

Untersuchungen zur Systematik, Morphologie und Ökologie der in westfälischen Höhlen vorkommenden aquatischen Höhlentiere*

Jürgen Pust, Münster

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung	4
II. Material und Methode	9
1. Das Untersuchungsgebiet	9
2. Die untersuchten Höhlen	9
3. Faunistische Untersuchungen	13
4. Abundanzbestimmungen	13
5. Morphologische und anatomische Untersuchungen zur Überprüfung des Artstatus	13
6. Klimatische Untersuchungen	14
7. Hydrochemische Untersuchungen	14
III. Ergebnisse	18
1. Das Arteninventar	18
2. Die Verteilung der troglobionten Arten im Untersuchungsgebiet	30
3. Das Klima der untersuchten Höhlen und die physikochemischen Parameter der Gewässer	35
3.1. Ergebnisse höhlenklimatischer Untersuchungen	36
3.2. Temperatur, pH-Wert, CO ₂ - und O ₂ -Konzentration der Höhlengewässer	36
4. Der Gewässerchemismus: geochemisch bedingte Verhältnisse und anthropogene Belastungen mit Schadstoffen	88
5. Reaktionen aquatischer Troglobionter auf abiotische und biotische Umweltbedingungen	119
6. Zur Morphologie und Anatomie von <i>Krumbachia subterranea</i> REISINGER, <i>Rectocephala schneideri</i> (KOMAREK) und <i>Prostoma putealis</i> (DE BEAUCHAMP)	159
IV. Diskussion	167
1. Die vertikale Verteilung der troglobionten Arten	167
2. Die Abhängigkeit der Höhlenfauna von den geologischen Formationen	170
3. Ökologische Valenz und Ausbreitungsfähigkeit	172
4. Die postglaziale Ausbreitung	174
5. Zur Frage genetischer Differenzierungen westfälischer Höhlentierpopulationen	175
6. Die Auswirkungen anthropogener Veränderungen auf die rezente Besiedlung	176
V. Zusammenfassung	179
VI. Literatur	181

*Dissertation der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität, Münster 1990.

I. Einleitung

Die Höhlen Westfalens und des angrenzenden Bergischen Landes liegen überwiegend im mitteldevonischen Massenkalk am Nordrande des Süderberglandes (LOTZE 1961; SCHMIDT & PLESSMANN 1961), im westlichen Sauerland auch in den Honseler Schichten, deren Kalkschichten wesentlich dünnbankiger als der Massenkalk sind. Besonders aus dem Wuppertaler und Ennepetaler Raum, aus dem Gebiet Hagen-Hohenlimburg-Iserlohn-Hemer, aus dem Hönnetal, sowie aus der Umgebung von Warstein und Brilon sind zahlreiche Höhlen bekannt. Hinzu kommen die Höhlen der weiter südlich gelegenen Attendorn-Elsper Doppelmulde. Eine zweite Gruppe von Höhlen befindet sich im ostwestfälischen Karst der Osningzone im Bereich der Paderborner Hochfläche und des Teutoburger Waldes (vorwiegend im Turon und Cenoman der Oberen Kreide; ROSENFELD) 1961; MORLO 1983).

Die geographische und geologische Erforschung der westfälischen Höhlen begann in der Mitte des vorigen Jahrhunderts durch NÖGGERATH (1846), VON DECHEN (1862) und FUHLROTT (1869) sowie zu Beginn dieses Jahrhunderts durch WOLF (STOFFELS 1987). Damit wurde auch der Weg für die Erforschung der Tierwelt der Höhlen Westfalens geebnet. Zunächst fanden terrestrische (BÖRNER 1901) und aquatische Arten in Tropfsteinhöhlen Interesse (GRÄTER 1910; THIENEMANN 1916; KIEFER 1928, 1931, 1932). Erst LENGERSDORF (1929, 1930, 1931a u. b, 1938) und GRIEPENBURG (1933a, b u. c, 1934, 1935, 1939a u. b, 1941a-e) berücksichtigten bei ihren langjährigen faunistischen Untersuchungen auch andere, bis dahin weitgehend unbekannte Höhlen. Die bis Mitte der 30er Jahre publizierten Tierfunde aus Höhlen wurden von WOLF (1937) zusammengefaßt.

Die Untersuchungen von LENGERSDORF und GRIEPENBURG zeigten übereinstimmend, daß unter den terrestrischen Höhlentieren Westfalens troglobionte Arten (obligatorische Cavemicole) nicht vertreten sind. Dies gilt weitgehend für alle Höhlengebiete im Bereich des glazialen Permafrostbodens von Mitteleuropa (HOLDHAUS 1954; DE LATTIN 1967). Bis auf wenige Ausnahmen (z. B. im Dachsteinmassiv) scheint die gesamte präglaziale Höhlentierfauna in den vergletscherten Gebieten und in den Gebieten mit Permafrostboden während der Glazialperioden ausgestorben zu sein. Dabei war offenbar nicht nur die Temperaturabsenkung, sondern insbesondere auch die Vereisung der Lückensysteme im oberflächennahen Gestein wirksam. Die Unterbrechung des für subterrane Leben essentiellen Transports organischer Substanzen von außen in die Höhlen hinein führte sowohl zum Aussterben der terrestrischen als auch der aquatischen Höhlenbewohner.

Nach der Eiszeit – möglicherweise bereits während der Schmelzphase – konnten aquatische Troglobionte aus den Refugialgebieten südlich der Permafrostgrenze über das Grundwassersystem der großen Flußtäler (z. B. Maas, Seine, Rhein, Themse, Weser) die devastierten Gebiete wiederbesiedeln (HUSMANN 1956; JEFFERSON 1969, 1976; HENRY 1976). Möglicherweise haben sie auf ihrer Nordwanderung auch flache Wasserscheiden überwinden können (HUSMANN 1956). *Proasellus cavaticus* (LEYDIG) ist vermutlich auf diesem Wege bis nach England (TATTERSALL 1930) und in den Harz (HUSMANN 1956) gelangt. Terrestrischen Troglobionten ist hingegen eine derartige Wiederausbreitung verwehrt. Für sie stellt neben den epigäischen Umweltbedingungen auch das Grundwasser eine unüberwindbare Ausbreitungsbarriere dar (TURANCHIK & KANE 1979). Dies gilt allerdings nicht für fakultative terrestrische Höhlenbewohner; insofern verwundert es nicht, daß einige wenige troglophile terrestrische Arten auch in westfälischen Höhlen vorkommen (LENGERSDORF 1961).

Hinsichtlich ihrer aquatischen troglobionten Fauna erwiesen sich westfälische Höhlen als relativ reichhaltig (GRIEPENBURG 1933b, 1934, 1935, 1939a u. b, 1941b und LENGERS-

DORF 1928, 1929, 1930, 1931a u. b, 1951a u. b und 1961). Der Grund dafür dürfte in ihrer Nähe zum Grundwassersystem des Rheintales als einem der bedeutungsvollsten postglazialen Ausbreitungswege in Mitteleuropa zu suchen sein.

Die erste Höhlennemertine überhaupt wies GRIEPENBURG im Februar 1930 in Gewässern der Kluterthöhle in Ennepetal (früherer Ortsname: Milspe) nach (GRIEPENBURG 1941b). Es handelt sich um eine Art der Gattung *Prostoma* (GRIEPENBURG 1935), deren Artstatus jedoch lange ungeklärt blieb, da eine genaue anatomische Untersuchung nicht erfolgte (PUST 1984). Etwas später wurden Höhlennemertinen auch aus einer Quelle bei Dijon und aus dem Grundwasser des Rheins bei Illkirch beschrieben (DE BEAUCHAMP 1932). 1957 folgten Funde aus Rumänien (MOTAS 1961) und 1961 aus Jugoslawien (TARMAN 1961).

Auch das Vorkommen troglobionter Turbellarien in westfälischen Höhlen stellt eine Besonderheit dar. *Krumbachia subterranea* wurde nach Funden Griepenburgs 1932 aus der Kluterthöhle in Ennepetal (GRIEPENBURG 1935) von REISINGER (1933) beschrieben. *Rectocephala schneideri* wurde zuerst in einem Stollen bei Clausthal im Harz gefunden (KOMAREK 1930) und etwas später von GRIEPENBURG (1934) in der Erlenhöhle bei Schwelm in Westfalen nachgewiesen. Die Art ist bisher nur aus Deutschland bekannt (ILLIES 1978). *Guestphalinus wiardi* (Oligochaeta, Annelida) wurde nach einem Exemplar, das GRIEPENBURG (1933b) in der Rentrophöhle gefunden hatte, von MICHAELSEN (1933) beschrieben. Später wurde die Art an weiteren Stellen nachgewiesen (vgl. Kap. III. 1.); sie ist auch auf linksrheinischem Gebiet verbreitet (ILLIES 1978). Im Grundwasser der Ruhr in der Nähe von Wandhofen bei Dortmund wurde der Archannelide *Troglochaetus beranecki* DELACHAUX gefunden (HUSMANN 1962).

Eine größere Verbreitung als die oben genannten Arten besitzen die in Westfalen nachgewiesenen troglobionten Crustaceen. Die Gattung *Niphargus* (Amphipoda) ist über ganz Europa verbreitet; aus Westfalen sind bis heute fünf Arten sicher nachgewiesen worden. LENGERSDORF (1961) gibt sogar 7 Arten an. Der in Mitteleuropa verbreitete Amphipode *Crangonyx subterraneus* BATE wurde in einer Quelle bei Schwelm (SCHELLENBERG 1932c) und im Grundwasser der Ruhr bei Dortmund nachgewiesen (HUSMANN 1962). Der Isopode *Proasellus cavaticus* ist von Südf frankreich (Rhone-Saone-System) über die Schweiz und Süddeutschland (Hochrhein- und oberes Donau-System), Elsaß-Lothringen, Luxemburg, Belgien (Meurthe-Mosel-Maas-System), Rheinland, Westfalen und Niedersachsen (Mittelrhein-Ruhr- und Weser-System) bis nach Südengland verbreitet (TATTERSALL 1930; STROUHAL 1958, HENRY 1976; HERHAUS in Vorbereitung). Für Westfalen wurde die Art von THIENEMANN 1912 und 1916 für die Kluterthöhle (Ennepetal) angegeben; von diesen Funden existiert heute nur noch ein juveniles Exemplar. Ferner sind Funde aus dem Grundwasser der Ruhr (HUSMANN 1962) und aus Quellen (HUSMANN 1956; PUST et. al. in Vorbereitung) bekannt. Bereits Mitte des letzten Jahrhunderts gibt FUHLROTT (1849) eine Habitusabbildung eines Grundwasserisopoden aus einem Elberfelder Brunnen, bei dem es sich um *P. cavaticus* handeln könnte. Besondere Erwähnung verdient auch das Vorkommen von Syncariden in westfälischen Höhlen. LENGERSDORF (1929) und GRIEPENBURG (1939a) fanden eine als *Bathynella chappuisi* DELACHAUX bestimmte Form in Westfalen (LENGERSDORF 1929, fand sie in der Reckenhöhle, GRIEPENBURG 1939a, im Halver Hülloch.).

Die faunistischen Untersuchungen von GRIEPENBURG und LENGERSDORF liegen mittlerweile 50 Jahre zurück. LENGERSDORF gab 1961 eine Zusammenfassung aller älteren Untersuchungen. Es erscheint demnach angebracht, das Vorkommen troglobionter aquatischer Tiere in Westfalen zu überprüfen. Hierbei soll versucht werden, den bisher zweifelhaften Artstatus einiger westfälischer Formen zu klären. Nach ILLIES (1978) gehört die von KOMAREK der Gattung *Bdellocephala* zugerechneten Art *schneideri* der Gattung *Rectocephala* an. Dies ist anhand des westfälischen Materials zu überprüfen. Mit

dem Artstatus der in der Kluterthöhle vorkommenden *Prostoma*-Art beschäftigte ich mich bereits in meiner Diplomarbeit (PUST 1984). Neuere systematische Arbeiten, die zur Aufstellung weiterer Arten (bzw. Unterarten) führten, erfordern auch eine Überprüfung der westfälischen *Bathynella*- und *Niphargus*-Arten (vgl. JAKOBI 1955; SERBAN & GLEDHILL 1965; STOCK & GLEDHILL 1977). Die systematische Einordnung der troglobionten Turbellarien und der *Prostoma*-Art erfordert die detaillierte Beschreibung ihrer inneren Anatomie.

Weitgehend unbekannt ist auch die Ökologie der einheimischen aquatischen Höhlentiere, ihre Bindung an bestimmte Gewässertypen ebenso wie ihre Abundanzdynamik. Durch regelmäßige Begehungen und quantitative Erhebungen sollte versucht werden, zu diesen Fragenkomplexen erste Antworten zu geben.

Besondere Bedeutung verdient die Fragestellung, ob die Höhlenfauna Westfalens in west-östlicher Richtung verarmt. Gerade dies wäre zu erwarten, wenn tatsächlich eine nacheiszeitliche Wiederbesiedlung über das Grundwassersystem des Rheins erfolgt ist. Geographische Unterschiede der Besiedlung sind allerdings nur dann entsprechend zu interpretieren, wenn die übrigen wesentlichen Bedingungen des Vorkommens von Höhlentieren analysiert sind. Dazu gehören Qualität und Quantität des organischen Inputs. Wesentlich ist z.B. auch die morphologische Struktur des Spaltensystems (Ausrichtung, Volumen und Ausdehnung des Lückensystems, also im weitesten Sinne die Verkarstungsfähigkeit der Gesteine der unterschiedlichen geologischen Formationen, sowie die Sedimentauffüllung des Lückensystems). Schließlich ist auch die Bedeutung der physikalischen und chemischen Parameter der Höhlengewässer zu analysieren. Die Gasgehalte der Höhlengewässer werden außer von der Entfernung zur Oberfläche auch durch die Art der Bewetterung der Höhlen bestimmt. Es sind Beziehungen zwischen dem im Wasser gelösten Sauerstoff, Kohlendioxid und der Zusammensetzung der Höhlenluft zu erwarten. Der Wasserchemismus könnte wesentlich über die ionale Zusammensetzung und den pH-Wert das Vorkommen von Höhlentieren beeinflussen (NOLL & STAMMER 1953). Es ist zu erwarten, daß sich die verschiedenen genannten Faktorenkomplexe in unterschiedlichem Maß wechselseitig beeinflussen können. Unter dem Einfluß der Höhlenbewetterung, des einfließenden Oberflächenwassers und des Grundwassers sind sowohl azyklische als auch zyklische Veränderungen der physikalischen und chemischen Parameter denkbar. Es sind aus diesem Grund wiederholte Messungen in festen zeitlichen Abständen durchzuführen.

In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, ob aquatische Höhlentiere durch Schadstoffbelastungen der Gewässer gefährdet sind. Viele Höhlen liegen in landwirtschaftlich und industriell intensiv genutzten Gebieten. Es ist zu untersuchen, ob in solchen Gebieten Tropf- und Sickerwasser z.B. Stickstoff-belastet sind. Über das Grundwasser könnten auch höhlenferne Kontaminationen das Vorkommen von aquatischen Höhlentieren beeinflussen. Hierbei ist neben Stickstoffkontaminationen auch an Schwermetalle und Erdalkaliumionen zu denken.

Bisherige Untersuchungen zur möglichen Wirkung des Wasserchemismus auf das Vorkommen troglobionter Arten in Quellen, Uferfiltraten und Höhlen erbrachten entweder keinen Zusammenhang (THIENEMANN 1924; BEYER 1932; HAINE 1946; HUSMANN 1956) oder es wurde nur im Falle starker Grundwasserbelastungen das Fehlen empfindlicher Arten festgestellt (NOLL & STAMMER 1953). Aber auch direkte anthropogene Einflüsse könnten das Vorkommen von Höhlentieren beeinflussen. Zahlreiche Höhlen werden touristisch als „Tropfsteinhöhlen“ oder „Abenteuerhöhlen“ genutzt. Innerhalb der faunistisch besonders bedeutungsvollen Kluterthöhle in Ennepetal sind bereits seit 1951 Therapiestationen für Asthmakranke eingerichtet (CAUER 1954). Es wurden Wege angelegt und Höhlenseen eingefaßt.

Innerhalb des hier skizzierten Rahmens soll versucht werden, einen Überblick über das heutige Vorkommen aquatischer Trogllobionter in Westfalen zu gewinnen.

Es wurde bereits mehrfach auf das Vorkommen aquatischer Höhlentiere im Grundwasser hingewiesen. Damit wird eine Definition des Begriffs Höhle und Höhlentier im biologischen Sinne erforderlich. Auch Höhlen weisen eine hohe Habitatheterogenität auf. Der biologische Höhlenbegriff entspricht keineswegs dem noch heute verbreiteten Bild von der Höhle als einem von der Außenwelt vollständig abgeschlossenen monotonen Lebensraum. Die Höhle als Lebensraum von Organismen umfaßt das gesamte (luft- und wassergefüllte) Spaltensystem, das sich vom C1-Horizont (JUBERTHIE et al. 1980) des Bodens bis in die Tiefe (z. T. einige 100 m) des Grundwassers erstreckt. Die Höhle als der vom Menschen begehbarer Raum im Gesteinsmassiv mit einem mehr oder weniger großen Eingang stellt nur ein Kompartiment innerhalb des hypogäischen Habitatkontinuums dar. Diese Sicht ist in jüngerer Zeit durch die gründliche Beschreibung von „superficial underground compartments“ gestärkt worden (JUBERTHIE et al. 1980, 1981). Das Habitatkontinuum aquatischer Höhlenbewohner kann in Karstgebieten in vertikaler Folge in eine oberflächennahe Filterzone, in eine vadose (begehbar und bewetterte) Zone und in eine phreatische Zone des Grundwassers gegliedert werden. Die Filterzone ist durch ihre Raumstruktur (sie ist englumig und daher nur eingeschränkt belüftet) und durch ihre meist großen Nähe zur Oberfläche (unmittelbar unterhalb vom A- und B-Horizont beginnend) charakterisiert. Die großräumigen luftgefüllten Hohlräume der vadosen Zone werden über größere Tagöffnungen von der Außenluft bewettert. Die phreatische Zone des Grundwassers umfaßt das völlig wassergefüllte Kluftsystem unterhalb der luftgefüllten Hohlräume. Sie ist von der Außenatmosphäre weitgehend unbeeinflusst. -Die Gewässer der Filterzone können als Tropf- und Sickerwasser an ihrer Eintrittsstelle in die vadose Zone untersucht werden. Sie speisen die Gewässer der vadosen Zone, wobei sich unter dem Einfluß der Bewetterung ihre Parameter zunehmend verändern können. Von der vadosen Zone aus ist häufig auch das Grundwasser erreichbar, das an seiner Eintrittsstelle in die vadose Zone ebenfalls noch seine charakteristischen Parameter aufweisen kann. Auch das Grundwasser kann in Kontakt mit der Atmosphäre der vadosen Zone seine Eigenschaften verändern. Als Gewässer der vadosen Zone im engeren Sinne bezeichne ich also solche, die durch eine Bewetterung wesentlich beeinflusst werden. Außerhalb von Karstgebieten, z. B. auch im Interstitial der Flüsse, geht die oberflächennahe Filterzone unmittelbar in die Grundwasserzone über (selbstredend sind die Lebensbedingungen vor allem in den verschiedenen Filterzonen sehr unterschiedlich). Über Gewässer der oberflächennahen Filterzone dringen Trogllobionte auch in Gebiete aus nicht-verkarstungsfähigem Gestein vor (z. B. Schiefer). – Dieser Zonierung haftet etwas Künstliches an. Vor allem die oberflächennahe Filterzone und die vadose Zone können nicht in allen Fällen scharf voneinander abgetrennt werden. Auch im verkarstungsfähigem Kalkmassiv fehlt stellenweise die vadose (bewetterte) Zone. An ihrer Stelle können dann eine kleinlumige Fortsetzung der Filterzone oder nicht-bewetterte, größere Hohlräume treten. Dennoch erweist sich die Zonierung als vorläufig brauchbar, um das Vorkommen von aquatischen Tieren im hypogäischen Habitatkontinuum zu charakterisieren.

Gemeinsames Kennzeichen der Habitate im unterirdischen Kontinuum sind das Fehlen von Licht und damit von photoautotrophen Organismen sowie die von außen nach innen zunehmende Dämpfung aperiodischer sowie tages- und jahreszeitlicher Schwankungen vieler Umweltparameter. Höhlenorganismen sind weitgehend auf organischen Input als Nahrung angewiesen, jedoch ist gelegentlich auch auf die Existenz autochtoner Nahrungsketten hingewiesen worden. Sie soll sich auf die Chemosynthese von Mikroorganismen gründen (GINET & DECOU 1977). In der Regel ist das Nahrungsangebot vieler Höhlenhabitate stark reduziert. Tagferne aquatische Zonen besitzen zudem oft einen relativ niedrigen

Sauerstoffgehalt, verbunden mit hohen CO₂- und Ionenkonzentrationen (vgl. Kap. III. 4. und 5.).

Die den unterirdischen Lebensraum, das Höhlensystem im biologischen Sinne, besiedelnden Organismen sind durch konvergent erworbene Anpassungsmerkmale charakterisiert; diese sind genetisch fixiert. Sie äußern sich in einer reduzierten Stoffwechselrate (vgl. EIGENMANN 1909), einer verminderten Anzahl von Ortswechseln pro Zeiteinheit, kleinen Fortpflanzungsraten, Populationsdichten und -größen, einer verlängerten Entwicklung und langer Lebensdauer. Das allen Subterranhabitaten gemeinsame Dauerdunkel erfordert bei den ständigen Bewohnern eine von der Photoperiode unabhängige Gonadenreife. Das Fehlen von Licht unterbindet ferner eine optische Orientierung und macht die Ausbildung von Augen und Schirmpigmenten überflüssig. Besonders auffällig ist bei den obligatorischen Höhlenbewohnern die Reduktion von Augen und Körperpigment. Der Verlust des optischen Sinnes wird durch eine Verstärkung der chemischen und mechanischen Sinne kompensiert (KOSSWIG 1935). Höhlentiere sind meist auf den „ersten Blick“ als solche zu erkennen.

Die genannten Merkmale charakterisieren in erster Linie die obligatorischen Höhlenbewohner, die Troglobionten. Weniger ausgeprägt sind sie bei den trogliphilen Cavemicolen, die auch außerhalb des Höhlenmilieus leben und reproduzieren können. Sie fehlen in der Regel ganz bei den Troglaxenen, die Höhlen nur gelegentlich, tages- oder jahresperiodisch oder während bestimmter Entwicklungsstadien aufsuchen, und natürlich auch bei den „Accidentals“. Die Einteilung der Höhlentiere nach dem Bindungsgrad an das unterirdische Milieu geht auf SCHINER (1854) zurück. In Anpassung an diese Terminologie klassifizierte THIENEMANN (1925) Grundwassertiere als stygoxen, stygophil und stygobiont. -Bereits 1556 teilte AGRICOLA Höhlentiere nach Vorkommen und Lebensweise in drei Gruppen ein. Tiere der ersten Gruppe suchen nur zeitweilig Erdhöhlen auf und verstecken sich dort oder schlafen in ihnen. Die 2. Gruppe sucht zu gewissen Jahreszeiten Höhlen auf und verbringt einige Monate in tiefem Schlaf darin. Die 3. Gruppe lebt so gut wie dauernd in Höhlen.- Alle Höhlentiere stammen von oberirdischen Verwandten ab.

Unbeschadet ihrer auffälligen Konvergenzen verhalten sich auch Troglobionte innerhalb des hypogäischen Habitatkontinuums mehr oder weniger stenök bzw. euryök. Das Phänomen der Habitatbindung ist auch bei Höhlentieren zu beachten. Es gibt Arten mit schwach ausgebildeter Habitatbindung und solche mit strenger Bindung an bestimmte Habitate in bestimmten Kompartimenten, z.B. Spezialisten des „superficial underground compartment“ einerseits und solche von tiefen Grundwasserhorizonten andererseits (SMITH 1985).

Aquatische Tiere des Subterrانبereiches repräsentieren einen Komplex besonderer Lebensformen innerhalb der Gruppe der Höhlentiere. Sie bewohnen Tropf- und Sickergewässer, grundwasserferne temporäre oder permanente Wasserstellen, schließlich auch das Grundwasser selbst, die zu ihm gehörenden Seen, Fließgewässer und Lückensysteme. Lückensysteme können sowohl im massiven Gestein als auch im Schotter unterschiedlicher Korngröße (im Interstitial, Gehänge- und Moränenschutt etc.) ausgebildet sein. Tropf-, Sickergewässer und Fließgewässer übernehmen im hohen Maße die Aufgabe des Stofftransportes, einschließlich des Sauerstoffs, von der Außenwelt in den Subterrانبereich hinein. Sie bestimmen wesentlich auch die Zusammensetzung der Höhlenatmosphäre, da die im Wasser gelösten Gase mit der Höhlenatmosphäre ein Gleichgewicht anstreben. Der Charakter eines Höhlengewässers kann sich azyklisch oder zyklisch stark verändern. Solche Wechsel treten vor allem bei Hochwasser auf. Seen können dann den Charakter von Fließgewässern annehmen, Bäche durch Anstau eine Stagnationsphase erreichen oder sogar die Fließrichtung ändern. Je nach ihrer Lagebeziehung zur Außenwelt und untereinander weisen subterrane Gewässer auch mehr oder weniger stark ausgeprägte jahresperiodische Schwankungen ihrer physikochemischen Parameter sowie der organischen Fracht auf. Sie vermitteln deshalb mögliche Zeitgeber für Reproduktion, Entwicklung und Verhalten (GINET & DECOU 1977).

Meinem Lehrer, Herrn Prof. Dr. Fr. Weber danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit, für seine Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen und für die Durchsicht des Manuskriptes. Die Arbeit wurde vom evangelischen Studienwerk, Villigst und vom

Landschaftsverband Westfalen-Lippe in Münster gefördert; für ihre Unterstützung spreche ich diesen Institutionen meinen Dank aus. Großer Dank gebührt Herrn Dr. W. Griepenburg † für die genauen Fundortbeschreibungen und wertvollen Ratschläge während zahlreicher Gespräche. Herr Dr. M. Lacombe und die Mitarbeiter des Wasserlabors im Hygienisch-Bakteriologischen Landesuntersuchungsamtes in Münster ermöglichten mir die Durchführung physikochemischer Analysen. Ohne ihre Unterstützung und großzügige Hilfe wäre die Durchführung der Analysen nicht möglich gewesen; ich bin ihnen deshalb zu großem Dank verpflichtet. Den Mitarbeitern des Westfälischen Museums für Naturkunde in Münster danke ich für ihre Hilfe bei der geologischen Zuordnung der Höhlen im Untersuchungsgebiet und für ihre Hilfe bei der Literaturbeschaffung aus der Museums-Bibliothek. Für die Durchführung von pH-Wert-Messungen und die Besorgung von Literatur danke ich Herrn Zygowski, Münster. Für die Bestimmung der Syncariden danke ich Herrn Prof. Dr. H. K. Schminke, Zoologisches Institut Oldenburg; Herrn Herhaus aus Münster für die Bestimmung der Isopoden und den Vergleich westfälischer *Proasellus cavaticus* mit dem Typusmaterial; Herrn Dr. Vonk, Instituut voor taxonomische Zoölogie in Amsterdam, für die Bestimmung von Niphargiden aus der Kluterhöhle; Herrn Dr. Laukötter von der Landesanstalt für Ökologie, Landschaftsentwicklung und Forstplanung, für die Überlassung von westfälischen *Proasellus cavaticus*-Tieren aus Quellen; Herrn Dipl.-Biol. Dr. H. Terlutter, Zoologisches Institut in Münster, für die statistische Bearbeitung biometrischer Daten. Für die großzügige Zugangsregelung für Höhlen danke ich den Mitarbeitern des Geologischen Landesamtes in Krefeld, Herrn Dr. Hömberg, Archäologisches Museum in Olpe, Herrn Blank, Rheinisch-Westfälische Kalkwerke, Herrn Wortmann, Wasserwerk „Röhre“ in Sundern, Herrn Schellenbeck und Herrn Kuss, Kulturamt Schwelm und der Fa. MAGURA in Urach. Den Mitarbeitern des „Haus Ennepetal und Kluterhöhle GmbH“ danke ich für die großzügige Bereitstellung von Material und Gerät. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern des Heimatvereins und des Sportamts Hagen, den Mitarbeitern des Kulturamts Brilon und den zahlreichen Höhlenbetreuern, -besitzern und Höhlenforschern für die vielfältige Hilfe.

II. Material und Methode

1. Das Untersuchungsgebiet

Nach den Hauptgrundwassersystemen, die für die Wiederbesiedlung troglobionter Arten nach der letzten glazialen Vereisung diskutiert werden (HUSMANN 1956), läßt sich das Untersuchungsgebiet in zwei Gebiete unterteilen:

- Das Süderbergland mit dem Grundwassersystem von Rhein und Ruhr. Innerhalb dieses Gebietes wurden die Täler folgender Nebenflüsse untersucht: Wupper, Ennepe, Volme, Lenne, Hönne, Röhr und Möhne.
- Ostwestfalen mit dem Grundwassersystem von Diemel, Sauer und Weser.

2. Die untersuchten Höhlen

Von 637 im Untersuchungsgebiet bekannten Höhlen und weiteren 18 bis dahin katastermäßig nicht erfaßten Höhlen und Stollen wurden 110 (vgl. Tab. 1) nach folgenden Kriterien für die Untersuchung ausgewählt:

- Neben der Lage innerhalb des Untersuchungsgebietes war das Vorkommen von Gewässern für die Auswahl bestimmend.
- Eine regelmäßige Untersuchung der physikochemischen Parameter wurde durchgeführt, wenn das Vorkommen troglobionter Arten aus dem Schrifttum bekannt und durch eigene Untersuchungen bestätigt oder Neunachweise erbracht wurden.
- Physikochemische Untersuchungen wurden ferner in solchen Höhlen durchgeführt, die Besonderheiten des Höhlenklimas (z. B. eine dynamische Bewetterung) oder anthropogene Veränderungen aufweisen (wie Schaffung künstlicher Eingänge, Klüftöffnungen durch Steinbrucharbeiten u. s. w.).

Auch verschlossene Höhlen wurden bearbeitet, soweit eine Zugangsregelung mit Grundstückseigentümern, Behörden und Vereinen vereinbart werden konnte. Heute unzugängliche Höhlen werden, soweit sie im Schrifttum für das Vorkommen troglobionter Arten ausgewiesen sind, zitiert. Für die Bismarck-, Heilenbecker- und Rentropshöhle konnte ich für regelmäßige Untersuchungen leider keine Zugangsgenehmigung erwirken. Diese Höhlen, wie auch die Dr. Wolf-Höhle, Holthausener Bachhöhle und Simonhöhle (Tab. 1), habe ich nur einmal besuchen können. Der Eingang des kleinen Hüllochs bei Kierspe wurde vor einigen Jahren verschüttet, so daß z. Zt. eine Untersuchung dieser Höhle nicht möglich ist.

Der überwiegende Teil der untersuchten westfälischen Höhlen ist katastermäßig erfaßt (WEBER 1987); die über westfälische Höhlen bisher erschienene Literatur ist bei ZYGOWSKI (1988) bibliographisch zusammengefaßt.

Tab. 1 : Die untersuchten Höhlen

*: ständig wasserführende Höhlen, °: Grundwasser, °: Oberflächenwasser, †: Tropf- und Sickerwasser. **Fettdruck**: Troglobionte vorhanden, [in Klammern]: Zitat, keine eigenen Untersuchungen. *Kursiv*: geologische Formation (nach SCHMIDT & PLEBMANN 1961, geol. Karten 1:25.000). Vgl. auch Abb. 1.

Das Süderbergland

Das Wupper-Ennepe-System

1. Schiefer Stein bei Himmerkusen, Gummersbach †, *Hobräcker Schichten*
2. Dr. Witt Höhle bei Hütte, Gimborn *°, *Cultrijugatus-Schichten*
3. [Bismarckhöhle in Ennepetal *°], GRIEPENBURG 1935, *Obere Honseler Schichten*
4. Heilenbecker Höhle i. E. *°†, *Obere Honseler Schichten*
5. Kluterthöhle i. E. *°†, *Obere Honseler Schichten*
6. [Rentropshöhle i. E. *°†], GRIEPENBURG 1935, *Obere Honseler Schichten*
7. Erlenhöhle in Schwelm, Linderhausen *°†, *Mitteldevonischer Massenkalk*
8. Halver Hülloch *°†, *Obere Honseler Schichten*
9. Stollen bei Halver *†, (Schiefer)
10. Kluterthöhle in Hagen, Kückelhausen *°†, *Obere Honseler Schichten*

Das Volmesystem

1. Brackelsbergstollen im Hagener Heimatmuseum in Hagen *°†, *Massenkalk (+Schiefer)*
2. Juliusstollen, Hagener H. in Hagen *°†, *Massenkalk (+Schiefer)*
3. Eilper Höhlen I und II i. H. †, *Honseler Schichten*
4. Eisenhöhle i. H. *°†, *Mitteldevonischer Massenkalk am Rand der Honseler Schichten*
5. Volmehanghöhle i. H. *°†, *Mitteldevonischer Massenkalk*
6. [Kleines Hülloch bei Kierspe] *°†, GRIEPENBURG 1939a, *Honseler Schichten*

Das Lennesystem

1. Adlerstollen in Iserlohn *°†, *Massenkalk (+Schiefer)*
2. Matthiasstollen i. I. *†, *untere Honseler Schichten* (Schiefer mit Kalkeinlagerungen)
3. Stollen im Burgberg i. I. †, *Mitteldevonischer Massenkalk*
4. Erzgebirge II i. I. *°†, (Schiefer mit Kalkeinlagerungen)
5. B7-Höhle i. I. *†, *Mitteldevonischer Massenkalk*
6. Dechenhöhle i. I. *†, *Mitteldevonischer Massenkalk*
7. Höhle in der Wand i. I. *†, *Mitteldevonischer Massenkalk*
8. Knitterhöhle i. I. *°†, *Mitteldevonischer Massenkalk*
9. Kreuzhöhle i. I. *†, *Mitteldevonischer Massenkalk*

10. Kristallhöhle i. l. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
11. Kupferbergseenspalte i. l. ^{*GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
12. Pferdestall i. l. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
13. Dr. Wolf Höhle in Hohenlimburg ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
14. Oeger Höhle i. Ho. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
15. Stollen im Weißen Stein i. Ho. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
16. Höhle hinter der Villa Ribbert i. Ho. ^{*GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
17. Höhle an der Hünenpforte i. Ho. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
18. Holthausen Höhle in Hagen, Holthausen ^{*GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
19. Geßhardhöhle in Altroggenrahmede ^T, *Honseler Schichten*
20. **Heinrich-Bernhard Höhle bei Plettenberg** ^{*GT}, *Hobräcker Schichten*
21. Stollen unterhalb der H.-B.-Höhle b. P. ^T, *Hobräcker Schichten*
22. Attahöhle in Attendorn ^{*GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
23. Kirschhollenloch i. A. ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
24. Frankenhöhle I in Heggen ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
25. Frankenhöhlen II i. He. ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
26. Höhle in der Hohen Lei i. He. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
27. Teufelsloch i. He. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
28. Uferhöhle I i. He. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
29. Uferhöhle II i. He. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
30. Versteckte Höhle i. He. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
31. Wilhelmshöhle i. He. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
32. Lenneschacht bei Finnentrop ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
33. Lennespalte bei F. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
34. **Muttersteinhöhle bei F.** ^{*GT}, *Mittlere Newberrien-Schichten*
35. Landemerter Höhle bei Landemert ^T, *Hobräcker Schichten*
36. Heldenschluf bei Helden ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
37. Bandscheibenhöhle bei Frettermühle ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
38. Schmantloch bei Fr. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
39. Schmuckstück bei Fr. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
40. **Schönebecker Höhle bei Schönebecke** ^{*T}, *Honseler Schichten*
41. **Serkenroder Schacht bei Serkenrode** ^{*GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*

Das Hönnesystem

1. Balver Höhle bei Balve ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
2. Preußhöhle bei Balve ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
3. Große Burghöhle bei Klusenstein ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
4. Kleine Burghöhle bei K., *Mitteldevonischer Massenkalk*
5. **Krötenhöhle bei K.** ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
6. Feldhofhöhle bei Eisborn ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
7. **Friedrichshöhle bei E.** ^{*GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
8. Große Karhofhöhle bei E. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
9. Kleine Karhofhöhle bei E. ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
10. Leichenhöhle bei E. ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
11. Reckenhöhle bei E. ^{*T}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
12. Tunnelhöhle bei E. ^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*

13. Höhle im Fahnenfels bei Menden^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
14. Stollen bei Plattthaus bei M. *^{GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
15. Dahlmannhöhle bei Volkringhausen *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
16. Höhle im Beil bei V.^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
17. Kehlberghöhle bei V.^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
18. Ruthmecker Höhle bei V.^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
19. Ruthmecke II bei V.^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
20. Wasserloch im Kehlberg bei V. *^{GTO}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
21. Bärenhöhle im Felsenmeer (H1Fm) bei Hemer *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
22. Brillenhöhle (H30Fm) bei He. *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
23. Fußballhöhle (H7Fm) bei He. *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
24. Grauer Ort (H8Fm) bei He. *^{GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
25. Eiskeller (H20Fm) bei He. *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
26. Heinrichshöhle bei He. *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
27. Holunderhöhle, Fm bei He.^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
28. Prinzenhöhle bei He. *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
29. VON-DER-BECKE Höhle bei He. *^{GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*

Das Röhrsystem

1. Pauls-Stollen der Hermannszeche bei Allendorf *^G, *Blessenohler Zwischenschicht*
2. Karls-Stollen der Hermannszeche b. Ä. *^{GT}, *Blessenohler Zwischenschicht*
3. Große Sunderner Höhle in Sundern *^{GT}, *Hellefelder Kalk*
4. Kleine Sunderner Höhle i. S. *^T, *Hellefelder Kalk*

Das östliche Ruhrsystem

1. Antfelder Höhle in Antfeld *^{GT}, *Sparganophyllumkalk*
2. Antfelder Stollen bei A. *^{GT}, *Flinz und Nuttlarer Schiefer*
3. Antfelder Schieferbruch bei A. *^T, *Flinz und Nuttlarer Schiefer*
4. Bielsteinbachhöhle bei Warstein *^{GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
5. Bielsteinhöhle bei W. *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
6. Höhle im Kattenstein bei K. *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
7. Hohler Stein bei Kallenhardt^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
8. Simonhöhle bei K. *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
9. Rissehöhle bei K. *^{OT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
10. Mescheder Stollen bei Meschede *^{GT}, *Hellefelder Kalk des Turnai und Visé*
11. Veledahöhle bei Velmede *^{GT}, *Sparganophyllumkalk*

Ostwestfalen

Das Diemelsystem

1. Drakenhöhle bei Marsberg^T, *Zechstein*
2. Untrüggeschacht bei Hoppecke *^{GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
3. Messinghauser Stollen bei Messinghausen *^{GT}, *Mitteldevonischer Massenkalk (+Schiefer)*
4. Malachitdom bei Bleiwäsche *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
5. Rösenbecker Höhle bei Rösenbeck *^{OT}, *Mitteldevonischer Massenkalk*
6. Ziegentempel bei Rösenbeck *^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*
7. Hallersteiner Höhle bei Thülen^T, *Mitteldevonischer Massenkalk*

Das Sauer-System

1. Grundsteinheimer Höhle bei Grundsteinheim an der Sauer *^{GOT}, Oberkreide, Cenoman

Egge und Bielefelder Osning

1. Hohlsteinhöhle bei Horn *^T, Oberkreide, Cenoman

3. Faunistische Untersuchungen

Die Tiere wurden ausschließlich durch Handauflesungen gesammelt. Auf Anreicherungsverfahren, die leicht ein verfälschtes Bild über die Abundanzverhältnisse der einzelnen Arten liefern, wie das Aufstellen von Fallen und Ködern sowie auf Pumpversuche, wurde verzichtet.

Zur Beobachtung des Bewegungsverhaltens und der Nahrungsaufnahme wurden Tiere verschiedener Arten in Plastikschalen (Fischzuchtschalen: 45X65 cm) in Höhlen gehalten. *Prostoma putealis* wurde einzeln in Schalen gehalten, die 2 cm hoch mit Sediment (durch Leinen gepreßter und mit Wasser aufgeschwemmter Höhlenlehm) und mit insgesamt 15l Wasser vom Fundort bestückt waren. Die Schalen wurden mit lichtundurchlässiger Folie abgedeckt. Zur Analyse des Bewegungsverhaltens wurden 5 Nemertinen je ein- bis fünfmal für jeweils 24 Stunden alle 2 Std. kontrolliert. Die Bewegungsspuren wurden bei schwacher Beleuchtung (≈ 150 lx) auf Glas aufgezeichnet und anschließend fotografiert (Näheres vgl. PUST 1984). -*Proasellus cavaticus* und einige Niphargiden-Arten wurden jeweils in einigen Exemplaren pro Schale auf natürlichem Sediment über Monate bis einige Jahre gehalten. Das Verhalten der Tiere wurde in unregelmäßigen Abständen beobachtet.

Für die systematische Bestimmung der Arten und die morphologischen und anatomischen Untersuchungen wurden auch einzelne Tiere im Labor in einer Klimakammer gehältert.

Die meisten der in Tab. 1 aufgeführten Höhlen und Stollen wurden zwischen 1985 und 1989 zu verschiedenen Jahreszeiten mehrfach untersucht.

4. Abundanzbestimmungen

Abundanzbestimmungen führte ich an der Nemertine *Prostoma putealis* aus der Kluterthöhle (Ennepetal), an den Turbellarien *Rectocephala schneideri*, *Krumbachia subterranea* und *Planaria vitta* aus der Erlenhöhle sowie an *Proasellus cavaticus* aus der Friedrichshöhle durch. Ich besuchte dazu die genannten Höhlen einmal im Monat oder häufiger in einem Zeitraum von mindestens einem Jahr.

Für die Kluterthöhle (Ennepetal) und Friedrichshöhle wurden die Zahlen der Tierfunde pro Gewässer tabellarisch erfaßt. In der Erlenhöhle trug ich die Positionen der einzelnen Tiere in Gewässerkarten ein. Außerdem wurden die aktuelle Ausdehnung der Wasseroberfläche und die Anzahl wasserführender Fundstellen vermerkt sowie klimatische Messungen durchgeführt (vgl. Kap. II. 6.).

5. Morphologische und anatomische Untersuchungen zur Überprüfung des Artstatus

Von *R. schneideri*, *K. subterranea* und *P. putealis* wurde die Anatomie der inneren Organe, von den Crustaceen wurden die systematisch relevanten Merkmale des Exoskelettes untersucht.

Für eine Paraplasteinbettung wurden die Tiere mit einer gesättigten Sublimatlösung bei 60°C nach REISINGER (ROMEIS 1968), für eine Einbettung in Epon in 3%iger Glutaraldehydlösung in SÖRENSEN-Puffer (pH 7,4) bei 10°C im Kühlschrank fixiert. Die Fixierungsdauer betrug je nach Größe der Tiere zwischen 30 Minuten und 2 Stunden (siehe auch GLAUERT 1981).

Von *P. putealis* fertigte ich Serien von 5 µm dicken Schnitten nach Paraplasteinbettung und von 0,5 µm dicken Semidünnschnitten nach Einbettung in Epon (LUFT 1961) an. Von *R. schneideri* stellte ich Serien von Paraplastschnitten, von *K. subterranea* Serien von Semidünnschnitten her. Zur Anfärbung der Paraplastschnitte wurde die AZAN- und TRICHROM-GOLDNER-Färbung benutzt (ROMEIS 1968); die Semidünnschnitte wurden mit TOLUIDIN-BLAU gefärbt (TRUMP et al. 1961).

Von den systematisch bedeutungsvollen Extremitäten der Amphipoden und Isopoden wurden Dauerpräparate nach SIEG (1973) angefertigt. Von *P. cavaticus* untersuchte ich auch Typusmaterial aus der Aufsammlung von Meinert (1868) sowie von mir selbst gesammeltes Material aus der Falkensteiner Höhle und aus dem Eckisloch bei Urach (Schwäbische Alb). Vergleichsmaterial für *Niphargus puteanus* wurde ebenfalls aus der Falkensteiner Höhle und dem Eckisloch sowie aus dem Bauerloch (Neuffen) und dem Mordloch (Geislingen) untersucht. Von *A. stammeri* stellte ich Totalpräparate nach der Methode von SIEG (1973) her.

6. Klimatische Untersuchungen

In den Höhlen, in denen troglobionte Arten vorkommen, aber auch in einigen anderen Höhlen (Tab. 2) bestimmte ich die Luft- und Wassertemperatur (T) [°C], die relative (relLF) [%] und absolute (absLF) [mg/l] Feuchte sowie den CO₂-Gehalt (CO₂) [Vol.-%] der Höhlenatmosphäre. Die Messungen erfolgten jeweils an mehreren Stellen im Höhleninneren und außerhalb der Höhlen in der Nähe des Eingangs. Sie wurden in einigen Höhlen regelmäßig zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt (vgl. Tab. 2). In der Kluterthöhle (Ennepetal), der Großen Sunderner Höhle und der Friedrichshöhle erfolgten auch 2-stündige Messungen zur Erfassung tagesperiodischer Schwankungen.

Temperatur und Luftfeuchte maß ich mit einem Aspirationspsychrometer nach ASSMANN. Die Thermometer wiesen eine 1/5°-Einteilung auf. Die Meßwerte wurden auf 0.1°C geschätzt.

Der CO₂-Gehalt der Luft wurde mit dem Gasspürgerät der Firma Dräger oder titrimetrisch nach folgender Methode bestimmt: 11 Probevolumen (Höhlen- oder Außenluft) wurde mit 40 ml einer Ba(OH)₂-Lösung versetzt und 1 Minute geschüttelt. Es wurde mit 0.1N HCl titriert. Als Indikator diente eine 0.1%ige alkoholische Phenolphthaleinlösung. Die Konzentration der Ba(OH)₂-Gebrauchslösung wählte ich so, daß nach der Reaktion mit dem CO₂ der Probe noch mindestens 2.5 ml HCl bis zum Umschlagpunkt titriert werden konnten. Als Stammlösung diente eine gesättigte Ba(OH)₂-Lösung, die vor Gebrauch verdünnt wurde. Eichtitrationen (n = 15) ergaben bei einem CO₂-Gehalt der Eichprobe von 0.1 Vol.-% CO₂ eine Streuung von ±0.005 Vol.-%.

Die titrimetrische Methode wurde für den Einsatz im Höhleninneren entwickelt. Glas wurde nach Möglichkeit durch bruchsicheres Kunststoffmaterial ersetzt. Für die Probeentnahme benutzte ich 11 Enghalsflaschen. Als Sperrflüssigkeit diente auf pH 9 alkalisiertes destilliertes Wasser, das mit 10 Tropfen einer 0.1% alkoholischen Phenolphthaleinlösung versetzt war, um die Alkalität der Sperrflüssigkeit auch nach längerem Transport beurteilen zu können. Die titrimetrische CO₂-Bestimmung erfolgte direkt nach der Probeentnahme innerhalb der Höhle oder am Höhleneingang.

Die Luftströmung wurde mit einem Digitalanemometer der Firma Testoterm sowie mit Rauchröhrchen der Firma Dräger in der Erlenhöhle, Schönebecker Höhle, Kluterthöhle (Ennepetal), Friedrichshöhle, Dechenhöhle, Knitterhöhle und Antfelder Höhle bestimmt (auf die Meßwerte wird in Kap. III. 3.1. auszugsweise Bezug genommen).

7. Hydrochemische Untersuchungen

Die physikochemischen Parameter, die ich in Höhlengewässern und in benachbarten oberirdischen Gewässern bestimmte, sind in Tab. 3 aufgelistet. Für die Untersuchungen wurden ebenfalls bevorzugt solche Höhlen berücksichtigt, aus denen troglobionte Arten nachgewiesen wurden, außerdem Höhlen, in denen ein Fehlen troglobionter Arten möglicherweise anthropogene oder klimatische Ursachen hat (Schauhöhlen, Höhlen im Steinbruchgelände oder unter landwirtschaftlichen Nutzflächen).

Höhle/Stollen	Parameter				Anzahl der Meßstellen	Zeitraum der Messungen
	I	II	III	IV		
Kluterthöhle, EN:	T, relLF, absLF, CO₂				I-III: 18 IV: 12	I-III: 11.83-10.87 IV: 08.83-10.87
Erlenhöhle:	T, relLF, absLF, CO₂				8	03.85-01.88
Halver Hülloch:	T, relLF, absLF, CO₂				11	06.85-05.87
Kluterthöhle, HA:	T, relLF, absLF, CO₂				7	04.85-06.87
Eisenhöhle:	T, relLF, absLF, CO₂				6	07.85-06.86
Volmehanghöhle:	T, relLF, absLF, CO₂				13	04.85-05.86
Matthiasstollen:	T, relLF, absLF, CO ₂				I-III: 6, IV: 4	06.07.87
Dechenhöhle:	T, relLF, absLF, CO₂				9 12	02.84-05.85 05.85-10.87
Knitterhöhle:	T, relLF, absLF, CO₂				7	01.85-10.87
Höhle hinter der Villa Ribbert:	T, relLF, absLF, CO₂				13	08.85-01.87
Schönebecker Höhle:	T, relLF, absLF, CO₂				7	05.86-01.88
Große Burghöhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				2	21.11.87
Kleine Burghöhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				1	21.11.87
Krötenhöhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				1	21.11.87
Feldhofhöhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				2	21.11.87
Friedrichshöhle:	T, relLF, absLF, CO₂				4-15	08.85-01.88
Große Karhofhöhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				1	21.11.87
Kleine Karhofhöhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				4	21.11.87
Tunnelhöhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				1	21.11.87
Stollen bei Platthaus:	T, relLF, absLF, CO ₂				6	02.84-03.88
Ruthmecker Höhle I:	T, relLF, absLF, CO ₂				1	21.11.87
Ruthmecke II:	T, relLF, absLF, CO ₂				1	21.11.87
Wasserloch im Kehlberg:	T, relLF, absLF				2	17.05.87 + 19.07.87 + 25.01.88 21.08.87 + 15.11.87
Grauer Ort, H8Fm:	T, relLF, absLF, CO ₂				6-12	18.7.+11.9.+ 30.11.85 + 15.06.86
Eiskeller, H20Fm:	T, relLF, absLF, CO ₂				12-17	13.6.+12.7.87
Heinrichshöhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				5	12.07.87
VON-DER-BECKE-H.:	T, relLF, absLF, CO ₂				5	01.04.89
Karlsstollen:	CO ₂				5	08.86-11.87
Große Sunderner H.:	T, relLF, absLF, CO₂				5-6	12.87-04.88
Antfelder Höhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				5	11.04.88
Antfelder Stollen:	T, relLF, absLF, CO ₂				5	09.87-02.89
Malachitdom	T, relLF, absLF, CO₂				8	05.+19.10.85
Rösenbecker Höhle:	T, relLF, absLF, CO ₂				10-14	13.12.87
Grundsteinheimer H.:	T, relLF, absLF, CO ₂				7	

Tab. 2 : 34 westfälische Höhlen, in denen klimatische Messungen durchgeführt wurden. Fettdruck: Die Messungen erfolgten in monatlichen Abständen. In den übrigen Höhlen wurde nur einmal oder in unregelmäßigen Abständen gemessen. Zu den Abkürzungen vgl. Kap. II.6.

Parameter	(Abkürzung)	[Einheit]	Ort der Analyse
1. Wassertemperatur	(Tw)	[°C]	vor Ort
2. Wasserstoffionenkonzentration (pH-Wert)		[-log H ⁺]	vor Ort
3. Leitwert	(Lw)	[μS / cm]	im Labor
4. Gesamthärte	(G-Härte)	[°dH]	im Labor
5. Kalziumhärte	(Ca-Härte)	[°dH]	im Labor
6. Magnesiumhärte	(Mg-Härte)	[°dH]	im Labor
7. Sulfathärte	(SO ₄ -Härte)	[°dH]	im Labor
8. Karbonathärte	(CO ₃ -Härte)	[°dH]	vor Ort
9. Kalziumkonzentration	(Ca ²⁺)	[mg/l]	im Labor
10. Magnesiumkonzentration	(Mg ²⁺)	[mg/l]	im Labor
11. Sulfatkonzentration	(SO ₄ ²⁻)	[mg/l]	im Labor
12. Konzentration des gelösten Kohlendioxid	(CO ₂)	[mg/l]	vor Ort
13. Konzentration des gebundenen Kohlendioxid	(CO ₃ ²⁻)	[mg/l]	vor Ort
14. Konzentration des gelösten Sauerstoff	(O ₂)	[mg/l]	vor Ort
15. Sauerstoffsättigung	(O ₂ -S)	[%]	vor Ort
16. Konzentration der organischen Substanzen (org. Subst.)		[mg/l]	im Labor
17. Chloridkonzentration	(Cl ⁻)	[mg/l]	im Labor
18. Natriumkonzentration	(Na ⁺)	[mg/l]	im Labor
19. Phosphatkonzentration	(PO ₄ ³⁻)	[mg/l]	im Labor
20. Nitratkonzentration	(NO ₃ ⁻)	[mg/l]	im Labor
21. Nitritkonzentration	(NO ₂ ⁻)	[μg/l]	im Labor
22. Ammoniumkonzentration	(NH ₄ ⁺)	[mg/l]	im Labor
23. Eisenkonzentration	(Fe)	[mg/l]	im Labor
24. Mangankonzentration	(Mn)	[mg/l]	im Labor
25. Kupferkonzentration	(Cu)	[mg/l]	im Labor
26. Zinkkonzentration	(Zn)	[mg/l]	im Labor
27. Bleikonzentration	(Pb)	[mg/l]	im Labor
28. Quecksilberkonzentration	(Hg)	[mg/l]	im Labor
29. Cadmiumkonzentration	(Cd)	[mg/l]	im Labor
30. Arsenkonzentration	(As)	[mg/l]	im Labor
31. Schwefelwasserstoff	(H ₂ S)	[mg/l]	im Labor

Tab. 3: Die untersuchten physikochemischen Parameter

Innerhalb der ausgewählten Höhlen wurden meist Gewässertypen verschiedener Herkunft (Tropf- u. Sickerwasser, Grundwasser) aus klimatisch unterschiedlichen Höhlenkompartimenten berücksichtigt. In einigen Fällen wurde auch ein benachbartes Oberflächengewässer analysiert. Bei kleinen Tropfwasseransammlungen wurden die Tropfen mittels eines Trichters in 1l-Plastikflaschen aufgefangen (max. über 24h).

Auch diese Untersuchungen wiederholte ich meist zu verschiedenen Jahreszeiten. Höhlen, die ich in regelmäßigen, meist in monatlichen Abständen hydrochemisch untersuchte, sind in Tab. 4 in Fettdruck wiedergegeben.

Höhle/Stollen	Gewässertyp (G,O,T) u. -zahl	Intervall	Zeitraum der Messungen
Kluterthöhle, EN:	3G, 10, 6T	1 Monat	10.83-09.84
	1-3G, 6-9T	1 Monat	04.85-07.86
	6T		07.86
Erlenhöhle:	2T	1 Monat	04.85-03.86
	3T, 10		12.86
Halver Hülloch:	1G, 2T	1 Monat	07.85-03.86 +12.86
Kluterthöhle, HA:	1G, 1-3T	1-2 Monate	04.85-03.86
Eisenhöhle:	2-5G	1 Monat	09.85-03.86
Volmehanghöhle:	1-2G, 4-5T	1 Monat	05.85-03.86
Dechenhöhle:	5T	1 Monat	04.85-03.86
Knitterhöhle:	1-2G, 1T	1 Monat	04.85-03.86
Kupferbergseenspalte:	1G		06.85
Höhle hinter der Villa Ribbert:	1G, 2-3T	1 Monat	09.85-03.86
Schönebecker Höhle:	1-2T		07.+12.86
Große Sunderner H.:	4G, 10, 1T		12.86
	4G, 1T		07.87
Serkenroder Schacht:	1T		12.86
Reckenhöhle:	1T		09.85
Friedrichshöhle:	1G, 1-2T	1 Monat	09.85-03.86
	1-2G, 1-2O, 2T		07.+12.86+07.87
Stollen bei Platthaus:	1G, 2T		04.+05.85
	1G, 1-2T	2 Monate	09.85-03.86
Wasserloch im Kehlberg:	1G, 10		07.87
Grauer Ort. H8Fm:	1G		07.87
Heinrichshöhle:	2T		07.87
VON-DER-BECKE-H.:	1T, 2G		07.87
Antfelder Höhle:	1T, 10		12.86
Veledahöhle:	1G		12.86

Tab. 4: 22 hydrochemisch untersuchte Höhlen und Stollen. Fettdruck: Die Messungen erfolgten regelmäßig und zu verschiedenen Jahreszeiten. In den übrigen Höhlen wurde nur einmal oder in unregelmäßigen Abständen gemessen. Zu den Abkürzungen vgl. Legende in Tab. 1.

Soweit nicht anders angegeben, wurde nach dem Deutschen Einheitsverfahren (DEV) zur Wasseranalyse (1979) gearbeitet. Der gelöste Sauerstoff wurde nach WINKLER, das gelöste sowie gebundene CO₂ und die pH-Werte (aus den m- und p-Werten) nach DEV, H 7/8, 1979 bestimmt. Die organischen Substanzen wurden durch den Kaliumpermanganatverbrauch in saurer Lösung gemäß DEV, H4 und LEITHE (1972) bestimmt (angegeben werden mg KMnO₄-Verbrauch/l).

Bevor Veränderungen des Wasserchemismus einsetzen konnten, fixierte ich an der Entnahmestelle den gelösten Sauerstoff nach WINKLER. Die CO₂-Gehalte bestimmte ich innerhalb der ersten 15 Minuten nach der Probeentnahme, bevor sich die Temperatur veränderte, am Höhleneingang.

Da für die pH-Wert-Bestimmung nicht stets vor Ort eine Meßelektrode zur Verfügung stand, wurde der Säuregehalt aus den m- und p-Werten nach DEV, H 7/8 ermittelt. Diese Methode wurde durch Messungen mit einem transportablen pH-Meter der Firma WTW überprüft. Die Messungen ergaben gute Übereinstimmung für die 1. Stelle hinter dem Komma.

Die Konzentrationen der Metallionen bestimmte ich mit dem Atom-Absorptionsspektrometer AA6 der Firma Varian-Techtron. Zur Messung der Chloridkonzentrationen wurde die ABU-Autobürette der Firma Radiometer Copenhagen in Verbindung mit dem Rechner PHM 84 und dem Digitaltitrator TTT 81 verwendet. Die Leitfähigkeit wurde mit dem Gerät Metrom E 382 der Firma Herisau bei 20°C bestimmt. Die Bestimmung der Konzentrationen von Ammonium, Nitrit, Nitrat und Phosphat erfolgte mit dem Photometer PMQ 3 der Firma Zeiss. Die angegebenen Konzentrationen (mg/l und µg/l) beziehen sich auf die Anionen bzw. Kationen.

III. Ergebnisse

1. Das Arteninventar

Die in den bisher untersuchten Höhlen von anderen Autoren und von mir nachgewiesenen troglobionten Arten sind in Tab. 5 summarisch erfaßt. Die Turbellarien wurden nach REISINGER (1924, 1933), KOMAREK (1930), die Nemertine nach GIBSON & MOORE (1976) und die Crustaceen nach HENRY (1976), SCHELLENBERG (1942), PINKSTER (1970), GOEDMAKERS (1972), STOCK (1974), STOCK & GLEDHILL (1977), GLEDHILL (1980) und JAKOBI (1955) bestimmt. -Die Gesamtverbreitung der in Westfalen vorkommenden troglobionten Arten ist z. T. nur sehr lückenhaft bekannt. Einen Überblick gibt die „Limnofauna Europaea“ (ILLIES 1978); sie berücksichtigt jedoch lediglich die Zugehörigkeit zu größeren Regionen; Angaben zur Punktverbreitung werden nicht gemacht. Für einzelne Arten wurde deshalb die Verbreitung auch aus der zerstreuten Originalliteratur ermittelt. Im Folgenden sind die westfälischen Fundorte und Höhlen, die ein Vorkommen troglobionter Arten aufweisen oder aus dem Schrifttum für das Vorkommen troglobionter Arten bekannt sind, durch Sperrdruck gekennzeichnet.

Protozoen sind aus unterirdischen Gewässern schon früh beschrieben worden (EHRENBERG 1860; JOSEPH 1878), jedoch bereitet bei dieser Gruppe eine Einteilung in troglobionte, troglophile und troglaxene Arten beträchtliche Schwierigkeiten, da bei ihnen, mit Ausnahme weniger auf höheren troglobionten Arten epibiontisch lebender Ciliaten (HUSMANN 1956), engere Habitatbindungen an den unterirdischen Lebensraum bisher nicht festgestellt werden konnten (CHAPPUIS 1927; WETZEL 1929 in HNATEWYTSCH 1929). Obwohl offensichtlich die meisten unterirdisch angetroffenen Protozoen aus oberirdischen Gewässern stammen, ist es nicht gerechtfertigt, sie allesamt als Troglaxene zu bezeichnen, da einigen von ihnen eine unterirdische Entwicklung und Vermehrung möglich ist (VANDEL 1965). Diese Tiere müssen, obwohl sie mit großer Wahrscheinlichkeit nur zufällig in unterirdische Gewässer gelangen, damit definitionsgemäß als troglophil eingestuft werden. Bei den westfälischen Funden handelt es sich vorwiegend um euryöke, meist substratbewohnende oder sessile Arten, Bewohner des Litorals und Profundals; planktische Formen sind in Höhlen seltener (GRIEPENBURG 1933b, 1933c, 1934, 1935, 1939a, 1939b, 1941c+e). Aufgrund des Fehlens troglobionter Protozoen wird auf die Darstellung der zahlreichen Arten verzichtet und an dieser Stelle auf das Schrifttum verwiesen.

Unterirdisch lebende Copepoden (Crustacea) wurden seit dem Beginn dieses Jahrhunderts aus

verschiedenen Tropfsteinhöhlen Westfalens gemeldet (GRAETER 1910; THIENEMANN 1916; LENSCH 1930, 1931a+b, 1938 u. 1961; KIEFER 1931 u. 1932; GRIEPENBURG 1933b, 1934, 1935, u. 1939a u. b). Die meisten dieser Arten gehören der epigäischen Fauna an, einige gehören möglicherweise zu der Gruppe der Trogliphilen oder Troglobionten. Der aus der Kluterthöhle (Ennepetal) gemeldete *Cyclops stammeri* (KIEFER 1931), der auch aus der Höhle von St. Canzian (Triest) bekannt wurde (KIEFER 1930) und heute zu *Acanthocyclops venustus* (NORMAN & SCOTT) gerechnet wird (HUSMANN 1956), wurde zunächst als troglobiont angesehen (GRIEPENBURG 1935), muß aber aufgrund oberirdischer Lebensweise in Moorgewässern (KIEFER 1973) heute als troglophen oder trogliphil eingestuft werden. Das Vorkommen von Copepoden wurde in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

Stamm Plathelminthes (Plattwürmer)

Klasse Turbellaria (Strudelwürmer)

Ordnung Seriata

Unterordnung Tricladida

Familie Dendrocoelidae

Rectocephala schneideri (KOMAREK) [= *Bdellocephala schneideri* KOMAREK]

Die Art wurde als *Bdellocephala schneideri* aus dem Grumbacher Stollen zwischen Clausthal und Goslar (Harz) beschrieben (KOMAREK 1930), und später von SCHNEIDER (1938) in Stollen bei Andreasberg (Harz), von GRIEPENBURG (1934) in der Erlenhöhle bei Schwelm, in einem Grundwasserbrunnen in Idstein (Taunus) und im Kleinen Hüllloch bei Kierspe (GRIEPENBURG 1939a) nachgewiesen. Das Vorkommen in der Erlenhöhle kann von mir bestätigt werden, das Kleine Hüllloch bei Kierspe ist z.Z. nicht zugänglich. Im Mai 1986 entdeckte ich die Art in der Schönebecker Höhle bei Lüdenscheid. Für Westfalen sind also drei Fundstellen bekannt (Abb. 2). Nach ILLIES (1978) wird die Art aufgrund der Genitalanatomie heute zur Gattung *Rectocephala* gestellt (vgl. auch HYMAN 1954 und Kap. III. 6.). *R. schneideri* wurde bisher nur in Deutschland nördlich des Main gefunden. Aus Süddeutschland, Südeuropa und vor allem aus Südosteuropa sind eine große Zahl troglobionter Lokalformen aus der Familie der Dendrocoeliden beschrieben worden, deren Artstatus z.T. noch geklärt werden muß (DAHM & GOURBAULT in ILLIES 1978). Darunter könnten sich zu *R. schneideri* conspezifische Formen befinden.

Ordnung Neorhabdocoela

Unterordnung Typhloplanoida

Krumbachia subterranea REISINGER

Die 1932 von Griepenburg in der Kluterthöhle (Ennepetal) gesammelte Form (GRIEPENBURG 1935) wurde von REISINGER (1933) als *Krumbachia subterranea* beschrieben. GRIEPENBURG fand die Art später außerdem in der Rentropshöhle (1933b, 1935), in der Erlenhöhle (1934) und im Halver Hüllloch (1939a). Bei meinen Untersuchungen in der Kluterthöhle (1982-1989) konnte ich die Art nicht mehr nachweisen. In der Erlenhöhle ist die Art heute noch zahlreich, im Halver Hüllloch traf ich die Art regelmäßig in einzelnen Exemplaren an. Ich entdeckte sie neu in der Höhle hinter der Villa Ribbert (Hohenlimburg) in ebenfalls einzelnen Exemplaren (vgl. auch Abb. 2). *K. subterranea* wurde weiterhin im Grundwasser von Aschaffenburg und in Harzer Höhlen nachgewiesen (GRIEPENBURG 1941b). -Aus der Steiermark wurde von REISINGER (1924) die Form *Krumbachia styriaca* beschrieben, deren Artverschiedenheit von *K. subterranea* zweifelhaft ist (vgl. Kap. III. 6.). Nach ILLIES (1978) ist *K. subterranea* in Westeuropa, Süddeutschland und Südosteuropa verbreitet.

Stamm Nemertini (Schnurwürmer)

Prostoma putealis (DE BEAUCHAMP)

[= *P. clepsinoides* var. *putealis* DE BEAUCHAMP]

Die erste Höhlennemertine überhaupt wurde im Februar 1930 von GRIEPENBURG (1941b) in der Kluterthöhle (Ennepetal) entdeckt. Trotz intensiver Suche war es bisher nicht möglich, troglobionte Nemertinen in weiteren Höhlen Westfalens nachzuweisen (vgl. auch Abb. 2). Zu den wenigen Vorkommen außerhalb Deutschlands siehe die Bemerkungen in der Einleitung. DE BEAUCHAMP (1932) beschrieb die Art aus dem Grundwasser bei Dijon und Illkirch (Frankreich) als *Prostoma clepsinoides* var. *putealis*. *P. clepsinoides* ist eine von DUGES (1828) beschriebene oberirdische Süßwassernemertine. Der Name *clepsinoides* wurde von GIBSON & MOORE (1976) eingezogen. Sie schlugen vor, die unterirdische Form als eigene Art (*P. puteale*) aufzufassen. Weitere Höhlennemertinen wurden aus Rumänien (MOTAS 1961) und Jugoslawien (TARMAN 1961) gemeldet. Zur systematischen Stellung der Höhlennemertine und der oberirdischen Nemertinen siehe Kapitel III. 6. Die Höhlennemertine kommt auch heute noch in der Kluterthöhle vor, ist aber ganz offensichtlich seltener geworden (vgl. Kapitel III. 5.).

Stamm Annelida (Gliederwürmer)

Klasse Polychaeta (Vielborster)

Ordnung Archiannelida

Troglochaetus beranecki DELACHAUX

DELACHAUX (1921) beschrieb die Art nach einem Fund aus der Grotte de Vert in der Areuseschlucht, Kt. Neuenburg, Schweiz (siehe auch CHAPPUIS 1927). Sie ist im englumigen Lückensystem des Grundwassers gefunden worden und auch aus großräumigen Höhlengewässern bekannt (DELACHAUX 1921; STAMMER 1936a, 1936b und 1937; SCHULZE und UHLMANN 1960). Die Art wurde in westfälischen Höhlen bisher noch nicht nachgewiesen. HUSMANN fand die Art 1955 im Grundwasser der Ruhr bei Wandhofen nahe Dortmund zusammen mit anderen troglobionten Arten (HUSMANN 1962) (vgl. auch Abb. 2). – Nach ILLIES (1978) ist die Art in Südosteuropa und Mitteleuropa verbreitet.

Klasse Clitellata (Gürtelwürmer)

Ordnung Oligochaeta (Wenigborster)

Guestphalinus wiardi (MICHAELSEN) [= *Dorydrilus wiardi* MICHAELSEN]

Die Art wurde von GRIEPENBURG (1933b) erstmals in der Rentropshöhle gefunden und von MICHAELSEN (1933) zunächst als *Dorydrilus wiardi* (Dorydrilidae) beschrieben (vgl. Abb. 2). Sie wurde später als eigene Gattung (*Guestphalinus*) in die Familie Lumbriculidae gestellt (ILLIES 1978). *G. wiardi* wurde außerhalb Westfalens aus den Ringshöhlen des Ofenkaulberges (Siebengebirge; ZEPP 1933; LENGERSDORF 1933), aus der Tschamberhöhle (Schwäbische Alb; SCHELLENBERG 1936), aus einem Brunnen bei Idstein (Taunus; GRIEPENBURG 1941b), aus einem Brunnen im Maintal (NOLL & STAMMER 1953) und einer Quelle bei Beaufays (Belgien; LERUTH 1939) nachgewiesen. Weitere Fundpunkte sind nicht bekannt.

Stamm Arthropoda (Gliederfüßler)

Klasse Crustacea (Krebstiere)

Unterklasse Malacostraca (Höhere Krebse)

Überordnung Syncarida

Antrobathynella stammeri (JAKOBI) [= *Bathynella natans stammeri* JAKOBI]
(*Bathynella chappuisi* DELACHAUX)

Eine Syncaride (vermutlich *Antrobathynella stammeri*) wurde in Westfalen erstmals von LENGERSDORF (1929) in der Reckenhöhle gefunden. 1931-1934 gelang GRIEPENBURG (1939a) ein Nachweis im Halver Hülloch (vgl. Abb. 3). Die Angabe der Dechenhöhle als Fundort (KIEFER 1931) stellt nach GRIEPENBURG (mündliche Mitteilung) eine Verwechslung mit der Reckenhöhle dar (vgl. auch KIEFER 1928 und 1931). Die Art wurde zunächst als *Bathynella chappuisi* DELACHAUX geführt. Die Heranziehung der Mandibelform als systematisches Merkmal (JAKOBI 1955) führte zur Einordnung in die Art *B. natans* VEJDOVSKY als geographische Unterart *stammeri*. Später wurden die verschiedenen Unterarten zu Arten erhoben (HUSMANN 1968), *B. n. stammeri* wurde einer eigenen Gattung (*Antrobathynella*) zugerechnet (SERBAN 1966a u. b, 1972); als *B. chappuisi* gilt nur noch die vom locus typicus stammende Form (ILLIES 1978). -Ich fand die Art an derselben Stelle im Halver Hülloch, an der sie GRIEPENBURG erstmals entdeckte. Die Nachsuche in der Reckenhöhle war erfolglos, erwartungsgemäß fand ich sie auch nicht in der Dechenhöhle. Die Art ist europaweit im Grundwasser verbreitet.

Überordnung Peracarida (Ranzenkrebse)

Ordnung Isopoda (Asseln)

Proasellus cavaticus (LEYDIG)

Die in West- und Mitteleuropa weit verbreitete Höhlenassel kommt bis nach England vor (HENRY 1976). In Westfalen wurde die Art möglicherweise erstmals von FUHLROTT (1849) in einem Elberfelder Brunnen nachgewiesen (vgl. Einleitung). In diesem Jahrhundert wurde die Art von VOIGT in der Kluterthöhle (Ennepetal) in mehreren Exemplaren (THIENEMANN 1912) und etwas später dort auch von THIENEMANN in 1 Exemplar gesammelt (THIENEMANN 1916). Für die Kluterthöhle gelang GRIEPENBURG (1935) kein Neunachweis; die Angabe bei LENGERSDORF (1961) zum Vorkommen in der Kluterthöhle bezieht sich vermutlich auf THIENEMANN. Später wurde die Art westlich der Weser bei Höxter (HUSMANN 1956) und im Grundwasser der Ruhr bei Wandhofen gefunden (HUSMANN 1962; vgl. die Fundangaben zu *T. beranecki*), außerdem von MICKOLEIT (1987) in einer Quelle bei Wiehl im Bergischen Land und von LAUKÖTTER in Quellen der Paderborner und Briloner Hochfläche (PUST et. al. in Vorbereitung). Ich wies die Art erstmals 1985 für die Friedrichshöhle im Hönnetal und 1989 für die Höhle im Kattenstein bei Kallenhardt nach (vgl. auch Abb. 3). Nachforschungen in der Kluterthöhle waren erfolglos.

Ordnung Amphipoda (Flohkrebse)

Familie Gammaridae

Crangonyx subterraneus BATE

Der im Grundwasser West- und Mitteleuropas verbreitete Amphipode kommt bis nach England vor (SCHELLENBERG 1932b; ILLIES 1978). Im Grundwasser Westfalens wurde die Art bisher in einer Quelle im Strückerberg bei Schwelm (SCHELLENBERG,

1932c) und im Grundwasser der Ruhr bei Wandhofen (HUSMANN 1962) nachgewiesen (Abb. 3). Belege aus westfälischen Höhlen fehlen.

Niphargus aquilex (SCHIÖDTE)

SCHELLENBERG (1932c) erwähnt erstmals das Vorkommen von *N. aquilex* in Westfalen, und zwar für die Kluterthöhle (Ennepetal) und für die Erlenhöhle sowie für verschiedene Stellen im Grundwasser (z.B. Quelle im Strückerberg bei Schwelm). Auch GRIEPENBURG erwähnt die Art für die Kluterthöhle in Ennepetal (1935), die Erlenhöhle bei Schwelm (1934), die Rissehöhle im Lörmecke-Tal und die Höhle im Kattenstein bei Kallenhardt (1939b) (*N. aquilex* und *N. schellenbergi* wurden seinerzeit noch als Unterarten einer Art aufgefaßt, vgl. unten). Ich kann das Vorkommen der Art für die beiden erstgenannten Höhlen sowie für die Rissehöhle nicht bestätigen. In der Erlenhöhle fand ich nur juvenile Niphargiden, die nicht bestimmt werden konnten. Es gelang mir jedoch, *N. aquilex* für den Brackelsbergstollen bei Hagen und die Höhle im Kattenstein bei Kallenhardt nachzuweisen (vgl. auch Abb. 4). – *N. aquilex* kommt in Westeuropa einschließlich England und in Mitteleuropa vor; die Art lebt auch im Grundwasser der Tiefebene (SCHELLENBERG 1942).

N. fontanus BATE

N. fontanus wird für folgende Höhlen in Westfalen angegeben (vgl. auch Abb. 4): Bismarckhöhle (GRIEPENBURG 1935) – Kluterthöhle En (GRIEPENBURG 1935 und eigener Nachweis 1982) – Rentropshöhle (GRIEPENBURG 1933b und 1935) – Halver Hülloch (GRIEPENBURG 1939a) – Volmehanghöhle (eigener Nachweis 1988) – Kleines Hülloch bei Kierspe (GRIEPENBURG 1939a) – Höhle hinter der Villa Ribbert (eigener Nachweis 1986) – Heinrich-Bernhard-Höhle (eigener Nachweis 1986) – Schönebecker Höhle (eigener Nachweis 1986) – Stollen bei Platthaus (eigener Nachweis 1985) – Grauer Ort, H8Fm (eigener Nachweis 1987) – Große Sunderner Höhle (eigener Nachweis 1986) – Antfelder Höhle (eigener Nachweis 1988) – Antfelder Stollen (eigener Nachweis 1988) – Mescheder Stollen (eigener Nachweis 1988).

Die Art weist innerhalb des Untersuchungsgebietes die größte Zahl von Fundstellen auf; sie wurde auch außerhalb von Höhlen im Grundwasser (HUSMANN 1962) nachgewiesen. Den Nachweis von GRIEPENBURG (1935) konnte ich nur für die Kluterthöhle bestätigen. Es gelangen 10 Neunachweise. – *N. fontanus* ist in Westeuropa, in den Alpen, in Mitteleuropa (bis Warschau und Wien) und England in Höhlen und im Interstitial der Flüsse verbreitet (SCHELLENBERG 1942; ILLIES 1978).

N. kochianus BATE

N. kochianus wurde für folgende Höhlen gemeldet (vgl. auch Abb. 5):

Kluterthöhle En (SCHELLENBERG 1932c; GRIEPENBURG 1935 und eigener Nachweis 1982) – Kluterthöhle, Ha (eigener Nachweis 1985) – Matthiasstollen (eigener Nachweis 1986) – Krötenhöhle (eigener Nachweis 1986) – Friedrichshöhle (eigener Nachweis 1985).

Die Nachweise von *N. kochianus* für die Kluterthöhle (Ennepetal) (SCHELLENBERG 1932c; GRIEPENBURG 1935) kann ich bestätigen; außerdem fand ich *N. kochianus* in 4 weiteren Höhlen. SCHELLENBERG (1932c) gibt für das Vorkommen der Art im Grundwasser auch Brunnen bei Elberfeld und Bonn an. *N. kochianus* ist in mehreren

Unterarten in Europa verbreitet (STOCK & GLEDHILL 1977; STRASKRABA 1972; ILLIES 1978). Die von mir in der Kluterthöhle (Ennepetal) gesammelte Form wurde von VONK als Subspecies *N. kochianus kochianus* bestimmt. Vermutlich gehören auch die anderen Populationen im Untersuchungsgebiet dieser Unterart an. *N. k. kochianus* ist weiterhin aus England und Westfrankreich (Aquitanien) bekannt (STOCK & GLEDHILL 1977; VONK 1988). Aus der Provinz Limburg (Niederlande) und dem östlichen Teil von Belgien beschreiben STOCK & GLEDHILL (1977) die sehr ähnliche Form *N. k. dimorphopus*. Eine 3. Form, *N. k. pachypus*, kommt ebenfalls in der Provinz Limburg, in Belgien und Frankreich vor. Weitere Subspecies sind aus Irland, Helgoland und aus dem osteuropäischen Raum bekannt.

N. puteanus KOCH

N. puteanus wurde aus folgenden Höhlen gemeldet (vgl. auch Abb. 5): Kluterthöhle, En (THIENEMANN 1916; LENGERSDORF 1930; SCHELLENBERG 1932c) – Rentropshöhle (SCHELLENBERG 1932c) – Halver Hülloch (SCHELLENBERG 1932c) – Eisenhöhle (eigener Nachweis 1985) – Dechenhöhle (THIENEMANN 1916) – Attahöhle (THIENEMANN 1916) – Friedrichshöhle (eigener Nachweis 1985) – Von-der-Becke-Höhle (THIENEMANN 1916; LENGERSDORF 1928; SCHELLENBERG 1932c+1933 und eigener Nachweis 1987) – Prinzenhöhle (LENGERSDORF 1961).

SCHELLENBERG (1932c) erwähnt für die Kluterthöhle (Ennepetal), die Rentropshöhle und das Halver Hülloch das Vorkommen von *N. puteanus*. Nach einer späteren Bemerkung von SCHELLENBERG (1933) könnte es sich aber um *N. fontanus* handeln. Tatsächlich wurde die Art *N. fontanus* von GRIEPENBURG (1933b, 1935 und 1939a) für diese Höhlen angegeben und auch von mir für die Kluterthöhle bestätigt. Die Angabe THIENEMANN'S (1916) zum Vorkommen von *N. puteanus* in der Kluterthöhle ist möglicherweise ebenfalls zweifelhaft, da er zu jener Zeit die Existenz mehrerer *Niphargus*-Arten ablehnte (THIENEMANN 1912). LENGERSDORF (1930) bezieht sich auf die Meldung von *N. caspary* PRATZ aus der Kluterthöhle (SCHULTEN 1927) und hält den Fund für *N. puteanus*. Diese Ansicht ist ebenfalls nicht gesichert, da es sich auch um eine Verwechslung mit *N. fontanus* (GRIEPENBURG 1935 und eigener Nachweis), *N. aquilex* (GRIEPENBURG 1935) oder *N. schellenbergi* (eigener Nachweis) handeln könnte, deren Vorkommen in der Kluterthöhle gesichert ist. THIENEMANN (1916) gibt *N. puteanus* noch für die Attahöhle und die Dechenhöhle an. An beiden Stellen fand ich keine Niphargiden. Bestätigen konnte ich das bereits früher gemeldete Vorkommen in der Von-der-Becke-Höhle (THIENEMANN 1916; SCHELLENBERG 1932c und 1933); für diese Höhle gab SCHELLENBERG (1932c) zunächst das Vorkommen eines *N. tatrensis stadleri* KARAMAN an, bei dem es sich jedoch nach SCHELLENBERG (1933) ebenfalls um *N. puteanus* handeln soll. Der Fund „aus dem Ausfluß der Prinzenhöhle“ (Hemer) (LENGERSDORF 1928) konnte ebenfalls bestätigt werden; die Fundstelle liegt jedoch außerhalb der Höhle und wird vom Grundwassersystem der Von-der-Becke-Höhle gespeist. Innerhalb der Prinzenhöhle (LENGERSDORF 1961) konnte ich keine troglobionten Arten nachweisen. Eigene neue Nachweise liegen aus der Eisenhöhle und der Friedrichshöhle vor. Das Vorkommen von Niphargiden in der Eisenhöhle wird von ZYGOWSKI (1976) bereits angegeben. -*N. puteanus* ist bis heute sicher nur aus der Schweiz und Deutschland bekannt (SCHELLENBERG 1942; STOCK 1974).

N. schellenbergi (KARAMAN)

N. schellenbergi wurde aus folgenden Höhlen gemeldet (vgl. auch Abb. 4):

Kluterthöhle En (eigener Nachweis 1987) – Rentropshöhle (SCHELLENBERG 1932c; GRIEPENBURG 1933b) – Halver Hülloch (eigener Nachweis 1985) – Erzgebirge II (eigener Nachweis 1986) – Wasserloch im Kehlberg (eigener Nachweis 1987) – Pauls-Stollen der Hermannszeche (eigener Nachweis 1988) – Messinghauser Stollen (eigener Nachweis 1988) – Grundsteinheimer Höhle (eigener Nachweis 1988).

N. schellenbergi wurde lange Zeit als Unterart von *N. aquilex* aufgefaßt. Erst STRASKRABA (1972) vertritt die Ansicht, daß beide Formen innerhalb der *aquilex-tauri*-Gruppe echte Arten sind (vgl. auch ILLIES 1978). *N. schellenbergi* wurde in der älteren Literatur für den westfälischen Raum nur für die Rentropshöhle und aus dem Grundwasser (Quelle im Strückerberg) gemeldet (SCHELLENBERG 1932c). Mir gelangen 7 neue Nachweise aus Höhlen, u. a. aus der Kluterthöhle in Ennepetal (in allerdings nur 1 Exemplar), für die von SCHELLENBERG (1932c) und GRIEPENBURG (1935) die Form *aquilex* erwähnt wird. Da *N. schellenbergi* nach SCHELLENBERG (1932c) und GRIEPENBURG (1933b und 1935) in der wenige 100 m entfernten Rentropshöhle lebt, ist der Fund in der Kluterthöhle nicht überraschend. Möglicherweise kommen *N. aquilex* und *N. schellenbergi* in der Kluterthöhle sympatrisch vor, wie dies für die Quelle im Strückerberg belegt ist (SCHELLENBERG 1932c). 1989 konnte ich *N. schellenbergi* auch für die Almequelle (Briloner Hochfläche) nachweisen, wo sie syntop mit *P. cavaticus* vorkommt. Die Art ist innerhalb des Untersuchungsgebietes am weitesten verbreitet. Sie kommt von den Pyrenäen bis ins deutsche Mittelgebirge vor (HUSMANN 1956). Anders als *N. aquilex* wird die Art nicht in der Tiefebene gefunden (SCHELLENBERG 1942).

Unsichere *Niphargus*-Arten

Niphargus caspary PRATZ

SCHULTEN (1927) gibt das Vorkommen eines *N. caspary* PRATZ für die Kluterthöhle (Ennepetal) an, den CASPARY aus einem Elberfelder Brunnen nachgewiesen haben soll. Die heute zur Gattung *Niphargopsis* gerechnete Art (STRASKRABA 1972) wurde jedoch von PRATZ aus Münchener Brunnen beschrieben (SCHELLENBERG 1932a), während hingegen CASPARY (1849) aus Brunnen Elberfelds *N. puteanus* angibt (SCHELLENBERG 1932b). SCHELLENBERG (1932b u. 1932c) äußert die Ansicht, daß es sich bei CASPARYS Fund möglicherweise um *N. kochianus* handelt. SCHULTEN (1927) erwähnt jedoch ausdrücklich, daß die aus dem Bach der Kluterthöhle stammenden Tiere etwa 2 cm lang gewesen seien. Damit scheidet der wesentlich kleinere *N. kochianus* aus. LENGERSDORF (1930 und 1931b) hält die Form für eine Varietät von *N. puteanus*. Unter Berücksichtigung der damaligen Kenntnis der *Niphargus*-Systematik (vgl. SCHELLENBERG 1932c und 1933) könnte aber auch eine Verwechslung mit *N. aquilex*, *N. schellenbergi* oder mit *N. fontanus* vorliegen. Im übrigen sei darauf hingewiesen, daß aus Westfalen bisher keine gesicherte Meldung von *Niphargopsis casparyi* (PRATZ) vorliegt.

Niphargus stygius SCHIÖDTE

Die Art wird von LENGERSDORF (1961) für die Dechenhöhle angegeben und gehört zu jenen Arten, bei denen noch taxonomische Unklarheiten bestehen (ILLIES 1978). Innerhalb der Dechenhöhle und der unterhalb dieser liegenden Knitterhöhle (WOLF 1937 bezeichnet sie auch als „untere Dechenhöhle“) konnten von mir keine troglobionten Arten mehr festgestellt werden.

Niphargus tatrensis stadleri KARAMAN (vgl. auch Angaben zu *N. puteanus*)

LENGERSDORF gibt noch 1961 für die Von-der-Becke-Höhle eine Form an, die er als „*N. tatrensis (stadleri)*“ bezeichnet. Bereits SCHELLENBERG (1933) stellte die Form „*stadleri*“, die Karaman als Unterart von *N. tatrensis* WRESNIEWSKI auffaßte, zu *N. puteanus* KOCH. Dies kann von mir insofern bestätigt werden, als ich *N. puteanus* in der Von-der-Becke-Höhle fand. Auch *N. tatrensis* wird von ILLIES (1978) zu den Arten gestellt, bei denen noch taxonomische Unklarheiten bestehen.

Niphargus sp.

Es liegen aus folgenden Höhlen Funde von Krebsen der Gattung *Niphargus* vor: Heilenbecker Höhle – Erlenhöhle – Muttersteinhöhle – Serkenroder Schacht – Karls-Stollen der Hermannszeche.

Die Arten konnten nicht determiniert werden, da entweder nur juvenile Tiere gefunden wurden, oder keine Möglichkeit bestand, Tiere zur Bestimmung zu entnehmen (Heilenbecker Höhle).

Tab. 5: Die in den Höhlen Westfalens bisher nachgewiesenen troglobionten Arten, geordnet nach Fundorten.

Fettdruck: Höhlen, in denen eigene Untersuchungen durchgeführt wurden.
Petitdruck: Höhlen, für die nur Zitate existieren und eine eigene Untersuchung noch aussteht. Von der Literatur wurde in der Regel nur der Erstnachweis berücksichtigt. Zweifelhafte bzw. widerrufen Angaben stehen in Klammern.

Höhle	troglobionte Arten	eigener Nachweis [1982–1989]	zuerst belegt durch
Bismarckhöhle Ennepetal	<i>N. fontanus</i> BATE		GRIEPENBURG 1935
Heilenbecker Höhle Ennepetal	<i>Niphargus</i> sp.	X	
Kluterthöhle, En Ennepetal	<i>Krumbachia subterranea</i> REIS.		GRIEPENBURG 1935
	<i>Prostoma putealis</i> (DE BEAUCH.)	X	GRIEPENBURG 1935
	<i>Proasellus cavaticus</i> (LEYDIG)		THIENEMANN 1912
	(<i>Niphargus puteanus</i> KOCH)		THIENEMANN 1916 LENGERSDORF 1930 SCHELLENBERG 1932c
	(<i>N. caspary</i> PRATZ)		SCHULTEN 1927
	<i>N. kochianus</i> BATE	X	SCHELLENBERG 1932c GRIEPENBURG 1935
	<i>N. fontanus</i> BATE	X	SCHELLENBERG 1933 GRIEPENBURG 1935
	<i>N. aquilex</i> (SCHIÖDTE)		SCHELLENBERG 1932c GRIEPENBURG 1935
Rentropshöhle Ennepetal	<i>Krumbachia subterranea</i> REIS.		GRIEPENBURG 1933b
	<i>Guestphalinus wiardi</i> (MICH.)		GRIEPENBURG 1933b
	(<i>N. puteanus</i> SCHELLENBERG)		SCHELLENBERG 1932c

	<i>N. fontanus</i> BATE		SHELLENBERG 1933 GRIEPENBURG 1933 b
	<i>N. schellenbergi</i> (KARAMAN)		SHELLENBERG 1932c GRIEPENBURG 1933 b
Erlenhöhle Schwelm	<i>Krumbachia subterranea</i> REIS.	X	GRIEPENBURG 1934
	<i>Rectocephala schneideri</i> (KOM.)	X	GRIEPENBURG 1934
	<i>Niphargus aquilex</i> (SCHIÖDTE)		SHELLENBERG 1932c GRIEPENBURG 1934
	<i>Niphargus sp.</i> (juv. Tiere)	X	
Halver Hülloch Halver	<i>Krumbachia subterranea</i> REIS.	X	GRIEPENBURG 1939a
	<i>Antrobathynella stammeri</i> (JAKOBI)	X	GRIEPENBURG 1939a
	(<i>N. puteanus</i> SHELLENBERG)		SHELLENBERG 1932c
	<i>N. fontanus</i> BATE		GRIEPENBURG 1939a
	<i>N. schellenbergi</i> (KARAMAN)	X	
Kluterhöhle, Ha Hagen	<i>Niphargus kochianus</i> BATE	X	
	<i>Niphargus aquilex</i> (SCHIÖDTE)	X	
Brackelsberg - stollen Hagen			
	<i>Niphargus sp.</i>		ZYGOWSKI 1976
Eisenhöhle Hagen	<i>Niphargus puteanus</i> KOCH	X	
	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X	
Volmehanghöhle Hagen			
	<i>Rectocephala schneideri</i> (KOM.)		GRIEPENBURG 1939a
Kleines Hülloch Kierspe	<i>Niphargus fontanus</i> BATE		GRIEPENBURG 1939a
	<i>Niphargus kochianus</i> BATE	X	
Matthiasstollen Iserlohn	<i>Niphargus schellenbergi</i> (KARAMAN)	X	
Erzgebirge II Iserlohn	(<i>Bathynella chappuisi</i> DELACH.)		KIEFER 1931
	<i>Niphargus</i> (<i>puteanus</i> KOCH)		THIENEMANN 1916
	<i>Niphargus</i> (<i>stygius</i> SCHIÖDTE)		LENGERSDORF 1961
Höhle hinter der Villa Ribbert Hohenlimburg	<i>Krumbachia subterranea</i> (REIS.)	X	
	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X	
Heinrich- Bernhard-Höhle Plettenberg	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X	
Attahöhle Attendorn	<i>Niphargus</i> (<i>puteanus</i> KOCH)		THIENEMANN 1916
Muttersteinhöhle Finnentrop	<i>Niphargus sp.</i> (juv. Tiere)	X	
Schönebecker Höhle Lüdenscheid	<i>Rectocephala schneideri</i> (KOMAREK)	X	
	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X	
Serkenroder Schacht Serkenrode	<i>Niphargus sp.</i> (juv. Tiere)	X	

Krötenhöhle Hönnetal	<i>Niphargus kochianus</i> BATE	X		
Friedrichshöhle Hönnetal	<i>Proasellus cavaticus</i> (LEYDIG)	X		
	<i>Niphargus kochianus</i> BATE	X		
	<i>Niphargus puteanus</i> KOCH	X		
Reckenhöhle Hönnetal	<i>Bathynella</i> (<i>chappuisi</i> DELACH.)		KIEFER LENGERSDORF	1928 1929
Stollen bei Platthaus Hönnetal	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X		
Wasserloch im Kehlberg Hönnetal	<i>Niphargus schellenbergi</i> (KARAMAN)	X		
Grauer Ort, H8Fm Felsenmeer bei Hemer	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X		
VON-DER-BECKE- Höhle Hemer	(<i>Niphargus tatrensis stadleri</i> KARAMAN)		SHELLENBERG LENGERSDORF	1932c 1961
	<i>Niphargus puteanus</i> KOCH	X	THIENEMANN LENGERSDORF SHELLENBERG	1916 1928 1933
Prinzenhöhle Hemer	(<i>Niphargus puteanus</i> KOCH)		LENGERSDORF	1961
Karls-Stollen der Hermannszeche Allendorf	<i>Niphargus</i> sp. (1 juv. Tier)	X		
Pauls-Stollen der Hermannszeche Allendorf	<i>Niphargus schellenbergi</i> (KARAMAN)	X		
Große Sunderner Höhle Sundern	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X		
Rissehöhle Warstein	<i>Niphargus aquilex</i> (SCHIÖDTE)		GRIEPENBURG	1939b
Höhle im Kattenstein Kallenhardt	<i>Niphargus aquilex</i> (SCHIÖDTE)	X	GRIEPENBURG	1939b
	<i>Proasellus cavaticus</i> (LEYDIG)	X		
Antfelder Höhle Antfeld	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X		
Antfelder Stollen Antfeld	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X		
Mescheder Stollen Meschede	<i>Niphargus fontanus</i> BATE	X		
Messinghauser Stollen Messinghausen	<i>Niphargus schellenbergi</i> (KARAMAN)	X		
Grundsteinheimer Höhle Grundsteinheim	<i>Niphargus schellenbergi</i> (KARAMAN)	X		

Abb. 1: Die Lage der untersuchten Höhlen und die wichtigsten Flußtäler. Höhlen, aus denen troglobionte und troglophile Turbellarien, troglobionte Nemertinen, Anneliden und Crustaceen bekannt sind, werden namentlich genannt. Auf Grund des Vorkommens troglobionter Arten werden die Faunenzone A und B unterschieden.

