

## KARSTMORPHODYNAMIK UND IHRE HYDROLOGISCHE STEUERUNG

Mit 5 Abbildungen und 3 Tabellen

KARL-HEINZ SCHMIDT

*Summary:* Karstmorphodynamics and its hydrological steering

Process inter-relationships between precipitation and runoff variables and dissolved sediment concentration ( $\text{CaCO}_3$ ;  $\text{MgCO}_3$ ) were investigated in a limestone area (Iserlohner Kalksenke) in the northern Rheinische Schiefergebirge. Concentrations were analyzed for 26 sampling sites.

Where significant correlations between dissolved sediment concentration and precipitation could be found, these were negative. The concentrations show the best correlations with the precipitation amounts of the preceding 10 days ( $N_{10}$ ). Samples from karst springs show no significant correlation with precipitation data.

The confidence levels for the correlations between dissolved sediment concentrations and discharge data are very high, the values of the exponents in the regression equation ( $C = aQ^b$ ) lying between  $-0.15$  and  $-0.25$ .

When rates of solutational erosion are estimated, the variation of dissolved sediment concentration and dissolved sediment load with different magnitudes of discharge must be considered. The rate of chemical denudation was calculated for the study area using the rating curve and flow curve technique. The rate obtained is  $29 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{a}$  or  $29 \text{ mm}/1000 \text{ a}$ .

## I. Problemstellung

Im Zuge des Bemühens um eine exaktere Erfassung der Differenzierung der Karstformen und Abtragungsvorgänge in klimatisch unterschiedlich ausgestatteten Karstgebieten haben in der Karstgeomorphologie seit den 50er Jahren quantitative Analysen der reliefwirksamen Prozesse eine wesentliche Rolle gespielt.

Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt verschiedener mit der Kalklösung in Beziehung stehender Medien wurde untersucht, besonders der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Bodenluft, der sich bestimmend auswirkt auf die potentielle Lösungskonzentration des Karstwassers (MIOTKE 1974). Darüber hinaus galt die Aufmerksamkeit vor allem der Analyse der Härte bzw. der Kalzium- und Magnesiumkonzentration der in den Karstgebieten anzutreffenden Gewässer.

Die zunächst recht hoch gesteckten Erwartungen konnten jedoch nicht oder nur teilweise erfüllt werden. Zwar konnte man feststellen, daß zwischen arktischem und alpinem Raum auf der einen Seite und temperiertem und tropischem Raum auf der anderen Seite signifikante Unterschiede im  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Bodenluft und in der Lösungskonzentration bestehen, jedoch waren diese zwischen temperiertem und tropischem Raum nicht gegeben (vgl. ATKINSON & SMITH 1976).

Auch wenn mit Hilfe von Formeln (CORBEL 1959; WILLIAMS 1963) Lösungsraten ( $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{a}$ ;  $\text{mm}/1000\text{a}$ ) durch Einsetzen der ermittelten Lösungskonzentration berechnet wurden, ergaben sich in einem weltweiten Vergleich keine klimazonalen Differenzierungen (PRIESNITZ 1974). Vielmehr zeigten sich kleinräumig z. T. größere Unterschiede (GAMS 1966) als in Gebieten sehr verschiedenen Klimas.

Aus der kleinräumigen Variabilität der Lösungskonzentrationen muß geschlossen werden, daß neben den sich großräumig ändernden Klimafaktoren weitere Eigenschaften des Karstabtragungssystems für diese Unterschiedlichkeit verantwortlich sind. Zu diesen Einflüssen ausübenden Systemeigenschaften gehören vor allen Dingen die Lithologie und Struktur des Substrats, die Boden- und Vegetationsbedeckung, die Landnutzung und die hydrologischen Parameter Abfluß und Niederschlag.

Im vorliegenden Beitrag soll *der steuernde Einfluß von Niederschlag und Abfluß auf die Lösungskonzentration von Karstgewässern* am Beispiel der Iserlohner Kalksenke untersucht werden. Die aus den Analysen abgeleiteten Ergebnisse und Zusammenhänge sollen zu Aussagen über die Karstmorphodynamik herangezogen werden.

## II. Das Untersuchungsgebiet<sup>1)</sup>

Das Untersuchungsgebiet, die Iserlohner Kalksenke (Abb. 1), liegt am Nordrand des rechtsrheinischen Schiefergebirges in Höhenlagen zwischen 200 und 300 m. Der Untergrund wird gebildet aus sehr reinen devonischen Massenkalken. Der westliche Teil der Senke wird von der Lenne entwässert, der östliche von der Hönne. Zwischen Lenne und Hönne queren mehrere kleinere Fließgewässer die Senke (vgl. Abb. 1). Sie sind sämtlich der Ruhr tributär. Diese Entwässerungslinien durchfließen das Massenkalkgebiet, aus nicht durchlässigem Substrat kommend, als Fremdflüsse. Darüber hinaus fehlen Oberflächengewässer in der Kalksenke weitgehend. Sie ist jedoch durch zahlreiche Trockentäler, häufig mit Bachschwinden im Oberlauf, gegliedert.

<sup>1)</sup> Eine nähere Beschreibung der geologischen und geomorphologischen Situation ist zu finden bei K.-H. SCHMIDT (1975).

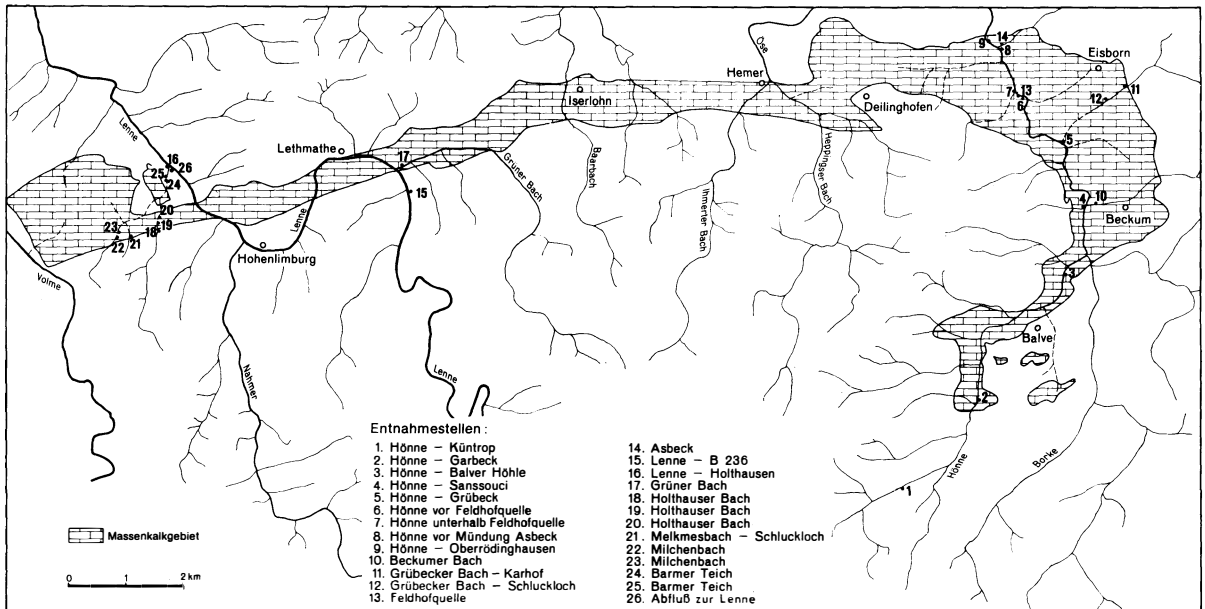


Abb. 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets  
Location of study area and sampling sites

