

BERICHTE UND MITTEILUNGEN

MÖGLICHKEITEN DER REGIONALISIERUNG VON WASSER- UND STOFFHAUSHALTSUNTERSUCHUNGEN

Mit 6 Abbildungen und 1 Tabelle

BERND CYFFKA, GERHARD GEROLD und KARL-HEINZ PÖRTGE

Summary: Regional transfer possibilities of water balance and dissolved load investigations

In the hydrographic research area of Ziegenhagen, the Geographic Institute of the University of Göttingen is trying to record and model the water balance and dissolved load turnover in areal units of varying sizes. The size of these areal units ranges from about 25 m² over 1.11 km², 1.37 km² and 1.76 km² to the research area size of 14.3 km². The data prove the transferability of results from small to large catchment areas (upscaling). By using the methods of recording, analysing and modelling for water balance and dissolved load turnover, the items 'water acidification' and 'water quality' are of great importance. For the examination of the water turnover the Geographic Institut is using recorded data from the year 1958 onwards. Data regarding dissolved load turnover from the years 1972 to 1975 are compared with our own measurements of the years 1988 and 1989. The enlargement of the areal unit increases the groundwater-borne portion of discharge as well as the contents of geogenic ions. Further studies with an improved instrumentation will be needed to verify these preliminary results.

Problemstellung und Gebietsbeschreibung

Die im *Gewässerkundlichen Forschungsgebiet Ziegenhagen* angelaufenen Untersuchungen haben das Ziel, den mit dem Wasserumsatz verbundenen geogenen und anthropogenen Stoffumsatz und -austrag in seiner zeitlichen wie räumlichen Varianz zu erfassen. Aus der Reaktion der Inputgrößen auf die Speicher- und Transformatorwirkung von Bewuchs, Substrat und Boden soll die langfristige Wassergüteentwicklung abgeleitet werden. Übergeordnetes Ziel ist das „upscaling“ (im Sinne von KLEEBERG 1990) Meßparzelle → Teileinzugsgebiet → Gesamtgebiet, mit dem die Möglichkeit der Regionalisierung von erarbeiteten Ergebnissen geprüft werden soll.

Das *Gewässerkundliche Forschungsgebiet Ziegenhagen* (GFZ) umfaßt das Einzugsgebiet des Rautenbaches bis zum Pegel Rautenbach I (14,3 km²), der im Ort Ziegenhagen, 3,5 km vor seiner Mündung in die Werra, liegt (vgl. Abb. 1). Durch die im Zuge der Internationalen Hydrologischen Dekade errichtete Instrumentierung befinden sich im Forschungs-

gebiet – mit Ausnahme des Teileinzugsgebietes Lindengrund (Geographisches Institut der Universität Göttingen) von der Hessischen Landesanstalt für Umwelt (HLfU) betrieben – neben zahlreichen Niederschlagsmeßgeräten noch drei Schreibpegelanlagen (1,11 km², 1,37 km² und 1,76 km²) und eine registrierende Quellschüttungsmeßstelle.

Der Untergrund besteht fast ausschließlich aus Gesteinen der Buntsandsteinformation (sm, su), die von dünnen, sandigen Verwitterungsdecken, Lößlehm sowie Auensedimenten in den Talbereichen bedeckt sind. An der Landnutzung hat nach neueren Untersuchungen (vgl. CYFFKA 1991) die Forstwirtschaft mit 87,9% (Laubwaldanteil 50,1%) den größten Anteil. 10,4% entfallen auf die Landwirtschaft (Wiese/Weide, Ackerland), der Rest wird von Siedlungsflächen eingenommen.

Zielsetzung und Methodik

Das GFZ gehört zu den basenarmen und pufferungsschwachen Gebieten, die zur Gewässerversauerung neigen (n. LEHMANN u. HAMM 1989). Anhand von Depositionsmessungen in benachbarten Gebieten (nordhessisches Bergland, vgl. FÜHRER et al. 1988) liegt – auf Hessen bezogen – bei den säurebildenden Luftschadstoffen eine mittlere Immissionsbelastung vor, die z. B. für Witzenhausen, in direkter Nachbarschaft des GFZ, immerhin eine Gesamtsäurebelastung von 1,34 kmol IÄ/ha · a im Freilandniederschlag und 4,27 kmol IÄ/ha · a im Bestandsniederschlag (Fichte) erreicht (n. BALÁZS 1989)!

Ergebnisse von Bachwasserbeprobungen im Kaufunger Wald (BALÁZS 1989) zeigen je nach Schadstoffexposition und Substrat im Einzugsgebiet niedrige bis hohe Alkalitäten (–18 bis +434 µmol IÄ/l). Die Versauerung der Gewässer und damit Gefährdung von „Reinwassergebieten“ (Trinkwasserversorgung) ist über den Wasser- und Stoffhaushalt in dem System Wald ↔ Boden ↔ Wasser auch von der Einzugsgebietsgröße, der Ausstattung und Landnutzung im Gebiet sowie den Abflußbedingungen (Niedrigwasser-, Hochwasser- und Schneeschmelzabfluß) abhängig.

