



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

HOCHWASSERENTSTEHUNG IN DER NÖRDLICHEN GRAUWACKENZONE DER ALPEN

FELDFORSCHUNGEN UND MATHEMATISCHE MODELLIERUNG.

RUNOFF GENERATION IN THE NORTHERN GREYWACK ZONE OF THE ALPS

FIELD STUDIES AND MATHEMATICAL MODELLING

Kirnbauer, R.¹, Tilch, N.², Markart, G.³, Zillgens, B.⁴, Kohlbeck, F.⁵, Leroch, K.⁶,
Seidler Ch.⁷, Haas, P.¹, Uhlenbrook, St.², Didszun, J.², Leibundgut, Ch.², Merz, B.⁴,
Chwatal, W.⁵, Fürst, J.⁶

ZUSAMMENFASSUNG

Prozessstudien im hydrologischen Testgebiet Löhnersbach bei Saalbach (Land Salzburg, Österreich) hatten gezeigt, dass unterirdischer Abfluss für die Abflussentstehung bestimmend sein kann. Daher wurden Spezialuntersuchungen in einem Kleinstinzugsgebiet durchgeführt, wo unterirdischer Abfluss beobachtet worden war. Die Ergebnisse von Beregnungsversuchen, Geoelektrik und Geoseismik in Verbindung mit Resultaten von tracerhydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen bildeten die Grundlage für die Erstellung von Modulen zur Berechnung von Oberflächen- und unterirdischem Abfluss, die als Bausteine in einem prozessorientierten Abflussmodell verankert werden.

Key words: Prozessforschung, unterirdischer Abfluss, hydrologische Modellierung, Tracer hydrologie

ABSTRACT

Process studies in the hydrological research basin Löhnersbach near Saalbach (province of Salzburg in Austria) have shown the relevance of subsurface flow for the runoff generation process. Thus, specific investigations were performed in a microscale subcatchment, where subsurface flow had been clearly observed. The results of irrigation experiments, geoseismic

¹ Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, Technische Universität Wien, Karlsplatz 13/223, A – 1040 Wien, kirnbauer@hydro.tuwien.ac.at

² Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, Fahnbergplatz, D-79098 Freiburg im Breisgau.

³ Bundesamt und Forschungszentrum für Wald, Rennweg 1 - Hofburg, A-6020 Innsbruck

⁴ Geoforschungszentrum Potsdam, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam

⁵ Institut für Geodäsie u. Geophysik, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 25 – 29 / 1282, A-1040 Wien

⁶ Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur, Muthgasse 18, A - 1190 Wien

⁷ Internationales Hochschulinstitut Zittau, Markt 23, D - 02763 Zittau

and geoelectric investigations together with tracerhydrological and hydrochemical studies were condensed to form modules for calculating surface and subsurface flow in a process oriented mesoscale runoff model.

Key words: process studies, subsurface flow, process oriented model, tracer hydrology

EINLEITUNG

Die hydrologische Modellierung versucht einen Naturvorgang zu beschreiben, der außerordentlich komplex, zeitlich variabel und räumlich heterogen ist. Moderne flächendetaillierte Modelle liefern jedoch nur dann zuverlässige Ergebnisse, wenn die für die Abfluss- und insbesondere die Hochwasserabflussentstehung maßgebenden Prozesse erkannt, verstanden und im Modell beschrieben werden. Grundlage für das notwendige Prozessverständnis sind gezielte Beobachtungen und Messungen in der Natur. Anschließend müssen hydrologische Modellvorstellungen und die daraus abgeleiteten Modelle an Hand adäquater Daten verifiziert (oder falsifiziert) werden. Modellierung und Messung müssen daher miteinander im Wechselspiel stehen (Binley et al., 1991; Kirnbauer, 1994). Für die Aussagekraft solcher Studien ist es entscheidend, dass die Prozesse jeweils auf der adäquaten Maßstabsebene beobachtet werden. Einzelne Teilprozesse des Niederschlag-Abfluss-Prozesses sind nur auf der kleinsten Maßstabsebene, im Bereich weniger Tausend Quadratmeter sichtbar (Haas & Kirnbauer, 1994).

In der vorliegenden Arbeit wird über Arbeiten im hydrologischen Untersuchungsgebiet Löhnersbach bei Saalbach im Land Salzburg berichtet. Auf der kleinsten Maßstabsebene (Mikroskale) wurden in den frühen Sommermonaten der Jahre 2001 und 2002 konventionelle hydrometeorologische Messungen gezielt mit tracerhydrologischen und hydrochemischen Methoden erweitert, um Aufschlüsse über die Dynamik des unterirdischen Abflusses zu erhalten. Diese Untersuchungen wurden durch künstliche Beregnung mit einer speziellen Beregnungsanlage ergänzt und unterstützt. Geoseismische und geoelektrische Verfahren liefern die zur Interpretation der genannten Messungen notwendigen Informationen über die Untergrundverhältnisse im Untersuchungsbereich. Die Ergebnisse der Detailuntersuchungen fanden Eingang in die mathematische Modellierung auf der Mikroskale. Die Arbeiten in Richtung Abflussmodellierung auf der nächsten Maßstabsebene, der Mesoskale, sind im Gange. Hierzu wird das Konzept der Hydrotopfgliederung des Einzugsgebietes, also einer Unterteilung des Einzugsgebietes nach Räumen ähnlichen Abflussverhaltens, angewendet. Ein in stetiger Weiterentwicklung befindliches Werkzeug hierfür ist das Wissensbasierte System FLAB (Flächen gleicher Abflussbildung; Peschke et al., 1999). Dies ist ein Expertensystem, das ursprünglich für deutsche Mittelgebirge entwickelt worden ist. Eine Erweiterung und Adaptierung für alpine Einzugsgebiete ist in Arbeit.

