

Zur anthropogenen Beschleunigung des Verkarstungsprozesses durch Immissionswirkung

Von **Andreas Arnold**

(Eingegangen am 23. September 1984)

Die in den letzten Jahrzehnten stark angestiegene anthropogene Immission von gasförmigen Säureanhydriten, insbesondere SO_2/SO_3 , NO_x und CO_2 , und deren Reaktionsprodukten hat komplexe Auswirkungen, die bisher erst in verhältnismäßig geringem Ausmaß erkannt und erforscht sind. Beispiele dafür sind:

- unmittelbare Beeinträchtigung der Gesundheit des Menschen, insbesondere durch chronische Erkrankungen der Atmungsorgane
- Material- und Bauwerksschäden durch verstärkte Metall- und Betonkorrosion
- Waldsterben (Holzmangel, Wegfall der Speicher- und Ausgleichsfunktion des Waldes für Klima und Wasserhaushalt, ökologische Folgen der „Versteppung“, Entzug der Lebensgrundlage vieler Tier- und Pflanzenarten . . .)
- Versauerung der Gewässer (besonders gefährdet sind Gewässer mit Einzugsgebiet im „sauren Urgestein“, z. B. Granit): Hemmung der Produktivität der Gewässer, Fischsterben, Veränderung des Artbestandes
- aerogene Gewässereutrophierung durch Eintrag von Minimumnährstoffen (Stickstoff und Phosphor) (von Bedeutung für Trinkwassertalsperren)
- zusätzliche Erhöhung der Nitratgehalte im Grundwasser durch Auswaschung von Stickstoffverbindungen aus der Luft mit dem Regen
- Versauerung terrestrischer Ökosysteme, insbesondere der Waldböden und infolgedessen Veränderung der Flora und Fauna, Hemmung des biologischen Abbaus mit verstärkter Neigung zur Vermoorung
- Notwendigkeit erhöhter Kalkgaben zur Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen
- verstärkte CO_2 -Abgabe an die Atmosphäre infolge Verdrängung aus Karbonaten durch „starke“ Säuren
- Beschleunigung der Verkarstungsgeschwindigkeit.

Der Beschleunigung der Verkarstung wurde bisher kaum Beachtung geschenkt (ausgen. Arnold 1981, – eine Publikation an schwer zugänglicher Stelle). Sie hat nicht nur für die Speläologie große Bedeutung.

1. Bedeutung des Karstes

Unter Verkarstung versteht man die Verwitterung der Karbonatgesteine (insbesondere Kalke und Dolomite) durch Lösungsvorgänge unter Beteiligung freier Kohlensäure sowie auch Verwitterung von Gips, Anhydrit und Alkalisalzen (insbesondere Steinsalz) nur durch Lösung in Wasser. Es handelt sich bei diesen Gesteinen um metamorphe Sedimente, nach Bögli (1978) um Evaporite, d. h. durch Meerwasser-Verdunstung in der Reihenfolge entgegen der Löslichkeit abgeschiedene Komponenten. Umgekehrt nimmt demzufolge auch die Verkarstungsgeschwindigkeit in der Reihenfolge Kalk, Anhydrit/Gips, Steinsalz jeweils um ein Vielfaches zu.

Infolge der Zerklüftung der Gesteine erfolgt die Verkarstung nicht nur ober-

irdisch, sondern führt zu Höhlenbildung und einer weitgehend unterirdischen Entwässerung der Karstgebiete. Verkarstungsfähige Gesteine treten auf einem erheblichen Teil der Erdoberfläche zutage und haben landschaftsbestimmenden Charakter. Für das Gebiet der DDR, in dem der Festgesteinsbereich auf dem überwiegenden Teil der Fläche nicht zutage tritt, weisen insbesondere der Thüringische Raum und der Harz lokal bedeutende Karstgebiete auf, z. B. die Massenkalke von Rübeland und die Zechsteingipse und Anhydrite des Südharzes und Kyffhäusers. Beispielfhaft für die Bedeutung des Karstes seien nachstehend einige Ausmaße von Karsterscheinungen genannt:

