

Sonderdruck aus Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen

30. 1986, H. 4, S. 85-93

Anwendung von Tracertechniken zur Erfassung des Wasserumsatzes in kleinen Einzugsgebieten

Stand und Fortgang der Arbeiten

Application of Tracer Techniques to Determining the Water Balance in Small Catchment Basins

Status and Future Steps

von Andreas Herrmann, Jürgen Koll, Christian Leibundgut, Piotr Maloszewski, Rolf Rau,
Werner Rauert und Willibald Stichler

Fortsetzung aus dem Juliheft 1984 / Continued from the July issue 1984

DK [621.039.85+543.42]:556.512.01.028(234.539)(047.1)

Es wird an das Forschungskonzept angeknüpft und mit ausgewählten Untersuchungsergebnissen der derzeitige Stand der systemhydrologischen Modellierung des Oberharzer Einzugsgebiets Lange Bramke verdeutlicht. Daraus ergeben sich einige neue Schwerpunkte für das weitere Vorgehen.

Rejoining the preliminary study concept, some selected research results are given in order to make clear the present state of systemhydrological modelling of the Lange Bramke basin in the Upper Harz Mts. This has led to some new aspects to be considered in future work.

1 Problemstellung und Lösungsansatz

Mit dem in [7] dargelegten Forschungskonzept sollen durch kombinierten Umwelt- und Fluoreszenztracereinsatz neue, prozeßorientierte Erkenntnisse über den Abflußmechanismus und die unterirdische Speicherdynamik in kleinen, bewaldeten Einzugsgebieten der paläozoischen Mittelgebirgsregion gewonnen werden. Wichtige Voraussetzungen für eine Realisierung dieser Ziel-

vorstellung sind: zuverlässige hydrologische Daten, detaillierte hydrogeologische Kenntnisse und sorgfältige Beprobungen und Analysen der durch natürliche Flächeninjektionen mit Umweltisotopen (^3H , ^2H , ^{18}O) und absichtliche Punkteinjektionen fluoreszierender Tracer (Naphthionat, Pyranin, Eosin, Uranin) markierten ober- und unterirdischen Komponenten des Gebietswasserkreislaufs.

Bodenwasserprobenahmen für Isotopenanalysen erfolgen seit 1984 an den beiden Input-Versuchsflächen im Freiland und Wald aus verschiedenen Tiefen über Saugkerzen, an die ein Unterdruck von 200 hPa angelegt wird. Die oberflächennahen Infiltrationswässer werden mit 1000 cm² großen Aufangschalen gesammelt [10]. Außerdem stehen bis auf die Wintermonate Bodenwasserproben von der Oberbodenbasis bei 80 cm an vier Hangstandorten des Bodenwasserprojekts des Instituts für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen zur Verfügung.

2.2 Umweltisotope

Die folgende Auswahl von Isotopengehaltsganglinien einiger Teilkomponenten des Wasserkreislaufs in der Lange Bramke gibt einen Eindruck von der Variationsbreite der natürlichen Tracerkonzentrationen. Ihre physikalisch-hydrologische Detailbearbeitung mußte bislang weitgehend zugunsten der vorrangigen Verifikation des Einzugsgebietsmodells zurückgestellt werden. Der Meßfehler des Isotopengehalts der Wasserproben beläuft sich für $\delta^{18}\text{O}$ auf $\pm 0,15\%$, für ^3H auf 7-10% vom Meßwert. Der getriebene experimentelle Aufwand erscheint in Hinblick auf zuverlässige Mittelwertbildungen, Ereignisanalysen auf Grundlage hoher Informationsdichte und die Entwicklung mathematischer Modelle für den instationären Fall den nachstehenden Ergebnissen zufolge gerechtfertigt.

2.2.1 Niederschläge und Abflüsse

Die ^{18}O -Gehalte der Niederschläge und Abflüsse beschreiben Abb. 2 zufolge typische sinusförmige Jahresgänge. Die Isotopengehalte der Abflüsse sind gegenüber denjenigen der Niederschläge durch die Speicherwirkung des Einzugsgebiets bei kaum merklichen Phasenverschiebungen wie im alpinen Lainbachtal

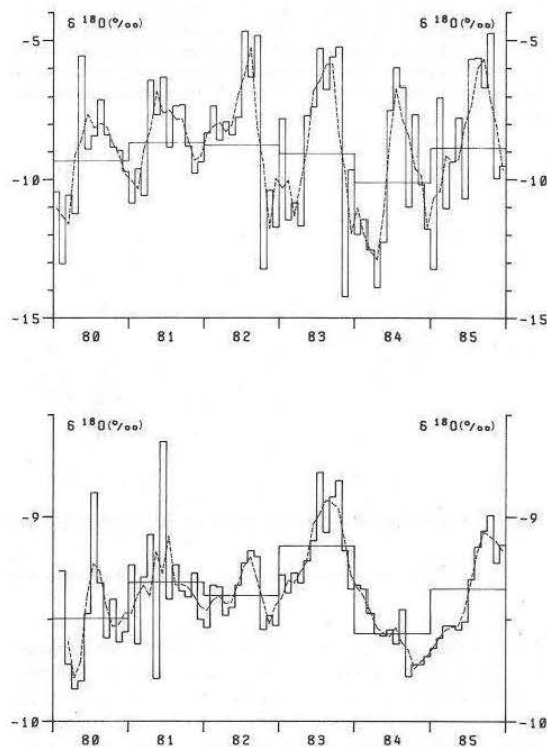


Abb. 2 Gewichtete Monats- und Jahresmittelwerte der ^{18}O -Gehalte der Niederschläge und Abflüsse der Lange Bramke mit übergreifenden Mitteln der Monatsmittelwerte (gestrichelt)

Weighted monthly and annual means of ^{18}O contents of precipitation and runoff with overlapping means of monthly mean values (dashed lines), Lange Bramke basin

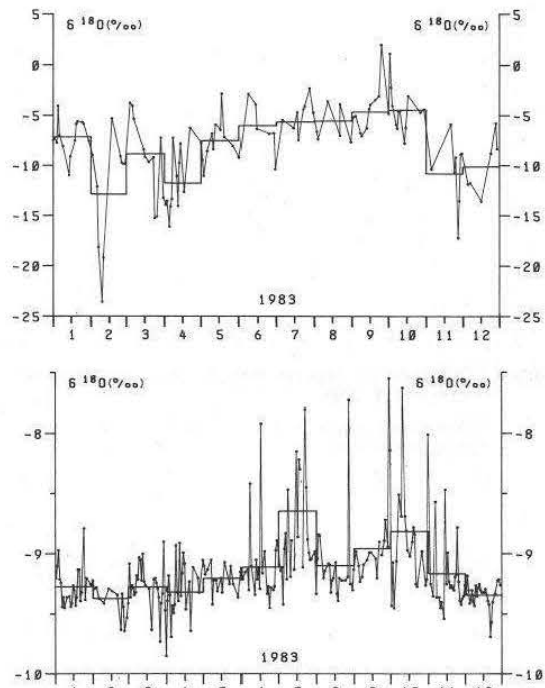


Abb. 3 Gewichtete Tages- und Monatsmittelwerte 1983 der ^{18}O -Gehalte der Niederschläge und Abflüsse Lange Bramke

Weighted daily and monthly means in 1983 of ^{18}O contents of precipitation and runoff, Lange Bramke basin

[20] um rd. 9/10 gedämpft. Die gegenüber alpinen Einzugsgebieten erschwerten Untersuchungsbedingungen dokumentieren sich u.a. in der Amplitudendämpfung der Outputfunktion bis an die Meßgenauigkeit als Folge der um rd. 1/4 reduzierten Inputschwankungsbreite.