UNTERSUCHUNGSGEBIET

Der Löhnersbach ist ein rechtsseitiger Zubringer zur Saalach. Er mündet nicht ganz 4 km stromab des bekannten Schiortes Saalbach (bei den Koordinaten Gauß-Krüger Österreich Re=-49.182; Ho=5.248.991 bzw. geogr. Koordinaten ED50 Länge=12°40'59"; Breite=47°22'41") Das Einzugsgebiet des Löhnersbaches bis zum Hauptpegel Rammern ist ca. 16 km² groß und erstreckt sich über einen Höhenbereich von ca. 1100 bis ca. 2200 m ü. A.. Es gehört geologisch der Grauwackenzone (Pirkl, 1989; 1993) an und zeigt weithin Spuren von Massenbewegungen aller Größenordnungen, die zum Teil aktiv sind. Dadurch kommt es zu Auflockerungszonen im Untergrund, die als potentielle Wasserwege wirken.

Zum Löhnersbach-Gebiet existiert eine Fülle von Untersuchungen zum Naturraum, auf die hier nur in Form der Tabelle 1 verwiesen werden soll.

Tab. 1: Zusammenstellung der Basisliteratur zum Einzugsgebiet des Löhnersbaches
Tab. 1: Literature survey concerning the Löhnersbach catchment

Themen	Literatur
Geologie, Hydrogeologie, Geomorphologie	Pirkl, 1989; 1993
Vegetation, Pflanzensoziologie	Klug-Pümpel et al., 1994; Schiffer & Burgstaller, 1990
Böden	Markart & Kohl, 1993a
Beregnungsversuche	Markart & Kohl, 1993b
Hydrologische Untersuchungen, erste Modellierungsarbeiten	Kirnbauer et al., 1996
Zusammenstellung Daten und Metadaten	Nobilis et al., 2002
Tracerhydrologie	Tilch et al. 2003

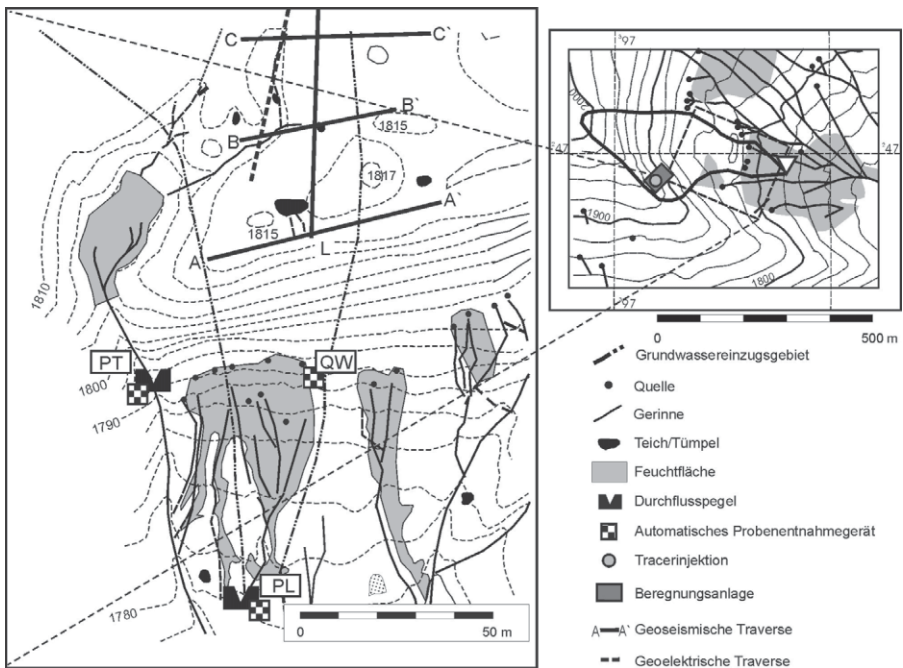


Abb.1: Experimentiergebiet Limbergalm; aus Tilch et al. 2003, verändert.
Fig. 1: Experimental region Limbergalm; from Tilch et al. 2003, revised

Aufbauend auf und abgestimmt mit den vorgenannten Untersuchungen wurde im interdisziplinären Dialog ein hydrometeorologisches Messnetz eingerichtet. Es zielt darauf ab, hydrologische Modellvorstellungen auf ihre Anwendbarkeit unter den gegebenen naturräumlichen Bedingungen zu überprüfen und die hydrologischen Prozesse auf unterschiedlichen Maßstabsebenen zu beobachten. Einen Überblick über das Messnetz gibt Abb. 1 in Kirnbauer et al., 1996 bzw. Abb. 2 in Tilch et al., 2003. Nähere Angaben zu den

verwendeten Messeinrichtungen und tabellarische Zusammenstellungen zu den Beobachtungsdaten finden sich in Nobilis et al., 2002. Die Untersuchungen, über die hier vorrangig berichtet werden sollen, konzentrierten sich auf einen kleinen Teilbereich des Löhnersbaches im Bereich der Limbergalm (bei den Koordinaten Gauß-Krüger Österreich Re=-52.802; Ho=5,247.057 bzw. geogr. Koordinaten ED50 Länge=12°38'04“; Breite=47°21'40“). Dieser Bereich wird in Abb. 1 genauer dargestellt.