Als längste Kalksteinhöhle der Erde gilt derzeit mit insgesamt 471 km das Mammoth Cave-System in Nordamerika (Mitt. 1984), als längste Gipshöhle mit 119 km die Optimistitscheskaja Peschtschera in der UdSSR (Bögli 1978), nach Völker (1982) beträgt ihre bekannte Länge inzwischen 147 km. Größter natürlicher Einzelhohlraum ist ein Saal in der Höhle Lobang Nasib Bagus in British Malaysia; dagegen sind die längsten Höhlen der DDR Gipshöhlen (Wimmelburger Schlotte 5 km, Heimkehle 2 km) und der größte freie Hohlraum (in der Heimkehle) mißt $65 \times 65 \times 22$ m (nach Völker 1982). Die Bildung von Karsthohlräumen (Höhlen) ist für die betreffenden Gebiete von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Beispielsweise dienen sie als unterirdische Wasserspeicher für die Trinkwasserversorgung und Energiegewinnung (vgl. dazu bei Trimmel 1968 das Kapitel Angewandte Höhlenkunde). Daneben haben insbesondere kleintektonische Bewegungen, wie Erdfälle und andere Senkungserscheinungen namentlich in den Gipskarstgebieten der DDR eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung. Gleiches trifft auch für die sogenannten Schlotten, tiefgelegene, oft wassergefüllte Hohlräume ohne Verbindung zur Erdoberfläche hinsichtlich ihrer Bedeutung für den Bergbau zu. Das Säurebindungsvermögen der Erdoberfläche, insbesondere der Karstgebiete und der Gewässer, insbesondere der Ozeane, stellt ein gewaltiges, aber nicht unerschöpfliches Pufferungsreservoir dar, ohne dessen Wirkung die Versauerung bereits lebensfeindliche Ausmaße erreicht hätte. Das unterstreicht die Bedeutung, Erforschung und Kontrolle dieser Pufferungsmechanismen. Karsterscheinungen, insbesondere Höhlen und Höhleninhalte (Höhleninhalte, speziell Sinterchronologie) bieten sich als natürliche Laboratorien dafür an.

2. Emission und Immission

Seit Beginn des industriellen Aufschwunges nach dem 2. Weltkrieg nehmen Umweltschäden durch Immission von Säureanhydriten und deren Derivaten stark zu. Dazu werden in der inzwischen recht umfangreichen Literatur zum Teil erheblich differierende Werte genannt. Nach Peukert und Panning (1975) betrug der SO_2 -Ausstoß auf der gesamten Erde im Jahre 1969 etwa $146 \cdot 10^6$ t und in der BRD (Fläche 248 054 km^2) $3,6 \cdot 10^6$ t im Jahr. Dagegen erwartete Schade (1975) von 1973 auf 1985 einen Anstieg der SO_2 -Emission in der BRD von 4,2 auf $4,6 \cdot 10^6$ t a. Galloway and Whelpdale (1980) berechnen die Schwefelemission (repräsentativ für ein Gebiet von $6 \cdot 10^6$ km^2 in Nordamerika) (in 10^6 t Schwefel/a) mit a) aus natürlichen Quellen (Vulkanismus) USA 0,44, Kanada 0,32; b) anthropogene Quellen: USA 14,0, Kanada 2,1 (Fläche USA 9 350 000, Kanada 9 960 000 km^2). Davon werden in beiden Ländern etwa $57\% = 9,9 \cdot 10^6$ t S/a (= $0,513$ t S/a \cdot km^2) im Gebiet deponiert. Meszaros and Varhely (1977) geben die Gesamtemission für Zentraleuropa mit $3,1$ t S/ $\text{km}^2 \cdot$ a an und errechnen daraus für Gesamteuropa durchschnittlich $32,4 \cdot 10^6$ t S/a (Europa 10 500 000 $\text{km}^2 = 3,09$ t S/a \cdot km^2). Neumüller (nach Römpf 1975) nimmt für das Gebiet der BRD eine Immission von durchschnittlich $20,2$ g $\text{SO}_2/\text{m}^2 \cdot$ a (und $8,1$ g $\text{NO}_x/\text{m}^2 \cdot$ a) an. Nach Möller (1979) (zit. in Pauke und Lux 1982) werden in der Dübener Heide als einem der nicht-urbanen Immissionszentren 40 – 80 kg S/ha \cdot a (= 4 – 8 t S/a \cdot km^2) gemessen. Für die reine, trockene Luft an der Erdoberfläche nimmt man allgemein einen kon-

stanten Anteil von 0,03 Volumen-% CO_2 an. Nach Bögli (1978) beträgt er zur Zeit auf Meereshöhe durchschnittlich 0,035 %, wird aber in Bodennähe häufig überschritten. Durch eine nahezu generelle anthropogene Eutrophierung der aquatischen und terrestrischen Ökosysteme und mehr noch durch Verbrennung fossiler Energieträger ist der CO_2 -Gehalt der Erdatmosphäre ständig im Steigen begriffen.