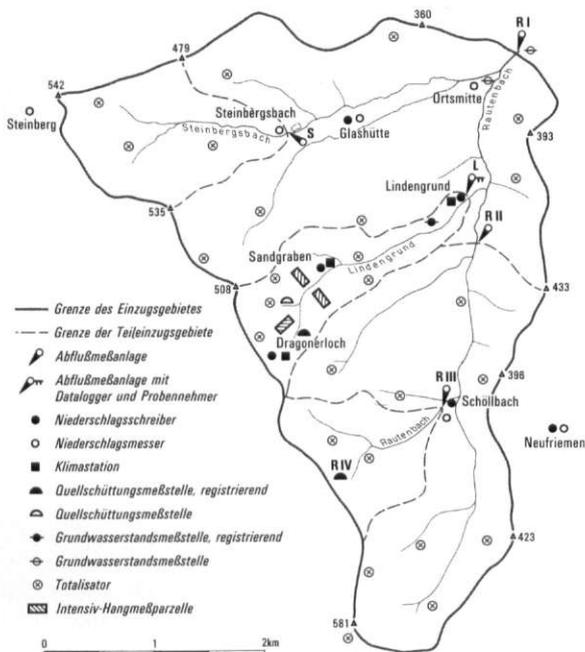


Abb. 1: Vorhandene und vorgesehene Instrumentierung
Present and projected instrumentation

Aufgrund der langjährigen Meßreihen (16 bis 31 Jahre) und der einzubringenden Instrumentierung im Teileinzugsgebiet Lindengrund (s. Abb. 1), welches seit Beginn des Jahres 1991 vom Geographischen Institut der Universität Göttingen betreut wird, kann der einzugsgebietsdifferenzierte Wasser- und Stoffumsatz unter besonderen Gunstbedingungen untersucht werden. Von Bedeutung sind hierbei die Parameter Bestandsniederschlag, Infiltration, Bodenwasserspeicherung und -gehalt, Interflow sowie die Klimatelemente Temperatur, Relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Strahlungsbilanz. Diese Parameter sollen auf drei Intensiv-Hangmeßparzellen im Teileinzugsgebiet mittels elektronischer Meßwertfassung registriert bzw. über automatische Probennehmer erfasst werden. Zur Messung der räumlichen Varianz der Oberflächenwasser im Teileinzugsgebiet selbst sind noch ein schreibender Quellschüttungspegel und zur Verfolgung von Grundwasserstandsänderungen eine registrierende Grundwassermeßstelle projektiert.

Das Untersuchungskonzept basiert auf drei unterschiedlich großen Raumeinheiten mit abnehmender Erfassungintensität (vgl. Abb. 1):

- I Hangmeßparzellen im Teileinzugsgebiet Lindengrund - vertikaler und lateraler Wasser- und Stoffumsatz
- II Teileinzugsgebiet Lindengrund - Integral der Wasser- und Stoffflüsse, Aggregation pedo-

hydrologisch „homogener Flächen“, Erfassung abflußwirksamer Teilgebiete.

- III Gesamteinzugsgebiet Rautenbach I - Aufschlüsselung der integralen Abflußinformation zur Erklärung von Abflußgang, Stoffaustrag und Wasserqualität.

Mittelfristiges Untersuchungsziel ist die Erfassung des Stoffaustrags aus kleinen Einzugsgebieten (Entwicklung der Wasserqualität) unter Anwendung einfacher Niederschlag-Abfluß-Modelle. Anhand von Bilanzen der wesentlichen Input- und Outputgrößen wie Niederschlag und Abfluß, Stoffein- und Stoffaustrag, soll die Verknüpfung der Raumeinheiten I-III über Wassertransportmodelle geprüft werden, wobei die Möglichkeiten der Regionalisierung bzw. des „upscaling“ eine bedeutende Rolle spielen.

Bisherige Untersuchungen

Untersuchungen zum Abflußverhalten und Wasserhaushalt führten RUDOLPH (1966) und KILLE u. RUDOLPH (1974) für das Rautenbach-I-Gebiet durch. Unter Einbeziehung der Teileinzugsgebiete Rautenbach III, Lindengrund und Steinbergsbach wurden diese Untersuchungen von CYFFKA (1991) fortgeführt. So wurde z. B. der mittlere Jahresgang der Faktoren des Wasserhaushaltes über die gesamten Beobachtungszeiträume aufgestellt. Abb. 2 zeigt dies exemplarisch für den Lindengrund und den Rautenbach I. Interessant sind die generellen Übereinstimmungen der Jahresgänge von Niederschlag, Abfluß und Verdunstung (berechnet n. FRIEDRICH et al. 1968) sowie die sich daraus ergebenden Bilanzglieder für Rücklage und Verbrauch, an beiden Pegeln trotz der Verzehnfachung der Einzugsgebietsgröße. Statistische Berechnungen zum Wasserhaushalt und Abflußverhalten auf der Basis von Tagessummen bzw. -mittelwerten ergaben, daß sich der Lindengrund mit dem Rautenbach I durchaus vergleichen läßt. Korrelationsrechnungen wiesen signifikante Zusammenhänge von $r \geq 0,96$ (Signifikanzniveau $\alpha = 1\%$) auf. Inwieweit diese Werte für ein „upscaling“ benutzt werden können, soll die weitere Untersuchung zeigen. Die von CYFFKA (1991) festgestellten Abweichungen des Rautenbach III und des Steinbergsbaches haben ihre Ursachen in unterirdischen Wasserzufuhren bzw. Trinkwasserentnahmen. Diese Faktoren treten besonders in Phasen mit Mittel- und Niedrigwasserabfluß deutlich hervor und beeinflussen aufgrund der Dauer dieser Perioden auch die mittleren Jahresgänge. Die „kurzlebigen“ Hochwasserereignisse werden davon nicht betroffen (s. u.).

