

Zeitschrift: Regio Basiliensis : Basler Zeitschrift für Geographie
Herausgeber: Geographisch-Ethnologische Gesellschaft Basel ; Geographisches Institut der Universität Basel
Band: 12 (1971)
Heft: 2

Artikel: Karstdenudation : das Ausmass des korrosiven Kalkabtrags
Autor: Bögli, Alfred
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1089203>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Karstdenudation – das Ausmass des korrosiven Kalkabtrags

ALFRED BOGLI

1 Das Problem des korrosiven Kalkabtrags

Der Kalkabtrag erfolgt teils mechanisch, teils korrosiv. Der mechanische Kalkabtrag ist vor allem orographisch, lithologisch und klimatisch bedingt. *Corbel* (1959b) schätzt ihn in Periglazialgebieten im Gebirge zu 50% des Lösungsabtrages, in hügeligem Gelände zu einem Viertel und in Plateaulandschaften zu einem Zehntel. Ausserhalb des Permafrostes ist er wesentlich geringer und ist in reinen Kalkgebieten und in den Tropen nahezu Null. Aber auch in Frostklimaten wird, von einigen Ausnahmen abgesehen, der Kalk zum grössten Teil korrosiv abgetragen. Es sei daher an den Anfang dieser Studie die übliche Summengleichung der Kalklösung gestellt:



Aus dieser Gleichung ist ersichtlich, dass zur Kalklösung CO_2 unerlässlich ist, und dass um so mehr Kalk gelöst werden kann, je mehr CO_2 zur Verfügung steht. Kalk ist praktisch in jeder Menge da; das Wasser selbst bestimmt die Lösungsmenge, so dass die wirkliche Variable im System $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ das Kohlendioxid ist. Es stammt, von seltenen Ausnahmen abgesehen, aus der Luft, sei es nun aus der atmosphärischen Luft, der Höhlenluft oder der Bodenluft.

Zwischen dem Kohlendioxid der Luft und dem gelösten Kalk bestehen Beziehungen, die durch viele Gleichgewichte geregelt werden. Das gasförmige CO_2 wird durch den Partialdruck P_{CO_2} in Atmosphären angegeben. Für die Lösung im Wasser gilt das Gesetz:

$$\text{CO}_2 \text{ gel. in g} = a \cdot P_{\text{CO}_2} \cdot 1,964$$

Der Austauschfaktor a sinkt von 0°C bis 20°C auf die Hälfte, nämlich von 1,713 auf 0,878. Bei der gleichen Temperaturzunahme steigt der Bedarf an Gleichgewichtskohlendioxid für den gelösten Kalk auf das Doppelte, so dass die maximal mögliche Kalkkonzentration bei konstantem P_{CO_2} auf einen Viertel absinkt. Darauf stützt sich vor allem *Corbel* bei der Beurteilung der Karstdenudation in den verschiedenen Klimazonen. Er vertritt in seinen Arbeiten die Auffassung, der Kalkabtrag nehme mit steigender Temperatur beträchtlich ab. Er sucht zu beweisen, dass unter vergleichbaren geologischen und morphologischen Bedingungen in den kalten Zonen zehnmal mehr Kalk gelöst wird als in den Tropen, und dass die Karstdenudation um diesen Betrag höher ist.

Die Berechnung der Karstdenudation erfolgt nach *Corbel* auf Grund der nachfolgenden Gleichung, in welcher der Kalkabtrag K in mm pro 1000 Jahren, die Abflusshöhe A in dm und der Kalkgehalt G in ppm gemessen sind. Die Dichte des Kalkes wurde zur rechnerischen Vereinfachung von *Corbel* mit $2,5 \text{ g/cm}^3$ eingesetzt.

Tabelle 1: Korrosiver Kalkabtrag nach *Corbel* (1959b), ergänzt durch Niederschlag und Abfluss

	Nieder- schlag mm	Abfluss mm	Abtrag mm/1000 J.
<i>Bergregionen mit mehr als 2000 mm Niederschlag</i>			
kalt (Svartisen, Mittelnorwegen)	5000	4000	450
warm (Rio Usumacinto, Südyucatan)	2000	760	45
<i>Hügelländer mit 1000—1600 mm Niederschlag</i>			
kalt (Quebec)	1500	1050	160 ¹
warm (Rio Champoton, Yucatan)	1300	300	16
<i>Ebenen mit 300—500 mm Niederschlag</i>			
kalt (Lappland)	²	280	40
warm (Chélif, Hochland der Schotts)	²	55	4
<i>Ebenen mit weniger als 200 mm Niederschlag</i>			
kalt (Unterer Mackenzie)	80	20	14
warm (Rio Grande bei S. Acacia)	²	20	1,4

¹ Die Abtragungsgrößen liegen in der gleichen Region sonst zwischen 75 und 150 mm/1000 J. (nach *Corbel* 1958).