Nach einer von Schoen et al. (1984) veröffentlichten Kartendarstellung liegt die großräumige Sulfatdeposition im Süd- und im Nordteil der BRD sowie in der nördlichen DDR zwischen 2,5 bis 5 $\text{g S/m}^2 \cdot \text{a}$, im Ruhrgebiet und im Ballungsraum Leipzig-Halle über 10 $\text{g S/m}^2 \cdot \text{a}$ und in den restlichen Gebieten beider Länder zwischen 5 und 10 $\text{g S/m}^2 \cdot \text{a}$. Das schließt jedoch lokal wesentlich höhere Werte in der Umgebung von Emissionszentren, wie Großstädten und Kohlekraftwerken nicht aus. Nach Psenner (1984) beschränken sich anthropogene Emission und Immission, territorial und klimatisch bedingt, bisher im wesentlichen auf die nördlich gemäßigte Zone der Erde, und es wurden (z. B., d. Verf.) im Jahre 1976 auf der Nordhalbkugel etwa 100 Millionen Tonnen Schwefel freigesetzt, „ein Wert, der die biogene Emission um etwa 100 % übersteigt“. Nach Haberle (1984) betrug die Emission in der BRD im Zeitraum 1954 bis 1982 nahezu konstant 2 Millionen t SO_2/a . Die Deposition von Schwefelverbindungen betrug 1980 (nach Georgii, zit. bei Haberle 1984) in der BRD 380 $\text{Val/m}^2 \cdot \text{a}$ (naß 60–125 und trocken 100–500) sowie 3,06 Mio t/a für das gesamte BRD-Gebiet.

„Die Prozentanteile von S-Verbindungen, N-Verbindungen und Cl^- als Säurebildner an der Gesamtdeposition (trocken und naß) ergeben: S = 83 %, N = 12 %, Cl^- = 6 %“ (Haberle 1984) (für das Gebiet der BRD, d. Verf.). An der Verkarstung sind also neben $\text{SO}_3^{--}/\text{SO}_4^{--}$ auch N-Verbindungen, Halogenwasserstoffe und CO_2 maßgeblich beteiligt. Stickoxide werden vor allem von Verbrennungsmotoren der Kraftfahrzeuge und von der chemischen Industrie emittiert. Während die SO_2 -Emission in der BRD im Zeitraum 1954 bis 1982 nahezu konstant blieb, stieg die NO_x -Emission im gleichen Zeitraum und Gebiet von 1 auf 3 Mio t/a an (Georgii, zit. bei Haberle 1984). Nach Angaben des gleichen Autors beträgt die Deposition dieser Stickstoffverbindungen jedoch nur 0,6 Mio t/a (Ursache hoher KFZ-Bestand in der BRD).

Neumüller (in Römpp 1975) gibt für die BRD im Jahre 1970 einen Wert an, aus dem sich eine durchschnittliche Immission von 8,1 $\text{g/m}^2 \cdot \text{a}$ NO_x errechnen läßt. Der relative Anteil der Stickstoffverbindungen am Phänomen „saurer Regen“ ist im Steigen begriffen, da sich die NO_x -Emission schwerer bekämpfen läßt (KFZ) als die SO_2 -Emission (Kraftwerke). CO_2 bzw. Kohlensäure gilt neben der physikalischen Lösungs-fähigkeit des Wassers als Hauptkomponente des natürlichen Verkarstungsprozesses in Form von Hohlraumbildung und Mineral-Neubildung (Karbonatkarst). Dabei wird der Einfluß natürlicher Emissionsquellen von $\text{SO}_2/\text{NO}_x/\text{HCl}$ nicht berücksichtigt (z. B. Bögli 1978).

„Die weltweite Nahrungsmittelproduktion entspricht etwa 3,2 % des globalen Kohlendioxid(CO_2)-Umsatzes der Photosynthese auf dem Land“ (Haberle 1984). Nach Rotty (zit. bei Garber u. Kempe 1981) wurden z. B. 1980 auf der Erde insgesamt 5,255 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in Form von CO_2 freigesetzt. Dabei blieb infolge Verknappung der fossilen Energieträger der Anstieg der CO_2 -Emission hinter den erwarteten Werten zurück. Der CO_2 -Gehalt der Luft stieg seit 1956 lediglich um 7,3 % (Garber und Kempe 1981). Die CO_2 -Freisetzung durch Waldrodung – insbesondere der tropischen Regenwälder – wird von verschiedenen Autoren mit 1 bis 3 Milliarden t/a CO_2 eingestuft. Weiterhin ist in der Bilanz der Verbleib von 1,1 bis 3,0 Gigatonnen/Jahr unklar („missing carbon“) (Garber und Kempe 1981). In diese Berechnung wurde jedoch wahrscheinlich noch nicht die CO_2 -Menge einbezogen, die bei der Neutralisation stärkerer Säuren aus anthropogenen Quellen ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{SO}_3$, HNO_x , HCl , ...) adäquat freigesetzt wird. Das wären z. B. für 0,146 Gigatonnen 1969 auf der ganzen Erde (Peu-

