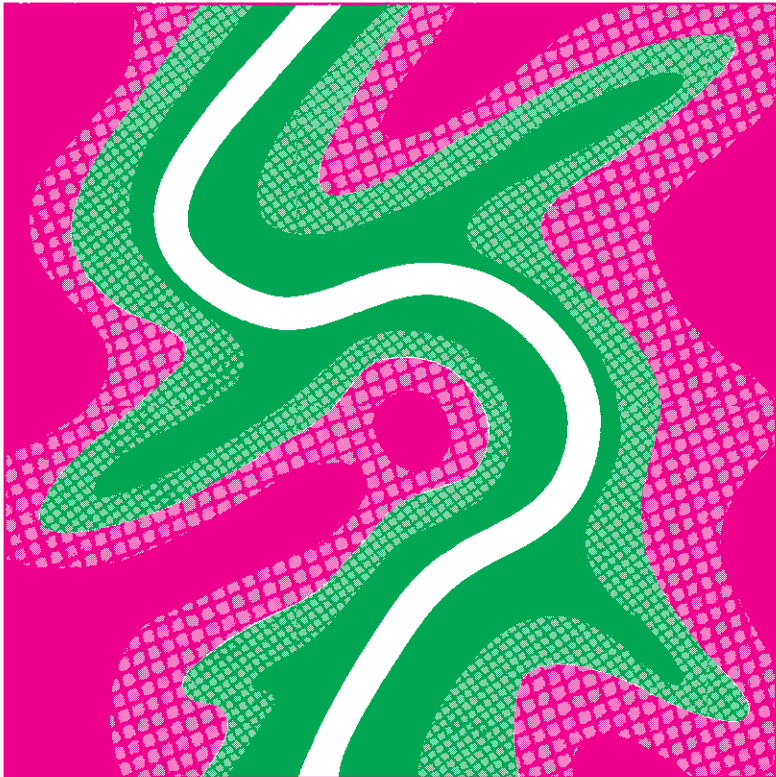


GEOMORPHOLOGIE IN STICHWORTEN

III Exogene Morphodynamik

Karstmorphologie – Glazialer Formenschatz – Küstenformen

6. neubearbeitete Auflage



HIRT^s STICHWORTBÜCHER

GEOMORPHOLOGIE IN STICHWORTEN

III. EXOGENE MORPHODYNAMIK

Karstmorphologie – Glazialer Formenschatz – Küstenformen

begründet von

Herbert Wilhelmy

6. neubearbeitete Auflage

von

Christine Embleton-Hamann



Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung
Berlin · Stuttgart · 2007

Anschrift der Verfasserin:

Prof. Dr. Christine Embleton-Hamann

Institut für Geographie und Regionalforschung
der Universität Wien

Universitätsstr. 7

1010 Wien

Österreich

Christine Embleton-Hamann ist Universitätsprofessorin für Physische Geographie am Institut für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien. Sie promovierte mit einer geomorphologischen Arbeit und spezialisierte sich während ihrer akademischen Berufsaufbahn in diese Fachrichtung weiter. Innerhalb der Geomorphologie gilt ihr Hauptforschungsinteresse den Wechselwirkungen zwischen anthropogener Landnutzung und geomorphologischem Prozessgefüge. Ergebnisse dieser anwendungsorientierten Forschung sind neben zahlreichen, rein fachwissenschaftlichen Publikationen auch etliche Arbeiten und technische Gutachten zu Fragen des Landschaftsschutzes, zu Aspekten der Globalen Umweltveränderungen sowie zur Beurteilung von geomorphologischen Naturgefahren. Als Gastprofessorin lehrte sie Geomorphologie an den Universitäten von London, Tokio und Taipeh. Sie ist in leitender Funktion in einschlägigen nationalen und internationalen Wissenschaftsverbänden und Forschungsgruppen tätig: seit 2005 in der Working Group on Geomorphology and Global Environmental Change, 1996–2000 in der Commission on Natural Hazards, 2000–2006 als Präsidentin der Österreichischen Geomorphologischen Kommission und 1997–2001 als Publications Officer der International Association of Geomorphologists.

Alle Rechte, auch das der Übersetzung, des auszugsweisen Nachdrucks, der Herstellung von Mikrofilmen, der fotomechanischen Wiedergabe sowie der Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen, vorbehalten.

