

REGULATOREN DER KARSTKORROSION DURCH PETROVARIANZ

VON

L. JAKUCS

Der Bereich der Geomorphologie, die sich mit der Studie der unter dem Einfluss von gleichen Bedingungen der Denudationswirkung und Zeitdauer auftretenden unterschiedlichen und eigenartigen Fazies der verschiedenen Gesteinen befasst, wird Gesteinsmorphologie genannt. In der ungarischen geomorphologischen Fachliteratur hat B. BULLA (1954) als erster die Rolle dieser Disziplin abgefasst: „Die Gesteinsmorphologie erklärt den Einfluss der Gesteinsbeschaffenheit und der qualitativen Unterschiedlichkeiten der Gesteine auf die Gestaltung der Oberflächenformen. Die Gesteinsmorphologie ist also eine Fazieskunde, die auf den materiellen (petrographischen und lithologischen) Unterschieden der das Relief aufbauenden Gesteine der Oberflächenformen beruht.“

In dem der genauen Definition anschliessenden erörternden Teil (angeführtes Werk S. 441—481) gibt BULLA auch die inhaltliche Erklärung seiner Definition an, indem er die spezifischen Denudationsformenschätze der wichtigsten Gesteinsgruppen aufführt und vergleicht. Seine Arbeit ist in der ungarischen Fachliteratur sogar nach der Tätigkeit solcher Art von CHOLNOKY (1928, 1932, 1939) von bahnbrechender Bedeutung und wird betrachtet als die Grundlegung eines Wissenschaftsbereiches. Ihr Wert wird also um nichts vermindert, auch wenn man sich mit der umfassenden Darstellung der wichtigsten Fragen heute nicht mehr begnügen kann, sondern eine viel eingehendere Analyse der Probleme verlangt. Das ist aber weder bei BULLA, noch in den neuesten geomorphologischen Handbüchern des Auslands zu finden. THORNBURY (1956), MAULL (1958), KETTNER (1959), LOUIS (1964) usw. begnügen sich auch damit, dass sie die Grenze der tiefgreifenden gesteinsmorphologischen Untersuchungen beim Erschliessen der auffälligsten und allgemein kennzeichnenden Denudationseigenschaften der einzelnen Gesteinsgruppen oder Gesteine (Kalkgestein, Dolomit, Granit, Basalt, Sandstein, Löss, Gips, Steinsalz usw.) ziehen und auf die Auswirkungen der innerhalb der unterschiedlichen Gesteinsarten auftretenden kleineren strukturellen oder materiellen Unterschiede höchstens nur durch einzelne Hinweise in den Nebensätzen eingehen. Eine Menge von Daten weisen doch darauf hin, dass *die innerhalb der einzelnen engeren Gesteinsgruppen vorhandenen und vom gesteinskundlichen Gesichtspunkt aus nicht kennzeichnenden, vielfach auch nicht berücksichtigten geringfügigen Unterschiede der Gesteinsvarietäten die Dynamik der Denudation oder ihren Einfluss auf die*

Beschaffenheit gelegentlich stärker modifizieren, als die grossen Abgrenzungen der petrographischen Systematik.

Insbesondere gilt diese Feststellung für die Karbonatgesteine, deren kaum mehr bemerkbaren Spezifika sich in den Formergebnissen des korrosiven Denudationsablaufes in grossem Masse widerspiegeln können. Darauf machte sich übrigens auch GRUND aufmerksam, als er die folgenden feststellte (1914, S. 634): „Ebenso, wie wir harte und weiche Gesteine unterscheiden, als es um die Erosion handelt, desgleichen verhalten sich die Kalk- und Dolomitgesteine unterschiedlich gegenüber der Korrosion, denn es gibt ja leicht und schwer lösliche Kalkgesteine je nach dem Reinheitsgrad des Kalkes.“

Hinsichtlich der oben angeführten Gesichtspunkte sollen im folgenden etwas eingehender untersucht werden, welche die geringeren Varianzunterschiede des Kalksteins, dieses wichtigsten verkarstenden Gesteins sind, von denen die Karstdenudation qualitativ und quantitativ empfindlich betroffen wird.

Die Karstkorrosion und die Eigenarten der stofflichen Zusammensetzung des Kalkgesteins

Es ist bekannt, dass der Kalkstein als Gestein zur Gruppe der sog. *Gesteine mit einem Mineral (monomineralischen Gesteine)* gehört. Der ihn gestaltender Grundstoff ist die *Kalzit*-Varietät des Kalziumkarbonats (CaCO_3).

Ein Teil der in der Natur vorkommenden Kalksteine enthält keinen anderen mineralischen Bestandteil, während ihr übriger Teil in mehr oder weniger Prozent Magnesit als *zusätzliches Gemenge* und *einen Anteil von verschiedenen verunreinigenden Stoffen* umfasst. Solche verunreinigende Stoffe können am häufigsten das Eisenoxid, verschiedene Tonminerale, Sand, verschiedene Einschlüsse von Kieselgel, Bitumen usw. sein. Die Menge der zusätzlichen und verunreinigenden Stoffe beträgt bei den sog. reinen Kalksteinen zumeist kaum 1%, bei den stärker verunreinigten Kalksteinen aber 10—15%, und in gewissen Fällen kann sie sogar noch mehr Gewichtsprozent ausmachen. In diesen Fällen sprechen wir über sandigen, tonigen (mergeligen), Feuerstein, Dolomit usw. haltenden Kalkstein, ja sogar wir müssen — wenn der Anteil der fremden mineralischen Bestandteile vorherrschend wird — über kalkhaltigen Sandstein, Mergel, Dolomit sprechen.

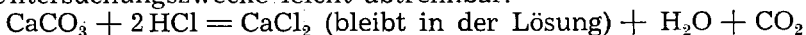
Die zusätzlichen und verunreinigenden Gemenge beeinflussen erheblich das Verhalten des Gesteins gegenüber der Korrosion. Deshalb können wir uns anhand der Untersuchung über die stoffliche Zusammensetzung des Kalksteins Gesichtspunkte von grundsätzlicher Bedeutung zur richtigen Erklärung einzelner karstgenetischer Vorgänge gewinnen. Es wird also oft erforderlich, für irgend ein Kalkgestein zu bestimmen:

1. sowohl das Verhältnis zwischen den unreinigenden Mineralen und den Karbonatmineralen,

2. als auch den Anteil der Kationen (Ca^{++} und Mg^{++}) der Karbonatminerale,

3. oder aber die Merkmale der verunreinigenden Bestandteile hinsichtlich der stofflichen, bzw. mineralischen Zusammensetzung.

Da sich der Karbonat-Grundstoff des Kalkgesteins in dünner Salzsäure im Sinne des nachstehenden chemischen Zerfalls restlos auflöst und zugleich die verunreinigenden Gemenge als in dünner Salzsäure unlösliche Lösungsrückstände im allgemeinen zurückbleiben, sind die letzteren für Untersuchungszwecke leicht abtrennbar.



In der Tabelle 1 zeigen wir die chemische Zusammensetzung einiger charakteristischen Kalkgesteinsarten unter Angabe des Anteils der zusätzlichen und verunreinigenden Gemenge an.

Der theoretisch reine Kalkstein (Kalzit) enthält 56% CaO und 44% CO_2 (CAYEUX 1935). Dies kommt aber in der Natur im seltensten Falle vor:

Die in dünner Salzsäure unlöslichen Verunreinigungen des Gesteins lösen sich in der Regel auch in den Grundwässern (Karstwässern) nicht auf; und so können sie sich im Laufe der Entwicklung von Kalksteinflächen an manchen Stellen kräftig anhäufen und die Verkarstungsprozesse entscheidend beeinflussen, regulieren. Aber auch die in den Höhlen vorkommenden verschiedenen Sedimente, Ausfüllungen sind zum grössten Teil aus diesen Lösungsrückständen entstanden (BÖGLI 1963, LAIS 1941, KUKLA-LOZEK 1958).

Wie es sich auch in der Tabelle 1 widerspiegelt, ist die am weitesten verbreitete und im grössten quantitativen Anteil vorkommende Komponente der Kalksteine das Magnesiumkarbonat, mit dessen Anwesenheit man bei den meisten Kalksteinen rechnen muss. Seine Menge kann sehr wechselnd sein und bis zum vollständig reinen Dolomit — wobei die gewichtsprozentige Zusammensetzung von CaCO_3 und MgCO_3 dem Molekularverhältnis 1:1 entspricht (54,35%:45,65%) — können in der Natur die verschiedensten Proportionen in der Zusammensetzung auftreten. Zumeist ist die Anwesenheit des SiO_2 , des Al_2O_3 und des Fe_2O_3 allgemein, doch verbleiben ihre Mengenverhältnisse in der Regel unter dem Anteil des Magnesiums. Und die Häufigkeit der übrigen Bestandteile ist bei den meisten Kalksteinen noch geringer und nicht unerlässlich.