kert und Panning 1975) 0,116 Gigatonnen CO_2 . Dazu kommen noch die durch Stickoxide und Halogenwasserstoffe freigesetzten Mengen, jedoch insgesamt sicher weniger als 0,5 Gigatonnen/Jahr.

Die Deposition von Chlorverbindungen aggressiven Charakters (z. B. HCl-Freisetzung durch PVC-Verbrennung) betrug dagegen in der BRD 1980 nur $25 \text{ Val/m}^2 \cdot \text{a} = 900 \text{ mg HCl/m}^2 \cdot \text{a}$ bzw. 0,22 Mio t/a in der gesamten BRD (Haberle 1984).

3. Diskussion (immissionsbedingte Beschleunigung der Verkarstung)

Die Beschleunigung der Verkarstung durch anthropogene Immission von SO_2 , NO_x , CO_2 , HCl wird in Standardwerken der Speläologie und Karstkunde bisher nicht berücksichtigt (z. B. Trimmel 1968, Bögli 1978, Zötl 1974) und auch im speziellen Schrifttum beider Fachgebiete bisher kaum erwähnt. Arnold (1981) versucht anhand der von Neumüller (in Römpp 1975) genannten Werte für das Gebiet der BRD von $20,2 \text{ g SO}_2 (= 30,6 \text{ g H}_2\text{SO}_4)$ und $8,1 \text{ g NO}_x (= 11,7 \text{ g HNO}_2\text{HNO}_3)$ die Verkarstungsbeschleunigung zu errechnen und kommt dabei auf eine zusätzliche Lösung von $31,2 \text{ g CaCO}_3/\text{m}^2 \cdot \text{a}$, was bei $2,93 \text{ g/cm}^3$ Dichte des Kalksteins einen Hohlraum von $10,65 \text{ cm}^3/\text{a}$ entspricht. Dabei ist noch zu berücksichtigen, daß der CaCO_3 -Gehalt der verkarstungsfähigen Gesteine ca. 80–90 % kaum übersteigt. Während die Löslichkeit des CaCO_3 nur $0,015 \text{ g/l}$ beträgt, lösen sich unter gleichen Bedingungen (Wasser 20°C) 2 g/l CaSO_4 und 745 g/l CaCl_2 . Infolge größerer Löslichkeit dieser Salze erfolgt eine verstärkte Ca^{++} - und Mg^{++} -Auswaschung. Im Lockergesteinsbereich führt das zur allmählichen Erschöpfung der Pufferungskapazität der Böden. Der Kalkverlust landwirtschaftlicher Nutzflächen in Mitteleuropa wird mit $250\text{--}500 \text{ kg CaO/ha} \cdot \text{a} = 44,6\text{--}89,2 \text{ g Ca/m}^2 \cdot \text{a}$ angegeben (Brockhaus ABC, 1974) (Anteil durch anthropogene Immission unbekannt, der Verf.). Im Meerwasser gelöste und in der Lithosphäre deponierte Karbonate bilden ein praktisch unerschöpfliches Pufferungssystem, dessen Leistungsfähigkeit jedoch lokal sehr unterschiedlich ist und bereits mancherorts überbeansprucht wird. Von dessen „Entgiftungsfunktion“ ist der Fortbestand des Lebens auf der Erde abhängig. Andernfalls kommt es zur Schadstoffakkumulation, bzw. nach Erschöpfen des Pufferungsvermögens der Erdalkalimetalle werden andere, toxische Metalle (Aluminium, Eisen und andere Schwermetalle) als Puffer in Anspruch genommen und damit in den biogenen Stoffkreislauf zurückgeführt.