MESSMETHODEN

Abflussmessungen

Im Bereich Limbergalm sind zwei Pegel installiert (PT und PL in Abb. 1). Beide arbeiten nach demselben Prinzip: Aus einer Messkiste, in der eine Drucksonde den Wasserstand misst, strömt das Wasser über ein V-Wehr (Thomson-Wehr), hinaus. Der Durchfluss wird als Funktion des Wasserstandes nach Hager (1990) ermittelt.

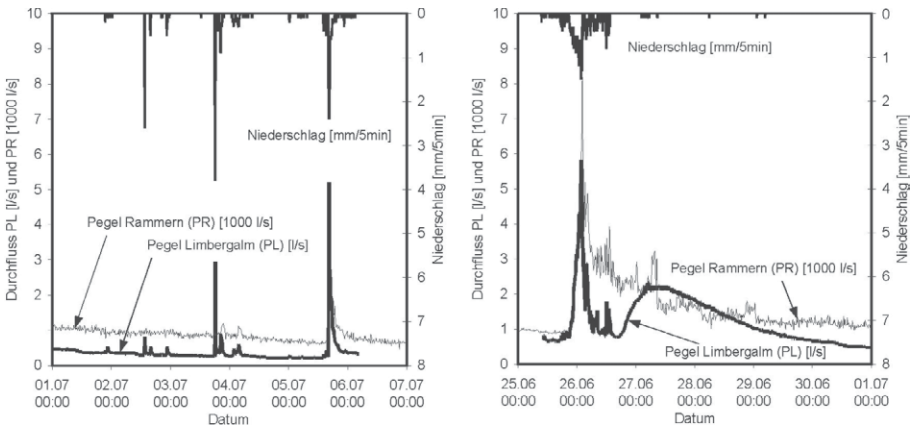


Abb. 2: Zwei charakteristische Ereignistypen, beobachtet an den Pegeln Limbergalm und Rammern.

Fig. 2: Characteristic event types as observed at gauge Limbergalm and gauge Rammern.

Am Pegel Limbergalm (PL) sind zwei kontrastierende Typen von Abflussereignissen zu beobachten, wie sie in Abb. 2 dargestellt sind: Kurze, heftige Gewitterregen rufen eine rasche Abflussreaktion sowohl am Pegel Limbergalm als auch am Hauptpegel Rammern hervor (links in Abb. 2). Kommt es bei hoher Vorbefeuchtung (und entsprechend großem Basisabfluss zu Ereignisbeginn) zu einem lang anhaltenden Niederschlag mäßiger Intensität, so reagiert der Abfluss am Pegel Limbergalm auch sofort, es folgt dieser ersten, raschen Reaktion aber eine zweite, stark verzögerte, deren Verlauf auch stark gedämpft ist (rechts in Abb. 2). Zu dieser zweiten Abflussreaktion kommt es ohne zusätzlichen Niederschlag. Es liegt nahe, diese zweite, „nachlaufende“ Welle als aus dem Grundwasser stammend anzusehen. Der Ereignistyp mit nachlaufender Welle tritt in idealtypischer Form nicht sehr häufig, aber im langjährigen Durchschnitt immerhin ca. einmal jährlich auf. Diese nachlaufende Welle ist am Hauptpegel Rammern niemals sichtbar, denn Grundwasserabflüsse unterschiedlicher Lauf- bzw. Aufenthaltszeit überlagern sich so, dass bloß ein stark verlangsamter Rückgang des abfallenden Astes der Hochwasserwelle beobachtbar wird. Quantitative Abschätzungen zu den Zeitkonstanten und den Entstehungsflächen der raschen bzw. der verzögerten Abflussreaktionen finden sich in Kirnbauer et al., in print

Es ist sehr selten möglich, ohne großen instrumentellen und experimentellen Aufwand den unterirdischen Abfluss so klar zu beobachten. Dies war der Anlass dafür, genau hier, im Bereich Limbergalm, mit verfeinerten Methoden die Gesetzmäßigkeiten des unterirdischen Abflusses zu untersuchen.

Künstliche Beregnung

Oberhalb beider Limbergalm-Pegel (PT und PL in Abb. 1) liegt ein Schutthang, der als Verdachtsfläche für die Entstehung der unterirdischen Abflusswellen anzusehen war. Hier sollte ein Fluoreszenztracer eingebracht werden, um diese Hypothese zu testen. Nachdem die im Frühsommer 2001 eingebrachten Tracer (Eosin und Uranin) mangels ausreichender natürlicher Niederschläge sehr spät, nämlich erst im Laufe der Schneeschmelze 2002, in den Quellen und Bächen des Untersuchungsbereiches identifiziert werden konnten, wurde beschlossen, den Versuch mit einem neuen Fluoreszenztracer (Naphthionat) zu wiederholen und den Bereich der Einspeisung künstlich zu beregnen. Durch die künstliche Beregnung sollte a) womöglich eine künstliche unterirdische Abflusswelle erzeugt werden, b) der Tracer transportiert werden. c) wurde versucht, durch temporäre Beimischung von Kochsalz zum Beregnungswasser die Leitfähigkeit des unterirdischen Abflusses kurzfristig zu erhöhen, sodass in der Geoelektrik eine deutlichere Reaktion beim Vorbeiströmen der Salzwolke sichtbar werden sollte.

Übliche Beregnungsanlagen werden zur Simulation hoher Niederschlagsintensitäten bei geringer Regendauer verwendet, und ihre Konstruktion daraufhin ausgerichtet (Schaffhauser, 1982; 1988; Lang, 1995). Niederschläge geringer Intensität können mit derartigen Anlagen im Allgemeinen nicht aufgebracht werden, weil bei der hierfür notwendigen Druckreduktion nicht mehr die gesamte Fläche überregnet wäre. Die eingangs erwähnten „nachlaufenden Wellen“ werden aber genau von solchen Regenereignissen geringer Intensität aber langer Dauer hervorgerufen, und genau solche Ereignisse sollten im hier beschriebenen Untersuchungsprogramm simuliert und analysiert werden. Es wurde daher eine spezielle Anlage für die Simulation von Dauerregen konstruiert (Abb. 3).