Als Konsequenz wurden die Probenahmen an Niederschlägen und Abflüssen 1983 automatisiert. Kleinste Analyseeinheiten für die Erzeugung von Jahresreihen sind gewichtete Tagesmischproben. So kann, wie in Abb. 3 zu erkennen ist, auch im Einzelfall der systembedingte Dämpfungseffekt mit den im Abfluß gekappt erscheinenden Isotopengehaltsspitzen der Niederschläge belegt werden. Auf den Einfluß der zwischengeschalteten Schneedeckenspeicher wird weiter unten eingegangen.

Auf Tageswertbasis erfolgt auch die Auswahl der für Separationen der Direktabflußkomponente geeigneten Abflußereignisse, die als der Abflußanteil mit der Isotopenkonzentration des aktuellen Inputs definiert ist. Ihre Anzahl ist wegen vergleichsweise mäßiger isotopischer Inputvariationen bzw. seltener signifikanter Tracersignale im Abfluß sehr beschränkt.

Darunter fallen bevorzugt Schneeschmelzperioden und Starkregenereignisse mit isotopischer Signalwirkung wie am 4./5. 9. und besonders am 6. 9. 1984 (Abb. 4), als innerhalb von 16 h 74 mm isotopisch leichte Niederschläge, bezogen auf $\delta^{18}\text{O} = -9,38\%$ des reinen Grundwasserabflusses, fielen. Durch Beimischung aktuellen Niederschlagswassers ist im Abfluß eine merkliche isotopische Abreicherung auszumachen (Abb. 5). Der außergewöhnlich hohe Direktabflußanteil dieser Hochwasserwelle läßt sich auf durchschnittlich 1/4, zur Zeit des Spitzenabflusses auf 1/3 abschätzen. Wie schon in anderen Gebieten [19, 20] wird somit auch im paläozoischen Mittelgebirge der analytische Nachweis der Generierung von Hochwasserganglinien durch beträchtliche Grundwassereinspeisungen in den Vorfluter geführt.

Demgegenüber ist der Niederschlag am 8. - 12. 9. 1984 (Abb. 4) beim derzeitigen Modellierungsstand für Direktabflußseparationen nicht geeignet, da im Zuge seiner allmählichen isotopischen Anreicherung der Hintergrundwert der Grundwasserkomponente gekreuzt wird. Andererseits verdeutlicht dieses Niederschlagsereignis den hohen Informationswert automatischer Beprobungen mit der Auflösung $h_N = 1$ mm. Derartige Isotopengehaltsvariationen lassen sich ursächlich nur unter Hinzuziehung synoptisch-meteorologischer Informationen erklären [18]. Solche Detailstudien stehen noch aus.

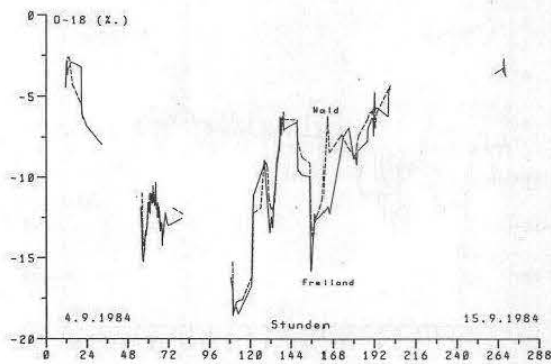


Abb. 4 ^{18}O -Gehalte der Niederschläge in den Längen Bramke vom 4. - 15. 9. 1984

^{18}O contents of precipitation on September 4-15, 1984, Lange Bramke basin

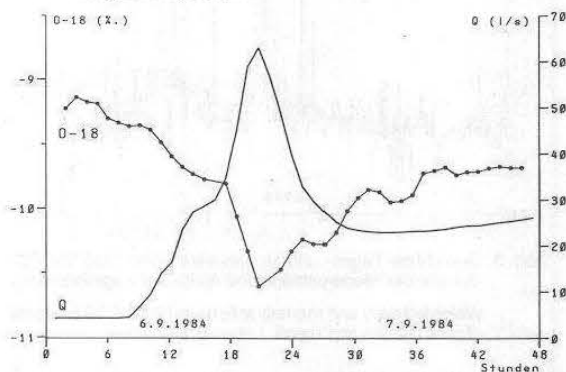


Abb. 5 Hochwasserganglinie (Q) der Längen Bramke mit ^{18}O -Gehalten (0-18) der Abflüsse

Flood hydrograph of the Lange Bramke River (Q) and ^{18}O contents of total runoff

Das ^3H -Input- und Outputverhalten (Abb. 6) ist in jüngster Zeit durch unregelmäßige Schwankungen auf einem absolut niedrigen Level gekennzeichnet. Im nachhinein erweisen sich also die während der Vorstudie ab 1980 an den Niedrigwasserabflüssen gezogenen Wasserproben, die bei 75 TU ansetzen und in der

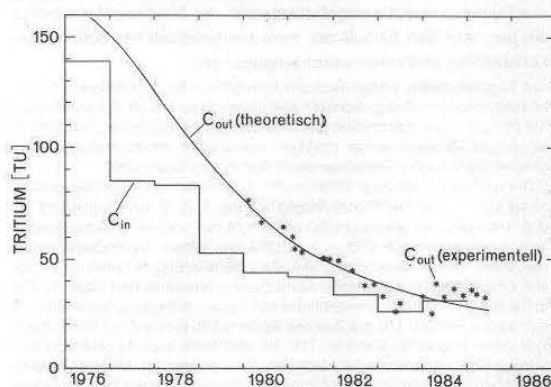


Abb. 6 Mittlerer jährlicher ^3H -Input an der DWD-Station Braunschweig und Outputfunktion der Längen Bramke bei Niedrigwasserführung unter Verwendung des Dispersionsmodells DM ($t_0 = 30$ Monate; $D/vx = 0.15$) [7]

Mean annual ^3H input at the Braunschweig German Weather Service station and output function of the Lange Bramke basin under low discharge conditions from application of the dispersion model DM ($t_0 = 30$ months; $D/vx = 0.15$) [7]

Folge exponentiell auf um 30 TU schwankende Werte absinken, als überaus wertvoll für die Anwendung mathematischer Fließmodelle.