Mit welchen Tendenzen die auf die Löslichkeit der mineralischen Zusammensetzung ausgeübte Wirkung auftritt, kann theoretisch nur schwierig und — wie die einander widersprechenden Feststellungen der zu diesem Zweck durchgeführten Berechnungen (GÁNTI T. 1957, MARKÓ L. 1961) beweisen — auch nicht immer richtig beantwortet werden. Die Ursache davon müssen wir wahrscheinlich darin sehen, dass sich die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung in der Regel an solche entsprechende kristall- und raumstrukturelle Merkmale anknüpfen, die auch an sich hinsichtlich des Einflusses auf die Lösungsdynamik von Bedeutung sind. Deshalb müssen wir bei der Beurteilung der Frage die Ergebnisse der *experimentellen Untersuchungen* unbedingt in den Vordergrund stellen, die die Grössenordnungen der unter der Wirkung von

TABELLE 1.

Chemische Zusammensetzung unterschiedlicher Kalksteine

Untersuchte Gesteinsprobe	CaO%	CO ₂ %	MgO%	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	MnO%	K ₂ O%	Na ₂ O%	P ₂ O ₅ %	SO ₃ %	Cl%	H ₂ O%	Zusammen
Rezenter Korallenkalk von den Bermudainseln (nach KLARKE)	55,16	43,74	0,20	0,23	Sp.	Sp.	—	—	—	—	—	—	—	0,54	99,87
Kalktuff vom Gebiet Iwanowo-Wosnesensk (nach SWETZOW)	54,30	44,45	0,16	0,37	0,65	Sp.	—	—	—	—	—	—	—	—	99,93
Mittelwert der Analyse von 345 Kalksteinen verschiedener Arten (nach KLARKE)	42,61	41,58	7,90	5,19	0,81	0,54	0,06	0,05	0,33	0,05	0,04	0,13	0,02	0,77	100,09
Mittelwert der Analyse von 498 zum Bau verwendbaren Kalksteinen verschiedener Art (nach KLARKE)	40,60	35,58	4,49	14,09	1,75	0,77	0,08	0,03	0,58	0,62	0,42	0,14	0,01	1,18	100,34
Kreidekalk vom Nord-Kaukasus (nach RENGARTEN)	50,11	39,75	0,37	5,70	2,38	0,24	—	—	—	—	—	—	—	—	98,55
Kreidekalk vom Gebiet Briansk (nach DOBROW)	52,40	43,56	0,48	1,00	0,90	—	—	—	—	—	—	Sp.	—	—	98,34
Weisser Biancone- (Kreide-) Kalk von der Umgebung des Gardasees (nach BLANCK und WEISSE)	54,50	43,29	1,20	0,76	0,17	0,01	—	—	—	—	—	—	—	—	99,96

Grauer Bianco- (Kreide-) Kalk von der Umgebung des Gardasees (nach BLANCK und WEISSE)	52,02	43,29	2,10	2,12	0,27	0,04	—	—	—	—	—	—	—	—	99,94
Liaskalk vom Gerecsegebirge (nach GEDEON)	53,11	42,80	Sp.	0,29	3,61	Sp.	—	—	—	—	—	—	—	—	99,91
Bräunlich-roter Ammoniten- Juralkalkstein, S-Alpen (nach BLANCK und WEISSE)	52,78	41,80	0,30	4,26	0,76	0,08	—	—	—	—	—	—	—	—	99,98
Weisslich roter Ammoniten- Juralkstein, S-Alpen (nach BLANCK und WEISSE)	55,05	42,96	Sp.	1,53	0,38	0,05	—	—	—	—	—	—	—	—	99,97
Wetterstein- (Trias-) Kalkstein vom Aggteleker Gebirge (JAKUCS)	53,19	43,96	2,00	0,61	0,14	0,06	—	Sp.	—	—	—	—	—	—	99,96
Unter-devonischer Kalkstein vom Moskauer Becken (nach SWETZOW)	55,44	44,11	0,02	0,10	0,07	0,07	—	—	—	—	Sp.	—	—	—	99,81
Karbonkalkstein mit Feuer- stein vom südlichen Flügel des Moskauer Beckens (nach SWETZOW)	41,18	32,34	Sp.	26,44	0,21	Sp.	—	—	—	—	—	—	—	—	100,17

Petrovarianz in der Karstkorrosion

gleichen Bedingungen vor sich gehenden Auflösung der Kalksteine von bekannter Zusammensetzung untereinander vergleichbar machen.

Zur Beantwortung der Frage in diesem Sinne hat von den ungarischen Autoren MÄNDY (1954) interessante Untersuchungen unternommen, als er die Löslichkeit der Kalksteine verschiedenen Alters und des triassischen Hauptdolomits bei Anwendung von gesättigten wässrigen Lösungen in CO_2 Atmosphäre und bei unterschiedlichen Neigungswerten der Gesteinsoberfläche verglich. Seine Versuchsergebnisse haben bestätigt und diejenige frühere erfahrungsmässige und theoretische These nach Grössenordnung in konkrete Beleuchtung gestellt, dass die Löslichkeit des Dolomits wesentlich geringer ist als die des Kalksteins. Dieser Löslichkeitsunterschied lässt sich übrigens um so mehr betonen, je mehr Zeit für die Berührung der Lösung mit der Gesteinsoberfläche gesichert ist (Abb. 1).

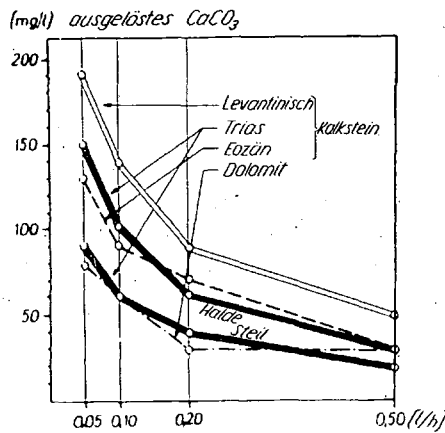


Abbildung 1. Auflösung von Kalksteinen verschiedenen Alters und des triassischen Hauptdolomits in dem mit Kohlensäure gesättigten Leitungswasser. An der Abszisse ist die Menge der an die Oberfläche der Gesteinsprobe getropften Lösung eingetragen. Die Löslichkeit des Triaskalksteins ist auch an steil und sanft geneigten Gesteinsflächen veranschaulicht, damit auf diese Weise der Unterschied des Korrosionsgrades in Abhängigkeit des flächenhaften Wasserabflussgeschwindigkeitsunterschiedes beurteilt werden kann (nach den Angaben von T. MÄNDY).

Gleichzeitig beobachtete MÄNDY grosse Abweichungen auch im Löslichkeitsgrad der von verschiedenen Fundorten stammenden Dolomiten. Leider gab er die geochemischen Kennzeichen weder bei den Kalkstein-, noch den Dolomitproben an und so gibt es keine Möglichkeit die spezifischen Intensitätsunterschiede je nach Löslichkeitsproben in ihrer Kausalität zu erschliessen.

Wesentlich mehr sagen über die Frage die Untersuchungen der Deutschen A. GERSTENHAUER und K. H. PFEFFER (1966) aus, die im

Interesse der endgültigen Lösung des Problems im Labor des Geographischen Instituts der Universität Frankfurt/Main eine Reihe von Untersuchungen durchführten. Bei 46 von verschiedenen Standorten stammenden Gesteinen verschiedenen Alters haben sie durch quantitative Analyse das Verhältnis $\text{CaCO}_3 : \text{MgCO}_3$ bestimmt, dann dieselben Gesteine (bis zu 2 mm Korngrösse gemahlen) der Einwirkung des beim atmosphärischen p CO_2 gesättigten Wassers bei Zimmertemperatur für 28 Stunden Dauer ausgesetzt. Sie bestimmten das Mass der so erfolgten Lösung. Ihre mit musterhafter Sorgfältigkeit und moderner chemischen sowie lösungstechnologischen Methodik durchgeführten Untersuchungsergebnisse sind in unserer Tabelle 2 zusammengefasst.

Das Lösungsdiagramm der neun Proben der Tabelle 2 ist in zeitlicher Verteilung der Teilergebnisse auch für mehr als 28 Stunden Zeitdauer angefertigt. Diese Lösungskurven, die wir für sehr kennzeichnend halten müssen, werden in Abbildung 2 angezeigt.

Sowohl Tabelle 2, als auch Abbildung 2 bestätigen wohl, dass die Lösungsdynamik der Kalksteine unterschiedlicher Zusammensetzung bedeutende Unterschiede in der Grössenordnung hat. Eine auffallende Erscheinung ist ausserdem, dass sich die Zeitkurven der Lösungsintensität bei den verschiedenen Proben kennzeichnend differenzieren, soweit die

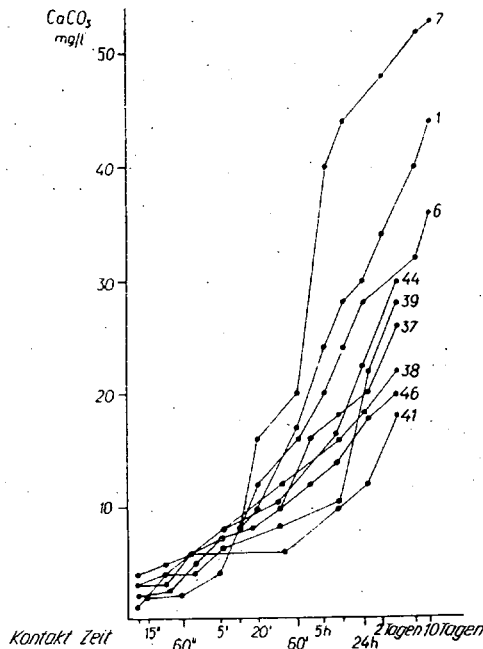


Abbildung 2. Zeitliche Abläufe der Lösung unterschiedlicher Kalksteintypen in dem mit p CO_2 gesättigten Wasser. Die Nummern der Proben entsprechen den Nummern der Tabelle 2 (nach GERSTENHAUER—PFEFFER).

