

Morphologie des Tropfsteins Situationsbericht

Von Herbert W. Franke (Puppling, BRD)

Mein Versuch, eine Übersicht über den Forschungsstand im Bereich der „Morphologie des Tropfsteins“ zu geben, kann nicht frei von eigenen, subjektiven Anschauungen sein, weil ich mich mit dem Thema schon vor etwa 30 Jahren zu beschäftigen begann. Im Rahmen einer Hubert Trimmel gewidmeten Festausgabe sei dieser Exkurs aber gestattet – umso mehr, als ich von ihm erste Hinweise auf Tropfsteingenerationen und damit auf die Aspekte mit dem Kalksinter verbundener Probleme der Chronologie und Stratigraphie erhielt. Ich möchte ihm auch an dieser Stelle für sein großes Interesse an meinen speläologischen Arbeiten und für viele fruchtbare Anregungen danken.

Die Formenwelt des Tropfsteins fesselte mich, soweit ich mich zurückerinnern kann, nicht nur aus wissenschaftlichen, sondern auch aus ästhetischen Gründen. Daraus erwuchs der Wunsch, eine dahintersteckende Ordnung zu finden – damals, als man nicht nur in Speläologenkreisen von „chaotischen Gestalten“ sprach, ein scheinbar aussichtsloses Unternehmen. Die wenigen wissenschaftlichen Versuche, die vorher in dieser Richtung unternommen worden waren, gingen von Kristallisationsprozessen des Kalzits aus. Mit ihnen ließen sich zwar Mikrostrukturen erfassen, nicht aber die den Speläologen mehr interessierenden „Makroformen“, also alle mit freiem Auge sichtbaren Höhlengebilde. Sie kommen als Kegel, Kerzen, Vorhänge und auch in verschiedenen komplizierteren Gestalten vor. Kristallisationsprozesse sind nicht zur Erklärung dieser Formen geeignet, weil es sich um „dissipative Strukturen“ im Sinn von Manfred Eigen handelt, worunter man all jene versteht, die sich nicht unter dem Einfluß innerer, sondern äußerer Kräfte bilden. Die Idee, Gesteinsformen aus physikalischen und chemischen Erscheinungen heraus erklären zu wollen, erschien in den Fünfzigerjahren so ungewöhnlich, daß selbst bekannte Fachleute die ersten Resultate ablehnten; so reagierte der Nestor der belgischen Speläologie, P.-G. Liégeois, anläßlich des in Wien abgehaltenen 3. Internationalen Speläologenkongresses 1961 darauf mit der Bemerkung, daß sich „die Natur nicht berechnen ließe“.

Die Grundlagen der Sintermorphologie

Einer der meistgeäußerten Einwände gegen solche theoretischen Zielvorstellungen bezog sich auf die große Zahl von Einflußfaktoren, die an der Entstehung des Tropfsteins wirksam sind; es sei nicht möglich, alle zu berücksichtigen. Es ließ sich hingegen nachweisen, daß es ausreicht, sich auf jene Faktoren zu beschränken, die den größten Einfluß auf das Sinterwachstum haben. Sind nur sie wirksam, entstehen die sogenannten „Normalformen“, also unter der Voraussetzung idealer Bedingungen – in stationärem Zustand und frei von Stör-

größen. Selbst unter diesen Vereinfachungen gestaltete sich das Problem mathematisch noch so unübersichtlich, daß der Einsatz von Näherungsmethoden nötig war.

Die für die Sinterbildung wichtigsten physikalisch-chemischen Prozesse sind im Grunde genommen dieselben, die auch bei der Kalkauflösung im Karst eine Rolle spielen. Es war zuerst Alfred Bögli (u. a. 1954), der die Grundlagen feststellte. Weitergehende Erkenntnisse ergaben sich aus dem erfolgreichen Versuch, mit der Radiokohlenstoffmethode Tropfsteine zu datieren. Die Ergebnisse bestätigten, daß sich normalerweise Kohlendioxid nicht durch Verdunstung, sondern durch Ausgasung aus Kalklösungen ausscheidet. Verantwortlich ist dafür der Ungleichgewichtszustand, eine Übersättigung an Bikarbonat, der zustande kommt, sobald das durch die Gesteinsklüfte sickernde Wasser in einen luftgefüllten Höhlenraum eintritt. Das Wasser wählt nun, der Gravitation unterworfen, den Weg der größten Neigung. Währenddessen fällt Kalk unterhalb der Decke aus oder auch, nach dem Abtropfen, auf dem Boden. Dabei ergeben sich grundlegende Unterschiede zwischen Boden- und Deckensinterformen. Im Fall der Tropfsteinbildung in der Bodenregion sind es dünne Wasserfilme – 1/10 mm dick –, in denen Kalk ausfällt. Gegenüber dem für jede Flüssigkeitsbewegung gültigen Normalfall tritt hier die Besonderheit ein, daß die ab rinnende Lösung ihren Weg durch die Abscheidung von Kalk selbst verändert.

