

Landolt-Börnstein

**Numerical Data and Functional Relationships
in Science and Technology**

**Zahlenwerte und Funktionen
aus Naturwissenschaften und Technik**

New Series / Neue Serie

Group V

Volume 1

Physical Properties of Rocks

Subvolume a



Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York

50.75
L 258
5-1a

LANDOLT-BÖRNSTEIN

Zahlenwerte und Funktionen
aus Naturwissenschaften und Technik

Neue Serie

Gesamtherausgabe: K.-H. Hellwege

Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung

Band 1

Physikalische Eigenschaften der Gesteine

Teilband a

V. Čermák · H.-G. Huckenholz · L. Rybach · R. Schmid
J. R. Schopper · M. Schuch · D. Stöffler · J. Wohlenberg

Herausgeber: G. Angenheister

24536/15

Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York 1982



CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik/Landolt-Börnstein. - Berlin, Heidelberg; New York: Springer.
Parallelit.: Numerical data and functional relationships in science and technology

NE: Landolt, Hans [Begr.]; PT. N.S./Gesamthrag.: K.-H. Hellwege. N.S., Gruppe 5, Geophysik und Weltraumforschung. N.S., Gruppe 5,
Bd. 1. Physikalische Eigenschaften der Gesteine/Hrg.: G. Angenheister. N.S., Gruppe 5, Bd. 1, Teilbd. a./V. Čermák ... - 1982.

ISBN 3-540-10333-3 (Berlin, Heidelberg, New York);
ISBN 0-387-10333-3 (New York, Heidelberg, Berlin)

NE: Angenheister, Gustav [Hrg.]; Čermák, Vladimír [Mitverf.]; Hellwege, Karl-Heinz [Hrg.]

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned specifically those of translation, reprinting, reuse of illustrations, broadcasting, reproduction by photocopying machine or similar means, and storage in data banks.

Under § 54 of the German Copyright Law where copies are made for other than private use a fee is payable to 'Verwertungsgesellschaft Wort' Munich.

© by Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1982

Printed in Germany

The use of registered names, trademarks, etc. in this publication does not imply, even in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protective laws and regulations and therefore free for general use.

Typesetting, printing and bookbinding: Universitätsdruckerei H. Stürtz AG Würzburg

2163/3020 - 543210

LANDOLT-BÖRNSTEIN

Numerical Data and Functional Relationships
in Science and Technology

New Series

Editor in Chief: K.-H. Hellwege

Group V: Geophysics and Space Research

Volume 1

Physical Properties of Rocks

Subvolume a

V. Čermák · H.-G. Huckenholz · L. Rybach · R. Schmid
J.R. Schopper · M. Schuch · D. Stöffler · J. Wohlenberg

Editor: G. Angenheister



Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York 1982

Editor

G. Angenheister

Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik und Geophysikalisches Observatorium, Ludwig-Maximilians-Universität, München, FRG

Contributors

V. Čermák

Českoslovenká Akademie VED, Geofyzikální Ústav, Praha – Spořilov, ČSSR

H.-G. Huckenholz

Mineralogisch-Petrographisches Institut, Ludwig-Maximilians-Universität, München, FRG

L. Rybach

Institut für Geophysik, Eidgenössische Technische Hochschule, Hönggerberg, Zürich, Switzerland

R. Schmid

Institut für Kristallographie und Petrographie, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Switzerland

J. R. Schopper

Institut für Geophysik, Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, FRG

M. Schuch

Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur u. Pflanzenbau, München, FRG

D. Stöffler

Institut für Mineralogie der Westfälischen Wilhelms-Universität, Münster, FRG

J. Wohlenberg

Lehrgebiet für Angewandte Geophysik, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, FRG

62812

Vorwort

Im Tabellenwerk „Landolt-Börnstein“ erschien die Geophysik zum ersten Mal im Jahre 1952 zusammen mit der Astronomie in einem von P. ten Bruggencate (Astronomie) und J. Bartels (Geophysik) gemeinsam herausgegebenen Band der 6. Auflage (Band III). In der „Neuen Serie“ des Landolt-Börnstein sind dagegen von vornherein zwei getrennte Buch-Gruppen, eine für Astronomie und Astrophysik (Gruppe VI) und eine für Geophysik und Weltraumforschung (Gruppe V) vorgesehen.

Die beiden ersten Bände der Gruppe V enthalten die geophysikalischen Daten der festen Erde. (Die Hydro- und Atmosphäre werden später in anschließenden Bänden dargestellt.) Im Band V/1 werden die physikalischen Eigenschaften der Gesteine behandelt, im Band V/2 die der Erde als Ganzes. Der Band V/1 enthält also die im Labor an Gesteins-Proben gemessenen Daten. Im Band V/2 sind dagegen vorwiegend die Werte der physikalischen Größen des Erdinnern, also des Materials in situ aufgeschrieben, die durch Messungen an oder dicht an der Erdoberfläche und mit Beachtung weiterer Beobachtungen, z.B. der Messungen im Labor, abgeleitet worden sind. Man spricht in diesem Fall von in-situ-Bestimmungen, in-situ-Messungen etc. Zum Beispiel findet man im Band V/1 die Dichte der Gesteine, gemessen an Proben, die man im Gelände, gegebenenfalls in Steinbrüchen oder im Bergwerk oder durch Bohrungen, erhalten hat. Im Band V/2 findet der Leser dagegen die Dichte im Inneren der Erde als Funktion der Tiefe, also als Ergebnis von in-situ-Messungen.