Abb. 3: Beregnungsanlage für geringe Intensitäten (Bauart BFW Innsbruck)

Fig. 3: Spray irrigation installation for low intensität (model BFW Innsbruck)

Sie ist wie folgt konzipiert: 10 Schwenkdüsen bestreichen eine 400 m² große Versuchsfläche. Um seitliche windbedingte Abdrift auszugleichen, werden die Außenseiten der eigentlichen Beregnungsfläche mit halber Intensität mitberechnet. Spezielle Düsen bringen bei max. 2 bar Druck 4m³/h Wasser auf die Versuchsfläche. Querschnittbegrenzer in den Düsen halten den Wasserdurchsatz ab 2 bar Druck weitgehend konstant. Ein online-registrierender Wasserzähler wird zusätzlich während der Versuchsdurchführung in 10 min-Abständen abgelesen und erlaubt so die genaue Dokumentation des Beregnungsvorganges. Die Wasserversorgung erfolgt aus natürlichen Gewässern, mit Hilfe von Beileitungen, Zwischenbehältern und einer Tragkraftspritze.

Geoseismik

Als Methode zur Identifikation potenzieller unterirdischer bevorzugter Fließwege und zur Abschätzung des Speichervolumens des Hanges und der maximalen Wassermenge, welche pro Zeiteinheit im Hang transportiert werden kann, wurden refraktionsseismische Untersuchungen durchgeführt. Diese Messungen erfolgten vor den Beregnungsversuchen. Angesichts der zu erkundenden geringen Teufen wurden die notwendigen Druckwellen bis auf zwei Punkte, wo Sprengkapseln eingesetzt wurden, durch Hammerschlag erzeugt.

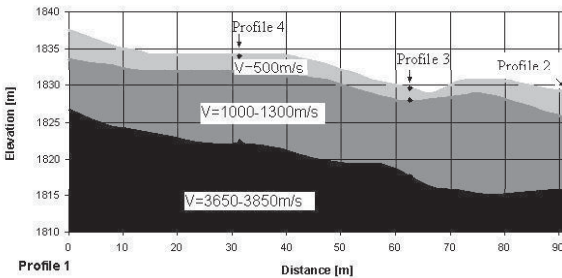


Abb. 4: Refraktionsseismisch ermitteltes Längsprofil

Fig. 4: Longitudinal profile explored by refraction seismics

Insgesamt wurden 4 seismische Profile ausgeführt. Das Längsprofil L (siehe Abb. 1) hatte 4m Geophonabstand und folgte ungefähr dem Fallen des Hanges. Der Abbildung 4 ist zu entnehmen, dass eine oberste sehr lockere Deckschicht von 1 bis 2m mit einer seismischen Geschwindigkeit von 500m/s angetroffen wurde. Darunter befindet sich Lockermaterial mit einer seismischen Druckwellengeschwindigkeit von 1000m/s bis 1300m/s. Daraus kann gefolgert werden, dass diese Schicht keinesfalls wassergesättigt, sondern weitgehend trocken war. Die Mächtigkeit dieser Schicht variiert zwischen 10m und 15m. Unterhalb des Lockermaterials folgt Fels mit einer seismischen Geschwindigkeit von 3600m/s bis 3900m/s.

Geoelektrik

Zusätzlich zur refraktionsseismischen Untersuchung und annähernd entlang derselben Profile wie diese (siehe Detailkarte Abb. 1) wurden geoelektrische Untersuchungen durchgeführt. Diese wurden einerseits durch die zu Versuchsbeginn herrschende Trockenheit, andererseits durch den sehr skelettreichen Oberboden des Untersuchungsbereiches erschwert: Es gelang nur schwer, ausreichenden Bodenkontakt der Sonden zu gewährleisten.

Den Widerstandsquerschnitten im unberegneten (Abb. 5 a) und im beregneten Zustand (Abb. 5 b) ist zu entnehmen, dass von der Oberfläche weg bis in eine Tiefe von etwas unter

10m ein sehr hoher Widerstand auftritt, wie er nur bei ganz trockenen Schottern und Sanden oder in kompetenten Gesteinen anzutreffen ist. Aus der Seismik geht hervor, dass der kompakte Fels in etwas mehr als 10m Tiefe liegt, und oberhalb Hangschutt. Die Widerstands-Tiefenmodelle gehen leider nicht bis zur Felsoberkante. Im untersten Bereich gibt es niedere Widerstände. Wäre der Fels erreicht worden, wäre unterhalb der gelb-blauen Schicht wieder eine rote Schicht mit hohem Widerstand zu sehen. Als Interpretation ergibt sich daher: Bei der Beregnung dringt das Wasser unmittelbar senkrecht ein (ein sehr kleiner Teil könnte auch an der Oberfläche fließen und dann erst in den Hangschutt eindringen). Das Wasser trifft auf den Stauer = Felsoberkante und fließt dann dort entlang der Felsoberkante der Schwerkraft folgend weiter. Wenn die Abb. 5 b keine messtechnischen Fehler hat, so kann man dort in der linken unteren Ecke (Blau) einen kleinen Wasserstau beobachten. Da die Profile zu wenig tief reichen, kann man nicht das ganze eingebrachte Wasservolumen erkennen, sondern nur den kleineren oberen Teil. Man sieht, dass die Mächtigkeit der Zone mit hohem Widerstand im Laufe der Zeit ein wenig abnimmt.