TABELLE 2.

Num- mer	Bezeichnung der Entnahmestelle	Geologisches Zeitalter	Ca CO ₃ %	Mg CO ₃ %	Anderes mg/l pro 28 h	CaCO ₃ mg/l pro 28 h
1.	Carrara (Apuanische Alpen)	Trias	98,0	2,0	0,0	31
2.	Copoya (Chiapas, Mexiko)	Oligozän	81,8	2,0	16,2	18
3.	Panamerikanische Landstrasse (1187 km, Chiapas, Mexiko)	Mittelkreide	89,4	4,8	5,8	20
4.	Macuspana (Tabasco, Mexiko)	Oligozän	92,7	4,8	2,5	24
5.	Canon (Chiapas, Mexiko)	Oligozän	93,2	4,0	2,6	26
6.	Poana (Tabasco, Mexiko)	Oberkreide	93,9	3,7	2,4	25
7.	Morelia (Chiapas, Mexiko)	Mittelkreide	97,4	1,0	1,6	41
8.	Vall de Travers (Neuenburger Jura)	Malm	93,2	3,8	3,0	27
9.	Vall de Brevine (Neuenburger Jura)	Malm	91,3	4,8	3,9	23
10.	Vall de Brevine (Neuenburg. J.)	Malm	92,8	4,9	2,3	23
11.	Les Sognettes (Neuenb. J.)	Malm	84,8	4,9	10,3	22
12.	Soyalo (Chiapas, Mexiko)	Mittelkreide	92,0	3,8	4,2	26
13.	Bochil (Chiapas, Mexiko)	Mittelkreide	90,9	4,9	4,2	22
14.	Teopisca (Chiapas, Mexiko)	Quartär	88,0	8,8	3,2	19
15.	Eube (Deutsches Mittelgebirge)	Muschelkalk	87,0	8,4	4,6	18
16.	Glattalp (Schweizer Alpen)	Unterkreide	95,0	3,4	1,6	26
17.	Glattalp (Schweizer Alpen)	Unterkreide	93,4	4,7	1,9	22
18.	Monte Cavallo (Venezianer Voralpen)	Kreide	91,0	4,9	4,1	20
19.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	89,4	9,9	0,7	16
20.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	91,0	8,6	0,4	19
21.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	84,6	9,7	5,7	16
22.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	88,9	4,9	6,2	21
23.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	87,9	9,9	2,2	17
24.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	94,4	2,8	2,8	17
25.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	95,0	3,0	2,0	28
26.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Eozän	92,6	4,6	2,8	22
27.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Eozän	87,0	8,9	4,1	18
28.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Eozän	89,4	10,0	0,6	15
29.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	90,4	8,8	0,8	19
30.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Eozän	96,0	0,7	3,3	40
31.	Monte Cavallo (Venez. Voralp.)	Kreide	94,1	4,1	1,8	23
32.	Longarone ((Piave-Tal)	Jura	90,9	4,3	4,8	16
33.	Paranuzzi (Venez. Voralpen)	Eozän	92,4	5,0	2,6	20
34.	Torrente Pentina (Venez. Vora.)	Trias	95,8	4,2	0,0	22
35.	Torr. Pentina (Venez. Voralpen)	Jura	92,0	8,0	0,0	16
36.	Torr. Pent. (Venez. Voralp.)	Trias	88,3	4,8	6,9	21
37.	Campo Felice (Abruzzen)	Untermiozän	97,0	2,0	1,0	20
38.	Campo di Rovere (Abruzzen)	Untermiozän	97,2	2,1	0,7	22
39.	Campo Felice (Abruzzen)	Mittelmiozän	84,5	9,7	5,8	22
40.	Campo Saline (Abruzzen)	Kreide	87,3	8,6	3,1	14
41.	Campo di Rovere (Abruzzen)	Untermiozän	90,6	4,4	5,0	12
42.	Piano di Ovindoli (Abruzzen)	Mittelmiozän	92,0	4,9	3,1	22
43.	Piano di Ovindoli (Abruzzen)	Mittelmiozän	90,0	4,0	6,0	22
44.	Campo Saline (Abruzzen)	Untermiozän	85,0	10,0	5,0	22
45.	Campo Felice (Abruzzen)	Kreide	99,0	1,0	0,0	26
46.	Campo Felice (Abruzzen)	Kreide	91,5	7,6	0,9	18

in den Richtungen der absteigenden Linien der einzelnen Diagramme auftretenden Brüche nicht parallel zueinander gemacht werden können.

Um den Zusammenhang zwischen den vorstehenden Lösungseigenschaften und den Gesteinszusammensetzungen zu erfassen, redigierte GERSTENHAUER ein neueres Diagramm (Abb. 3.), auf dessen Abszisse er den CaCO_3 -Anteil der Gesteinsproben und auf dessen Ordinata die mg/l Werte des in der Zeiteinheit von 28 Stunden der Untersuchung gelösten Gesteins aufgetragen hat. Die Streuung der auf diese Weise in das Diagramm eingetragene Punkte erreichte aber ein überaus breites Feld. Daraus kann bereits einer der wichtigsten Schlüsse der Untersuchungsserie gezogen werden: *Zwar zeigt die Lösungsintensität der Kalksteine unterschiedlicher Zusammensetzung gewisse Zusammenhänge mit den Verhältnissen des CaCO_3 -Gehalts des Gesteins auf, aber die Variabilität der Löslichkeit kann durch diesen Faktor allein nicht erklärt werden.*

Wenn wir aber bei einem nach den vorangehenden gleichen Prinzipien redigierten neueren Koordinatensystem, an dessen waagerechter Achse zunächst den MgCO_3 -Gehalt darstellen, die Anordnung der die Löslichkeit bezeichnenden Punkte untersuchen (Abb. 4), können wir eine wesentlich geringere Streuung beobachten und ausdrücklich kann ein verhältnismässig schmaler Lösungsgang bezeichnet werden, der den Grossteil der den Löslichkeitsgrad der untersuchten Gesteine bezeichnenden Diagrammpunkte enthält. In der Darstellung nach den Mol-Verhältnissen zeichnen sich die Gesagten noch auffälliger aus. Auf diesem Grund ergibt sich also von selbst die Erfassung des zweiten experimentellen Satzes der Versuchsreihe: *Der Löslichkeitsgrad der Kalkgesteine wird durch deren Magnesiumkarbonatgehalt auch bereits bei geringem Gemengeanteil entscheidend beeinflusst.*

Ausserdem ist noch ein sehr auffallender Zug des Diagramms der Abb. 4., dass die Abnahme der Löslichkeit der Erhöhung des Magnesiumkarbonatgehalts nicht in linearem, sondern progressiv umgekehrtem Verhältnis folgt. Das heisst, während von den Kalkgesteinen mit insgesamt 1 oder noch weniger % Gehalt an MgCO_3 Grössenordnungen von 40 mg/l der Löslichkeit in der Untersuchungsperiode von 28 Stunden erschienen, weist auch die Lösung der Kalkgesteine mit 2—5% Gehalt an Magnesium beinahe die Hälfte von diesem Wert auf. Diese Löslichkeitsminderung wird aber beim Erscheinen des Magnesiumkarbonats in erhöhter Grössenordnung nicht mehr wesentlich gesteigert.

Damit die die Löslichkeit gewiss auch modifizierende und so annehmbar auch die vorstehenden Versuchsergebnisse an manchen Stellen störende Wirkung der in den Gesteinen fast immer vorhandenen anderen Verunreinigungsbestandteile beseitigt, bzw. vermessen werden kann und dadurch der auf die Löslichkeit geübte Einfluss des Magnesiumkarbonats in der Tat eine eindeutige und durch Experiment exakte Beleuchtung gewinnen kann, haben GERSTENHAUER und PFEFFER mit dem je nach Analyse in verschiedenem Masse reinen Kalziumkarbonat- und Magnesiumkarbonatpulver Untersuchungen auf die Lösungsintensität durchgeführt. Die sehr beachtenswerten Ergebnisse dieser Messreihen werden

in Abbildung 5 und 6 veranschaulicht, und zwar Abb. 5 in bezug auf sämtlich mögliche Proportionsverhältnisse der beiden Komponenten, während Abb. 6 nur in den der Häufigkeit der petrographischen Bedingungen am meisten entsprechenden Proportionen, bei denen der Anteil des $MgCO_3$ -Gehalt des Gemenges nur 0—10% ausmacht.