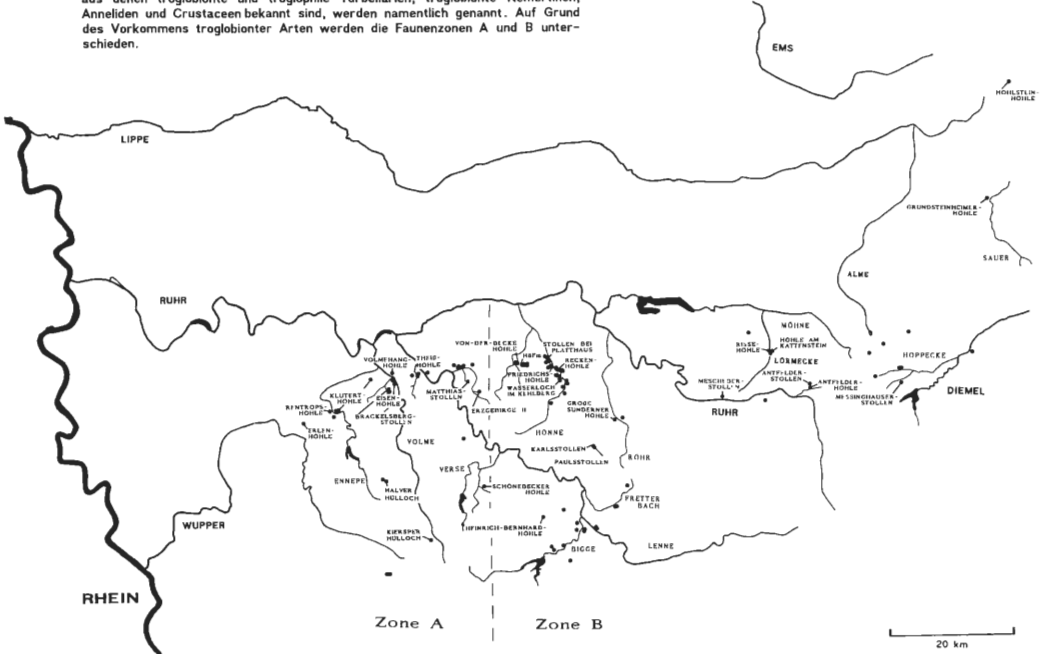


Abb. 2: Die geographische Verteilung der Fundstellen cavernicoler Turbellarien, Nemertinen und Anneliden. Ausgefüllte Symbole: vom Autor bestätigte Fundangaben; offene Symbole: nicht bestätigte Fundstellen.

Turbellarien: ■ *R. schneideri* Nemertinen: ● *P. putealis*
 ◆ *K. subterranea* Anneliden: ◆ *T. beranecki*
 + *Planaria vitta* ▲ *G. wiardi*

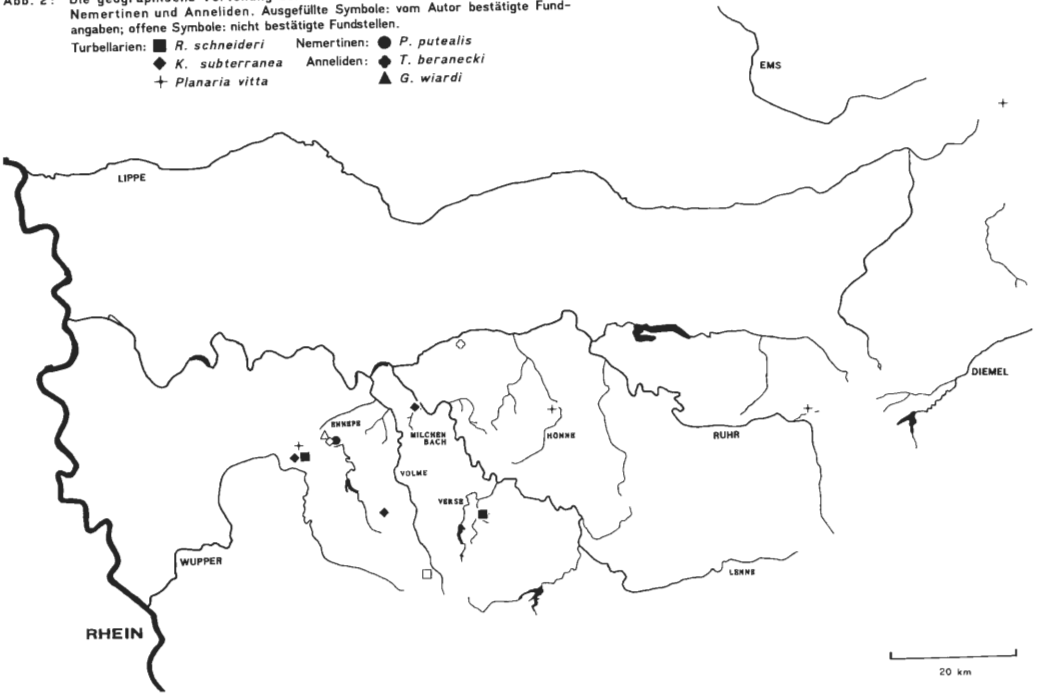


Abb. 3: Die geographische Verteilung der Fundstellen troglobionter Syncariden, Isopoden und Amphipoden (*Crangonyx subterraneus*). Ausgefüllte Symbole: vom Autor bestätigte Fundangaben; offene Symbole: nicht bestätigte Fundstellen.
 Syncariden: ◆ *A. stammeri* Isopoden: ★ *P. cavaticus*
 Amphipoden: ▲ *C. subterraneus*

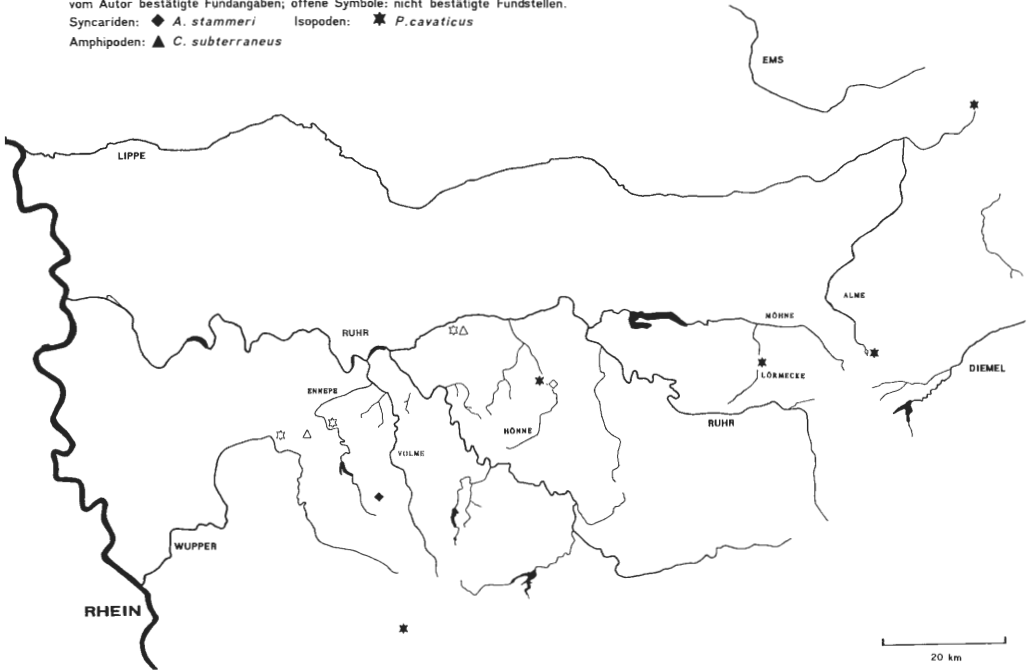


Abb. 4: Die geographische Verteilung der Fundstellen troglobionter Amphipoden der Gattung Niphargus. Die im Untersuchungsgebiet weit verbreiteten Arten. Ausgefüllte Symbole: vom Autor bestätigte Fundangaben; offene Symbole: nicht bestätigte Fundstellen.
 ● *N. fontanus*, ▲ *N. schellenbergi*, ◆ *N. aquilex*

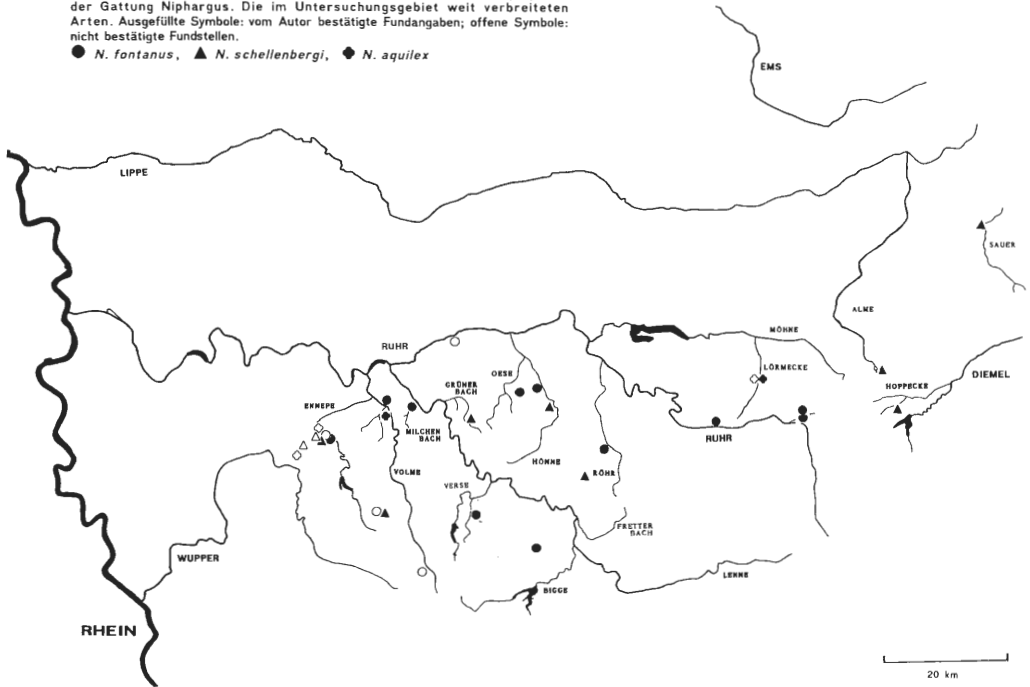
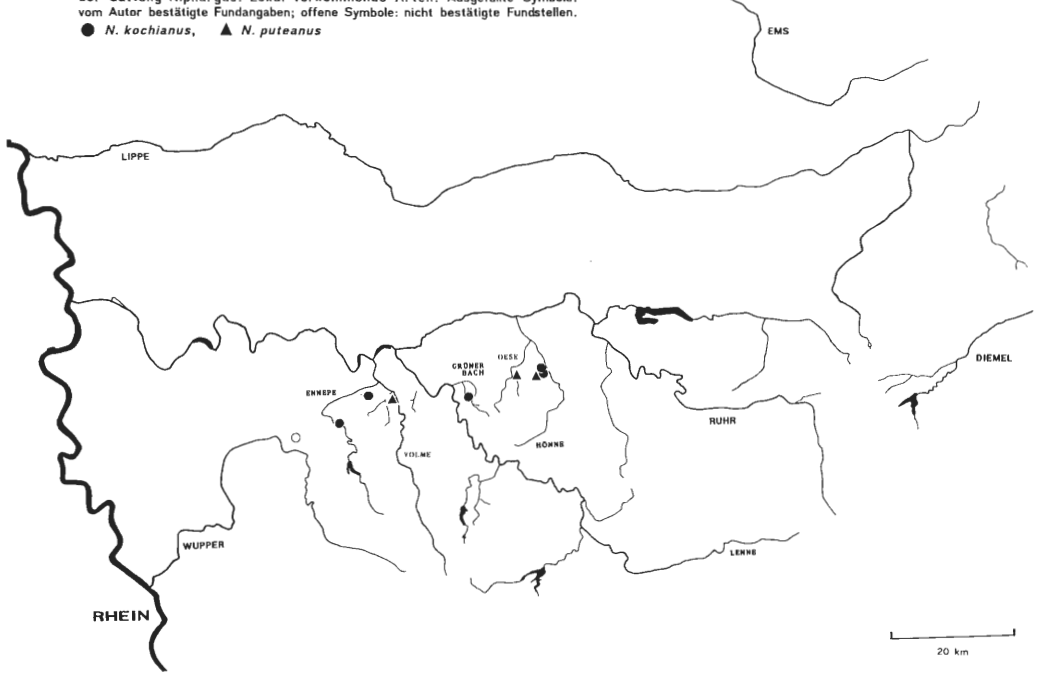


Abb. 5: Die geographische Verteilung der Fundstellen troglobionter Amphipoden der Gattung *Niphargus*. Lokal vorkommende Arten. Ausgefüllte Symbole: vom Autor bestätigte Fundangaben; offene Symbole: nicht bestätigte Fundstellen.
 ● *N. kochianus*, ▲ *N. puteanus*



2. Die Verteilung der troglobionten Arten im Untersuchungsgebiet

In etwa 1/3 der insgesamt 110 von anderen Autoren und mir untersuchten Höhlen (vgl. Tab. 1 und Abb. 9) wurden troglobionte Arten nachgewiesen. Höhlen mit troglobionten Tieren sind im westlichen wie auch im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes nicht selten (Abb. 9). Hinsichtlich der Artenzahl sind aber deutliche regionale Unterschiede erkennbar. Innerhalb der westlichen als A bezeichneten Zone treten Höhlen mit jeweils mehreren Arten auf, die sowohl der Gruppe der „Vermes“ als auch der Crustaceen angehören. Diese Zone umfaßt den Wupperbereich, den westlichen Bereich der Ruhr mit den Nebenflüssen Ennepe, Volme und westliche Lenne einschließlich des Versegebietes. Aus dieser Zone wurden 36 Höhlen untersucht, von denen 16 Höhlen (44%) troglobionte Arten aufweisen (Abb. 6 und 9). In der sich östlich anschließenden Zone B wurden mit wenigen Ausnahmen (Friedrichshöhle im Hönnetal mit 3 Arten und Höhle im Kattenstein bei Kallenhardt mit 2 Arten) nur jeweils eine Art pro Höhle nachgewiesen. Die Trogllobionten der Zone B gehören ausschließlich den Crustaceen an (Abb. 6 und 7). Die Grenze der beiden Zonen liegt im Bereich der Schönebecker Höhle bei Lüdenscheid (Luftlinienentfernung vom Rhein ca. 65 Km bei 7°45' ö. L. v. Greenwich). Die Zone B umfaßt das Ruhrsystem östlich von Schwerte mit den Nebenflüssen Lenne (östlich des Versegebietes), Höhne, Röhr, Möhne sowie das Diemel- und Sauerstystem. Es wurden aus dieser Zone 74 Höhlen untersucht, 21 (28%) enthalten troglobionte Arten. Außerhalb von Höhlen wurden troglobionte Arten auch aus dem Grundwasser und aus Quellen gemeldet, insbesondere von HUSMANN (1962) aus dem Grundwasser der Ruhr bei Wandhofen (Zone A) sowie von LAUKÖTTER aus der Jordanquelle (Bad Lippspringe bei Paderborn) und der Almequelle (Zone B) (PUST et. al. in Vorbereitung). In der Zone A sind alle im Untersuchungsgebiet nachgewiesenen Arten vertreten (13 Arten, einschließlich der Grundwasserfunde aus der Ruhr von HUSMANN

Artenzahl/Höhle

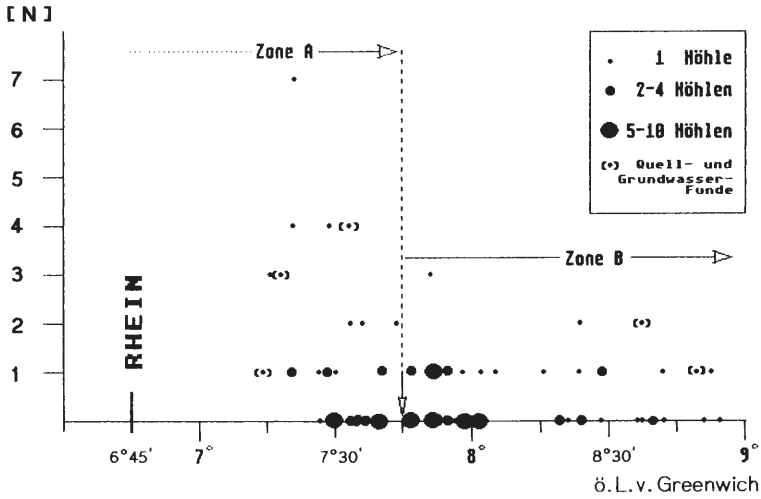


Abb. 6: Anzahl der troglobionten Arten pro Höhle • und außerhalb von Höhlen im Grundwasser und in Quellen (*), pro Fundstelle. Gliederung des Untersuchungsgebietes anhand der troglobionten Fauna. Die Angaben beziehen sich auf die im Schrifttum angegebenen Funde und auf Eigenfunde. Turbellarien, Nemertinen und Anneliden wurden nur innerhalb der Zone A, in der Zone B hingegen nur Crustaceen nachgewiesen.

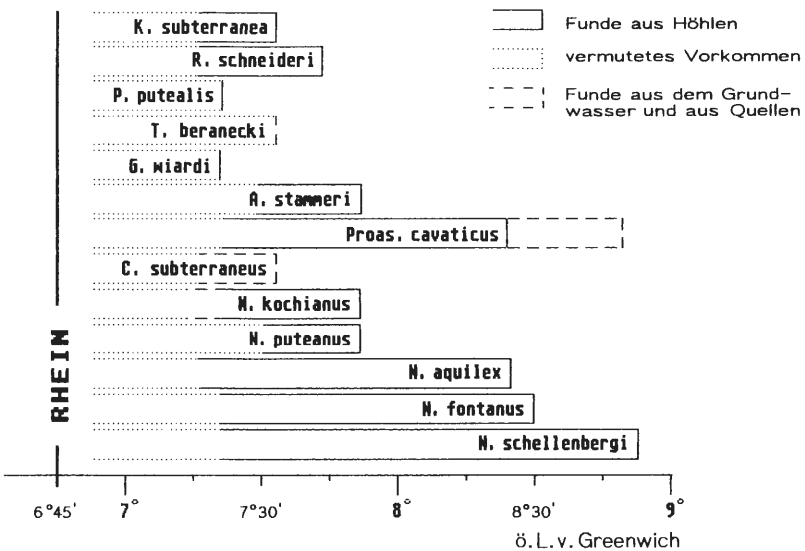


Abb. 7: Vorkommen troglobionten Arten mit Abstand zum Rhein. Es sind Höhlenfunde sowie Funde aus Grundwasser und Quellen berücksichtigt.

1962; 11 Arten aus Höhlen). In der Zone B tritt keine Art auf, die in der Zone A fehlt. Die troglobionte Fauna der Zone B ist hingegen deutlich artenärmer (7 Arten) (Abb. 6 und 9). Östlich von 8°30', im ostwestfälischen Raum auf der Paderborner und Briloner Hochfläche (ca. 135 Km Luftlinie östlich vom Rhein) wurden nur noch *Niphargus schellenbergi* und *Proasellus cavaticus* nachgewiesen (Abb. 7).

An dieser Stelle sei ausdrücklich betont, daß der Versuch einer regionalen Gliederung der troglobionten aquatischen Fauna in die Zonen A und B des Untersuchungsgebietes nicht die Annahme einer kontinuierlichen Verbreitung der Arten in der jeweiligen Zone

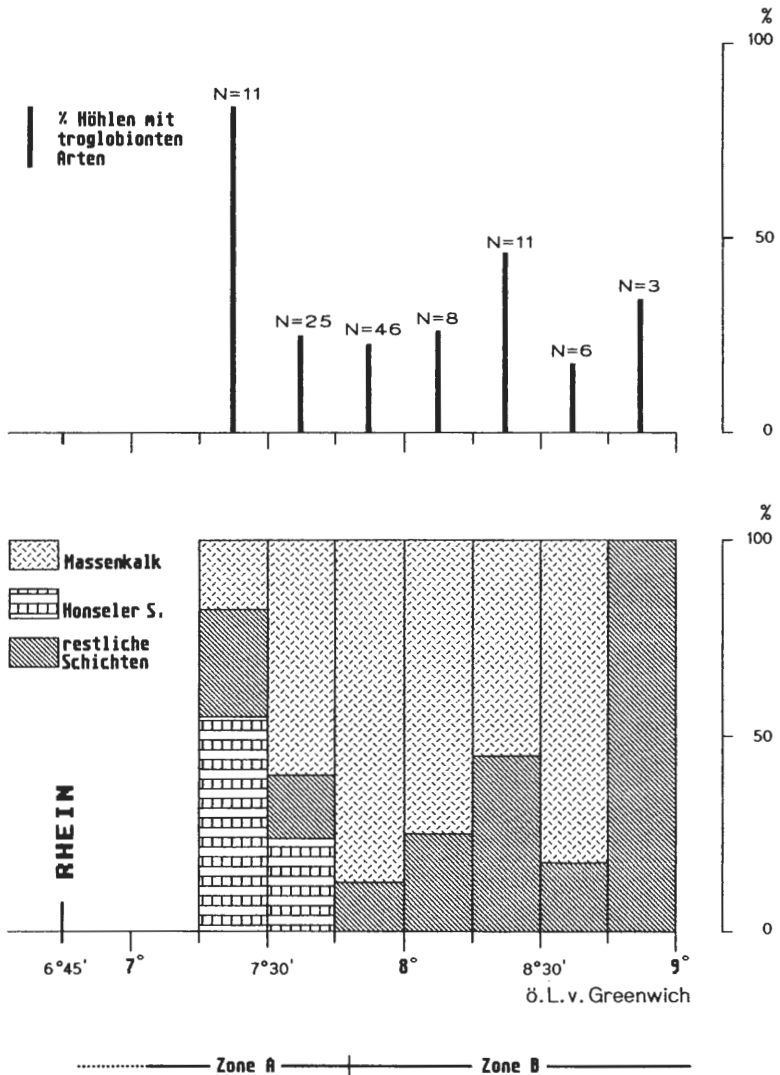


Abb. 8: Häufigkeit von Höhlen und Verteilung der Geologischen Formationen in den unterschiedenen Zonen (A und B). Oben: Prozentanteile der Höhlen mit troglobionten Arten. N = Gesamtzahl der Höhlen. Unten: Prozentuale Verteilung der geologischen Formationen.

impliziert. Die Höhlennemertine *P. putealis* und der Annelide *G. wiardi* treten vermutlich nur in jeweils einer Höhle auf (in der Kluterthöhle in Ennepetal bzw. in der Rentropshöhle). Eine weitere Verbreitung als die troglobionten Turbellarien, Nemertinen und Anneliden weisen andererseits die *Niphargus*-Arten auf, insbesondere *N. aquilex*, *N. fontanus* und *N. schellenbergi* sowie der Isopode *P. cavaticus*. Aber auch sie sind nicht „flächendeckend“ verbreitet, wie die große Anzahl von Höhlen ohne eine troglobionte Fauna beweist (Abb. 6 und 9).

Die Abnahme der Artenzahl von Westen nach Osten legt die Annahme nahe, daß dafür die zunehmende Entfernung vom Rhein maßgeblich ist (siehe auch Kap. IV. 4.), von

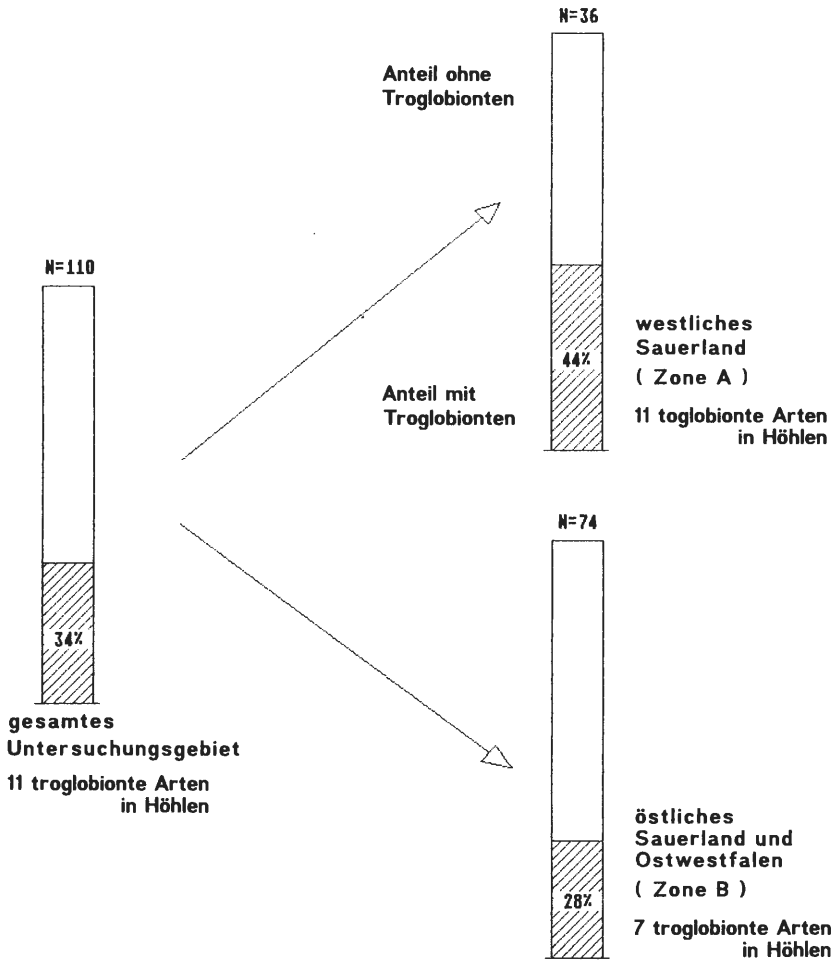


Abb. 9: Prozentualer Anteil der Höhlen mit troglobionten Arten (schraffiert) im westlichen (Zone A) und östlichen (Zone B) Bereich des Untersuchungsgebietes. N = Anzahl der Höhlen. Quell- und Grundwasserfunde außerhalb von Höhlen sind nicht berücksichtigt.

dessen Grundwasserstrom aus vermutlich unser Gebiet nacheiszeitlich besiedelt worden ist (vgl. auch Einleitung). Bevor eine solche Annahme als gesichert gelten kann, ist jedoch zu prüfen, ob die west-östliche Verteilung nicht auch durch andere Faktoren bedingt sein könnte. Dabei ist insbesondere an Unterschiede im Auftreten verschiedener geologischer

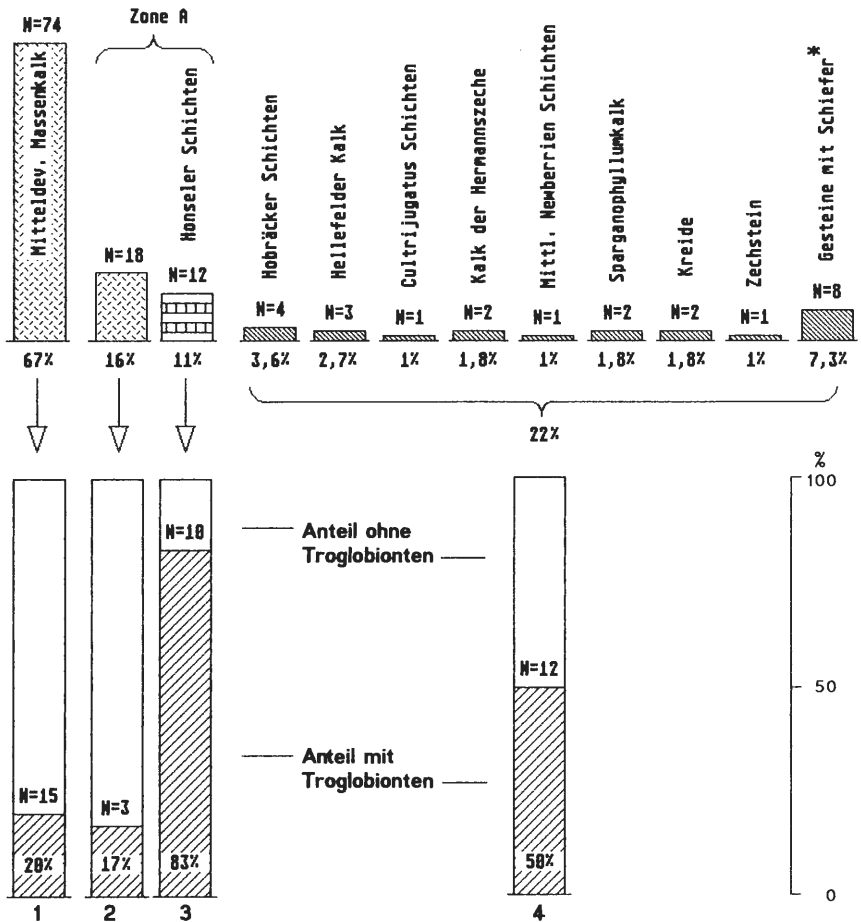


Abb. 10: Prozentuale Verteilung der untersuchten Höhlen auf die verschiedenen geologischen Formationen (oben; N = Anzahl der untersuchten Höhlen) sowie der prozentuale Anteil der Fundstellen mit troglobionten Arten (unten; N = Anzahl der Höhlen mit troglobionten Arten). Säule 1 (unten) gibt für den Massenkalk innerhalb der Zonen A und B den prozentualen Anteil und die Anzahl der Höhlen mit troglobionten Arten an; Säule 2 berücksichtigt nur die innerhalb der Zone A im Massenkalk gelegenen Höhlen und Säule 4 die außerhalb des Massenkalks und der Honseler Schichten gelegenen Höhlen. *)Stollen in Gesteinsschichten, die den Massenkalk umgeben, vorzugsweise im Schiefer.

Formationen zu denken. Abb. 8 belegt, daß ausschließlich in der besonders artenreichen Zone A Höhlen in den Honseler Schichten untersucht wurden. Diese Formation ist durch alternierendes Auftreten von Kalk-, Grauwacke- und Tonschieferschichten gekennzeichnet, was im Zuge der Verkarstung zu einer charakteristischen Raumstruktur und damit auch zu einem anderen Höhlenklima als im Massenkalk führt. Es dominieren hier zahlreiche Übergänge vom kleinlumigen Lückensystem der Schiefer- und Grauwackeschichten zum größerlumigen Lückensystem der Kalkschichten; die vorwiegend horizontale Schichtung des Tonschiefers im Ennepetaler Raum verhindert durch Überdeckung der Kalkschichten weitgehend die Ausdehnung des vertikalen Kluftsystems und bewirkt eine zusätzliche Stabilisierung des Höhlenklimas auch im größerlumigen Spaltensystem der Kalkschichten (siehe auch Kap. III. 3.1.). Demgegenüber weist der mitteldevonische Massenkalk meist großräumige Höhlen auf, da hier die Hohlräumeerweiterungen im Zuge der Verkarstung nicht begrenzt werden. Dies bedingt ein Absinken des Grundwasserspiegels. Hinzu kommen oftmals zahlreiche wetterwirksame Tagverbindungen, die klima-de-stabilisierend wirken (Kap. III. 3.1.).

Von insgesamt 12 untersuchten Höhlen, die innerhalb der Honseler Schichten liegen, weisen 83% eine troglobionte Fauna auf. Demgegenüber fällt ins Auge, daß innerhalb der Zone A nur 17% der Höhlen des Massenkalks besiedelt sind (im gesamten Untersuchungsgebiet weisen 20% der im Massenkalk gelegenen Höhlen troglobionte Arten auf; vgl. auch Abb. 10). Der Unterschied in der Besiedlung der Honseler Schichten und des Massenkalks der Zone A ist mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha < 0,001$ signifikant (χ^2 - Vierfeldertest, SACHS 1974). Die Gesamtheit der Höhlen, die in anderen geologischen Formationen liegt, ist zu 50% besiedelt (Abb. 10). Es fällt auf, daß auch innerhalb der Zone B der Anteil besiedelter Höhlen in den außerhalb des Massenkalks gelegenen Höhlen größer ist (Abb. 8). Höhlen im Massenkalk scheinen also in unserem Gebiet besonders häufig frei von troglobionten Arten zu sein (vgl. Kap. IV. 2.).

3. Das Klima der untersuchten Höhlen und die physikochemischen Parameter der Gewässer

Wechselwirkungen zwischen der Luft und dem Wasser sind in Höhlen ebenso wie auf der Erdoberfläche zu beobachten und müssen bei der Beurteilung des Vorkommens aquatischer troglobionter Arten berücksichtigt werden (vgl. Kap. III. 5.). Die Temperatur wirkt sich auf die Löslichkeit der Gase im Wasser aus; Luftfeuchte und Luftströmung beeinflussen auch in Höhlen die Verdunstungsrate und damit die Ionenkonzentrationen stehender Gewässer. Es ist zu beachten, daß die im Wasser gelösten Gase, Sauerstoff und Kohlendioxid, mit der Atmosphäre ein Gleichgewicht anstreben. Der pH-Wert und die Löslichkeit verschiedener Stoffe im Wasser werden dementsprechend auch von der Zusammensetzung der Luft beeinflusst, d. h., von der Bewetterung der Höhle. Neben dem fließenden Grundwasser ist das aus der Filterzone in die vadose Zone einströmende Tropf- und Sickerwasser an dem Transport von Sauerstoff und Kohlendioxid beteiligt. Die Vegetationsbedeckung über der Höhle, der Gehalt an organischem Material und die Heterotrophenaktivität des Bodens beeinflussen die Konzentrationen des gelösten Sauerstoffs und Kohlendioxids (FRANKE 1963; TRIMMEL 1966, MIOTKE 1974; BÖGLI 1976). Da Tropf- und Sickergewässer bei ihrer Abwärtsbewegung bis zum Eintritt in die vadose Zone und beim Kontakt mit der Höhlenatmosphäre meist eine Erwärmung erfahren (siehe hierzu Kap. III. 3.1. und 3.2.), geben sie nach Überschreiten des Sättigungszustandes in verstärktem Maße CO₂ und O₂ an die Höhlenatmosphäre ab. Vom Grundwasser gespeiste

Höhlenbäche, die häufig CO₂-reich und O₂-arm sind, können bei entsprechender Fließgeschwindigkeit und den dadurch bedingten erhöhten Austauschraten rasch gelöstes CO₂ an die Atmosphäre abgeben und Sauerstoff aufnehmen.

Die Wechselwirkungen zwischen Höhlenluft und Höhlengewässern sind vor allem als Folge der Kinetik des Wettergeschehens in der Höhlenatmosphäre komplex. Es ist daher erforderlich, auch die Abhängigkeit des Höhlenklimas von der Höhlentopologie (räumliche Ausdehnung und Lage des Höhlensystems innerhalb des Gebirgsmassivs, unter Berücksichtigung der Vertikal- und Horizontalausdehnung des Kluftsystems und der Lage von Tagöffnungen) und von geologischen Faktoren (z. B. Begrenzung des wetterwirksamen vertikalen Kluftsystems durch nichtverkarstungsfähige Gesteinsschichten) zu analysieren. -Eine Bewetterung über Tagöffnungen (z. B. über den Höhleneingang) wird als „externer“, hiervon unabhängige Luftaustausche innerhalb der Höhle werden als „interner Wetterwechsel“ bezeichnet (nach KYRLE 1923). Entsprechend der Kinetik externer Wetterwechsel können Höhlen in zwei Gruppen eingeteilt werden. Zur ersten Gruppe gehören Höhlen, die zu jeder Jahreszeit einen intensiven Austausch der Höhlenatmosphäre mit der Außenatmosphäre aufweisen. Sie besitzen mehrere wetterwirksame Tagöffnungen und werden als dynamisch bewetterte Höhlen bezeichnet. Die zweite Gruppe läßt über einen längeren Zeitraum im Jahr eine Reduktion des Wetterwechsels erkennen; es treten bei dieser Gruppe also jahresperiodische Phasen eines erhöhten und eines reduzierten Wetterwechsels auf. Diese Höhlen besitzen meist nur eine Tagöffnung und werden als statisch bewettert bezeichnet (KYRLE 1923). Statisch bewetterte Höhlen sind in der Regel von der Außenluft stärker isoliert als dynamisch bewetterte Höhlen, die stets einen erhöhten Luftaustausch zwischen Höhlenatmosphäre und Außenluft aufweisen.

3.1. Ergebnisse höhlenklimatischer Untersuchungen

Als Musterbeispiel einer statisch bewetterten Höhle kann die Erlenhöhle bei Schwelm angesehen werden. Die Höhle liegt im Mitteldevonischen Massenkalk unter einem Buchenwald. Die Schichtung des Kalks ist im Bereich der Höhle sehr dünnbankig und an mehreren Stellen eingebrochen (Dolinenbildung). Besonders im Eingangsbereich und im westlichen Teil der Zentralhalle (Abb. 11) ist die Höhle an den Verlauf einer Schichtfuge angelegt (GRIEPENBURG 1934); das Gangsystem ist dort sehr niedrig und erreicht erst im Osten der „Zentralhalle“ eine Höhe von knapp 2m. Die Höhlendecke steigt vom Eingang bis zum Abzweig des „Südgangs“ in der Zentralhalle bergwärts an (von Meßpunkt [Mp] 0.1 bis 3; Abb. 11), so daß während der warmen Jahreszeit über diesen Weg der Einstrom warmer Luftmassen entlang der Höhlendecke zu erwarten ist. Im Kontrast zu der flachen Zentralhalle steht der teils sehr schmale, aber bis über 3m hohe Südgang (von Mp 3 bis Mp 4), der in einer stark zerbrochenen Halle (Mp 5) einmündet. Eine nach Süden gehende Fortsetzung führt in starken Verbruch (Mp 6). Oberhalb dieses Höhlenteils sind im Wald mehrere kleine Dolinen sichtbar, die im Frühjahr der Höhle größere Schmelzwassermengen zuführen. Die Gesteinsbedeckung der Höhle ist insgesamt nur wenige Meter mächtig (schätzungsweise ca. 5 – 10m). Zahlreiche Tropfwaterstellen, sowohl im Eingangsbereich (Mp 0.1 bis Mp 2) als auch im östlichen Teil der Zentralhalle (Mp 3) und im Südgang (Mp 4 und 5), weisen auf ein gut ausgebildetes vertikales Kluftsystem im Deckgestein hin. Die Höhlensohle wird von z. T. mächtigen Lehmschichten bedeckt, auf denen, wie auch in mehreren Sinterbecken des Südgangs, kleinere vom Tropfwater gespeiste Höhlenseen ruhen. Die Höhle befindet sich unter einer Fläche von nur ca. 30x50m. Es ist anzunehmen, daß das oberirdische Wettergeschehen weitgehend synchron auf diese Fläche einwirkt. Durch den niedrigen, mit nur einer Tagöffnung versehenen Eingangsbereich sind wesentliche Voraussetzungen für eine statische Bewetterung mit lokal begrenztem externen Wetterwechsel gegeben.

Daß die Höhle in der Tat statisch bewettert ist, zeigen die Schwankungen von Temperatur, Luftfeuchte und CO₂-Gehalt der Höhlenatmosphäre deutlich (Abb. 12 u. 13).

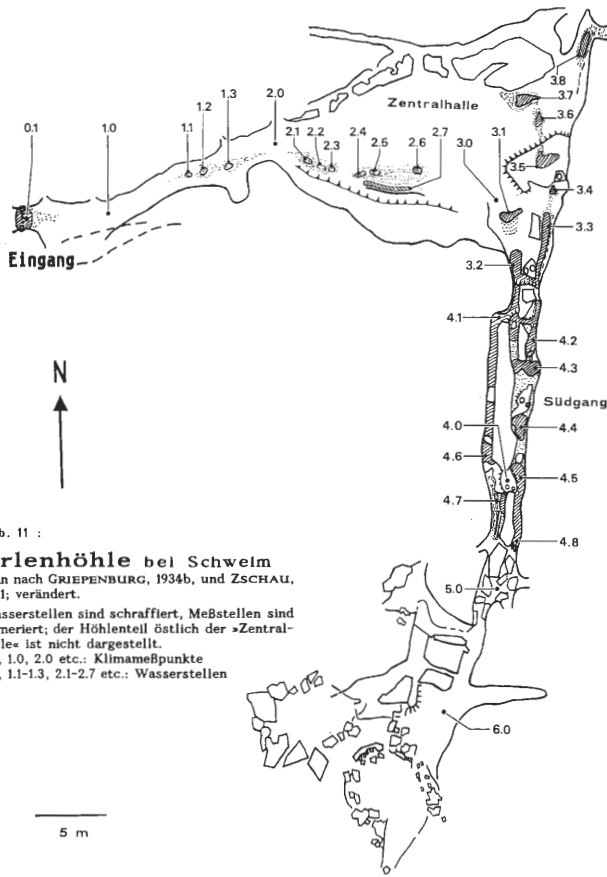


Abb. 11 :
Erlenhöhle bei Schweim
 Plan nach GRIEPENBURG, 1934b, und ZSCHAU, 1981; verändert.
 Wasserstellen sind schraffiert, Meßstellen sind numeriert; der Höhlenteil östlich der »Zentralhalle« ist nicht dargestellt.
 0.1, 1.0, 2.0 etc.: Klimameßpunkte
 0.1, 1.1-1.3, 2.1-2.7 etc.: Wasserstellen

Aufgrund externer Wetterwechsel sinkt die Temperatur im Eingangsbereich im Verlauf des Winters stark ab und erreicht im Sommer relativ hohe Werte; bis zur Zentralhalle sind die jahresperiodischen Temperaturschwankungen bereits stark gedämpft (Abb. 12A). Aber noch im Südgang sind deutliche, jahresperiodische Temperaturschwankungen (synchron und von etwa gleicher Amplitude) feststellbar, die durch das nach der Schneeschmelze eintretende, kalte Sickerwasser und durch die interne Bewetterung über das Deckgestein verursacht werden. Externe Wetterwechsel wirken sich hier auf die Temperatur nur schwach aus. Typisch für den Südgang ist die innerhalb von nur 2 Monaten erfolgende rasche Abkühlung (Minimum von März bis Mai). Innerhalb der Stagnationsphase (ab Mai bis Spätherbst, wenn die Temperatur der Außenluft oberhalb der mittleren Höhlentemperatur von ca. 7°C liegt) erwärmt sich die Höhlenatmosphäre nur langsam (Maximum zwischen September und Dezember). Im Eingangsbereich der Höhle (Mp 1 u. 2) liegt die Jahresdurchschnittstemperatur der Höhlenluft mit 6.25 – 6.30°C besonders niedrig (Abb. 12A), sie nimmt zum Höhleninneren hin bis auf 7.25°C zu. Während im Eingangsbereich (Mp 1) die Temperaturen im Sommer bis 9.9°C ansteigen können und im Winter zuweilen der Boden gefriert, bewegen sich die Temperaturen in den tieferen Höhlenteilen (Bereich des Südgangs) im Jahrgang nur

zwischen 5.8°C und 8.8°C. Das ausgeprägte vertikale Kluftsystern im Deckgestein und die oberflächennahe Lage der Höhle sind für die relativ niedrigen mittleren Lufttemperaturen verantwortlich. Die winterliche Abkühlung wirkt sich stärker als die sommerliche Erwärmung aus.

Phasengleich zur Temperatur verändert sich die absolute Luftfeuchte. Ihre Amplitude wird ebenfalls vom Eingang bis zur Zentralhalle (Mp 3) zunehmend gedämpft. Im Südgang verlaufen die Veränderungen synchron mit etwa gleich großer Amplitude. Der Verlauf der Schwankungen ist hier wie bei der Temperatur „sägezahnförmig“ (Abb. 12B). Der Vergleich zwischen Außenluft und Höhlenatmosphäre zeigt, daß für die absolute Feuchte das Dekrement kleiner ist als für die Temperatur.

Das Dekrement der relativen Feuchte ist hingegen größer als jenes für Temperatur und absolute Feuchte. Bereits im Eingangsbereich (zwischen Mp 1 bis 2) ist eine deutliche Abnahme der Amplitude feststellbar; im Bereich des Südgangs weist die relative Feuchte nur kleinere Einbrüche auf (z. B. März-April 1986) und liegt meist oberhalb von 98% (Abb. 13A). Auch die über das Kluftsystern des Deckgesteins eintretende Luft ist nahezu wasserdampfgesättigt.

Ein völlig anderes Bild als die bisher besprochenen klimatischen Parameter weist der CO₂-Gehalt der Höhlenatmosphäre auf. Dieser in der Außenluft weitgehend konstante Parameter (ca. 0.03 Vol.-% CO₂) besitzt in der Erlenhöhle relativ große jahresperiodische Schwankungen, die mit zunehmendem Abstand zum Eingang zunehmen (Abb. 13B). Der Verlauf der Konzentrationskurven weist eine Abhängigkeit von der Außentemperatur auf (vgl. den CO₂-Anstieg vom Mai 1986 und den Einbruch vom September-Oktober 1986 in Abb. 13B mit dem Temperaturgang der Außenluft in Abb. 12A) und ist offensichtlich von externen Wetterwechseln abhängig. Die Maxima der CO₂-Konzentration liegen in den Sommer- und Herbstmonaten (von Mai bis Oktober-November), die Minima hingegen im Winter und Frühjahr (von November-Dezember bis April). Die Konzentrationsänderungen verlaufen steilflankig; die Maxima sind scharf und besitzen Ähnlichkeiten mit denen des Bodens (siehe MIOTKE 1974). Die mittlere CO₂-Konzentration steigt zum Höhleninneren hin an (bis 0.145 Vol.-% an Mp 5, mit einem Maximum von 0.40 Vol.-% im Sommer); im Winter gehen die Werte an allen Meßstellen zeitweise auf 0.03 Vol.-% zurück.

Der Gang der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre macht deutlich, daß das Höhlenklima der Erlenhöhle, besonders in den tieferen Höhlenteilen, über die oberflächennahe Filterzone beeinflusst wird. Dies wird auch durch die an allen Meßstellen im Südgangsbereich gleichgroße Jahresamplitude von Temperatur und absoluter Luftfeuchte bestätigt. -Das Beispiel der Erlenhöhle verdeutlicht, daß statisch bewetterte Höhlen nicht ein konstantes Klima besitzen müssen, sondern daß für sie jahreszyklische Veränderungen der Temperatur, Luftfeuchte und besonders des CO₂-Gehaltes kennzeichnend sind. Die Stagnationsphase der Bewetterung ist durch hohe CO₂-Konzentrationen der Atmosphäre charakterisiert.

Die oberflächennahe, ca. 118m lange Schönebecker Höhle liegt in den Honseler Schichten (mit ca. 25m ist die Gesteinsbedeckung etwas mächtiger als bei der Erlenhöhle). Auch diese Höhle liegt unter einem Laubwald. Der Eingangsbereich ist geräumiger. Für die Luftzirkulation existieren keine Barrieren. Der Hauptgang ist bergwärts leicht einfallend und erweitert sich auf den ersten 5m beträchtlich. Ab hier (Mp 1) steigt der Hauptgang leicht an, bis eine an eine größere Querkluft angelegte Raumerweiterung (Mp 3) erreicht wird, wo ein Sickerwasser-führender Nebengang kreuzt; der Hauptgang führt bis zu einer weiteren Wasserstelle (periodischer Höhlensee: Mp 9) abwärts. Der Gang mündet dann nach kurzem Anstieg in eine geräumige Halle (Mp 10), deren Fortsetzung aufwärtssteigend im Verbruch (Schiefer) endet (siehe Abb. 14). -

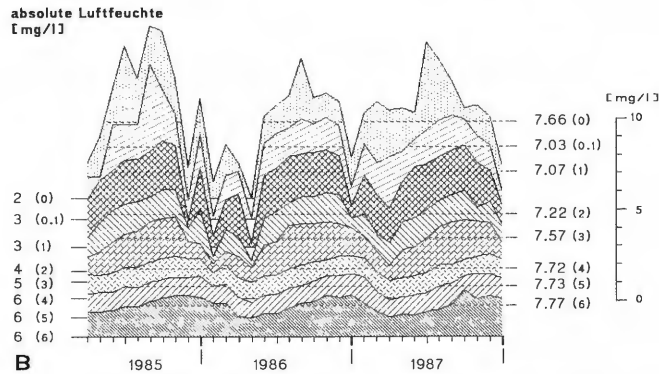
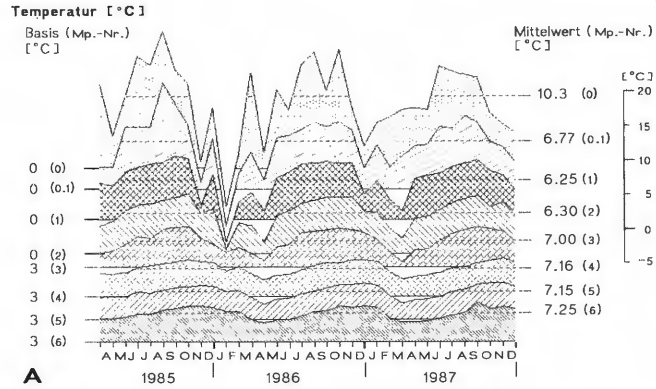


Abb. 12 : Temperatur (A) und absolute Feuchte (B) der Atmosphäre in der Erlenhöhle. Werte von 7 Meßstellen aus der Höhle (Mp. 0.1 - 6) und einer Außenmeßstelle (Mp. 0) 10 m vom Eingang der Höhle. Die Darstellung der Werte beginnt nicht immer bei Null, sondern bei dem jeweils links vom Diagramm angegebenen Basiswert. Die Meßpunktnummer ist jeweils in Klammern gesetzt. Die Mittelwerte sind jeweils rechts vom Diagramm angegeben. Die Diagramme sind mit zunehmendem Abstand vom Höhleneingang (dE) untereinander dargestellt.

Mp 0 : 10m dE	Mp 2 : 18m dE	Mp 5 : 55m dE
Mp 0.1 : 0m dE	Mp 3 : 35m dE	Mp 6 : 60m dE
Mp 1 : 5m dE	Mp 4 : 45m dE	

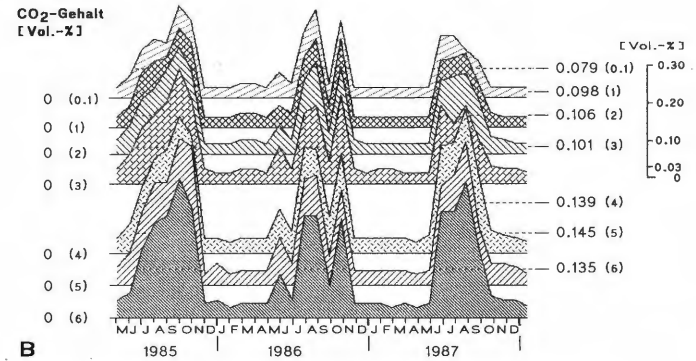
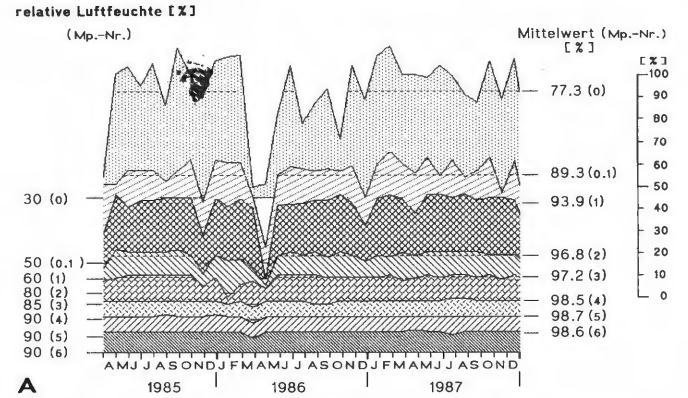


Abb. 13 : Relative Feuchte (A) und CO₂-Gehalt (B) der Atmosphäre in der Erlenhöhle. Werte von 7 Meßstellen aus der Höhle (Mp. 0.1 - 6) und einer Außenmeßstelle (Mp. 0). Die CO₂-Konzentrationen der Außenluft sind nicht dargestellt, die Meßwerte am Mp. 0 lagen stets bei 0.03 Vol.-X.

Aufgrund dieser Topologie sind für die Schönebecker Höhle wesentliche Bedingungen erfüllt, die eine statische Bewetterung bewirken. Da die Schichtung des Schiefers vorwiegend in vertikaler Richtung verläuft, ist die Durchlässigkeit des Deckgesteins nicht eingeschränkt.

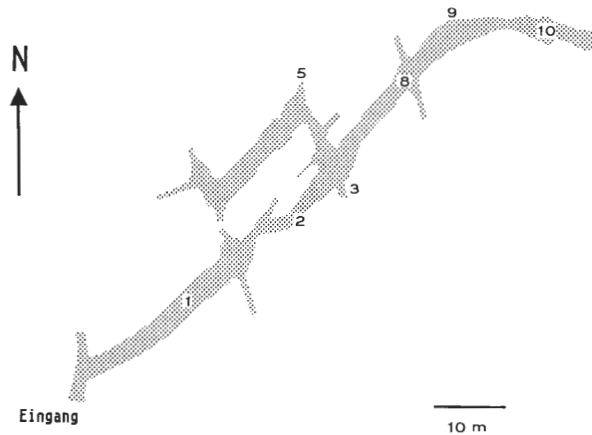


Abb. 14 :

Schönebecker Höhle
bei Lüdenscheld

Plan nach JUNNEMANN & FISCHER, 1939; verändert.

Das Gangsystem ist schraffiert dargestellt; Meßstellen sind numeriert.

Die Lufttemperatur weist im Mittel etwas niedrigere Werte als in der Erlenhöhle auf (Abb. 15A). Die jahresperiodischen Schwankungen sind bereits im Eingangsbe- reich gedämpft. Wenige Meter hinter dem Eingang (an Mp 1) liegt das Temperaturmaximum bei nur 7.1°C; ein Durchfrieren des Bodens im Winter konnte hier jedoch nicht festgestellt werden (Minimum bei 1.5°C). Die mittlere Temperatur steigt vom Eingang bis zum Ende des Hauptgangs an. Ein „sägezahnförmiger“ Verlauf des Temperaturgangs ist nicht erkennbar. Im Dezember 1986 trat ein steilflankiger Temperatureinbruch auf; ab März 1987 erfolgte ein zunächst ebenso steiler Temperaturanstieg, der im April abflachte und ab Juni ein Plateau erreichte. Diese Temperaturschwankungen weisen auf eine über den Eingang erfolgende („externe“) Bewetterung hin.

Die Dämpfung der Schwankungen der absoluten Luftfeuchte (Abb. 15B) ist im Vergleich zu denen der Temperatur etwas geringer. Die Atmosphäre weist im Mittel einen etwas geringeren absoluten Wassergehalt als in der Erlenhöhle auf.

Für die relative Feuchte (Abb. 16A) konnten größere Einbrüche an allen Meßpunkten während des Winters 1986/87 festgestellt werden. Sie traten weitgehend synchron auf und wiesen innerhalb des Hauptgangs (zwischen Mp 1 und Mp 9) kein Dekrement auf. Dieser Befund weist ebenfalls auf externe Wetterwechsel innerhalb des Hauptgangs hin.

Der CO₂-Gehalt (Abb. 16B) der Höhlenluft zeigt ähnliche Veränderungen wie in der Erlenhöhle. Allerdings sind die mittleren Konzentrationen mit 0.07 Vol.-% deutlich niedriger. Entsprechend flacher ist auch die jahreszeitliche Amplitude. Das Maximum der Konzentration lag im Untersuchungszeitraum bei 0.13 Vol.-%.

Die in den Honselers Schichten gelegene statisch bewetterte Klutertöhle (Ennepetal) besitzt über weite Bereiche eine das vertikale Kluftsystem überdeckende Tonschiefer-

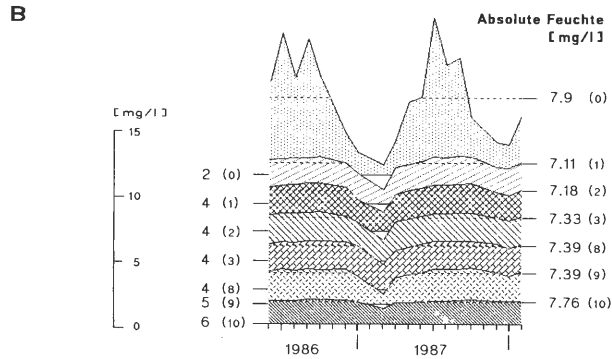
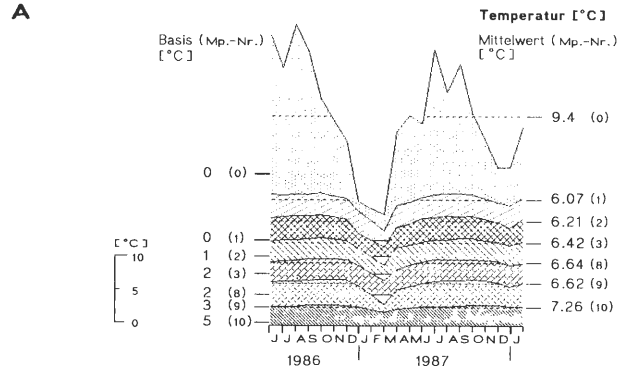


Abb. 15: Temperatur (A) und absolute Feuchte (B) der Atmosphäre aus der Schönebecker Höhle. Es sind die Werte von 6 Meßstellen aus der Höhle (Mp 1-3 und Mp 8-10) dargestellt sowie Werte der Außenmeßstelle (Mp 0).

Mp 0 : 10m dE	Mp 3 : 35m dE	Mp 9 : 55m dE
Mp 1 : 17m dE	Mp 8 : 50m dE	Mp 10 : 70m dE
Mp 2 : 25m dE		

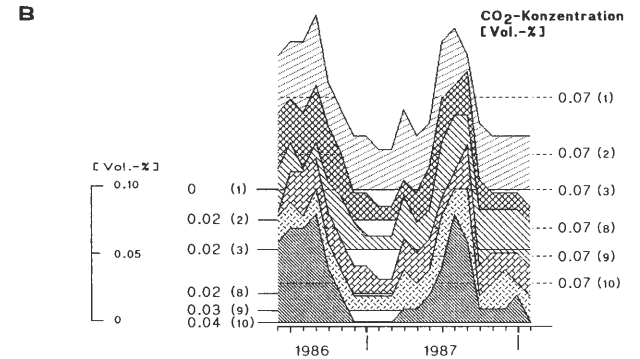
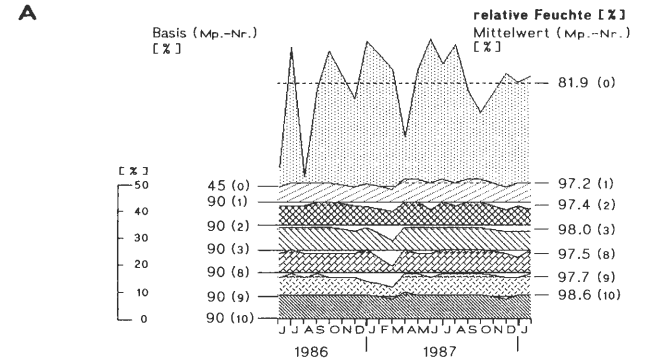


Abb. 16: Relative Feuchte (A) und CO₂-Gehalt (B) der Atmosphäre in der Schönebecker Höhle. Aus der Höhle sind die Werte von 6 Meßstellen (Mp. 1-3 und Mp. 8-10) dargestellt. Die CO₂-Werte der Außenluft lagen bei 0.03 Vol.-% und sind hier nicht dargestellt.

schicht. Die Gesteinsbedeckung ist im Bereich der mittleren und nördlichen Höhlenteile bedeutend mächtiger als bei der Schönebecker Höhle. Lediglich die südlich gelegenen Höhlenteile („Wolfsschlucht“ und das tagnahe Kluftsystm in den Bereichen „Jungfernhalle“ und „Regenbachquelle“; Abb. 17) weisen eine geringere Gesteinsbedeckung mit nach oben unbegrenzten vertikalen Klüften, zahlreiche Tropfwasserstellen und durch Sickerwasser stark erweiterte Spalten, sogenannte „Tropfkamine“, auf. Im Bereich der „Wolfsschlucht“ beträgt die Mächtigkeit des Deckgesteins nur wenige Meter. Wie die Schönebecker Höhle stellt auch die Kluterthöhle ein bergwärts einfallendes Kluftsystm dar, das durch seine Dichte und Vernetzung den Eindruck eines Labyrinths vermittelt (insgesamt 5.7 km Gangstrecke). Es existieren 2 Tagöffnungen, von denen nur eine heute als Eingang dient und wetterwirksam ist; die andere ist mit Mauerwerk verschlossen und wetterunwirksam.

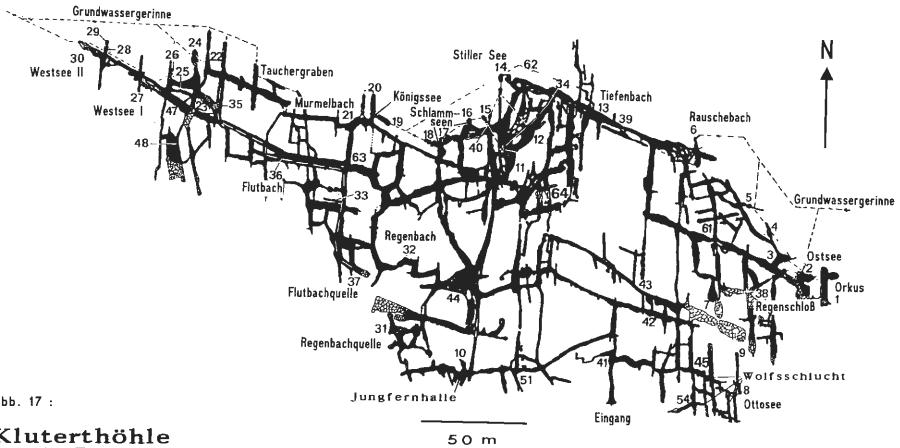


Abb. 17 :

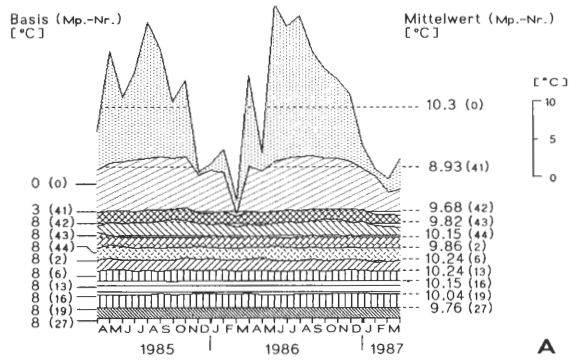
Kluterthöhle
in Ennepetal

Plan nach GRIEPENBURG, 1935; verändert.
Meßstellen sind numeriert. Es sind nur solche
Meßstellen aufgeführt, an denen regelmäßig gemessen wurde.

Die Schwankungen der Lufttemperatur nehmen mit zunehmendem Abstand vom künstlich erweiterten Eingang etwas langsamer ab als bei den zuvor besprochenen Höhlen. So kann im Winter ein Durchfrieren des Bodens noch 35m vom Eingang (Mp 41) beobachtet werden. Winterliche Temperatureinbrüche ließen sich noch 70m vom Eingang (Mp 43) nachweisen und sind auf externe Wetterwechsel zurückzuführen (Abb. 18A). An den tiefer gelegenen Meßstellen (Mp 2 – 27) ließen sich keine eingangsbedingten Temperaturschwankungen mehr feststellen. Wie in den bereits besprochenen Höhlen nimmt die mittlere Lufttemperatur zu den tieferen Höhlenteilen hin zu. Im Mittel liegen die Temperaturen deutlich höher als in der Erlenhöhle und Schönebecker Höhle (siehe auch Abb. 18A). Die deutlich verminderten Temperaturen am „Ostsee“ (Mp 2) und „Westsee I“ (Mp 27) werden hier durch interne Wetterwechsel verursacht, wie Luftströmungsmessungen zeigten. Jedoch bedingt dies keine jahreszeitlichen Temperaturschwankungen; am Westsee I blieben die Temperaturschwankungen unter 0.1°C.

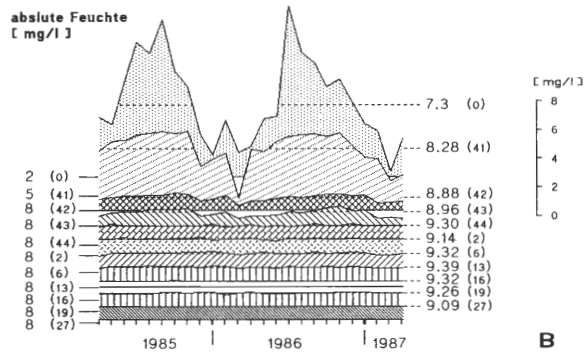
Auf externe Wetterwechsel zurückzuführende Schwankungen der absoluten Luftfeuchte ließen sich in den tieferen Höhlenteilen nicht nachweisen (Abb. 18B). Im Eingangsbereich traten jedoch jahresperiodische Schwankungen dieses Parameters auf, mit gegenüber der Temperatur verringertem Dekrement (zwischen Mp 41 und Mp 42); an Mp 43 konnte sogar eine Amplitudenzunahme festgestellt werden, die auf eine weitere mögliche wetterwirksame Tagverbindung hinweist.

Temperatur [°C]



A

absolute Feuchte [mg/l]

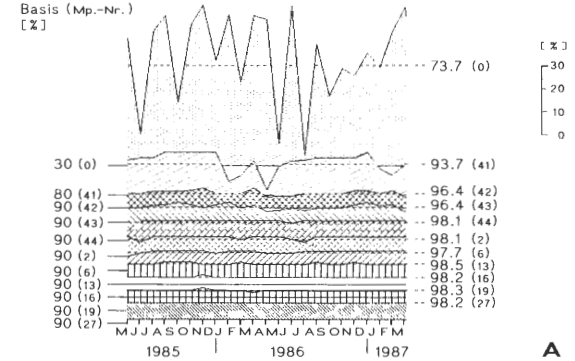


B

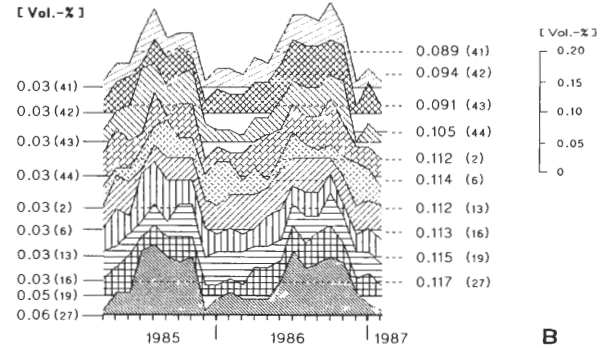
Abb. 18: Temperatur (A) und absolute Feuchte (B) der Atmosphäre in der Kluterthöhle (Ennepetal); Werte an 10 Meßstellen in der Höhle (Mp 41-44; Mp 2, 6, 13, 16, 19 und 27) und einer Außenmeßstelle (Mp 0).

Mp 0 : 10m dE	Mp 2 : 200m dE	Mp 16 : 250m dE
Mp 41 : 35m dE	Mp 6 : 180m dE	Mp 19 : 280m dE
Mp 42 : 50m dE	Mp 8 : 95m dE	Mp 27 : 350m dE
Mp 43 : 70m dE	Mp 13 : 230m dE	
Mp 44 : 140m dE		

relative Feuchte [%]



A

CO₂-Konzentration [Vol.-%]

B

Abb. 19: Relative Feuchte (A) und CO₂-Konzentration (B) der Atmosphäre in der Kluterthöhle, (Ennepetal); Werte von 10 Meßstellen aus der Höhle (Mp 41-44; Mp 2, 6, 13, 16, 19 und 27). Der CO₂-Gehalt der Luft an der Außenmeßstelle lag bei 0.03 Vol.-% und ist hier nicht dargestellt.

Die Schwankungen der relativen Feuchte (Abb. 19A) weisen von den untersuchten klimatischen Parametern auch hier das höchste Dekrement auf. Externe Wetterwechsel verursachen in Eingangsnähe kleinere phasengleiche Einbrüche der relativen Feuchte während der Wintermonate zwischen Mp 41 und Mp 43; dort liegt die relative Feuchte im Mittel deutlich unterhalb der Sättigung (zwischen 93.7 und 96.4%), während sie sich an den bergwärts gelegenen Meßstellen dem Sättigungspunkt nähert (98.1 – 98.5%). Kleinere aperiodische Schwankungen in den tieferen Höhlenteilen (an Mp 44, Mp 2 und Mp 6 und an Mp 16 und Mp 19) sind mit großer Wahrscheinlichkeit anthropogen.

Der CO₂-Gehalt der Höhlenatmosphäre (Abb. 19B) weist erwartungsgemäß jahresperiodische Schwankungen auf. Im Sommer sind die Konzentrationen über etwa 5 Monate hoch, im Winter über einen entsprechenden Zeitraum niedriger (an den meisten Meßstellen jedoch deutlich oberhalb von 0.03 Vol.-%). Zunahme und Abnahme des CO₂-Gehaltes verlaufen steil und innerhalb eines kurzen Zeitraums (1-2 Monate). Die für die Kluterthöhle typische Plateaubildung im Sommer und Winter konnte auch in weiteren statisch bewetterten Höhlen mit großer Gesteinsbedeckung festgestellt werden (z. B. im Halver Hüllloch). Die mittleren Konzentrationen liegen in der Eingangsregion niedriger als in den tieferen Höhlenteilen; sie steigen von 0.089 Vol.-% an Mp 41 bis auf 0.094 Vol.-% an Mp 42 an; nach einem leichten Einbruch an Mp 43 (0.091 Vol.-%) erhöhen sie sich in den tieferen Höhlenteilen sogar auf 0.117 Vol.-% (Mp 27; vgl. auch Abb. 19B). -Messungen der CO₂-Konzentrationen in 2-stündigen Abständen während externer Wetterwechsel konnten die Abhängigkeit des CO₂-Gehaltes von der Bewetterungsintensität belegen (Abb. 20). Am 04. und 05. 10. 86 lag tagsüber die Außentemperatur oberhalb der mittleren Höhlentemperatur, des Nachts deutlich darunter. Die Schwankungen der Außentemperatur bewirkten ein „Abschalten“ der externen Wetterwechsel des Nachts und ein „Abschalten“ am Tage. Neben leichten Einbrüchen der Luftfeuchte an den Meßstellen 41 und 42 konnte am Meßpunkt 41 eine erhebliche CO₂-Abnahme ab 20 Uhr festgestellt werden. CO₂-Einbrüche ließen sich bis zum Mp 2 nachweisen; die Schwankungen wiesen jedoch ein hohes Dekrement auf. Die Wiederholung der Messungen am 07. und 08. 03. 1987 (Abb. 21) spiegeln eine andere Situation wieder. Tagsüber und des Nachts lag jetzt die Außentemperatur weit unterhalb der mittleren Höhlentemperatur. Daher waren ständige externe Wetterwechsel zu vermuten. Eine kräftige Temperaturabnahme der Außenluft in der Nacht (vom 07. auf den 08. 03. 1987 sank die Außentemperatur auf -6.1°C) bewirkte eine Intensitätssteigerung der externen Wetterwechsel. Der sich in der Nacht verstärkende Luftaustausch wirkte sich durch eine Absenkung der Luftfeuchte bis zu den Mp 41, 42 und 45 und des CO₂-Gehaltes bis zum Mp 2 aus (vgl. Abb. 21).

Messungen der Luftströmung ergaben am 21. 03. 1987 am Höhleneingang 10 cm oberhalb der Sohle 21 cm/s. Die Luft wurde am Höhleneingang mit Rauchröhrchen markiert; die Front wurde nach 35 Minuten an Mp 13 (ca. 230 m vom Eingang) festgestellt. Dies entspricht einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 11 cm/s. Die Rauchfront bewegte sich zunächst dem bergwärts einfallenden Höhlensystem folgend nach Norden (Abb. 22); in den von Osten nach Westen nur schwach absinkenden Hauptklüften bewegte sie sich nur langsam voran. Mp 2 (ca. 200m vom Eingang) wurde erst nach 1.5 Stunden erreicht; dies entspricht 3.7 cm/s. An Mp 44 (140m vom Eingang), der über 2 Wege von Mp 13 und Mp 42 bewettert wird, konnte die Front nach 40 Minuten festgestellt werden, was einer Geschwindigkeit von 5.8 cm/s entspricht. Die Werte liegen demnach in der Größenordnung, wie sie auch für die Schönebecker Höhle bei externer Bewetterung festzustellen sind. – Der westliche Teil der Kluterthöhle (westlich von Mp 44) wurde von der Front nicht erreicht. Rauchmarkierungen in der tagnahen, südlichen Zone (am Mp 37) ergaben, daß der westliche Höhlenteil aus der

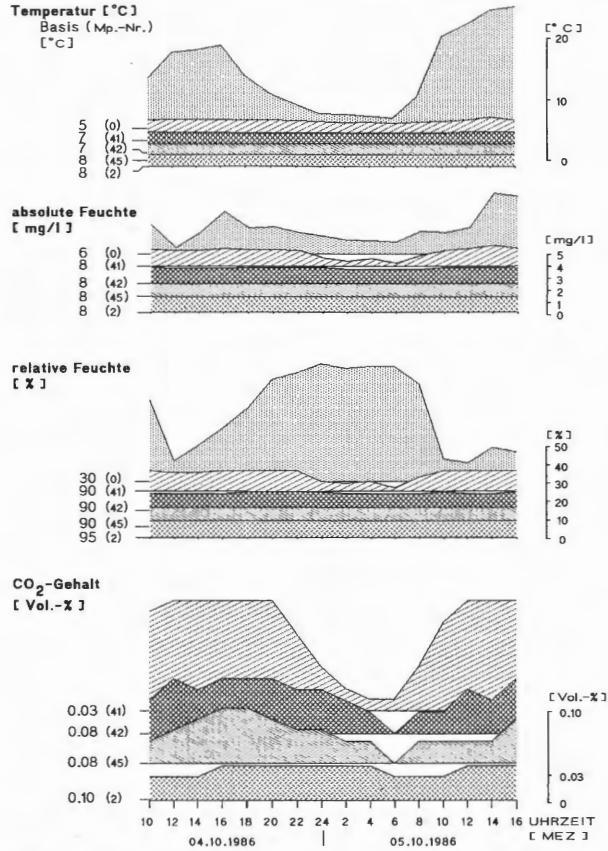


Abb. 20: Tagesperiodische Schwankungen der Lufttemperatur, der absoluten und relativen Feuchte und des CO_2 -Gehaltes der Luft in der Kluterthöhle (Ennepetal) vom 04. bis zum 05.10.1986 an 4 Meßstellen (Mp 41, 42, 45 und 2) und einer Außenmeßstelle (Mp 0). Der CO_2 -Gehalt der Außenluft lag bei 0.03 Vol.-% und ist hier nicht dargestellt.

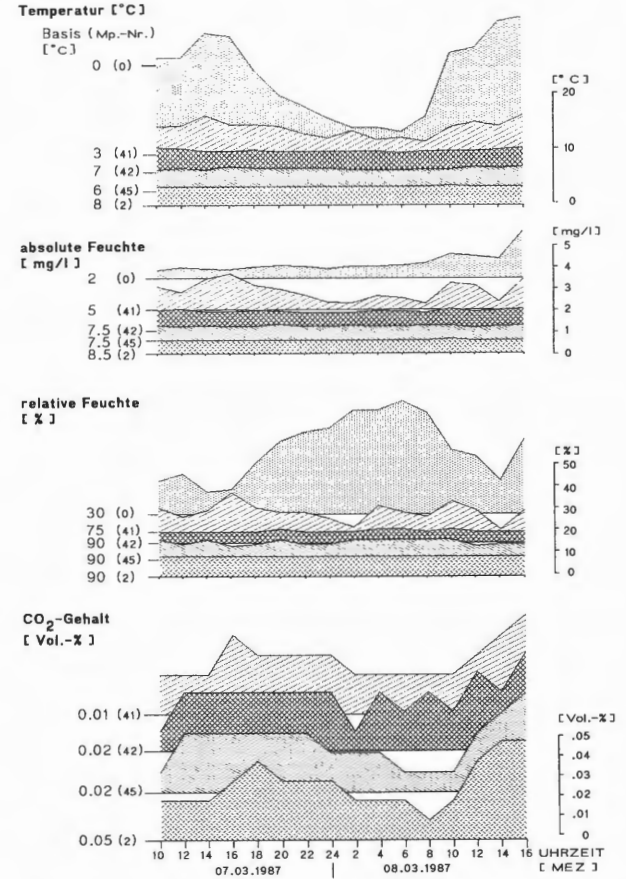


Abb. 21: Tagesperiodische Schwankungen der Lufttemperatur, der absoluten und relativen Feuchte und des CO_2 -Gehaltes der Luft in der Kluterthöhle (Ennepetal) vom 07. bis zum 08.03.1987 an 4 Meßstellen (Mp 41, 42, 45 und 2) und einer Außenmeßstelle (Mp 0). Der CO_2 -Gehalt der Außenluft lag bei 0.03 Vol.-% und ist hier nicht dargestellt.

südlichen Höhlenzone über das Deckgestein bewettert wird (Abb. 22). Die oberflächen-nahen, relativ kalten Luftmassen bewegen sich von dort abwärts nach Norden; ein Teil fließt nach Erreichen der „Korallenstraße“ (Mp 63) nach Westen, während ein anderer dem „Regenbachgang“ (Mp 32) folgend in Richtung Mp 19 und Mp 17 abfließt und damit den Zutritt der von Mp 44 und Mp 62 kommenden externen Wetter blockiert. – In der Kluterthöhle lassen sich also eine Zone mit externen Wetterwechseln (der eingangsnaher Bereich; Mp 41-44 bis Mp 6, 13 u. 62) von einer Zone mit internen Wetterwechseln (der tagnahe, südliche Bereich außerhalb der geschlossenen Schieferabdeckung mit Mp 38, 8, 10 u. 37 und der westliche tiefer liegende Höhlenteil ab Mp 16 und 19 bis zu Mp 27 und Mp 30) unterscheiden.

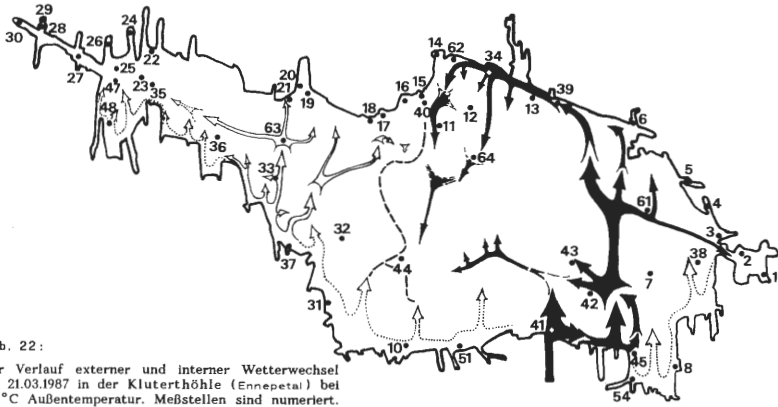


Abb. 22:
 Der Verlauf externer und interner Wetterwechsel am 21.03.1987 in der Kluterthöhle (Ennepetal) bei 3,6°C Außentemperatur. Meßstellen sind nummeriert.
 Abgebildet sind nur der Umriss des Höhlensystems, die Grenze zwischen extern und intern bewetterter Zone: ---, Richtung der Luftströmungen: → externe; ⇨ interne Wetterwechsel; ⇨ vermutete interne Wetterwechsel entlang des von Süd nach Nord verlaufenden Temperaturgradienten.

Das ebenfalls in den Honseler Schichten gelegene Halver Hülloch besitzt hinsichtlich des Klimas Ähnlichkeiten mit der Kluterthöhle. Es existiert ebenfalls nur eine Tagöffnung, die heute jedoch mit einer massiven Eisentür verschlossen ist. Das Halver Hülloch ist ca. 500m lang (GRIEPENBURG 1939a); das Deckgestein ist ca. 15 – 20m dick. Der Eingangsbereich (siehe Abb. 23) ist bergwärts einfallend. Durch den Eingang (Mp 1) rinnt Regenwasser in das Höhlensystem ein, das durch Tropfwasser vermehrt wird und innerhalb einer Querkluft (Mp 2) kleine Tümpel speist. Mehrere Sinterbecken, die am westlichen Ende des Hauptgangs (Mp 4) sowie östlich von Mp 3 in einer nach Nordost verlaufenden Querkluft liegen (bei Mp 11), werden ebenfalls von Tropfwasser gespeist. Das Deckgestein weist im Hauptgangsbereich stellenweise eine starke Klüftigkeit auf. In Höhe von Mp 5 führt eine Querkluft in südlicher Richtung abwärts und trifft auf eine zum Hauptgang parallel verlaufende Kluft, die an Mp 10 ein Grundwassergerinne erreicht. Im Gegensatz zu dem 4 – 5m hohen und mehrere Meter breiten Hauptgang sind die in Höhe des Grundwasserhorizontes verlaufenden Klüfte sehr schmal und niedrig.

Die Kinetik der klimatischen Parameter verhält sich weitgehend so wie in der Kluterthöhle; die mittleren Temperaturen liegen jedoch mit Werten zwischen 6,8 und 8,9°C deutlich niedriger (Abb. 24A). Dies ist eine Folge davon, daß hier das Deckgestein durchlässiger ist. Externe Wetterwechsel konnten bis 65m hinter dem Eingang (Mp 5) an Einbrüchen der Temperatur, der absoluten und relativen Luftfeuchte festgestellt werden; die Schwankungsbreite erfährt aber ein großes Dekrement (siehe auch Abb. 24B und Abb. 25A). Die Atmosphäre erreicht bereits im

Eingangsbereich eine sehr hohe Feuchte (Abb. 25A). Dies ist möglicherweise auf den Verschuß des Eingangs zurückzuführen, der die Wirksamkeit externer Wetterwechsel einschränkt. Die mittleren CO_2 -Konzentrationen liegen im Bereich des Hauptgangs ähnlich hoch (Abb. 25B) wie in der Klutertöhle; innerhalb der vadosen Zone im Bereich des Grundwasserhorizontes sind sie noch höher (vgl. Abb. 25B). Auch im Halver Hüllloch treten jahresperiodische CO_2 -Schwankungen in der Höhlenatmosphäre auf, die einen „sägezahnförmigen“ Verlauf (mit Plateau-Bildungen) aufweisen (Abb. 25B), mit einem Minimum im Winter und einem Maximum im Sommer. Aber auch während der Wintermonate sind die CO_2 -Konzentrationen der Höhlenatmosphäre gegenüber den Außenwerten noch erhöht; dies gilt besonders für die Bereiche des Grundwasserhorizontes. – Das Halver Hüllloch weist also eine statische Bewetterung auf, die im Bereich der Eingangsregion und im Hauptgang bis Meßstelle 5 durch externe Wetterwechsel bedingt ist. In den tiefer gelegenen Höhlenteilen nimmt ihr Einfluß deutlich ab. An Mp 9 und 10 erfolgt ein CO_2 -Zustrom über das Grundwassergerinne.

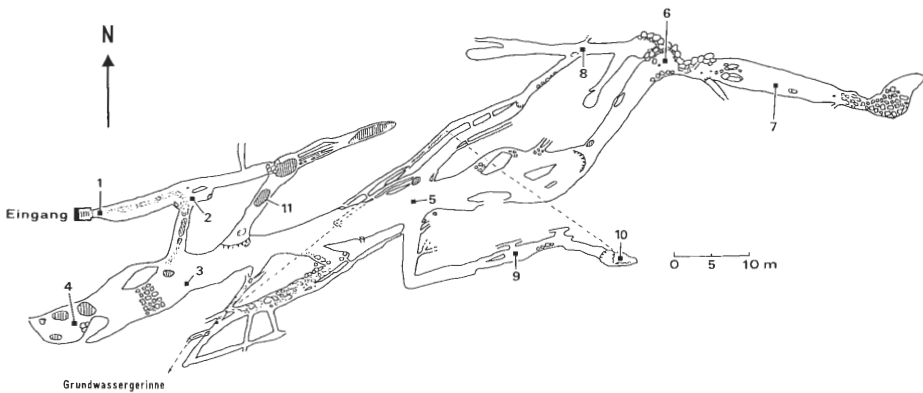


Abb. 23:

Halver Hüllloch

Plan nach GRIEPEBURG & KLIEBHAN, 1967, und SCHNEIDER, 1975/76; verändert.

Meßstellen, sind numeriert, stehende Gewässer sind schraffiert; Gerinne: - - -

Als Beispiel einer im Massenkalk gelegenen Großhöhle mit vorwiegend statischer Bewetterung und mächtiger Gesteinsbedeckung weist die Friedrichshöhle (Abb. 26) deutliche Unterschiede zu den in den Honseler Schichten gelegenen Höhlen auf (1117m Gesamtlänge; KOLARIK & HAMMERSCHMIDT 1987). Das System dieser Höhle ist nicht auf eine schmale verkarstungsfähige Schicht begrenzt, sondern weist mit über 30m Höhenunterschied und bis zu 20m hohen Gängen, Schächten und mehreren übereinander liegenden Galerien eine große Vertikalausdehnung auf, die mindestens bis zum Karstwasserniveau hinabreicht (Abb. 27). Der A- und B-Horizont des Bodens ist stellenweise nur lückenhaft ausgebildet. Es sind zahlreiche Stellen anstehenden Kalks vorhanden, in dem sich vertikale Klüfte der Höhle fortsetzen und die teils auch übertage stark erweitert sind. Die Klüfte im Deckgestein speisen zahlreiche Tropfwasserstellen in der vadosen Zone und sind offensichtlich wetterwirksam, ohne jedoch zu einer ausgeprägten dynamischen Bewetterung zu führen. Tropfsteinbildungen und versinterter Flußsedimente in den oberen Höhlenteilen verdeutlichen die „tagnahe“ Exposition dieser Klüfte. In den auf Karstwasserniveau gelegenen Höhlenteilen sind Versinterungen und Tropfsteine spärlich, hingegen dominieren Korrosionsformen, die auf hohe CO_2 -Konzentrationen in der Höhlenatmosphäre hinweisen. Tatsächlich treten hier zeitweise CO_2 -Konzentrationen der Luft von

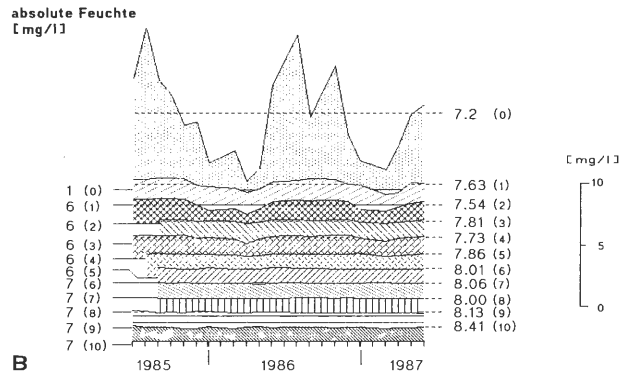
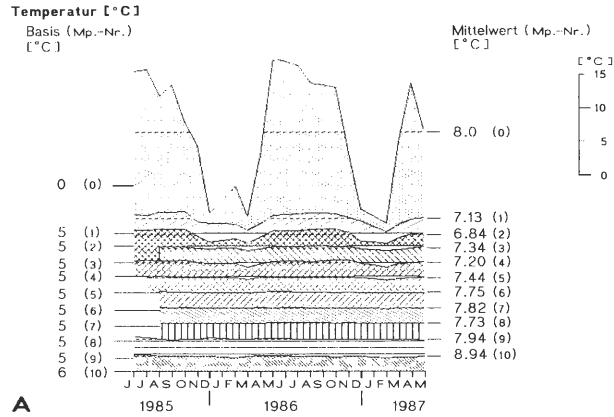


Abb. 24 : Temperatur (A) und absolute Feuchte (B) der Atmosphäre im Halver Hüllloch; Werte von 10 Meßstellen innerhalb der Höhle (Mp 1-10) und einer Außenmeßstelle (Mp 0).