Pegel in der näheren Umgebung des Untersuchungsgebietes liegen bei Altena und Hagen-Halden (Lenne) und Menden (Hönne). Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe beläuft sich im Untersuchungsgebiet auf Werte um 1000 mm. Die Werte für die einzelnen Stationen sind:

Neuenrade	1057 mm (1931–1960)
Iserlohn-Westig	902 mm (1931–1960)
Hohenlimburg	930 mm (1931–1960)
Heppingsen	1079 mm (1931–1960)

Die mittlere jährliche Abflußhöhe beläuft sich auf 696 mm am Pegel Altena (1961–1975) und auf 480 mm am Pegel Menden (1951–1975). Die Hönne und ihre Nebenflüsse entwässern den größten Teil des Massenkalkgebietes. Entsprechend wird sich das Hauptaugenmerk der Untersuchung auf das Einzugsgebiet der Hönne konzentrieren.

### III. Probennahme und Analyseverfahren

Während des Abflußjahres 1973 und der zweiten Hälfte des Abflußjahres 1972 wurden an insgesamt 26 Entnahmestellen im Bereich des Iserlohner Massenkalkgebietes Wasserproben zur Bestimmung des Kalzium- und Magnesiumgehalts genommen. Die Probennahme erfolgte in unregelmäßigen Abständen, um ein möglichst weites Spektrum an unterschiedlichen hydrologischen Außenbedingungen erfassen zu können. Die Probennahmestellen lagen im Untersuchungsgebiet so verteilt (vgl. Abb. 1), daß sie während eines Entnahmeumlaufs innerhalb weniger Stunden erreichbar waren.

Die Probennahme zur Ermittlung der Lösungskonzentration ist wesentlich unproblematischer als die Probennahme zur Bestimmung der Schwebstoffkonzentration, da die Lösungskonzentration im allgemeinen im Gewässerquerschnitt einheitlich verteilt ist. Bei den ersten Probennahmen waren im Gewässerquerschnitt mehrere Proben genommen worden; es zeigte sich jedoch, daß die Abweichungen innerhalb der Fehlergrenzen der Analyseverfahren lagen. Es wurde deswegen im folgenden pro Entnahmestelle eine Probe untersucht. Die Laboranalyse erfolgte innerhalb 24 Stunden nach der Entnahme, vielfach noch am gleichen Tage.

Im Labor wurden zunächst Kalzium und Magnesium gemeinsam bestimmt mit Hilfe von Indikator-Puffer-tabletten und Titriplex als Titrierflüssigkeit. Anschließend wurde eine spezifische Kalziumbestimmung durchgeführt mit Calconkarbonsäure als Indikator. Aus der Differenz der Titriplexmengen konnte die Magnesiumkonzentration ermittelt werden<sup>2)</sup>.

Die ermittelten Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen können dann in äquivalente Mengen Kalzium- ( $\text{CaCO}_3$ ) bzw. Magnesiumkarbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) umgerechnet werden, oder die Gesamthärte kann, wie es in der Karstliteratur auch wegen der besseren Darstellbarkeit üblich ist, in eine äquivalente Menge Kalziumkarbonat umgerechnet werden. Die Lösungskonzentration wird in mg/l oder ppm ausgedrückt.

<sup>2)</sup> Die Analyseverfahren sind beschrieben in einer von der Firma MERCK publizierten Titrieranleitung: E. MERCK: Komplexometrische Bestimmungsmethoden mit Titriplex. Darmstadt.

Um Aussagen über die Lösungsfracht<sup>3)</sup> der Fließgewässer machen zu können, mußten Abflußmessungen herangezogen werden. Für die Bereitstellung von Abflußwerten möchte ich dem Staatlichen Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft Hagen und dem Ruhrtalesperrenverband Dank sagen. Die ebenfalls benötigten Niederschlagswerte stellte das Wetteramt Essen zur Verfügung.

#### IV. Die Lösungskonzentration in Abhängigkeit von Niederschlag und Abfluß

Lösungskonzentrationen und Abflußmenge verhalten sich in der Regel umgekehrt proportional. Das Verhältnis zwischen beiden Variablen läßt sich in einer Potenzfunktion der Form  $C = aQ^b$  ausdrücken

$C$  = Lösungskonzentration ( $\text{CaCO}_3$  in mg/l)

$Q$  = Abflußmenge (l/s oder  $\text{m}^3/\text{s}$ )

$a, b$  = Koeffizienten

Da es sich um ein inverses Verhältnis handelt, nimmt  $b$  negative Werte an, die in den meisten Fällen unter  $-1$  liegen (GREGORY & WALLING 1973). Auf logarithmischem Papier erscheint die Funktion als Gerade (vgl. Abb. 3).

Die Lösungskonzentration wird ebenfalls umgekehrt proportional auf die Niederschlagsmenge reagieren, da sich auch hier wie bei der Abflußmenge der Verdünnungseffekt bei größerem Wasserdargebot bemerkbar macht.

In der vorliegenden Untersuchung wird die Beziehung zwischen Lösungskonzentration ( $C$ ) und Niederschlagsmenge ( $N$ ) in Form einer linearen Regressionsgleichung  $C = a + bN$  ausgedrückt, da der Gebrauch einer Potenzfunktion im Durchschnitt schlechtere Korrelationen erbrachte.

Um zur Berechnung der Gleichungen neben einer genügenden Anzahl von Werten<sup>4)</sup> eine möglichst weit gestreute Informationsbreite zugrunde legen zu können, wurden die Proben im Beobachtungszeitraum bei unterschiedlichsten Abfluß- und Niederschlagsbedingungen genommen. Regressionsgleichungen mit der Abflußmenge als unabhängiger Variablen wurden nur für die Entnahmestellen an Hönne und Lenne erstellt<sup>5)</sup>, da

für die kleineren Gewässer keine laufenden Abflußbeobachtungen zur Verfügung standen. Regressionsgleichungen mit der Niederschlagsmenge als unabhängiger Variablen wurden berechnet für die Niederschlagssummen, die im Zeitraum von 5 ( $N_5$ ), 10 ( $N_{10}$ ) und 20 ( $N_{20}$ ) Tagen vor dem Entnahmedatum gefallen waren.

Die Entnahmestellen wurden in fünf Gruppen eingeteilt, die unterschiedliches Verhalten in den Schwankungen ihrer Lösungskonzentration erwarten ließen.

1. Entnahmestellen an der Lenne: Die Lenne als größter Fremdfluß im Massenkalkgebiet, Entnahmestellen 15 und 16.
2. Entnahmestelle an der Hönne: Die Hönne als durch Massenkalk wesentlich beeinflusstes Gewässer, Entnahmestellen 1–9.
3. Karstquellen: Entnahmestellen 13, 24–26.
4. Entnahmestellen an kleineren allochthonen Gewässern: Entnahmestellen 11, 18, 21.
5. Entnahmestellen an kleineren Fließgewässern nach Verlauf über Massenkalk: Entnahmestellen 10, 12, 14, 17, 19, 20, 22, 23.