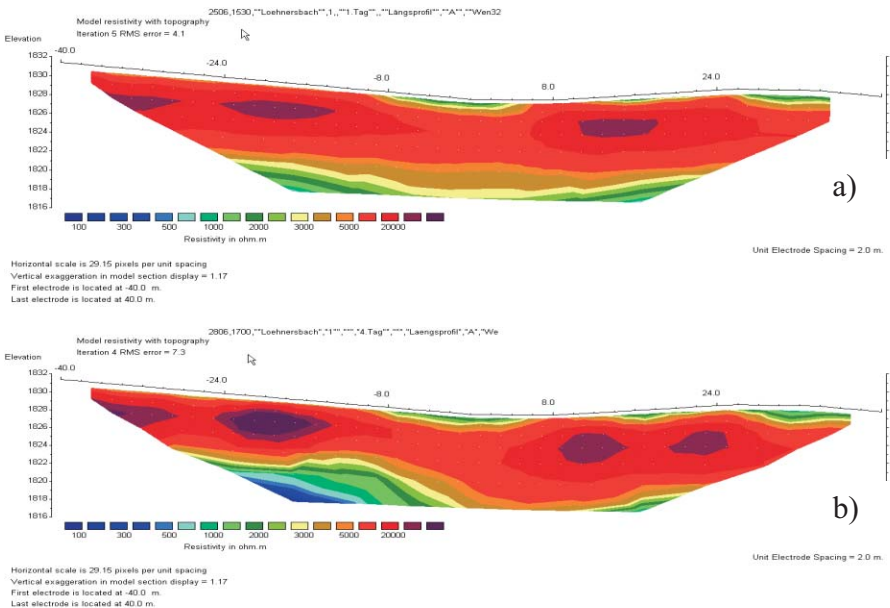


Abb. 5: Ausgewählte Ergebnisse der Geoelektrik: Widerstandsprofil ungefähr dem Geoseismik-Längsprofil (siehe L in Abb. 1) folgend. a) 25.6.2002 um 15:30 b) 28.6.2002 um 17:00. Interpretation im Text.

Fig. 5: Selected results of the geoelectric investigations: soil resistance longitudinal profile (see L in Fig. 1). Interpretation in the text.

Tracerhydrologie und Hydrochemie

Die mit dem eingangs erwähnten Tracereperiment im Frühsommer 2001 einhergehenden hydrochemischen Untersuchungen hatten das Ergebnis erbracht, dass die nachlaufenden Wellen aus zwei Grundwasserkomponenten bestehen (Tilch et al., 2003) und dass die im Nahbereich der Pegel PT und PL austretenden Quellen tatsächlich aus dem schuttreichen Oberhang gespeist werden. Das im Frühsommer 2002 durchgeführte zusätzliche Tracereperiment erlaubt nunmehr auch Aussagen über die Dynamik des unterirdischen Abflusses.

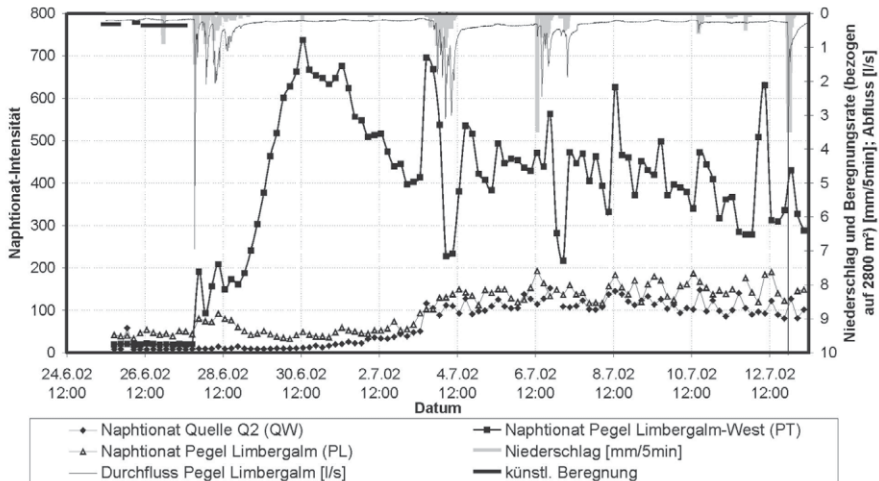


Abb. 6: Tracerexperiment Juni 2002; Intensität des Tracers an diversen Punkten

Fig. 6: Tracer experiment of June 2002; tracer intensity observed at different points

