
Untersuchungen an Vermikulationen aus der Schrattenhöhle, Melchsee-Frutt

✎ Arnfried Becker

In einigen Höhlen sind schwarze, graue, braune, mitunter auch rötliche, unregelmässig geformte Flecken und Streifen auf weissem Sinter besonders auffällig. Diese Ablagerung wird Vermikulation genannt. Woraus sie besteht und wie sie entstanden sein könnte, lest ihr im folgenden Beitrag.

Überblick und Ziel

Der Begriff Vermikulation leitet sich vom teilweise „wurmartigen“ (lat. *vermiculatus*) Aussehen dieser Ablagerungen ab und bezeichnet dünne, unregelmässige, nicht zusammenhängende und unverfestigte Ablagerungen aus Ton und Schluff auf Höhlenwänden und Sinterbildungen. Die mineralische Zusammensetzung ist variabel: Tonminerale, aber auch Al- und Fe-Oxide und sogar Russ wurden beschrieben. Vermikulationen können bis zu einem Zentimeter dick und mehrere Zentimeter lang und breit werden (Bini *et al.* 1978, Hill & Forti 1997). Sie werden von einem so genannten *Halo* umgeben, der zumeist etwas grösser ist als die Vermikulation selbst und keine ‚Verunreinigungen‘ aufweist. Dies ist die Substratoberfläche, auf der die Vermikulation aufsitzt. Nach ihrem Aussehen können Vermikulationen nach Parenzan (1961) in acht Klassen unterteilt werden (Abb. 1); Beispiele zeigt die Abb. 2 (a-d). Vermikulationen finden sich auf allen glatten und dichten Oberflächen – auch ausserhalb von Höhlen: Schiefer, vulkanische Gesteine, Lehm, Beton, Fensterscheiben. Kalkstein als Unterlage ist somit keine Voraussetzung für ihre Entstehung.

Fließendes und tropfendes Wasser scheint die Vermikulationsbildung zu verhindern, aber die Felsoberfläche muss zumindest feucht sein, bevor sich Vermikulationen bilden können. Die Temperatur spielt keine Rolle, vorausgesetzt, es gefriert nicht (Hill & Forti 1997). Hingegen scheint Wind bedeutend zu sein. Oft werden Vermikulationen in Höhlen mit starkem saisonalen Luftzug beobachtet, häufig an Stellen mit kleinem oder plötzlich abnehmendem Gangquerschnitt (Bini *et al.* 1978). Die Bedeutung von Luftströmungen bei der Entstehung von Vermikulationen wurde erstmals von Renault (1959) erkannt.

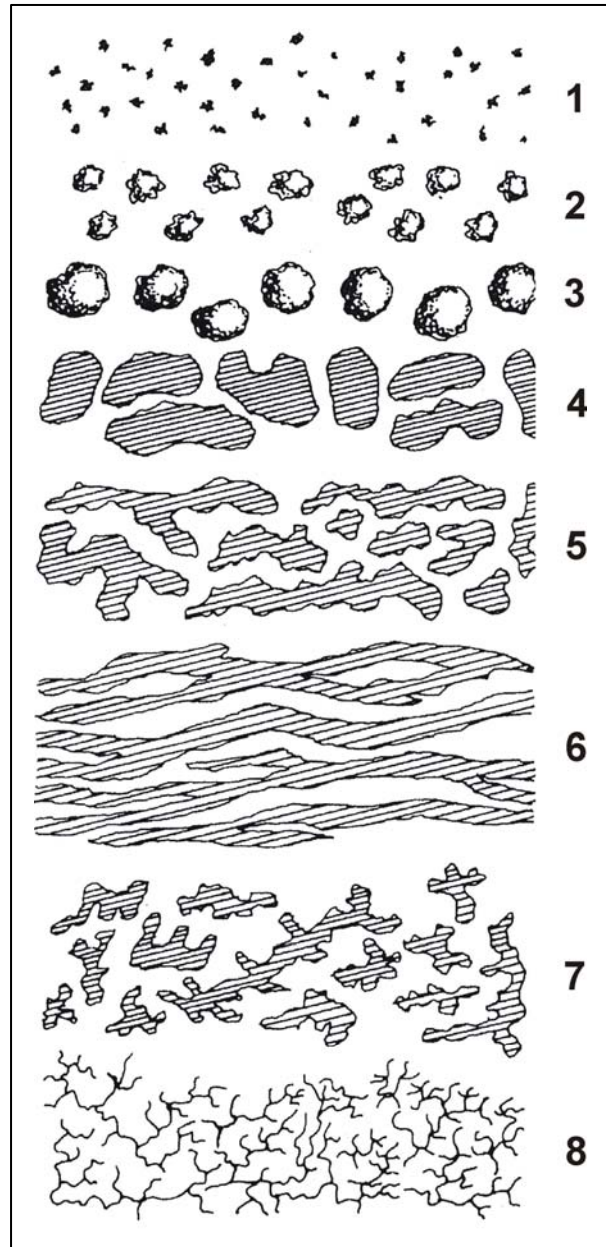
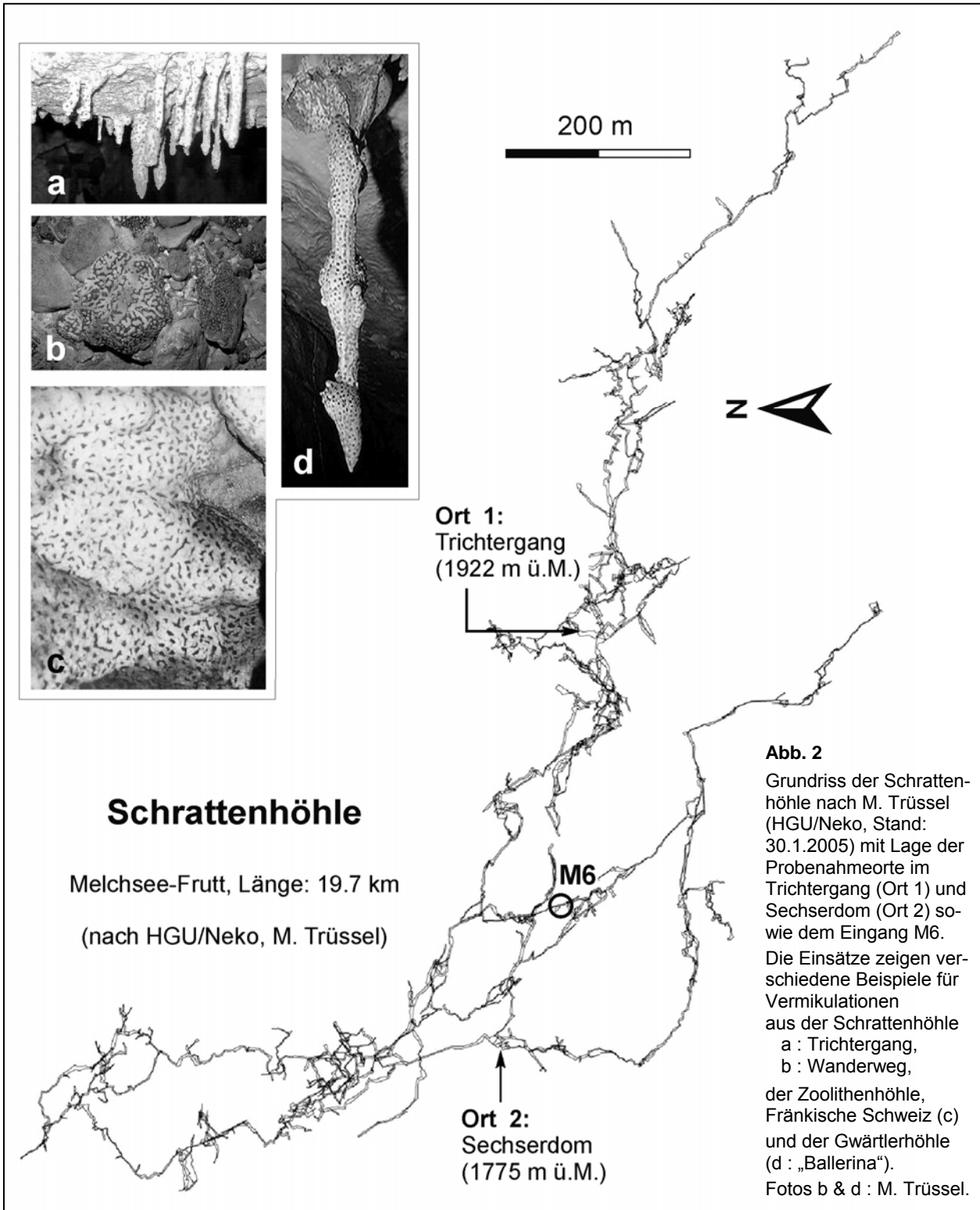