Im Band V/1 sind die Daten nach den physikalischen Größen wie Dichte, Porosität, elektrische Leitfähigkeit etc. geordnet. Von dieser Einteilung sind nur das Eis und die Gesteine des Mondes ausgenommen, für die die Werte aller physikalischen Größen in zwei getrennten Kapiteln zusammengestellt sind. Dieses wird den Lesern, die sich nur für diese Materialien interessieren, das Finden der gesuchten Werte erleichtern.

Die physikalischen Eigenschaften der Minerale sind nur soweit behandelt, wie es für das Verständnis der physikalischen Eigenschaften der Gesteine erforderlich ist. Auch sind nicht alle physikalischen Eigenschaften der Gesteine behandelt worden. Bevorzugt sind diejenigen Größen, die auch durch in-situ-Messungen bestimmt werden können.

Für die vollständige Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der Gesteine benötigt man auch die Terminologie der Petrographie und der Mineralogie. Am Anfang des Bandes V/1 sind daher die Gesteins-Einheiten und deren Namen beschrieben, die man an oder dicht an der Erdoberfläche findet und die man im tieferen Erdinneren vermutet. Es hat sich gezeigt, daß die für die Gesteine der Erde entwickelte Terminologie nur um wenige Begriffe erweitert werden mußte, um die Gesteine der Mondoberfläche beschreiben zu können. Es darf vermutet werden, daß auch bei fortschreitenden Kenntnissen von den Oberflächen und von den inneren Strukturen der festen Planeten und der festen Satelliten die gegenwärtige Terminologie der Petrographie und Mineralogie zum größten Teil verwendet werden kann.

Die Gesteine der Erdoberfläche bestehen aus Körnern verschiedener Minerale. Die Durchmesser der Körner sind meist kleiner als 1 cm. Sie können aber auch kleiner als 10 μm sein. Sie sind durch schmale Korngrenzen voneinander getrennt. Die innere Struktur der intergranularen Grenzen ist wenig bekannt. Typisch für die Gesteine ist auch, daß sie kleine Hohlräume in Form von Poren z.B. zwischen den Körnern oder in Form von feinen Rissen enthalten. Oft haben die Körner eine interne, nur mit dem Mikroskop erkennbare Struktur. Kann man mit einem stark vergrößernden Mikroskop keine Korngrenzen und keine internen Strukturen erkennen, so wird dieses Material oft zunächst als

glasige Grundmasse bezeichnet. Ob eine solche glasige Grundmasse, die die Körner umschließt, eine submikroskopische Ordnung, z.B. in Nestern, enthält, oder kryptokristallin ist, kann nur durch weitere Untersuchungen entschieden werden.

Man nimmt allgemein an, daß die Porosität in einer Tiefe von 20 bis 30 km sehr klein ist. Vermutlich haben die Gesteine aber in dieser Tiefe noch eine Kornstruktur. Dies gilt auch, jedoch mit einigen Modifikationen, für partiell geschmolzene Gesteine. Es ist aber unbekannt, bis in welche Tiefe die Kornstruktur existiert, oder – falls sie existiert – welcher Art die Kornstruktur ist. Es ist also noch fraglich, ob das Material des Erdmantels, insbesondere des unteren Erdmantels, als Gestein im oben definierten engeren Sinn bezeichnet werden kann. Es können daher viele der in diesem Band aufgeschriebenen Daten physikalischer Größen nicht ohne ausführliche Diskussion und nur mit Beachtung der Hochdruck- und Hochtemperatur-Experimente auf das tiefere Erdinnere übertragen werden. Für einige Größen findet man diese Diskussion in diesem Band.

Bei der Erforschung der festen Planeten und der festen Satelliten (z.B. des Mondes) wird man die gleichen physikalischen Größen zu messen haben wie bei der Erforschung der festen Erde. Man wird auch zum großen Teil die gleichen Meßprinzipien anwenden können, jedoch in anderer technischer Ausführung. Will man z.B. Seismographen auf der Oberfläche des Mondes aufstellen, so hat man die große Temperaturvariation, die geringe Schwere, den lockeren Boden etc. zu beachten. Obwohl die Meßprinzipien die gleichen sind, so ist doch zu erwarten, daß die Zahlenwerte der physikalischen Größen der festen Planeten und der festen Satelliten sehr verschieden sind von denen der Erde. Für den Mond ist dies bereits bekannt, da sowohl Messungen an Mondproben als auch in-situ-Messungen auf dem Mond durchgeführt worden sind.