In Abb. 6 sind die Durchbruchkurven der Tracerintensität von Naphthionat an verschiedenen Punkten dargestellt. Einspeisebeginn war der 26.06.2002 um 8:22 Uhr MEZ. Dank der künstlichen Beregnung mit einer Intensität von ca. 5,8mm/h über 52 Stunden und Dank eines natürlichen Regenereignisses, das von 27.06.2002 um ca. 18 Uhr bis 28.6. um 23:55 ca. 60 mm Niederschlag brachte, wurde das Naphthionat relativ rasch weitertransportiert: Ein deutliches Ansteigen der Konzentration am Pegel Limberg West (PT) ist bereits am 28.6. erkennbar, und eine Kulmination trat am 30.6. gegen Mittag auf. Eine nachlaufende Welle trat am Pegel Limbergalm (PL) trotz der recht großen Niederschlagsmenge nicht auf. Dies ist eine Folge der großen Trockenheit, die zu Beginn des Experimentes geherrscht hatte. In Abb. 6 ist zu erkennen, dass am Pegel PT nach dem ersten Intensitäts-Peak des Tracers ein zweiter, wesentlich gedämpfter und langgezogener Scheitel aufgetreten ist, der seinen Scheitel um den 6. bis 8. Juli hatte, und der sich auch in den Tracerganglinien von Pegel PL und Quelle QW abbildet, die vorher kaum eine Reaktion gezeigt hatten. Daraus lässt sich, wie schon aus der Hydrochemie des Jahres 2001, schließen, dass der unterirdische Wassertransport auf zumindest zwei Wegen erfolgt, die sich durch unterschiedliche Dämpfungs- bzw. Speichereigenschaften unterscheiden (Blockschutt des Steilhanges, tieferer Hangschutt bzw. Auflockerungsbereich des Kristallins). Im Gegensatz dazu erfolgt der Grundwasserabfluss am Pegel PL lediglich aus dem tieferen Fließsystem. Ereignisspezifische Niederschlag-Abfluss-Bilanzen auf der Basis mehrjähriger Zeitreihen und die über die Tracerhydrologie erzielten Chemographen bestätigen diesen Sachverhalt.

INTERPRETATION DER ERGEBNISSE DES EXPERIMENTES

Die geoseismische Untersuchung bestätigt die auf Grund von gutachtlicher geologischer Ansprache gefasste Hypothese über die Untergrundverhältnisse und ermöglicht die Definition eines Untergrundmodells als Basis für die Modellierung. Die Geoelektrik unterstützt die geoseismischen Ergebnisse. Darauf aufbauend sind die tracerhydrologischen Ergebnisse wie folgt interpretierbar: Als relativ wenig dämpfender und speichernder unterirdischer Wasserweg

kann der seicht liegende Hangschutt angesehen werden. Für ihn kann ein k -Wert von ca. 10^{-3} m/s abgeschätzt werden. Der zweite Wasserweg führt über einen tieferen Speicher mit einem k -Wert von ca. 10^{-4} m/s und kann als Abfluss durch klüftigen Fels interpretiert werden. Unter den beim Experiment herrschenden Bedingungen wurden PL und QW nur aus dem zweiten Speicher angeströmt. Über die parallel durchgeführten hydrochemischen Untersuchungen wird an dem Ort berichtet werden.

Aus der Zusammenschau aller Ergebnisse leitet sich das in Abb. 7 dargestellte Untergrundmodell als Basis für die Modellierung ab.

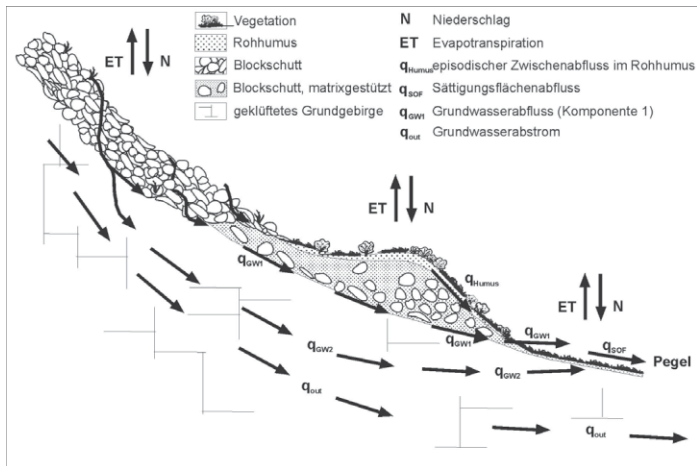


Abb. 7: Hydrotipe und Untergrundmodell des Untersuchungsbereiches Limbergalm als Basis der mathematischen Modellierung.

Fig.7: Hydrotypes and geologic model of the subsoil conditions in the experimental area Limbergalm as a basis of the mathematical model.

MATHEMATISCHE MODELLIERUNG

Korrespondierend mit dem in Abb. 7 gezeigten Untergrundmodell wurde ein mathematisches Konzeptmodell für den Abfluss am Pegel Limbergalm (PL) entwickelt, dessen Struktur in Abb. 8 dargestellt ist.

Im Blockschutt werden zwei Speicher berücksichtigt. Der Niederschlag tritt in den oberen Bodenspeicher ein, der regelt, wie viel Niederschlag bzw. Bodenwasser verdunstet (Verhältnis E_{pot}/E_{act}) und wie viel Wasser in Abhängigkeit von der Feldkapazität in den Grundwasserspeicher fließen kann. Die Potentielle Verdunstung wird nach Penman-Wendling (DVWK, 1996) berechnet. Der Grundwasserspeicher hat zwei Ausläufe (q_{gw1} und q_{deep_out}) und einen Überlauf (q_{gw2}), die direkt in das nächste Hydrotop entwässern. Der Auslauf q_{deep_out} wird durch einen Faktor gesteuert. Die Speicher im Blockschutt werden jeweils durch einen linearen Speicher beschrieben. Der Abfluss q_{gw1} tritt auf der Sättigungsfläche aus und wird durch die Speicherkonstante $K_{q_{gw1}}$ geregelt. Wird bei länger anhaltenden Niederschlägen das maximale Speichervolumen erreicht, läuft der Speicher über, und q_{gw2} wird initiiert. Somit ist q_{gw2} eine episodisch auftretende Abflusskomponente, die die nachlaufende Welle