Abb. 1 Vermikulation-Klassifikation nach Parenzan (1961):
(1) punktförmig, (2) plattig, (3) blasenförmig,
(4) irregulär ellipsenförmig oder gestreckt,
(5) leopardenfell-fleckig, (6) tigerfell-streifig,
(7) hyroglyphen-ähnlich, (8) dendritisch.



Von allen Modellen zur Entstehung von Vermikulationen scheint nur eine von allgemeiner Bedeutung zu sein: die Ausflockung von Schwebstoffen in einem austrocknendem Flüssigkeitsfilm (Bini *et al.* 1978). Jedes feinkörnige Material kann Bestandteil der Vermikulation sein, vorausgesetzt, es ist fein genug, im Wasserfilm in Suspension zu bleiben. Die Art der Vermikulation hängt stark vom Volumenverhältnis Wasser zu Schwebstoff ab.

Nur wenn dieses Verhältnis gross ist, entsteht eine kolloidähnliche Suspension, die bei der Austrocknung des Flüssigkeitsfilms in kleinen „klumpenartigen Massen“ ausflockt. Die Form der so ausgeflockten Massen, also der Vermikulation, ist abhängig vom ausgeflockten Material selbst und seinen physiko-chemischen Eigenschaften sowie der Gesteinsoberfläche, der Verdunstungsrate, der Materialanlieferung u.a.

Ziel der vorliegenden Arbeit war, Hinweise auf die Entstehung der Vermikulationen in der Schrattenhöhle, Melchsee-Frutt, zu erhalten. Martin Trüssel (HGU) organisierte die Probenahme, die am 28./29. Sept. 2002 erfolgte. Dieser Beitrag berichtet über die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen und ihre Interpretation.

Probenahme

Von jeder Probenahmestelle mussten 5 g der Vermikulationen mit einem Spatel vorsichtig abgehoben werden, ohne diese von der Unterlage abzuschaben oder abzukratzen. Letzteres sollte verhindern, dass Material von der Unterlage, auf der sich die Vermikulation befindet, in die Probe gelangt und diese verunreinigt. Die so erhaltene Probemenge pro Vermikulation war dementsprechend gering, so dass für jede 5g-Probe

ca. 20-30 einzelne Vermikulationen beprobt werden mussten. Die Auswahl der unterschiedlichen Vermikulationen, die zu einer Probe à 5 g zusammengefasst wurden, erfolgte visuell anhand der Farbe. Nahe beieinander liegende Vermikulationen gleicher Farbe wurden als ursächlich zusammengehörig angenommen. Zum Vergleich wurden darüber hinaus Proben von Bodensediment in unmittelbarer Nähe der Vermikulations-Probestelle 2 „Sechserdom“ genommen. An der Probeentnahmestelle 1 im „Trichtergang“ gab es keine Bodensedimente. Dafür wurde eine weitere Bodenprobe in einem Seitengang der „Oase“ unweit des Trichterganges genommen. Die Probeentnahmeorte im Trichtergang und der Oase (Ort 1) und dem Sechserdom (Ort 2) sind der Abb. 2 zu entnehmen, die genauen Entnahmeorte der Proben der Tabelle 1.