Aus Umfangs- und Zeitgründen ist der Band V/1 in zwei Teilbände V/1a und V/1b aufgeteilt worden. Teilband V/1a wird hiermit vorgelegt, Teilband V/1b erscheint Anfang 1982. Es muß als ein Gewinn für die Physik und für die Geowissenschaften gewertet werden, daß im Landolt-Börnstein ein so umfangreicher Band für das Spezialgebiet „physikalische Eigenschaften der Gesteine“ zur Verfügung gestellt werden konnte.

Zu danken ist zunächst den Autoren, insbesondere für die Sammlung der Daten, dann dem Springer-Verlag und der Landolt-Börnstein Redaktion. In großzügiger Weise und mit viel Geduld wurden die Wünsche der Autoren erfüllt. Mit besonderer Sorgfalt hat Frau H. Weise die Vorbereitung der Manuskripte, die Korrekturen und Umbrüche besorgt.

Wie alle Bände des Landolt-Börnstein ist auch dieser ohne finanzielle Unterstützung von anderen Stellen veröffentlicht worden.

München, September 1981

Der Herausgeber

Preface

The first publication concerning geophysical data within the Landolt-Börnstein Tables appeared 1952 in a volume (vol. III of the 6th Edition) concerning Geophysics as well as Astronomy; it was edited by J. Bartels (Geophysics) and P. ten Bruggencate (Astronomy). The amount of data accumulated since then makes it necessary to separate these fields into two groups in the "New Series" of Landolt-Börnstein, namely group V for Geophysics and Space Research and group VI for Astronomy and Astrophysics.

The geophysical data of the solid earth are compiled in the first two volumes of group V, i.e. V/1 and V/2 (further volumes will present data relating to the hydrosphere and the atmosphere). Volume V/1 contains a compilation of the physical properties of rocks while volume V/2 treats physics of the earth as a whole. Thus, volume V/1 contains data of rock samples measured in laboratories whereas volume V/2 will contain predominately the values of the physical quantities of the earth's interior, i.e. of the material in-situ. These values have been derived from measurements at the surface of the earth or very close to it under consideration of further observations such as laboratory measurements. The results are the so-called in-situ determinations or in-situ measurements. In volume V/1, for instance, rock densities which have been measured on samples from ground, quarries or even mines or bore-holes are to be found. In volume V/2, the reader can find the density of the interior of the earth as function of the depth as a result of in-situ measurements.

In volume V/1, the data are arranged in tables according to physical quantities such as density, porosity, electric conductivity etc. Only data on ice and the moon are treated in two separate chapters. This will be helpful for the reader interested only in these materials.

The physical properties of minerals are treated in so far as they are necessary for the understanding of the physical properties of rocks. Nevertheless these properties have not been treated exhaustively. Results which can be determined also by in-situ measurements have been preferred.

The terminology used in petrography and mineralogy is required to describe the physical properties of rocks completely. Therefore, volume V/1 begins with a description of the different rock types found at the surface of the earth or very close to it and of those thought to be situated deep in the earth's interior. It has been shown that the terminology needed for the description of the earth's rocks can be used to describe the rocks on the moon's surface if one adds some terms. It may be presumed that it will be possible to use the actual terminology of petrography and mineralogy as the knowledge of the surfaces and internal structure of the solid planets and solid satellites advances.

The rocks of the earth's surface are composed of the grains of different minerals. The grain diameters are generally less than 1 cm. They can also be less than 10 μm . Thin boundaries separate the grains from one another. The internal structure of the intergranular boundaries is not well known. The rocks are characterized by minute cavities e.g. pores between the grains or fine cracks. In many cases, the internal structure of a grain can only be observed under a microscope. If the internal structure or grain boundaries cannot be detected even under a highly magnifying microscope, for the present the material is called a glassy base material. Further investigations are needed in order to decide if a submicroscopic order (perhaps in clusters) of the glassy base material surrounding the grains or a kryptocrystalline state exist.

It is generally supposed that at a depth of 20 to 30 km the porosity is very low. However, it is probable that rocks still consist of an aggregate of individual mineral grains at such a depth. This is also true – still with some modifications – for partially melted rocks. Never-

theless, it is not known up to what depth a grain structure can exist or – if it exists – of what kind it is. Therefore it is still an open question whether the material of the earth's mantle and especially of the lower mantle can be considered as a rock according to the above restrictive definition. That is the reason why many data on physical quantities given in this volume cannot be applied to the interior of the earth without a detailed discussion and without considering the experiments at high pressure and temperature. Such a discussion concerning some quantities is reported in this volume.