² Nicht näher bestimmbar, doch im Rahmen der Gruppe liegend.

$$K \text{ mm/1000 J.} = \frac{4}{100} \cdot A \cdot G$$

Diese Gleichung gilt für Gebiete mit einem zu vernachlässigenden Areal von nichtkarbonatischem Gestein. Andernfalls setzt *Corbel* den reziproken Wert des Flächenanteiles an löslichem Gestein ein, «n».

$$K \text{ mm/1000 J.} = \frac{4}{100} \cdot A \cdot G \cdot n$$

Der Anteil des löslichen Gesteines ist eine schwer fassbare Grösse. Nicht selten sind die unlöslichen und undurchlässigen Gesteine auch kalkhaltig, oder das Wasser versinkt auf Klüften in den tiefer liegenden Kalk, oder der Kalk ist von kalkfreiem Boden bedeckt. Das berechnete K wird vom Faktor n wesentlich beeinflusst. Ohne sehr gute Kenntnis der Lokalgeologie und der lokalen Böden kann eine Entscheidung nur schwer gefällt werden. Beispielsweise liegen über dem Karbonkalk mit dem Flint-Ridge-Cave-System (Kentucky) Quarzsandsteinbänke, z. B. der Big Clifty Sandstone. Das Wasser sickert jedoch durch dieses klüftige Gestein und reichert sich darunter mit Kalk an. Andererseits ist der Karbonkalk südlich davon in der Pennyroyal Plain mit meterdicken Lagen von Residualton bedeckt, was aus der geologischen Karte nicht hervorgeht. Ausserdem kann Wasser mehrere hundert Kilometer weit durch Kalk fliessen, der an der Oberfläche nicht ansteht. Die Quellen von Mittelflorida, z. B. Silver Spring, erhalten ihr Wasser nach *Jordan* aus Südgeorgia. Das alles zeigt die grosse Pro-

blematik in der Bestimmung von «n», das bestenfalls durch persönliche Begehung des Geländes erfasst werden kann.

Die aus den verkarsteten Gebieten weggeführten Kalkmengen sind proportional den Abflusshöhen und damit abhängig von Niederschlag und Evapotranspiration. Nach *Wüst* (1936) betragen die Verdunstungswerte in der Tundra 120 mm/Jahr, in der kühl gemässigten Zone 300 mm, in den Subtropen 450 mm und im tropischen Regenwald 1200 mm. Es zeigt sich dabei sowohl eine direkte Abhängigkeit von der Temperatur wie von der Pflanzenwelt. *Benken* (1960) gibt Abflussgleichungen, die gleichzeitig die Abhängigkeit von den Niederschlagshöhen festlegen. Abweichungen davon sind im wesentlichen durch die unterschiedliche Bewachsung bedingt (Transpiration). Sie sind besonders gross im Karst, wo wegen der unterirdischen Entwässerung und dem schnellen Verschwinden des Wassers in den Karsthohlräumen die Evaporation stark herabgesetzt ist, und wo im nackten Karst die Transpiration ganz dahin fällt. Genaue Zahlen sind nicht bekannt, so dass hier noch ein weites Forschungsfeld brach liegt.

In reifen Karstlandschaften erfolgt die Entwässerung zu 100 % unterirdisch, auch dann, wenn die Oberfläche nicht restlos aus Kalk besteht. Das Wasser verschwindet im nackten Karst lange vor dem Erreichen des Gleichgewichtes im Untergrund. Kalk wird daher nicht nur oberirdisch, sondern auch unterirdisch aufgelöst. In bedecktem Karst, wo das einsickernde Wasser verglichen mit dem P_{CO_2} der Atmosphäre stark übersättigt ist, kommt es wegen der Mischungskorrosion doch noch zur Auflösung von Kalk. Der oberirdische Kalkabtrag erfolgt auf dem Anstehenden, unabhängig davon, ob das Gestein nackt zutage trete oder von Bodenbildungen bedeckt sei. Er darf aber nicht aus dem Kalkgehalt der Gewässer abgeleitet werden; denn das Wasser entspringt entweder unterirdischen Karstgerinnen wie in der Areuse oder in der Birs, oder sie führen allochthones Wasser wie die Pivka in Slowenien oder die Orbe. Der unterirdische Kalkabtrag entzieht sich, mit Ausnahme der Höhlen, der unmittelbaren Beobachtung. Darauf wird noch zurückzukommen sein.