Interessante Aspekte ergeben sich auch für das Hochwasserabflußverhalten. So kann anhand der vorliegenden N- und A-Registrierungen die zeitliche und räumliche Variabilität der abgelaufenen Niederschlag-Abfluß-Ereignisse untersucht werden. Fragen

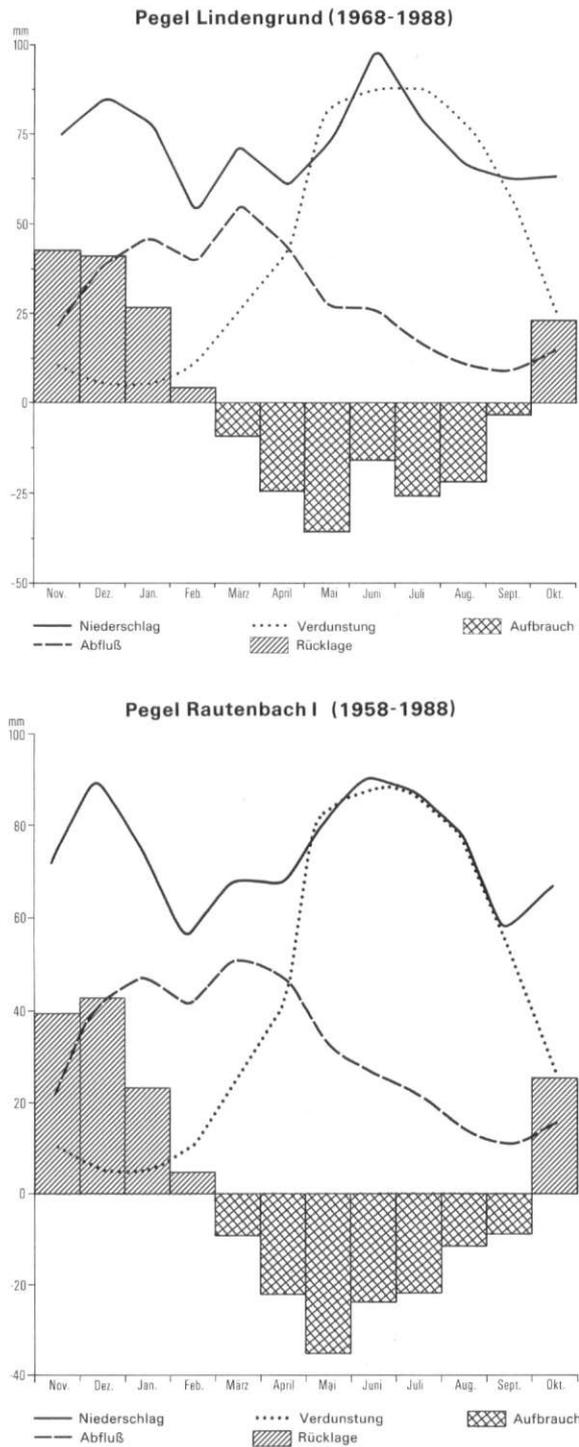


Abb. 2: Mittlerer Jahresgang der Faktoren des Wasserhaushaltes an den Pegeln Lindengrund (1968-1988) und Rautenbach I (1958-1988) im Vergleich

Mean annual regime of water balance factors at gauging stations Lindengrund (1968-1988) and Rautenbach I (1958-1988) in comparison

nach der Beeinflussung des Abflußverhaltens durch Unterschiede bei den zeitinvarianten Gebietsparametern sind Intention der Untersuchung. Wie stark die Zeitvarianz der Niederschlagsmenge und -intensität die Form einer Abflußwelle beeinflusst, zeigt Abb. 3. Die N- und A-Ganglinien der beispielhaft gezeigten Ereignisse wurden in 15minütigen Intervallen (Δt) von den Schreiberstreifen digitalisiert. Die Abflußganglinien, wieder sind die Pegel Lindengrund und Rautenbach I ausgewählt, unterscheiden sich deutlich in Scheitelwert (Q_{max}) und Scheitelanstieg (t_a). Das Ereignis vom 20. 5. 1977 (Lindengrund: $h_N = 23,1$ mm; Rautenbach I: $h_N = 23,6$ mm) erreicht einen Abflußbeiwert von $\alpha = 0,02$ (Lindengrund und Rautenbach I), während dieser am 5. 6. 1979 bei $\alpha = 0,06$ (Lindengrund) bzw. $\alpha = 0,08$ (Rautenbach I) liegt (Lindengrund: $h_N = 40,1$ mm; Rautenbach I: $h_N = 37,0$ mm).

Als Resultat der Niederschlag-Abfluß-Untersuchungen zeigt sich in der überwiegenden Anzahl der beobachteten Ereignisse eine Übereinstimmung zwischen den kleinen Teileinzugsgebieten und dem Gesamtgebiet. Die eingangs erwähnten Abhängigkeiten von der Gebietsgröße und -ausstattung treten in der konkreten Hochwassersituation in den Hintergrund, so daß unter diesen, von randlichen Einflüssen relativ freien Bedingungen, Ansatzpunkte für ein „upscaling“ gegeben sind.

