

Fig. 5: 1 Mendips: Runding streams and risings  
2 Central Peak District, S. Pennines

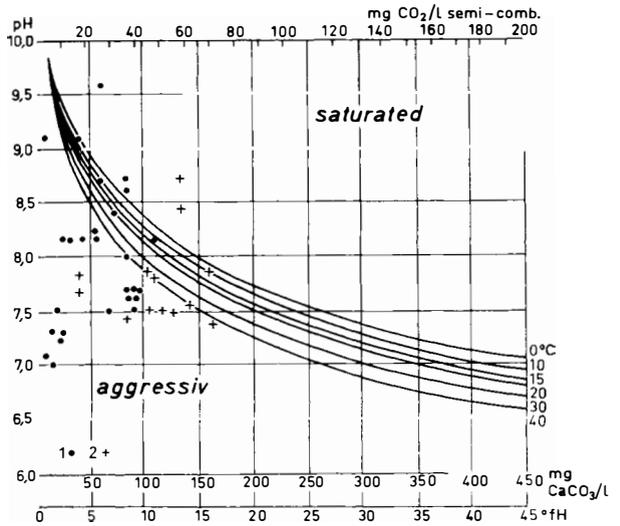


Fig. 6: New South Wales (Australia)  
1 Coolaman Plain (1330 m. above S. L., 1200 mm rainfall, 12° C. mean annual temp.)  
2 Jenolan (800 m. above S. L., 800 mm rainfall, 16° C. mean annual temp.)  
(from observations by J. N. Jennings)

Thus a brief review of the results now coming to light suggest that temperature is not a major factor in the dissolution of limestones. There is almost invariably a correlation between the log. of the discharge and the calcium hardness of waters; despite this maximum chemical denudation is most likely to occur at or near maximum discharge, due to the large volumes of water involved. Recent work suggests that non-climatic factors (lithology and structure of the limestones, depth and length of time of percolation) more than compensate for any variation due to temperature. Furthermore, the importance of soil CO<sub>2</sub> as a result of a vegetation cover has been completely ignored in hypotheses based solely on temperature variations. Such a situation has been for many years recognized by geographers and geologists — long before

the somewhat misleading attempts which have been made recently to over-simplify a very complex problem. It also illustrated the need to tackle the problem in a completely different manner.

References

1. CORBEL, J. 1959. "Erosion en Terrain Calcaire", Ann. Géogr., 68<sup>e</sup> année, pp. 97—116.
2. DOUGLAS, I. 1962. "An Evaluation of some Techniques used in the Study of landforms with special reference to Limestone Areas". Unpublished thesis, Univ. of Oxford.
3. KENDALL, P. F. and WROOT, H. E. 1924. "The Geology of Yorkshire", page 943.
4. PIGGOTT, D. 1963. Symposium on "Denudation in Limestone Regions"; Royal Geog. Soc. Unpublished.
5. INGLE SMITH, D. and MEAD, D. G. 1962. "The solution of Limestone", with special reference to Mendip. Proc. University of Bristol Spelaeological Soc. Vol. 9, No. 3, pp. 188—211.

KALKABTRAGUNGSMESSUNGEN IN DEN ÖSTERREICHISCHEN KALKHOCHALPEN

Mit 4 Abbildungen und 2 Tabellen

FRIDTJOF BAUER

Eines der wesentlichsten Merkmale eines Karstgebietes ist die dauernde Umgestaltung seiner Oberfläche durch die karbonatlösende Wirkung CO<sub>2</sub>-haltiger Niederschlagswässer. Diese kontinuierliche, auch unter Bodenbedeckung vor sich gehende Veränderung der Gesteinsoberfläche schafft

laufend neue Voraussetzungen für die Entwicklung der überlagernden Böden und der Struktur der Vegetation, wie auch für Mikroklima und Oberflächenwasserhaushalt. Die Frage nach der Geschwindigkeit des Karbonatgesteinsabtrages muß daher im Rahmen eines Karstforschungspro-

grammes stets eine zentrale Stellung einnehmen. Erst wenn diese Größe bekannt ist, kann unter Berücksichtigung der übrigen am Verkarstungsprozeß beteiligten Faktoren (Geologie, Oberflächengestalt, Klima, Boden, Vegetation, Wasserhaushalt) auf die weitere Entwicklung des Gesamtsystems geschlossen werden. Die Kenntnis der Entwicklungstendenz einer Karstfläche ist aber die wesentlichste Voraussetzung für die Planung aller in ihrem Bereich durchzuführenden wirtschaftlichen Maßnahmen.

In den österreichischen Karstgebieten ist der Verkarstungsprozeß am stärksten in den Kalkhochalpen wirksam. Boden und Vegetation stehen in Höhenlagen über 1600 m in ständigem Kampf mit der fortschreitenden Verkarstung, die hier die schwierigsten Voraussetzungen für sämtliche praktischen, vor allem forst- und weidewirtschaftlichen Maßnahmen schafft.

Eines der ausgeprägtesten österreichischen Hochkarstgebiete ist das Dachsteinmassiv, dessen östlicher Plateauteil, bei einer Fläche von rund 200 km<sup>2</sup>, Höhenlagen von 1400—2000 m umfaßt. In diesem Karstplateau wurde am Oberfeld (Gjaidalm, bei Obertraun) in 1830 m Seehöhe vom Speläologischen Institut eine Forschungsstation zur Untersuchung des Karstprozesses eingerichtet. Im Rahmen des dort eingeleiteten koordinierten Arbeitsprogrammes, an dem sämtliche einschlägigen Fachdisziplinen (wie Geologie, Morphologie, Hydrologie, Klimatologie, Boden- und Vegetationskunde) beteiligt sind, wird der Messung des Lösungsabtrages besondere Bedeutung zugemessen.