© 2007 Gebrüder Borntraeger, Berlin · Stuttgart
Johannesstr. 3A, 70176 Stuttgart

www.borntraeger-cramer.de

E-Mail: mail@borntraeger-cramer.de

⊗ Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

Satz: DTP + TEXT, Eva Burri, Stuttgart

Druck: Tutte Druckerei GmbH, Salzweg bei Passau

Printed in Germany

ISBN ebook (pdf) 978-3-443-01135-2

ISBN 978-3-443-03115-2

Vorwort zur 6. Auflage

Die Forschungsansätze der Geomorphologie haben sich seit den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts stark verändert. Diesen Änderungen entsprechend wurde in der 6. Auflage neben der Darstellung der Formensystematik ein Hauptaugenmerk auf die Erklärung von Prozessen und von Systemzusammenhängen gelegt. Dies erforderte neue Kapitelkonzepte und neue Texte. Unter den klassischen Großkapiteln des Teils III entstand dadurch die Glazialgeomorphologie zur Gänze neu, ebenso mehrere Unterkapitel der Karstmorphologie.

Eine Anpassung an die aktuellen Forschungsinhalte der Geomorphologie erfolgte in der Themenauswahl für die kürzeren Kapitel des vorliegenden Bandes. Vor dem Hintergrund der Globalen Umweltveränderungen wurde der Einfluss menschlichen Handelns auf die geomorphologischen Prozesse, bzw. umgekehrt, die Gefährdung von Siedlungen und Wirtschaft durch geomorphologische Prozesse zu einem zentralen Thema der Geomorphologie. In diesem Sinne erhielt das Kapitel „Anthropogene Formen“ der 5. Auflage eine völlig neue Struktur und wurde unter dem Titel „Der Einfluss des Menschen auf die Reliefformung“ neu verfasst.

Das rhythmische Anordnungsmuster bestimmter Kleinformen bildete nur für kurze Zeit um die Mitte des vorigen Jahrhunderts ein eigenständiges geomorphologisches Erkenntnisobjekt. Da alle entsprechenden Formen und Formungsprozesse auch andernorts in den drei Teilen der Geomorphologie in Stichworten behandelt werden, wurde das diesbezügliche Kapitel der 5. Auflage aufgelöst und damit Platz geschaffen für die umfassenden Neuerungen der 6. Auflage.

Wien, im November 2006

CHRISTINE EMBLETON-HAMANN

Vorwort zur 5. Auflage

Die GEOMORPHOLOGIE IN STICHWORTEN erscheint seit 20 Jahren. Sie ist mit ihren vier Teilen für Hochschule und Schule zu einem Standardwerk geworden. HERBERT WILHELMY hat das Werk 1970 bis 1974 erarbeitet und dabei das Grundwissen zur Geomorphologie in klarer, verständlicher und bei aller gebotenen Kürze umfassender und sehr systematischer Form dargestellt.

Professor WILHELMY, der das Werk von der 1. bis zur 4. Auflage – also 20 Jahre – betreut hat, wird die Arbeit aus Altersgründen nicht mehr fortführen. So hat nun ab der 5. Auflage ein neues Team die Bearbeitung übernommen.

Der vorliegende Teil III – EXOGENE MORPHODYNAMIK – wurde von Frau Dr. CH. EMBLETON-HAMANN und Herrn H. FISCHER überarbeitet. Dabei mußten neben durchgehender Aktualisierung mehrere Kapitel aufgrund neuer Forschungsrichtungen und Schwerpunkte stark umgearbeitet, z.T. neugestaltet werden. Dies gilt besonders für die *Karstmorphologie* (H. FISCHER) und die Kapitel *Küstenformen* und *Angewandte Geomorphologie* (CH. EMBLETON-HAMANN).

Das bisher in Teil III behandelte Kapitel *Reliefumkehr* in ab der 5. Auflage in Teil II dargestellt.

Um die jüngere Literatur aufnehmen zu können, mußten wieder – wie schon in früheren Auflagen – einige ältere Angaben gestrichen werden. Es ist daher empfehlenswert, das Schrifttum der 1. Auflage zur Gewinnung eines vollständigen Überblicks heranzuziehen.