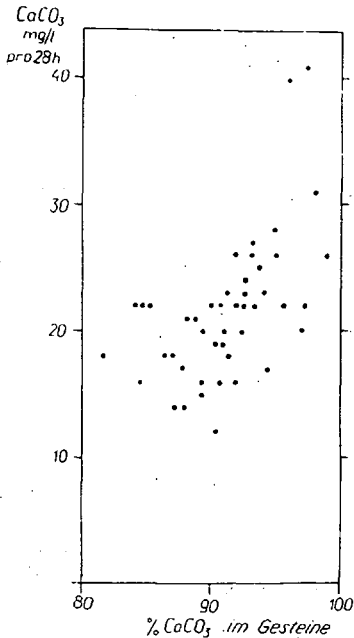


Abbildung 3. Die 28 stündige Löslichkeit von 46 verschiedenen Gesteinsproben in dem mit $p\text{ CO}_2$ gesättigten Wasser je nach dem an der Abszisse angegebenen CaCO_3 -Gehalt der Proben (nach GERSTANHAUER—PFEFFER).

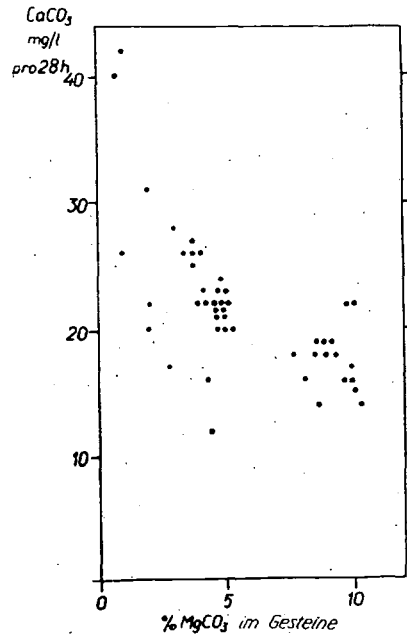


Abbildung 4. Die 28 stündige Löslichkeit von 46 verschiedenen Gesteinsproben in dem mit $p\text{ CO}_2$ gesättigten Wasser, je nach dem an der Abszisse angegebenen $MgCO_3$ -Gehalt der Proben (nach GERSTANHAUER—PFEFFER).

Die oben angeführten Lösungsversuche beweisen eindeutig, dass die Löslichkeit des CaCO_3 , d. h. des Kalksteins bereits durch minimalen $MgCO_3$ -Gehalt vermindert wird, aber die darüber hinaus reichenden weiteren Veränderungen in der Proportion des Magnesiums keine bedeutende, die Löslichkeit modifizierende Auswirkung in der Grössenordnung mehr haben.

Vergleichen wir die auf die absoluten Grössenordnungen der Löslichkeit bezogenen Werte einerseits der Diagramme in den Abbildungen 5 und 6, und andererseits der Kurven der Abbildungen 3 und 4, so stellt

sich der interessante Zusammensetzung heraus, dass die Löslichkeit der natürlichen Kalkgesteine sowohl bei den magnesiumfreien, als auch den magnesiumkarbonathaltigen Gesteinsproben wesentlich höher ist, als die Löslichkeit pro Anal. des Pulvergemenges von Kalziumkarbonat, bzw. von Kalziumkarbonat-Magnesiumkarbonat. Dieser überraschende Umstand kann nur auf zweierlei Arten erklärt werden. Entweder müssen wir daran denken, das die nicht karbonathaltigen Unreinigkeiten der natür-

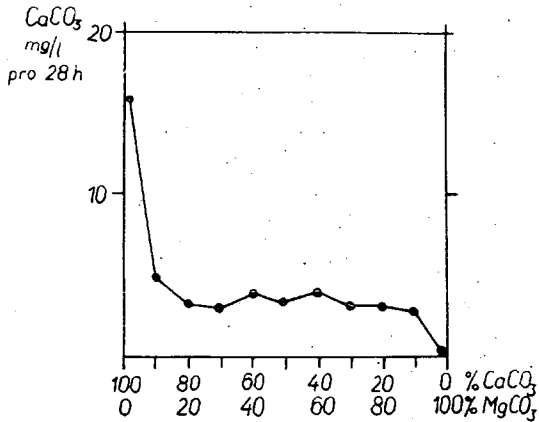


Abbildung 5. Die 28 stündige Löslichkeit der Gemenge in unterschiedlicher Proportion pro Anal. von CaCO_3 und MgCO_3 in dem mit p CO_2 gesättigten Wasser bei Zimmertemperatur, nach den an der Abszisse angegebenen Gemenge-Proportionen (nach GERSTENHAUER—PFEFFER).

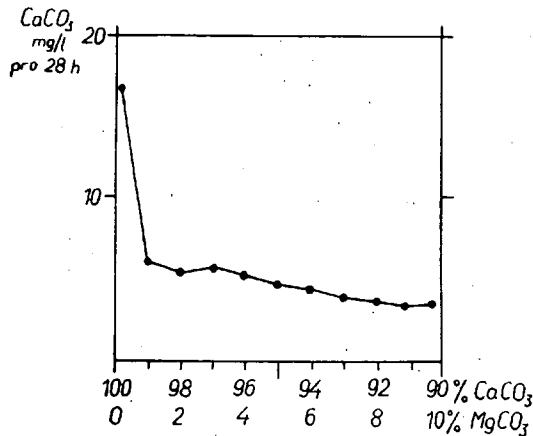


Abbildung 6. Die 28 stündige Löslichkeit der Gemenge von pro Anal. CaCO_3 90—100% und MgCO_3 0—10% in dem mit p CO_2 gesättigten Wasser bei Zimmertemperatur, nach den an der Abszisse angegebenen Mischungsproportionen (nach GERSTENHAUER—PFEFFER).

lichen Kalkgesteine die Löslichkeit des Gesteins günstig beeinflussen, oder aber daran, dass sich in dieser Erscheinung die Wirkungsergebnis der kristall- und gefügestrukturellen Eigenart der natürlichen Gesteine widerspiegelt.

Hinsichtlich der objektiven Beurteilbarkeit der Verkarstungsvorgänge ist es gar nicht gleichgültig, ob dieses Problem bereits auf Grund unserer gegenwärtigen Kenntnisse zu entscheiden ist. Deshalb haben wir von den GERSTENHAUER'schen Analysendaten die nichtkarbonatigen Unreinigkeitsmengen der 46 Kalksteinproben errechnet und diese Werte — im Vergleich mit den Lösungsergebnissen von 28 Stunden — einmal in die entsprechende Kolonne der Tabelle 2 eingetragen, zum anderen in Abbildung 7 auch graphisch dargestellt.

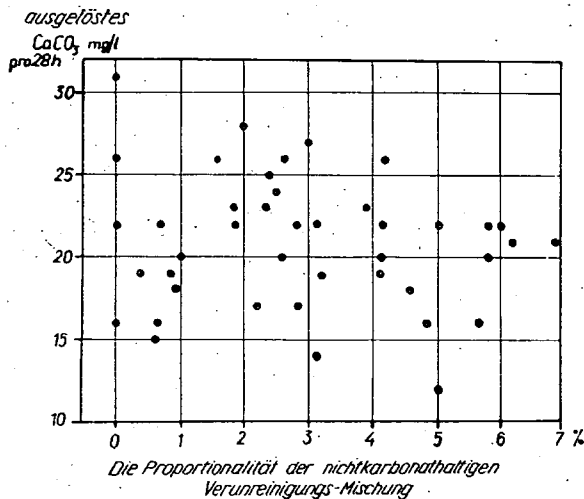


Abbildung 7. Zusammenhang der nicht-karbonatig-mineralischen Unreinigkeiten der Kalkgesteine mit dem Ausmass der 28 stündigen Kalksteinlösung. Es ist zu bezeichnen, dass die Punkte der Proben mit Nummern 2, 7, 11 und 30 im Diagramm fehlen, da deren Streuung vom dargestellten Koordinatenfeld sehr weitab, draussen gelegen ist (aus den Daten von GERSTENHAUER—PFEFFER berechnet, original redigiert).

Die sehr starke Streuung der Punkte in Abb. 7 beweist, dass die Löslichkeit des Kalkgesteins in erster Linie *nicht* mit der Menge der karbonatfremden Gemengteilen in kausalem Zusammenhang steht. Was also die Ursache des aus dem Magnesiumverhältnis nicht deutbaren Löslichkeitsgrades und der anderen Lösungs-Spezifika anbelangt; tritt die andere Klärung, d. h. die Wirkung der Merkmale der Gestein- und Kristallstruktur in den Vordergrund.

Dass man wirklich — wenigstens die Grössenordnung der Wirkung betreffend — die Ursache der Erscheinung in diesen Umständen zu suchen hat, kann auch von einer anderen Seite her bestätigt werden:

Die Gesteinsproben Nr. 34, 35 und 45 von GERSTENHAUER enthalten kein unreinigendes Mineral, sondern das Kalkgestein wird ausschliesslich aus CaCO_3 und zum kleineren Teil aus MgCO_3 gestaltet. Die Löslichkeit dieser vier Gesteine kann also nur durch das Verhältnis $\text{Ca} : \text{Mg}$ des Gesteins, sowie durch ihren kristallinen und gesteinsgefügen Charakter beeinflusst werden. Wenn nämlich die letzteren keine Rolle spielten, sollten die Löslichkeitspunkte der Gesteinsproben auf die Diagrammkurve der Abb. 6. fallen. Dagegen wird die tatsächliche Lage durch die von uns umrissene Abb. 8. erschlossen.