Der Untersuchungsbereich wird von gebanktem Dachsteinkalk aufgebaut. Der Kalk hat eine submikroskopische Körnung, der Kalziumkarbonatanteil beträgt durchschnittlich 98 % (Unlösliches und Sesquioxide 0,2—3,5 %, Magnesiumkarbonat meist weniger als 1 %). Als jüngste Eiszeitbildung finden sich in Hohlformen und auf Geländeverflachungen des Untersuchungsgebietes Moränen und sonstige gletschernahe Ablagerungen des Gschnitz- und Daunstadiums (8500—8000 v. Chr.) mit einem Kalziumkarbonatgehalt von durchschnittlich 92 % (Unlösliches und Sesquioxide 3—14 %). Während der letzten Vereisung wurden die teilweise von Karren zerfurchten Kalkflächen zum letztenmal glattgeschliffen. Klufftkarren und tiefe Rinnenkarren wurden hierbei z. T. nur gekappt, flache Rinnenkarren verfielen (besonders in Luvlagen) vollständig dem Gletscherabtrag.

Die in den während der letzten Vereisungsstadien abgeschliffenen Kalkflächen und auf den gleichaltrigen Gletscherablagerungen angelegten Lösungsformen haben sich seit dem Eisfreiwerden dieser Flächen, also während der letzten 10 000 Jahre, entwickelt. Aus dem Volumen dieser Lö-

sungshohlformen, sowie aus den Mengen des Lösungsrückstandes (soweit dieser nicht abtransportiert worden ist) kann auf den während dieses Zeitraumes erfolgten Mindestlösungsabtrag geschlossen werden.

Der aktuelle Kalkabtrag kann über die Messung des Kalkgehaltes in von abgegrenzten Kalkflächen abfließendem Niederschlagswasser festgestellt werden. Die Messung der Lösungsfähigkeit von Regen-, Schneeschmelz- und Bodendurchflusssäuren sowie die Bestimmung des Kalkgehaltes in Quellwässern liefert wertvolle Vergleichswerte.

Für die einzelnen Berechnungen wurde als „wirksamer Niederschlag“ der durchschnittliche Jahresniederschlag, vermindert um den Betrag der Schneeverdunstung, bezeichnet. Der „wirksame Niederschlag“ umfaßt also alles mit der Oberfläche in Berührung kommende Regen- und Schneeschmelzwasser und wurde für das Untersuchungsgebiet mit 1500 mm/Jahr angenommen. Ferner wurden die Berechnungen unter der Annahme gleichbleibender Verhältnisse von Niederschlag, Oberflächengestalt, Boden und Vegetation während der letzten 10 000 Jahre durchgeführt. Die daraus resultierenden Fehler werden in der Zusammenfassung behandelt.

In der Folge werden die im Dachsteingebiet gewonnenen Untersuchungsergebnisse dargelegt und miteinander verglichen.

### 1. Karbonatlösungsfähigkeit von Wässern

In Regenwasser, Schneeschmelzwasser und Bodendurchflusssäuren wurde mittels Marmorversuches (Heyer-Versuch) die Kalklösungsfähigkeit bestimmt. Regen- und Bodendurchflusssäuren wurden unter einer Paraffinölschicht gesammelt, um eine nachträgliche CO<sub>2</sub>-Aufnahme aus der Luft zu verhindern. Die untersuchten, ca. 10 cm mächtigen Bodenkörper (Rendzina mit Mattenvegetation, Latschenhumus mit Zwergstrauchvegetation) lagen zur Sammlung des Durchflusssäuren in flachen paraffinierten Blechtrichtern mit einer Fläche von ca. 1/10 m<sup>2</sup>. Das Schneeschmelzwasser wurde durch Schmelzen von Schnee (dessen Volumen zu 60 bis 70 % aus eingeschlossener Luft bestand) unter Luftabschluß gewonnen. Die mit Marmorpulver versetzten und absolut luftdicht aufbewahrten Wasserproben erreichten nach drei Tagen (bei öfterem Umschütteln) folgende Kalkgehalte:

	mg CaCO <sub>3</sub> /l °dH	
Schneeschmelzwasser	14	0,7
Regenwasser	16	0,9
Rendsinendurchflusssäure	35-50	2,0-2,8
Latschenhumusdurchflusssäure	50-70	2,8-4,0

Die durch die Marmorversuche gewonnenen Werte geben nur die minimale (ursprüngliche) Lösungsfähigkeit der Wässer an, da hierbei nur

die in den Wässern ursprünglich enthaltene Kohlensäure (und allenfalls die Humussäuren der Bodendurchflußwässer) wirksam wurden. (Die für die Bodendurchflußwässer, besonders für die Latschenhumusdurchflußwässer, erhaltenen Werte dürften zu niedrig sein, da die nur 10 cm mächtigen Bodenkörper beim Einbringen in die Blechtrichter eine weitgehende Störung des Gefüges erfahren.) Bei raschem Abfluß von Niederschlagswässern über freie Kalkflächen kann ihre ursprüngliche Lösungsfähigkeit z. T. erst nach längerem Lauf vollständig aufgebraucht werden, bei langsamem Abfluß kann auf engstem Raum über den ursprünglichen  $\text{CO}_2$ -Gehalt hinaus auch noch zusätzlich aus der Luft aufgenommenes  $\text{CO}_2$  lösend wirksam werden; bei gleicher Niederschlagshöhe ist der örtliche Lösungsabtrag bei großer Niederschlagsstärke geringer als bei geringer Niederschlagsstärke (Nieselregen). (Die  $\text{CO}_2$ -Aufnahme aus der Luft und die Kalklösung sind um so größer, je geringer die Schichtdicke des abfließenden Wassers und die Fließgeschwindigkeit sind und je größer die überflossene Kalkoberfläche ist.) So erreichte in flachen Karrenrinnen von rd. 1 m Länge (Neigung rd.  $50^\circ$ ) abfließendes Schneeschmelzwasser je nach Fließgeschwindigkeit (1—2 cm/s) Kalkgehalte von 7—14 mg  $\text{CaCO}_3$ /l. (Bei Härtewerten unter 14 mg  $\text{CaCO}_3$ /l wurde während des Abflusses noch nicht die gesamte ursprüngliche Lösungsfähigkeit des Schneeschmelzwassers wirksam.) Schneeschmelzwasser, das eine 2 m lange, mit Kalksand erfüllte Rinne (Neigung ca.  $5^\circ$ ) mit einer Fließgeschwindigkeit von rd. 2 mm/s durchsickerte, erreichte Kalkgehalte bis zu 24 mg  $\text{CaCO}_3$ /l ( $\text{CO}_2$  Aufnahme aus der Luft!).