Tabelle 1 Probenliste mit Entnahmeorten und Art der Proben.

Probe	Entnahmeort	Beschreibung
1a-c	Trichtergang	Vermikulation an Wand
2a	Sechserdom	Dunkle Vermikulation an Wand
2b	Sechserdom	Helle Vermikulation an Wand
2c	Sechserdom	Vermikulation an Wand unter Konglomerat-«Nische»
2d	Sechserdom	Bodensediment: oberste hauchdünne Lage schwärzlich, darunter rötlich
2e	Sechserdom	Bodensediment: ganze Scholle
54/2	Seitengang ab Oase	Bodensediment: oberste rötlich Lage

- 1 17 m ab Fünferhalle, LK 664'103/181'343/1922, Messpunkt 28/2
- 2 Direkt im Dom W, LK 663'627/181'448/1775, Messpunkt 1/38
- 54 664'038/181'319/1901, Messpunkt 54/2

Untersuchungen

An dem Probenmaterial wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- (1) mikroskopische Mineralbestimmung,
- (2) Bestimmung des Carbonatgehaltes und des Gehaltes an organischem Kohlenstoff,
- (3) Korngrößenverteilung.

Alle Untersuchungen wurden am Geologischen Institut der ETH Zürich durchgeführt. Für die mikroskopischen Untersuchungen wurden vom Probenmaterial so genannte *smear slides* angefertigt. Dazu wurde ein Teil des Probenmaterials auf einem Objektträger verteilt, in Kunstharz eingebettet und schliesslich mit einem Deckglas abgedeckt. Nach dem Aushärten des Kunstharzes unter UV-Licht konnte das Proben-

material unter dem Polarisations-Mikroskop analysiert werden. Die Kohlenstoffbestimmungen kamen mit sehr kleinen Probemengen aus. Die Untersuchungen erfolgten in einem *Coulomat*, womit der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) und der gesamte anorganische Kohlenstoffgehalt (TIC) gemessen werden konnte. Der gesamte organische Kohlenstoffgehalt (TOC) ergibt sich aus der Differenz (TC-TIC). Der Carbonatgehalt wird aus dem TIC, multipliziert mit einem Faktor 8.333, berechnet. Alle Angaben erfolgen in Gewichtsprozent (Gew.-%). Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte laseroptisch an einem *Malvern-Mastersizer 2000* im Limnogeologischen Labor der ETH Zürich. Mit dieser Messapparatur war es möglich, Probemengen weit unter 1 g zu analysieren.

Ergebnisse

Mineralbestand

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen zusammengefasst. Aufgelistet sind nur diejenigen Substanzen, die mikroskopisch identifiziert werden konnten. Für die Analyse des Mineralbestandes in der tonigfeinschluffigen Grundmasse wären röntgendiffraktometrische Untersuchungen erforderlich, die nicht durchgeführt wurden.

Auffallend ist, dass Calcit in den Bodenproben 2d und 2e so gut wie nicht vorkommt. Im Gegensatz dazu enthalten die Vermikulationsproben fast durchwegs Calcit, z.T. als massige Körner, mitunter auch idiomorph ('eigengestaltig', d.h. mit klar erkennbaren Kristallflächen). Unter den identifizierten Glimmermineralien kommt Chlorit in fast allen Proben vor (Ausnahme: 2b). Die Art der Chloritmineralien konnte nicht bestimmt werden, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich ein Teil der Chlorite authigen, d.h. an Ort und Stelle im Höhlensediment gebildet hat. Muskowit ist das zweit häufigste Glimmermineral. Es kommt

sowohl in den Bodenproben, als auch in den meisten Vermikulationsproben vor. Muskowit bildet sich im Allgemeinen nicht authigen in Sedimenten. Dafür ist es vor allem in metamorphen Gesteinen (Umwandlungsgesteine) weit verbreitet, z.B. in Glimmerschiefern. Biotit wurde nur in der Probe 1c beobachtet. Biotit bildet sich definitiv nicht authigen in Sedimenten, sondern kann nur allothigen (d.h. anderswo entstanden) in die Vermikulation 1c gelangt sein. Biotit ist vor allem in magmatischen Gesteinen weit verbreitet, z.B. als dunkler Glimmer im Granit. Eisenoxide und -hydroxide (Hämatit und Limonit) sind in fast allen Proben zu beobachten und kommen in der Vermikulation 2a und der Bodenprobe 2e häufig vor. Schwermineralien kommen in den Vermikulationen 2a und 2c relativ häufig vor, ebenso in der Bodenprobe 2e. In den anderen Proben sind sie sehr selten oder fehlen völlig. Eine Besonderheit der Bodenprobe 2d ist das gehäufte Auftreten von Gesteinsbruchstücken. Abgesehen von dem sehr seltenen Vorkommen von Calcitkristallen in den Bodenproben und dem auffallend hohen Anteil an Gesteinsbruchstücken in der Bodenprobe 2d, unterscheiden sich die Bodenproben mineralogisch kaum von den Vermikulationen.

Tabelle 2 Farbandsprache und Mineralbestand anhand polarisationsmikroskopischer Analysen von *smear slides*.

