

Ulrich Sebastian

Gesteinskunde

Ein Leitfaden für Einsteiger
und Anwender



Spektrum
TECHNIK & WISSEN

Gesteinskunde

Ulrich Sebastian

Gesteinskunde

Ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender

Spektrum
AKADEMISCHER VERLAG

Dr. Ulrich Sebastian
Obermarkt 3
09599 Freiberg/Sa.

Wichtiger Hinweis für den Benutzer

Der Verlag, und der Autor haben alle Sorgfalt walten lassen, um vollständige und akkurate Informationen in diesem Buch zu publizieren. Der Verlag übernimmt weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für die Nutzung dieser Informationen, für deren Wirtschaftlichkeit oder fehlerfreie Funktion für einen bestimmten Zweck. Der Verlag übernimmt keine Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren, Programme usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen. Der Verlag hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg 2009
Spektrum Akademischer Verlag ist ein Imprint von Springer

09 10 11 12 13 5 4 3 2 1

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Planung und Lektorat: Merlet Behncke-Braunbeck, Dr. Christoph Iven

Herstellung: Detlef Mädje

Umschlaggestaltung: SpieszDesign, Neu-Ulm

Titelfotografie: Straßendpflaster aus verschiedenen Gesteinen, Foto: Dr. Ulrich Sebastian

Fotos/Zeichnungen: vom Autor, wenn in den Abbildungsunterschriften nichts anderes angegeben

Satz: klartext, Heidelberg

Druck und Bindung: Stürtz GmbH, Würzburg

Printed in Germany

ISBN 978-3-8274-2024-4

Vorwort

Wie viele verschiedene Gesteine gibt es? Die Antwort: Unendlich viele. Nicht ganz so groß ist die Anzahl der Namen die sich Wissenschaftler ausgedacht haben, um die Welt der Gesteine zu beschreiben. Aber sie ist groß genug um jeden Anfänger – egal aus welcher Motivation heraus er sich mit Gesteinen beschäftigt – zu verunsichern, zu verwirren oder gar „zu erschlagen“.

Es existieren zwei grundlegende Wege, sich diesem Chaos zu stellen. Der akademische Weg führt zur Petrologie. Über das Studium der Entstehung der Gesteine erschließt sich mit der Zeit auch ihre Vielfalt und Nomenklatur. Dieser Weg ist lang und beschwerlich.

Der Weg des Laien ist meist der über Bestimmungsbücher, die ausgerüstet mit unzähligen Tafeln von Farbfotos eine zuverlässige Zuordnung per „Optik“ suggerieren. Dieser Weg ist voller Gefahren. Äußerlichkeiten rücken in den Vordergrund, die zwar das abgebildete Gestein dominieren, aber keineswegs zu verallgemeinern sind. Mit dem vorliegenden Leitfaden kann jeder versuchen, einen Mittelweg zu beschreiten. Es handelt sich nicht um ein Bestimmungsbuch mit Schlüsseln und Farbtafeln. Genauso wenig ist es ein Lehrbuch der Petrologie. Zur Gesteinsentstehung wird hier nur das nötigste gesagt. Und ganz wichtig: Die Petrographie wurde von veralteten und überflüssigen Begriffen weitestgehend gesäubert – lediglich das Grundgerüst der Gesteinsansprache wird vermittelt.

Erfahrungen aus jahrelanger Lehrtätigkeit für Anfänger führten den Autor zu der Ansicht, dass eine Ergänzung der zahlreich vorhandenen und

teilweise hervorragenden Lehr- und Bestimmungsliteratur notwendig sei. Anders als in anderen Veröffentlichungen wird aber dem Anspruch praxisorientierter Neulinge Rechnung getragen. So werden im zweiten Teil des Buches die Gesteine unter technischem Aspekt – also im Hinblick auf ihre Eigenschaften und ihre Verwendung – vorgestellt. Insbesondere den Lockergesteinen (Sediment, Boden) wurde extra viel Platz eingeräumt – einschließlich der gültigen Normen.

Damit ist die „Gesteinskunde“ eben nicht nur für Einsteiger, wie Fachschüler und Studenten gedacht, sondern im besonderen Maße auch für Anwender, wie Ingenieure und Techniker zum Beispiel der Bohr- oder Bautechnik. Aber auch die große Zahl der Hobbygeologen und Steinesammler ist angesprochen.

Das wichtigste im Umgang mit Gesteinen kann dieser Leitfaden allerdings nicht ersetzen: Übung am Objekt und viel Erfahrung.

Für verschiedene technische Hilfe danke ich Herrn Dr. Manuel Lapp, LfUG Sachsen, Herrn Detlef Schubert, BSZ „Julius Weisbach“ Freiberg und Herrn Jens Wächtler, Steinmetz in Freiberg. Meiner Frau Dr. Silke Voigt, IfM-Geomar Kiel und meinen Kollegen Gerd-Ulrich Lotzwick und Dr. Udo Görne sei Dank für kritische Durchsicht und helfende Kommentare. Besonderen Dank schulde ich Dr. Christoph Iven vom Spektrum Akademischer Verlag, der professionelle Hand an das Manuskript legte, so manches gerade bog und dem Buch den letzten Schliff gab.

Ulrich Sebastian

Inhaltsverzeichnis

I Einleitung

1	Der Baustoff der Gesteine	3
	Entstehung der Elemente	3
	Schalenbau der Erde	3
	Minerale	4
2	Die Bestimmung gesteinsbildender Minerale	7
	Definition	7
	Mineralgliederung	7
	Mineraleigenschaften	8
	Gesteinsbildende Minerale	8
3	Einteilung und Entstehung der Gesteine	13
	Definition	13
	Geologische Systematik	13
	Geotechnische Systematik	13
	Plattentektonik	14
	Gesteinskreislauf	16
	Gesteinsvielfalt	16

II Die Gesteine

4	Sedimente und Sedimentgesteine	21
4.1	Eigenschaften von Sedimenten und Sedimentgesteinen	21
	Schichtung	21
	Sedimentäre Fazies	21
4.2	Klastische Sedimente und Sedimentgesteine	21
	Korngrößenklassifikation	25
	Ansprache der klastischen Sedimentgesteine	25
4.3	Chemische Sedimentgesteine	27
	Entstehung	27
	Evaporite	28
	Weitere Chemische Sedimentgesteine	29
4.4	Biogene Sedimentgesteine	29
	Entstehung	29

Karbonatgesteine	30
Kieselige Sedimentgesteine	32
Phosphatische Sedimentgesteine	32
Organogene Sedimentgesteine.	32
Aufgaben	33
5 Magmatische Gesteine	35
5.1 Entstehung und Eigenschaften	35
Entstehung	35
Chemischer Charakter.	36
Magmatische Bildungsräume und Gefüge	36
Vulkanische Förderprodukte	39
5.2 Das QAPF-Doppeldreieck („Streckeisen-Diagramm“)	40
5.3 Feldansprache	43
5.4 Wichtige Magmatite im Bild	47
Saure Magmatite	47
Intermediäre Magmatite	47
Basische Magmatite	47
Ultrabasische Magmatite	47
Aufgaben	52
6 Metamorphe Gesteine	53
6.1 Metamorphose	53
6.2 Eigenschaften metamorpher Gesteine	54
Metamorphose und Tektonik.	54
Metamorphe Gefüge	55
Kataklasite und Mylonite.	56
6.3 Benennung metamorpher Gesteine	56
6.4 Die wichtigsten Metamorphite als Funktion von Ausgangsgestein und metamorpher Fazies	57
Metamorphose von tonigen Gesteinen.	59
Metamorphose von granitischen Gesteinen	59
Metamorphose von Karbonaten	59
Metamorphose von basaltischen Gesteinen	62
Metamorphose von Sandstein	62
6.5 Die Metamorphit-Nomenklatur nach IUGS	62
6.6 Spezielle Metamorphe	65
Granulite.	65
Metasomatose.	67
Impaktmetamorphose	67
Migmatite	67
Serpentinite	68
Aufgaben	69

III Technische Gesteinskunde

7	Lockergesteine (Boden)	73
7.1	Technische Lockergesteinsansprache	73
	Summenkurven	73
	Lockergesteinsansprache in der geotechnischen Erkundung (nach DIN EN ISO 14688)	76
	Ungleichförmigkeitsgrad	76
	Lockergesteinsansprache in der Bautechnik (nach DIN 18196)	79
	Wassergehalt und Zustandsgrenzen	79
	Bodenklassen nach VOB (DIN 18300 und DIN 18311)	83
	Lockergesteinsansprache in Land- und Forstwirtschaft (nach DIN 4220 und DIN 19682)	83
7.2	Technische Eigenschaften von Lockergesteinen	86
7.2.1	Laborbestimmte Eigenschaften	86
7.2.2	Feldbestimmte Eigenschaften	94
7.3	Bohren in Lockergesteinen	97
	Bohrverfahren	97
	Bohrbarkeit von Lockergesteinen	98
7.4	Hydrogeologische Eigenschaften von Lockergesteinen	101
	Wasserkreislauf und Gestein	101
	Porosität und Permeabilität	102
	Durchlässigkeitsbeiwert	103
	Bestimmung von Durchlässigkeitsbeiwerten in Pumpversuchen	104
	Überschlägige Bestimmung von Durchlässigkeitsbeiwerten	109
7.5	Verwendung von Lockergesteinen	110
	Betonzuschlag	110
	Straßenbau	111
	Filtersand und Filterkies	113
	Deponiebau	114
	Aufgaben	116
8	Festgesteine (Fels)	119
8.1	Technische Festgesteinsansprache	119
	Gestein, Fels und Gebirge	119
	Bautechnische Benennung von Fels nach DIN EN ISO 14689-1	120
	Felsklassifikation von Natursteinen	122
8.2	Technische Eigenschaften von Festgesteinen	124
8.2.1	Festigkeiten	124
8.2.2	Trennflächengefüge	127
	Häufigkeit der Trennflächen	127
	Raumlage von Trennflächen	129
8.3	Hydrogeologische Eigenschaften von Festgesteinen	131
8.4	Bohren in Festgesteinen	131
	Bohrverfahren	131
	Bohrbarkeit von Festgestein	132

8.5 Verwendung von Festgesteinen	133
8.5.1 Brecherprodukte.	133
8.5.2 Werksteine.	136
Aufgaben	139
9 Darstellung von Gesteinen	141
9.1 Zeichen und Farben	141
9.2 Graphische Auswertung von Erkundungsergebnissen	143
Bohrergebnisse	143
Aufschlussdokumentation	143
Kartierung	143
Aufgaben	146
10 Lösungen der Aufgaben	147
Literatur	151
Zitierte Normen	153
Kleines Lexikon und Register der Gesteinsnamen	155
Index	161

I Einleitung

1 Der Baustoff der Gesteine

Entstehung der Elemente

Wie viele naturwissenschaftliche Beschreibungen beginnt auch diese mit dem Urknall. Vor etwa 15 Milliarden Jahren entstanden dabei Raum, Zeit und die Grundbausteine der Materie, wie z. B. einfache Protonen. Bis jedoch unsere irdischen Gesteine entstehen konnten, waren noch 10 Milliarden Jahre Zeit – zwei Drittel der Geschichte des Universums. In der Zwischenzeit wurde in Sternen das einfachste und häufigste Element – der Wasserstoff – durch Kernfusion zu Helium „verbrannt“, so wie es auch heute noch in unserer Sonne geschieht. Aus den Kernen von Helium und Wasserstoff konnten durch weitere Kernfusionen schwerere Elemente entstehen und aus diesen wiederum noch schwerere. Das klappt jedoch nur bis zur Ordnungszahl 26, dem Eisen. Schwerere Elemente können sich so nicht bilden. Dafür müssen erst Sterne ihr Leben aushauchen und als Supernova explodieren. Bevor unser Sonnensystem entstehen konnte, war daher jede Menge Zeit vergangen – und Sterne waren gekommen und gegangen.

Vor ca. 5 Milliarden Jahren war es dann so weit, dass sich aus einer kosmischen Wolke flüchtiger Elemente, aber auch schwereren Staubes eine rotierende diskusförmige Scheibe bildete. Die Kontraktionsenergie im Zentrum führte zur Zündung der Kernfusion unserer Sonne. Sonnenwind und Fliehkräfte wehten die leichten Elemente Wasserstoff und Helium von der Sonne weg, während die schweren in Sonnennähe verblieben. Die unzähligen Einzelkörper unseres Sonnensystems fanden sich auf Umlaufbahnen zusammen und bildeten im Laufe der nächsten Milliarde Jahre die inneren Gesteins- und die äußeren Gasplaneten.

Damit war eine erste Stofftrennung vollzogen, bei der die gesteinsbildenden Elemente, wie Sili-

zium, Eisen, Aluminium und Sauerstoff frei Haus geliefert wurden.

Schalenbau der Erde

Mit der Zusammenballung von Planetesimalen, den ersten Himmelskörpern unseres Sonnensystems, zu Planeten fand auch die Erde zu ihrer heutigen Größe. Allerdings war unser Sonnensystem noch ziemlich unaufgeräumt. Die Geburt der Erde war über Millionen von Jahren von Meteoriteinschlägen begleitet. Von dieser Zeit zeugt noch die narbige Oberfläche des Mondes, der sein Antlitz seitdem nicht wesentlich verändert hat.

Während die Erde bombardiert wurde und sich weiter zusammenballte, heizte sie sich im Zentrum – teilweise bis zur Aufschmelzung – auf. Es entwickelte sich ein intensiver Magmatismus. Der sorgte dafür, dass leichtes Material in Richtung Oberfläche transportiert wurde und schwereres absank. Aus einer zunächst homogenen Knolle entstand die stark differenzierte Erde mit ihren Kugelschalen (Abb. 1.1). Flüchtige Bestandteile wurden dabei ganz nach außen transportiert, wo sich eine frühe Atmosphäre bildete. Aus dieser regnete es permanent und so entstand die Hydrosphäre mit ihren Weltmeeren. Aber auch der feste Teil der Erde differenzierte sich und wie in einem Hochofen entstand eine Schlackeschicht auf einem Kern aus Metall (vor allem Eisen). Diese Schlackeschicht ist recht mächtig und umfasst den Erdmantel und die Erdkruste. Im Wesentlichen besteht die Schlacke aus Silikaten – unseren Gesteinen.

Mit der Entstehung des Schalenbaus wurde also eine weitere Stofftrennung vollzogen, bei der sich besonders leichte Elemente in der Kruste anhäuften. Andere verschwanden fast vollständig im Innern der Erde.

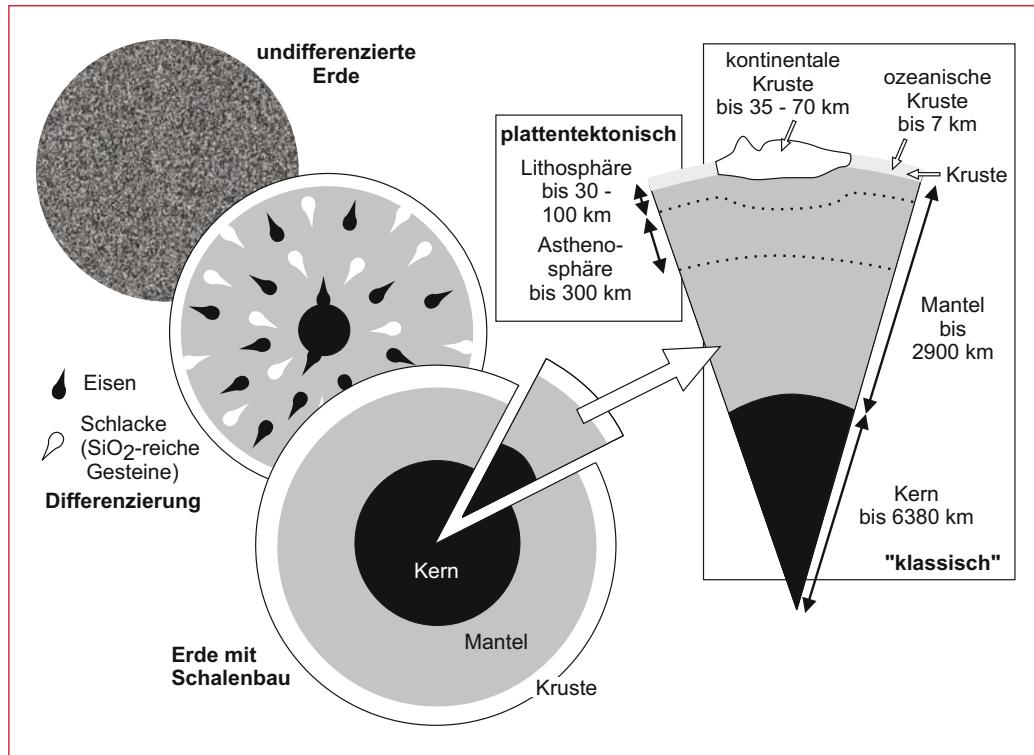


Abb. 1.1 Der Schalenbau der Erde. Aus einer undifferenzierten Erde (links hinten) entwickelte sich der heutige Schalenbau (vorn). Je nach Betrachtungsweise („klassisch“ oder plattentektonisch) werden diese Schalen unterschiedlich abgegrenzt und benannt (rechts).

Lediglich 8 von etwa 100 natürlichen Elementen machen über 99% der Erdkruste aus (Abb. 1.2). Das hat den Vorteil, dass es gar nicht so viele Kombinationsmöglichkeiten für chemische Verbindungen gibt und wir nicht allzu viele Minerale lernen müssen. Der Nachteil ist, dass alle schweren Elemente tendenziell für uns unerreichbar im Erdinneren stecken und nur in Ausnahmefällen in der Kruste anzutreffen sind. Solche Elemente sind für uns „edel“ und werden als Lagerstätten begierig gesucht. Das beginnt mit dem Eisen, das in Masseprozenten häufigste Element der Erde, das aber in der Kruste mit nur noch 6% vertreten ist – immerhin. Bei Chrom (0,2%), Zink (0,08%) oder Gold (0,0003%) sieht die Sache schon viel ungünstiger aus.

Minerale

Die wenigsten Elemente kommen rein (gediegen) vor, meist sind sie als chemische Verbindungen miteinander verknüpft. Diese Bausteine, die fest, natürlich und anorganisch sind, heißen Minerale und sind der Grundstoff der Gesteine.

Acht Elemente machen die Welt aus, auf der wir stehen. Die knappe Hälfte davon ist Sauerstoff – nach Masseprozenten! In Volumenprozenten ausgedrückt sind es 88%, die Erdkruste ist damit ein wahres Luftsiegel. Viele Minerale sind daher Sauerstoffverbindungen.

Sauerstoff, Silizium und Aluminium machen zusammen 82 Masseprozent der Erdkruste aus. Die wichtigsten Minerale sind die Silikate. Eine handvoll davon bildet bereits 90% der Kruste.

Obwohl rund 4000 Minerale bekannt sind, führen also die meisten lediglich ein Schatten-

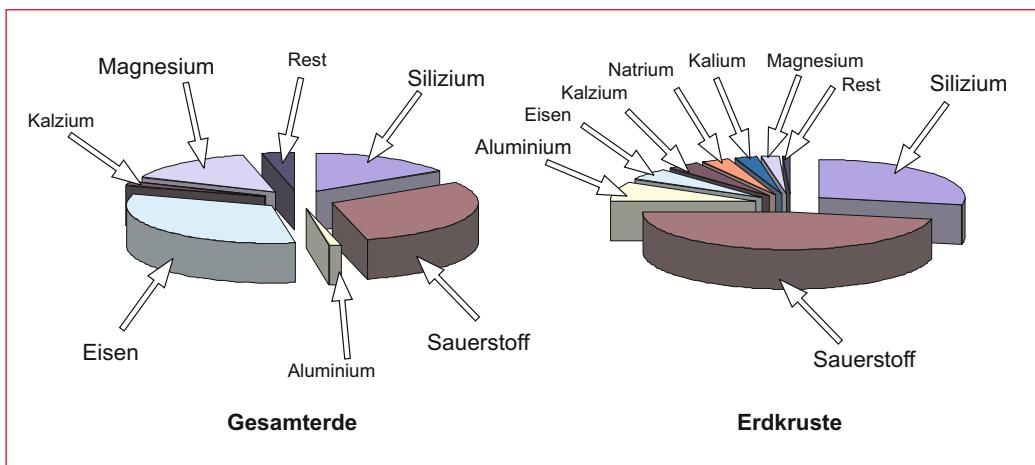


Abb. 1.2 Die Elementverteilung in der Gesamterde und der Erdkruste in Massenprozent.

dasein und sind nichts weiter als die begehrten Exoten für Mineraliensammler. Ca. 250 Minerale kommen tatsächlich gesteinsbildend vor. Aber keine Angst, auch diese Anzahl lässt sich noch einmal schrumpfen. Mit den sechs wichtigsten

Mineralen bzw. Mineralgruppen kennen wir schon über 90% der Erdkruste. Und mit 20 Mineralen lässt sich bereits solide Petrographie betreiben.

2 Die Bestimmung gesteinsbildender Minerale

Definition

Minerale sind

- natürlich gebildete
- anorganische
- meist feste (kristalline)
- stofflich homogene
- chemische Verbindungen.

Mit diesen fünf Punkten lassen sich Minerale klar definieren und vor allem gegen Nichtminerale abgrenzen. Im Einzelnen:

Natürlich gebildet. Minerale können selbstverständlich künstlich hergestellt werden. Der Diamant zum Beispiel wird für industrielle Zwecke synthetisch erzeugt. Allerdings muss es für ein solches künstliches Mineral ein natürliches Vorbild geben. Reißbrettsubstanzen, für die es in der Natur kein Pendant gibt, gelten nicht!

Anorganisch. Zucker und andere organische Substanzen würden die restlichen Bedingungen locker erfüllen, fallen aber durch diese Bedingung heraus.

Meist fest. Zum Beispiel Wasser ist anorganisch und natürlich gebildet. An Minerale ist darüber hinaus jedoch die Forderung gestellt, kristallin zu sein, zumindest im mikroskopischen oder submikroskopischen Maßstab und in einem bestimmten Temperaturbereich. Das natürlich vorkommende Metall Quecksilber ist unter Normaltemperaturen allerdings flüssig, es gilt trotzdem als Mineral. Ausnahmen bestätigen die Regel.

Stofflich Homogen. Jedes Mineral muss sich durch eine chemische Formel beschreiben lassen, die in ihrer Zusammensetzung allerdings variabel sein kann. Ungeachtet dessen, kann es auch verschiedene Minerale mit ein und derselben For-

mel geben, wenn sich diese in ihrer Kristallstruktur unterscheiden.

Mineralgliederung

Als chemische Verbindungen gliedert man die Minerale am besten chemisch.