Wien, im Herbst 1991

Autoren und Verlag

Vorwort zur 1. Auflage

Teil III der „Geomorphologie in Stichworten“ setzt die in Teil II begonnene Behandlung der exogenen Kräfte, Vorgänge und Formen fort. Nach der dort erfolgten Darstellung der Verwitterungs- und Bodenbildungsprozesse, der mannigfaltigen Formen der linearen und flächenhaften Abtragung, der Tal- und Flächenbildungsprozesse und ihrer Bedeutung für die Oberflächengestaltung der Erde hat dieser Band in seinen drei Hauptabschnitten die Karsterscheinungen, den glazialen Formenschatz und die Küstenformen zum Thema. Klein- und Großformen des Karstes werden in ihren spezifischen Erscheinungen über alle Klimagebiete der Erde verfolgt, die glazialen Formen nach solchen der Abtragung und der Aufschüttung untersucht. Die Betrachtung der Küstenformen erfolgt in ständigem Bezug zu den Problemen der Tektonik und eustatischen Meeresspiegelschwankungen und bietet eine Systematik der Formen der zurückgewichenen und vorgertickten Küsten. Weitere Kapitel über den submarinen Formenschatz, rhythmische Phänomene, Reliefumkehr, anthropogene Formen und angewandte Geologie schließen sich an. Besonders die beiden letzten Abschnitte sollen zeigen, in welchem Umfang der Mensch freiwillig oder unfreiwillig an der Veränderung der Erdoberfläche beteiligt ist und wie er andererseits geomorphologische Kenntnisse für eine sinnvolle Gestaltung seines Lebensraumes nutzen kann.

Verlag und Verfasser waren wie in den zwei vorausgehenden Bänden bemüht, den Text durch instruktive Karten zu ergänzen sowie durch reichhaltige Literaturangaben und ein detailliertes Register eine schnelle Orientierungshilfe zu bieten.

Tübingen, im Mai 1972

HERBERT WILHELMY

Inhalt

1	Karstmorphologie	11
1.1	Zum Begriff „Karst“: Definitionen und Typologien	11
1.2	Grundlagen der Verkarstung.....	13
1.3	Der oberirdische Karstformenschatz.....	15
1.3.1	Karren.....	16
1.3.1.1	Karrenbildung	16
1.3.1.2	Karrentypen.....	17
1.3.1.3	Kristallinkarren und Lösungsformen in Silikatgesteinen.....	21
1.3.2	Dolinen	21
1.3.2.1	Entstehung der Dolinen.....	22
1.3.2.2	Dolinenformen	24
1.3.3	Poljen	27
1.3.3.1	Formenschatz der Poljen und Poljentypen.....	27
1.3.3.2	Entstehung der Poljen	29
1.3.4	Karstrandebenen, Karstpedimente	31
1.3.5	Karsttäler	32
1.3.6	Kuppen-, Kegel- und Turmkarst.....	34
1.3.6.1	Landschaftsbild und Formungsprozesse	34
1.3.6.2	Zum Begriff „Tropischer Karst“	38
1.4	Der unterirdische Karst	40
1.4.1	Karsthydrographie.....	40
1.4.1.1	Modellvorstellungen zur Karsthydrologie	41
1.4.1.2	Phänomene der Karsthydrographie	44
1.4.2	Karsthöhlen	45
2	Glazialer Formenschatz	52
2.1	Eiszeiten und Gletscherschwankungen	54
2.2	Entstehung und Eigenschaften der Gletscher.....	58
2.2.1	Gletscherbildung und Massenhaushalt von Gletschern	58
2.2.1.1	Metamorphose des Schnees zu Gletschereis.....	58
2.2.1.2	Nähr- und Zehrgebiet des Gletschers	59
2.2.1.3	Die Schneegrenze.....	61
2.2.2	Die Gletscherbewegung	63
2.2.2.1	Eistemperaturen und Druckschmelzpunkt	63
2.2.2.2	Druck- und Schubkräfte an der Gletschersohle	63

2.2.2.3	Schmelzwasser	64
2.2.2.4	Prozesse der Gletscherbewegung	65
2.2.2.5	Warme und kalte Gletscher	67
2.2.3	Strukturen der Gletscheroberfläche.....	68
2.3	Typen der Vergletscherung	70
2.4	Glaziale Erosion.....	73
2.4.1	Mechanismen der Glazialerosion.....	73
2.4.2	Glaziale Erosionsformen.....	75
2.5	Glaziale Akkumulation	80
2.5.1	Moränen und Moränenlandschaften.....	80
2.5.2	Die Glaziale Serie	85
2.6	Glazifluviale Formen.....	86
2.6.1	Glazifluviale Erosionsformen	87
2.6.2	Glazifluviale Akkumulationsformen	89
3	Küstenformen	96
3.1	Marine Abrasion und Akkumulation.....	97
3.1.1	Motor der marinen Prozesse: Wellen und Gezeiten.....	97
3.1.1.1	Wellen	97
3.1.1.2	Gezeiten	100
3.1.2	Marine Abrasion und ihre Formen	101
3.1.2.1	Kliffe	102
3.1.2.2	Abrasionsplattformen.....	104
3.1.3	Marine Akkumulation und ihre Formen.....	105
3.1.3.1	Strände	105
3.1.3.2	Nehrungsinseln und Strandhaken.....	108
3.1.3.3	Watten	109
3.2	Organisch aufgebaute Küsten	113
3.2.1	Mangroveküsten.....	113
3.2.2	Korallenriffküsten	115
3.3	Auswirkungen von Tektonik und Meeresspiegelschwankungen	120
3.3.1	Ursachen für Veränderungen des Meeresspiegelniveaus	120
3.3.1.1	Eustatische Meeresspiegelschwankungen.....	120
3.3.1.2	Isostatische Vertikalbewegungen der Küste	121
3.3.1.3	Andere tektonische Ursachen für Landhebungen und -senkungen..	121
3.3.2	Pleistozäne und holozäne Meeresspiegelschwankungen	122
3.3.3	Formen aufgetauchter Küstenlinien	124
3.4	Typen der Ingressionsküste	125