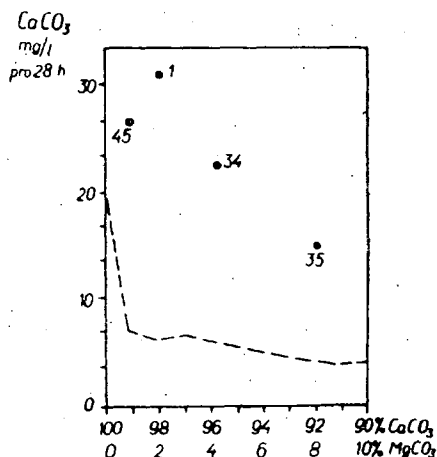


Abbildung 8. Die 28 stündige Löslichkeit der nur aus CaCO_3 und MgCO_3 Komponenten bestehenden Gesteinsproben in dem mit p CO_2 gesättigten Wasser bei Zimmertemperatur je nach den an der Abszisse angegebenen Gemengeverhältnissen. Gestrichelt haben wir zum Vergleichszweck die Löslichkeitskurve der pro Anal. Gemisches bezeichnet (original).

In unserem Koordinatensystem kann die objektive Lage der dargestellten vier Punkte nicht mehr durch die chemische Zusammensetzung der Gesteine gedeutet werden und deshalb können wir auf Grund der eigenartigen Anordnung der Punkte die Ursache des erfahrenen Löslichkeitsgrades betreffend nach dem Stand unseres heutigen Wissens wirklich nur an die bereits erwähnten lithostrukturellen Eigenschaften denken.

Der Einfluss der kristallographischen und gesteinsstrukturellen Eigenarten des Kalkgesteins auf die Karstkorrosion

Es versteht sich von selbst, dass die im Laufe der Laboruntersuchungen erhaltenen Ergebnisse in ihrer absoluten Grössenordnung auf die Natur nicht angewandt werden können, weil dabei mit der Interferenz.

der die Verkarstung bestimmenden sämtlichen Faktoren gerechnet werden muss. Aber ebenso ist es auch wahr, dass die im Labor erfassbaren Tendenzen und Beziehungen auch unter natürlichen Bedingungen vorhanden sind und wirken. Deswegen kann jeder statistische Vergleich, der die Ergebnisse der laboratorischen Löslichkeitsuntersuchungen der Gesteine mit den auf das Gefüge, die Struktur bezogenen Eigenschaften derselben Gesteine vergleicht, ebenso nützlich sein und ebenso zur Erkenntnis der auf die Dynamik der Karstkorrosion objektiv wirkenden Gesetzmässigkeiten führen, wie die Forschung des Zusammenhanges zwischen der chemischen Zusammensetzung und dem Löslichkeitsgrad.

Aus dieser Überlegung ausgegangen soll die Initiative von GERSTENHAUER und PFEFFER hoch geschätzt werden, die die bereits früher angenommenen Zusammenhänge zwischen den strukturellen Eigenschaften des Gesteins und dem Löslichkeitsgrad durch konkrete experimentelle Laboruntersuchungen genau angeben.

Zunächst haben sie von den bereits erwähnten 46 Arten von Kalkgesteinen Dünnschliffe angefertigt und die Gefügemerkmale der Proben durch mikroskopische Analyse festgelegt, dann die karbonat-mineralogische Zusammensetzung des Gesteins durch selektive Färbemethodik ermittelt. Dabei ist es zu erwähnen, dass die chemische Substanz allein die mineralogische Zusammensetzung nicht bedingt. Der Magnesiumgehalt kann nämlich in den Kalkgesteinen grundsätzlich in drei verschiedenen mineralogischen Formen vorhanden sein:

1. Er ist sehr häufig im Innern des Kalzits in disperser Anordnung eingebaut und in diesen Fällen kann seine Anwesenheit durch gefügekundliche und kristallographische Untersuchungsmethoden nicht nachgewiesen werden. Wir müssen bei diesen Kalksteinen wahrscheinlich an den Einbau mit syngenetischer Gitterstruktur denken. Das Mineral als Hauptbestandteil eines solchen Gesteins nennen wir deshalb *Mg-Kalzit*.

2. Der Mg-Gehalt kann in Form von Dolomit (einzelne Kristallkörner oder Ader) vorhanden sein (Zeichen der postgenetischen Mg-Einführung), ferner

3. in Form von Magnesit.

Über die Analysen nach den vorangehenden Gesichtspunkten hinaus haben sie die glattgeschliffene Flächen der Kalksteine der Einwirkung von dünner Salzsäure ausgesetzt und nach Ablauf einer gewissen Zeit die subjektive Tastempfindung der geätzten Fläche festgelegt (sehr glatt, glatt, rau, sehr rau), dann nach weiteren Ätzung die mikromorphologischen Zustandsmerkmale der korrosiven Gesteinsoberfläche bestimmt (ebene, wellige, karrenfeldartige Fläche, Relief mit Dolinen, an Kratergebiet erinnernd, manchmal turmartig, zackig gegliedert).

Die Ergebnisse der vorstehenden Untersuchungen sind in den Kolonnen II—XI. der Tabelle 3 zusammengefasst. In der Kolonne XII. der Tabelle sind die Ergebnisse der 28 stündigen Lösung angegeben, damit so die einzelnen Eigenschaften und der tatsächliche Korrosionsgrad übersichtlich vergleichbar werden.

Die Angaben der Tabelle sind in vielfacher Annäherung zu bewerten. Wie aber immer die Annäherung sei, muss mit dem Umstand gerechnet werden, dass die Lösungskraft nicht durch eine oder andere Gesteinsbeschaffenheit aktiviert wird, sondern sie ist das komplexe Ergebnis der gesamten Wirkungsfaktoren des physischen Zustandes und der chemischen Zusammensetzung. In dem nur theoretisch möglichen Falle, wenn z. B. alle von uns untersuchten Kalkgesteine die genau gleiche chemische und mineralogische Zusammensetzung hätten, könnten wir die Unterschiede des Korrosionsgrades natürlich schon als Zeichen der entsprechenden Folge der Gefügebeschaffenheit bewerten und da wäre die Werthöhe des Wirkungsgrades sogar in der genauen numerischen Grössenordnung definierbar. Da es aber in der Natur ebensowenig 46, wie nicht einmal zwei Kalkgesteine von gleicher chemischen und mineralogischen Zusammensetzung gibt, so können wir wohl auch mit Hilfe der Tabelle 3 nur bis zu den beim statistischen Vergleich erkennbaren annähernden Tendenzen gelangen.

So weit können wir doch wirklich kommen. Denn z. B. vergleichen wir ja in je grösser Anzahl den Mittelwert der spezifischen Lösungen von gleichen Gefüge-Eigenschaften mit dem Mittelwert von gleichwohl je mehr Lösungsgruppen der Gesteine von anderen strukturellen Merkmalen, mit desto mehr Recht können wir darauf vertrauen, dass der erhaltene Unterschied tatsächlich die Widerspiegelung der gefügekundlichen Wirkungen ist. Beim statistischen Vergleich von zahlreichen Proben werden nämlich die Wirkungen der starken spezifischen (z. B. die chemische Zusammensetzung betreffenden) Unterschiede beseitigt und auch die gesuchten schwächeren Wirkungsbeziehungen setzen sich ausdrücklich durch.

Infolge der oben Gesagten haben wir von der unübersichtbaren Einzeldarstellungsmethode von GERSTENHAUER abgewichen (Diagramme VII—X. des angeführten Werkes) und die in Tabelle 3 zusammengefassten Ergebnisse haben wir in der die objektiven Tendenzen mehr durchsetzenden statistischen Bearbeitung zum Ausdruck gebracht (Abb. 9 und 10). Die durch je 28 stündige Lösungen erhaltenen mg/l Wertzahlen der aufgrund der gleichen Eigenschaften in eine Gruppe einreihbaren Gesteinsproben addiert, und die so erhaltene Summe durch die Zahl der Proben geteilt, haben wir die für die Gruppen bezeichnenden durchschnittlichen Löslichkeitsniveaus erhalten, die in unseren Abbildungen die Höhe der Diagrammkolonnen der einzelnen gesteinskundlichen Merkmale bedingen.