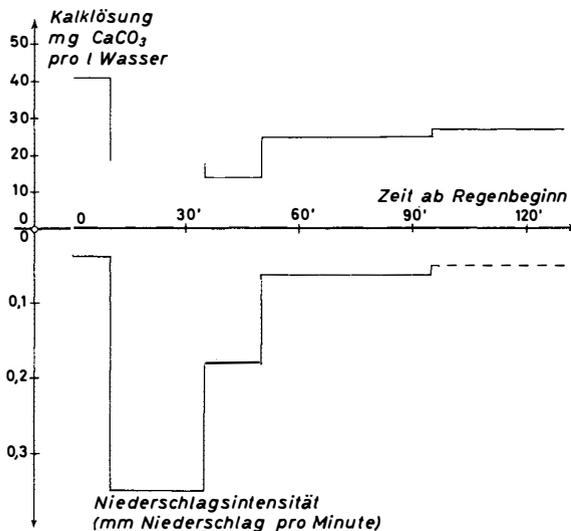


Abb. 1: Änderung von Niederschlagsintensität und Kalklösung während eines Regenfalles (Versuchsfläche Gjaidalm „L“)

Die Abhängigkeit des Betrages der Kalklösung von der Niederschlagsstärke zeigt Abb. 1. (Die hohen Abtragungswerte zu Beginn des Niederschlages dürften auf eine entsprechende Vorbereitung der Felsoberfläche während der dem Niederschlag vorangegangenen Trockenperiode zurückzuführen sein.)

Die ursprüngliche Lösungsfähigkeit der Bodendurchflußwässer beträgt ein Vielfaches der Regen- und Schneeschmelzwässer. Sie wird infolge des langsamen Durchflusses der Niederschlagswässer durch die Böden meist an Ort und Stelle wirksam und führt dort zu besonders ausgeprägten Lösungsformen.

## 2. Lösungsabtrag von freien Felsflächen

Auf der Gjaidalm wurden in 1700 m Seehöhe drei geneigte Flächen von massivem, ungeklüftetem Dachsteinkalk durch bis 3 cm hohe Paraffinwälle abgegrenzt. Das innerhalb dieser Begrenzungen anfallende und abfließende Niederschlagswasser wurde in geschlossenen Gefäßen gesammelt. Im Abflußwasser wurde für jedes Niederschlagsereignis (bzw. für Zeitabschnitte gleicher Niederschlagsstärke) der Kalkgehalt bestimmt. Aus der Menge des abgeflossenen Wassers und dem darin gemessenen Kalkgehalt wurde der in den einzelnen Untersuchungsflächen erfolgte Kalkabtrag berechnet.

Auf diese Art wurde der Kalkabtrag in einer nur schwach skulpturierten Fläche (L), in einem Rinnenkarrenstück mittlerer Dimension (R) und in einer langen, ausgeprägten Karrenrinne (Ri) gemessen (Abb. 2).

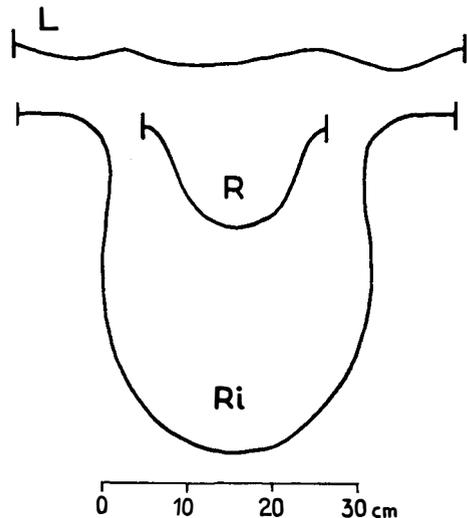


Abb. 2: Durchschnittsprofile durch die Untersuchungsflächen L, R und Ri quer zur Flächenneigung.

Die für die einzelnen Flächen bestimmten Werte sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt. Neben der durchschnittlichen Neigung der Gesamtflächen (bei