4	Submarine Formen	135
5	Der Einfluss des Menschen auf die Reliefformung	141
5.1	Anthropogene Formen	142
5.1.1	Reliefveränderungen durch Siedlungstätigkeit	142
5.1.2	Reliefveränderungen durch den Bergbau.....	143
5.1.3	Reliefveränderungen durch die Landwirtschaft	145
5.1.4	Reliefveränderungen im Zuge von Wasserbauprojekten.....	146
5.1.5	Reliefveränderungen für Zwecke des Verkehrs.....	147
5.1.6	Reliefveränderungen für militärische Zwecke und als Kriegsfolge.	147
5.2	Anthropogene Beeinflussung geomorphologischer Prozesse	148
5.2.1	Hangdenudation durch fluviale Abtragung und Massenbewegungen	149
5.2.2	Äolische Prozesse	151
5.2.3	Beschleunigte Küstenerosion	151
5.2.4	Senkung der Geländeoberfläche.....	153
6	Angewandte Geomorphologie	157
	Sachregister.....	160

Quellenverzeichnis der Abbildungen

- Abb. 1, 3 nach Entwürfen von H. Fischer
Abb. 2, 17, 19, 26, 30, 31, 33, 34, 36, 37, 38, 40 nach Entwürfen von H. Wilhelmy
Abb. 4 Hirt-Archiv
Abb. 5 nach D. C. Ford und P. W. Williams, Karst Geomorphology and Hydrology. London 1989, S. 429
Abb. 6 nach H. Lehmann in: Umschau in Wiss. u. Technik, 1953, S. 561
Abb. 7 nach K. H. Pfeffer in: Geol. Rundsch., 1964, S. 422
Abb. 8 nach A. Grund in: Z. Ges. f. Erdkde. Berlin, 1914, S. 636
Abb. 9, 10 nach G. Wagner in : Aus der Heimat. 1954, S. 197, 206
Abb. 11 nach Entwürfen von H. Fischer, aktualisiert
Abb. 12 nach L. Hurni et al. in: Sbg. Geogr. Arb., Bd. 36, 2000, S. 31
Abb. 13 nach M. J. Siegert und J. A. Dowdeswell in: Quaternary Science Reviews, 23, Abb. 1, 2004 und A. S. Dyke et al. in: Quaternary Science Reviews 21/1–3, Abb. 4, 2002
Abb. 14 nach: H. Louis, Geomorphologie. Berlin 1968, S. 270, und H. Weber, Oberflächenformen des festen Landes. Leipzig 1958, S. 216, verändert und ergänzt
Abb. 15, 18, 22, 23, 24, 27, 28 nach Entwürfen von C. Embleton-Hamann
Abb. 16 nach G. Wagner 1960, aus P. Busch, Geomorphologie. Paderborn 1986, S.52
Abb. 20 nach R. F. Flint, Glacial and Quaternary geology. New York 1971, S. 209
Abb. 21 nach C. Rathjens, Geomorphologie für Kartographen Lahr 1958, S. 259
Abb. 25 nach O. Maull, Handbuch der Geomorphologie. Wien 1958, S. 448
Abb. 29, 39 aus: Schleswig-Holstein, Festschr. z. 37. dt. Geographentag, Kiel 1969, S. 158 und 179
Abb. 32 aus: J. F. Gellert, Grundzüge der Physischen Geographie von Deutschland, Bd. I, Berlin 1958, S. 377
Abb. 35 nach H. Mensching in: Erdkunde, 1961, S. 220
Abb. 41 aus: D. Kelletat, Physische Geographie der Meere und Küsten. Teubner Studienbücher der Geographie 1989, S. 33. Mit freundlicher Genehmigung des Verlages B. G. Teubner, Stuttgart
Abb. 42 aus. F. Machatschek, Relief der Erde, Bd. II. Berlin 1955, S. 133