Obwohl zur Abfassung der allgemeinen Gesetzmässigkeit und insbesondere zur Erwägung ihrer Rolle in der Grössenordnung derartiger Folgerungen viel mehr Untersuchungsmaterial erforderlich wäre, genügt doch nach unserer Meinung bereits diese Beobachtungsreihe zur Erkennung der wichtigsten Tendenzen, die im folgenden konkretisiert werden können:

Der gefügekundliche Aufbau der Kalksteine steht mit dem Löslichkeitsgrad in enger Verbindung. *Die Kalksteine von dichter, homogener Konsistenz, die specksteinförmig aussehen und muschelrig brechen, lösen*

TABELLE 3

*Gefügekundliche und mineralogische Merkmale unterschiedlicher Kalksteine
und der Löslichkeitsgrad*

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
1.	de	0,20—0,25 (0,35)	—	nf	s	s	4	—	—	3	31
2.	p	nf	0,20—0,25 (1,50)	—	s	m	4	—	—	3	18
3.	p	nf	0,05—0,10	bis 1,50	ns	l	4	2	—	—	20
4.	t	nf	—	—	s	l	4	2	—	—	24
5.	tf	nf	—	0,10—0,25	é	k	—	4	2	—	26
6.	pe	nf	0,25—0,40	0,05—0,06	s	s	4	2	—	2	25
7.	p	nf	0,05—0,30	—	é	s	4	2	—	—	41
8.	p	nf	0,05 0,50—1,00	—	ns	m	4	3	—	3	27
9.	tt	nf	—	0,10—0,25 (0,50)	ns	l	4	2	—	—	23
10.	sz	0,15—0,25	—	—	né	s	4	2	—	—	23
11.	t	nf	—	—	s	d	4	—	3	3	22
12.	sz	0,20—0,25 (0,75)	—	—	né	t	4	—	3	3	26
13.	p	nf	0,15—0,20 0,50—1,50	—	s	k	4	3	—	3	22
14.	p	nf	0,25—0,50	nf	é	s	4	3	—	3	19
15.	pe	nf	0,05	nf	s	l	4	3	—	—	18
16.	sz	0,10—0,15	—	—	né	t	4	4	—	—	26
17.	sz	0,20—0,25 0,75—1,25	—	—	né	et	1	4	—	—	22
18.	p	nf	0,20—0,50	—	s	s	4	2	—	—	20
19.	pe	nf	0,10—0,15	0,25	ns	m	4	3	1	3	16
20.	sz	0,50—1,50	—	—	ns	s	4	—	—	3	19
21.	sz	0,20	—	—	né	s	4	3	—	—	16
22.	p	nf	0,40—0,50	—	s	s	4	3	—	—	21
23.	pf	nf	0,05	0,40—0,50	ns	l	4	3	—	—	17
24.	p	nf	0,15—0,20	—	s	s	4	3	—	—	17
25.	sz	0,05—0,10	—	—	né	l	2	4	1	—	28
26.	p	nf	0,25—0,50 (1,00)	—	s	m	4	—	—	3	22
27.	sz	0,05—0,10	—	—	né	s	—	4	1	3	18
28.	sz	0,40—1,10	—	—	né	t	4	—	—	3	15
29.	p	nf	0,20—1,20	—	ns	m	4	2	—	—	19
30.	sz	0,05—0,10	—	—	é	s	—	4	1	—	40
31.	p	nf	0,25—0,50	—	ns	m	4	3	—	—	23
32.	p	nf	0,05—0,10 0,35—0,50	—	né	s	4	3	—	3	16
33.	p	nf	0,15—0,25	—	s	l	4	3	—	—	20
34.	sz	0,25—1,25	—	—	né	s	4	4	—	—	22
35.	p	nf	0,20—0,30	—	s	l	4	2	—	2	16
36.	t	nf	—	—	s	s	4	—	3	3	21
37.	t	nf	—	—	é	l	4	2	—	—	20
38.	te	nf	—	0,25	s	l	4	2	—	—	22
39.	sz	0,15—0,25	—	—	né	t	4	2	—	2	22
40.	p	nf	0,10—0,15	—	ns	m	4	2	—	—	14
41.	t	nf	—	—	s	s	4	2	—	—	12
42.	p	nf	0,25—0,50 (1,50)	—	s	t	4	3	—	3	22

sich wesentlich schwieriger auf, als diejenigen Kalksteine, die von kristallkörniger Struktur sind (Diagramme 5 und 6 der Abbildung 9). Es ist wahrscheinlich, dass die Ursache dieser Erscheinung in den Angriffsflächen unterschiedlicher Grösse der Gesteine zu sehen ist, da ein glatter,

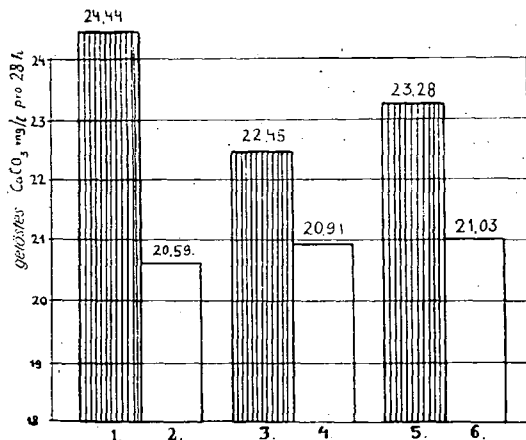


Abbildung 9. Zusammenhang der gefügekündlichen Eigenschaften des Kalkgesteins mit der Löslichkeit. Der 28 stündige Löslichkeitsgrad ist im Durchschnitt der Einzellöslichkeit der Gesteinsproben gleicher Beschaffenheit angegeben (aus den Angaben von GERSTENHAUER—PFEFFER original redigiert).

Legende:

1. Die durch dünne Salzsäure geätzte Fläche ist von rauher oder sehr rauher Tastempfindung.
2. Die durch Ätzung mit dünner Salzsäure erhaltene Fläche ist von glatter oder sehr glatter Tastempfindung.
3. An der mit dünner Salzsäure geätzten Gesteinsplatte erschienen gezackte Türmchen, spitzenartige Dörner oder krater- und dolinenförmige Eintiefungen.
4. An der mit dünner Salzsäure geätzten Gesteinsplatte gibt es entweder keine Mikroformen oder es sind Rücken und Flachmulden nur mit sanftem Relief, geringer Reliefenergie, gelegentlich sind karrenförmige Rinnenanfänge bemerkbar.
5. Das Gefüge des Gesteins ist kristallkörnig, grob kristallin, gelegentlich geadert.
6. Das Gefüge des Gesteins ist entweder völlig dicht, homogen oder es liegen in der dichten Grundmasse disperse Einzelkristalle (porphyrisches Gefüge), gelegentlich können auch Adern, Drusen oder kleine Kristallinseln beobachtet werden.

muscheliger, dichter Kalkstein eine geringere Lösungsfläche dem Wasser darbietet (Diagramme 1 und 2 der Abbildung 9). Der kristallkörnige Kalkstein hat nämlich eine rauhere Bruchfläche als der Kalkstein mit dichtem Gefüge, denn beim Bruch geht die Auseinandersetzung zumeist an den Kontaktflächen der Einzelkristalle vor sich, hinsichtlich dessen, dass die Adhensionskraft beim Aneinanderhaften der Körner geringfügiger

ist, als das gitterstrukturelle Zusammenhalten des Kristalls. Im Laufe der Lösung nimmt dann die Fläche noch weiter zu, da im korrosiven Abschnitt an den einzelnen Kristallflächen weitere kleine Eintiefungen und Aufwölbungen, die sogenannten *Ätzgruben und -hügel* in Erscheinung treten (Diagramme 3 und 4 der Abbildung 9).

Von zwei die gleiche Menge von Magnesiumkarbonat enthaltenden Kalksteinen wird also — falls kein anderer störender Faktor mitwirkt — derjenige eine Karstkorrosion von erheblicherer Dynamik haben, der einen höheren Kristallisierungsgrad hat.

In den in Abbildung 10 dargelegten Diagrammen haben wir die Formgeprägen der mineralischen Erscheinung des Kalzium- und Mag-

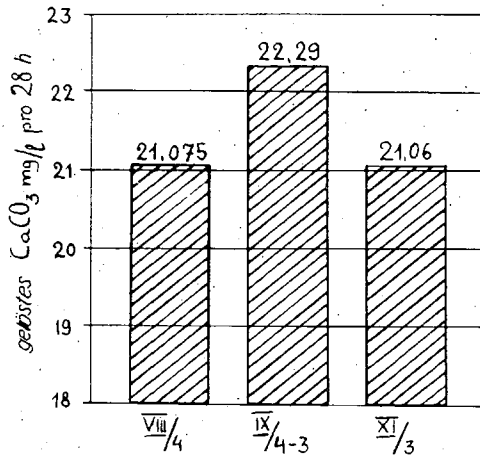


Abbildung 10. Die Einwirkung der mineralischen Anordnung des Kalziumkarbonat- und Magnesiumkarbonatgehaltes der Kalkgesteine auf die Löslichkeit. Der 28. stündige Löslichkeitsgrad ist im Durchschnitt der einzelnen Löslichkeiten der Gesteinsproben mit gleicher mineralogischen Kennzeichnung angegeben (aus den Angaben von GERSTENHAUER—PFEFFER original redigiert).

Legende:

VIII/4

= Das die Mehrheit des Gesteins gestaltende Hauptmineral ist der reine Kalzit, und der Gehalt an Mg-Karbonat lokalisiert sich hauptsächlich auf das Vorkommen in Einzelkristallen oder Adern.

IX/4—3

= Das den Grossteil oder den bedeutenden Anteil gestaltende Mineral ist der Mg-Kalzit, d. h. der bedeutende Teil des Mg-Karbonatgehaltes des Kalkgesteins ist in der im Kristallgitter des Kalzits eingebauten Form anwesend.