Probe	Calcit	Glimmer	Hämatit, Limonit	Schwermineralien	Farbe*	Sonstiges
1a	wenig, massig	vorhanden, u.a. Chlorit	sehr fein	nicht nennenswert	leicht gelbliches Braun: 10 YR 5/4	
1b	viel, verschiedene Grössen, massive Form	grobe Chlorite und Muskowite			tief gelbliches Braun: 10 YR 4/2	Holz ?
1c	sehr häufig, massive Form, selten spitz	grobe Biotite und Muskowite, Chlorit	feinkörnig	sehr wenige oder keine S.	leicht gelbliches Braun: 10 YR 5/4	
2a	sehr häufig in massigen Körnern	Chlorit vorhanden	viel	kleine nadelige und grobe S.; recht häufig	tief gelbliches Braun: 10 YR 4/2	„Pyritwürfel“
2b	häufig, oft spitze Einzelkristalle		sehr fein	keine S.	helles Olivbraun: 5 Y 5/6	
2c	mässig häufig, massive Form	Chlorit, Muskowit	häufig	häufig	helles Olivbraun: 5 Y 5/6	
2d	selten	Chlorit, Muskowit		vorhanden	leicht braun bis düsterbraun: 5 YR 4/4 bis 5 YR 2/2	viele Gesteinsbruchstücke
2e	fehlt fast gänzlich	Chlorit, Muskowit	viel	häufig	gräulichbraun: 5 YR 3/2	

* Angaben entsprechend der Munsell-Farbskala

Kohlenstoffanteil

Die Bestimmungen des Kohlenstoffs mit dem ‚Coulomat‘ ermöglichen die Aufteilung des Kohlenstoffs in den Carbonatanteil und den Anteil Kohlenstoff, der an organische Substanzen gebunden ist. Bei dem Carbonat handelt es sich um Calciumcarbonat (CaCO₃). Den niedrigsten Carbonatanteil haben die beiden Bodenproben und die Vermikulation 1a, den höchsten die

beiden Proben 2a und 2b (Tabelle 3). Bei den restlichen Vermikulationsproben schwankt der Carbonatgehalt von 4.0 - 6.1 Gewichts-%. Der Anteil organischen Kohlenstoffs liegt mit Ausnahme der Bodenprobe 2e bei allen anderen Proben deutlich über 1 Gew.-% mit einem Spitzenwert von fast 3.7 Gew.-% im Falle der Vermikulation 1c. Die Art der organischen Verbindungen wurde nicht bestimmt.

Tabelle 3 Kohlenstoffbestimmungen mit dem ‚Coulomat‘.

Probe	TC (%C)	TIC (%C)	Karbonat (Gew.-%)	TOC (%C)	Material
1a	*	0.326	2.717	*	Vermikulation
1b	2.361	0.730	6.083	1.631	Vermikulation
1c	4.324	0.654	5.450	3.670	Vermikulation
2a	3.575	2.171	18.091	1.404	Vermikulation
2b	4.557	1.569	13.074	2.988	Vermikulation
2c	2.641	0.478	3.983	2.163	Vermikulation
2d	3.378	0.398	3.317	2.980	Boden
2e	0.545	**	≈ 0	≈ 0.55	Boden

TC: total carbon (Gesamtkohlenstoffgehalt),

TIC: total inorganic carbon (gesamter anorganischer Kohlenstoffgehalt),

TOC: total organic carbon (gesamter organischer Kohlenstoffgehalt)

*nicht gemessen, ** 43.063 µgC/g

Kornverteilung

Die Korngrössenanalysen, dargestellt im Dreikomponentensystem Ton-Schluff-Sand (Abb. 3), zeigen, dass die Vermikulationen überwiegend als Schluffe angesprochen werden müssen mit einem nur geringen Ton- bzw. Sandanteil. Die untersuchten Bodenproben heben sich davon deutlich ab, vor allem durch ihren i.A. höheren Sandanteil.

Die Kornverteilungskurven für die untersuchten Vermikulationen und Bodenproben zeigt die Abb. 4. Deutlich ist zu erkennen, dass sich auch die Vermikulationen von den beiden Probenahmestellen in ihren Kornverteilungen unterscheiden. Die Proben von Ort 2 (Abb. 4 oben, schwarze Linien) zeigen Maxima, die sich im Bereich Mittel-Schluff konzentrieren, wohingegen die Proben von Ort 1 alle im Bereich Grob-Schluff liegen (Abb. 4 oben, graue Linien). Die Kurvenverläufe sind für beide Probenorte ähnlich, nur die beiden Proben 1b weisen einen davon abweichenden, etwas unregelmässigen Verlauf auf.

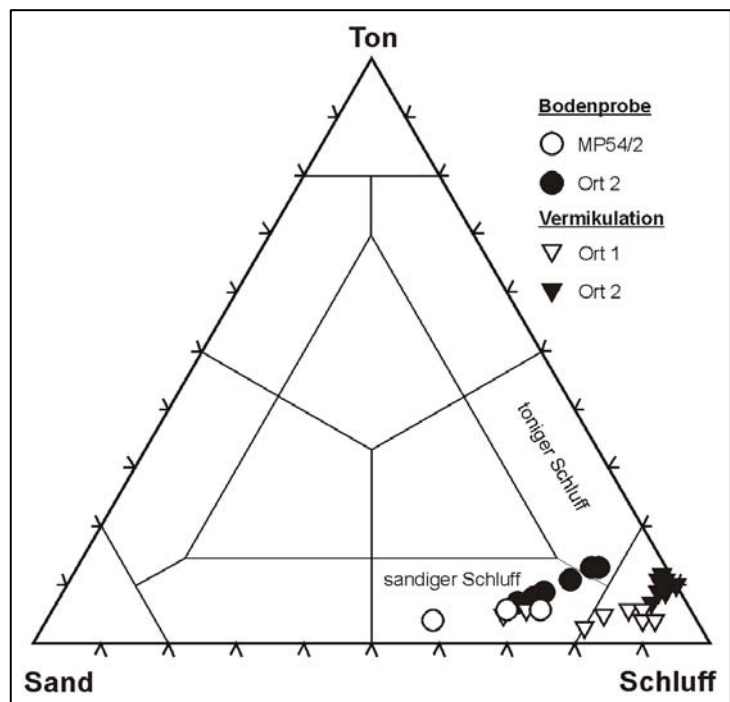


Abb. 3 Lage der Proben im Dreikomponentensystem Ton-Schluff-Sand. Kreise : Bodenproben, Dreiecke : Vermikulationen; weiss : Oase (MP54/2) oder Ort 1, schwarz : Ort 2.