Auch die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflusst den Kalkabtrag. Sie steigt bei einer Temperaturzunahme um $30^\circ C$ ungefähr auf das Achtfache. Deshalb ist in warmen Zonen die Kalklösung stark beschleunigt. Sie führt andererseits in kalkreichen Gewässern zu einer schnellen Angleichung an den niedrigen CO_2 -Partialdruck der Atmosphäre, wobei der überschüssige Kalk ausgeschieden wird. *Oertli* (1953) mass an der Pivka in Slowenien auf 12 km Distanz bei $16^\circ C$ ein Absinken der Kalkgehalte bis Postojna von $21^\circ fH$ auf $15,75^\circ fH$, das sind 25 %, und in der unterirdischen Fortsetzung, in den Postojnska Jama (Adelsberger Grotten), auf 6,5 km Distanz ein Absinken von $14,5^\circ fH$ auf $13,24^\circ fH$, bzw. um 9 %. In den Tropen ist bei einer um $10^\circ C$ höheren Temperatur die Reaktionsgeschwindigkeit doppelt so gross. Messungen über den Kalkabtransport, noch viel mehr aber über den Kalkabtrag müssen in der warmen Zone unbedingt innerhalb des Karstgebietes, bzw. an den Quellen selbst erfolgen. Darauf wurde viel zu wenig Rücksicht genommen. Kontinuierliche Kalkgehaltsbestimmungen, wie sie besonders in den USA durchgeführt werden, halten sich nicht an die

Karstgebiete, da sie wirtschaftlichen Zwecken dienen. In Deutschland gibt es keine einzige für die Bestimmung der Karstdenudation brauchbare Messtation.

Auch der Inhalt des Begriffes «Kalkabtrag» ist noch unerklärt. Darunter ist nämlich jene Menge Kalkgestein zu verstehen, die tatsächlich weggelöst wird. Wird nun innerhalb des untersuchten Raumes wieder Kalk ausgeschieden, sei es als Kalksinter, Tuff oder Kalkschlamm, so wird dadurch das Faktum des Abtrages nicht annulliert. Misst man den Kalkgehalt an der Grenze des Einzugsgebietes, so erfasst man nicht den Kalkabtrag, sondern die Kalkbilanz, das heisst die Differenz zwischen Kalkabtrag und Kalkausscheidung, das was aus dem Areal hinausgetragen wird. In kalten Zonen ist die Kalkbilanz infolge der geringen Reaktionsgeschwindigkeit mit dem Kalkabtrag nahezu identisch. In den Tropen ist sie dagegen bedeutend kleiner, was den Eindruck eines geringen Kalkabtrages hinterlässt. Die Auffassung eines Abtragsverhältnisses zwischen subarktischer Region und Tropen von 10:1 von *Corbel* ist nicht zuletzt auch auf die mangelnde Berücksichtigung dieser Tatsachen zurückzuführen.

Sweeting (1964) betont mit direktem Hinweis auf *Corbel* die grosse Variabilität der Kalkgehalte des Wassers innerhalb einer Region mit kaum abweichenden klimatischen Bedingungen. *Sweeting* stellt die Abhängigkeit von der Bewachsung in den Vordergrund und verweist ausserdem auf die Bedeutung lithologischer Einflüsse.

Tabelle 2: Kalkgehalte in Grossbritannien, nach *Sweeting* (1964), ergänzt:

	Kalkgehalte
Durness, Nordschottland, kristalline Kalke, lückig bewachsen	60 — 80 ppm
South Wales, Karbonkalk, lückig bewachsen	80 — 100 ppm
Nordpenninen, Karbonkalk, etwas lückig bewachsen	140 — 180 ppm
Mendips, Karbonkalk, geschlossene Grasdecke	220 — 240 ppm
Südengland, Kreidekalk, geschlossene Vegetationsdecke	280 — 300 ppm

Die Tabelle 2 zeigt die grossen Variationen innerhalb des ozeanischen, kühl-gemässigten Klimas mit milden, schneearmen Wintern und kühlen Sommern. Die Bewachsung ist eindeutig für die Grössenordnung der Kalklösung entscheidend, doch zeigt der extreme petrographische Gegensatz zwischen dichtem Karbonkalk und porösem Kreidekalk bei sonst ähnlicher Bewachsung den bedeutenden lithologischen Einfluss. Der Kalkabtrag ist somit nicht nur von Temperatur und Abfluss (N—V), sondern auch von biologischen, lithologischen und pedologischen Faktoren abhängig. *Pitty* (1966) bestätigt durch seine Untersuchungen diese Befunde und stellt fest, dass in der Kalklösung das biogene CO₂ — zum mindesten für das Kluftwasser — der dominante Faktor ist, und dass daher die gelöste Kalkmenge mit der Temperatur steigt, ganz im Gegensatz zur Auffassung von *Corbel*.