Mp 0 : 5m dE	Mp 4 : 50m dE	Mp 8 : 92m dE
Mp 1 : 5m dE	Mp 5 : 65m dE	Mp 9 : 90m dE
Mp 2 : 20m dE	Mp 6 : 104m dE	Mp 10 : 110m dE
Mp 3 : 30m dE	Mp 7 : 120m dE	

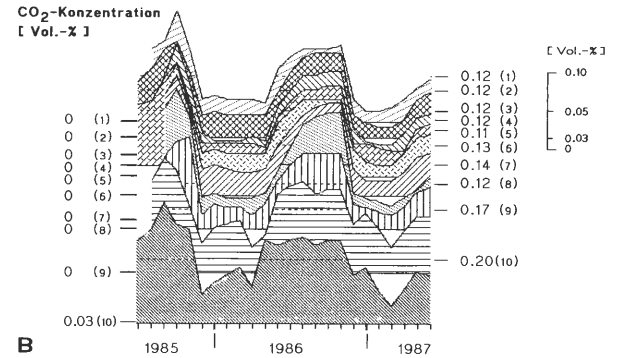
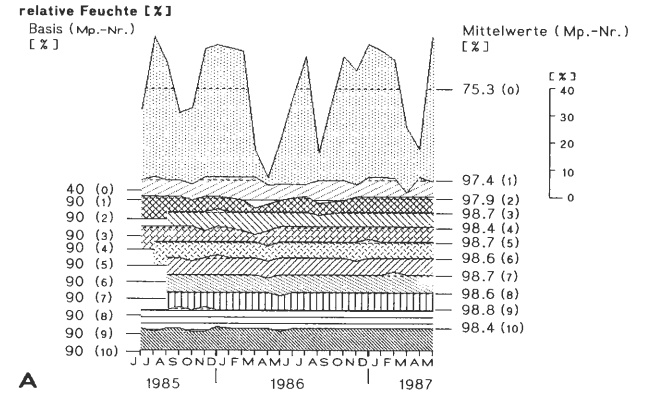


Abb. 25 : Relative Feuchte (A) und CO₂-Konzentration (B) der Atmosphäre im Halver Hüllloch an 10 Meßstellen innerhalb der Höhle (Mp 1-10) und einer Außenmeßstelle (Mp 0). Die Werte der CO₂-Konzentration an der Außenmeßstelle lagen bei 0.03 Vol.-% und sind hier nicht dargestellt.

über 3 Vol.-% auf. Hierfür ist vermutlich die Heterotrophenaktivität im Sediment des organisch belasteten Grundwassers verantwortlich. Innerhalb dieser Zone führte ich jedoch nur wenige Messungen durch (2 psychrometrische und 5 CO₂-Messungen); die Kinetik des Klimas konnte nur für die oberhalb dieser Zone gelegenen Höhlenteile geklärt werden. Aber auch dort ist eine Vertikalzonierung feststellbar: während die Decke und die oberen Wandbereiche reichlich Versinterungen aufweisen, sind in den unteren Wandbereichen wenige Meter über dem Boden sich nach unten eintiefende Korrosionsrinnen vorhanden. Sie belegen den Einfluß der CO₂-reichen Höhlenatmosphäre auf die Korrosivität der Sickerwässer (vgl. Kap. III. 3.2.).

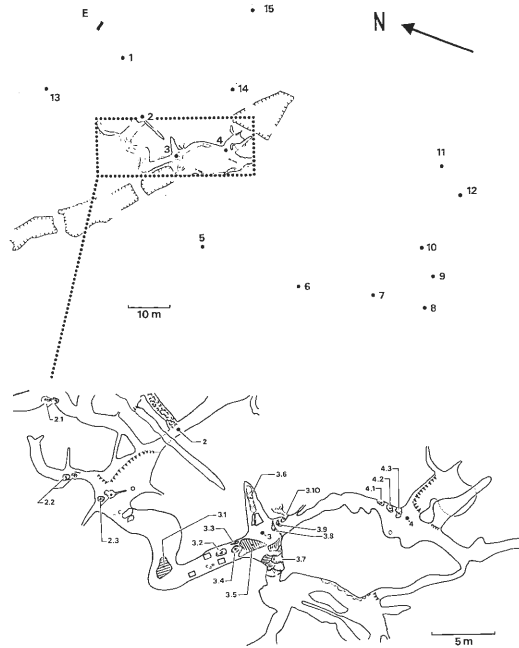


Abb. 26:
Friedrichshöhle im Hönnetal
Plan nach KOLARIK, 1977; verändert.

Der Bereich des Gangsystems der Höhle ist oben schraffiert abgebildet; auf eine Darstellung des gesamten Gangsystems wurde verzichtet. Die Wasserstellen sind schraffiert, die Meßstellen mit den (dezimal-) numerierten Fundstellen für *Proasellus cavaticus* angegeben. Ganze Zahlen: Klimameßpunkte.

Größere Schwankungen der Lufttemperatur treten nur in der Eingangshalle (Mp 1) auf, ohne daß jedoch im Winter die Frostgrenze erreicht wird. 35m hinter dem Eingang, an einer mehrere Meter tiefer liegenden Stelle (Mp 2), konnte nur im Februar 1986 ein schwacher Temperatureinbruch (eine Abweichung um 0.5°C vom Mittelwert bei einer Außentemperatur von -5.2°C) festgestellt werden (Abb. 28A); 65m und 85m vom Eingang (Mp 3 und 4) traten keine Abweichungen mehr auf. Wie in den oben beschriebenen Höhlen steigt auch in der Friedrichshöhle die mittlere Temperatur mit zunehmender „Tiefe“, d. h. mit zunehmender Dicke des Deckgesteins an (von 7.45°C in der Eingangshalle auf 8.65°C auf dem Karstwasserniveau, Mp 13).

Die absolute Luftfeuchte ist, da die Atmosphäre weitgehend wasserdampfgesättigt ist, von den Temperaturverhältnissen bestimmt und entspricht daher auch ihrer Kinetik und räumlichen Verteilung (vgl. Abb. 28B).

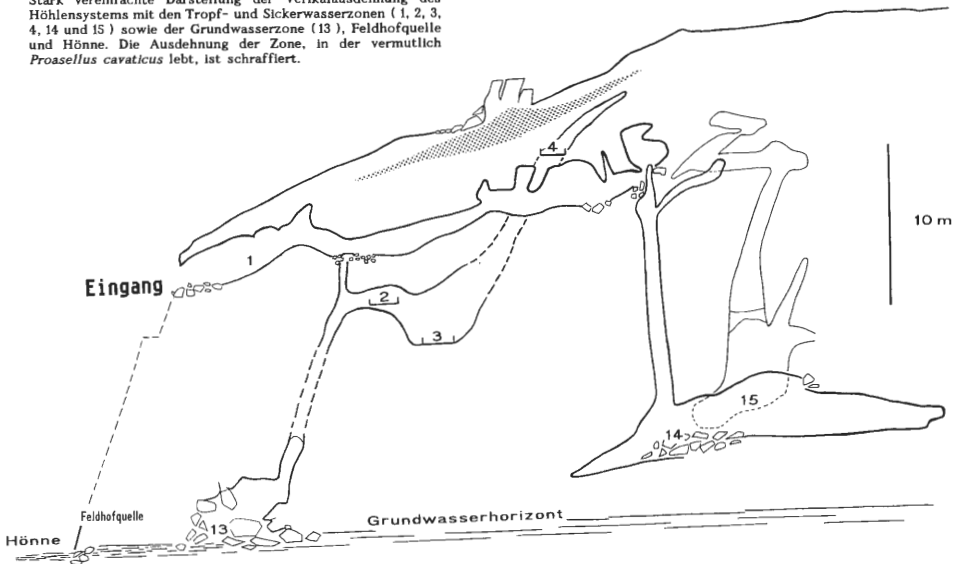
Obwohl die relative Feuchte der Atmosphäre an Mp 1 und Mp 2 geringe Schwankungen aufweist (Abb. 29A), geben sie keinen Hinweis auf externe Wetterwechsel, die als Folge einer statischen Bewetterung zu interpretieren sind. Die feststellbaren Schwankungen an den beiden nur wenige Meter voneinander entfernten Meßstellen weisen keinerlei Phasenbeziehungen auf. Auch eine von der Jahreszeit abhängige Änderung des Dekrements kann nicht festgestellt werden. Inwieweit diese Schwankungen Ausdruck einer schwachen dynamischen Bewetterung sind, muß offen bleiben. Wie jedoch die Temperaturverhältnisse und die im folgenden dargestellten CO₂-Verhältnisse belegen, sind diese Höhlenteile vorwiegend statisch bewettert. Die Bedeutung des Eingangs für externe Wetterwechsel muß hier als gering angesehen werden (die natürliche Tagöffnung ist heute mit einer massiven Stahlplatte verschlossen).

Abb. 27 :

Friedrichshöhle im Hönnetal

Plan nach KOLARIK, 1977; verändert.

Stark vereinfachte Darstellung der Vertikalausdehnung des Höhlensystems mit den Tropf- und Sickerwasserzonen (1, 2, 3, 4, 14 und 15) sowie der Grundwasserzone (13), Feldhofquelle und Hönne. Die Ausdehnung der Zone, in der vermutlich *Proasellus cavaticus* lebt, ist schraffiert.



Es konnten jahresperiodische Schwankungen des CO₂-Gehaltes der Höhlenatmosphäre gemessen werden (Abb. 29B). Die im Winter auftretenden Minima, die selten zu einer CO₂-Abnahme bis auf 0.03 Vol.-% führen, dauern nur kurz an (1-3 Monate). Leicht verlängerte Anstiegsphasen im Frühjahr und eine steile Abnahme der Konzentration im Herbst charakterisieren die CO₂-Kinetik (Abb. 29B). Mit zunehmender Tiefe nehmen auch die mittleren CO₂-Konzentrationen der Höhlenluft zu. Schwache tagesperiodische Schwankungen (Abb. 30) konnten noch 65m hinter dem Eingang (Mp 3) festgestellt werden. Externe Wetterwechsel am Eingang konnten bei kühler Außenwitterung (unter 9°C) durch Eintritt von Außenluft (Messung der Luftströmung mit Rauchröhrchen) nachgewiesen werden. Hierbei entsteht jedoch nur in kalten Wintern ein kontinuierlicher Luftzug, sonst treten die Wetterwechsel in Form von Oszillationen auf (Wechsel zwischen Phasen mit Außenlufteinstrom und Phasen mit Ausstrom der Höhlenluft; Abb. 30). Je nach Temperaturverhältnis zwischen Außen- und Höhlenluft verändert sich der Quotient aus der Dauer des Ein- und Ausstroms (E/A). Auch die Frequenz der Oszillationen ist nicht konstant (die Periodenlänge beträgt 1 – 2 Minuten), variiert aber in geringerem Maß als der Quotient E/A, der als Maß für die Intensität des externen Wetterwechsels

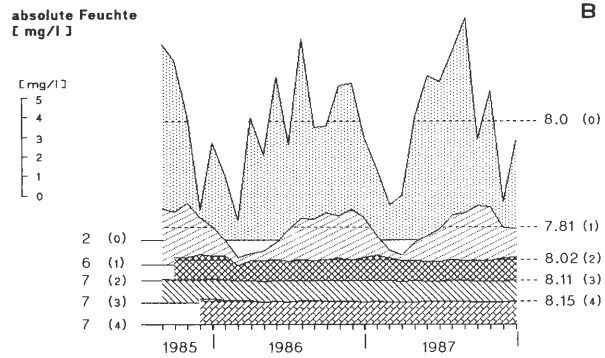
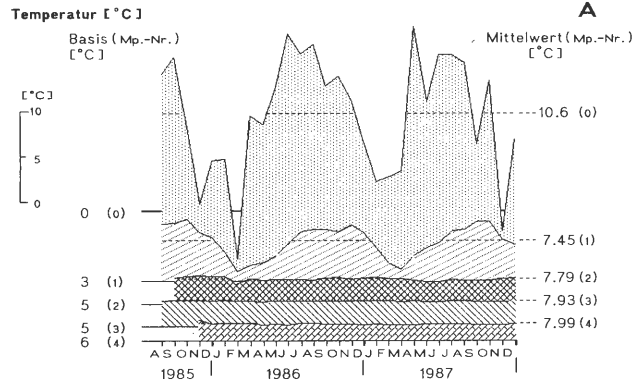


Abb. 28: Temperatur (A) und absolute Feuchte (B) der Atmosphäre in der Friedrichshöhle; Werte von 4 Meßstellen aus der Höhle (Mp 1 - 4) und einer Außenmeßstelle (Mp 0).

Mp 0 : 50m dE
Mp 1 : 12m dE

Mp 2 : 30m dE
Mp 3 : 55m dE

Mp 4 : 70m dE

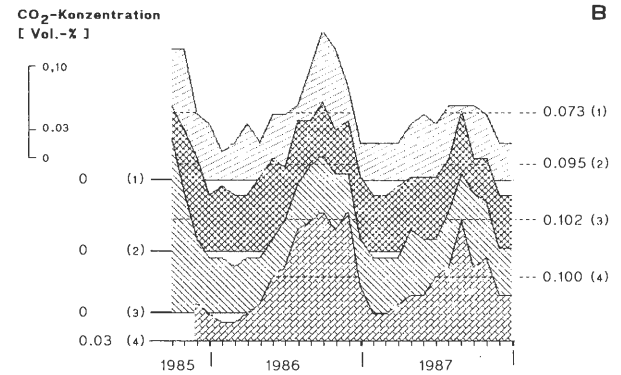
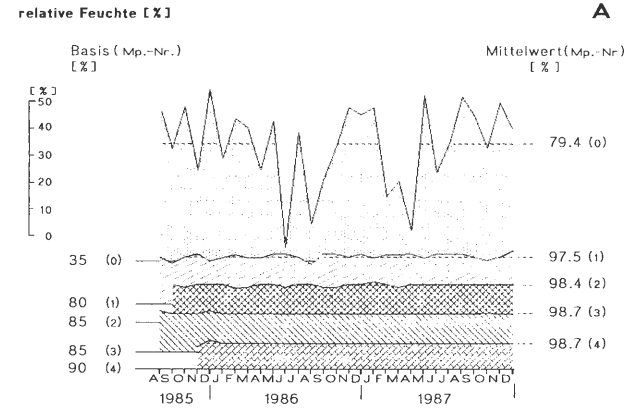


Abb. 29: Relative Feuchte (A) und CO₂-Konzentration (B) der Atmosphäre in der Friedrichshöhle; Werte an 4 Meßstellen in der Höhle (Mp 1 - 4) und einer Außenmeßstelle. Der CO₂-Gehalt der Außenluft lag bei 0.03 Vol.-% und ist hier nicht dargestellt.

genommen werden kann. Bei sehr niedrigen Außentemperaturen (unterhalb der Frostgrenze) treten Phasen mit einem Ausstrom der Höhlenluft nicht mehr auf, es erfolgt ein kontinuierlicher Außenluft-Einstrom. – Wetteroszillationen mit ähnlicher Frequenz konnten auch für die Erlenhöhle, Kluterthöhle (Ennepetal), die dynamisch bewetterte Dechenhöhle und mehrere Felsenmerhöhlen festgestellt werden.

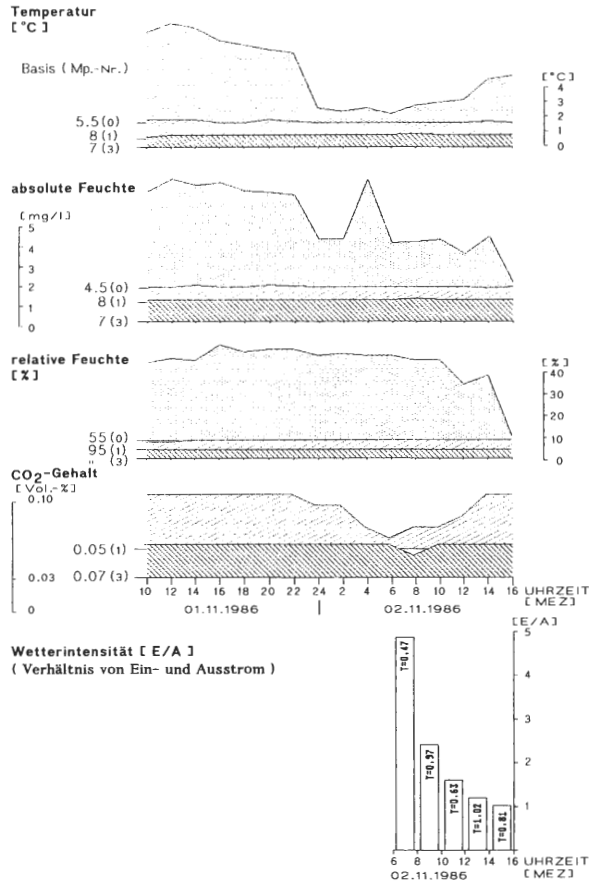


Abb. 30: Temperatur, absolute und relative Feuchte, CO₂-Gehalt der Atmosphäre an 2 Meßstellen (Mp 1 und Mp 3) in der Friedrichshöhle und einer Außenmeßstelle (Mp 0), sowie der Quotient aus der Dauer von Ein- und Ausstrom externer Wetterwechsel [E/A] und die Frequenz T [S/min] am Höhleneingang. Die Messungen erfolgten im Abstand von 2 Stunden; die CO₂-Konzentrationen der Atmosphäre außerhalb der Höhle sind nicht dargestellt.

Wesentliches Merkmal dynamisch bewetterter Höhlen ist das Vorhandensein mehrerer wetterwirksamer Tagöffnungen, wie dies bei der Dechenhöhle der Fall ist (Abb. 31). Die im mitteldevonischen Massenkalk gelegene Höhle verläuft von Ost nach West mit leichtem Gefälle. Im Osten ist das Deckgestein recht massiv, mit allerdings zahlreichen, sickerwasserführenden Spalten. Im westlichen Teil ist die Bedeckung reduziert. Hier sind die Spalten des Deckgesteins vom Sickerwasser stark erweitert, mehrere Verbruchzonen sind hier lokalisiert. Es existieren 4 künstlich erweiterte Tagverbindungen (Abb. 31), die an externen Wetterwechseln beteiligt sind. Von den in der Höhle eingerichteten 9 Meßstellen ist keine weiter als 115m von einer Tagöffnung

entfernt (Abb. 32). Sämtliche Meßstellen liegen innerhalb des Einflußbereiches externer Wetterwechsel. Das vermehrte Auftreten von Versinterungen in der Dechenhöhle (Tropfsteine und Sinterbecken) deutet ebenfalls auf eine reduzierte Isolation von der Außenwelt.

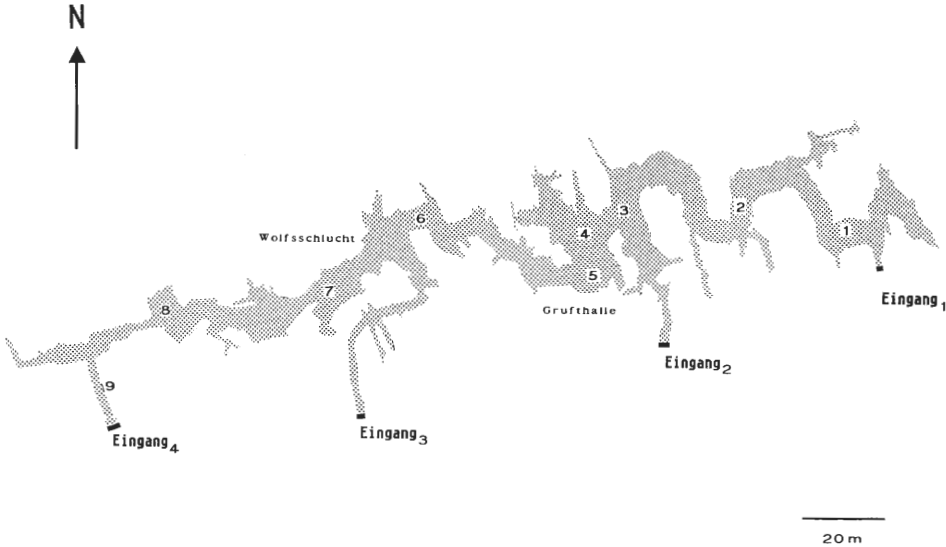


Abb. 31 :

Dechenhöhle in Iserlohn

Plan nach GRIEPENBURG (1968), ergänzt in HAMMERSCHMIDT, 1987; verändert.
Das Gangsystem ist schraffiert dargestellt; die Meßstellen sind numeriert.

Die Temperatur der Höhlenwetter erfährt an sämtlichen Meßstellen jahresperiodische Schwankungen mit einem Minimum während der Winter- und Frühjahrsmonate (Abb. 32A) und mit einem oder mehreren Maxima im Sommer (z. B. an Mp 1 und 2 im Sommer 1986). Zwischen den Eingängen E₁ und E₄ besteht für die mittlere Temperatur ein Gradient mit 10.56°C am (oberen) Eingang E₁ und 8.79°C an Mp 8 (45m hinter dem unteren Eingang E₄). An der Meßstelle 9 (15m hinter E₄) steigt die mittlere Temperatur wieder an und nähert sich der mittleren Außentemperatur. An dieser Meßstelle treten innerhalb der Höhle die größten Amplituden auf; hier sind externe Wetterwechsel besonders wirksam (vgl. auch den Gang der relativen Feuchte und der CO₂-Konzentration in Abb. 32B u. 33), während an Mp 1 (20m hinter E₁) nur kleine Amplituden auftreten und der CO₂-Gehalt erhöht ist. Der von Ost nach West verlaufende Temperaturgradient erfährt an Mp 3 eine geringfügige Störung (Absenkung der mittleren Temperatur), die möglicherweise auf den schwachen Einfluß einer nahe gelegenen Tagöffnung zurückgeht (dE₂ = 40m; vgl. auch den CO₂-Einbruch an Mp 3 im März 1986). Die Tagöffnung E₃, die den Mp 6 und Mp 7 am nächsten liegt, weist, wenn überhaupt, nur eine geringe Wetterwirksamkeit auf; die klimatischen Parameter weisen jedenfalls an diesen Meßstellen die geringsten Schwankungen auf.

Die relative Feuchte (Abb. 32B) zeigt, wie bereits für die Temperatur beschrieben, an allen Meßstellen mehr oder weniger starke Schwankungen. E₄ besitzt die größte Wetterwirksamkeit; sowohl im Sommer wie im Winter treten auf externe Wetterwechsel zurückzuführende Schwankungen an Mp 8 und 9 (bis 45m hinter E₄) auf. Die Schwankungen der relativen Feuchte erfolgen (im Gegensatz zur Temperatur) nicht phasengleich, d. h., sie sind nicht Folge einer kontinuierlichen Luftströmung, sondern Folge weitgehend unabhängiger Wetterwechsel an den verschiedenen Meßstellen.

Noch deutlicher wird das komplexe Klimageschehen durch den Gang der CO₂-Konzentration in der Höhlenatmosphäre veranschaulicht (Abb. 33). Reduzierte CO₂-Konzentrationen müssen hierbei verstärkt auftretenden Wetterwechseln zugeordnet werden. Die gegenüber statisch bewetterten Höhlen deutlich verringerten mittleren CO₂-Konzentrationen (0.036 – 0.067 Vol.-%) zeigen, daß zwischen Außen- und Höhlenatmosphäre ein erhöhter Austausch stattfindet. Die während der Wintermonate leicht verminderten CO₂-Konzentrationen in der Höhlenatmosphäre dürfen nicht zu der Annahme verleiten, daß die externe Bewetterung in der Dechenhöhle im Sommer reduziert ist; tatsächlich gibt es dafür keinen Hinweis (während der Wintermonate ist die CO₂-Produktion im Boden stark reduziert (vgl. MIOTKE 1974)). Im Sommer, wie im Winter treten unregelmäßige Schwankungen des CO₂-Gehaltes ohne Phasenbeziehungen zwischen den Meßpunkten auf.

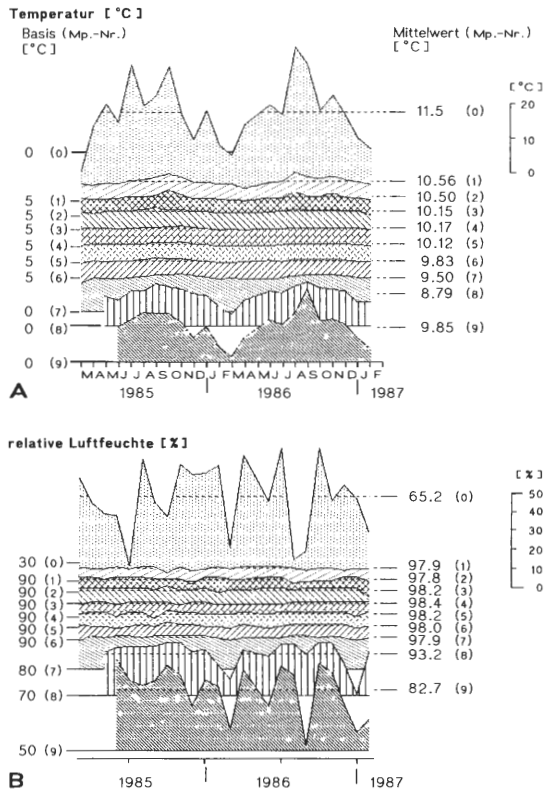


Abb. 32: Temperatur (A) und relative Feuchte (B) der Luft in der Dechenhöhle. Werte von 9 Meßstellen (Mp. 1 - 9) innerhalb der Höhle und einer Außenmeßstelle (Mp. 0₄). Die Entfernung der Meßstellen zu den Eingängen sind unten angegeben, die jeweils kürzesten Entfernungen sind unterstrichen.

Mp 0 ₁ :	Eingang an der Kapelle	dE ₁ :	0 m
Mp 0 ₂ :	Alter Ausgang in Höhe der Kanzelgrotte	dE ₂ :	0 m
Mp 0 ₃ :	Ausgang an der Kaiserhalle	dE ₃ :	0 m
Mp 0 ₄ :	Höhe Bahnlinie am Pflörnerhaus; Außenstation	dE ₄ :	50 m
Mp 1 ₁ :	Kapelle	dE ₁ :	20
Mp 1 ₂ :	Knochenkammer	dE ₁ :	25
Mp 2:	Laubengang	dE ₁ :	40
Mp 3:	Königsgrotte	dE ₁ :	115
Mp 4:	Höllengrotte	dE ₁ :	145
Mp 5:	Grufthalle	dE ₁ :	160
Mp 6:	Kristallgrotte	dE ₁ :	200
Mp 7:	Wolfsschlucht	dE ₁ :	235
Mp 8:	am Doppelgang	dE ₁ :	280
Mp 9:	neuer Ausgang	dE ₁ :	310

dE ₂ :	140	dE ₃ :	295	dE ₄ :	305 m
dE ₂ :	165	dE ₃ :	320	dE ₄ :	330 m
dE ₂ :	115	dE ₃ :	275	dE ₄ :	285 m
dE ₂ :	40	dE ₃ :	200	dE ₄ :	210 m
dE ₂ :	70	dE ₃ :	170	dE ₄ :	180 m
dE ₂ :	85	dE ₃ :	155	dE ₄ :	165 m
dE ₂ :	125	dE ₃ :	115	dE ₄ :	125 m
dE ₂ :	160	dE ₃ :	80	dE ₄ :	90 m
dE ₂ :	205	dE ₃ :	125	dE ₄ :	4.5 m
dE ₂ :	235	dE ₃ :	155	dE ₄ :	15 m

Die beiden vorgestellten Bewetterungstypen weisen also weitgehende Unterschiede auf (z.B. hoher CO₂-Gehalt der Höhlenluft in Höhlen mit statischer Bewetterung während der Stagnationsphase, stets niedriger CO₂-Gehalt bei dynamischer Bewetterung). Obwohl die Unterschiede in einzelnen Fällen sehr deutlich hervortreten, existieren bei einigen Höhlen auch Zwischenformen der Bewetterung. Z. B. gibt es dynamisch bewetterte Höhlen mit Teilbereichen, in denen in abgeschwächter Form eine Stagnationsphase auftritt. Diese Art der Bewetterung kann bei Höhlen beobachtet werden, die mehrere Tagverbindungen aufweisen, deren Wetterwirksamkeit aber deutlich eingeschränkt ist. Vor allem für größere, im Massenkalk gelegene Höhlensysteme mit dominierender statischer Bewetterung sind solche Effekte charakteristisch. In dynamisch bewetterten Höhlen können Teilbereiche auch eine rein statische Bewetterung aufweisen; dies ist gegeben, wenn für diese nur eine wetterwirksame Verbindung zu dem dynamisch bewetterten Höhlenbereich vorhanden ist. Solche Teilbereiche, oft nach unten begrenzte Vertikalstrecken, liegen meist viele Meter unterhalb der dynamisch bewetterten Zone nahe des Grundwasserspiegels. Verringerter Sinterbesatz, besonders aber Korrosionsformen sind für sie charakteristisch (vgl. Kap. III. 3.2.).

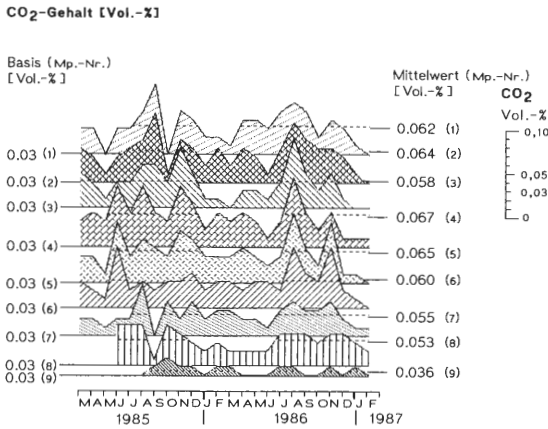
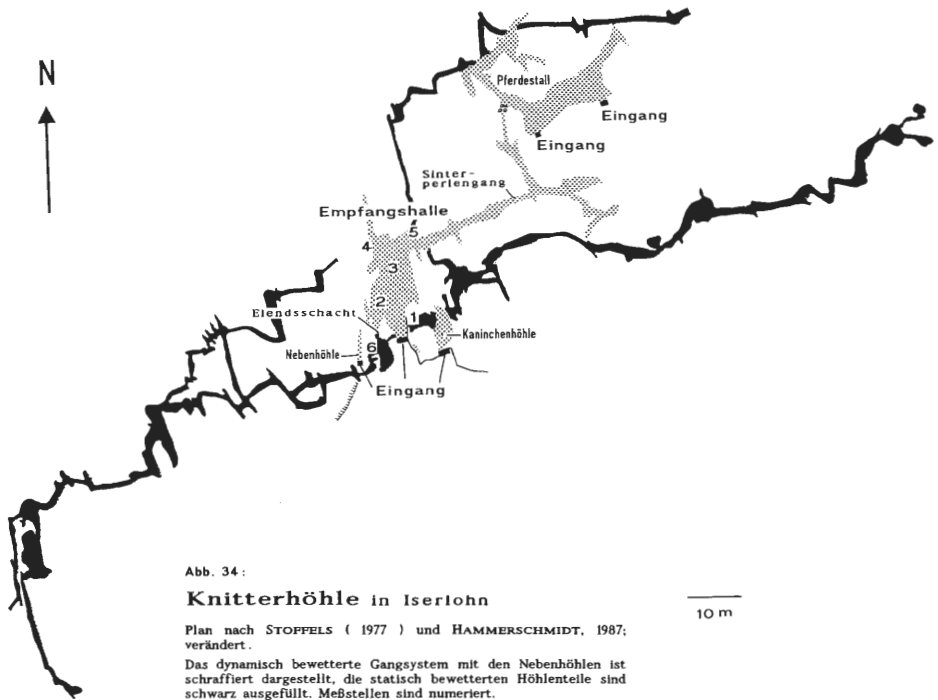


Abb. 33: CO₂-Konzentration in der Höhlenatmosphäre der Dechenhöhle. Die Werte von der Außenmeßstelle (Mp 0) lagen bei 0.03 Vol.-% und sind hier nicht dargestellt.

Als Beispiel einer dynamisch bewetterten Höhle mit überlagerter statischer Bewetterung und einem statisch bewetterten Höhlenteil muß die 510m lange Knitterhöhle (Untere Dechenhöhle nach WOLF 1937) angesehen werden, die mit 3 weiteren kleineren Höhlen in Verbindung steht (STOFFELS 1977 ; Abb. 34). Über den Eingang der Knitterhöhle (Mp 1 und Mp 2) erreicht man bergwärts absteigend die „Empfangshalle“ (Mp 3 und Mp 4) mit größeren Tropfsteinbildungen. Vor dem steilen Abstieg zum Mp 5 zweigt in östliche Richtung der ca. 20m lange „Sinterperlangang“ ab, der über einen Kamin eine Verbindung zu einer weiteren Höhle (Pferdestall) mit mehreren Tagöffnungen aufweist. Ca. 10m westlich vom Höhleneingang, im südlichen Teil der Empfangshalle, gelangt man über den 7m tiefen „Elendschacht“ in auf Grundwasserniveau liegende Höhlenteile (Mp 6). Diese Bereiche sind von Versinterungen frei; im Bachtteil dominieren Korrosionsformen. Erst ca. 8m oberhalb, im dynamisch bewetterten Teil, ist Sinter mit hoher Wachstumsrate festzustellen (HOHMANN 1979).

Jahresperiodische Schwankungen der Lufttemperatur mit geringem Dekrement sind für die eingangsnahen Zone charakteristisch (Abb. 35A). Sämtliche Meßstellen in den Bereichen der tropfsteinreichen Empfangshalle erreichen im Winter die Frostgrenze. Erst die auf Grundwasserniveau gelegenen Höhlenteile (Mp 5 und Mp 6) weisen auch im Winter Temperaturen über 0°C auf. Externe Wetterwechsel sind für diese Schwankungen verantwortlich; sie weisen aufgrund der hohen Wetterwirksamkeit des Eingangs (vergleichbar mit E₄ der Dechenhöhle) eine große Amplitude auf. Die mittleren Temperaturen liegen innerhalb der Empfangshalle zwischen 6.91 und 7.19°C, steigen jedoch mit zunehmender Tiefe der Höhle auf 9.35°C (Mp 6) an. Die im Winter verstärkt auftretenden externen Wetterwechsel überlagern die dynamischen Wetterwechsel im Eingangsbereich der Knitterhöhle derart, daß der Eindruck einer statischen Bewetterung entsteht.



Die relative Feuchte weist starke Einbrüche während der Wintermonate auf, aber auch im Sommer sind innerhalb der Empfangshalle schwache Schwankungen feststellbar (Abb. 35B). Die Dämpfung ist stärker als bei der Temperatur. Die mittleren Werte der relativen Feuchte nehmen mit zunehmender Tiefe des Höhlensystems ebenfalls zu; innerhalb der Empfangshalle sind sie im Vergleich mit statisch bewetterten Höhlen deutlich reduziert. Erst unterhalb der Empfangshalle bei Mp 6 werden nahe am Sättigungsbereich liegende Werte erreicht. – Die auch im Sommer festzustellenden Schwankungen der relativen Feuchte und die im Mittel niedrigen Werte geben Hinweise auf eine schwache dynamische Bewetterung.

Der CO₂-Gehalt der Höhlenatmosphäre weist den auf Grundwasserniveau isoliert liegenden vadosen Höhlenteilen (Mp 6) und den im Bereich der Empfangshalle gelegenen Teilen (Mp 1, 2, 3, 4 und 5) unterschiedliche Bewetterungsarten zu. Während die Meßstellen innerhalb der letztgenannten Zone nur geringe CO₂-Konzentrationen mit

unregelmäßigen Schwankungen aufweisen (im Mittel zwischen 0.045 und 0.07 Vol.-%), liegen sie an Mp 6 mit im Mittel 0.308 Vol.-% vergleichsweise hoch und schwanken jahresperiodisch (Abb. 36). Dieser auf Grundwasserniveau liegende Höhlenteil ist weitgehend von den übrigen Höhlenteilen isoliert, da die meisten Verbindungen durch Siphonstrecken unterbrochen sind; nur über den Elendschacht existiert eine Wetterverbindung. Die hohen CO₂-Konzentrationen werden mit großer Wahrscheinlichkeit durch das Grundwasser als CO₂-Lieferant verursacht. Die CO₂-Schwankungen zeigen an dieser Stelle große Amplituden. Daß die CO₂-Schwankungen durch statische Wetterwechsel verursacht werden, kann man daran erkennen, daß der CO₂-Gehalt des Grundwassers jahresperiodisch nur wenig schwankt (siehe auch Kap. III. 3.2.). Mp 5, der ebenfalls auf Grundwasserniveau liegt, jedoch von der Empfangshalle wettermäßig nicht isoliert ist, weist nur geringe CO₂-Konzentrationen der Höhlenluft auf.

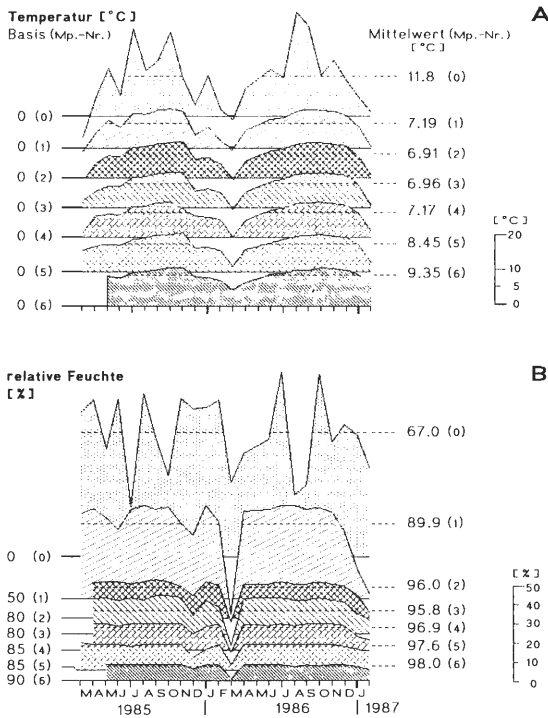


Abb. 35: Temperatur (A) und relative Feuchte (B) in der Knitterhöhle. Werte an 6 Meßstellen (Mp 1 - 6) innerhalb der Höhle und einer Außenmeßstelle (Mp 0).

Mp 0 : dE = 10 m	Mp 3 : dE = 25 m	Mp 6 : dE = 30 m
Mp 1 : dE = 15 m	Mp 4 : dE = 30 m	
Mp 2 : dE = 20 m	Mp 5 : dE = 36 m	

Ähnliche klimatische Verhältnisse wie in der Knitterhöhle bestehen auch für die Große Sunderner Höhle. Mehrere Tagöffnungen (Abb. 37) führen zu einer dynamischen Bewetterung; die geringe Dicke des Deckgesteins im Bereich der „Eulenhalle“ (Mp 1, 2 und 3) bewirkt ebenfalls einen verstärkten Eintritt der Außenluft und ist deshalb klimadestabilisierend. Entsprechend große Schwankungen der Lufttemperatur, der absoluten und der relativen Luftfeuchte sowie ein niedriger CO₂-Partialdruck (im Mittel an Mp 1: 0.038, Mp 2: 0.043, Mp 3: 0.037 Vol.-%) mit nur geringen Schwankungen charakterisieren diesen Höhlenteil. Im Winter sinkt der CO₂-Gehalt der Luft an allen

Meßstellen dieses Bereichs auf 0.03 Vol.-%; sie liegen alle im Einflußbereich verstärkter externer Wetterwechsel. Mp 6 liegt nicht innerhalb des dynamisch bewetterten Bereiches (der benachbarte Eingang ist mit einer Stahlplatte verschlossen; Verbindungen zum restlichen Höhlensystem sind aufgrund phreatischer Abschnitte [Siphone] wetterunwirksam). Die Gesteinsbedeckung ist hier mächtiger. Obwohl der Eingang verschlossen ist, sind externe Wetterwechsel wirksam; die Schwankungen der Lufttemperatur, der relativen und absoluten Feuchte zeigen, daß eine statische Bewetterung vorliegt (Stagnationsphase im Sommer, verstärkte Wetterwechsel im Winter); der CO₂-Gehalt der Höhlenluft liegt hier im Mittel höher (bei 0.05 Vol.-%) als an den Meßstellen im Bereich der Eulenhalle, seine Schwankungen besitzen eine größere Jahresamplitude; er ist auch im Winter erhöht und sinkt nicht unter 0.04 Vol.-%.

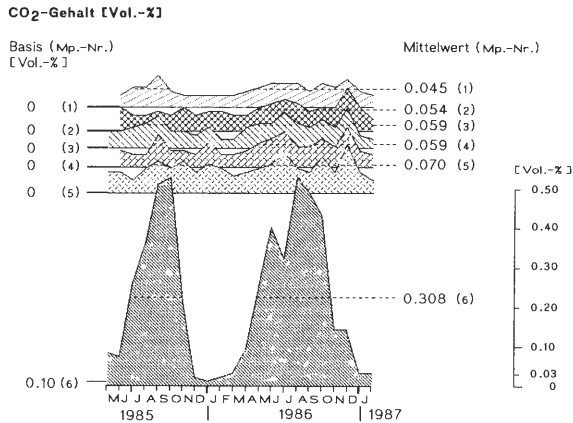


Abb. 36: CO₂-Konzentration in der Höhlenatmosphäre der Knitterhöhle. Die Werte von der Außenmeßstelle (Mp 0) lagen bei 0.03 Vol.-% und sind hier nicht dargestellt.

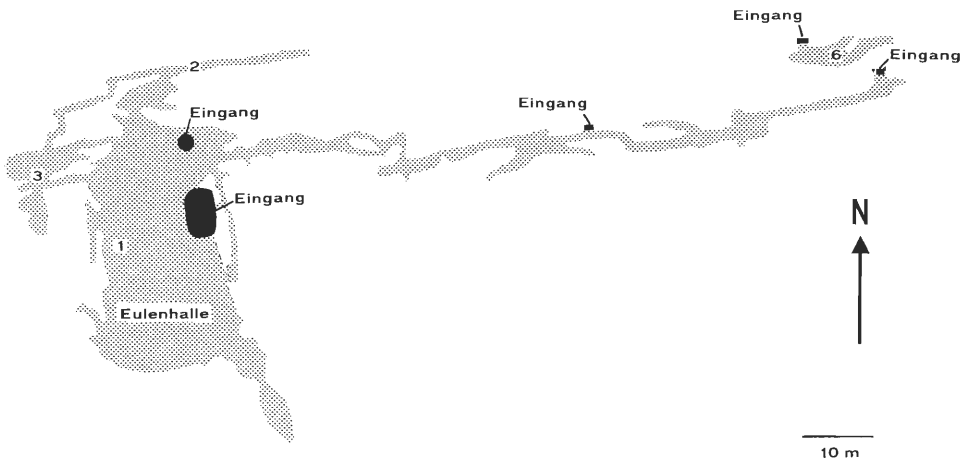


Abb. 37 :

Große Sunderner Höhle

Plan nach PIELSTICKER (1982); verändert.

Das Gangsystem ist schraffiert dargestellt, die beiden Deckenlöcher sind schwarz ausgefüllt. Die Meßstellen sind nummeriert.

Eine weitere abweichende Form der Bewetterung zeigt die im Massenkalk gelegene Höhle hinter der Villa Ribbert (Abb. 38). Sie besitzt 2 Tagöffnungen (zwischen Mp 1 und Mp 2) mit einem Höhenunterschied von ca. 10m. Trotzdem dominiert das Bild einer statisch bewetterten Höhle, da die Wetterwirksamkeit beider Eingänge durch Verschlüsse reduziert ist. Eine weitere Tagverbindung wird bei der Meßstelle 4 vermutet, die ca 60m vom Eingang entfernt liegt. Die Meßstellen 5 – 10 führen in tiefere Höhlenteile und sind in einem Abstand von 10-15m angelegt. Die Meßstellen 11 und 12 liegen in einem zum Eingang zurückführenden, tropfsteinreichen Gang. Die Meßstelle 7 liegt in Höhe des Grundwasserniveaus. Das Höhlensystem verläuft im Bereich der Meßstellen weitgehend horizontal.

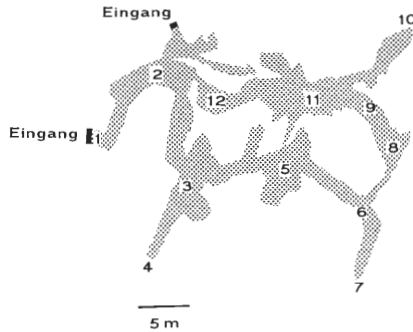


Abb. 38:

**Höhle hinter der
Villa Ribbert**
in Hohenlimburg

Plan nach JANSSEN & BECKER (1937-38) in
JUNEMANN & FISCHER, 1939; verändert.

Das Gangsystem ist schraffiert dargestellt;
Meßstellen sind numeriert.

Die Temperatur zeigt jahresperiodische Schwankungen mit hohem Dekrement; die mittleren Temperaturen nehmen vom Eingang zu den tieferen Höhlenteilen hin zu (Abb. 39A). Während der Wintermonate treten Temperaturabsenkungen auf, während des Sommers sind Plateaus festzustellen.

Der Gang der relativen Feuchte weicht von dem der Temperatur deutlich ab, da auch während der Sommermonate Schwankungen auftreten, die an den verschiedenen Meßpunkten asynchron sind (Abb. 39B). Sie geben einen deutlichen Hinweis dafür, daß die für statisch bewetterte Höhlen charakteristische Stagnationsphase hier durch dynamische Wetterwechsel schwachen Ausmaßes überlagert wird. Auch der am Grundwasser liegende Mp 7, der nicht durch Siphonbildung vom restlichen Höhlenteil isoliert wird, ist durch dynamische Wetterwechsel beeinflusst. Von den zwischen den beiden Eingängen befindlichen Höhlenteilen abgesehen (Mp 1 und Mp 2) liegt an den restlichen Meßstellen die mittlere relative Feuchte nahe am Sättigungspunkt.

Der CO₂-Gehalt der Höhlenatmosphäre zeigt ausgeprägte jahresperiodische Schwankungen, wie dies für statisch bewetterte Höhlen typisch ist (Abb. 40). An den Meßstellen 1 und 2 ist die Konzentration erwartungsgemäß niedriger als an den restlichen Meßstellen. Auch sind die Amplituden innerhalb dieser Zone bis einschließlich der Meßstelle 4 vermindert. Ab der Meßstelle 5 steigt die mittlere Konzentration jedoch zum Höhleninneren hin steil an und erreicht am Grundwasserniveau (Mp 7) ein Maximum. – Es kann also ein schwacher Einfluß dynamischer Bewetterung festgestellt werden, der sich in geringfügigen Schwankungen der relativen Luftfeuchte während der Sommermonate an fast allen Meßstellen und durch einen reduzierten CO₂-Gehalt der Höhlenatmo-

sphäre vom Eingang bis zum Mp 4 äußert. Insgesamt wird das Wettergeschehen jedoch durch den Wechsel zwischen einer Phase aktiver Bewetterung und einer Stagnationsphase geprägt; die statische Bewetterung dominiert.

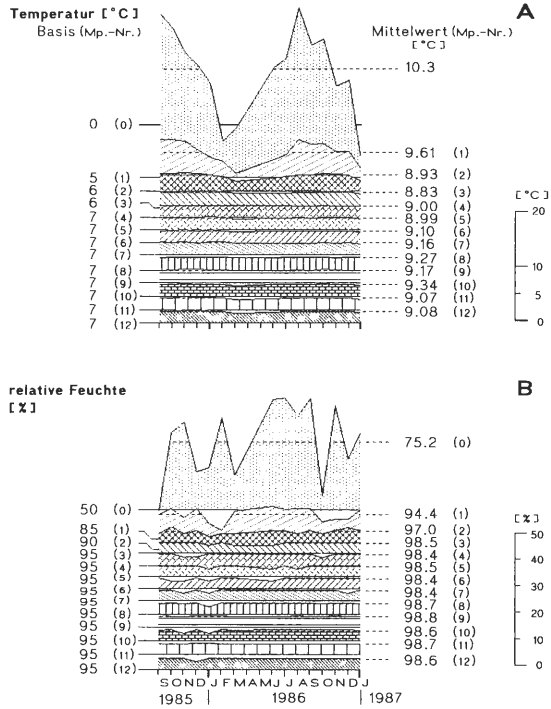


Abb. 39: Temperatur (A) und relative Feuchte (B) in der Höhle hinter der Villa Ribbert. Werte an 12 Meßstellen (Mp 1 - 12) innerhalb der Höhle und einer Außenmeßstelle (Mp 0). Entfernungen der Meßstellen von den beiden Eingängen der Höhle sind nicht angegeben, da ein genauer Höhlenplan zur Bestimmung der Position nicht zur Verfügung stand. Innerhalb der Höhle sind die Meßstellen markiert.

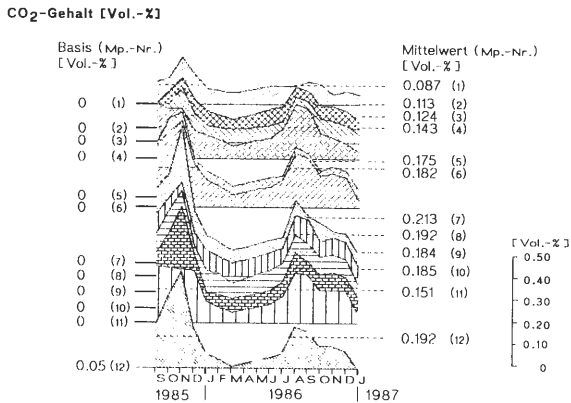


Abb. 40: CO₂-Konzentration in der Höhlenatmosphäre der Höhle hinter der Villa Ribbert. Die Werte von der Außenmeßstelle (Mp 0) lagen bei 0.03 Vol.-% und sind hier nicht dargestellt.

Im folgenden werden die klimatisch untersuchten Höhlen den beiden Bewetterungsarten, Höhlen mit Zwischenformen der jeweils dominierenden Bewetterungsart zugeordnet. Höhlen mit troglobionten Arten sind in Fettdruck angegeben.

- Höhlen mit dynamischer Bewetterung:
Dechenhöhle in Iserlohn, **Große Karhofhöhle** im Hönnetal
- Mit großer Wahrscheinlichkeit weisen sämtliche Felsenmeerhöhlen eine überwiegend dynamische Bewetterung auf, die zonal auch statisch sein kann. Ähnliches muß für die **Kreuzhöhle** in Iserlohn, die **Dr. Wolf Höhle**¹⁾ und **Öger Höhle** in Hohenlimburg, die **Attahöhle** und das **Kirschhollenloch** in Attendorn, die **Kleine Sunderner Höhle**, die **Reckenhöhle**, **Kehlberghöhle** und **Ruthmecker Höhlen** im Hönnetal, die **Drakenhöhle** bei Marsberg und die **Höhle im Hallerstein** bei Thülen vermutet werden.
- Höhlen mit dynamischer Bewetterung und statisch bewetterten Zonen:
Volmehanghöhle in Hagen, **Knitterhöhle** in Iserlohn, **Grauer Ort (H8Fm)**, **Eiskeller (H20Fm)** im Felsenmeer bei Hemer, **Große Sunderner Höhle**, **Malachitdom** bei Bleiwäsche.
- Höhlen mit statischer Bewetterung:
Kluterthöhle in Ennepetal, **Erlenhöhle** bei Schwelm, **Halver Hülloch**, **Kluterthöhle**²⁾, **Brackelsbergstollen**, **Eisenhöhle** in Hagen, **Matthiasstollen** in Iserlohn, **Schönebecker Höhle**, **Stollen bei Platthaus** im Hönnetal, **Antfelder Höhle**, **Antfelder Stollen**, **Grundsteinheimer Höhle**.
- Für folgende Höhlen wird eine vorwiegend statische Bewetterung angenommen:
Höhle hinter der Villa Ribbert in Hohenlimburg, **Heinrichshöhle**, **Von-der-Becke-Höhle** in Hemer, **Friedrichshöhle** im Hönnetal, **Rösenbecker Höhle**.
- In folgenden Höhlen wurden keine klimatischen Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund der Topologie wird angenommen, daß sie ebenfalls statisch bewettert sind:
Bismarckhöhle, **Heilenbecker Höhle**, **Rentropshöhle** in Ennepetal, **Stollen bei Halver**, **Juliusstollen**, **Adlerstollen**, **Erzgebirge II**, **Holthäuser Höhle** bei Hohenlimburg, **Geßhardhöhle** bei Altroggenrahmede, **Kleines Hülloch** bei Kierspe, **Heinrich-Bernhard-Höhle** bei Plettenberg, **Stollen unterhalb der H.-B.-Höhle**, **Muttersteinhöhle** bei Finnentrop, **Landemerter Höhle**, **Serkenroder Schacht**, **Leichenhöhle**, **Dahlmannhöhle**, **Wasserloch im Kehlberg** im Hönnetal, **Paulsstollen** und **Karlstollen der Hermanszeche** bei Allendorf, **Höhle im Kattenstein** bei Kallenhardt, **Simonhöhle**, **Rissehöhle** im Lörmecketal bei Warstein, **Mescheder Stollen**, **Untrüggeschacht** bei Hoppecke und **Messinghauser Stollen**.

Zusammenfassend kann also folgendes gesagt werden:

In statisch bewetterten Höhlen verändern sich die Schwankungen der Klimaparameter meist im Rhythmus der Jahreszeiten. Dies wird durch periodisch auftretende Phasen verstärkter und stagnierender Wetterwechsel verursacht. Das vertikale Kluftsystem im Deckgestein ist neben dem Höhleneingang ebenfalls „wetterwirksam“. Es stellt in den meisten Fällen die kürzesten Verbindungen des Höhlensystems zur Außenwelt dar und wird während der Wintermonate durch absinkende Luftmassen und Schmelzwasser abgekühlt, während im Sommer diese Spalten von der Außenatmosphäre nur wenig beeinflusst werden. Vertikale Temperaturgradienten sind die Folge und bewirken, daß oberflächennahe Zonen meist niedrigere mittlere Temperaturen als tiefer

¹⁾ Die Dr. Wolf Höhle wurde 1989 mit einem massiven Verschuß versehen, der mit großer Wahrscheinlichkeit externe Wetterwechsel einschränkt.

²⁾ Da ein natürlicher Eingang fehlt, kommen externe Wetterwechsel hier kaum vor.

gelegene Zonen aufweisen. Die meisten westfälischen Höhlen besitzen nur eine geringe oder mäßige Gesteinsbedeckung. Interne Wetterwechsel, die hauptsächlich durch vertikale Temperaturgradienten verursacht werden, sind am Gesamtwettergeschehen dieser Höhlen wesentlich beteiligt. Bei statischer Bewetterung liegt die Stagnationsphase der Höhlenwetter vorwiegend in der warmen Jahreszeit (die Außentemperatur liegt oberhalb der Höhlenlufttemperatur, das vertikale Kluftsystem bleibt weitgehend von der Außenatmosphäre unbeeinflusst). Im Winter sind verstärkte Wetterwechsel festzustellen; kalte Außenluft dringt in das Höhlensystem ein (die Außentemperatur liegt unterhalb der Höhlenlufttemperatur). Für diese jahresperiodischen Wechsel der Bewetterung ist es weitgehend unerheblich, ob das vadose System bergwärts einfallend oder ansteigend ist. Diese Zusammenhänge erklären auch den Befund, daß Höhlen mit ausgeprägtem vertikalem Kluftsystem im Jahresmittel deutlich niedrigere Temperaturen aufweisen als solche Höhlen bzw. Höhlenteile, deren vertikales Kluftsystem durch Tonschieferschichten begrenzt wird (z. B. bei der in den Honselers Schichten gelegenen Kluterthöhle in Ennepetal; vgl. Kap. III. 3.2.). Statisch bewetterte Höhlen weisen deutlich ausgeprägte jahresperiodische Schwankungen der Temperatur, Luftfeuchte und Luftströmung auf: steil abfallende Temperaturwerte und „Einbrüche“ in den Luftfeuchteplateaus während der Wintermonate und langsam ansteigende Temperaturen und hohe Luftfeuchtwerte während der Sommermonate. Daneben verändert sich auch die Luftzusammensetzung jahresperiodisch. Als Maß für die Intensität externer Wetterwechsel kann der CO₂-Gehalt der Höhlenluft dienen. Erwartungsgemäß liegen die Maxima der CO₂-Konzentration innerhalb der Stagnationsphase (in den Sommermonaten), während im Winter der CO₂-Gehalt deutlich abnimmt. Die Kinetik kann je nach Höhle und Höhlenkompartiment variieren. Höhlenteile mit mächtiger Gesteinsbedeckung nahe des Grundwasserniveaus erreichen während der Sommermonate weitgehend gleichbleibend hohe CO₂-Konzentrationen (Plateaus). Oberflächennahe Kompartimente besitzen hingegen steiflankige Maxima, ähnlich den Verhältnissen der Bodenatmosphäre; die Kinetik der CO₂-Schwankungen wird hier also auch von der Heterotrophenaktivität des Bodens bestimmt (Abb. 13B; siehe auch MIOTKE, 1974). Die Kinetik der klimatischen Parameterschwankungen, die maßgeblich den Wasserchemismus beeinflussen (vgl. Kap. III. 3.2.), verändert sich also entlang des Vertikalgefälles in statisch bewetterten Höhlen (vgl. auch Kap. IV. 1.).

Dynamisch bewetterte Höhlen lassen keinen jahresperiodischen Wechsel zwischen einer Stagnationsphase und einer Phase aktiver Wetterwechsel erkennen. In dynamisch bewetterten Höhlen ist zu jeder Jahreszeit ein intensiver Austausch mit der Außenluft feststellbar. Daran sind in der Regel 2 oder mehrere, meist auf unterschiedlichem Niveau liegende Tagöffnungen beteiligt. Zwischen den Jahreszeiten kann eine Wetterinversion erfolgen: ein Eingang läßt vorwiegend während des Winters Außenluft ein und kühlt sich ab, während durch den anderen Eingang im Sommer warme Außenluft einströmt. Temperaturgradienten innerhalb der dynamisch bewetterten Höhlenzone zwischen beiden Eingängen können die Folge sein. Da aufgrund mehrerer Tagöffnungen die Luftzirkulation begünstigt ist, können bei dynamischer Bewetterung wesentlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten auftreten als in statisch bewetterten Höhlen (in der Dechenhöhle erreichen sie im Hauptgang 67cm/s und an Engstellen zeitweise über 1.5 m/s). Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen sind zuweilen bei dynamisch bewetterten Höhlen erhöht, bei zahlreichen Tagöffnungen meist asynchron. Das zeitliche Ausmaß der Klimaschwankungen an einer Meßstelle ist ebenso wie ihre räumliche Dämpfung weitgehend von der Jahreszeit unabhängig (oberirdische Klimaschwankungen wirken sich im Sommer ebenso wie im Winter aus). Insgesamt kann das Ausmaß der Klimaschwankungen gegenüber statisch bewetterten Höhlen erhöht sein. Vergleichbar hohe CO₂-Konzentrationen und -Schwankungen, wie ich sie innerhalb statisch bewetter-

ter Höhlen während der Sommerzeit feststellen konnte, treten bei dynamischer Bewetterung nicht auf. Sämtliche von mir untersuchten Höhlen mit einer dynamischen Bewetterung liegen im Massenkalk (sie sind meist frei von troglobionten Arten; vgl. Kap. III. 5., IV. 2. u. 3.); unter ihnen sind mehrere Höhlen, die aufgrund ihres reichhaltigen Tropfsteinvorkommens (als Ausdruck der reduzierten Isolation zur Außenatmosphäre; vgl. Kap. III. 3.2.) als Schauhöhlen genutzt werden (vgl. Kap. IV. 6.).

3.2. Temperatur, pH-Wert, CO₂- und O₂-Konzentration der Höhlengewässer.

Besonders in oberflächennahen Zonen, die durch stark erweiterte vertikale Klüfte (Schächte) charakterisiert sind, liegen die Wassertemperaturen extrem niedrig. So werden Kondenswasser, Tropf- und Sickerwasser im Einstiegsschacht zum Eiskeller (Felsenmeer bei Hemer) während trockener Sommer nahezu das ganze Jahr über als Eis

Mittlere Temperatur

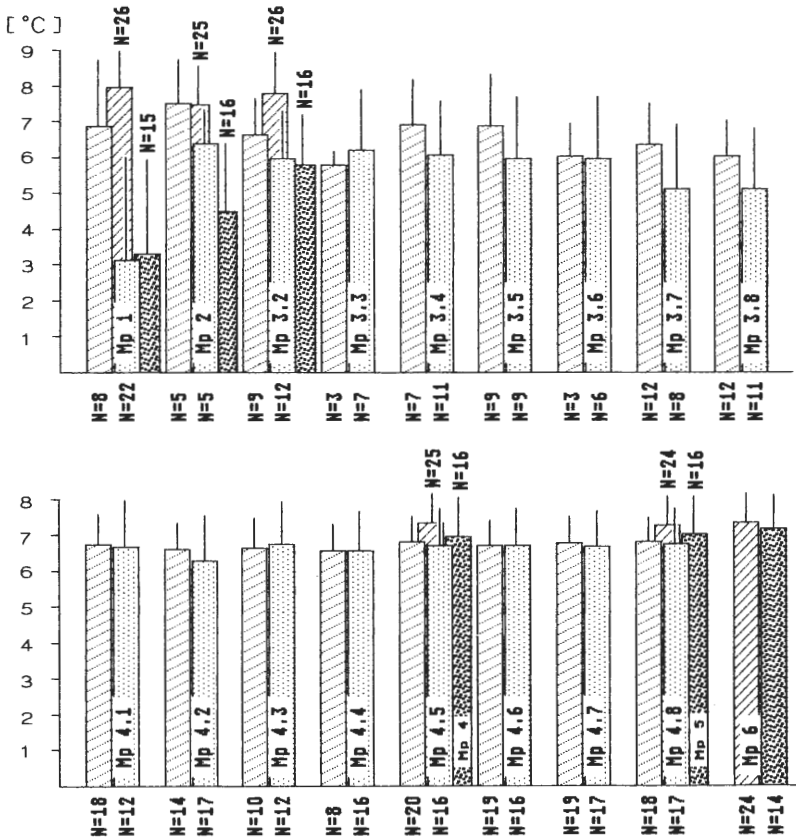


Abb. 41: Mittlere Temperatur der Gewässer und Höhlenatmosphäre in der Erlenhöhle von 1985 bis 1988.

- ▨ : mittl. Wassertemperatur im Sommer
- ▤ : mittl. Wassertemperatur im Winter
- ▧ : mittl. Lufttemperatur im Sommer
- ▩ : mittl. Lufttemperatur im Winter
- | : Standardabweichung

Mittlere Temperatur

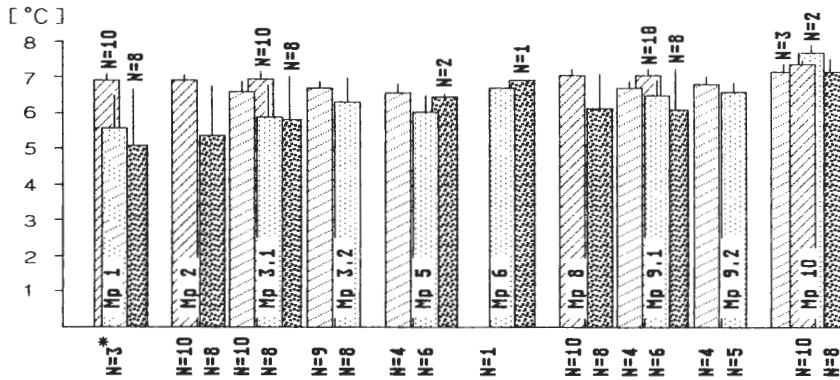
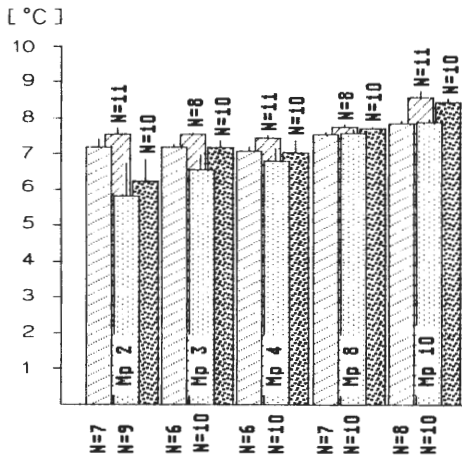


Abb. 42: Mittlere Temperatur der Gewässer und Höhlenatmosphäre im Halver Hülloch von 1985 bis 1987 (A) und in der Schönebecker Höhle von 1985 bis 1988 (B).

- : mittl. Wassertemperatur im Sommer
 - : mittl. Wassertemperatur im Winter
 - : mittl. Lufttemperatur im Sommer
 - : mittl. Lufttemperatur im Winter
- | : Standardabweichung

* die mittlere Wassertemperatur wurde aus Sommer- und Winterwerten zusammengefaßt.

festgehalten. Am 18. 07. 1985 waren die Schachtwände ab einer Tiefe von 14m vereist (die Außentemperatur lag bei 25.0°C). Am 15. 06. 1986 war eine Vereisung bereits ab einer Tiefe von 8m festzustellen (die Außentemperatur lag bei 24.7°C), am 11. 09. 1986 ab 18m Tiefe. Die Lufttemperatur lag im Jahresmittel im Bereich der Vereisung bei 0.5°C (vgl. Kap. III. 3.1.).

Auch die Tropf- und Sickergewässer anderer oberflächennaher Höhlen weisen niedrige Jahresmitteltemperaturen auf; sie liegen z.B. in der Erlenhöhle zwischen 4.1°C in der Eingangszone (Mp 1) und 6.8°C im Südgang (Mp 4.1 bis Mp 4.8, vgl. auch

Mittlere Temperatur

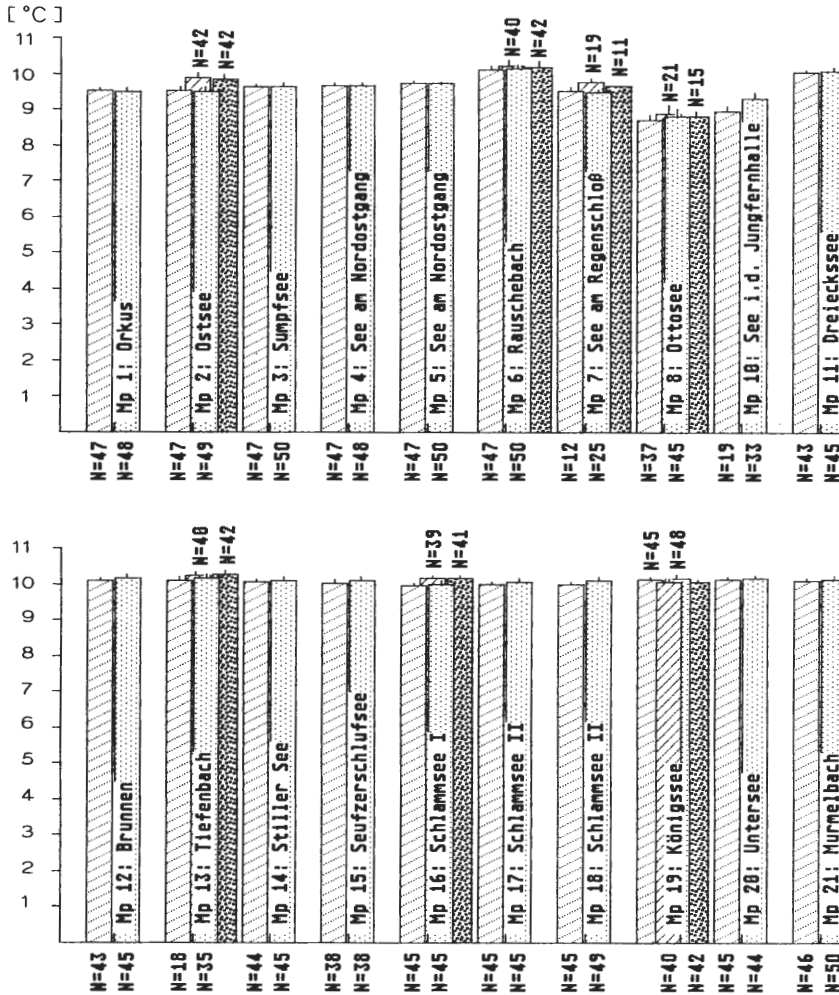


Abb. 43: Mittlere Temperatur der Gewässer und Höhlenatmosphäre in der Kluterthöhle von 1982 bis 1987.

- ▨ : mittl. Wassertemperatur im Sommer
 - ▤ : mittl. Wassertemperatur im Winter
 - ▧ : mittl. Lufttemperatur im Sommer
 - ▩ : mittl. Lufttemperatur im Winter
- I: Standardabweichung

Abb. 41). Wie bei der Temperatur der Höhlenluft treten hier auch bei der Wassertemperatur jahresperiodische Schwankungen auf. In der Schönebecker Höhle sind die Temperaturverhältnisse mit 5.6°C im Eingangsbereich und 7.3°C am Ende des Hauptgangs ähnlich wie in der Erlenhöhle (vgl. Abb. 42B). In Höhlen der Honseler Schichten mit mächtigerem, aber durchlässigem vertikalem Kluftsystem, wie z.B. im Halver Hüllloch, liegen die mittleren Temperaturen der Tropf- und Sickerwasser

Mittlere Temperatur

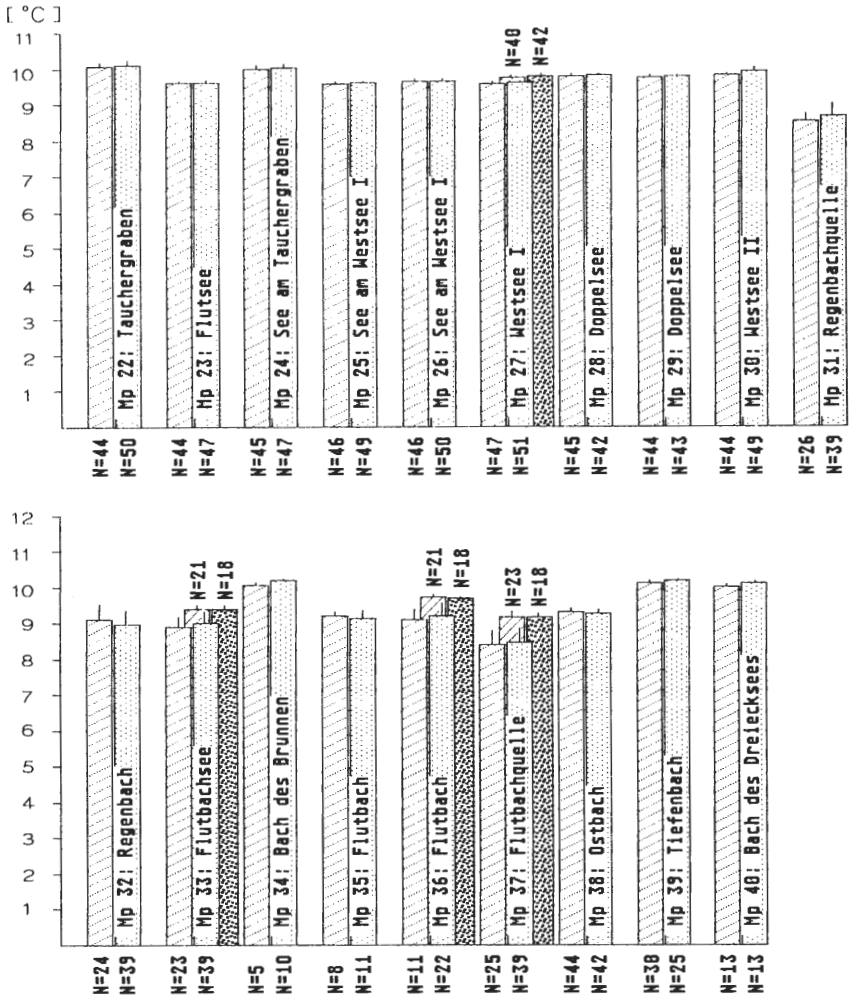


Abb. 44: Mittlere Temperatur der Gewässer und Höhlenatmosphäre in der Kluterhöhle von 1982 bis 1987.

- ▨ : mittl. Wassertemperatur im Sommer
- ▩ : mittl. Wassertemperatur im Winter
- ▧ : mittl. Lufttemperatur im Sommer
- ▦ : mittl. Lufttemperatur im Winter
- | : Standardabweichung

nur wenig höher (am Mp 2: 6.4°C, am Mp 8: 7.6°C); mit wachsender Gesteinsbedeckung nehmen die Temperaturschwankungen jedoch ab (Abb. 42A; vgl. RONNEBERGER 1975). Die Temperaturen der Tropf- und Sickergewässer sind höher, wenn, wie teilweise in der Kluterhöhle in Ennepetal, Tonschieferschichten das Kluftsystem des Deckgesteins überdecken (Abb. 43 und 44). Die Temperatur der „Flutbachquelle“ (Mp 37) liegt hier im Jahresmittel bei 8.5°C, jene der „Regenbachquelle“ (Mp 31) bei 8.6°C

Mittlere Temperatur

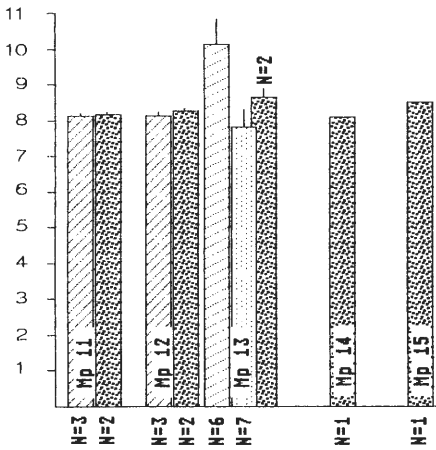
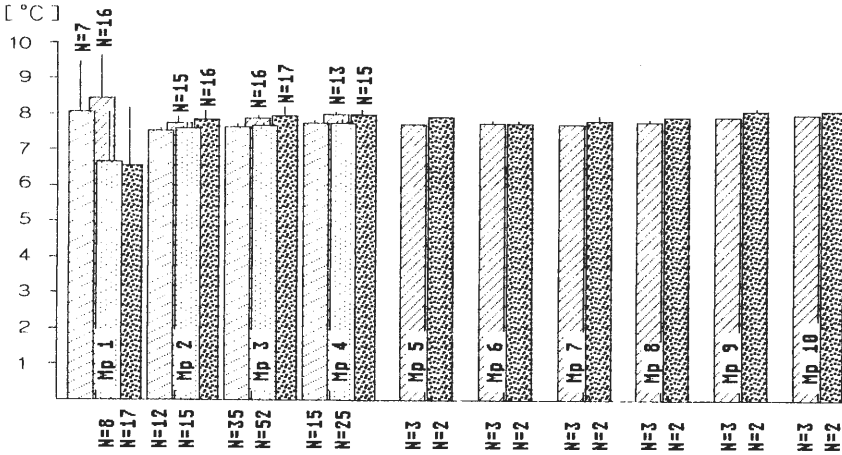


Abb. 45: Mittlere Temperatur der Gewässer und Höhlenatmosphäre in der Friedrichshöhle von 1985 bis 1988.

- : mittl. Wassertemperatur im Sommer
 - : mittl. Wassertemperatur im Winter
 - : mittl. Lufttemperatur im Sommer
 - : mittl. Lufttemperatur im Winter
- |: Standardabweichung

und des „Ottosees“ (Mp 8) bei 8,8°C. Die Temperatur des Wassers der Tropfkamine im Bereich des „Regenschlosses“ („Ostbach“: Mp 38 und See am „Regenschloß“: Mp 7) liegt im Mittel bereits zwischen 9,3 und 9,5°C. Jahresperiodische Temperaturschwankungen sind hier nicht mehr erkennbar; typisch für diese Gewässer jedoch ist, daß sie oft niedrigere Temperaturen als die Höhlenluft der vadosen Zone aufweisen. Dies gilt auch für die von Tropf- und Sickergewässern gespeisten Höhlenseen, z. B. den „Ostsee“ und „Westsee I“ (Mp 2 und Mp 27).

Im M a s e n k a l k gelegene Höhlen mit mächtiger Gesteinsbedeckung aber erweitertem vertikalen Kluftsystem im Deckgestein besitzen ebenfalls niedrige Temperaturen ihrer

Mittlere Temperatur

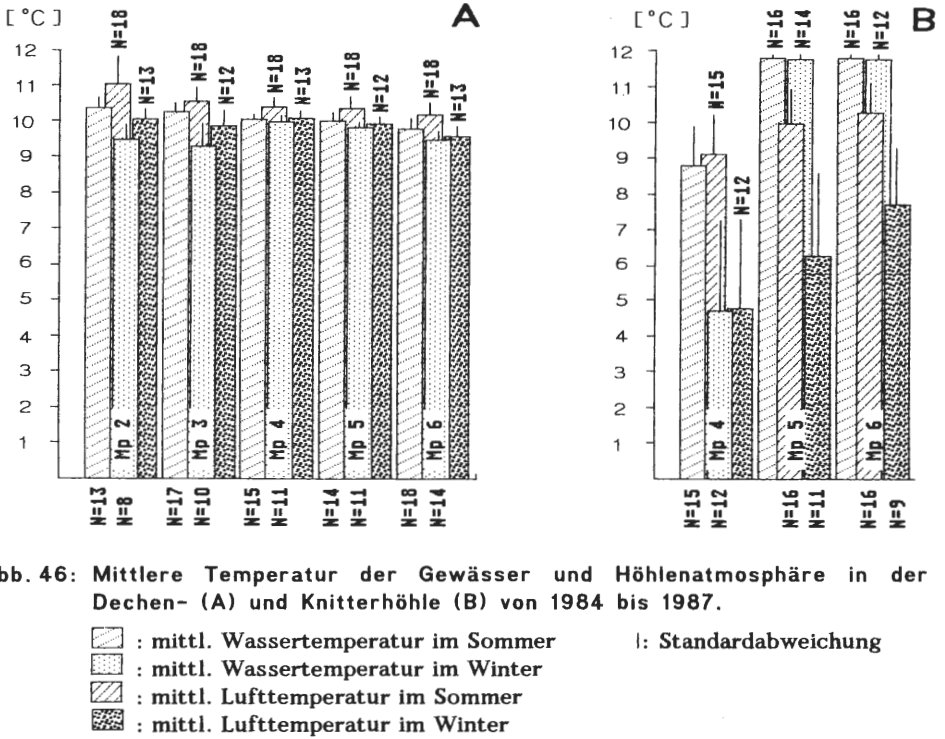


Abb. 46: Mittlere Temperatur der Gewässer und Höhlenatmosphäre in der Dechen- (A) und Knitterhöhle (B) von 1984 bis 1987.

Tropf- und Sickerwasser (z.B. in der Friedrichshöhle, Abb. 45 mit 7.6°C an Mp 2 bis 7.7°C an Mp 4). Die Temperaturschwankungen sind hier ebenfalls sehr gering. Ist die Dicke des Deckgesteins reduziert und existieren mehrere Tagöffnungen (dynamische Bewetterung), können größere Temperaturschwankungen beobachtet werden (an Mp 8 in der Volmehanghöhle schwankte die Wassertemperatur bei 11 Messungen zwischen 6.4 und 9.5°C ; an Mp 3.5 in der Friedrichshöhle lag hingegen das Minimum bei 7.6 °C und das Maximum bei 7.8°C, N = 26). Ist das vertikale Kluftsystem bei mächtigem Deckgestein nur gering ausgebildet, wie in der Dechenhöhle, so liegen andererseits die Temperaturen der Tropf- und Sickerwasser innerhalb der vadosen Zone nahe der Jahresdurchschnittstemperatur (zwischen 10 und 11°C; vgl. Abb. 46). Im Mittel liegen die Temperaturen der Tropf- und Sickerwassergerinne innerhalb der vadosen Zone deutlich höher als an ihrer Eintrittsstelle in das begehbare Höhlensystem. Sie erfahren entlang der Fließstrecke innerhalb der vadosen Zone eine Erwärmung. Temperaturschwankungen der Tropf- und Sickerwasser werden häufig durch Änderungen der Wasserschüttung verursacht (niedrige Temperaturen und entsprechend größere Differenz zur Lufttemperatur bei starker Schüttung; vgl. in Abb. 44 in der Kluterthöhle die erhöhte Standardabweichung der Temperaturschwankungen an der „Flutbachquelle“ Mp 37 und am „Flutbach“ Mp 36 sowie deren Zunahme von der „Regenbachquelle“ Mp 31 zum „Regenbach“ Mp 32).

Die Temperatur der Höhlenseen schwankt meist weniger stark als die der Tropf- und Sickerwasser. Seen, deren Temperatur nahe an der der Höhlenluft liegt und die geringe Schwankungen aufweist, sind gegenüber äußeren Einflüssen weitgehend isoliert (Abb. 47), d.h., sie liegen von Tagöffnungen und Wassereintrittsstellen meist entfernt. Die

Mittlere Temperatur

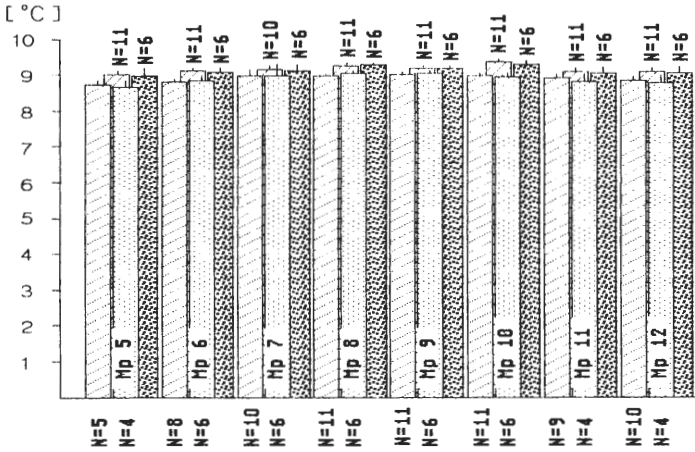


Abb. 47: Mittlere Temperatur der Gewässer und Höhlenatmosphäre in der Höhle hinter der Villa Ribbert von 1985 bis 1987.

- : mittl. Wassertemperatur im Sommer
 - : mittl. Wassertemperatur im Winter
 - : mittl. Lufttemperatur im Sommer
 - : mittl. Lufttemperatur im Winter
- |: Standardabweichung

Temperatur kann aber sprunghaft ansteigen, wenn z. B. ein tropfwassergespeister, isoliert liegender Höhlensee bei Hochwasser mit dem Grundwasser in Verbindung kommt. In dynamisch bewetterten Höhlen weist die Temperatur der Seen in der vadosen Zone oft der Lufttemperatur entsprechende Schwankungen auf (Abb. 46).

Die Grundwassertemperatur kann von Höhle zu Höhle sehr unterschiedlich sein. Sie ist oft durch sehr geringe Schwankungen charakterisiert. Meist ist die Temperatur höher als die der Tropf- und Sickerwasser und der von ihnen gespeisten Höhlenseen; zuweilen liegt sie auch oberhalb der mittleren Lufttemperatur der vadosen Zone, z. B. in der Kluterthöhle in Ennepetal (Mp 6 und Mp 19) zwischen 10.1 und 10.2°C (vgl. Abb. 43). In der Knitterhöhle liegt die Grundwassertemperatur mit 11.8°C deutlich höher als in der Kluterthöhle (vgl. Mp 5 und 6 in Abb. 46B). Temperaturschwankungen der Höhlenluft, wie sie hier besonders stark auftreten, wirken sich auf die Grundwassertemperatur kaum aus.

Niedrige und variable Temperaturen des Grundwassers deuten immer darauf hin, daß Einflüsse durch Gewässer oberirdischen Ursprungs (z. B. durch Tropf- und Sickerwasser) wirksam sind. Der große Temperaturbereich an Mp 13 in der Friedrichshöhle (7.4-11.3°C, N = 13) sowie die niedrige Temperatur am Mp 10 im Halver Hülloch (7.9°C, N = 18; Grundwassergerinne) und am Grauen Ort, H8Fm, (6.8°C) zeigen Störungen durch eindringendes Oberflächenwasser an.

Der Gehalt an gelöstem Sauerstoff und Kohlendioxid ist weitgehend von der Herkunft des Höhlengewässers abhängig. Neben einer direkten Wirkung der Temperatur auf die Löslichkeit der Gase beeinflussen wetterwechselabhängige Diffusionsvorgänge zwischen Höhlenatmosphäre und Gewässern, Mischungsvorgänge zwischen Gewässern aus unterschiedlichen Zonen sowie die Gewässerbelastungen mit organischen Substanzen die O₂- und CO₂-Konzentrationen (vgl. auch Kap. III. 4.).

Tropf- und Sickerwässer weisen zu Zeiten erhöhter CO₂-Konzentrationen in der Höhlenluft (während der Stagnationsphase in statisch bewetterten Höhlen von Mai bis Oktober) ebenfalls einen erhöhten Gehalt an gelöstem CO₂ auf. Je geringer die Entfernung zwischen Tropfwasserstelle und Boden (A- und B-Horizont) ist, um so genauer entsprechen sich der zeitliche Verlauf der CO₂-Konzentrationen von Wasser und Luft. -Dies kann z.B. in der Kluterthöhle bei der oberflächennah gelegenen Tropfwasserstelle an Mp 38 (Abb. 48) beobachtet werden; auch Mp 37 und Mp 8 weisen im Frühjahr ein CO₂-Maximum auf; die mittleren Sommerwerte liegen (mit Ausnahme des Mp 1) an allen Gewässern der Kluterthöhle deutlich oberhalb der mittleren Winterwerte (Abb. 50).

Die aus der Filterzone stammenden Tropf- und Sickerwässer sind also offensichtlich wichtige CO₂-Lieferanten sowohl für die Höhlenatmosphäre als auch für das Grundwasser. Sie führen bei statisch bewetterten Höhlen während der Stagnations-

CO₂-Gehalt

Mp.-Nr.: (2) [Vol.-%]; (38,37, 8, 1, 27, 3, 5, 6, 19) [mg/l]
 (Höhlenluft) (Höhlengewässer)

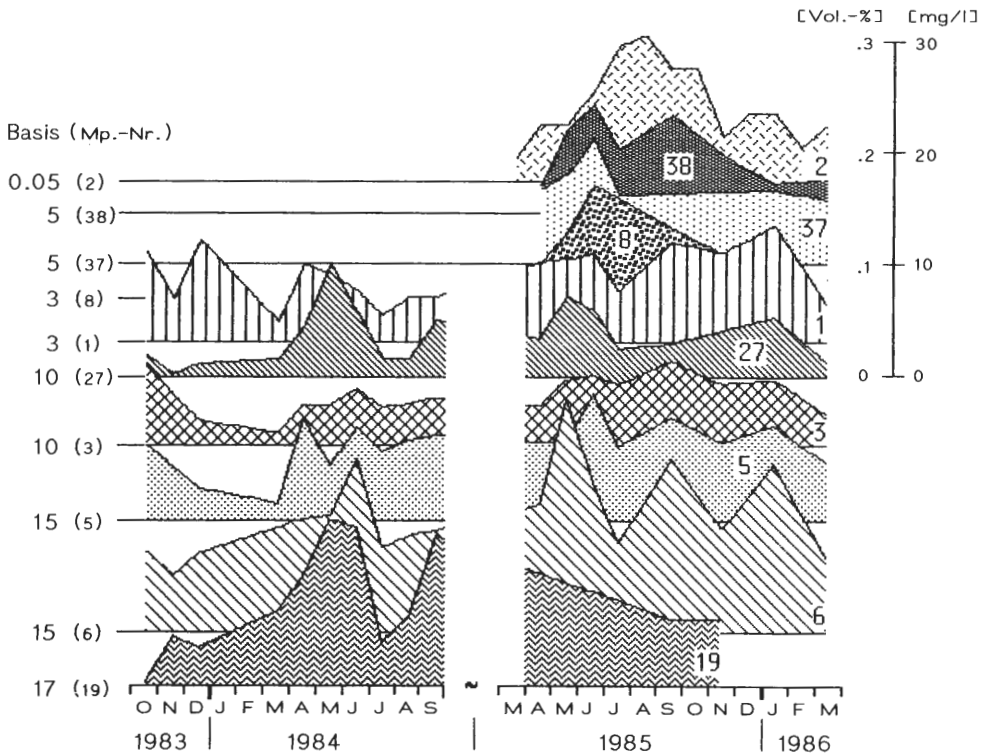


Abb. 48: CO₂-Gehalt der Höhlenatmosphäre in der Kluterthöhle am Ostsee (2) und der Tropf- und Sickerwässer der südlichen Zone (38, 37, 8) sowie der tropf- und sickerwassergespeisten Seen der vadosen Zone (1, 3, 5, 27) und des Grundwassers (6, 19). (Die Mp.-Nr. der Probeentnahmestelle ist zusätzlich innerhalb der Schraffur eingeblendet.)

phase im Sommer zu einer erheblichen CO₂-Anreicherung sowohl in der Höhlenatmosphäre als auch in den Höhlengewässern. Bei dynamischer Bewetterung wird die CO₂-Konzentration der Gewässer durch kontinuierliche CO₂-Abgabe an die Höhlenatmosphäre reduziert (dies ist eine wesentliche Ursache der Tropfsteinbildungen, vgl. TRIMMEL 1968).

Tropfwassergespeiste Höhlenseen können unregelmäßige CO₂-Schwankungen aufweisen (vgl. in Abb. 56 u. 57 die Schwankungen an Mp 1, Mp 27, Mp 3 und Mp 5), die möglicherweise durch Hochwassereinstrom und durch verstärkte Heterotrophen-Aktivität bewirkt werden (die Heterotrophen-Aktivität wird z. T. anthropogen verstärkt, vgl. auch Kap. III. 4. und IV. 6.). – Die beim Grundwasser auftretenden jahresperiodischen Schwankungen des CO₂ werden ebenfalls oft durch aperiodische Schwankungen großer Amplitude überlagert (Abb. 57; Mp 6 und Mp 19). Gegenüber den Tropf- und Sickergewässern der Filterzone weisen die vom Grundwasser gespeisten Seen noch stärker erhöhte CO₂-Konzentrationen auf (siehe in Abb. 50 Mp 6 und Mp 19). Auch das Grundwasser wird als CO₂-Lieferant der Höhlenatmosphäre angesehen (CAUER 1954).

CO₂-Gehalt [Vol.-%] Mp.-Nr.: (2) (Höhlenluft)

O₂-Gehalt [mg/l] Mp.-Nr.: (38,37, 8, 1, 27, 3, 5, 6, 19) (Höhlengewässer)

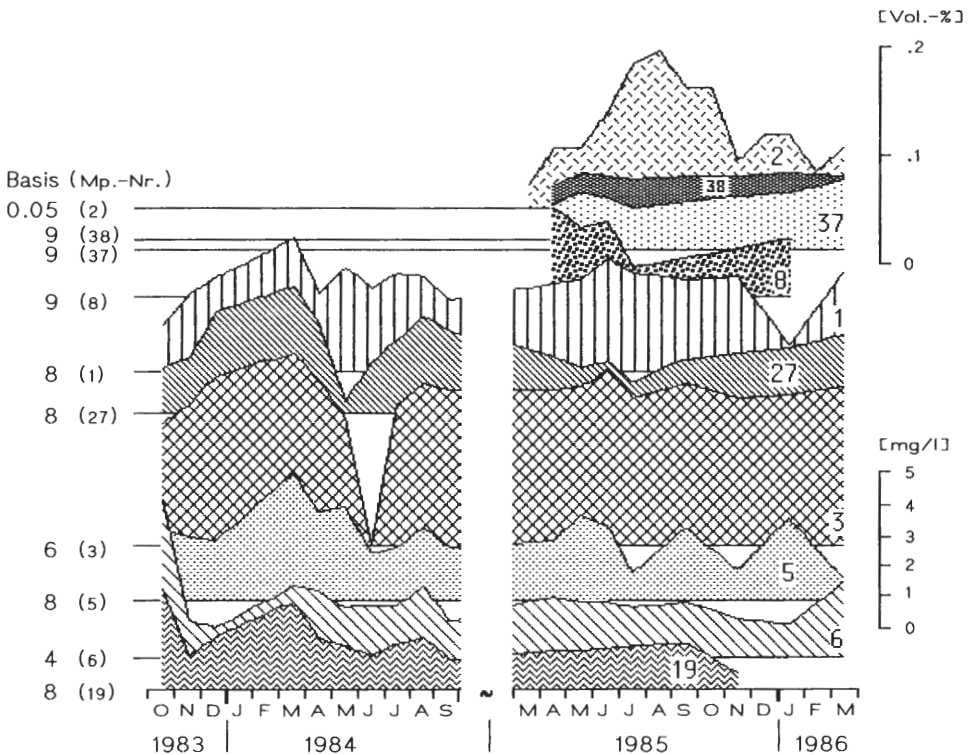


Abb. 49: CO₂-Gehalt der Höhlenatmosphäre in der Kluterthöhle am Ostsee (2) und O₂-Gehalt der Tropf- und Sickergewässer der südlichen Zone (38, 37, 8) sowie der tropf- und sickerwassergespeisten Seen der vadosen Zone (1, 3, 5, 27) und des Grundwassers (6, 19). (Die Mp.-Nr. der Probeentnahmestelle ist innerhalb der Schraffur eingblendet.)