The exploration of the solid planets and of the solid satellites (e.g. the moon) will require measurements of the same physical quantities as those for the exploration of the solid earth. It will be possible to apply the same measuring principles in the most cases even though with other technical means. For instance, seismographs should not be set up on the moon's surface without considering the large temperature variations, the low gravity and the loose soil. Although the numerical values of the physical quantities both on the earth's surface and on the solid planets and solid satellites are obtained by the same measuring principles, they differ considerably. This is already known for the moon since both measurements on samples from the moon and in-situ measurements on the moon have been performed.

For technical reasons, volume V/1 has been divided into two subvolumes V/1a and V/1b. Subvolume V/1a is presented herewith, subvolume V/1b will appear at the beginning of 1982. It should be regarded as an advantage for the physics and geosciences that Landolt-Börnstein publishes such a comprehensive compilation on a specialized field like "physical properties of rocks".

The authors deserve our thanks, especially for compiling and evaluating the data, the Springer Verlag and the editorial office of Landolt-Börnstein for having respected and fulfilled the authors' wishes in a patient and liberal way; Frau H. Weise has cared for the preparation and correction of the manuscripts, galleys and final pages.

Like all other volumes of Landolt-Börnstein, this volume is published without outside financial support.

München, September 1981

The Editor

Übersicht Band V/1

	Teilband
0 Die Gesteine der Erde	a
1 Dichte	a
2 Porosität und Permeabilität	a
3 Elastizität und Inelastizität	b
4 Thermische Eigenschaften	a
5 Elektrische Eigenschaften	b
6 Magnetische Eigenschaften	b
7 Radioaktivität der Gesteine	b
8 Physikalische Eigenschaften des Eises	b
9 Physikalische Eigenschaften der Gesteine des Mondes	b
Zwei-dimensionale Inhaltsübersicht für beide Teilbände	a, b

Survey of Volume V/1

	Subvolume
0 The rocks of the earth	a
1 Density	a
2 Porosity and permeability	a
3 Elasticity and inelasticity	b
4 Thermal properties	a
5 Electrical properties	b
6 Magnetic properties	b
7 Radioactivity of rocks	b
8 Physical properties of ice	b
9 Physical properties of lunar rocks	b
Two-dimensional survey of contents for both subvolumes	a, b

Inhaltsverzeichnis

0 Die Gesteine der Erde (H.-G. HUCKENHOLZ)	1
0.1 Einleitung	1
0.2 Die magmatischen Gesteine	3
0.2.1 Nomenklatur	3
0.2.2 Quantitativer Mineralbestand der magmatischen Gesteinstypen	9
0.2.3 Chemische Zusammensetzung der magmatischen Gesteine	17
0.2.4 Das Gefüge der magmatischen Gesteine	18
0.2.5 Die Herkunft der magmatischen Gesteine	21
0.3 Die metamorphen Gesteine	26
0.3.1 Nomenklatur	26
0.3.2 Die mineralische Zusammensetzung der Metamorphite	29
0.3.3 Die chemische Zusammensetzung der Metamorphite	32
0.3.4 Das Gefüge der metamorphen Gesteine	34
0.3.5 Die Entstehung der metamorphen Gesteine	37
0.4 Die sedimentären Gesteine	44
0.4.1 Nomenklatur	44
0.4.2 Die mineralische Zusammensetzung der sedimentären Gesteine	45
0.4.3 Das Gefüge der sedimentären Gesteine	46
0.4.4 Klastische oder Trümmer-Sedimente	50
0.4.5 Chemische und biochemische Sedimente	56
0.4.6 Die chemische Zusammensetzung der sedimentären Gesteine	59
0.4.7 Die Herkunft und Entstehung der sedimentären Gesteine	63
0.5 Literatur zu 0.1...0.4	65
 1 Dichte	 66
1.1 Dichte der Minerale (J. WOHLBERG)	66
1.1.0 Einleitung	66
1.1.1 Dichte und Röntgen-Dichte von Mineralen	67
1.1.2 Literatur zu 1.1	113
1.2 Dichte der Gesteine (J. WOHLBERG)	113
1.2.0 Einleitung	113
1.2.1 Dichte von Tiefengestein	114
1.2.2 Dichte von Ergußgestein	115
1.2.3 Dichte von vulkanischen Gläsern	116
1.2.4 Dichte von metamorphen Gesteinen	116
1.2.5 Dichte von Sedimentgesteinen und -Böden	118
1.2.6 Dichte von einigen metallischen Erzen, mineralischen Erzen und Substanzen aus organischen Lagerstätten	119
1.2.7 Literatur zu 1.2	119
1.3 Dichte von Mineralen und Gesteinen bei Stoßwellenkompression (D. STÖFFLER)	120
1.3.1 Theorie der Stoßwellen in Festkörpern	120
1.3.1.1 Grundlegende thermodynamische Beziehungen	120
1.3.1.2 Berechnung der Zustandsgleichung aus Stoßwellendaten	122
1.3.1.3 Der Einfluß der Materialfestigkeit und der Phasenumwandlungen auf die Struktur der Stoßwelle	124
1.3.2 Experimentelle Methoden	126
1.3.3 Tabellen	127
1.3.3.1 Standard-Metalle	129
1.3.3.2 Minerale	131