Nach Wechmann (1963) beträgt der Anteil der Ozeane an der Erdoberfläche $361 \text{ Mio km}^2 = 70,6 \%$, und diese umfassen $1,37 \cdot 10^9 \text{ km}^3$ Wasser mit 36% Gesamtsalzgehalt, davon 200 mg/l NaHCO_3 . Das entspricht $274 \text{ 000 Gigatonnen NaHCO}_3$ mit entsprechendem Pufferungsvermögen. Im Gegensatz dazu ist die Pufferungskapazität der Oberflächengewässer des Binnenlandes und des Grundwassers (Süßwasser) verhältnismäßig gering und unterliegt geologisch/petrographisch bedingt großen lokalen Unterschieden. Gebiete mit „sauren Urgesteinen“ und deren Verwitterungsprodukten, wie Granit, Porphyry, Basalt, ... liefern Böden und Wasser mit geringem Pufferungsvermögen. Viele industriefernen „Rauchschadensgebiete“ sind durch solche geologischen Verhältnisse gekennzeichnet, z. B. große Teile Schwedens (Overrein et al. 1981) und in der DDR das Westerzgebirge (Peukert 1974, Arnold 1983). In den Karbonat-Karstgebieten selbst ist eine Erschöpfung der Pufferungsfähigkeit kaum zu erwarten, doch werden Korrosion und Hohlraumbildung verstärkt, und es tritt eine Vergipsung des Karbonatkarstes ein. Die Ergebnisse dieses Prozesses sind wenig auffällig, zumal trotz grundsätzlicher Unterschiede des physikalisch-chemischen Prozesses der Verkarstung im Karbonat- und im Sulfatkarst in beiden die gleichen Karsterscheinungen auftreten (Zötl 1974). Ebenso werden Sulfat-, Nitrat-, Chlorid-Gehalte, ... ansteigen. In einem Beispiel (nach Arnold 1981) bei angenommen 700 mm/a Niederschlag und 300 mm/a

Abflußhöhe steigt der SO_4^{--} -Gehalt um 54 mg/l und der $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$ -Gehalt um 30 mg/l, was durchaus im Bereich der Gewässerverunreinigung durch sonstige anthropogene Quellen wie Düngung und deren Eutrophierungsfolgen liegt und deshalb nur noch an anthropogen wenig beeinflussten Standorten quantitativ nachweisbar ist. Im Sulfatkarst, welcher in der DDR gemessen am Weltmaßstab eine verhältnismäßig bedeutende Rolle spielt, ist dagegen kaum eine verstärkte Lösung zu erwarten, allenfalls als Folge von Mischwasserkorrosion nach Bögli (1978) durch Nitrate, Chloride usw. Beispielsweise steigert Kochsalzzugabe die Löslichkeit von Gips beträchtlich (Zötl 1974). Das wird allerdings durch immissionsbedingten Anstieg der Sulfatkonzentration teilweise egalisiert.

Konkrete Untersuchungen und Messungen zur immissionsbedingten Verkarstungsbeschleunigung im Karbonatkarst liegen nach meiner Kenntnis bisher nicht vor. Ebenso unbekannt, wenn auch von großer Bedeutung ist ihr Einfluß auf die Mineralbildung und -erhaltung, speziell in den sogenannten Tropfsteinhöhlen, von denen viele als Schauhöhlen genutzt werden. Legler (1978) stellte in der Kameruner Höhle bei Rübeland/Harz einen ungewöhnlich hohen Sulfatanteil der Höhlenwässer fest und führte diese auf Einwirkung von Oxydationsprodukten von Pyritstaub aus der nahegelegenen Schwefelkiesverarbeitung zurück. Das Vorhandensein von Gipskristallen in dieser Höhle kann der Verfasser aus eigener Anschauung bestätigen.

Da in Karbonat-Karstgebieten aufgrund der guten Pufferung die bekannten Schädwirkungen des sauren Regens, wie Gewässerversauerung und Waldsterben, nicht oder nur in abgeschwächter Form auftreten, liegen aus solchen Gebieten bisher wenig Untersuchungsergebnisse vor. In Auflistungen der Schädwirkungen des sauren Regens für Ökosysteme, Organismen und den Menschen wird die Verkarstungsbeschleunigung nicht erwähnt. Auf diesem Gebiet hat sich ein großer Nachholebedarf an Untersuchungen ergeben, der von Karstforschern und Speläologen gemeinsam abgebaut werden muß.