Auf der Basis dieser Überlegungen ließen sich die Formprinzipien des Tropfsteins zumindest qualitativ klären. Die Ergebnisse wurden in einer Reihe von Artikeln unter dem Titel „Beiträge zur Morphologie des Höhlensinters“ in dieser Zeitschrift veröffentlicht (z. B. H. W. Franke, 1956, 1961, 1962). Besondere Aufmerksamkeit verdient der sogenannte Kerzenzapfen, der in seiner zylindrischen Form der „Normalform“ sehr nahekommt. An diesem speziellen Typ ließen sich – insbesondere auch im Zusammenwirken mit Radiokohlenstoffmessungen – die theoretischen Resultate bestätigen. Eines der damals wichtigsten Resultate war, daß Bodenzapfen nicht nach dem Vorbild der Wachstumsringe von Bäumen aufgebaut sind, sondern sich aus übereinandergesetzten haubenförmigen Schichten aufbauen. An ihrem Beispiel zeigt sich die Besonderheit der Stratigraphie des Bodensinters; dabei ergeben sich gegenüber anderen Sedimenten weitaus kompliziertere Verhältnisse.

In der ersten, qualitativen Näherung entspricht die Morphologie des Tropfsteins weitgehend jener anderer Formen, die bei der Erstarrung ab rinnender Flüssigkeiten entstehen, beispielsweise des Formenschatzes von Eis und Wachs. Im nächsten Näherungsschritt muß der spezielle Fall der Ausscheidung aus Salzlösungen berücksichtigt werden. Erst mit einem dritten Näherungsschritt erfaßt man die Besonderheiten der Bildung von Höhlensinter, indem die für Kalklösungen gültigen Kenngrößen für Lösungsgleichgewichte, Diffusionen und Oberflächenprozesse in Ansatz gebracht werden.

An dieser Stelle war die Grenze dessen erreicht, was auf privater Basis, ohne die besonderen Hilfsmittel eines Forschungs- oder Lehrinstituts, möglich war. Als besonders erschwerend hatten sich die umständlichen Berechnungen erwiesen, für die damals nicht einmal ein Taschenrechner zur Verfügung stand.

Außerdem waren die dynamischen Erscheinungen der Kalkauflösung und -abscheidung theoretisch noch nicht ausreichend bekannt. Das galt insbesondere für die in der Umsetzung langsamste Reaktion, durch die die Geschwindigkeit der Kalkausscheidung bestimmt ist. Um zumindest eine Abschätzung der quantitativen Situation zu erreichen, wurden die Verhältnisse allerdings schon damals unter verschiedenen naheliegenden hypothetischen Annahmen angenähert durchgerechnet, von denen sich später eine als zutreffend erwies.

Ausweitung der Theorie, experimentelle Absicherung

Die Theorie der Tropfsteinbildung, so unvollkommen sie bis in die Mitte der Siebzigerjahre auch noch war, erbrachte doch die erste fundierte Grundlage, um die Wachstumsprozesse des Sinters mit allgemeineren geologischen und klimatologischen Erscheinungen in Beziehung zu bringen. Auf diese Weise wurde erstmals sichergestellt, daß Tropfsteinbildung vor allem in Warmzeiten erfolgt und während Kaltzeiten Wachstumspausen eintreten. Damit ergab sich ein enger Zusammenhang mit den Klimafolgen des Eiszeitalters, denen in den letzten Jahrzehnten wachsendes wissenschaftliches Interesse entgegengebracht wird. Auch unter diesem Aspekt gewann die Sintermorphologie weit über den engeren Bereich speläologischer Fragestellung hinausreichende Bedeutung – bestand doch die Hoffnung, Tropfsteinformen als Indikatoren für Klima und andere Umwelterscheinungen zur Bildungszeit zu benutzen.