Demangeot (1967) neigt in seiner Studie über das Aternobecken ganz den Auffassungen von *Corbel* zu, vermutlich weil er das biogene CO₂ ausschliesst. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen *Birot et al.* (1968) für Jamaica.

Die scheinbar unvereinbaren Gegensätze zwischen der Schule von *Corbel* und den übrigen Karstforschern gehen möglicherweise auf die unterschiedliche Methodik zurück, mit welcher das Problem des Kalkabtrages, der sog. Karstdenu-dation, angegangen wird. Deshalb hat der Autor, so weit möglich, an zwei Bei-spielen die Abhängigkeiten überprüft, mit dem Ziel, die direkte Temperatur-abhängigkeit in ihrer Auswirkung gegen die Abhängigkeit von biologischen Ge-gebenheiten, die z. T. eine reziproke Temperaturabhängigkeit bedeutet, abzu-wägen.

2 Der korrosive Kalkabtrag im Muotatal

Zwischen Muota und Pragelpassfurche (Kanton Schwyz) liegen 22 km² voll verkarsteten Geländes, das restlos unterirdisch zum «Schleichenden Brunnen» hin entwässert wird. Über die karsthydrographischen Zusammenhänge und die Verkarstung im Muotatal wurde in dieser Zeitschrift schon berichtet (*Bögli* 1960 und 1968, ausserdem *Bögli* 1970).

Die Oberfläche besteht bis auf kleine Reste von Flysch aus Kreidegesteinen, die vom Hauterivien bis zum Turon reichen. Verkarstungsfähig sind vor allem der Schrattenkalk des Barrèmien und untern Aptien, die Echinodermenbreccien des Gault, die wegen ihrer grobkörnigen Struktur nur gerundete Karren tragen, und der Seewerkalk des Turon. Der Schrattenkalk besteht zu 95 bis 99% aus CaCO₃ und ist 120 bis 150 m mächtig. Er ist der Träger der grossen Höhlen, vor allem des Hölloch (112 km vermessener Länge). Die Echinodermenbreccien und der Seewerkalk spielen bei der Höhlenbildung eine untergeordnete Rolle. Zwischen diese löslichen Gesteine schieben sich unlösliche, an der Oberfläche etwas Haute-rivien-Kieselkalke, Drusbergschichten und die Grünsande des Gault. Da das aus diesen Bereichen abfliessende Wasser Kalkgehalte über 60 ppm aufweist, können diese undurchlässigen und nahezu unlöslichen Gesteinsflächen bei der Berech-nung des Kalkabtrags vernachlässigt werden, womit der Faktor «n», eine wich-tige Fehlerquelle, ausgeschaltet ist.

Die tiefsten zugänglichen Stellen des verkarsteten Raumes liegen an der Erd-oberfläche bei ca. 650 m, unterirdisch aber bei 625 m, 13 m unter dem Vorfluter-niveau (Tauchversuche). Es ist anzunehmen, dass ein beträchtlicher Hohlraum-anteil im phreatischen Raum bis 50 m unter die permanente Karstwasserfläche hinunterreicht; denn das Niveau des Vorfluters muss zur Zeit der grössten Tal-ausräumung ca. 30 m tiefer gelegen haben. Das Einzugsgebiet des «Schleichenden Brunnens», das für die Untersuchungen massgebend ist, setzt erst bei 800 m ü. M. ein, weist jedoch bis 1100 m Höhe nur eine sehr geringe Fläche auf, da der An-stieg zum Teil in senkrechten Wandstufen erfolgt. Bei 1100 m beginnt die all-mählich ansteigende Hochfläche. Das untere Drittel reicht bis ca. 1450 m und umfasst ausgeprägten Waldkarst. Der Boden ist stellenweise mit Rendzina be-deckt, oder er besteht aus moosüberzogenen und nackten Karrenbuckeln. Das obere Drittel ist nackter Karst, durchzogen von schmalen Streifen von Grün-sand. Hier und auf den verkarsteten Echinodermenbreccien des Gault stellen sich Bodenbildungen ein. Im mittleren Drittel nimmt der Anteil an nackten Kalkfel-

sen gegen oben schnell zu, der Wald wird locker und löst sich zuletzt in Einzelbäume auf.

