

Computer-Simulationen des Wachstums von Stalagmiten

Von Wolfgang Dreybrodt und Günther Lamprecht (Bremen)

Stalagmiten entstehen aus auftropfendem kalkreichem und mit Kohlendioxid angereicherterem Wasser. Dieses Wasser beginnt seinen Weg zur Höhle als Regenwasser und nimmt beim Durchsickern der über der Höhle liegenden Vegetationsschichten Kohlendioxid auf. Der Kohlendioxidgehalt dieser obersten Bodenschichten kann bis zum Hundertfachen höher sein als in der Atmosphäre. Das so mit Kohlendioxid angereicherte Wasser löst auf seinem Weg durch das Kalkgestein Kalk auf. Tritt es in einen unterirdischen Hohlraum ein, so gibt es in der kohlendioxidärmeren Höhlenluft Kohlendioxid ab und wird so mit Kalk übersättigt. Der nun ausfallende Kalk bildet beim Abrinnen des Wassers Höhlensinter in all seinen phantastischen Formen und beim Auftropfen die unterschiedlichsten Stalagmiten.

Es ist aber nicht nur die einzigartige Schönheit dieser Formen, die die Beschäftigung mit Speleothemen interessant macht. In Stalagmiten sind in der Form ihrer Jahresschichten, in ihrer Wachstumsgeschwindigkeit und in ihren Formänderungen während ihres Wachstums Informationen über die Umwelt- und Klimabedingungen eingeschrieben. Könnten wir dieses steinerne Geschichtsbuch lesen, so könnten wir vielleicht wichtige Aufschlüsse über die Umweltbedingungen der letzten 30 000 Jahre erhalten.

Nachdem in letzter Zeit die physikalischen und chemischen Grundlagen der Wachstumsgeschwindigkeit von Stalagmiten (1, 2) erkannt worden sind, ist es nur folgerichtig zu überlegen, wie ihre Formen entstehen. Wir haben daher in einem ersten Schritt versucht, das Wachstum von Stalagmiten mit einem einfachen Ansatz zu beschreiben und es durch Berechnungen in einer Rechenanlage zu simulieren.

Das Wachstum von Stalagmiten hängt wesentlich ab von der Wasserzufuhr und davon, wie das auftropfende Wasser als Wasserfilm vom Tropfstein abrinnt. Wir können zunächst zwei Fälle unterscheiden:

1. Die Wasserzufuhr ist kontinuierlich. Es bildet sich ein dicker, schnell ablaufender Wasserfilm auf der gesamten Oberfläche des Stalagmiten. In diesem Falle ist die Verweilzeit des Wassers sehr kurz. Es kann daher nur wenig Kalk abscheiden. Weil sich daher die chemische Zusammensetzung aber nur wenig ändert, ist die Abscheidungsgeschwindigkeit auf der gesamten Oberfläche gleich groß. Der Stalagmit zeigt einen wandsinterartigen Überzug (1). Abb. 1 zeigt den Längsschnitt eines solchen Stalagmiten. Der innere Kern entspricht einem haubenförmig gewachsenen Stalagmiten, der später durch hohe Wasserzufuhr von einer wandsinterartigen Schicht überzogen wurde.
2. Der zweite Grenzfall liegt vor, wenn Wasser in großen Zeitabständen auftropft. Es bildet sich dann nach dem Auftropfen ein an der Auftropfstelle etwa 0,1 mm dicker Wasserfilm, der sehr langsam am Stalagmiten abläuft und dabei Kalk absetzt. Da der Film nach außen hin dünner wird, und außerdem