Im Gegensatz dazu zeigen die Bodenproben einen ungleichmässigen Kurvenlauf, am deutlichsten zu sehen an den drei Kurven für die Probe 2d mit offensichtlich zwei Maxima, einem im Feinschluff-Bereich, einem weiteren im Grobschluff-Bereich. Auch die Probe 2e deutet ein ähnliches Verteilungsmuster an mit einem Hauptmaximum im Grobschluff und einem Nebenmaximum im Feinschluff. Hingegen ist für die Probe MP54/2 ein Nebenmaximum nicht mehr deutlich zu erkennen.

Kornverteilungen mit mehr als einem Maximum werden Mischverteilungen genannt. In ihnen spiegeln sich mehr als ein Ablagerungsereignis wider. Mischverteilungen mit deutlich ausgeprägten Maxima können in sich überlagernde ‚reine‘ Kornverteilungen unterteilt werden. Das zeigt die Abb. 5 für die mittleren Kornverteilungskurven der Proben 2d und 2e. Deutlich sind die beiden Maxima im Bereich Fein- und Grobschluff zu erkennen.

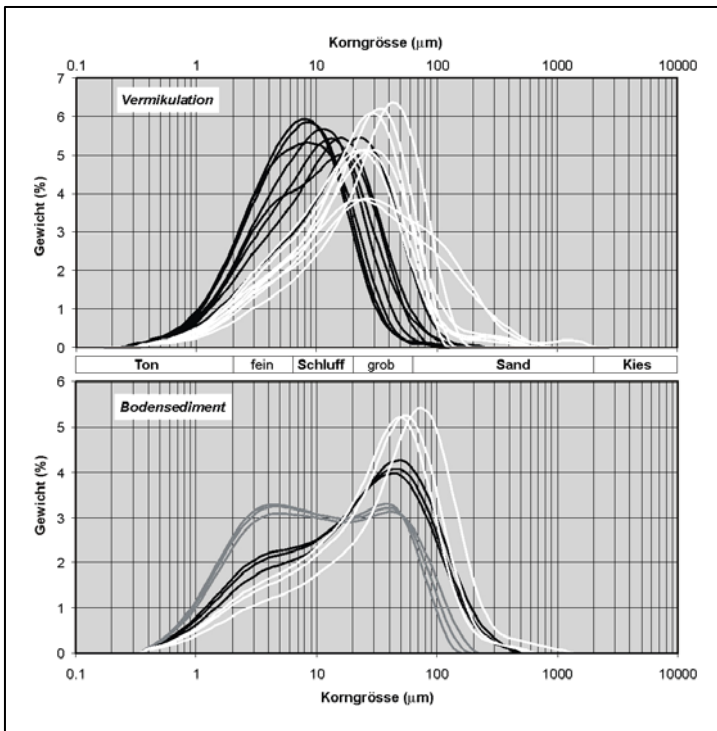


Abb. 4 Kornverteilungskurven für die Vermikulationsproben (oben) von Ort 1: graue Linien, Ort 2: helle Linien, und den Bodenproben (unten): MP54/2: helle, 2d: graue, 2e: schwarze Linien.

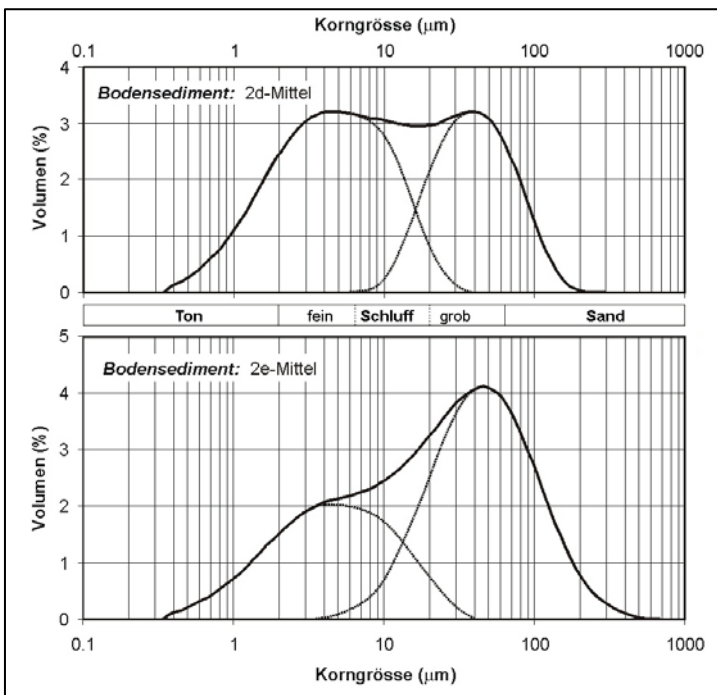


Abb. 5 Zerlegung der Kornmischverteilungen der Bodenproben 2d und 2e in jeweils zwei symmetrische Kornverteilungen mit Maxima im Fein- und Grobschluff.