Contents

0 The rocks of the earth (H.-G. HUCKENHOLZ)	1
0.1 Introduction	1
0.2 The igneous rocks	3
0.2.1 Nomenclature	3
0.2.2 Quantitative mineral composition of igneous rock types	9
0.2.3 The chemical composition of igneous rocks	17
0.2.4 The texture and structure of igneous rocks	18
0.2.5 The origin and genesis of igneous rocks	21
0.3 The metamorphic rocks	26
0.3.1 Nomenclature	26
0.3.2 The mineral composition of metamorphic rocks	29
0.3.3 The chemical composition of metamorphic rocks	32
0.3.4 The texture and structure of metamorphic rocks	34
0.3.5 The origin and genesis of metamorphic rocks	37
0.4 The sedimentary rocks	44
0.4.1 Nomenclature	44
0.4.2 Mineral composition of sedimentary rocks	45
0.4.3 The texture and structure of sedimentary rocks	46
0.4.4 Clastic or fragmental sedimentary rocks	50
0.4.5 Chemical and biochemical sedimentary rocks	56
0.4.6 The chemical composition of sedimentary rocks	59
0.4.7 The origin and genesis of sedimentary rocks	63
0.5 References for 0.1-0.4	65
 1 Density	 66
1.1 Densities of minerals (J. WOHLBERG)	66
1.1.0 Introduction	66
1.1.1 Density and X-ray density of minerals	67
1.1.2 References for 1.1	113
1.2 Densities of rocks (J. WOHLBERG)	113
1.2.0 Introduction	113
1.2.1 Density of intrusive rocks	114
1.2.2 Density of extrusive rocks	115
1.2.3 Density of volcanic glasses	116
1.2.4 Density of metamorphic rocks	116
1.2.5 Density of sedimentary rocks and soils	118
1.2.6 Density of some common metallic ores, mineral ores, and substances of organic deposits	119
1.2.7 References for 1.2	119
1.3 Density of minerals and rocks under shock compression (D. STÖFFLER)	120
1.3.1 Theory of shock waves in solids	120
1.3.1.1 Basic thermodynamics	120
1.3.1.2 Calculation of equation of state data from shock wave data	122
1.3.1.3 The influence of material strength and phase transitions on the shock wave structure	124
1.3.2 Experimental techniques	126
1.3.3 Tables	127
1.3.3.1 Standard metals	129
1.3.3.2 Minerals	131

1.3.3.2.1 Elemente	131
1.3.3.2.2 Oxide	135
1.3.3.2.3 Carbonate	143
1.3.3.2.4 Halogenide	145
1.3.3.2.5 Sulfide	148
1.3.3.2.6 Silikate	149
1.3.3.3 Gesteine	156
1.3.3.3.1 Magmatische Gesteine	157
1.3.3.3.2 Metamorphe Gesteine	169
1.3.3.3.3 Sedimente und sedimentäre Gesteine	174
1.3.3.4 Gläser	180
1.3.4 Literatur zu 1.3.1–1.3.3	181
2 Porosität und Permeabilität	184
2.1 Porosität der Gesteine (J.R. SCHOPPER)	184
2.1.0 Einleitung	184
2.1.1 Definitionen	184
2.1.2 Entstehungsursache und unterschiedliche Art der Porosität	185
2.1.2.1 Intergranulare Porosität	185
2.1.2.2 Intragranulare Porosität	187
2.1.2.3 Riß- und Kluftporosität	187
2.1.2.4 Kavernöse Porosität	187
2.1.3 Direkter Einfluß der Temperatur auf die Porosität	188
2.1.4 Einfluß des Druckes auf die Porosität	188
2.1.5 Verknüpfung mit der Dichte	189
2.1.6 Messung	190
2.1.6.1 Die Archimedische Methode	190
2.1.6.2 Die Methode nach dem Boyle-Mariotteschen Gesetz	191
2.1.7 Symbolliste	192
2.1.8 Tabellen und Diagramme	192
2.1.9 Literatur zu 2.1	262
2.2 Spezifische innere Oberfläche und Kapillarität der Gesteine (J.R. SCHOPPER)	267
2.2.1 Einleitung	267
2.2.1.1 Allgemeine Bemerkungen	267
2.2.1.2 Definitionen	267
2.2.1.3 Petrographische Aspekte	269
2.2.1.4 Meßmethoden für die innere Oberfläche	269
2.2.1.4.1 Die BET-Methode	270
2.2.1.4.2 Stereologische Methoden	270
2.2.1.5 Meßmethoden für die Kapillarität	271
2.2.1.5.1 Die „Restored-State“-Methode	271
2.2.1.5.2 Die Quecksilber-Injektions-Methode	272
2.2.1.5.3 Die Zentrifugen-Methode	273
2.2.1.6 Verknüpfungen mit anderen petrophysikalischen Größen	273
2.2.1.7 Symbolliste	273
2.2.2 Tabellen und Abbildungen	274
2.2.2.1 Spezifische Oberfläche	274
2.2.2.2 Kapillaritätskurven	275
2.2.3 Literatur zu 2.2.1 und 2.2.2	277
2.3 Permeabilität der Gesteine (J.R. SCHOPPER)	278
2.3.1 Definitionen	278
2.3.2 Entstehungsursache und unterschiedliche Arten der Permeabilität	282
2.3.3 Verknüpfungen mit anderen petrophysikalischen Größen	282
2.3.4 Messung	284
2.3.4.1 Messung mit Flüssigkeiten	284
2.3.4.2 Messung mit Gasen	284