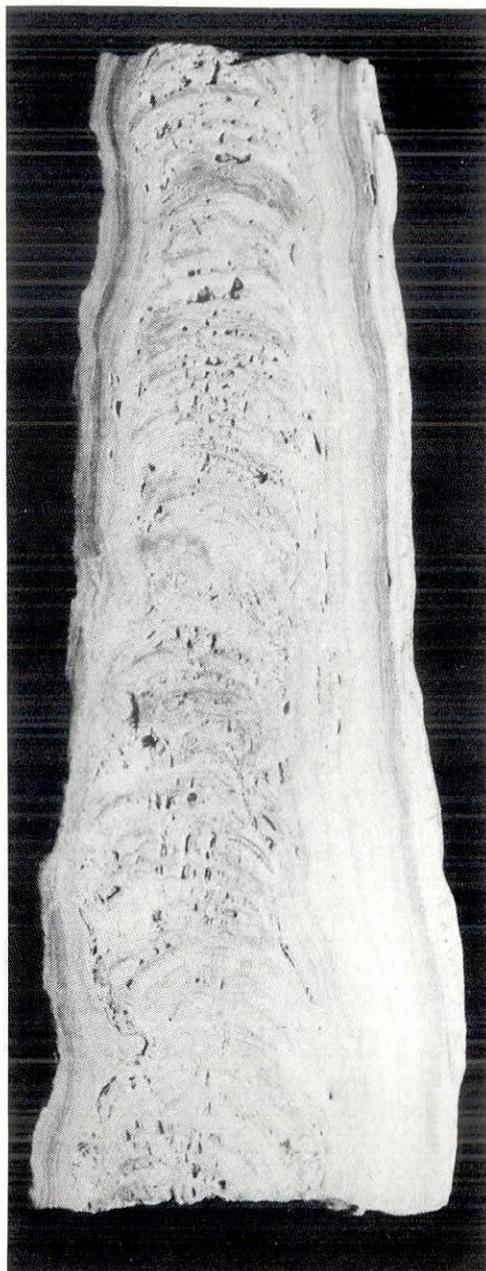


Abb. 1

das nach außen rinnende Wasser bereits Kalk abgesetzt hat, nimmt die pro Zeit und Flächeneinheit abgeschiedene Kalkmenge von innen nach außen ab. Dies führt dazu, daß der Stalagmit nur noch in einem haubenförmigen Bereich an seinem oberen Ende wächst.

Beide Grenzfälle, aber auch alle Zwischenbereiche, können nun in der Höhle in unmittelbarer Nachbarschaft vorkommen, weil die Wasserzufuhr durch eine sehr enge Kluft im Gestein nur durch langsames Tropfen erfolgt, an einer weiter geöffneten Kluft aber zur gleichen Zeit durch sehr schnelles Tropfen, d. h. kontinuierliche Wasserzufuhr, auftreten kann. Der Vergleich des Wachstums von Tropfsteinen ist daher nur möglich, wenn die genauen Bedingungen der Wasserzufuhr bekannt sind.

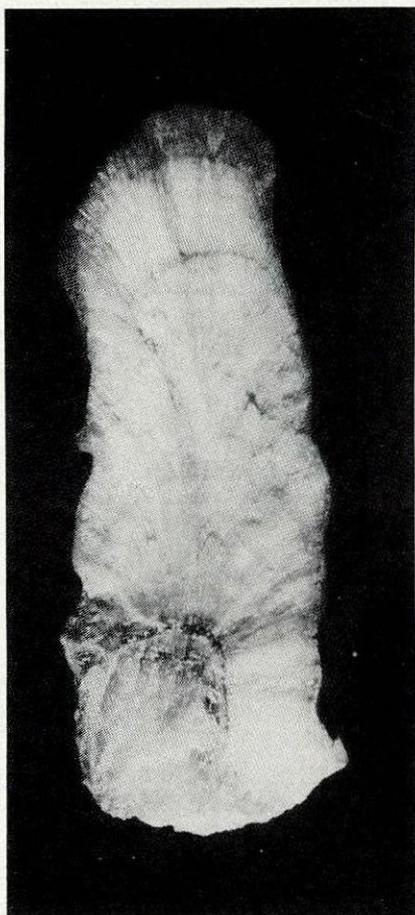


Abb. 2

Ein wichtiges, für alle Kristallisationsprozesse geltendes Prinzip gilt nun für die Kalkausscheidung. Das Wachstum erfolgt immer und an allen Stellen des Tropfsteines senkrecht zur jeweiligen Oberfläche. Dieses Prinzip besagt nichts anderes, als daß bei Kristallisationsprozessen sich Flächen herausbilden, auf denen sich dazu parallele, neue Kristallschichten aufbauen. Die Abbildung 2 zeigt einen in einer Höhle in Mallorca gefundenen, in der Längsrichtung gebrochenen Stalagmiten. Man sieht deutlich, daß die nadelförmigen Kristalle, aus denen der Stalagmit gewachsen ist, senkrecht auf den Schichtlinien und senkrecht auf der Außenfläche stehen.