4. Zusammenfassung

Große Teile der festen Erdoberfläche werden von verkarstungsfähigen Gesteinen bedeckt. Die seit der Jahrhundertwende in der nördlichen Hemisphäre der Erde sprunghaft angewachsene Emission und Deposition von Säurebildnern und Säuren, wie SO_2/SO_3 , NO_x , CO_2 , HCl , ... läßt eine erhebliche Beschleunigung der Verkarstung der Karbonat-Karstgebiete (Kalkstein, Dolomit, Marmor, ...) erwarten. Dies wird in einem Rechenbeispiel dargestellt. Daraus wird ein erheblicher Nachholebedarf zur Untersuchung der Problematik deutlich.

Schrifttum

- Arnold, A.: Theoretische Betrachtungen zur anthropogenen Beschleunigung des Verkarstungsprozesses durch Immission saurer Gase, Aerosole und Stäube. *Die Grotte* 4 (1981) 4, 17–21. (Nachdruck mit Ergänzungen in: *Mitt. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher* (München) 30 (1984) 2, 24–26.)
- Arnold, A.: Zur Veränderung des pH-Wertes der Laichgewässer einheimischer Amphibien. *Arch. Naturschutz u. Landschaftsforsch.* (Berlin) 23 (1983) 1, 35–40.
- Bögli, A.: *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Berlin, Heidelberg, New York 1978. Brockhaus-ABC Landwirtschaft. Leipzig 1974.
- Galloway, J. N., and D. M. Whelpdale: An atmospheric sulfur budget for Eastern North America. *Atmospheric Environment* 14 (1980) No. 4, 409–417.
- Garber, W., und S. Kempe: Dem Klima bleibt eine Galgenfrist. Der Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre steigt langsamer als vermutet. *Die Welt* vom 17. 10. 1981, Nr. 242.
- Haberle, M.: Schadstoffe in der Atmosphäre und Waldschäden – ökologische und ökonomische Aspekte. *Allgemeine Forst-Zeitschrift* (München) 39 (1984) Nr. 30/31, 761–766.

- Legler, C.: Hydrochemische Untersuchungen in der Kameruner Höhle bei Rübeland/Harz. Fundgrube **XIV** (1978) 3/4, 82–84 und 93–100.
- Meszaros, E., and G. Varhely: An attempt to estimate the continental sulphur emission on the basis of atmospheric measurements. *Atmospheric Environment* **11** (1977) No. 2, 169–172.
- Mitteilungen d. Verb. dt. Höhlen- u. Karstforscher (München) **30** (1984) 2, 37. Mammoth Cave nun 471 km lang.
- Overrein, L. N., H. M. Seip und A. Tollan: Acid precipitation-effects on forest and fish. Final report of the SNSF-project 1972–1980. Oslo 1981.
- Paucke, H., und E. Lux: Physiologische und ökologische Betrachtungen zur Wirkung von Immissionen auf Wälder. *Hercynia N. F.*, Leipzig **19** (1982) 2, 249–272.
- Peukert, V.: Untersuchungen des Einflusses atmosphärischer Verunreinigungen auf die Wasserbeschaffenheit der Gewässer. *Wasserwirtschaft/Wassertechnik* **24** (1974) 5, 158–161.
- Peukert, V., und C. Panning: Einfluß anorganischer Luftverunreinigungen auf die Wasserbeschaffenheit von Trinkwassertalsperrren. *Acta hydrochim. hydrobiol.* **3** (1975) 5/6, 545–552.
- Psenner, R.: Saurer Regen – eine Gefahr für unsere Gewässer? *Österreichs Fischerei* **37** (1984) 7, 184–194.
- Römpps Chemie-Lexikon, Stuttgart 1975.
- Schade, H.: Die erwartete Schwefeldioxid-Emission aus Feuerungsanlagen in der BRD bis zum Jahre 1985 unter Berücksichtigung des Energieprogrammes 1974 der Bundesrepublik. *Schr.-Reihe Landesanstalt für Immissions- und Bodennutzungsschutz* (Essen) Nr. 35. Verl. Girardet 1975, 42–49.
- Schoen, R., R. Wright und M. Krieter: Gewässerversauerung in der Bundesrepublik Deutschland. Erster regionaler Überblick. *Naturwissenschaften* **71** (1984) 95–97.
- Trimmel, H.: Höhlenkunde. Braunschweig 1968.
- Völker, R.: Rekordhöhlen. *Die Grotte* **5** (1982) 1, 22–23.
- Wechmann, A.: Hydrologie. Berlin 1964.
- Zötl, J. G.: Karsthydrogeologie. Wien, New York 1974.

Andreas Arnold

DDR - 7010 Leipzig
Nordstraße 39/551