- Elemente (gediegene Minerale), z. B.
 - Diamant, C
 - Kupfer, Cu
- Sulfide (Schwefelverbindungen ohne Sauerstoff), z. B.
 - Pyrit, FeS_2
 - Zinkblende, ZnS
- Oxide & Hydroxide, z. B.
 - Hämatit, Fe_2O_3
 - Limonit, $FeOOH$
- Halogenide (Salze der Elemente der 7. Hauptgruppe), z. B.
 - Halit, $NaCl$
 - Fluorit, CaF_2
- Karbonate (Salze der Kohlensäure), z. B.
 - Calcit, $CaCO_3$
 - Siderit, $FeCO_3$
- Sulfate (Salze der Schwefelsäure), z. B.
 - Gips, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$
 - Schwerspat, $BaSO_4$
- Phosphate (Salze der Phosphorsäure), z. B.
 - Pyromorphit, $Pb_5Cl(PO_4)_3$
 - Apatit, $Ca(F, OH)PO_4$
- Nitrat (Salze der Salpetersäure), z. B.
 - Kalisalpeter, KNO_3
 - Chilesalpeter, $NaNO_3$
- Borate (Salze der Borsäure), z. B.
 - Borax, $Na_2(OH)_4B_4O_5 \cdot 8H_2O$
 - Boracit, $(Mg, Fe, Mn)_3ClB_7O_{13}$
- Silikate (Salze der Kieselsäure), z. B.
 - Kalifeldspat, $KAlSi_3O_8$
 - Kaolinit, $Al_4(OH)_8Si_4O_{10}$

2

Für die Gesteinsansprache stellen die Silikate die wichtigste Gruppe dar. Über 90% der Erdkruste bestehen aus Silikaten. Das wichtige Mineral Quarz (SiO_2) ist seiner Chemie nach ein Oxid, wird aufgrund seiner Eigenschaften jedoch meist zu den Silikaten gezählt.

Mineraleigenschaften

Um Minerale identifizieren zu können müssen bestimmte Eigenschaften der Minerale teilweise buchstäblich unter die Lupe genommen werden. Nicht alle Eigenschaften sind wirklich für alle Minerale relevant. Meist erkennt man ein Mineral an einer oder zwei ganz ausgewählten Eigenschaften, den diagnostischen Merkmalen. Hier werden die wichtigsten Eigenschaften, auf die es zu achten gilt, kurz vorgestellt.

- **Farbe:** optische Eigenschaft, wichtigstes diagnostisches Merkmal (sofern man nicht farbenblind ist).
- **Strichfarbe:** Farbe des Pulvers, erhält man durch Reiben auf unglasiertem Porzellan (z. B. Rand der Unterseite einer Kaffeetasse oder spezielle Strichtafel).
- **Durchsichtigkeit:** unabhängig von der Farbe kann ein Mineral durchsichtig, durchscheinend oder undurchsichtig (opak) sein.
- **Glanz:** beschreibende Eigenschaft, wie z. B. Glas-, Diamant-, Fett-, Metall- oder Perlmuttglanz.
- **Spaltbarkeit:** Art und Weise, wie ein Mineral auf äußere mechanische Einwirkung reagiert. Auf einer Skala von 5 bis 0 wird angegeben ob ein Mineral sehr gut bis nicht spaltbar ist.
- **Bruch:** Reaktion auf mechanische Einwirkung bei fehlender Spaltbarkeit, wird beschrieben, z. B. eben, hakig, muschelig, splittrig.
- **Ritzhärte:** durch Vergleichsminerale aufgestellte Skala von 1 bis 10 (Mohshärte), wichtig ist grobe Orientierung:
 - 1 – 2 mit Fingernagel ritzbar, z. B. Gips
 - 3 – 5/6 mit Taschenmesser ritzbar, z. B. Calcit
 - 6/7 – 10 ritzt Fensterglas, z. B. Quarz
- **Dichte:** spezifisches Gewicht, abschätzbar, z. B. Quarz 2,65 g/cm^3 , Pyrit 5 g/cm^3 , Gold 19 g/cm^3
- **Ferromagnetismus:** Fähigkeit Kompassnadel abzulenken, nur Magnetit und Pyrrhotin.

- **Reaktion auf Salzsäure:** Indikator für Karbonate, z. B. Calcit $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$, Kohlendioxid entweicht brausend, funktioniert bei anderen Karbonaten mit heißer Salzsäure.
- **Geschmack:** nur für Halogenide anwendbar (und zu empfehlen).
- **Kristallform:** setzt Kenntnisse in Kristallographie und eine Mindestgröße der Kristalle im Handstück voraus.

Gesteinsbildende Minerale

Die 20 wichtigsten Minerale und Mineralgruppen der Erdkruste werden kurz besprochen. Nicht alle sind wirklich gesteinsbildend. Einige sind am Gesteinsaufbau zwar nur gering beteiligt, geben aber manchem Gestein eine typische Farbe.

Quarz SiO_2

Da Glas maßgeblich aus Quarz besteht, sind einige typische Eigenschaften von Quarz denen von Glas sehr ähnlich, vor allem die Durchsichtigkeit, der glasige bis fettige Glanz und der muschelige bis splittrige Bruch. Die hohe Ritzhärte (7) hilft bei der Abgrenzung zum Beispiel gegen Calcit. Winzigste Beimengungen fremder Elemente und Minerale können verschiedene (Fremd-)Farben verursachen.

Feldspat (K, Na, Ca) $(\text{Al, Si})_4\text{O}_8$

Feldspat macht mit 60 Masse-% das Gros der Erdkruste aus. Wer Quarz und Feldspat sicher erkennt, ist in der Lage über zwei Drittel aller Gesteine mineralogisch aufzulösen.

Feldspat zeichnet sich gegenüber Quarz vor allem durch seine Eigenfarbe (weiß, gelblich, fleischfarben, rosa) und die gute Spaltbarkeit aus.

Man unterscheidet je nach Kation drei verschiedene Feldspäte, die sich teilweise vermischen können (Abb. 2.1). Für die praktischen Belange genügt es zwischen Kalifeldspat (Orthoklas, Mikroklin und Sanidin) und Plagioklas zu unterscheiden. Als Faustregel gilt: Kalifeldspat ist meist

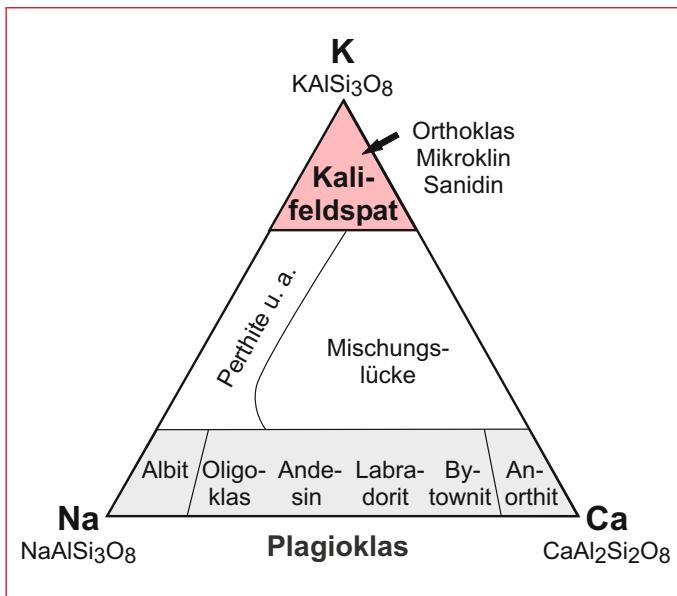


Abb. 2.1 Das vereinfachte Feldspatdreieck.

rötlich oder gelblich gefärbt, während der Plagioklas meist weiß ist. Ausnahme ist der Labradorit, ein blau bis braun schillernder Plagioklas, der den Fußboden so mancher Bank oder öffentlichen Einrichtung ziert.

Glimmer

Glimmer sind Schichtsilikate und bestehen aus dünnblättrigen schuppenförmigen Kristallen. Hervorstechende Eigenschaft der Glimmer ist damit eine perfekte Spaltbarkeit in eine Richtung.

Zwei Sorten Glimmer sind für uns sinnvoll zu unterscheiden, Biotit und Hellglimmer.

Biotit $K(Mg, Fe, Mn)_3(OH, F)_2|(Al, Fe)Si_3O_{10}$
 Der Biotit ist ein Mischmineral eines Magnesium- und eines Eisenendglieds. Die Eisenbestandteile färben das Mineral schwarz. Zusammen mit Quarz und Feldspat (Feldspat, Quarz und Glimmer, ...) macht er meistens den Granit aus.

Muskovit $KAl(OH, F)_2|AlSi_3O_{10}$

Auf der anderen Seite existieren Glimmer, die hell sind und silbrig glänzen. Der wichtigste Hellglimmer ist der Muskovit. Sind die Schuppen

dünn genug, erkennt man, dass das Mineral eigentlich farblos ist.

Amphibole und Pyroxene

Den Mineralgruppen der Amphibole und Pyroxene ist gemein, dass sie mehr oder weniger schwarze und prismatische Kristalle ausbilden. Die Unterschiede sowohl zwischen den Gruppen als auch innerhalb dieser sind sehr filigran und selbst für erfahrene Geologen im Handstück kaum auflösbar.

Kommt es dennoch darauf an zwischen Amphibolen und Pyroxenen zu unterscheiden, dann hilft die Spaltbarkeit weiter. Bei Pyroxenen schneiden sich die zwei Spaltflächenscharen im Winkel von ca. 90° . Bei Amphibolen sind es etwa 124° .

Stellvertretend je ein prominentes Beispiel:

Amphibol – Gemeine Hornblende

$(Na, K)Ca_2(Mg, Fe, Al)_5(OH, F)_2|(Si, Al)_2Si_6O_{22}$

Pyroxen – Augit $(Ca, Mg, Fe, Ti, Al)_2(Si, Al)_2O_6$

Tonminerale

Tonminerale sind Kolloide und damit immer kleiner als 0,002 mm. Sie bilden den Ton und

2

ihre Eigenschaften sind nur im Kollektiv erkennbar.

Die geringe Kristallgröße bringt eine sehr große innere Oberfläche mit sich, die wiederum für eine hohe Haftwassermenge verantwortlich ist. Damit sind feuchte Tone hoch plastisch und an ihrer Eigenschaft, gut zwischen den Fingern ausrollbar zu sein, werden sie im Gelände erkannt.

Neben Wasser können verschiedene Kationen an die Tonblättchen angelagert werden, was die Fruchtbarkeit von tonreichen Böden verursacht, aber auch die Eignung der Tone als geochemische Sperre. Diese Eigenschaft heißt Kationenaustauschkapazität (KAK). Die Dreischicht-Tonminerale verfügen noch über eine weitere Eigenschaft, die Thixotropie. Verursacht durch gleiche elektrische Ladungsüberschüsse an den Oberflächen stoßen sich die Tonblättchen voneinander ab und bilden im Ruhezustand eine Kartenhausstruktur. Sie verleiht dem Ton eine trügerische Stabilität, die bei mechanischer Beanspruchung schnell zusammenbricht. Diese Eigenschaft macht man sich in der Bohrtechnik zu nutze um die Bohrspülung in Bohrpausen zu stützen.

Bekanntestes Zweischicht-Tonmineral ist der **Kaolinit**, der Rohstoff für Porzellan: $\text{Al}_4(\text{OH})_8|\text{Si}_4\text{O}_{10}$. Häufig in Tongesteinen vorhandene Tonminerale sind **Illit** ($\text{K}, \text{H}_2\text{O}\text{Al}_2(\text{H}_2\text{O}, \text{OH})_2|\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$) und **Montmorillonit** $\text{Al}_{1,67}\text{Mg}_{0,33}(\text{OH})_2|\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot \text{Na}_{0,33}(\text{H}_2\text{O})_4$, der auch im Bentonit der Bohrspülung verwendet wird.

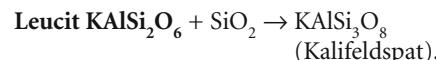
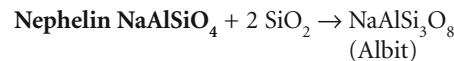
Serpentin $\text{Mg}_6(\text{OH})_8|\text{Si}_4\text{O}_{10}$

Gruppe von Silikaten, die durch Umwandlung von Olivin und Pyroxen entstehen. Grünlche faserige bis schuppige Aggregate mit der Härte 3 bis 4.

Foide

Diese Gruppe von Mineralen, die auch Feldspatvertreter heißt, kristallisiert aus SiO_2 -armen Magmen aus. Quarz und Foid schließen sich daher im Gestein aus. Feldspatvertreter spielen bei der Benennung magmatischer Gesteine eine wichtige Rolle. Trotzdem sind sie selten mit bloßem Auge im Gestein erkennbar. Allgemein lässt sich sagen, dass sie dem Quarz in Glanz und

Bruch recht ähnlich sind, aber im Gegensatz zu ihm meist eine eigene Farbe haben. Zwei wichtige Vertreter sind Nephelin und Leucit. Fügt man diesen beiden Mineralen rechnerisch SiO_2 hinzu, dann ergeben sich formelmäßig jene Feldspäte, die durch sie vertreten werden:



Olivin $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$

Silikat, das an grünes Bierflaschenglas erinnert.

Calcit CaCO_3

Wichtigstes Nichtsilikat. Reagiert aufbrausend auf Salzsäure, ist mit dem Messer ritzbar (Härte 3) und hat eine gute dreidimensionale Spaltbarkeit.

Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Zweitwichtigstes Karbonatmineral, das sich vom Calcit dadurch unterscheidet, dass es nur auf heiße Salzsäure reagiert. Die Härte ist mit 3,5 bis 4 auch etwas höher.

Limonit FeOOH

Dieses Gemisch aus Goethit und Lepidokrokit kommt kaum in sichtbaren Kristallen vor, spielt aber als färbende Beimengung in vielen Gesteinen eine Rolle. Der gelbliche Sand, der „dreckige“ Erdboden, rostbraune Ortsteine und Eisenkrusten werden immer von diesem Mineral gefärbt. Er ist das Eisenmineral unserer Klimazone.

Hämatit Fe_2O_3

Was in unserem Klima der Limonit, das ist im Wüstenklima der Hämatit. Er färbt Gestein und Boden rot. Auch die roten Farben mancher Gra-

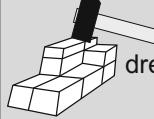
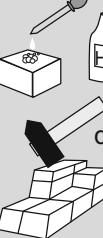
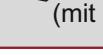
Mineralgruppe	Anteil an der Erdkruste	Diagnose	weitere Unterteilung
Feldspat	60 %	 	Kalifeldspat eher rötlich fleischfarben 
			Plagioklas eher weiß 
Pyroxene & Amphibole	17 %		Pyroxen Spaltwinkel ca. 90° 
			Amphibol Spaltwinkel ca. 125° 
Quarz	13 %	 	z. B. Bergkristall farblos, klar  Milchquarz weiß  Amethyst violett 
			Biotit schwarz  Hellglimmer farblos, silbrig 
Tonminerale	1 %	 < 0,002 mm plastisch	 Quarz Glimmer Calcit Tonminerale Rest Amphibole & Pyroxene Feldspat Summe der aufgeführten Minerale: 96 %
Calcit	1 %	 braust mit Salzsäure  gut dreidimensional spaltbar Härte 3 (mit Messer ritzbar)	

Abb. 2.2 Diagnosetabelle der wichtigsten gesteinsbildenden Minerale.

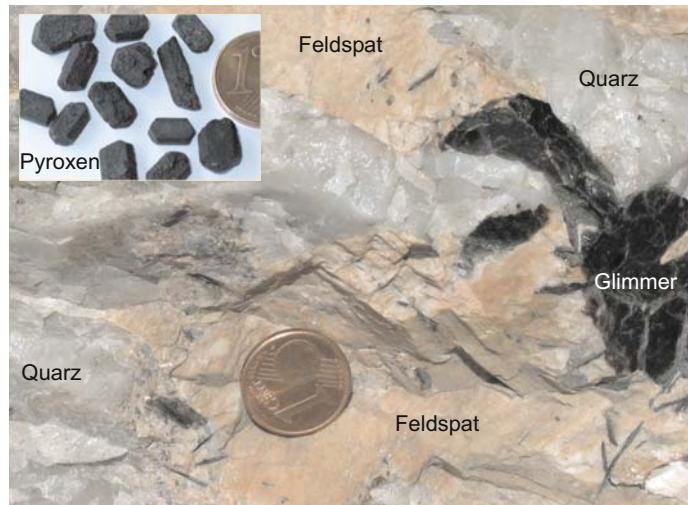


Abb. 2.3 Anhand des im großen Foto abgebildeten grobkörnigen Magmatits (Pegmatit) können die wichtigsten diagnostischen Merkmale von Quarz, Feldspat (Orthoklas) und Glimmer (Biotit) gezeigt werden. Im Gegensatz zum blättrigen Glimmer sind die Amphibole und Pyroxene prismatisch ausgebildet (kleines Foto: aus einem Vulkanit herausgewitterte Pyroxene).

nite und Gneise und das Purpur des Porphyrs gehen auf den Hämatit zurück.

Pyrit FeS_2

Ohne Sauerstoff ausgestattet, bildet sich dieses Sulfid in reduzierenden Milieus, wie in magmatischen Gängen oder in sauerstoffarmen Meeresböden und Faulschlämmen. Er ist durch seine hellgelbe Farbe und den metallischen Glanz nur mit seinem nahen Verwandten, dem **Markasit** FeS_2 , zu verwechseln. Fein verteilt im Sediment wirkt er allerdings schwarz und es umgibt ihn dann oft ein Schwefelgeruch.

Anhydrit CaSO_4

Anhydrit ist ein sedimentäres Mineral. Es hat keine so markanten diagnostischen Eigenschaften, wie andere Minerale. Das heißt, das Ausschlussprinzip hilft weiter. Gips ist weicher, Calcit reagiert auf Salzsäure und Halit hat einen (Salz-) Geschmack.

Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Gips sollte jeder schon einmal gesehen haben. Vielleicht am eigenen Bein. Aufgrund seines feinkörnigen Auftretens im Gestein erscheint er meist weiß (oder verunreinigt: grau), obwohl er eigentlich farblose Kristalle bildet (Marienglas). Gips ist wie kaum ein anderes Mineral weich und mit dem Fingernagel gerade so ritzbar.

Halit NaCl

Halit ist simples Kochsalz, das wie in der Küche in Würfeln spaltet, durchsichtig ist und eben nach Salz schmeckt.

Die Abbildung 2.2 stellt das mineralogische Mindestwissen nebeneinander. Die Diagnosetabelle sollte in fast allen Lebenslagen zur Gesteinsansprache befähigen. Das Erscheinungsbild der vier wichtigsten Mineralgruppen geben die beiden Fotos in Abbildung 2.3 wieder.

3 Einteilung und Entstehung der Gesteine

Definition

Gesteine sind **natürliche Aggregate von Mineralen**.

Damit wird klar eine Hierarchie festgelegt, die zwischen Mineral als Grundbaustein und Gestein als Konstrukt aus Mineralen unterscheidet. Mineralaggregat heißt allerdings auch, dass durchaus nur ein Mineral am Gestein beteiligt sein kann. Dieses Gestein nennt man dann **monomineralisch**. Ein sehr reiner Kalkstein beispielsweise besteht fast ausschließlich aus Calcit. Reicht es dann nicht aus, beim Calcit als Ansprache zu bleiben?

Für den Anfänger ist es wichtig, sich klar den Unterschied zwischen Baumaterial (Mineral) und dem Bauergebnis (Gestein) vor Augen zu halten. Ein Haus (Gestein) besteht beispielsweise aus den „Mineralen“ Ziegelstein, Glas (für die Fenster), Holz (für den Dachstuhl) und so weiter. Ein Baumhaus kann durchaus nur aus Holz aufgebaut sein. Es wäre dann monomineralisch. Das „Mineral“ ist Holz, das „Gestein“ heißt aber Baumhaus.

Geologische Systematik

Die am weitesten verbreitete Systematik zur Gliederung von Gesteinen ist jene, die sich die Geologen ausgedacht haben. Sie sind Geschichtsforscher und für sie steht die Entstehung des Gesteins im Vordergrund (Abb. 3.1):

1. **Magmatische Gesteine** oder **Magmatite** entstehen durch Erstarrung eines geschmolzenen Gesteinsbreis, des Magmas. Erstarrt das Magma bereits in der Erde bilden sich **Plutonite**. Gelangt die Schmelze jedoch zur Erdoberfläche tritt sie an einem Vulkan aus und bildet **Vulkanite**.

2. **Sedimentäre Gesteine** oder **Sedimentite** entstehen durch Ablagerung (Sedimentation). Das passiert immer auf der Erde, wenn auch meist unter Wasserbedeckung. Sedimentgesteine aus Bruchstücken anderer Gesteine heißen **klastische**, aus einer Lösung ausgefällte heißen **chemische** und unter Beteiligung von Organismen gebildete nennt man **biogene** Sedimentite.
3. **Metamorphe Gesteine** oder **Metamorphite** gehen durch Umwandlung unter erhöhten Drücken und Temperaturen aus den beiden anderen Gruppen – oder auch aus metamorphen Gesteinen selbst – hervor. Grob unterscheidet man, je nachdem ob ganze Krustenteile oder nur die heißen Umgebungen geschmolzener Magmenkörper betroffen sind, in **regional- bzw. kontaktmetamorphe Gesteine**.

Muss ein Gestein eigentlich fest sein? Hier taucht schon das erste Problem auf. Bevor sich beispielsweise ein Sandstein durch Verfestigung von Sand bilden kann, muss es zur Ablagerung von Sand kommen. Der Geologe nennt die nicht verfestigten Materialien **Sediment** und trennt sie damit strikt vom **Sedimentgestein** (Sedimentit). In der Geologie sind Sedimente also keine Gesteine, obwohl sie bei der Gesteinsbetrachtung großzügig mit behandelt werden (Abb. 3.2).

Geotechnische Systematik

Gerade die Sedimente sind es aber, mit denen der Nichtgeologe am häufigsten zu tun hat, wenn er im Erdreich herum stochert. Bergleute, Bauingenieure, Landwirte und Bohrtechniker um nur einige zu nennen.