XI/3

= Der bedeutende Teil des Mg-Karbonatgehaltes des Gesteins ist in Form von Dolomitekristallen oder Dolomita-
darn zwischen den Gefügen vorhanden.

nesiumkarbonatgehalts der Gesteine mit dem Löslichkeitsniveau verglichen. Aus der statistischen Bearbeitung ergibt sich als eine schwach auftretende Tendenz der interessante Zusammenhang, dass *der Magnesiumgehalt des Gesteins die Lösung des Kalksteins weniger hindert, wenn er nicht in Form von Dolomit oder Magnesit anwesend ist, sondern als disperses Kristallgefüge in der Gitterstruktur des Kalzits eingebaut ist.* Den letzteren Wirkungszusammenhang können wir aber solange noch nur voraussetzlich annehmen, bis seine Objektivität durch eine viel größere Anzahl von Untersuchungsmaterial bestätigt wird.

Wir müssen wiederholt betonen, dass die Analyse von den Bedingungen der Petrovarianz der Verkarstung keine leichte Aufgabe ist, da es in der Natur gleichzeitig zahlreiche petrographische Faktoren Wirken, und ein Teil dieser fördert, der andere verlangsamt den Lösungsprozess in negativer Richtung. In den meisten Fällen kommt die eine oder die andere Wirkung wegen der eigenartigen lokalen Umstände vorherrschend zum Ausdruck, die Löslichkeit ist aber in letzter Reihe die komplexe vektorielle Resultante von vielen Varietäten der Faktoren.

Die Frage ist übrigens um so komplizierter, weil die in der Natur vorhandenen gesamten Wirkungsseiten der Petrovarianz noch immer nicht in Betracht genommen wurden. Die Übersicht der übriggebliebenen ist die Zielsetzung unseres folgenden Kapitels.

Der Einfluss der stratigraphischen und strukturellen Merkmale des Kalksteins auf die Karstkorrosion

Hinsichtlich der Bestimmung des Ausmasses der Korrosionsdynamik sind die strukturellen und stratigraphischen Eigenschaften der Kalksteine von ausschlaggebender Bedeutung. Zu dieser Kategorie zählen wir den Schichtungsgrad des Gesteins und die Beschaffenheit des die Schichtfugen ergebenden Materialwechsels oder des Sediment hiatus im Laufe der Ablagerung, ferner das Klüftigkeitsmass der Gesteine und den damit zusammenhängenden Permeabilitätsgrad, sowie die Eigenschaften der Standhaftigkeit des Kalkgesteins.

Es kann nicht bestritten werden, dass die obigen Merkmale das Gestein sozusagen prädestinieren, die Ausbildung der einen oder anderen Formengruppe in den Vordergrund zu rücken. So hat z. B. schon MARTEL (1908) mit Recht bemerkt, dass die Rinnenkarrenbildung an den dünnbänkigen und steil geschichteten Kalksteinoberflächen viel auffälliger ist, als in den aus dickbänkigen und ungestört gelagerten Schichten aufgebauten Geländen. Dazu kann aber noch hinzugefügt werden, dass das Vorkommen der Wurzelkarren, die bekanntlich an den mächtigen, massiv gelagerten, wenig geschichteten Gesteinen sehr charakteristische Lösungsmikroformen sind, an den plattigen, stark geschichteten Kalksteinen fast ausgeschlossen ist. Übrigens werden wir im späteren die Gültigkeit der vorstehenden Aussage noch an mehreren Beispielen untersuchen.

Einer der wichtigsten, in der qualitativen Erfassung der Verkarstung eine bedeutende Rolle spielenden strukturellen Faktoren ist das Ausmass der *Kluftporosität des Gesteinsgefüges*.

Bei den Kalkgesteinen mit dichtem, homogenem Gefüge kann es über Kluftporosität wenig gesprochen werden, doch kaum mehr verfügen die kristallkörnigen Gesteine darüber. Das hängt wahrscheinlich mit der Verdichtung des Kalkschlammes bei der Diagenese, bzw. im Falle der kristallkörnigen Gefüge mit der die Umkristallisierung bewirkenden Kompaktion bei der durch grosse Druck- und Hitzewirkungen hervorgerufenen Metamorphose zusammen (POLOWINKINA 1948).

Andererseits sind die bergmännischen Erfahrungen unter dem Karstwasserniveau beachtenswert, die darüber berichten, dass sogar die dichtesten und sozusagen keine Kluftporosität besitzenden Kalksteine vermögen, das unter Druck stehende Wasser in ihrem Gefüge durchzulassen. So schreibt z. B. KASSAI (1948, S. 33): „Im Kohlenbecken von Esztergom ist das Kalkgestein unter dem wassergefährdeten Niveau um ein Gutes feuchter als die Bergfeuchte ist. Aus dem anscheinend völlig dichten Kalkgestein bekommt man triefendes Wasser und um so mehr, je tiefer man sich unter dem wassergefährlichen Niveau befindet, d. h. je grösser der hydrostatische Druck ist.“

Diese letztere Beobachtung, die zum Schein den Ergebnissen der petrographischen Gefügeuntersuchungen und Trocknenproben widerspricht, ist zweifellos objektiv und angebracht. Bis auf heute ist es aber nicht beruhigend entschieden, welcher Anteil bei der im Falle des bergbaulichen Beispiels bezeichneten Wasserführung im Gesteinsgefüge tatsächlich der Gesteinsporosität zutrifft und welcher der verheilten Mikroklüftung des Kalksteins, womit man ebenso rechnen soll, und zwar bei den meisten Kalksteinen schon fast von der letzten Phase des Prozesses der Diagenese an.

Die Frage der Gesteinsporosität kann sonst auch nicht schematisch behandelt werden. Die Gestaltung der relativen Porositätslosigkeit ist nämlich bis zu einem gewissen Grade eine mit der geologischen Zeit zusammenhängende Frage. Namentlich kann man nachweisen (CAYEUX 1935), dass die Kalksteine um so dichter erscheinen, je älter sie im geologischen Sinne sind. Bei den Kalksteinen ganz jungen Alters (Ende Tertiär, Quartär) können noch erhebliche Klufträume zwischen den Gefügen vorhanden sein. So beträgt z. B. die Porosität des Sarmata-Kalksteins in Mittel-Europa im allgemeinen 1—7%, während die davon noch jüngeren Süsswasserkalksteine (Kalktuffe, Wiesenkalksteine usw.) sogar die Werte von 10—20% überschreiten können (PIA 1933).

Die Folge des kompakten, dichten Gefüges vor allem der älteren Kalksteine ist die *Bildung von Rissen, Brüchen* — im allgemeinen die *Gestaltung des Lithoklasennetzes*. Wegen der Kompaktheit verhält sich nämlich der Kalkstein als ein starres, sprödes Material gegenüber den auf ihn wirkenden Beanspruchungen, und kann sich ihnen nicht einmal durch die kleinste Deformation anpassen (SCHMIDT 1953, 1957).

Auch die bei den einzelnen Aufschlüssen beobachtbaren, stark gefalteten Kalksteine (z. B. im Mecsekgebirge) konnten sich nur in tausend Stücke zerkleinert der tektonischen Beanspruchung anpassen, und des-

halb sind diese Schichten mehr oder weniger immer krümmelig. Und wenn sie von kontinuierlicher Konsistenz sind, so ist das schon das Ergebnis eines postgenetischen Zementationsvorganges.

POLOWINKINA betont (1948), dass der Kalkstein in der Erdrinde zu allen Zeiten von physischen Beanspruchungen (orogenetischem und stratigraphischem Druck, tektonischen Einwirkungen) betroffen wird, unter deren Wirkung eine starke Mikroklüftung gestaltet wird. Seine Untersuchungen zeigen, je weniger der Kalkstein umkristallisiertes Gefüge hat, desto grösser ist das Ausmass seiner Klüftung. Das bedeutet mit anderen Worten, dass die nachträgliche Umkristallisierung die Sprödhheit des Gesteins gewissermassen vermindert. Wir verweisen dabei auf die ausgezeichnete Translation der Kalzitkristalle (MAURITZ-VENDL 1942).

Der Grad der im Kalkstein zustande gekommenen strukturellen Klüftung ist die wichtigste Voraussetzung der *Wasserdurchlässigkeit* des Gesteins. Die Folge davon ist nämlich die Tatsache, dass sich auch die porositätsfreien Kalksteine fast immer *als gutes wasserdurchlässiges Gestein* (permeable Schicht) verhalten.

Nach CAYEUX (1935) haben wir die strukturelle Klüftigkeit von mehreren hundert Kalksteinen verschiedenen geologischen Alters und aus unterschiedlichen Entnahmestellen herrührend untersucht und den interessanten Zusammenhang erfahren, dass die aus der Menge der Mikro-Lithoklasen sich ergebende Wasserdurchlässigkeit der Gesteine unter anderem *vom geologischen Zeitalter abhängig* ist. Wir haben in den Kalkverbänden von paläozoischer Ablagerung die grösste Anzahl struktureller Klüfte (je nach Flächeneinheit 36) gefunden, weniger zahlreiche in den aus dem Mesozoikum stammenden Kalksteinen (je nach Flächeneinheit 6—20), und in den tertiären Kalksteinen die wenigsten (je nach Flächeneinheit 1—8). In den quartären (pleistozänen und holozänen) Kalktuffen gibt es hingegen entweder keine solchen strukturellen Haarrisse oder sie kommen nur stellenweise vor. Das ist sonst auch natürlich, wenn man daran denkt, dass das jüngere Gestein von geringerer tektonischer und anderer Beanspruchung betroffen werden konnte.