2.2.2 Schneedeckenspeicher

Im Rahmen des schneehydrologischen Teilziels des Projekts (physikalisch begründete Modellierung der Schneedeckenspeicher, -schmelze und -schmelzabflüsse) ist eine zeitlich-räumlich hochaufgelöste Überwachung des winterlichen Isotopeninputs gewährleistet. Dabei ist zu bedenken, daß der hydrologisch relevante isotopische Systeminput über die Schneedeckenausflüsse erfolgt. Ihre Isotopengehalte unterscheiden sich fraktionierungs- und austauschbedingt vom durchschnittlichen Isotopengehalt des durch Akkumulation von Einzelniederschlägen stratifizierten Schneedeckenspeichers [5]. Grundlegende Einblicke in diese Zusammenhänge erlauben die Lysimeterschneedecken, deren Ausflüsse automatisch gemessen und beprobt werden [21].

Abb. 7 zufolge wird die erstmals aus dem Lainbachtal berichtete ^{18}O -Anreicherung einer Fichtenbestands- gegenüber der benachbarten Freilandschneedecke um durchschnittlich 2‰ [18] bestätigt. Die Anreicherungen beider Schneedecken um die Jahreswende 1983/84, vor allem aber während der ausgeprägten Schmelzperioden im März und April 1984, sind typisch. Hierin spiegeln sich die abschmelzbedingten Verluste der leichten Isotopenfraktion über Schneedeckenausflüsse als Kombinations-effekt aus der Isotopenstruktur (isotopische Stratifikation) der Schneedecke und der Isotopenfraktionierung beim Schmelzprozeß wider.

Isotopenfraktionierende Verdunstungseffekte sind quantitativ gering einzuschätzen [21]. Da die isotopischen Anreicherungen bereits an frisch abgelagertem Neuschnee beobachtet werden, dürfte vor allem der Isotopenaustausch zwischen Schneekristallen und dem Wasserdampf im Bestand hierfür verantwortlich sein. Aufklärung wird u. a. von Luftfeuchteproben erwartet, die ab Winter 1985/86 mit Hilfe von Kühlfallen gezogen werden. Vergleichbare systematische Abweichungen wurden an Regenwasserproben noch nicht nachgewiesen.

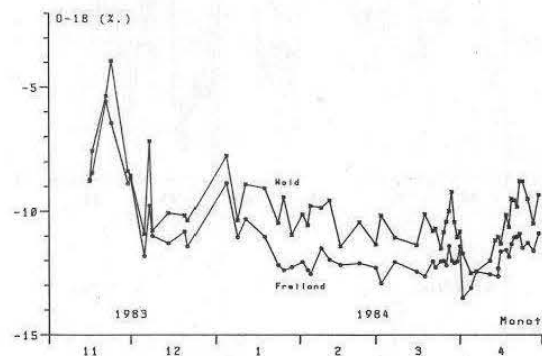


Abb. 7 ^{18}O -Gehalte von Lysimeterschneedecken im Freiland und Wald

^{18}O contents of lysimeter snow covers in open area and forest

Wie nach Abb. 7 zu erwarten, sind die ^{18}O -Gehalte der Ausflüsse der Lysimeterschneedecken im Wald höher (Abb. 8). Schmelzperioden sind analog der allmählichen Anreicherung der Restschneedecken an den aufsteigenden Ästen der Isotopengehaltsganglinien der Ausflüsse abzulesen. Somit werden die in Labor- und alpinen Feldexperimenten gewonnenen Ergebnisse [5] bestätigt.

Die ^{18}O -Konzentrationen der Abflüsse Lange Bramke zeichnen den Zeitraum der Vor- und Hauptschmelze im März/April 1984 durchschnittlich durch Abreicherung nach (Abb. 9). Im einzelnen ist im Zuge der Abflüßvorspitze durch Beimischung aktueller Schmelzwässer eine generelle isotopische Abreicherung zu vermerken, gefolgt von einer Anreicherung zurück

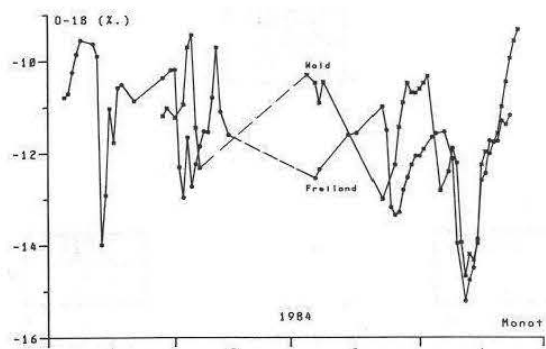


Abb. 8 Gewichtete Tageswerte der ^{18}O -Gehalte der Ausflüsse von Lysimeterschneedecken im Freiland und Wald

Weighted daily means of ^{18}O contents of runoff from open area and forest lysimeter snow covers

auf den Hintergrundwert des Grundwassers ab Beginn der Hauptschmelze und Einspeisung der quantitativ bedeutenden schwereren Isotopenfraktionen. Der Direktabflußanteil liegt mit rd. 10%, bei einem Spitzenwert von 20% am 16. 4., der auch während des ungewöhnlichen Märzhochwassers 1981 infolge der Duplizität von Schneeschmelze und ergiebigen Regenfällen nicht übertroffen wurde [9], deutlich unter den alpinen Werten [19, 20], entsprechend einer noch bedeutenderen Grundwassereinspeisung in den Vorfluter.

Für die Weiterentwicklung der mathematischen Fließmodelle werden künftig Detailinformationen über den tatsächlichen isotopischen Gebietsinput aus Schneedeckenspeichern benötigt. Für derartige Modellinputfunktionen spielen neben isotopischen Fraktionierungs- und Austauschereffekten in den Schneedecken letztlich auch deren mechanische Speichereigenschaften bzw. hydraulische Leitfähigkeiten eine wichtige Rolle. Insofern haben die kombinierten hydrologischen, energetischen und isotopischen Schneedeckenexperimente einen hohen Stellenwert.