Hydrochemische Untersuchungen wurden von LEHNARDT et al. (1976 und 1983) sowie HAMANN (1989) und HUMMEL (1990) vorgenommen. Die in wöchentlichen Abständen genommenen Proben sind für die Zielsetzung dieser Arbeit nur bedingt auszuwerten, da keine Abflußwellen i. e. S. erfaßt wurden. Allerdings können diese Daten als „hydrochemische Gebietskennwerte“ eingestuft werden, da sie relativ lange Zeiträume abdecken und so einen mittleren Zu-

Tabelle 1: Hydrochemische Gebietskennwerte am Pegel Rautenbach I
 Hydrochemical catchment characteristics, Rautenbach I gauging station

	Minimum	Mittel	Maximum
pH-Wert [mV]	6,8	7,1	7,7
el. Leitf. [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	126,0	150,6	171,2
Gesamthärte [$^{\circ}\text{dH}$]	4,2	5,1	7,8
Karbonathärte [$^{\circ}\text{dH}$]	2,0	3,0	4,2
NO_3^- [mg/l]	0,0	4,6	10,0
Na^+ [mg/l]	4,2	5,6	7,2
K^+ [mg/l]	0,4	1,4	3,7
Ca^{++} [mg/l]	11,7	14,0	22,0
Mg^{++} [mg/l]	5,7	9,5	13,4
Cl^- [mg/l]	3,0	4,7	6,4
SO_4^{--} [mg/l]	12,5	39,8	55,7
HCO_3^- [mg/l]	14,0	31,0	39,7

Quelle: LEHNARDT et al. 1976 und 1983, (Juli 1972–Mai 1975); HAMANN 1989, (Mai 1988–Oktober 1988), HUMMEL 1990, (Mai 1988–April 1989)

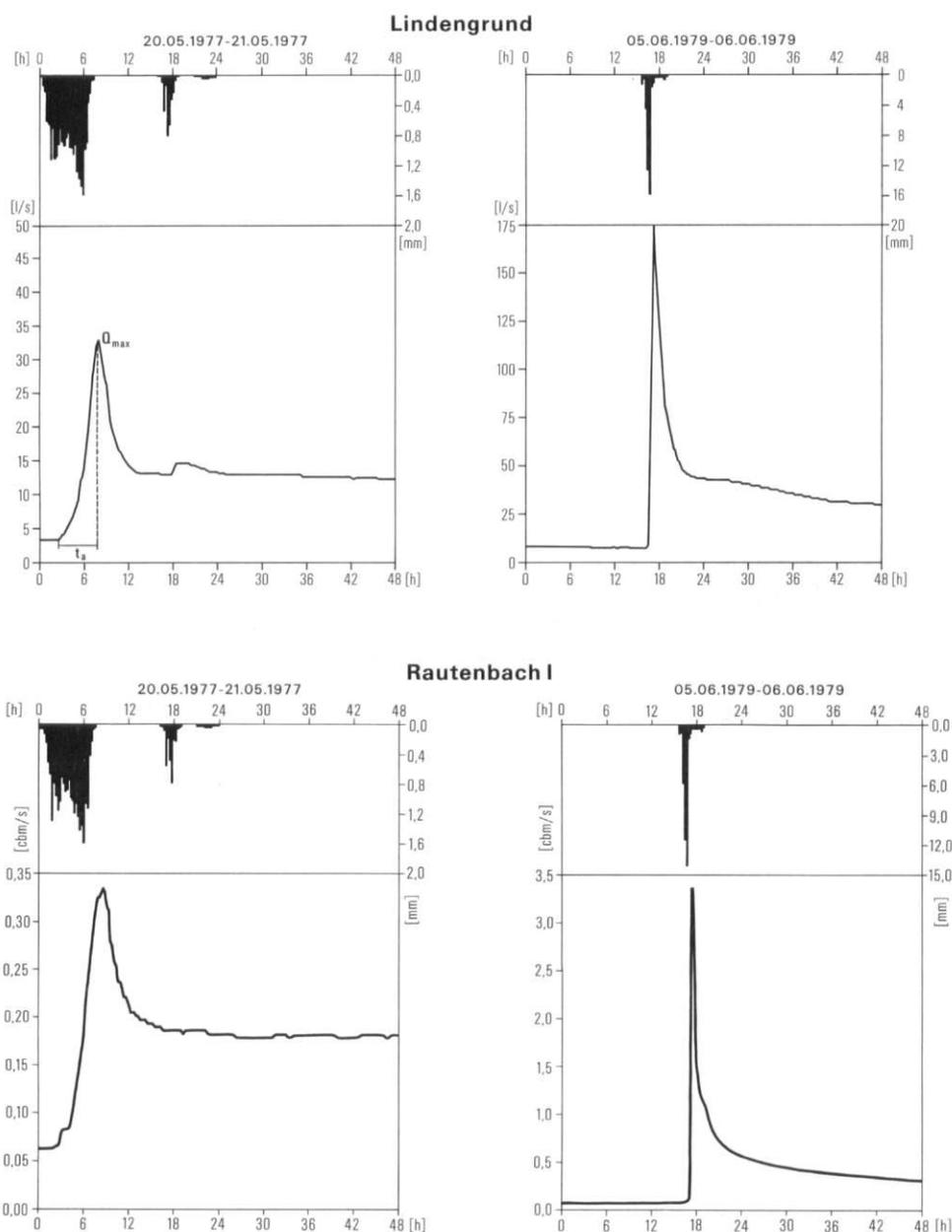


Abb. 3: Gebietsniederschlags- und Abflußganglinien von Hochwasserereignissen im Teileinzugsgebiet Lindengrund und im Gesamtgebiet Rautenbach I. Beginn jeweils 00.15 Uhr, $\Delta t = 0,25$ h