##### a) Lösungskonzentration und Niederschlag

Die Lösungskonzentrationswerte der Gruppe 1 zeigten keine signifikante Korrelation mit den gewählten Niederschlagsparametern. Das war hier auch weniger zu erwarten, da zur Berechnung der Korrelation die Niederschlagswerte der Stationen, die den Entnahmestellen am nächsten lagen, benutzt wurden, und die Lenne durch Niederschläge im Oberlauf wesentlich beeinflusst wird.

Auch die Proben der Gruppe 3 zeigen keine signifikante Korrelation mit den Niederschlagswerten. Als überraschend muß die Tatsache festgehalten werden, daß selbst die Niederschlagssumme der 20 vorausgegangenen Tage keinen Einfluß auf die Lösungskonzentration der Karstquellen zu haben scheint.

Die Werte der Entnahmestellen der übrigen Gruppen wiesen bis auf einzelne Ausnahmen recht gute Korrelationen mit den Niederschlagssummen der vorherigen 10 bis 20 Tage ( $N_{10}$ ,  $N_{20}$ ) auf, während die Korrelationskoeffizienten für die Beziehung zwischen Lösungskonzentration und der Niederschlagssumme der vorherigen 5 Tage ( $N_5$ ) vielfach unter dem Schwellenwert für eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von 90% lagen. In Tabelle 1 sind die Sicherheitswahrscheinlichkeiten<sup>6)</sup> für die einzelnen Entnahmestellen und Niederschlagsvariablen dargestellt. Bei den Hönnewerten scheinen die Lösungskonzentrationen am stärksten durch die Niederschlagssumme der vorhergehenden

<sup>3)</sup> An dieser Stelle sollte noch einmal daraufhingewiesen werden, daß unbedingt zwischen Lösungskonzentration, die in mg/l oder  $\text{g}/\text{m}^3$  ausgedrückt wird (allgemein: Gewicht/Volumeneinheit), und Lösungsfracht, deren Maßeinheit g/s oder t/d (allgemein: Gewicht/Zeiteinheit) ist, unterschieden werden sollte.

<sup>4)</sup> Die Anzahl der Probennahmen variiert bei den einzelnen Entnahmestellen zwischen  $n = 8$  und  $n = 20$ . Es ist dem Verfasser bewußt, daß eine höhere Anzahl wünschenswert ist. Die Proben decken jedoch eine große Spannweite an Abflußwerten und Niederschlagswerten.

<sup>5)</sup> Es wurden die Werte der Pegelmessungen benutzt. Für die Entnahmestellen an der Hönne wurden die Abflußwerte flächenanteilmäßig berechnet.

<sup>6)</sup> Das Maß der Korrelation wird hier durch die Sicherheitswahrscheinlichkeiten ausgedrückt, da die einzelnen Korrelationskoeffizienten mit unterschiedlichen Anzahlen von Wertepaaren berechnet wurden und deswegen untereinander nicht absolut vergleichbar sind.

*Tabelle 1: Sicherheitswahrscheinlichkeiten für die korrelative Beziehung zwischen der Lösungskonzentration und der Niederschlagshöhe ( $N_5$ ) ( $N_{10}$ ) ( $N_{20}$ ) und die Beziehung zwischen Lösungskonzentration und Abflußmenge (Q)*

Confidence levels for the correlation between dissolved sediment concentration and precipitation amount ( $N_5$ ) ( $N_{10}$ ) ( $N_{20}$ ), and between dissolved sediment concentration and discharge (Q)

Entnahmestelle	Sicherheitswahrscheinlichkeiten in %				
	$N_5$	$N_{10}$	$N_{20}$	Q	
Gruppe 1:	15	–	–	–	95 (nur Winter)
	16	–	–	–	95 (nur Winter)
Gruppe 2:	1	–	95	95	95
	2	95	95	–	99
	3	95	99,9	99	95
	4	95	95	90	99
	5	99	95	95	99
	6	95	95	90	95
	7	95	95	–	95
	8	90	95	99	99
	9	95	95	95	99
Gruppe 3:	13	–	–	–	nicht ermittelt
	24–26	–	–	–	nicht ermittelt
Gruppe 4:	11	95	95	95	nicht ermittelt
	18	99	99	99,9	
	21	–	90	90	
Gruppe 5:	10	–	–	–	nicht ermittelt
	12	–	–	90	
	14	90	90	–	
	17	–	–	95	
	19	95	95	99	
	20	95	95	95	
	22	–	90	–	
	23	95	95	95	

10 Tage bestimmt zu sein, während sich bei Gruppe 4 und 5 keine deutlichen Unterschiede zwischen  $N_{10}$  und  $N_{20}$  ergeben. Da der korrelative Zusammenhang zwischen zwei Variablen nur bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von mehr als 95% (Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner als 5%) als statistisch signifikant angesehen werden kann, sind Aussagen über die Steuerung der Lösungskonzentration durch Niederschlag nur für die Entnahmestellen an der Höhne und die Entnahmestellen 11, 17–20 und 23 der Gruppen 4 und 5 möglich. Letztgenannte Probenahmestellen liegen mit Ausnahme von Nr. 23 an relativ großen Zuflüssen mit Einzugsgebieten von mehreren Quadratkilometern. Die Entnahmestellen der Gruppen 4 und 5, die keine statistisch signifikante Korrelation zeigen, befinden sich an kleinen Zuflüssen, die zudem noch durch Ortschaften (z. B. Asbeck und Beckumer Bach) oberhalb der Entnahmestellen in ihrer Lösungskonzentration beeinträchtigt sind. Hier wird die zu erwartende negativ

korrelative Beziehung zwischen Konzentration und Niederschlag durch nicht natürliche Einflußnahmen überlagert. Bezüglich der Steuerung der Lösungskonzentration durch den Niederschlag können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

1. Wo eine signifikante Korrelation zwischen Niederschlag und Lösungskonzentration besteht, ist diese negativ.
2. Die besten Korrelationen zeigen die Lösungskonzentrationswerte mit der Niederschlagssumme der vor dem Entnahmedatum liegenden 10 Tage ( $N_{10}$ ).
3. Die Lösungskonzentrationswerte an der Höhne zeigen im gesamten Verlauf gute Korrelationen mit den Niederschlagswerten.
4. Die Niederschlagsverhältnisse im Kalkgebiet zeigen keinen Einfluß auf das Lösungskonzentrationsverhalten an der Lenne als größtem Fremdfluß.
5. Die Lösungskonzentration an den Karstquellen zeigt keine signifikante Korrelation mit der Niederschlagshöhe.
6. Die Fließgewässer mittlerer Größenordnung zeigen relativ gute Korrelationen mit den Niederschlagswerten.

#### b) Lösungskonzentration und Abfluß

Untersuchungen über den korrelativen Zusammenhang zwischen Lösungskonzentration und Abfluß wurden für die Entnahmestellen der Gruppen 1 (Lenne) und 2 (Höhne) durchgeführt.

An der Lenne zeigten sich im ganzjährigen Vergleich der Werte für beide Probenahmestellen keine signifikanten Korrelationen. Betrachtete man jedoch ausschließlich die Werte des hydrologischen Winterhalbjahres, ergaben sich in den Berechnungen für beide Entnahmestellen Korrelationskoeffizienten, für die eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von mehr als 95% bestand.