EXOGENE MORPHODYNAMIK

1 Karstmorphologie

1.1 Zum Begriff „Karst“: Definitionen und Typologien

Wo wasserlösliche Gesteine im Untergrund liegen, bildet sich durch die lösende Wirkung von Grund- und Oberflächenwasser (= *Karstkorrosion*¹) ein eigener Typus des Reliefs und ein eigener (unterirdischer) Wasserkreislauf aus: das *Karstrelief*. Fluviale Erosion und Denudation treten zugunsten von Lösungsformen (*Korrosionsformen*) stark zurück. Karren, Dolinen, Uvalas und Poljen treten als Leitformen auf. Bäche oder Flüsse fehlen oder enden nach kurzem oberirdischen Lauf in Schwinden, Schlucklöchern (Ponoren) oder Höhlen. Klüftigkeit und Löslichkeit vorwiegend CaCO₃-reicher Gesteine führen zu schnellem Abfluss des Niederschlagswassers in den Untergrund, durch die lösende Wirkung des Wassers zur Ausbildung verzweigter Höhlensysteme und zur Entwicklung eines besonderen unterirdischen Entwässerungsnetzes.

Der Name Karst² bezieht sich in ursprünglicher Bedeutung auf kahle, vegetationsarme, von weißen Kalksteinböden übersäte alpin-dinarische Übergangslandschaft nordöstlich Triest. Bezeichnung wurde von dort als morphologischer Begriff auf alle Kalklandschaften übertragen, deren Formenbild auf gleichen oder ähnlichen Prozessen der „Verkarstung“ beruht.

Auch die Terminologie der Einzelphänomene knüpft fast ausschließlich an den Formenschatz des Dinarischen Karstes an; denn über diesen Raum entstanden die ersten, schon klassisch gewordenen Arbeiten. Dalmatien ist das Land des „klassischen“ Karstes und der Karstforschung. Ein 500 km langer Küstenstreifen an der Adria mit einer Fläche von 80 000 km² ist zu 80–90 % verkarstet. Dort wurden von österreichischen und deutschen Forschern (A. GRUND, F. KATZER, N. KREBS, O. LEHMANN, K. KAYSER u. a.) und jugoslawischen Geographen (J. CVJIĆ, J. ROGLIĆ) wichtigste Erkenntnisse zur Karstmorphologie gewonnen.

In der Geomorphologie wird die Bezeichnung Karst auch für andere Phänomene verwendet, die zwar nicht auf Verkarstung beruhen, bei denen aber ganz ähnliche Formenbilder entstehen. Darunter fallen die Begriffe *Thermokarst* bzw. *Kryokarst* (→ II, S. 59) und *Glaziokarst*. Unter Thermokarst ist ein karstähnlicher, hohlformenreicher Formenschatz zu verstehen, der sich durch aufschmelzendes Bodeneis des Dauerfrostbodens in der Zone des diskontinuierlichen Permafrostes bildet.

1 lat. *corrodere* = zernagen

2 serbokroat. *Krās* = dünner Boden, *Krāsa* = steiniger Boden

Glaziokarst steht für Abschmelzformen im schuttbedeckten Zungenbereich von Gletschern in Gebieten starker Einstrahlung (z. B. im Tien-Shan, Karakorum).

Pseudokarst: Einerseits Bezeichnung für Gesamtkomplex von Lösungsformen in Silikatgesteinen. Durch Lösung im chemischen Sinn können zwar Kleinformen (Kristallinkarren → III, 1.3.1.3) entstehen, aber nicht Typmerkmale von Karstlandschaften wie größere und große Lösungshohlformen an der Oberfläche zusammen mit einer generell unterirdischen Entwässerung. Andererseits wird der Begriff Pseudokarst gelegentlich auch im Zusammenhang mit Piping (→ II, S. 3) verwendet. Die Ähnlichkeit zu Karstprozessen ist hier durch eine Verlagerung des Wasserabflusses in den (oberflächennahen) Untergrund gegeben. Der Wasserabzug erfolgt im Wege von Makroporen und größeren Bodenröhren. Dabei mechanische Ausspülung von Feinmaterial (Suffosion, vgl. Suffosionsdolinen → III, 1.3.2.1) verbunden mit linearen und rundlichen Nachsackungshohlformen an der Oberfläche.