2.2.3 Bodenspeicher (BS)

Die isotopischen Bodenwasserexperimente dienen Bestimmungen von Sickergeschwindigkeiten, hydraulischen Parametern wie der mittleren Verweilzeit (t_0) und der isotopischen Inputfunktionen der nachgeschalteten Speicher PS und KS. Die im vorherrschend hängigen Gelände zu berücksichtigenden lateralen Wasserflüsse

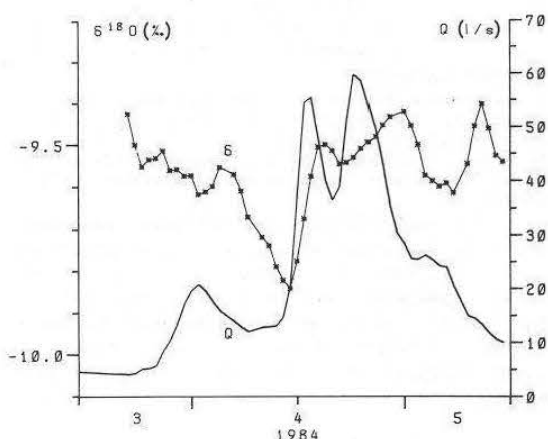


Abb. 9 Mehrfach übergreifende Mittel der gewichteten täglichen ^{18}O -Gehalte (s) der Abflüsse Lange Bramke (Q) vom 15. März bis 15. Mai 1984

Multiple overlapping means of weighted daily ^{18}O contents (s) of total runoff with discharge (Q) of the Lange Bramke River, 15 March to 15 May 1984

und die Substratheterogenität erschweren diese Aufgaben. Daher können nur vieljährige Meßreihen zu befriedigenden Ergebnissen führen.

Die Isotopengehalte der Infiltrationswässer (Abb. 10, 5 cm), die den tatsächlichen Input in das unterirdische System repräsentieren, weisen bei etwas höheren und geringfügig gedämpften Werten im Wald an beiden Versuchsstandorten einen synchronen Verlauf auf. Mit der Tiefe erscheinen die jahreszeitlichen Variationen zunehmend gedämpft und phasenverschoben. Diese Effekte setzen sich bis in die größte Beprobungstiefe von 130 cm fort. Das Beispiel beweist, daß auch beim Bodenspeicher nur systematische engständige Beprobungen die für realitätsgerechte Simulationen mit mathematischen Fließmodellen benötigten Ganglinien liefern. Dazu soll der bei [22] vorgestellte Ansatz verfolgt werden.

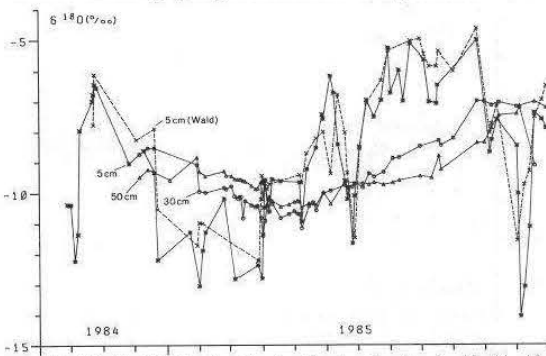


Abb. 10 Übergreifende Mittel der Einzelwerte der ^{18}O -Gehalte des Bodenwassers in verschiedenen Tiefen, Freiland und Wald (nur 5 cm)

Overlapping means of single values of ^{18}O contents of soil water at various depths, in open area and forest (5 cm only)

2.2.4 Porengrundwasserspeicher (PS)

Im hydrologischen Systemmodell Lange Bramke (Abb. 1) wird angenommen, daß die dominante indirekte Abflußkomponente Q_0 - Q_3 aus PS in den Vorfluter eingespeist wird. Mit Kenntnis der hydraulischen Eigenschaften von PS lassen sich folglich auch Schlüsse über Abflußbildungsmechanismen ziehen.

Abb. 11 belegt nachdrücklich den Wert engständiger Probenahmen für Beurteilungen der Hydrodynamik in PS. In beiden Entnahmetiefen sind nach unten zunehmende Dämpfungen gegenüber den Isotopengehalten der aktuellen Systeminputs aus Regen- und Schmelzwässern auszumachen. Den Grundschnittpunkten der Kurven sind bei quantitativ bedeutenden Einträgen wie dem isotopisch leichten Schmelzwasser im März/April 1984 markante Spitzen aufgesetzt, denen im einzelnen ursächlich noch nachzugehen ist. Mit der Bearbeitung der in Höhe des Pegels, in Talauenmitte und am bergwärtigen Ende von PS erhobenen Isotopengehaltsganglinien wird neben einer Abschätzung von t_0 vor allem eine quantitative Bewertung der lateralen Flüsse aus BS und KS angestrebt.

2.2.5 Kluftgrundwasserspeicher (KS)

Über die Isotopengehalte von Kluftgrundwässern liegen für zuverlässige hydrologisch-hydraulische Interpretationen noch zuwenig Daten vor. Grundsätzliche Probleme verursachen die beträchtlichen mittleren Verweilzeiten der Kluftwässer in der Größenordnung von Jahren, gleichbedeutend hohen Amplitudendämpfungen bei den stabilen Isotopen. Für die Speicheransprache mittels Tritium scheinen die Voraussetzungen etwas günstiger zu sein. Immerhin beginnt sich im Stollenbereich isotopisch ein Zweiboxen-Kluftwassersystem mit stärkeren Variationen der ^{18}O -Gehalte der aus den kräftiger schüttenden Klüften austretenden Wässer in den

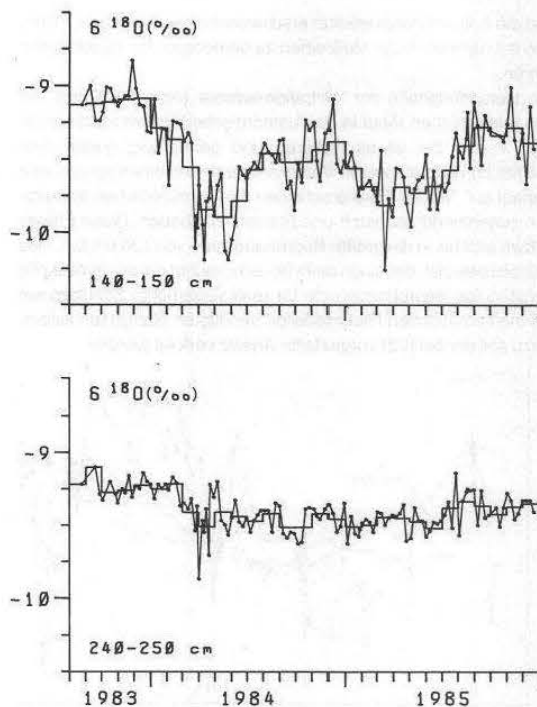


Abb. 11 Einzelwerte und Monatsmittelwerte der ^{18}O -Gehalte des Porengrundwassers in Höhe des Pegels Lange Bramke in 140 - 150 cm und 240 - 250 cm unter GOK

Single values and monthly mean values of ^{18}O contents of pore groundwater near the Lange Bramke gauge at 140 - 150 cm and 240 - 250 cm below surface

Hauptstörungszonen abzuzeichnen. Die ^3H -Gehalte bewegen sich auf der beprobten Stollenstrecke zwischen 30-50 TU.