Die schlechte Korrelation während des Sommerhalbjahres wird nicht zuletzt dadurch begründet sein, daß im Beobachtungszeitraum die Abflußwerte nur sehr wenig schwankten, und die Schwankungen in den Lösungskonzentrationen durch anthropogene Einwirkungen hervorgerufen wurden. Bei den stärkeren Schwankungen des Wasserstandes im Winterhalbjahr wirkten sich dagegen die unterschiedlichen Abflußwerte in erster Linie bestimmend für die Varianz in den Lösungskonzentrationswerten aus.

An der Höhne wurden im Flußlängsverlauf insgesamt neun Entnahmestellen angefahren, damit Aussagen über die Veränderung der Lösungskonzentration mit zunehmender Dauer des Kontakts mit dem Massenkalk und zunehmender Bedeutung des Kalkeinflusses möglich wurden. An den einzelnen Entnahmetagen nahmen die Lösungskonzentrationswerte flußab mit wachsender Lauflänge über Kalk zu. Diese Tendenz ist in Abbildung 2 zu erkennen. Es ist hier die

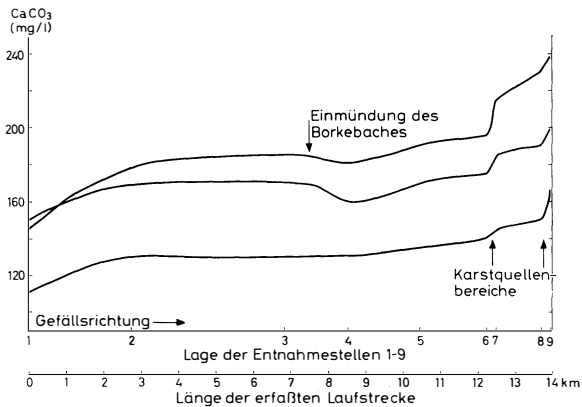


Abb. 2: Verhalten der Lösungskonzentration im Hönellängsverlauf an drei ausgewählten Tagen

Change of dissolved sediment concentration along the course of the Höhne on three different days

Entwicklung der Lösungskonzentrationswerte für drei ausgewählte Entnahmetage bei unterschiedlichen hydrologischen Außenbedingungen im Flußlängsverlauf maßstabsgerecht festgehalten.

Die Zunahme in den Lösungskonzentrationswerten erfolgt nicht kontinuierlich, sondern wird in hohem Maße durch den Einfluß der in die Höhne mündenden Gewässer bestimmt. Das ist besonders bei der Steigerung des Kalkgehaltes zwischen den Entnahmestellen 6 und 7 und den Entnahmestellen 8 und 9 der Fall, wo im zwischenliegenden Flußabschnitt Karstquellen oder stark lösungsintensive Zuflüsse in die Höhne münden. Ein gegensätzlich gerichteter Effekt ist zwischen den Entnahmestellen 3 und 4 festzustellen, wo der Borkebach, ein größerer Nebenfluß der Höhne, der relativ weiches Wasser führt, in die Höhne mündet.

Aus einem Vergleich der Lösungskonzentrationskurven untereinander ergibt sich, daß die Entwicklung der Lösungskonzentrationswerte im Hönellängsverlauf auch bei stark unterschiedlichen Außenbedingungen in ähnlicher Form abläuft. Das traf außer für die drei dargestellten Entnahmetage für alle weiteren ebenfalls zu. Als weitere Information ist aus den Kurven zu entnehmen, daß sich die Werte der einzelnen Entnahmestellen an den Probennahmetagen in gleicher Richtung verändern, sie also auf die vorgegebenen hydrologischen Bedingungen in gleicher Form reagieren. Allerdings ist die Steigerung der Lösungskonzentrationswerte im Flußlängsverlauf an abflußreichen Tagen weniger groß als an solchen mit geringem Abfluß.

So weisen auch alle Entnahmestellen an der Höhne gute und sehr gute Korrelationen zwischen Abflußmenge und Lösungskonzentration (vgl. Tab. 1) auf. Die Korrelationskoeffizienten sind mit Sicherheitswahrscheinlichkeiten von mehr als 95% und in den meisten Fällen von mehr als 99% statistisch signifikant bis sehr signifikant. Die Exponenten der berechneten

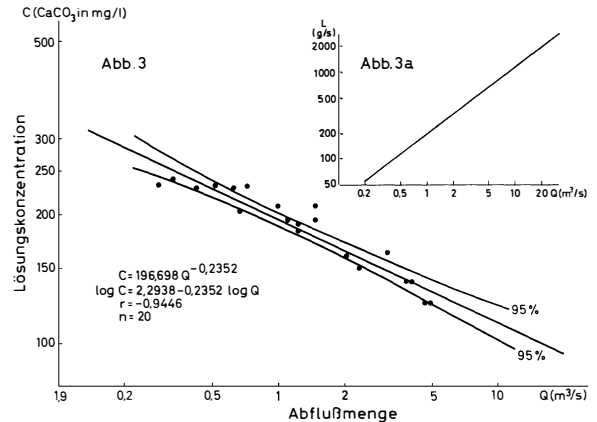


Abb. 3: Regressionsgerade (logarithmische Darstellung) für die Beziehung zwischen Abflußmenge (Q) und Lösungskonzentration (C) mit den 95%-Konfidenzgrenzen

3a: Graphische Darstellung (logarithmisch) der Beziehung zwischen Abflußmenge (Q) und Lösungsfracht (L), berechnet unter Verwendung der in Abb. 3 dargestellten Funktion

Dissolved sediment concentration (C) rating curve with the 95% confidence limits (sampling site 9)

3a: Relation between discharge (Q) and dissolved sediment load (L). Sediment load values were calculated using the rating curve of Fig. 3

Potenzfunktionen liegen zwischen  $-0,15$  und  $-0,25$ . Als Beispiel der korrelativen Beziehung zwischen Abflußmenge und Lösungskonzentration sind die Werte für die Entnahmestelle 9, die unmittelbar vor der Massenkalknordgrenze liegt, in logarithmischer Darstellung abgebildet (Abb. 3)<sup>7)</sup>.

Die negative Korrelation zwischen Abflußmenge und Lösungskonzentration (Wasserhärte) ist in vielen Veröffentlichungen für sehr unterschiedliche Untersuchungsgebiete bestätigt worden (ŠTELCL, VLČEK und PIŠE 1969; GAMS 1972; JENNINGS 1972; NEWSON 1972; HELLDÉN 1976). Auch DOUGLAS (1968) betont das Vorhandensein einer generell inversen Korrelation zwischen beiden Variablen, weist aber darauf hin, daß in einzelnen Einzugsgebieten eine positive Korrelation festgestellt werden konnte (vgl. auch GREGORY & WALLING 1973).

Obwohl in Ausnahmefällen eine andere als inverse Beziehung zwischen den Variablen Abflußmenge und Lösungskonzentration aufgrund komplizierender Verhältnisse in dem betroffenen Einzugsgebiet bestehen kann, muß doch die negative Korrelation als die vorwiegend existente angesehen werden.

<sup>7)</sup> Bei der logarithmischen Transformierung der Werte nimmt die graphische Darstellung der Potenzfunktion  $C = aQ^{-b}$  die Form einer Geraden an mit der zugehörigen Regressionsgleichung  $\log C = \log a - b \log Q$ ; b bestimmt die Steigung der Regressionsgeraden.