Dieses Prinzip und die Tatsache, daß die Kalkabscheidung auf der Oberfläche des Stalagmiten von innen nach außen abnimmt, bilden nun die Basis für unsere Berechnung der Form des wachsenden Stalagmiten. Unter dieser Bedingung kann man nämlich eine einfache geometrische Konstruktion angeben, mit deren Hilfe man von einer beliebig vorgegebenen Fläche aus das Wachsen des Stalagmiten erhält. Zur Vereinfachung beschränken wir uns auf zwei Dimensionen, d. h., wir betrachten das Wachstum entlang Längsschnitlinien der Unterlage und des Stalagmiten. In Abbildung 3 seien die Punkte P_1 bis P_m Punkte aus

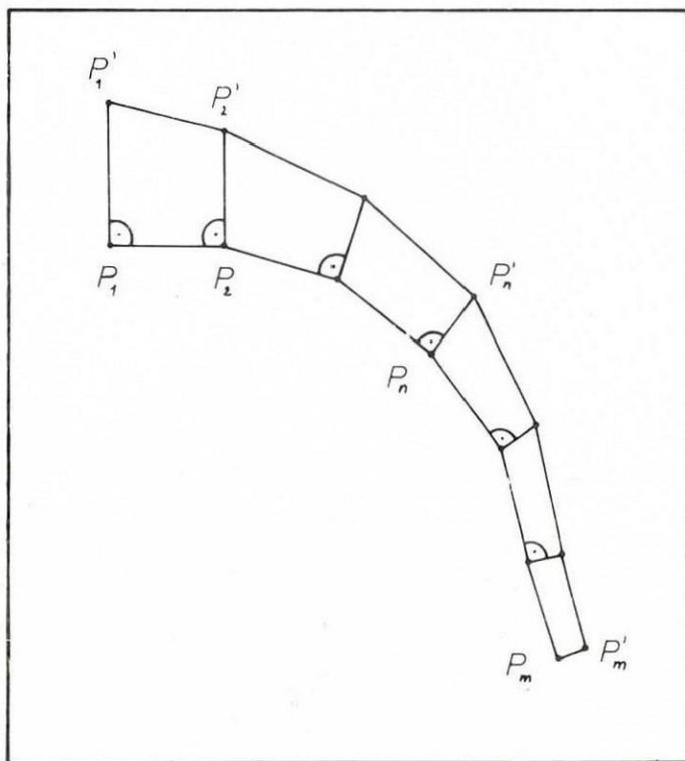


Abb. 3

Längsschnitten durch die Unterlage, auf der der Stalagmit wächst. Wenn wir nur genügend solcher Punkte wählen, können wir die Form der Unterlage gut durch einen Sehnenzug zwischen P_1 bis P_m annähern.

Die zu einer späteren Zeit sich herausbildende Form erhalten wir durch folgende Konstruktionsschnitte.

1. Wir errichten die Senkrechte in allen Punkten $P_1 \dots P_m$. Dies simuliert die zur jeweiligen Fläche senkrechte Wachstumsrichtung.
2. Wir nehmen nun an, daß P_1 Auftropfpunkt des Wassers ist. Dann ist die Länge des Streckenzuges P_1 bis P_n die Entfernung vom Auftropfpunkt.
3. Wir nehmen an, daß die Dicke R der pro Zeiteinheit abgeschiedenen Kalkschicht eine Funktion dieses Abstandes ist, also $R = R(P_1 P_n)$. Dann erhalten wir die nach einer Zeit ΔT entstandene Oberfläche durch Abtragen der Strecke $R(P_1 P_n) \cdot \Delta T$ im Punkte P_n ; senkrecht zu $P_{n-1} P_n$.
4. Auf diese Weise erhalten wir den Polygonzug $P_1' \dots P_m'$ als neue Oberfläche nach der Zeit ΔT .
5. Wir setzen das Verfahren mit dieser neuen Oberfläche fort. Durch die Wahl hinreichend kleiner Abstände zwischen den Punkten und hinreichend kleiner Zeitabstände kann man so die Form des Stalagmiten zu allen späteren Zeitpunkten ermitteln.

Das eigentlich physikalische Problem liegt nun in der Bestimmung der Funktion $R(P_1 P_n)$. Damit ist die Frage verknüpft, wie das ab rinnende Wasser einen Wasserfilm bildet, wie dick dieser ist und wie schnell er sich bewegt. Dies hängt aber mit der Fallhöhe der Tropfen zusammen.

Bei geringer Fallhöhe erhalten wir Kerzenstalagmiten mit gerundetem Ende. Bei großen Fallhöhen treten Stalagmiten mit völlig ebenen Enden auf. Bei noch größeren Fallhöhen schließlich treten Tellerstalagmiten auf, bei denen das oberste Ende tellerförmig nach innen gewölbt ist (3).