Area precipitation and run-off curves from storm run-offs in the partial catchment area of Lindengrund and the overall catchment area of Rautenbach I. Starting at times 00.15 h, $\Delta t = 0.25$ h

stand aufzeigen (vgl. Tab. 1 und CYFFKA et al. 1989). Diese Werte kennzeichnen das Wasser des Rautenbaches am Pegel Rautenbach I als weich und gering mineralisiert. Es handelt sich um erdalkalische, überwiegend sulfathaltige Wässer vom Typ Mg – Ca – (Na) – SO_4 – HCO_3 – (Cl) (n. IÄ mmol/l), deren pH-Werte im neutralen bis schwach alkalischen Bereich liegen. Damit ist beim Oberflächenwasser

eine Zuordnung zum Kohlensäure-Karbonat-Puffersystem gegeben.

Die für eine Regionalisierung bedeutenden morphometrischen Kennwerte aller Teileinzugsgebiete und des Gesamtgebietes wurden von CYFFKA 1989 und 1991 erörtert. Hierbei ergaben sich aufschlußreiche Unterschiede zwischen den Gebieten, die Eingang in die laufenden Untersuchungen finden sollen.

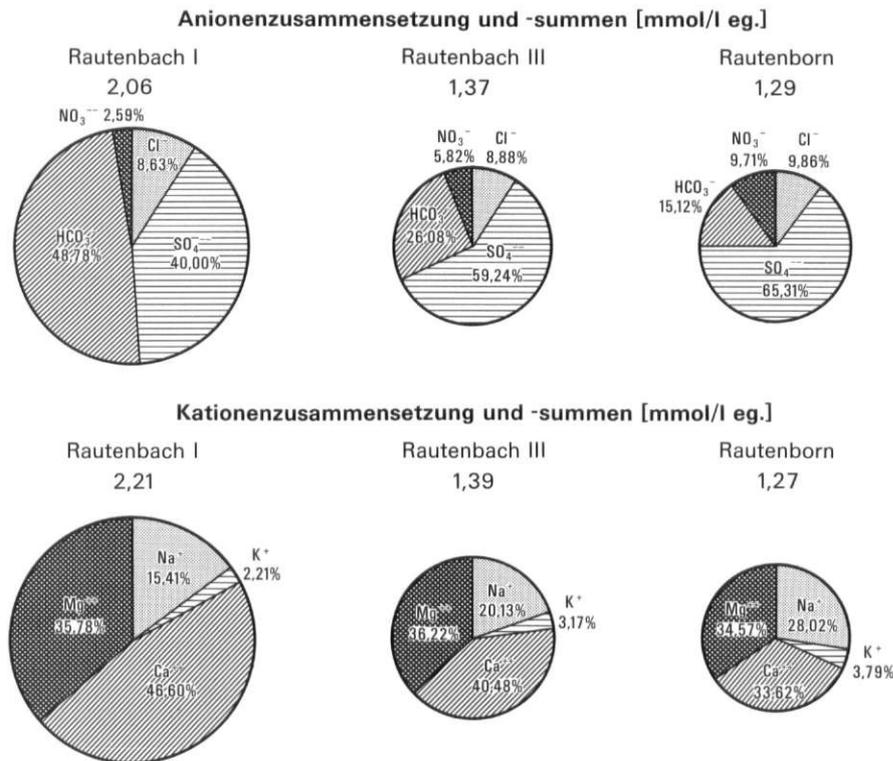


Abb. 4: Hydrochemisches „upscaling“. Änderung der Anionen- und Kationen-Äquivalentkonzentrationen mit der Vergrößerung des Einzugsgebietes (A_{Eo})

Hydrochemical „upscaling“. Changing of the anion and cation concentration by enlargement of the catchment size

Ergebnisse und Diskussion

Die bisherigen hydrochemischen Untersuchungen zeigen, daß die Zusammensetzung der gelösten Inhaltstoffe des Gewässers und der Stoffaustrag sowohl von der Art des Abflusses als auch von der Ausstattung der einzelnen Teileinzugsgebiete abhängt. Der hohe Anteil der SO_4^{2-} -Ionen an den gelösten Anionen (Äquivalentkonzentration) von der Quelle Rautenborn bis zur Meßstelle Rautenbach I verdeutlicht den Einfluß des atmosphären Schwefeleintrages und der Bodenversauerung im oberen Einzugsgebiet. Diesen Sachverhalt zeigt Abb. 4, wobei aufgrund der Änderung der Ionen-Äquivalentkonzentration mit der Vergrößerung des Einzugsgebietes von einem „hydrochemischen upscaling“ gesprochen werden kann.

Eine Beurteilung des immissionsbedingten Versauerungsmaßes nach QUADFLIEG (1989) über den Quotienten von

$$\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{SO_4^{2-} + NO_3^-} \quad (1)$$

läßt erkennen, daß mit dem Wert von 0,9–1,1 (Rautenborn, Rautenbach III) im obersten Einzugsgebiet eine nachhaltige Versauerung eingesetzt hat. Zwar

ist noch eine positive Alkalität, 0,181 mmol(eq)/l, und damit Säureneutralisationskapazität gegeben, das Puffersystem von Boden und Gestein kann jedoch erhöhte Säureeinträge durch stärker saure Sickerwässer bei Schneeschmelze oder Starkregen in den Vorfluter nur noch gering neutralisieren.