Auch sie kennen Magmatite, Sedimentite und Metamorphite. Zuvor ist für sie jedoch entschei-

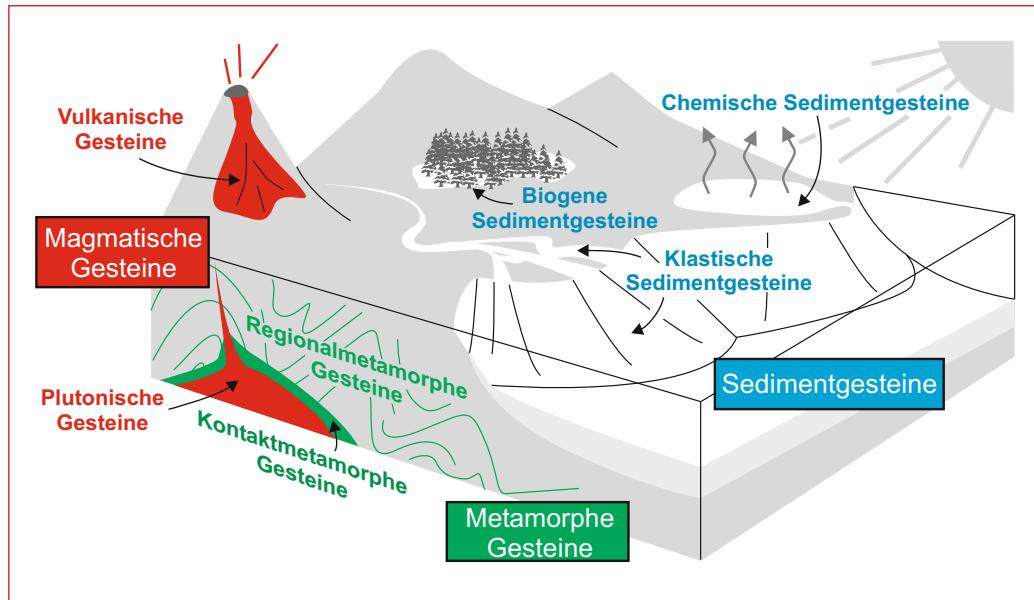


Abb. 3.1 Die Einteilung der Gesteine in magmatische, metamorphe und sedimentäre.

dend ob die Erdkruste fest oder locker ist. Techniker und Ingenieure teilen die Gesteine ein in

1. **Lockergestein (= Boden)** und
2. **Festgestein (= Fels)**.

Das ist auch nachvollziehbar, da die technischen Eigenschaften, wie Grab- und Bohrbarkeit für sie im Vordergrund stehen.

Auch die Begriffe „Boden“ und „Fels“ werden vom Geologen völlig anders ausgelegt. Der Fels steht in der Brandung und Boden ist eine in Horizonte gegliederte Verwitterungszone direkt unterhalb der Erdoberfläche.

Die Begriffe Boden und Fels, Lockergestein und Festgestein, sind aber von den Anwendern in den Vorschriftenstatus erhoben wurden. Sie ziehen die Titel von DIN-Vorschriften und gehören zum Begriffsinventar von Ingenieurbüros und Bergbaubetrieben. Die Geologen müssen damit leben.

Plattentektonik

Das Vergehen von Gesteinen, ihre Verwitterung und Erosion, kann jeder der aufmerksam durch

die Welt geht, beobachten. Da ist die Marmorplatte, die sich aufgrund des sauren Regens oder des falschen Pflegemittels langsam auflöst. An Prallhängen von Flüssen entstehen bei fast jedem Frühjahrshochwasser neue Rutschmassen. Felshänge zerbröseln, Natursteinbauten, ob Kölner Dom oder Dresdner Barockschloss, tun es auch. Das verwitterte Material, gelöst oder abgeschabt, wird vom Regen erfasst und davon gespült. Hier begegnet es uns als Trübe in den großen Flüssen, wie Elbe, Rhein oder Amazonas wieder. Wäre dieser Prozess allein für die Oberflächengestaltung unseres Planeten zuständig, dann wäre das Relief aller Festländer recht bald auf Null abgetragen und die Meeresbecken wären zugekippt.

Ganz offensichtlich stehen diesen Vorgängen Prozesse gegenüber, die für den Neuaufbau der Erdkruste sorgen. Neue Gebirge entstehen, Vulkane brechen aus, ganze Regionen heben sich.

Hundert Jahre nachdem Alfred Wegener die Vermutung geäußert hat, dass sich die Kontinente über unseren Globus bewegen, wissen wir heute sehr gut über die Dynamik unserer Erdkruste Bescheid. Sie stellt sich als ein Kreislauf dar in welchem immer wieder neue Kruste gebildet und alte vernichtet wird.

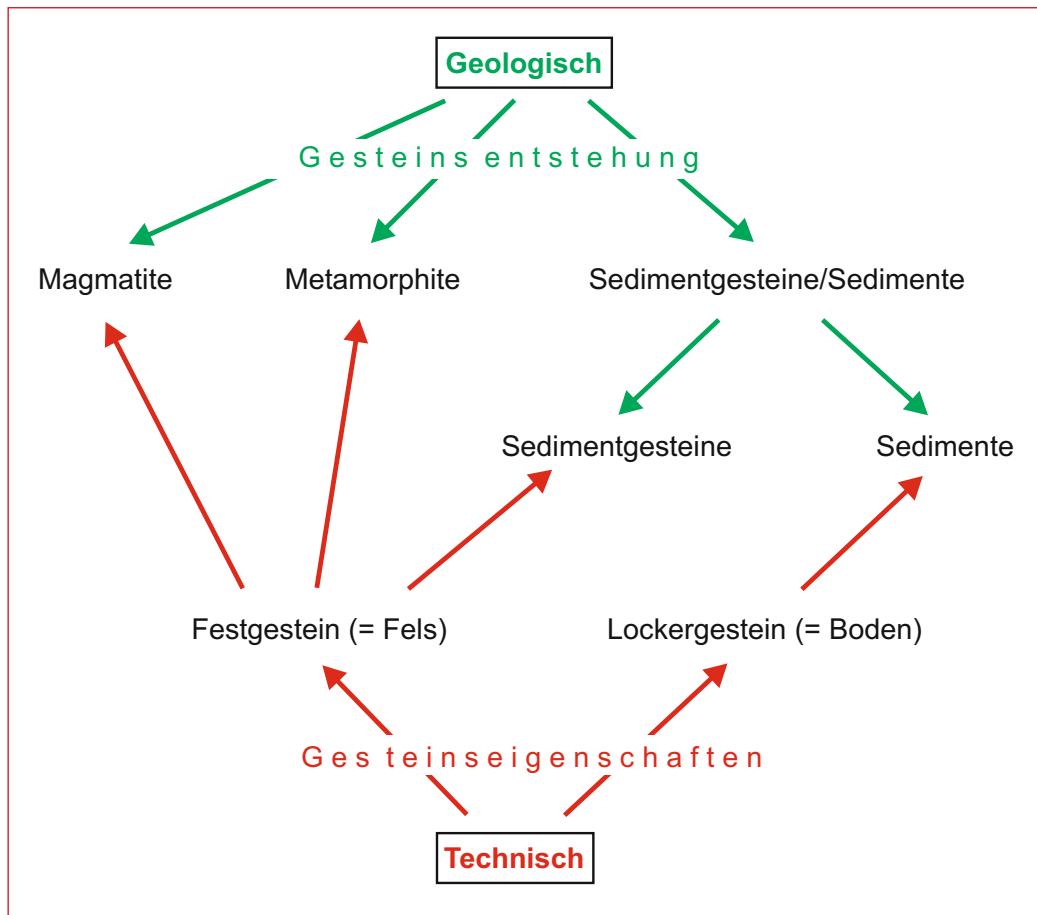


Abb. 3.2 Gegenüberstellung der geologischen und technischen Gesteinsansprache.

Die **Mittelozeanischen Rücken** sind die Gebiete in denen in allen Ozeanen ständig neuer basaltischer Meeresboden gebildet wird, die **ozeanische Kruste** (Abb. 3.3). In dem Atemzuge, wie dadurch der Ozeanboden an Fläche wächst, muss an anderer Stelle Ozeanboden verschwinden. Sonst würde die Erde immer größer werden. Die Vernichtung von Ozeanboden geschieht in den **Subduktionszonen**, wo er rumpelnd unter andere Kruste, sei es ozeanische wie in Japan oder kontinentale wie in Südamerika, verschwindet. Immer ist dieser Vorgang mit Magmatismus verbunden, da die abtauchenden Gesteine in der Tiefe aufgeschmolzen werden. Wird nun ein Ozeanboden Stück für Stück verschluckt, dann folgt daraus, dass sich die angrenzenden Kontinente irgendwann begegnen

und sich schließlich an ihrer **Kollisionslinie** zu neuen Gebirgen auffalten.

So wird die Erdoberfläche in einzelne tektonische Platten zergliedert, deren seitliche Grenzen jene Gebiete der Erde sind, wo etwas wirklich Spannendes passiert. Dazu gehören Mittelozeanische Rücken, Subduktionszonen, Faltengebirge und Blattverschiebungszenen mit prominenter Erdbebengefährdung (San Andreas-Verwerfung an der Westküste der USA oder die anatolische Verwerfung in der Türkei). Nach unten sind diese etwa 100 km dicken Platten durch eine zäh-plastische Schicht, die Asthenosphäre (Abb. 1.1), begrenzt. Auf ihr bewegen sich die so genannten **Lithosphärenplatten**, angetrieben durch Konvektionsströme im Erdmantel.

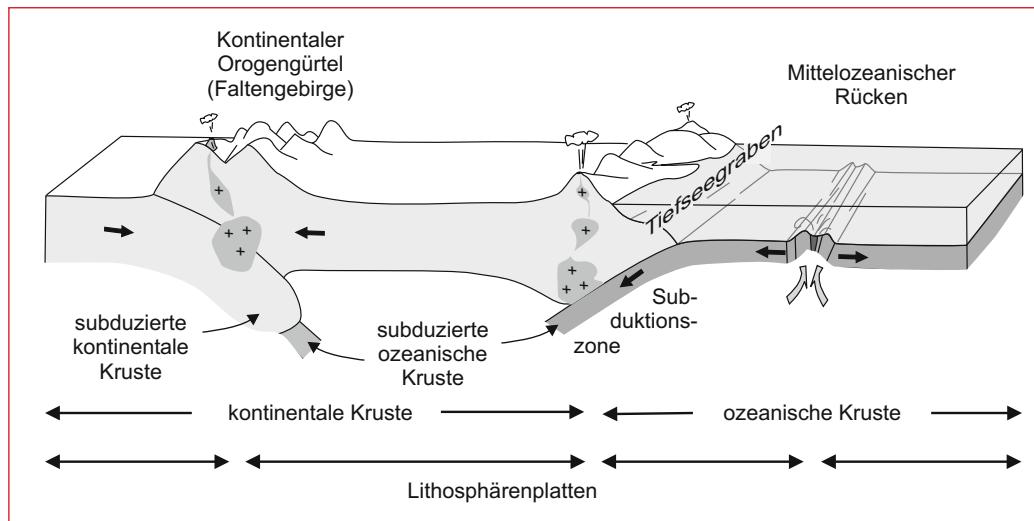


Abb. 3.3 Das Grundprinzip der Plattentektonik. Es ist ein Schnitt über vier Lithosphärenplatten dargestellt. An den drei Plattengrenzen ist das Prinzip von Krustenentstehung und Krustenvernichtung zu erkennen: Ozeanboden-Spreizung, Subduktion, Kontinent-Kontinent-Kollision (von links nach rechts).

Gesteinskreislauf

Jedes x-beliebige Gestein, welcher Natur auch immer, ist diesem Großkreislauf in irgendeiner Art und Weise mit unterworfen. Kein Gestein existiert für immer, auch wenn kontinentale Bildungen bessere „Überlebenschancen“ haben als ozeanische.

Noch bevor man die Plattentektonik kannte und sie akzeptierte, hatte man das Wechselspiel aus Gesteinsbildung und Gesteinsabtragung erkannt. Abtragungsschutt wird wieder aufgeschmolzen und erstarrtes Magma wieder abgetragen. Aus jedem Gestein kann fast jedes andere werden. Dieser so genannte Gesteinskreislauf beherrschte als Übersicht jede Geographiezimmerwand.

Im Zuge der Plattentektonik hat dieser Gesteinskreislauf an Format gewonnen. Die Plattentektonik ist der Gesteinskreislauf. In Abbildung 3.4 ist ein typisches plattentektonisches Szenarium herausgegriffen worden, um den Kreislaufgedanken zu verdeutlichen. Anhand eines magmatischen Gürtels oberhalb einer Subduktionszone können hier die drei Bildungsprozesse für die Gesteinsgruppen (Magmatismus für Magmatite, Sedimentation für Sedimentite und

Metamorphose für Metamorphite) in Beziehung zueinander gesetzt werden. Die wichtigsten Vorgänge, die die Gesteine zur nächsten Gruppe überführen, stehen in abgerundeten Kästen: Verwitterung, Versenkung und Aufschmelzung.

Diese sechs Begriffe sind noch einmal in den unteren Teil der Abbildung 3.4 kopiert worden. Hier sind für eine Übersicht die wichtigsten Petrographien der drei Gesteinsgruppen in drei Kästen aufgeführt.

Gesteinsvielfalt

Wie viel Gesteinsarten existieren eigentlich? Und wie viele Begriffe müssen gelernt werden, um in der Praxis über die Runden zu kommen?

Zunächst muss festgestellt werden, dass kein Gestein doppelt vorkommt. Jedes ist auf seine Art einmalig, da unzählige Parameter bei der Bildung von Gesteinen wirken. So gibt es alle Übergänge zwischen den Gesteinsarten und auch innerhalb einer Sorte finden sich immer kleine Unterschiede in Farbe oder Mineralzusammensetzung. Wer Naturstein verarbeitet und auf verschiedene Lieferungen zurückgreifen muss, weiß ein Lied davon zu singen.

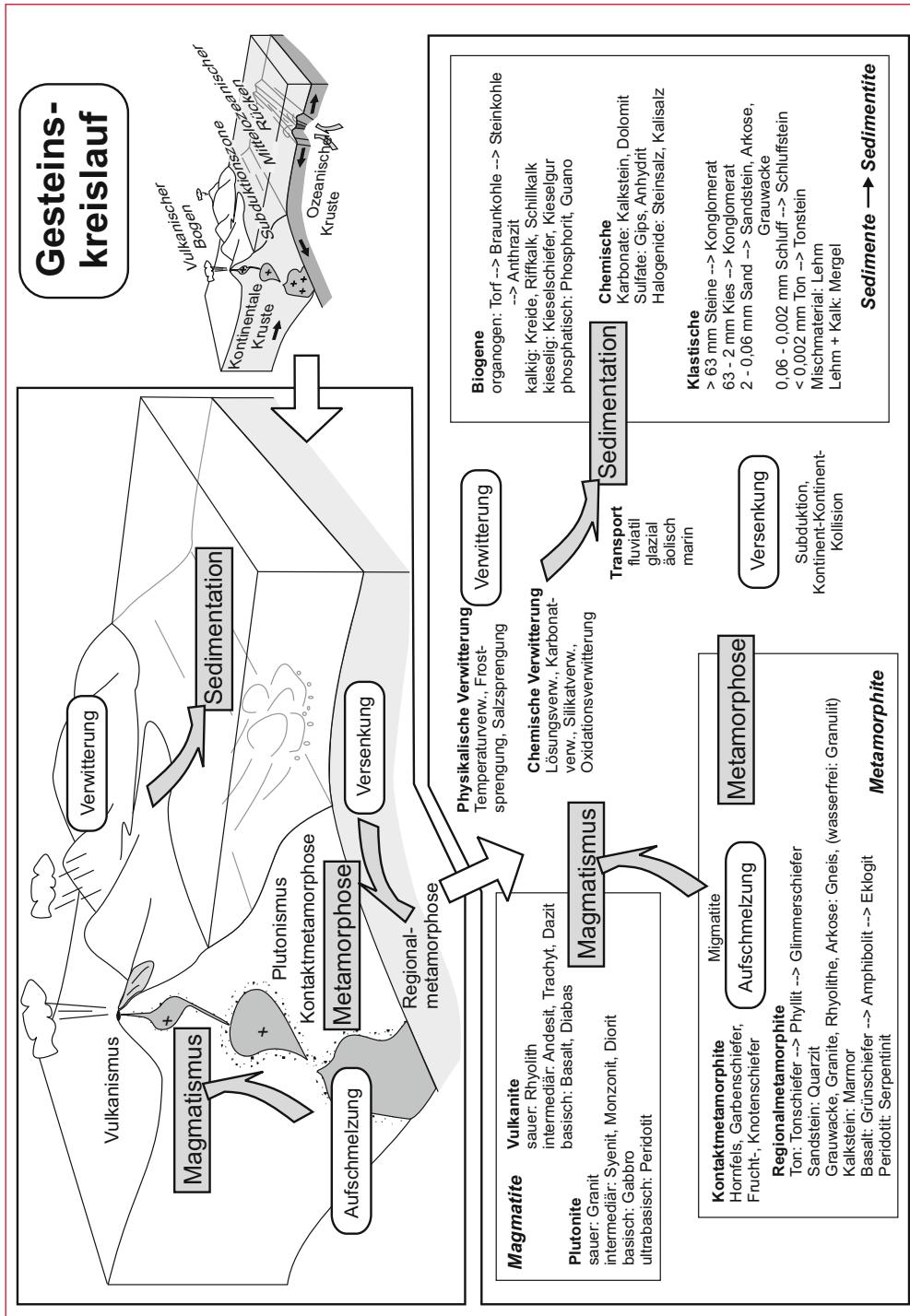


Abb. 3.4 Der Gesteinskreislauf im Kontext der Plattentektonik. Erläuterung siehe Text.

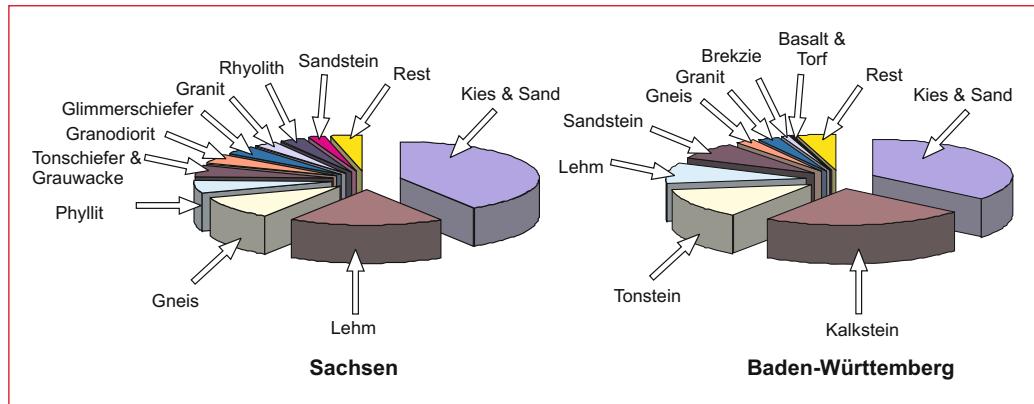


Abb. 3.5 Die ungefähren Anteile der Gesteine am Aufbau der Erdoberfläche in den Ländern Sachsen und Baden-Württemberg.

Die Aufgabe von Petrographen ist es, die unendliche Gesteinsvielfalt in sinnvolle Kategorien zu pressen und so diesen Kosmos überschaubar zu machen. Dabei wird versucht jedes Gestein in eine möglichst passende Schublade zu stecken. Das geht weder ohne Kompromisse, noch herrscht bei der Definition der Schubladen Einigkeit.

Aber ähnlich wie bei den Mineralen, ist nicht jedes Gestein von gleicher Bedeutung. Darüber hinaus sind manche Begriffe veraltet und sollten auch aus der Lehre verschwinden. Nach dem Großsaubermachen bleiben gar nicht so viele Gesteinsnamen übrig, die der Einsteiger oder der Anwender für sein Grundwissen benötigt.

Ein Blick auf zwei Fallbeispiele unterstreicht das. So machen 33 Gesteine oder Gesteinsgruppen, locker oder fest, so gut wie 100% der an der Oberfläche Sachsens anstehenden Gesteine aus. Zehn davon bilden immerhin 96%. Sie sind in Abbildung 3.5 aufgeführt. Gleiches gilt auch für das Land Baden-Württemberg: 11 relativ eng umrissene Gesteinsgruppen bilden 96% der Ober-

flächengeologie. Mit der Tiefe mag sich das freilich ändern, da viele junge Bildungen der Eiszeit oder der heutigen Täler nur wenige Meter mächtig sind. Aber der Bereich unmittelbar unter der Rasensohle ist es, der den Anwender brennend interessiert. Hier werden Fundamente gegründet, Deponien angelegt und Flachbohrungen abgeteuft.

Weil die jüngsten Bildungen nun einmal oben auf liegen, ist es nicht verwunderlich, dass am häufigsten Sande und Kiese vorkommen. Sie machen in Sachsen etwa 40% und in Baden-Württemberg etwa 35% aus – über ein Drittel! Und das in Ländern, die einen sehr hohen Anteil an Mittelgebirgen haben und damit von Natur aus mit Festgestein reich gesegnet sind. Addiert man in beiden Ländern zu Sand und Kies das Lockermaterial Lehm, der im Löß, in Moränen- und in Verwitterungsböden steckt, dann erhält man etwa die Hälfte alles an der Erdoberfläche anstehenden Gesteins. In Bundesländern ohne Mittelgebirge, wie Schleswig-Holstein oder Brandenburg, geht dieser Anteil gegen 100%.

II Die Gesteine

4 Sedimente und Sedimentgesteine

4.1 Eigenschaften von Sedimenten und Sedimentgesteinen

Sedimente entstehen an der Erdoberfläche oder am Grund von Gewässern durch Ablagerung von Partikeln, die im Normalfall zunächst keinen Zusammenhalt haben. Sedimente stellen also Lockermaterial dar. Erst durch Prozesse wie Entwässerung, Drucklösung und Zementation, die unter dem Begriff der **Diagenese** zusammengefasst werden, entstehen aus Sedimenten Sedimentgesteine (Locker- und Festgestein im Kapitel 3).

Schichtung

Die Tatsache, dass die Ablagerung nicht kontinuierlich stattfindet und die abgelagerten Materialien variieren führt zu einer Eigenschaft, die fast allen Sedimenten und Sedimentgesteinen gemein ist – der Schichtung. Sie stellt also ein Anlagerungsgefüge dar, das mit einem Materialwechsel verbunden ist. Wenn also beispielsweise in einem Fluss immer Quarzkörnchen der gleichen Größe abgelagert würden, dann wäre das Sediment ungeschichtet. Erst ein Wechsel zu einer feineren oder größeren Korngröße oder die Beimengung von zum Beispiel Ton oder organischer Substanz erzeugt Schichtung.

Die Umstände der Bildung bringen weitere typische Eigenschaften eines Sediments oder Sedimentgesteins hervor. Solche Sedimentstrukturen sind in Abbildung 4.1 zusammengestellt.

Sedimentäre Fazies

In allen Regionen der Erde können Sedimente abgelagert werden. Das benötigte Material wird durch verschiedene Prozesse herbei geschafft. Vor allem das transportierende Medium spielt für die Art des Sediments eine herausragende Rolle. Strömende Medien wie Flüsse, Wind oder Meereströmung sortieren ihr Transportmaterial entsprechend der Transportenergie, die im Wesentlichen von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Gletscher hingegen schieben Lockermaterial aller Korngrößen wie ein Schneepflug vor sich her, egal ob Kubikmeter große Findlinge oder feinen Staub. Innerhalb des sich unter Gletschern bildenden Sediments ist keine Schichtung zu erwarten, da der Bulldozer-Effekt eine materialabhängige Ablagerung ausschließt.