Der P_{CO_2} der atmosphärischen Luft erreicht in tieferen Lagen des untersuchten Gebietes 0,028 ‰, in höheren 0,022 ‰. Zahlreiche Messungen zeigen, dass der P_{CO_2} in den ventilierten Teilen der Höhle nur wenig davon abweicht, 0,023 bis 0,04 ‰. In nicht ventilierten Höhlenteilen, genügend Abstand von den ventilierten vorausgesetzt, passt sich der P_{CO_2} dem Kalkgehalt des Wassers an und erreicht einen Gleichgewichtswert. Am Syphon des «Blinddarmes», in der untern Etage des Hölloches, wurden im März 1969 bis zu 0,13 ‰ CO_2 gemessen. In einer Höhle auf Bödmerenalp wies die Luft infolge des Kontaktes mit Schneeschmelzwasser, dessen CO_2 bei der Kalklösung aufgebraucht worden war, nur 0,01 ‰ auf. Ähnliche Beobachtungen machten *Ek et al.* (1969) in den Karpathen, wo ein Minimum von 0,016 ‰ gemessen wurde. Die Bodenluft zeigt dagegen sehr unterschiedliche Werte, je nach Bodendichte, biologischer Aktivität, Feuchtigkeitsgrad und Austauschmöglichkeiten mit der freien Atmosphäre. Es wurden Partialdrucke zwischen 0,04 ‰ und 3 ‰, in Ausnahmefällen bis über 8 ‰ CO_2 gemessen. Die Schwankungen sind sowohl zeitlich wie örtlich hoch. Aus den CO_2 -Konzentrationen lassen sich Kalkgehalte bis zu einigen hundert ppm ableiten. Doch durchsickert das Wasser die Bodenzone so rasch, dass das Gleichgewicht bei den meist unter 10°C liegenden Temperaturen nur selten erreicht wird.

Im «Schleichenden Brunnen» liegen die Kalkgehalte des Wassers zwischen 70 und 120 ppm und zeigen eine deutliche Herkunftsabhängigkeit, indem niedrige Werte bei Wasser aus dem nackten Karst angetroffen werden, hohe jedoch bei Wasser aus dem bewaldeten Karst. Naturgemäss gibt der «Schleichende Brunnen» nur Mischwasser ab, so dass die Extreme gedämpft erscheinen. Deshalb wurden zahlreiche Proben im Hölloch selbst untersucht, wo auf Klüften und Schichtfugen das Wasser aus dem Waldkarst direkt fassbar wird. Ausnahmsweise steigen die Kalkgehalte auf 180 ppm an, liegen aber meist zwischen 100 und 140 ppm. Diese Werte sind für die Untersuchung um so wichtiger, als das Wasser bis zu den Messpunkten in engen Spalten und daher ohne Kontakt mit Luft fliesst. Das sind phreatische Bedingungen, unter denen der Kalkgehalt im Gerinne konstant bleibt, abgesehen von der Möglichkeit der Mischungskorrosion, wenn sich zwei Wässer vermischen. Die tiefsten Einzelextreme im Hölloch sind leider nicht fassbar, da sie nur bei Hochwasser auftreten, was eine Untersuchung zum vornherein verunmöglicht. Sie dürften aber die beobachteten Werte von 70 ppm im «Schleichenden Brunnen» nicht um mehr als 5 ppm unterschreiten. In Kolken und Seen werden Kalkgehalte zwischen 85 ppm und 100 ppm angetroffen. Die höheren Werte sind auf kleine Zusickerungen während nasser Perioden zurückzuführen, die noch wenig lang zurückliegen oder auf leicht erhöhten P_{CO_2} , die tieferen finden sich in Becken mit langem Kontakt mit Höhlenluft von niedrigerem P_{CO_2} , so dass das $\text{CaCO}_3 - \text{CO}_2$ — Gleichgewicht erreicht ist.

Der Kalkabtrag wird aus dem mittleren jährlichen Abfluss, der jährlichen Abflusshöhe und dem mittleren Kalkgehalt des Wassers berechnet («n» = 1).

Bei Muotathal (610 m ü. M.) betragen die Niederschläge 1990 mm, im nackten Karst der Bödmeren-Silbern (2300 m ü. M.) mehr als 2400 mm. Der mittlere Abfluss der ganzen Region liegt bei 2000 mm jährlich (Muota-Limnigraph). Der mittlere Kalkgehalt des Wassers aus dem «Schleichenden Brunnen» beträgt 100 ppm. Daraus berechnet sich nach der Formel von *Corbel* der gesamte Kalkabtrag durch Korrosion zu 80 mm in 1000 Jahren.