Mit der Vergrößerung des Einzugsgebietes zum Pegel Rautenbach I hin nimmt der Anteil der SO_4^{2-} - und NO_3^- -Ionen zugunsten der HCO_3^- -Ionen deutlich ab, der Quotient beträgt 2,09, die Alkalität 0,725 mmol(eq)/l. Zwei Faktoren sind dafür maßgeblich:

1. Mit der Wiesen- und Ackernutzung im Mittel- und Unterlauf sowie wahrscheinlich deutlich höherem Grundwasserabflußanteil werden die geogenen Stoffe (Ca^{++} , Mg^{++} , HCO_3^-) verstärkt eingetragen.
2. Mit dem Zufluß vom Teileinzugsgebiet Lindengrund werden ebenfalls deutlich höhere Anteile geogener Ionen eingetragen.

Aus der Ionenbilanz wird deutlich, daß flußabwärts mit der positiven Bilanz bei den Anionen organische Säuren beteiligt sein müssen, die verstärkt aus den staunassen Alluvialböden und Pseudogley-Parabraunerden der unteren Hangbereiche stammen.

Aus den bisher untersuchten Abfluß-Konzentrations-Beziehungen (vgl. Abb. 5) ist der Verdün-

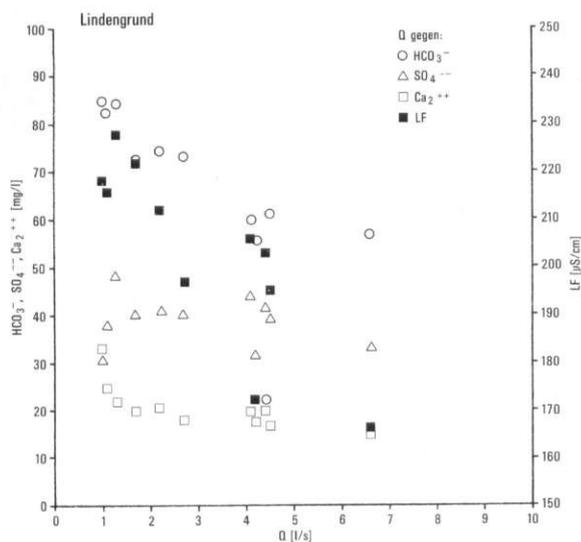


Abb. 5: Abfluß-Konzentrations-Beziehung am Pegel Lindengrund
Run-off-concentration-relation, Lindengrund gauging station

nungseffekt bei den geogenen Komponenten (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺) nur für die Einzugsgebiete der Pegel Rautenbach I und II zu erkennen, die pH-Abnahme bei Abflußzunahme ist gering. Für die kleineren Einzugsgebiete bleiben die Ionenkonzentrationen bei Ca⁺⁺ bis zur Abflußmenge von ca. 40 l/s konstant!

Typisch ist die Zunahme der pedogenen und anthropogenen Anionen bei vermehrtem Deckschichtenabfluß, insbesondere der SO₄⁻-Ionen, und die Abnahme der HCO₃⁻-Ionenkonzentrationen mit Abflußzunahme in allen Teileinzugsgebieten. Dar- aus folgt:

- Die Sulfatkonzentrationen der Waldbäche sind eng mit der Bodenwasserdynamik verbunden, gleichzeitig muß auch bei Hochwasserereignissen ein erheblicher Abflußanteil aus tieferen Substrat- und Bodenschichten mit noch hohem Puffervermögen stammen. Dieser, im Ereignisfall vermehrte Grundwasserabflußanteil, bewirkt, daß der pH-Wert 7,0 nur selten unterschritten wird.
- Bei anhaltend hoher atmogener Säurebelastung ist zukünftig eine zunehmende Versauerung der Oberflächengewässer zu befürchten. Ein Vergleich des Austrags gelöster Stoffe im GFZ zwischen dem Meßzeitraum 1972-1975 (vgl. LEHNARDT et al. 1976) und dem Zeitraum 1988-1990 (laufende Untersuchungen) am Pegel Rautenbach I, zeigt eine deutliche Zunahme sowohl bei den Kationen (Ca⁺⁺) als auch bei den Anionen (SO₄⁻, HCO₃⁻), was auf eine Zunahme der Basenverdrängung bei Säureakkumulation in der ungesättigten Bodenzone hinweist.

- Während des hydrologischen Winterhalbjahres ist aufgrund der verstärkten Beteiligung der ungesättigten Bodenzone an der Abflußbildung eine negative Ionenbilanz an allen Meßstellen gegeben. SO₄⁻ dominiert mit 50-60% der Anionen. Dies zeigt, daß Kationsäuren (Al, Mn, Fe) bei der Abpufferung der atmosphären Säuren mitwirken.