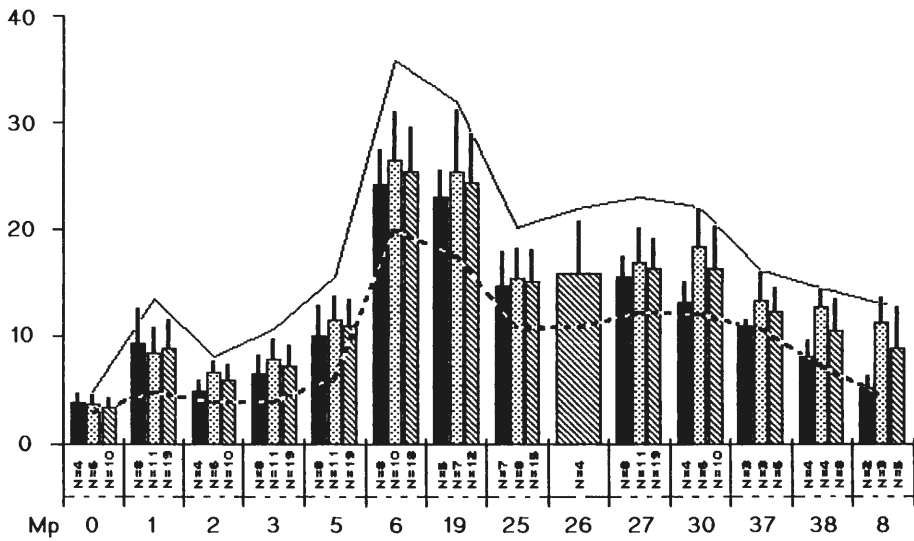
Der pH-Wert der Höhlengewässer ist von der Konzentration der überschüssigen Kohlensäure abhängig. Gewässer dynamisch bewetterter Höhlen weisen einen im Mittel etwas, zeitweise aber auch deutlich höheren pH-Wert auf als Gewässer aus statisch bewetterten Höhlen. Der mittlere pH-Wert des dynamisch bewetterten Höhlensees aus der Großen Sunderner Höhle (Mp 3) liegt bei 7.5 und der des Höhlenbachs (Mp 2) bei 7.4, während die mittleren pH-Werte der Gewässer der statisch bewetterten Kluterthöhle in Hagen mit 7.2 für die Tropf- und Sickergewässer (Mp 3, 4 u. 5) und mit 7.1 für den Höhlensee (Mp 6) deutlich niedriger liegen. In der Kluterthöhle (Ennepetal) war die Schwankungsbreite des pH-Wertes gering (Abb. 51); saure Werte wurden gelegentlich beim Grundwasser (Mp 19: pH 6.9-7.2) festgestellt. Im Jahresmittel liegen die Werte stets im leicht basischen Bereich bei pH 7.1; bei den tropf- und sickerwassergespeisten Seen und Bächen bei pH 7.3 (Abb. 51). Während der Sommermonate ist bei fast allen Höhlengewässern eine pH-Wert-Reduktion festzustellen, während im Winter der pH-Wert leicht erhöht ist (Abb. 51, 60, u. 62). Diese Differenzen zwischen Sommer und Winter sind in oberflächennahen Höhlenzonen (Mp 38, Mp 37 und Mp 8) größer als in den tieferen, grundwassernahen Höhlenteilen (Abb. 51).

Die Löslichkeit vieler Ionen ist vom pH-Wert abhängig. Erwartungsgemäß konnten für Tropf- und Sickergewässer (Mp 8, Mp 37 und an Mp 38 in der Kluterthöhle, Ennepetal) Beziehungen zwischen dem pH-Wert und den Konzentrationen von Kalzium, Magnesium (Abb. 52) bzw. dem Leitwert (Abb. 51) festgestellt werden. Entsprechend der erhöhten Wasserstoffionenkonzentration sind im Sommer oft auch die Konzentrationen der genannten Ionen und der Leitwert gegenüber den Winterwerten erhöht. Für die meisten der stehenden Gewässer der vadosen Zone und für das Grundwasser bestehen jedoch offensichtlich andere Verhältnisse (vgl. Abb. 51 und 52). Allgemein gilt für diese Gewässer, daß der Leitwert und die Ionenkonzentrationen im Jahresmittel mit zunehmender Tiefe und mit der Nähe zum Grundwasser ansteigen. – Bis auf Mp 8 wies die Hydrogenkarbonatkonzentration an allen Gewässern der Kluterthöhle nur aperiodische Schwankungen geringer Amplitude auf (Abb. 53). – Die Sulfatkonzentration zeigte erheblich größere aperiodische Schwankungen als die Konzentration des Hydrogenkarbonats (Abb. 53). – Für die Natrium- und Chloridkonzentrationen (Abb. 54) besteht ebenfalls keine Abhängigkeit von den jahresperiodischen Schwankungen des gelösten CO₂ und des pH-Wertes. Während die Konzentrationen für Natrium und Chlorid bei den Gewässern der Filterzone niedrig lagen, erreichten sie bei den Gewässern innerhalb der Grundwasserzone und in der Ennepe hohe Werte (vgl. Kap. III. 4.).

Schwankungen des gelösten Sauerstoffs lassen sich nicht mit bestimmten Phasen externer oder interner Wetterwechsel in Beziehung setzen, da sie jahresperiodisch sowohl bei statisch als auch bei dynamisch bewetterten Höhlen auftreten. Für viele Gewässer gilt, daß sie im Winter einen höheren Sauerstoffgehalt aufweisen als im Sommer (vgl. Abb. 50). Das Tropfwasser an Mp 38 der Kluterthöhle in Ennepetal (vgl. Abb. 49) besitzt jedoch über das Jahr einen gleichmäßig hohen Sauerstoffgehalt (99.5% Sättigung im Jahresmittel), obwohl hier jahresperiodische Schwankungen des Gehaltes an gelöstem CO₂ festgestellt wurden. Erwärmung führt hier zeitweise zur Übersättigung (bis zu 101% bei einem Mittelwert für die Sommermonate von 99.9%), während im Winter die mittlere Sättigung bei 99.0% liegt. Das Wasser der Mp 37 und Mp 8 weist jedoch während des Sommers eine deutliche Sauerstoffabnahme auf, die mit einer Zunahme des gelösten CO₂ einhergeht (vgl. Abb. 55); dies geht offensichtlich auf eine Erhöhung der Heterotrophenaktivität zurück. Insbesondere Seen können sowohl im Sommer (Mp 27 und Mp 3) als auch im Winter (Mp 1) starke Sauerstoffdefizite aufweisen, die von erhöhten CO₂-Konzentrationen begleitet werden (Abb. 56) und daher ebenfalls nicht durch Änderung der Höhlenbewetterung, sondern durch zeitweise

CO₂ gel.

[mg/l]



O₂ gel.

[mg/l]

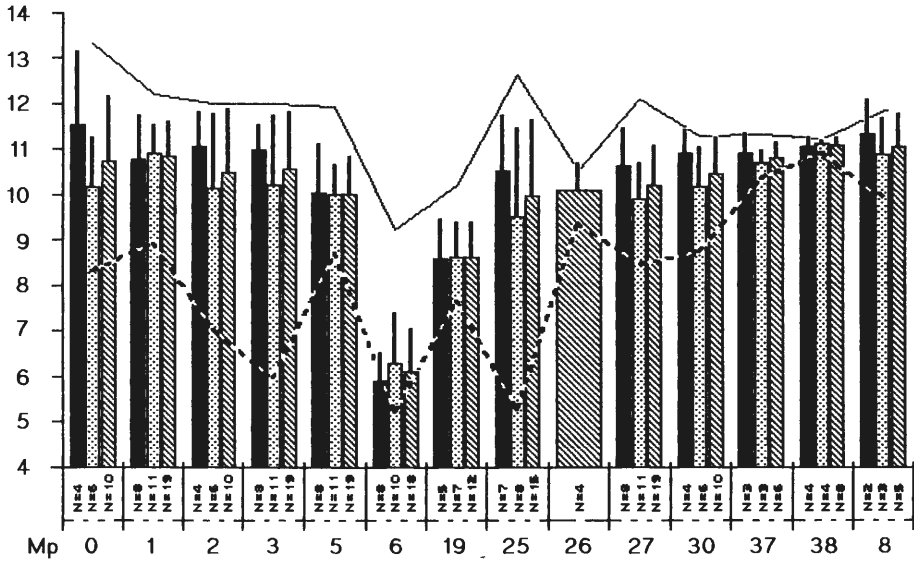


Abb. 50 : Gelöstes Kohlendioxid und Sauerstoff in Gewässern der Kluterthöhle. Die Messungen erfolgten von 1983 bis 1987.

- mittlere Winterwerte
- ▨ Jahresmittel
- ▩ mittlere Sommerwerte
- Standardabweichung
- Maximum
- - - Minimum

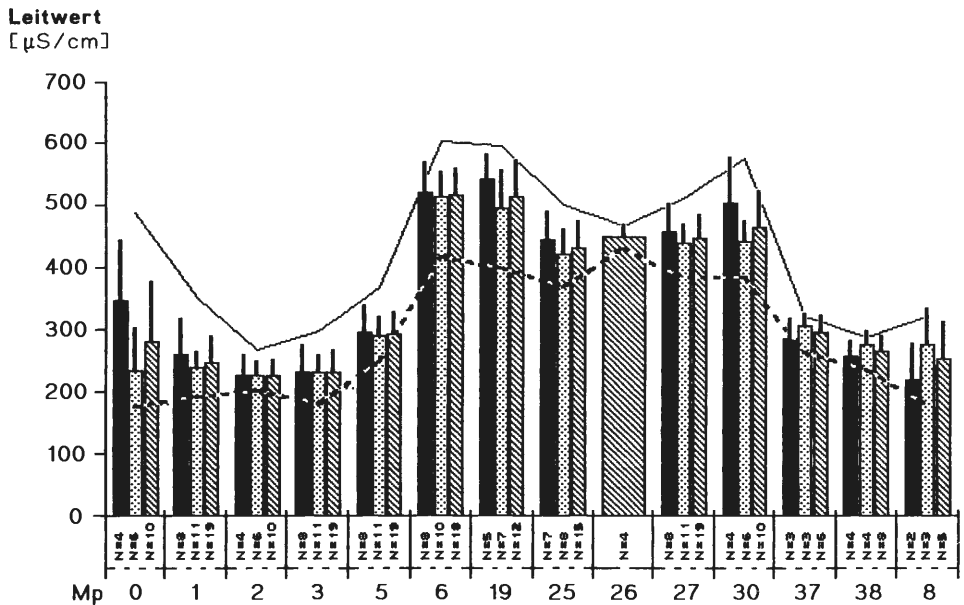
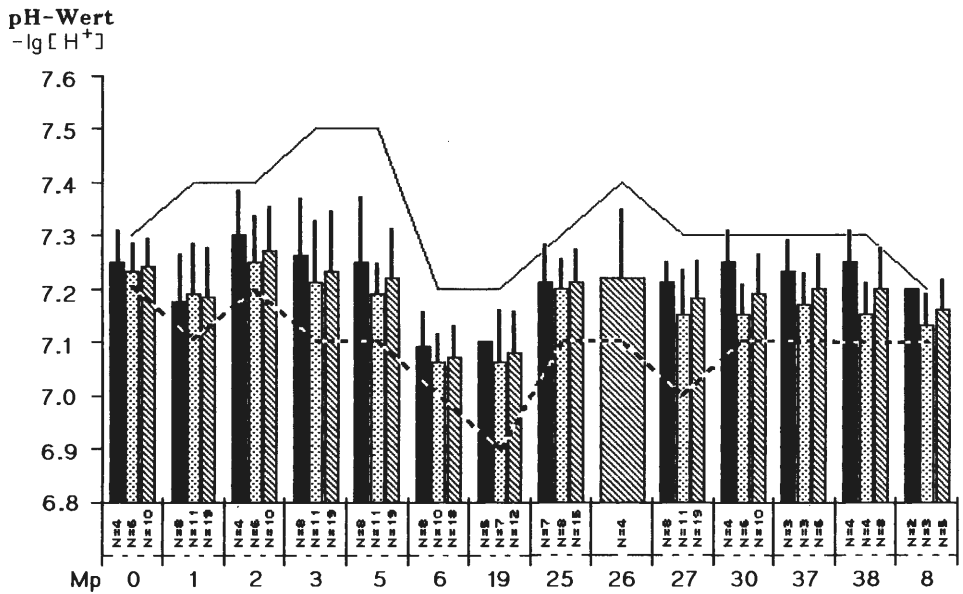


Abb. 51 : pH-Wert und Leitwert in Gewässern der Kluterthöhle. Die Messungen erfolgten von 1983 bis 1987.

- mittlere Winterwerte
- Jahresmittel
- mittlere Sommerwerte
- Standardabweichung
- Maximum
- Minimum

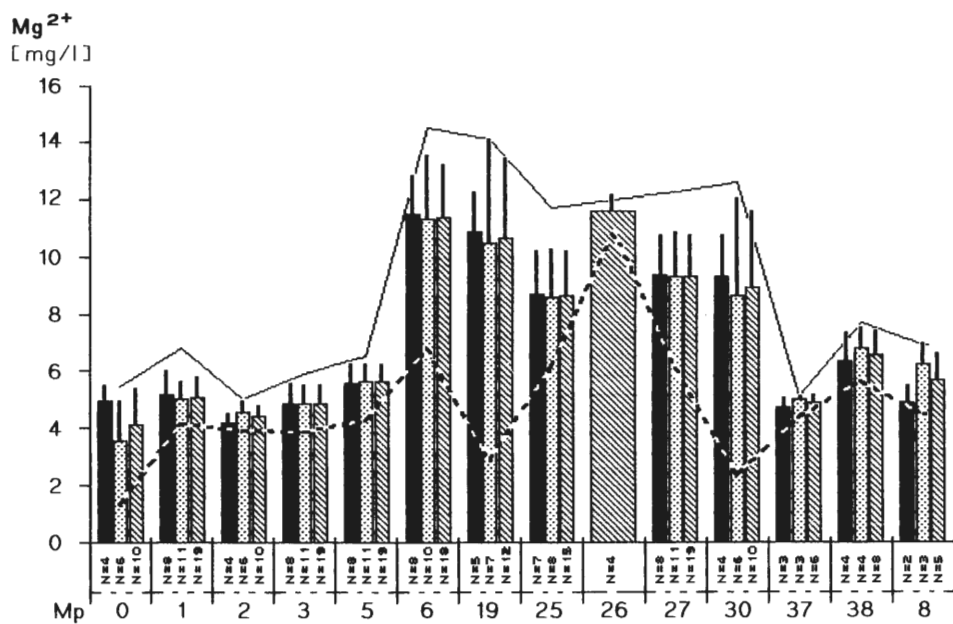
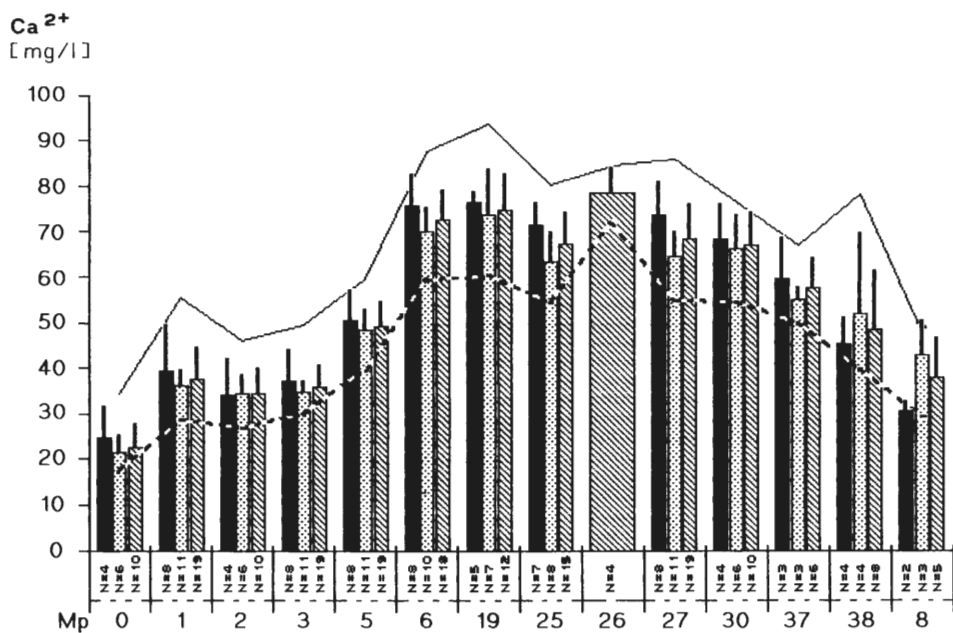


Abb. 52: Kalzium und Magnesium in Gewässern der Kluterthöhle. Die Messungen erfolgten von 1983 bis 1987.

- mittlere Winterwerte
 - Jahresmittel
 - Maximum
- mittlere Sommerwerte
 - Standardabweichung
 - Minimum

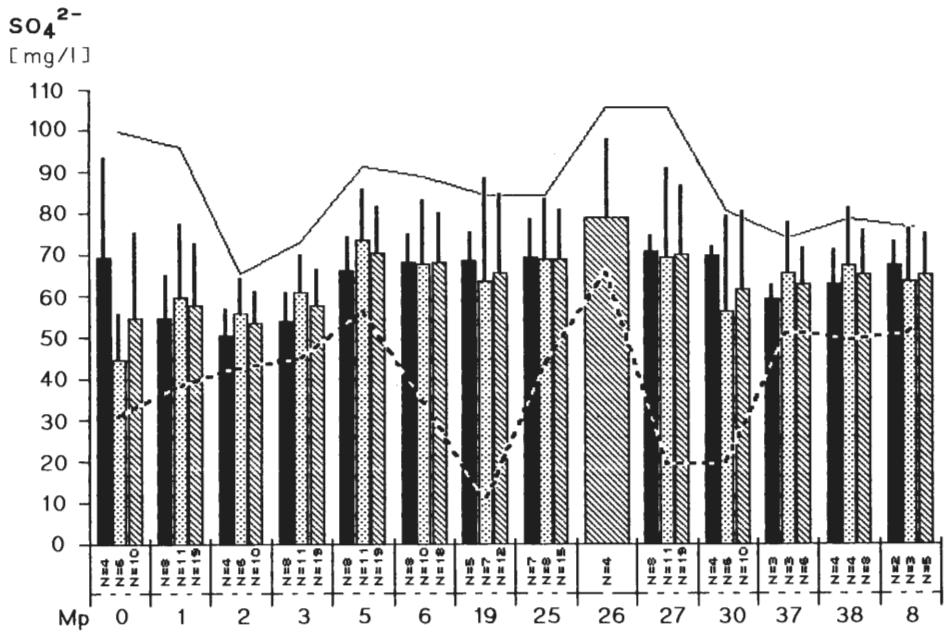
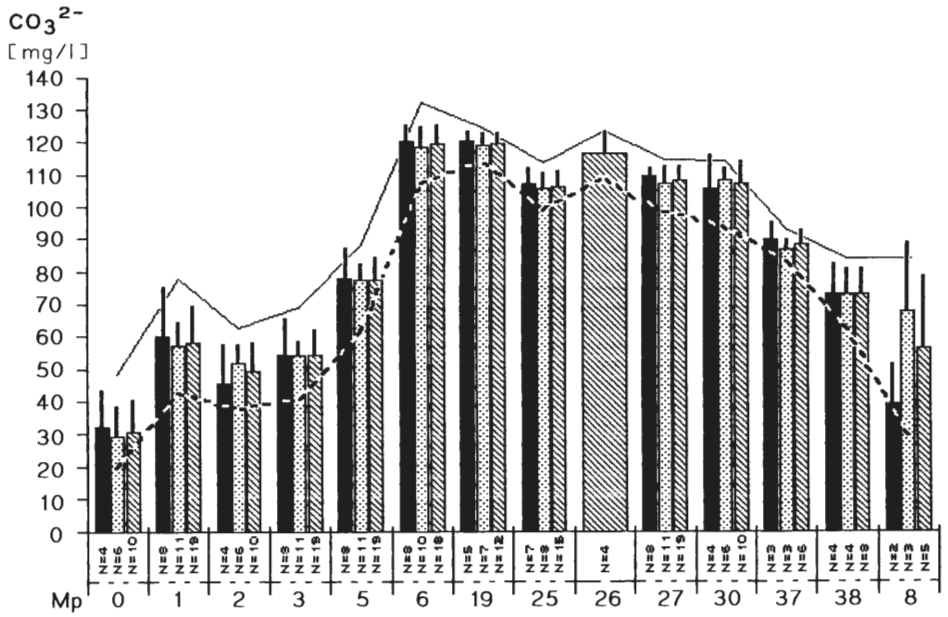


Abb. 53: Gebundenes CO₂ und SO₄ in Gewässern der Kluterthöhle. Die Messungen erfolgten von 1983 bis 1987.

- mittlere Winterwerte
- Jahresmittel
- mittlere Sommerwerte
- Standardabweichung
- Maximum
- Minimum

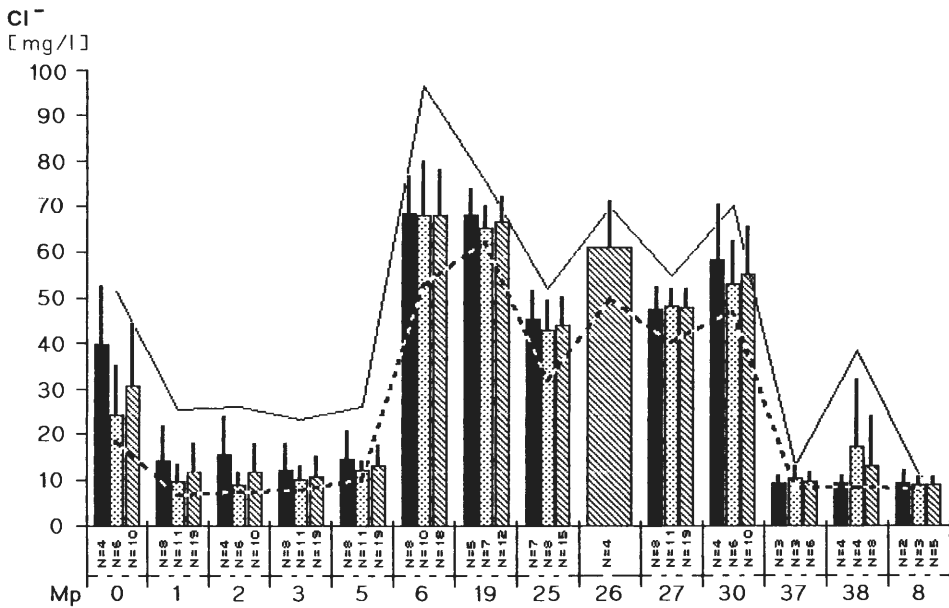
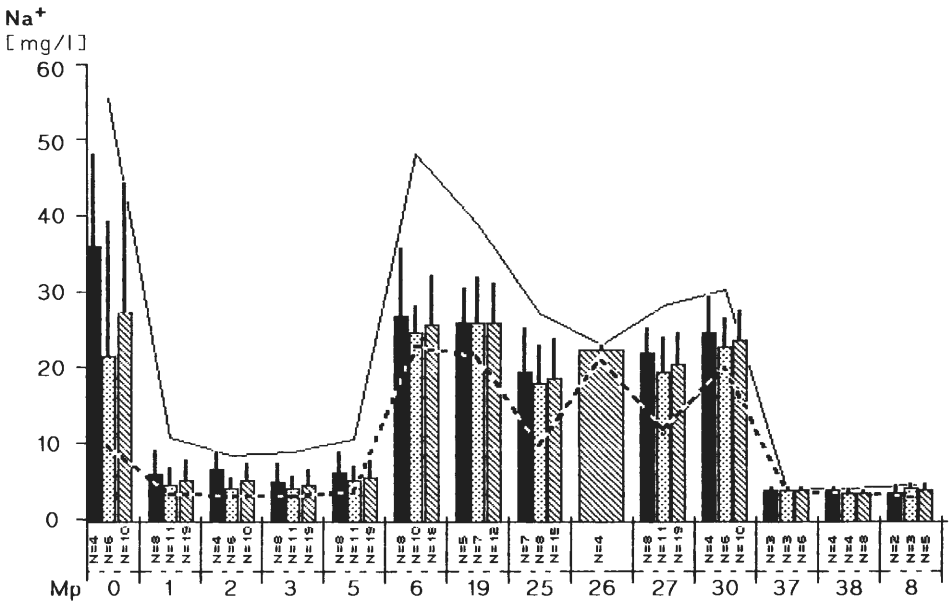
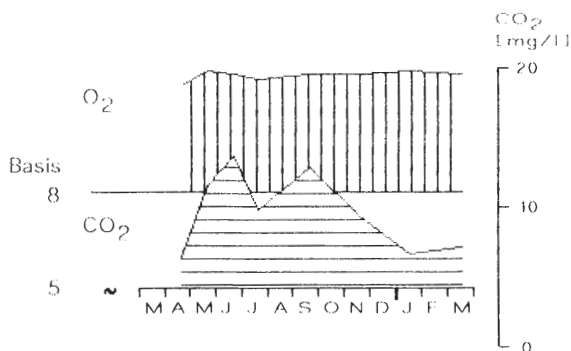


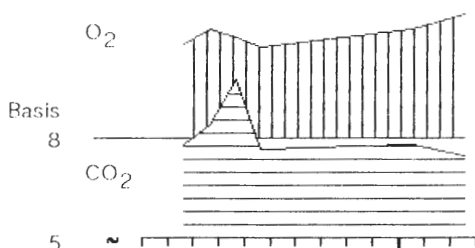
Abb. 54 : Natrium und Chlorid in Gewässern der Kluterthöhle. Die Messungen erfolgten von 1983 bis 1987.

- mittlere Winterwerte
- ▨ Jahresmittel
- ▩ mittlere Sommerwerte
- Standardabweichung
- Maximum
- - - Minimum

Mp 38



Mp 37



Mp 8

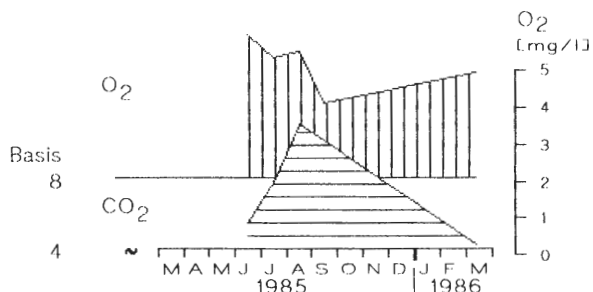


Abb. 55: CO₂-Gehalt und O₂-Gehalt der Tropf- und Sickerwässer der südlichen Zone (38, 37, 8), Kluterthöhle

erhöhte Sauerstoffzehrung verursacht werden (vgl. auch Kap. III. 4.). Gelegentlich können aber auch bei diesen Gewässern Übersättigungen auftreten. – Die Grundwässer und die vom Grundwasser gespeisten Gewässer weisen im Jahresmittel einen niedrigen Sauerstoffgehalt auf, der bei längerem Kontakt mit der Höhlenatmosphäre jedoch ansteigt (Mp 6: 56% und Mp 19: 79%; vgl. auch Abb. 50). Die Schwankungen des Sauerstoffgehaltes sind bei diesen Gewässern deutlich geringer als die Schwankungen des gelösten CO₂ (Abb. 57). Bei dem sowohl vom Grundwasser als auch vom Tropf- und Sickerwasser gespeisten See am Nordostgang der Kluterthöhle (Mp 5) ist dieser Unterschied vermindert; die Schwankungen der Konzentrationen von Sauerstoff und Kohlendioxid verlaufen dort zeitweise phasengleich, aber nicht jahresperiodisch (Abb. 57). Die Schwankungen werden bei diesem See offensichtlich nicht durch Änderungen des Bewitterungsmodus oder der Heterotrophenaktivität, sondern durch Änderungen des Zuflusses verursacht. So konnte für diesen See während einer Hochwasserphase (verstärkter Tropfwasserzufluß) im Frühjahr 1984 eine drastische Sauerstoffzunahme

CO₂-Gehalt und O₂-Gehalt [mg/l] Mp.-Nr.: (1, 27, 3)

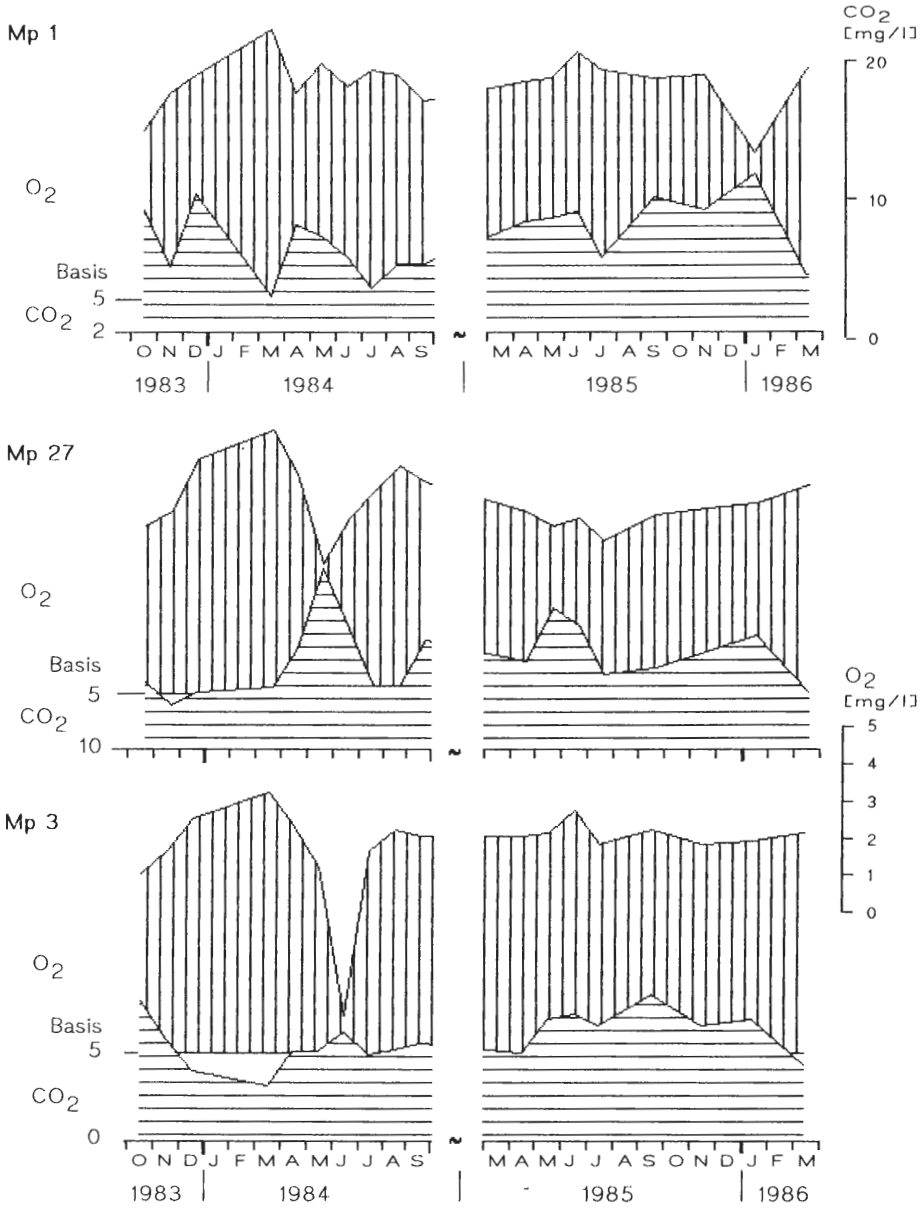


Abb. 56: CO₂-Gehalt und O₂-Gehalt der tropf- und sickerwassergespeisten Seen (1, 27, 3) in der Klutertöhle

und CO₂-Abnahme festgestellt werden (vgl. Abb. 57). Auch die Sauerstoffschwankungen im Wasser an Mp 19 haben diese Ursache, da hier ebenfalls bei Hochwasser sauerstoffreiche Tropf- und Sickergewässer verstärkt einmünden, sonst aber der Zufluß durch das Grundwasser erfolgt.

CO₂-Gehalt und O₂-Gehalt [mg/l] Mp.-Nr.: (5, 6, 19)

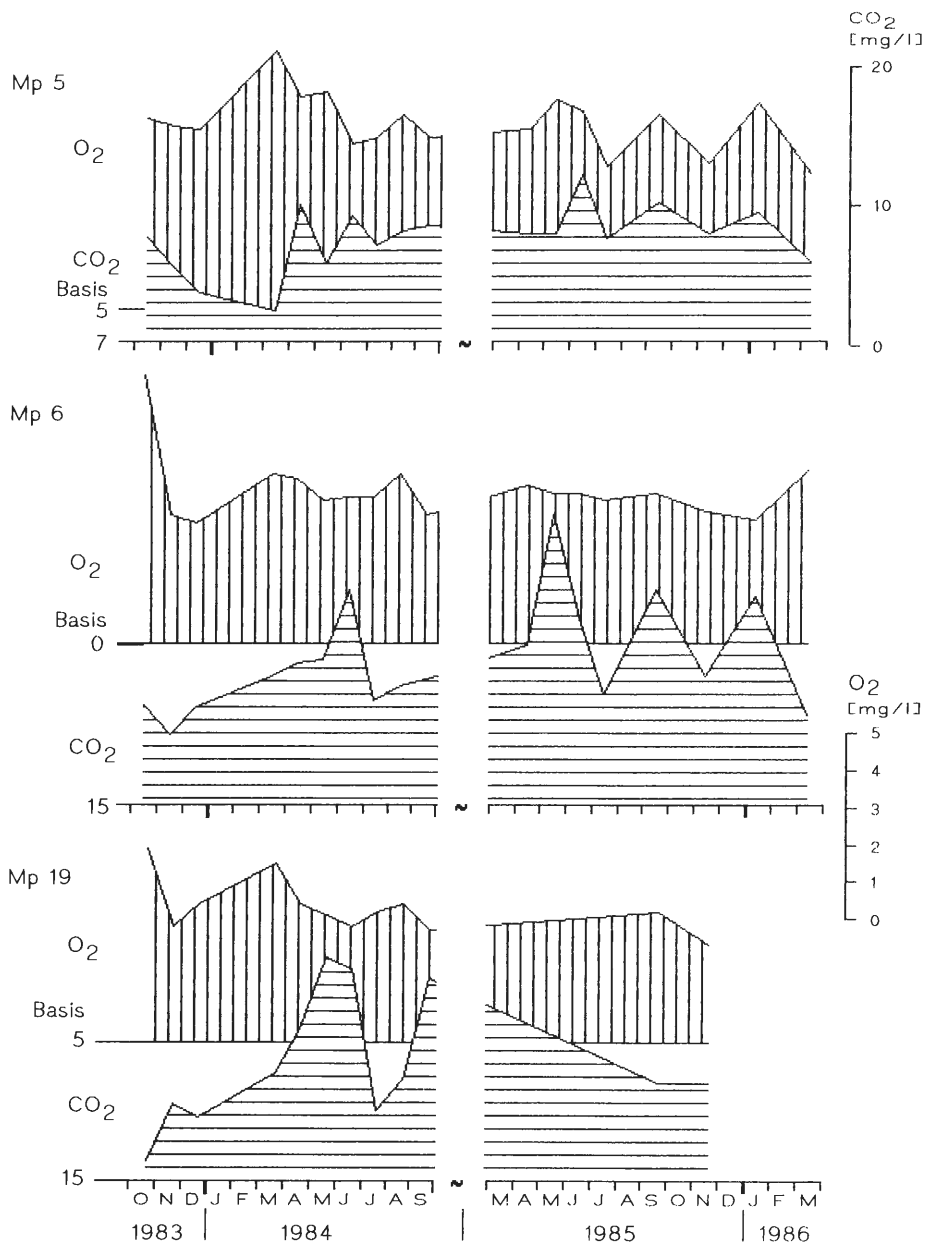


Abb. 57: CO₂-Gehalt und O₂-Gehalt des tropf- und sickerwassergespeisten Sees (5) und der Grundwässer (6, 19) in der Kluterthöhle

Die Gewässer in der Erlenhöhle (ausschließlich Tropf- und Sickergewässer) weisen erhebliche jahresperiodische Schwankungen des Chemismus auf. Sowohl die für diese Höhle typische Bewetterung (vgl. Kap. III. 3.1.) als auch die geringe Gesteinsbedeckung führen dazu, daß im Winter (aktive Bewetterungsphase) und Frühjahr (nach Einsetzen der

Schneesmelze) die Abgabe von CO₂ aus den Höhlengewässern erleichtert ist, während die Zuführung durch Tropf- und Sickerwasser reduziert ist. Im Sommer ist die CO₂-Abgabe des Wassers wegen der erhöhten CO₂-Konzentration der Höhlenluft eingeschränkt; zusätzlich ist die CO₂-Produktion im A- und B-Horizont erhöht. Unterschiede zwischen den Sommer- und Wintermittelwerten der Konzentration des gelösten CO₂ sowie des pH- und Leitwerts konnten an den Gewässern des Südgangs (Mp 4.2 und 4.8) festgestellt werden (Abb. 60; zu den Konzentrationsschwankungen der Ionen vgl. Kap. III. 4.). -Jahresperiodische Schwankungen des Sauerstoffgehaltes traten nicht auf; vielmehr war von Januar bis Dezember 1986 eine stetige Abnahme des Sauerstoffgehaltes am Meßpunkt 4.2. festzustellen (Abb. 60); der mittlere Sauerstoffsättigungswert lag mit 69.7% an dieser Meßstelle (85.8% an Meßstelle 4.8) erstaunlich niedrig, was auf erhöhte Sauerstoffzehrung durch Heterotrophenaktivität zurückzuführen ist.

Zeitweise deutlich erhöhte pH-Werte wurden in der dynamisch bewetterten Dechen- und Knitterhöhle gemessen. Dort ist bei mehreren Seen (Dechenhöhle: Mp 2, 3 und 5) im Winter die mittlere CO₂-Konzentration niedriger als im Sommer (Abb. 61). – Entsprechende jahreszeitliche Unterschiede wurden auch für den pH- und Leitwert festgestellt (Abb. 62). Bei vorwiegend fließenden Sickergewässern, die bei geringem Wasservolumen eine große Oberfläche (Grenzfläche zur Atmosphäre) aufweisen (z. B. an Mp 5), treten ebenfalls große Unterschiede zwischen Sommer- und Winterwerten auf. Allgemein gilt auch für die Gewässer der Dechenhöhle, daß das Jahresmittel des CO₂-Gehaltes mit abnehmender Gesteinsdicke abnimmt (dies kann auch bezüglich des Leitwerts festgestellt werden, jedoch macht hiervon der See Mp 6 eine Ausnahme; vgl. Abb. 62).

Das Grundwassergerinne in der Knitterhöhle (Mp 5 und Mp 6) weist erwartungsgemäß eine wesentlich höhere CO₂-Konzentration als das Tropf- und Sickerwasser an Mp 4 auf. Im Sommer sind der CO₂-Gehalt und der Leitwert gegenüber den Wintermonaten leicht erhöht (Abb. 61 und 62). Die Unterschiede zwischen den mittleren pH-Werten im Sommer und Winter sind jedoch gering (Abb. 62); der pH-Wert ist im Jahresmittel deutlich niedriger als bei den Tropf- und Sickergewässern.

Die in beiden Höhlen gemessenen Sauerstoffkonzentrationen bestätigen die aus der Klutert- und Erlenhöhle vorgestellten Ergebnisse. Mit abnehmender Dicke des Deckgesteins (von Mp 2 nach Mp 6) nimmt die Sauerstoffkonzentration in den Gewässern der Dechenhöhle zu (Abb. 61); diese Sauerstoffzunahme wird von einer CO₂-Abnahme begleitet (s.o.). Das Grundwasser in der Knitterhöhle weist erwartungsgemäß die niedrigsten Sauerstoffkonzentrationen auf.

Die oben an Beispielen erläuterten hydrochemischen Charakteristika der Höhlengewässer aus verschiedenen Zonen wurden auch in weiteren westfälischen Höhlen angetroffen. Die zwischen den 3 Zonen und Oberflächengewässern auftretenden Unterschiede der Konzentrationen von CO₂, O₂ und des pH-Werts wurden weitgehend für folgende Höhlen bestätigt (vgl. auch Abb. 58 und 59):

Friedrichshöhle und Reckenhöhle im Hönnetal, Heinrichshöhle und Von-der-Becke-Höhle in Hemer, Schönebecker Höhle bei Lüdenscheid, Serkenroder Schacht, Große Sunderner Höhle, Antfelder Höhle, Veleadahöhle bei Velmede, Höhle hinter der Villa Ribbert, Kluterthöhle, Volmehanghöhle und Eisenhöhle in Hagen.

Für einzelne Höhlen konnten jedoch Besonderheiten des Wasserchemismus festgestellt werden, zu deren Verständnis weitere Erklärungen erforderlich sind (vgl. auch Kap. III. 4.). Im Hönnetal weist das Wasserloch im Kehlberg einen erstaunlich hohen Sauerstoffgehalt auf (Abb. 58); gleiches konnte für das Grundwasser im Stollen bei

Platthaus (kleiner OT-Stollen) und im Grauen Ort (H8Fm) festgestellt werden. In allen drei Fällen wird dies durch Sauerstoffaufnahme aus der Außenluft bewirkt. – Das Wasserloch im Kehlberg erhält sein Wasser von einem oberirdischen Gerinne, das wenige 100m oberhalb der Höhle aus Quellen hervorgeht, in der Kehlbergschwinde versickert und direkt in das Wasserloch im Kehlberg einmündet. Wasser der Ruthmecke, eines weiteren oberirdischen Gerinnes, mündet ebenfalls in das Wasserloch im Kehlberg ein (ZYGOWSKI 1987). Beide Oberflächengewässer dienen als Sauerstofflieferanten. Innerhalb der Höhle tritt dieses Wasser als stark strömendes Gerinne auf, so daß die Sauerstoffdiffusion zwischen Wasser und Höhlenluft begünstigt ist. Da das in das Wasserloch im Kehlberg einmündende Oberflächenwasser weitgehend unbelastet ist, erfolgt innerhalb der Höhle keine erhöhte Sauerstoffzehrung. – Obwohl die hydrologischen Verhältnisse der Friedrichshöhle ähnlich sind wie beim Wasserloch im Kehlberg, verursacht die starke Belastung des Hönnewassers im Grundwasserbereich der Friedrichshöhle eine sehr starke Sauerstoffzehrung (Abb. 58) (oberhalb der Friedrichshöhle tritt Hönnewasser in das Höhlensystem ein, erscheint innerhalb der Höhle an der Meßstelle Mp 13 und fließt an der Feldhofquelle wieder in die Höhle). – Das Grundwasser im Stollen bei Platthaus wird möglicherweise ebenfalls durch ein oberirdisches Gewässer beeinflusst, das aber als Sauerstofflieferant dient (vgl. hierzu Kap. III. 4.). – Die Wasserstelle im Grauen Ort, H8Fm im Felsenmeer, wird nur periodisch vom Grundwasser gespeist und besitzt intensiven Kontakt mit der Höhlenatmosphäre. Da diese Felsenmeerhöhle eine dynamische Bewetterung aufweist, ist für eine rasche CO₂-Abgabe (erhöhter pH-Wert) und Sauerstoffaufnahme gesorgt.

Auch die hydrochemischen Verhältnisse der Gewässer im Halver Hüllloch sind anders als erwartet (Abb. 59). Ein periodisch auftretendes Gerinne (Mp 2), das bei Regen über den Höhleneingang einfließt und im Eingangsbereich mehrere kleine Wasserstellen speist, besitzt aufgrund seiner relativ hohen organischen Fracht im Jahresmittel den geringsten Sauerstoffgehalt aller Gewässer im Hüllloch (vgl. Kap. III. 4.). Den relativ höchsten Sauerstoffgehalt weist hier sogar das Grundwassergerinne auf. Aus geologischen Gründen (das Hüllloch liegt in einer kleinen Kalklinse; vgl. auch Kap. III. 3.1.) handelt es sich bei diesem Gerinne nicht um tiefes Grundwasser, sondern um ein oberflächennahes Gewässer mit stellenweise gutem Kontakt zur Höhlenatmosphäre, so daß hier ein erhöhter Sauerstoffgehalt nicht überrascht. Bei dem Gewässer an Meßstelle Mp 4 handelt es sich um einen Höhlensee, der von Tropf- und Sickerwasser gespeist wird; dieses Wasser enthält im Jahresmittel die höchsten CO₂-Konzentrationen und einen für Tropf- und Sickerwasser typischen, nur wenig reduzierten Sauerstoffgehalt.

Zusammenfassend kann also folgendes festgehalten werden: Tropf- und Sickergewässer unterscheiden sich vom Grundwasser wesentlich in ihrem Wasserchemismus. Ein meist hoher Sauerstoffgehalt verbunden mit leicht erhöhten Konzentrationen des gelösten CO₂ und pH-Werte wenig oberhalb von 7 charakterisieren die Tropf- und Sickergewässer. Sie weisen je nach Mächtigkeit der Gesteinsbedeckung mehr oder weniger große jahreszeitliche Schwankungen der Temperatur, des CO₂-Gehaltes, des pH-Wertes und der Ionenkonzentrationen auf. Das Grundwasser enthält in der Regel nur relativ wenig Sauerstoff und eine hohe CO₂-Konzentration sowie entsprechend hohe Ionenkonzentrationen und einen niedrigen pH-Wert (stellenweise unter pH 7); die Temperaturschwankungen sind meist gering. Der Chemismus des fließenden Grundwassers wird nur wenig von der Höhlenatmosphäre beeinflusst (jahresperiodische CO₂-Schwankungen sind gering; bei längerem Kontakt mit der Atmosphäre wird mäßig O₂ aufgenommen und CO₂ abgegeben). – In allen Höhlengewässern können zeitweise Phasen erhöhter Sauerstoffzehrung auftreten, die zu einem Sauerstoffdefizit verbunden mit einer Erhöhung der

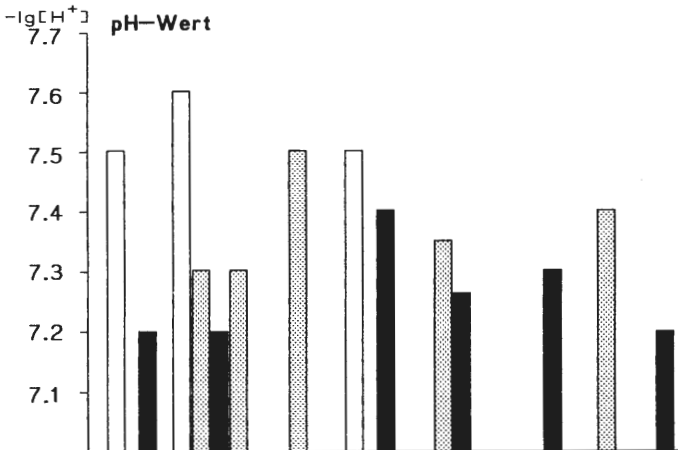
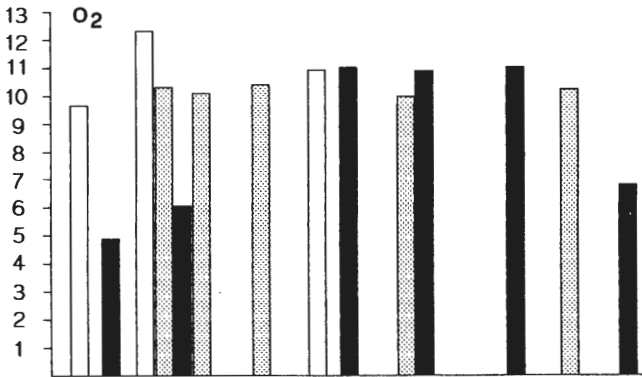
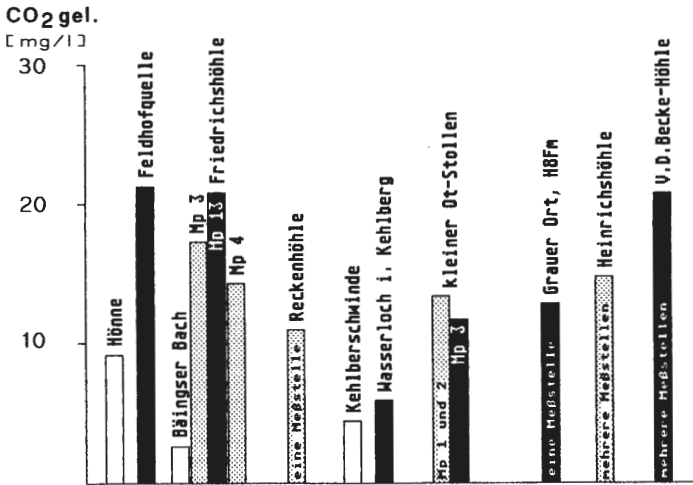


Abb. 58: Gelöstes CO₂, O₂ und pH-Wert aus Höhlen- und Oberflächengewässern des Hönnetals und Hemeraner Raums.

■ Grundwasser □ Oberflächenwasser ▨ Tropf- und Sickerwasser

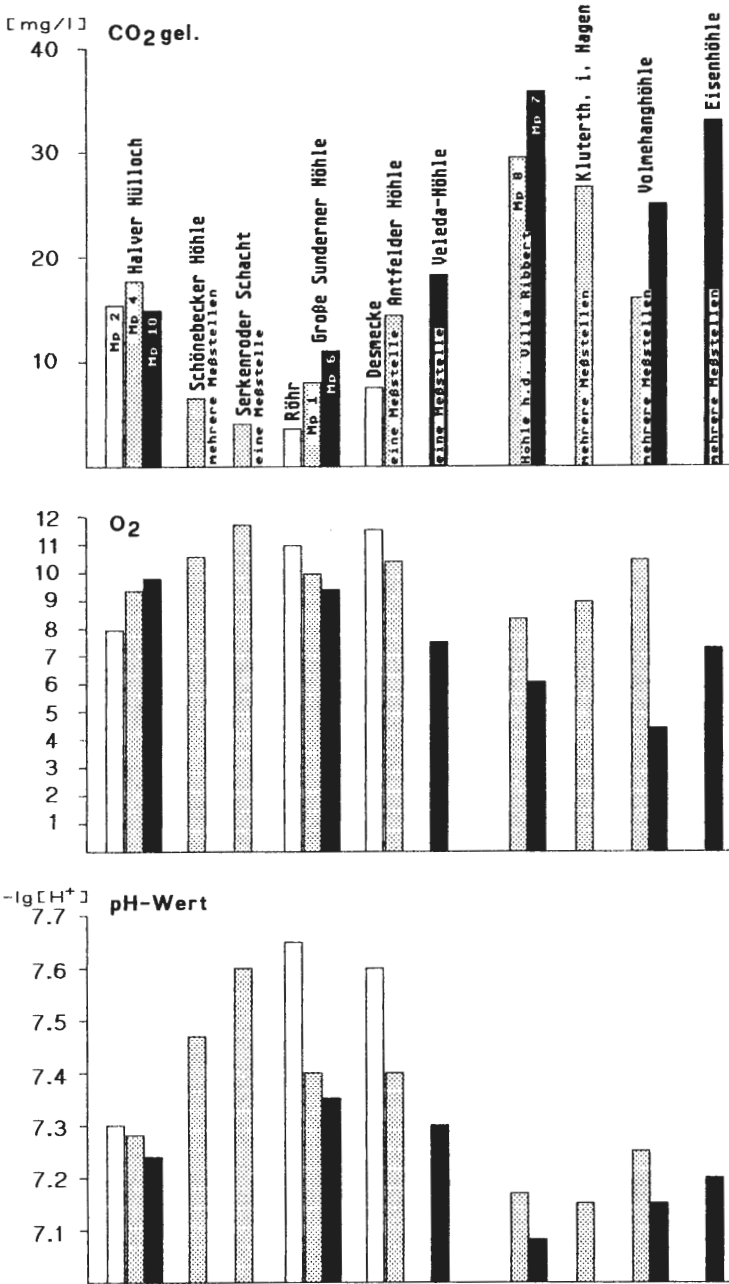


Abb. 59: Gelöstes CO₂, O₂ und pH-Wert aus Höhlen- und Oberflächengewässern des südlichen und östlichen Sauerlandes sowie des Hagener Raums.
 ■ Grundwasser □ Oberflächenwasser ▨ Tropf- und Sickerwasser

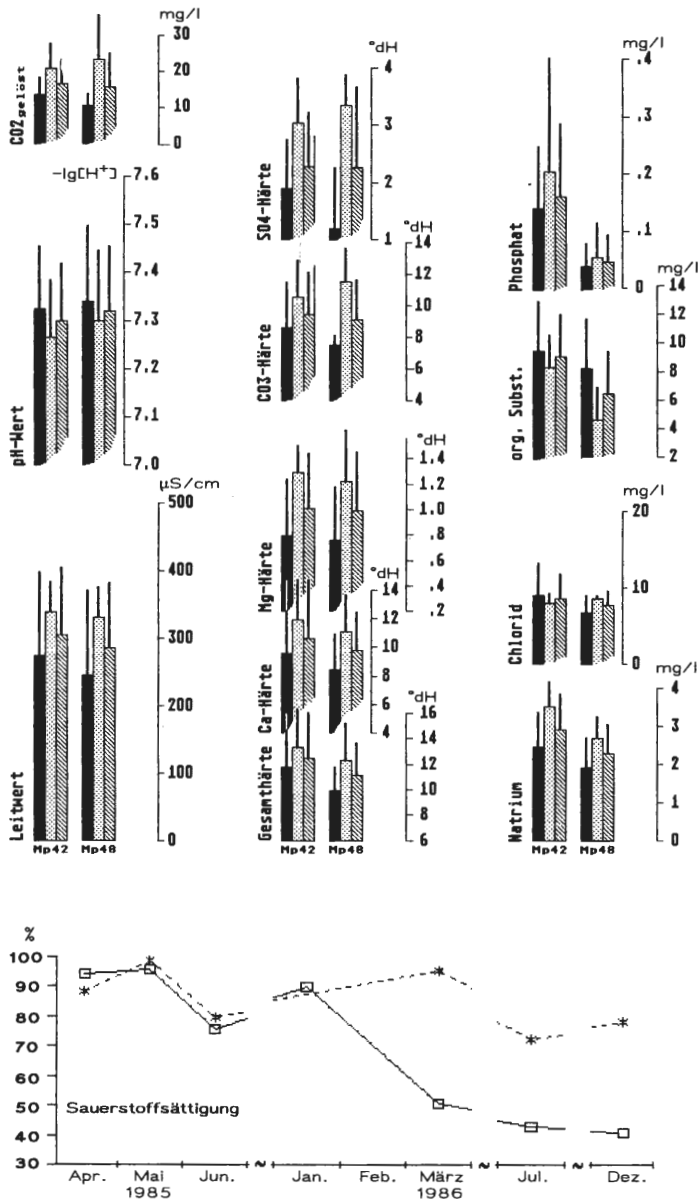


Abb. 60 : Physikochemische Parameter des Tropf- und Sickerwassers aus der Filterzone (Mp 4.2 und Mp 4.8) in der Erlenhöhle. Die Säulendiagramme geben das Jahresmittel (▨), das Sommermittel (□) und Wintermittel (■) sowie die Standardabweichung | an. Für den Sauerstoffgehalt sind die Meßwerte für Mp 4.2 (□) und Mp 4.8 (*), als Zeitdiagramm dargestellt.

CO₂-gel.

[mg/l]

60

Dechenhöhle

Knitterhöhle

50

40

30

20

10

M=2
M=3
M=5
M=2
M=4
M=7
M=4
M=4
M=8
M=3
M=3
M=6
M=4
M=4
M=8

M=2
M=4
M=7
M=4
M=4
M=8
M=4
M=1
M=5

O₂[mg/l]

13

Dechenhöhle

Knitterhöhle

12

11

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

Mp 2
Mp 3
Mp 4
Mp 5
Mp 6

Mp 4
Mp 5
Mp 6

Abb. 61: Gelöstes Kohlendioxid und Sauerstoff in Gewässern der Dechen- und Knitterhöhle. Die Messungen erfolgten von 1985 bis 1986

■ mittlere Winterwerte

▨ mittlere Sommerwerte

▧ Jahresmittel

| Standardabweichung

— Maximum

— Minimum

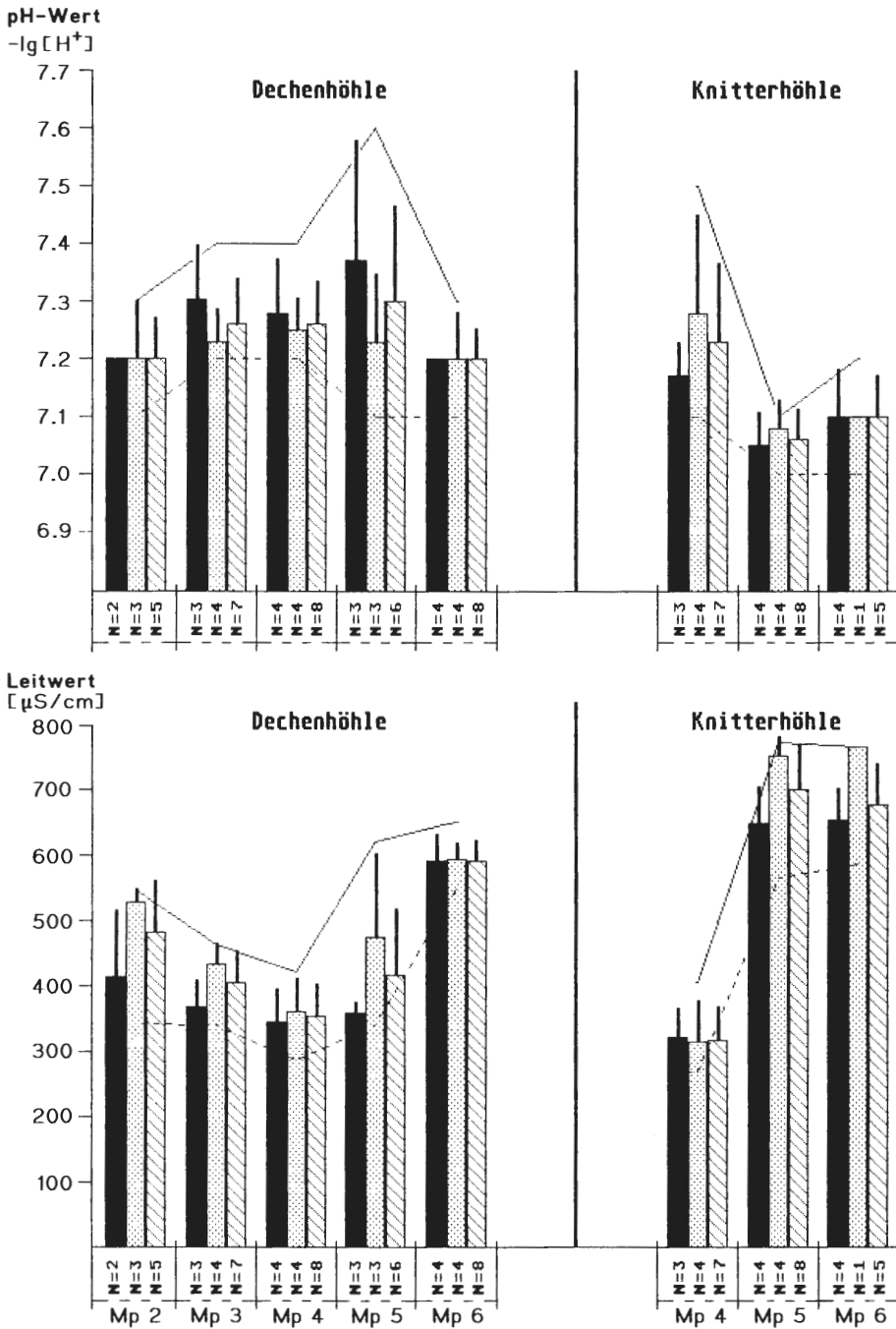


Abb. 62 : pH-Wert und Leitwert in Gewässern der Dechen- und Knitterhöhle. Die Messungen erfolgten von 1985 bis 1986

CO₂-Konzentration führen. Innerhalb der vadosen Zone werden sowohl bei Seen als auch bei Tropf- und Sickergewässern die Temperatur, der Gehalt des gelösten CO₂ und der pH-Wert auch von der Höhlenbewetterung beeinflusst. Die Gewässer der vadosen Zone unterscheiden sich daher von denen innerhalb der Filterzone, in denen die CO₂-Konzentration offensichtlich höher und der pH-Wert niedriger ist; die Schwankungen der meisten Parameter sind hier möglicherweise erhöht. Die Folge eines verstärkten Austausches der Höhlenatmosphäre mit der Außenluft ist ein erhöhtes Partialdruckgefälle zwischen dem im Wasser gelösten CO₂ und dem atmosphärischen CO₂. Erhöhte pH-Werte, die durch Wetterwechsel-bedingte Abgasung des gelösten Kohlendioxids aus dem Wasser verursacht werden, kommen deshalb hauptsächlich in dynamisch bewetterten Höhlen vor (Volmehanghöhle an Mp 10: pH 7.2-7.4 bei N = 7; Dechenhöhle an Mp 5: pH 7.1- 7.6 bei N = 6; Knitterhöhle an Mp 4: pH 7.1-7.5 bei N = 7 und Große Sunderner Höhle an Mp 1: pH 7.3-7.5 bei N = 2). In statisch bewetterten Höhlen liegen die pH-Werte meist nur wenig oberhalb von 7 (Kluterthöhle in Ennepetal an Mp 27: pH 7.0-7.3 bei N = 19; Kluterthöhle in Hagen an Mp 3: pH 7.1-7.2 bei N = 3 und Höhle hinter der Villa Ribbert an Mp 10: pH 7.1-7.2 bei N = 4). Die verstärkte CO₂-Abgabe aus dem Wasser an die Atmosphäre führt bei gesättigten Kalklösungen außerdem zur Abscheidung von Kalziumkarbonat (BÖGLI 1976, 1978). Diese Sinterbildungen können ihrerseits Veränderungen der Raumstruktur bewirken (z.B. durch Verlegung des kleinlumigen Lückensystems an der Grenzfläche zur Höhlenatmosphäre). Gelangen die innerhalb des intensiv bewetterten Höhlenteils ausgedünnten Lösungen (z.B. Tropf- und Sickergewässer) bei ihrer Abwärtsbewegung in nur schwach (z.B. statisch) bewetterte Bereiche mit einem erhöhten CO₂-Gehalt in der Atmosphäre, so können sie wieder CO₂ aufnehmen und werden dann korrosiv. In diesen Zonen treten die für dynamisch bewetterte Zonen typischen Tropfsteinbildungen gegenüber Korrosionsformen zurück. Die Bildungen von Sinter oder Korrosionsformen ist davon abhängig, ob der CO₂-Gehalt des Tropf- und Sickerwassers über oder unter jenem Wert liegt, der mit dem CO₂-Gehalt der Höhlenluft im Gleichgewicht steht (TRIMMEL 1968); das Vorkommen von reichhaltigen Sinterbildungen bzw. Korrosionsformen (vgl. Knitterhöhle und Friedrichshöhle in Kap. III. 3.1.) kann demnach für einzelne Höhlenzonen Hinweise auf den Isolationsgrad zur Außenluft geben.

4. Der Gewässerchemismus: geochemisch bedingte Verhältnisse und anthropogene Belastungen mit Schadstoffen.

Nachdem im vorausgegangenen Kapitel die Höhlengewässer hinsichtlich der Temperatur, des pH-Werts sowie der CO₂- und O₂-Konzentrationen charakterisiert wurden, wird im Folgenden die Abhängigkeit der ionalen Konzentrationen von der Geochemie des umgebenden Gesteins und von anthropogenen Belastungen besprochen.

Der Chemismus des Grundwassers der Kluterthöhle in Ennepetal (Honseler Schichten) wird von der benachbarten Ennepe beeinflusst. Erhöhte Konzentrationen von Natrium, Chlorid, Phosphat, Nitrat und Ammonium charakterisieren sowohl das Grundwasser der Höhle als auch die Ennepe (vgl. Abb. 63, 65 u. 66). Die Chlorid- und Nitratkonzentrationen sind im Grundwasser der Höhle sogar erheblich höher als in der Ennepe, während Nitrit und Ammonium wesentlich niedrigere Werte aufweisen. Im Grundwasser und in der Ennepe wurden erhöhte Werte an Eisen gemessen; im Wasser des „Königssees“ (Mp 19) wurde ein erhöhter Kupfergehalt festgestellt (vgl. Abb. 63 und 66). Das ionale Kalzium-Magnesiumverhältnis liegt beim Wasser der Ennepe bei 3,4, im

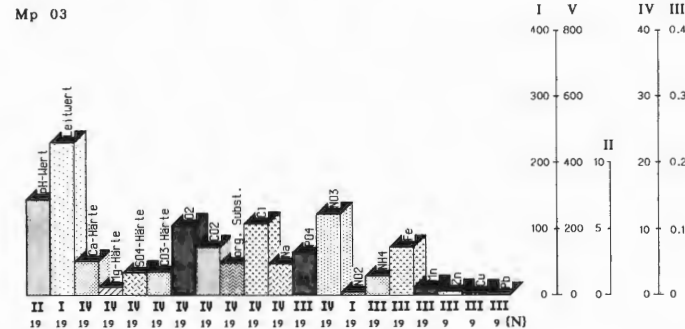
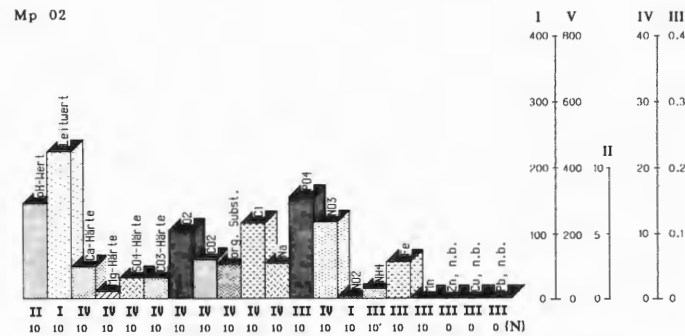
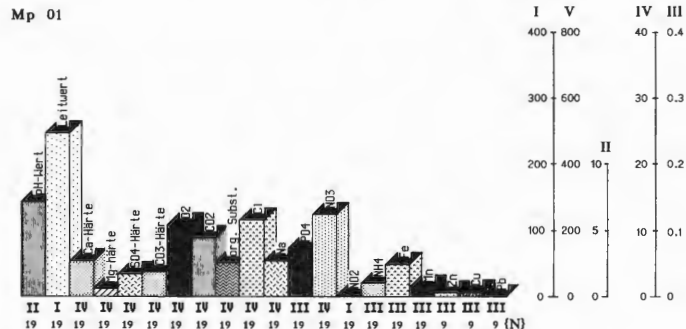
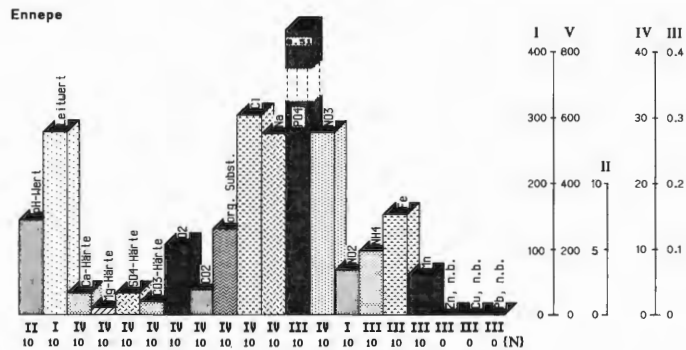


Abb. 63: Die physikochemischen Parameter der Ennepe und des Tropf- und Sickerwassers (Mp 1; Höhlensee) aus der Kluterthöhle in Ennepetal. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg[H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Abb. 64: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers (Mp 2 und Mp 3; Höhlensee) aus der Kluterthöhle in Ennepetal. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg[H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

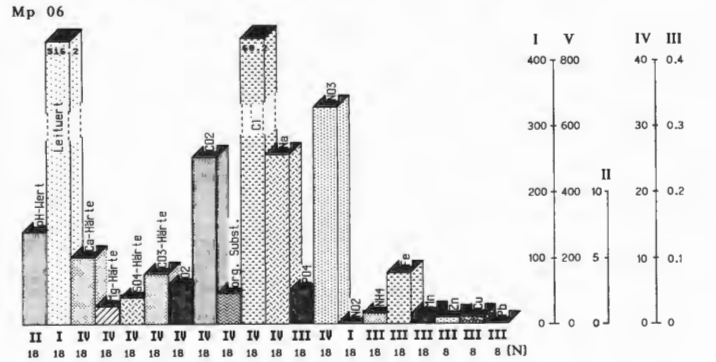
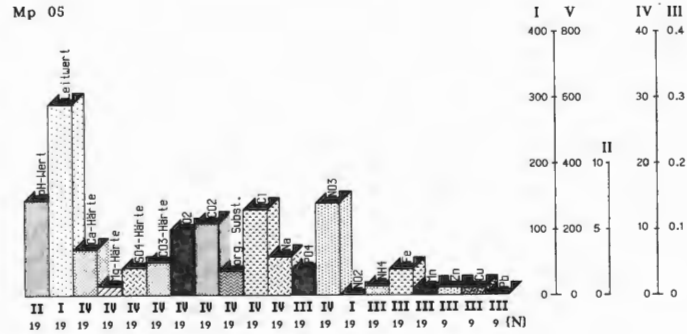


Abb. 65: Die physikochemischen Parameter des Tropf-, Sicker- und Grundwassers (Mp 5: Höhlensee; Mp 6: Grundwassergerinne) aus der Kluterthöhle in Ennepetal. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

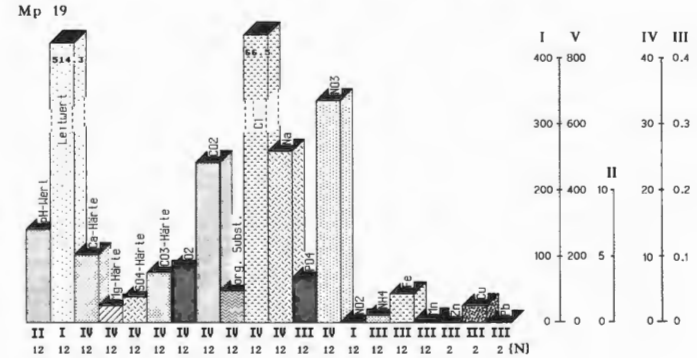
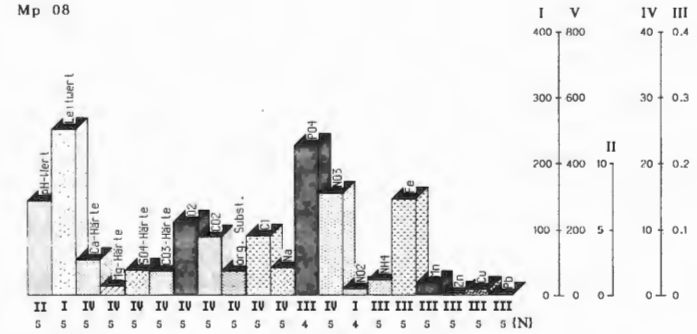


Abb. 66: Die physikochemischen Parameter des Tropf-, Sicker- und Grundwassers (Mp 8: tropfwassergespeicher Höhlensee; Mp 19: grundwassergespeicher Höhlensee) aus der Kluterthöhle in Ennepetal. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

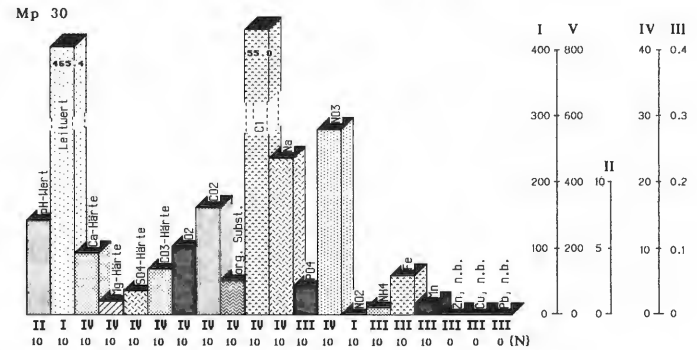
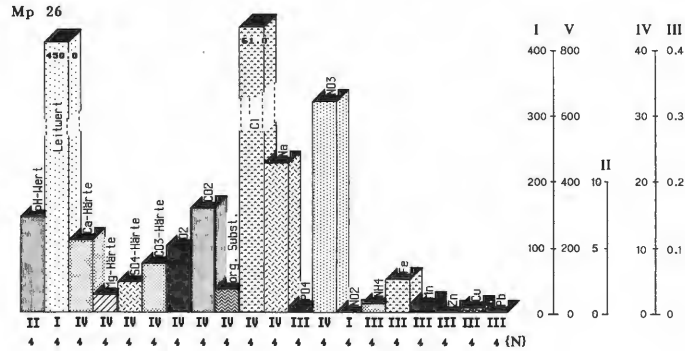
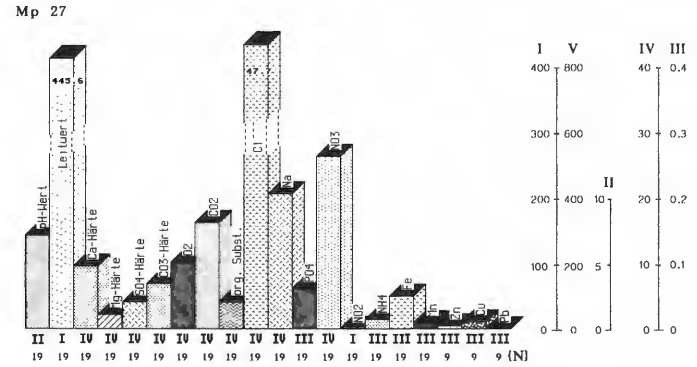
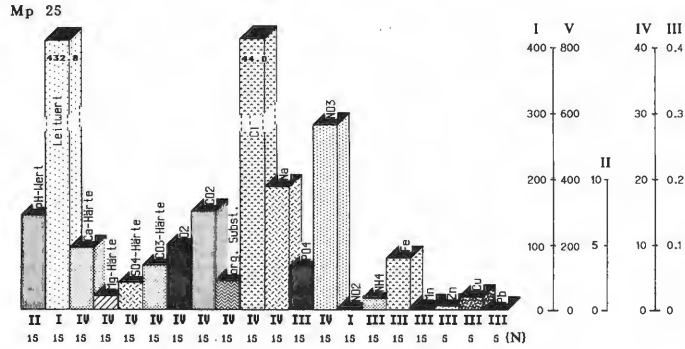


Abb. 67: Die physikochemischen Parameter des Sicker- und Grundwassers (Mp 25 und Mp 26; Höhlenseen) aus der Kluterthöhle in Ennepetal. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert [-lg[H ⁺]]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Abb. 68: Die physikochemischen Parameter des Sicker- und Grundwassers (Mp 27 und Mp 30; Höhlenseen) aus der Kluterthöhle in Ennepetal. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert [-lg[H ⁺]]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Grundwasser der Kluterthöhle bei 3.8 an Mp 6 und 4.2 an Mp 19. – Auch die Höhlenseen im Westseebereich werden über das Grundwasser von der Ennepe beeinflusst; dies gilt im hohen Maß für den direkt mit dem Grundwasser in Verbindung stehenden See Mp 26 (vgl. Abb. 66 und 67). Eine etwas größere Isolation vom Grundwasser besitzt der See Mp 25, gefolgt von den „Westseen“ I (Mp 27) und II (Mp 30; vgl. auch Abb. 68). Sämtliche Seen dieser Zone weisen einen stark erhöhten Natrium- und Chloridgehalt auf; auch die Nitratkonzentrationen sind deutlich erhöht. Das Kalzium-Magnesiumverhältnis steigt mit zunehmendem Isolationsgrad der Gewässer vom Grundwasser (es beträgt bei Mp 26: 4.1, bei Mp 27: 4.4, bei Mp 30: 4.6 und bei Mp 25: 4.7). Eine zeitweise auftretende Sauerstoffzehrung in den Höhlenseen der Kluterthöhle ist möglicherweise Folge einer überhöhten organischen Fracht. Auch die öfters von „Höhlenforschern“ durchgeführten Begehungen dieser Seen beeinträchtigen im hohen Maß die Wasserqualität. Eingebrachte Fremdstoffe werden hier nicht abtransportiert, sondern lagern sich im Sediment ab. Bei Begehungen werden Schadstoffe, die mittlerweile im Sediment abgelagert sind, erneut aufgewirbelt und in Lösung gebracht und können vermutlich dann sogar zu erheblich höheren Belastungen führen, als es das zeitweise Eindringen des Grundwassers bei Hochwasser vermag. – Die vorwiegend aus der Filterzone gespeisten Gewässer der südlichen Höhlenzone und im Bereich des „Ostsees“ (Mp 2) unterscheiden sich vom Chemismus des Grundwassers durch verringerte Natrium- und Chloridwerte und niedrigere Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen (Abb. 66 u. 69). Das ionale Verhältnis von Kalzium und Magnesium liegt hier meist höher als beim Wasser der Ennepe und beim Grundwasser, variiert aber von Gewässer zu Gewässer beträchtlich (für den „Ostsee“, Mp 2: 4.8, den „Orkus“, Mp 1: 4.5, den „Sumpfssee“, Mp 3: 4.4, Mp 5: 5.3, Mp 8: 4.0, Mp 38: 4.4 und Mp 37: 7.0). Die hohen Werte weisen auf eine Isolation vom Grundwasser hin; die große Variabilität zeigt, daß die Gewässer z.T. auch voneinander isoliert sind. Erhöhte Phosphatwerte an Mp 2 und Mp 8 sowie die an allen Gewässern dieser Zone leicht erhöhten Nitratwerte zeigen, daß auch hier die Gewässer schwach belastet sind (erhöhte Phosphatkonzentrationen weisen auf eindringendes Oberflächenwasser hin; WEGELIN 1966). – Auch die Tropf- und Sickergerwässer (Gewässer der Filterzone) sind also schon erkennbar anthropogen belastet.

Ein Fließwasser am Grunde einer Doline außerhalb der Erlenhöhle (Massenkalk) in einem landwirtschaftlich intensiv genutztem Gebiet wies eine hohe Stickstoffbelastung auf (Nitrat und Ammonium; Abb. 70). Auch der CO₂-Gehalt, die Kalzium- und Chloridkonzentrationen sowie der Leitwert waren erhöht. Es handelt sich um Grundwasser, das nur wenig Kontakt mit der Außenluft aufweist. – Die Erlenhöhle liegt oberhalb des Grundwasserspiegels; in ihr kommen ausschließlich Tropf- und Sickergerwässer vor. Entsprechend der oberflächennahen Lage weisen die Konzentrationen vieler Ionen jahresperiodische Schwankungen auf (z. B. Kalzium, Magnesium, Sulfat, Natrium, Chlorid und Phosphat; vgl. Abb. 60). Die Tropfwasserstelle Mp 3.5 (Abb. 70) weist niedrige Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen und einen geringen Leitwert auf. Eine hohe Phosphatkonzentration, deutlich erhöhte Werte der organischen Substanzen und zeitweise auftretende Sauerstoffdefizite, wie sie hier zu beobachten sind, treten in oberflächennahen Höhlengewässern vor allem innerhalb solcher Gebiete auf, die anthropogen belastet sind. Der leicht erhöhte Nitratwert weist auf Belastungen durch die Landwirtschaft hin. Noch deutlicher sind diese Belastungen im Bereich des Südgangs (Mp 4.2 und Mp 4.8; vgl. Abb. 71). Neben hohen Nitrat- und Phosphatwerten treten besonders an der Meßstelle Mp 4.2 erhöhte Eisen- und Mangankonzentrationen auf. Hier wurde 1986 ein zunehmendes Sauerstoffdefizit festgestellt. Die zunehmende Belastung der Gewässer in der Erlenhöhle ist eine Folge davon, daß in die Höhle nach

intensiven Niederschlägen und im Frühjahr während der Schneeschmelze über das Deckgestein des Südgangsystems Oberflächenwasser von einem tief eingefurchten Feldweg entlang landwirtschaftlicher Nutzflächen einfließt. – Die Tropf- und Sickergewässer der Erlenhöhle, insbesondere aber das Grundwasser des umgebenden Gebietes sind als belastet einzustufen.

Das Halver Hülloch liegt innerhalb der Honselers Schichten in einer kleinen Kalklinse. Aufgrund dieser geologischen Situation bestehen bei dieser Höhle hinsichtlich des Wasserchemismus Besonderheiten. Das Grundwassergerinne (Mp 10) des Hüllochs weist gegenüber den Tropfwasserstellen Mp 4 und 11 (vgl. Abb. 72 u. 73) einen reduzierten Leitwert und geringere Konzentrationen von Kalzium und Magnesium auf (vgl. hierzu auch Kap. III. 3.2.). Die Stickstoffverbindungen liegen in vergleichsweise niedriger Konzentration vor; schwach erhöht sind jedoch die Ammoniumwerte. Die organische Fracht ist gering; entsprechend niedrig liegen auch die Konzentrationen für Natrium, Chlorid und Phosphat. Erhöhte Werte wurden für Eisen und Mangan festgestellt, auch die Kupfer- und Zink-Konzentrationen sind leicht erhöht. Während das Wassereinzugsgebiet der Tropf- und Sickergewässer in der unmittelbaren Umgebung des Hüllochs liegt, erstreckt es sich für das Grundwasser möglicherweise weit über die Kalklinse hinaus. Die Tropf- und Sickergewässer treten im Hülloch als kleine Seen auf, die an den Meßstellen Mp 4 und 11 Sinterbecken darstellen und bei Mp 8 auf Sediment ruhen (vgl. die gegenüber Mp 8 erhöhten Kalziumkonzentrationen an Mp 4 und 11). Mit einem Ca-Mg-Verhältnis von 2.6 weicht das Gewässer Mp 8 von den übrigen Gewässern des Hüllochs erheblich ab (Ca-Mg-Verhältnis an Mp 4: 25.2, an Mp 10: 12.4 und an Mp 11: 16.0); ein erhöhter Phosphatgehalt deutet auf eine oberflächennahe Lage des Gewässers an Mp 8. Ein nach stärkeren Regenfällen auftretendes Gerinne, das innerhalb des Eingangsbereichs der Höhle kleinere Tümpel speist (Mp 2), weist eine erhebliche organische Fracht auf (Abb. 72). Es treten hier sehr hohe Phosphatkonzentrationen sowie ein sehr hoher Gehalt an Eisen und Mangan auf. Die Stickstoffverbindungen sind ebenfalls stark erhöht; vorwiegend liegt Ammonium vor. Entsprechend ist hier zeitweise eine hohe Sauerstoffzehrung festzustellen. Aufgrund der relativ niedrigen Nitratkonzentrationen im Tropf- und Grundwasser kann eine Belastung der Gewässer des Halver Hüllochs durch die Landwirtschaft weitgehend ausgeschlossen werden.