Aus dem Gesamtareal lassen sich Waldkarst und nackter Karst hydrographisch einigermaßen trennen und einzeln fassen. Im Herbst kann während Wochen der Niederschlag in höheren Lagen als Schnee, in tieferen als Regen fallen. In dieser Zeit und während des Winters stammt das Wasser des «Schleichenden Brunnens» zum grössten Teil aus dem bewaldeten Karst. Dabei treten Kalkgehalte um 120 ppm auf, gelegentlich auch darunter. Zur Kontrolle wurden die Schichtfugengewässer des Hölloches herangezogen, deren Kalkgehalte zwischen 100 ppm und 180 ppm liegen. Die niedrigen Werte stammen offensichtlich von den nackten Kalkflächen im Walde, die hohen aus den lehmigen Bodendecken, die einzeln neben der Rendzina auftreten. Der Wert von 180 ppm ist auf einen Einzelfall beschränkt und darf daher weggelassen werden. Dann liegt das Mittel der Kalkgehalte bei 120 ppm. Die Abflusshöhe des Waldkarstes beträgt 1900 mm. Daraus berechnet sich der Kalkabtrag im Waldkarst des Muotatales zu 91,2 mm in 1000 Jahren.

Im Vorsommer ist der Waldkarst schneefrei und das Schmelzwasser bereits abgelaufen. Bei länger anhaltendem niederschlagsfreiem Wetter kommt es im nackten Karst zu ausgiebiger Schneeschmelze. Dessen Abfluss übertrifft in dieser Zeit jenen des Waldkarstes um ein Vielfaches. Es kommt zu langandauernden Hochwassern im Hölloch. Im «Schleichenden Brunnen» sinkt der Kalkgehalt auf 70 bis 80 ppm. Das ist weniger als dem Gleichgewicht mit der Höllochluft entspricht, das bei 85 ppm liegt. Das ist daraus erklärlich, dass bei Hochwasser der Kontakt zwischen Höhlenluft und Wasser sehr klein ist. Sickerstellen und kleine Quellen im nackten Karst weisen bei Trockenheit Werte um 90 ppm Kalk auf, bei Regenwetter allerdings auch 70 ppm und weniger. Der Mittelwert dürfte um 85 ppm oder etwas darunter liegen. Bei einem Abfluss von 2100 mm erreicht der Kalkabtrag in 1000 Jahren 71 mm. Trotz der grösseren Abflusshöhe macht der Kalkabtrag im kälteren nackten Karst nur 78 % der Karstdenudation im tieferen und ca. 4 ° C wärmeren Waldkarst aus. Die Gegenüberstellung der beiden Ergebnisse zeigt eindeutig die grosse Bedeutung der Bewachsung und damit der biologischen Aktivität beim Kalkabtrag, was im Gegensatz zur Modellvorstellung von *Corbel* steht.

Aus dem vorliegenden Material ist auch der Anteil des ober- und des unterirdischen Kalkabtrages bestimmbar. Im nackten Karst des Muotatales wurde in zahlreichen Proben der mittlere Kalkgehalt des in die Kluftharren einflussenden Wassers gemessen und zu nur 17 ppm bestimmt. Da die jährliche Abflusshöhe 2100 mm beträgt, ergibt sich ein Oberflächenabtrag von 14 mm im Jahrtausend.

Auf den dem Silbergebiet benachbarten Märenbergen befinden sich modellhaft ausgebildete Karrentische, die sich seit der Daunzeit, also während der letzten 10 000 Jahre gebildet haben (Bögli 1961). Die Sockel der auflagernden erratischen Blöcke sind meist 12 cm hoch, im Maximum 15 cm. Der Kalkabtrag von 12 bis 15 mm in 1000 Jahren stimmt gut mit der andern Berechnungsmethode überein. Bei einem Oberflächenabtrag von 14 mm im Jahrtausend und einem Gesamtabtrag von 71 mm ergibt sich ein unterirdischer Kalkverlust von 57 mm. Dieser Kalkanteil wird überwiegend oberflächennah weggelöst, zumeist vermutlich in den oberen 10 m, wo die Kluftkarren und Schichtfugen erweitert werden. Mehr Schwierigkeiten bereitet die Bestimmung des Kalkabtrages im Waldkarst. Mit den heutigen Mitteln ist eine Kalkgehaltsbestimmung unmittelbar unter der Bodendecke kaum möglich. Hier hilft das Hölloch weiter. Die Gleichgewichtskonzentration des Kalkes im Wasser beträgt etwa 85 ppm. Wasser mit 100 ppm und mehr kann im Hölloch nur von der Bodendecke an der Oberfläche stammen. Vom Niederschlag des Waldkarstes dürfte ein Zehntel aus nackten Kalkflächen in den Untergrund einsickern. In Analogie zum nackten Karst lässt sich der unterirdische Abtrag durch dieses Wasser zu 6 mm festlegen. Wegen der unterschiedlichen Kalkkonzentrationen kommt es ausserdem zur Mischungskorrosion. Ihr Ausmass ist schwer zu berechnen und beträgt maximal 4 mm, kann aber örtlich hohe Werte erreichen. Der unterirdische Abtrag macht daher ca. 10 mm aus, womit für den oberirdischen 81 mm verbleiben.