Die Gesamtheit der Eigenschaften, die Sedimente bei ihrer Bildung im Geflecht der geologischen Prozesse an der Erdoberfläche (sog. Exogene Dynamik) angenommen haben, heißen sedimentäre Fazies. Die verschiedenen Fazies werden meist nach ihren Bildungsräumen benannt. Eine Idee von dieser Vielfalt vermittelt Abbildung 4.2.

Einige wichtige Szenarien sind in Abbildung 4.3 herausgegriffen. Neben typischen Gesteinen und deren Merkmalen sind Summenkurven des Korngrößenspektrums klastischer Bildungen aufgezeigt. Sie werden im Abschnitt 4.2 erläutert.

4.2 Klastische Sedimente und Sedimentgesteine

Durch Verwitterung eines Gesteins separierte und dann transportierte und abgelagerte Körner bilden die klastischen Sedimente und Sediment-

4

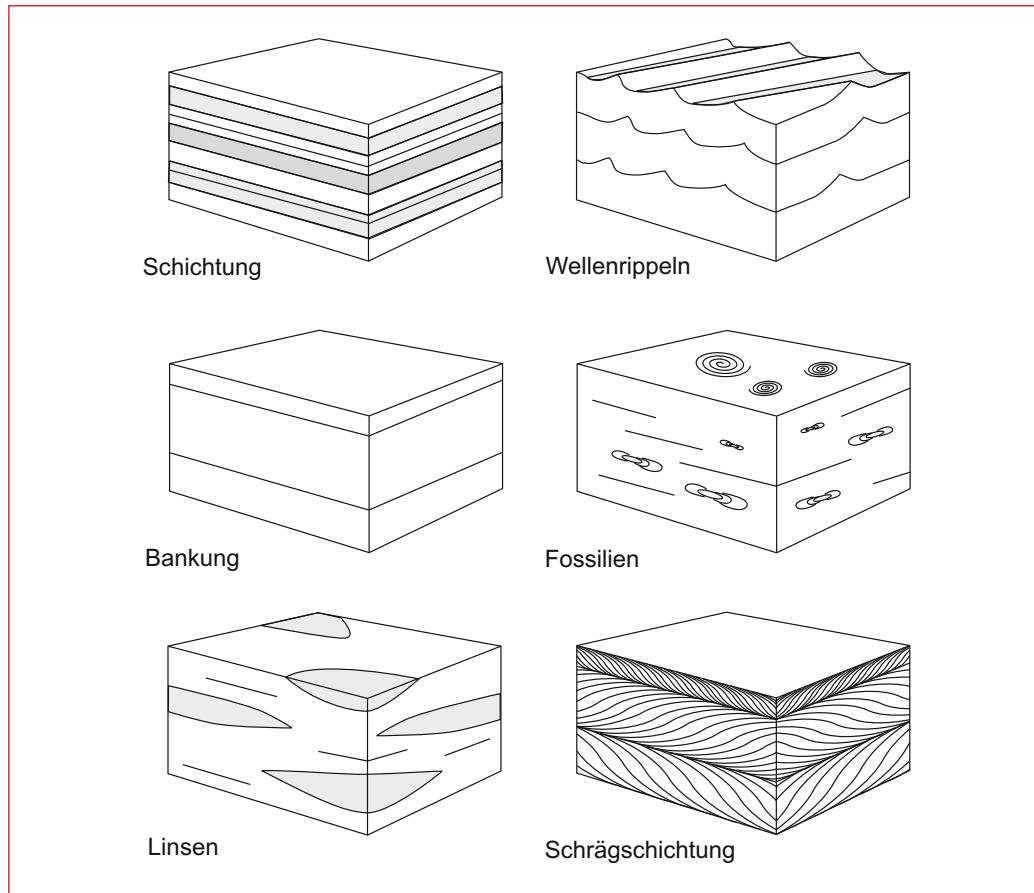


Abb. 4.1 Schichtungstypen und Sedimentstrukturen.

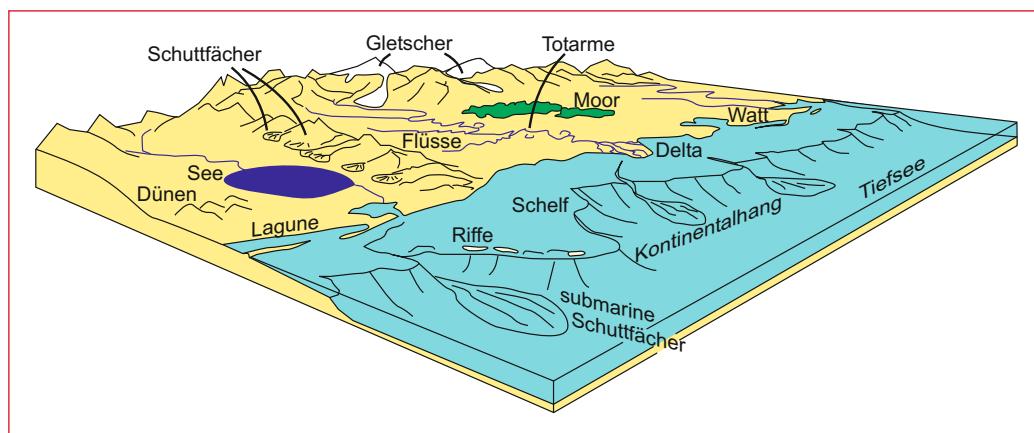


Abb. 4.2 Die Schauplätze der exogenen Dynamik – der geologischen Vorgänge auf unserem Planeten. Sie liefern die Bildungsräume für Sedimente. Nach Mojon (2006).

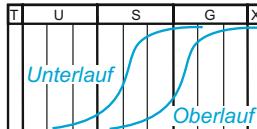
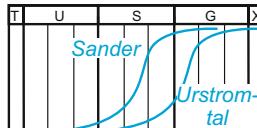
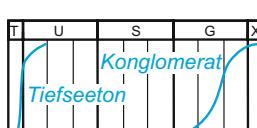
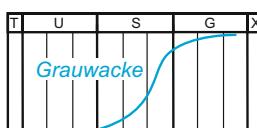
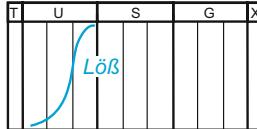
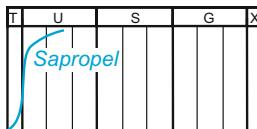
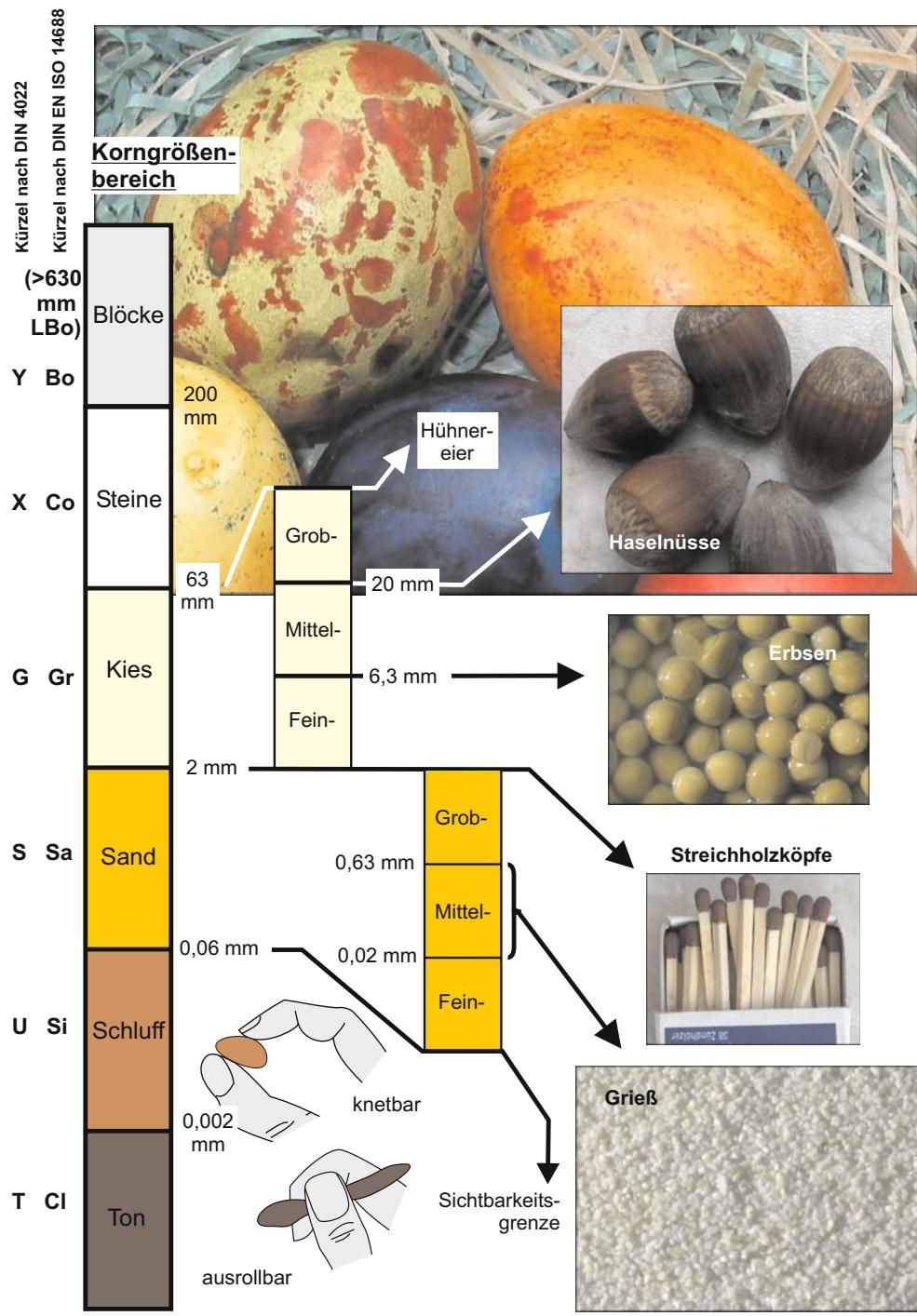
Ablagerungsraum (sedimentäre Fazies)	Korngröße klastischer Sedimente/ Beispiele	Typische Eigenschaften	Charakteristische Sieblinie
Fluss fluvial	Steine → Kies → Sand Flusschotter	gut sortiert Schrägschichtung	
Gletscher glazigen	Blöcke bis Ton Geschiebemergel Geschiebelehm mit Findlingen	unsortiert keine Schichtung	
Schmelzwasser glazifluviatil	Kies, Sand Schmelzwassersande	gut sortiert Schrägschichtung	
Meer marin	Kies Sand Schluff Ton tiefmarin Transgressions- konglomerat Sansteine, Tiefseeton Chemische Sedimente	gradierte Schichtung Meeresfossilien küstennah: Schrägschichtung Wellenrippeln	
Meer (Kontinentalhang)	Grauwacke- Tonschiefer- Wechsellagerung	schlecht sortiert	
Wind äolisch	Feinsand, Schluff Löß	sehr gut sortiert Schrägschichtung	
Seen limnisch	Feinsand, Schluff, Ton Biogene Sedimente Sapropel Torf	organogene Beimengungen	

Abb. 4.3 Die wichtigsten sedimentären Bildungs-(Fazies-)bereiche sowie charakteristische Eigenschaften der dort entstehenden Sedimente und Gesteinsbeispiele. Die Korngrößenspektren (Sieblinien) werden ausführlich in Abschnitt 7.1 behandelt. T, U, S, G, X beschreiben die Korngrößen Ton, Schluff, Sand, Kies und Steine (Abb. 4.4).



gesteine. Bei den Bestandteilen handelt es sich meist um silikatische Minerale. Wird das Gestein beispielsweise aus kalkigen Bruchstücken aufgebaut, dann wird es Kalkstein genannt und bei den biogenen oder chemischen Sedimenten mit behandelt.

Korngrößenklassifikation

Wenn hier von Bruchstücken (**Klasten**) die Rede ist, dann liegt es nahe die klastischen Sedimente nach der Größe ihrer Klasten einzuteilen. Die Korngröße ist die wichtigste Eigenschaft der klastischen Sedimente. Nicht nur, dass sie einem Sediment oder Lockergestein den Namen gibt, sondern die Korngrößenverteilung verschafft dem Material auch eine Vielzahl von Eigenschaften, die für die Anwendung von großer Bedeutung sind. Porosität und damit Wasserdurchlässigkeit, Frostempfindlichkeit und Verdichtbarkeit, aber auch die Fruchtbarkeit eines Bodens, Plastizität und Verformbarkeit, Bearbeitbarkeit und Bohrbarkeit sind abhängig von der Korngröße.

Die Korngrößenklassifikation wird heute recht übereinstimmend definiert. Vom Kleinen zum Großen sind das **Ton**, **Schluff** (= Silt), **Sand**, **Kies**, **Steine** und **Blöcke**. Ihre Abgrenzung und weitere Unterteilung ist Abbildung 4.4 zu entnehmen.

Eine praktische Zwischengruppierung ist die Zuordnung der genannten Kategorien in die Gruppe der **bindigen** Sedimente, die aufgrund ihres geringen Durchmessers und des großen Haftvermögens als klebrig und verbunden erscheinen und in die Gruppe der **nichtbindigen** (früher auch rollig genannten) **Lockergesteine** (oder Böden):

- Bindig: Ton, Schluff
- Nichtbindig: Sand, Kies, Steine, Blöcke.

Hier treffen wir auf eine wichtige Ausnahme was die Definition des klastischen Sediments anbelangt. Korngrößen unter 0,002 mm sind eigentlich keine Klasten, also Bruchstücke, sondern mineralische Neubildungen, die während der Verwitterung entstanden sind. Der Begriff „Ton“ ist somit zweideutig. Ton ist wie in Abbildung 4.4 gezeigt die Bezeichnung einer Korngröße. In Kapitel 2 war jedoch zu erfahren, dass Tonminerale

eine Mineralgruppe umfassen. Da die Tonminerale aber nicht größer als 0,002 mm werden und andere Minerale kaum so klein zermahlen werden, decken sich Mineralogie und Korngrößenansprache weitgehend. Während also die Korngrößen bis hinunter zum Schluff aus immer weiter aufgemahlenen Silikaten bestehen und der Schluff als Silikatmehl zu bezeichnen wäre, ist der feinere Ton mineralogisch und chemisch völlig andersartig. Damit sind vor allem sprunghaft höhere Adsorptionseigenschaften verbunden, die den Ton als Wasserstauer prädestinieren, ihn fruchtbarer und Wasser aufnahmefähiger machen und ihm die Eigenschaft der Thixotropie verleihen (Kapitel 2).

In den seltensten Fällen besteht ein Lockergestein (= Boden = Sediment) aus nur einer Korngröße. Meist handelt es sich um Mischmaterialien. Das heißt, dass ein einfacher Begriff wie Sand oder Kies für die Benennung eines Sediments häufig nicht ausreicht. Zunächst muss geklärt werden, welchen Anteil jede Korngröße am Sedimentkörper hat. Das kann man zum einen schätzen, und es gibt eine Vielzahl von Hilfen und Faustregeln. Ausschlaggebend ist allerdings die Erfahrung, die es Fachleuten mit jahrelanger Praxis ermöglicht, Korngrößenanteile auf 5% Volumenanteil zuverlässig zu schätzen. Eine Hilfe zur Lockergesteinsansprache liefert die Abbildung 4.5. Aus ihr ist auch ersichtlich (Dreieck oben rechts), dass ein Mischmaterial verschiedener Korngrößen als **Lehm** bezeichnet wird.

Beimengungen von Kalk führen zur Bezeichnung:

- Sand + Kalk = **Kalksandstein**
- Ton/Schluff + Kalk = **Mergel/Mergelstein**.

Zum anderen ist es für die Praxis unerlässlich die Korngrößenanteile exakt zu bestimmen. Das geschieht mittels Sieb- und Schlämmanalyse und wird im Kapitel 7.1 besprochen.

Ansprache der klastischen Sedimentgesteine

Natürlich können die klastischen Sedimente (= Lockergesteine = Böden) verfestigt werden und somit den Weg zum „richtigen“ Gestein ein-

4

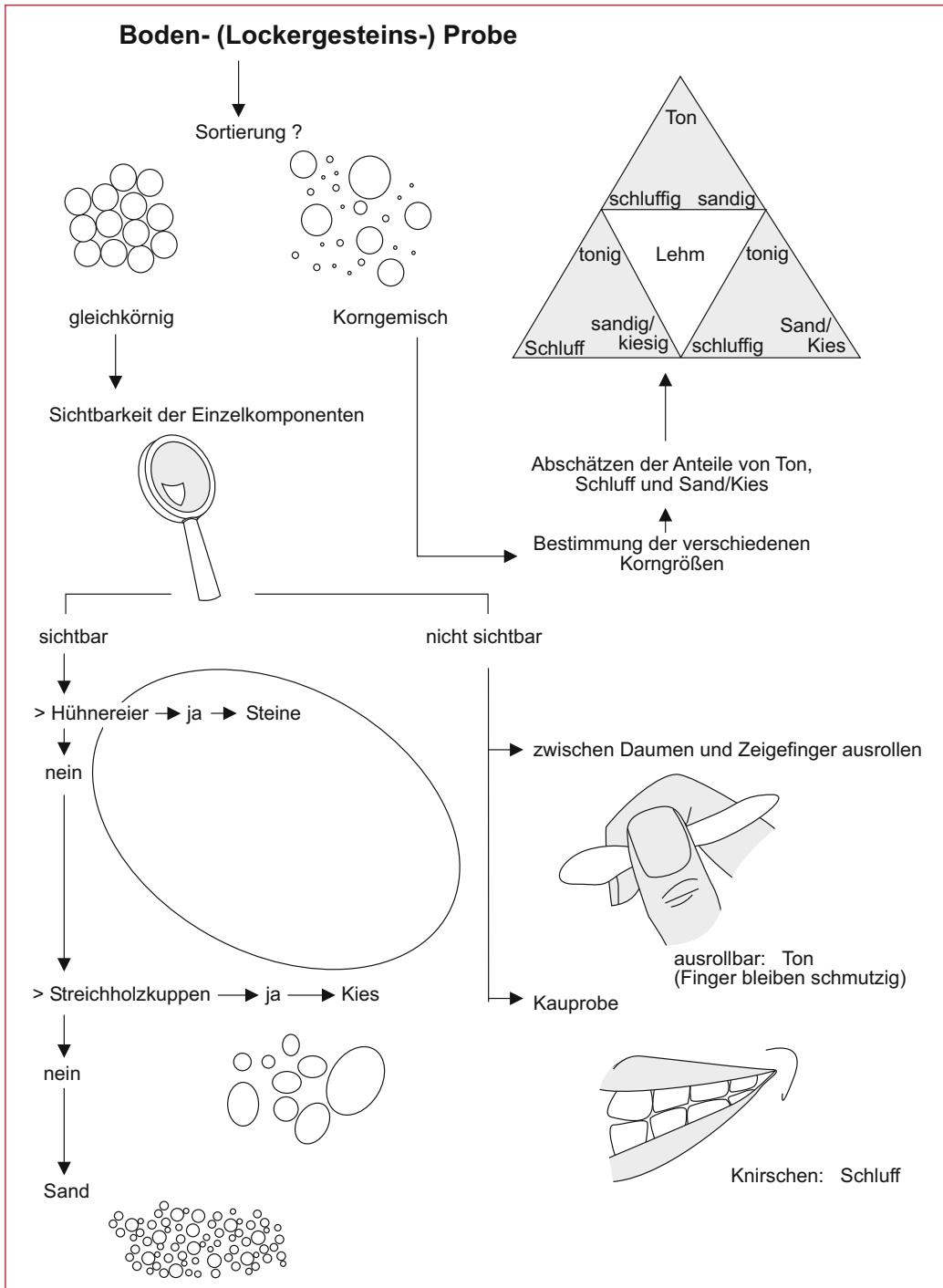


Abb. 4.5 Ansprache einer Bodenprobe.



Abb. 4.6 Konglomerat und Brekzie als die verfestigten Formen von Kies oder Steinen.

schlagen. Die Benennung ist zunächst einfach: Aus Ton wird **Tonstein**, aus Schluff wird **Schluffstein** und aus Sand wird **Sandstein**.

Wird aber aus Kies ein Kiesstein und aus Steinen ein Steinsteine? Natürlich nicht! Für alle klastischen Gesteine mit Korngrößen ab 2 mm Durchmesser gelten andere Begriffe. Dabei spielt nicht mehr die Größe der Komponenten, sondern ihre Form die herausragende Rolle.

Wurden die Einzelkomponenten intensiv transportiert und rund geschliffen, dann spricht man von **Konglomerat**. Sind die Bruchstücke kantig, so heißt das Gestein **Brekzie** (Abbildung 4.6). Soweit die Theorie.

Echte Brekzien mit echt kantigen Komponenten entstehen allerdings kaum im sedimentären Bereich. Ablagerung setzt fast immer zumindest einen kurzen Transportweg voraus. Schnell sind Ecken rund gebrochen und Kanten leicht abgeschliffen. Solche Bildungsräume sind vor allem Gebirgswüsten, wo die Gravitation die dominierende Transportkraft ist. Hier hat sich der Begriff **Fanglomerat** eingebürgert, eine Synthese aus dem englischen Fan, dem (Schutt-)Fächer, und dem Konglomerat.

Woher stammen dann aber die Brekzien? Häufig wird ein Gestein durch tektonische oder magmatische Vorgänge zerbrochen. Die entstandenen Bruchstücke sind dann, wie beim zerbrochenen Porzellan scharfkantig. Magmatische Lösungen, mobilisiertes Nebengestein oder eindringendes Sediment verkitteten die Bruchstücke meist an Ort und Stelle. Der häufigere Weg zur Entstehung der Brekzie.

Noch ein paar Bemerkungen zu den Sandsteinen. Manche Sandsteine entstehen unter besonderen Bildungsbedingungen, die dem Gestein spezielle Eigenschaften verpassen und daher eine andere Benennung rechtfertigen (Abb. 4.7).

Enthält der Sandstein nicht nur Quarzkörnchen, wie meist der Fall, sondern mindestens 25% Feldspat, dann spricht man von **Arkose**. Sie bildet sich meist in Wüsten, wo der Feldspat infolge des Wassermangels nicht hydrolysiert und zu Tonmineralen umgewandelt werden kann. Das Eisen ist in solchen Klimaten als Hämatit gebunden (Kapitel 2). Arkosen sind daher meist rot gefärbt.

Führt das Gestein neben Feldspat auch weitere Minerale und sogar ganze Gesteinsbruchstücke eines Altbestandes, nennt man es **Grauwacke**. Die Sortierung ist ausgesprochen schlecht. Neben der Hauptkomponente Sand können größere Anteile Schluff und Ton auftreten. Die Grauwacke ist das Gestein der Kontinentalabhänge.