Folgerungen und Forschungskonzept

Die Auswertungen zum Gebietswasserhaushalt und die hydrochemischen Analysen ergeben, daß mit der Einzugsgebietsvergrößerung der grundwasserbürtige Abflußanteil sowie der Anteil geogener Ionen und damit die Pufferungskapazität (Alkalitätsge- winn) im Fließgewässer deutlich ansteigt. Die chemische Zusammensetzung und die Abfluß-Konzentra- tions-Beziehungen deuten an, daß sowohl saure Sickerwässer (50-60% IÄ SO₄⁻ bei den Anionen) als auch neutral-alkalische Grundwässer (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺- und HCO₃⁻-Dominanz) bei der Abflußbildung und am Stoffaustrag maßgeblich beteiligt sind, wobei auf der Kationenseite ein Verdünnungseffekt zum Teil erst beim Überschreiten bestimmter Abflußmengen (vgl. Ca⁺⁺ in Abb. 5) eintritt. Der chemische Gradient entlang des Rautenbaches weist darauf hin, daß flußabwärts vermehrt Wasser tieferer Schichten mit positiver Alkalität abfließt. Ferner unterscheiden sich die Teileinzugsgebiete gering in der Art der Abfluß- bildung und -konzentration, jedoch deutlich im Stoff- austrag und der hydrochemischen Zusammen- setzung.

Durch die Ergänzungsausstattung im Teileinzugs- gebiet Lindengrund sollen in Verbindung mit der Entschlüsselung der integralen Abflußinformationen über den Konvergenzmodell-Ansatz nach LEIBUND- GUT (1984) Fragen der räumlichen Einzugsgebiets- variabilität in bezug auf die Anweisung homogener Teilgebiete (i. e. Pedohydrotope) und der Abhängig- keit der Modellparameter bei den Standort- und Wassertransport- Hangmodellen von den gebiets- spezifischen Merkmalen untersucht werden. Die Be- arbeitung nach drei verschiedenen Raumskalen („upscaling“) mit unterschiedlicher Erfassungs- intensität beinhaltet folgende Probleme (vgl. Abb. 6):

1. Anwendung eines zweidimensionalen Hang- modells für Wassertransport und Lösungschemie zur Erfassung der Abflußbildung und -konzentra- tion sowie der niederschlagsabhängigen Stoffaus- träge. Flächenvariabilität der Eingabeparameter und Gültigkeit der „repräsentativen Standorte“ (Intensiv-Hangmeßparzellen) für Teileinzugs- gebiete.
2. Aggregation gebietspezifischer Modellparame- ter, wie bodenhydrologische Funktionen und In- filtrationseigenschaften, Zustandsvariablen (z. B. Bodenfeuchte und Bodenwasserspannung) und Randbedingungen, wie Grundwasserflurabstand