Die unter einem Sportplatzgelände liegende Kluterthöhle in Hagen (Honselers Schichten) enthält mehrere Tropf- und Sickergewässer. Der Bereich des natürlichen Eingangs wurde verschüttet. Die Höhle ist nur noch über einen künstlich geschaffenen Einstiegsschacht zu erreichen, der mit einem Deckel und einer Schotterabdeckung verschlossen ist, so daß externe Wetterwechsel nicht auftreten, die für einen Abtransport des gelösten CO₂ sorgen könnten. Über den mit Schrott und Bauschutt verfüllten Eingangsbereich der Höhle entwässert die Drainageanlage des Sportplatzgeländes in das bergwärts einfallende Höhlensystem; bei Kontakt mit der CO₂-reichen Höhlenatmosphäre (Eingangsbereich im Sommer: 0.18-0.39 Vol.-%; im Winter: 0.29-0.33 Vol.-%) werden die eingeleiteteten Wässer korrosiv. Niedrige pH-Werte, wie sie andernorts nur für das Grundwasser der Höhlen festgestellt wurden (vgl. Abb. 59), sind hier in Verbindung mit erhöhten Konzentrationen für Kalzium- und Magnesiumionen und hohen Leitwerten bereits für die eingangsnahen Tropf- und Sickergewässer (Mp 3 und 4, vgl. Abb. 74) kennzeichnend. Erhöhte Phosphatwerte, unterschiedliche Konzentrationen von Stickstoffverbindungen und sehr verschiedene Ca-Mg-Verhältnisse (Mp. 3: 9.5; Mp 4: 8.8; Mp 5: 4.3; Mp 6: 5.8) sowie Natrium- und Chloridkonzentrationen verdeutlichen die oberflächennahe und voneinander unabhängige Lage der einzelnen Tropfwasserstellen. Hohe, lokal auch sehr hohe Eisen- und Mangankonzentrationen wurden festgestellt

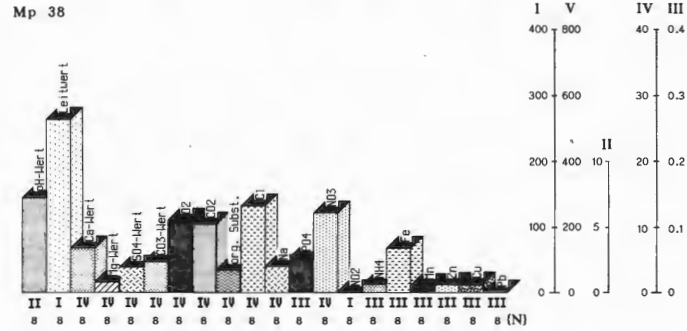
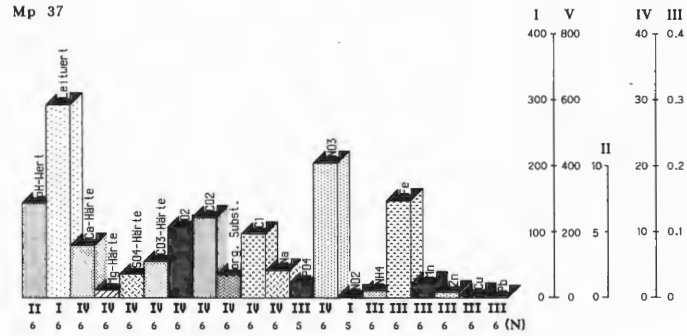


Abb. 69: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers (Mp 37 und Mp 38: Tropfwassergerinne) aus der Kluterthöhle in Ennepetal. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg[H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

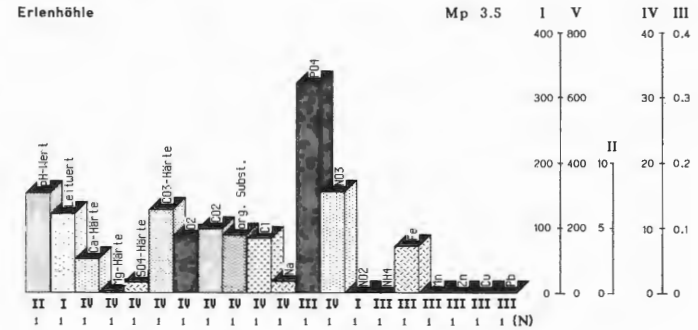
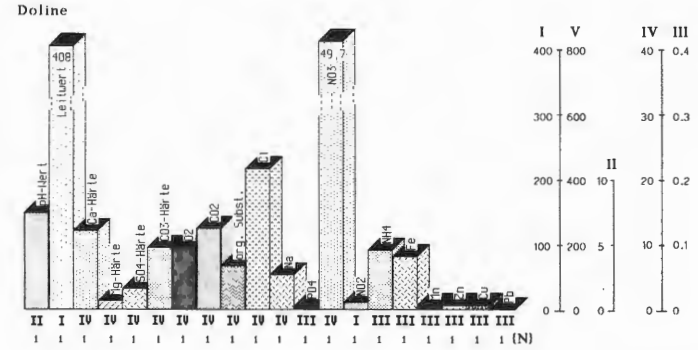


Abb. 70: Die physikochemischen Parameter eines Dolingewässers und des Tropf- und Sickerwassers an der Meßstelle Mp 3.5 in der Erlenhöhle bei Schwelm. Die Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 04.12.1986. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg[H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

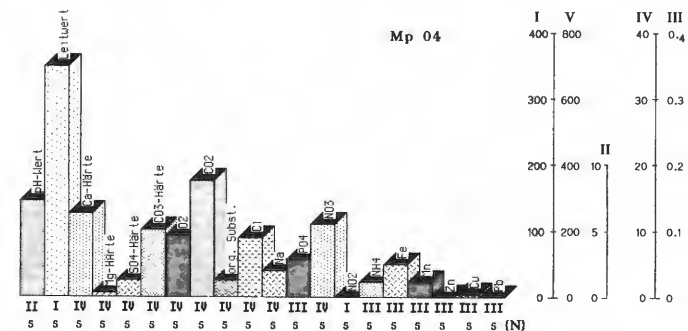
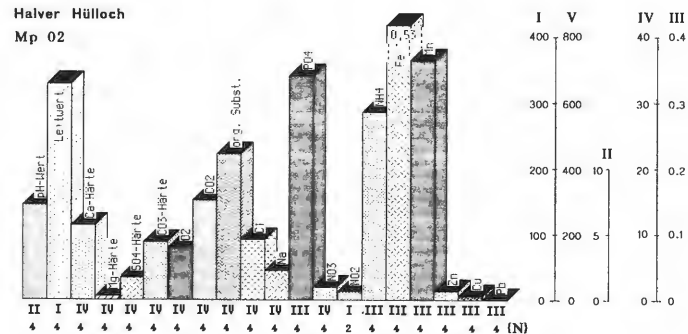
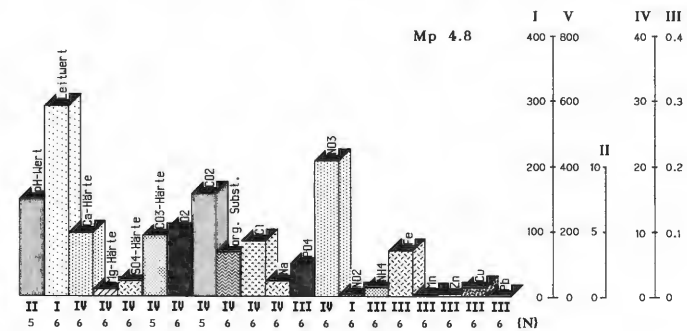
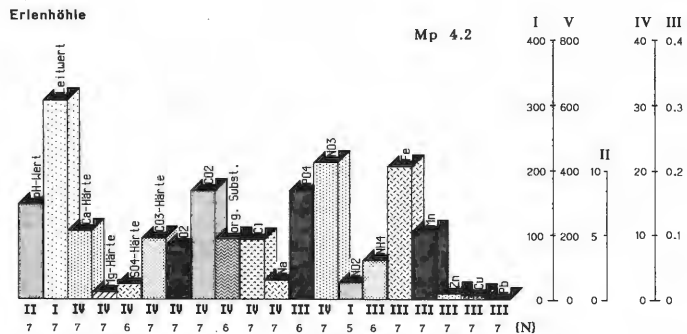


Abb. 71 : Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers an den Meßstellen Mp 4.2 und Mp 4.8 in der Erlenhöhle bei Schwelm. Die Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1985 bis 1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Abb. 72 : Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers im Halver Hülloch. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1985 bis 1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

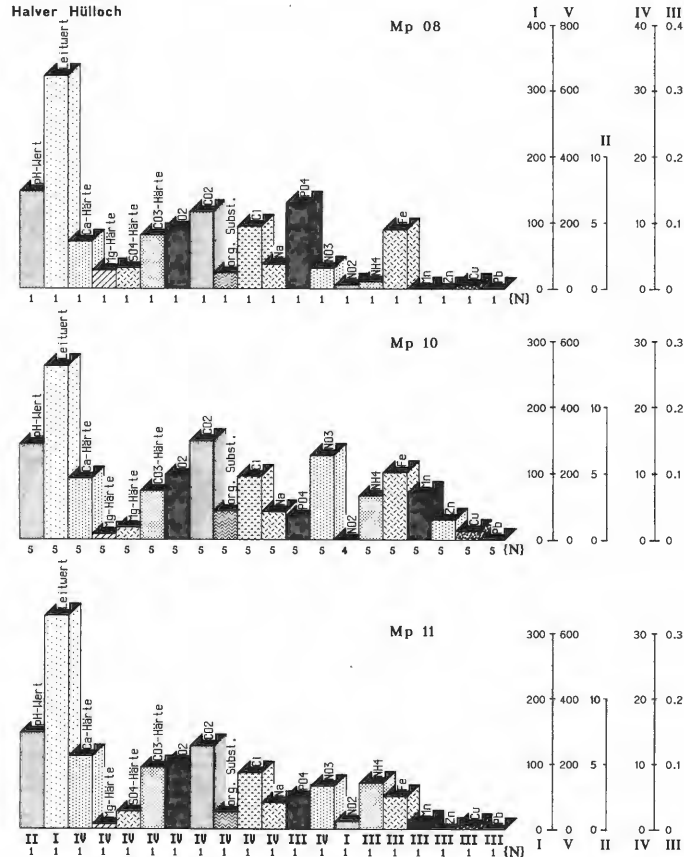


Abb. 73 : Die physikochemischen Parameter des Tropf-, Sicker- und Grundwassers im Halver Hülloch. Die dargestellten Werte von den Meßstellen Mp 8 und 11 entstammen einer Einzelanalyse vom 07.12.1986; die von der Meßstelle Mp 10 dargestellten Werte wurden aus Analysen von 1985 und 1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffern) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [µg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

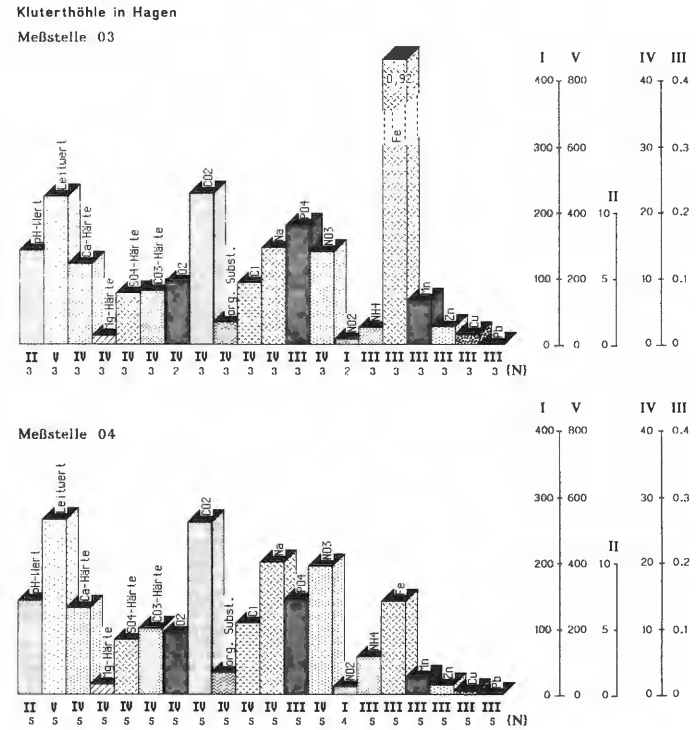
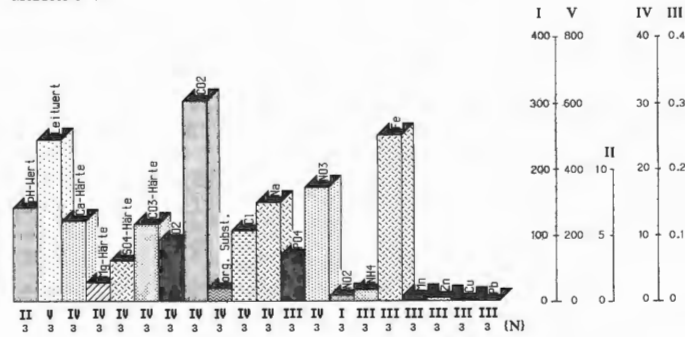


Abb. 74 : Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers in der Kluterthöhle in Hagen am Meßpunkt Mp 03 und 04. Die dargestellten Mittelwerte wurden für Mp 03 aus Einzelanalysen vom 31.08.1985, 12.01. und 08.03.1986 und für Mp 4 vom 27.05., 31.08., 02.11.1985, 12.01. und 08.03.1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffern) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

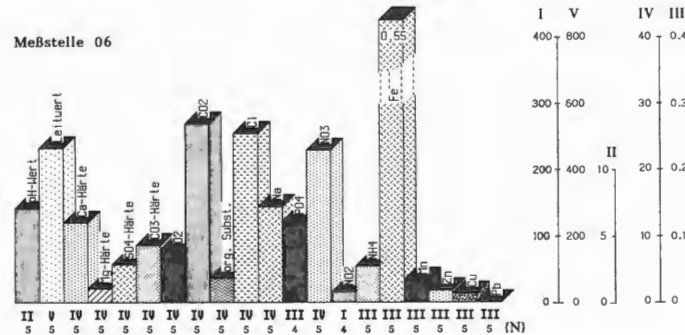
pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [µg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Kluterhöhle in Hagen

Meßstelle 05

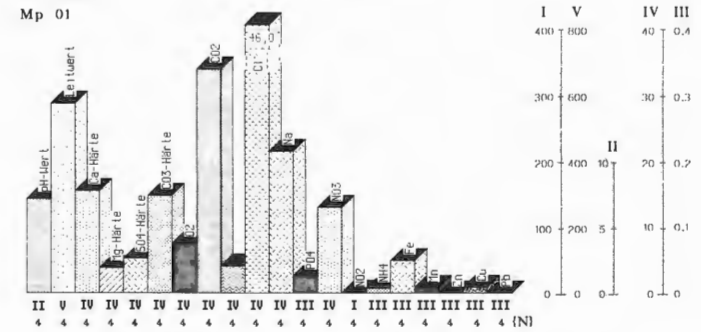


Meßstelle 06



Eisenhöhle

Mp 01



Mp 02

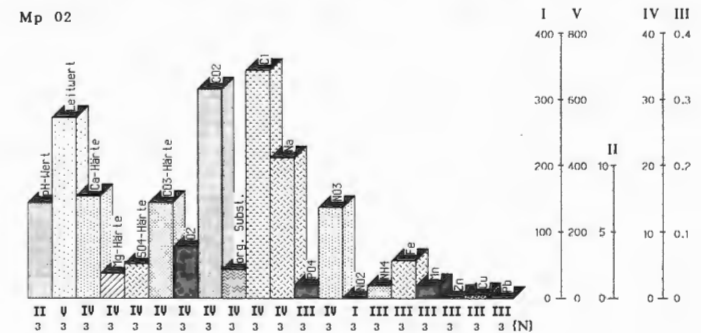
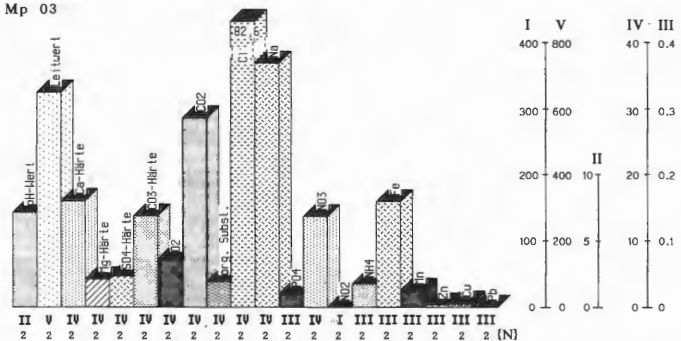


Abb. 75: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers in der Kluterhöhle in Hagen am Meßpunkt Mp 05 und 06. Die dargestellten Mittelwerte wurden für Mp 05 aus Einzelanalysen vom 27.05.1985, 12.01. und 08.03.1986 und für Mp 6 vom 27.05., 31.08., 02.11.1985, 12.01. und 08.03.1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert [-lg[H ⁺]]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [µg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	Cl ⁻ [mg/l]	CO ₃ -Härte [°dH]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Abb. 76: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers in der Eisenhöhle in Hagen. Die dargestellten Mittelwerte wurden aus Analysen vom 29.08., 27.10.1985, 10.01. und 02.03.1986 (Mp 1) und 27.10.1985, 10.01. und 02.03.1986 (Mp 2) gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert [-lg[H ⁺]]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Eisenhöhle
Mp 03

Mp 04

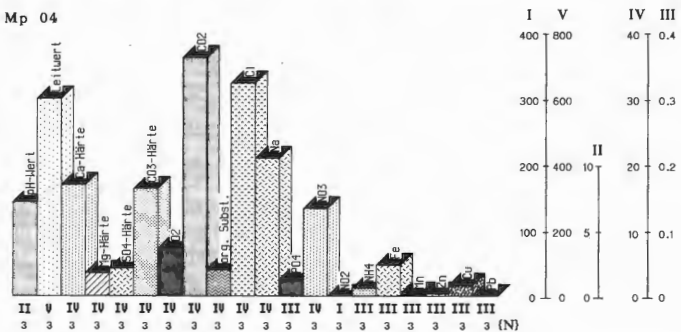


Abb. 77: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers in der Eisenhöhle in Hagen. Die dargestellten Werte wurden aus Analysen vom 10.01.1986, 02.03.1986 (Mp 3) und vom 29.08.1985, 27.10.1985 und 10.01.1986 (Mp 4) gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [μS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [μg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

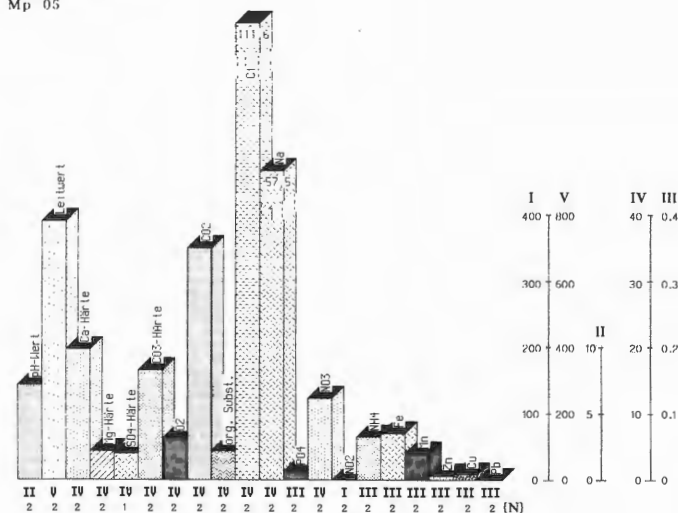
Eisenhöhle
Mp 05

Abb. 78: Die physikochemischen Parameter des Tropfwassers in der Eisenhöhle in Hagen. Die dargestellten Mittelwerte (Mp 5) wurden aus Analysen vom 10.01.1986 und 02.03.1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [μS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [μg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

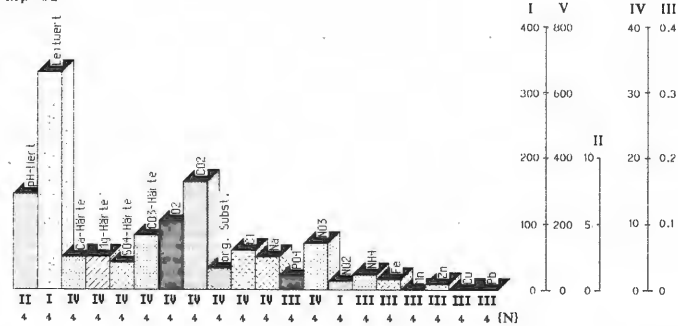
(Maximum für Mangan: 0.14mg/l; Maximum für Eisen 2.12 mg/l; vgl. auch Abb. 74 und 75). Auch Zink und Kupfer wurden an allen Stellen nachgewiesen, am Eingang (Mp 3) in erhöhter Konzentration (Maximum für Kupfer: 0.04mg/l an Mp 3 und 0.06 mg/l an Mp 6; Maximum für Zink: 0.06mg/l an Mp 3; vgl. auch Abb. 74). – Die Klutertöhle in Hagen weist somit aufgrund anthropogener Veränderungen der Bewitterung, durch den Eintrag von Fremdstoffen innerhalb des Eingangsbereiches und durch Eingriffe in die hydrologischen Verhältnisse der Höhle erhebliche Veränderungen des Chemismus und hohe Schadstoffbelastungen der Höhlengewässer auf.

In der Eisenhöhle (Massenkalk) speist ein Grundwassergerinne (Eintrittsstelle an Mp 4) eine nur langsam in Richtung Stollenmundloch (Mp 1) fließende Wasseransammlung; weitere kleinere Wassereintrittsstellen befinden sich ebenfalls auf dieser ca. 35m langen Strecke. Im hinteren Teil des Stollens (Gesamtlänge : 58m; ZYGOWSKI 1976) befindet sich ein kleiner Tropfwassertümpel (Mp 5). Sehr hohe Natrium-, Chlorid- und Kalziumkonzentrationen sowie ein leicht erhöhter Eisengehalt, verbunden mit einem hohen Leitwert (besonders am Mp 5) charakterisieren die Gewässer. Das Ca-Mg-Verhältnis liegt im Mittel bei 4.3 (Mp 1: 4.0; Mp 2: 4.2; Mp 3: 3.9; Mp 4: 4.9 und Mp 5: 4.6). Die hohe Salzkonzentration im Wasser (der Stollen liegt in unmittelbarer Nähe zur Volme und oberhalb des Stollens verläuft eine Hauptverkehrsstraße) weist auf anthropogene Belastungen hin (vgl. Abb. 76-78).

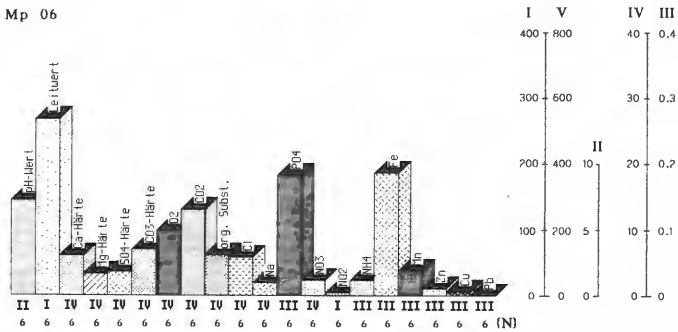
Die Volmehanghöhle befindet sich in einem heute stillgelegten Steinbruch (Massenkalk) am nördlichen Volmeufer und weist ein weitgehend horizontal angelegtes, aber kompliziert verzweigtes, auf ca. 1km Länge geschätztes Gangsystem auf, mit eingeschalteter Stollenanlage und mehreren Tagöffnungen (KERSBERG 1977). Mehrere Tropf- und Sickergewässer (Mp 2, 6, 7, 8 und 10), sowie Grundwassergerinne (Mp 9 und 12) wurden untersucht. Größere Unterschiede treten in der Wasserzusammensetzung bei den Tropf- und Sickergewässern je nach ihrer Lage und der Klüftigkeit der Gesteinsbedeckung auf. Eine weitgehend massive Gesteinsbedeckung besteht an Mp 2. Ein hoher Dolomitierungsgrad wird hier durch das bei 0.99 liegende Kalzium-Magnesium-Verhältnis angezeigt. Der Gehalt an Natrium und Chlorid, Phosphat und organischen Substanzen ist niedrig, gleichfalls die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen (Abb. 79). Eisen und Zink wurden in geringer Konzentration nachgewiesen. Das Tropfwasser kann an dieser Stelle daher als weitgehend unbelastet angesehen werden. – Dies kann für die restlichen Gewässer der Volmehanghöhle jedoch nicht gesagt werden (vgl. auch Abb. 80-82). Die Belastungen der Grundwassergerinne werden durch erhöhte Stickstoff-, Phosphat-, Natrium- und Chloridwerte angezeigt, die der Tropf- und Sickergewässer durch erhöhte Phosphat-, Eisen- und Manganwerte; letztere sind möglicherweise ebenfalls anthropogen (Eisen und Mangan liegen im Tropfwasser des reinen dolomitierten Kalks an Mp 2 nur in geringer Konzentration vor). Besonders in Bereichen starker Klüftigkeit des Deckgesteins und einer oberflächennahen Lage des Tropfwassers (z.B. an Mp 8) treten hohe Belastungen auf. Erhöhte Ammoniumkonzentrationen wurden an mehreren Meßstellen festgestellt. Neben erhöhten Natrium- und Chloridwerten weisen die Grundwassergerinne gegenüber den Tropf- und Sickergewässern ein erhöhtes Ca-Mg-Verhältnis auf (Mp 9: 3.0; Mp 12: 3.1).

Tropf- und Sickergewässer und Höhlenseen sind in der Dechenhöhle (Massenkalk) durch hohe Leitwerte und Kalziumkonzentrationen und weitgehend niedrige Nitratwerte, aber teilweise erhöhte Ammoniumkonzentrationen (z.B. an Mp 3) gekennzeichnet. Stark schwankende, zeitweise sehr hohe Chloridkonzentrationen an Mp 5 und 6 (vgl. auch den Wasserchemismus in der Reckenhöhle) deuten auf eine anthropogene Belastung (Mp 5: 14.7-104.8mg/l; Mp 6:13.6-98.3mg/l Chlorid); an den restlichen Meßstellen der Höhle traten wesentlich geringere Schwankungen auf (Mp 2:

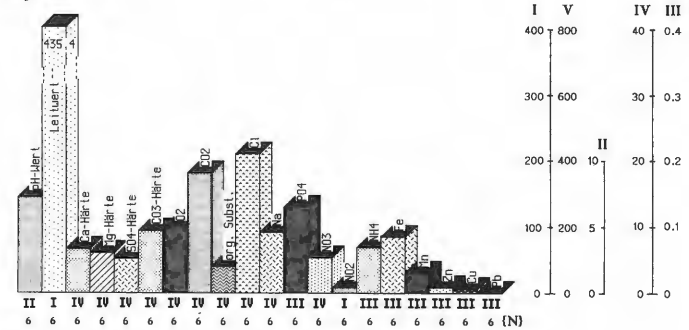
Volmehanghöhle
Mp 02



Mp 06



Volmehanghöhle
Mp 07



Mp 08

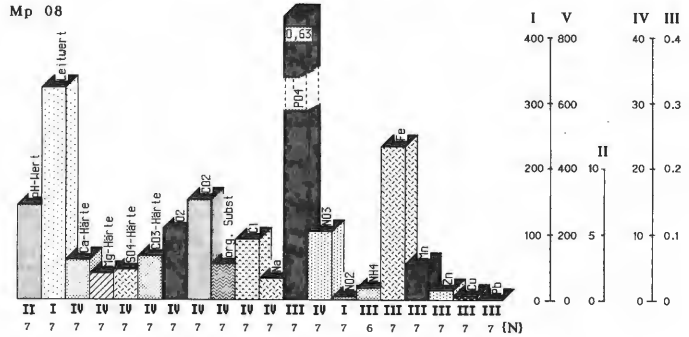


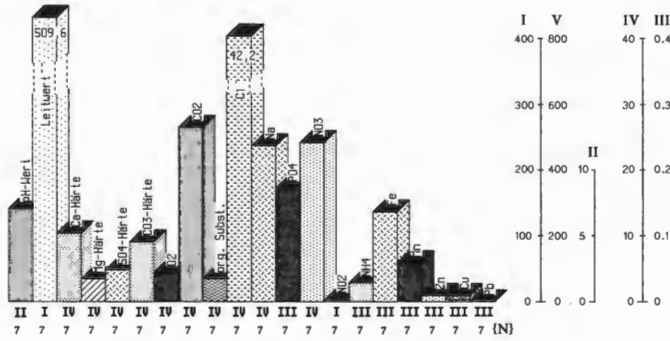
Abb. 79: Die physikochemischen Parameter der Tropf- und Sickergewässer in der Volmehanghöhle in Hagen. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von den Meßstellen Mp 2 und Mp 6 von 1985 bis 1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Abb. 80: Die physikochemischen Parameter der Tropf- und Sickergewässer in der Volmehanghöhle in Hagen. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von den Meßstellen Mp 7 und Mp 8 von 1985 bis 1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Volmehanghöhle
Mp 09



Mp 10

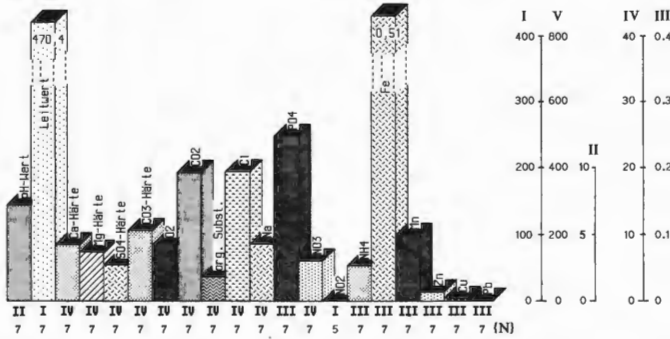


Abb. 81 : Die physikochemischen Parameter der Sickergewässer und des Grundwassers in der Volmehanghöhle in Hagen. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von den Meßstellen Mp 9 und Mp10 von 1985 bis 1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg [H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Volmehanghöhle
Mp 12

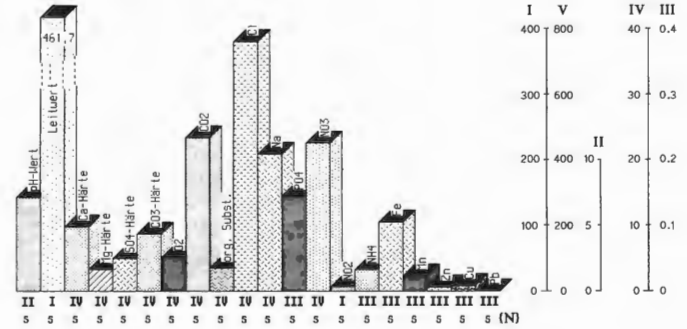


Abb. 82 : Die physikochemischen Parameter des Grundwassers in der Volmehanghöhle in Hagen. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von der Meßstelle Mp 12 von 1985 bis 1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg [H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

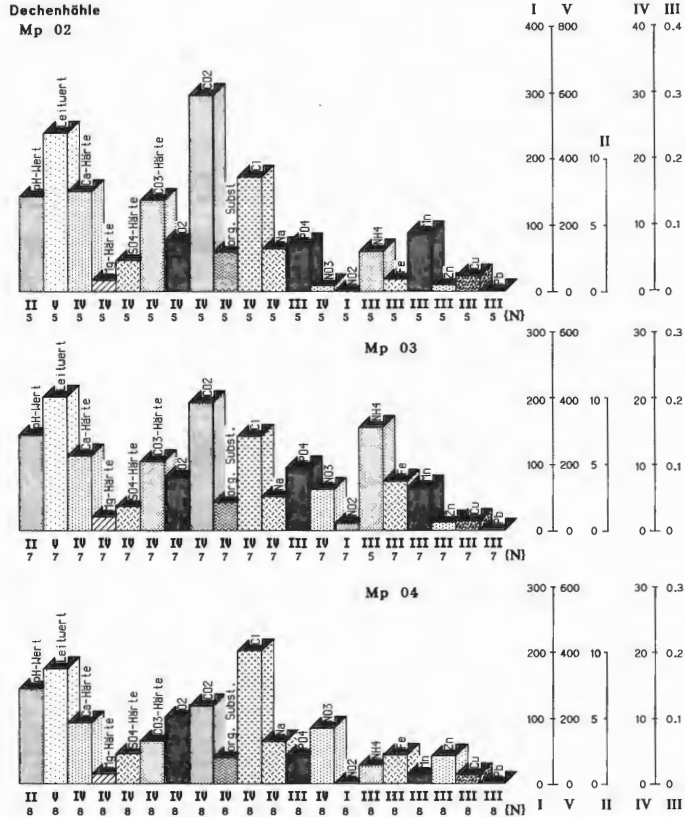


Abb. 83: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers von den Meßpunkten Mp 2, 3 und 4 (dynamisch bewetterter Bereich) in der Dechenhöhle in Iserlohn. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

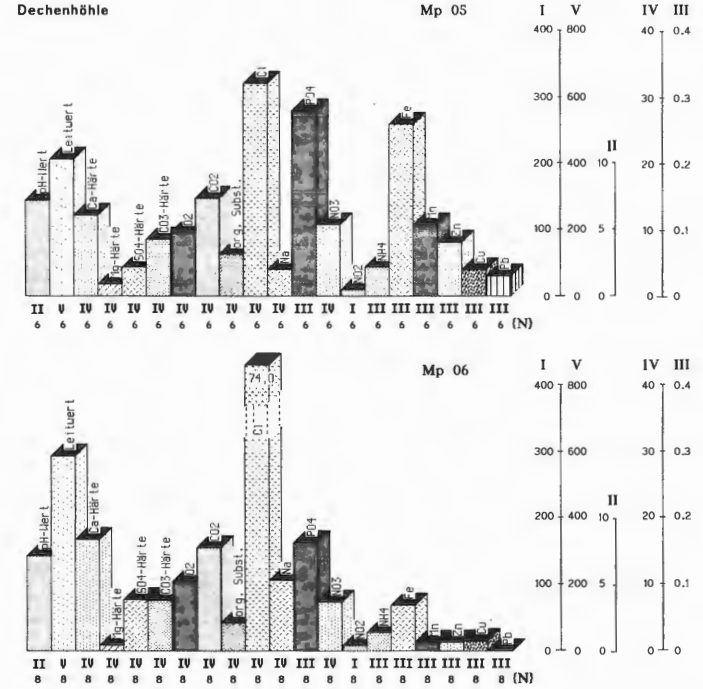


Abb. 84: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers von den Meßpunkten Mp 5 und 6 (dynamisch bewetterter Bereich) in der Dechenhöhle in Iserlohn. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

14.3-19.1 mg/l; Mp 3: 11.3-19.0 mg/l; Mp 4: 14.0-33.0 mg/l Chlorid). Im Wasser der Höhlenteile mit geringer Gesteinsbedeckung steigt die Phosphatkonzentration sprunghaft an (Abb. 84; Mp 5 und 6). Erhöhte Konzentrationen von Eisen, Mangan, Zink, Kupfer und Blei wurden an Mp 5 festgestellt. Eisen und Mangan treten auch im Tropfwasser des östlichen Höhlenteils in erhöhter Konzentration auf (Abb. 83). Das Ca-Mg-Verhältnis weist zwischen den verschiedenen Gewässern große Unterschiede auf (Mp 2: 9.2; Mp 3: 5.5; Mp 4: 6.6; Mp 5: 7.1 und Mp 6: 21.5) – In der D e c h e n h ö h l e treten offensichtlich Belastungen des Wasserchemismus auf, die sowohl geologischen Ursprungs (Schwermetallbelastung) als auch anthropogen sind (zeitweise sehr hohe Chloridkonzentrationen).

Ebenfalls sehr hohe Natrium- und Chloridkonzentrationen weist das Grundwassergerinne der K n i t t e r h ö h l e auf (sie sind hier möglicherweise geologisch bedingt; vgl. Abb. 86 u. 87). Im Gegensatz zu den Tropfwasserseen der D e c h e n h ö h l e sind die Konzentrationsschwankungen gering (Mp 5: 74.8-82.5mg/l; Mp 6: 79.3-85.7mg/l Chlorid). Es wurden erhöhte Nitratwerte festgestellt. Auch die Konzentrationen von Eisen, Mangan, Zink und Kupfer waren erhöht. Im T r o p f w a s s e r (Mp 4) ist die Eisenkonzentration sehr hoch (bis 0.81mg/l Eisen); leicht erhöht sind die Werte für Mangan, Zink und Kupfer (Abb. 85). Während hier als Belastung ein leicht erhöhter Phosphat- und Nitratgehalt festgestellt wurde, lagen die Konzentrationen von Natrium und Chlorid niedrig (Natrium: 3.1-5.0 mg/l; Chlorid: 6.2-17.7mg/l). Das Ca-Mg-Verhältnis lag im T r o p f w a s s e r bei 8.2, im G r u n d w a s s e r bei 4.1 (Mp 5) und 4.4 (Mp 6).

Die in einem Steinbruch bei Letmathe gelegene K u p f e r b e r g s e e n s p a l t e (im Massenkalk) weist einen hohen Leitwert auf, der weniger durch die vergleichsweise niedrige Kalziumkonzentration als durch den stark erhöhten Sulfatgehalt verursacht wird (die Sulfathärte liegt deutlich oberhalb der Kalziumhärte). Ein hoher Phosphatgehalt weist den See als ein oberflächennahes Höhlengewässer aus. Bedenklich erscheint die deutlich erhöhte Nitrit- und Ammoniumkonzentration neben einem nur leicht erhöhten Nitratwert. Das Wasser wird ferner durch eine sehr hohe Zinkkonzentration belastet (0.28mg/l); eine leicht erhöhte Eisenkonzentration wurde ebenfalls festgestellt (vgl. Abb. 88).

Eine große Stickstoffbelastung (hohe Nitratkonzentrationen) weisen die T r o p f - und S i c k e r g e w ä s s e r der im Massenkalk liegenden Höhle hinter der Villa Ribbert auf (Abb. 89-92). Im ausgebauten Höhlenteil wurden zeitweise sehr hohe Eisenkonzentrationen festgestellt (Maximum an Mp 6: 1.11 mg/l; an Mp 10: 1.34mg/l; vgl. auch Abb. 89-92); hier befindet sich über weite Bereiche eine Aschenschicht, die z. T. wieder mit Lehm überdeckt ist. Mp. 8 ist frei von Asche und liegt oberhalb von Mp 6 und Mp 10, so daß kontaminiertes Tropfwasser hier nicht auftritt. Es wurden hier nur schwach erhöhte Eisenkonzentrationen festgestellt (Mp 8: 0.04-0.10 mg/l Eisen, vgl. auch Abb. 91). Leicht erhöhte Manganwerte kommen an fast allen Tropfwasserstellen vor, bis auf Mp 8 auch erhöhte Zink- und Kupferwerte. Am Mp 10 wurden Spuren von Blei nachgewiesen (0.005 mg/l). Die Tropf- und Sickerwasser kennzeichnen auch hohe Leitwerte und hohe Kalziumkonzentrationen. Das Ca-Mg-Verhältnis liegt an Mp 6 und 8 mit 5.3 bzw. 5.5 deutlich oberhalb des Wertes von 3.7 an Mp 10. Die Konzentrationen von Natrium und Chlorid sind nur an Mp 7, die Phosphatkonzentrationen sind an allen Meßstellen leicht erhöht; der Gehalt an organischen Substanzen ist niedrig. Das G r u n d w a s s e r weist hohe Kalzium-, Natrium- und Chloridwerte auf (das Ca-Mg-Verhältnis liegt bei 3.8; vgl. auch Abb. 90). Die Nitratwerte liegen niedriger als im Tropf- und Sickerwasser; sie sind jedoch auch hier gegenüber Normalwerten (unter 10 mg/l) deutlich erhöht; ebenfalls sind die Phosphatwerte erhöht. Es wurden ferner leicht erhöhte Eisen-, Mangan- und Kupferkonzentrationen und Spuren von Zink und Blei im Grundwasser nachgewiesen. – Die Höhlengewässer sind demnach sowohl hinsichtlich der Erdalkalitionen, der Stickstoffverbindungen als auch des Schwermetallgehalts anthropogen belastet.

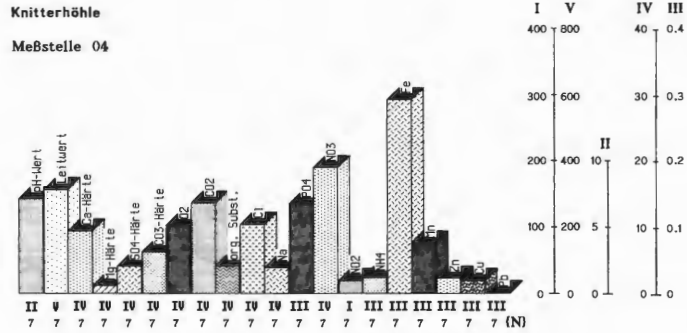


Abb. 85: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers in der Knitterhöhle am Meßpunkt Mp 4 (dynamisch bewetterter Bereich). Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

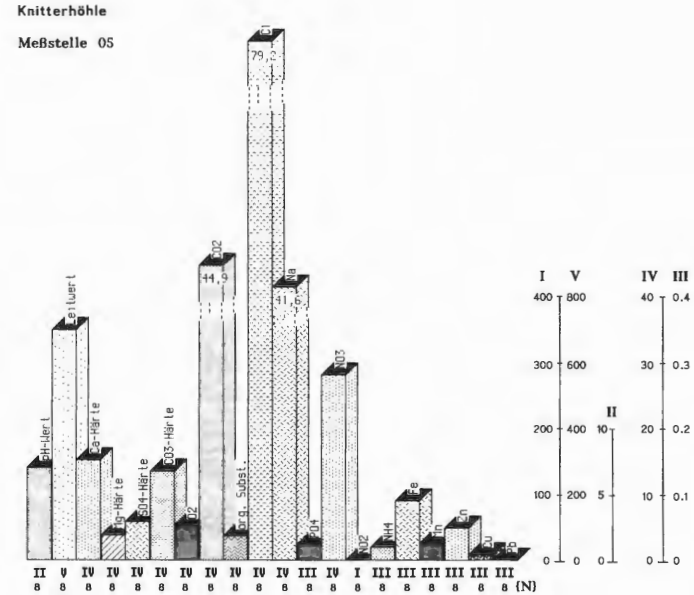


Abb. 86: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers in der Knitterhöhle am Meßpunkt Mp 5 (dynamisch bewetterter Bereich). Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Knitterhöhle
Meßstelle 06

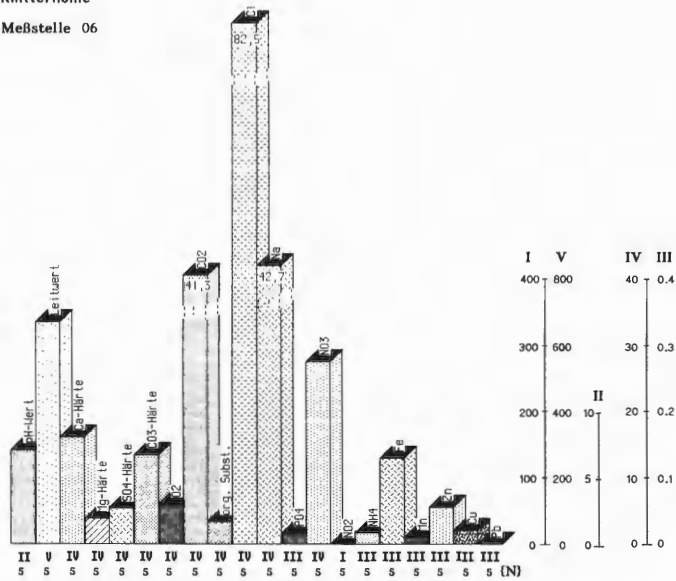


Abb. 87: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers in der Knitterhöhle am Meßpunkt Mp 6 (statisch bewetterter Bereich). Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1984 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Kupferbergseenspalte
Grundwasserkluft

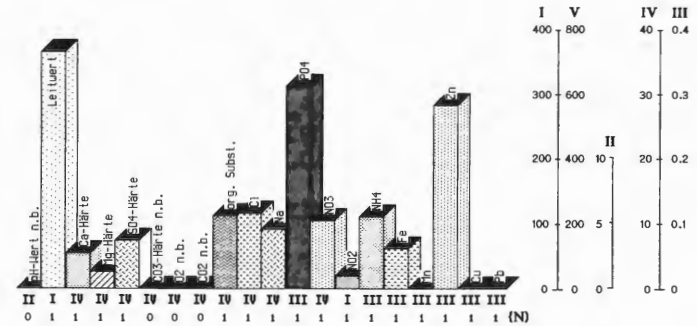


Abb. 88: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers in der Kupferbergseenspalte in Iserlohn. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 28.06.1985. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Höhle hinter der Villa Ribbert

Meßstelle 06

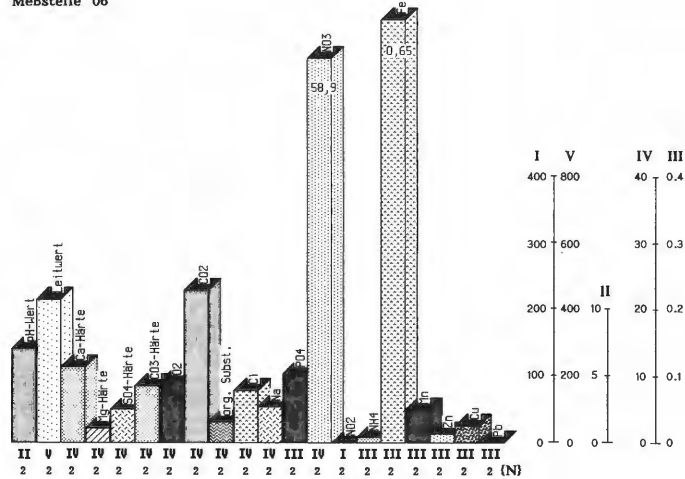


Abb. 89: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers in der Höhle hinter der Villa Ribbert am Meßpunkt Mp 6. Die dargestellten Mittelwerte wurden aus Einzelanalysen vom 28.08.1985 und 01.03.1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg [H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Höhle hinter der Villa Ribbert

Meßstelle 07

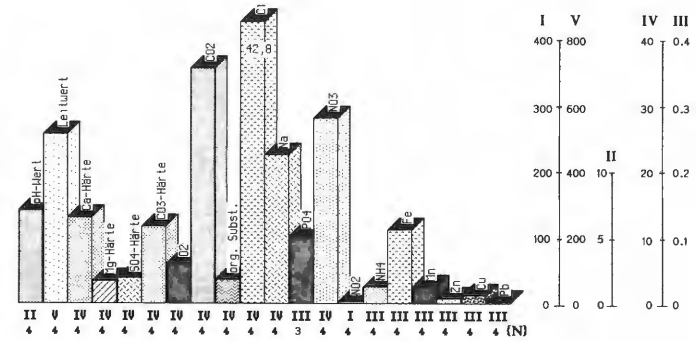


Abb. 90: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers in der Höhle hinter der Villa Ribbert am Meßpunkt Mp 7. Die dargestellten Mittelwerte wurden aus Einzelanalysen vom 28.08., 31.10.1985, 09.01. und 01.03.1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg [H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Höhle hinter der Villa Ribbert

Meßstelle 08

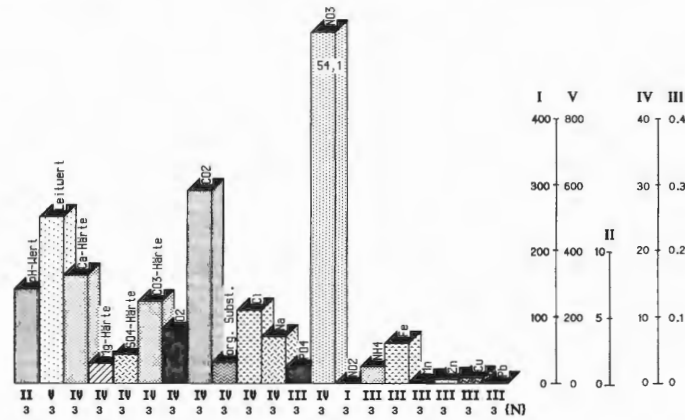


Abb. 91 : Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers in der Höhle hinter der Villa Ribbert am Meßpunkt Mp 8. Die dargestellten Mittelwerte wurden aus Einzelanalysen vom 31.10.1985, 09.01. und 01.03.1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert [-lg[H ⁺]]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Höhle hinter der Villa Ribbert

Meßstelle 10

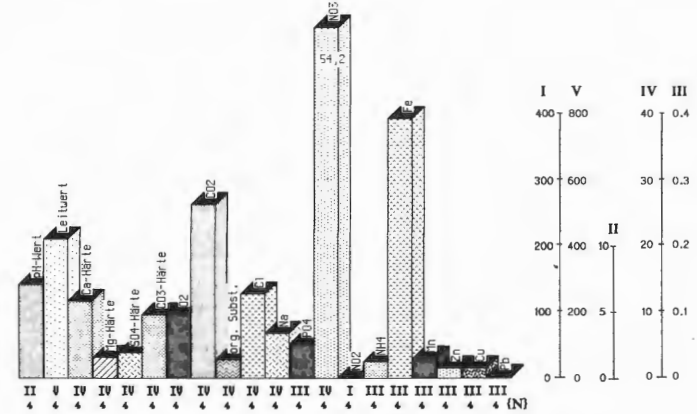


Abb. 92 : Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers in der Höhle hinter der Villa Ribbert am Meßpunkt Mp 10. Die dargestellten Mittelwerte wurden aus Einzelanalysen vom 28.08., 31.10.1985, 09.01. und 01.03.1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert [-lg[H ⁺]]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Die von Sickerwasser gespeisten periodischen Seen in der Schönebeker Höhle weisen – für Höhlengewässer untypisch – niedrige Ionenkonzentrationen auf. Dies hat möglicherweise seine Ursache darin, daß die in den Honselers Schichten liegende Höhle sich in einer kleinen Kalklinse befindet, während benachbart nichtverkarstungsfähiges Gestein (Schiefer) ansteht. Aber auch hier ist Kalzium das dominierende Kation, dessen Konzentration im Vergleich zu oberirdischen Gewässern außerhalb der Kalkzone erhöht ist; entsprechend erhöht ist der Leitwert (Abb. 93). Organische Substanzen, Natrium, Chlorid und die Stickstoffverbindungen liegen an beiden Sickerwasserstellen in niedriger Konzentration vor; an Mp 9 ist die Ammoniumkonzentration leicht erhöht. Neben erhöhten Eisenkonzentrationen an beiden Meßstellen wurde an Mp 9 ein leicht erhöhter Kupfergehalt festgestellt (eine schwache, möglicherweise geologisch bedingte Belastung).

Die Große Sunderner Höhle liegt im „Kohlenkalk“ (Kulm II, Dinant; SCHMIDT & PLEBMANN 1961). Sie enthält mehrere von Tropfwasser gespeiste Sinterbecken und ein Grundwassergerinne, das innerhalb der Höhle intensiven Kontakt mit der Höhlenatmosphäre besitzt, und das mehrere Seen und das Wasserwerk „Röhre“ speist. Es wurden das Tropfwasser an Mp 1 (Eulenhalle), das Grundwassergerinne (Mp 2) und der Höhlensee (Mp 3) unterhalb der Halle, der See im alten Höhlenteil nahe am Wasserwerk (Mp 6), der Brunnen des Wasserwerks „Röhre“ und die Röhre unterhalb des Wasserwerks hydrochemisch untersucht. Die Röhre ist ein sauerstoffreiches, schwach stickstoffbelastetes Gewässer (mit leicht erhöhtem Nitratgehalt und erhöhten Nitrit- und Ammoniumwerten) und weist eine deutlich erhöhte Kalzium-Konzentration, (ca. 30 mg/l), einen erhöhten pH-Wert (zwischen 7.5 und 7.8) und geringe Natrium- und Chloridwerte auf (Abb. 94). – Der pH-Wert der Höhlengewässer ist aufgrund einer anthropogenen dynamischen Bewitterung hoher Intensität bis auf den alten Höhlenteil (pH 7.3 an Mp 6) mit pH 7.5 (im Bereich des Steinbruchs) nur wenig niedriger als in der Röhre (vgl. auch die erhöhten Sauerstoffkonzentrationen in Abb. 94 u. 95). Die Höhlengewässer weisen niedrigere Ammoniumkonzentrationen als das Wasser der Röhre auf (leicht erhöhte Werte in den grundwassergespeisten Seen, stark erniedrigte Werte im Grundwassergerinne und Brunnen). Nitrit ist nahezu nicht vorhanden; die Nitratwerte sind erhöht (Abb. 94 u. 95). Der Gehalt an organischen Substanzen ist an allen Gewässern der Höhle gering, bis auf das Wasser des Sinterbeckens (Mp 1), das durch ein Deckenloch belichtet wird und bei zeitweise über 100 Lux Lichtstärke Algenbewuchs aufweist. Auch die Konzentrationen von Eisen, Zink und Kupfer sind niedrig; Mangan wurde in Spuren nachgewiesen. Das Ca-Mg-Verhältnis liegt im Wasser der Röhre (Mp 0.1: 4.4) deutlich niedriger als im Wasser der Höhle (Mp 1: 10.5, Mp 2: 9.6, Mp 3: 10.3, Mp 6: 10.1) und im Brunnen (Mp 0.2: 10.1). – Von den leicht erhöhten Nitratwerten abgesehen, weisen die Gewässer der Höhle keine Belastungen auf.

Im Serkenroder Schacht (Massenkalk) tritt als kleiner Wasserfall ein ergiebiges Tropf- und Sickerwassergerinne in die Höhle ein und speist einen kleinen Höhlenbach. Ein hoher Sauerstoffgehalt (99.8% Sättigung) und ein geringer Gehalt an gelöstem CO₂ deuten auf eine reduzierte Isolation zur Außenatmosphäre (pH-Wert: 7.6; Abb. 96). Bis auf den Gehalt an Kalzium liegen die restlichen Kationen in geringer Konzentration vor. Die Nitratkonzentration ist leicht erhöht; die Konzentrationen von Nitrit und Ammonium sind sehr niedrig, ebenfalls die von Phosphat, Natrium und Chlorid. Ein leicht erhöhter Eisengehalt sowie Spuren von Mangan, Zink und Kupfer wurden festgestellt. Das Ca-Mg-Verhältnis liegt bei 7.3 .

Die im Hönnetal (Massenkalk) gelegene, dynamisch bewetterte Reckenhöhle weist mehrere Tropf- und Sickergewässer auf. Es wurde das Wasser eines Sinterbeckens untersucht, in dem LENGERSDORF (1929) Syncariden fand. Ein pH-Wert von 7.5, ein

hoher Sauerstoffgehalt (92.7% Sättigung) und ein relativ niedriger Gehalt an gelöstem CO₂ deuten auf eine geringe Isolation zur Außenatmosphäre (Abb. 97). Die hohen Chlorid- und Eisenkonzentrationen sind möglicherweise anthropogen (vgl. Parallelen zur Dechenhöhle in Abb. 84 und die niedrigen Chlorid-Werte im Tropfwasser der Friedrichshöhle in Abb. 100). Die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen, von organischen Substanzen, Phosphat und Natrium sind gering; es wurden Spuren von Mangan, Zink und Kupfer nachgewiesen. Das Ca-Mg-Verhältnis liegt hier mit 1.2 sehr niedrig. Bedingt durch die hohe Chloridkonzentration ist der Leitwert verhältnismäßig hoch.

In der Friedrichshöhle wurde neben mehreren Tropf- und Sickergewässern (meist von Sinterbecken gefaßte Seen, wie an Mp 3 und 4) ein durch die Höhne (Mp 0.1) beeinflusstes Grundwassergerinne (Mp 13) analysiert. Das Tropf- und Sickerwasser der Filterzone an Mp 3 und 4 (Abb. 100) weist einen leicht erhöhten Nitratgehalt auf; das Ca-Mg-Verhältnis beträgt 55.9 an Mp 3 und 45.5 an Mp 4. Das Grundwasser (Feldhofquelle an Mp 0.2 und Grundwassergerinne innerhalb der Höhle) ist hingegen durch die weitgehend anthropogene Schadstofffracht des Hönnewassers in hohem Maß belastet (sehr hohe Werte der Stickstoffverbindungen, hohe Werte der Natrium-, Chlorid- und Eisen-, sowie erhöhte Mangan-, Zink- und Kupferkonzentrationen; vgl. Abb. 98 und 99). Besonders schwerwiegend ist neben hohen Nitrat- und sehr hohen Phosphatwerten die extrem hohe Nitritkonzentration im Hönnewasser, die auch im Wasser der Feldhofquelle und im Grundwasser der Friedrichshöhle noch erhöht ist. Auch die hohen Phosphat-, Natrium- und Chloridkonzentrationen und der erhöhte Gehalt an organischen Substanzen im Grundwasser sind auf Belastungen durch die Höhne zurückzuführen. Als Folge hiervon ist im Grundwasser der Höhle und im Wasser der Feldhofquelle eine zeitweise hohe Sauerstoffzehrung festzustellen (vgl. auch Kap. III. 3.2.). Das Ca-Mg-Verhältnis liegt im Wasser der Feldhofquelle bei 7.2 und im Grundwasser (Mp 13) bei 8.5 (das der Höhne liegt bei 6.3). Der Bängser Bach (Abb. 98), der möglicherweise ebenfalls zum Einzugsgebiet der Friedrichshöhle gehört, ist hingegen bis auf einen hohen Eisen- und Mangangehalt weitgehend unbelastet (Ca/Mg: 4.3). Im Tropf- und Sickerwasser der Friedrichshöhle ist kein Einfluß durch Wasser der Höhne oder des Bängser Baches festzustellen; das Einzugsgebiet der Tropfwasserstellen liegt offensichtlich direkt oberhalb der Höhle.

Vergleichsweise unbelastet ist das Grund-, Tropf- und Sickerwasser im Stollen bei Plathaus (Kleiner OT-Stollen; vgl. Abb. 101). Hier wurden Tropfwasserstellen im Bereich des wenig klüftigen Deckgesteins in Eingangsnähe (Mp 1) sowie im Bereich einer Störungszone (Verbruch durch spatiges Gestein und zahlreiche Klüfte) ca. 100m vom Eingang entfernt (Mp 2) und eine grundwasserführende, mit einem Steinbruch in Verbindung stehende, z.T. phreatische Kluft untersucht (Mp 3), die durch Oberflächenwasser beeinflusst wird. Die Konzentration der Stickstoffverbindungen, die organische Fracht, die Konzentrationen von Natrium und Chlorid und anderer Metallionen sind an den 3 Meßstellen niedrig. Zink und Kupfer kommen nur in Spuren vor; eine leicht erhöhte Eisenkonzentration wurde an Mp 2 sowie zusammen mit leicht erhöhten Manganwerten an Mp 3 festgestellt. Sehr unterschiedlich sind der Leitwert und der Gehalt an gelöstem CO₂. An Mp 1 liegen besonders hohe CO₂-Werte vor, während sie mit zunehmender Klüftigkeit und Kontakt mit der Höhlenatmosphäre von Mp 2 nach Mp 3 abnehmen und der Sauerstoffgehalt zunimmt (mittlerer CO₂-Gehalt an Mp 1: 32.0 mg/l, an Mp 2: 13,3 mg/l, an Mp 3: 11.7 mg/l; mittlerer Sauerstoffgehalt an Mp 1: 9.6 mg/l, an Mp 2: 9.9 mg/l, an Mp 3: 10.9 mg/l). Ein erhöhter Phosphatgehalt liegt an Mp 3 vor (bis 0.37 mg/l), wodurch ein Hinweis auf Oberflächenwasser gegeben ist. Auch das Ca-Mg-Verhältnis liegt mit 17.0 an Mp 3 wesentlich niedriger als an Mp 1 (25.0) und Mp

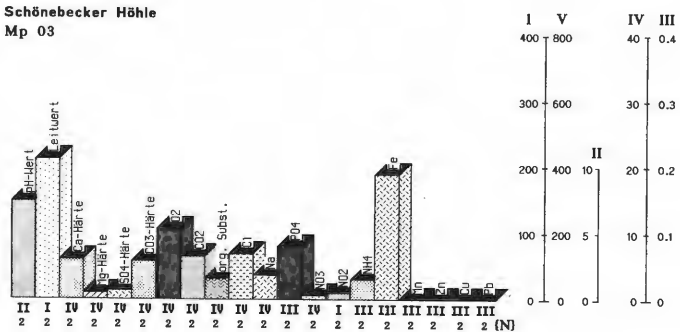
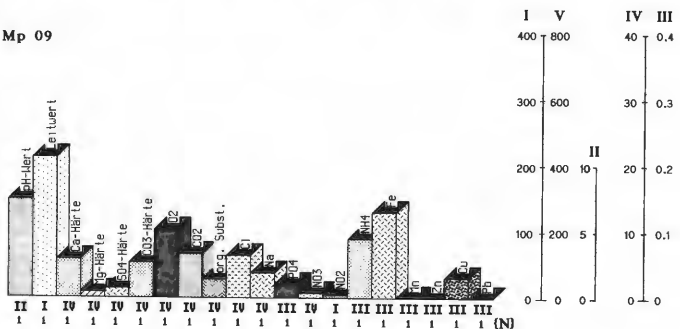
Schönebecker Höhle
Mp 03

Mp 09


Abb. 93: Die physikochemischen Parameter der Tropf- und Sickerergewässer aus der Schönebecker Höhle. Die dargestellten Werte von der Meßstelle Mp 9 entstammen einer Einzelanalyse vom 07.12.1986; die Werte von Meßstelle Mp 3 vom 11.07. und 07.12.1986 sind als Mittelwert dargestellt. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

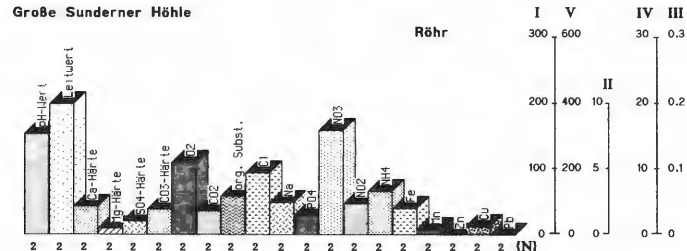
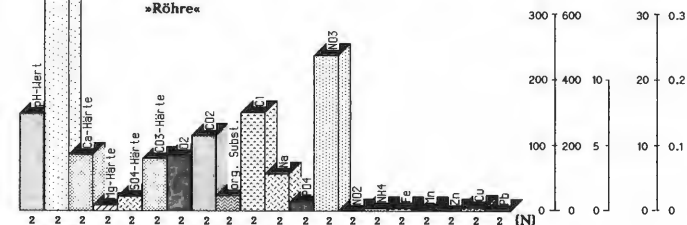
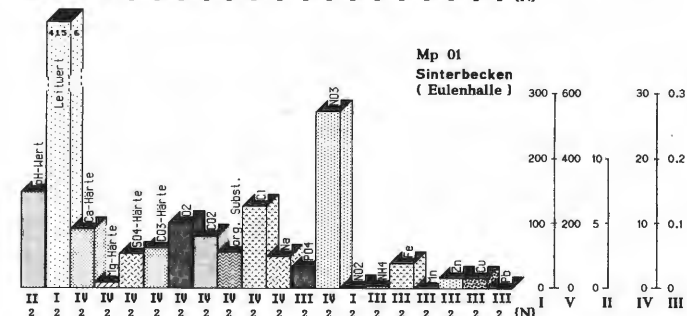
Große Sunderner Höhle

Brunnen
»Röhre«

Mp 01
Sinterbecken
(Eulenhalle)


Abb. 94: Die physikochemischen Parameter der Röhre, des Brunnens »Röhre« und des Tropf- und Sickerwassers (Mp 1) in der Großen Sunderner Höhle. Die dargestellten Mittelwerte wurden aus Einzelanalysen vom 05.12.1986 und 10.07.1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffern) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

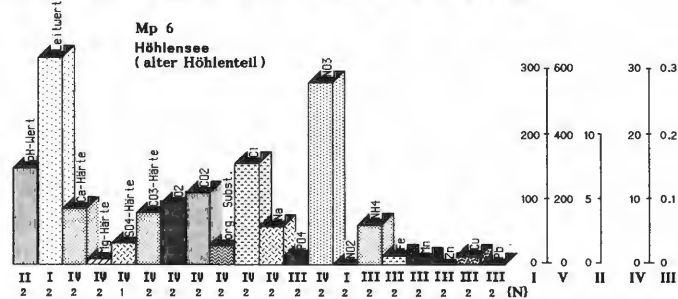
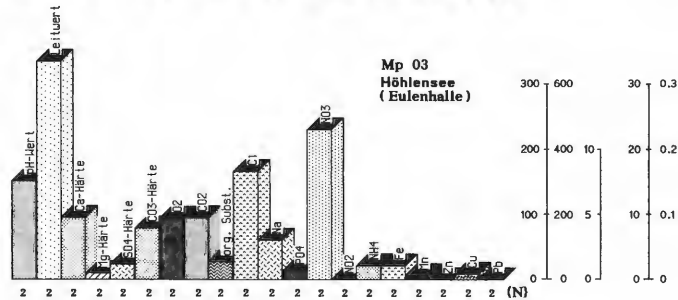
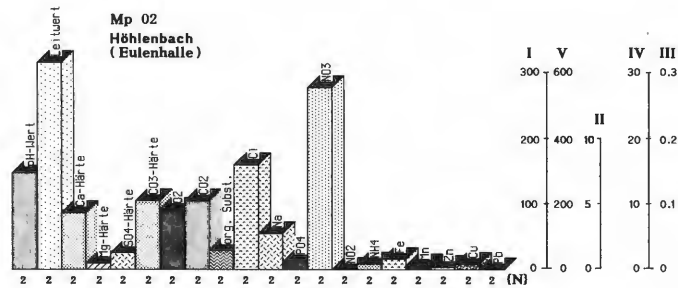


Abb. 95: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers (Mp 2, Mp 3 und Mp 6) in der Großen Sunderner Höhle. Die dargestellten Mittelwerte wurden aus Einzelanalysen vom 05.12.1986 und 10.07.1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffern) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg[H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

**Serkeröder Schacht
Becken unter Wasserfall**

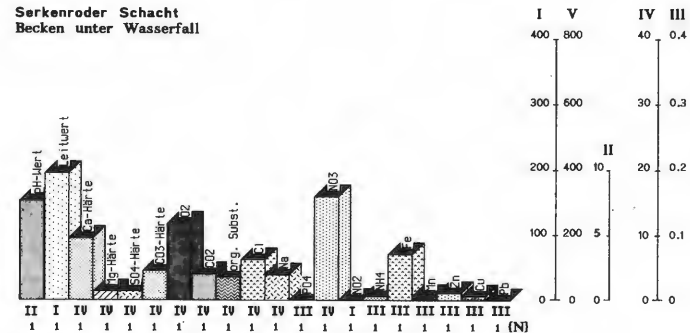


Abb. 96: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers im Serkeröder Schacht. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 05.12.1986. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg[H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

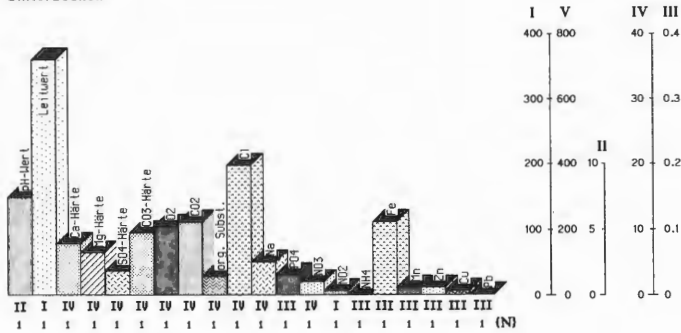
**Reckenhöhle
Sinterbecken**


Abb. 97 : Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers in der Reckenhöhle. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 03.11.1985; die Wasserprobe wurde aus einem Sinterbecken entnommen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

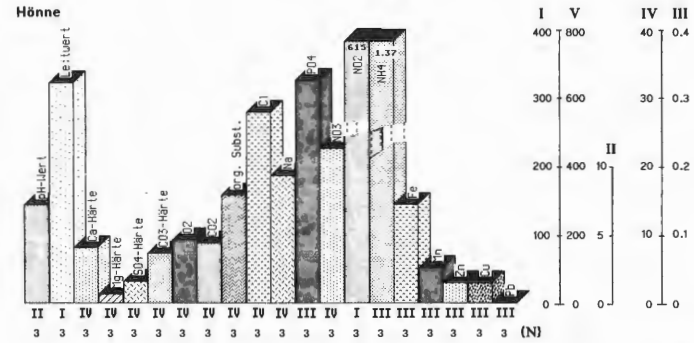
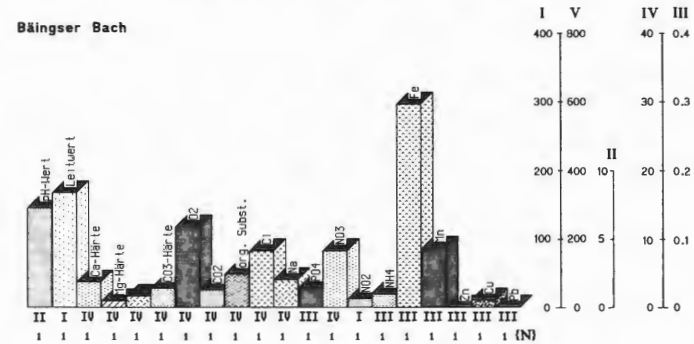
Hönne

Bäingser Bach


Abb. 98 : Die physikochemischen Parameter der Hönne und des Bäingser Bachs. Die dargestellten Werte für den Bäingser Bach entstammen einer Einzelanalyse vom 06.12.1986; die Mittelwerte für die Hönne stammen von Analysen vom 12.07.1986, 06.12.1986 und 09.07.1987. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

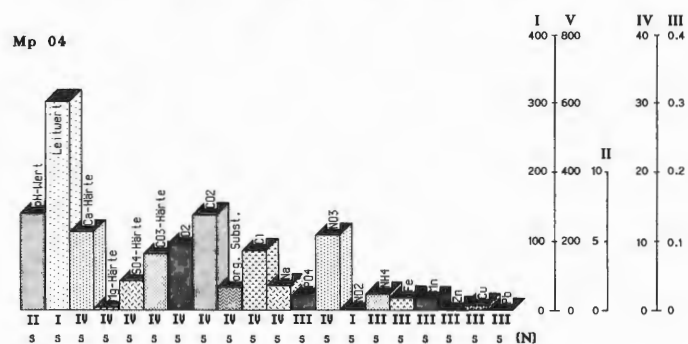
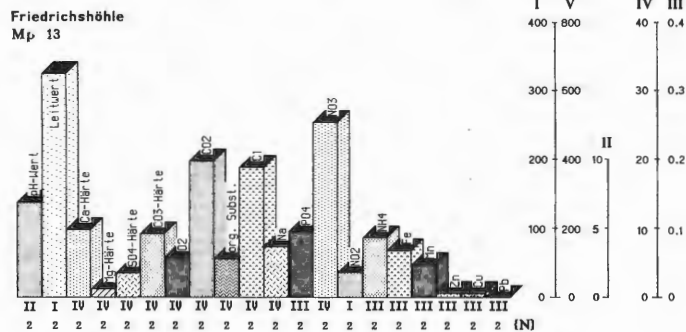
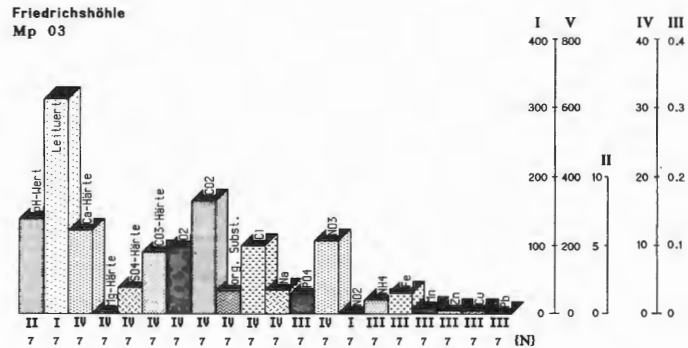
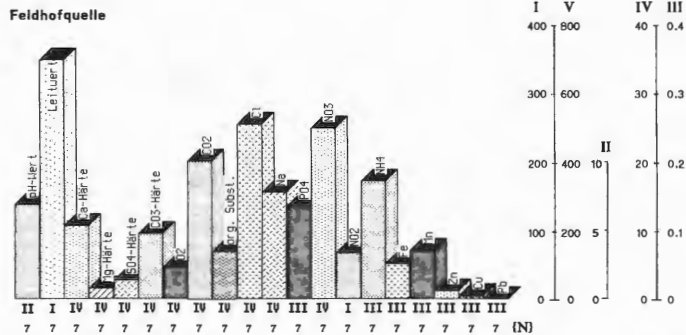


Abb. 99: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers der Feldhofquelle und der Friedrichshöhle (Mp 13) im Hönnetal. Die dargestellten Mittelwerte vom Meßpunkt Mp 13 entstammen Analysen von 06.12.1986 und 09.07.1987; die Werte der Feldhofquelle geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1985 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Abb. 100: Die physikochemischen Parameter der Tropf- und Sickerwässer aus der Friedrichshöhle im Hönnetal. Die dargestellten Werte der Meßstellen Mp 3 und Mp 4 geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1985 bis 1987 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

2 (25.6). Hinweise auf den Einfluß von Wasser der Hönne im Bereich des Stollens gibt es nicht.

Der Bach im Wasserloch im Kehlberg ist ebenfalls weitgehend unbelastet (Abb. 102). Das Wasser stammt hauptsächlich von einem oberirdischen Bach, der oberhalb der Höhle versickert (Abb. 102). Die bereits im oberirdischen Bachlauf geringe organische Fracht und die geringe Nitratkonzentration verringern sich im unterirdischen Lauf; es ist aber eine deutliche Zunahme der Ammoniumkonzentration im Höhlenwasser festzustellen. Auch eine geringfügige Erhöhung des Leitwertes, der Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen und des Gehaltes an gelöstem CO₂ charakterisieren den Höhlenbach; das Ca-Mg-Verhältnis ist an beiden Entnahmestellen sehr niedrig und nimmt in der Höhle nur wenig zu (von 2.8 im oberirdischen Bachtteil auf 2.9 im Höhlenbach).

Das Höhlengewässer im Grauen Ort (H8Fm) im Felsenmeer bei Hemer (Massenkalk) weist hohe Stickstoff-, Natrium- und Chlorid-Belastungen auf (Abb. 103), die offensichtlich anthropogen sind (im Wassereinzugsgebiet befinden sich ausgedehnte landwirtschaftliche Nutzflächen; in unmittelbarer Nähe der Höhle liegt der Felsenmeerparkplatz). Die hohe Eisenkonzentration ist mit großer Wahrscheinlichkeit geologisch bedingt (das Felsenmeer wurde früher zum Eisenerzabbau genutzt; vgl. BANNIZA 1980; HÄNISCH 1990). Mangan und Zink wurden nur in Spuren nachgewiesen. Eine erhöhte Phosphatkonzentration deutet auf die Oberflächennähe der Wasserstelle. Der Leitwert liegt mit 536 µS/cm sehr hoch; das dominierende Kation ist Kalzium (das Ca-Mg-Verhältnis liegt bei 25.6).

Die Heinrichshöhle in Hemer weist nur Tropf- und Sickerwasser auf, die weitgehend unbelastet sind und nur stellenweise eine leicht erhöhte Nitratkonzentration aufweisen (bei Mp 1; geringe Werte von Zink und Spuren von Eisen, Mangan und Kupfer). Die Kalziumkonzentration ist hoch (87.6-89.4mg/l) und entsprechend auch der Leitwert (471.3-474.0 µS/cm). Mit Werten von 15.6 (Mp 1) und 9.8 (Mp 2) differiert das Ca-Mg-Verhältnis zwischen den beiden Tropfwasserstellen erheblich (vgl. auch Abb. 104).

Die unterhalb der Heinrichshöhle und mit dieser in Verbindung stehende Von-der-Becke-Höhle weist an einer Tropfwasserstelle am Ende des Hauptgangs im alten Höhlenteil (Mp 1) eine hohe Nitratbelastung und einen erhöhten Natrium- und Chlorid-Gehalt auf (Abb. 105). Leicht erhöht sind der Phosphatgehalt und die Eisenkonzentration; Kupfer und Zink wurden in Spuren nachgewiesen. Im Grundwasser der Höhle (Wasserloch I und II; vgl. Abb. 105) liegt Nitrat in deutlich verringerter Konzentration vor. Gleiches gilt auch für die Natrium- und Chloridkonzentration, so daß offensichtlich die Schadstoffbelastung aus dem unmittelbaren Bereich oberhalb der Höhle (Sportplatzgelände) stammt und anthropogen ist. Die Höhlengewässer sind im Grundwasserbereich durch einen hohen Gehalt an gelöstem CO₂ und durch hohe Kalziumkonzentrationen charakterisiert. Das Ca-Mg-Verhältnis liegt am Wasserloch I mit 5.3 und am Wasserloch II mit 6.0 deutlich niedriger als im Tropfwasser (an Mp 1 bei 9.9; vgl. Mp 2 in der Heinrichshöhle). Der Sauerstoffgehalt ist hier mit 60.5 und 72.3% Sättigung nur wenig kleiner als im Tropfwasser (78.8% Sättigung).

Eine nur schwache Nitratbelastung weist das Tropf- und Sickerwasser der Antfelder Höhle (Sparganophyllumkalk) auf, die unterhalb des Höhleneingangs fließende Desmecke ist hiervon in stärkerem Maße belastet (Abb. 106). Ein relativ hoher Sauerstoffgehalt (88.6% Sättigung), erhöhte Konzentrationen von Kalzium (97.9 mg/l) und gelöstem CO₂ (14.4 mg/l) charakterisieren das Höhlengewässer.- Aus einer innerhalb derselben geologischen Formation liegenden Höhle, der Velledahöhle bei Velmede, wurde das Grundwasser analysiert (Abb. 107). Neben einer leicht erhöhten Eisenkonzentration wurden Spuren von Mangan, Zink und Kupfer, wie im Tropfwasser der Antfelder Höhle, nachgewiesen. Es besteht eine schwache Nitratbelastung. Die

Stollen bei Plattthaus

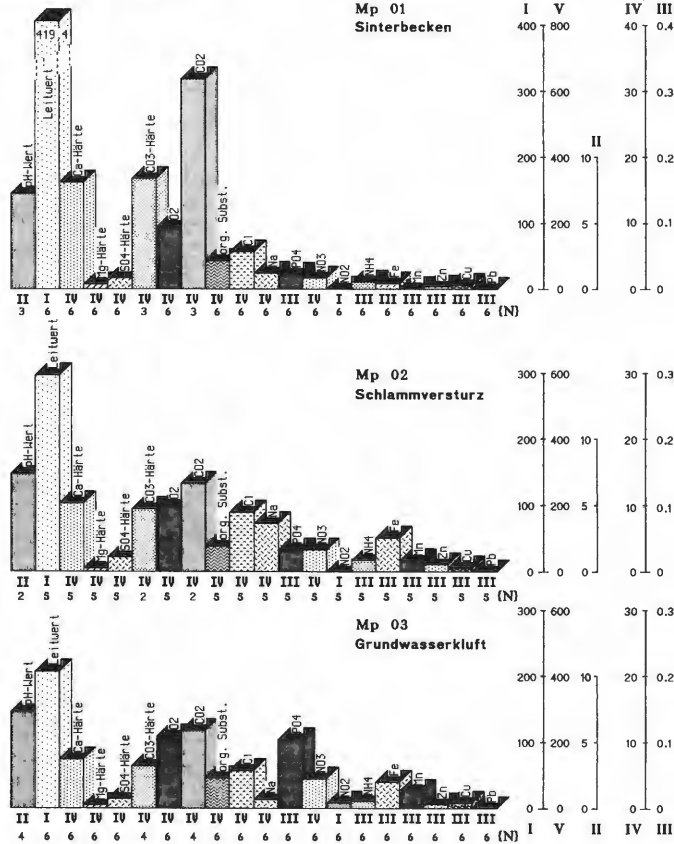
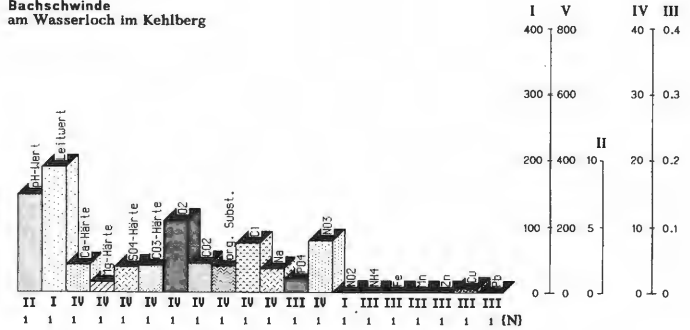


Abb. 101: Die physikochemischen Parameter des Tropf-, Sicker- und Grundwassers im Stollen bei Plattthaus im Hönnetal. Die dargestellten Werte geben das Jahresmittel an und wurden aus Analysen von 1985 bis 1986 gewonnen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg[H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Bachschwinde am Wasserloch im Kehlberg



Wasserloch im Kehlberg

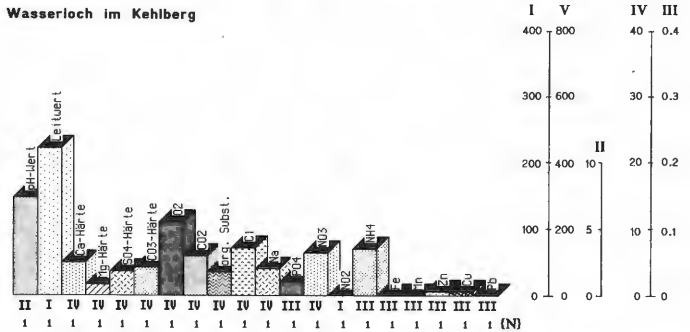


Abb. 102: Die physikochemischen Parameter des Wassers der Bachschwinde und des Wasserlochs im Kehlberg im Hönnetal. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 09.07.1986. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert -lg[H ⁺]	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

Grauer Ort
Höhle im Felsenmeer (H8Fm)
Wasser aus dem Stollen "Toter Mann"

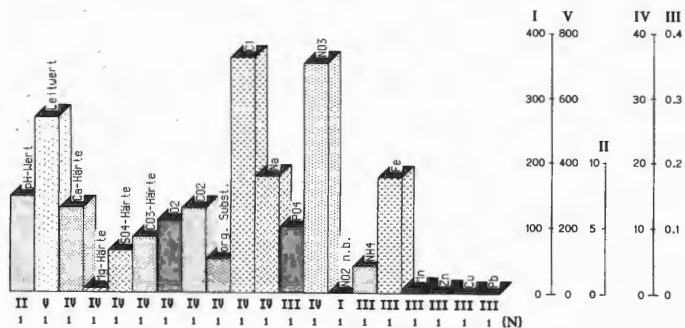


Abb.103: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers im Grauen Ort, Höhle im Felsenmeer (H8Fm) bei Hemer. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 12.07.1987. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

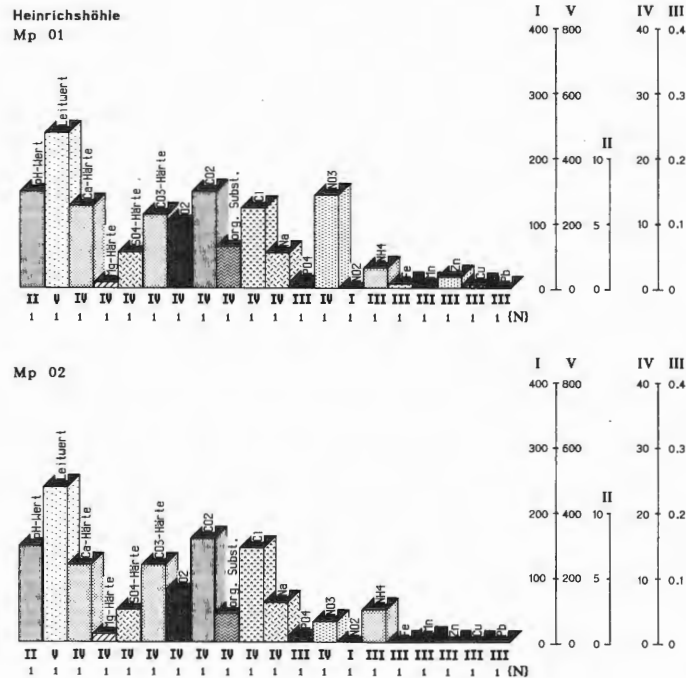


Abb.104: Die physikochemischen Parameter des Tropf- und Sickerwassers in der Heinrichshöhle. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 12.07.1987; die Wasserproben wurden Sinterbecken (am Bärenskelett; Mp 1 und Geldsee; Mp 2) entnommen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert $-\lg[H^+]$	SO ₄ -Härte [°dH]	org. Subst. [mg/l]	NO ₃ ⁻ [mg/l]	Mn [mg/l]
Leitwert [µS/cm]	CO ₃ -Härte [°dH]	Cl ⁻ [mg/l]	NO ₂ ⁻ [µg/l]	Zn [mg/l]
Ca-Härte [°dH]	O ₂ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	NH ₄ ⁺ [mg/l]	Cu [mg/l]
Mg-Härte [°dH]	CO ₂ [mg/l]	PO ₄ ³⁻ [mg/l]	Fe [mg/l]	Pb [mg/l]

VON-DER-BECKE-HÖHLE

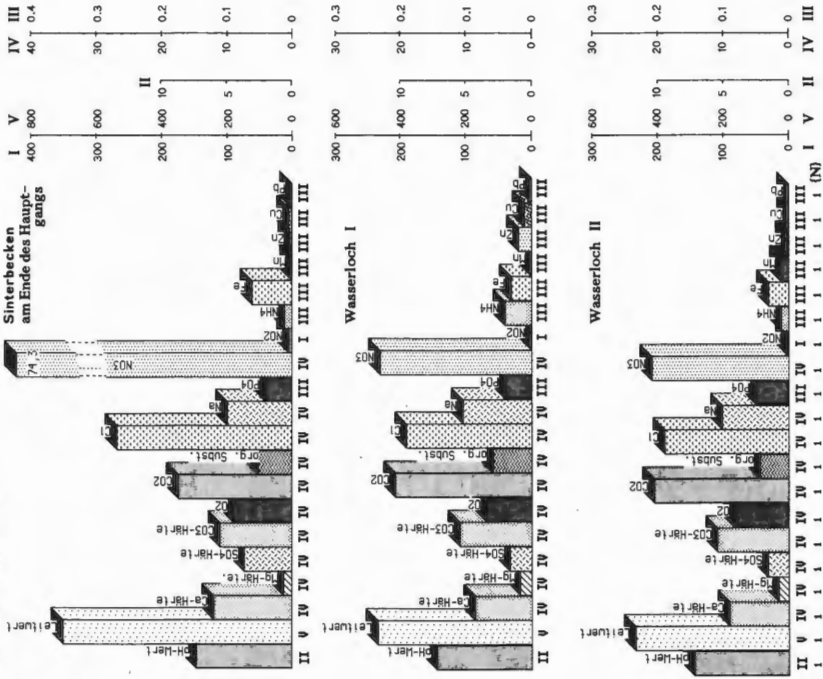


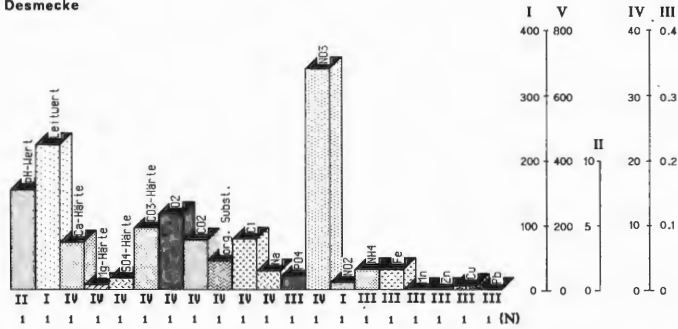
Abb. 105: Die physikochemischen Parameter des Tropf-, Sicker- und Grundwassers in der VON-DER-BECKE-HÖHLE in Hemer. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 12.07.1987. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert	-lg(H ⁺)	SO ₄ -Härte	[dH]	org. Subst.	[mg/l]	NO ₃ ⁻	[mg/l]	Mn	[mg/l]
Leitwert	[µS/cm]	CO ₃ -Härte	[dH]	Cl ⁻	[mg/l]	NO ₂	[µg/l]	Zn	[mg/l]
Ca-Härte	[dH]	O ₂	[mg/l]	Na ⁺	[mg/l]	NH ₄ ⁺	[mg/l]	Cu	[mg/l]
Mg-Härte	[dH]	CO ₂	[mg/l]	PO ₄ ³⁻	[mg/l]	Fe	[mg/l]	Pb	[mg/l]

organische Fracht ist niedrig; gleiches gilt für den Gehalt an Natrium und Chlorid. Der Sauerstoffgehalt ist gegenüber den Tropf- und Sickerwässern mit 64,6% Sättigung deutlich reduziert, der Gehalt an gelöstem CO₂ ist mit 18,2 mg/l nur mäßig erhöht. Das dominierende Kation ist Kalzium (das Ca-Mg-Verhältnis liegt bei 7,3).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei allen untersuchten Höhlengewässern ein erhöhter Gehalt an Kalziumhydrogenkarbonat auftritt (in benachbarten oberirdischen Gewässern ist dieser meist ebenfalls leicht erhöht). Die meist gesättigten Kalklösungen der Höhlengewässer stellen ein Puffersystem dar; dennoch treten von der Bewitterung abhängige pH-Wert-Schwankungen auf (vgl. Kap. III. 3.2.). Das Grundwasser ist in der Regel ionenreicher als die Tropf- und Sickerwässer und weist nur geringe lokale Unterschiede in der Zusammensetzung auf. Benachbarte Tropf- und Sickerwässer unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Zusammensetzung oftmals stark (z. B. kommen sehr verschiedene Ca-Mg-Verhältnisse vor); sie sind meist voneinander isoliert. Von den Gewässern der untersuchten Höhlen befindet sich nur ein geringer Teil im natürlichen Zustand. In den meisten Höhlen sind Belastungen durch Schadstoffe festzustellen; am häufigsten sind hiervon die Grundwässer betroffen; weitgehend unbelastet sind meist nur isoliert liegende Tropf- und Sickerwässer mit begrenztem Wassereinzugsgebiet innerhalb unbelasteten Terrains. Die häufigste Belastung sind hohe Stickstoffkonzentrationen; sie wurden bei allen Höhlen, die in landwirtschaftlich intensiv genutzten Gebieten liegen, festgestellt. Aber auch anthropogene Belastungen durch Schwermetalle, wie sie in für den Besucherverkehr ausgebauten oder mit Schutt verfüllten Höhlen, aber auch bei in Steinbrüchengelegenen Höhlen festgestellt wurden, nehmen zu. Ein weiterer zunehmender Belastungsfaktor sind die Höhlenbesucher selbst, die als „Höhlenforscher“ mit ständig wachsender technischer Ausrüstung immer entlegene Höhlenteile betreten und „erschließen“. Die hierbei auftretenden Veränderungen in ehemals naturbelassenen Höhlen-

Desmecke



Antfelder Höhle
Sinterbecken

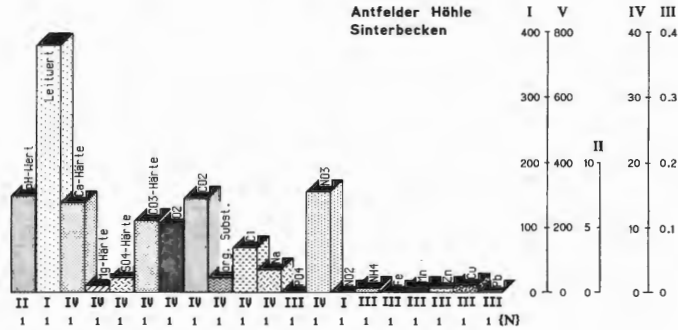


Abb. 106: Die physikochemischen Parameter der Desmecke und des Tropf- und Sickerwassers in der Antfelder Höhle. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 03.12.1986; die Wasserprobe wurde aus dem Sinterbecken nahe dem Eingang entnommen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert	-lg [H ⁺]	SO ₄ -Härte	[°dH]	org. Subst.	[mg/l]	NO ₃ ⁻	[mg/l]	Mn	[mg/l]
Leitwert	[µS/cm]	CO ₃ -Härte	[°dH]	Cl ⁻	[mg/l]	NO ₂ ⁻	[µg/l]	Zn	[mg/l]
Ca-Härte	[°dH]	O ₂	[mg/l]	Na ⁺	[mg/l]	NH ₄ ⁺	[mg/l]	Cu	[mg/l]
Mg-Härte	[°dH]	CO ₂	[mg/l]	PO ₄ ³⁻	[mg/l]	Fe	[mg/l]	Pb	[mg/l]

Veledahöhle

Grundwasserkluft

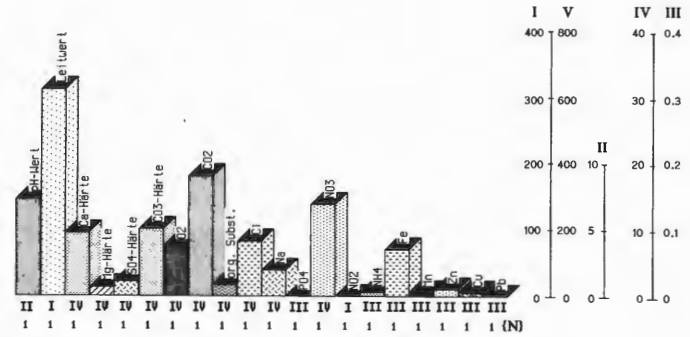


Abb. 107: Die physikochemischen Parameter des Grundwassers in der Veledahöhle. Die dargestellten Werte entstammen einer Einzelanalyse vom 03.12.1986; die Wasserprobe wurde der Grundwasserkluft (unterer Höhlenteil) entnommen. Zu jeder Säule ist unten die zu verwendende Skala (römische Ziffer) und die Anzahl der Messungen (arabische Ziffer) angegeben. Die Einheiten verteilen sich wie folgt:

pH-Wert	-lg [H ⁺]	SO ₄ -Härte	[°dH]	org. Subst.	[mg/l]	NO ₃ ⁻	[mg/l]	Mn	[mg/l]
Leitwert	[µS/cm]	CO ₃ -Härte	[°dH]	Cl ⁻	[mg/l]	NO ₂ ⁻	[µg/l]	Zn	[mg/l]
Ca-Härte	[°dH]	O ₂	[mg/l]	Na ⁺	[mg/l]	NH ₄ ⁺	[mg/l]	Cu	[mg/l]
Mg-Härte	[°dH]	CO ₂	[mg/l]	PO ₄ ³⁻	[mg/l]	Fe	[mg/l]	Pb	[mg/l]

teilen (direkte Belastungen der Gewässer durch Eintrag und vermehrten Aufschluß von Schadstoffen; Folgewirkungen durch Änderungen der Bewetterung) können zu erheblichen Belastungen des Wasserchemismus führen. Dieser Faktor wird an Bedeutung gewinnen, da der „Höhlentourismus“ in den letzten Jahren stark angestiegen ist und nur wenige Höhlen aufgrund eines entsprechend geregelten Zugangs (z. B. Erlenhöhle) hiervon verschont sind.

5. Reaktionen aquatischer Troglobionter auf abiotische und biotische Umweltbedingungen.

Im folgenden werden die Habitatbedingungen einiger der in Westfalen vorkommenden troglobionten Arten nach den Angaben in der Literatur und aufgrund der eigenen Befunde dargestellt. Anhand der gewonnenen Informationen werden Aussagen über die Lokalisation, den Isolationsgrad und die Größe der Populationen getroffen. Die unterschiedlichen Anpassungsstrategien der einzelnen Arten an die Bedingungen der besiedelten Höhlenhabitate werden – soweit dies bereits möglich ist – analysiert.

Krumbachia subterranea REISINGER

Die Art wurde in Westfalen in vadosen Höhlenbereichen gefunden, die eine relativ geringe Isolation zum Außenmilieu aufweisen: Eingangsbereiche, wie in der Erlenhöhle (Meßstellen 1 und 2; vgl. auch GRIEPENBURG 1934), Bereiche unterhalb wenig mächtigem Deckgestein, wie in der „Wolfsschlucht“ der Kluterthöhle in Ennepetal (GRIEPENBURG 1935) und Bereiche unterhalb von Deckgestein mit erweitertem vertikalen Kluftsystem, wie in der Höhle hinter der Villa Ribbert (Mp 8, eigene Funde). Auch die Fundstelle im Halver Hülloch (Mp 8; vgl. auch GRIEPENBURG 1939a) weist entsprechend den klimatischen und physikochemischen Meßergebnissen offenbar eine relativ geringe Isolation zur Außenwelt auf (vgl. den CO₂-Gehalt der Höhlenluft an Mp 8 in Abb. 25B in Kap. III. 3.1. und die Konzentrationen des gelösten und gebundenen CO₂, von Kalzium-, Natrium- und Chloridionen sowie von Phosphat und Nitrat in Tab 7). Oberflächennahe Habitate, wie sie offensichtlich von *K. subterranea* bevorzugt werden, weisen relativ niedrige Temperaturen auf (vgl. Kap. III. 3.1. u. 3.2.).

In der Erlenhöhle wurden schon innerhalb der photischen Zone, wenige Meter hinter dem Eingang Tiere in Bodenmulden gefunden, die nur wenige Wochen im Jahr Tropfwasser führen und im Winter unter 0°C abkühlen können. Diese Mulden unterliegen relativ starken Veränderungen. Besonders häufig wurden die Tiere in Wassertümpeln in der Zentralhalle gefunden (~ 90%). In der Erlenhöhle fand ich die Tiere häufig im Tropfwasser, das in Gefäßen aufgefangen wurde (max. 5 Tiere pro Woche und Tropfstelle). Vermutlich gelangen die Tiere mit dem Tropfwasser nur zufällig in die vadosen Zone und werden hier dann auch in nur vorübergehend mit Wasser gefüllten Bodenmulden beobachtet. Ihr eigentlicher Lebensbereich scheint die Filterzone des Deckgesteins zu sein. In Höhlenteilen mit zunehmender Gesteinsbedeckung (z. B. im Südgang der Erlenhöhle) oder in Höhlen mit noch mächtigerer Gesteinsbedeckung (Halver Hülloch und Höhle hinter der Villa Ribbert) werden die Tiere nur vereinzelt gefunden. Sie scheinen also obere Horizonte zu bevorzugen. Die absolute Häufigkeit der Tiere in der Erlenhöhle schwankt stark (vgl. Abb. 108). Je ein Maximum des Auftretens wurde im Mai 1986, von Dezember 1986 bis März 1987 und von Juni bis August 1987 beobachtet. In manchen Monaten fehlte die Art ganz, obwohl Tropfwasserstellen vorhanden waren. Jungtiere traten verstärkt von April bis Mai 1986 auf.