Diese negative Korrelation ist vor allem durch den Verdünnungseffekt bei Hochwasserabflüssen bedingt. Bei Hochwasser wird ein größerer Teil des gesamten Abflusses durch den direkten Abfluß gebildet, der sich aus dem Oberflächenabfluß und dem unmittelbaren Zwischenabfluß (rapid interflow) zusammensetzt. Bei Niedrigwasserabflüssen wird ein größerer Teil des Gesamtabflusses durch den Basisabfluß repräsentiert, der sich zusammensetzt aus Grundwasserabfluß und verzögertem Zwischenabfluß (delayed interflow). Oberflächenabfluß und unmittelbarer Zwischenabfluß haben einen wesentlich kürzeren und wesentlich weniger intensiven Kontakt mit Gestein und Boden als der Basisabfluß. Der direkte Abfluß, dessen Anteil besonders bei höheren Abflußmengen bedeutend ist, wird in der Regel immer einen geringeren Lösungsanteil pro Volumeneinheit aufweisen als der Basisabfluß. Das sich unter Trockenwetterbedingungen in einem Karstwassersystem befindende Wasser hat eine längere Verweildauer im System und kann eine hohe Lösungskonzentration erreichen, während das System bei starkem Abfluß schneller durchfließende Wasser sein Lösungspotential nur teilweise ausschöpfen kann.

Die für die Beziehung zwischen Abflußmenge und Lösungskonzentration ermittelte Regressionsgleichung kann zur rechnerischen Bestimmung der Lösungskonzentration bei bekannten Abflußwerten verwendet werden. Die graphische Darstellung der Regressionsgleichung (Abb. 3) dient als Schätzkurve (rating curve), von der die Lösungskonzentration zu einem bestimmten Abflußwert abgelesen werden kann.

Wie bei jeder Regressionsanalyse stellt sich auch hier die Frage, wie genau der Wert der abhängigen Variablen (hier: C) bei bekanntem Wert der unabhängigen Variablen (hier: Q) geschätzt werden kann, da sich die Berechnung der Regressionsgleichung notwendigerweise auf eine Stichprobenauswahl beschränken muß und somit nur eine Näherung der Regressionsgleichung der Grundgesamtheit darstellt. Mit Hilfe statistischer Methoden<sup>8)</sup> können Konfidenzintervalle berechnet werden, innerhalb derer die tatsächlichen Werte der abhängigen Variablen bei gegebenen Sicherheitswahrscheinlichkeiten liegen.

In Abbildung 3 sind die Konfidenzintervalle bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% für die Voraussage des Wertes der Lösungskonzentration bei bekanntem Abflußwert eingezeichnet. Die Konfidenzgrenzen liegen relativ eng um die berechnete Regressionsgerade, so daß die auf dieser beruhenden Schätzungen als relativ genau bezeichnet werden können. Aus der Darstellung wird ersichtlich, daß die Konfidenzintervalle mit zunehmender Entfernung vom Mittelwert von Q größer werden, daß also die Genauigkeit der Schätzung im peripheren Bereich abnimmt. Das ist bei Voraussagen zu berücksichtigen.

<sup>8)</sup> Für die Berechnung wurde das von EBDON (1977) beschriebene Verfahren verwendet.

Bezüglich der Steuerung der Lösungskonzentration durch den Abfluß können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

1. Lösungskonzentration und Abfluß weisen eine negative Korrelation auf.
2. An der Lenne bestand nur während des hydrologischen Winterhalbjahres ein signifikant korrelativer Zusammenhang zwischen Lösungskonzentration und Abflußmenge.
3. An der Hönne ist an allen Entnahmestellen die Korrelation zwischen Lösungskonzentration und Abflußmenge gut bis sehr gut. Die Werte der Exponenten in der Potenzfunktion  $C = aQ^b$  liegen zwischen  $-0,15$  und  $-0,25$ .
4. Die ermittelte Regressionsgleichung der Beziehung zwischen Lösungskonzentration und Abflußmenge erlaubt als Schätzkurve (Abb. 3) zuverlässige Voraussagen der Lösungskonzentration bei bekannten Abflußwerten.

## V. Folgerungen für die Karstmorphodynamik

Die bisherigen Vorstellungen könnten dem Eindruck Vorschub leisten, daß die größten Abtragungsintensitäten zu Zeiten geringen Abflusses zu erwarten wären. Doch das Gegenteil ist der Fall. Zwar ist bei geringen Abflußmengen die Konzentration pro Volumeneinheit größer, die abgeführte Lösungsfracht steigt jedoch mit zunehmender Abflußmenge.

Unter Verwendung der aus den Meßdaten ermittelten Regressionsgleichung für die Beziehung zwischen Abflußmenge und Lösungskonzentration kann die zu den verschiedenen Abflußwerten gehörige Lösungsfracht berechnet werden. Die Beziehung zwischen Abflußmenge und Lösungsfracht zeigt eine eindeutige positive Korrelation (vgl. Abb. 3a). Die Begründung dafür liegt in der Tatsache, daß die Abflußwerte wesentlich stärker variieren als die Werte für die Lösungskonzentration.

An der Hönne variieren die extremen Abflußwerte mit einem Faktor von 445, die zugehörigen Lösungskonzentrationen nur um einen Faktor von 4. Nur wenn in der Funktion  $C = aQ^b$  der Exponent größer als  $-1$  ist, würde die Lösungsfracht bei abnehmender Abflußmenge steigen.

Die Beziehungen zwischen Abflußmenge, Lösungskonzentration und Lösungsfracht sind in Abbildung 4 veranschaulicht. Als Beispielswerte dienten die Monatsmittel des Abflusses 1973, die zusammen mit den nach der Regressionsgleichung berechneten Werten für Konzentration und Fracht aufgezeichnet sind. Es wird deutlich, daß zu Abflußmaxima Konzentrationsminima gehören und umgekehrt, daß die Frachtmaxima mit den Abflußspitzenwerten zusammenfallen. Die inverse Beziehung zwischen Abfluß und Konzentration führt lediglich zu einer Glättung der Frachtkurve im Vergleich zur Abflußganglinie.

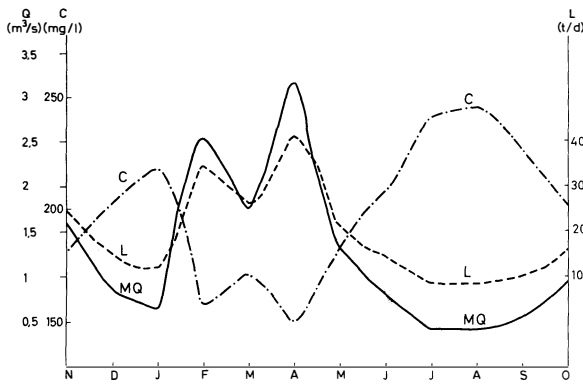


Abb. 4: Abflußmonatsmittel (MQ) des Abflußjahres 1973 und zugehörige Lösungskonzentrationen (C) und Lösungsfrachten (L)

Monthly mean discharges (MQ) of the water year 1973 and respective dissolved sediment concentrations (C) and dissolved sediment loads (L)

Bei einer Analyse der Karstmorphodynamik und Abtragungsintensität in einem Karstgebiet ist die Abflußmenge eine bedeutendere Einflußgröße als andere Parameter, die nur die potentielle Lösungsfähigkeit des Wassers pro Volumeneinheit steuern. Bei hohen Abflüssen ist in der Regel das Lösungspotential des Wassers nicht ausgeschöpft, so daß die maximale Lösungskraft des Karstwassers, die vor allem durch dessen  $\text{CO}_2$ -Gehalt und dessen Kontakt mit  $\text{CO}_2$ -haltigen Media bestimmt ist, nur bei Niedrigwasserabflüssen mit entsprechend langen Aufenthaltsdauern des Wassers im Karstsystem eine signifikant steuernde Rolle spielt. Im Vergleich des morphodynamischen Verhaltens verschiedener Einzugsgebiete kommt der Untersuchung der das Lösungspotential steuernden Parameter jedoch eine entscheidende Bedeutung zu.