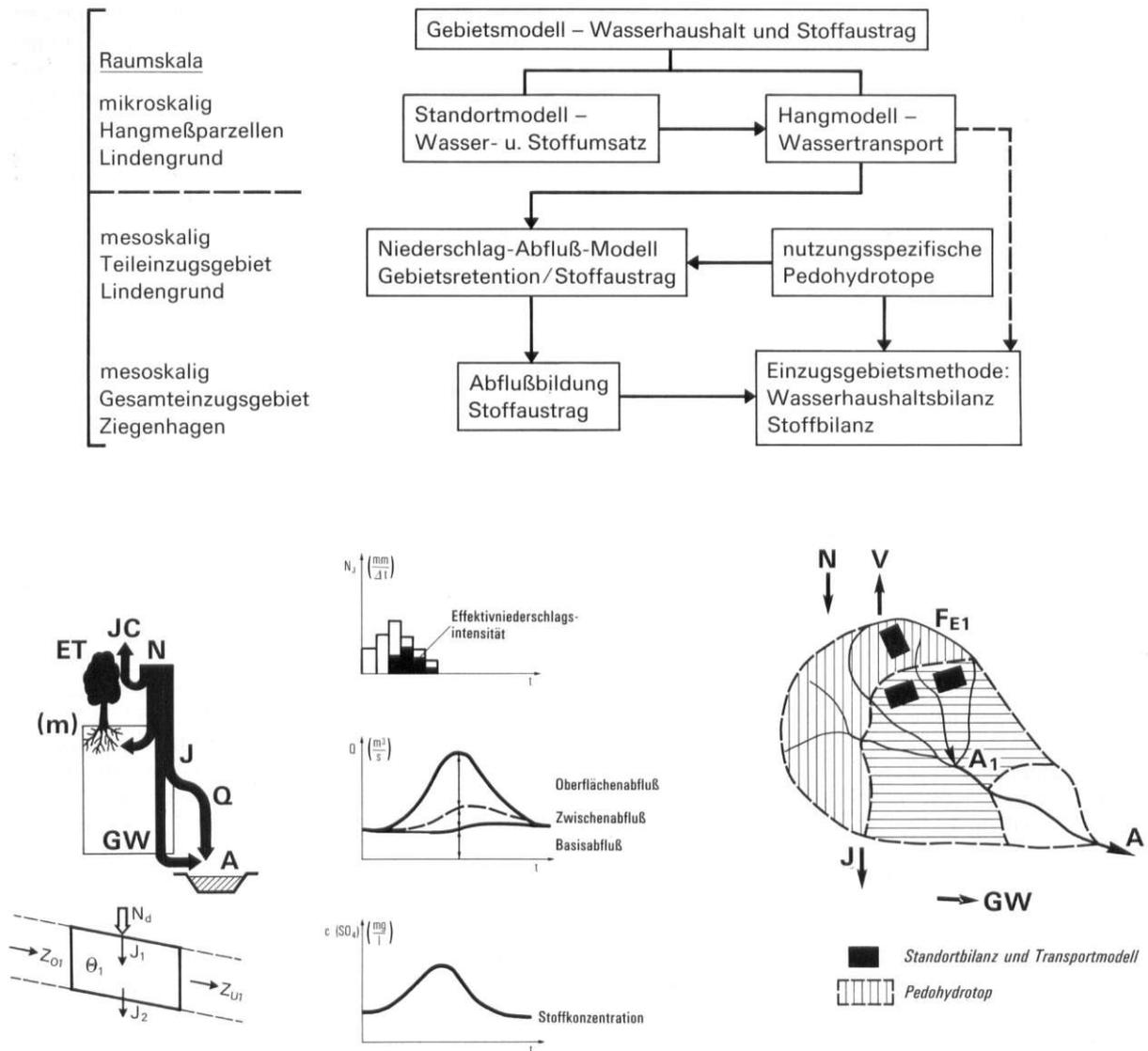


Abb. 6: Forschungskonzept
Research concept

und Verdunstung, über möglichst zeitinvariante Substrat-, Boden-, Relief- und Vegetationsparameter und ereignisspezifische Kenngrößen, beispielsweise Vorbodenfeuchte, Niederschlagsintensität und Vegetationsphase.

3. Aggregierung der Standortwasserbilanzen und Stoffumsätze auf die Fläche über die nutzungs-spezifischen Pedohydrotope.

Anhand der Gebietsbilanzierung von Wasser- und Stoffhaushalt (ausgewählte Ionen) kann die Anwendbarkeit der Niederschlag-Abfluß-Modelle und die Güte der räumlichen Aggregierung für die unterschiedlichen Einzugsgebiete geprüft werden.

Literatur

BALÁZS, Á.: Säurebilanz eines Fichtenbestandes im Hessischen Forstamt Witzenhausen. In: DVWK Mitteilungen 17, Bonn 1989, S. 167-174.

CYFFKA, B., HUMMEL, K.-H. u. PÖRTGE, K.-H.: Untersuchungen zum Abflußverhalten und zum Gewässerchemismus im Gewässerkundlichen Forschungsgebiet Ziegenhagen. In: Die Erde 120, 1989, S. 181-188.

CYFFKA, B.: Computergestützte Ermittlung morphometrischer Parameter aus topographischen Karten. In: Erdkunde 43, 1989, S. 220-225.

- : Das Abflußverhalten in kleinen Buntsandstein-Einzugsgebieten – Untersuchungen im Gewässerkundlichen

- Forschungsgebiet Ziegenhagen (Kaufunger Wald, Nordhessen). In: Gött. Geogr. Abh. 93, 1991.
- FRIEDRICH, W., LIEBSCHER, H. J., RUDOLPH, R. u. WAGENHOFF, A.: Forstlich-hydrologische Untersuchungen in bewaldeten Versuchsgebieten im Oberharz. In: Aus dem Walde, Mitt. a. d. Niedersächsischen Landesforstverwaltung 7, Hannover 1968.
- FÜHRER, H.-W., BRECHTEL, H.-M., ERNSTBERGER, H. u. ERPENBECK, C.: Ergebnisse von neuen Depositionsmessungen in der Bundesrepublik und im benachbarten Ausland. In: DVWK Mitteilungen 14, Bonn 1988.
- HAMANN, A.: Untersuchungen zum Wasserchemismus und seiner Beziehung zum Abfluß im Einzugsgebiet des Rautenbachtals (Kaufunger Wald). Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Göttingen. Göttingen 1989 (unveröffentlicht).
- HUMMEL, K.-H.: Untersuchungen zur Gewässergüte in einem Buntsandsteineinzugsgebiet im Kaufunger Wald. Diplomarbeit Geogr. Inst. Univ. Göttingen. Göttingen 1990 (unveröffentlicht).
- KILLE, K. u. RUDOLPH, R.: Abflußverhalten und Wasserhaushalt eines buchenbestandenen Buntsandsteingebietes. In: Allg. Forstzeitschrift 29, 1974, S. 1095-1098.
- KLEEBOG, H.-B.: Regionalisierung in der Hydrologie - Aufgaben und Probleme. Jahrestagung d. Geogr. Arbeitskreises Hydrologie. Göttingen 1990.
- LEHMANN, R. u. HAMM, A.: Räumliche und zeitliche Dynamik der Fließwässerversauerung. In: Geogr. Rundschau 41, 1989, S. 340-351.
- LEHNARDT, F., BRECHTEL, H.-M. u. BONESS, M.: Nährstoff-Gehalte und -Austräge von Bächen aus Einzugsgebieten verschiedener Landnutzung. In: Verhandl. d. Ges. f. Ökologie, Sonderdruck. Göttingen 1976, S. 397-410.
- : Einfluß der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt. Chemische Beschaffenheit und Nährstofftransport von Bachwässern aus kleinen Einzugsgebieten unterschiedlicher Landnutzung im Nordhessischen Buntsandsteingebiet. In: Schriftenreihe des DVWK 57, Hamburg 1983, S. 179-298.
- LEIBUNDGUT, C.: Zur Erfassung hydrologischer Meßwerte und deren Übertragung auf Einzugsgebiete verschiedener Dimensionen. In: Geomethodica 9, Basel 1984, S. 141-170.
- QUADFLIEG, A.: Zum Nachweis einer immissionsbedingten Versauerung im Grundwasser des ost- und nordhessischen Buntsandsteingebietes. In: DVWK Mitteilungen 17, Bonn 1989, S. 239-243.
- RUDOLPH, R.: Das Gewässerkundliche Forschungsgebiet Ziegenhagen (Kaufunger Wald). In: Staatsanzeiger für das Land Hessen, Sonderausgabe Juli 1966, S. 48-53.