1.3.3.2.1 Elements	131
1.3.3.2.2 Oxides	135
1.3.3.2.3 Carbonates	143
1.3.3.2.4 Halides	145
1.3.3.2.5 Sulfides	148
1.3.3.2.6 Silicates	149
1.3.3.3 Rocks	156
1.3.3.3.1 Igneous rocks	157
1.3.3.3.2 Metamorphic rocks	169
1.3.3.3.3 Sediments and sedimentary rocks	174
1.3.3.4 Glasses	180
1.3.4 References for 1.3.1...1.3.3	181
2 Porosity and permeability	184
2.1 Porosity of rocks (J. R. SCHOPPER)	184
2.1.0 Introduction	184
2.1.1 Definitions	184
2.1.2 Origin and different types of porosity	185
2.1.2.1 Intergranular porosity	185
2.1.2.2 Intragranular porosity	187
2.1.2.3 Fissure and fracture porosity	187
2.1.2.4 Vugular porosity	187
2.1.3 Direct effect of temperature on porosity	188
2.1.4 Effect of pressure on porosity	188
2.1.5 Relation to density	189
2.1.6 Measurement	190
2.1.6.1 The Archimedian method	190
2.1.6.2 The Boyle's law method	191
2.1.7 List of symbols	192
2.1.8 Tables and diagrams	192
2.1.9 References for 2.1	262
2.2 Specific internal surface and capillarity of rocks (J. R. SCHOPPER)	267
2.2.1 Introduction	267
2.2.1.1 General remarks	267
2.2.1.2 Definitions	267
2.2.1.3 Petrographical aspects	269
2.2.1.4 Methods of measuring internal surface area	269
2.2.1.4.1 The BET-method	270
2.2.1.4.2 Stereological methods	270
2.2.1.5 Methods of measuring capillarity	271
2.2.1.5.1 The restored-state method	271
2.2.1.5.2 The mercury-injection method	272
2.2.1.5.3 The Centrifuge method	273
2.2.1.6 Relations to other petrophysical quantities	273
2.2.1.7 List of symbols	273
2.2.2 Tables and figures	274
2.2.2.1 Specific surface	274
2.2.2.2 Capillarity curves	275
2.2.3 References for 2.2.1 and 2.2.2	277
2.3 Permeability of rocks (J. R. SCHOPPER)	278
2.3.1 Definitions	278
2.3.2 Origin and different types of permeability	282
2.3.3 Relations to other petrophysical quantities	282
2.3.4 Measurement	284
2.3.4.1 Liquid flow measurement	284
2.3.4.2 Gas flow measurement	284