Die Kornsummenkurven (Abb. 6) geben Auskunft über den Sortierungsgrad. Je höher dieser ist, d.h. je mehr Körner in einem eng begrenzten Korngrössenbereich liegen, desto steiler sind die Kornsummenkurven. Für die Vermikulationen (Abb. 6 oben) sind die Kornsummenkurven sehr steil und zeigen für beide Entnahmeorte fast identische Steigungen im mittleren Kurvenbereich. Die einzige Ausnahme bilden die beiden Kurven der Probe 1b. Auch in den Kornsummenkurven wird deutlich, dass die Kornverteilungen der Proben der beiden Entnahmeorte unterschiedliche Maxima haben. Der Sortierungsgrad der Bodenproben ist noch immer sehr gut, aber doch deutlich schlechter als jener der Vermikulationen. Ausserdem sind die Steigungen der Kurven für die drei Proben jeweils leicht verschieden.

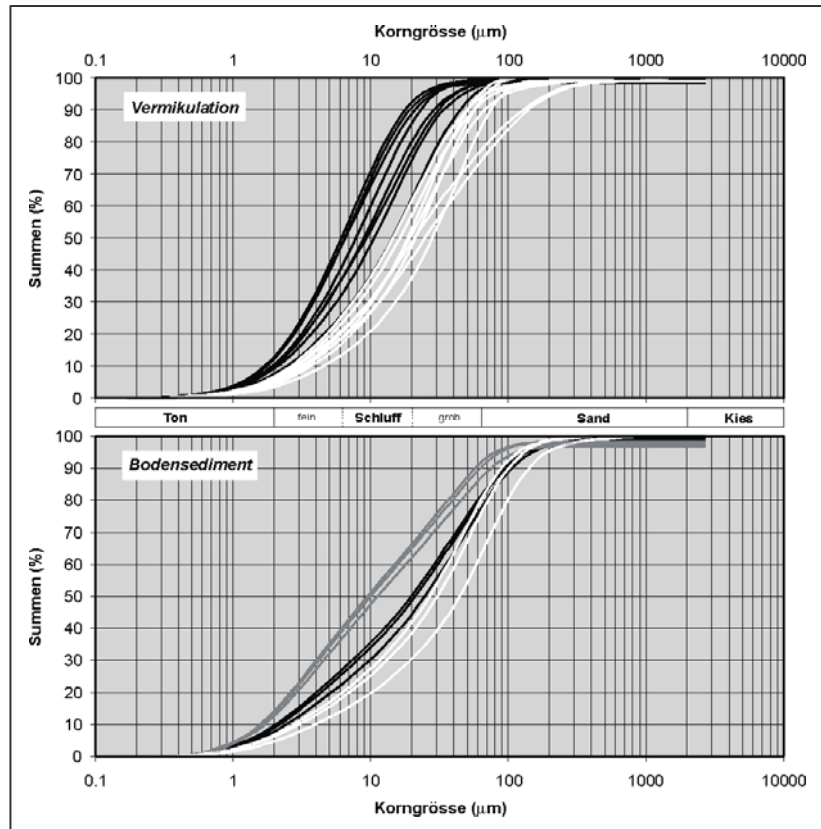


Abb. 6 Kornsummenkurven für die Vermikulationsproben (oben) von Ort 1: helle Linien, Ort 2: schwarze Linien, und den Bodenproben (unten) MP54/2: weisse, 2d: graue, 2e: schwarze Linien.

Interpretation

Die zum Teil idiomorphen Calcitkristalle könnten bei der Probenahme aus der unmittelbaren Umgebung unbeabsichtigt in die Vermikulation gelangt sein. Wahrscheinlicher ist aber, dass sie sich auf oder in der Vermikulation während der Austrocknung des Wasserfilms durch Ausfällung aus der Lösung authigen (an Ort und Stelle) gebildet haben. Für die anderen nachgewiesenen Mineralien in der Vermikulation ist authigene Mineralneubildung aber eher unwahrscheinlich.

Die Glimmer Chlorit und Muskowit und besonders Biotit sowie Schwermineralien sind keine typischen Mineralien in Kalksteinen. Kämen sie dennoch im sehr reinen Quintner-Kalkstein vor, in dem es ausser (authigenem) Quarz kaum Verunreinigungen gibt (Weber 2004), dann müssten sehr grosse Kalksteinvolumina korrodiert werden, um die erforderlichen ‚Verunreinigungen‘ für die Vermikulationsbildung an der Kalksteinoberfläche zu konzentrieren. Dieses *in situ*-Modell scheitert daran, dass Vermikulationen in der Schraffenhöhle (Abb. 2a) oft auf Stalaktiten vorkommen und nicht auf dem Quintnerkalk: Der Stalaktit wäre aufgelöst, bevor sich die erforderliche Menge ‚Verunreinigungen‘ an seiner Oberfläche angereichert hätte.

Die Vermikulation besteht somit überwiegend aus allothigen (d.h. anderswo entstandenen) Mineral-komponenten. Der grösste Teil des Sediments, aus dem die Vermikulation besteht, ist demnach zum gegenwärtigen Ablagerungsort transportiert worden. Drei Transportmechanismen bieten sich an: durch (1) Eis, (2) Wasser oder (3) Luft.

(1) Sedimente, die durch Eis transportiert werden, sind im Allgemeinen sehr schlecht sortiert. Das widerspricht dem sehr guten Sortierungsgrad der untersuchten Sedimentproben. Ausserdem weisen glaziale Ablagerungen kaum organische Beimengungen auf, was nicht gut mit den Untersuchungsergebnissen übereinstimmt (Tabelle 3). Schliesslich beobachtet man zwischen dem Eis und der Felsoberfläche fast immer eine Randspalte. Steht Wasser in diesen Randspalten, dann führt das meistens zu einer korrosiven Überprägung, aufgrund des geringen Schwebstoffanteils im Schmelzwasser aber nur selten zur Ablagerung von Sediment auf der Kalksteinoberfläche. Ausserdem scheint fliessendes Wasser die Vermikulationsbildung i.A. zu verhindern (Hill & Forti 1997).