Im Juni 1985 wurde mit Injektionen von Uranin, Eosin und Naphthionat in das gestörte und ungestörte Anstehende nahe der Wasserscheide zum Winteral ein erster Markierungsversuch gestartet. Trotz aufwendiger Überwachungen konnte bislang noch kein Tracernachweis geführt werden.

2.3 Mathematische Modelle

2.3.1 Fließmodelle

Die verwendeten mathematischen Fließmodelle, mit denen das schwierige Rückwärtsproblem der Auffindung von relevanten, physikalisch begründeten Fließparametern als Zielgrößen durch optimale Anpassung der theoretischen an die experimentell gefundene Traceroutputfunktion eines Speichers gelöst werden soll, wurden nach den zwischenzeitlichen Erfahrungen gegenüber [7] um modifizierte Versionen erweitert. Alle Modelle sind in Abb. 12 aufgeführt.

Das auf die porösen Subspeicher BS und PS angewendete Dispersionsmodell DM beinhaltet die beiden Fließparameter mittlere Verweilzeit des Wassers (t_0) und die Dispersionskonstante (D/vx). Die Anwendung des Parallelklutmodells PFDM auf KS muß bei vier unbekannten Fließparametern (t_0 ; D/vx ; a ; p) so lange zurückgestellt werden, bis für a oder p realistische Näherungswerte vorliegen. In deren Definition bedeuten: $2b$ die Öffnungsweite der Klüfte, D_p die Molekulardiffusion in der Festgesteinsmatrix, n_i und n_p die Porositäten der Klüfte und der Festgesteinsmatrix. Nach den Ergebnissen von [12, 13] kann auf KS vorübergehend das gewöhnliche Dispersionsmodell ODM angewendet werden, da die Fließgeschwindigkeiten klein sind, d. h. $t_0 > 1$ Jahr ist. ODM hat zwei Fließparameter: die mittlere Verweilzeit des Tracers \bar{t} und D/vx^* , das die Dispersion der Outputfunktionen als Ergebnis der Dispersion in den Klüften und der Diffusion in die poröse Matrix beschreibt. Mit \bar{t} kann nur das Gesamtvolumen aus gebundenem und beweglichem Wasser abgeschätzt werden. Gesucht ist aber t_0 , das über den sog. Retardationsfaktor R mit \bar{t} verknüpft ist. Für experimentelle Bestimmungen von R werden wiederum die beiden Porositäten (n_i , n_p) benötigt.

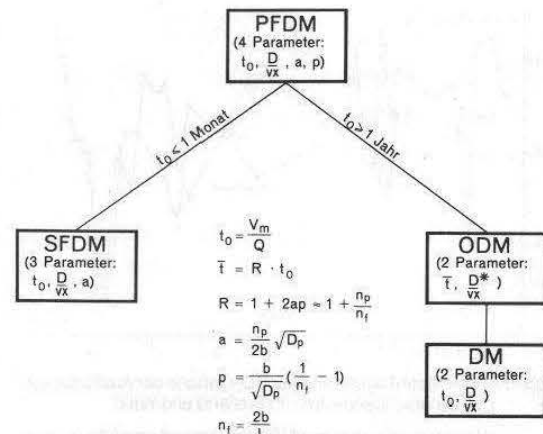


Abb. 12 Mathematische Fließmodelle mit hydraulischen Parametern und deren Definitionen

Mathematical flow models including hydraulic parameters and their definitions

Das Parallelklutmodell PFDM liefert im Fall sehr schneller Wasserflüsse durch die Klüfte mit $t_0 \leq 1$ Monat denselben Systemoutput wie das Einklutmodell SFDM mit nur drei Fließparametern (t_0 ; D/vx ; a). Da durch die geringe Tracerdiffusion in die Festgesteinsmatrix eine gegenseitige Beeinflussung benachbarter Klüfte zu vernachlässigen ist, ist SFDM vor allem für Kunst-tracerexperimente über kurze Distanzen geeignet, wo es auch eingesetzt werden soll. Aus der einfacheren Anpassung resultiert meist nur ein einziger Parametersatz.

Die mit Abb. 12 skizzierten Zusammenhänge zwischen Zielgrößen, Aquifertypen, spezifischen Modellversionen, Fließparametern und relevanten hydrogeologischen Kenngrößen verdeutlichen den vielschichtigen Abstimmungsbedarf zwischen Modelltheorie und Experiment. Besonderer Wert wird auf möglichst vielseitige, voneinander unabhängige Verifikationen von Modellparametern gelegt, wobei KS die bei weitem größten Probleme stellt.

2.3.2 Direktabflußseparation und Bestimmung des Infiltrationskoeffizienten α

Der Direktabfluß ($Q-Q_0$) wird im hydrologischen Modell (Abb. 1) als Bypasskomponente behandelt. Für die Bestimmung der Direktabflußanteile mit der Mischungsformel, die auf Monatswertbasis erfolgt, werden die ^{18}O -Konzentrationen des Inputs (Q), des Abflusses ($Q-Q_0$) und des indirekten Abflusses (Q_0-Q_3) benötigt. Letztere können nicht gemessen, sondern nur auf indirektem Wege bestimmt werden.

Bei Anwendung von DM auf die ^3H -Input- und Outputfunktionen bei Niedrigwasserführung (= Grundwasserabfluß) wird die beste Anpassung an die beobachteten Werte mit $t_0 = 30$ Monate und $D/vx = 0.15$ erzielt. Wird nun DM mit diesen Parameterwerten auf die ^{18}O -Inputfunktion angewendet, erhält man die theoretischen ^{18}O -Konzentrationen der indirekten Abflußkomponente [4, 6].

Für numerische Modellierungen von Grundwasserflüssen ist die Kenntnis der Tracerinputfunktion in das Grundwassersystem unerlässlich. Dazu bedarf es u. a. realistischer Vorstellungen über den Infiltrationskoeffizienten (IK) α . Die Idee der folgenden IK-Bestimmung mit Hilfe von Messungen stabiler Isotope geht auf die Abschätzung von mittleren jährlichen ^3H -Inputkonzentrationen für Grundwassersysteme mit einem einfachen Infiltrationsmodell zurück [2]:

$$C_{in} = \sum_{i=1}^{12} \alpha_i P_i C_i / \sum_{i=1}^{12} \alpha_i P_i \quad (1)$$

worin P_i die Niederschlagshöhe, C_i die ^3H -Konzentration des Niederschlags, α_i der IK und i der Monat ist.

