Kalibrierung der abflusssteuernden Parameter (v.a. hydraulische Leitfähigkeiten der Stauhazone bzw. der gut leitenden Oberböden) unerlässlich ist. Dazu sind in jedem Fall Messdaten erforderlich, die eine gute Prozesstrennung erlauben (Tracer!).

5 Zusammenfassung

Die Abbildung von Abflussbildungsprozessen in kleinen Einzugsgebieten ist mit den vorgestellten Simulationsmodellen nicht vollständig möglich (so ist die Abbildung der nachgewiesenen Druckantwort des tiefen Grundwasserleiters mit keinem der Modelle möglich).

Simulationsmodelle abstrahieren sowohl in der räumlichen als auch in der zeitlichen Skala. Eine wirkliche „Erklärung“ des Gebietsverhaltens aus messbaren physikalischen Größen (z.B. Hydraulische Leitfähigkeit des Bodens) wäre theoretisch mit dem Modell CATFLOW denkbar, es scheiterte jedoch an anderen Problemen (Frage der charakteristischen Hanglänge, räumliche Diskretisierung, Verfügbarkeit von Parametern, Messdaten). Die einfacheren Ansätze zeigen eine größere Robustheit und eine wesentlich leichtere Handhabbarkeit. Hier liegen die Begrenzungen sowohl in einer fehlenden zeitlichen Auflösung (PRMS) als auch in einer fehlerhaften Konzeptionalisierung der im Gebiet ablaufenden Prozesse (TOPMODEL-Ansatz in WASIM-ETH, Abflussbildungsroutine in PRMS).

6 Literatur

- Bergström, S. (1991): Principles and Confidence in Hydrological Modelling, *Nordic Hydrology*, 22, 123-136
- Bonell, M. (1998): Selected challenges in runoff generation research in forests from the hillslope to headwater drainage basin scale, *JAWRA* 34, 4, 765-785.
- Casper, M.; Zehe, E. (2001): A process based test scheme for rainfall-runoff models, *Geophysical Research Abstracts*, 26th Gen. Ass. of the EGS, Nizza, 25-30.3.2001, 3, CD-ROM, Katlenburg
- Casper, M. (2002): Die Identifikation hydrologischer Prozesse im Einzugsgebiet des Dürreychbaches (Nordschwarzwald), Dissertation am Institut für Wasserwirtschaft und Kultuttechnik, Universität Karlsruhe
- Leavesley, G.H. & L.G.Stannard (1995): The Precipitation-Runoff Modeling System - PRMS, In: Singh, V.P. (Hrsg.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Res. Publ., Highlands Ranch, USA
- Leavesley, G.H.; Lichty, R.W.; Troutman, B.M.; Saindon, L.G. (1983): *Precipitation-Runoff Modeling System: User's Manual*, Water-Resources Investigations Report 83-4238, Denver
- Maurer, T. (1997): Physikalisch begründete zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransportes in kleinen ländlichen Einzugsgebieten, *Mitt. d. Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft der Univ. Karlsruhe*, 61, Karlsruhe
- Merz, B. (1996): Modellierung des Niederschlag-Abfluß-Vorgangs in kleinen ländlichen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung der natürlichen Variabilität, *Mitt. d. Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft der Univ. Karlsruhe*, 56, Karlsruhe
- Plate, E.J. (Hrsg.) (1992): *Weierbach-Projekt, Prognosemodell für die Gewässerbelastung durch Stofftransport aus einem kleinen ländlichen Einzugsgebiet*, *Mitt. d. Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft der Univ. Karlsruhe*, 41, Karlsruhe
- Schulla, J. (1997): *Hydrologische Modellierung von Flußgebieten zur Abschätzung von Folgen von Klimaveränderungen*, Diss. ETH 12018, 161 S., Zürich
- Schulla, J; Jasper, K. (1999): *Modellbeschreibung WaSiM-ETH*, unveröffentl., Zürich
- Volkman, H. 2003: *Gelöste organische Kohlenstoffverbindungen (DOC) im Dürreychbachtal (Nordschwarzwald)*, Diss. Universität Karlsruhe
- Waldenmeyer, G. 2003: *Abflussbildung und Regionalisierung in einem forstlich genutzten Einzugsgebiet (Dürreychtal, Nordschwarzwald)*, Diss. Universität Karlsruhe, *Karlsruher Schriften zu Geographie und Geoökologie*, Band 20
- Zehe, E. (1999): Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone auf verschiedenen Skalen, *Mitt. d. Inst. f. Hydrologie und Wasserwirtschaft der Univ. Karlsruhe (TH)*, 64, Karlsruhe