In populärer Literatur gebräuchliche Übertragung der Begriffe Karst und Verkarstung auf durch Entwaldung und Bodenerosion (→ II, S. 50) unfruchtbar gewordene Böden entspricht nicht wissenschaftlichem Sprachgebrauch.

Karsttypen:

In Abhängigkeit von Formenausstattung und Vegetationsdecke können verschiedene **Karsttypen** definiert werden. Nach morphologischen Gesichtspunkten wird zwischen Voll- und Halbkarst unterschieden, nach dem Grad der Vegetationsbedeckung zwischen Kahlkarst und Grünkarst.

Vollkarst: Karstlandschaften, deren Oberfläche nicht durch Täler, sondern ausschließlich durch spezifische Karstformen, Poljen, Dolinen, Karrenfelder, etc. bestimmt wird. Typische Beispiele sind die Kalkhochplateaus der Nördlichen Kalkalpen (Dachstein, Totes Gebirge u. a.)

Halbkarst (Fluviokarst, Mesokarst): Sind verkarstete Landschaften, deren Großformung durch eine fluviale Erosionslandschaft bestimmt wird. Typische Beispiele sind voralpine Karstlandschaften (Niederösterreichische Voralpen).

Nackter oder Kahlkarst: Lösungsfähiges Gestein steht ohne Vegetationsdecke an Erdoberfläche an. Beispiele: Mediterraner Karst, bes. Hochkarst der Dinariden (Montenegro), Hochkarst der nördlichen Kalkalpen. Große Teile nackten Karstes der Mittelmeerländer sind offensichtlich auf anthropogene Einflüsse zurückzuführen. Einstige Wälder sind dort seit Jahrhunderten vernichtet. Nach Abholzung unterlag die ungeschützte Bodenkrume schneller Abspülung. Manche „typischen“ Formen des nackten Karstes, z.B. Trichter- und Schüsseldolinen entstanden in einstmals „bedecktem Karst“.

Grünkarst (Bedecker³ Karst): Vegetationsbedeckte Karstlandschaft. Kaum Vorkommen von Karren. Beispiele: Schwäbisch-Fränkische Alb, Bükk-Gebirge (Ungarn).

1.2 Grundlagen der Verkarstung

Für den Verkarstungsprozess sind folgende Voraussetzungen nötig:

- 1) Verkarstungsfähige Gesteine
- 2) Inhomogenitäten im Gestein (tektonischen und stratigraphischen Ursprungs)
- 3) Agens für die Korrosion (Wasser und Kohlendioxid)

Verkarstungsfähige Gesteine:

Vollkommen unlöslich ist kein Gestein, jedes unterliegt der lösenden Wirkung des Wassers bzw. der darin enthaltenen verschiedenen organischen und anorganischen Säuren. Auf den leicht löslichen entwickelt sich das Karstphänomen.

a) Chemisch-organische Sedimentgesteine

Kalke (CaCO_3): Der Großteil der Karsterscheinungen ist auf Kalken entwickelt. Auf der Erde sind ca. 30 Mio. km^2 aus Kalken aufgebaut. In den Alpen werden sie > 1000 m mächtig.

Dolomite: Sind als Doppelsalze minder löslich, aber ebenfalls weit vertreten.

Gips und Anhydrit: Da sie sehr leicht löslich sind, treten sie in humiden Gebieten selten an der Oberfläche auf.

Salzgesteine: Diese sind nur in extrem trockenen Räumen oberflächenbildend. In feuchten Gebieten haben sie nur Bestand unter einer Bedeckung durch andere Gesteinskörper (z. B. Haselgebirge in den Werfener Schichten der alpinen Trias). Nachsackungen können infolge von Auslaugungen im Untergrund vorkommen (Salzkarste in NW-Deutschland, z. B. Senke von Benthe b. Hannover).

b) Klastische Sedimentgesteine

Kalksandsteine, Kalkkonglomerate, Kalkbreccien; Dolomitsandsteine, u. a. m.

c) Verkarstungsfähige metamorphe Gesteine

Marmor, Kalkglimmerschiefer, u. a. m.

Reinheit des verkarstungsfähigen Gesteins ist für Intensität und Art der Verkarstung von großer Bedeutung. Bei starker Beimengung von unlöslichen Bestand-

3 nicht zu verwechseln mit Begriff „Überdeckter Karst“, bei welchem eine verkarstete Fläche nachträglich von jüngeren Sedimenten (z. B. Löß) überdeckt wurde.

teilen (z. B. in Kalkglimmerschiefern im Gegensatz zu organisch entstandenen Kalken mit oft nur geringer Verunreinigung) reichern sich diese im Zuge der Kalklösung an Oberfläche an und bilden Decken aus *Residualtonen* und *-lehmen* (*Rückstandslehmen*, *Verwitterungslehmen*), welche Klüfte im darunter liegenden Gestein verstopfen. Weitere Eintiefung der Karsthohlformen dadurch unterbunden. Umgekehrt wird aber deren seitliche Ausweitung begünstigt: In abgedichteter Hohlform kann es zu gelegentlichem Wasserstau mit seitlicher Anlösung der Begrenzung kommen.