Es ist praktisch unmöglich, α_i für einzelne Monate und Jahre zu bestimmen. Als vereinfachende Annahme werden daher die

monatlichen sommerlichen IK α_s (April-September) und die winterlichen IK α_w (Oktober-März) konstant gesetzt. Mit

$$C_{in} = (\alpha \sum_s P_i C_i + \sum_w P_i C_i) / (\alpha \sum_s P_i + \sum_w P_i) \quad (2)$$

worin s und w für die Sommer- und Wintermonate eines Jahres stehen und

$$\alpha = \alpha_s / \alpha_w \quad (3)$$

ist, läßt sich der ^3H -Input für jedes Jahr getrennt berechnen. Unter Verwendung der stabilen Isotope kann mit dem Modell α bestimmt werden.

Die ^{18}O -Gehalte schwanken ebenfalls saisonal, doch anders als beim Tritium kann die mittlere ^{18}O -Konzentration im Grundwasser aufgrund der hohen Verweilzeit konstant gesetzt werden. Dieser Mittelwert $\bar{\delta}$ kann unabhängig durch Messungen am Grundwasserabfluß bestimmt werden. Dazu wird in Gl. (2) C_i durch δ_i ersetzt, dem gewichteten mittleren Isotopengehalt der Niederschläge im i-ten Monat. Diese neue Gleichung beschreibt nun keine Jahresmittel mehr, sondern die mittlere Outputkonzentration des gesamten Beobachtungszeitraums, d. h. für n Jahre oder $6 \cdot n$ Monate. Da $\bar{\delta}$ aus Messungen des Grundwasserabflusses bekannt ist, läßt sich α ableiten [3]:

$$\alpha = (\sum_w P_i \delta_i - \bar{\delta} \sum_w P_i) / (\bar{\delta} \sum_s P_i + \sum_s P_i \delta_i) \quad (4)$$

Für die Lange Bramke und den Zeitraum 1980-84 errechnet sich mit $\bar{\delta} = -9.38\text{‰}$, $\sum_s P_i = 2433 \text{ mm}$ und $\sum_w P_i = 2616 \text{ mm}$ der Infiltrationskoeffizient $\alpha = 0.4$. Dieser Wert besagt, daß der winterliche IK ein 2.5faches des sommerlichen beträgt. An einer Verbesserung dieser Näherung auf Grundlage der tatsächlichen Infiltrationsverhältnisse wird gearbeitet.

2.4 Einzugsgebietsmodell Lange Bramke

Wegen des Bedarfs an zuverlässigen experimentellen Daten und verfeinerten theoretisch-mathematischen Ansätzen können eine Verifikation und Erweiterung der hydrologischen Modellvorstellung über das Einzugsgebiet Lange Bramke (Abb. 1) nur sukzessive erfolgen. Ausgehend von der konzeptionellen Projektplanung [7] über erste grobe Abschätzungen [8] und eine schon recht brauchbare Näherung [6], bei der allerdings BS und KS noch als eine einzige Box (BS + KS) behandelt wurden, ließ sich inzwischen der mit Abb. 13 beschriebene Stand erreichen. Über die Ableitung einzelner Größen informiert zusammenfassend [4].

Der Direktabflußanteil beläuft sich lediglich auf 11.5% oder 80 mm/a, d. h. die Abflüsse werden dominant aus unterirdischen Reservoirs gespeist.

Als hydraulische Erklärung für die Diskrepanz zwischen kleinen unterirdischen Fließgeschwindigkeiten und hohen Wasserumsätzen kommt in An-

lehnung an [16] auch hier der Verstärkungseffekt der Exfiltration von Grundwasser in den Vorfluter durch Versteilung des Potentialgefälles beim Infiltrationsvorgang in Betracht. Derartige lokale Grundwasserspiegelanhebungen, die mit der Infiltration einsetzen, eine Einengung des Kapillarsaums bedeuten und [17] zufolge unter ungesättigten Bedingungen offensichtlich schneller erfolgen, dürften auch wesentlich zu variablen Einspeisungen von Grundwasser aus KS in PS beitragen.

Entsprechend hoch fällt mit 670 mm/a die minimale Infiltrationsrate aus, gleichbedeutend der Summe aus indirektem Abfluß Q_0 - Q_3 (620 mm/a) und dem auf 50 mm/a geschätzten unterirdischen Abstrom Q_3 aus KS in das Wintertal. Die Grundwasserneubildungsrate, die sich aus hydrologischen Daten auf größenordnungsmäßig 200 mm/a abschätzen läßt, wird erst mit Kenntnis des Wasserflusses Q_{08} - Q_1 von BS nach KS genauer faßbar sein. Auch die schwierige Bestimmung der Einspeisungsrate Q_1 von BS in PS steht noch aus.

Die mittleren Verweilzeiten des Wassers t_0 in BS (1.08 a) und PS (0.33 a) lassen in Anbetracht von $t_0 = 2.5$ a für das gesamte unterirdische Reservoir, das sich aus der indirekten Abflußkomponente Q_0 - Q_3 abschätzen läßt, einem unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse und der Ergebnisse vergleichbarer Studien in Mitteleuropa [19, 20] sehr plausiblen Wert, auf entsprechend hohe Verweilzeiten der Kluftgrundwasser schließen. Folgerichtig werden sich die künftigen Arbeiten hauptsächlich auf KS und damit die Anwendung von PFDM konzentrieren, wobei experimentelle Bestimmungen der beiden Porositäten n_1 und n_2 und Nachweise hydraulischer Verbindungen höchste Priorität haben.

3 Schlußfolgerungen

Aus der Kombination konventioneller Untersuchungsverfahren mit modernen Tracertechniken und unter Verwendung hydrologisch relevanter mathematischer Modellvorstellungen lassen sich bislang nicht erreichte Einblicke in Wasserumsatz und Speichereigenschaften natürlicher hydrologischer Systeme kleiner Einzugsgebiete erzielen. Der Fortschritt gegenüber den letzten Bestandsaufnahmen auf dem Gebiet der tracerhydrologischen Systemanalyse [19, 20] sollte aber nicht allein an den vielen neuen Problemstellungen und offenen Fragen gemessen werden. In diesem Projekt ist daher inzwischen eine Umorientierung im Sinne einer Konzentration auf detaillierte Speicheranalysen erfolgt.