2.3.5	Symbolliste	285
2.3.6	Tabellen und Abbildungen	286
2.3.7	Literatur zu 2.3.1...2.3.6	303
3	Elastizität und Inelastizität	siehe Teilband b, S.1 ff.
3.1	Geschwindigkeiten elastischer Wellen und Elastizitäts-Konstanten von Gesteinen und gesteinsbildenden Mineralen	
3.1.1	Einleitung (H. GEBRANDE)	
3.1.2	Geschwindigkeiten elastischer Wellen und Elastizitäts-Konstanten bei Normalbedingungen (H. GEBRANDE)	
3.1.3	Geschwindigkeiten elastischer Wellen und Elastizitäts-Konstanten von Gesteinen bei Zimmertemperatur und Drucken bis 1 GPa (H. GEBRANDE)	
3.1.4	Geschwindigkeiten elastischer Wellen und Elastizitäts-Konstanten bei erhöhten Drucken und Temperaturen (H. KERN)	
3.2	Bruch und Inelastizität von Gesteinen und Mineralen (F. RUMMEL)	
4	Thermische Eigenschaften	305
4.1	Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Minerale und Gesteine (V. ČERMÁK, L. RYBACH)	305
4.1.1	Einführung	305
4.1.1.1	Definitionen	305
4.1.1.2	Einheiten	307
4.1.1.3	Anisotropie	307
4.1.1.4	Temperatur- und Druckabhängigkeit	307
4.1.1.5	Einfluß von Dichte/Porosität und Wassergehalt	309
4.1.2	Tabellen	310
4.1.2.1	Minerale	310
4.1.2.2	Gesteine	315
4.1.3	Literatur zu 4.1	341
4.2	Wärmeleitfähigkeit des Bodens (M. SCHUCH)	344
4.2.1	Einleitung	344
4.2.2	Daten	344
4.2.3	Literatur zu 4.2.1 und 4.2.2	344
4.3	Schmelztemperaturen der Gesteine (R. SCHMID)	345
4.3.1	Einführung	345
4.3.2	Schmelztemperaturen einzelner Gesteinsgruppen	346
4.3.2.1	Allgemeine Bemerkungen zu Fig. 5 und 6	346
4.3.2.2	Bemerkungen zur Solidusdarstellung (Fig. 5)	350
4.3.2.3	Bemerkungen zur Liquidusdarstellung (Fig. 6)	350
4.3.3	Literatur zu 4.3.1 und 4.3.2	352
4.4	Radioaktive Wärmeproduktion in Gesteinen (L. RYBACH, V. ČERMÁK)	353
4.4.1	Einleitung	353
4.4.1.1	Allgemeine Bemerkungen	353
4.4.1.2	Wärmeproduktion durch natürliche Radioaktivität	353
4.4.1.3	Geochemische Gesetzmäßigkeiten	354
4.4.1.3.1	Magmatische Gesteine	354
4.4.1.3.2	Sedimentgesteine	354
4.4.1.3.3	Metamorphe Gesteine	355
4.4.1.4	Anordnung der Wärmeproduktionsdaten	355
4.4.2	Daten	356
4.4.2.1	Magmatische Gesteine	356
4.4.2.2	Sedimentgesteine	364
4.4.2.3	Metamorphe Gesteine	365
4.4.3	Literatur zu 4.4.1 und 4.4.2	371
	Zwei-dimensionale Inhaltsübersicht	373

2.3.5 List of symbols	285
2.3.6 Tables and figures	286
2.3.7 References for 2.3.1--2.3.6	303
3 Elasticity and inelasticity	see Subvolume b, p. 1 ff.
3.1 Elastic wave velocities and constants of elasticity of rocks and rock-forming minerals	
3.1.1 Introduction (H. GEBRANDE)	
3.1.2 Elastic wave velocities and constants of elasticity at normal conditions (H. GEBRANDE)	
3.1.3 Elastic wave velocities and constants of elasticity of rocks at normal temperature and pressures up to 1 GPa (H. GEBRANDE)	
3.1.4 Elastic wave velocities and constants of elasticities of rocks at elevated pressures and temperatures (F. KERN)	
3.2 Fracture and flow of rocks and minerals (F. RUMMEL)	
4 Thermal properties	305
4.1 Thermal conductivity and specific heat of minerals and rocks (V. ČERMÁK, L. RYBACH)	305
4.1.1 Introductory remarks	305
4.1.1.1 Definitions	305
4.1.1.2 Units	307
4.1.1.3 Anisotropy	307
4.1.1.4 Temperature and pressure dependence	307
4.1.1.5 Effects of density/porosity and water content	309
4.1.2 Tables	310
4.1.2.1 Minerals	310
4.1.2.2 Rocks	315
4.1.3 References for 4.1	341
4.2 Thermal conductivity of soil (M. SCHUCH)	344
4.2.1 Introduction	344
4.2.2 Data	344
4.2.3 References for 4.2.1 and 4.2.2	344
4.3 Melting temperatures of rocks (R. SCHMID)	345
4.3.1 Introduction	345
4.3.2 Melting temperatures of individual rock groups	346
4.3.2.1 General comments to Figs. 5 and 6	346
4.3.2.2 Comments on the solidi (Fig. 5)	350
4.3.2.3 Comments on the liquidi (Fig. 6)	350
4.3.3 References for 4.3.1 and 4.3.2	352
4.4 Radioactive heat generation in rocks (L. RYBACH, V. ČERMÁK)	353
4.4.1 Introduction	353
4.4.1.1 General remarks	353
4.4.1.2 Heat generation by radioactive decay	353
4.4.1.3 Geochemical control of heat generation	354
4.4.1.3.1 Igneous rocks	354
4.4.1.3.2 Sedimentary rocks	354
4.4.1.3.3 Metamorphic rocks	355
4.4.1.4 Arrangement of heat generation data	355
4.4.2 Data	356
4.4.2.1 Igneous rocks	356
4.4.2.2 Sedimentary rocks	364
4.4.2.3 Metamorphic rocks	365
4.4.3 References for 4.4.1 and 4.4.2	371
Two-dimensional survey of contents	372

0 The rocks of the earth — Die Gesteine der Erde

0.1 Introduction — Einleitung

Rocks are natural mineral assemblages crystallized by rockforming processes. Rocks form the earth's crust and mantle. Their nomenclature is based on origin and composition. This leads to the distinction of **igneous rocks** (magmatites; magmatic rocks), **metamorphic rocks** (metamorphites), and **sedimentary rocks** (sediments).