Bei der Wertung der morphodynamischen Wirksamkeit verschieden hoher Abflußmengen kann ein Verfahren wertvolle Aufschlüsse geben, das in der angelsächsischen Literatur in verschiedenen Varianten vorgestellt wird (z. B. SMITH & NEWSON 1974), aber meines Wissens in der deutschsprachigen Literatur noch keine Anwendung gefunden hat. Als Informationsgrundlage benutzt man generell die Regressionsgleichung der Beziehung zwischen Abflußmenge und Lösungskonzentration sowie die Abflußdauerlinie<sup>9)</sup>.

<sup>9)</sup> Abflußdauerlinien für die Pegel I. und II. Ordnung werden für die Gewässer der Bundesrepublik Deutschland in den Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbüchern veröffentlicht. Von ihnen sind für die einzelnen Abflußwerte die Über- bzw. Unterschreitungstage abzulesen. Nach DIN 4049 ist die Dauerlinie die zeichnerische Darstellung statistisch gleichwertiger Einzelbeobachtungen in der Reihenfolge ihrer Größe.

Bei der vorliegenden Analyse wurde unter Berücksichtigung der genannten Verfahren im einzelnen wie folgt verfahren:

Als Beispielstation wurde Entnahmestelle 9 an der Hönne bei Oberrödinghausen gewählt. Die Abflußwerte wurden in 16 Klassen unterteilt, die mit Ausnahme der höchsten Klasse eine Klassenbreite von  $0,5 \text{ m}^3$  haben (Tabelle 2). Für die einzelnen Klassenmitten (Spalte 2) wurden mit Hilfe der Regressionsgleichung die zugehörigen Lösungskonzentrationen bestimmt (Tabelle 2, Spalte 7). Aus der Abflußdauerlinie kann die Anzahl der Tage abgelesen werden, an denen Abflußwerte einer bestimmten Klasse erreicht wurden (Spalte 3). Die äquivalenten Prozentanteile sind in Spalte 5 angeführt. Die Spalten 4 und 6 zeigen die kumulative Anzahl der Tage, bzw. die Prozentanteile an, an denen Abflußwerte der zugehörigen Klasse erreicht oder unterschritten wurden. In Spalte 8 sind die zu den Klassenmitten der Abflußwerte zugehörigen Lösungsfrachten angegeben. Aus den bis dahin vorliegenden Informationen kann dann der Anteil der einzelnen Abflußklassen an der Gesamtlösungsfracht abgeleitet werden, sowohl absolut (Spalte 9) wie prozentual (Spalte 11). Die verbliebenen Spalten geben die kumulativen Werte der Lösungsfracht (Spalte 10) und die kumulativen Prozentanteile (Spalte 12) an. Jede Zahlenangabe dieser Spalten repräsentiert die Menge der Lösungsfracht bzw. den prozentualen Anteil an der Gesamtlösungsfracht, der von der zugehörigen Abflußklasse und den Klassen geringerer Abflußwerte transportiert wird. Der letzte Wert in Spalte 10 gibt die durchschnittliche Menge der Gesamtlösungsfracht eines Jahres an der Entnahmestelle an.

Mit Hilfe der Tabelle kann man eine Summenkurve der durchschnittlichen Lösungsfracht erstellen (Abb. 5). Hier sind auf der x-Achse die Anzahl der Tage des Jahres sowie die äquivalenten Prozentwerte kumulativ eingetragen, auf der y-Achse die kumulativen Lösungsfrachten sowie die zugehörigen Prozentanteile. Die Kurve bietet eine diagrammatische Veranschaulichung der zeitlichen Verteilung der Lösungsabtragung.

Aus Tabelle und Kurve können folgende Informationen entnommen werden:

Der prozentuale Anteil von Abflüssen bestimmter Größenordnung an der Gesamtlösungsfracht entspricht nicht deren prozentualem Anteil am Abflußgeschehen. Niedrige Abflußwerte weisen im Vergleich mit ihrer Dauer geringe Frachtanteile auf, hohe Abflußwerte dagegen vergleichsweise große Frachtanteile. Es läßt sich ablesen, daß 25% der gesamten Lösungsfracht eines Jahres von Abflüssen transportiert werden, die an nur 33 Tagen des Jahres vorkommen. 50% der Gesamtlösungsfracht werden abgeführt von Abflüssen, die nur etwas mehr als 25% der Gesamtdauer des Jahres, nämlich 95 Tage, ausmachen.

Ein großer Teil der Lösungsfracht wird mithin während relativ kurzer Zeit transportiert. Jedoch zeigen

Tabelle 2: Die morphodynamische Wirksamkeit verschieden hoher Abflußmengen (Entnahmestelle 9, Hönne bei Oberrödinghausen)

Morphodynamic activity of discharges of different magnitudes (sampling site 9, Hönne at Oberrödinghausen)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0 -0,5	0,25	37	37	10,14	10,14	273	68	217,4	217,4	2,3	2,3
0,5-1	0,75	103	140	28,22	38,36	211	158	1406,1	1623,5	14,9	17,2
1 -1,5	1,25	72	212	19,73	58,09	187	234	1455,7	3079,1	15,4	32,6
1,5-2	1,75	48	260	13,15	71,24	173	303	1256,6	4335,7	13,3	45,9
2 -2,5	2,25	25	285	6,85	78,09	163	367	792,7	5128,4	8,4	54,4
2,5-3	2,75	19	304	5,2	83,29	155	426	699,3	5827,8	7,4	61,8
3 -3,5	3,25	14	318	3,84	87,13	149	484	585,4	6413,2	6,2	68,-
3,5-4	3,75	11	329	3,01	90,14	144	540	513,2	6926,4	5,4	73,4
4 -4,5	4,25	8	337	2,19	92,33	140	595	411,3	7337,7	4,4	77,8
4,5-5	4,75	7	344	1,92	94,25	136	646	390,7	7728,4	4,1	81,9
5 -5,5	5,25	6	350	1,64	95,89	133	698	361,8	8090,2	3,8	85,8
5,5-6	5,75	4	354	1,1	96,99	130	748	258,5	8348,7	2,7	88,5
6 -6,5	6,25	3	357	0,82	97,81	128	800	207,4	8556,1	2,2	90,7
6,5-7	6,75	3	360	0,82	98,63	125	844	218,8	8774,9	2,3	93,-
7 -7,5	7,25	2	362	0,55	99,18	123	892	154,1	8929,0	1,6	94,7
> 7,5	20	3	365	0,82	100,-	97	1940	502,8	9431,8	5,3	100,-

1 Abflußmengenklassen (m<sup>3</sup>/s); 2 Klassenmitten (m<sup>3</sup>/s); 3 Häufigkeitszahlen; 4 Kumulative Häufigkeitszahlen; 5 Häufigkeitszahlen in ‰; 6 Kumulative Prozentanteile; 7 Lösungskonzentrationen (mg/l); 8 Lösungsfrachten (g/s); 9 Anteil der Abflußmengenklassen an der Gesamtlösungsfracht eines Jahres (t/a); 10 Kumulative Werte; 11 Prozentanteile der Abflußmengenklassen an der Gesamtlösungsfracht eines Jahres; 12 Kumulative Prozentanteile