Neben den zahlreichen Einzelaufgaben zur Ergänzung der bisherigen Informationen, vor allem zur hydrogeologisch-hydraulischen Erschließung des Kluftwassersystems, sollte auch noch ein grundsätzliches Problem bewältigt werden, wofür das Projekt nicht zuletzt wegen der gut belegten Isotopengehaltsganglinien denkbar günstige Voraussetzungen bietet. So behandeln alle bisherigen Modellansätze Einzugsgebiete und Subreservoirs als stationäre Systeme mit konstanter Zu- und Ausflußrate. Erst wenn es gelingt,

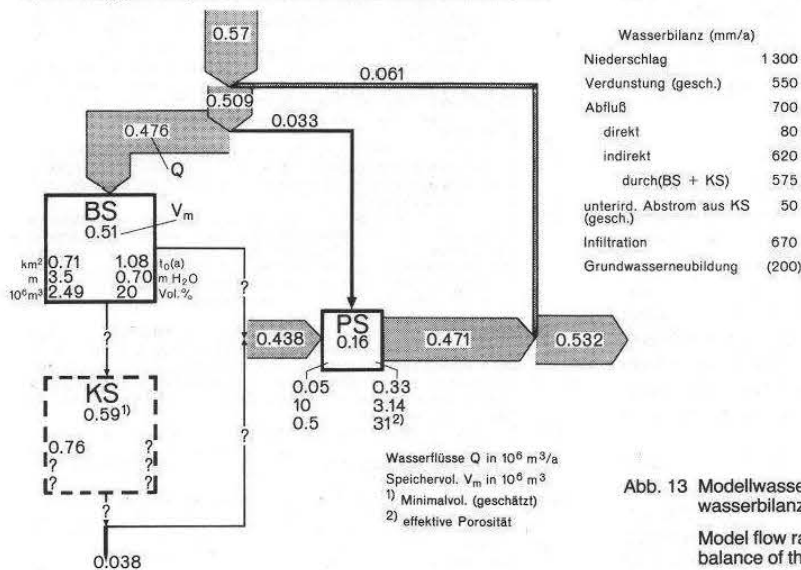


Abb. 13 Modellwasserflüsse mit Speicherkenngrößen und Modellwasserbilanz im Einzugsgebiet Lange Bramke

Model flow rates with reservoir features and model water balance of the Lange Bramke basin

adäquate Massenbilanz- bzw. Transportgleichungen für Umwelt-tracer und damit mathematische Fließmodelle auch für den instationären Fall zu formulieren [23], ist der entscheidende Durchbruch erreicht.

Zusammenfassung

Nach der Vorstellung des systemanalytischen Forschungsansatzes, der seit einigen Jahren in den kleinen Oberharzer Untersuchungsgebieten verfolgt wird und die mathematische Modellierung der Wasserflüsse und hydrogeologisch-hydraulischen Eigenschaften der relevanten hydrologischen Speicher zum Ziel hat, werden einige einschlägige Zwischenergebnisse diskutiert. Der Forschungsschwerpunkt liegt derzeit im Einzugsgebiet Lange Bramke.

Aufgrund der angeschnittenen komplizierten geologisch-tektonischen Verhältnisse im Oberharzer Devonsattel wird die Fortführung der detaillierten hydrogeologischen Bestandsaufnahme auch unter Einsatz erfolversprechender geoelektrischer bzw. -magnetischer Verfahren als notwendig erachtet. Besonderes Augenmerk gilt hier dem Verhalten der als natürliche hydrologische Tracer eingetragenen Umweltsotope Tritium (^3H) und Sauerstoff-18 (^{18}O) im System. Hierüber informieren Isotopengehaltsganglinien von Niederschlägen, Schneedecken und deren Ausflüssen, Boden- und Porengrundwässern sowie Abflüssen, die u. a. im Hinblick auf hydrologische Prozeßabläufe interpretiert werden.

Durch spezifische mathematische Verknüpfungen hydrologischer und isotopischer Input- und Outputdaten des Gebietes und der dominanten Subspeicher ungesättigte Bodenzone, Poren- und Kluftgrundwasserleiter wird eine Modellvorstellung über Wasserflüsse und Speichervolumina in der Lange Bramke entwickelt. Bei den dafür verwendeten mathematischen Fließmodellen erweist sich die mittlere Verweilzeit (t_v) als wichtigster hydraulischer Parameter. Aus Wasservolumina und Abmessungen der Speicher lassen sich mittlere Aquifermächtigkeiten und Porositäten ableiten, die es mit unabhängigen Verfahren zu verifizieren gilt. Besondere theoretische und experimentelle Probleme bereitet gegenwärtig noch das Kluftgrundwasserreservoir. Als hydrologisch bedeutendes Ergebnis ist der durchschnittlich nur 11%ige, bei einzelnen Hochwasserwellen 20% des Gesamtabflusses kaum übersteigende Direktabflußanteil, dessen Abtrennung mit Isotopen erfolgt. Damit werden im paläozoischen Mittelgebirge grundsätzlich die aus alpinen Einzugsgebieten bekannten Ergebnisse bestätigt, gleichbedeutend einer Dominanz von Grundwasser bei der Generierung von Hochwasserwellen.

Aus den Teilergebnissen werden künftige Arbeitsschritte dieses multidisziplinären Forschungsprojekts abgeleitet. Die Untersuchungen werden sich danach neben Verifikationen von Modell-ergebnissen auf das Kluftwasserreservoir und Modellentwicklungen für den instationären Fall konzentrieren.

Conclusions

By combining conventional investigation methods with advanced tracer techniques and using hydrologically relevant mathematical model concepts quite new perspectives may be attained as regards information on the water balance and reservoir characteristics of natural hydrologic systems in small catchment basins. However, the progress made in this field as compared with the last surveys within the scope of tracer-hydrological system analyses [19, 20] cannot be judged only by the great number of new problem formulations and open questions. The present project has therefore been adapted to a reorientation with a view to concentrating on detailed reservoir analyses.

Besides a great number of individual tasks aimed at completing previous information, first of all with the objective of knowing more about hydrogeology and hydraulics of the fractured rock reservoir, there is still a fundamental problem to be surmounted. The project offers favourable prerequisites for solving this problem, not least

owing to the well-evidenced progressive graphs of isotope contents. The problem concerns the restriction that all former model approaches consider catchment basins and sub-reservoirs as steady-state systems with constant inflow and outflow rates. Not before we succeed in developing mass balance and transport equations for environmental tracers and obtain in this way mathematical flow models for the case of unsteady flow, is the decisive break-through achieved.

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. A. Hermann, Dipl.-Geol. Dr. J. Koll, Dipl.-Phys. Dr. P. Maloszewski*) und Dipl.-Geogr. R. Rau im Institut für Geographie, Abt. Physische Geographie und Landschaftsökologie der Technischen Universität, Langer Kamp 19c, D-3300 Braunschweig. Dipl.-Phys. W. Rauert und Dipl.-Phys. W. Stichler im Institut für Radiohydrometrie der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) München, Ingolstädter Landstr. 1, D-8042 Neuherberg. Dozent Dr. Ch. Leibundgut im Geographischen Institut, Abt. Physikalische Geographie-Gewässerkunde der Universität, Hallerstr. 12, CH-3012 Bern.