Tabelle 1

Flächenbezeichnung		L	R	Ri																
Flächenneigung		32°	25°	24°																
Flächenlänge im Gefälle	cm	168	122	790																
FG = Gesamtgesteinsoberfläche	cm <sup>2</sup>	6 020	4 534	101 519																
FT = Tangentenfläche	cm <sup>2</sup>	5 577	2 685	50 769																
FH = Horizontalprojektion	cm <sup>2</sup>	4 730	2 440	46 300																
Gesamthöhe der untersuchten Niederschläge	mm	335	322	176																
Aus den Flächen abgeflossene Wassermengen	l	102,4	51,6	357,9																
Extremwerte des Kalkgehaltes der Abflußwässer	mg CaCO <sub>3</sub> /l	14—63	15—76	30—96																
Durchschnittliche Härte der Abflußwässer	mg CaCO <sub>3</sub> /l	24,6	29,0	49,4																
Kalkabtrag von den Flächen pro 1 mm Niederschlag	mg CaCO <sub>3</sub> /l	7,5	4,6	100,5																
Kalkabtrag von den Flächen in 10 000 Jahren (zu 1500 mm wirksamem Niederschlag)	cm <sup>3</sup>	41 800	25 500	581 000																
In 10 000 Jahren abgetragene Kalkschicht	<table style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td rowspan="3" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td> <td>berechnet auf FG</td> <td>cm</td> <td>6,95</td> <td>5,63</td> <td>11,50</td> </tr> <tr> <td>berechnet auf FT</td> <td>cm</td> <td>7,50</td> <td>9,50</td> <td>5,72</td> </tr> <tr> <td>berechnet auf FH</td> <td>cm</td> <td>8,85</td> <td>10,50</td> <td>12,55</td> </tr> </table>	}	berechnet auf FG	cm	6,95	5,63	11,50	berechnet auf FT	cm	7,50	9,50	5,72	berechnet auf FH	cm	8,85	10,50	12,55			
}	berechnet auf FG		cm	6,95	5,63	11,50														
	berechnet auf FT		cm	7,50	9,50	5,72														
	berechnet auf FH	cm	8,85	10,50	12,55															
Gemessenes Volumdefizit, berechnet als Kalkschicht über FH	cm	1,3	10,0	16,4																

R und Ri der Tangentenflächen) sind für jede Fläche die Länge in der Richtung des Gefälles, die Gesamtgesteinsoberfläche (FG), die Tangentenfläche (FT), die Horizontalprojektion (FH) der Tangentenfläche, die Summe der erfaßten Niederschläge (Messungen der Station Gjaidalm-Feld), die Menge des während dieser Niederschläge aus der Fläche abgeflossenen Wassers und dessen Kalkgehalte angegeben. Aus diesen Werten wurden der Kalkabtrag von den Flächen in 10 000 Jahren (bei Annahme von 1500 mm wirksamem Niederschlag pro Jahr) und daraus die Mächtigkeiten der in diesem Zeitraum von den Flächen abgetragenen Kalkschichten (bezogen auf FG, FT und FH) berechnet. Diesen Werten wurde das gemessene Volumendefizit (Volumen zwischen Tangentenfläche und Gesteinsoberfläche, berechnet auf eine Kalkschicht über FH) als Mindestlösungsabtrag in den letzten 10 000 Jahren (seit Eisfreiwerden der vom Gletscher glattgeschliffenen Flächen) gegenübergestellt.

Die für die Projektionen der Untersuchungsflächen auf die Kartenfläche (FH) berechneten Abtragswerte, die für die Bestimmung des Gebietsabtrages allein ausschlaggebend sind, sind bei allen drei Untersuchungsflächen, unabhängig von den für die Gesamtgesteinsflächen FG und für die Tangentenflächen FT berechneten Werten, von der gleichen Größenordnung (8,85—12,55 cm/10 000 Jahre). Dies zeigt, daß durch reines Niederschlagswasser von verschieden stark skulpturierten freien Kalkflächen nur wenig voneinander abweichende Kalkmengen pro Flächeneinheit der Kartenfläche abgetragen werden.

Die gemessenen Volumendefizitwerte sind in jedem Fall geringer als der tatsächlich erfolgte Abtrag, da während des Abtragsprozesses, wenn auch in geringerem Maße als die Rinnentiefen, auch die Höhenlinien (Karrenrippen und -grate) der Lö-

sung ausgesetzt gewesen sind. Daraus ist auch das für die Fläche L, die einem flächenhaften Abtrag unterlegen ist, festgestellte, weit unter dem aus dem aktuellen Abtrag für 10 000 Jahre berechneten Abtragswert liegende Volumendefizit erklärbar. Das Volumendefizit der ausgeprägten Karrenrinne Ri ist dagegen größer als der berechnete Abtragswert, was auf die früher (postglaziales Klimaoptimum!) über und in ihr gelegenen Latschenhumusböden, deren Durchflußwässer einen weitaus stärkeren Kalkabtrag bewirken als reines Niederschlagswasser und die über der tiefen Rinne Ri mächtiger waren als über den beiden anderen Versuchsflächen, zurückgeführt werden muß.

### 3. Lösungsabtrag unter Latschenbeständen

Im Gegensatz zu freien Kalkflächen, von denen (bis auf eine dünne Schicht Haftwasser) das anfallende Niederschlagswasser rasch und zur Gänze abfließt, wird in Bodenkörpern das Niederschlagswasser gespeichert. Ein Teil des vom Boden aufgenommenen Wassers verfällt der Verdunstung, der Rest durchsickert den Bodenkörper mehr oder weniger langsam. Aus mächtigen Bodenkörpern kann noch mehrere Tage nach Ende eines Niederschlagsereignisses Wasser ausfließen (Abb. 3). Durch die langsame Abgabe der Bodendurchflußwässer an den Felsuntergrund wird ihre an und für sich hohe ursprüngliche Lösungsfähigkeit meist an Ort und Stelle voll wirksam.