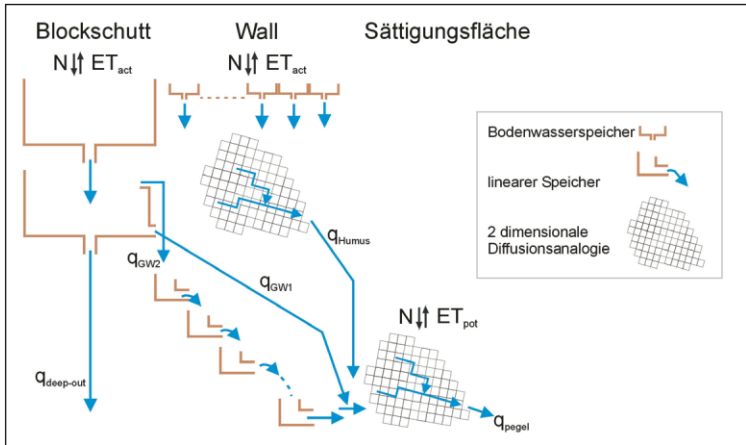


Abb. 8: Modellkonzept zur Berechnung von Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Basisabfluss aus verschiedenen Hydrotopen

Fig. 8: Model concept for calculating surface flow, interflow and baseflow from different hydrotopes.

simulieren soll. Steuerungsgrößen sind das maximale Speichervolumen $S_{q_{gw1}}$ und die Speicherkonstante $k_{q_{gw2}}$. Der Abfluss q_{gw2} durchfließt die Strecke vom Blockschutt bis zur Feuchtoberfläche. Dieser Abflussbildungsprozess wird räumlich verteilt mit Speicherkaskaden berechnet (in Anlehnung an TAC^D; Uhlenbrook et al., in print). Die Rasterzellengröße beträgt $10 \times 10 \text{ m}$ und die Fließrichtung wird durch das DGM bestimmt. Ein weiterer episodischer Abfluss, der schnelle Zwischenabfluss im Wall unterhalb der Humusauflage (q_{Humus}), wird räumlich verteilt basierend auf einem $10 \times 10 \text{ m}$ Raster berechnet. Zwischenabfluss entsteht, wenn der Niederschlag die Feldkapazität in der Humusauflage übersteigt. Der Abfluss wird durch die zweidimensionale Diffusionsanalogie beschrieben. Die Flüsse q_{Humus} , q_{gw1} und q_{gw2} werden an die höchste Rasterzelle der Sättigungsfläche, die an das Hydrotop Wall angrenzt, weitergegeben. Der Sättigungsflächenabfluss wird wie q_{Humus} räumlich verteilt durchfließen durch die zweidimensionale Diffusionsanalogie beschrieben. In der niederschlagsfreien Zeit wird für die Verdunstung die Potentielle Verdunstung angenommen, die nach Penman-Wendling (DVWK, 1996) berechnet wird. Es wird angenommen, dass während eines Niederschlagsereignisses auf der Sättigungsfläche keine Verdunstung stattfindet. Zu Beginn eines Niederschlagsereignisses wird ein vom Basisabfluss zu Ereignisbeginn abhängiger Muldenspeicher aufgefüllt. Für den verbleibenden Effektivregen wird Abflussbeiwert 1 angenommen. Der Pegelabfluss setzt sich somit aus den Flüssen q_{gw1} , q_{gw2} , q_{Humus} und dem Effektivregen zusammen, welche die Fläche räumlich verteilt durchfließen. Die Modellierungsarbeiten sind im Gange. Über Ergebnisse wird später zu berichten sein.

WEITERE ARBEITEN UND AUSBLICK

In Abb. 9 ist das Struktogramm für die Abflussberechnung auf der Mesoskala dargestellt. Es verwendet das Wissensbasierte System „Flächen gleicher Abflussbildung“ (Peschke et al., 1999) zur Ausweisung von Flächen mit gleichem Abflussbildungsmechanismus und setzt für diese Flächen die für die Mikroskala entwickelten Module an. Die aus den Teilflächen kommenden Abflusswellen werden dem Gerinnesystem zugeführt (flood routing) und sodann zum Gebietsabfluss überlagert. Die Arbeiten hierzu beziehen sich auf die Adaptierung des

ursprünglich für Mittelgebirgslandschaften entwickelten Systems FLAB und auf die Erstellung des übergeordneten Programmsystems.

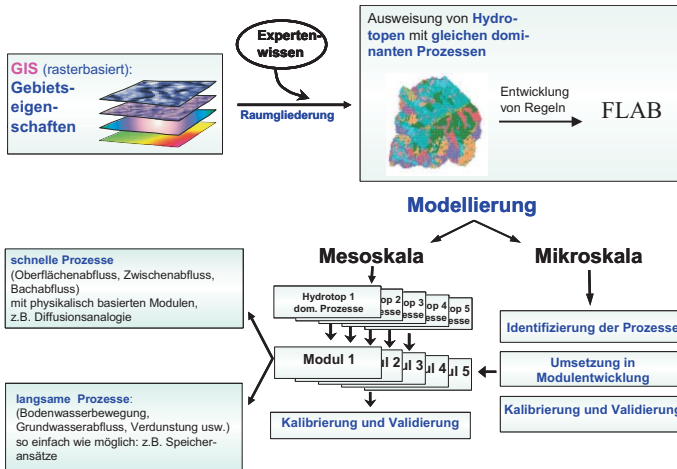


Abb. 9: Modellstruktur des prozessorientierten Einzugsgebietsmodells

Fig. 9: Structure of the process oriented catchment model

ZUSAMMENFASSUNG

Konventionelle hydrometeorologische Beobachtungen hatten klare Hinweise auf unterirdische Abflussprozesse in einem mikroskaligen Teilbereich des hydrologischen Testgebietes Löhnersbach geliefert. Diesen Hinweisen folgend wurden Detailuntersuchungen mit Hilfe von Beregnungsversuchen, Refraktionsseismik und Geoelektrik durchgeführt, deren Aufgabe es war, die Ergebnisse von tracerhydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen besser interpretieren zu können. Aus der Zusammenschau der Untersuchungsergebnisse auf der Mikroskala wurden Module zur Modellierung von ober- und unterirdischem Abfluss als Bausteine für ein prozessorientiertes Abflussmodell für die Mesoskala abgeleitet.