Wir beschränken uns in dieser Arbeit auf Kerzenstalagmiten, bei denen das Wasser aus geringer Fallhöhe auftröpft. Unmittelbar nach dem Auftropfen verteilt sich das Wasser fließend über die Oberfläche. Es bildet sich dann nach einigen Sekunden ein stationärer Film, der durch Kohäsion an der Oberfläche festgehalten wird. Diese Verhältnisse sind so verwickelt, daß man kaum einen einfachen Ausdruck angeben kann, der die Abscheidungs geschwindigkeit als Funktion des Abstandes von der Auftropfstelle beschreibt. Wir sind daher gezwungen, zur Modellbildung als ersten Schritt eine einfache Funktion zu wählen, die qualitativ dieses Verhalten richtig beschreibt. Eine solche Funktion ist

$$R = R_0 \exp \left(- \frac{l(P_1 P_n)}{\lambda} \right)$$

wobei l die Länge des Weges von der Auftropfstelle bis zum entsprechenden Punkt P_n auf der Oberfläche ist. Die Konstante R_0 gibt die Wachstumsgeschwindigkeit an, λ ist ein Maß für die Ausdehnung des Kalk abscheidenden Wasserfilms. Bei erhöhter Wasserzufuhr wird daher der Wert von λ steigen. Bei einem Wert von $\lambda = 5$ cm erhält man Stalagmiten mit einem Durchmesser von 10 cm und mit $\lambda = 1,67$ cm einen Durchmesser von 3,6 cm.

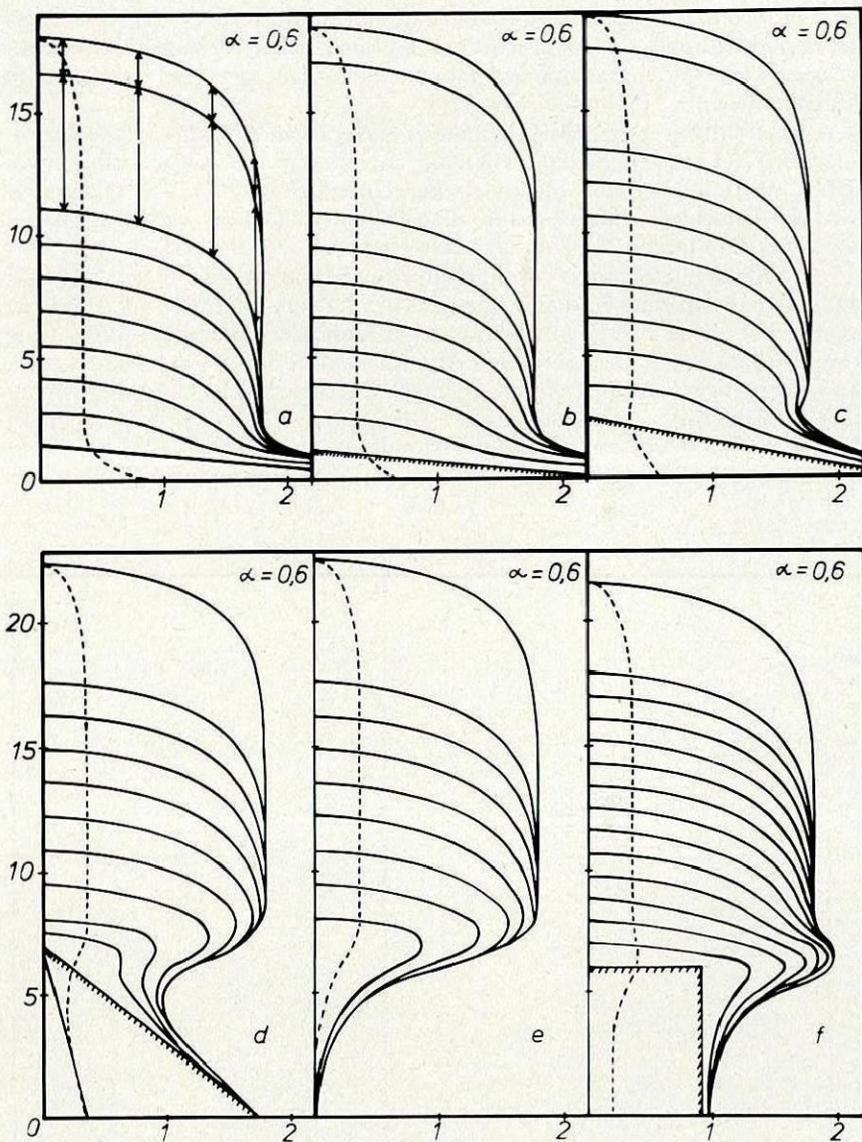
Mit dieser Annahme kann man nun das geometrische Konstruktionsverfahren in algebraische Form umschreiben. Die so erhaltenen Ausdrücke wurden in SIMULA programmiert. Der Wert R_0 wurde gewählt mit $0,1 \text{ cm}/\Delta T$, wobei ΔT gerade die Zeit ist, in der der Stalagmit um $0,1 \text{ cm}$ wächst. Es wurden nun ausgehend von der Anfangsfläche die Form des Stalagmiten nach der Zeitspanne ΔT berechnet und dieses Verfahren bis zu 400 Schritten wiederholt. Auf diese Weise erhält man ein Schichtlinienbild des Stalagmiten mit dem zeitlichen Abstand ΔT zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Linien.