Im Bereiche der Gjaidalm wurde nach einigen Niederschlagsereignissen der Verlauf des Abflusses von Bodendurchflußwasser aus einem mächtigen Latschenbestand verfolgt. Während die Abflussmengen, von einem noch während oder (bei kurz dauernden Niederschlägen) erst nach dem Ende des Niederschlagsereignisses eintretenden Maximum an, zuerst rasch und dann immer langsamer

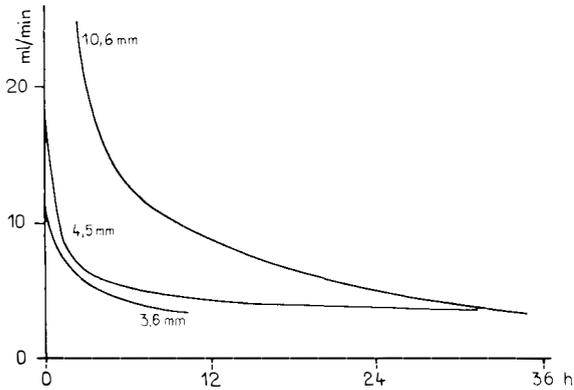


Abb. 3: Wasserabfluß aus einer Latschenhumusfläche.

Der in einer Karrenrinne erfolgende Teilabfluß aus einer über  $10 \text{ m}^2$  großen Latschenhumusfläche mit Bodenmächtigkeiten von 20—100 cm wurde vom Ende einiger Regenfälle (mit Niederschlagshöhen von 3,6 mm, 4,5 mm und 10,6 mm) an bis über 36 Stunden verfolgt. Auf der Abszisse ist die seit dem Ende des Niederschlags verstrichene Zeit, auf der Ordinate ist der Durchfluß in der beobachteten Rinne in ml/min aufgetragen.

Der Durchfluß am Ende des Niederschlags ist je nach Regenstärke und Niederschlagshöhe verschieden hoch, die Abnahme des Abflusses erfolgt je nach den Verdunstungsverhältnissen verschieden rasch, erstreckt sich jedoch meist über einige Tage.

abnehmen, bleiben die im Durchschnitt um  $100 \text{ mg CaCO}_3/\text{l}$  ( $5,6^\circ \text{ dH}$ ) liegenden Härtewerte stets von der gleichen Größenordnung.

Die unter laboratoriumsmäßigen Versuchsbedingungen gemessenen Werte der Karbonatlösungsfähigkeit von Humuswässern aus dem Boden des Latschenbestandes (s. o.) sind kleiner, was vor allem in der hierbei verwendeten nur 10 cm mächtigen Bodenschicht, die außerdem beim Einbringen in die Trichter stark gestört wurde, begründet sein dürfte. (Die Mächtigkeit des Bodens des untersuchten Latschenbestandes betrug demgegenüber 20—100 cm.)

Nimmt man die in einem Latschenbestand erfolgende Verdunstung des anfallenden Niederschlagswassers mit 50% an, beträgt bei einem wirksamen Niederschlag von 1500 mm im Jahr der Bodendurchfluß  $75 \text{ ml Wasser pro cm}^2$  Fläche und pro Jahr. Bei einem durchschnittlichen Kalkgehalt von  $100 \text{ mg CaCO}_3$  pro Liter Durchflußwasser beträgt somit der Kalkabtrag  $7,5 \text{ mg CaCO}_3/\text{cm}^2/\text{Jahr}$ . Die Dicke der in 10 000 Jahren abgetragenen Kalkschicht ergibt sich daraus mit rd. 28 cm.

#### 4. Lösungsabtrag über Kalkmoränenschutt

In die Oberflächen von eiszeitlichen Moränenschuttkörpern, die meist eng mit sonstigen eiszeitlichen gletschernahen Ablagerungen verzahnt und die in Höhenlagen von 1800—2000 m mit einer

reichen Mattenvegetation bedeckt sind, sind bei geringen Flächenneigungen meist regelmäßig ausgebildete und gleichmäßig über die Flächen verteilte Trichter mit Durchmessern von 1—3 m eingesenkt (Abb. 4). Die Tiefe der Trichter übersteigt selten den Betrag ihres halben Durchmessers. Die Einzugsbereiche umfassen im Durchschnitt 5 bis  $10 \text{ m}^2$  und sind innerhalb eines Trichterfeldes stets von der gleichen Größenordnung. Unter den Trichtersohlen liegt in der Regel ein bis über 1 m mächtiger Tonbodenpfropfen, während die flachen Bereiche zwischen den Trichtern von nur wenige cm mächtigen Rendzinen bedeckt sind. Vom Beginn der Eintiefung der Trichter in horizontale oder nur schwach geneigte Schuttflächen an, fließen die anfallenden Niederschlagswässer nicht mehr oberflächlich ab, sondern versickern innerhalb der einzelnen Trichtereinzugsbereiche. Damit wird die gesamte Lösungsfähigkeit der Bodendurchflußwässer innerhalb der einzelnen Trichtereinzugsbereiche wirksam, wie auch die Lösungsrückstände innerhalb der einzelnen Einzugsbereiche deponiert bleiben. Der unter den Trichtersohlen liegende Tonbodenkörper wird daher durch den nach dem letzten Eisfreiwerden innerhalb des Trichtereinzugsbereiches angefallenen Moränenschuttlösungsrückstand gebildet. Aus dem Gehalt an Unlöslichem und Sesquioxiden im Tonbodenkörper und im umgebenden Moränenschutt kann auf die Menge des seit dem Eisfreiwerden (d. i. während

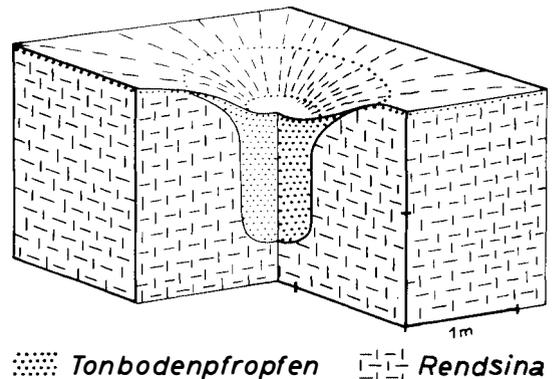


Abb. 4: Schnitt durch einen Moränenschuttlösungstrichter mit eingelagertem Tonbodenpfropfen; darunter Verteilungsschema der Trichter und ihrer Einzugsbereiche in einer Moränenschuttfläche.