Einen wesentlichen Beitrag zur Klärung der Verhältnisse hat die Radiokohlenstoffmethode geleistet, obwohl es lange dauerte, bis die schon 1951 aufgedeckte Möglichkeit, sekundäre Kalk zu datieren, durch K. O. Münnich an der Universität Heidelberg ihre experimentelle Bestätigung fand (H. W. Franke, 1951 a, 1951 b). Die breite Anwendung wurde durch Zusammenarbeit mit M. A. Geyh im Radiokohlenstofflabor des Niedersächsischen Landesamtes für Bodenforschung in Hannover möglich. Die Ergebnisse bestätigten einerseits mehrere Voraussagen der morphologischen Theorie, andererseits ergeben sich aus ihnen grundlegende Anweisungen zur Probenentnahme (vgl. u. a. H. W. Franke, K. O. Münnich, J. C. Vogel 1963; H. W. Franke 1966 b).

Zu einer Erweiterung des Modells kam es durch Berechnungen von R. L. Curl, der einen Versuch unternahm, vermutete prinzipielle Mängel der theoretischen Grundlage aufzudecken. Letztlich mußte er sie aber bestätigen, doch hatte er bei dieser Gelegenheit den Effekt der „Minimum-Durchmesser-Stalagmiten“ erkannt. Während in der ursprünglichen Fassung der Theorie ein kontinuierlicher Zufluß der Kalklösung vorausgesetzt war, berücksichtigte er die Diskontinuität des Tropfenfalles und stellte fest, daß es unter normalen Umständen keine Bodenzapfen mit Durchmessern unter drei Zentimetern geben sollte.

Eine Einschränkung erfahren alle diese Modelle durch die Annahme geringer Tropfhöhen – im Realfall sind Störeffekte durch seitliche Abweichungen während des Falls oder dynamische Prozesse beim Zerstieben infolge des Aufpralls zu berücksichtigen. I. Gams bezog diese Erscheinungen ein und erhielt – wie zu erwarten war – größere Stalagmitendurchmesser.

Außer dem radioaktiven Kohlenstoffisotop haben sich auch andere, stabile und instabile Isotope als aufschlußreiche Untersuchungsobjekte erwiesen; aus ihren Konzentrationen versucht man u. a. Schlüsse auf Umweltparameter der Vorzeit zu ziehen. Ein weiterer Impuls wurde durch den breiten Einsatz der Höhlensinterdatierung mit der Uran/Thorium-Methode ausgelöst.

Quantitative Modelle des Sinterwachstums

Nachdem um 1970 ein vorläufiger Abschluß des theoretischen Modells der Tropfsteinmorphologie erreicht schien, leitete W. Dreybrodt (1980, 1981 a, 1981 b) rund zehn Jahre später den noch ausstehenden quantitativen Ausbau ein. Als äußere Voraussetzungen standen ihm ein kleines Forschungsteam an der Universität Bremen und natürlich auch Computer für die komplizierten Berechnungen zur Verfügung. Inzwischen waren auch die benötigten, die Dynamik der Kalkabscheidung bestimmenden Kenngrößen ermittelt worden; sie gehen auf Arbeiten von M. M. Reddy und G. H. Nancollas zurück und wurden später durch L. N. Plummer verbessert. Nach Dreybrodts Vorstellung laufen in den dünnen, auf der Oberfläche des Höhlensinters stehenden oder sich langsam bewegenden Wasserfilmen folgende Prozesse ab:

Im ersten, sehr schnellen und nach zehn Sekunden beendeten Schritt geht das überschüssige Kohlendioxid aus dem Wasserfilm aus. In der nun vorliegenden an Kalziumkarbonat übersättigten Lösung kommt es zu verschiedenen Wechselwirkungen der in der Lösung vorhandenen Ionen sowie zu Diffusionsprozessen, die zur Ablagerung von Kalk führen.

Mit Hilfe dieses Modells konnte W. Dreybrodt quantitative Angaben über die Wachstumsgeschwindigkeit des Tropfsteins gewinnen, die gut mit den Beobachtungen der Felduntersuchungen übereinstimmen. Mit Hilfe computergraphischer Simulation stellte er Stalagmitenquerschnitte in verschiedenen Phasen des Wachstums unter veränderlichen Bedingungen dar. Außerdem begann er sich in seinem Institut auch experimentell mit der Abscheidung und der Lösung von Kalk zu beschäftigen.

Bei der Bearbeitung des Tropfsteinproblems ergab sich schon früh, daß Abscheidung und Auflösung von Kalk – auch aus dem Aspekt der physikalisch-chemischen Umsetzung – komplementäre Prozesse sind. Im Augenblick arbeitet die Gruppe in Bremen an der Lösung eines allgemeinen Gleichungssystems, das alle Prozesse gleichzeitig berücksichtigen soll. Als Ergebnis wird eine umfassende Theorie der Kalkabscheidungen, aber auch der Kalklösungsprozesse erwartet, die zum Verständnis von Karstprozessen auf physikalisch-chemischer Grundlage beitragen wird. Ein spezielles Problem aus dem behandelten Fragenkreis, mit dem sich auch der Verfasser beschäftigt, behandelt die Erscheinung der Laugungskolke und ihrer Beziehung zu paläoklimatischen Erscheinungen.