Auf ein Problem bei der Berechnung muß noch hingewiesen werden. Beim Wachsen des Stalagmiten verändert sich die Länge des Polygonzuges, aber zunächst nicht die Anzahl der ihn beschreibenden Punkte, weil aus jedem Punkt der Ursprungslinie nur ein neuer Punkt erzeugt wird. Die Annäherung durch einen Polygonzug wird also immer schlechter. Um dies zu verhindern, wurden zwei Schranken S_{\max} und S_{\min} vorgegeben. Wenn der Abstand zweier benachbarter Punkte S_{\max} übersteigt, wird durch lineare Interpolation ein neuer Zwischenpunkt in der Mitte eingefügt. Sinkt dagegen der Abstand zweier benachbarter Punkte unter die Schranke S_{\min} , so wird einer von ihnen weggelassen. Auf diese Weise ist gewährleistet, daß der den Oberflächenschnitt beschreibende Polygonzug immer Geradenstücke vergleichbarer Länge enthält und die Genauigkeit der Oberflächenbeschreibung konstant bleibt.

In den Abbildungen 4a–4f sind die Ergebnisse der Rechnungen dargestellt. Der Auftropfpunkt des Wassers liegt in allen Fällen auf der Ordinate. Es werden jeweils nur die Längsschnitte der rechten Hälfte gezeigt. Der Wert von λ ist in allen Fällen $1,667 \text{ cm}$. Abb. 4a zeigt einen Längsschnitt eines auf einer ebenen Fläche gewachsenen Stalagmiten. Die Form des Stalagmiten erhält man durch Rotation um die Ordinate. Der Abstand zwischen den unteren Schichtlinien entspricht 15 Zeiteinheiten ΔT . Es ist zu beachten, daß Höhe und Durchmesser des Stalagmiten in verschiedenen Maßstäben aufgetragen sind. Die maßstäblich richtige Form ist links gestrichelt im jeweiligen Bild eingezeichnet. Man sieht, daß bereits bei einer Höhe, die etwa dem Dreifachen des Durchmessers entspricht, ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Ab hier wächst der Stalagmit, ohne seinen Durchmesser weiter zu verändern, nach oben. Dieses Wachstum entspricht einer nach oben gerichteten Parallelverschiebung der Haube. Die im Bild eingezeichneten senkrechten Abstände zwischen zwei beliebigen Schichtlinien im Gleichgewichtsbereich sind an allen Stellen gleich lang.

Dieses wichtige Prinzip des Wachstums von Kerzenstalagmiten wurde bereits von H. W. Franke postuliert (2) und entspricht auch den Beobachtungen in der Natur. Die Tatsache, daß es durch die Rechnungen richtig wiedergegeben wird, beweist die Konvergenz unseres Verfahrens und die prinzipielle Richtigkeit seiner Annahmen.

Dies wird auch dadurch unterstützt, daß Testläufe mit anderen Funktionen $R(P_i P_n)$ qualitativ das gleiche Verhalten zeigen. In weiteren Simulationsrechnungen haben wir nun untersucht, wie das Wachstum der Stalagmiten von der Form der ursprünglichen Unterlage abhängt. Die Abb. 4b bis 4e zeigen Längsschnitte von auf geneigten Ebenen wachsenden Stalagmiten in Richtung der