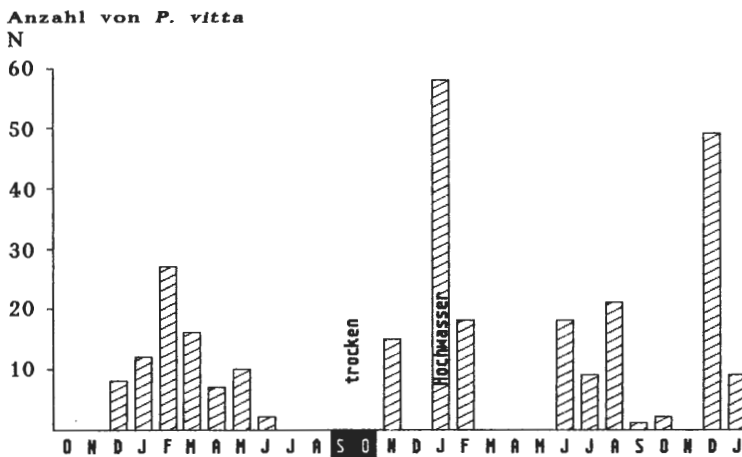
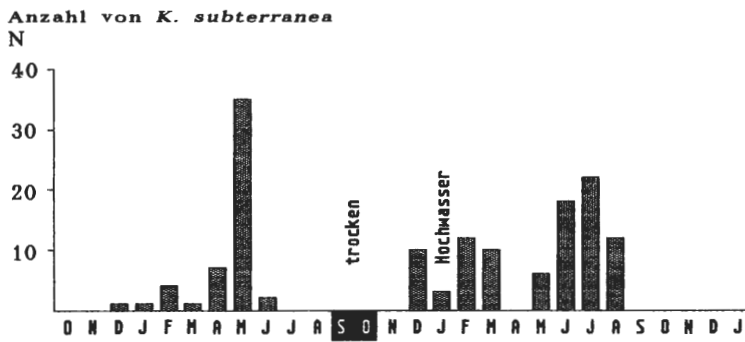
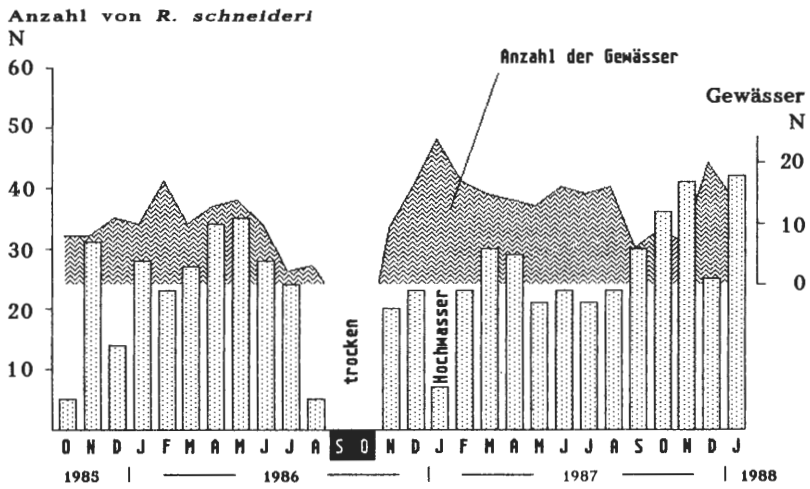
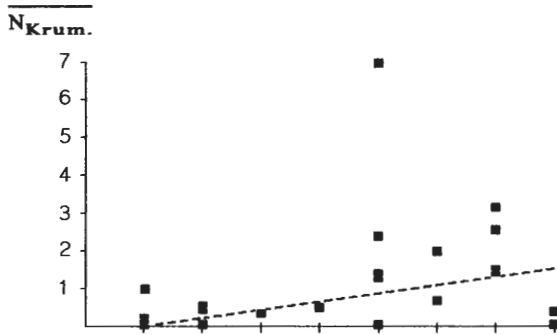


Abb. 108: Abundanzen von *Rectocephala schneideri* [dotted], *Krumbachia subterranea* [solid black], *Planaria vitta* [hatched] sowie die Anzahl der wasserführenden Untersuchungsstellen [hatched area]. Dargestellt sind die Gesamtabundanzen der Arten und die Gesamtzahl wasserführender Stellen.

Die Ursache der Abundanzschwankungen ist nicht genau bekannt. Naheliegend ist die Annahme, daß die Verdriftungsrate mit der Stärke des Tropfenfalls zunimmt. Bei einem „Hochwasser“ im Januar 1987, als die Zahl der Tropfstellen stark erhöht war und das Wasser z.T. traufenartig aus Deckenspalten strömte, wurde allerdings kein vermehrtes Auftreten von *K. subterranea* beobachtet (Abb. 108). Um die Abhängigkeit des Auftretens der Art in der Höhle von der Stärke und der Dauer des Wassereinstroms durch das Deckgestein zu analysieren, wurde die Zahl der jeweils wasserführenden Stellen zugrunde gelegt (alle Gewässer in der Erlenhöhle sind tropfwassergespeist). In Abb. 109 ist die absolute Häufigkeit der Tiere von der Anzahl der jeweils vorhandenen Gewässer dargestellt, in denen die Art mindestens einmal gefunden wurde (Mp 1.1, 2.6, 3.2, 3.3, 3.5-3.8 und 4.4). Die positive Korrelation der Gesamtabundanz mit der Anzahl der Wasserstellen ist signifikant. Es fällt allerdings auf, daß bei einer mittleren Anzahl vorhandener Wasserstellen (5-7) die absolute Häufigkeit maximal ist. Es sind dies die Wasserstellen in der Zentralhalle, die bereits bei mittlerem Wassereinstrom ausgebildet sind. In ähnlicher Weise verändert sich die Zahl der Gewässer, die besetzt sind, mit der Anzahl vorhandener Gewässer (Abb. 109). Die Zahl der besetzten Gewässer ist meist geringer als die Zahl der vorhandenen. Wird die mittlere Anzahl der Tiere pro Gewässer zur Zahl der beim jeweiligen Untersuchungstermin ausgebildeten Gewässer in Beziehung gesetzt, ergibt sich keine signifikante Korrelation. Ich deute diese Beobachtung in folgender Weise: Bei mittlerem Wassereinstrom werden die Tiere aus dem Deckgestein verstärkt ausgespült, es treten dann in der Zentralhalle Abundanzmaxima auf. Bei stärkerem Wasserstrom scheint die Verdriftungsrate der Tiere zurückzugehen (sowohl die Anzahl der Tiere als auch die Anzahl der besetzten Gewässer wird kleiner).

Im Tropfwasser der Erlenhöhle wurde zusammen mit *K. subterranea* die troglophile Triclade *Planaria vitta* gefunden. Diese Art ist im westlichen und östlichen Sauerland weit verbreitet (siehe Abb. 2 in Kap. III. 1.). Sie kommt ebenfalls in der Filterzone des Deckgesteins vor, wie häufige Fänge im aufgefangenen Tropfwasser belegen. Das Auftreten dieser Art zeigt eine andere Abhängigkeit vom Wassereinstrom (von der Zahl der vorhandenen Tropfwasserstellen; vgl. Abb. 108 u. 110). Wie bei *K. subterranea* ist die absolute Häufigkeit signifikant positiv mit der Zahl der vorhandenen Gewässer korreliert, in denen die Art mindestens einmal beobachtet wurde (Mp 2.5, 3.2-3.4, 4.1-4.8; vgl. auch Abb. 11). Abundanzmaxima treten aber, anders als bei *K. subterranea*, bei maximalem Wassereinstrom auf. Die Zahl der besetzten Gewässer nimmt ebenso mit der Zahl der vorhandenen Gewässer zu wie die mittlere Dichte pro Gewässer (vgl. Abb. 110). Bei *P. vitta* geht die Verdriftungsrate, wenn der Wassereinstrom stärker wird, also nicht zurück wie bei *K. subterranea*, sondern sie steigt weiter an. Die Art besitzt offenbar keine Mechanismen, die sie vor Verdriftung schützen. Die geringen Abundanzen von *K. subterranea* während der Phasen stark erhöhten Wassereinstroms läßt hingegen bei dieser Art solche Mechanismen vermuten.

In der Kluterthöhle (Ennepetal) konnte ich *K. subterranea* nicht mehr nachweisen. GRIEPENBURG (1935) fand sie hier in der „Wolfsschlucht“ und im „Sintergang“. Meine klimatischen und physikochemischen Messungen gaben keinen Hinweis darauf, warum die Art heute dort offenbar fehlt. Ich halte es aber für naheliegend, daß anthropogene Belastungen zum Aussterben der Tiere führten. Oberhalb der „Wolfsschlucht“ verläuft heute die Zufahrtsstraße zur Kluterthöhle; der „Sintergang“ wurde häufig für sogenannte „Abenteurerführungen“ genutzt; heute befindet sich in seinem Anfangsteil eine Therapiestation. Dauerhafte Veränderungen des Lebensraums, wie für die Kluterthöhle beschrieben, wurden an den heute noch verbliebenen Fundstellen von *K. subterranea* (Erlenhöhle, Halver Hülloch und Höhle hinter der Villa Ribbert) nicht festgestellt. – Da *K. subterranea* ein Bewohner oberflächenna-

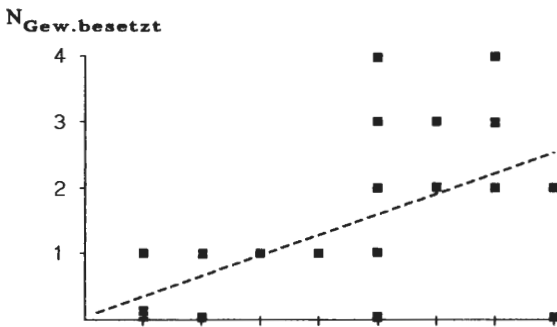


Gleichung der
Regressionsgeraden:
 $N_{Krum.} = 0.22 N_{Gew.} - 0.24$

Wertepaare (N):
N = 22

Korrelationskoeffizient (R):
R = 0.33

Irrtumswahrscheinlichkeit: >5%



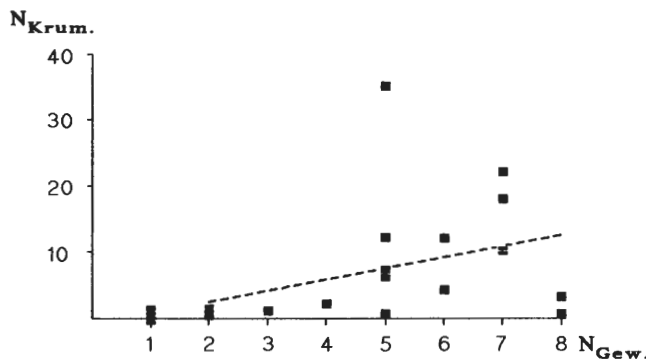
Gleichung der
Regressionsgeraden:

$N_{Gew.besetzt} =$
 $0.32 N_{Gew.} + 0.06$

Wertepaare (N):
N = 22

Korrelationskoeffizient (R):
R = 0.59

Irrtumswahrscheinlichkeit: ≤1.0%



Gleichung der
Regressionsgeraden:

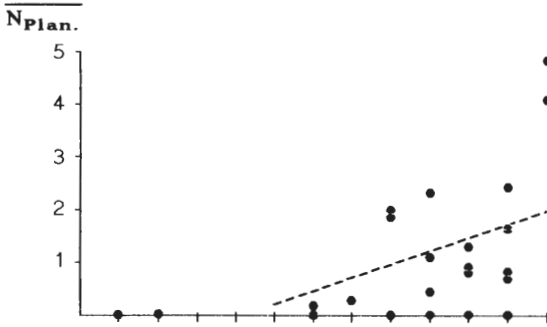
$N_{Krum.} = 1.67 N_{Gew.} - 0.87$

Wertepaare (N):
N = 22

Korrelationskoeffizient (R):
R = 0.46

Irrtumswahrscheinlichkeit: ≤1.0%

Abb. 109: Mittlere Abundanzen ($\overline{N_{Krum.}}$), Gesamtabundanzen ($N_{Krum.}$) und Anzahl der besetzten Gewässer ($N_{Gew.besetzt}$) von *Krumbachia subterranea* in Abhängigkeit von der Anzahl der vorhandenen Gewässer ($N_{Gew.}$) in der Erlenhöhle, Schwelm. Es liegen diejenigen Gewässer dieser Darstellung zugrunde, in denen die Art mindestens einmal gefunden wurde.

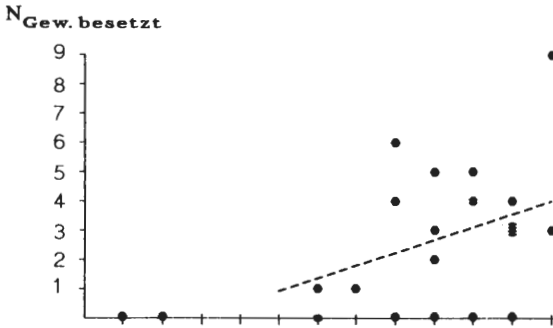


Gleichung der
Regressionsgeraden:
 $N_{Plan.} = 0.25 N_{Gew.} - 1.05$

Wertepaare (N):
 $N = 25$

Korrelationskoeffizient (R):
 $R = 0.54$

Irrtumswahrscheinlichkeit: $\leq 1.0\%$

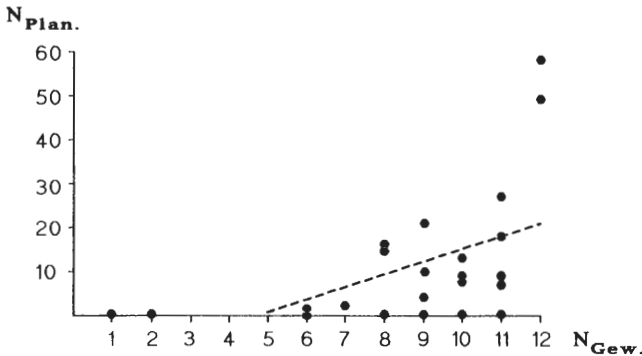


Gleichung der
Regressionsgeraden:
 $N_{Gew. \text{ besetzt}} = 0.44 N_{Gew.} - 1.30$

Wertepaare (N):
 $N = 25$

Korrelationskoeffizient (R):
 $R = 0.53$

Irrtumswahrscheinlichkeit: $\leq 1.0\%$



Gleichung der
Regressionsgeraden:
 $N_{Plan.} = 2.88 N_{Gew.} - 13.74$

Wertepaare (N):
 $N = 25$

Korrelationskoeffizient (R):
 $R = 0.54$

Irrtumswahrscheinlichkeit: $\leq 1.0\%$

Abb. 110: Mittlere Abundanzen ($\overline{N_{Plan.}}$), Gesamtabundanzen ($N_{Plan.}$) und Anzahl der besetzten Gewässer ($N_{Gew. \text{ besetzt}}$) von *Planaria vitta* in Abhängigkeit von der Anzahl der vorhandenen Gewässer ($N_{Gew.}$) in der Erlenhöhle, Schwelm. Es liegen diejenigen Gewässer dieser Darstellung zugrunde, in denen die Art mindestens einmal gefunden wurde.

her Höhlenkompartimente ist, sind die Populationen heute mit großer Wahrscheinlichkeit voneinander isoliert (vgl. Kap. IV.3.). Stellen, von denen die Tiere durch bereits singuläre Störungen verschwunden sind, können deshalb auch nach Abklingen der Störungen nicht wiederbesiedelt werden.

Tab. 7 faßt die Variationsbreite der kennzeichnenden Parameter der Tropf- und Sickergewässer zusammen, in denen *K. subterranea* von mir gefunden wurde. Es ist ersichtlich, daß die Variation hinsichtlich der Ca-, Mg-, SO₄-, Cl-Konzentrationen, der CO₂- und O₂-Konzentrationen und des Gehaltes an organischen Substanzen erheblich ist. Auch die Phosphat-, Nitrat-, Nitrit- und NH₄⁺-Gehalte sind zum Teil hoch und variieren stark. Wie in Kap. III. 3.2. erläutert, sind starke (z. T. jahresperiodische) Konzentrationschwankungen gelöster Stoffe für Gewässer der Filterzone charakteristisch. *K. subterranea* ist offensichtlich daran angepaßt und erweist sich auch gegenüber mäßig erhöhte Konzentrationen von Nitrat und Ammonium (z.B. in der Erlenhöhle und der Höhle hinter der Villa Ribbert) als relativ unempfindlich; sie ist auch relativ Fe- und Mn-tolerant.

Rectocephala schneideri (KOMAREK)

Die Art wurde zuerst aus „Grubenwasseransammlungen mit reichlich Schlamm sediment“ des zwischen Clausthal und Goslar gelegenen 500 Jahre alten Grumbacher Stollens bekannt (KOMAREK 1930). Der Stollen war z. Z. der Artbeschreibung bereits 150 Jahre außer Betrieb. Die Tiere wurden 62m unter Tage zusammen mit „Schwärmen von Niphargus und Asellus cavaticus“ (KOMAREK 1930) angetroffen, so daß angenommen werden kann, daß es sich bei dem Fundort um weitgehend unbelastetes Grundwasser innerhalb der vadosen Zone gehandelt hat. Ein weiteres Grundwasservorkommen gibt GRIEPENBURG (1939a) für Idstein im Taunus an, wo er 1936/37 mehrere Tiere aus einem Grundwasserbrunnen pumpte. Die westfälischen Höhlenfunde wurden an Stellen oberhalb des Grundwasserhorizontes innerhalb der vadosen Zone in Höhlen mit relativ geringer Gesteinsbedeckung gemacht (Erlenhöhle, Kleines Hülloch bei Kierspe, GRIEPENBURG 1934, 1939a; neue eigene Funde in der Schönebecker Höhle). Die Fundstellen werden aber offensichtlich von externen Wetterwechseln nur schwach beeinflusst; in unmittelbarer Eingangsnähe wurde die Art bisher nicht gefunden. Charakteristisch für die westfälischen Fundstellen ist auch, daß sie sediment- und nährstoffreich sind. Dies scheint auch für das heute verschlossene Kiersper Hül-

	Populationen aus der			
	Friedrichshöhle		Falkensteiner Höhle - Eckisloch	
	♂♂	♀♀	♂♂	♀♀
Anzahl der gemessenen Tiere (N)	N = 9	N = 8	N = 17	N = 30
Mittelwert [mm]	a) 5.05	a) 5.25	a) 4.31	a) 4.67
a) Länge	b) 0.94	b) 1.01	b) 0.94	b) 1.06
b) Breite				
Standardabweichung	a) 0.51	a) 0.38	a) 0.43	a) 0.53
a) Länge	b) 0.08	b) 0.08	b) 0.10	b) 0.11
b) Breite				

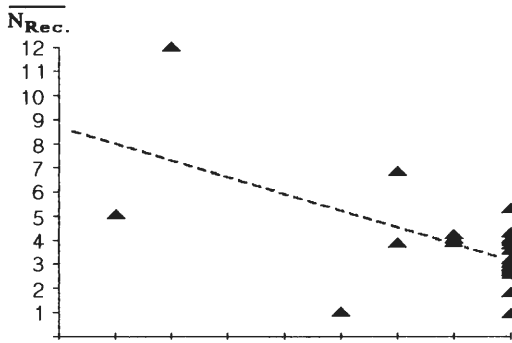
Tab. 6: Körperlänge und -Breite (Mittelwerte und Standardabweichung) der untersuchten *Proasellus cavaticus*-Populationen aus der Friedrichshöhle (Westfalen) sowie aus dem Eckisloch und der Falkensteiner Höhle (Schwäbische Alb). Es sind nur Adulttiere berücksichtigt.

Tab. 7: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den *K. subterranea*-Fundstellen. Die Werte aus dem Halver Hülloch entstammen einer Einzelanalyse vom 07.12.1986.

Parameter a) Minimum b) Maximum		Höhlen		
		Erlenhöhle	Höhle hinter der Villa Ribbert	Halver Hülloch
Wassertemperatur [°C]	a	≤ 0.0	8.9	7.4
	b	9.3	9.1	7.8
pH-Wert -lg [H ⁺]	a	7.2	7.1	
	b	7.6	7.2	7.4
Leitwert [μS/cm]	a	107.9	471.3	
	b	410.0	557.8	324.0
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	33.9	109.4	
	b	111.3	133.5	51.1
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	1.0	12.7	
	b	7.1	13.0	11.7
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	a	7.7	71.0	
	b	65.3	92.2	55.8
CO ₂ -gebunden [mg/l]	a	73.0	180.4	
	b	204.6	211.2	128.0
CO ₂ -gelöst [mg/l]	a	7.5	22.0	
	b	31.3	34.3	11.7
O ₂ -Konzentration [mg/l]	a	4.7	8.2	
	b	11.8	8.5	9.3
O ₂ -Sättigung [%]	a	40.5	73.4	
	b	98.4	75.5	93.6
org. Substanzen [mg/l]	a	3.5	2.7	
	b	14.3	3.8	2.4
Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	5.0	10.2	
	b	13.8	12.9	9.5
Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	1.0	6.0	
	b	4.0	7.7	3.7
PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.005	
	b	0.35	0.07	0.13
NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	2.5	50.2	
	b	35.7	61.4	3.1
NO ₂ ⁻ -Konzentration [μg/l]	a	0.0	0.0	
	b	101.0	0.0	5.0
NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.005	
	b	0.23	0.05	0.01
Fe-Konzentration [mg/l]	a	0.005	0.040	
	b	0.690	0.100	0.090
Mn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	
	b	0.440	0.010	0.000
Zn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	
	b	0.020	0.010	0.000
Cu-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	
	b	0.070	0.020	0.005
Pb-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	
	b	0.000	0.000	0.000

loch zuzutreffen (SÖNNEKEN 1966), aus dem GRIEPENBURG (1939a) ein Exemplar zusammen mit *N. fontanus* erbeutete. *N. fontanus* kommt auch in der Schönebecker Höhle zusammen mit *R. schneideri* vor.

Höhere Tierzahlen stellte ich nur in der Erlenhöhle fest. Bei den monatlichen



Gleichung der
Regressionsgeraden:

$$N_{Rec.} = -0.70 N_{Gew.} + 8.62$$

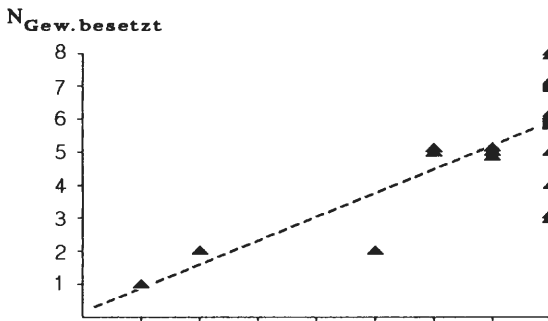
Wertepaare (N):

$$N = 25$$

Korrelationskoeffizient (R):

$$R = -0.61$$

Irrtumswahrscheinlichkeit: $\leq 0.1\%$



Gleichung der
Regressionsgeraden:

$$N_{Gew. \text{ besetzt}} = 0.72 N_{Gew.} + 0.129$$

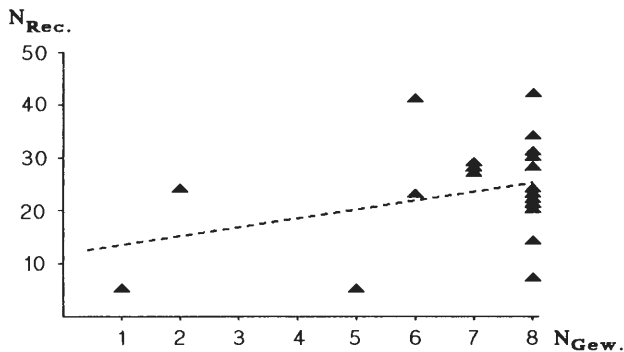
Wertepaare (N):

$$N = 25$$

Korrelationskoeffizient (R):

$$R = +0.73$$

Irrtumswahrscheinlichkeit: $\leq 0.1\%$



Gleichung der
Regressionsgeraden:

$$N_{Rec.} = 1.72 N_{Gew.} + 11.75$$

Wertepaare (N):

$$N = 25$$

Korrelationskoeffizient (R):

$$R = 0.35$$

Irrtumswahrscheinlichkeit: $\geq 5\%$

Abb. 111 : Mittlere Abundanzen ($\overline{N_{Rec.}}$), Gesamtabundanzen ($N_{Rec.}$) und Anzahl der besetzten Gewässer ($N_{Gew. \text{ besetzt}}$) von *Rectocephala schneideri* in Abhängigkeit von der Anzahl der vorhandenen Gewässer ($N_{Gew.}$) in der Erlenhöhle, Schwelm. Es liegen diejenigen Gewässer dieser Darstellung zugrunde, in denen die Art mindestens einmal gefunden wurde.

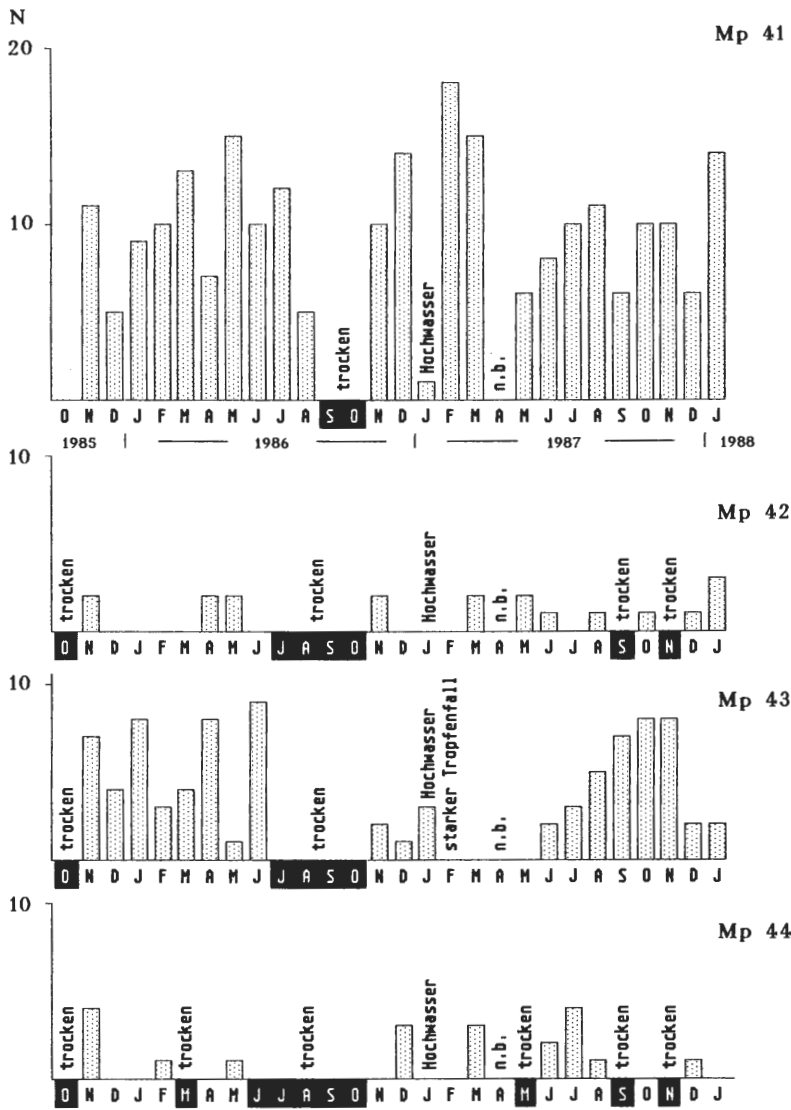


Abb. 112: Abundanzen von *Rectocephala schneideri* in der Erlenhöhle an den Meßstellen 41 bis 44

Begehungen vom Oktober 1985 bis Januar 1988 wurden an den 8 Gewässern im Bereich des Südgangs (Mp 41 – Mp 48; vgl. auch Abb. 11) bis zu 40 Tiere gezählt. Meist bewegte sich die Gesamtzahl zwischen 20 und 30 (vgl. Abb. 108). Während die Gesamtabundanz nicht erkennbar von der Anzahl wasserführender Fundstellen abhängt (Abb. 111), ist die mittlere Abundanz pro Gewässer mit der Anzahl wasserführender Stellen signifikant negativ korreliert (Abb. 111). Dies macht deutlich, daß die Population auf den vadosen Bereich des Südgangs in der Erlenhöhle beschränkt ist. Bei Trockenheit wandern die Tiere in die verbleibenden Wasserstellen (hohe mittlere Abundanz pro Gewässer),

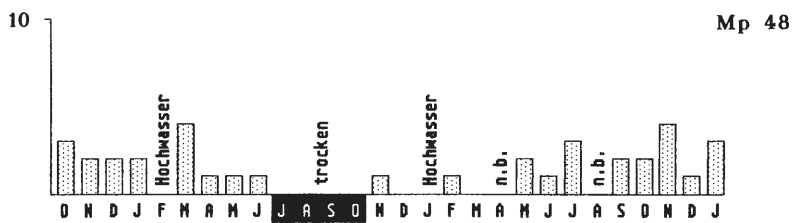
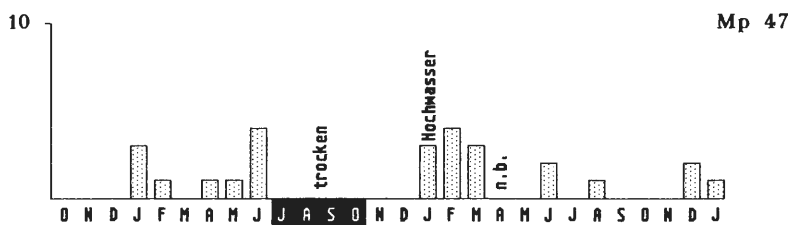
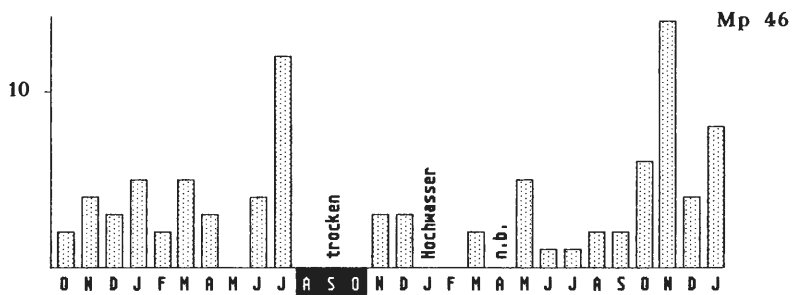
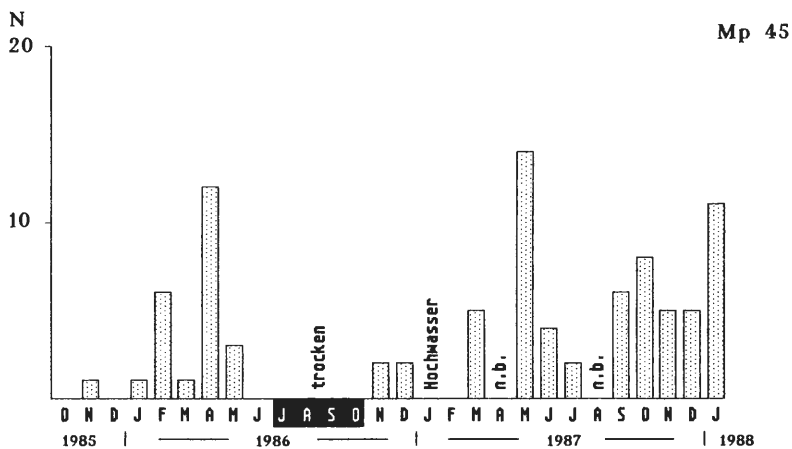


Abb. 113: Abundanzen von *Rectocephala schneideri* in der Erlenhöhle an den Meßstellen 45 bis 48

während sie sich bei normalem Wasserstand weiter ausbreiten können (niedrige mittlere Abundanz pro Gewässer); aber auch dann werden nicht immer sämtliche wasserführenden Stellen besetzt (Abb. 111). Bei starkem Hochwasser (z.B. am 31. 12. 1986; Abb. 108) wurden deutlich weniger Tiere beobachtet; ihr Verbleib ist noch ungeklärt. Nach Rückgang eines Hochwassers stellte sich die ursprüngliche Abundanz wieder ein (Abb. 108). In der Filterzone konnte ich *R. schneideri* nicht nachweisen. Zonen mit starkem Tropfenfall werden von den Tieren gemieden (z.B. Mp 42, 47 und 48); sie bevorzugen Stillwasserzonen (z.B. Mp 41, 43, 45 und 46; vgl. Abb. 112 u. 113). Nach starken Niederschlägen kann auch an Mp 43 starker Tropfenfall auftreten, wie am 09. 02. 1987. Obwohl die Stelle bei normalem Wassereinstrom gut besetzt ist, fehlte *R. schneideri* hier zu dieser Zeit (Abb. 112). Die größten Tierzahlen wurden an Mp 41 beobachtet, an einer Fundstelle, die während der Untersuchungszeit nur für 2 Monate trocken fiel und gegenüber den restlichen *R. schneideri*-Fundstellen am längsten Wasser führt (Abb. 112). Dieses Gewässer weist einen Bereich mit viel organischem Material auf (Reisig, Holz), der von einem zweiten Bereich mit Blockwerk durch Sinter und einen Stalagmiten abgetrennt ist (Abb. 114). Der größte Anteil des auf den Stalagmiten auftropfenden Wassers fließt in Richtung Mp 42 und von dort in Richtung Zentralhalle ab. Mp 42 fällt

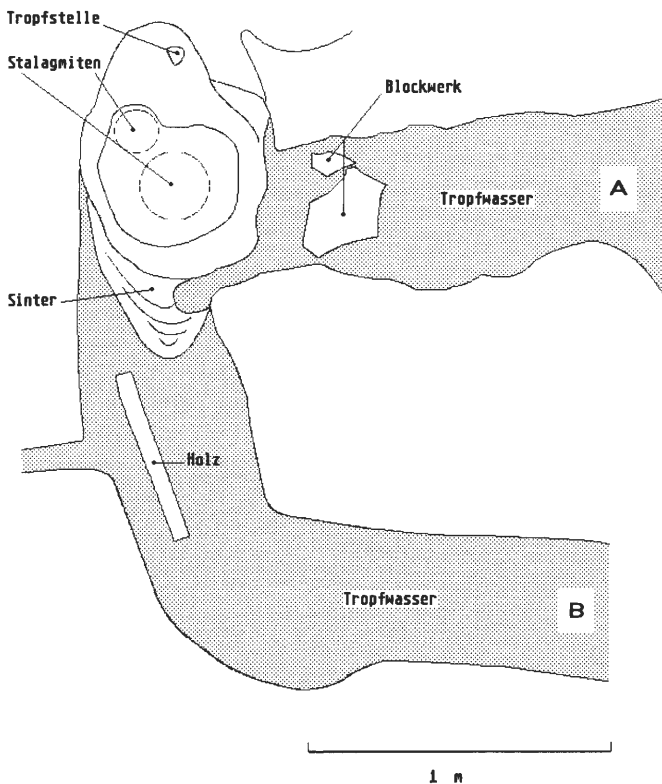
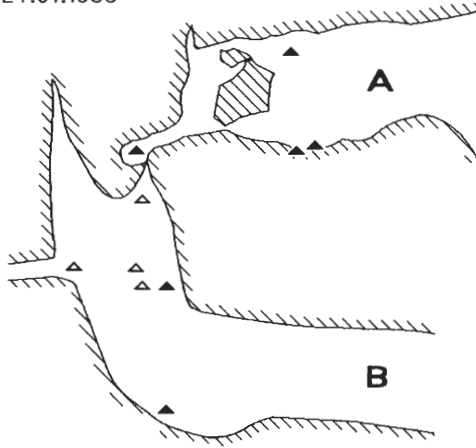


Abb. 114: Fundstelle Mp 41 für *Rectocephala schneideri* in der Erlenhöhle. Das Gewässer ist von Tropf- und Sickerwasser gespeist und gliedert sich in einen oberen Abschnitt (A), der neben Sediment Kalksteine (Blockwerk) am Boden enthält. Der untere Abschnitt (B) ist weitgehend frei von Blockwerk, hier kommt auf dem Gewässerboden vermehrt organisches Material (Holz) vor. Es wurden hier in monatlichen Abständen die Anzahl der Tiere, ihre räumliche Verteilung und die Wasserführung festgestellt.

Mp 41
24.01.1986



Verteilung von *R. schneideri* bei normaler Wasserführung an Mp 41 in der Erlenhöhle. Mit 10 Tieren entspricht dies einer normalen Besetzung an Mp 41. Ein Teil der Tiere in Abschnitt B flottiert an der Wasseroberfläche \blacktriangle ; 2 Tiere kriechen auf der Sedimentoberfläche \blacktriangle . Im Abschnitt A halten sich 2 Tiere am Gewässerrand auf und sind offensichtlich inaktiv \blacktriangle ; während 2 Tiere aktiv umherkriechen.

Das Flottieren der Tiere in Abschnitt B ist vermutlich eine Reaktion auf zunehmenden Sauerstoffmangel, der in diesem nährstoffreichen Abschnitt durch erhöhte Sauerstoffzehrung zweifellos größer ist als in dem relativ nährstoffärmeren Abschnitt A.

09.05.1986

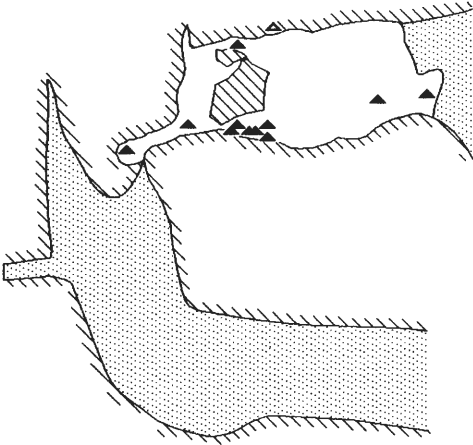


Verteilung von *R. schneideri*. Sämtliche Tiere befinden sich innerhalb der Zone A, obwohl Zone B wasserführend ist. Nur 2 Tiere bewegten sich auf der Sedimentoberfläche etwa in der Mitte der Gewässerzone während die übrigen 12 Tiere überwiegend im halbkontrahierten Zustand am Gewässerrand verharrten; ein Tier flottierte an der Wasseroberfläche. Vermutlich herrscht auch innerhalb der Zone A Sauerstoffmangel.

Abb. 115: Verteilung von *Rectocephala schneideri* an Mp 41 in der Erlenhöhle bei normalem Wassereinstrom.

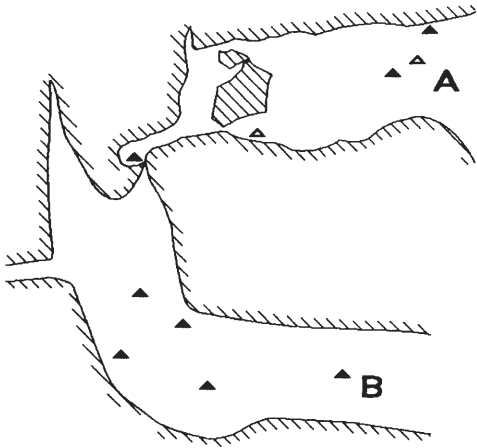
häufig trocken. Ein geringerer Teil rinnt als Sickerwasser am Sinter entlang in Richtung Mp 41. Direkter Tropfenfall erfolgt hier außer während Hochwasserperioden aber nicht, so daß das Wasser an Mp 41 weitgehend unbewegt bleibt. In dem bewegteren Wasser des benachbarten Mp 42 kommt *R. schneideri* in geringerer Abundanz vor (Abb. 112). Da die Wasserstelle Mp 41 trotz verminderten Wassereinstroms nur selten trockenfällt, ist die Versickerungsrate hier offensichtlich gering. Ein besonders häufiges Trockenfallen wurde an Mp 44 beobachtet (Abb. 112); dort kommt *R. schneideri* ebenfalls in nur geringer Abundanz vor. Mp 41 dient während der Trockenzeit als Refugialraum. Bei Hochwasser nimmt auch hier die Abundanz drastisch ab (vgl. den 31. 12. 1986 in Abb. 112). Bis auf Mp 47 wurde auch an den anderen *R. schneideri*-Fundstellen ein Rückzug der Tiere bei Hochwasser festgestellt (Abb. 112 und 113).

Mp 41
18.07.1986



Verteilung von *R. schneideri* während Niedrigwasser. Mit insgesamt 12 Tieren weist Mp 41 eine normale Besetzung auf. Die Verteilung ist jedoch ungleichmäßig. Der Aufenthaltsschwerpunkt mit weitgehend inaktiven Tieren liegt im Blockwerkbereich; nur 2 Tiere bewegen sich am rechts seicht auslaufenden Gewässerrand auf dem Sediment. Vermutlich herrscht aufgrund fortschreitender Sauerstoffzehrung im restlichen Gewässer Sauerstoffmangel.

28.10.1986

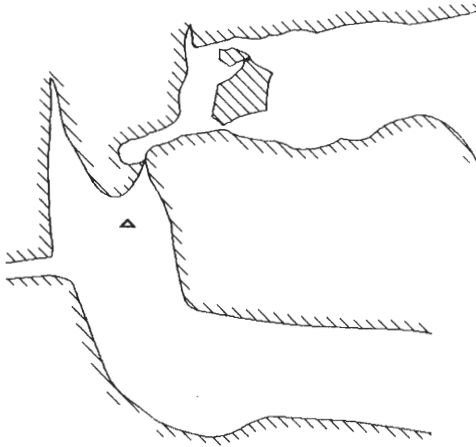


Verteilung von *R. schneideri* ca. 1 Woche nach Einsetzen des Wassereinstroms. Die Besetzungstärke ist normal; etwa die Hälfte der Tiere ist in Zone B auf dem Sediment kriechend aktiv. Innerhalb der Zone A befinden sich 3 Tiere am Gewässerrand, möglicherweise inaktiv; 2 Tiere flottieren an der Wasseroberfläche. Die Verteilung der Tiere ist relativ gleichmäßig.

Abb. 116: Verteilung von *Rectocephala schneideri* an Mp 41 in der Erlenhöhle während Niedrigwassers am 18.07.1986 und nach Wiederauffüllung am 28.10.1986.

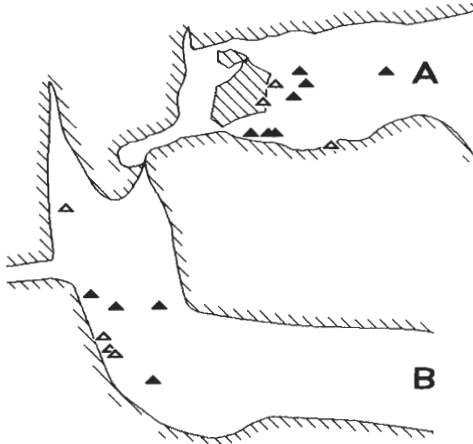
Aktive Tiere bewegen sich häufig auf der Sedimentoberfläche kriechend vorwärts, zuweilen flottieren sie auch an der Wasseroberfläche (vgl. den 24. 01. 1986 und den 01. 08. 1987 in Abb. 115 – 118). In Ruhe befindliche Tiere halten sich meist am Gewässerrand in Höhe des Wasserspiegels am Fels auf (z.B. am 09. 05. 1986; vgl. Abb. 115), möglicherweise weil der Sauerstoffdiffusionsweg an diesen Stellen sehr gering ist; auch werden hier Störgrößen (Pegeländerungen, Wasserbewegungen) zuerst wirksam, so daß die Tiere frühzeitig aktiviert werden. Bei Niedrigwasser befinden sich die Tiere meist im Ruhezustand (vgl. den 18. 07. 1986, den 31.08. und den 22. 11. 1987 in Abb. 116, 118 und 119); nach Wiederansteigen der Gewässer scheinen die Tiere nur kurzfristig erhöhte Aktivität zu zeigen (sie kriechen auf der Sedimentoberfläche; vgl. den 28. 10. 1986 und den 09. 01. 1988 in Abb. 116 und 119). Zu Zeiten hoher Abundanz, auch bei Niedrigwasser, sind die Tiere an Mp 41 nicht gleichmäßig verteilt, sondern sie treten geclustert auf (siehe Abb. 116 – 117).

Mp 41
31.12.1986



Verteilung von *R. schneideri* während einer Hochwasserphase. Es wurde nur ein Tier an der Wasseroberfläche flottierend vorgefunden. Das Wasser hat sich in den Bereichen A und B hoch angestaut (hier nicht gezeigt).

09.02.1987

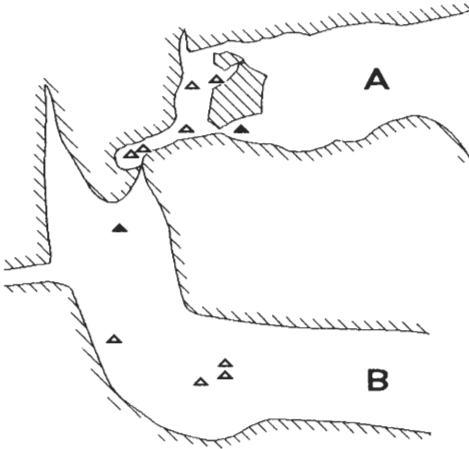


Verteilung von *R. schneideri* nach Rückgang des Hochwassers. Mit 18 Tieren ist die Besetzung an Mp 41 sehr hoch und in Zone A und B etwa gleich groß. Die Tiere treten geclustert auf. Der überwiegende Teil ist aktiv; 7 Tiere flottieren an der Wasseroberfläche. 4 Tiere in Zone A halten sich am Gewässerrand auf (1 flottierend) und scheinen inaktiv zu sein.

Abb. 117: Verteilung von *Rectocephala schneideri* an Mp 41 in der Erlenhöhle während des Hochwassers am 31.12.1986 und nach Einsetzen normalen Wassereinstroms am 09.02.1987.

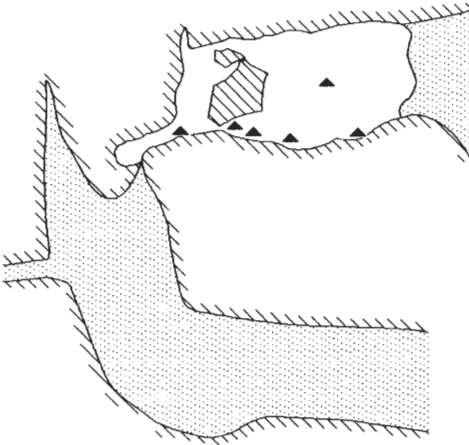
In der Schönebecker Höhle (vgl. Abb. 14) konnte ich nur geringe Tieranzahlen an den Fundstellen Mp 5 und Mp 9 feststellen (Maximum: 5 Tiere/Gewässer). Da die Fundstellen nur für kurze Zeit im Jahr Wasser führen (Tropfwasser tritt an diesen Fundstellen nicht auf), ist zu vermuten, daß die Population unzugängliche Stellen unterhalb des Hauptgangs bewohnt. Die Vertikalausdehnung des nicht begehbaren Kluftsystems ist unbekannt, aber es ist aufgrund der Topologie und der geologischen Formation (kleine Kalklinse der Honseler Schichten) zu vermuten, daß keine Verbindung zum Grundwasser besteht (die benachbarte Ahe fließt ca. 50m unterhalb der Höhle). Aufgrund der für diese Formation typischen Schichtung von Kalk und Tonschiefer könnten aber ausgedehnte Wasseransammlungen auf wasserundurchlässigen Schichten ruhen, so daß die *R. schneideri*-Population möglicherweise außerhalb der vadosen Zone in einem tiefer gelegenen, nicht begehbaren phreatischen System lebt und nur bei hohem

Mp 41
01.08.1987



Verteilung von *R. schneideri* zu Beginn einer Niedrigwasserperiode. Mit 11 Tieren, von denen der überwiegende Teil an der Wasseroberfläche flottiert, ist Mp 41 normal besetzt. Die Verteilung der Tiere ist geclustert; die Aufteilung auf Zone A und B ist etwa gleich verteilt. Innerhalb der Zone A halten sich die Tiere bevorzugt im Blockwerkbereich auf, nahe des schwach überrieselten Sinters, möglicherweise als Reaktion auf eine fortschreitende Sauerstoffabnahme im Wasser.

31.08.1987

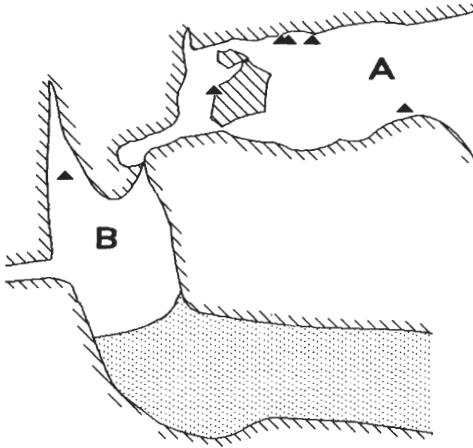


Verteilung von *R. schneideri* während der sich oben anschließenden Niedrigwasserphase. Mit 6 Tieren ist die Besetzung von Mp 41 reduziert. Die Tiere halten sich bevorzugt am Gewässerrand auf, offensichtlich inaktiv; ein Tier kriecht auf dem Sediment.

Abb. 118: Verteilung von *Rectocephala schneideri* in der Erlenhöhle bei rückläufigem Wassereinstrom und sinkendem Wasserstand an Mp 41 am 01.08.1987 und bei Niedrigwasser am 31.08.1987.

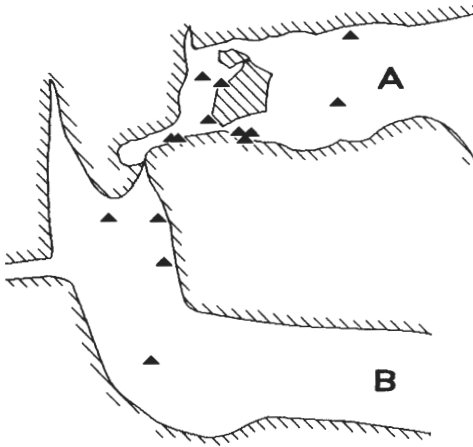
Wasserstand die vadose Zone erreicht. Wie bei der Erlenhöhle, steht auch oberhalb der Schönebecker Höhle ein Laubwald. Der Eintrag von organischem Material über den Höhleneingang ist ebenfalls erhöht. Die Fundstellen weisen reichlich Sediment, Reisig und Geäst auf. Das die Fundstelle Mp 5 speisende Sickerwassergerinne Mp 3 sowie weitere auf Sediment ruhende Sickerwassertümpel in den Nebengängen der Höhle weisen kein *R. schneideri*-Vorkommen auf. Die Schönebecker Höhle ist derzeit unverschlossen und wird häufig von Besuchern begangen. Hierzu sind Bretter über tiefere Wasserstellen und in engen Passagen gelegt, die sich bei Belastung tief in das Sediment eindrücken. Störungen durch häufiges Begehen der Wasserstellen könnten die Ursache der Seltenheit der Tiere in der vadosen Zone sein. Hingegen kommt der gegenüber Störungen unempfindlichere *N. fontanus* hier häufiger vor.

Mp 41
22.11.1987



Verteilung von *R. schneideri* zu Beginn der Gewässerauffüllung. Wie am 31.08. 1987 ist die Besetzung reduziert. Der überwiegende Teil der Tiere hält sich innerhalb der Zone A auf und ist weitgehend inaktiv; ein Tier ist in Zone B aktiv.

09.01.1988



Verteilung von *R. schneideri* nach Wiederauffüllung von Mp 41. Die Besetzung des Gewässers ist mit 14 Tieren leicht erhöht. Ein Teil der Tiere hält sich innerhalb der Zone A am Gewässerrand und im Blockwerk auf, möglicherweise inaktiv. Ca. die Hälfte der Tiere ist aktiv, 4 Tiere innerhalb der Zone B.

Abb. 119 : Verteilung von *Rectocephala schneideri* in der Erlenhöhle zu Beginn der Wasserauffüllung an Mp 41 am 22.11.1987 und nach Wiederauffüllung und bei normalem Wassereinstrom am 09.01.1988.

Die Wassertemperaturen sind an den Fundstellen der Erlenhöhle und der Schönebecker Höhle ähnlich; der Leitwert sowie die Konzentrationen von Kalzium, Magnesium, Sulfat und Chlorid, die Phosphat- und Stickstoffkonzentrationen, der Gehalt an gelöstem CO₂ und der organischen Substanzen liegen in der Schönebecker Höhle wesentlich niedriger als in der Erlenhöhle (vgl. Tab. 8); die Erlenhöhle ist – wie bereits erwähnt (Kap. III. 4.) – natürlicherweise, aber auch anthropogen belastet. Auch Phasen vorübergehender erhöhter O₂-Zehrung, wie sie in der Erlenhöhle besonders an dem von den Tieren bevorzugten Gewässer Mp 41 (Abb. 11) auftreten, werden offenbar toleriert. Ich gewann den Eindruck, daß die Tiere dann inaktiv am Fels am Gewässerrand verharren.

Tab. 8: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den *R. schneideri*-Fundstellen

Parameter a) Minimum b) Maximum	Höhlen	
	Erlenhöhle	Schönebecker Höhle
Wassertemperatur [°C]	a 4.6 b 8.3	5.8 6.9
pH-Wert -lg [H ⁺]	a 7.2 b 7.5	7.4 7.5
Leitwert [μS/cm]	a 107.9 b 410.0	207.6 218.7
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a 33.9 b 111.3	40.7 45.5
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a 1.1 b 7.1	3.3 4.3
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	a 7.7 b 65.3	13.4 30.7
CO ₂ -gebunden [mg/l]	a 73.0 b 204.6	83.6 96.8
CO ₂ -gelöst [mg/l]	a 7.5 b 31.3	5.1 7.9
O ₂ -Konzentration [mg/l]	a 4.7 b 11.8	10.3 10.9
O ₂ -Sättigung [%]	a 40.5 b 98.4	87.1 91.9
org. Substanzen [mg/l]	a 3.5 b 14.2	2.8 3.5
Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	a 5.0 b 13.8	6.3 7.6
Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	a 1.0 b 4.0	3.5 3.7
PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	a 0.00 b 0.35	0.02 0.10
NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	a 2.5 b 35.7	0.0 1.0
NO ₂ ⁻ -Konzentration [μg/l]	a 0.0 b 101.0	4.0 11.0
NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	a 0.00 b 0.23	0.02 0.09
Fe-Konzentration [mg/l]	a 0.005 b 0.690	0.090 0.290
Mn-Konzentration [mg/l]	a 0.000 b 0.440	0.000 0.000
Zn-Konzentration [mg/l]	a 0.000 b 0.020	0.000 0.000
Cu-Konzentration [mg/l]	a 0.000 b 0.070	0.000 0.030
Pb-Konzentration [mg/l]	a 0.000 b 0.000	0.000 0.000

Prostoma putealis (DE BEAUCHAMP)

Es sind bisher nur wenige Fundstellen von troglobionten Nemertinen beschrieben worden (vgl. Kap. III. 1.). Die Kluterthöhle in Ennepetal (Abb. 17) ist bisher die einzige Fundstelle, an denen Höhlennemertinen über einen längeren Zeitraum im natürlichen Habitat regelmäßig beobachtet werden konnten. Der systematische Status, Morphologie, Aktivitäts- und Migrationsverhalten, Abundanzschwankungen und ökologische Ansprüche an das Habitat wurden von mir bereits während meiner Diplomarbeit 1984 untersucht, deren bislang unveröffentlichte Ergebnisse ich hier und in Kap. III. 6. auszugsweise vorstellen möchte.

Alle bisherigen Funde troglobionter Nemertinen (einschließlich der Kluterthöhlenfunde) wurden entweder aus dem Grundwasser (Interstitial und Quellen) oder aus Höhlen innerhalb der vadosen Zone gemeldet (vgl. DE BEAUCHAMP 1932; GRIEPENBURG 1935 und 1941b; MOTAS 1961 und TARMAN 1961). Es liegen keine Funde aus der Filterzone vor. In der Kluterthöhle fand ich *P. putealis* nur in den relativ isoliert liegenden, sedimentreichen Seen Mp 3, 5, 25, 26 und 27 (Abb. 17; vgl. Kap. III. 3.2. und 3.4.), die stark reduzierte Schwankungen der Umweltparameter aufweisen. Es handelt sich um großlumige Stillgewässer, die aus der Filterzone gespeist werden, z. T. bei Hochwasser auch mit dem Grundwasser in Kontakt treten. Die Art fehlt in der Filterzone, vermutlich, weil sie die dort herrschenden Parameterschwankungen nicht toleriert. Die Tiere haben innerhalb der nördlich gelegenen Gewässer der vadosen Zone der Kluterthöhle offensichtlich ihre natürliche Ausbreitungsgrenze erreicht. In der Kluterthöhle fehlt die Art heute im fließenden Grundwasser (Mp 6, 13, 21, 22, 34, 39 und 40) sowie in den regelmäßig vom Grundwasser gespeisten Seen (Mp 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 24 und 30). GRIEPENBURG (1935) fand die Tiere im westlichen und östlichen Höhlenteil (einschließlich „Ostsee“, Mp 2). In letzter Zeit erfährt die Population zunehmende Verluste ihres Besiedlungsraumes; der „Ostsee“ ist heute frei von allen troglobionten Arten. Der See wurde in den 70er Jahren durch einen künstlichen Damm in 2 Teile aufgeteilt. Auch weniger empfindliche Arten aus der Gruppe der Crustaceen fehlen seitdem im „Ostsee“ (vgl. hierzu das Vorkommen von *N. aquilex*, *N. kochianus* und *N. fontanus*). Schutzmaßnahmen im Bereich des „Ostsees“ (Abschalten der Beleuchtung und Entfernen der Liegen der Therapiestation, Absperrungen) führten noch nicht zu einer Wiederbesiedlung, obwohl direkt mit dem „Ostsee“ in Verbindung stehende Seen (z. B. Mp 1 und Mp 3) troglobionte Arten enthalten; vielmehr ist auch dort heute ein zunehmender Rückgang der troglobionten Bewohner festzustellen.

Untersuchungen des Aktivitäts- und Migrationsverhalten im natürlichen Habitat und an in Kunststoffschalen (Kap. II. 3.) gehälterten Tieren zeigen, daß *P. putealis* sehr ortstreu ist und oft über Monate innerhalb einer Fläche von weniger als 1 m² im Sediment verweilt (PUST 1984). Kurze, oft nur wenige Stunden andauernde Aktivitätsphasen, in denen die Tiere sich auf der Sedimentoberfläche fortbewegen, werden von bis zu mehreren Wochen andauernden Ruhephasen, während der die Tiere sich im Sediment befinden, abgelöst. Zur Bestimmung der Dauer und der Intensität der Aktivitätsphasen wurden die von den Tieren auf der Lehmoberfläche produzierten Spuren (eine auf der Lehmoberfläche entstandene Depression und ein Schleimfaden, der von den Drüsenzellen der Epidermis abgegeben wird) in meist 2-stündigem Intervall aufgezeichnet und vermessen. Während der Ruhephasen sind die im Sediment befindlichen Tiere durch feine Poren auf der Lehmoberfläche zu lokalisieren. Die Kriechbewegungen (langsames Vorwärtsgleiten, bei mechanischer Reizung auch kurzzeitiges, spannerartiges Rückwärtskriechen) sind zu Beginn der Aktivitätsphase meist geradlinig – es werden dann bis zu 120 cm/h zurückgelegt, – zum Ende der Aktivitätsphase werden die Kriechbewegungen durch häufigere Pausen unterbrochen; die Tiere wechseln dann häufig die Richtung und

verbleiben innerhalb eines Areals von nur wenigen cm². Die mittlere Kriechgeschwindigkeit kann dann unter 10 cm/h absinken. Weder eine Aktivitätsperiodik von annähernd 24h, noch Beziehungen zwischen der Länge der Aktivitäts- und Ruhephasen konnten bei *P. putealis* festgestellt werden. Es wurden auch an der Wasseroberfläche flottierende Individuen sowohl im natürlichen Habitat als auch in den Versuchsschalen beobachtet, einige Tiere mit ausgestülptem Rüssel. Die langgestreckten Tiere bewegten sich aktiv entlang der Wasseroberfläche. Eine mechanische Reizung führte stets zu einer raschen Kontraktion. Die Tiere sanken dann auf das Sediment, wo sie innerhalb weniger Minuten verschwanden.

Lichteinwirkungen werden von den Tieren möglicherweise über einen Hautlichtsinn wahrgenommen (die Tiere sind augenlos; vgl. Kap. III. 6.). Zu Beginn der Aktivitätsphase antworten sie mit einer Erhöhung der Kriechgeschwindigkeit; zum Ende der Aktivitätsphase wird diese vorzeitig abgebrochen; die Tiere ziehen sich dann in das Sediment zurück. Stärkere Lichteinwirkungen, z.B. Elektronenblitze, sind lethal. Nach einer solchen Lichteinwirkung kann ein sofortiger Aktivitätsabbruch beobachtet werden; die Tiere sind dann jedoch meist nicht mehr in der Lage, sich ins Sediment zurückzuziehen. Längeres Dauerlicht veranlaßt die Tiere, im Sediment zu verbleiben bzw. dieses aufzusuchen.

Untersuchungen zur Nahrungsaufnahme erbrachten keinen Hinweis für eine räuberische Lebensweise; *P. putealis* scheint sich vielmehr von Bakterien und Detritus zu ernähren. Analysen des Darminhaltes erbrachten niemals Chitinreste, jedoch Sedimentpartikel.

P. putealis vermag sich wirkungsvoll gegen Verdriftung zu schützen. Während der innerhalb des „Westsee“-Bereichs periodisch auftretenden Hochwässer ziehen sich die Tiere in das Sediment zurück. In der Kluterthöhle gehälterte Tiere verließen überflutete Schalen nicht. Von der Wasserströmung überraschte, aktiv kriechende Tiere kontrahieren sehr rasch und bleiben mit ihrem Schleimfaden mit der Unterlage verbunden. Selbst stärkere Strömungsgeschwindigkeiten führen nicht zu einer Trennung von der Unterlage.

Nach Hochwasserperioden wurden meist bedeutend weniger aktive Tiere gefunden als zuvor (Abb. 120). Da eine Verdriftung der Tiere ausgeschlossen werden kann, ist anzunehmen, daß durch das eindringende Grundwasser Änderungen des Wasserchemismus und der oberflächlichen Sedimentbeschaffenheit verursacht werden, die sich negativ auf die Population auswirken. Während der Hochwasserphasen werden weite Abschnitte der Führungswege überflutet und Fremdmaterial gelangt dann in die Gewässer (dies konnte ich am „Ostsee“ und im westlichen Höhlenbereich am „Königssee“ feststellen; auf den Nebengängen nahe der *P. putealis*-Fundstellen im Bereich der „Westseen“ und im Bereich von Mp 3 bis 5, die ebenfalls zeitweise überflutet werden, befinden sich Karbidabfälle; vgl. auch Kap. IV. 6.). Aber auch das Grundwasser selbst ist in der Kluterthöhle durch erhöhte Konzentrationen von Natrium, Chlorid, Phosphat, Nitrat und Ammonium belastet (vgl. Kap. III. 4.). Diese Belastungen liegen möglicherweise oberhalb der Toleranzgrenze von *P. putealis*. Auch das auf die Kluterthöhle beschränkte Vorkommen der Art weist auf eine extreme Stenotopie hin. In Tab. 9 werden die physikochemischen Parameter der *P. putealis*-Fundstellen für den relativ wenig belasteten östlichen Höhlenbereich (aus der Filterzone gespeiste Gewässer, Mp 3 und Mp 5) sowie den zeitweise belasteten westlichen Bereich (bei Hochwasser durch das Grundwasser beeinflusste Fundstellen an Mp 25, 26 und 27) mitgeteilt.

Juvenile Tiere wurden nie gefunden. Möglicherweise ist die Reproduktionsrate sehr gering (es wurden 31 Tiere anatomisch untersucht).

Versuche, *P. putealis* im aus der Höhle entnommenen Wasser bei 9.6°C im Labor zu

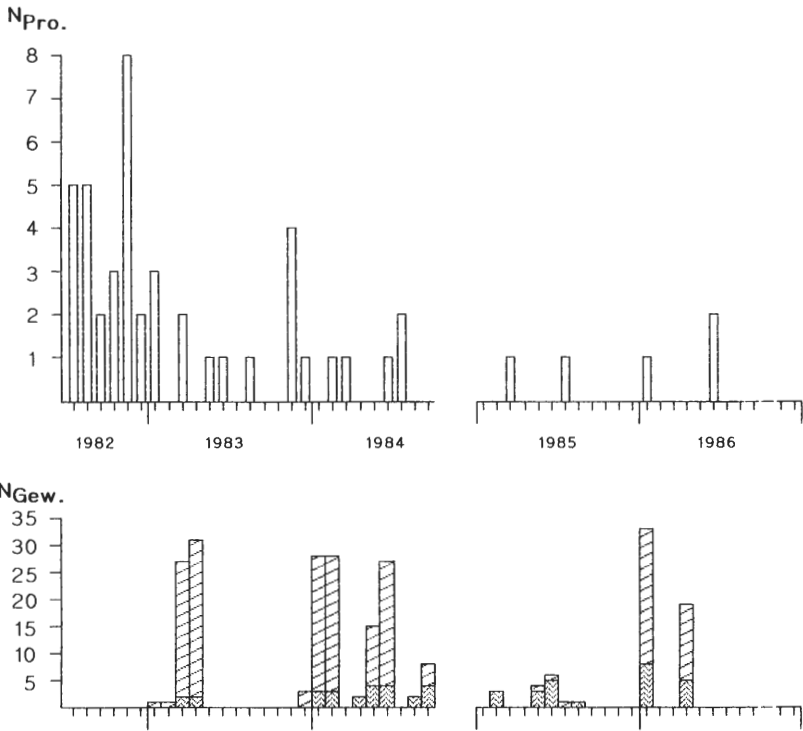


Abb. 120: Gesamtabundanzen von *Prostoma putealis* aus der Kluterthöhle in Ennepetal, sowie Anzahl hochwasserführender Gewässer und bei Hochwasser Fließbewegung aufweisende Höhlenseen . Die Abundanzen wurden bis September 1984 in 14-tägigen Intervallen und von 1985 bis 1987 monatlich festgestellt. Dargestellt ist die monatliche Gesamtzahl der Tiere (bis September 1984 das monatliche Mittel) von allen Fundstellen.

halten, zeigten, daß die Tiere sehr empfindlich gegenüber Milieuänderungen reagieren. Nach einer spontanen pH-Wert-Erhöhung auf 8.7 sterben die Tiere innerhalb weniger Tage (bei Einwirkung der Außenluft stellt sich dieser pH-Wert unter Ausfällung von Kalziumkarbonat bei Wasserproben aus der Kluterthöhle ein und steigt bei zusätzlicher Belüftung noch weiter an). Im Stollen bei Platthaus hielt ich Tiere in mit Wasser aus der Kluterthöhle gefüllten Schalen bei 8.7°C und bei einem CO₂-Gehalt der Luft zwischen 0.08 und 0.15 Vol.-% 1½ Jahre lang. Im Stollen trat keine pH-Wert-Erhöhung im Hälterungswasser auf. Die Empfindlichkeit von *P. putealis* gegenüber pH-Werterhöhungen zeigt die Bedeutung einer CO₂-reichen Höhlenatmosphäre für das Vorkommen der Art (vgl. Tab. 9). In der Kluterthöhle liegt die mittlere CO₂-Konzentration der Höhlenluft an den *P. putealis*-Fundstellen zwischen 0.11 und 0.12 Vol.-% (vgl. auch Kap. III. 3.1.) und variiert dort zwischen 0.07 und 0.18 Vol.-% (vergleichbar mit den Verhältnissen im Stollen bei Platthaus). Die Fundstellen liegen in einer Zone, in denen externe Wetterwechsel sich auf den Wasserchemismus entweder nur schwach („Ostsee“-Bereich mit Mp 3 als an den „Ostsee“ angrenzendes Gewässer) oder gar nicht auswirken (westlicher Höhlenbereich an Mp 25, 26 und 27; vgl. Abb. 121). So sind die am „Ostsee“ (Mp 2) gemessenen tagesperiodischen Änderungen des CO₂-Partialdrucks in der Luft auch zu Zeiten intensiver externer Wetterwechsel sehr

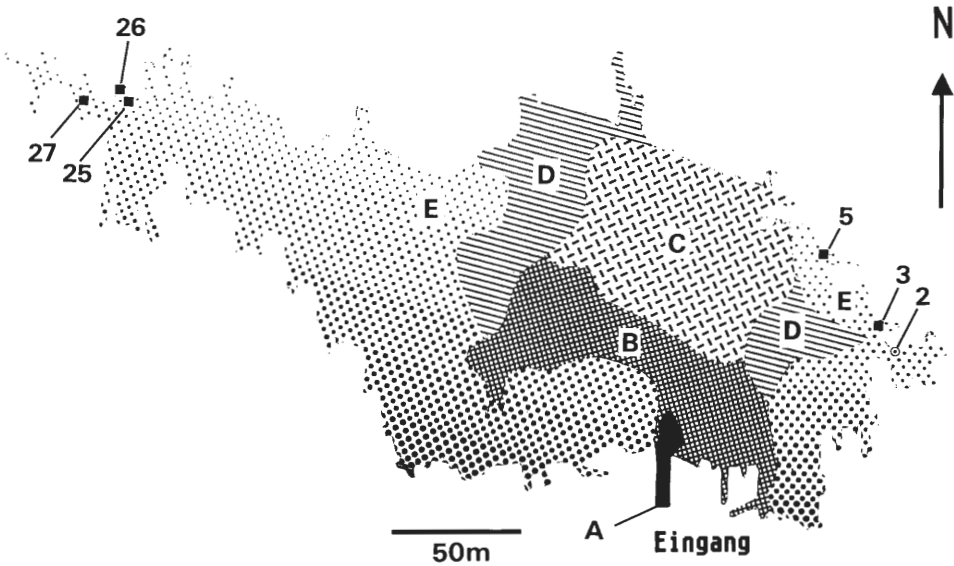


Abb. 121 :

Lage der Fundstellen von *Prostoma putealis* in der Kluterthöhle (Ennepetal) unter Berücksichtigung klimatischer Zonen. Zur Aufstellung der verschiedenen Zonen wurde die Wirkung externer Wetterwechsel (bei Außentemperaturen bis -2°C) auf die Lufttemperatur, -Feuchte und CO_2 -Gehalt der Luft herangezogen.

Fundstellen:

Mp 2: Ostsee (GRIEPENBURG 1935); heute ohne troglobionte Arten.

Mp 3: Sumpfsee. Mp 5: See am Nordostgang. Mp 25: See am Westsee I.

Mp 26: See am Westsee I. Mp 27: Westsee I.

Alle Fundstellen liegen innerhalb der Zone E, die von externen Wetterwechseln nicht oder nur geringfügig beeinflusst wird.

Zone A: Das Höhlenklima wird hier stark durch externe Wetterwechsel beeinflusst. Zu allen Jahreszeiten treten erhöhte Schwankungen der klimatischen Parameter auf. Im Winter kann die Temperatur am Boden unter den Gefrierpunkt sinken; eine erhöhte Luftströmung, eine reduzierte relative Luftfeuchte (unter 75%) und ein CO_2 -Gehalt von 0.03 Vol.-% charakterisieren dann diese Zone.

Zone B: Die Lufttemperatur liegt in dieser Zone stets oberhalb des Gefrierpunktes. Erhöhte Schwankungen der relativen und absoluten Luftfeuchte und der Temperatur werden durch externe Wetterwechsel verursacht (erhöhte Schwankungen und reduzierte mittlere Werte im Winter, im Sommer geringere Schwankungen und erhöhte Werte). Der CO_2 -Gehalt sinkt im Winter meist auf 0.03 Vol.-% ab.

Zone C: Die mittlere relative Luftfeuchte wird hier nicht mehr durch externe Wetterwechsel beeinflusst und liegt nahe am Sättigungspunkt (95-100%). Erhöhte Schwankungen der Lufttemperatur im Winter (die Standardabweichung ist gegenüber den Sommerwerten um mindestens 10% erhöht) werden auch hier noch durch externe Wetterwechsel verursacht und gehen meist mit einer Temperaturerniedrigung einher. Der CO_2 -Gehalt der Luft sinkt im Winter nicht unter 0.05 Vol.-%.

Zone D: Die Schwankungen der relativen Feuchte und der Lufttemperatur sind sehr gering; sie lassen sich externen Wetterwechseln nicht mehr zuordnen (keine jahresperiodischen Schwankungen). Der CO_2 -Gehalt der Luft sinkt im Winter nicht unter 0.06 Vol.-%.

Zone E: Innerhalb dieser Zone dominieren interne Wetterwechsel; externe Wetterwechsel wirken sich hier nur wenig aus. Ein aus Süden langsam abwärtsfließender kalter Luftstrom erzeugt einen weitgehend gleichbleibenden Temperaturgradienten von 8.9°C im Süden bis 10.2°C im Norden. Der CO_2 -Gehalt sinkt im Winter am Tage nicht unter 0.07 Vol.-% (aufgrund tagesperiodischer Schwankungen kann er jedoch an Mp 2 während der Nachtstunden auf 0.06 Vol.-% absinken).

Tab. 9: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den Fundstellen von *P. putealis*; Mp 03 und 05 sowie (in Klammern) die vom Grundwasser beeinflussten Mp 25, 26 und 27 in der Kluterthöhle (Ennepetal).

Parameter a) Minimum b) Maximum	Höhle Kluterthöhle Ennepetal		Parameter a) Minimum b) Maximum	Höhle Kluterthöhle Ennepetal	
		a		b	
Wassertemperatur [°C]	a	9.4 (9.4)	Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	7.7 (31.3)
	b	9.6 (10.0)		b	26.2 (69.9)
pH-Wert -lg [H ⁺]	a	7.0 (7.0)	Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	3.2 (9.6)
	b	7.5 (7.4)		b	10.8 (28.5)
Leitwert [μS/cm]	a	176.3 (383.2)	PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	a	0.00 (0.00)
	b	367.7 (510.2)		b	0.25 (0.26)
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	29.4 (53.6)	NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	9.0 (15.5)
	b	59.5 (85.8)		b	19.1 (36.1)
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	3.8 (6.1)	NO ₂ ⁻ -Konzentration [μg/l]	a	0.0 (0.0)
	b	6.5 (12.3)		b	10.0 (6.0)
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	a	45.1 (19.2)	NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	0.00 (0.005)
	b	91.2 (105.6)		b	0.18 (0.060)
CO ₂ -gebunden [mg/l]	a	40.6 (99.0)	Fe-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.010)
	b	88.3 (123.2)		b	0.570 (0.440)
CO ₂ -gelöst [mg/l]	a	4.0 (10.7)	Mn-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.000)
	b	15.6 (23.0)		b	0.08 (0.110)
O ₂ -Konzentration [mg/l]	a	6.0 (5.3)	Zn-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.000)
	b	12.0 (12.6)		b	0.060 (0.020)
O ₂ -Sättigung [%]	a	62.8 (48.4)	Cu-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.000)
	b	109.1 (114.1)		b	0.060 (0.050)
org. Substanzen [mg/l]	a	1.9 (1.9)	Pb-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.000)
	b	12.6 (8.5)		b	0.000 (0.000)

gering; der CO₂-Gehalt der Höhlen-Luft bleibt auch nach Absenkung im Winter gegenüber jenem der Außenluft um mehr als das Doppelte erhöht (vgl. Kap. III. 3.1.). Die für statisch bewertete Höhlen typische Abnahme der CO₂-Konzentration der Höhlenluft im Winter führt an den *P. putealis*-Fundstellen nur zu geringfügigen Abnahmen des im Wasser gelösten CO₂ und nur zu geringfügigen pH-Werterhöhungen (auf max. pH 7.5.). Auch größere Schwankungen der Wassertemperatur treten hier nicht auf (sie liegt im Mittel bei 9.6-9.8°C ± 0.08°C SD im östlichen bewohnten Höhlenteil und bei 9.6°C ± 0.07°C SD im westlich bewohnten Höhlenteil). Mp 26 kann allerdings durch Hochwasser bedingte Temperaturerhöhungen von maximal 0.5°C erfahren. Für das Vorkommen der Art könnte auch entscheidend sein, daß durch die großen Wasservolumina der bewohnten Seen Parameterschwankungen der einfließenden Gewässer der Filterzone abgepuffert werden. – An den östlichen Fundstellen sind die Leitwerte kleiner als im Grundwasser; die Konzentrationen von Kalzium, Magnesium, Phosphat, Nitrat, und Ammonium sind relativ gering, die Konzentration des gelösten Sauerstoffs liegt im Mittel nahe am Sättigungspunkt. Nitrit, und Ammoniumkonzentrationen, der Gehalt an organischen Substanzen und die damit verbundene Sauerstoffzehrung sind an Mp 3 zeitweise anthropogen erhöht. Durch Grundwassereintritt kommt es im westlichen Höhlenteil an den *P. putealis*-Fundstellen zur Abnahme des gelösten Sauerstoffs und zu einer längerfristigen Erhöhung des Nitrat-, Natrium- und Chloridgehaltes. Die Konzentrationen der Metallionen sind zeitweise für Mangan, Zink und Kupfer leicht und für Eisen beträchtlich erhöht.

Antrobathynella stammeri (JAKOBI)

Eindeutig belegbar ist *A. stammeri* in Westfalen bisher nur aus dem Halver Hüllloch. Die von LENGERSDORF (1929) in der Reckenhöhle gefundene Syncaridenpopulation existiert dort heute offensichtlich nicht mehr; eine Überprüfung ihres Artstatus ist deshalb nicht möglich. Aufgrund des Verbreitungsbildes dieser Art (sie kommt als einzige Art vom Alpengebiet bis zur nordeutschen Tiefebene vor, während die anderen *Bathynella*-Arten meist kleine, außerhalb Westfalens gelegene Verbreitungsareale besitzen; vgl. HUSMANN 1964) ist es allerdings sehr wahrscheinlich, daß es sich bei den Funden aus der Reckenhöhle ebenfalls um *A. stammeri* handelte. Essentiell für das Vorkommen von *A. stammeri* im Grundwasser ist eine zügige Strömung, die für den lebensnotwendigen Stofftransport, insbesondere des Sauerstoffs, sorgt. Nach HUSMANN (1964) besiedeln die Tiere daher bevorzugt vom Grundwasser durchzogene Lockergesteinsufer (Grobsande und kiesiges Material) mit ausreichend großem Lückensystem. Solches Material ist innerhalb der nahe der Reckenhöhle gelegenen Friedrichshöhle noch ca. 15m oberhalb des heutigen Flußniveaus feststellbar. Die Reckenhöhle liegt heute mehrere Meter oberhalb des Hönneniveaus, so daß es sich bei dem von LENGERSDORF (1929) angegebenen Syncariden-Vorkommen um eine vom Grundwasser sekundär isolierte Population gehandelt haben könnte. Ihr Verlöschen kann somit bereits durch ein singuläres Ereignis verursacht gewesen sein; eine Wiederbesiedlung vom Uferinterstitial ist heute nicht mehr möglich, zumal das Hönnegrundwasser stark verunreinigt ist (vgl. Kap. III. 4.). – Auch die Fundstelle (Mp 11) im Halver Hüllloch liegt mehrere Meter oberhalb des Grundwasserspiegels. Die Tiere wurden dort sowohl innerhalb eines tropfwassergespeisten Sinterbeckens als auch innerhalb von oft nur wenige mm² großen Vertiefungen des Wandsinters nahe des Sinterbeckens beobachtet. An diesen Stellen ist ein ständiger Tropfwassereinstrom feststellbar. Es ist daher sehr wahrscheinlich, daß die Population oberhalb der vadosen Zone innerhalb der Filterzone des Deckgesteins etabliert ist und Tiere mit dem Tropfwasser in die vadosen Zone gelangen. Es treten hier die für das Uferinterstitial typischen Lockergesteine nicht auf; es handelt sich vielmehr um ein stabiles Lückensystem zwischen alternierenden Schichten aus Kalk und Tonschiefern innerhalb einer kleinen Linse aus Honseler Schichten. Das umgebende Gestein besteht aus Schiefer. Auch im Halver Hüllloch handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um eine lokal isolierte *A. stammeri*-Population, die noch heute das gleiche, engbegrenzte Areal besiedelt, das GRIEPENBURG (1939a) bereits beschrieb; an anderen Stellen konnte ich die Art im Halver Hüllloch nicht nachweisen.

Hinsichtlich der physikochemischen Parameter fand ich sowohl an der Fundstelle im Halver Hüllloch als auch in der Reckenhöhle ähnliche Bedingungen vor, die HUSMANN (1964) für das Vorkommen von *A. stammeri* angibt (vgl. Tab. 10): Die Wassertemperatur liegt niedrig (zwischen 7.2 und 8.9°C; vgl. auch NOLL & STAMMER 1953), der bevorzugte pH-Wertbereich von 7.0-7.4 wird nur wenig überschritten (vgl. Tab. 10); *A. stammeri* lebt nach HUSMANN (1964) in Grundwässern, in denen kein chemischer Bestandteil als „Extremfaktor“ wirksam wird. – Entsprechendes kann auch für den Wasserchemismus in der Reckenhöhle und im Halver Hüllloch gesagt werden (Tab. 10). Die Nitratkonzentration liegt nach NOLL & STAMMER (1953) an den *A. stammeri*-Fundstellen im Maintal im Mittel bei 26.5 mg/l und erreicht nur in Ausnahmefällen hohe Werte; ähnliches gilt auch für die Ammonium- und Phosphatkonzentrationen, während die Kalzium-, Chlorid- und Eisenkonzentrationen teilweise beträchtlich erhöht sein können. *A. stammeri* ist offensichtlich in der Lage, ionenreiches Grundwasser zu besiedeln, besitzt aber anscheinend ein erhöhtes Sauerstoffbedürfnis und meidet hohe Stickstoff- und Phosphatkonzentrationen. Diese Bedingungen sind auch an den westfälischen Fundstellen erfüllt (Tab. 10). Im Hönnetal beschränken Gewässerbelastungen das

Tab. 10: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den *Antrobathynella stammeri*-Fundstellen. Die Werte aus der Reckenhöhle entstammen einer Einzelanalyse vom 03.11.1985, die aus dem Halver Hülloch vom 07.12.1986

Parameter	Höhlen	
	Reckenhöhle	Halver Hülloch
Wassertemperatur [°C]	8.9	7.2
pH-Wert -lg [H ⁺]	7.5	7.4
Leitwert [μS/cm]	359.6	328.0
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	55.7	79.7
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	27.6	3.1
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	61.4	45.1
CO ₂ -gebunden [mg/l]	149.6	147.0
CO ₂ -gelöst [mg/l]	11.0	12.8
O ₂ -Konzentration [mg/l]	10.4	10.3
O ₂ -Sättigung [%]	92.7	87.7
org. Substanzen [mg/l]	2.8	2.5
Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	19.7	8.6
Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	5.0	4.0
PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	0.03	0.05
NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	1.9	6.5
NO ₂ ⁻ -Konzentration [μg/l]	6.0	11.0
NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	0.00	0.07
Fe-Konzentration [mg/l]	0.110	0.050
Mn-Konzentration [mg/l]	0.010	0.010
Zn-Konzentration [mg/l]	0.010	0.000
Cu-Konzentration [mg/l]	0.005	0.005
Pb-Konzentration [mg/l]	0.000	0.000

Vorkommen der Art auf die Filterzone und schließen das Auftreten im Interstitial der Höhne und im heute belasteten Grundwasser der Hönnetalhöhlen aus. Allerdings wurden die Tiere auch im nur wenig belasteten Grundwasser des Halver Hüllochs bisher nicht gefunden.

Proasellus cavaticus (LEYDIG)

Funde der Art aus Brunnen, aus dem Grundwasser des Uferinterstitials, aus Quellen- und Höhlengewässern (vgl. Kap. III. 1.) weisen *P. cavaticus* als besonders vielseitig bei der Besiedlung des unterirdischen Lebensraums aus, vergleichbar mit einigen euryöken *Niphargus*-Arten. Aufgrund ihrer geringen Körpergröße (ca. 4-6 mm Länge und 0.8-1.2 mm Breite, vgl. Kap. IV. 5.) sind die westfälischen Tiere in der Lage, selbst Zonen im englumigen Lückensystem der Filterzone zu besiedeln, die von großen Niphargiden (z. B. von *N. puteanus*) nicht erreicht werden. Wie die Syncaride *A. stammeri* dringt auch *P. cavaticus* über englumige Lückensysteme des Grundwassers in die vadose Zone der Höhlen vor, wo die Tiere in Höhlenbächen, in auf Sediment ruhenden Höhlenseen und in von Tropfwasser gespeisten Sinterbecken vorkommen (HENRY 1976). Neben Höhlengewässern stellt besonders der vom Grundwasser durchzogene Ufer- und Gehängeschutt für die Tiere einen idealen Lebensraum dar. Im Grundwasser des Rheins bei Krefeld kommen *A. stammeri* und *P. cavaticus* syntop vor (HUSMANN 1964); während die Syncariden auch das kleinlumige Lückensystem besiedeln können (Grobsande zwischen 0.6-2mm Korngröße), scheint *P. cavaticus* dort auf das großräumige Lückensystem beschränkt zu sein (HUSMANN 1964).

Trotz der großen Vielseitigkeit bei der Besiedlung von Subterranbereichen wurde die „Höhlenassel“ in Westfalen bisher nur vereinzelt gemeldet (vgl. Kap. III. 1.). Für das Vorkommen dieser Art scheint essentiell, ähnlich wie für das Vorkommen von *A. stammeri*, eine ständige Sauerstoffzufuhr zu sein, die im Interstitial und in der Filterzone durch die Wasserzirkulation und in der vadosen Zone auch durch die Höhlenatmosphäre gegeben ist.

Bei der *P. cavaticus*-Population in der Friedrichshöhle ist das Fehlen im stark belasteten Grundwasser auffällig. Die Tiere wurden hier nur oberhalb des Grundwasserhorizontes innerhalb eines kleinen Bereiches der vadosen Zone (Mp 2.1-2.3, Mp 3.1 – 3.10 und Mp 4.1 – 4.3; vgl. Abb. 26) gefunden: in Sinterbecken, die periodisch austrocknen. Die Tiere treten dort nur vereinzelt auf. Von 1985 bis 1988 wurden an 16 Fundstellen insgesamt 51 Individuen festgestellt. Dieser Befund macht deutlich, daß die Population oberhalb der Fundstellen in der Filterzone Zone lebt (das anhand der Verteilung der innerhalb der vadosen Zone liegenden Fundstellen vermutete Areal der *P. cavaticus*-Population ist schraffiert in Abb. 27 dargestellt). Die Zahl der Tiere schwankt unregelmäßig und zeigt keine Abhängigkeit vom Wassereinstrom (von der Anzahl der vorhandenen Gewässer). Oberhalb der Höhle im Bereich der Fundstellen befinden sich im Laubwald anstehende Kalkfelsen mit stark erweiterten vertikalen Klüften, die einen Wassereinstrom in das Höhlensystem und die Sauerstoffversorgung begünstigen. An Tropfwasserstellen, die nicht unterhalb dieser anstehenden Kalkfelsen liegen, wurden in der Friedrichshöhle keine troglobionten Arten nachgewiesen.

In der Höhle im Kattenstein bei Kallenhardt gelang mir nur ein Einzelfund (vgl. Kap. III. 1.). Ich fand das Tier 1989 im Tropfwasser der Filterzone in einem Nebengang (in Eingangsnähe). An der Fundstelle ist die Gesteinsbedeckung nur wenige Meter mächtig und die Gewässer sind recht klein (an der Fundstelle nur wenige cm² Wasserfläche), so daß angenommen werden kann, daß dieser Höhlenteil nur sehr unregelmäßig mit Tropfwasser versorgt wird und periodisch trockenfällt. Auch hier gelangen offensichtlich nur verdriftete Tiere in die vadose Zone. *P. cavaticus* kommt mit

Tab. 11: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den *Proasellus cavaticus*-Fundstellen. Werte in Klammern: Grundwasser in der Friedrichshöhle (Mp 13) sowie Grundwasser in der Kluterthöhle (Mp 6 und 19 ; möglicher Fundort nach THIENEMANN, 1916).

Parameter		Friedrichs- höhle	Kluterthöhle (Ennepetal) Mp 6 u. 19
Wassertemperatur [°C]	a	7.5 (7.4)	(9.9)
	b	8.0 (11.3)	(10.4)
pH-Wert -lg [H ⁺]	a	7.1 (7.2)	(6.9)
	b	7.4 (7.2)	(7.2)
Leitwert [µS/cm]	a	256.3 (298.2)	(398.1)
	b	379.6 (383.2)	(602.4)
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	71.5 (65.4)	(59.8)
	b	101.8 (79.8)	(93.4)
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	0.7 (4.2)	(2.8)
	b	1.3 (6.1)	(14.5)
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	a	42.2 (28.8)	(9.6)
	b	107.5 (92.2)	(89.1)
CO ₂ -gebunden [mg/l]	a	101.2 (147.4)	(107.8)
	b	165.0 (151.8)	(132.0)
CO ₂ -gelöst [mg/l]	a	9.7 (19.1)	(17.3)
	b	27.7 (22.4)	(35.7)
O ₂ -Konzentration [mg/l]	a	9.1 (6.0)	(5.2)
	b	11.2 (6.1)	(10.2)
O ₂ -Sättigung [%]	a	78.6 (53.8)	(48.2)
	b	96.9 (55.2)	(93.8)
org. Substanzen [mg/l]	a	1.9 (4.3)	(2.2)
	b	5.4 (7.4)	(10.3)
Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	8.2 (17.2)	(52.7)
	b	11.7 (22.2)	(96.2)
Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	2.5 (5.9)	(22.1)
	b	4.2 (9.3)	(48.3)
PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	a	0.005 (0.100)	(0.00)
	b	0.06 (0.100)	(0.24)
NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	8.0 (26.3)	(19.9)
	b	13.8 (27.0)	(41.9)
NO ₂ ⁻ -Konzentration [µg/l]	a	0.0 (10.0)	(0.0)
	b	10.0 (65.0)	(12.0)
NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	0.00 (0.07)	(0.00)
	b	0.06 (0.11)	(0.06)
Fe-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.040)	(0.000)
	b	0.070 (0.100)	(0.300)
Mn-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.010)	(0.000)
	b	0.070 (0.090)	(0.100)
Zn-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.000)	(0.000)
	b	0.020 (0.010)	(0.050)
Cu-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.000)	(0.000)
	b	0.020 (0.010)	(0.050)
Pb-Konzentration [mg/l]	a	0.000 (0.000)	(0.000)
	b	0.000 (0.000)	(0.000)

großer Wahrscheinlichkeit auch in dieser Höhle hauptsächlich in der Filterzone vor.

In der Kluterthöhle (Ennepetal) wurde *P. cavaticus* um 1910 in wenigen Exemplaren „im Bach der Kluter“ gefunden (THIENEMANN 1912 und 1916); seitdem wurde von

dort kein weiterer Nachweis gemeldet. Die Tiere aus der Kluterthöhle stammen offensichtlich aus dem Grundwassergerinne Rauschebach-Murmelbach (Mp 6 u. 19). In diesem Zusammenhang ist die heutige Sauerstoffarmut des Rauschebachs (Mp 6) von Bedeutung, die das Verschwinden der Art erklären könnte (die Art fehlt an Stellen, die stark Abwasser-belastet sind; HUSMANN 1956). Eine starke Belastung muß heute sowohl für die Ennepe als auch für die Höne und die umgebenden Grundwässer angenommen werden (vgl. Kap. III. 4. u. IV. 6.). Ein rezentes Vorkommen der Tiere im Flußinterstitial und im Grundwasser der Ennepetal- und Hönnetalhöhlen ist deshalb unwahrscheinlich. Die in Tab. 11 dargestellte Variationsbreite der physikochemischen Parameter sind an den Fundstellen in der Friedrichshöhle und an der vermuteten alten Fundstelle in der Kluterthöhle ähnlich (mit Ausnahme der O₂-Konzentration). Die Konzentrationen der Stickstoffverbindungen, des Phosphates und des Sauerstoffs an den rezenten *P. cavaticus*-Fundstellen in der Friedrichshöhle zeigen jedoch, daß hier eine Belastung, wie sie heute für das Grundwasser beider Höhlen vorliegt, nicht auftritt (vgl. Tab. 11). Es ist sehr wahrscheinlich, daß die von *P. cavaticus* tolerierte Variationsbreite der physikochemischen Parameter etwas größer als an den Fundstellen in der Friedrichshöhle ist. Das ausschließliche Vorkommen in der Filterzone weist aber darauf hin, daß möglicherweise nur solche isoliert liegenden und aufgrund des räumlich eng begrenzten (oberflächennahen) Wassereinzuggebietes von Schadstoffbelastungen freien Zonen eine gewisse Wahrscheinlichkeit für ein Überleben der Population über einen längeren Zeitraum bieten. Singuläre Störungen können isolierte Populationen jedoch irreversibel auslöschen (vgl. auch die Angaben zum Vorkommen von *A. stammeri*).