The formation of the planet earth and its evolution in space and time caused rocks different in chemical composition and physical state within the crust and mantle. Crustal rocks are well exposed and accessible over a vertical section of at least 20 km from the earth's surface. Rocks of the (upper) mantle and the deeper crust cannot be observed *in situ*. Knowledge of their chemical composition and physical state comes from fragmental inclusions in igneous rocks. These rock fragments are torn off the upper mantle and deeper crust and are brought to the surface by rising magma from depths as deep as 150 km or more. The chemical composition and physical state of zones deeper than the upper mantle can be extrapolated from the geophysical behavior of the earth. Laboratory experiments are able to simulate the pressure-temperature regime of regions as low as the mantle/core boundary.

The crust of the earth – approximately 1 % of the planet's volume (equal to about 0.5 % of its mass) – is about 30 km thick. Its thickness decreases under the oceans to less than 10 km but increases within the orogenic belts to 60 km and more. In general, the crust consists of a thin cover of sediments which is about 3 to 5 km thick. Toward greater depths, the sediments change gradually into metamorphic rocks forming the basement. Igneous rocks penetrate the sedimentary cover and the basement as dikes, extrude from the surface and build volcanic edifices, and intersect the sedimentary cover and the basement as large scale intrusions.

The thin crust is underlain by a (very) thick mantle which extends to depths of about 2900 km. It constitutes about 80 % of the planet's volume (equal to about 68 % of its mass). The rocks within the upper mantle from the Mohorovičić-discontinuity (the crust/mantle boundary) to about 200 km depth have metamorphic textures caused by flow and partial melting-processes associated with physical and chemical re-equilibration of the mineral phases. Seismic data obtained for depths between 100 and 150 km (low velocity zone, Gutenberg zone) interpret the material of the mantle to be solid (crystalline) with small amounts of

Gesteine sind natürliche Mineralgemenge, die durch gesteinsbildende Prozesse entstehen. Gesteine bauen die Erdkruste und den Erdmantel auf. Ihre Einteilung erfolgt nach Herkunft und Zusammensetzung, dabei werden **magmatische Gesteine** oder Magmatite, **metamorphe Gesteine** oder Metamorphite und **sedimentäre Gesteine** oder Sedimente unterschieden.

Die Entstehung des Planeten Erde und seine Entwicklung in Raum und Zeit bedingte hinsichtlich chemischer Zusammensetzung und physikalischer Zustände unterschiedliche Gesteine in Erdkruste und Erdmantel. Die Gesteine der Erdkruste sind gut erschlossen und vertikal über mindestens 20 km von der Erdoberfläche zugänglich. Die Gesteine der tieferen Erdkruste und der oberen Zone des Erdmantels (Oberer Mantel) sind nicht direkt beobachtbar. Die Kenntnis ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer physikalischen Zustände ergibt sich aus Einschlüssen in magmatischen Gesteinen, die aus Teufen bis hinunter zu 150 km und mehr stammen. Beim Aufstieg wurden Fragmente der tieferen Kruste und des Oberen Mantels mitgerissen und an die Oberfläche gebracht. Stoffzusammensetzungen und Phasenzustände tieferer Erdzonen können aus dem geophysikalischen Verhalten der Erde abgeleitet werden. Labor-experimente simulieren den Druck-Temperatur-Bereich bis zur Grenze des Unteren Mantels und des Erdkerns.

Die Erdkruste, die rund 1 % des Volumens (das sind etwa 0.5 % der Gesamtmasse) unseres Planeten ausmacht, ist etwa 30 km mächtig. Sie dünnt unter den Ozeanen auf unter 10 km aus, schwillt aber unter (geologisch jungen) Faltengebirgen auf über 60 km an. Zum größten Teil besteht die Erdkruste aus einer (unterschiedlich mächtigen) Decke von Sedimenten. Diese bilden das sogenannte Deckgebirge (im Mittel 3...5 km mächtig). Zu größerer Teufe gehen die Sedimente in Metamorphite über, die das Grundgebirge bilden. Magmatite durchziehen als Gänge (Ganggesteine) das Grund- und Deckgebirge, erscheinen als überlagernde Vulkanbauten (Oberflächengesteine) und durchsetzen Grund- und Deckgebirge als (großräumige) Intrusionen (Tiefengesteine).

Die dünne Erdkruste wird von einem sehr dicken Mantel unterlagert, der bis etwa 2900 km Teufe reicht und etwa 80 % des Volumens (das sind rund 68 % der Masse) unseres Planeten ausmacht. Im Prinzip sind die Gesteine im oberen Teil des Mantels von der Mohorovičić-Diskontinuität (der Grenze zwischen Kruste und Mantel) bis etwa 200 km durch Fließvorgänge und Teilschmelzprozesse verbunden mit chemischer und physikalischer Reequilibration der Phasen in ihrem Gefüge metamorph. In Teufen zwischen 100 und 150 km (Gutenberg-Zone; low velocity layer) können die seismischen Daten so interpretiert werden, daß