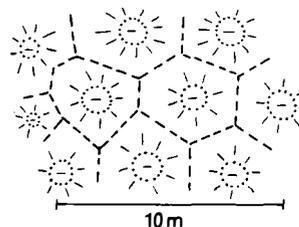


Abb. 4: Schnitt durch einen Moränenschuttlösungstrichter mit eingelagertem Tonbodenpfropfen; darunter Verteilungsschema der Trichter und ihrer Einzugsbereiche in einer Moränenschuttfläche.

der letzten 10 000 Jahre) gelösten Moränenschuttes geschlossen werden.

Für einen Schutttrichter wurde auf Grund der Meßergebnisse (genaue Vermessung des Trichters, chemische Analysen des Tonbodens und des Moränenschuttes) eine Abtragsbilanz erstellt.

Bei einem Trichtereinzugsbereich von 7,322 m<sup>2</sup> beträgt das Volumen des Trichters (gemessen von der Tangentenfläche über dem Trichterrand bis zur Schuttoberfläche der Trichtersohle 2,060 m<sup>3</sup>. Die Menge des im Tonbodenkörper enthaltenen Unlöslichen und der Sesquioxide beträgt 492,7 kg, der durchschnittliche Gehalt an Unlöslichem und Sesquioxiden im umgebenden Moränenschutt beträgt 6,6 % bei einem durchschnittlichen Karbonatgehalt von 93,4 %. Es müssen daher zur Bildung der Menge des vorliegenden Lösungsrückstandes 7.465 kg Moränenschutt der Karbonatlösung anheimgefallen sein, was bei einem durchschnittlichen spezifischen Gewicht von 1,56 des umgebenden Moränenschuttes einem Schuttvolumen von 4,785 m<sup>3</sup> entspricht. Die Differenz zwischen dem Volumen des gelösten Schuttes (4,785 m<sup>3</sup>) und dem Trichtervolumen (2,060 m<sup>3</sup>) ergibt mit 2,725 m<sup>3</sup> jene Schuttmenge, die nach dem Eisfreiwerden der Fläche und vor dem Einsetzen des Lösungsabtrages innerhalb des Trichtereinzugsbereiches über der heutigen Tangentenfläche gelegen haben muß und deren Karbonatanteil ebenfalls durch Lösung abgetragen wurde.

Aus den errechneten Kubaturen des abgetragenen Schuttes und der Größe des Trichtereinzugsbereiches kann die Mächtigkeit der abgetragenen Schuttschichten (unter Annahme einer über der gesamten Schuttoberfläche gleichmäßig wirkenden Lösung ohne Trichterbildung) berechnet werden:

Schuttschicht oberhalb der heutigen Tangentenfläche	37,2 cm
Schuttschicht, berechnet aus dem heutigen Trichtervolumen (unterhalb der heutigen Tangentenfläche bis zur heutigen Schuttoberfläche)	28,1 cm
Gesamtschichtdicke	65,3 cm

Während der letzten 10 000 Jahre ist somit (auf die Gesamtschuttfläche berechnet) eine Kalkmoränenschuttschicht von rd. 65 cm Mächtigkeit abgetragen worden, was einer 36 cm mächtigen Schicht von massivem Kalk (99 % Karbonate, 1 % Unlösliches und Sesquioxide) entspricht.

Nimmt man den wirksamen Niederschlag für das Untersuchungsgebiet mit 1500 mm/Jahr an, so ergibt sich bei einer Verdunstung von rd. 30 % des anfallenden Niederschlagswassers (nach Lysimetermeßergebnissen in Tonböden mit Mattenvegetation) ein Durchfluß von 1050 l/m<sup>2</sup> im Jahr. Da in 10 000 Jahren in einer Fläche von 7,322 m<sup>2</sup>

6972 kg CaCO<sub>3</sub> gelöst worden sind, beträgt der Lösungsabtrag pro Quadratmeter und Jahr 95,2 g CaCO<sub>3</sub>. Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher Kalkgehalt der Durchflußwässer von 90,5 mg CaCO<sub>3</sub>/l (= 5,1° dH).

Aus den Abtragswerten kann die Absenkungsgeschwindigkeit der Schuttoberfläche für das Trichterzentrum (stärkster Lösungsabtrag) mit durchschnittlich 18 cm/1000 Jahre und für die Ränder der Einzugsbereiche (geringster Lösungsabtrag) mit durchschnittlich 3,6 cm/1000 Jahre errechnet werden.

### 5. Härte von Quellwässern

Die über 5 Jahre durchgeführte tägliche Bestimmung der Härte der Wässer von 7 Karstquellen des Dachsteinmassives ergab, daß die Härtewerte bis über 30 % um den langfristigen Mittelwert schwanken können. Die Maximalwerte treten im Spätwinter (vor Einsetzen der Schneeschmelze, bei äußerst geringen Quellschüttungen) auf, die Minimalwerte während der Schneeschmelze (bei maximalen Schüttungswerten).

Der Jahresdurchschnitt der Härte von aus unvergletscherten Plateaubereichen (mit Latschen- und Mattenvegetation und kahlen Felsflächen) stammenden Quellwässer liegt zwischen 90 und 110 mg CaCO<sub>3</sub>/L (5—6° dH). Der Durchschnittswert der Härte von Quellwässern, an denen auch Gletscherwässer beteiligt sind, schwanken um 50—70 mg CaCO<sub>3</sub>/L (3—4° dH).