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Abtragungswerte im Waldkarst und im nackten Karst:

	Gesamt- abtrag	Abtrag		Verhältnis O : U
		oberird.	unterird.	
Waldkarst	91 mm	81 mm	10 mm	8 : 1
nackter Karst	71 mm	14 mm	57 mm	1 : 4
Waldkarst: nackter Karst	9 : 7	8 : 1,4	1 : 5,7	

Es zeigt sich aus Tabelle 3, dass in voll verkarsteten Gebieten nicht nur der bewachsene Karst bedeutend stärkere Karstdenudation aufweist, sondern auch einen überwiegenden Oberflächenabtrag zeigt.

Abschliessend seien einige Angaben über den Kalkabtrag in verschiedenen Klimazonen nach der Literatur angeführt, wobei bewusst auf die Werte nach Corbel verzichtet wurde (siehe Tab. 1).

Bei vergleichbaren Niederschlägen nimmt der gesamte Kalkabtrag von den feuchten Tropen mit ca. 50 mm in 1000 Jahren gegen die Subtropen hin auf weniger als 30 mm ab, um in der gemässigten Laub- und Nadelwaldzone einem Maximum bei 90 mm zuzustreben und in der Subarktis und Arktis wieder abzusinken. Die Tiefwerte in der Arktis sind weniger eine Sache der geringen Niederschläge als der geringen biologischen Aktivität des Bodens. In dieser Aufstellung sind extreme klimatische Bedingungen bewusst umgangen worden, vor allem die Niederschlagsmaxima. Den geringen Niederschlägen von Spitzbergen lassen sich in

Tabelle 4 Der Abtrag in verschiedenen Klimazonen, berechnet aus der Kalkbilanz

	Niederschlag mm	Kalkabtrag mm/1000 J.	Autor
<i>Warmfeuchtes Klima</i>			
Jamaica, Rio Bueno	2000	51	<i>Birot et al.</i>
Martha Brae	1800	54	idem
Puerto Rico, Rio Camuy	1650	40	idem
Kuba, Rio San Vicente	1600	46 ¹	<i>Lehmann, H.</i>
Kissimmee, Florida	1200	27	<i>Douglas</i> ²
<i>Gemässigttes Klima</i>			
Kentucky, kontinental	1100	64	<i>Douglas</i> ²
Aternobecken, Gran Sasso	1500	81	<i>Demangeot</i> ³
Lee, Essex	700	63	<i>Douglas</i> ²
Malham Tarn, Nordpenninen	1100	58 ¹	<i>Sweeting</i>
Areuse bei Les Moyats, Schweiz	1700	89	<i>Burger</i>
Muotatal, Waldkarst, Schweiz	2200	91	<i>Bögli</i>
Berner Jura, Birsgebiet, Schweiz	1100	50	<i>Barsch</i>
<i>Subarktisches bis arktisches Klima</i>			
Muotatal, nackter Karst	2400	71	<i>Bögli</i>
Spitzbergen, feucht	280	17 ¹	<i>Nagel</i>
trocken	180	7 ¹	<i>Nagel</i>

¹ Aus Grundlagen in der Literatur oder mit Hilfe von persönlichen Mitteilungen durch den Autor berechnet.

² Nach einer unveröffentlichten Dissertation bei *M. Sweeting*.

³ Die Verteilung auf die einzelnen Höhenstufen wurde nicht in die Tabelle übernommen, da das biogene CO₂, das sehr unterschiedlich auftritt, nicht in die Berechnung einbezogen worden war. *Demangeot* (1968): «En comptant seulement le CO₂ d'origine atmosphérique...», p. 189.

warmen Zonen keine Beispiele gegenüberstellen, weil in vollariden Gebieten mangels fliessendem Wasser die auf Grund verschiedener Beobachtungen sicherlich vorhandene Kalkkorrosion nicht fassbar ist. Bei Vergleichen wäre es richtiger, statt der Niederschlagsmengen die Abflusshöhen als Grundlage zu nehmen. Zum Schluss sei festgestellt, dass die bisherigen Untersuchungen über Kalkabtrag und Verkarstung in den verschiedenen Klimazonen die Hauptzüge erkennen lassen, dass aber eine genauere Abklärung umfangreiche, weltweite Forschungsarbeit verlangt. Es ist *Corbels* Verdienst, das Problem in grossem Umfang angepackt zu haben.