4.3 Chemische Sedimentgesteine

Entstehung

Chemische Sedimente entstehen durch Ausfällung aus einer übersättigten Lösung. Sie verfesti-

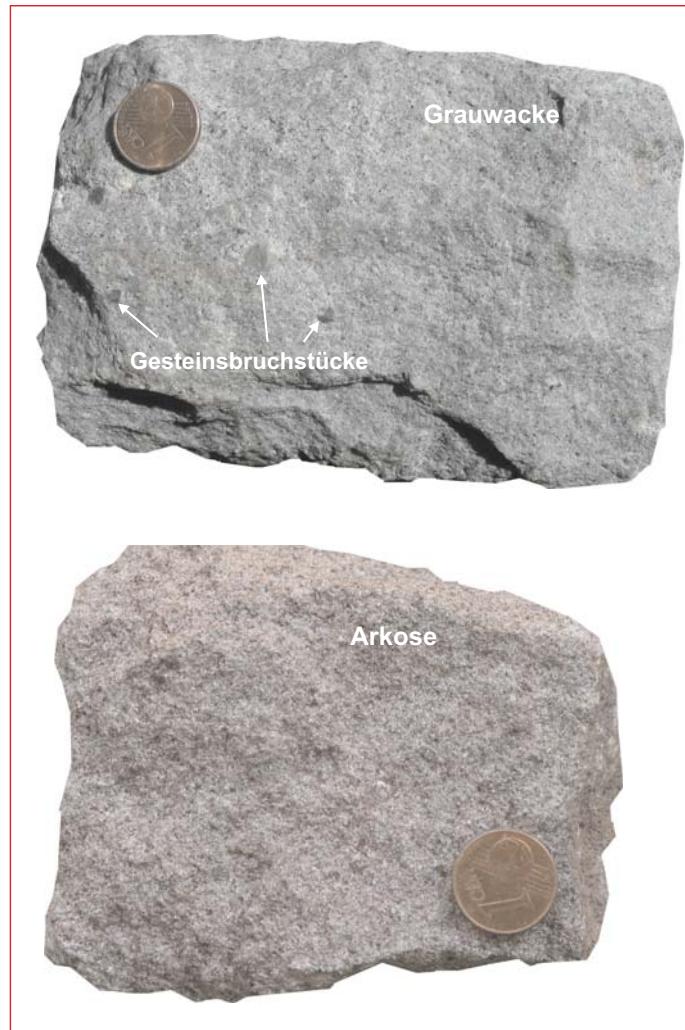


Abb. 4.7 Die Sandsteintypen Arkose und Grauwacke. Bei den weißen Punkten in der Arkose handelt es sich um kaolinisierten Feldspat.

gen sich sehr schnell, sodass die „Lockervarianten“ hier nicht besprochen werden müssen.

Zur Ausfällung kommt ein Stoff, wenn seine Konzentration im Lösungsmittel die Löslichkeit überschreitet. Das wird vor allem durch Verdunstung im Meer oder in kontinentalen Salzpfannen erreicht. Solche Eindampfungsgesteine heißen Evaporite.

Evaporite

Was ausfällt sind chemische Substanzen, also Minerale. Die entstehenden Gesteine werden nach dem häufigsten enthaltenen Mineral benannt. Die wichtigsten infrage kommenden Minerale sind in Tabelle 4.1 in der theoretischen Reihenfolge ihrer Ausfällung aufgeführt.

Da es sich bei diesen Gesteinen gleichzeitig um Minerale handelt, läuft ihre Bestimmung wie die der Minerale ab. Die Diagnose ist oben bereits festgehalten.

Tabelle 4.1 Die wichtigsten evaporitischen Minerale und Gesteine. Vom Mineralnamen abweichende Gesteinsnamen in Klammern.

	Mineral/Gestein	Formel	Diagnose
1. Sulfate	Anhydrit Gips	CaSO_4 $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Härte 3, grau, glasig Härte 2, weiß
2. Halogenide	Halit (Steinsalz) Sylvin (Kalisalz)	NaCl KCl	Geschmack (Kochsalz) Geschmack (schräfer als Kochsalz)

Weitere Chemische Sedimentgesteine

Auf chemischem Wege können zudem gebildet werden:

- Eisen-Gesteine: durch Fällung von Hämatit, Limonit oder Chlorit, oft als Oolith (Abschnitt 4.4),
- Kiesel-Gesteine: in der Umgebung von untermeerischen vulkanischen Quellen,
- Karbonat-Gesteine: einige Karbonate entstehen auf diesem nichtbiogenen Weg. Der **Travertin** bildet sich zum Beispiel an Quellen stark kalk- und kohlensäurehaltigen Süßwassers.

4.4 Biogene Sedimentgesteine

Entstehung

Unter biogenen Sedimentgesteinen werden hier alle Gesteine verstanden, die durch die biologische Aktivität von Organismen gebildet worden sind, egal ob sie das Sedimentmaterial in Form ihrer Körpersubstanz zur Verfügung gestellt haben oder eher als Katalysatoren gewirkt haben.

Bestes Beispiel ist das Karbonat, das auch rein chemisch gefällt werden kann. Aber nicht nur die Schreibkreide, die aus den winzigen Kalkplatten von Algen besteht, zählt in dieses Kapitel, sondern auch die meisten feinkörnigen, scheinbar abiotischen Kalksteine. Man hat herausgefunden,

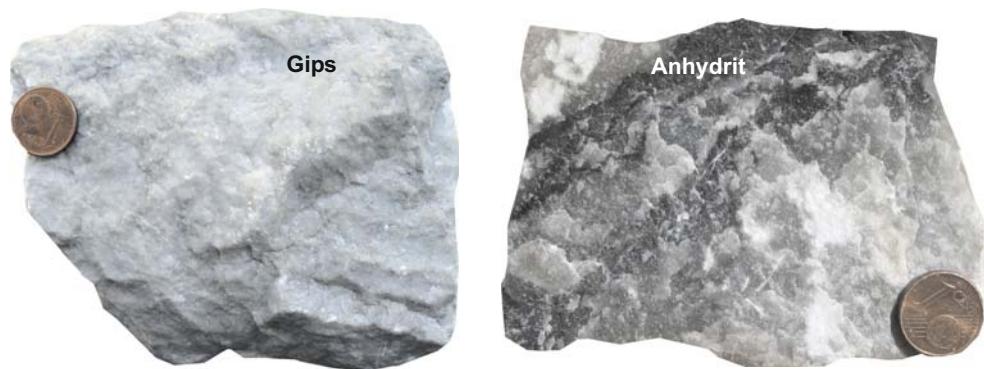


Abb. 4.8 Anhydrit und Gips.

4

dass meistens zumindest Bakterien an der Fällung von Karbonaten beteiligt sind.

Neben karbonatischem Material können Lebewesen kieselige, phosphatische und organische Substanz beisteuern. Danach gliedern wir:

Karbonatgesteine

Karbonatgesteine bestehen überwiegend aus Karbonat, einer Mineralgruppe die als gesteinsbildende Vertreter im Wesentlichen

- Calcit (Kalkspat) CaCO_3 und
- Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

umfasst. Alle aus Calcit aufgebauten Gesteine sind leicht durch den Salzsäuretest (Kapitel 2) zu entlarven. Schwieriger wird es mit dem Dolomit,

der in kalter Salzsäure kaum sprudelt und das CO_2 erst mit heißer Salzsäure wirklich freigibt.

Allgemeiner Ausdruck für alle sedimentären Gesteine aus Calcit ist **Kalkstein**, für alle dolomischen Gesteine **Dolomit oder Dolomitstein**.

Je nach Struktur oder Entstehung der Karbonatgesteine existiert jedoch eine Vielzahl spezieller Begriffe. Dazu ein paar Beispiele (Abb. 4.9):

- **Oolith:** Durch Fällung um in bewegtem Wasser schwimmende Kristallisationskeime entstanden. Es bilden sich bis mehrere Millimeter große Kugelchen, die Ooide.
- **Schreibkreide:** Sehr reiner, weißer Kalkstein aus den mikroskopischen Teilen von Kalkalgen.
- **Riffkalk:** Kalkstein aus den Skeletten Riff bildender Organismen wie z. B. Korallen und Schwämme.
- **Schillkalk:** Kalkstein aus den Skeletten Schalen tragender Organismen, z. B. Muschelschill.

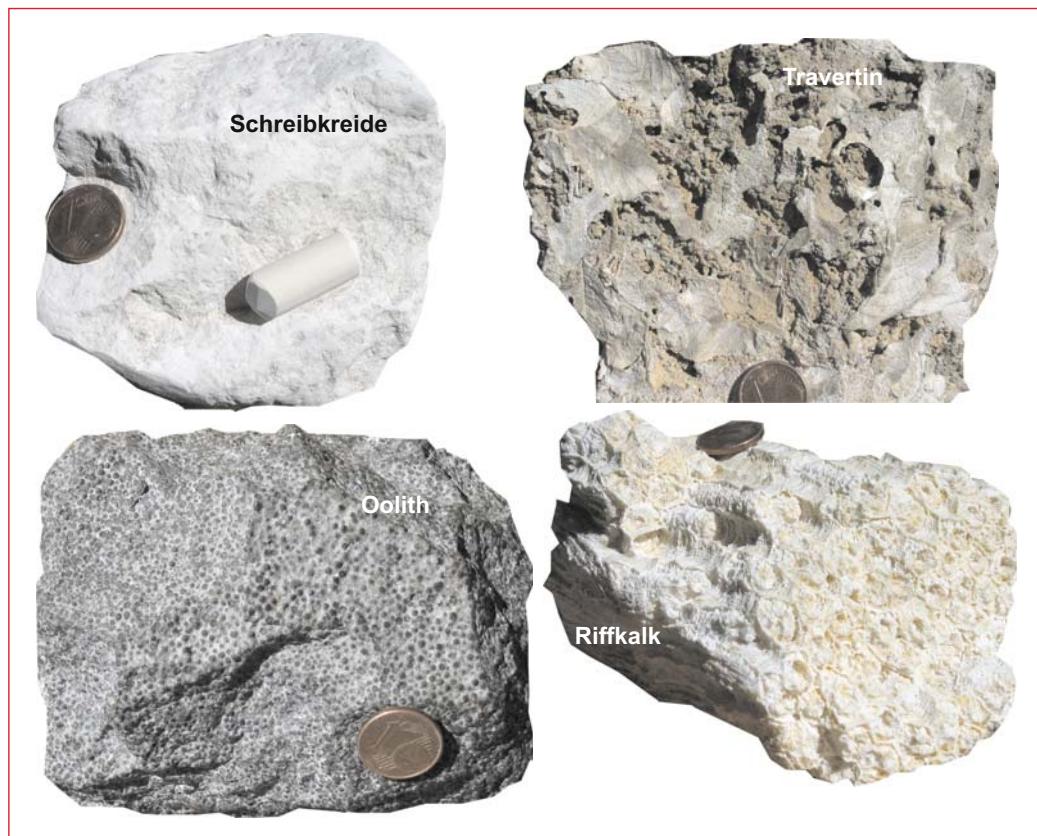


Abb. 4.9 Die Kalksteinvarietäten Oolith, Schreibkreide, Riffkalk und Travertin.

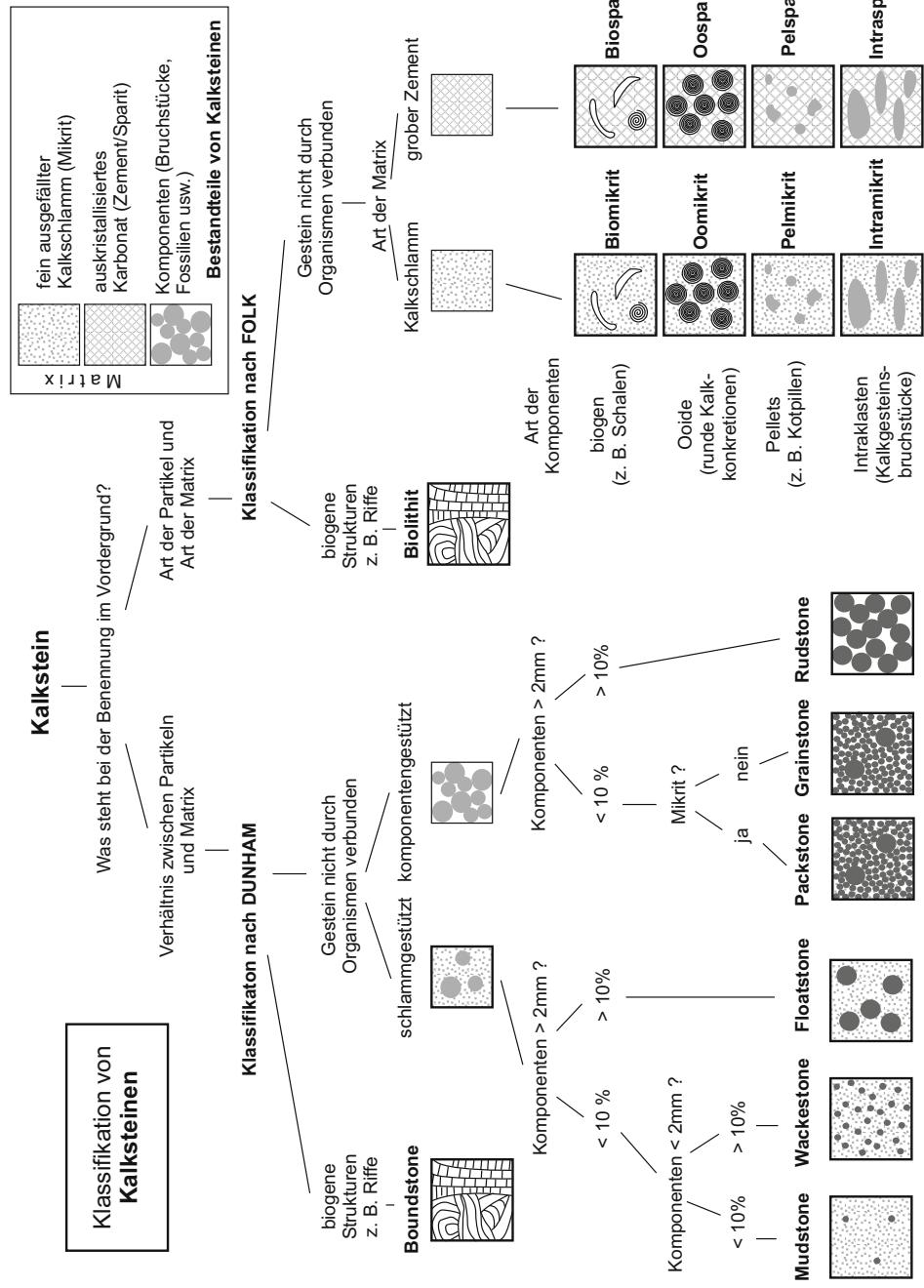


Abb. 4.10 Karbonatbezeichnung auf Grundlage der Mikrofaziesanalyse (nach FLÜGEL 2004).

4

Vor allem in warmen Meeren tun sehr verschiedene Lebensformen ihr Werk, um die im Detail vielfältigsten Karbonatgesteine zu produzieren. Auf den ersten Blick merkmalsarm, offenbaren sie unter dem Mikroskop doch eine immense Fülle an Information. Der Geologe kann so alles über ihre Entstehung erfahren. Er bedient sich dabei der **Mikrofaziesanalyse**. Die Begriffe der Gesteinsansprache aus der Mikrofaziesanalyse sind teilweise zum festen Bestandteil der Petrographie geworden und sollen deshalb in Abbildung 4.10 kurz beleuchtet werden.

Kieselige Sedimentgesteine

Organismen die kieselige Substanz bilden, sind vor allem Algen und Schwämme. Die wichtigsten Gesteine sind:

- **Kieselgur:** Entsteht im Süß- und Salzwasser aus den Skelettteilchen von Kieselalgen (Diatomeen). Er ist sehr porös und leicht und wird deshalb zur Herstellung von Dynamit und zum Filtern von Bier verwendet.
- **Radiolarit:** Dichtes, meist schwarzes Kieselgestein aus marinen Kieselalgen (Radiolarien). Als so genannter **Kieselschiefer** kommt er häufig in mitteleuropäischen Schiefergebirgen vor (Abbildung 4.11).



Abb. 4.11 Kieselschiefer (Radiolarit).

Phosphatische Sedimentgesteine

Sie spielen in Europa nur eine untergeordnete Rolle und werden daher nur kurz erwähnt. Der wichtigste Vertreter ist der **Phosphorit**, der als marine Bildung in Form von knolligen und unregelmäßigen, dunkelbraunen oder schwarzen Massen aus feinstem Apatit vorkommt.

Organogene Sedimentgesteine

Streng genommen dürfte diese Gruppe gar nicht als Gestein bezeichnet werden. Ein Gestein wird meist als natürliches Mineralgemenge definiert und Minerale wiederum sind per Definitionem anorganisch (Kapitel 2 und 3). Aber wir machen eine Ausnahme.

Ausgangspunkt für diese Gesteinsgruppe ist das pflanzliche Material, welches sich in Mooren akkumulieren kann und nach einer Bedeckung mit Sand und Ton und einer möglichst starken Versenkung beginnt sich umzuwandeln. Die organische Substanz darf dabei weder vollständig oxidiert werden, also verwesen, noch unter völligen Sauerstoffabschluss geraten und verfaulen. Der kompliziert ablaufende Prozess der **Inkohlung** entfernt aus der Pflanzensubstanz nach und



Abb. 4.12 Phosphoritknolle mit Schneckenfossil, ehemaliger Tagebau Espenhain, südlich Leipzig.



Abb. 4.13 Die Inkohlungsreihe im Bild. Torf, Braunkohle und Steinkohle.

nach den Wassergehalt und reichert den Kohlenstoff an.

Im Verlauf der Inkohlung entsteht aus der Pflanze:

Torf → Braunkohle → Steinkohle → Anthrazit.

Das darauf folgende Stadium der Bildung von **Graphit**, und zugleich Endglied des Wandels von belebter zu unbelebter Natur (denn Graphit ist ein Mineral mit der Formel C), kann nur durch Metamorphose erreicht werden.

Die Grenzen zwischen Torf und Braunkohle sowie zwischen Braunkohle und Steinkohle sind fließend und das Erscheinungsbild hängt sehr stark von der Ausgangssubstanz ab. Holzreiches Material sieht noch als Braunkohle wie Holz aus, während holzarme (ligninarme) Pflanzenteile viel schneller destruiert und homogenisiert werden. Auch der Glanz, an der man die Steinkohle erkennt, ist stark abhängig vom Ausgangsmaterial.

Eine halbwegs objektive Zuordnung kann nur durch die Bestimmung des Wassergehalts getroffen werden.

Aufgaben

1. Lebensmittel eignen sich hervorragend für die Veranschaulichung geologischer Sachverhalte. Grieß, Haselnüsse und Hühnereier sind ganz offizielle Vergleichsgrößen bei der Korngrößenabschätzung. Aber der Küchenschrank gibt noch mehr her: Kaffee, gemahlen oder als Bohnen, Erbsen, Linsen, Reis, Graupen, Zucker, Salz ... Alle warten darauf als ein klastisches Sediment angesprochen zu werden!
2. Geben Sie den Gesteinen (fest) mit folgenden Eigenschaften einen Namen!
 - a) eckige Komponenten mit Durchmesser von 5 mm bis 10 cm,
 - b) verfestigter Quarzsand mit viel kalkigem Bindemittel,
 - c) braust mit Salzsäure, besteht aus 2 mm großen konzentrisch aufgebauten Kugelchen,
 - d) weiß, mit Fingernagel gerade noch ritzbar, keine Reaktion auf Salzsäure.
3. Benennen Sie folgende Kalksteine auf der Grundlage einer Faziesanalyse nach DUNHAM und FOLK!

4

- a) 30% Kalkschlamm, 70% Ooide (< 2 mm), Komponenten stützen Gefüge,
- b) 20% Kalkgesteinbruchstücke (5–50 mm), 80% Kalkschlamm,
- c) 50% Organismenschalen (1–2 cm) in 50% auskristallisierter Matrix, Schalen berühren sich,
- d) poröser Kalkstein aus fossilen Korallen.

5 Magmatische Gesteine

5.1 Entstehung und Eigenschaften

Entstehung

Magmatische Gesteine entstehen durch Erstarrung geschmolzenen Gesteins, dem **Magma**. Magmatismus setzt also voraus, dass Gestein zunächst zur Aufschmelzung kommt. Das passiert dort, wo

- heiße Konvektionsströme im Erdmantel aufsteigen und Material des Mantels oder der Kruste stark erhitzen

- Gesteinsmaterial mit relativ geringer Schmelztemperatur durch tektonische Prozesse in tiefere und heißere Bereiche transportiert wird.

Somit ist Magmatismus eng an die Vorgänge der Plattentektonik geknüpft. Abbildung 5.1 skizziert einen Überblick über die prinzipiellen Bildungsmechanismen von Magmatiten. Die Bildungsumstände dieser **magmatischen Provinzen** bedingen den Chemismus der Schmelze und damit die Gesteinsart nach der Erstarrung. Wenn beispielsweise zwei Kontinente kollidieren, dann kann die Mächtigkeit der kontinentalen Kruste verdoppelt werden. Kruste, die bereits bei 750°C aufschmilzt, gerät dabei in größere Tiefen und somit heißere Bereiche. Bei Überschreiten der

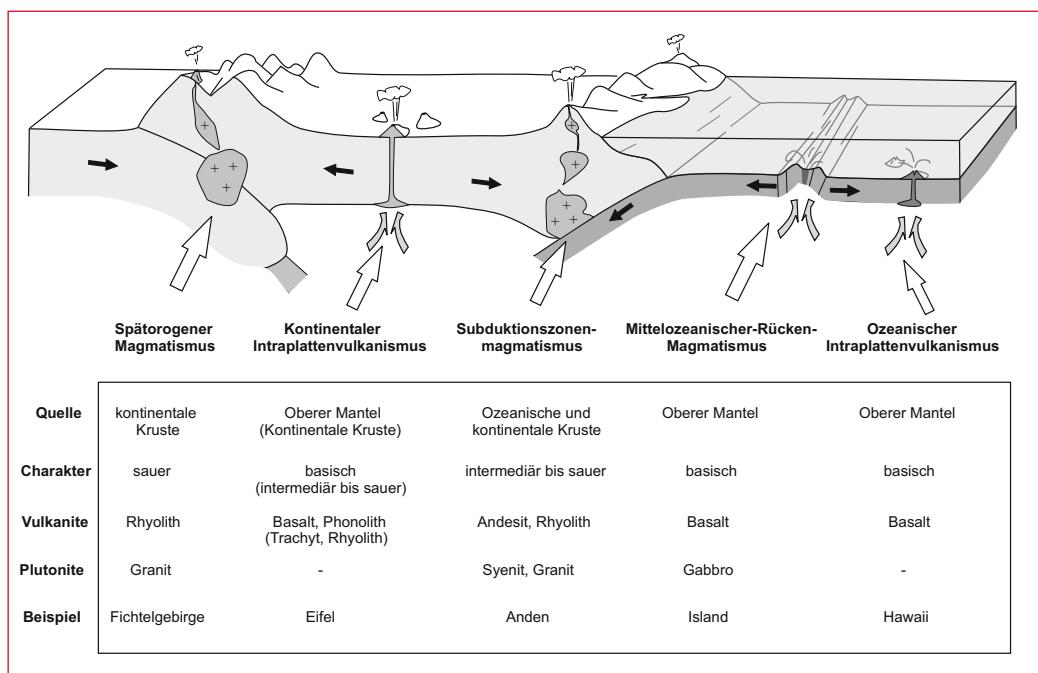


Abb. 5.1 Vorgänge der Plattentektonik und die prinzipiellen Bildungsmöglichkeiten magmatischer Gesteine.