(2) Die Hypothese der Anlieferung des Sediments der Vermikulationen durch Wasser-Transport scheint daher nur dann wahrscheinlicher zu sein, wenn es sich um ein kurzfristiges Ereignis handelt, also ein Hochwasser. In nicht mehr aktiven Höhlen sind Hochwässer seltene, katastrophale Ereignisse. Die Frage ist, ob Stalaktiten, die in der Schrattenhöhle oft die Unterlage für die Vermikulationen bilden, solch ein Ereignis unbeschadet überstanden hätten. Nur die Situation, in der sich die Stalaktiten in einer Rückstauumgebung befanden, ist denkbar. Durch raschen Anstieg suspensionsbeladenen Wassers ohne grosse Strömung und einen ebenso raschen Abfall des Wasserspiegels könnte sich ein Sedimentfilm auf der Höhlenwand und den Stalaktiten bilden. Solche Sedimentfilme sind in hochwassergefährdeten Höhlen oft zu sehen. Sie unterscheiden sich aber in ihrem Aussehen deutlich von Vermikulationen. Es sind zumeist flächenhafte Überzüge, welche der Höhlenwand einen durchweg ‚schmutzigen‘ Eindruck geben. Die für Vermikulationen typische saubere Trennung zwischen Sediment und *Halo* fehlt.

(3) Am wahrscheinlichsten wurde das Sediment, aus dem die Vermikulationen in der Schrattenhöhle bestehen, durch die Luft transportiert. Die Höhle erstreckt sich von 1525 bis 2055 m ü.M. über mehr als 500 Höhenmeter bei einer Gesamtlänge von fast 20 km. In dieser Höhle werden oft sehr starke Höhlenwinde registriert. Eine Messstation am Eingang M6 (Abb. 2) zeigt eine direkte Korrelation mit der Umgebungstemperatur: bei -20°C zieht der Wind mit 20 km/h höhleneinwärts, bei $+10^{\circ}\text{C}$ mit 10 km/h höhlenauswärts (M. Trüssel, pers. Mitt.). 20 km/h ist nach der Beaufort-Skala bereits Windstärke 4: *mässige Brise*. Die Temperatur in der Höhle liegt im Winter ungefähr zwischen 0 und 2°C . Zieht im Winter sehr kalte Aussenluft in die Höhle, dann führt das zu einer sehr starken Austrocknung. Die Eingangsbereiche sind daher im Winter oft ‚staubtrocken‘. Dieser Effekt des Austrocknens wird im Winter noch dadurch verstärkt, dass der Niederschlag über mehrere Monate als Schnee gebunden ist und kaum Wasser in die nur wenige Dekameter unter der Geländeoberfläche liegenden Höhlengänge Zutritt. ‚Staubpartikel‘ können somit leicht aus Höhlensedimenten ausgeblasen werden, die an verschiedenen Stellen der Schrattenhöhle anstehen. Diese Höhlensedimente, die oft glazialen Ursprungs sind und in die Höhle eingeschwemmt wurden, können somit auch die Quelle der Glimmer und Schwerminerale sein, die in den Vermikulationen nachgewiesen wurden. Für diese Annahme spricht bereits die ähnliche Mineralzusammensetzung der untersuchten Bodensedimente im Vergleich zu den Vermikulationen (Tabelle 2).

Dieser windtransportierte Staub schlägt sich dann im Höhleninneren an feuchten Flächen nieder, wo sich die Staubpartikel beim Abtrocknen des Flüssigkeitsfilmes in kleinen Aggregaten, den Vermikulationen, konzentrieren.

Für einen Transport durch Wind sprechen auch die Kornverteilungen der Vermikulationen. Ihr ausgezeichneter Sortierungsgrad sowie die Kornverteilungskurven mit Maxima im Mittel- und Grobschluff sind sehr typisch für Sedimente, die durch Wind transportiert wurden. Man spricht von ‚äolischen Sedimenten‘ (nach Aiolos: altgriechischer Gott der Winde). Ein allgemein bekanntes äolisches Sediment ist der Löss, der in den Kältesteppen und Tundren während der Eiszeiten abgelagert wurde. Löss zeigt ebenfalls einen sehr guten Sortierungsgrad und ein Korngrössenmaximum im Grobschluff.

Der sehr gute Sortierungsgrad der Vermikulation erklärt sich dadurch, dass Partikel ab einer bestimmten Grösse nicht mehr durch die Luft transportiert werden können. Sie sind einfach zu gross und zu schwer. Feineres Material, also Ton, könnte im Liefersediment nicht ausreichend vorhanden gewesen sein, was aber eher unwahrscheinlich ist. In jedem Fall sind Tonpartikel im trockenen Zustand aufgrund ihrer geringen Grösse mobiler und bleiben selbst noch bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten „in der Schwebe“. Sie werden daher im Vergleich zum Schluff dementsprechend seltener sedimentiert und reichern sich relativ zum Schluff in der Vermikulation ab.