Nicht bzw. kaum verkarstungsfähig sind: *silikatische Gesteine* (Granite, Syenite, Diorite, Gabbros). Nur in den Tropen, wo das Wasser reichlich biogenes CO_2 und Säuren enthält, kommt es auch zu oberflächlichen Lösungserscheinungen (Pseudokarren), nicht jedoch zur unterirdischen Entwässerung, welche ein Hauptmerkmal der Verkarstung ist.

Inhomogenitäten im Gestein:

Kompakter Kalkstein, den es kaum gibt, wäre wasserundurchlässig. Schichtfugen, Schichtgrenzen stellen sedimentäre Inhomogenitäten dar, Klüfte und Verwerfungen bilden tektonische Inhomogenitäten. Sie sind Leitlinien für die Lösung; das Wasser dringt längs dieser Inhomogenitäten ein. Durch Karstkorrosion werden diese hydrographisch wegsam gemacht, so dass ein unterirdisches Entwässerungssystem entstehen kann. Dieses ist quasi Motor der Verkarstung: bildet Voraussetzung für die Entwicklung der Höhlensysteme und der geschlossenen Depressionen an der Oberfläche, welche das Besondere des Karstphänomens ausmachen. Mit Erweiterung der Kluftsysteme wächst Aufnahmefähigkeit des Untergrundes für größere Wassermenge.

Fehlende Kapillarwirkung in sich erweiternden Klüften lässt Regen- und Schneeschmelzwasser rasch in die Tiefe absinken; somit besonders tiefe Lage des Grundwasserspiegels in verkarsteten Gebieten. Je größer Vertikalabstand zwischen Oberfläche und Grundwasserhorizont, umso vollkommener Ausbildung des Karstphänomens. Intensität der Verkarstung somit vorrangig vom Ausmaß tektonischer Hebung abhängig.

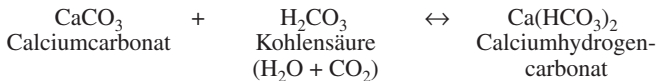
Agens für die Korrosion (Wasser und Kohlendioxid):

Kalk, bestehend aus Calciumcarbonat, ist von sich aus nur schwer wasserlöslich. Löslichkeit des Kalkes erhöht sich jedoch stark, wenn CO_2 im Wasser enthalten ist – was in der Natur immer der Fall ist, denn Wasser nimmt aus Luft CO_2 auf. Aufgenommenes Luft- CO_2 verbindet sich mit Wasser zu Kohlensäure.

Kohlendioxidgehalt der Luft macht nur rd. 0,03 Vol.-% aus. Da Pflanzen und Bakterien CO_2 produzieren, werden aber in Bodenluft Werte von rd. 2 Vol.-%, in tropischen Böden sogar bis zu 10 Vol.-% erreicht. Je höher der CO_2 -Gehalt der Bodenluft, desto mehr CO_2 wird an Bodenwasser abgegeben. Daneben spielt

Wassertemperatur eine Rolle: Kaltes Wasser ist für CO_2 aufnahmefähiger als wärmeres. Auch in Kaltklimaten kann somit Lösungswirkung entstehen, diese jedoch insgesamt in feuchtheißen Klimaten wegen intensiven Bodenlebens, verbunden mit hohen CO_2 -Gehalten der Bodenluft am stärksten.

Vorhandensein von Kohlensäure im Wasser ermöglicht *Kohlensäureverwitterung*. Dabei entsteht aus dem Calciumcarbonat das zehnfach leichter lösliche Calciumhydrogencarbonat:



Calciumhydrogencarbonat dissoziiert in Wasser, d.h. es wird in Einzelionen zerlegt und mit dem Karstwasser weggeführt.