Ausblick

Während Studien der Morphologie des Höhlensinters zunächst allenfalls das Interesse spezialisierter Speläologen fanden, hat sich seit einigen Jahren das

Schwergewicht der Aktivitäten aus dem Bereich der Höhlenkunde zu umfassenden paläoklimatischen Forschungen hinbewegt. Diese Situation bringt eine Änderung im Publikationsmodus mit sich: Während die ersten Beiträge in deutscher Sprache erschienen und englischsprachigen Wissenschaftlerkreisen weitgehend unbekannt blieben, werden die heutigen Originalarbeiten ausnahmslos in englischen oder US-amerikanischen Fachzeitschriften publiziert, die von deutschsprachigen Speläologen kaum gelesen werden. Auch Dreybrodt veröffentlichte seine wichtigsten Arbeiten zuerst in Englisch.

Alles in allem hat sich der von Anfang an vertretene Standpunkt bestätigt, daß viele in der Speläologie diskutierte Fragen von umfassendem wissenschaftlichen Interesse sind. Diesem Umstand gemäß ergeben sich auch von der Morphologie des Höhlensinters Brückenschläge zu anderen Disziplinen, z. B. der Paläontologie und der Vorgeschichte. Im Zuge der Weiterentwicklung isotopenphysikalischer und radiochronologischer Methoden ist zu erwarten, daß die Höhlen – auch aus anderen Aspekten heraus, als jenen des Sinters – Beachtung finden werden. Unter den Erscheinungen, die in diesem Zusammenhang Aufmerksamkeit verdienen, sind neben den Höhlensedimenten (z. B. Höhlenlehm) auch Raumformen (z. B. Kolke, Canyons) zu nennen. Die Anwendung physikalischer und chemischer Methoden in der Höhlenkunde hat in den letzten Jahrzehnten einen bemerkenswerten und verdienten Aufschwung genommen; es wäre zu wünschen, daß sie auch innerhalb fachspeläologischer Untersuchungen häufiger eingesetzt werden.

Literatur:

- Bögli, A. (1954): Das Verhalten von Karbonaten in der Natur. Die Höhle 5, 3/4, 36.
- Curl, R. L. (1973): Minimum Diameter Stalagmites. The NSS Bulletin 35, 1–9.
- Dreybrodt W. (1980): Deposition of Calcite from thin Films of Natural Calcareous Solutions and the Growth of Speleothems. Chemical Geology 29, 89–105.
- Dreybrodt W. (1981 a): The Kinetics of Calcite Precipitation from thin Films of Calcareous Solutions and the Growth of Speleothems: Revisited. Chemical Geology 32, 237–245.
- Dreybrodt W. (1981 b): Physikalisch-chemische Prozesse in natürlichen Kalklösungen und das Wachstum von Stalagmiten. Laichinger Höhlenfreund 16, 7–16.
- Dreybrodt, W., Lamprecht G. (1981): Computer-Simulationen des Wachstums von Stalagmiten. Die Höhle 32, 11–21.
- Franke, H. W. (1951 a): Altersbestimmungen von Kalzitkonkretionen mit radioaktiven Kohlenstoff. Naturwissenschaften 38, 527.
- Franke, H. W. (1951 b): Altersbestimmungen an Sinter mit radioaktivem Kohlenstoff. Die Höhle 2, 62–64.
- Franke, H. W. (1956): Beiträge zur Morphologie des Höhlensinters I. Die Höhle 7, 35 f.
- Franke, H. W., Münnich, K. O., Vogel, J. C. (1958): Auflösung und Abscheidung von Kalk – C^{14} -Datierung von Kalkabscheidungen. Die Höhle 9, 1–5.
- Franke, H. W., Münnich, K. O., Vogel, J. C. (1959): Erste Ergebnisse von Kohlenstoff-Isotopenmessungen an Kalksinter. Die Höhle 10, 17–22.
- Franke, H. W. (1961): Formgesetze des Höhlensinters. Atti del Symposium Internazionale di Speleologia, Como 1960, 185–209.
- Franke, H. W. (1961 b): Der schichtenweise Aufbau der Bodenzapfen (Beiträge zur Morphologie des Höhlensinters III). Die Höhle 12, 8–12.