Ausblick

Für die Entstehung der Vermikulationen ist ein Wasserfilm notwendig, in dem eingeweichte Partikel in Suspension bleiben können, zumindest solange, bis der Wasserfilm eingetrocknet ist. Demnach wäre der Partikelgrösse nicht nur durch die Transportkraft des Höhlenwindes eine obere Grenze gesetzt, sondern auch durch die Dicke des Wasserfilms. Letztere hängt von einer Vielzahl von lokalen Einflussfaktoren ab, auf die hier nicht eingegangen werden soll. Ob die Wasserfilmdicke oder die Windgeschwindigkeit die Kornverteilung der Vermikulationen kontrolliert, könnte getestet werden, indem die Kornverteilungen an Orten mit deutlich unterschiedlichen Luftströmungen untersucht werden. In Bereich mit geringer Luftströmung sollten die Kornverteilungsmaxima bei niedrigeren Werten liegen als in Bereichen mit höheren Windgeschwindigkeiten. Auf einen solchen Zusammenhang könnten die vorliegenden Untersuchungen hindeuten. Im Entnahmeort 1 (Trichtergang) ist bei hohen und tiefen Aussentemperaturen ein schwacher bis mässiger Luftzug zu verspüren, wohingegen am Ort 2 (Sechserhalle) der Luftzug schwach bis

nicht spürbar ist (M. Trüssel, pers. Mitt.). Dies würde relativ gut korrelieren mit den Maximalwerten im Bereich Mittelschluff für den Ort 2 im Vergleich zu Maximalwerten im Grobschluff für Ort 1. In Ort 1 wäre somit anhand der Korngrössenverteilung mit generell etwas höheren Windgeschwindigkeiten zu rechnen.

Wenn es möglich wäre, anhand der Kornverteilungskurven der Vermikulation eine Aussage über die Windgeschwindigkeiten zu machen, dann wären das die maximalen Windgeschwindigkeiten während des Winterhalbjahrs. Im Sommerhalbjahr strömt warme Aussenluft in die kalte Höhle, was zu vermehrter Kondensation von Wasser an den Höhlenwänden führt und sich negativ auf die Mobilisierung von Staubpartikeln auswirken wird. Den möglichen Zusammenhang zwischen den Korngrössenverteilungen, Windgeschwindigkeiten sowie minimalen Aussentemperaturen während des Winterhalbjahrs zu untersuchen, scheint ein interessanter Forschungsansatz zu sein. Hierzu könnten zu Beginn des Winters und zu Beginn des Sommers Partikelfilter an denjenigen Stellen der Höhle aufgestellt werden, von denen die Vermikulationsproben stammen. In Verbindung mit einer automatischen Registrierung der (Spitzen-)Windgeschwindigkeiten könnte der vermutete Zusammenhang zwischen Partikeltransport, Partikelgrösse, Windgeschwindigkeit und minimaler Wintertemperatur überprüft werden.

Den Feinaufbau der Vermikulationen zu untersuchen, wäre eine weitere interessante Aufgabe. Ist die Vermikulation geschichtet oder homogen? Falls sie geschichtet ist, wie ist sie geschichtet: horizontal, schräg, vertikal? Schliesslich wäre es auch interessant zu erfahren, welchen Ursprung das organische Material hat: eingewehte Tier- oder Pflanzenreste, Mikroben, Russ?

Schriften

- Bini, A., Cavalli Gori, M. & Gori, S. (1978): A critical review of hypotheses on the origin of vermiculations. *Int. J. Speleol.*, **10**: 11-33.
- Hill, C. & Forti, P. (1997): Cave Minerals of the World. Nat. Speleol. Soc., Huntsville, Alabama, 463 S.
- Parenzan, P. (1961): Sulle formazioni argillo-limose dette vermicolari. Atti Symp. Intern. «Riempimenti naturali delle grotte», Varenna, 1960, *Rass. Spel. It.*, Mem. **5** (1): 120-125.
- Renault, P. (1959): Etat de parois en cavernes. Vermiculatons argileuses et cristallisations de gypse. *Ann. Spéléol.*, **14**: 249-252.
- Weber, E. (2004) : Étude des mouvements récents dans les karsts de Melchsee-Frutt (OW). Apport de la modélisation 3D et comparaison avec la grotte de Milandre (JU) et le réseau de Siebenhengste (BE). Dipl.-Arb. Univ. Neuchâtel, 167 S.

Zusammenfassung

Unter Vermikulation werden fleckige oder wurmartige Sedimentbelege auf Sinterbildungen und Höhlenwänden bezeichnet. Ihre Entstehung ist unabhängig vom Substrat, auf dem sie sich bilden. Neben Kalkstein und Sinter kommen sie daher auf einer Vielzahl von Unterlagen vor: Beton, Glas, vulkanische Gesteine etc.

Ihre Entstehung verdanken sie dünnen Wasserfilmen auf Oberflächen, in denen feine „Staubpartikel“ eingeweht werden, die bei der Austrocknung des Wasserfilms in kleinen „klumpenartigen Massen“ ausflocken. Für einen Windtransport sprechen die Kornverteilungskurven mit Maxima im Mittel- und Grobschluff, der sehr gute Sortierungsgrad sowie allothigene Komponenten, die nicht direkt aus dem anstehenden Kalkstein stammen. In der Schrattenhöhle könnte ein Zusammenhang zwischen dem Maximum der Kornverteilungskurve und der maximalen Winter-Höhlenwindgeschwindigkeit bestehen.

Dank

Ich danke Martin Trüssel von der HGU (vormals HGT) für die Organisation und Durchführung der Probenahme in der Schrattenhöhle, Katrin Monecke (vormals Limnogeologie, ETHZ) für die Anfertigung der smear slides, Wilfried Winkler (Geologie, ETHZ) für die Mineralanalysen unter dem Polarisationsmikroskop, Adrian Gilli (vormals Limnogeologie, ETHZ) für die Messungen mit dem ‚Coulomat‘ und Erwan Le Guerroué (Geologie, ETHZ) für die Korngrössenanalysen mit dem ‚Malvern-Mastersizer 2000‘.