*) Humboldt-Stipendiat; Heimatanschrift: Institute of Nuclear Physics, Radzikowskiego 152, PL-31 342 Kraków

Die Weiterführung des Forschungsvorhabens gründet wesentlich auf der bereitwilligen Unterstützung zahlreicher Mitarbeiter in- und ausländischer Institute und Institutionen. Ihnen, unseren Doktoranden, Diplomanden und studentischen Hilfskräften gilt unsere Anerkennung. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei für die finanzielle Förderung, der Alexander-v.-Humboldt-Stiftung für das Habilitationsstipendium für Dr. Maloszewski gedankt.

Es ist geplant, zu gegebener Zeit wieder über Stand und Fortgang der Arbeiten im Rahmen dieses mehrjährigen Forschungsvorhabens in den DGM zu berichten.

Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgruppe Bodenkunde: Bodenkundliche Kartieranleitung. 3. verb. u. erw. Aufl., Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover 1982
- [2] Dinger, T. and Davis, G.H.: Some considerations of tritium dating and the estimates of tritium input function. — IAH Congr. Istanbul, Mem. IAH (1967) p. 276-278
- [3] Grabczak, J., Maloszewski, P., Rozanski, K. and Zuber, A.: Estimation of the tritium input function with the aid of stable isotopes. — Catena 11 (1984) S. 105-114
- [4] Hermann, A., Koll, J., Maloszewski, P., Rauert, W. and Stichler, W.: Water balance studies in a small catchment area using environmental isotope tracer techniques. — Proc. IAHS Symp. on Conjunctive Water Use, Budapest July 1986; IAHS Publ. no. 156 (1986) p. 111-124
- [5] Hermann, A., Lehrer, M. and Stichler, W.: Isotope input into runoff systems from melting snow covers. — Nordic Hydrol. 12 (1981) p. 309-318
- [6] Hermann, A., Maloszewski, P., Koll, J. and Stichler, W.: Hydrologische Modellvorstellung für ein kleines Einzugsgebiet unter Verwendung von Umweltsotopen (Lange Bramke, Oberharz). Z. dt. geol. Ges. 136, Teil 2 (1985) S. 599-611 (Hydrogeologische Beiträge 9)
- [7] Hermann, A., Maloszewski, P., Rau, R., Rosenow, W. and Stichler, W.: Anwendung von Tracertechniken zur Erfassung des Wasserumsatzes in kleinen Einzugsgebieten. Ein Forschungskonzept für die Oberharzer Untersuchungsgebiete. — DGM 28 (1984) S. 65-74
- [8] Hermann, A., Maloszewski, P., Rau, R. G. and Stichler, W.: Prozeßanalyse des Wasserumsatzes in den Oberharzer Untersuchungsgebieten mittels Tracermessungen. — Tagungsber. Symp. Wald und Wasser, Grafenau/Bayer. Wald, Sept. 1984; Tagungsber. Nationalparkverw. Bayer. Wald 5 (1985) S. 517-530
- [9] Hermann, A. and Rau, R.: Snow cover stores and winter runoff behaviour of a small basin in the German Highlands. — Tagungsber. Workshop Schneehydrol. Forschung in Mitteleuropa, Hann. Münden März 1984; DVWK-Mitt. 7 (1984) S. 449-472
- [10] Hermann, A. and Rau, R.: Instrumentierungs- und Organisationskonzept für ein tracerhydrologisches Forschungsvorhaben in den Oberharzer Untersuchungsgebieten. — Landschaftsökologisches Messen und Auswerten, Braunschweig, 1 (1985) H. 2/3, S. 209-241
- [11] Hinze, C.: Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25 000, Blatt Clausthal-Zellerfeld (4128). — Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover 1971
- [12] Maloszewski, P. and Zuber, A.: Interpretation of artificial environmental tracers in fissured rocks with a porous matrix. — Proc. IAEA Vienna Symp. Sept. 1983; Isotope Hydrology 1983, p. 635-651
- [13] Maloszewski, P. and Zuber, A.: On the theory of tracer experiments in fissured rocks with a porous matrix. — Journal of Hydrology 79 (1985) p. 333-358
- [14] Müller, I.: Anisotropic properties of rocks detected with electromagnetic VLF (Very Low Frequency) measurements. — Proc. Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Zürich Sept. 1983, p. 273-282
- [15] Scheelen, A.: Refraktionsseismische Messungen im Einzugsgebiet Lange Bramke (Oberharz) zur Entwicklung eines Speichermodells. — Diplomarbeit (1985), Inst. f. Geographie TU Braunschweig
- [16] Sklash, M.G. and Farvolden, R.N.: The role of groundwater in storm runoff. — Journal of Hydrology 43 (1979) p. 45-65

- [17] Stauffer, F. und Job, D.: Infiltration in geschichteten Böden und Reaktion des Grundwasserspiegels. Experiment und Simulation. — IHW-ETH Zürich, Ber. R. 18-82 (1982)
- [18] Stichler, W. und Herrmann, A.: Räumlich-zeitliche Variationen der Isotopengehalte randalpiner Niederschläge. — Tagungsber. 15. Int. Tag. f. Alpine Meteorol., Grindelwald Sept. 1978, 1. Teil, S. 271-275
- [19] Stichler, W. und Herrmann, A.: Environmental isotopes as tracers in water balance studies of mountainous watersheds. — Symp. on Hydrological Research Basins and Their Use in Water Resources Planning, vol. 2, p. 357-368; Bundesamt für Umweltschutz — Landeshydrologie, Bern 1982
- [20] Stichler, W. und Herrmann, A.: Application of environmental isotope techniques in water balance studies of small basins. — IAHS Publ. no 148 (1985) p. 93-112
- [21] Stichler, W., Herrmann, A. and Rau, R.G.: Snowmelt runoff modelling considering environmental isotope and conventional methods. — Proc. IAHS Symp. on Modelling Snowmelt Induced Processes, Budapest July 1986; IAHS Publ. no. 155 (1986) p. 231-244
- [22] Stichler, W., Moser, H. and Schroeder, M.: Measurements of Seepage Velocity in a Sand Lysimeter by Means of ^{18}O -Content. — Proc. Symp. on Recent Investigations in the Zone of Aeration, Munich Oct. 1984, vol. 1, p. 191-204
- [23] Zuber, A., Maloszewski, P., Stichler, W. und Herrmann, A.: Tracer relations in variable flow. — Proc. 5th Symp. on Underground Water Tracing (SUWT), Athens Sept. 1986 (in press)