5

Schmelztemperatur bilden sich daher Magmen mit der Zusammensetzung der kontinentalen Kruste – granitische, saure Schmelzen entstehen. Wenn dagegen heißes Material des Erdmantels aufsteigt oder ozeanische Kruste aufschmilzt – die eine ähnliche Zusammensetzung aufweist, wie der Mantel – dann werden basaltische, basische Magmen generiert (Schmelztemperatur über 1000 °C).

Allerdings wirkt ein weiterer Vorgang entscheidend auf die spätere Gesteinszusammensetzung. Ist das Gestein einmal geschmolzen, dann ist es meist leichter als seine Umgebung und erfährt einen Auftrieb. Dabei kann das Magma sich gewissermaßen durch die Kruste hindurch fressen und auch Nebengestein fremder Zusammensetzung aufschmelzen und in sich aufnehmen, assimilieren. Gleichzeitig kühlst das Magma ab, wobei Minerale mit hoher Schmelztemperatur zuerst auskristallisieren. Bei diesem Vorgang wird das Magma in frühere und spätere Kristallisationsate separiert – es differenziert sich. Magmendifferenzierung ist vor allem bei langen Aufstiegs wegen, wie an Subduktionszonen, zu beobachten (Abb. 5.1).

Chemischer Charakter

Worin unterscheiden sich nun diese Schmelzen und die daraus entstehenden Gesteine? Wie in Kapitel 1 gezeigt, unterscheiden sich kontinentale Kruste und ozeanische Kruste bzw. oberer Mantel immens. Durch die Dichtetrennung während des Frühstadiums der Erde ist die kontinentale Kruste aus leichteren Elementen und Mineralen aufgebaut als der Erdmantel und seine Haut aus ozeanischer Kruste. Dieser Unterschied beruht vor allem auf den Anteilen an Silizium, Aluminium und Eisen. Der Siliziumgehalt ist das herausragende Kriterium bei der Klassifizierung magmatischer Gesteine und wird als SiO_2 angegeben. SiO_2 -reiche Gesteine (kontinentale Krus-

te) werden als sauer, SiO_2 -arme Gesteine (ozeanische Kruste, Mantel) als basisch oder ultrabasisch bezeichnet. Vermischte Magmen oder solche, die durch Differenzierung aus basischen Magmen hervorgingen (Subduktionszonen), liegen dazwischen, sind intermediär (Tabelle 5.1).

Magmatische Bildungsräume und Gefüge

Der SiO_2 -Gehalt eines Gesteins kann, wie weiter unten zu sehen sein wird, an der Mineralzusammensetzung erkannt werden. Neben dieser stofflichen Eigenschaft spielt bei der Identifizierung magmatischer Gesteine das Gefüge eine Rolle. Diese Anordnung und Ausbildung der einzelnen Minerale ist abhängig vom Erstarrungsort des Magmas. Einen Überblick über die Formen magmatischer Bildungen liefert Abbildung 5.2. Für die Gesteinsansprache ist die Unterscheidung in **Plutonite** (Erstarrung in mehr oder weniger großen Körpern in der Tiefe), **Vulkanite** (Erstarrung an der Erdoberfläche als Folge eines vulkanischen Ereignisses) und **Ganggesteine** (irgendwo dazwischen) wichtig.

Grundsätzlich zeichnet sich ein magmatisches Gestein durch die regellose Anordnung seiner Minerale aus. Egal von welcher Seite man es betrachtet, es sieht immer gleich aus (Abb. 5.3). Das liegt daran, dass das Magma zwar unter äußerem Druck stehen, ausgequetscht und in bestimmte Formen gepresst werden kann. Aber anders als feste Gesteine bei der Ausbildung der Schieferung, kann die Flüssigkeit selbst keiner Differenzialspannung (Stress, „gerichteter Druck“) unterliegen. Ebenso sind gravitative Prozesse, die bei den Sedimenten so wichtig sind, stark eingeschränkt. Ausnahmen vom Prinzip der Regellosigkeit ergeben sich logischerweise dort, wo die genannten Prozesse (Stress, Gravitation) ihren Einfluss wiedererlangen. Spannungsdifferenzen können wirken, wenn das Magma beina-

Tabelle 5.1 Chemischer Charakter magmatischer Gesteine.

Charakter	sauer	intermediär	basisch	ultrabasisch
Gew.-% SiO_2	> 63 %	63 – 52 %	52 – 45 %	< 45 %

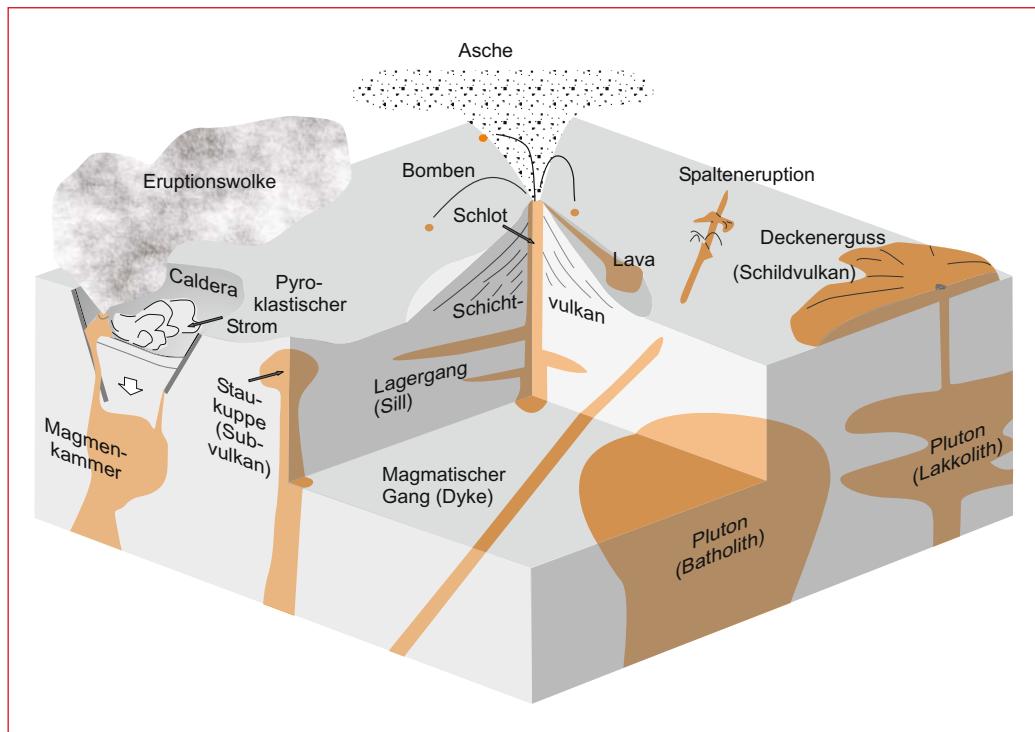


Abb. 5.2 Formen magmatischer Bildungen.

he erstarrt und sehr zäh flüssig geworden ist: hier bilden sich Fließgefüge. Oder wenn Magma bei einem Vulkanausbruch zu einzelnen Partikeln „zerstäubt“ wird und der Schwerkraft gehor- chend somit de facto als Sediment abgelagert wird (z. B. Aschetuffe).

Während Magmatite also (fast) immer regellos sind, existieren dennoch Unterschiede im Gefüge. Hier ist die Tiefe der Magmenerstarrung entscheidend. Generell gilt: je tiefer und je geringer der Temperaturunterschied zum Nebengestein umso grobkörniger das Gefüge. Konnte das Mag-



Abb. 5.3 Ein simpler Pflasterstein offenbart die Regellosigkeit magmatischer Gefüge. Die Anordnung der Minerale ist von allen Seiten gleich (Granodiorit, Demitz-Thumitz/Lausitz). Zum Vergleich ein metamorphes Gestein mit einer deutlichen Anisotropie. Dieser Gneis ist aus dem Granodiorit hervorgegangen (Freiberg/Erzgebirge).

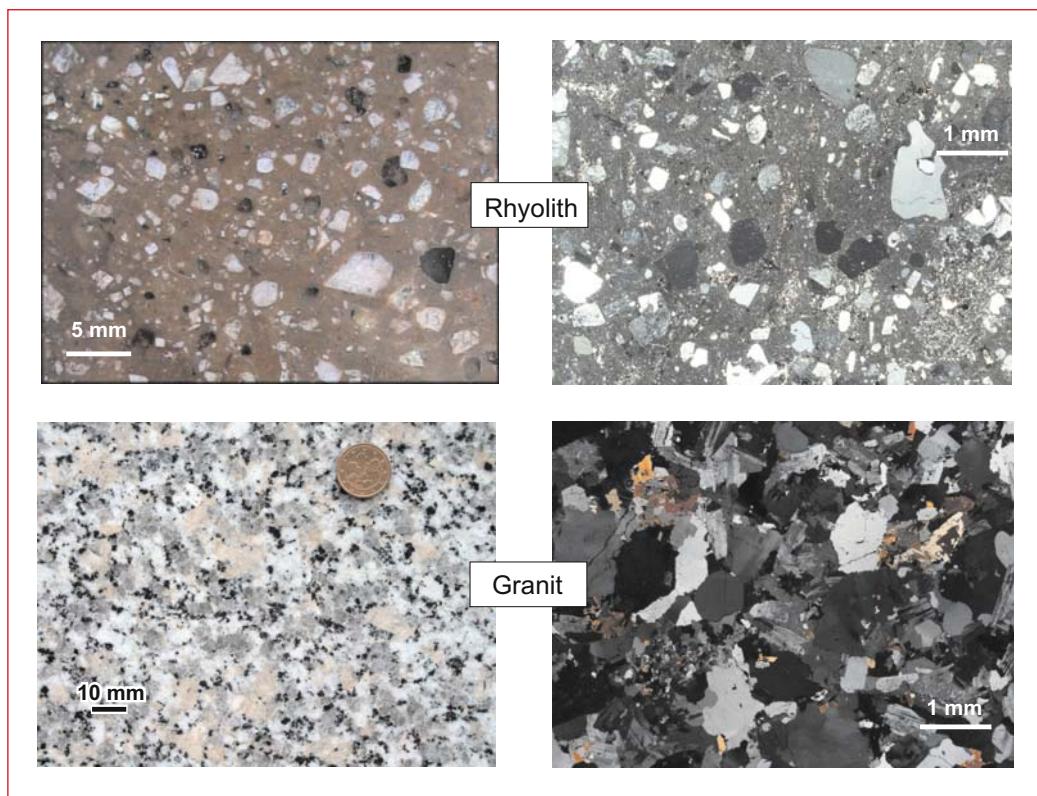
5

Tabelle 5.2 Die Eigenschaften magmatischer Gesteine in Abhängigkeit von ihrem Bildungsraum.

Bildungsraum	Gleichkörnigkeit	Kristallgröße
Vulkanit	ungleichkörnig	Matrix: feinkörnig oder nicht-kristallin (glasig) Einsprenglinge: grobkörnig
Ganggestein	ungleichkörnig oder gleichkörnig	mittlkörnig
Plutonit	gleichkörnig	grobkörnig

ma langsam abkühlen und hatte es damit Zeit zur Auskristallisation oder nicht? Für einen Plutonit heißt das: ja, es hatte! Und zwar gilt das für alle beteiligten Minerale – das Gefüge ist gleichkörnig. Vulkanische Magmen, Laven, sind meist etwas „vorkristallisiert“ bevor sie an der Erdoberfläche schnell erstarrten. Typisch für sie ist somit

ein Gefüge mit dichter, für das bloße Auge meist nicht als kristallin erkennbarer Grundmasse und darin eingelagerten gut sichtbaren Kristallen, den Einsprenglingen. Man spricht vom **porphyrischen Gefüge**. In Tabelle 5.2 werden die Gesteinseigenschaften der magmatischen Bildungsräume vereinfacht zusammengefasst.

**Abb. 5.4** Der grundsätzliche Unterschied zwischen vulkanischem (oben) und plutonischem Gestein (unten) in angeschliffenen Handstücken (links) und Dünnschliffen (rechts).

Vulkanische Förderprodukte

Meist geht man bei der Betrachtung magmatischer Gesteine davon aus, dass ein Magma in der Tiefe erstarrt oder als Lava am Vulkan ausfließt. Viele magmatische Bildungen sind jedoch durch Ablagerung einzelner Magmenfetzen und -partikel entstanden. Verantwortlich hierfür sind im Magma enthaltene Gase, die beim Vulkanaus-

bruch ähnlich wie beim entkorken einer Sektflasche den magmatischen „Sekt“ in Stücke reißen. Eine Vielzahl der heutigen Begriffe für solche Bildungen ist genetischer Natur. Das heißt, erst detaillierte Untersuchungen liefern uns die genauen Bildungsbedingungen des Gesteins (Abb. 5.5). Daher an dieser Stelle (Tabelle 5.3) nur ein kleines Lexikon zu den Bezeichnungen vulkanischer Förderprodukte.

Tabelle 5.3 Kleines Lexikon vulkanischer Förderprodukte.

Base Surges	Partikeltransport in dampfreichen grundnahen Wolken (in phreatomagmatischer Eruption)
Bimsstein	aufgeschäumte SiO_2 -reiche Lava, glasig erstarrt
Fallout	abgeregenes Material aus Aschewolke (Plinianische Ausbrüche)
Fiamme	geschmolzene Bimsstein-Lapilli
Lahars	wasserreiche vulkanische Schutt- und Schlammströme, Wasser stammt aus geschmolzenem Eis oder Regen
Phreatomagmatische Eruption	explosionsartige Eruption nach Kontakt von Magma mit Grundwasser
Pyroklastit	vulkanische klastische Gesteine
Pyroklastischer Strom	heißer Partikel- und Gasfluss in Bodennähe nach Kollaps einer Eruptionswolke oder bei seitlicher Ausbreitung über den Kraterrand
a) Ignimbrit	Glaspartikel mit niedriger Dichte (Bimsstein); durch Gas aufgetrieben; unsortiert; mit Asche, Kristallen und Gesteinsbruchstücken vermischt (in manchen Ländern auf geschmolzene Ablagerungen beschränkt)
b) Schmelztuff/ Schmelzignimbrit	Partikel so heiß, dass sie verschmelzen
c) Block-and-ash-flow	blasenarme, dichte Partikel, viskos
d) Surges	niedrige Dichte, hoher Gasgehalt, schnelles und turbulentes Fließen
Tephra i. e. S.	vom Schlot wegtransportiertes festes Material
Tephra i. w. S.	unverfestigte Ablagerung vulkanischen Materials (stammt von Aristoteles) Unterteilung nach Korngröße: Asche < 2 mm Lapilli 2–64 mm Bomben (plastisch deformiert), Blöcke (fest) > 64 mm
Tuff	verfestigte Tephra (Aschetuff, Lapillituff, ...)
Tuffit	Tuff mit sedimentär-klastischen Bestandteilen
Vulkaniklastika	originale oder umgelagerte Tephra

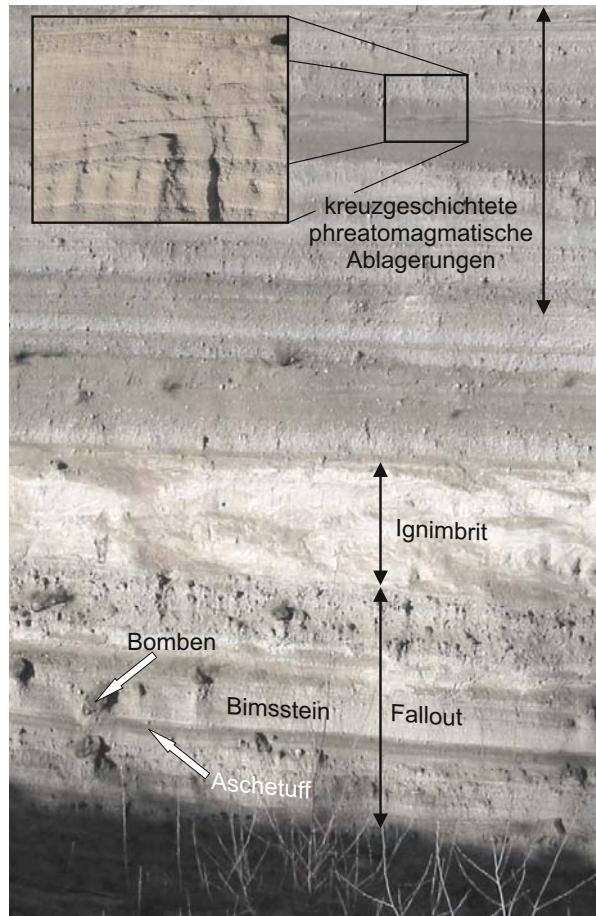


Abb. 5.5 In der Tephra des Vulkanaustrichts vom Lacher Maar in der Eifel vor ca. 13000 Jahren stecken genetisch verschiedene Bildungen.

5.2 Das QAPF-Doppel-dreieck („Streckeisen-Diagramm“)

Man kann heute getrost von mehreren Hundert Gesteinsnamen für Magmatite ausgehen. Für viele Gesteinsnamen gibt es Synonyme, z. B. Lokal- oder Regionalnamen. Eine straffe Systematik, die international anwendbar ist, bringt da Abhilfe. Wir können uns glücklich schätzen, dass ein solches Schema für magmatische Gesteine nicht nur existiert, sondern auch zu einem internationalen Regelwerk geworden ist.

ALBERT STRECKEISEN veröffentlichte 1976 eine Arbeit die übersetzt den Titel trägt „Zu

jedem plutonischen Gestein den richtigen Namen“. Später ist dieses Werk fortgesetzt worden und gipfelt in der vorläufig letzten Fassung von LE MAITRE u. a. aus dem Jahr 2004. Die dort gemachten Vereinbarungen zur Benennung von Magmatiten sind Standard der International Union of Geological Sciences (IUGS). Dieses Regelwerk gilt für alle Magmatite, so exotisch sie auch sein mögen. Kondensiert man daraus den für mitteleuropäische Verhältnisse wichtigen Kern heraus, dann bleibt ein Schema übrig, das richtig gesprochen Quarz-Alkalifeldspat-Plagioklas-Foid-Diagramm (QAPF) heißt, aber häufig nach seinem Urvater Streckeisen-Diagramm genannt wird.

Die Abbildung 5.6 zeigt wie bei der Benennung beispielsweise eines Plutonits vorgegangen

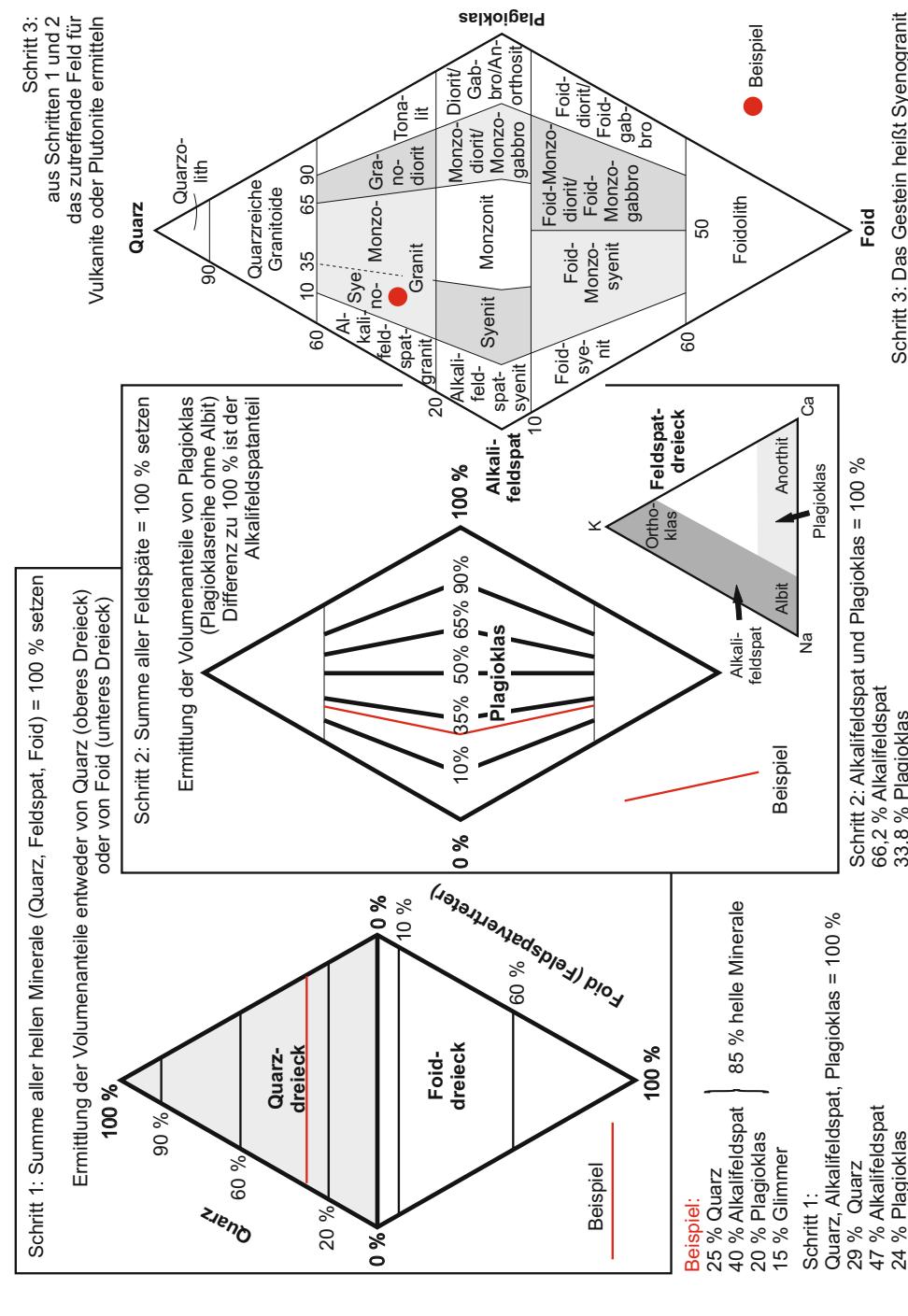


Abb. 5.6 Bestimmung magmatischer Gesteine im QAPF-Doppeldreieck („Strecken-Diagramm“) am Beispiel eines Plutonits (auf Grundlage von LE MAITRE et al. 2004).