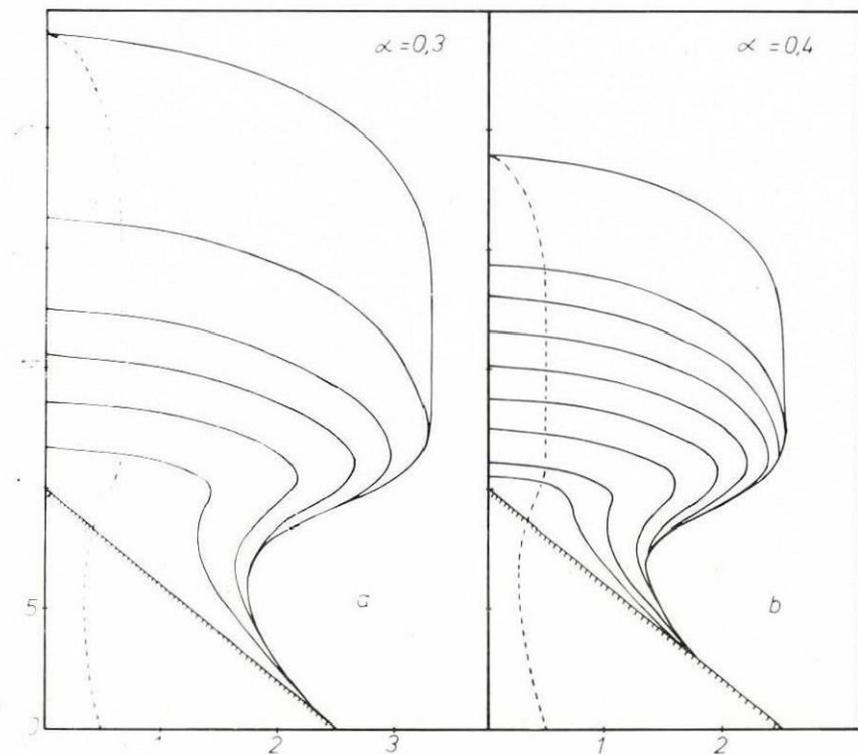


größten Neigung. Ab einem Neigungswinkel von 45° beginnt sich am unteren Rande eine Einschnürung auszuprägen, die mit wachsendem Neigungswinkel zunimmt. Solche Einschnürungen kann man recht häufig in der Natur bei auf steilen Unterlagen wachsenden Stalagmiten beobachten. Untersuchungen des

Zusammenhang zwischen Einschnürungstiefe und Neigung der Unterlage, sowie photographische Dokumentation könnten sicher wichtige weitere Hinweise zu verbesserten Rechnungen geben und wären damit sicher ein reizvolles Aufgabenfeld für Höhlenforscher.

Abbildung 4e zeigt schließlich einen Stalagmiten, der auf einer senkrechten Unterlage wächst. Solche Fälle sind ebenfalls in der Natur nicht gerade selten. Wie auch bei dem auf der ebenen Unterlage wachsenden Stalagmiten wird der Gleichgewichtszustand in allen Fällen nach einem Höhenwachstum vom etwa Dreifachen des Durchmessers erreicht.

Abbildung 4f illustriert das Ergebnis einer Rechnung, bei der der Auftropfpunkt so nahe an einer Felskante liegt, daß der Stalagmit über die Kante hinauswächst. Hier zeigt sich eine Auswölbung in Höhe der Kante. Die Ausbildung von überhängenden Flächen in den Abbildungen 4c bis 4e ist charakteristisch für Stalagmitenwachstum bei stark geneigten Flächen. Solche Überhänge treten aber auch auf, wenn die Wasserzufuhr auf einen Stalagmiten erhöht wird, so daß der Stalagmit mit größerem Durchmesser weiterwächst. Denkt man sich die Darstellung in Abbildung 4e als rotationssymmetrische Figur um die Ordinate, so



hat man genau diesen Fall. Der aus der Kante entstehende Zylinder ist dann als idealisierte Form des ursprünglichen Stalagmiten zu beobachten.

Die auf den Oberflächen von Stalagmiten auftretenden Unebenheiten und Rauigkeiten führen nun dazu, daß sich an den überhängenden Stellen Wassertropfen bilden können. Diese führen dann zu Kalkausscheidungen unter stalaktitenähnlichen Bedingungen. Auf diese Weise wird verständlich, wie an großen Stalagmiten und an steilen Felswänden Sinterformen auftreten, die von A. Bögli (3) als Medusentropfsteine bezeichnet werden.

Aus dem Vergleich der Gleichgewichtsformen der Abbildung 4 ergibt sich ein neues, wichtiges Prinzip des Wachstums von Stalagmiten: Die Gleichgewichtsformen der Stalagmiten sind in allen sechs Fällen identisch. Bei konstanten Wachstumsbedingungen ist daher die Endform des Stalagmiten *unabhängig* von der Form der Fläche, auf der sein Wachstum beginnt.