Zu gleicher Zeit ist es auch beachtenswert, dass die strukturellen Klüfte der aus dem Karbon oder noch älteren Zeiten stammenden Kalkgesteine mit Kalzitablagerungen oft kräftig zusammenzementiert sind und deshalb deren Porenvolumen und damit auch ihre Wasserführungskapazität von sehr reduziertem Wert sind.

Die Zusammenhänge des geologischen Zeitalters und der Wasserführungskapazität der Kalksteine, bzw. der offenen und geschlossenen strukturellen Klüftigkeitsziffern werden in Abbildung 11 veranschaulicht.

Das Ausmass der Permeabilität des Kalksteins ist eine der grundlegendsten Voraussetzungen des Verkarstungsprozesses. Anhand des Diagramms finden wir das am ausdrücklichsten bei den im Quartär entstandenen Kalksteinen, bei denen aber der Höchstwert der Wasserführungskapazität nicht mit den strukturellen Klüften des Gesteins, sondern mit der erheblichen Gefügeporosität und mit den lockeren und vielfach erdigen Festigkeits- und Aggregatzustandseigenschaften zusammenhängt. Die Höchstwerte der offenen Klüfte der Kalksteine und ihrer daraus folgen-

den Wasserführungs- und Wasserspeicherkapazität treten daher bei den aus dem mesozoischen Zeitalter stammenden Gesteinen in Erscheinung und wenn wir den zur Karstbildung nötigen Faktor Zeit auch beachten, so wird auf Grund der oben Gesagten verständlich, dass die Kalksteine aus der Trias-, Jura- und Kreidezeit am häufigsten die auffälligsten Spuren des Verkarstungsprozesses aufweisen.

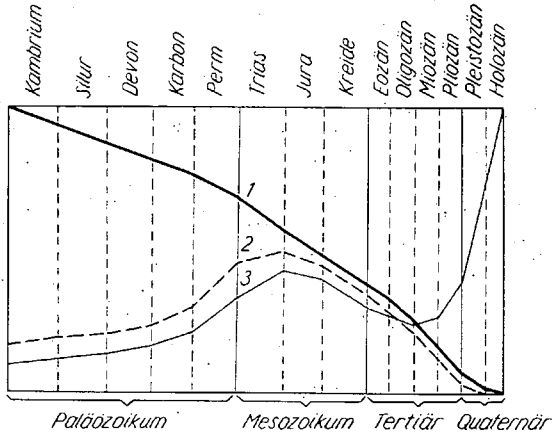


Abbildung 11. Zusammenhänge der geologischen Zeitalter und der Wasserdurchlässigkeit der Kalkgesteine, bzw. des Ausmasses ihrer offenen und geschlossenen strukturellen Klüftigkeit (original).

Das zweite Kriterium der Wasserführungskapazität der Kalkgesteine ist *Ausmass und Charakter der Schichtung* des Gesteins. Je ausgesprochener die Schichtung eines Kalksteinverbandes ist und je dichter darin die *Absonderungen an den Schichtfugen* sind, desto stärker tritt *die an den Schichtflächen verlaufende Wasserführung* in den Vordergrund. Da aber die Schichtung der Kalkgesteine im allgemeinen *mit dem Materialwechsel der Ablagerung* im Zusammenhang steht (Pelitbildung in grösserem Masse), machen die Absonderungen an den Schichtfugen gerade diejenigen Flächenebenen des Gesteins für die absickernden Wässer zugänglich, wo das Gestein am meisten unrein ist. So werden bei der Wasserführung solcher Art einerseits die Lösungsbedingungen ungünstiger, andererseits aber geht auch die Anhäufung der Lösungsrückstände in höherem Masse vor sich, was die Füllung der Klüfte fördert. Es ist offensichtlich, dass diese Umstände in grossem Masse mit der Erfahrungserscheinung zusammenhängt, nach welcher *die Verkarstungsbedingungen der kräftig geschichteten und an der Schichtfugenebene leicht trennbaren Kalkgesteinsarten nachteiliger sind, als die der ungeschichteten, grobbänkigen, homogenen Kalkgesteine.*

Die Gewölbedurchmesser der möglichst grossen Hohlräume im Gestein, sowie der morphologische Grundcharakter der sich gestaltenden

Täler und Höhlengänge werden nicht in letzter Reihe durch die *Standhaftigkeit* des Kalkgesteins bedingt. Die Standhaftigkeit selbst steht ebensowohl in engem Zusammenhang mit der Schichtung und der verheilten strukturellen Klüftung des Gesteins, sowie mit den Kristallisierungs- und anderen Eigenschaften des Gefüges. Natürlich auch mit dem Grad der Verkarstung, die aber schon eine sekundäre Eigenschaft ist.

Im allgemeinen können wir aussagen, dass die völlig kompakten, homogenen, wenig oder nicht geschichteten, reinen Kalkgesteine mit geringen offenen strukturellen Mikrokluftungen in höchstem Masse standhaftig sind. Am geringsten standhaftig sind dagegen die lockeren Kalkstuffsedimente, sowie die stark geschichteten und entlang der Schichtfugen fremde (insbesondere tonige) Schichtbänder enthaltenden Kalkgesteine.

Literaturverzeichnis

- Bögli, A. (1963): Höhlenkarren — Akten III. Intern. Kongr. f. Speläologie, Bd. 2. Wien, 1963.
- Bulla, B. (1954): A klimatikus morfológia területi rendszere. (Räumliches System der klimatischen Morphologie) — MTA Társ.-Tört. Tud. Oszt. Közl. 1954. 1—4.
- Cayeux, L. (1935): Roches, Carbonates, Calcaires et Dolomites — Paris, 1935.
- Cholnoky, J. (1928): A földfelszín formáinak ismerete. (Die Kenntnis der Oberflächenformen der Erde) Budapest, 1928.
- Cholnoky, J. (1932): A mészkőhegységek földrajzi jellemvonása. (Der geographische Charakter der Kalksteingebirge) — Földgömb, 1932.
- Cholnoky, J. (1939): A mészkővidék arculata. (Das Gesicht des Kalksteingebietes) — Barlangvilág, 1939.
- Gánti, T. (1957): A barlangok keletkezésének kémiai vonatkozásai. (Chemische Beziehungen der Entstehung der Höhlen) — Hidr. Közl. 1957. 3.
- Gerstenhauer—Pfeffer (1966): Beiträge zur Frage der Lösungsfreudigkeit von Kalkgesteinen — Abhandl. zur Karst — u. Höhlenkunde, Heft 2. 1966. München.
- Grund, A. (1914): Der geographische Zyklus im Karst — Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin.
- Kassai, F. (1948): Paleogén szénbányászatunk, a karsztvíz és a védekezés módjai. (Paläogener Kohlenbergbau, das Karstwasser und die Arten der Verteidigung) — Hidr. Közl. 1948. 1—4.
- Kettner, R. (1959): Allgemeine Geologie — Berlin, 1959.
- Kukla—Lozek (1958): Zum Problem der Höhlenfüllungen — Cs. Kras XI. Praha, 1958.
- Lais, R. (1941): Über Höhlensedimente — Quartär, 1941. 3.
- Louis, H. (1964): Allgemeine Geomorphologie — Berlin, II. Auflage, 1964.
- Markó, L. (1961): A kalciumkarbonát és magnéziumkarbonát elegyek oldhatósága vízben széndioxid jelenlétében. (Die Löslichkeit der Kalziumkarbonat- und Magnesiumkarbonat-Gemenge im Wasser in Anwesenheit von Kohlendioxid) — Karszt- és Barlangkutató, 1961. 1.
- Martell, E. A. (1908): L'évolution souterraine — Paris, 1908.
- Mauil, O. (1958): Geomorphologie — Wien, 1958.
- Mauritz—Vendl (1942): Ásványtan (Mineralogie) — Budapest, 1942.
- Mándy, T. (1954): Mészkövek és dolomitok oldási vizsgálata (Untersuchung der Löslichkeit von Kalksteinen und Dolomiten) — Hidr. Közl. 1954. 11—12.
- Pia, J. (1933): Die rezenten Kalksteine — Berlin, 1933.
- Polowinkina, E. R. (1953): Strukturi gornih porod (Band II.) — Moskau—Leningrad, 1948.
- Schmidt, E. R. (1953): Karsztvízjáratok kialakulásának geomechanikája. (Geomechanik der Entstehung von Karstwassergängen) — MTA Közl. VIII. 1. 1953.
- Schmidt, E. R. (1957): Geomechanika — Budapest, 1957.
- Thornbury, W. D. (1956): Principles of geomorfology — New York—London, 1956.