1 discharge classes (m<sup>3</sup>/s); 2 class mean (m<sup>3</sup>/s); 3 frequency (days); 4 cumulative frequencies; 5 frequency (percent); 6 cumulative percentages; 7 dissolved sediment concentration (mg/l); 8 dissolved sediment load (g/s); 9 contribution of discharges classes to annual dissolved load; 10 cumulative values; 11 contribution of discharge classes to annual dissolved load (percent); 12 cumulative percentages

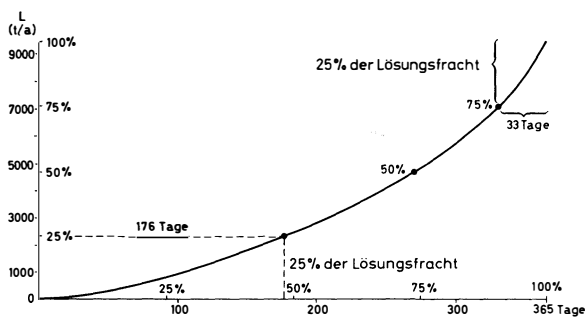


Abb. 5: Summenkurve der jährlichen Lösungsfracht (L) in t/Jahr

Beispiel: Zum Transport von 25% der Lösungsfracht werden bei Niedrigwasserabflüssen 176 Tage, bei Hochwasserabflüssen nur 33 Tage benötigt.

Cumulative graph showing annual dissolved sediment load (L)

Example: During low flows 176 days are needed to transport 25% of the total load, but only 33 days are needed during high flows.

die extremen Abflüsse eine bedeutendere Rolle bei den Abtragungsprozessen spielen (vgl. GREGORY & WAL-LING 1973).

Die Frage der Bestimmung von Lösungsraten (rate of solutional erosion, denudation rate, chemical denudation) für Karstgebiete oder Flußeinzugsgebiete ist in der Karstliteratur intensiv behandelt worden. Jüngst ist diesem Problem ein Symposium gewidmet worden (GAMS 1976). Der Bestimmung der Lösungs-raten standen häufig nur unzureichende Meßreihen zur Verfügung. In die Formel von CORBEL (1959) und darauf aufbauende Berechnungsweisen fanden meist nur Durchschnittswerte für die Wasserhärte und geschätzte Abflußhöhen (in dm) Eingang. In Gebieten mit langjährigen Abflußbeobachtungen sollten exaktere Methoden herangezogen werden, die die Abflußdauerlinie und eine mit einer Reihe von Meßdaten rechnerisch ermittelte Beziehung zwischen Abflußmenge und Lösungskonzentration zur Bestimmung der Lösungs-rate benutzen. So kommt man, wie in Spalte 10 von Tabelle 2 angegeben, zur Festlegung der durchschnittlichen jährlichen Lösungsfracht. Dieser Wert, dividiert durch die Fläche des Einzugsgebietes, ergibt die Frachts-pende pro km<sup>2</sup> des Einzugsgebietes pro Jahr, hier 73,5 t/km<sup>2</sup>/a. Eine durchschnittliche Dichte des löslichen Substrats von 2,5 vorausgesetzt, erhält man für das Einzugsgebiet der oberen Hönne eine Lösungsrate von 29,4 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/a oder 29,4 mm/1000 a. Wenn zum Ver-

die Darstellungen auf der anderen Seite, daß nicht singuläre Ereignisse den Hauptanteil des Transports bestimmen, sondern daß dieser von Abflüssen gemäßigter Größenordnung geleistet wird. Ähnliche Betrachtungen für den Schwebstofftransport ergeben, daß hier



**Tabelle 3: Differenzen in der Lösungsratenbestimmung bei Verwendung verschiedenartiger Methoden**

Differences in the assessment of the rate of solutional erosion when using different methods

1. Berechnung mit Hilfe der hier vorgestellten Methode (Benutzung der Regressionsgleichung der Beziehung zwischen Lösungskonzentration und Abflußmenge, Benutzung der Abflußdauerlinie).	29,4 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /a oder mm/1000a
2. Berechnung nach der Formel von CORBEL (1959)	
$X = \frac{4 ET}{100}$	
X = Lösungsrate	
E = Abflußhöhe (dm)	
T = durchschnittliche Lösungskonzentration	36,48 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /a oder mm/1000a
3. Berechnung nach der Formel von WILLIAMS (1963)	
$X = \frac{fQT}{10^9 AD}$	
f = Umrechnungsfaktor (bei Q in m <sup>3</sup> ist f = 1000)	
Q = Abflußsumme (m <sup>3</sup> )	
A = Fläche des Einzugsgebietes (km <sup>2</sup> )	
D = Dichte des löslichen Substrats	
Die anderen Ausdrücke wie oben	35,67 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> /a oder mm/1000a

gleich bei der Berechnung der Lösungsrate die Formeln von CORBEL (1959) oder WILLIAMS (1963) benutzt werden, ergeben sich erheblich nach oben abweichende Werte (vgl. Tabelle 3).

Der Aussagewert der Lösungsraten ist umstritten. Seine Verlässlichkeit und Aussagekraft werden durch mehrere Faktoren beeinträchtigt. Masseneingaben an gelöstem Material, die nicht durch Lösung des Substrats im Einzugsgebiet bedingt sind, z. B. durch Niederschlag und anthropogene Beeinflussungen, müssen bei der Kalkulation der Lösungsrate berücksichtigt werden (vgl. MEADE 1969).

Ein häufiger Einwand gegen die Benutzung von Lösungsraten ist, daß die Maßzahl keine Information über die Verteilung der Lösungsdynamik im Karstsystem beinhalte, sondern nur eine relativierte Angabe über die Oberflächenerniedrigung im Gesamtsystem mache (BECKINSALE 1972) und als Formungsindex nicht zu verwenden sei (PRIESNITZ 1974).

Das Argument BECKINSALES wird in jüngeren Arbeiten insofern entkräftet, daß die dort vorgestellten Detailergebnisse über die Lösungsdynamik zeigen, daß tatsächlich der größte Teil der Lösungstätigkeit, weit über 60%, im oberflächennahen Bereich vonstatten

geht, daß deswegen eine Beschreibung der Lösungstätigkeit in einem Karstgebiet durch eine Maßzahl der Oberflächenerniedrigung (mm/1000 a) durchaus ihre begründete Berechtigung hat (SMITH & NEWSON 1974; ATKINSON & SMITH 1976).

Ein sehr bemerkenswertes Ergebnis, das ebenfalls in den genannten Arbeiten präsentiert wird, ist, daß in den unterirdischen Hohlräumen nur ein ausgesprochen geringer Anteil an der Gesamtlösung, nämlich weniger als 1%, gelöst wird. PRIESNITZ (1974) kommt bei seinen Untersuchungen im Muschelkalk des Niedersächsischen Berglandes zu dem Ergebnis, daß sich die Lösungstätigkeit nicht in Karstoberflächenformen manifestiert, daß die Lösung insgesamt nur eine das Relief tieferschaltende Wirksamkeit zeigt. Auch für das eigene Arbeitsgebiet kann bestätigt werden, daß die Lösung zu einer Relieferung der Oberfläche in nur sehr geringem Maße beiträgt. Zwar fehlen Hohlformen und sich rezent erweiternde Hohlformen nicht vollkommen, im Vergleich mit der berechneten Lösungsfracht stellen sie jedoch nur einen zu vernachlässigenden Lieferungsanteil dar. Insofern zeigen neben den Messungen zur Verteilung der Lösungsdynamik auch die Geländebeobachtungen, daß man in vielen Karstgebieten der Angabe einer Lösungsrate doch einen respektablem Aussagewert zubilligen kann.