- Franke, H. W.* (1962 a): Die Beziehungen zwischen Versinterung und Korrosion (Beiträge zur Morphologie des Höhlensinters IV). *Die Höhle* 13, 77–82.
- Franke, H. W.* (1962 b): Radiokarbondatierung an Sinterproben der Griffener Tropfsteinhöhle. *Carinthia* II, 152¹, 108–110.
- Franke, H. W.* (1963 a): Formprinzipien des Tropfsteins. Akten des 3. Internationalen Kongresses für Speläologie 1961 in Wien–Obertraun–Salzburg, II, 63–71.
- Franke, H. W.* (1963 b): Formgesetze der Korrosion. *Jahreshefte für Karst- und Höhlenkunde* 18, 3, 207–224.
- Franke, H. W., Münnich, K. O., Vogel, J. C.* (1963): Neue Ergebnisse der Radiokarbonbestimmungen an Höhlensinter. Akten des 3. Internationalen Kongresses für Speläologie 1961 in Wien–Obertraun–Salzburg, IV, 69–71.
- Franke, H. W.* (1966 a): Ein speläologischer Beitrag zur postglazialen Klimageschichte. *Eiszeitalter und Gegenwart* 17, 149–152.
- Franke, H. W.* (1966 b): Zur Entnahme von Sinterproben für Radiokarbondatierungen. *Die Höhle* 17, 92–95.
- Franke, H. W., Geyb, M. A.* (1968): Übergeordnete Gesichtspunkte bei der Auswahl von Sinterproben für ¹⁴C-Datierungen. *Der Aufschluß* 19, H. 4, 89 f.
- Franke, H. W., Geyb, M. A.* (1969): Neue Radiokohlenstoffdaten aus fränkischen Höhlen. *Geol. Blätter NO-Bayern* 19, 168–173.
- Franke, H. W., Geyb, M. A.* (1970): Isotopenphysikalische Analysenergebnisse von Kalksinter – Überblick zum Stand ihrer Deutbarkeit. *Die Höhle* 21, 1–9.
- Franke, H. W.* (1971): Morphologie und Stratigraphie des Tropfsteins – Rückschlüsse und Größen des Paläoklimas. *Geol. Jb.* 89, 473–501.
- Franke, H. W., Geyb, M. A., Trimmel, H.* (1971): Ergebnisse der Radiokohlenstoffdatierung von Sintergenerationen aus der Großen Kollerhöhle bei Winzendorf, (NÖ.). *Mitt. Österr. Geogr. Ges.* 113, 269–276.
- Franke, H. W.* (1974): Sub Minimum Diameter Stalagmites. *The NSS Bulletin* 37, 1, 17 f.
- Franke, H. W., Geyb, M. A.* (1970 a): Zur Wachstumsgeschwindigkeit der Stalagmiten. *Atompraxis* 16, 1, 46–48.
- Franke, H. W., Geyb, M. A.* (1971): Radiokohlenstoff-Analysen an Tropfsteinen. *Umschau in Wissenschaft und Technik* 71, 3, 91.
- Franke, H. W.* (1975): Correspondence between Sintering and Corrosion. *Ann. Spéléo.* 30, 4, 665–675.
- Gams, I.* (1982): Grundlage zur Erforschung der Stalagmitenformen. *Hölloch-Nachrichten* 5, 41–46.
- Geyb, M. A., Franke, H. W., Dreybrodt, W.* (1982): Anomal große $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Hochgebirgssinter. *Hölloch-Nachrichten* 5, 49–61.
- Geyb, M. A.* (1983): Physikalische und chemische Datierungsmethoden in der Quartärforschung. *Clausthaler Tektonische Hefte* 19, 1–163.
- Hennig, G., Grün, R., Brunnacker, K.* (1983): Speleothems, travertines and paleoclimats. *Quaternary Research* 19, (im Druck).
- Münnich, K. O., Vogel, J. C.* (1959): C¹⁴-Altersbestimmung von Süßwasser-Kalkablagerungen. *Naturwissenschaften* 46, 5, 168.
- Trimmel, H.* (1967): Die Große Kollerhöhle bei Emmerberg, (NÖ.) – ein Beispiel für den geologischen Aussagewert des Höhlensinters. *Die Höhle* 18, 13–17.

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Herbert W. Franke, Puppling, Haus 40, D-8195 Egling, BRD.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 1984

Band/Volume: [035](#)

Autor(en)/Author(s): Franke Herbert W.

Artikel/Article: [Morphologie des Tropfsteins Situationsbericht 141-146](#)