LITERATUR

- Barsch, D.* (1969): Studien zur Geomorphogenese des zentralen Berner Juras. Basler Beiträge zur Geographie, H. 9, Basel
- Biro, P., Corbel, J., Muxart, R.* (1958): Morphologie des régions calcaires à la Jamaïque et à Porto-Rico. Editions du CNRS, Paris, pp. 335—392
- Bögli, A.* (1951): Probleme der Karrenbildung. Geogr. Helv. VI, S. 191—204
- (1960): Karsthydrographische Untersuchungen im Muotatal. Regio Basiliensis I, S. 68—79
- (1961): Karrentische. Zeitschr. f. Geomorphologie, S. 185—193
- (1964 a): Mischungskorrosion, ein Beitrag zum Verkarstungsproblem. Erdkunde, Arch. f. wissensch. Geogr., S. 83—92
- (1964 b): Le Schichttreppenkarst, un exemple de complexe glaciokarstique. Revue Belge de Géogr., pp. 63—82
- (1968): Präglazial und präglaziale Verkarstung im hintern Muotatal, Regio Basiliensis IX, S. 135—153
- (1970): Das Hölloch und sein Karst. La Baconnière, Boudry
- Brenken, G.* (1960): Versuch einer Klassifikation der Flüsse und Ströme der Erde nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten, Manuskript, Düsseldorf (cit. nach R. Keller)
- Burger, A.* (1959): Hydrogéologie du Bassin de l'Areuse. Bull. de la Soc. Neuchâtel. de Géogr.
- Corbel, J.* (1957): Les karsts du nord-ouest de l'Europe. Inst. des études rhodaniennes de l'Université de Lyon
- (1958): Les karsts de l'est canadien. Cahiers de Géogr. de Québec, pp. 193—216
- (1959 a): Vitesse de l'érosion. Zeitschr. f. Geom., S. 1—28
- (1959 b): Erosion en terrain calcaire. Annales de Géogr., vol. 366, pp. 97—120
- Demangeot, J.* (1968): Sur une courbe de dissolution des calcaires en montagnes méditerranéennes. Phénomènes karstiques, Ed. du CNRS, Paris, pp. 185—191
- Ek, C. et al.* (1969): Some analysis of the CO₂ content of the air of five Polish caves. Annals of Geomorph., vol. 13, pp. 267—286
- Keller, R.* (1962): Gewässer und Wasserhaushalt des Festlandes. G. Teubner, Leipzig
- Örtli, H.* (1953): Karbonathärte von Karstgewässern. Stalactite, Nr. 4, S. 1—10
- Pitty, J. F.* (1966): An Approach to the Study of Karst Water. University of Hull, Occ. Papers in Geogr. 5
- Sweeting, M.* (1964): Some factors in the absolute denudation of limestone terrains. — Erdkunde, Arch. f. wissensch. Geogr., S. 92—95
- (1965): Denudation in Limestone Regions, a Symposium. Geogr. Journal, Vol. 131, pp. 34—56
- Sweeting, M., Gerstenhauer, A.* (1960): Zur Frage der absoluten Geschwindigkeit der Kalkkorrosion. Zeitschr. f. Geomorph., Suppl. Bd. 2, S. 66—73
- Wüst, G.* (1922): Verdunstung und Niederschlag auf der Erde. Zeitschr. d. Gesellschaft f. Erdkunde, Berlin

THE AMOUNT OF THE KARSTDENUATION (Abstract)

The amount of the karstdenudation is being intensively discussed. *Corbel* (1959 b) and his supporters emphasize that in warm climates the amount of dissolved limestone is ten times smaller than in subarctic regions, because the CaCO₃ is less dissolved in high temperatures. *Sweeting* (1964) and others point out that in British regions with similar climate but different vegetation the concentration of CaCO₃ in the water varies from 60 ppm to 300 ppm and consequently the karstdenudation is up to 5 times higher than at the minimum.

In order to clear this controversy, the author used opposite karst forms, bare karst (average height 2100 m) and wooded karst (1200 m), and that in the Muota valley (Canton of Schwyz). Although in the wooded karst the precipitations are smaller, the ratio of karstdenudation between wooded and bare karst is 9 : 7. In the wooded karst the corrosion is concentrated on the surface (89 %), in the bare karst in the underground (80 %). These results verify *Sweeting's* opinion that the vegetation is controlling the karstdenudation.

(A. Bögli / W. Schneider)