Bei einer Bestimmung der Lösungsrate sollte dann jedoch, wo die Möglichkeiten bestehen, ein Verfahren benutzt werden, daß die Veränderlichkeit der Variablen Abflußmenge und Lösungskonzentration berücksichtigt und bei der Berechnung der Gesamtlösungsfracht die Abflußdauerlinie heranzieht, wie es oben demonstriert wurde. Ein solches Verfahren trägt der komplexen hydrologischen Steuerung der Karstmorphodynamik mehr Rechnung (Tabelle 3).

Für die Karstmorphodynamik ergeben sich nachstehende Folgerungen:

1. Die Lösungsfracht korreliert im Gegensatz zur Lösungskonzentration eindeutig positiv mit der Abflußmenge (Abb. 3a).
2. Die Häufigkeit des Auftretens verschieden hoher Abflußmengen entspricht nicht deren Anteil an der Gesamtlösungsfracht. Hohe Abflüsse leisten im Vergleich zu ihrer Dauer intensivere Lösungsarbeit als niedrige Abflüsse. Der größte Teil der Gesamtlösungsfracht wird während eines vergleichsweise kleinen Zeitraums transportiert.
3. Die Höhne transportiert bei Oberrödinghausen (Entnahmestelle 9) während eines Jahres durchschnittlich 9400 Tonnen Lösungsfracht. Das entspricht einer Lösungsrate von 29 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/a bzw. 29 mm/1000 a.
4. Die Charakterisierung der Lösungstätigkeit durch eine Maßzahl der Oberflächenerniedrigung (mm/1000a) hat durchaus ihre Berechtigung, da ein großer Teil der Lösung (> 60%) oberflächennah stattfindet.

5. In der Oberflächenreliefierung macht sich diese Lösungstätigkeit nur in ausgesprochen geringem Maße bemerkbar.
6. Bei der Berechnung der Lösungsraten sollte der komplexen Steuerung der Lösungsdynamik besonders durch den Abfluß Rechnung getragen werden.

#### Literatur

- ATKINSON, T. C. & SMITH, D. I.: The Erosion of Limestones. In: FORD, T. D. & CULLINGFORD, C. H. D.: The Science of Speleology. London, 1976, S. 151–177.
- BECKINSALE, R. P.: The limestone bugaboo: surface lowering or denudation or amount of solution. Trans. Cave Res. Gr. G. B., 14, 1972, S. 55–58.
- CORBEL, J.: Erosion en terrain calcaire. – Ann. Geogr., 68, 1959, S. 97–120.
- DOUGLAS, I.: Some hydrologic factors in the denudation of limestone terrains. Zschr. Geom., 12, 1968, S. 241–255.
- EBDON, D.: Statistics in Geography. – Oxford, 1977.
- GAMS, I.: Factors and dynamics of corrosion of the Carbonate Rocks in the Dinaric Karst of Slovenia. Geografski vestnik, 38, 1966, S. 11–68.
- : Effect of runoff on corrosion intensity in the NW Dinaric Karst. Trans. Cave Res. Gr. G. B., 14, 1972, S. 78–83.
- (Hrsg.): Karst Processes and Relevant Landforms. Ljubljana, 1976.
- GREGORY, K. J. & WALLING, D. E.: Drainage Basin. Form and Process. London, 1973.
- HELLDÉN, U.: Hydrology and Karst Denudation. In: GAMS, I.: Karst Processes and Relevant Landforms. Ljubljana, 1976, S. 97–106.
- JENNINGS, J. N.: The Blue Waterholes, Cooleman Plain, N.S.W., and the problem of karst denudation rate determination. Trans. Cave Res. Gr. G. B., 14, 1972, S. 109–117.
- MEADE, R. H.: Errors in using modern stream-load data to estimate natural rates of denudation. Bull. Geol. Soc. Am., 80, 1969, S. 1265–1274.
- MIOTKE, F. D.: Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Bodenluft in seiner Bedeutung für die aktuelle Kalklösung in verschiedenen Klimaten. Abh. Ak. d. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Klasse, 3. Folge, 29, 1974, 51–67.
- NEWSON, M. D.: Merits of a hydrological bias to karst erosion studies. Trans. Cave Res. Gr. G. B., 14, 1972, S. 118–124.
- PRIESNITZ, K.: Lösungsraten und ihre geomorphologische Relevanz. Abh. Ak. d. Wiss. Göttingen, Math.-Phys. Klasse, 3. Folge, 29, 1974, 68–85.
- SCHMIDT, K.-H.: Geomorphologische Untersuchungen in Karstgebieten des Bergisch-Sauerländischen Gebirges. Bodumer Geogr. Arbeiten, 22, Paderborn, 1975.
- SMITH, D. I. & NEWSON, M. D.: The dynamics of solutional and mechanical erosion in limestone catchments on the Mendip, Hills, Somerset. In: GREGORY, K. J. & WALLING, D. E.: Fluvial Processes in Instrumented Watersheds. – London, 1974, S. 155–167.
- ŠTELCL, O., VLČEK, V. & PIŠE, J.: Limestone solution intensity in the Moravian Karst. – Stud. Geogr. Brno, 1969, S. 71–86.
- WILLIAMS, P. W.: An initial estimate of the speed of limestone solution in County Clare. – Irish Geogr., 4, 1963, S. 432–441.

## INDUSTRIAL ESTATES IN CENTRAL CLYDESIDE – VERBREITUNG, DIFFERENZIERUNG UND BEDEUTUNG FÜR DEN STRUKTURWANDEL EINES ALTEN INDUSTRIERAUMES

Mit 3 Abbildungen und 5 Tabellen

MANFRED HOMMEL

*Summary:* Industrial estates in old industrial regions: The case of Central Clydeside.

Until now industrial estates are pretty rare in West Germany, but are recently proposed as an instrument to promote industrial change in the Ruhr coalfield. This paper examines industrial estates as an instrument of regional policy and their role in the modernization process of Central Clydeside. Four types of industrial estates: SIEC, New Town, private, and local authority estates are identified and described by number, size, and distribution. The objectives of the different developing agencies, location patterns, design, and factory types of their estates and their particular conditions and restrictions for incoming firms are analysed as well as the resulting differences in the industrial structure (by SIC-order, size, density of employment, and ultimate ownership

of establishments) and the intra-regional effects of the estates. The large government estates have attracted a lot of new industries – the SIEC estates mainly larger firms from outside the region, the New Town estates often smaller firms from Glasgow –, but due to their location in the older problem areas at the fringe of Glasgow and in Lanarkshire, Glasgow with its still declining industries has not as much participated in this growth as the outer parts of the conurbation. The recently developed small private and local authority estates are concentrated in the industrial core of the conurbation and encourage expanding local firms to stay there, so reducing industrial decline. Due to their variety and the cooperation of the different developing agencies industrial estates are an effective instrument not only for regional economic policy, but also for urban planning in old industrial regions.