- Aus unvergletscherten Plateaubereichen (mit teilweiser Vegetationsbedeckung) stammende Wässer haben nach Niederschlägen eine geringere Härte als während Trockenperioden. Das Absinken der Härte wird durch die geringere Kalklösung der bei Niederschlägen rasch über kahlen Kalkfels abfließenden oder die Bodenkörper rasch durchdringenden Wässer verursacht.
- Gletscherwässer führende Quellen haben nach Niederschlägen eine höhere Härte als während Trockenperioden, da in ihnen nun in erhöhtem Maße Wässer aus Bodenkörpern oder von freien Felsflächen des weiteren Einzugsbereiches austreten, die in jedem Falle größere Härtewerte erreichen als rasch versinkende Gletscherwässer.

Während des Sommers zeigen die Härtekurven einen Verlauf, der für die Art des jeweiligen Quelleinzugsbereiches charakteristisch ist.

### Zusammenfassung

Ziel der hier beschriebenen, im Dachsteingebiet in Höhenlagen von 1700 bis 1800 m durchgeführten Messungen war es, den Betrag des nachweislich in den Kalkhochalpen erfolgten Kalkabtrages größenordnungsmäßig zu bestimmen.

Die einzelnen Werte wurden unter der Annahme berechnet, daß während der letzten 10 000 Jahre die gleichen Klima-, Boden- und Vegetationsverhältnisse wie heute geherrscht hätten, was jedoch keineswegs der Fall gewesen ist. Vor allem muß hier die postglaziale Wärmezeit berücksichtigt werden, während der (etwa zur Bronzezeit) die Waldgrenze um 400 m höher lag als heute. So konnte auch nachgewiesen werden (BAUER 1958), daß ein Großteil der heute freiliegenden Karrenrinnen unter Bodenbedeckung geformt worden ist, unter der nach den hier beschriebenen Meßergebnissen der Lösungsabtrag größer gewesen sein dürfte als bei Freiliegen der Karrenflächen. Andererseits lagen die heute von mächtigen Latschenhumusböden bedeckten Flächen nach dem Eisrückzug noch lange frei, bevor eine Besiedlung durch eine Pioniervegetation erfolgte; die mächtigen Latschenhumusbestände wurden wohl erst zu Beginn und während der postglazialen Wärmezeit angelegt. In diesen Bereichen wird also vorwiegend ein geringerer Lösungsabtrag als heute erfolgt sein. (Wie weit hier außerdem eine wärmezeitliche Waldvegetation einen größeren Verdunstungsfaktor und damit wiederum eine Verminderung des Lösungsabtrages zur Folge hatte, kann nicht abgeschätzt werden.)

Aus den aktuellen Abtragungswerten wurde für die letzten 10 000 Jahre für heute freiliegende Kalkflächen der Abtrag einer Kalkschicht von rd. 9 bis 12,5 cm, für Latschenhumusflächen ein Abtrag einer Kalkschicht von rd. 28 cm berechnet. Nach obigen Überlegungen muß jedoch der Durchschnittswert des Kalkabtrages während der letzten 10 000 Jahre in heute freiliegenden Kalkflächen größer und in heute latschenbestandenen Kalkflächen geringer gewesen sein als der dort heute gemessene Wert. Somit muß der Durch-

schnittswert des postglazialen Kalkabtrages im Untersuchungsgebiet in der Größenordnung von rd. 15—20 cm angenommen werden.

Aus den Volumendefiziten einzelner Karrenrinnen wurde ein minimaler postglazialer Kalkabtrag von 10—16 cm berechnet, was ebenfalls für einen Durchschnittsabtragungswert von mehr als 15 cm spricht.

Diese Werte stimmen mit dem gemessenen postglazialen Abtrag von Schichtflächen (10—20 cm, BAUER 1953) und den an Karrentischen gemessenen Abtragungshöhen (rd. 15 cm, BÖGLI 1961) gut überein.

Grundsätzlich andere Verhältnisse als über massivem Kalk herrschen in Moränenschuttflächen, die im Untersuchungsgebiet gegenüber den (freiliegenden oder bodenbedeckten) Kalkflächen zurücktreten. Moränenschuttkörper liegen zum überwiegenden Teil in Hohlformen des Plateaus, die stets größere Niederschlagshöhen aufweisen als die auf Hang- und Kuppenlagen beschränkten Felsflächen. Dementsprechend muß hier auch der Lösungsabtrag größer sein als in Kalkfelsbereichen. Aus der beschriebenen Bilanzierung ergab sich für den untersuchten Schutttrichter für die Nacheiszeit ein Abtrag einer Schicht von 65 cm Moränenschutt, was einer Kalkfelschicht von 36 cm entspricht. Ferner muß noch berücksichtigt werden, daß in Moränenschuttflächen die gesamte Lösungsfähigkeit der Bodendurchflußwässer an der Oberfläche des nur langsam durchsickerten Moränenschuttkörpers wirksam wird, während in Felsflächen bedeutende Mengen des abfließenden Niederschlags- oder Bodendurchflußwassers an Klüften versinken, noch bevor ihre volle Lösungsmöglichkeit an der Oberfläche wirksam werden kann.

Die wesentlichsten Meßergebnisse wurden in der Tabelle 2 zusammengefaßt.