LITERATUR

- Binley, A. M., Beven, K. J., Calver, A., Watts, L. G. (1991): "Changing responses in hydrology: Assessing the uncertainty in physically based model predictions." *Wat. Resour. Res.*, Vol. 27, No. 6, pp. 1253 - 1261.
- DVWK - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1996): „Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.“ *Merkblätter zur Wasserwirtschaft*, 238, Bonn.
- Haas, P., Kirnbauer, R. (1994): "Runoff generation in a small Alpine catchment - observations on different scales." *European Geophysical Society, XIX General Assembly, Grenoble, 25 - 29. April 1994. Annales Geophysicae, Suppl. II to Vol. 12*, p. C 428.
- Hager, W.H. (1990): „Scharfkantiger Dreiecksüberfall.“ *wasser, energie, luft*, Jg. 82, H.1/2, S. 9-14

- Kirnbauer, R. (1994): „Hydrographische Daten - Hydrologische Erkenntnis.“ *ÖIAZ, Österr. Ingenieur Zeitschrift 139 (1994), H. 9, S. 399-407.*
- Kirnbauer, R., Pirkel, H., Haas, P., Steidl, R. (1996): „Abflußmechanismen - Beobachtung und Modellierung.“ *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 48 (1996) H. 1/2, S. 15-26.*
- Kirnbauer, R., Blöschl, G., Haas, P., Müller, G., Merz, B. (2004): “Identifying space-time patterns of runoff generation – A case study from the Löhnersbach catchment, Austrian Alps.” *To appear in "Global Change and Mountain Regions", (U. Huber, M. Reasoner and H. Bugmann, Eds.). KLUWER academic publishers; (in print).*
- Klug-Pümpel, B., Burgstaller, B., Schiffer, R. (1994): „Borstgrasweiden im Schattberggebiet (Land Salzburg): Artengarnitur und Phytomasse.“ *Die Bodenkultur, J. f. landwirtsch. Forschung, Bd. 45, H. 2, S. 99-112.*
- Lang, E. (1995): „Starkregensimulation - ein Beitrag zur Erforschung von Hochwasserereignissen.“ *FBVA - Bericht Nr. 90, 70 Seiten.*
- Markart, G., Kohl, B. (1993a): „Die Böden im Einzugsgebiet des Löhnersbaches / Saalbach.“ *Unveröffentlichter Projektbericht an das BMLF, Wien.*
- Markart, G., Kohl, B. (1993b): „Berechnungen im Einzugsgebiet des Löhnersbaches / Saalbach.“ *Unveröffentlichter Projektbericht an das BMLF, Wien.*
- Nobilis, F., Bergmann, H., Müller, G. (2002): „Hydrologische Versuchsgebiete in Österreich – Erfahrungen, nationale und internationale Anforderungen, Zukunftsaspekte.“ *In: Mitteilungsblatt d. Hydrographischen Dienstes in Österreich. Hrg.: Hydrographisches Zentralbüro, Wien, Nr. 81, S. 1-126 (Löhnersbach: S. 84-91)*
- Peschke, G., Etzenberg, CH., Müller, G., Töpfer, J., Zimmermann, S. (1999): „Das wissensbasierte System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung.“ *IHI-Schriften H. 10; Internationales Hochschul-Institut Zittau. 122 S., zahlr. Abb.*
- Pirkel, H. (1989): „Erarbeitung der Zusammenhänge zwischen Hanginstabilitäten und -labilitäten, Hangwasserhaushalt und Massenbewegungen in Teilen des Zentralalpenkristallins.“ *Österreichische Akademie der Wissenschaften, Geologische Bundesanstalt, Wien. Unveröffentlichter Forschungsbericht, Kartierung.*
- Pirkel, H. (1993): „Arbeitsunterlagen für eine interdisziplinäre Fachdiskussion zur Auswertung und Verknüpfung von Kartierungsinhalten - Einzugsgebiet Löhnersbach / Saalbach.“ *Unveröff. Forschungsbericht, Wien 1993.*
- Schaffhauser, H. (1982): „Untersuchungen über das Abflussverhalten verschieden bewirtschafteter Versuchsflächen.“ *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt, Band 144: 85 - 101.*
- Schaffhauser, H. (1988): „Berechnungsversuche im Einzugsgebiet des Dürnbaches.“ *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Band 161: 147 - 159.*
- Schiffer, R., Burgstaller, B. (1990): „Vegetationskartierung Löhnersbach.“ *Unveröff. Forschungsbericht / Thematische Karte.*
- Tilch, N., Uhlenbrook, S., Didszun, J., Leibundgut, CH., Zillgens, B., Kirnbauer, R., Merz, B. (2003): „Entschlüsselung von Abflussbildungsprozessen mit Hilfe tracerhydrologischer Ansätze in einem alpinen Einzugsgebiet.“ *Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 55 (2003), H. 1/2, pp. 9-17.*
- Uhlenbrook, S., Roser, S., Tilch, N., (2003): „Hydrological process representation at the meso-scale: The potential of a distributed, conceptual catchment model.“ *Journal of Hydrology, in print.*