Die Abbildungen 5a und 5b zeigen Stalagmiten auf geneigter Unterlage bei höherer Wasserzufuhr ($\lambda = 3,33$ cm, $\lambda = 2,5$ cm). Außer der Vergrößerung der Radien bleiben alle bisher beschriebenen Eigenschaften gültig. Rechnungen mit Werten von $\lambda = 5$ cm bis $\lambda = 1,66$ cm zeigten, daß innerhalb einer Genauigkeit von 10% der Durchmesser der Stalagmiten gleich 2λ ist.

Die Abbildungen 6a und 6b zeigen Änderungen, die auftreten, wenn sich die Wasserzufuhr verändert. In Abbildung 6a ist der Fall simuliert, bei dem die Wasserzufuhr zurückgeht. Auf einem Stalagmiten mit $\lambda = 2,5$ cm wächst ein Stalagmit mit $\lambda = 1,66$ cm. In Abbildung 6b erhöht sich die Wasserzufuhr.

Abbildung 6c schließlich zeigt das Wachstum eines Tropfsteines bei konstanter Wasserzufuhr für den Fall, daß eine Kippung des Stalagmiten um etwa 10° stattgefunden hat. Die Achse des gekippten Stalagmiten ist eingezeichnet. Solche Fälle sind von B. Schillat in der Natur beobachtet worden. Das Verkippen folgt aus tektonischen Schollenbewegungen (4), die durch die Änderung der Wachstumsachsen im Stalagmiten aufgezeichnet werden.

Die Simulationsrechnungen können ein breites Gebiet anderer Fälle beschreiben, z. B. Änderungen, die an Stalagmiten auftreten, wenn die Wasserzufuhr sich zeitlich langsam verändert oder wenn die Tropfstelle sich verlagert. All die Ergebnisse hier darzustellen ist aus Platzgründen nicht möglich.

Die Ergebnisse unseres ersten noch groben Ansatzes zeigen, daß solche Simulationsrechnungen ein weiterer Schritt sind zum Verständnis der Morphologie von Stalagmiten. Wenn auch noch bessere physikalische Kenntnisse über die Einzelheiten beim Abrinnen des Wasserfilms nötig sind, ist es trotzdem bereits jetzt möglich, durch Simulationsrechnungen Annahmen über die Ursachen von Formänderungen zu testen. Wir sind damit dem Verständnis der Schrift unserer geohistorischen Tropfsteinkalender einen Schritt näher gekommen.

Literatur:

- (1) Dreybrodt, W.: Deposition of Calcite from Thin Films of Natural Calcareous Solutions and the Growth of Speleothems. Chemical Geology, 1980, im Druck.

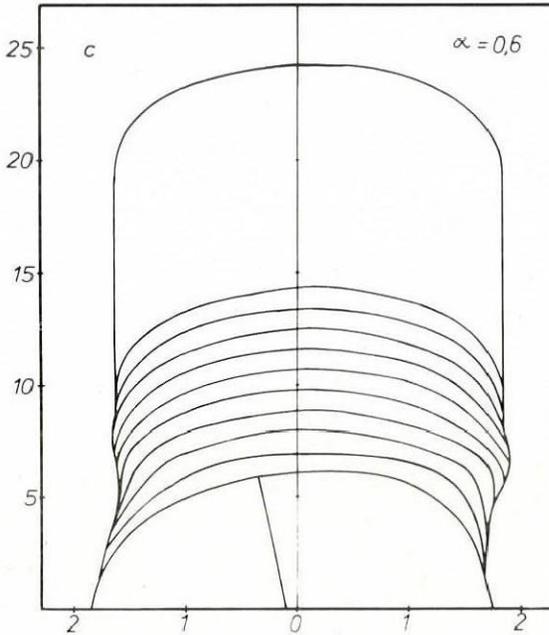
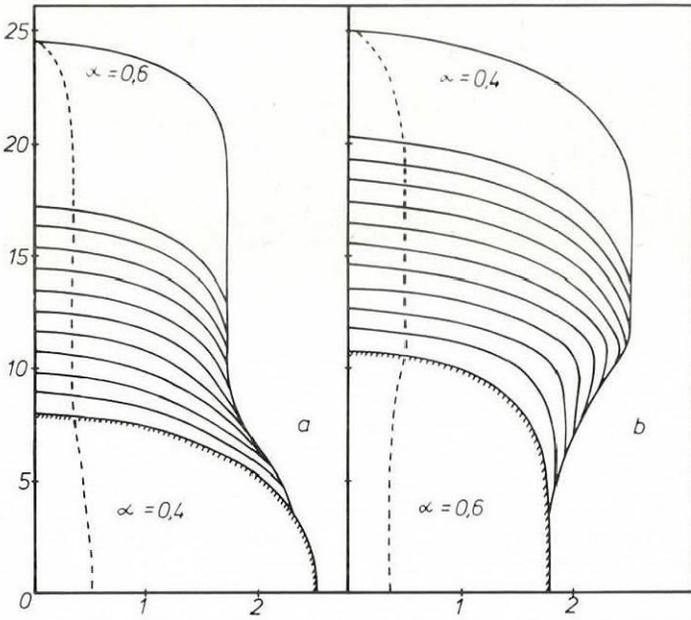