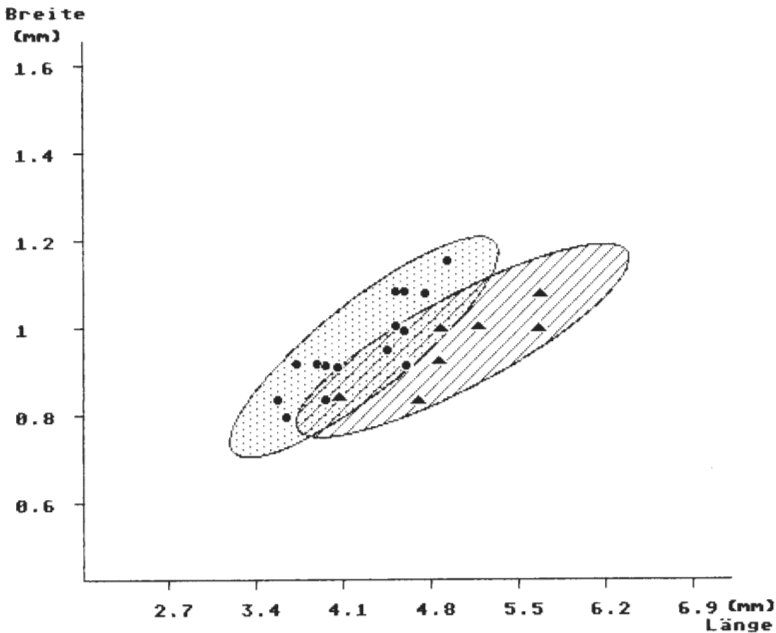


Abb. 122: *Proasellus cavaticus*. Die Körperbreite in Abhängigkeit von der Körperlänge (Streuungs-Ellipsen nach LINDNER & BERCHTOLD, 1982) für die Populationen aus der Friedrichshöhle in Westfalen (▲) sowie aus dem Eckisloch und der Falkensteiner Höhle bei Urach (Schwäbische Alb) (●). Es sind nur ♂♂ berücksichtigt. Die Ellipsen umfassen den Bereich, in dem 95% der Werte erwartet werden. Zur Anzahl der untersuchten Tiere vgl. Tab. 6.

Die Tiere aus der Filterzone der Friedrichshöhle sind gegenüber den im großlumigen Bereich des Grundwassers lebenden Tiere der Falkensteiner Höhle und dem Eckisloch (Schwäbischen Alb) im Mittel länger (Abb. 122 und Tab. 6). Hinsichtlich der mittleren Körperbreite unterscheiden sich die Populationen nicht. Das Längen-Breiten-Verhältnis liegt bei den von mir untersuchten Tieren aus der Filterzone (Friedrichshöhle) für die ♂♂ bei 5.35 ± 0.32 (Standardabweichung) ($N = 8$) und für die ♀♀ bei 5.20 ± 0.27 ($N = 9$); bei den Tieren aus der Schwäbischen Alb betragen die Werte für die ♂♂: 4.59 ± 0.26 ($N = 17$) und für die ♀♀: 4.41 ± 0.27 ($N = 30$). Die *P. cavaticus*-Population aus der Almquelle stimmt hinsichtlich der Körperlänge und -breite mit den Grundwassertieren aus der Schwäbischen Alb (Falkensteiner Höhle und Eckisloch) überein (vgl. auch HERHAUS et al. in Vorbereitung).

Niphargus aquilex (SCHIÖDTE)

Die Art besiedelt das Grundwasser des Uferinterstitials (HUSMANN 1956), Grundwassergerinne und Tropf- und Sickergewässer der vadosen Zone sowie Quellregionen und Brunnengewässer (SCHELLENBERG 1932c). Die Art wurde im Düsseldorfer Raum auch häufig in abwasserfreien Gräben und Bächen gefunden, wo sie lokal syntop mit *Gammarus* sp. auftritt (HINZ & DANEEL 1974). Im Einzugsgebiet der Fulda bei Kassel wurde *N. aquilex* im Bachschotter nach starken Regenfällen oberirdisch nachgewiesen (NAGEL & KRAUSE 1985). Diese Funde weisen auf einen hohen Euryökiegrad der Art hin, den bereits BEYER (1932) in seiner Untersuchung der Quellen und Bäche des Bambergegebietes für *Niphargus* sp. betont. Auch BEYER wies ein oberirdisches Niphargiden-Vorkommen nach (eine Arttermination erfolgte als *N. aquilex aquilex* in FEEST et al. 1976); bei seinen Untersuchungen erwies sich die Art gegenüber Temperaturschwankungen als widerstandsfähiger als *Gammarus pulex*. Ein syntopes Vorkommen mit *G. pulex* wurde von BEYER (1932) nie beobachtet. – Andererseits wurde *N. aquilex* aber nur in chemisch unbelastetem Wasser nachgewiesen. Die Art toleriert vermutlich keinen Sauerstoffmangel. Dadurch dürfte der Rückgang der Art in den westfälischen Höhlen bedingt sein. Ich fand die Art nur an 2 Fundstellen (einschließlich eines Neufundes), während GRIEPENBURG (1934, 1935 und 1939b) die Art noch für 4 Höhlen angibt (vgl. Kap. III. 1.).

Ich fand *N. aquilex* in von Tropf- und Sickerwasser gespeisten Tümpeln im Brackelsbergstollen und in der Höhle im Kattenstein. Beide Fundstellen liegen weit oberhalb des Grundwasserspiegels in der Nähe des Eingangs in Zonen mit erhöhtem organischen Input. Obwohl keine klimatischen und hydrochemischen Untersuchungen an den Fundstellen erfolgten, ist aufgrund der Fundstellenlage und der geringen Gesteinsbedeckung im Bereich der Fundstellen ein Einfluß stärkerer klimatischer Schwankungen sowie Schwankungen des Wasserchemismus, vergleichbar mit denen in der Erlenhöhle (vgl. Kap. III. 3.1. u. 3.2.), anzunehmen. Während der Untersuchung wurden aber keine Hinweise gewonnen, die auf eine chemische Belastung der Gewässer deuten. GRIEPENBURG (1939b) gibt *N. aquilex* für die Rissehöhle an. Dort dringt Wasser der Lörmecke ein, das heute jedoch offensichtlich belastet ist (bei Niedrigwasser starke Schaumbildung, Verfärbung und stechender Geruch). Zur Zeit der Untersuchung wurden in dieser Höhle keinerlei troglobionte Arten nachgewiesen. – In der Kluterthöhle (Ennepetal) und Erlenhöhle (GRIEPENBURG 1934 und 1935) wies ich die Art ebenfalls nicht nach (in der Erlenhöhle fand ich jedoch juvenile Niphargiden, die nicht determiniert werden konnten; vgl. Kap. III. 1.).

Niphargus fontanus BATE

Die Art kommt im Grundwasser des Uferinterstitials (HUSMANN 1962), in Grundwassergerinnen, Höhlenseen, Quellen und Brunnengewässern (SCHELLENBERG 1942) und im Tropf- und Sickerwasser (GRIEPENBURG 1939a) vor. Die Funde durch GRIEPENBURG (1933b, 1935 und 1939a) zeigen, daß die Art in westfälischen Höhlen weit verbreitet ist. Der ökologische Schwerpunkt liegt jedoch im interstitiellen Grundwasser (HUSMANN 1956). Über das oberirdische Erscheinen der Art ist bisher wenig bekannt.

In der Kluterthöhle (Ennepetal; vgl. Abb. 17) kommt die Art im östlichen Höhlenbereich an Stellen vor, die direkt von Tropf- und Sickergewässern gespeist werden (in mehreren periodisch auftretenden Tümpeln und im „Ottosee“, Mp 8; vgl. Abb. 17), in Tropf- und Sickerwassergerinnen („Regenbach“, Mp 32 und „Flutbach“, Mp 36), in von Tropfwassergerinnen gespeisten Seen (Mp 1, 3, 4, 5 und 33), aber auch in belasteten Grundwassergerinnen („Murmelbach“, Mp 21 und „Tauchergraben“, Mp 22) und in vom Grundwasser gespeisten Seen (Mp 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20 und 30); sie fehlt heute am „Ostsee“ (Mp 2). Es werden felsiger Untergrund und sedimentreiche Stellen besiedelt; im Sediment graben die Krebschen Röhren. Sämtliche Fundstellen liegen an vom Höhleneingang entfernten Stellen, die von externen Wetterwechseln nur wenig beeinflußt werden.

In der Volmehanghöhle fand ich jeweils ein Exemplar im Grundwasser der „Wolfsschlucht“ (Mp 9) und im Grundwasser unterhalb der „Zentralhalle“ (Mp 12; vgl. Abb. 123). Im Tropf- und Sickerwasser der dynamisch bewetterten Höhlenteile fand ich keine troglobionten Arten.

In der Höhle hinter der Villa Ribbert fand ich die Tiere in vom Tropf- und Sickerwasser gespeisten, nur periodisch wasserführenden Tümpeln (bei Hochwasser bis



zu 20 Exemplare an Mp 10 und 11; Abb. 38). Die sedimentreichen Fundstellen liegen im Bereich der ausgebauten Wege und sind chemisch durch sehr hohe Nitratwerte belastet; die Konzentrationen für Mangan, Kupfer und Zink sind erhöht (Tab. 12; vgl. auch Kap. III. 4.). Im Grundwasser (Mp 7) fand ich keine troglobionten Arten. Da die Fundstellen regelmäßig austrocknen, ist zu vermuten, daß die Tiere aus höher gelegenen Horizonten eingeschwemmt werden, möglicherweise aus Bereichen, die weniger belastet sind. Diese Vermutung wird durch die Beobachtung unterstützt, daß die Abundanzen während der Hochwasserperioden stark ansteigen und danach rasch wieder zurückgehen. Oft sind sämtliche Tiere schon nach wenigen Wochen verschwunden, obwohl die Fundstellen noch Wasser führen. Da die Tiere im Sediment Röhren graben, besteht auch die Möglichkeit, daß sie dort während ungünstiger Milieubedingungen in einer Ruhephase verharren und nach Erneuerung des Wassers (nach Hochwasserperioden) wieder aktiv werden. Das Überdauern von kurzen Trockenperioden in solchen Röhren vermutet SKET (1974) für *N. stygius*.

Die *N. fontanus*-Fundstelle in der Heinrich-Bernhard-Höhle liegt an einem größeren sedimentreichen Höhlensee unterhalb des Leiterabstiegs. Die Herkunft des Gewässers konnte ich nicht klären. Die Tiere kommen dort verstreut vor.

In der Schönebecker Höhle wurden Tiere in den Tropfwasserstellen des Hauptgangs (Mp 5 und 9; vgl. Abb. 14) und in Tropfwassergerinnen und -Tümpeln der Nebengänge regelmäßig gefunden (vgl. auch die Angaben zum *R. schneideri*-Vorkommen).

Im Stollen bei Patthaus fand ich *N. fontanus* sowohl in einem Tropfwassergerinne als auch im Grundwasser an sedimentreichen Stellen, nicht jedoch in den zahlreichen sedimentarmen Sinterbecken. Die Fundstellen liegen vom Eingang entfernt, die Schwankungen des Höhlenklimas sind gering. Das Wasser ist an den Fundstellen relativ gering belastet (vgl. Kap. III. 4.); auch die Schwankungsbreite der meisten physikochemischen Parameter ist relativ gering (Tab. 12). Der CO₂-Partialdruck der Höhlenluft ist auch im Winter erhöht (vgl. Angaben zu den Schalenversuchen von *P. putealis* im Stollen bei Patthaus).

Im Grauen Ort im Felsenmeer fand ich *N. fontanus* in einem periodisch vom Grundwasser überfluteten, blind-endenden Stollen in der unteren Etage der Höhle. Dieser Stollenteil ist vom übrigen Höhlensystem wettermäßig isoliert. Aufgrund des stark erweiterten vertikalen Kluftsystems bewirken im Winter verstärkt auftretende Wetterwechsel eine Absenkung der Luft- und Wassertemperatur auch im Bereich der Fundstelle (Tab. 12); der CO₂-Partialdruck der Höhlenluft ist hier während der Sommermonate (0.11 Vol.-%) und auch im Winter (0.08 Vol.-%) erhöht. Die Wasserstellen in den oberen Höhlenteilen weisen kein Vorkommen troglobionter Arten auf. Eine erhöhte Eisenkonzentration stellte ich im Wasser der Fundstelle fest; ansonsten ist das Wasser aber nur wenig belastet (vgl. Tab. 12).

In der Großen Sunderner Höhle fand ich 2 Exemplare im alten Höhlenteil im unbelasteten Grundwasser auf felsigem Untergrund (Tab. 12). Die Fundstelle (Mp 6) liegt außerhalb der dynamisch bewetterten Zone in einem Höhlenteil mit nur einer Tagöffnung (Abb. 37; vgl. auch Kap. III. 3.1.). In den starken Wetterwechseln ausgesetzten benachbarten sedimentreichen Seen und im Höhlenbach fand ich keine troglobionten Arten.

Im eingangsnahen Bereich der Antfelder Höhle fand ich die Art in einem Sinterbecken in wenigen Exemplaren. Das Becken ist in kleinere Sinterschalen gegliedert und enthält wenig Sediment; der Wassereinstrom (Sickerwasser) ist hier zeitweise stark (siehe eine Photographie dieser Stelle in TRIMMEL 1968: Abb. 32, S. 53). Die Tiere gelangen mit großer Wahrscheinlichkeit über das Sickerwasser der Filterzone an die

Tab. 12: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den *Niphargus fontanus*-Fundstellen. A: Tropf-, Sicker- und Grundwasser in der Kluterthöhle (Ennepetal); B: Grundwasser in der Volmehanghöhle; C: Tropf- und Sickerwasser in der Höhle hinter der Villa Ribbert; D: Tropf- und Sickerwasser in der Schönebecker Höhle; E: Tropf-, Sicker- und Grundwasser im Stollen bei Platthaus; F: Grundwasser am Grauen Ort im Felsenmeer; G: Grundwasser in der Großen Sunderner Höhle; H: Tropf- und Sickerwasser in der Antfelder Höhle

Parameter a) Minimum b) Maximum	Höhlen								
		A	B	C	D	E	F	G	H
Wassertemperatur [°C]	a	8.1	9.0	8.6	5.8	8.8	6.8	8.4	7.2
	b	10.4	10.5	9.0	6.9	9.0		8.6	
pH-Wert -lg [H ⁺]	a	6.9	7.0	7.1	7.4	7.2	7.3	7.3	7.4
	b	7.5	7.2	7.2	7.5	7.5		7.4	
Leitwert [µS/cm]	a	176.3	355.0	341.0	207.6	175.6	535.9	282.8	376.1
	b	595.2	546.7	519.0	218.7	330.6		350.4	
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	28.5	60.5	68.3	40.7	42.1	91.7	59.1	97.9
	b	93.4	80.2	97.0	45.5	80.7		62.8	
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	2.3	11.8	12.8	3.3	1.2	2.3	3.0	3.7
	b	14.1	16.9	15.2	4.3	2.6		4.5	
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	a	9.6	64.3	59.5	13.4	7.7	108.5	54.7	36.5
	b	84.5	109.4	76.8	30.7	43.2			
CO ₂ -gebunden [mg/l]	a	30.8	118.8	110.0	83.6	77.0	132.0	122.5	171.6
	b	124.0	158.4	184.8	96.8	162.8		123.2	
CO ₂ -gelöst [mg/l]	a	4.0	17.2	15.0	5.1	7.0	12.8	10.6	14.4
	b	31.9	38.7	36.5	7.9	16.7		11.4	
O ₂ -Konzentration [mg/l]	a	6.0	3.4	9.6	10.3	7.2	11.0	9.4	10.4
	b	12.2	8.8	10.1	10.9	11.4		9.4	
O ₂ -Sättigung [%]	a	62.8	31.2	85.2	87.1	64.2	92.8	82.9	88.6
	b	110.7	80.2	88.9	91.9	101.3		83.1	
org. Substanzen [mg/l]	a	1.7	2.2	1.9	2.8	2.5	5.1	1.9	2.2
	b	13.4	5.1	4.3	3.5	7.3		3.8	
Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	6.6	23.0	8.9	6.3	4.9	36.0	14.4	6.8
	b	75.2	47.1	18.7	7.6	9.6		16.5	
Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	3.2	10.1	5.8	3.5	0.7	17.1	5.7	3.4
	b	39.2	25.0	7.6	3.7	8.5		6.0	
PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.10	0.005	0.00
	b	0.39	0.37	0.17	0.10	0.37		0.02	
NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	7.5	8.3	47.8	0.0	1.6	35.2	26.2	15.3
	b	40.4	28.1	58.4	1.0	7.0		29.4	
NO ₂ ⁻ -Konzentration [µg/l]	a	0.0	0.0	0.5	4.0	0.0	n.b.	0.0	0.0
	b	26.0	21.0	8.0	11.0	27.0		0.0	
NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.04	0.02	0.005
	b	0.18	0.12	0.05	0.09	0.04		0.10	
Fe-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.030	0.040	0.090	0.000	0.175	0.005	0.000
	b	0.570	0.340	1.340	0.290	0.180		0.020	
Mn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.005	0.005	0.005
	b	0.080	0.270	0.080	0.000	0.110		0.010	
Zn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.005
	b	0.060	0.040	0.030	0.000	0.050		0.000	
Cu-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.010
	b	0.060	0.020	0.030	0.030	0.030		0.020	
Pb-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000		0.000	

Fundstelle. Das Wasser ist unbelastet (Tab. 12). Die Höhle ist statisch bewettert; der im Sommer erhöhte CO₂-Gehalt der Luft sinkt im Winter an der *N. fontanus*-Fundstelle auf 0.03 Vol.-%.

In einem Schieferstollen östlich von Antfeld unterhalb der B7 kommt *N. fontanus* im Tropfwasser vor. Der Schiefer ist jedoch nicht rein, da dünne Kalkschichten zwischengelagert sind, die an den Tropfwasserstellen durch Versinterungen leicht erkennbar werden. Die Fundstellen liegen nur wenig oberhalb des Grundwasserniveaus, so daß eine Verbindung zum Grundwasser während der Hochwasserperioden nicht auszuschließen ist. Die Bewetterungsverhältnisse sind hier ähnlich wie in der Antfelder Höhle (s.o.).

In einem Tropfwassergerinne oberhalb des Grundwasserhorizontes fand ich die Art auch in einem Stollen westlich von Meschede. Auch hier kommt Schiefer mit eingelagerten Kalkschichten vor; es treten Versinterungen auf; der Sedimentanteil ist mäßig. Die Strömung des Gerinnes ist gering. Die höchsten Abundanzen stellte ich in unmittelbarer Nähe von Tropfstellen fest.

N. fontanus bewohnt sedimentreiche Gewässer. Gegenüber chemischen Belastungen ist er möglicherweise unempfindlich; er toleriert hohe Leitwerte und Leitwert-Schwankungen, erhöhte Natrium- und Chlorid-, Phosphat-, Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumkonzentrationen. An den meisten Fundstellen ist die Eisenkonzentration hoch. Auch kurzfristige Abnahmen des gelösten Sauerstoffs werden toleriert. Seine Umwelttoleranz scheint daher größer als die von *P. cavaticus* zu sein, möglicherweise, weil die Art im Sediment vergraben ungünstige Bedingungen ohne Nahrungsaufnahme überdauern kann. Stellen, die ständig einer starken Bewetterung durch die Außenluft ausgesetzt sind, scheint *N. fontanus* jedoch zu meiden.

Niphargus kochianus BATE

Die Art ist ein Bewohner des Interstitials der Ströme und Flüsse (STOCK 1972; STOCK & GLEDHILL 1977) sowie von Brunnen und Höhlen (SCHELLENBERG 1932b und 1932c). Als Fundstelle für Westfalen gibt GRIEPENBURG (1935) den „Ostsee“ der Klutertöhle (Ennepetal) an, der von Tropf- und Sickergewässern gespeist wird.

Ich fand *N. kochianus* in der Klutertöhle (Ennepetal) weit verbreitet in Tropf- und Sickerwasserstellen und -gerinnen (Mp 8, 10, 31, 32, 35, 36 und 37), in hiervon gespeisten Seen (Mp 1, 3, 4, 5, 23, 24, 25, 27 und 33), aber auch im fließenden Grundwasser (Mp 6, 13, 21, 22, 34, 39 und 40) und in vom Grundwasser gespeisten Seen (Mp 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 26, 28, 29 und 30) (Abb. 17). An einigen Fundstellen wurden nur Einzelexemplare beobachtet (Fundstellen mit größerer Häufigkeit und regelmäßigem Vorkommen sind in Fettdruck angegeben). Der Besiedlungsschwerpunkt liegt offenbar innerhalb der Grundwasserzone des mittleren und westlichen Höhlenbereichs. Die Tiere wurden dort bevorzugt in Stillwasserbereichen angetroffen (in Höhlenseen und toten Armen des „Murmelbach-Tauchergrabens“, Mp 20 und 22). In der Zone der Tropf- und Sickergewässer (östlicher und südlicher Höhlenbereich) wurde die Art regelmäßig, aber in geringerer Häufigkeit gefunden, Schwerpunkte sind der „Sumpfssee“ (Mp 3) und der „Regenbach“ (Mp 32). Sämtliche Fundstellen liegen in Bereichen mit reduzierten Wetterwechseln (Abb. 121). Die Fundstellen mit größeren Abundanzen weisen lockere Sedimentschichten auf (besonders an Mp 17 und 18; vgl. Abb. 17). Die Tiere graben dort Röhren, wie auch bei in Schalen gehälterten Tieren beobachtet werden konnte. Es werden hierbei die anfallenden Sedimentmassen über die Einstiegsöffnung nach außen befördert, und es bildet sich bei stehendem Wasser um die Öffnung herum oft ein kleiner Lehmhügel. Eine erhöhte Spurendichte im Bereich der Röhren zeigt, daß diese

nach Verlassen wiederholt aufgesucht werden (die Spuren laufen sich radial verdichtend auf die Öffnungen zu).

In der Kluterthöhle (Hagen) fand ich die Art vereinzelt an Mp 3, 4 und 5 in kleinen Tropfwassertümpeln (Abb. 124). Die Fundstellen sind sehr sedimentreich und bilden an Mp 5 zu Zeiten erhöhten Wassereinstroms ein Fließwassergerinne (vergleichbar mit Mp 32 in der Kluterthöhle in Ennepetal). Am Ende der Höhle (Mp 6) befindet sich ein kleiner Höhlensee mit zeitweise geringem Sauerstoffgehalt (4.9 mg/l). Dort fand ich keine troglobionten Tiere. Sämtliche Fundstellen werden von externen Wetterwechseln nur sehr wenig beeinflusst, da die Höhle keinen wetterwirksamen Eingang besitzt (vgl. Kap. III. 3.1. und III.4.).

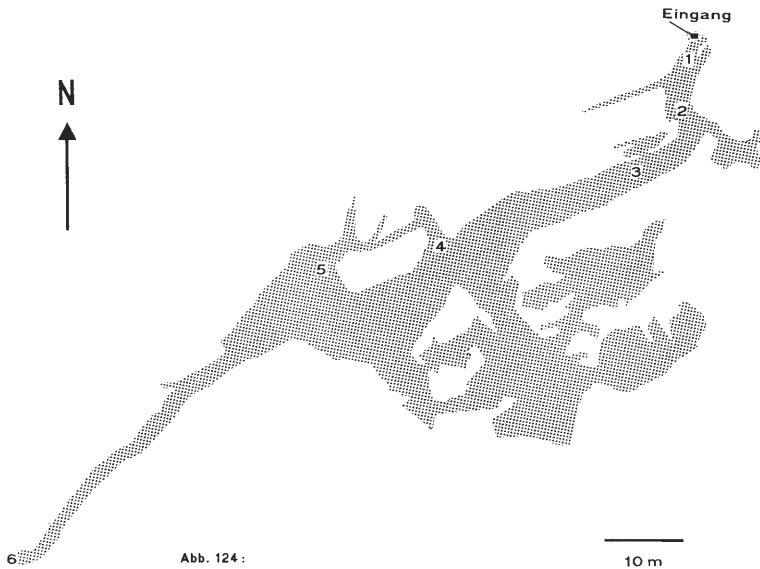


Abb. 124:
Kluterthöhle in Hagen
Plan nach WEBER, Arbeitskreis Kluterthöhle und Arbeitsgemeinschaft
Höhle und Karst Sauerland/Hemer e.V. (1983); verändert.
Das Gangsystem ist schraffiert dargestellt; die Meßpunkte sind numeriert.

Auch der Matthiasstollen (Iserlohn-Lössel) besitzt keinen wetterwirksamen Eingang und wurde zwecks Untersuchung am 06. 07. 1986 aufgedeckt. *N. kochianus* fand ich bevorzugt in der Nähe des Stollenmundlochs, an sedimentreichen Stellen. In diesem Bereich ist offensichtlich der Input an Nahrung am größten, da durch das vorgelagerte, nur lockere Stein- und Erdmaterial Regenwasser in den Stollen eindringt. Ein hoher CO₂-Gehalt der Luft bereits am Stollenmundloch (0.32 Vol.-%), der sich bis zum Stollenende auf 0.40 Vol.-% erhöhte, weist auf stark reduzierte Wetterwechsel an den Fundstellen hin. Ein am Eingang steil verlaufender und zum Stolleninneren hin abflachender Temperaturanstieg der Luft (7.7 – 8.7°C) und des Wassers (7.4 – 8.4°C) ist in Verbindung mit einer Luftfeuchte nahe am Sättigungspunkt (Abnahme von 99% auf 96% vom Eingang zum Stolleninneren) charakteristisch für interne Wetterwechsel in oberflächennahen Bereichen. Trotz Eingangsnähe liegen im Sommer die Fundstellen offensichtlich außerhalb des Einwirkungsbereichs externer Wetterwechsel.

In der Friedrichshöhle (Hönnetal) fand ich *N. kochianus* an denselben Fundstellen wie *P. cavaticus* und außerdem an Mp 5 (Abb. 26). Es ist daher wahrscheinlich, daß auch *N. kochianus* durch das Tropfwasser der Filterzone an die Fundstellen gelangt. Der

Tab. 13: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den *Niphargus kochianus*-Fundstellen.

Parameter a) Minimum b) Maximum	Höhlen			
	Kluterthöhle (Ennepetal)	Kluterthöhle (Hagen)	Friedrichs- Höhle	
Wassertemperatur [°C]	a	7.3	8.0	7.4
	b	10.4	10.1	8.0
pH-Wert -lg [H ⁺]	a	6.9	7.1	7.1
	b	7.5	7.2	7.4
Leitwert [µS/cm]	a	176.3	374.4	256.3
	b	602.4	611.9	379.6
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	28.5	70.9	71.5
	b	87.6	107.7	101.8
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	2.3	3.4	0.7
	b	14.5	17.0	1.3
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	a	9.6	92.2	42.2
	b	105.6	161.3	107.5
CO ₂ -gebunden [mg/l]	a	30.8	101.2	101.2
	b	132.0	202.4	165.0
CO ₂ -gelöst [mg/l]	a	4.0	5.5	9.7
	b	35.7	21.1	27.7
O ₂ -Konzentration [mg/l]	a	5.2	7.4	9.1
	b	12.6	12.3	11.2
O ₂ -Sättigung [%]	a	48.2	63.6	78.6
	b	114.1	110.9	96.9
org. Substanzen [mg/l]	a	1.7	1.3	1.9
	b	13.4	4.7	5.4
Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	6.6	7.2	8.2
	b	96.2	12.9	11.7
Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	3.2	9.4	2.5
	b	48.3	23.3	4.2
PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.005	0.005
	b	0.39	0.43	0.060
NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	7.5	8.1	8.0
	b	41.9	25.3	13.8
NO ₂ ⁻ -Konzentration [µg/l]	a	0.0	0.0	0.0
	b	26.0	29.0	10.0
NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.00	0.00
	b	0.18	0.12	0.06
Fe-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.040	0.000
	b	0.670	2.120	0.070
Mn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000
	b	0.140	0.140	0.070
Zn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000
	b	0.060	0.060	0.020
Cu-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000
	b	0.060	0.040	0.020
Pb-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000
	b	0.000	0.000	0.000

geringe Sedimentanteil an den Fundstellen (Sinterbecken) läßt ebenfalls vermuten, daß dies nicht der eigentliche Lebensraum der Tiere ist. In mit Sediment gefüllten Schalen graben auch die Tiere aus der Friedrichshöhle in der oben beschriebenen Weise Röhren; in den Sinterbecken wurde dies nicht beobachtet. Im Grundwasser der Friedrichshöhle (Mp 13) kommt die Art nicht vor.

In der benachbarten Krötenhöhle fand ich die Art in einer kleinen Tropfwassermulde am Ende des niedrigen und gewundenen Hauptgangs. Auch hier handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit nicht um das natürliche Habitat, da der Lehm an der Fundstelle stark verfestigt ist und offensichtlich dort von Höhlenbesuchern vertieft wurde. Die Fundstelle liegt nicht weit vom Eingang entfernt, so daß eine Wirkung externer Wetterwechsel anzunehmen ist. Eine Verbindung zum Grundwasser ist für die Fundstelle auszuschließen.

Untersuchungen an *N. kochianus* aus Brunnen lassen die Art als unempfindlich gegenüber hohen Leitwerten und Chloridkonzentrationen erscheinen; es wurden bis zu 1036 $\mu\text{S}/\text{cm}$ und 89 mg/l Chlorid gemessen (VONK 1988). Auch das Vorkommen der Art im chloridreichen Grundwasser der Kluterthöhle (Ennepetal) bestätigt diese Vermutung (Tab. 13). Das seltene Vorkommen der Tiere an der Grundwassereintrittsstelle des „Rauschebachs“ (Mp 6) ist auffallend. Neben einer erhöhten Wasserströmung könnte hierfür auch der geringe Sauerstoffgehalt die Ursache sein (mittlerer Sauerstoffgehalt: 6.1 mg/l bei N = 18). Auch in der Kluterthöhle (Hagen) fehlt die Art offensichtlich im sauerstoffarmen Wasser. Im „Sumpfee“ (Mp 3, Kluterthöhle in Ennepetal; Abb. 17), in dem die Art häufiger vorkommt, wurden nur kurzzeitige Sauerstoffzehrungen festgestellt; im Wasser des „Rauschebachs“ (Mp 6; Abb. 17) ist die Sauerstoffkonzentration über längere Zeiträume niedrig (im Mittel bei 56%) und erfährt nur kurzfristig Erhöhungen. An den Fundstellen mit hohen Abundanzen („Murmelbach-Tauchergraben“, Mp 21, 22 und 26; Abb. 17) liegen die Sauerstoffkonzentrationen des Grundwassers bereits wesentlich höher; bis zum „Königssee“ (Mp 19) steigen die mittleren Werte bereits auf 79% und bis zum „Tauchergraben“ (Mp 22) auf über 90% Sättigung an. Gegenüber erhöhten Phosphat-, Nitrat-, Nitrit- und Ammonium- sowie hohen Eisen- und Mangankonzentrationen scheinen die Tiere offensichtlich unempfindlich zu sein (vgl. in Tab. 13 die entsprechenden Maxima aus beiden Kluterthöhlen). An den Fundstellen der Friedrichshöhle tritt kein Parameter als Belastung auf.

Niphargus puteanus KOCH

N. puteanus ist ein Bewohner der Spaltengewässer (NOLL & STAMMER 1953). Sein Verbreitungsschwerpunkt liegt in West- und Süddeutschland, in Höhlen, Quellen und Brunnen (SCHELLENBERG 1935). In der Schwäbischen Alb besiedelt die Art das in erweiterten Gesteinsspalten zirkulierende Grundwasser und ist dort weit verbreitet (DOBAT 1975). Eigene Funde aus dem Bauerloch (Neuffen), Eckisloch (Urach), der Falkensteiner Höhle (Grabenstetten) und dem Mordloch (Geislingen) beschränkten sich auf mäßig bis langsam strömende Grundwassergerinne (Falkensteiner Höhle, Eckisloch), größere stehende Wasseransammlungen (Bauerloch) und phreatisches Grundwasser (Mordloch). Größere Abundanzen konnten an sedimentreichen Tropfwasserstellen festgestellt werden, jedoch ist es unwahrscheinlich, daß die bis zu 3 cm langen Tiere an diesen Stellen mit dem Wasser der Filterzone eingespült werden. Bereiche in unmittelbarer Nähe zu Tropfwasserstellen erfahren aber meist einen erhöhten Nahrungsinput; in sauerstoffarmen Gewässern treten hier auch lokale Zonen mit erhöhter Sauerstoffkonzentration auf. An den wenigen Fundstellen in Westfalen (vgl. auch Kap. III. 1.) kommt die Art in ähnlichen Habitaten vor; auch hier scheint sie innerhalb der Filterzone zu fehlen.

In der Eisenhöhle wurden mit ca. 15 Tieren/m² die höchsten Abundanzen in Eingangsnähe festgestellt (Mp 1; Abb. 125). Das langsam strömende Grundwassergerinne ist durch eine versinterte Vertikalstufe im hinteren Drittel des Gangs geteilt, die kaum von den Tieren aktiv überwunden werden kann. Ein Teil des aus einem Quergang eintretenden Grundwassers (Mp 4) wurde über 2 Jahre lang durch Gaze mit einer Maschenweite von ca. 1.5 mm gefiltert, ohne daß darin Tiere zurückgehalten wurden. Möglicherweise ist die

Population also auf den vadosen Teil der Höhle beschränkt. Auch in einem vom Tropfwasser gespeisten, sedimentarmen Tümpel am Ende der Höhle (Mp 5) kommt die Art offensichtlich nicht vor. Der oberhalb der Stufe liegende Gewässerteil ruht auf einer wenige cm dicken Sedimentschicht (Mp 3), während unterhalb der Stufe (Mp 2) das Sediment um ein vielfaches mächtiger ist und reichlich organisches Material (Holz) enthält. An Mp 1, am Höhleneingang, geht die Dicke der Sedimentschicht zurück; hier ist reichlich frisches organisches Material (eingeweichte Blätter und Reisig) und Geröll vorhanden. An dieser Stelle wurden die Tiere regelmäßig in erhöhter Abundanz festgestellt, obwohl dieser Bereich im Tageslicht liegt und Niphargiden aufgrund ihres Hautlichtsinns üblicherweise negativ phototaktisch reagieren. Mehrere Monate im Dauerdunkel gehaltene Tiere von dieser Fundstelle reagieren auf stärkere Lichteinwirkung mit einer Fluchtreaktion. Die Höhle ist statisch bewettert; der CO₂-Gehalt der Luft ist im Sommer (bis 0.50 Vol.-%) und im Winter (nicht unter 0.06 Vol.-%) erhöht.

In der Von-der-Becke-Höhle kommt die Art in der unteren Etage in einem schwach strömenden Grundwassergerinne vor. Dieses tritt unterhalb der Höhle als Bach zutage, wo ich innerhalb der überbauten Wasseraustrittsstelle ebenfalls Tiere fand; im oberirdischen Teil des Baches fehlen sie offensichtlich. An beiden Fundstellen treten mächtige Sedimentablagerungen auf; organisches Material (Blätter, Holz u. a. pflanzliche Reste) fehlt jedoch. *N. puteanus* fehlt in den Tropfwasserbecken der Höhle. Auch in der nur wenige Meter entfernten Heinrichshöhle, die nur Tropfwasser enthält, ließ sich die Art nicht nachweisen.



Auch in der Friedrichshöhle stellte ich die Art nur im Grundwasser fest (Mp 13; vgl. Abb. 26 und 27). Da hier Hönneversickerungen einspeisen (vgl. Kap. III. 4.), erfährt das Grundwasser an der Fundstelle je nach Wasserführung der Hönne mehr oder weniger starke Schadstoffbelastungen und entsprechend variierende Sauerstoffdefizite (Tab. 14)

Tab. 14: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den *Niphargus puteanus*-Fundstellen. Die Werte des Bachs an der Austrittsstelle unterhalb der VON-DER-BECKE-Höhle sind in Klammern gesetzt. Die Werte aus der VON-DER-BECKE-Höhle entstammen einer Einzelanalyse vom 12.07.1987.

Parameter	Höhlen	Höhlen		
		Eisenhöhle	VON-DER-BECKE Höhle	Friedrichshöhle
a) Minimum				
b) Maximum				
Wassertemperatur [°C]	a	8.5	8.8 (8.7)	7.4
	b	9.6		11.3
pH-Wert	a	7.1	7.2 (7.2)	7.2
-lg [H ⁺]	b	7.3		7.2
Leitwert [µS/cm]	a	252.6	468.6 (465.9)	298.2
	b	773.6		383.2
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	94.9	60.7 (64.6)	65.4
	b	129.0		79.8
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	11.7	6.7 (6.6)	4.2
	b	21.5		6.1
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	a	64.3	54.7 (53.8)	28.8
	b	118.1		92.2
CO ₂ -gebunden [mg/l]	a	206.8	169.4 (169.4)	147.4
	b	259.7		151.8
CO ₂ -gelöst [mg/l]	a	22.0	20.7 (20.5)	19.1
	b	43.1		22.4
O ₂ -Konzentration [mg/l]	a	5.1	6.8 (8.2)	6.0
	b	10.3		6.1
O ₂ -Sättigung [%]	a	46.1	60.5 (72.3)	53.8
	b	91.2		55.2
org. Substanzen [mg/l]	a	2.5	5.8 (4.4)	4.3
	b	5.1		7.4
Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	31.1	19.1 (18.9)	17.2
	b	126.8		22.2
Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	20.6	10.3 (10.1)	5.9
	b	52.3		9.3
PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.04 (0.05)	0.10
	b	0.10		0.10
NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	10.1	23.1 (20.9)	26.3
	b	16.4		27.0
NO ₂ ⁻ -Konzentration [µg/l]	a	0.0	0.0 (2.0)	10.0
	b	6.0		65.0
NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.03 (0.01)	0.07
	b	0.05		0.11
Fe-Konzentration [mg/l]	a	0.010	0.030 (0.030)	0.040
	b	0.210		0.100
Mn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000 (0.010)	0.010
	b	0.050		0.090
Zn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.019 (0.002)	0.000
	b	0.005		0.010
Cu-Konzentration [mg/l]	a	0.005	0.011 (0.000)	0.000
	b	0.010		0.010
Pb-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000 (0.000)	0.000
	b	0.000		0.000

mit zeitweise starker Wassereintrübung. Auch das Vorkommen troglonexer und troglophiler Arten weist auf eindringendes Oberflächenwasser hin; entsprechend hoch liegt der Input von organischem Material. Trotz Sauerstoffzehrung und chemischer Belastung

kommt *N. puteanus* hier in hoher Abundanz vor. Obwohl die Fundstelle schwer einzusehen ist, wurden stets 30-50 Tiere geschätzt. Ebenfalls in hoher Abundanz wurden hier *Gammarus fossarum* (Amphipoda), *Bythinella dunkeri* (Gastropoda) und vereinzelt *Dugesia gonocephala* (Tricladida) festgestellt. Ich konnte mehrmals beobachten, daß *N. puteanus* die Quellschnecke als Nahrung aufnimmt. Schalenversuche zeigten, das er *D. gonocephala* verschmäht, aber eigene Artgenossen frißt. An den ausschließlich von Tropf- und Sickerwasser gespeisten *P. cavaticus*- und *N. kochianus*-Fundstellen fehlt *N. puteanus*. Die *N. puteanus*-Fundstelle liegt außerhalb der vom Eingang klimatisch beeinflussten Zone; der CO₂-Gehalt der Luft erreicht zeitweise 3.1 Vol.-% (vgl. auch Kap. III. 3.1.).

Gegenüber Schwankungen der meisten physikalischen und chemischen Parameter scheint *N. puteanus* unempfindlich zu sein. Große Schwankungen des Leitwerts, der Chlorid- und Natriumkonzentrationen und hohe Magnesiumkonzentrationen (in der Eise nhöhle; Tab. 14) werden von der Art toleriert. Niedrige Sauerstoffkonzentrationen und hohe CO₂-Werte treten an allen Fundstellen über einen längeren Zeitraum auf; in der Friedrichshöhle war auch dann die Abundanz hoch. Die Art ist offensichtlich an die Milieubedingungen des Tiefengrundwassers gut angepaßt. pH-Werte oberhalb von 7.3 wurden an den Fundstellen nicht beobachtet, Konzentrationen des gelösten CO₂ unterhalb von 20 mg/l nur selten. Die Konzentrationen von Phosphat, Nitrat und Ammonium sind zwar erhöht, Konzentrationsspitzen, wie im Grundwasser der Kluterthöhle und der Höhle hinter der Villa Ribbert, wurden aber nicht beobachtet. Auch sehr hohe Nitritwerte, verursacht durch das eindringende Hönnewasser, belasten das Grundwasser in der Friedrichshöhle ohne sichtbaren Einfluß auf die *N. puteanus*-Population. Mit Ausnahme des Grundwassers der Von-der-Becke-Höhle waren die Konzentrationen für Eisen an den Fundstellen stark und für Mangan leicht erhöht. – Die wenigen untersuchten Fundstellen lassen kaum die gesamte Toleranzbreite der Art gegenüber Umweltschwankungen erkennen, weisen aber *N. puteanus* als besonders euryök aus. Die Art vermag auch schwach bis mäßig verunreinigtes Grundwasser zu besiedeln. Im Gegensatz zu den meisten anderen westfälischen *Niphargus*-Arten sind dieser großen Art für die Ausbreitung enge Grenzen gesetzt: das englumige Interstitial (Sande und Kiese von geringer Korngröße in unmittelbarer Ufernähe) sowie die Filterzone und das Lückensystem im nichtverkarstungsfähigen Gestein stellen möglicherweise Ausbreitungsbarrieren dar.

Niphargus schellenbergi (KARAMAN)

Nach HUSMANN (1956) besiedelt die Art alle subterranean wasserführenden Biotope, soweit sie ihr ausreichende Bewegungsfreiheit gewähren. Ihr Verbreitungsschwerpunkt liegt in den Spaltengewässern, von wo aus sie in Brunnen und Quellen und auch an die Erdoberfläche gelangt. Die Art ist, wie Funde aus Gebieten mit Tonschiefer und Buntsandstein zeigen, offensichtlich nicht auf die Zone verkarstungsfähigen Gesteins beschränkt (SCHELLENBERG 1942). Aus westfälischen Höhlen meldet GRIEPENBURG (1933b) die Art aus dem Grundwasser der Rentröpsöhle; weitere 7 Neunachweise aus Höhlen und ein Quellsfund konnten von mir erbracht werden (vgl. Kap. III. 1.).

In der Kluterthöhle (Ennepetal) fand ich ein Tier zusammen mit *N. fontanus* in einem periodisch wasserführenden Tümpel nahe Mp 8 in der „Wolfsschlucht“ (vgl. Abb. 17). Da auch *N. schellenbergi* im Sediment Röhren gräbt (siehe unten auch die Angaben zum Vorkommen im Halver Hü lloch), ist unklar, ob die Tiere in diesem Gewässer Trockenphasen überdauern, oder ob es sich um ein aus der Filterzone mit dem Tropf- und Sickerwasser eingeschwemmtes Tier handelt. Letzteres kann nicht ausgeschlossen

werden, da im Bereich der „Wolfsschlucht“ die Spalten im Deckgestein erweitert sind.

Im Halver Hüllloch (Abb. 23) fand ich die Art bereits wenige Meter hinter dem Eingang in zeitweise von Regenwasser vermehrten, sedimentreichen Tropfwasserlachen (Mp 2) und in von Tropfwasser gespeisten Sinterbecken (Mp 4, 11 und weitere, nahe Mp 11 gelegene Tropfwasserstellen) mehrere Meter oberhalb des Grundwasserspiegels; im Grundwasser (Mp 10) fand ich keine troglobionten Arten. Das Vorkommen der Tiere in der Eingangsregion, zumal in zeitweise durch hohe organische Fracht belastetem Wasser (Tab. 15), macht deutlich, daß die Art weitgehend unempfindlich gegenüber klimatischen Einflüssen und Änderungen des Wasserchemismus ist. Die Tiere kommen auch in periodisch wasserführenden Gewässern der Tropfwasserzone vor (Mp 4). Die kaskadenartig übereinander liegenden Becken sind sedimentarm und es dominiert kristallines Kalziumkarbonat. Auch hier scheint das Spaltensystem im Deckgestein erweitert zu sein; nach starken Regenfällen erfolgt ein traufenartiger Wassereinstrom. Die Konzentration der organischen Substanzen liegt an Mp 4 niedrig; jedoch kommen erhebliche Schwankungen des Leitwerts und der Konzentration von Kalzium und gebundenem CO₂ (Kalziumhydrogenkarbonat) vor (Tab. 15). In Mp 11 (Sinterbecken) lebt die Art zusammen mit *A. stammeri*; wie diese Art fand ich *N. schellenbergi* auch hier in wassererfüllten Vorsprüngen des überrieselten Wandsinters. In einem größeren Tropf- und Sickerwassertümpel graben die Tiere, wie für *N. fontanus* und *N. kochianus* beschrieben, Röhren in dem hier reichlichen Sediment. Auch die charakteristischen Hügel sind hier zu beobachten. In diesem Zusammenhang ist interessant, daß der Tümpel während der Untersuchungen (1985-1988) stets Wasser führte. Das Verhalten der Tiere, Röhren zu graben und darin zu verweilen, ist also offensichtlich nicht von einem Wechsel zwischen wasserführenden Zeiten und Trockenphasen abhängig.

Am Eingang des Stollens Erzgebirge II fand ich *N. schellenbergi* in einer nahezu die gesamte Stollenbreite einnehmenden Wasseransammlung auf reichlich Sediment und organischem Material (eine Wasserströmung war kaum festzustellen) und in etwas geringerer Abundanz in einem vom Eingang entfernten Abschnitt an Tropfwasserstellen. Auch hier halten sich die Tiere offensichtlich bevorzugt an Stellen auf, die eine geringe Strömung und ein erhöhtes Nahrungsangebot aufweisen.

Im Wasserloch im Kehlberg fand ich die Art zusammen mit *G. fossarum* regelmäßig im Grundwassergerinne der vadosen Zone, jedoch stets nur einzelne, meist juvenile Tiere. Bereits wenige Meter hinter dem Eingang konnte ich bei normaler Wasserführung Tiere an den Versickerungsstellen feststellen, aber auch im hinteren Teil fand ich Tiere an vertieften Stellen mit reduzierter Wasserströmung. Bis auf die Eingangsregion ist der Sedimentanteil des Gewässers gering; die Wasserströmung ist an den meisten Stellen des Gerinnes relativ stark. Das Auftreten trogloxener Arten im Grundwasser weist darauf hin, daß dieses vom oberhalb der Höhle versickernden Mittelgebirgsbach vermehrt wird, in dem ich auch *Gammarus fossarum*, zum Teil weiße Tiere, feststellte; dort fand ich jedoch nie *N. schellenbergi*. Funde in der Almquelle und im austretenden Grundwasser des Paulsstollens der Hermannszeche belegen, daß die Art auch in Westfalen oberirdisch auftritt (vgl. auch Kap. III. 1.). Ich fand sie auch hier mit *G. fossarum* zwischen Blättern und Steinen.

Im Messinghauser Stollen liegen andere Verhältnisse vor. Hier kommen im Eingangsbereich verstreut bis häufig Troglaxene vor (Grasfrösche, Larven und Adulte des Feuersalamanders). *N. schellenbergi* fand ich erst an vom Eingang entfernten Stellen, an denen die Troglaxenen fehlten. Bevorzugt halten sich auch hier die Tiere an tümpelartigen Erweiterungen des Grundwassergerinnes auf, also an Stellen mit verringerter Wasserströmung und erhöhter Sedimentationsrate.

Tab. 15: Die Variationsbreite physikochemischer Parameter an den *Niphargus schellenbergi*-Fundstellen. Die aus dem oberirdischen Bachlauf des Wasserlochs im Kehlberg gewonnenen Werte sind in Klammern gesetzt. Die Werte aus dem Wasserloch im Kehlberg entstammen einer Einzelanalyse vom 09.07.1986.

Parameter a) Minimum b) Maximum	Höhlen			
		Kluterhöhle (Ennepetal)	Halver Hülloch	Wasserloch im Kehlberg
Wassertemperatur [°C]	a	8.3	3.9	8.2 (8.6)
	b	9.1	7.4	
pH-Wert -lg [H ⁺]	a	7.1	7.1	7.4 (7.5)
	b	7.2	7.5	
Leitwert [µS/cm]	a	176.3	244.8	222.2 (190.7)
	b	321.6	431.6	
Ca ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	29.1	55.3	35.5 (30.0)
	b	47.8	112.4	
Mg ²⁺ -Konzentration [mg/l]	a	4.5	1.7	7.2 (6.3)
	b	6.9	3.2	
SO ₄ ²⁻ -Konzentration [mg/l]	a	51.8	15.4	62.4 (65.3)
	b	76.8	69.1	
CO ₂ -gebunden [mg/l]	a	30.8	114.4	66.0 (63.8)
	b	83.6	180.4	
CO ₂ -gelöst [mg/l]	a	4.4	10.6	5.9 (4.4)
	b	13.0	24.2	
O ₂ -Konzentration [mg/l]	a	10.0	5.3	11.0 (10.9)
	b	11.8	11.3	
O ₂ -Sättigung [%]	a	89.2	45.4	95.9 (96.1)
	b	104.3	96.3	
org. Substanzen [mg/l]	a	2.2	1.6	3.5 (4.0)
	b	5.2	48.0	
Cl ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	7.5	8.2	7.1 (7.5)
	b	10.9	10.8	
Na ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	3.2	3.5	4.0 (3.6)
	b	4.8	5.1	
PO ₄ ³⁻ -Konzentration [mg/l]	a	0.09	0.00	0.02 (0.02)
	b	0.39	1.07	
NO ₃ ⁻ -Konzentration [mg/l]	a	13.0	1.1	6.4 (7.9)
	b	18.2	13.5	
NO ₂ ⁻ -Konzentration [µg/l]	a	0.0	0.0	0.0 (0.0)
	b	26.0	13.0	
NH ₄ ⁺ -Konzentration [mg/l]	a	0.00	0.00	0.00 (0.07)
	b	0.05	0.55	
Fe-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.030	0.000 (0.000)
	b	0.370	1.330	
Mn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000 (0.000)
	b	0.050	0.380	
Zn-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000 (0.005)
	b	0.010	0.030	
Cu-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.005 (0.005)
	b	0.040	0.010	
Pb-Konzentration [mg/l]	a	0.000	0.000	0.000 (0.000)
	b	0.000	0.000	

Auch in der Grundsteinheimer Höhle kommen die Tiere in einem sedimentreichen Grundwassergerinne zusammen mit *Gammarus pulex* vor (der Wasserspiegel erreicht hier zeitweise die Höhlendecke). Das Grundwasser wird von Versickerungsstellen

der Sauer vermehrt, so daß das Vorkommen von *G. pulex* in der Höhle nicht überrascht. Das syntope Vorkommen von Niphargiden und Gammariden (vgl. auch die Angaben zu *N. puteanus* in der Friedrichshöhle) macht deutlich, daß sich diese im Subterrانبereich nicht gegenseitig ausschließen; auch in geeigneten oberirdischen Habitaten können sie koexistieren. Oberhalb des Grundwassergerinnes kommt *N. schellenbergi* auch in sedimentreichen Tümpeln vor, die nur bei Hochwasser vom Grundwasser erreicht werden.

N. schellenbergi weist offensichtlich die größte Vielseitigkeit unter den untersuchten westfälischen troglobionten Arten auf. Eine erhöhte Toleranz gegenüber größeren Schwankungen der Umweltparameter (Temperatur, Sauerstoffkonzentration, Lichteinwirkung) ist seit langem bekannt (SCHELLENBERG 1942) und wird durch die vorliegenden Funde aus Höhlengewässern und aus oberirdischen Habitaten bestätigt (vgl. auch Tab. 15). Obwohl die Art von mir nur in statisch bewetterten Höhlen gefunden wurde, zeigt das oberirdische Vorkommen der Art, daß sie auf einen erhöhten CO₂-Partialdruck der Luft nicht angewiesen ist; möglicherweise muß aber dann ein ständiger Zustrom von CO₂-reichem Wasser gesichert sein. Die Art toleriert größere Schwankungen der Ionenkonzentration (vgl. den Leitwert in Tab. 15), insbesondere der Kalzium- und Magnesiumkonzentrationen sowie des Hydrogenkarbonatgehaltes. Auch zeitweilig hohe Phosphat-, Nitrit- und Ammoniumwerte und ein hoher Gehalt an organischen Substanzen mit zeitweise auftretender Sauerstoffzehrung (z. B. im Eingangsbereich des Halver Hüllochs) werden überstanden. Es ist also wahrscheinlich, daß *N. schellenbergi* auch gegenüber Stickstoffbelastungen weitgehend unempfindlich ist, obwohl an den hydrochemisch untersuchten Höhlenfundstellen die Nitratwerte nur mäßig erhöht sind. Die zeitweise festgestellten hohen Eisen- und Mangankonzentrationen wirken sich ebenfalls nicht limitierend auf das Vorkommen der Tiere aus; möglicherweise sind sie als Konsumenten von Eisenbakterien (HARTMANN 1983) an diese Milieubedingungen angepaßt. Neben der relativ großen Toleranz gegenüber zeitweisen Umweltbelastungen ist möglicherweise die sehr variable Körpergröße der adulten Tiere für die Besiedlung enger Lückensysteme (des ufernahen und uferfernen Interstitials sowie der Filterzone) von Vorteil (SCHELLENBERG 1942, fand trüchtige Weibchen, die nur 7 mm lang waren). Im Vergleich zu den relativ stenöken (z. B. *N. kochianus*) bzw. großen *Niphargus*-Arten (z. B. *N. puteanus*) sind für *N. schellenbergi* die Ausbreitungshindernisse geringer.

6. Zur Morphologie und Anatomie von *Krumbachia subterranea* REISINGER, *Rectocephala schneideri* (KOMAREK) und *Prostoma putealis* (DE BEAUCHAMP)

Während die in dieser Arbeit behandelten Crustaceen hinreichend genau an Hand ektoskelettaler Merkmale charakterisiert sind, mußte zur Bestimmung der äußerlich merkmalsarmen Turbellarien und Nemertinen auch die innere Anatomie berücksichtigt werden. Die diesbezüglichen Befunde sind z. T. neu, so daß sie hier mitgeteilt werden sollen.

Krumbachia subterranea REISINGER

Die Art ähnelt stark der Form *K. styriaca* REISINGER, einer terricolen Rhabdocoele aus der Steiermark (REISINGER 1924). Nach REISINGER (1933) unterscheidet sie sich von ihr jedoch in drei Merkmalen des Genitalapparates: „1. Die Bursa copulatrix ist eine in transversaler Ebene abgeflachte, breite Tasche, kein Schlauch wie bei *K. styriaca*. 2. Der Ductus communis (weibl. Genitalkanal) entbehrt der für *K. styriaca* bezeichnenden ventralen Abknickung und setzt sich minder scharf abgesetzt in den Stiel des sehr großen

Receptaculum seminis fort, welches in das Darmepithel gebettet ist. 3. Die Vitellarien sind mit zweizeilig angeordneten kurzen Seitenästen versehen, nicht glattwandig, wie bei *K. styriaca*. Da weder für *K. subterranea* noch für *K. styriaca* bisher eine zeichnerische Darstellung der inneren Anatomie existiert, wurden in Abb. 126 auch die gattungstypischen Merkmale berücksichtigt (die Gattung *Krumbachia* enthält nur die beiden genannten Arten). Diese sind nach REISINGER (1924): „Protoplanellini ohne dermale Rhabdoide, adenale bloß in den Stäbchenstraßen, mit typischem Pharynx rosulatus. Mit fixem, kutikularisierten Ductus ejaculatorius. Mit Bursa copulatrix und langgestieltem Receptaculum seminis.“

Diese und auch die artspezifischen Merkmale konnten bei den Tieren aus der Erlenhöhle, dem Halver Hülloch und der Höhle hinter der Villa Ribbert bestätigt werden: – Die drehrunden Tiere sind – wie auch *K. styriaca* – weiß und augenlos; ausgewachsene Tiere besitzen eine Länge von 1.5 – 2.0 mm (*K. styriaca*: 1.8-2.4 mm Länge). – Rhabdoide kommen zahlreich in Stäbchenstraßen (Abb. 126A: Ss) vor; diese münden getrennt an der Kopfspitze nach außen. Der Bildungsort der Rhabdoide liegt hinter und dorsal vom Gehirn (Ge) (nur adenale Rhabdoide in Stäbchenstraßen, wie bei *K. styriaca*). – Der Pharynx rosulatus (Abb. 126B und Abb. 126A: Phq) liegt nur wenig hinter der Körpermitte (Pharynx-Ø: 200 – 250 µm; Höhe [Dorso-ventral-Ausdehnung] ca. 170 µm). Der Pharyngealmund (Abb. 126A: Mö; ventral) ist rechteckig (60 x 70 µm); der Anschluß zum Darm ist nahezu kreisrund (Ø: ca. 110 µm). – Die ventral gelegenen Hoden (Te) sind ungleich groß und erstrecken sich vom Pharynx bis in das vordere Körper-Drittel. – Die nach hinten verlaufenden Vasa deferentia (Vd) sind im Bereich des Pharynx sagittal verengt und münden in das median liegende, langgestreckte Kopulationsorgan (Peb). – Das unpaare Germarium (Ger) liegt im hinteren Körper-Fünftel dorsolateral; weiter caudal befindet sich das Receptaculum seminis (Rs), es erstreckt sich weit in die Medianebene hinein. – Vom Germarium verläuft der Germiduct (Od) caudad und geht nach einer Biegung ventralwärts in den Receptaculum-Stiel über. Hier mündet der Ductus communis ein. Die Ausführgänge der Schalendrüsen (Sd) und die beiden Vitelloducte enden in einem erweiterten Abschnitt (Ø: 45 – 60 µm) des Ductus communis. Von dieser Stelle verläuft der Ductus communis ca. 100 µm rostrad und mündet in die transversal nur geringfügig abgeflachte Bursa copulatrix (Bc). Diese steht über einen Porus mit dem ventral gelegenen Atrium genitale (Ag) in Verbindung. – In das Atrium genitale mündet der abgewinkelte distale Teil des Ductus ejaculatorius (De) ein (Ø: ca. 25 µm); sein erweiterter proximaler Teil (Ø: ca. 65 µm) verläuft vom Pharynx kommend ventrad und biegt in Höhe der Atrialkrypten caudad ab. Das Atrium genitale gliedert ventral ein Vestibulum ab, an dem die paarigen Atrialkrypten (Akr) ansetzen. – Die lateralen Vitellarstränge gliedern dorsal perlschnurartig 2 oder 3 Seitenknospen (Vitellarien; Vi) ab. – Der syncytiale Darm (in Abb. 126A nicht eingezeichnet) verläuft dorsal vom Vorderrand des Gehirns bis in das hintere Körper-Fünftel. Das Darmepithel besitzt zahlreiche Auffaltungen. Lakunenartige Aussackungen und Spalten des Darmlumens durchziehen das Darmepithel und reichen bis an das mesenchymale Lückensystem heran (besonders dorsal im Bereich der Vitellarien). – Schirmpigmente (Sp) befinden sich links und rechts oberhalb der vom Gehirn nach vorn ziehenden Nervenbahnen (Ma).

Die große Übereinstimmung der inneren Anatomie von *K. subterranea* und *K. styriaca* ist auffallend. Bis auf die teilweise mehrzeilig angeordneten Vitellarien bei *K. subterranea* sind die von REISINGER (1933) angegebenen Merkmalsunterschiede nur gering oder nicht ausgebildet.

Es muß in diesem Zusammenhang beachtet werden, daß der Kontraktionszustand der Tiere sich auf die Form und die Lage von Organen auswirken kann (die von mir untersuchten Tiere lagen nach der Fixierung im halb-kontrahierten Zustand vor). Die

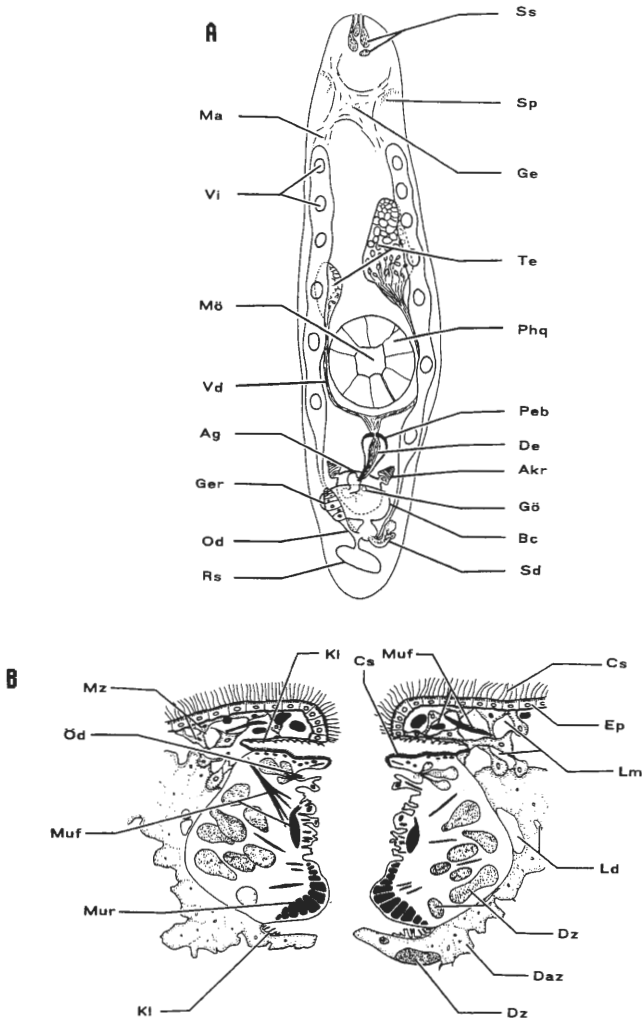


Abb. 126: *Krumbachia subterranea* REISINGER; A: Schematische Darstellung der inneren Anatomie in der Transversal - Ebene. Der Darm ist nicht eingezeichnet; das Antrum genitale mit dem ventral abgegliederten Vestibulum ist einheitlich dargestellt und mit Ag bezeichnet. B: Schematische Darstellung des Pharynx rosulatus von *K. subterranea* in der Sagittalebene.

Abkürzungen: Ag: Atrium genitale; Akkr: Atrialkrypta; Bc: Bursa copulatrix; Cs: Ciliensaum; Daz: Darmzellen; De: Ductus ejaculatorius; Dz: Drüsenzellen; Ep: Epidermis; Ge: Gehirn; Ger: Germarium; Gö: Geschlechtsöffnung; Kl: Kutikularleiste; LD: Lakunensystem des Darms; LM: Lakunensystem des Mesenchyms; Ma: Markstrang; Mö: Mundöffnung; Muf: Muskelfasern, längs und diagonal; Mur: Muskelfasern, ringförmig; Mz: Mesenchymzellen; Od: Oviduct; Öd: Öffnung der Drüsengänge; Peb: Penisbulbus; Phq: Pharynx im Querschnitt; Rs: Receptaculum seminis; Sd: Schalendrüsen; Sp: Schirmpigmente; Ss: Stäbchenstraßen; Te: Testes; Vd: Vas deferens; Vi: Vitellarien

Ausdifferenzierung der Vitellarien hängt vom Entwicklungszustand der Tiere ab (REISINGER beschrieb *K. styriaca* an nur 3 Exemplaren). Von den von mir untersuchten Tieren (9) waren 5 voll ausdifferenziert. Bei den Jungtieren waren die Vitellarienseitenäste nicht vorhanden. – So könnten bei jungen, nicht vollständig ausdifferenzierten Tieren im Kontraktionszustand die für *K. styriaca* angegebenen Merkmale hervortreten (Bursa copulatrix schlauchförmig; Ductus communis mit ventraler Abknickung; Vitellarien glattwandig), während bei ausdifferenzierten, wenig kontrahierten Tieren die hier genannten Merkmale vorliegen (Bursa copulatrix als breite Tasche, transversal abgeflacht; Ductus communis ohne ventrale Abknickung; Vitellarien mit zweizeilig angeordneten kurzen Seitenästen).

Auch die Fundumstände von *K. styriaca* (in feuchtem, modernden Buchenlaub „auf der Kanzel“ bei Graz; REISINGER 1924) stehen nicht völlig im Widerspruch zu der Habitatbindung der troglobionten *K. subterranea*. Unter Berücksichtigung, daß beide Arten augenlos und weitgehend unpigmentiert sind und daß *K. subterranea* oberflächen-nahe Habitate bevorzugt und möglicherweise unter geeigneten Bedingungen auch bis an die Erdoberfläche vorzudringen vermag, sind auch hier Gemeinsamkeiten vorhanden.

Rectocephala schneideri (KOMAREK)

Die Art wurde von KOMAREK (1930) anatomisch beschrieben. Von den 11 von mir anatomisch untersuchten Tieren (Länge: 1.5 – 2.5 cm; Breite: 4-6 mm), die aus der Erlenhöhle und Schönebecker Höhle stammten, besaßen nur zwei Tiere (aus der Erlenhöhle) ein ausdifferenziertes Genital; die Vitellarien waren nur bei einem Tier voll ausdifferenziert. Die nach Fixierung auf etwa 2/3 der Lebendgröße kontrahierten Tiere wurden in der Sagittal- und Transversalebene untersucht. – Die Tiere sind ausnahmslos unpigmentiert und augenlos (es sind auch keine Schirmpigmente vorhanden; vgl. *K. subterranea*). – Bereits beim lebenden Tier ist eine ventral am Kopfende gelegene, gut ausgebildete, muskulöse Sauggrube (Abb. 127A: Sg) erkennbar, die bei Reizung des Tieres fingerartig ausgestülpt wird und sowohl der Festheftung (es wird Drüsensekret sezerniert) als auch der Fortbewegung (z.B. Rückwärtsschieben) dient. – Vom vorn breit abgestutzten Kopfbereich ziehen zwei laterale Randwülste mit prismatischen Epithelzellen und eingelagerten Rhabditenbündeln caudad. – Der typische Tricladen-Darm (Da) besitzt wenige Besonderheiten; es treten zwischen den hinteren Darmästen Anastomosen auf. – Die ventrale Öffnung der Pharyngealtasche (Pht, mit längsorientiertem Pharynx plicatus; Ph) liegt im hinteren Körper-Drittel; die Geschlechtsöffnung (Gö) liegt ebenfalls ventral, im hinteren Körper-Fünftel. – Die paarigen Germarien (Ger) liegen rostral hinter den ersten 3 Darmdivertikeln; die ventrolateralen Oviducte (Od) verlaufen unmittelbar dorsal der Markstränge (Ma). Die lateral zwischen den Darmdivertikeln gelegenen Testes (Te) und die Vitellarien (sie sind in Abb. 127A nicht dargestellt) nehmen den Medianbereich ein. Die Vasa deferentia (Vd) ziehen ventral vom Darm und dorsal von den Oviducten nach hinten. – Eine Besonderheit des Genitals stellt der muskulöse Bulbus dar (Abb. 127A, B u. C), in dem die Vesicula seminalis (Vs) mit ventraler Drüsenpapille (Abb. 127B: Dp), der Penisbulbus (Peb) und das Antrum masculinum (Abb. 127B u. C: Am) eingeschlossen sind. Aufgrund dieser typischen Bulbusausbildung wurde die Gattung *Rectocephala* von *Bdellocephala* abgetrennt (HYMAN 1954); die von KOMAREK (1930) beschriebene Art *Bdellocephala schneideri* gehört daher in die neue Gattung. – Zwischen dem muskulösen Bulbusteil (mBt) (z. T. lateral mit diesem überlappend) und der Pharyngealtasche liegt die sich von der Medianebene bis zur Dorsalseite ausdehnende Bursa copulatrix (Abb. 127A, B u. C: Bc). Der Bursastiel ist proximal englumig (Bs; z. T. gewunden), distal erweitert er sich (hier mit hochprismatischen Epithelzellen). Er zieht lateral vom Bulbus über die Geschlechts-

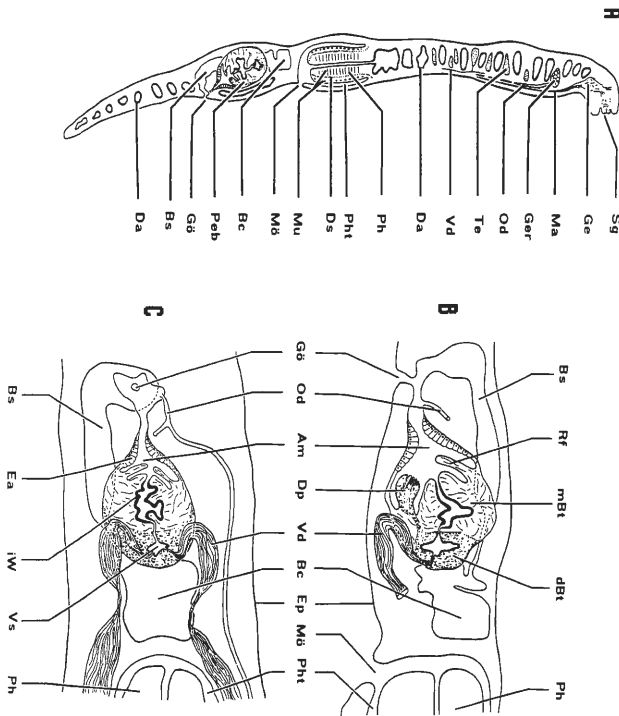


Abb. 127: *Rectocephala schneideri* (KOMAREK); A: Schematische Darstellung der Organlage in der Sagittalebene als Übersicht. Die Vitellarien sind nicht eingezeichnet. B und C: Schematische Darstellung des Genitalbereichs im hinteren Körperabschnitt. B: Sagittalebene; C: Transversalebene

Abkürzungen: Am: Antrum masculinum; Bc: Bursa copulatrix; Bs: Bursa-stiel; Da: Darm; dBt: drüsiger Bulbusteil; Dp: Drüsenpapille; Ds: Drüsensekret; Ea: Epithel des Antrum masculinum; Ep: Epidermis; Ge: Gehirn; Ger: Germarium; Gö: Geschlechtsöffnung; iW: innere Wand des Penisbulbus; Ma: Markstrang; mBt: muskulöser Bulbusteil; Mö: Mundöffnung; Mu: Muskulatur des Pharynx plicatus; Od: Oviduct; Peb: Penisbulbus; Ph: Pharynx; Pht: Pharyngealtasche; Rf: Ringfalte des Penisbulbus (Penis-spitze); Sg: Sauggrube; Te: Testes; Vd: Vas deferens; Vs: Vesicula seminalis

öffnung hinaus nach hinten, wo er sich kammerartig erweitert, scharf ventrad abknickt und nach einer geringfügigen Verengung in den erweiterten Vorraum oberhalb der Geschlechtsöffnung mündet. In diese Erweiterung mündet auch das Antrum masculinum und die hinter dem Penisbulbus vereinigten Oviducte (Od). – Die nach hinten ziehenden Vasa deferentia (Vd) erweitern sich in Höhe der Pharyngealtasche; im Bereich der Bursa copulatrix weisen sie eine starke Verengung auf (Abb. 127C). Sie ziehen ventrolateral über die Vesicula seminalis hinaus, biegen in einem scharfen Winkel sich verjüngend zurück in Richtung der Medianebene und münden getrennt in den vorderen Teil der Vesicula seminalis ein. Dieser ist zur Bursa copulatrix nicht, wie KOMAREK (1930) angibt, durch eine flache Zellschicht, sondern durch mehrschichtig angeordnete großlumige Drüsenzellen abgegrenzt (vgl. Abb. 127B u. C). – Der Bulbus ist in einen vorderen drüsigen (mit Vesicula seminalis) und einen hinteren muskulären Abschnitt (= Penis) differenziert; die Lumina sind kammerartig erweitert und über einen englumigen, z. T.

gewundenen Kanal miteinander verbunden (Abb. 127B u. C). – Der Penis wird von einer Ringfalte (Abb. 127B: Rf) zum Antrum masculinum abgeschlossen, die dorsal muskulär und ventral als Drüsenpapille (Abb. 127B: Dp) ausgebildet ist. Die Ringfalte stellt nach KOMAREK (1930) die Penis Spitze dar. Die Drüsenpapille wird von KOMAREK (1930) nicht erwähnt. – Das sich anschließende Antrum masculinum (Am) ist im Bereich der Ringfalte stark erweitert und verjüngt sich nach hinten bis zur Einmündung in den Vorraum oberhalb der Geschlechtsöffnung. Das Lumen ist von hochprismatischen, dünnwandigen Epithelzellen (Ea) ausgekleidet. Sie werden im distalen Abschnitt des Antrums (bei zunehmender Verengung des Lumens) flacher; die Zellkerne sind basal angeordnet.

Hinsichtlich der Vesicula seminalis (s. o.) und auch der Bursa copulatrix bestehen also nach KOMAREK's Beschreibung Unterschiede zu den von mir untersuchten Tieren. Dennoch überwiegen die Übereinstimmungen bei weitem. Da mir keine Tiere aus dem Harz für eine Überprüfung zur Verfügung standen, muß zunächst noch offen bleiben, ob tatsächlich Abweichungen im Bau des Genitals vorliegen.

Prostoma putealis (DE BEAUCHAMP)

Die Beschreibung der wenigen unterirdisch lebenden Süßwassernemertinen erfolgte, als bezüglich des Artstatus vieler oberirdisch lebender *Prostoma*-Arten noch eine große Unsicherheit bestand. GIBSON & MOORE (1976) revidierten die Gattung *Prostoma* unter Festlegung der morphologischen Merkmale, die eine sichere Artdiagnose ermöglichen. Zu den heute eingezogenen Arten gehört auch *P. clepsinoides* DUGÈS, zu der DE BEAUCHAMP (1932) als var. *putealis* eine im Grundwasser des Rheins bei Illkirch und aus einer Quelle bei Dijon gefundene Nemertine stellte. Bei der Beschreibung dieser unterirdisch lebenden Nemertine blieben für die Artdiagnose wesentliche Merkmale unberücksichtigt; andere Merkmale wurden jedoch ausführlich beschrieben, obwohl ihre Aussagekraft aufgrund hoher Merkmals-Variabilität heute angezweifelt werden muß. GRIEPENBURG (1941b) hielt die Nemertinen aus der Kluterthöhle (Ennepetal) und jene aus dem Grundwasser bei Dijon und Illkirch für eine Unterart von *P. graecense* BÖHMIG. Die in der Kluterthöhle lebenden Nemertinen weisen jedoch für mehrere systematische Merkmale konstante Abweichungen zu *P. graecense* auf und besitzen mehr Gemeinsamkeiten mit *P. canadiensis* GIBSON & MOORE (1978), die in Nordamerika und in Europa in der Maas gefunden wurde (s. u.).

Als makroskopisch sichtbare Gemeinsamkeit der bisher im Grundwasser gefundenen troglobionten Nemertinen sind Augen- und Pigmentlosigkeit festgestellt worden (DE BEAUCHAMP 1932; GRIEPENBURG 1935; MOTAS 1961; TARMAN 1961). Diese Merkmale wurden aber auch von anderen Tiergruppen im Zuge der Anpassung an die unterirdische Lebensweise unabhängig voneinander erworben; die Pigmentreduzierung ist ferner auch als induktive Anpassung an Dauer-Dunkel-Bedingungen von oberirdischen Arten (z. B. von Gammariden und Isopoden) bekannt. Es ist daher erstaunlich, daß diese regressiven Merkmale, die bei Höhlentieren über Tierstämme hinweg gemeinsam auftreten, ohne Berücksichtigung der inneren Anatomie hinreichend sein sollen, um alle Höhlennemertinen zu einer Art [*P. puteale* (DE BEAUCHAMP)] – zu stellen (GIBSON & MOORE 1976). Für eine Differenzierung verschiedener Grundwassernemertinenarten ist m. E. die Berücksichtigung der für die Diagnose oberirdischer Arten herangezogenen Merkmale erforderlich; es wird sogar erforderlich sein, neue Merkmale zu benennen, um auch die im Subterranebereich erfolgten Speziationsprozesse zu erfassen.

Für eine Differenzierung der Arten innerhalb der Gattung *Prostoma* gelten nach GIBSON & MOORE (1976) als verlässliche Merkmalskriterien (1) das Vorhandensein oder Fehlen eines Frontalorgans, (2) die Anatomie und Ausdehnung der Kopfdrüse sowie die

Gestaltung ihrer Ausführgänge, (3) die Ausbildung des Oesophagus und seine epitheliale Auskleidung, (4) die Ausbildung der Rhynchodaeummuskulatur, (5) die Anzahl der Rüsselnerven sowie (6) das Vorhandensein oder Fehlen einer caudalen taktilen Cilie (5 und 6 mit Einschränkung, da individuelle Abweichungen auftreten).

Eine detaillierte morphologische Beschreibung der Höhlennemertine aus der Kluterthöhle in Ennepetal führte ich in meiner Diplomarbeit 1984 durch (vgl. auch Kap. III. 5.). Der für eine Art-Charakterisierung wesentliche Merkmalskomplex sei an dieser Stelle kurz wiedergegeben (vgl. Abb. 128A u. B): (1) Ein epidermal eingesenktes Frontalorgan (Fo) (\emptyset : 35-40 μm) ist vorhanden. Es ist dorsal an der Kopfspitze knapp oberhalb der Rhynchodaeumöffnung lokalisiert. (In das Rhynchodaeum münden der Oesophagus [Oe] und der Rüssel [R]). In das Frontalorgan mündet der Hauptausführgang der Kopfdrüse (Hag) (\emptyset : ca. 30 μm). (2) Die Kopfdrüse (Kd) ist gut ausgebildet (deutlich größer als bei *P. eilhardi*) und reicht bis zur dorsalen Gehirnkommisur (dG); die Kopfdrüse überragt diese jedoch nicht. Basal besteht die Kopfdrüse aus größeren sakkulären Lobuli (sE) – aus diesem Bereich geht der Hauptausführgang hervor; tubuläre Drüsenlobuli (tD) bilden den dorsalen Bereich der Kopfdrüse. Von den tubulären Drüsenlobuli gehen besondere Ausführgänge ab, die getrennt ausmünden (uAg) (Poren- \emptyset : 5 μm). Diese Verhältnisse sind bisher nur von *P. canadiensis* bekannt (GIBSON & MOORE 1978). (3) Der Oesophagus (Oe) ist kurz, ohne Cilien und wird von einem niedrigen plattenartigen Epithel gebildet, welches sich von dem des Rhynchodaeums (Rd) nicht unterscheidet; der Übergang zum 2-teiligen Magen (Abb. 128A: M) ist cytologisch scharf abgrenzbar. Diese Verhältnisse weichen stark von *P. graecense* ab (dort: gut ausgebildeter, bewimperter Oesophagus). Es besteht aber teilweise Übereinstimmung mit *P. canadiensis* (dort: Fehlen der Bewimperung; der Oesophagus ist jedoch länger als bei *P. putealis*). (4) Die schwach ausgebildete Längsmuskulatur des Rhynchodaeums besteht nur aus wenigen einzelnen Muskelfasern (auch dieses Merkmal ist von *P. graecense* verschieden und weist eine Übereinstimmung mit *P. canadiensis* auf). (5) *P. putealis* besitzt mindestens 11 Rüsselnerven (*P. graecense*: 8, 9 od. 10; *P. canadiensis*: 12). (6) eine caudale taktile Cilie konnte nicht festgestellt werden (ebenfalls nicht bei *P. canadiensis*; sie kommt jedoch bei *P. graecense* vor). – GIBSON & MOORE (1976) machen keine Aussage über die dorso-ventrale Differenzierung der Epidermis. Dorsal besteht sie aus hochprismatischen Zellen mit gut ausgebildetem Ciliensaum (Abb. 128A: dE; Cs); ventral liegen plattenartige Epidermiszellen vor (vE), die nur kurze Cilien tragen. Auch die Körpermuskulatur ist dorsal mächtiger als ventral ausgebildet (Abb. 128A: Rm, Lm und vKm).

Ich komme auf Grund dieser Merkmale zu dem Schluß, daß die Höhlennemertine näher mit *P. canadiensis* als mit *P. graecense* verwandt ist. Vor allem auf Grund der regressiven Merkmale, weniger auf Grund der Oesophagus-Länge, halte ich sie aber für artverschieden von *P. canadiensis*.

Bezüglich der oben genannten Merkmale beschreibt DE BEAUCHAMP (1932) für seine Höhlennemertinen (von Dijon und Illkirch) nur die Ausdehnung der Kopfdrüse (sie reicht bei seinem Material nicht bis zur dorsalen Gehirnkommisur) und das Vorhandensein einer taktilen Cilie; diese Beschreibung weicht von den Verhältnissen, die ich bei den Nemertinen aus der Kluterthöhle feststellte, ab. Da DE BEAUCHAMP (1932) nur wenige schlecht fixierte Tiere zur Art-Beschreibung vorgelegen haben und die Lage sowie die Ausdehnung der inneren Organe vom Kontraktionszustand der Tiere abhängen, und da eine verlängerte Cilie nicht konstant bei allen Tieren derselben Art auftritt, ist es m. E. nicht gerechtfertigt, aufgrund der wenigen und durch Neufunde vom locus typicus nicht abgesicherten morphologischen Unterschiede, die troglobionten Nemertinen aus der Kluterthöhle von der von DE BEAUCHAMP beschriebenen Form abzutrennen. Ich halte deshalb vorläufig beide Formen für konspezifisch und bezeichne sie als *P. putealis* (DE

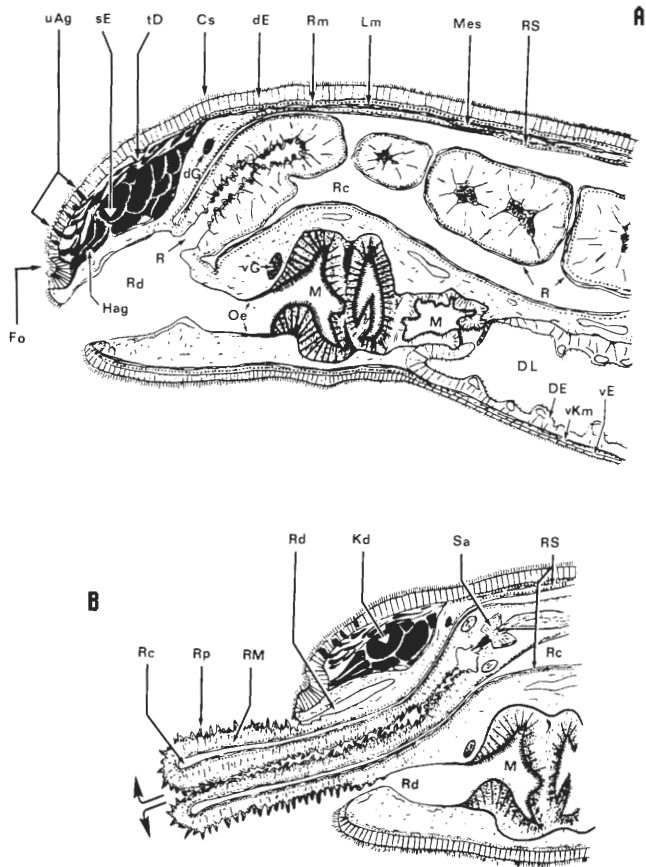


Abb. 128: *Prostoma putealis* (DE BEAUCHAMP); Schematische Darstellung des Kopfbereiches. A: Gesamtübersicht; Tier mit invaginiertem Rüssel; B: Tier mit ausgestülptem Rüssel.

Abkürzungen: Cs: Ciliensaum; dE: dorsale Epidermis; DE: Darmepithel; dG: dorsale Gehirnkommissur; DL: Darmlumen; Fo: Frontalorgan; Hag: Hauptausführgang der Kopfdrüse; Kd: Kopfdrüse; Lm: Längsmuskulatur; M: Magen; Mes: Mesenchym; Oe: Oesophagus; Rc: Rhynchocoel; Rd: Rhynchodaeum; RM: Rüssel-Muskulatur; Rm: Ringmuskulatur; Rp: Rüsselpapillen; Rs: Rüssel; Rss: Rüsselscheide; Sa: Stiletapparat; sE: sakkuläre Elemente der Kopfdrüse; tD: tubuläre Drüsenelemente der Kopfdrüse; uAg: unabhängig ausmündende Gänge, die von den distalen Tubuli der Kopfdrüse ausgehen; vE: ventrale Epidermis; vG: ventrale Gehirnkommissur; vKm: ventrale Körpermuskulatur

BEAUCHAMP). [Den von GIBSON & MOORE 1976, vorgeschlagenen Namen *P. puteale* halte ich für nicht gerechtfertigt]. – Ob die in Südosteuropa gefundenen Höhlennemertinen zur selben Art gehören, ist durchaus zweifelhaft. Bei der 1961 aus einer Höhle nahe Bileca, Herzegowina und aus Vjetrenica nahe Zavala beschriebene *P. herzegowinense* TARMAN liegen allerdings nur Abweichungen hinsichtlich der Anzahl der Rüsselnerven vor; sie ist um 1 (insgesamt 12) gegenüber den Nemertinen aus der Klutterhöhle (11 Rüsselnerven) höher. Von einer 1957 in einer temporären Quelle der Herkules-Bäder gefundenen Höhlennemertine liegt mir nur eine Habituszeichnung vor (in MOTAS 1961). Die dort dargestellte Tierlänge (3 mm) und Form des Kopfbereiches (stark verbreitertes, cephal abgestutztes Vorderteil) sind für Süßwassernemertinen untypisch und lassen eine

Zugehörigkeit zur Gattung *Prostoma* als zweifelhaft erscheinen (vgl. PUST 1984). Zur Differenzierung der bisher beschriebenen troglobionten *Prostoma*-Arten ist es erforderlich, den Artstatus der französischen und der osteuropäischen Höhlennemertinen entsprechend der Revision der oberirdisch lebenden *Prostoma*-Arten nach GIBSON & MOORE (1976) neu zu überprüfen.

IV. Diskussion

1. Die vertikale Verteilung der troglobionten Arten

Es bietet sich für Karstgebiete die folgende vertikale Zonierung der aquatischen Lebensräume des Systems „Höhle“ (im weiteren Sinne) an (vgl. Abb. 129): (1) die Tropf- und Sickerwasser einer oberflächennahen, kleinlumigen Filterzone, die in der Regel nicht innerhalb der begehbaren Höhlen lokalisiert sind und in starkem Maße von der Bodenatmosphäre des A- und B-Horizontes beeinflusst werden (siehe Kap. III. 3.1.); (2) Still- und Fließgewässer (Höhlenseen, -Bäche und -Flüsse) in einer begehbaren Zone; zwischen den Höhlengewässern der vadosen Zone und der Höhlenatmosphäre treten mehr oder weniger starke Wechselwirkungen auf (vgl. Kap. III. 3.2.); (3) eine Zone des tieferen Grundwassers, die von der Höhlenatmosphäre in der Regel unbeeinflusst bleibt. Diese Zone umfaßt den vom Grundwasser erfüllten Bereich im verkarsteten Gestein (phreatische Spaltengewässer). Auch das Lückensystem außerhalb von Karstgebieten weist eine ausgedehnte Filterzone und Grundwasserzone auf (z. B. im oberflächennahen Schiefer, in Schotter-, Kies- und Sandablagerungen); die vadosen Zone ist in der Regel auf Karstgebiete begrenzt. – Dieser topologischen Zonierung entsprechen Unterschiede im Wasserchemismus und Nahrungsangebot (siehe Kapitel III. 4. u. 5.); die Vernetzung und Ausdehnung der Zonen ist für die Ausbreitung aquatischer troglobionter Arten von Bedeutung (vgl. auch Kap. III. 2., IV. 2., 3. u. 4.).

Die Bewohner der Filterzone

Im Bereich der Hochflächen und Trockentäler des Untersuchungsgebietes ist die Filterzone meist viele Meter oberhalb des Grundwasserspiegels lokalisiert. Sie ist entweder von einem ausgeprägten A- und B-Horizont bedeckt, wie z. B. bei der Erlenhöhle, der Kluterthöhle (Ennepetal), der Höhle hinter der Villa Ribbert und dem Halver Hülloch, oder steht innerhalb anstehender (nicht von einer Bodenschicht bedeckter) Kalkblöcke über vertikale Klüfte im unmittelbaren Kontakt mit der Außenwelt (z. B. Friedrichshöhle, Krötenhöhle und Rekenhöhle im Hönnetal). Gesichert ist das Vorkommen von *Krumbachia subterranea*, *Antrobathynella stammeri*, *Proasellus cavaticus*, *Niphargus aquilex* und *N. kochianus* in der Filterzone; möglicherweise sind auch Populationen von *N. fontanus* und *N. schellenbergi* hier angesiedelt (Abb. 129). Methodisch bedingt wurden alle Funde innerhalb der vadosen Zone gemacht, auch die der zuvor genannten Arten. Auf ihr Vorkommen in der Filterzone schließe ich, weil sie in ausschließlich aus der Filterzone gespeisten Gewässern nachgewiesen werden konnten. *K. subterranea* wurde in der Erlenhöhle im aufgefangenen Tropfwasser gefunden (Kap. III. 5.); ich fand die Art nur in Höhlen unter Mischwald mit einem ausgeprägten A- und B-Horizont, möglicherweise kommt sie in der Filterzone des anstehenden Kalks nicht vor. *K. subterranea* scheint in besonderem Maße an ein Leben in der Filterzone angepaßt zu sein (vgl. Kap. IV. 3.). Ich fand die Art wie *A. stammeri* nur in der Filterzone; außerhalb Westfalens wurden beide Arten auch aus dem Grundwasser gemeldet (vgl. Kap. III. 1.). Vermutlich

ist die Filterzone im Untersuchungsgebiet primär vom Grundwassersystem aus besiedelt worden, vom ufernahen Interstitial oder vom phreatischen Lückensystem aus. Eine horizontale Ausbreitung im Bereich der Filterzone erscheint für die kleineren Formen, *K. subterranea*, *A. stammeri* und vielleicht auch für *Proasellus cavaticus* möglich. Die größeren Niphargiden, *N. aquilex*, *N. fontanus*, und *N. schellenbergi* haben vermutlich die Filterzone nur lokal (im Bereich größerer Klufterweiterungen) vom Grundwasser aus besiedelt. Dies trifft wohl auch für *N. kochianus* zu, der zwar relativ klein ist, aber unter den genannten Arten eine relativ starke Bindung an das Grundwasser erkennen läßt (VONK 1988; vgl. auch Kap. III. 5.). *N. puteanus* ist aufgrund seiner Körpergröße und möglicherweise auch aufgrund starker Bindungen an das Grundwassermilieu nicht in der Lage, die Filterzone zu besiedeln. Die im Bereich der Filterzone der Friedrichshöhle (Hönnetal) lebende *P. cavaticus*-Population unterscheidet sich morphometrisch von den im Grundwassersystem des Eckislochs und der Falkensteiner Höhle (Schwäbische Alb bei Urach) sowie in der Almequelle (Briloner Hochfläche) lebenden Populationen (vgl. Kap. III. 5.; PUST et al. in Vorbereitung). Die Tiere aus der Filterzone sind relativ schmaler. Möglicherweise hat bereits bei der Besiedlung dieses Habitats vom Grundwasser der Höhle aus eine Auswahl der Tiere hinsichtlich ihrer Körperform stattgefunden.