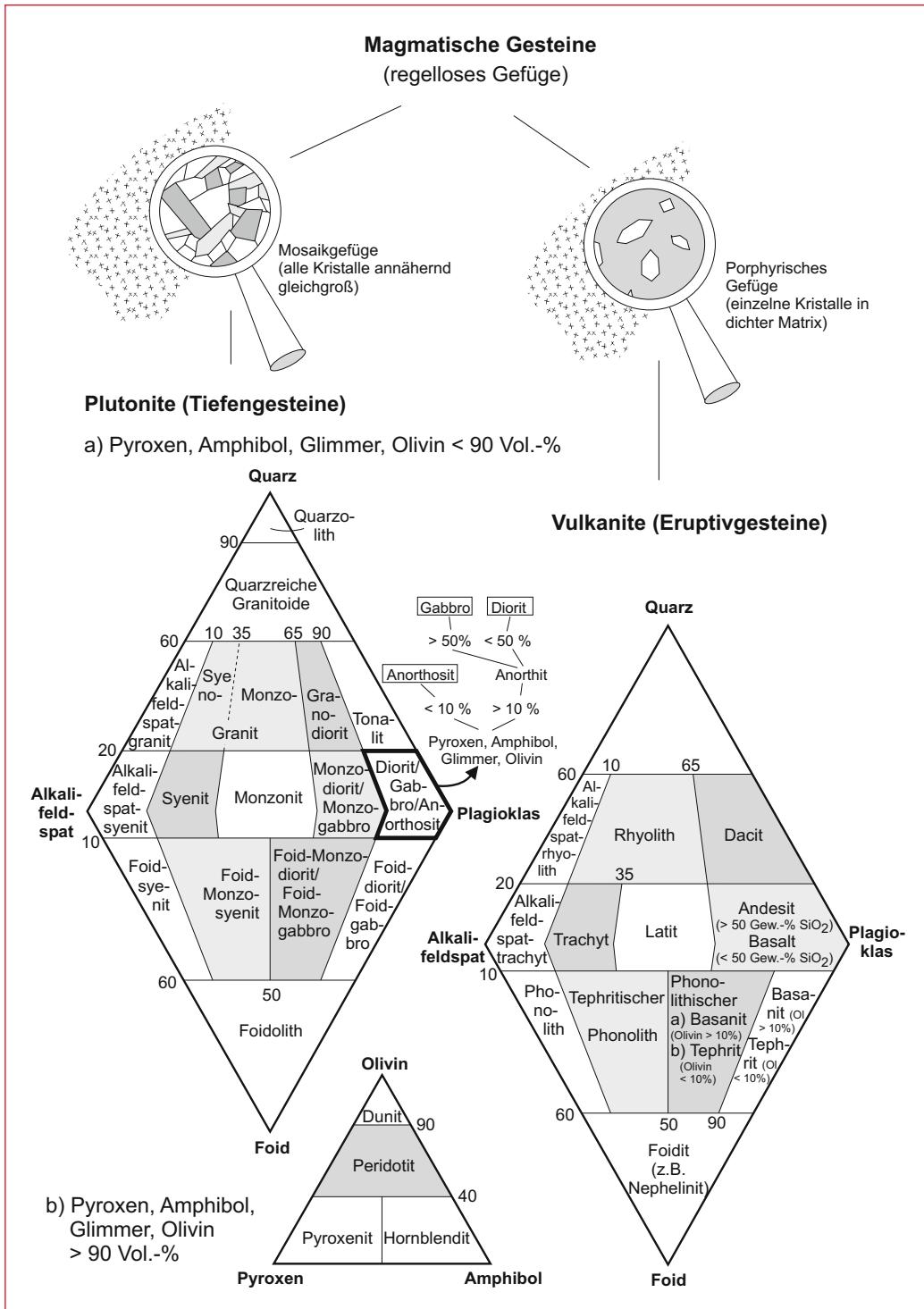


Abb. 5.7 Die Ansprache magmatischer Gesteine, vereinfacht nach LE MAITRE et al. 2004.

wird. Voraussetzung ist, dass der Anteil der dunklen Minerale (vor allem Pyroxen, Amphibol, Glimmer, Olivin) am Gestein 90 Vol.-% nicht übersteigt. Die Hellminerale Quarz, Feldspat und Foid werden zunächst gleich 100 Vol.-% gesetzt. Da sich im Gestein Quarz (SiO_2 -reiches Magma) und Foid (SiO_2 -armes Magma) ausschließen, ist danach zu entscheiden in welchem der beiden Dreiecke man sich befindet (Quarz oben, Foid unten). Der Quarz- oder Foidgehalt kommt nun einer Linie im Diagramm gleich. Eine zweite Linie wird errichtet, indem der Plagioklasanteil ins Schema eingetragen wird. Was als Plagioklas zählt und was als Alkalifeldspat gerechnet wird, zeigt das Feldspatdreieck. Der Schnittpunkt der beiden Geraden ergibt dann die Lage des Gesteins im Streckeisen-Diagramm. Dieser Punkt liegt in einem bestimmten Feld, für das die IUGS einen oder mehrere Namen vorgesehen hat. Stehen mehrere zur Debatte wie beispielsweise Diorit/Gabbro/Anorthosit, dann müssen weitere Kriterien geprüft werden. Den kompletten, aber etwas abgespeckten Überblick zur Magmatitbenennung liefert die Abbildung 5.7. Ergänzend für den Fall, dass dunkle Minerale mehr als 90 Vol.-% ausmachen, ist das Olivin-Pyroxen-Hornblende-Dreieck beigefügt.

Soweit die offizielle Benennung der magmatischen Gesteine mit gleichkörnigem (Mosaik-) Gefüge (Plutonite) und porphyrischem Gefüge (Vulkanite). Bei der Benennung der Ganggesteine geht man davon aus, dass dieses Material meist die feinkörnige Variante des plutonischen Äquivalents darstellt. Aus diesem Grund leitet sich der Name des Ganggesteins aus der Bezeichnung für den Plutonit mit gleichem Mineralbestand unter Voranstellung von „Mikro-“ ab. Aus Gabbro wird Mikrogabbro, aus Granit wird Mikrogranit.

5.3 Feldansprache

Sicher sind bei der Betrachtung des IUGS-Regelwerks auch dessen Grenzen für die Feldansprache klar geworden. Für eine zuverlässige Bestimmung muss der Bearbeiter also erstens den Mineralbestand zweifelsfrei bestimmen können. Spätestens bei der Unterscheidung der Feldspäte in Alkali-

und Plagioklas-Feldspäte wird auch der mit allen Wassern gewaschene Fachmann an seine Grenzen kommen. Und zweitens muss dieser Mineralbestand auch akkurat quantifiziert werden. Für die mikrokristalline Matrix der Vulkanite ist beides ein Unding bei der Bestimmung mit bloßem Auge oder einer Lupe. Einige Unterscheidungen nach IUGS erfordern zudem auch eine chemische Analyse des Gesteins, wie beispielsweise den Na_2O - und K_2O -Gehalt. So stringent das in Abschnitt 5.2 gezeigte Verfahren auch ist, im Gelände ist es wenig praktikabel. Das ist auch der Grund, weshalb sich veraltete Namen genauso wie missverständliche Bezeichnungen hartnäckig halten.

Ein guter Kompromiss, der aber in der Praxis kaum umgesetzt wird, ist der, das Streckeisen-Diagramm noch einmal zu vereinfachen und dem Gestein den Namen einer Gruppe zu geben, der dann gewissermaßen vorübergehenden (Feld-) Charakter hat – zu sehen in Abbildung 5.8.

Viel häufiger kommt der Anfänger mit einer Klassifikation in Berührung, die aus dem Mineralbestand auf den SiO_2 -Gehalt schließt und damit das Gestein in sauer oder basisch gruppieren (Abschnitt 5.1). Damit ist zwar auch keine exakte Ansprache möglich, aber häufig reicht dieser chemische Charakter eben aus:

Quarz sichtbar $\rightarrow \text{SiO}_2$ -Überschuss \rightarrow sauer \rightarrow + Mosaikgefüge \rightarrow saurer Plutonit
 \rightarrow vermutlich Granit.

Eine kleine Bestimmungshilfe mit typischer Mineralvergesellschaftung und einigen „Eck-Gesteinen“ bietet die Abbildung 5.9.

Das weitere Vorgehen bei der Gesteinsbestimmung im Gelände beruht, man muss es aussprechen, auf Erfahrung. So hat jedes Gestein seine besonderen Merkmale, die sich nicht aus einem Streckeisen-Diagramm oder dem SiO_2 -Gehalt ableiten lassen. So erkennt man den Trachyt häufig an seinen typischen Sanidin-Feldspäten, der Mikrogabbro (Diabas) enthält leistenförmige (weiße) Plagioklase usw.

Häufig werden die petrographischen Begriffe, wie sie im Streckeisen-Diagramm vorkommen, in das Schema sauer/basisch gepresst ohne zu berücksichtigen, dass dieses Schema eine chemische Zusammensetzung ausdrückt, das Streckeisen-Diagramm jedoch mineralogisch ausgerich-

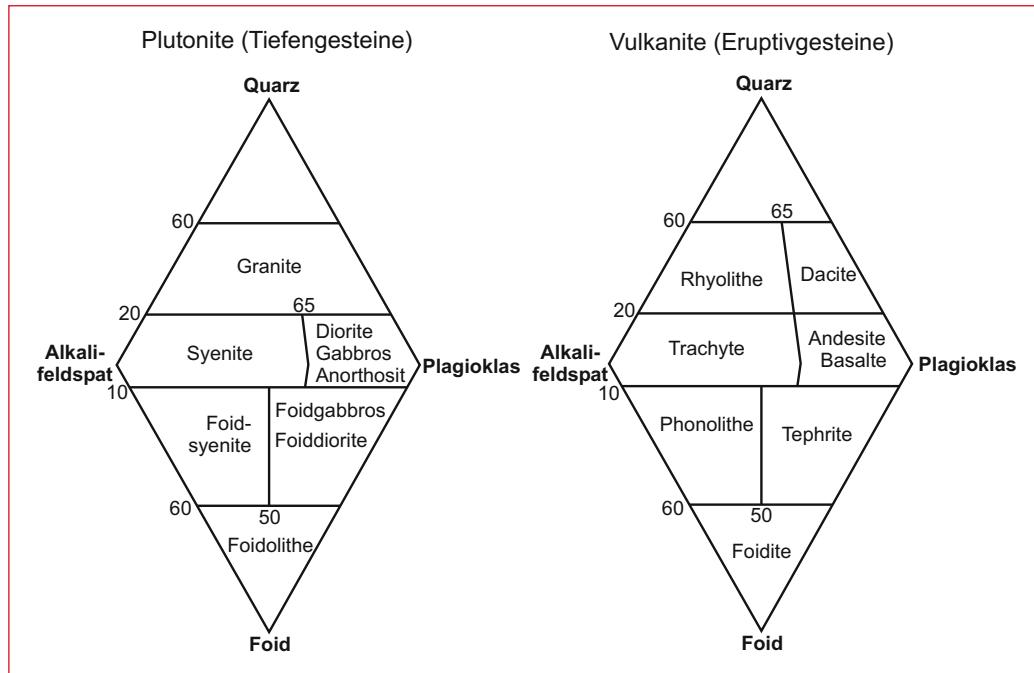


Abb. 5.8 Die Feld-Variante des Streckeisen-Diagramms (nach LE MAITRE et al. 2004). Im Original wird dem Gesteinsnamen die Endung „-oid“ (-artig) angehängt. Also z. B. Granitoid, Phonolitoid usw. Diese Endung drückt dann den vorübergehenden Stand der Bestimmung aus.

tet ist. Es ist hilfreich den chemischen Gedanken etwas weiter zu denken und dem SiO_2 -Gehalt die Gehalte an Na_2O und K_2O hinzuzufügen. Damit verliert die Einteilung sauer/basisch an Eindimensionalität. Für eine Feldbetrachtung ist zu überlegen, welche Minerale diesen Gehalt widerspiegeln – Alkalifeldspäte und Foide zum Beispiel. Damit wäre auch die Verbindung zum Streckeisen-Diagramm wieder hergestellt!

Die wichtigsten Petrographien sind in Abbildung 5.10 in einem $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ -Diagramm dargestellt (TAS-Diagramm nach IUGS).

Zusätzlicher Trick für Vulkanite: jedes Gestein ist durch das Auftreten bestimmter Minerale als Einsprengling charakterisiert – der Einsprengling als Verräter (Abb. 5.10)!

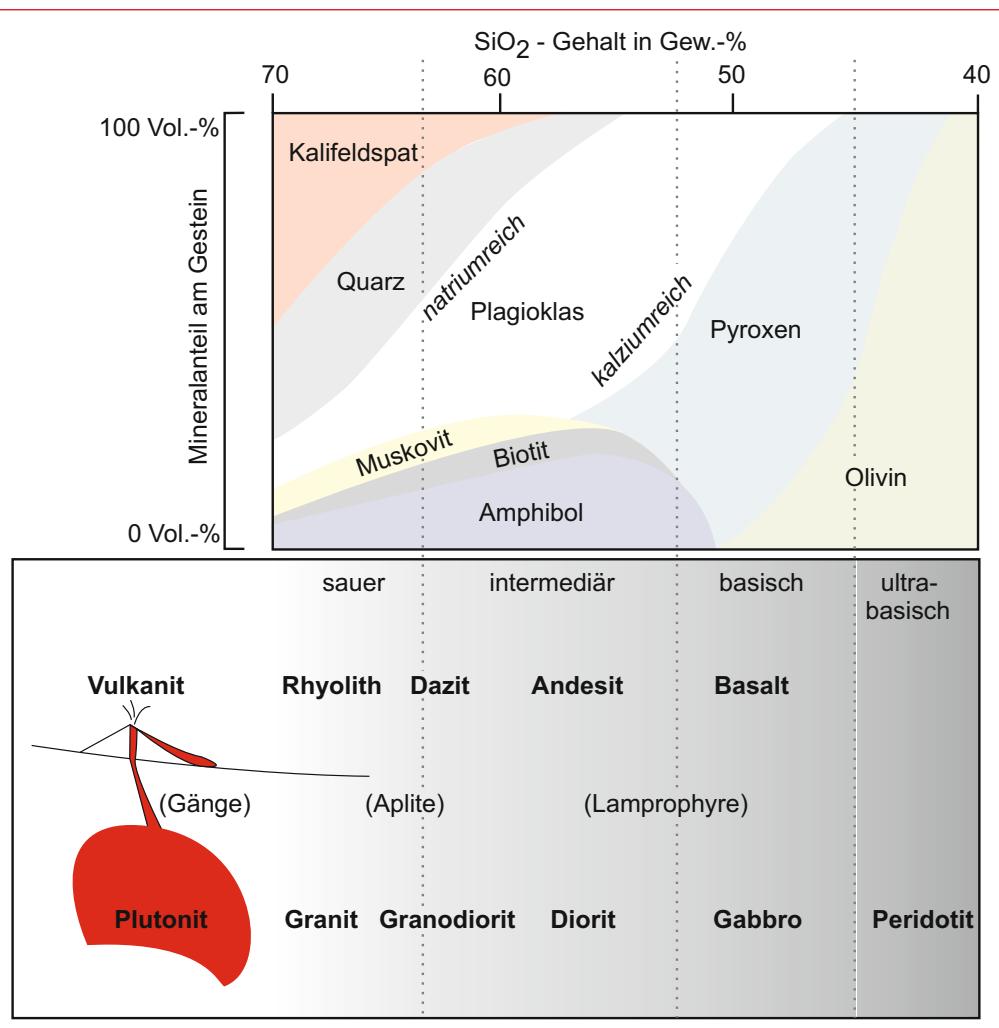


Abb. 5.9 Einfaches Schema zur Gesteinsansprache entsprechend dem SiO₂-Gehalt und Mineralbestand (nach PRESS & SIEVER 2008).

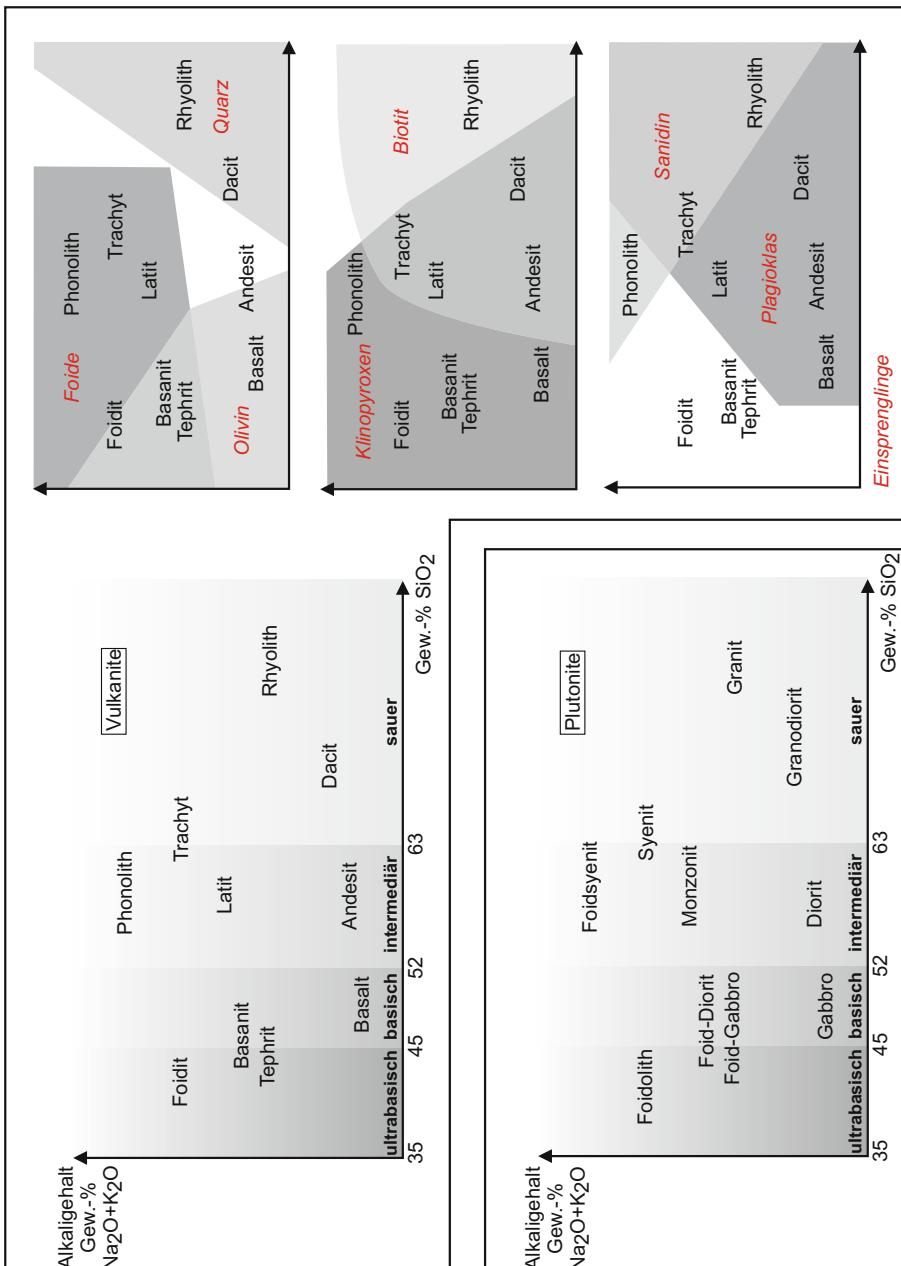


Abb. 5.10 Wichtige Vulkanite und Plutonite im $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ -Diagramm. Charakteristische Minerale, die als Einsprenglinge auftreten können (verschiedene graue Flächen), sind in drei gesonderten Vulkanitdiagrammen rechts beigefügt (nach GÖLDSCHIEDER in STROSCHE et al. 2001). So lässt sich das Gestein aufgrund der Gegenwart verschiedener Einsprenglinge in eine bestimmte Position des Diagramms bringen.

5.4 Wichtige Magmatite im Bild

In vier Übersichten werden die aus mitteleuropäischer Sicht wichtigsten magmatischen Gesteine dargestellt. Ausgangspunkt ist das untere Schema in Abbildung 5.9. Für verschiedene SiO_2 -Gehalte werden plutonische und vulkanische Vertreter und zum Teil die dazwischen liegenden Ganggesteine aufgeführt. Dabei werden die Begriffe „sauer“, „intermediär“, „basisch“ und „ultrabasisch“ grob ins Streckeisen-Diagramm übersetzt (rote Hinterlegung) – was eigentlich nicht möglich ist, da sich beide Systematiken grundlegend unterscheiden (siehe oben). Dafür muss die vereinfachte Feld-Darstellung nach IUGS (Abbildung 5.8) herhalten.

Saure Magmatite (Abb. 5.11)

Die Gesteine mit einem SiO_2 -Gehalt von > 63% werden durch ihre Gegenwart von Quarz dominiert. Anhand der Handstückfotos werden die Erscheinungsbilder der wichtigsten Minerale, wie auch die Gefügemerkale noch einmal besprochen.

Das wichtigste plutonische Gestein ist der Granit, der in der Abbildung rechts unten in drei verschiedenen Varietäten abgebildet wird und sich im Übrigen nur unwesentlich vom Granodiorit unterscheidet.

Intermediäre Magmatite (Abb. 5.12)

Die intermediären Magmatite (SiO_2 -Gehalt 63–52%) stehen nicht nur chemisch zwischen den sauren und basischen Gesteinen, sondern auch äußerlich. Sie erscheinen meist blasser als ihre sauren Kollegen, sind aber häufig nicht so dunkel

wie die Basite. Quarz kann zwar vorhanden sein, verschwindet aber als dominierendes Mineral aus dem Handstück. Biotit-Glimmer werden immer häufiger durch andere „Eisenfänger“, wie Amphibole und Pyroxene ersetzt. Auf die Darstellung eines intermediären Ganggesteins wurde verzichtet.

Basische Magmatite (Abb. 5.13)

Das Problem an basischen Gesteinen (SiO_2 -Gehalt 52–45%) ist ihre dunkle Farbe. Die Mineralbestimmung wird sehr schwer, zumal es um Feinheiten im Foidgehalt geht. Eine Feldunterscheidung von Basalt und Tephrit ist so gut wie unmöglich.

Neben der Farbe sind es vor allem die Gehalte an Olivin und die strikte Quarzabwesenheit, die ein Magmatit zum Basit qualifizieren. Typisch sind auch leistenförmige Plagioklase, die früher als Indiz für Diabas galten. Heute ist das Gestein besser als Mikrogabbro zu bezeichnen und bei strenger „Streckeisen-Auslegung“ sollte auch der Begriff Lamprophyr für basisches Ganggestein nicht benutzt werden.