Abb. 6

- (2) Franke, H. W.: Morphologie und Stratigraphie des Tropfsteins — Rückschlüsse auf Größen des Paläoklimas. Geologisches Jahrbuch, 89, 473, 1971.
- (3) Bögli, A.: Karsthydrographie und physische Speläologie. Springer-Verlag, Berlin 1978.
- (4) Schillat, B.: Aufzeichnung langfristiger, tektonischer Wellenbewegungen in den Wachstumsanalysen von Tropfsteinen. Abhandlungen zur Karst- und Höhlenkunde, Reihe A, Heft 14, München 1976.

Tätigkeitsberichte 1980 **der dem Verband österreichischer Höhlenforscher** **angeschlossenen Höhlenvereine und Forschergruppen**

Wie in den früheren Jahren sollen die im folgenden Text wiedergegebenen Tätigkeitsberichte ein zusammenfassendes Gesamtbild über Vielfalt und Umfang der Höhlenforschungen in Österreich geben. Selbstverständlich können viele Einzelheiten nicht oder kaum erwähnt werden; da einzelne Berichte nicht rechtzeitig an die Schriftleitung übermittelt worden sind, ist leider auch die wünschenswerte Vollständigkeit nicht hundertprozentig gegeben.

Landesverein für Höhlenkunde in Kärnten

Im Jahre 1980 wurden 75 Höhlenbefahrungen mit einer Teilnehmerzahl von insgesamt ca. 250 durchgeführt, was gegenüber dem Vorjahr einer Steigerung von nahezu 100% entspricht. In dieser Zahl inbegriffen sind nicht nur Befahrungen in Kärntner Höhlen, sondern auch Exkursionen in Salzburg, Oberösterreich, Steiermark, Belgien, Italien und Jugoslawien. Der Großteil der Befahrungen konzentrierte sich natürlich wieder auf die Villacher Alpe, wo entsprechend unserem Forschungsprogramm eine Reihe von Grabungsprojekten in Angriff genommen wurden. Wenn auch die meisten noch nicht abgeschlossen sind, konnten bereits bedeutende Erfolge verbucht werden. So konnte der Seufzerschacht (3724/154) nach intensiven Grabungen und Erweiterung einiger Engstellen in eine Tiefe von 30 m erforscht und gemeinsam mit der Höhle unter dem Seufzerschacht (3742/155) neu in das Höhlenverzeichnis aufgenommen werden. Weitere Vorstöße gelangen auch im Bärenschacht und in der Thermenhöhle; im Bärenschacht waren die ersten Grabungen schon in den dreißiger Jahren durch den damaligen Landesverein in Kärnten erfolgt. In der Quallenhöhle konnten 150 m neue Gangteile vermessen und der über dem Teich befindliche Schlot in eine Höhe von ca. 30 m bezwungen werden. Bemerkenswert sind die in dieser Höhle befindlichen, größten bisher in der Villacher Alpe entdeckten Bodenversinterungen.

Die Mitglieder des Vereines beteiligten sich an den Aktionen im Rahmen der Umweltschutzwochen an je einer regionalen und nationalen Höhlenrettungsübung und an der Jahrestagung des Verbandes österreichischer Höhlenforscher. Mit einer gelungenen Weihnachtsfeier im Eggerloch endete ein erfolgreiches Vereinsjahr.

Josef Fröblich (Villach)

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Die Höhle](#)

Jahr/Year: 1981

Band/Volume: [032](#)

Autor(en)/Author(s): Dreybrodt Wolfgang, Lamprecht Günther

Artikel/Article: [Computer-Simulation des Wachstums von Stalagmiten 11-21](#)