Dieser Lösungsvorgang ist reversibel: Wenn der CO_2 -Gehalt im Wasser abnimmt, verlaufen die chemischen Reaktionen in umgekehrter Richtung und aus Ionenkonzentration des Karstwassers wird Calciumcarbonat ausgefällt. Solche Kalkabscheidungen werden *Sinter* (gelegentlich auch *Travertin*) genannt (zugehörige Akkumulationsformen → Kapitel 1.3.5, 1.3.6.1 und 1.4.2). Mögliche Ursache der CO_2 -Abnahme kann z. B. eine Temperaturerhöhung des Karstwassers bei Austritt an die Erdoberfläche sein; oder sie erfolgt unter Beteiligung pflanzlicher Organismen, die dem Wasser CO_2 zur Photosynthese entziehen.

Gleichfalls vom CO_2 -Gehalt des Wassers abhängig ist Phänomen der *Mischungskorrosion* (erstmal beschrieben von A. BÖGLI, 1964). Wenn sich zwei Wässer mit unterschiedlichem Kalkgehalt oder unterschiedlicher Temperatur mischen, wird CO_2 und damit neues Lösungspotential freigesetzt. Mischungskorrosion vor allem zur Erklärung der Höhlengenesse wichtig.

Obwohl die vom biogeochemisch gesteuerten CO_2 -Gehalt abhängige Lösungsaggressivität des Wassers eine wichtige Rolle spielt, ist bloße Wassermenge letztendlich von entscheidender Bedeutung. Weltweit höchste Lösungsraten werden in Kalkgebieten mit extremen Niederschlagssummen gemessen.

1.3 Der oberirdische Karstformenschatz

Infolge der Löslichkeit der Gesteine und des vielfachen Verschwindens des Wassers in den Untergrund entsteht das Karstrelief, das vom fluviatil gestalteten Relief wesentlich abweicht. Bestehen im fluvialen Relief großräumige, ununterbrochene Abdachungen zur Erosionsbasis hin, so ist das Karstrelief durch viele in sich geschlossene Hohlformen (Dolinen, Poljen) sowie auch durch unterirdische Formen (Höhlen) geprägt; daneben ein abwechslungsreicher Kleinformenschatz (Karren).

1.3.1 Karren

Karren (Schratten, schw., Lapiés, frz.) bilden die korrosiven Kleinformen des Karstphänomens. Sie sind Korrosionsformen (kleine rinnen-, rillen-, wannen-, loch- oder napfartige Hohlformen von einigen mm- bis m-Tiefe), die auf verkarsungsfähigen Gesteinen bei flächenhafter Benetzung und Abfluss durch Niederschlags- und Schmelzwässer unter gelegentlicher Mitwirkung von Organismen entstehen.

Karren werden benannt:

- *nach der Hohlform*: Rillen-, Rinnen-, Mäander-, Loch-, Napf-, Trittkarren u. a.
- *nach der Restform*: Spitz-, Stockkarren, Karrensteine, Karrengrate u. a.
- *nach Lage oder Wirkungsraum*: Freiliegend gebildete Karren (Schichtflächen-, Schichtkopf-, Wandkarren) und subkutane⁴ Karren, Höhlenkarren, Brandungskarren,
- *nach dem Bildungsvorgang*: Abfluss-, Spritzwasser-, Subkutan-, Struktur- (Kluft-, Schichtfugen-), karren, u. a.

1.3.1.1 Karrenbildung

Karren entstehen vor allem auf freier Gesteinsoberfläche (freiliegend gebildete Karren) oder unter einer geringmächtigen Humusdecke (subkutane Karren, Rundkarren).

Mehrere Faktoren beeinflussen die Karrenogenese:

- a) Das *Substrat*: Die Reinheit der löslichen Gesteine ist ein wesentlicher Faktor; auch die kristalline Struktur spielt eine Rolle. Verzahnt strukturierte Kalke neigen mehr zur Karrenbildung als zuckerkörnige.

Unter einer minder mächtigen Humus- und Verwitterungsdecke entstehen als Folge mehr flächiger Lösung die Rundkarren. Mächtige Boden- und Verwitterungsdecken verhindern weitgehend die Karrenbildung.

Inhomogenitäten im Gestein (Klüfte, Schichtfugen) bilden bevorzugte Lösungsbahnen (Strukturkarren).

- b) Das *Wasserdargebot*: Intensität und Verteilung der Niederschläge sowie die Anreicherung durch biogenes CO₂, (bes. unterhalb von Humuspolstern) sind bedeutend. Fördernd ist auch eine mächtige Schneedecke, welche eine längere Schneeschmelzperiode bewirkt.

- c) *Abflussgeschwindigkeit*: Beim Abfluss bildet sich über dem Gestein ein dünner Wasserfilm (von 10⁻¹–10⁻³ cm) mit höherer Sättigung und daher geringerer

⁴ unter der Oberfläche, lat. cutis = Haut, Oberfläche