Tabelle 2

		Kalkfels		Moränenschutt
		freie Felsfläche	mit Latschenhumus bedeckt	
Gemessene Extremwerte der Kalklösung in mg CaCO <sub>3</sub> pro Liter Abflußwasser		14—96	(70—)100	—
Durchschnitt des Kalkgehaltes der Abflußwässer in mg CaCO <sub>3</sub> /l		25—50	ca. 100	—
Kalkabtrag seit dem Eisrückzug, berechnet als Schichtdicke massiven Kalkes über der Karrenfläche in cm	Minimaler Abtrag, berechnet aus Volumdefizit	10—16	—	15,5
	Abtrag, berechnet aus aktuellen Abtragungswerten, bzw. Bilanzierung	> 9—13	< 28	36

(Die um 90—110 mg CaCO<sub>3</sub>/l liegenden Durchschnittswerte der zum größten Teil aus vegetationsbedeckten Flächen stammenden Quellwässer entsprechen den Härtewerten der Humusabflußwässer von Latschenbeständen.)

Die um 90—100 mg CaCO<sub>3</sub>/l liegenden Härte-durchschnittswerte der aus zum größten Teil vegetationsbedeckten Flächen stammenden Quellwässer entspricht den Härtewerten der Humusabflußwässer von Latschenbeständen.

#### Ausblick

Mit den hier beschriebenen Untersuchungen wurden neben den Werten des aktuellen Kalkabtrages auch wesentliche Anhaltspunkte für die Größenordnung des nacheiszeitlichen Kalkabtrages gewonnen. Diese Werte gelten jedoch nur für das Untersuchungsgebiet und können selbst auf benachbarte Hochkarstflächen nur mit Einschränkungen übertragen werden. So betragen die Niederschlagshöhen im südöstlichen Teil des Dachsteinmassives nur mehr rd. 70 % der im Gjaidalgebiet gemessenen, was weitgehend abweichende Lösungsabtragswerte zur Folge haben muß. Um so größer müssen die Abweichungen der Lösungsabtragswerte in voralpinen Karstgebieten (bei z. T. noch geringeren Niederschlagshöhen und unter dichter Bewaldung) sein, von außeralpinen Karstgebieten ganz zu schweigen.

Bisher wurden in den verschiedensten Karstgebieten der Erde von zahlreichen Autoren Untersuchungen über die Größe des Lösungsabtrages durchgeführt. Diese Untersuchungen mußten sich notgedrungen meist auf Einzelmessungen beschränken, da vor allem in abgelegenen, verkehrsmäßig schlecht aufgeschlossenen, manchmal nur im Rahmen von Expeditionen erreichbaren Gebieten, in den seltensten Fällen ähnliche Arbeitsmöglichkeiten bestehen wie im Dachsteingebiet. Außerdem werden die Abtragsmessungen oft nach verschiedenen Methoden durchgeführt, so daß ihre Ergebnisse nicht immer voll vergleichbar sind.

Es muß daher angeregt werden, einheitliche, möglichst einfache Methoden auszuarbeiten, die eine Erfassung des aktuellen Kalkabtrages auch unter schwierigsten Voraussetzungen gestatten und einander vergleichbare Werte liefern. In Frage kommen hierfür:

1. Bestimmung der ursprünglichen Kalklösungsfähigkeit von Wässern (Marmorversuch);
2. Erfassung von Vergleichswerten der Kalklösungsfähigkeit von Niederschlags- und Bodenwässern durch die lösungsbedingte Gewichtsabnahme von Marmorkörpern gleicher Größe, Form, Struktur und Zusammensetzung, die langfristig den Niederschlägen bzw. den Bodendurchflußwässern (eingraben!) ausgesetzt werden;
3. Bestimmung der Härte von Oberflächenabflußwässern unter Berücksichtigung des Charakters der Abflußflächen und der Niederschlagsverhältnisse;
4. Bestimmung der Härte von Karstquellwässern.

Die systematische Durchführung solcher vereinheitlichter Messungen im Rahmen einer internationalen Zusammenarbeit aller, in den verschiedensten Klimagebieten arbeitenden Karstmorphologen könnte ein weltumfassendes Vergleichsmaterial erbringen. Die Einleitung eines solchen Untersuchungsprogrammes (nach Festlegung einheitlicher Methoden), etwa im Rahmen eines „Karstmorphologischen Dezenniums“, müßte daher eine der Hauptaufgaben der Karstkommission bei der Internationalen Geographischen Union sein.

#### Literatur:

- BAUER, F.: Verkarstung und Bodenschwund im Dachsteingebiet. — Mitt. d. Höhlenkommission, Jg. 1953, H. 1.  
 —: Nacheiszeitliche Karstformen in den österreichischen Kalkhochalpen. — Deuxième Congrès International de Spéléologie (Bari-Lecce-Salerno 1958), Tome I.  
 BÖGLI, A.: Probleme der Karrenbildung. — Geographica Helvetica, H. 3, 1951.  
 —: Der Chemismus der Lösungsprozesse und der Einfluß der Gesteinsbeschaffenheit auf die Entwicklung des Karstes. — Report of the Commission on Karst Phenomena, IGU, New York, 1956.  
 —: Kalklösung und Karrenbildung. — Zeitschr. f. Geomorphologie, N. F., Suppl.-Bd. 2, 1960.  
 —: Karrentische, ein Beitrag zur Karstmorphologie. — Zeitschr. f. Geomorphologie, N. F., Bd. 5, H. 3, 1961.

## UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN EINFLUSS VON MIKROORGANISMEN AUF DAS PHÄNOMEN DER KARSTBILDUNG

Mit 3 Tabellen

BOLESŁAW SMYK und MARIA DRZAL

### I. Einleitung

Der Verkarstungsprozess von Kalksteinen verläuft unter dem Einfluß physikalischer, chemischer und biologischer Faktoren. Die Rolle der physikalischen und chemischen Faktoren in der Entwick-

lung der Karsterscheinungen ist bereits vielseitig bearbeitet worden und bildet eines der wesentlichsten Probleme in der Karsterforschung der in verschiedenen Klimazonen gelegenen Gebiete.

Der biologische Faktor wurde bisher vor allem vom Standpunkt mechanischer und biochemischer