Aufgrund der Oberflächennähe sind in der Filterzone auch relativ viele troglaxene und troglophile Arten zu finden. *Planaria vitta* wurde im gesamten Untersuchungsgebiet in der Filterzone nachgewiesen. Die Art ist oberirdisch weit verbreitet und seit langem auch aus Höhlen bekannt (BÖHMIG 1909). Im Bereich der Flußtäler können in der Filterzone besondere, von den Verhältnissen der Hochflächen abweichende Bedingungen auftreten. Oberirdische Gammariden dringen vor allem im Bereich von Wasserschwinden und in der Kontaktzone mit dem ufernahen Interstitial in die Filterzone (und in tiefere Höhlenbereiche) vor und können dort zusammen mit troglobionten Niphargiden vorkommen. In der Grundsteinheimer Höhle fand ich *N. schellenbergi* zusammen mit *Gammarus pulex*; im Wasserloch im Kehlberg *N. schellenbergi* mit *G. fossarum* (im Grundwasser der Friedrichshöhle kommt neben *N. puteanus* ebenfalls *G. fossarum* vor). Ich gewann den Eindruck, daß die eindringenden Gammariden nicht als Konkurrenten oder Predatoren das Vorkommen der troglobionten Niphargiden beeinflussen. Epigäische und troglobionte Crustaceen können auch oberirdisch syntop vorkommen, z. B. *N. schellenbergi*, *P. cavaticus* und *G. fossarum* in der Almequelle bei Brilon. In der Nähe des Stollenmundlochs außerhalb des Paulsstollens der Hermannszeche bei Allendorf lebt *N. schellenbergi* ebenfalls mit *G. fossarum* zusammen. Andererseits berichtet BEYER (1932), daß *N. aquilex* in den Quellen der Baumberge ein Zusammenleben mit *G. pulex* meidet (vgl. auch FEEST et al. 1976).

Die Arten der vadosen Zone

Bisher ausschließlich in Gewässern der vadosen Zone wurden im Untersuchungsgebiet *Prostoma putealis* und *Guestphalinus wiardi* gefunden. *Rectocephala schneideri* ist aus der vadosen Zone der Erlenhöhle, des Kleinen Hüllochs bei Kierspe und der Schönebecker Höhle bekannt. In der Schönebecker Höhle wurde sie in Tümpeln gefunden, die bei Niedrigwasser vollständig austrocknen und möglicherweise mit einem phreatischen Gewässer auf Tonschiefer in Verbindung stehen. Das Vorkommen der Art unter grundwasserähnlichen Bedingungen ist nicht unwahrscheinlich. Außerhalb Westfalens ist das Vorkommen der Art im Grundwasser gesichert (vgl. Kap. III. 1.); auch *P. putealis* und *G. wiardi* sind in nichtwestfälischen Gebieten aus dem Grundwasser bekannt.

Die Habitatansprüche der in der vadosen Zone lebenden Arten sind sehr unterschiedlich. Die euryöken Niphargiden kommen bevorzugt in der Nähe der Höhleneingänge an Stellen

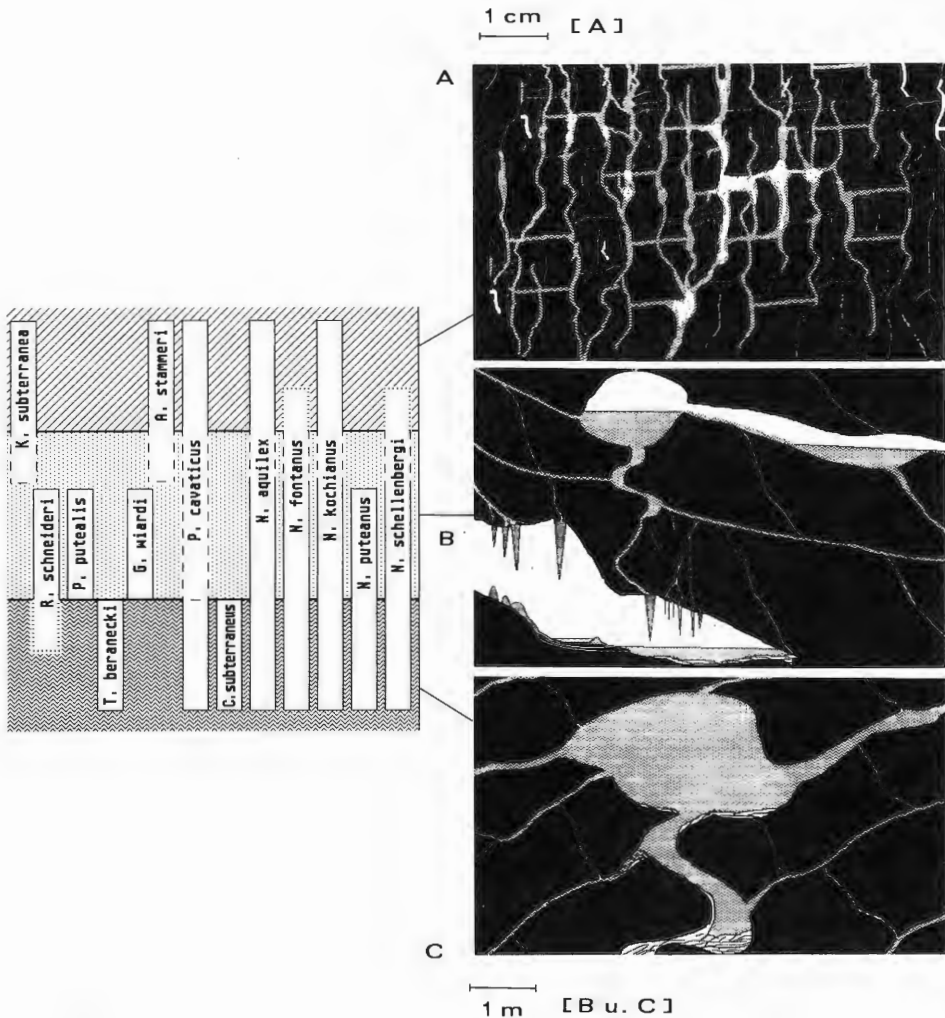


Abb. 129: Nachgewiesenes Vorkommen troglobionter aquatischer Höhlentiere in Westfalen innerhalb der 3 vertikalen Zonen des Höhlensystems (einschließlich des Grundwassers außerhalb der Karstregion). □ Bereich des nachgewiesenen Habitats, innerhalb dessen die Population etabliert ist. ▨ Nachweis von Individuen im Tropf- und Sickerwasser unterhalb der Filterzone. ▤ Vermutetes Vorkommen der Population.

A: Filterzone; B: vadose Zone; C: Grundwasserzone

mit reichlichem Nahrungsangebot vor (vgl. Kap. III. 5.) sowie in Mischungszone, an denen z.B. Oberflächenwasser in die vadose Zone eintritt. Extrem stenök ist hingegen *P. putealis*, die in der Kluterthöhle (Ennepetal) nur in Seen auftritt, die besonders stark gegenüber Außenwelteinflüssen isoliert sind (Kap. III. 5.). Die Fundstellen von *R. schneideri* sind weniger isoliert; auf Grund hohen organischen Anteils im Sediment können hier vorübergehend Sauerstoffzehrungen auftreten, die von *R. schneideri* toleriert werden (vgl. Kap. III. 4. und 5.).

Innerhalb der vadosen Zone wurde verschiedentlich das syntope Vorkommen mehrerer Arten beobachtet, z.B. leben im „Sumpfsee“ der Kluterthöhle (Ennepetal) *P. putealis*, *N. fontanus* und *N. kochianus* zusammen. Charakteristische Vergesellschaftun-

gen, wie sie HUSMANN z.B. bei den Bewohnern des Interstitials vermutet (HUSMANN 1962), habe ich aber nicht nachweisen können. Das Spektrum zusammenlebender Arten variiert sehr stark. Allerdings kann sich bei geringer Habitatheterogenität das Vorkommen bestimmter Arten ausschließen. *A. stammeri* und *N. schellenbergi* kommen im Halver Hüllloch in kleinen Wandsinterbecken vor, jedoch nie gemeinsam in denselben Becken; im großen sedimentreichen See bei Mp 11 leben sie hingegen zusammen (vgl. Abb. 23). *P. putealis* kann in kleinen sedimentarmen Gewässern nicht mit *N. fontanus*, wohl aber mit *N. kochianus* koexistieren. In Schalenversuchen wurde *P. putealis* in kürzester Zeit von *N. fontanus* gefressen, mit *N. kochianus* konnte sie unbegrenzt lange gehalten werden. In sedimentreichen Höhlengewässern kann die Nemertine auch mit *N. fontanus* koexistieren, da sie während der Ruhephasen im Sediment verborgen ist, sich aber auch während der Aktivitätsphasen jeder Zeit ins Sediment zurückziehen kann (vgl. Kap. III. 5.).

Die Arten des Grundwassers

Wie bereits betont wurde, scheinen alle aus Westfalen bekannten troglobionten aquatischen Arten unter günstigen Bedingungen auch das Grundwasser zu besiedeln. In Westfalen wurden bisher *P. cavaticus* und alle Niphargiden, der Amphipode *Crangonyx subterraneus* und der Archannelide *Troglochaetus beranecki* im Grundwasser nachgewiesen (Kap. III. 1.). Die auffällige Artenarmut des Grundwassers in den von mir untersuchten westfälischen Höhlen scheint die Folge einer anthropogenen Belastung des Grundwassers durch Schadstoffe zu sein (vgl. Kap. IV. 6.). Die einzige Art, die ständig im (mäßig-) belasteten Grundwasser noch zu leben vermag, ist *N. puteanus*.

2. Die Abhängigkeit der Höhlenfauna von den geologischen Formationen

Aus 34% der untersuchten Höhlen sind troglobionte Arten bekannt (vgl. Kap. III. 2.). Troglobionte Arten kommen innerhalb des Untersuchungsgebietes offensichtlich nicht gleichmäßig verteilt vor, obwohl sämtliche berücksichtigte Höhlen Gewässer innerhalb der vadosen Zone aufweisen (mit Ausnahme der Kleinen Burghöhle, Hönnetal). Da methodisch bedingt (vgl. Kap. II. 3.) nur die vadoso Zone untersucht werden konnte, war eine vollständige faunistische Erfassung nicht möglich. Dies ist besonders zu betonen, da Höhlentierpopulationen innerhalb eines Höhlensystems häufig ein lokal-begrenztes Vorkommen aufweisen, wie die Verhältnisse des Halver Hüllochs und der Friedrichshöhle deutlich zeigen (vgl. Kap. III. 5. und IV. 1.). Es fällt jedoch auf, daß je nach geologischer Formation und Flußtal sehr unterschiedliche Artenanzahlen vorliegen (vgl. Kap. III. 2.), die nicht mit der Untersuchungsmethode erklärt werden können. So weisen die meisten in den Honselers Schichten des Ennepetaler Raums gelegenen Höhlen troglobionte Arten auf, während in den Massenkalk-Höhlen im Lennetal des Iserlohner Raums und im Lenne-Bigge-Gebiet des Attendorner Raums nur selten troglobionte Arten gefunden wurden.

Eine mögliche Ursache der offensichtlich regional unterschiedlichen Besiedlung könnte die unterschiedliche vertikale Entfernung bestimmter Höhlen zu den Grundwasserströmen der Flüsse sein, die als postglaziale Wiederbesiedlungswege diskutiert werden (vgl. Kap. IV. 4.). So ist es denkbar, daß Höhlen im Massenkalk z.T. bereits zu Beginn der Warmzeit vom Grundwasser isoliert waren und daher ihre Wiederbesiedlung erschwert war. Auch postglazial könnten besonders im Massenkalk Grundwasserabsenkungen erfolgt sein. Dadurch wurden ehemals bestehende Habitatkontinua in einzelne Isolate aufgelöst, wodurch die Aussterbewahrscheinlichkeit, besonders für Arten mit enger Habitatbindung und kleiner Migrationsrate, erhöht wurde (vgl. Kap. III. 5. und IV. 1.).

Durch Talvertiefungen wurden nicht-hangparallele Klüfte angeschnitten; dies führte zur Schaffung weiterer Tagöffnungen und damit zu Veränderungen des Höhlenklimas (Abnahme der Isolation zur Außenatmosphäre mit Konsequenzen für den Wasserchemismus; vgl. Kap. III. 3.1. und 3.2.). Dies kann die Ausbildung einer Ausbreitungsbarriere zwischen Filter- und Grundwasserzone zur Folge haben.

Höhlen mit troglobionten Arten befinden sich in Westfalen bevorzugt am Rande des Massenkalks in Bereichen mit angrenzendem Schiefer und in Nicht-Massenkalk-Gebieten (Honselers Schichten, Hobräcker Schichten, Kalk der Hermannszeche, Hellefelder Kalk, Sparganophyllum-Kalk, Flinz und [kalkhaltiger] Nuttlarer Schiefer; vgl. Kap. III. 1. und 2.). Das Vorhandensein eines ausgedehnten kleinlumigen Lückensystems in diesen Formationen könnte das Vorkommen troglobionter Arten in mehrerer Hinsicht begünstigen. Von Bedeutung ist zweifellos, daß die *Habitat heterogenität* dort wesentlich größer ist als im Massenkalk mit stark erweiterten Klüften. In englumigen umweltkonstanteren Lückensystemen ist es auch stenöken Arten möglich, sich auszubreiten und große Populationen aufzubauen. Kleinlumige Lückensysteme, insbesondere aber zwischengelagerte Grundwasserstauer (z.B. Tonschieferschichten), wirken sich auf Schwankungen der Temperatur, des Wasserchemismus und der Wasserführung dämpfend aus (vgl. in Kap. III. 3.2. die relativ reduzierten Standardabweichungen der meisten physikochemischen Parameter der Filterzonengewässer in der Kluterthöhle [Ennepetal] gegenüber den Filterzonengewässern der im Massenkalk gelegenen Erlenhöhle, der Friedrichshöhle oder der Dechenhöhle). Der Gehalt an überschüssiger Kohlensäure ist in den Gewässern des kleinlumigen Lückensystems höher (neutraler pH-Wert; vgl. Kap. III. 3.2.) und weist geringere Schwankungen auf als in den großen gut durchlüfteten Höhlen des Massenkalks. Dieser Gegensatz hinsichtlich des pH-Wertes charakterisiert auch die Gewässer statisch und dynamisch bewetterter Höhlen (vgl. Kap. III. 3.2.). Ich möchte die Hypothese aufstellen, daß troglobionte aquatische Arten, die in stark Bikarbonat-haltigem Wasser leben, zwingend auf hohe CO₂-Gehalte angewiesen sind. Wenn das Kohlendioxid abdampft, steigt der pH-Wert an (der pH-Wert des Wassers aus der Kluterthöhle in Ennepetal von Mp 27 erhöht sich außerhalb der Höhle auf Werte von 8.7; vgl. Kap. III. 5.). Eine solche pH-Wert-Zunahme wird offenbar von troglobionten Arten (z.B. von *Prostoma putealis*) nicht toleriert. Dafür könnte eine reduzierte Fähigkeit, den pH-Wert zu regulieren, maßgeblich sein. Diese Zusammenhänge könnten eine wesentliche Ursache dafür sein, daß troglobionte Arten in solchen Höhlengewässern fehlen, die Kontakt mit einer CO₂-armen (im intensiven Austausch mit der Außenluft stehenden) Höhlenatmosphäre haben. Gerade dies ist in den Tier-armen dynamisch bewetterten Höhlen festzustellen (vgl. Kap. III. 3.1. u. 3.2.). – Meine Beobachtungen und Interpretationen stehen in Übereinstimmung mit den Befunden von NOLL & STAMMER (1953), daß bei erhöhtem pH-Wert von Interstitial- und Grundwässern die Anzahl troglobionter Arten reduziert ist. pH-Wert-Erhöhungen können bei Brunnengewässern anthropogen sein und auf Verunreinigungen deuten (NOLL & STAMMER 1953). Ich vermute, daß troglobionte Arten auf reduzierte pH-Werte nicht oder erheblich weniger empfindlich reagieren; besonders außerhalb von Kalkgebieten könnte der Einfluß von pH-Wert-Schwankungen auf das Vorkommen troglobionter Arten gering sein (vgl. auch NOLL & STAMMER 1953; HUSMANN 1956). Damit wären ihrem möglichen Vorkommen in subterranean Frischgewässern außerhalb von Kalkgebieten keine Grenzen gesetzt. Dies ist vor allem für die Ausbreitung troglobionter aquatischer Arten von erheblicher Bedeutung (vgl. Kap. IV. 4.). – Troglobionte aquatische Arten erfahren also gerade in dem unterirdischen Gewässersystem die Begrenzung ihrer Verbreitung, das in Kalkgebieten liegt. Die Gewässer in den großen Hohlräumen dynamisch bewetterter Höhlen, zu deren Bildung vor allem der Massenkalk neigt, werden von troglobionten aquatischen Arten gemieden.

3. Ökologische Valenz und Ausbreitungsfähigkeit

Das heutige Verbreitungsbild troglobionter Arten in Westfalen unterstützt die These, daß die ökologische Valenz die Ausbreitungsfähigkeit troglobionter Arten maßgeblich bestimmt. Euryöke Arten mit breitem Habitatspektrum, wie z.B. *N. schellenbergi* und *N. fontanus*, sind innerhalb des Untersuchungsgebietes weit verbreitet (vgl. Kap. III. 1. u. 5.). Es kann angenommen werden, daß für diese Arten eine größere Anzahl von Ausbreitungswegen und ein längerer Wiederbesiedlungszeitraum als für stenöke Arten existierten. Gewisse euryöke Arten, z. B. *N. aquilex*, *P. cavaticus* und *N. schellenbergi*, kommen lokal sogar oberirdisch vor (vgl. Kap. III. 5. u. IV. 1.). Diese Arten könnten unter geeigneten Bedingungen Wasserscheiden durch eine oberirdische Ausbreitung überwunden haben (vgl. Kap. IV. 4.). – Das weite Habitatspektrum von *N. schellenbergi* könnte Zweifel aufkommen lassen, ob die Art als „troglobiont“ bezeichnet werden darf. M. E. überwiegen jedoch deutlich die Anpassungsmerkmale an eine unterirdische Lebensweise. So ist *N. schellenbergi* in der Lage, auch oberflächenferne, nahrungs- und sauerstoffarme Bereiche der tieferen Grundwasserzone zu besiedeln. Hohe Ionenkonzentrationen werden ebenso wie ionenarmes Wasser toleriert. Daß es sich bei den oberirdischen Funden von *N. schellenbergi* nur um verdriftete Tiere handelt, ist andererseits aber auch nicht anzunehmen, da ich sie stets an nährstoffreichen Stellen mit reduzierter Wasserströmung in oft höherer Abundanz als in tagfernen und nährstoffarmen Höhlenteilen fand; die Tiere suchen zweifellos diese oberirdischen Zonen aktiv auf. Allerdings halte ich es für unwahrscheinlich, daß *N. schellenbergi* von Quellregionen entfernt heute dauerhaft oberirdische Populationen zu bilden vermag. Bei jeder oberirdischen Fundstelle sind Verbindungen zum Grundwassersystem vorhanden. *N. schellenbergi* gehört also zweifellos zu den echten Höhlentieren, die nicht – wie viele troglophile Arten – erst am Anfang der Entwicklung zum Höhlentier stehen. Allerdings ist die Art trotz ihres Status als echtes Höhlentier zu einem oberirdischen Aufenthalt befähigt.

Engere Bindungen an von der Außenatmosphäre wenig beeinflusste Milieubedingungen (z. B. an erhöhte CO₂- und Ionenkonzentrationen im Wasser) weisen *N. puteanus* und *N. kochianus* auf. Im Untersuchungsgebiet wurden beide Arten bisher nur unterirdisch gefunden (vgl. Kap. III. 5.). *N. puteanus* ist offensichtlich auf CO₂-reiches Grundwasser im großlumigen Lückensystem angewiesen, wie es in Westfalen besonders häufig im Massenkalk auftritt, während *N. kochianus* auch die Filterzone zu besiedeln vermag (vgl. Kap. III. 5.). Möglicherweise war beiden Arten das Überschreiten von Wasserscheiden in Westfalen weder auf oberirdischem Weg noch über das englumige Lückensystem der oberflächennahen Zonen möglich. Sie kommen vermutlich deshalb nur im westlichen Sauerland vor (vgl. Kap. III. 1. und IV. 4.).

Die sehr stenöke *P. putealis* ist nur lokal verbreitet; sie wurde nur in großlumigen Stillwasseransammlungen mit reduzierten Schwankungen der Umweltparameter gefunden (vgl. Kap. III. 4. und 5.). Das Vorkommen von *P. putealis* in den Honseler Schichten (Kluterthöhle in Ennepetal, vgl. Kap. III. 2.) ist sicherlich nicht zufällig. Nacheiszeitliche Veränderungen der Höhle durch fortschreitende Verkarstung erfolgten innerhalb dieser Formation, verglichen mit dem Massenkalk, nur im geringen Maße, da zahlreiche nahezu horizontal verlaufende Tonschieferschichten als Grundwasserstauer fungieren (vgl. Kap. IV. 2.). Tatsächlich liegen die Fundstellen im westlichen Teil der Kluterthöhle noch heute nahezu auf Grundwasserniveau (vgl. Kap. IV. 4.). Das Fehlen der Art innerhalb der Filterzone und in Grundwasser-fernen Habitaten der vadosen Zone weisen auf eine extreme Stenökie hin; sie bedingt Ortstreue und eine nur äußerst schwach ausgeprägte Ausbreitungsfähigkeit. Die Art ist stenotherm (GRIEPENBURG 1935) und sehr lichtempfindlich; sie toleriert offensichtlich nur geringfügige pH-Wert-Erhöhungen (vgl.

Kap. III. 5. und IV. 2.). Während der postglazialen Wiederbesiedlungszeit konnten die Tiere von den Hauptgrundwasserströmen aus (Kap. IV. 4.) nur wenig weit in das Höhlengebiet Westfalens vordringen (vgl. Abb. 7 in Kap. III. 2. und Kap. IV. 4.); möglicherweise ist das lokale Vorkommen aber auch die Folge subrezenter Auslöschungen isolierter Populationen (sekundär bedingtes lokales Vorkommen), die auch bei der Beurteilung des Verbreitungsbildes der weiteren Arten mit lokalem Vorkommen (z. B. *K. subterranea*, *R. schneideri*, *T. beranecki*, *G. wiardi*, *A. stammeri*, *P. cavaticus* und *N. aquilex*) erwogen werden müssen. Besondere Beachtung verdienen hierbei die in Kap. IV. 6. zu diskutierenden anthropogenen Einflüsse und Schadstoffbelastungen der Höhlenhabitate.

Bei der Syncaride *A. stammeri* bestehen möglicherweise engere Habitatbindungen als bei den meisten einheimischen troglobionten Amphipoden. Morphologische Anpassungen wie Reduktion der Körpergröße und der hinteren Extremitäten, ein gedrungener wurmförmiger Habitus, weisen die Art als Bewohner englummer Lückensysteme aus. Die Art ist kaltstenotherm, sie bevorzugt Temperaturen von 8-10°C; oberhalb von 13°C ist ein dauerhafter Aufenthalt nicht möglich (die Eientwicklung unterbleibt und die Eier werden resorbiert; vgl. JAKOBI 1955). Weder JAKOBIS (1955) noch meine Untersuchungen im Halver Hüllloch lieferten Hinweise auf eine Fortpflanzungsperiodik. Die Tiere legen einzelne relativ große Eier ab (JAKOBI 1955); dies kann als Anpassung an nährstoffarme Habitate verstanden werden; die Tiere sind offensichtlich in der Lage, oberflächennahe wie auch oberflächenferne Gewässer zu besiedeln (möglicherweise nur bei guter Sauerstoffversorgung; siehe HUSMANN 1964; vgl. Kap. III. 5.). Das Vorkommen in großlumigen Lückensystemen (z. B. in der vadosen Zone) setzt bei gemeinsamem Vorkommen mit räuberischen Niphargiden englumige Fluchträume voraus (HUSMANN 1964; siehe CHAPPUIS 1927; vgl. Kap. III. 5.).

Aufgrund eines geringeren Hungervermögens, einer offensichtlichen Fortpflanzungsperiodik und einer erhöhten Eizahl (HENRY 1976) ist *P. cavaticus* stärker als *A. stammeri* an das ufernahe Interstitial bzw. an oberflächennahe Grundwasserhabitate gebunden. Die Art wurde sogar oberirdisch gefunden (in der Almqelle; vgl. Kap. III. 5.). *A. stammeri* und *P. cavaticus* sind in Westfalen nur lokal vertreten; in Höhlen wurden bisher nur isolierte Populationen in der Filterzone des Deckgesteins nachgewiesen. Es ist daher sehr wahrscheinlich, daß das rezente Vorkommen beider Arten sekundär durch postglaziale Habitatveränderungen geprägt ist (durch Aussterben von Grundwasserpopulationen; vgl. Kap. IV. 6.).

Auch *K. subterranea* und *R. schneideri* (Turbellaria) kommen in Westfalen offensichtlich nur in isolierten Populationen vor (vgl. Kap. III. 5.). Während *K. subterranea* das englumige Lückensystem in oberflächennahen Zonen des Deckgesteins bevorzugt, sind für *R. schneideri* für die Besiedlung englummer Lückensysteme aufgrund ihrer erheblichen Körpergröße engere Grenzen gegeben. Auch Unterschiede in der Abundanzdynamik und der Morphologie (vgl. Kap. III. 5.) lassen bei den beiden Arten auf Anpassungen an unterschiedliche Lebensräume schließen. Für *K. subterranea* wurden in der Erlenhöhle stark schwankende Abundanzen festgestellt (dieselbe Beobachtung machte GRIEPENBURG 1941b, in der Kluterthöhle in Ennepetal); es konnten Hinweise auf eine Fortpflanzungsperiodik gewonnen werden. Als Anpassungen an ein Leben in der Filterzone können die Einschränkung der Verdriftungsrate bei stärkerer Wasserschüttung (nach Regenfällen und Schmelzwassereintritt; vgl. Kap. III. 5.) und das Vorhandensein von Schirmpigmenten in Gehirnnähe angesehen werden, das möglicherweise die Wahrnehmung der Richtung des einfallenden Lichts ermöglicht (vgl. Kap. III. 6.). Bei *R. schneideri* wurde hingegen keine Pigmentbildung festgestellt. Die *R. schneideri*-Population aus der Erlenhöhle weist geringere Abundanzschwankungen auf. Auch Hinweise

auf eine Fortpflanzungsperiodik konnten nicht gewonnen werden. Während etwa die Hälfte der anatomisch untersuchten Individuen von *K. subterranea* reife Gonaden aufwiesen, lag der Prozentsatz geschlechtsreifer Tiere bei *R. schneideri* bei nur ca. 20% (vgl. Kap. III. 6.). Beide Arten besitzen offensichtlich unterschiedliche Anpassungsstrategien an den unterirdischen Lebensraum: *K. subterranea* erfüllt Charakteristika eines „r-Strategen“, *R. schneideri* eines „K-Strategen“. *K. subterranea* ist möglicherweise auf Zeitgeber (z. B. jahresperiodische Schwankungen des Wasserchemismus) und auf ein erhöhtes Nahrungsangebot angewiesen und kommt vermutlich auch aus diesen Gründen bevorzugt in der oberflächennahen Filterzone vor; möglicherweise liegen auch Anpassungen an niedrige Temperaturen vor (vgl. Kap. III. 3.1. u. 3.2.). Wie in diesem Zusammenhang das Vorkommen der Art im Grundwasser bei Aschaffenburg zu bewerten ist, ist noch unklar (Kap. III. 1.). *R. schneideri* besitzt offensichtlich weitergehende Anpassungen an tiefergelegene Höhlenhabitats, wie sie in besonderem Maße auch bei *P. putealis* auftreten. Ortstreue, eine Vorliebe für Stillwasserzonen, ausgeprägte Ruhephasen, eine geringe Reproduktionsrate und eine geringe Populationsgröße sind als Gemeinsamkeiten beider Arten hervorzuheben. *R. schneideri* verbirgt sich allerdings im Gegensatz zu *P. putealis* während der Ruhephasen nicht im Sediment; eine möglicherweise größere Unempfindlichkeit gegenüber Angriffen räuberischer Niphargiden und die Deckung des Sauerstoffbedarfs könnten die Ursache hierfür sein. Es ist sehr wahrscheinlich, daß *R. schneideri* auch das oberflächenferne Grundwasser zu besiedeln vermag (vgl. auch KOMAREK 1930; SCHNEIDER 1938, zu dem Vorkommen im Harz; vgl. GRIEPENBURG 1939a, zu dem Vorkommen im Grundwasser bei Idstein im Taunus). Die bisherigen Fundumstände deuten aber darauf hin, daß *R. schneideri* bevorzugt in nährstoffreicheren Habitats auftritt. Leichte Sauerstoffzehrungen werden toleriert. Es ist aber fraglich, ob die Art sich im Tiefengrundwasser ausbreiten und auf Dauer in Bereichen mit reduzierter Sauerstoff- und Nährstoffzufuhr leben kann.

4. Die postglaziale Ausbreitung

Es wird heute meist angenommen, daß während der diluvialen Kaltzeiten die mitteleuropäische Höhlenfauna im Bereich des Permafrostbodens vernichtet wurde (HOLDHAUS 1954; DE LATTIN 1967; vgl. Einleitung). Zur Ausbildung von Permafrostböden in Mitteleuropa vgl. WEST (1968) und FLINT (1971). Refugialgebiete für troglobionte Arten existierten während der letzten Eiszeit in Südfrankreich, dessen Höhlenfauna im Vergleich zu der Mitteleuropas sehr artenreich ist (VANDEL 1965). Von dort könnten troglobionte Arten Mitteleuropa postglazial über das Interstitial der großen Ströme wiederbesiedelt haben. Diese Vorstellung impliziert, daß die Tiere bei ihrer Nordausbreitung die relativ flachen Wasserscheiden zwischen dem Rhone-Saone-Doubs-System und den nach Norden fließenden Flußsystemen (Maas, Rhein) überwinden konnten. Euryöke Arten, wie z. B. *Proasellus cavaticus*, *Niphargus aquilex* und *N. schellenbergi* könnten diese Wasserscheiden durchaus auch im oberflächennahen Filtersystem überwunden haben. Für stenöke Arten, wie *Prostoma putealis*, die im oberflächennahen Filtersystem nicht zu leben vermögen, muß eine Überwindung der Wasserscheiden in tieferen Lücken- und Spaltensystemen angenommen werden (z. B. im verkarstungsfähigen Gestein).

Für *Krumbachia subterranea*, *Rectocephala schneideri* und *Troglochaeta beranecki* könnte man auch osteuropäische Refugien annehmen (vgl. Kap. III. 1.). Auch in diesem Fall ist die Überwindung von Wasserscheiden bei der Besiedlung Mitteleuropas vorauszusetzen. Dabei kommt für *K. subterranea* ebenfalls eine Ausbreitung über das oberflächennahe Filtersystem in Frage. -Die Verbreitung von *N. puteanus* ist noch zu unbekannt, als daß für diese Art eine Eiszeitüberdauerung innerhalb des heutigen bekannten Verbreitungsgebietes zwingend zu fordern ist. M. E. ist in keinem Fall die sehr

unwahrscheinliche Hypothese aufrecht zu erhalten, daß troglobionte aquatische Höhlentiere während der Eiszeit im mitteleuropäischen Tundragebiet nördlich der Alpen überlebten (vgl. BOETTGER 1939, 1957; HENRY 1976).

Die in Westfalen bis heute nachgewiesenen aquatischen Höhlentiere kommen südlich von Westfalen im Bereich des Grundwassersystems des Rheins bzw. seiner Nebenflüsse vor, z.T. allerdings nur lokal (vgl. Kap. III. 1.). Eine Besiedlung Westfalens vom Rhein aus ist deshalb sehr wahrscheinlich. Das Untersuchungsgebiet könnte über das Interstitial der Ruhr, Wupper bzw. das Sieg-Agger-Grundwassersystem erreicht worden sein.

Damit findet der relative Artenreichtum der westlichen Zone A eine einleuchtende Erklärung (Kap. III. 2.). Zwar bevorzugen die Troglobionten innerhalb der Zone A Höhlen in den Honseler Schichten, die in der östlichen Zone B nicht vorkommen bzw. nicht untersucht wurden, doch sind hier in anderen geologischen Formationen Höhlen mit ähnlichen Bedingungen ausgebildet (Kalk, der mit wasserstauenden Schichten durchsetzt ist, z.B. durch Schiefer; vgl. Kap. III. 2.). Es sind daher keine ökologischen Gründe erkennbar, die eine Besiedlung der Zone B durch die Arten ausschließen, die nur in der Zone A vorkommen. Die relative Artenarmut der Zone B scheint allein durch ihre größere Entfernung vom Rhein bedingt zu sein.

Die postglaziale Ausbreitung kann sowohl passiv als auch aktiv erfolgt sein. Die passive Ausbreitung flußabwärts durch Verdriftung von Individuen erfolgt sehr rasch. Die aktive Ausbreitung flußaufwärts ist hingegen sehr viel langsamer, da sie die Ausdehnung bzw. Verschiebung des Populationsareals voraussetzt. Die unterschiedliche Artenzahl zwischen Zone A und B ist also wahrscheinlich dadurch bedingt, daß Westfalen nur aktiv besiedelt werden konnte.

Die meisten Höhlentiere, die unser Gebiet besiedeln, wurden vermutlich passiv nach Norden mit dem Rhein verdriftet. Für *N. kochianus* kann ein anderer Ausbreitungsweg angenommen werden. Die Art ist mit mehreren Formen im Bereich des Maas-Systems verbreitet (vgl. Kap. III. 1.), in unserem Gebiet kommt die Art südlich nur bis zur Sieg vor (vgl. SCHELLENBERG 1942; NOLL & STAMMER 1953; ILLIES 1978). In diesem Fall ist eine aktive Ausbreitung Rhein-aufwärts bis in unser Gebiet vorstellbar.

Überlegungen zur Wiederbesiedlung Mitteleuropas durch aquatische troglobionte Arten müssen der Tatsache Rechnung tragen, daß der Harz relativ artenreich ist. HUSMANN (1956) nimmt an, daß das Wesergebiet vom Main aus über die Schotter der Urlahn besiedelt wurde (vgl. auch HUSMANN 1964). Zumindest im Falle von *P. cavaticus*, *N. aquilex*, *N. fontanus* und *N. schellenbergi*, die in Westfalen auch die Zone B besiedeln (Kap. III. 2.), ist auch ein Vordringen über die Ruhrwasserscheide oder über das Grundwasser des Paderborner Karstgebietes in das Diemel-Weser-System hinein denkbar. Für die Einwanderung einer troglobionten Art von der Weser her gibt es keine Hinweise, und sie erscheint angesichts der Tatsache, daß der Rhein den wesentlichen postglazialen Ausbreitungsweg darstellte, als unwahrscheinlich.

5. Zur Frage genetischer Differenzierungen westfälischer Höhlentierpopulationen

Morphologische und physiologische Anpassungen von Höhlentierpopulationen an die besonderen Umweltbedingungen in Höhlen (vgl. Einleitung) sind in der Regel genetisch fixiert; sie sind das Ergebnis schrittweiser, über längere Zeiträume auftretender Evolutionsprozesse.

Allerdings kann das klassische Merkmal der Pigmentreduktion in Dauer-Dunkel-Habitaten modifikatorisch (innerhalb einer Generation) auch bei Troglaxenen auftreten. Für

Gammarus pulex ssp. *subterraneus* SCHNEIDER aus dem Erzbergwerk Grund im Harz ist bekannt, daß nicht das Ausbleichen der Lichteinwirkung auf die Tiere zum Ausbleichen führt, sondern daß hierfür das Fehlen einer carotinoidreichen Nahrung in tagfernen Zonen verantwortlich ist; der Einfluß des Lichtes auf die Pigmentierung dieser Tiere ist offensichtlich gering (ANDERS 1956).

Aber auch genetische Differenzierungen können relativ schnell eintreten. Die Subterratform *Gammarus pulex* ssp. *subterraneus* aus dem Erzbergwerk Grund liefert hierzu ein weiteres Beispiel. Für die Unterart ist bekannt, daß sie polyallele Farbtypen ausbildet (ANDERS 1956). Der Ernst-August-Stollen wurde erst in der Mitte des vorigen Jahrhunderts von einer oberirdisch lebenden *G. pulex*-Population besiedelt. In der Stollen-Population tritt heute das vom Wildtypallel r^+ (olivbraun) abweichende dominante R^2 -Allel (rotbraun) auf. Die Populationen auf der 11. und 13. Sohle des Bergwerks leben dort bereits seit mehreren Jahrhunderten und besitzen aus der r -Allelreihe neben r^+ und R^2 noch ein drittes, rezessives Farallel r^- , das eine ziegelrote Färbung der Tiere bewirkt. Tritt r^- homozygot bei ♀♀ auf, so bedingt es, wie auch das R^2 -Allel, eine weitgehend männliche Nachkommenschaft (ANDERS 1953, 1956 u. 1957).

Der terrestrische Käfer *Choleva septentrionis* JEANNEL hat nacheiszeitlich die Segeberger Höhlen (Holstein) besiedelt; die Population hat seit der Besiedlung Merkmale einer Anpassung an das Höhlenleben erworben (BENICK 1937, 1950; HEUN 1955). Die Höhlenpopulation wird als Subspecies *Ch. s. holsatica* aufgefaßt.

Grundsätzlich kann man auch bei westfälischen Höhlentierpopulationen genetische Differenzierungen nicht ausschließen, die bei der postglazialen Besiedlung Westfalens bzw. bei der Besiedlung einzelner Höhlensysteme oder nach erfolgter Besiedlung stattfanden. Genetische Differenzierungen können die Folge von Zufallsauslese (genetische Drift) bei der Gründung neuer Populationen durch wenige Individuen bzw. in Phasen sehr geringer Populationsdichte und/oder die Folge gerichteter Selektion sein.

Bisher wurden westfälische Höhlentiere noch nicht intensiv auf populationsspezifische Differenzierungen untersucht; lediglich bei *Proasellus cavaticus* wurden Hinweise auf morphometrische Unterschiede gefunden (vgl. Kap. III. 5.). Die in der Filterzone der Friedrichshöhle (Hönnetal) lebenden Tiere sind im Mittel relativ schmäler als die Tiere aus dem Grundwasser der Falkensteiner Höhle und dem Eckisloch (Schwäbische Alb) und die in der Almequelle (Briloner Hochfläche) lebenden Tiere. Ob die Unterschiede allerdings genetisch oder modifikatorisch bedingt sind, ist noch unbekannt. Um dies zu klären, müßten Aufzuchten unter identischen Bedingungen durchgeführt werden. Auf fundortabhängige Größenunterschiede bei *P. cavaticus* weisen auch HENRY & MAGNIEZ (1983) hin.

Ob die geringfügigen anatomischen Abweichungen zwischen den von KOMAREK (1930) aus dem Harz beschriebenen Tieren der Art *Rectocephala schneideri* und den von mir untersuchten westfälischen Tieren konstant sind, ist ungeklärt (vgl. Kap. III. 6.).

6. Die Auswirkungen anthropogener Veränderungen auf die rezente Besiedlung

Der seit Beginn dieses Jahrhunderts festzustellende Rückgang troglobionter Arten in Westfalen ist auffallend. In der Rissehöhle ist *N. aquilex* (GRIEPENBURG 1939b) nicht mehr feststellbar. *N. fontanus* fehlt heute offensichtlich im Halver Hülloch (GRIEPENBURG 1939a). In der Kluterthöhle in Ennepetal sind *Krumbachia subterranea* (GRIEPENBURG 1935) und *P. cavaticus* (THIENEMANN 1916) ausgestorben; fortschreitende Abundanzabnahmen sind in dieser Höhle bei *P. putealis* und *N. kochianus* festzustellen. Besonders in Schauhöhlen ist der Rückgang troglobionter Arten gravierend: In der Atta- und Dechenhöhle sind die Niphargidenpopulationen ausgelöscht

(THIENEMANN 1916), in der *Reckenhöhle* sind Syncariden nicht mehr nachweisbar (LENGERSDORF 1929); die 3 letztgenannten Höhlen sind heute frei von troglobionten Arten.

Für diese Verluste der Höhlenfauna sind offenbar jüngere anthropogene Belastungen verantwortlich zu machen. Auf ältere Belastungen führe ich z. B. das Fehlen von Syncariden, von *P. cavaticus* und *N. kochianus* im Grundwasser der Hönnetalhöhlen zurück (das Vorkommen dieser Arten in der Filterzone läßt eine Besiedlung vom Grundwasser der Hönne aus als wahrscheinlich erscheinen).

Die anthropogenen Veränderungen, die den Lebensraum troglobionter Arten beeinflussen können, sind sehr vielfältig. Ich möchte auf folgende Belastungen besonders hinweisen: (1) Freisetzen von Sediment; (2) Veränderungen durch Gesteinsabbau; (3) chemische Belastungen der Höhlengewässer; (4) Veränderungen der Wasserführung; (5) Betrieb von Schauhöhlen und Höhlentourismus.

(1) Das Freisetzen von Sediment ist vor allem eine Folge landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Eingriffe (Kahlschläge). In Folge erhöhter Bodenerosion und durch das Absterben der oft tief in die Gesteinsspalten hinabreichenden Wurzeln der Laubbäume kommt es zur Verstopfung des kleinlumigen Lückensystems in der oberflächennahen Filterzone und in bestimmten Fällen auch in der vadosen Zone und in der Grundwasserzone. Als Beispiele für Sedimentablagerungen als Folge von Kahlschlägen seien einige Höhlen des Felsenmeers, die *Kluterthöhle* in Hagen und der südliche Teil der Rösenbecker Höhle genannt. Der nördliche Teil der Rösenbecker Höhle und die benachbarte Hallersteiner Höhle liegen unterhalb eines alten Laubwaldes und sind sedimentarm.

Die Verstopfung des oberflächennahen kleinlumigen Lückensystems bedeutet für kleinere Arten (z.B. für *K. subterranea* und *A. stammeri*) sowie vermutlich auch für die Entwicklungsstadien einiger größerer Arten den Verlust des Lebensraums bzw. eines Schutzraums, in den die Tiere sich z.B. vor Predatoren zurückziehen können. Darüber hinaus kann es zu vielseitigen Veränderungen in anderen Bereichen kommen: der für das Leben im Subterranebereich essentielle Stofftransport wird meist eingeschränkt, die Wasserspeicherkapazität des Lückensystems im Gestein nimmt ab, stärkere Schwankungen der nur noch auf wenige größere Klüfte beschränkten Wasserschüttung und deshalb auch größere Schwankungen der physikalischen und chemischen Parameter des Wassers sind die Folge; lockere Sedimentschichten, die sich auf Gestein niederschlagen, bieten z.B. *P. cavaticus* keinen ausreichenden Halt; eine größere Verdriftungsrate ist die Folge (vgl. Kap. III. 5.).

(2) Durch Gesteinsabbau (besonders durch Tagebau) werden neue Tagverbindungen geschaffen, die zu einer Verstärkung der Bewetterung führen. Eine drastische CO₂-Abnahme ist die Regel und auch stärkere klimatische Schwankungen können die Folge sein (vgl. auch Kap. III. 3.2.). Gesteinsabbau kann zur Absenkung des Karstwasserspiegels führen, nicht nur lokal im Abbaubereich, sondern auch in einem größeren Umfeld (vgl. Punkt 4). Durch Sprengarbeiten werden Mineralienester dem Tropf- und Sickerwasser zugänglich; dies kann zu Schwermetallbelastungen führen (vgl. die Kupferbergseenspalte in Kap. III. 4.). Gesteinsabbau im Tagebau geht mit einer Beseitigung der Vegetationsbedeckung einher und erhöht damit die Bodenerosion (vgl. Punkt 1). In Höhlen in noch in Betrieb befindlichen Steinbrucharanlagen und in solchen, die erst vor wenigen Jahren stillgelegt wurden oder noch eine deutliche Schädigung der Vegetationsbedeckung aufweisen, fand ich keine troglobionten Arten (z.B. Malachitdom, Kleine Sunderner Höhle, die Höhlen in der hohen Lei bei Heggen, die Ruthmecker Höhlen im Hönnetal; vgl. Tab. 1). Lediglich in Stollenanlagen bzw. in Höhlen am Rande von seit längerem

stillgelegten Steinbrüchen, die eine ältere Laubwaldbedeckung aufweisen, wurden euryöke Niphargiden gefunden (z.B. in Stollen im Hagener, Iserlohner und Hemeraner Raum, in der Volmehanghöhle und der Großen Sunderner Höhle; vgl. Kap. III. 5.).

(3) Chemische Belastungen sind in der Regel die Folge der Einleitung von Oberflächenwasser aus landwirtschaftlich genutzten Gebieten sowie ungeklärter Abwässer aus Industrie- und Siedlungsgebieten. Sowohl die Belastung durch Ammoniak, Nitrit und Nitrat als auch durch Salze (Kap. III. 4. u. 5.) spielen eine Rolle; auch an Pestizide der Landwirtschaft und Gifte aus Industrieabwässern, die in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt wurden, ist zu denken. Chemische Belastungen wirken sich nicht nur lokal, sondern im Falle einer Grundwasserbelastung meist großräumig aus. Auch höhlenferne Einleitungen können das Vorkommen troglobionter Tiere erheblich in Mitleidenschaft ziehen (vgl. Friedrichshöhle im Hönnetal und Kluterthöhle in Ennepetal; Kap. III. 4. und 5.). Eine erhöhte organische Fracht kann lokal Sauerstoffzehrungen in Höhlengewässern zur Folge haben, besonders bei stagnierenden Gewässern der vadosen Zone und im Grundwasser (vgl. z.B. Friedrichshöhle, Halver Hülloch, Kluterthöhle in Ennepetal; Kap. III. 3.2., 4. und 5.).

(4) Veränderungen des Grundwasserspiegels durch Bergbau wurden bereits genannt. In der Knitterhöhle (untere Dechenhöhle) war das Grundwasser in den 70er Jahren vermutlich auf Grund von Straßenbaumaßnahmen vorübergehend so stark abgesunken, daß der Höhlenbach und phreatische Zonen der Höhle über längere Zeit trockenfielen. Andererseits können Überflutungen vadoser Höhlenteile die Folge von Wasserstaumaßnahmen sein (z.B. durch Wehre). Als Folge können ein erhöhter Sedimenteinstrom (Punkt 1) und chemische Belastungen (Punkt 3) auftreten. Troglaxene Arten, die mit troglobionten konkurrieren bzw. Predatoren sind, können vermehrt in die Gewässer der Höhle gelangen.

(5) In Westfalen wurden bereits im letzten Jahrhundert, ausgehend von der Entdeckung der Dechenhöhle 1868, planmäßig Tropfsteinhöhlen als Schauhöhlen erschlossen (HAMMERSCHMIDT 1987). Im Hemeraner Raum sind Anfänge eines Höhlentourismus für das vorletzte Jahrhundert belegt (VON STEINEN 1749). Ein Rückgang des Vorkommens troglobionter Arten ist besonders in Schauhöhlen festzustellen. Gravierend sind insbesondere Veränderungen der Bewetterung durch Schaffung neuer Eingänge und Gangerweiterungen, Veränderungen im Gewässersystem sowie der Eintrag von Bausubstanzen zur Wegebefestigung und zur Durchführung von Sicherungsmaßnahmen (vgl. Kap. III. 4. und 5.). Beleuchtungseinrichtungen schränken den Lebensraum empfindlicher troglobionter Arten ebenso ein wie die irreversible Schädigung des Sediments und lokale Änderungen des Wasserchemismus durch häufiges Betreten bewohnter Gewässer (vgl. auch Kap. III. 5.).

In jüngerer Zeit wurden neben den Schauhöhlen nahezu alle in der Untersuchung berücksichtigten Höhlen von einem „neuen“ Höhlentourismus erfaßt; ein größeres Freizeitangebot und ein wachsender Einsatz technischer Hilfsmittel führten zur Erschließung zahlreicher bislang nicht begangener Höhlen und Höhlenteile. Auch die meisten von troglobionten Arten besiedelten Kleinhöhlen sind hiervon betroffen.

Verstärkte Aktivitäten organisierter Gruppen, diesem Höhlentourismus entgegenzuwirken, führten ebenfalls zu anthropogenen Veränderungen. Schon der Verschluß von Höhleneingängen kann für das Vorkommen von Höhlentieren negative Folgen haben, wenn dadurch die Bewetterung geändert wird (z.B. erhöhter korrosiver Aufschluß von Schadstoffen; vgl. Kluterthöhle in Hagen, Kap. III. 4.), wenn der natürliche Stofftransport, z.B. der Eintrag von organischen Substanzen, unterbrochen wird, oder

wenn Gewässerbelastungen z.B. durch Schadstoff-abgebende Bausubstanzen auftreten. Die Nutzung als exklusive „Abenteuerhöhlen“ (z.B. die Rentropshöhle und Kluterthöhle in Ennepetal; vgl. GALLINIS 1989) führt zu einer erheblichen Gefährdung der Höhlentiere, wie sie bisher nur aus Schauhöhlen bekannt ist (z.B. durch Abenteuerführungen und Rettungsübungen). Insbesondere durch den Einsatz technischen Geräts zur Erweiterung enger Gangstrecken (mechanischer Aufschluß) erhöht sich die Gefahr eines Eintrags wassergefährdender Stoffe ins Innere der Höhlen. Das Verschwinden selbst euryöker Arten kann die Folge sein. *N. fontanus* wird seit 1987 nicht mehr in der Grundwasser-führenden Kluft des besonders häufig von „Höhlenforschern“ genutzten Stollens bei Platthaus gefunden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß durch Eingriffe des Menschen in die Landschaft (z.B. durch forst-, land-, und wasserwirtschaftliche Landschaftsnutzung und durch Ausdehnung von Industrie- und Siedlungsgebieten) großflächige Veränderungen des subterranean Lebensraums entstehen, während Schauhöhlenbetrieb und Höhlentourismus meist nur zu lokalen Veränderungen in den betroffenen Höhlen führen.

Die anthropogenen Belastungen haben in diesem Jahrhundert so stark zugenommen, daß stenöke und selbst einige euryöke troglobionte Arten nur noch an wenigen Stellen als isolierte Populationen existieren. Ihr Überleben ist deshalb schon durch lokale Störungen bedroht, wie sie z.B. vom Höhlentourismus ausgehen können. Weitreichende Schutzmaßnahmen, die den Erhalt des oberflächennahen Lückensystems, der natürlichen Vegetationsbedeckung, des Gewässer- und Bewitterungssystems der Höhlen mit einschließen, sind erforderlich, um die Reste der westfälischen troglobionten Fauna wirkungsvoll zu schützen.

V. Zusammenfassung

Das Vorkommen aquatischer troglobionter Arten in Westfalen ist seit Beginn dieses Jahrhunderts bekannt; die Erstfunde der Arten *Krumbachia subterranea*, *Prostoma putealis* und *Guestphalinus wiardi* stammen aus Westfalen. Trotz zahlreicher faunistischer Untersuchungen gab es bislang nur wenig Kenntnis über die regionale Verbreitung, die Habitatbindungen und die Wege der postglazialen Wiederbesiedlung. Ungeklärt war auch der Gefährdungsgrad der westfälischen troglobionten Fauna.

Es wurden 110 Höhlen untersucht; in der Literatur wurden bisher aus 14 dieser Höhlen troglobionte Arten (27 Populationen) gemeldet. 11 Populationen aus 6 Höhlen sind heute noch existent; 9 Populationen aus 7 Höhlen sind heute nicht mehr nachweisbar; das Schicksal von 7 weiteren Populationen ist noch unbekannt. Aus 27 Höhlen wurden 31 Populationen neu nachgewiesen.

Von den 13 in Westfalen nachgewiesenen troglobionten Arten wurden 11 Arten aus Höhlen gemeldet (ein rezentes Höhlenvorkommen wurde für 10 Arten bestätigt; *G. wiardi* wurde noch nicht wiedergefunden). *P. putealis* (Kluterthöhle, Ennepetal) und *Antrobathynella stammeri* (Halver Hüllloch) wurden von mir in jeweils einer Höhle nachgewiesen; auch von *K. subterranea* (3 Höhlen), *Rectocephala schneideri* (2 Höhlen), *Proasellus cavaticus* (2 Höhlen), *Niphargus aquilex* (2 Höhlen) und *N. puteanus* (3 Höhlen) sind nur wenige isolierte Populationen bekannt. Ein größeres Vorkommen besitzen *N. fontanus* (11 Höhlen), *N. schellenbergi* (7 Höhlen) und *N. kochianus* (5 Höhlen) (Kap. III. 1. u. 5.).

K. subterranea, *R. schneideri* und *P. putealis* wurden anatomisch anhand von Schnittpräparaten untersucht. Bei *K. subterranea* bestehen hinsichtlich der morphologischen Abgrenzbarkeit von *K. styriaca* Unklarheiten. Bei *R. schneideri* wurden geringfügige

Abweichungen zur Erstbeschreibung (Tiere aus dem Harz) festgestellt. *P. putealis* erscheint anhand der inneren Anatomie näher mit der oberirdisch lebenden *P. canadiensis* als mit der ebenfalls oberirdischen *P. graecense* verwandt zu sein. *Proasellus cavaticus*-Populationen unterscheiden sich hinsichtlich des Längen-Breitenverhältnisses des Körpers (dieser Unterschied kann sowohl modifikatorisch als auch genetisch bedingt sein). Sichere Hinweise auf postglaziale Differenzierungen liegen für keine der untersuchten Arten vor (Kap. III. 6. u. IV. 5.).

Mit zunehmender Entfernung vom Rhein nimmt die Anzahl troglobionter Arten ab; sie geht im ostwestfälischen Raum (Paderborner und Briloner Hochfläche) auf insgesamt 2 Arten (*P. cavaticus* und *N. schellenbergi*) zurück. Auch die Anzahl der Arten pro Höhle nimmt von Westen nach Osten ab. Die troglobionten „Vermes“ wurden bisher nur aus dem westlichen Untersuchungsgebiet gemeldet. Das Grundwassersystem des Rheins wird als Ausgang einer zeitlich begrenzten postglazialen Wiederbesiedlung Westfalens durch troglobionte Arten angesehen, die aktiv (flußaufwärts) über die Grundwasserströme von Wupper und Ruhr sowie ihrer Nebenflüsse erfolgte. Troglobionte Arten konnten hierbei unter günstigen Bedingungen möglicherweise auch Wasserscheiden überwinden (Kap. III. 5. und IV. 4.).

Die festgestellten Arten weisen z. T. unterschiedliche Habitatbindungen auf. Zusammenhänge zwischen Umweltparametern und dem Aufenthaltsort von Höhlenpopulationen im Habitatkontinuum der oberflächennahen Filterzone, der vadosen Zone und der Grundwasserzone werden beschrieben.

Bei den Turbellarien *R. schneideri* und *K. subterranea* wurden Unterschiede in der Populationsdynamik beobachtet, die als Anpassung an unterschiedliche Habitate gedeutet werden: *R. schneideri* zeigt bei geringer Abundanz nur kleine Abundanzschwankungen; bei *K. subterranea* treten unregelmäßige, starke Abundanzschwankungen auf. *K. subterranea* präferiert die oberflächennahe Filterzone, *R. schneideri* tiefere Zonen (Kap. III. 5. u. IV. 1.).

Dynamisch beweterte Höhlen (mindestens 2 Tagöffnungen) sind gegenüber der Außenluft weniger isoliert als statisch beweterte Höhlen (1 Tagöffnung). Eine ständige Bewetterung der Höhle mit Außenluft hat eine erhöhte Abgabe von CO₂ aus dem Wasser an die Höhlenatmosphäre zur Folge. Die dadurch bewirkte Erhöhung des pH-Werts scheint sich negativ auf das Vorkommen der meisten aquatischen troglobionten Arten auszuwirken. Für eine dauerhafte Existenz ist für sie eine erhöhte Konzentration von gelöstem CO₂ erforderlich. Es wird vermutet, daß bereits leicht erhöhte pH-Werte im Bicarbonat-gepufferten Höhlenwasser die pH-Wert-Regulation der Tiere erschwert. Diese Zusammenhänge können erklären, warum in dynamisch bewetterten Höhlen troglobionte aquatische Arten allenfalls in „Stillbereichen“ des Wetterstroms gefunden wurden. In statisch bewetterten Höhlen, in denen oft erheblich höhere Konzentrationen der Luft und des Wassers gemessen wurden (mit allerdings starken jahresperiodischen Schwankungen), ist die aquatische troglobionte Fauna artenreicher. Damit wird auch der festgestellte Unterschied in der Besiedlung von Höhlen aus verschiedenen geologischen Formationen verständlich. Die großräumigen, dynamisch bewetterten Höhlen des Massenkalks sind artenarm. In den Honseleer Schichten sind nur relativ kleinlumige Hohlräume zwischen wasserundurchlässigen, nichtverkarstungsfähigen Schichten (z.B. Schiefer) ausgebildet. Diese Höhlen sind stärker isoliert und in der Regel statisch bewettert; ihre troglobionte Fauna ist meist reicher als die der Massenkalkhöhlen (Kap. III. 5. u. IV. 2.).

Das Vorhandensein einer natürlichen Vegetation wirkt sich positiv auf das Vorkommen troglobionter Arten aus. Qualität und Quantität des Nahrungsangebotes, aber auch die Erhaltung einer natürlichen Raumstruktur der Höhlenhabitate sind von ihrem Vorhandensein abhängig. Bei fehlender Vegetationsbedeckung führt erhöhte Bodenerosion zur

Verstopfung des kleinlumigen Lückensystems und zur Devastierung der oberflächennahen Filterzone; dadurch können auch die Bedingungen in der vadosen Zone und im Grundwasserbereich nachhaltig beeinträchtigt werden (Kap. III. 5. u. IV.).

Das Grundwasser westfälischer Höhlen ist artenarm. Hierfür scheinen anthropogene Belastungen maßgeblich zu sein. Es wurden erhöhte Konzentrationen von Stickstoffverbindungen, organischen Substanzen, hierdurch bedingte Sauerstoffzehrungen und daneben auch Schwermetall- und Salzbelastungen festgestellt (Kap. III. 4.).

Die meisten troglobionten Arten kommen bei uns nur noch als isolierte Populationen mit einem stark eingeschränkten Besiedlungsareal vor. Für einzelne Populationen konnten von mir innerhalb der letzten 5 Jahre eine Abundanzabnahme und eine Verminderung der Anzahl der besiedelten Wasserstellen festgestellt werden (Kap. III. 5. u. IV. 6.). Sämtliche westfälischen Höhlen, in denen das Vorkommen troglobionter Arten nicht bestätigt werden konnte, weisen gravierende anthropogene Veränderungen auf. Hierzu gehören alle untersuchten Schau- und Abenteuerhöhlen (Kap. IV. 6.). Die isolierten Höhlenpopulationen von *K. subterranea*, *R. schneideri*, *P. putealis*, *A. stammeri* und *P. cavaticus* sind in ihrem Bestand besonders stark gefährdet.

IV. Literatur

- AGRICOLA, G. (1556): De Re Metallica Libri.- Buch von den Lebewesen unter Tage.- Aus: Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen.-Agricola-Gesellschaft beim Deutschen Museum zur Förd. der Gesch. der Naturwiss. u. der Technik e. V. : 511-543.
- ANDERS, F. (1953): Über die carotinoiden Körperpigmente und die Geschlechtsbestimmung von *Gammarus pulex* L. (Crust., Amphip.).- Naturwiss. **40** (1): 27.
- , (1956): Über Ausbildung und Vererbung der Körperfarbe bei *Gammarus pulex* subsp. *subterraneus* (SCHNEIDER), einer normalerweise pigmentlosen Höhlenform des gemeinen Bachflohkrebses.- Zeitschrift für induct. Abstammungs- und Vererbungslehre **87**: 567-579.
- , (1957): Modifikative und erbliche Variabilität der Pigmentierung bei einer Höhlenform von *Gammarus pulex* L.- Verhandl. Deutsch. Zool. Ges. Hamburg: 197-203.
- BANNIZA, H. (1980): Alter Bergbau im ehemaligen Amt Hemer.- Die Fibel, Schriftenreihe der Heimat, Bürger- und Heimatverein, Hemer: 51-125.
- BEAUCHAMP, P. DE (1932): Sur une Némerte obscuricole.- Bull. Soc. zool. Fr. **57**: 268-273.
- BENICK, L. (1937): Die Käfer der Segeberger Höhle.- Schr. Naturw. Ver. Schl.-Holst. **22** (1): 146-176.
- , (1950): Probleme um den Segeberger Höhlenkäfer.- Schr. Naturw. Ver. Schl.-Holst. **24** (2): 57-62.
- BEYER, H. (1932): Die Tierwelt der Quellen und Bäche des Baumbergegebietes.- Abh. des Westf. Prov.-Museums f. Naturkde. Münster **3**: 9-187.
- BOETTGER, C. R. (1939): Die subterrane Molluskenfauna Belgiens.- Mém. Mus. Roy. d'Hist. Nat. Belgique **88**: 1-67.
- , (1958): Höhlenfauna und Glazialzeiten.- Verhandl. Deutsch. Zool. Ges. Graz: 125-127.
- BÖGLI, A. (1976): CO₂-Gehalte von Luft und Kalkgehalte von Wässern im unterirdischen Karst.- Z. Geomorph. N. F. **26** (Suppl.-Bd.): 153-163.
- , (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie.- Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- BÖHMIG, L. (1909): Tricladida.- in BRAUER: Die Süßwasserfauna Deutschlands.- Gustav Fischer Verlag, Jena **19**: 143-176.
- BÖRNER, C. (1901): 2. Über einige theilweise neue Collembolen aus den Höhlen der Gegend von Letmathe in Westfalen.- Zool. Anz. **24**: 333-345.
- CASPARY, R. (1849): *Gammarus puteanus* KOCH.- Verh. naturhist. Verein. preuss. Rheinl. u. Westf. **6**: 39-48.

- CAUER, H. (1954): Chemisch-physikalische Untersuchungen der Klimaverhältnisse in der Kluterthöhle. – Archiv für physikalische Therapie **6** (1): 1-20.
- CHAPPUIS, P. A. (1927): Die Tierwelt der unterirdischen Gewässer.- in: THIENEMANN, A. : Die Binnengewässer. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Erwin Nägele) G. m. b. H. **3**: 1-175.
- DAHM, A. G. & N. GOURBAULT (1978): Tricladida et Temnocephalida (Turbellaria).- in ILLIES, J. : Limmofauna Europaea. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, New York, Swets & Teitlinger B. V., Amsterdam 2. Aufl. : 16-17.
- DECHEN, H. VON (1862): Mitteilungen über eine neu aufgefundene Kalksteinhöhle im Hönnetal.- Verhandlungen naturhist. Verein preuss. Rheinl. u. Westf., Correspondenzblatt, Bonn: 82.
- DELACHAUX, T. (1921): Un Polychète d'eau douce cavernicole; *Troglochaetus beranecki* nov. gen. nov. spec.- Bull. Soc., Neuchateloise des Sciences Naturelles **45**: 1-7.
- DEUTSCHE EINHEITSVERFAHREN ZUR WASSERANALYSE (1979) Herausgegeben von der Fachgruppe Wasserchemie in der Gesellschaft deutscher Chemiker. 3. Aufl., 8. Lief., Weinheim: Verlag Chemie.
- DOBAT, K. (1975): Die Höhlenfauna der Schwäbischen Alb.- Jh. Ges. Naturkde. Württemberg **130**: 260-381.
- DUGÈS, A. (1828): Recherches sur l'organisation et les moers des Planariées.- Ann. Sci. nat. **1** (15): 139-183.
- EHRENBERG, C. G. (1860): Über die mit dem *Proteus anguineus* zusammenlebenden mikroskopischen Lebensformen in den Bassins der Magdalengrotte in Krain.- Monatsber. d. k. preuß. Akad. Wiss. Berlin: 758-775
- EIGENMANN, C. H. (1909): Cave vertebrates of America. A study of degenerative evolution.- Publ. Carnegie Inst. Washington **104**: 1-241.
- FEEST, J., C. BRIESEMANN, B. GREUNE & J. PENASSA (1976): Zum Artbestand von vier Quellregionen der Baumberge verglichen mit faunistischen Untersuchungen aus den Jahren 1926-30.- Natur und Heimat **36** (2): 32-39.
- FLINT, R. F. (1971): Glacial and Quaternary Geology.- John Wiley & Sons, Inc. : 281.
- FRANKE, H. W. (1963): Formgesetze der Korrosion.- Jahreshefte für Karst- und Höhlenkunde **3**: 207-224.
- FUHLROTT, E. (1869): Höhlen und Grotten in Rheinland-Westfalen nebst Beschreibung und Plan der Dechenhöhle.- Verlag von Bädeker, Iserlohn- Elberfeld.
- ,– (1849): Nachtrag zu CASPARY, R. : *Gammarus puteanus* KOCH.- Verh. naturhist. Ver. Rheinl. **6**: 47-48.
- GALLINIS, H. (1989): Ablauf der Rettungsübung in der Kluterthöhle am 14. 04. 1989.- Antiberg, Heft 39: 24-27.
- GIBSON, R. & J. MOORE (1976): Freshwater nemerteans.- Zool. J. Linn. Soc. **58**: 177-218.
- ,– (1978): Freshwater nemerteans: New Records of *Prostoma* and a Description of *Prostoma canadiensis* sp. nov.- Zool. Anz. **201**: 77-85.
- GINET, R. & V. DECOU (1977): Initiation à la Biologie et à l'écologie souterraines.- Editions Universitaires, Jean-Pierre Delarge, 10, rue Mayet, 75006 Paris.
- GLAUERT, A. M. (1981): Fixation, dehydration and embedding of biological specimens.- North-Holland Publishing Company, Amsterdam – New York – Oxford.
- GLEDHILL, T. (1980): Designation and Description of the Lectotype of *Niphargus fontanus* BATE.- Crustaceana **Suppl. 6**: 27-37.
- GOEDMAKERS, A. (1972): *Gammarus fossarum* KOCH, 1835: Redescription based on neotype material and notes on its local variation (Crustacea, Amphipoda).- Bijdragen tot de Dierkunde **42** (2): 124-138.
- GRAETER, E. (1910): Die Copepoden der unterirdischen Gewässer. – Archiv für Hydrobiologie **6**: 1-48, 111-152
- GRIEPENBURG, W. (1933a): Höhlen des Bergischen Landes. – c) Die Tierwelt der oberen Hardthöhle in Wuppertal-Barmen.- Nachrichtenbl. f. rh. Heimatpflege **4**: 330-332.

- ,– (1933b): Die Rentropshöhle bei Milspe in Westfalen.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (2): 18-30.
- ,– (1933c): Die Protozoenfauna einiger westfälischer Höhlen.- Sitzungsberichte der Ges. Naturforsch. Freunde zu Berlin 1933: 78-92.
- ,– (1934): Die Berghauser Höhle bei Schwelm in Westfalen.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (2): 33-39.
- ,– (1935): Kluterthöhle, Bismarck- und Rentropshöhle bei Milspe und ihre Tierwelt.- Abh. aus dem Westf. Provinzial-Mus. f. Naturkde, Münster **6**: 1-46
- ,– (1939a): Die Tierwelt der beiden Hülllöcher im Sauerland.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (2/4): 72-79.
- ,– (1939b): Die Tierwelt der Höhlen bei Kallenhardt.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (1): 17-26.
- ,– (1941a): Die Höhlen Westfalens.- Natur und Heimat **8** (1): 1 -13.
- ,– (1941b): Ein Beitrag zur Kenntnis der Wurmfauna westfälischer Höhlen.- Decheniana **100 B**: 73-116.
- ,– (1941c): Die Tierwelt der Höhlen des Hönnetals.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (1/2): 55-60.
- ,– (1941d): Tiere aus Höhlen bei Werdohl und Hohenlimburg.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (1/2): 74-76.
- ,– (1941e): Die Tierwelt der Bilsteinhöhlen bei Warstein i. Westf.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (3/4):190-196.
- HÄNISCH, W. (1990): Zur Bergbauforschung im Felsenmeer.- Hohenlimburger Heimatblätter **51** (4): 101-116, 125-129.
- HAINE, E. (1946): Die Fauna des Grundwassers bei Bonn mit besonderer Berücksichtigung der Crustaceen.- Dissertation Melle in Hannover.
- HAMMERSCHMIDT, E. (1987a): Zur Wirkungsgeschichte der Dechenhöhle im 19. Jahrhundert.- Mitt. Ber. der Speläogruppe Letmathe (2): 3-9.
- ,– (1987b): Neue Pläne von der Dechenhöhle und Knitterhöhle.- Mitt. Ber. der Speläogruppe Letmathe (2):54.
- HARTMANN, R. (1983): Untersuchungen über die Hydrologie und aquatische Fauna in einem Bergwerk des Harzes, unter besonderer Berücksichtigung des Höhlenflohkrebses *Niphargus schellenbergi* KARAMAN (1932).- Diplomarbeit, Göttingen.
- HENRY, J.-P. (1976): Recherches sur les Asellides hypogés de la lignée *cavaticus* (Crustacea, Isopoda, Asellota).- Thèse, Dijon.
- ,– (1977): Origine et anciennete de *Proasellus cavaticus* (LEYDIG) (Crustacea, Isopoda, Asellota des eaux souterraines).- Proc. 7th Int. Speleol. Congr. Sheffield: 243-246.
- ,– (1980): Un Asellide interstitiel de France: *Proasellus rouchi* n. sp. (Isopoda, Asellota) et considerations sur les espèces de la lignée *cavaticus*.- Crustaceana **38**: 183-193.
- ,– & G. MAGNIEZ (1983): Crustaces Isopodes (Principalement Asellotes).- Bull. de la Soc. Linneenne de Lyon **52** (10): 319-357.
- HERHAUS, K.-H. (1991): Designation and description of the lectotype of *Proasellus cavaticus* (Leydig, 1871) (Crustacea, Isopoda, Asellidae). – Steentrupia, Zool. Mus. Kopenhagen; in Vorbereitung.
- HERHAUS, K.-H. & J. PUST (in Vorbereitung): Die Verbreitung der hypogäischen Süßwasserasseln des Genus *Proasellus* (Dudich, 1925) (Crustacea, Isopoda, Asellidae) in Deutschland. –
- HEUN, C. (1955): Biologie und Ökologie von *Choleva holsatica* BEN.- Entom. Mitt. Zool. Mus. Hamburg **7**: 195-228.
- HINZ, W. & I. DANNEEL (1974): Vorkommen von *Niphargus a. aquilex* SCHIÖDTE (Amphipoda) in Oberflächengewässern bei Düsseldorf.- Natur und Heimat **34** (1): 7-11.
- HNATEWYSCH, B. (1929): Die Fauna der Erzgruben von Schneeberg im Erzgebirge.- Zool. Jb. Syst. **56**: 173-268.
- HOHMANN, W. (1979): Zum Wachstum holozäner Großstalagmiten in der Knitterhöhle bei

- Letmathe/Sauerland – und zur Methodik der Sinter-Probeentnahmen durch Kernbohrungen.-
Dortmunder Beiträge zur Landeskunde: 45-63.
- HOLDHAUS, K. (1954): Die Spuren der Eiszeit in der Tierwelt Europas.- Universitätsverlag Wagner,
Innsbruck: 247-250 u. 493.
- HUSMANN, S. (1956): Untersuchungen über die Grundwasserfauna zwischen Harz und Weser.-
Archiv für Hydrobiologie **52** (1/2): 1-184.
- ,– (1962): Ökologische und verbreitungsgeschichtliche Studien über den Archianneliden *Troglo-
chaetus beranecki* DELACHAUX; Mitteilungen über Neufunde aus den Grundwasserströmen von
Donau, Ybbs, Ötz, Isar, Lahn, Ruhr, Niederrhein und Unterweser.- Zool. Anz. **168**: 312-324.
- ,– (1964): Morphologische, ökologische und verbreitungsgeschichtliche Studien über die Bathy-
nellen (Crustacea, Syncarida) des Niederrhein-Grundwasserstromes bei Krefeld.- Gewässer
und Abwässer (37/38): 46-76.
- ,– (1968): Ökologie, Systematik und Verbreitung zweier in Norddeutschland sympatrisch lebender
Bathynella-Arten (Crustacea, Syncarida).- Int. J. Speleol. **3**: 111-145.
- HYMAN, L. H. (1954): North American Triclad Turbellaria. 13. Three new cave Planarians.-Proc.
U. S. Nat. Mus. (Ms. nat. mus. Wash. D. C.) **103**.
- ILLIES, J. (1978): Limnofauna Europaea.- Gustav Fischer Verlag Stuttgart – New York, Swets &
Zeitlinger B. V.-Amsterdam; 2. Aufl.
- JAKOBI, H. (1955): Biologie, Entwicklungsgeschichte und Systematik von *Bathynella natans*
VEJD.- Zool. Jb. Syst. **83**: 1-62.
- JEFFERSON, G. T. (1969): The distribution of hypogean animals in the British Isles.- C. R. 5. Congr.
Int. Speleol., Stuttgart **8**: 1-6.
- ,– (1976): Cave Faunas.- in: The Science of Speleology London **10**: 359-421.
- JOSEPH, G. (1878): Ueber Grotteninfusorien.- Jahresber. schles. Ges. **56**: 72-76.
- JUBERTHIE, C., & M. BOUILLON & B. DELAY (1980): Sur l'existence du milieu souterrain superficiel
en zone calcaire.- Mèm. Biospeol. **8**: 77-93.
- JUBERTHIE, C. & B. DELAY (1981): Ecological and Biological Implications of the Existence of a
„Superficial Underground Compartment“.- Proc. 8. Congr. Speleol. : 203-206.
- JÜNEMANN, B. & E. FISCHER (1939): Karsterscheinungen bei Hohenlimburg in Westfalen.-
Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (2/4): 49-62.
- ,– (1940): Die Herscheider Höhle bei Schönebecke.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstfor-
schung (1): 8-11.
- KERSBERG, H. (1977): Die Volmehanghöhle in Hagen.- Hagener Beiträge zur Geschichte und
Landeskunde (8): 1-48
- KIEFER, F. (1928): Zur Kenntnis der geographischen Verbreitung von *Bathynella chappuisi*
DELACHAUX, Syncarida.- Zool. Anz. **78**: 123-125.
- ,– (1931): Zur Kenntnis der in unterirdischen Gewässern lebenden Copepoden.- Mitteilungen über
Höhlen- und Karstforschung (2): 46-50.
- ,– (1932): Die Ruderfußkrebse der unterirdischen Gewässer Deutschlands.- Mikrokosmos (26):
60-65.
- ,– (1930): Neue höhlenbewohnende Ruderfußkrebse.- Zool. Anz. **87**: 222-228.
- ,– (1973): Ruderfußkrebse (Copepoden).- Kosmos-Verlag, Franckh-Stuttgart, 2. Aufl. : 1-99
- KOLARIK, T. & E. HAMMERSCHMIDT (1987b): Die Friedrichshöhle im Hönnetal.- Mitt. Ber.
Speläogruppe Letmathe (2): 26-31.
- KOMAREK, J. (1930): Eine blinde *Bdellocephala* (Tricladida) aus dem Harz.- Zool. Anz. **87**:
327-332.
- KOSSWIG, C. (1935): Die Evolution von „Anpassungs“-Merkmalen bei Höhlentieren in genetischer
Betrachtung.- Zool. Anz. **112**: 148-155.
- KYRLE, G. (1923): Theoretische Speläologie.- Wien, Druck der Österreichischen Staatsdruckerei.
- LATTIN, G. DE (1967): Grundriß der Zoogeographie.- Stuttgart, Gustav Fischer Verlag.
- LEITHE, W. (1972): Die Analyse der organischen Verunreinigungen in Trink-, Brauch- und
Abwässern.- Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft MBH, Stuttgart: 45-46.

- LENGERSDORF, F. (1928): Beitrag zur Kenntnis der Höhlenfauna Westfalens.- Verhandl. d. naturhist. Vereins preuss. Rheinl. und Westf. **85**: 106-108.
- , (1929): Biologisch interessante Funde aus westfälischen Höhlen.-Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (2): 55-58.
- , (1930): Beitrag zu einer Höhlenfauna Westfalens.- Abhandl. aus dem Westf. Prov. Mus. f. Naturkde. Münster **1**: 99-123.
- , (1931a): II. Beitrag zur Kenntnis der Höhlenfauna Westfalens.- Abhandl. aus dem westf. Prov.-Mus. f. Naturkde. Münster **1**: 121-123.
- , (1931b): III. Beitrag zur Kenntnis der Höhlenfauna Westfalens.- Abhandl. aus dem westf. Prov.-Mus. f. Naturkde. Münster **1**: 125 -128.
- , (1933): Die lebende Tierwelt der natürlichen und künstlichen Höhlen des Rheinlandes.- Nachrichtenbl. f. rh. Heimatpflege **4**: 310-319.
- , (1938): Beitrag zur Kenntnis der Höhlenfauna des Hönnetals.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (4): 145-147.
- , (1951a): Von Höhlen und Höhlentieren.- Die neue Brehm-Bücherei, Gemeinschaftsarbeit der Akademischen Verlagsgesellschaft Geest u. Portig K.-G., Leipzig, A. Ziemsen Verlag, Wittenberg/Lutherstadt.
- , (1951b): Faunistischer Streifzug durch westfälische Höhlen.- Natur und Heimat **12** (1): 21-27.
- , (1961): Die lebende Tierwelt der westfälischen Höhlen.- Jahreshefte für Karst- und Höhlenkunde **2**: 193-226.
- LERUTH, R. (1939): Notes d'hydrobiologie souterraine. VIII. Un genre (*Guestphalinus*) et une espèce (*Trichodrilus lengersdorfi* MICHAELSEN) d'Oligochètes phréatiques nouveaux pour la faune Belge.- Bull. Soc. Roy. Sci. Liège, Séance du 15. VI. 1939 (6-7): 416-420.
- LINDNER, A. & W. BERCHTOLD (1982): Statistische Methoden III. Multivariable Verfahren.- Birkhäuser Verlag, Basel.
- LOTZE, F. (1961): Zur Geologie des westfälischen Karstes.- Jahreshefte für Karst- und Höhlenkunde **2**: 3-28.
- LUFT, J. H. (1961): Improvements in epoxy resin embedding methods.- J. biophys. biochem. Cytol. **9**: 409.
- MICHAELSEN, W. (1933): Über Höhlenoligochaeten.- Mitteilungen über Höhlen- und Karstforschung (1): 1-19.
- MICKOLEIT, G. (1987): Limnologische Untersuchung des Alpebaches und seiner Nebenbäche (Oberbergischer Kreis, NRW).- Decheniana **140**: 164-173.
- MIOTKE, F.-D. (1974): Carbon dioxide and the soil atmosphere.- Abh. Karst- und Höhlenkunde A (9): 1-49.
- MORLO, H. (1983): Die Höhlen in Lippe und im Paderborner Land.- in: Beiträge zur Karst- und Höhlenforschung in Westfalen, Karst und Höhle: 121-170.
- MOTAS, C. (1961): Speologia in Roumania.- Rassegna Speleol. Ital. **13**: 3-22.
- NAGEL, K.-O. & R. KRAUSE (1985): Die Gammaridenfauna im Stadtgebiet von Kassel (Crustacea: Decapoda, Gammaridae).- Hessische faunistische Briefe (4): 61-63.
- NÖGGERATH, J. J. (1846): Über einige knochenführende Höhlen in dem großen rheinisch-westfälischen Kalkzuge.- Archiv f. Mineralogie, Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde **20**: 328-350.
- NOLL, W. & H. J. STAMMER (1953): Die Grundwasserfauna des Unterraingebietes von Hanau bis Würzburg mit Einschluß des Spessarts.- Mitt. naturwiss. Mus. Stadt Aschaffenburg **6**: 1-77.
- PINKSTER, S. (1970): Redescription of *Gammarus pulex* (LINNAEUS, 1758) based on neotype material (Amphipoda).- Crustaceana **18** (2): 177-186.
- PUST, J. (1984): Untersuchungen zur Systematik, Morphologie und Ökologie der in der Kluterhöhle (Ennepetal, Westf.) vorkommenden Nemertine *Prostoma* sp.- Diplomarbeit, Münster.
- PUST, J., LAUKÖTTER, G. & K.-F. HERHAUS (1991): Neue Nachweise der interstitiellen Süßwasserassel *Proasellus cavaticus* (Leydig, 1871) in Westfalen. - Natur und Heimat (in Vorbereitung).
- REISINGER, E. (1924): Die terricolen Rhabdocoelen Steiermarks.- Zool. Anz. **59**: 33-48.

- ,– (1933): Neues zur vitalen Nervenfärbung (Gleichzeitiger Beitrag zur Kenntnis des Protoplasten-Nervensystems).- Verhandl. Deutsch. Zool. Ges. Köln: 155-160.
- ROMEIS, B. (1968): Mikroskopische Technik.- 16. Aufl., Oldenbourg, München.
- RONNEBERGER, D. (1975): Zur Kenntnis der Grundwasserfauna des Saale-Einzugsgebietes (Thüringen).- *Limnologica* (Berlin) **9** (3): 323-419.
- ROSENFELD, U. (1961): Karsterscheinungen in der Osningzone.- Jahreshefte für Karst- und Höhlenkunde **2**: 81-98.
- SACHS, L. (1974): Angewandte Statistik. Planung und Auswertung – Methoden und Modelle.- Springer Verlag – Berlin-Heidelberg-New York.
- SCHELLENBERG, A. (1932a): Vier blinde Amphipodenarten in einem Brunnen Oberbayerns.- *Zool. Anz.* **98**: 131-139.
- ,– (1932b): Bemerkungen über subterrane Amphipoden Großbritanniens.- *Zool. Anz.* **99**: 49-58.
- ,– (1932c): Deutsche subterrane Amphipoden.- *Zool. Anz.* **99**: 311-323.
- ,– (1933): *Niphargus puteanus* am alten Fundort neu entdeckt. Revision der deutschen *Niphargus*-arten.- *Zool. Anz.* **102**: 255-257.
- ,– (1935): Schlüssel der Amphipodengattung *Niphargus* mit Fundortangaben und mehreren neuen Formen.- *Zool. Anz.* **111**: 204-211.
- ,– (1936): Amphipodenstudien in Südbaden.- Sitzungsber. Ges. Naturforsch. Freunde Berlin: 23-34.
- ,– (1942): Krebstiere oder Crustacea, IV. : Flohkrebse oder Amphipoda.- in: DAHL, F. : Die Tierwelt Deutschlands und der angrenzenden Meeresteile. Jena **40**.
- SCHINER, J. R. (1854): Fauna der Adelsberger-, Lueger- und Magdalenengrotte.- in: SCHMIDL, A.: Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, Luegg, Planina und Laas.- Wien.
- SCHMIDT, H. & W. PLEBMANN (1961): Sammlung Geologischer Führer. Herausgeg. : F. LOTZE, Gebrüder Bornträger. Berlin-Nikolassee **39** (Sauerland): 1 -151.
- SCHNEIDER, R. (1938): Bericht über die Untersuchungen der Unterweltfauna in den Stollen von St. Andreasberg im Harz.- Sitzungsber. Ges. Naturforsch. Freunde zu Berlin: 412-418.
- SCHULTEN, E. & E. SCHULTEN (1927): Führer durch die Kluterhöhle.- Verlag Emil Schulten, Elberfeld, Kronprinzenallee 85.
- SCHULZE, E. & D. UHLAND (1960): Beitrag zur Faunistik der Barbarossahöhle.- *Zool. Anz.* **164**: 122-132.
- SERBAN, E. (1966a): Contributions a l'étude de *Bathynella* d'Europe; *Bathynella natans* VEJDOVSKY un dilemme à résoudre.- *Int. J. Speleol.* **2**: 115-132.
- ,– (1966b): Nouvelles contributions à l'étude de *Bathynella* (*Bathynella*) *natans* VEJD. et *Bathynella* (*Antrobathynella*) *stammeri* JAKOBI.- *Int. J. Speleol.* **2**: 208-221.
- ,– (1972): *Bathynella* (Podophallocarida, Bathynellacea).- *Trav. Inst. Spéol.* «Emile Racovitza» **11**: 11-225
- SERBAN, E. & T. GLEDHILL (1965): Concerning the presence of *Bathynella natans stammeri* JAKOBI (Crustacea, Syncarida) in England.- *Ann. Mag. nat. Hist.* **8** (13): 513-522.
- SIEG, J. (1973): Zum Problem der Herstellung von Dauerpräparaten von Klein-Crustaceen, insbesondere von Typusexemplaren.- *Crustaceana* **25** (2): 222-224.
- SKET, B. (1974): *Niphargus stygius* (SCHIDTE) (Amphipoda, Gammaridae). – Die Neubeschreibung des Reneotypus, Variabilität, Verbreitung und Biologie der Art, I.- *Biol. vestn.* (Ljubljana) **22**: 91-103.
- SMITH, D. G. (1985): The occurrence of the troglobitic amphipod *Stygobromus tenuis tenuis* (SMITH) (Crangonyctidae) in the Taconic Mountains of the southwestern Massachusetts (USA): a case for the existence of a subterranean refugium in a glaciated region.- *Int. J. Speleol.* **14**: 31-37.
- SÖNNEKEN, W. (1966): Höhlen des Sauerlandes.- Kommissionsverlag Rudolf Beucker, Lüdenscheid.
- STAMMER, H. J. (1936a): Die aquatile Fauna der Reyersdorfer Höhle.- *Der Höhlenarchannelide Troglochaetus beranecki* in Schlesien.- *Zool. Anz.* **118**: 265-268.
- ,– (1936b): Die Wasserfauna der Schneeberghöhlen.- *Beiträge z. Biol. Glatzer Schneeberges* (2):

- 199-214.
- ,– (1937): Der Höhlenarchiannelide *Troglochaetus beranecki* in Schlesien.- Zool. Anz. **118**: 265-268.
- STEINEN, J. D. VON (1749): Versuch einer westfälischen Geschichte, besonders der Grafschaft Mark.- Historia des Amtes Iserlohn, Bädeker Verlag.
- STOCK, J. H. & T. GLEDHILL (1977): The *Niphargus kochianus*-group in northwestern Europe.- Crustaceana **Suppl. 4**: 212-243.
- STOCK, J. (1972): L'état actuel des connaissances sur les genres du groupe *Niphargus* du Benelux.- Actes du 1er colloque international sur le genre *Niphargus*, Verona, 15.-19. Avril 1969, Museo Civico di Storia Naturale di Verona. Mem. fuori **5**: 33-34.
- ,– (1974): Redescription de l'amphipode hypogé *Niphargus puteanus* (KOCH in PANZER, 1836), basée sur du matériel topotypique.- Bijdragen tot de Dierkunde **44** (1): 73-82.
- STOFFELS, D. (1977): Das Knitterhöhlen-System in Iserlohn.- Karst und Höhle, München: 111-121.
- ,– (1987): Dr. Benno Wolf's Wirken in Rheinland-Westfalen.- Mitt. Ber. der Speläogruppe Letmathe (2): 10-20.
- STRASKRABA, M. (1972): L'état actuel des nos connaissance sur le genre *Niphargus* en Tchécoslovaque et dans les pays voisins.- Actes du 1. colloque internat. sur le genre *Niphargus*, Museo civico di storia naturale di Verona, Mem. fuori **5**: 35-46.
- STROUHAL, H. (1958): *Asellus (Proasellus)* im nördlichen Österreich (Isopoda, Asellota).-Ann. Naturhist. Mus. Wien **62**: 263-282.
- TARMAN, K. (1961): *Prostoma hercegovinense* n. sp. jamski Nemertin iz Hercegoviskih.- Jugoslovanski Speleoloski Kongress Zagreb.
- TATTERSALL, W. M. (1930): *Asellus cavaticus* SCHIÖDTE, a blind Isopod new to the British Fauna, from a well in Hampshire.- J. Linn. Soc. **37**: 79-91.
- THIENEMANN, A. (1912): Der Bergbach des Sauerlandes. Faunistisch-biologische Untersuchungen.- Internat. Rev. Biol. **Suppl. 4**: 1-125
- ,– (1916): Beiträge zur Kenntnis der westfälischen Süßwasserfauna. IV. Über einige Krebstiere der westfälischen Fauna.- Jber. Westf. Prov. -Ver. f. Wiss. u. Kunst **44**: 182-191.
- ,– (1924): Hydrobiologische Untersuchungen an Quellen.- Archiv für Hydrobiologie **14**: 151-190.
- ,– (1925): Die Binnengewässer Mitteleuropas. Eine limnologische Einführung.- Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Erwin Nägele) G. m. b. H. **1**.
- TRIMMEL, H. (1968): Höhlenkunde.- Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- TRUMP, B. F., E. A. SMUCKLER, & E. P. BENDITT (1961): A Method for Staining Epoxy Sections for Light Microscopy.- J. Ultrastructure Research **5**: 343-348.
- TURANCHIK, E. J. & T. C. KANE (1979): Ecological genetics of the cave beetle *Neaphaenops tellkampfi* (Coleoptera: Carabidae).- Oecologia (Berlin) **44**: 63-67.
- VANDEL, A. (1965): Biospeleology. The Biology of the Cavernicolous Animals.- Pergamon Press.
- VONK, R. (1988): The *Niphargus kochianus*-group (Crustacea, Amphipoda) in the Aquitanian Basin, South-Western France, and a supposed case of introgressive hybridisation.- Stygologia **4** (2): 177-191.
- WEBER, H. W. (1987): Höhlenkataster Westfalen 1987.- Antberg (31/32).
- WEGELIN, R. (1966): Beitrag zur Kenntnis der Grundwasserfauna des Saale-Elbe – Einzugsgebietes.- Zool. Jb. Syst. **93**: 1-177.
- WEST, R. G. (1968): Pleistocene Geology and Biology.- Longmans, London: 94.
- WETZEL, A. (1929): Die Protozoen der Schneeberger Erzbergwerke.- in: HNATEWYTSCH, B. : Die Fauna der Erzgruben von Schneeberg im Erzgebirge.- Zool. Jb. Syst. **56**: 261-268.
- WOLF, B. (1937): Animalium Cavernarum Catalogus.- S'Gravenhage.
- ZEPP, P. (1933): Höhlen des Siebengebirges.- Nachrichtenbl. f. rh. Heimatpflege **4**: 352-355.
- ZSCHAU, M. (1981): Mitteilungen über die Erlenhöhle in Linderhausen bei Schwelm.-Antberg (23): 20-24.
- ZYGOWSKI, D.-W. (1976): Entdeckung von Höhlenflohkrebsen (*Niphargus*) in der Eisenhöhle.- Mitteilungen der Karst- und Höhlengruppe im Hagener Heimatbund (6).

- ,- (1987): Die Höhlen im Kehlberg (Hönnetal bei Volkringhausen): Ein karsthydrologisches System en miniature.- Dortmund Beiträge zur Landeskunde **21**: 79-95.
- ,- (1988): Bibliographie zur Karst- und Höhlenkunde in Westfalen (unter Einschluß des Bergischen Landes).- Abh. aus dem Westf. Mus. f. Naturkde. Münster 50 B: 1-295.

Anschrift des Verfassers: Dipl.-Biol. Dr. Jürgen Pust
Zoologisches Institut der Universität
Schloßplatz 5, D-4400 Münster