Ultrabasische Magmatite (Abb. 5.14)

Magmen mit SiO_2 -Gehalten unter 45% sind sehr schwer und obendrein gasarm. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass sich ein solches Gestein an die Erdoberfläche verläuft (obwohl das vorkommt). Vielmehr sind sie Vertreter der Unterkruste und des Mantels und erstarren auch dort. Das heißt, sie müssen durch besondere geologische Umstände zur Erdoberfläche transportiert werden. Häufig wird dabei der ursprüngliche Mineralbestand verändert und sie sind für uns eigentlich Metamorphite (typisch: Peridotit zu Serpentinit).

Drei plutonische Vertreter werden vorgestellt.

5

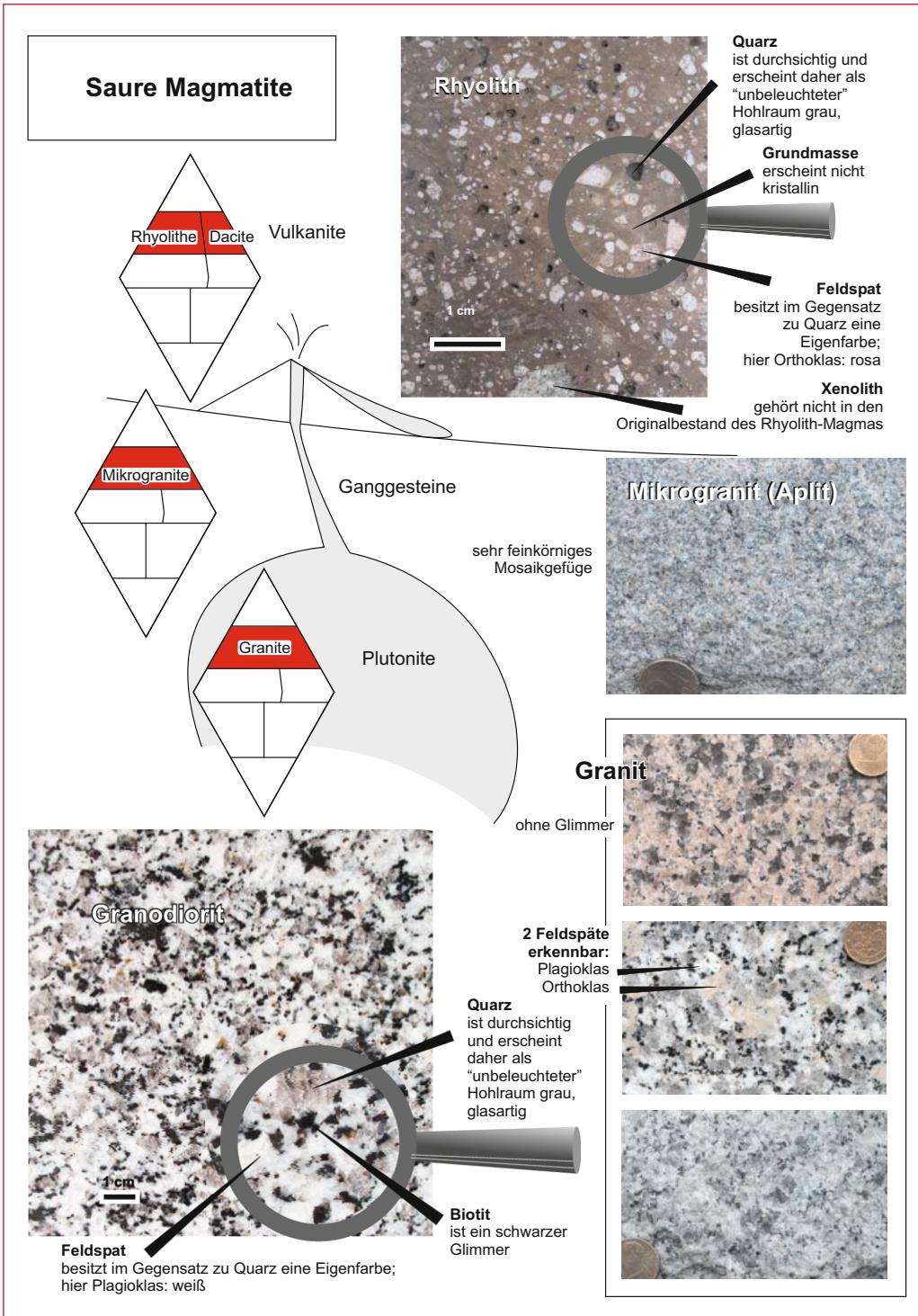


Abb. 5.11 Saure Magmatite im Bild.

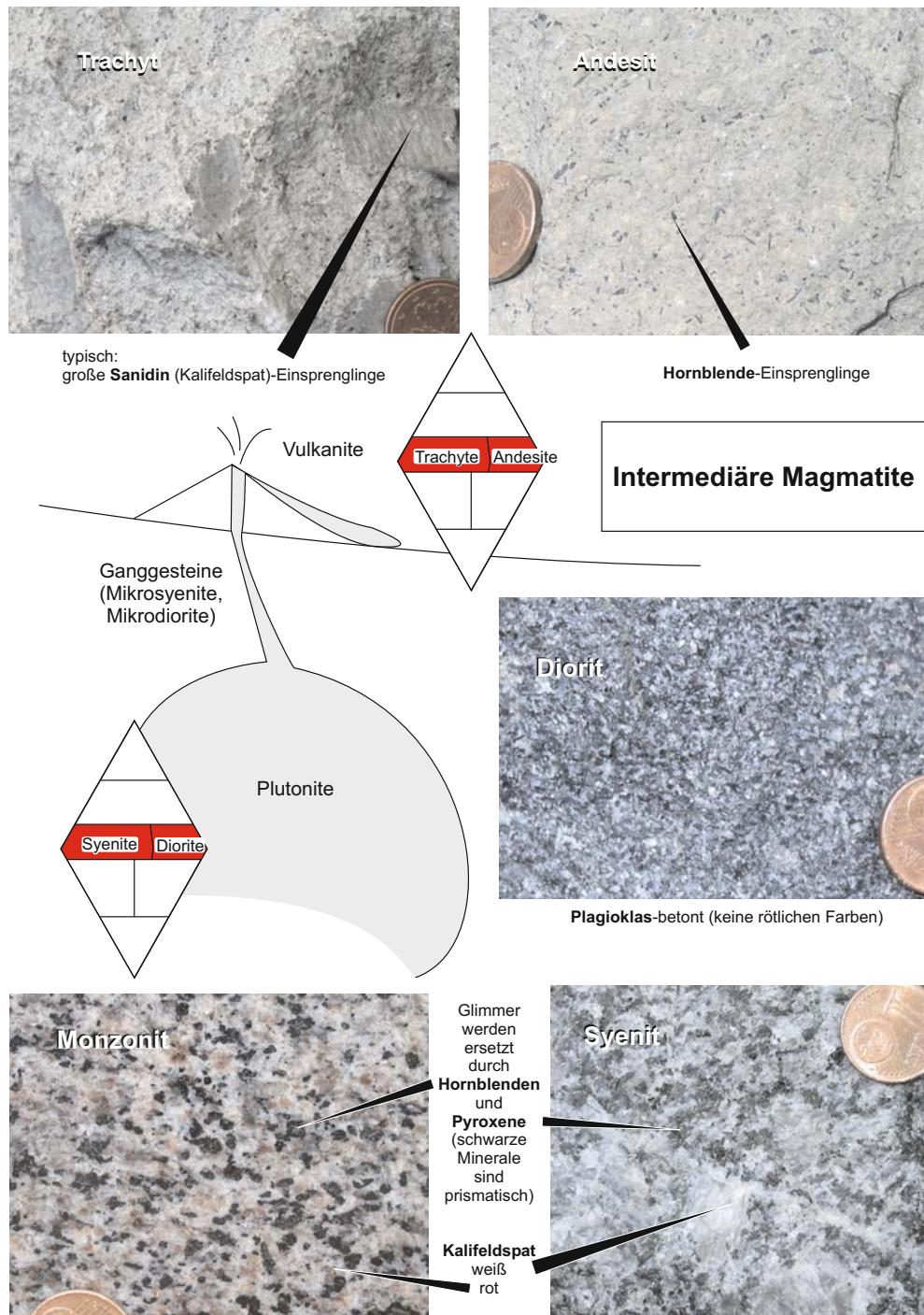


Abb. 5.12 Intermediäre Magmatite im Bild.

5

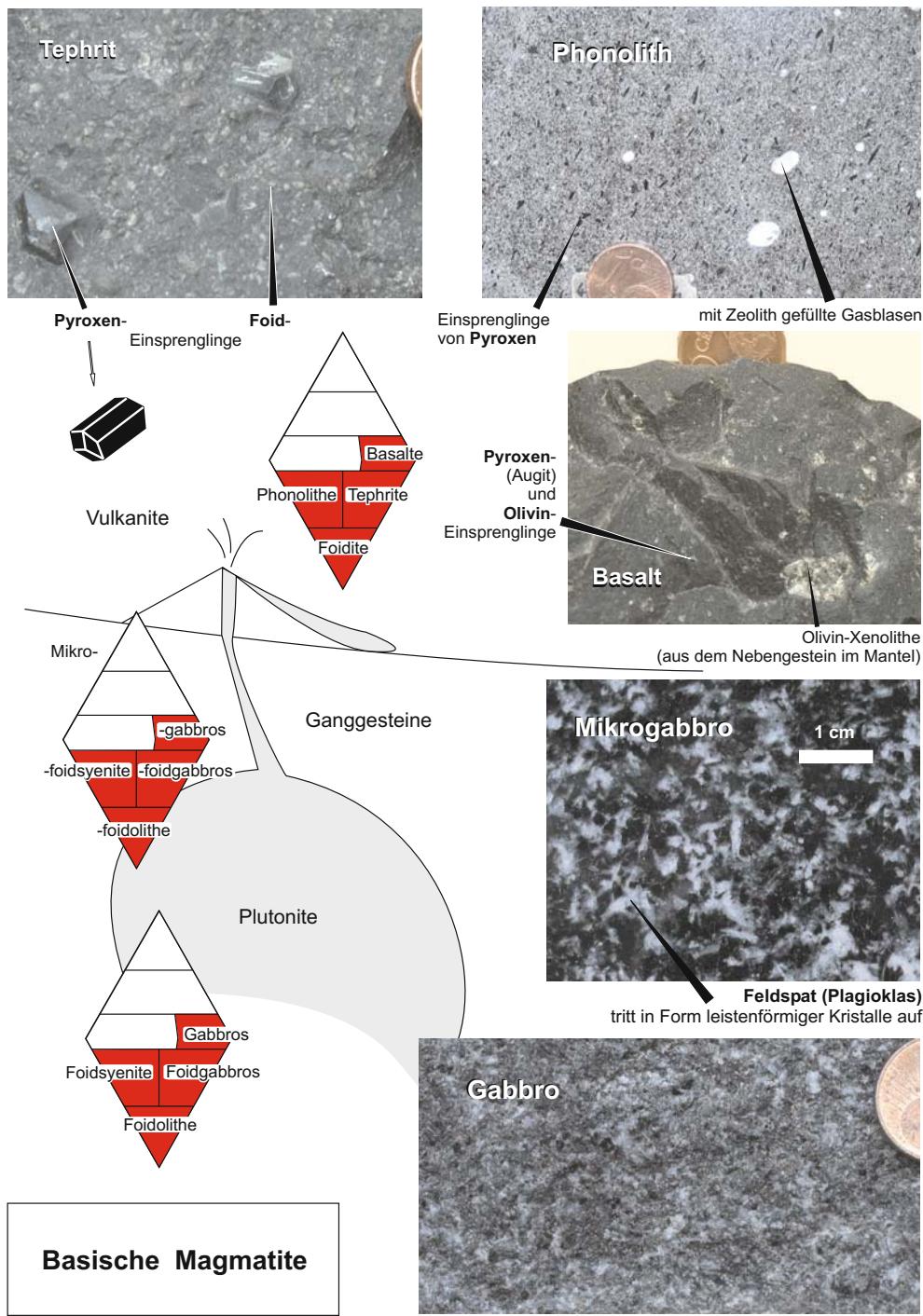


Abb. 5.13 Basische Magmatite im Bild.

Ultrabasische Magmatite

Olivin und grüner Pyroxen sind im Handstück kaum zu unterscheiden

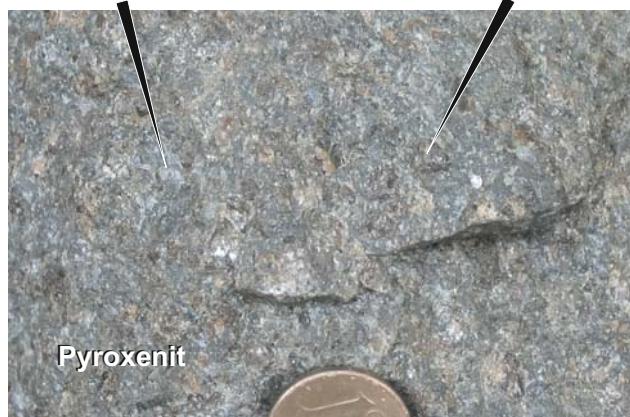


* Eigentlich zeigt das Bild einen Serpentinit. Das heißt, dass der ursprüngliche Peridotit sich beim Aufstieg zur Erdoberfläche durch Wasseraufnahme umgewandelt hat. Dabei hat sich vor allem aus Olivin das grüne Mineral Serpentin gebildet. Das abgebildete Gestein zeigt allerdings nur wenig Umwandlung, was auch in den unzersetzten Granaten zum Ausdruck kommt. Die magmatischen Eigenschaften überwiegen die metamorphen.



Pyroxen ist hier grün (Jadeit)

roter Granat (Pyrop)



Verwechslungsmöglichkeit mit Eklogit (Omphacit und Pyrop)

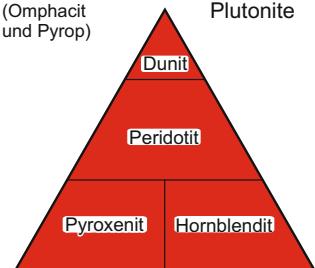
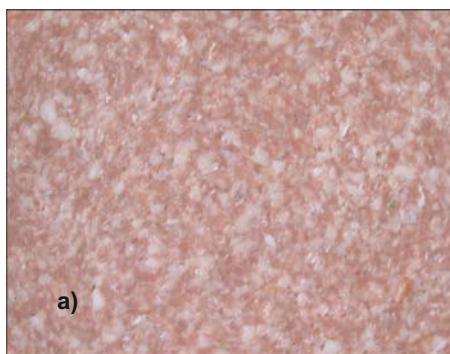
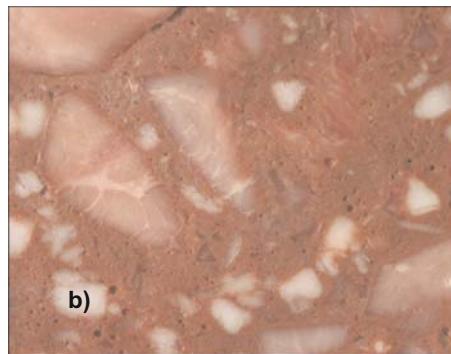


Abb. 5.14 Ultrabasische Magmatite im Bild.



a)



b)

Abb. 5.15 a) Salami alias Plutonit, b) Blutwurst alias Vulkanit.

Aufgaben

1. Auch bei den Magmatiten helfen Lebensmittel als Übungsobjekt weiter. Wurst ist ein ideales Pendant zum magmatischen Gestein. Die Salami in Abb. 5.15 zeigt ein klares Mosaikgefüge, während die Blutwurst unschwer als porphyrisch zu erkennen ist. Weitere gute Gefügeeigenschaften haben grobe und feine Leberwurst, Mortadella und Römerbraten. Ordnet man den Fleisch- und Fettstücken, Kapern, Pfefferkörnern usw. Minerale zu, dann ist sogar eine komplette petrographische Benennung möglich. Sprechen Sie Ihre Wurst

bei Frühstück und Abendessen an und trainieren Sie so das Vokabular der Magmatite!

2. Geben Sie den Magmatiten mit folgendem Gefüge und Mineralbestand (Tabelle 5.4) einen Namen nach Streckeisen!
3. In verschiedenen Vulkaniten haben Sie die Natur der Einsprenglinge bestimmt. Um welche Petrographie handelt es sich jeweils?
 - a) Sanidin, Klinopyroxen und Biotit
 - b) Quarz und Sanidin
 - c) Olivin und Nephelin (Foid)
 - d) Plagioklas und Olivin
 - e) Foid und Biotit
 - f) Quarz und Klinopyroxen

Tabelle 5.4 Petrographische Beschreibungen zu Aufgabe 2.

a) porphyrisch	b) grobkörnig/ Mosaikgefüge	c) grobkörnig/ Mosaikgefüge	d) mittelkörnig/ Mosaikgefüge
Nephelin 35%	Hornblende 40%	Alkalifeldspat 50%	Plagioklas 65% (davon 60% Anorthit)
Plagioklas 35%	Olivin 30%	Quarz 25%	Hornblende 15%
Alkalifeldspat 15%	Pyroxen 25%	Plagioklas 20%	Olivin 10%
Hornblende 10%	Plagioklas 5%	Turmalin 5%	Nephelin 5%
Biotit 5%			Alkalifeldspat 5%

6 Metamorphe Gesteine

6.1 Metamorphose

Metamorphose heißt Umwandlung. Metamorphe sind also Gesteine die durch eine Umwandlung aus anderen Gesteinen hervorgegangen sind. Die wichtigsten Randbedingungen sind dabei Temperatur und Druck. Während der Druck allein von der Mächtigkeit des überlagerten Gesteins abhängt, nimmt die Temperatur mit der Tiefe unterschiedlich stark zu (geothermischer Gradient). Das hängt davon ab, in welcher geotektonischen Position man sich auf dem Globus befindet. Somit sind auch die Art und Intensität der Metamorphose eng an die Plattentektonik geknüpft.

Die Parameter Druck (p) und Temperatur (T) spannen ein Feld der theoretisch möglichen Meta-

morphebedingungen auf (p-T-Diagramm). So vielfältig die Kombination Druck/Temperatur sein kann, so vielfältig ist das Spektrum der metamorphen Gesteine. Etwas System ins Chaos bringt der geothermische Gradient.

Betrachten wir Abbildung 6.1. Ein Gestein an der Erdoberfläche würde sich im Koordinatenursprung des p-T-Diagramms befinden. Im Verlauf einer Metamorphose bewegt sich der „Gesteinpunkt“ ins p-T-Feld hinein. Drei generelle Verläufe (p-T-Pfade) sind denkbar. Gleichmäßige Zunahme von Druck und Temperatur ist dort realisiert, wo kontinentale Platten kollidieren und Kruste versenkt wird. Von der Metamorphose sind ganze Krustenabschnitte betroffen. Man spricht von **Regionalmetamorphose**. Ein Spezialfall liegt vor, wenn ozeanische Kruste subduziert wird. Die relativ kalte Kruste wird dabei ziemlich schnell in

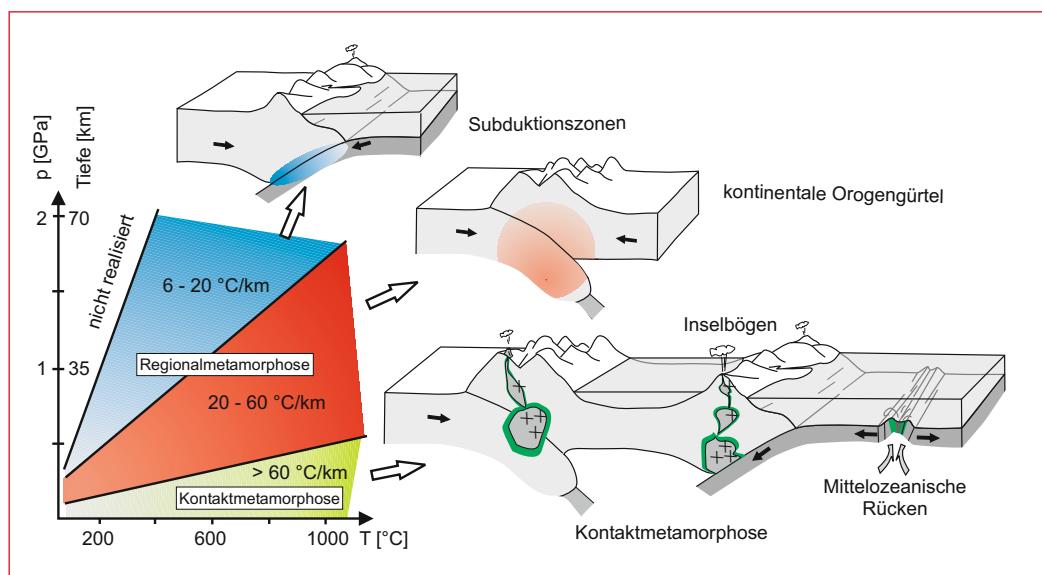


Abb. 6.1 Das Verhältnis von Temperatur zu Druck bzw. Tiefe (geothermischer Gradient) entscheidet über die Art der Metamorphose. Er ist mit einer bestimmten Situation der Plattentektonik verbunden.

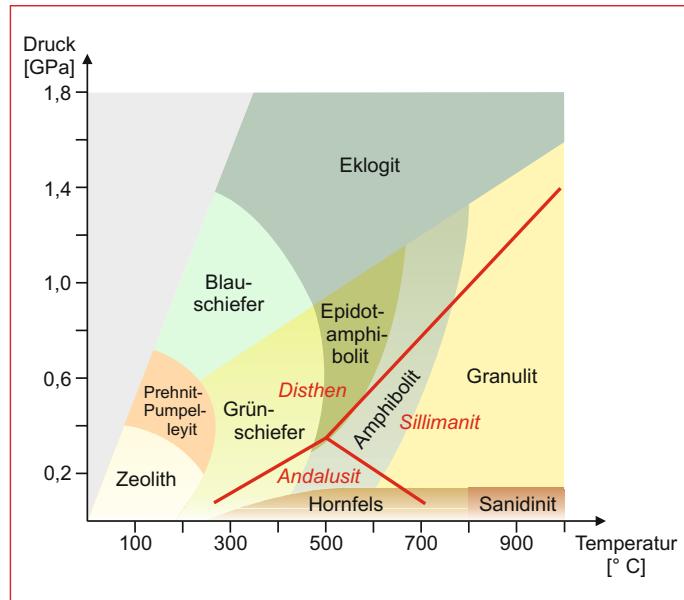


Abb. 6.2 Die metamorphen Faziesbereiche. Zusätzlich sind die Existenzfelder der drei Modifikationen von Al_2SiO_5 eingezeichnet: Andalusit, Sillimanit und Disthen. Ein Gigapascal (GPa) entspricht zehn Kilobar oder 10000 Atmosphären oder 100 Kilometern Wassersäule oder rund 35 Kilometern Tiefe in der Erde.

die Tiefe gebracht. Die Aufheizung der Gesteine hinkt immer ein bisschen der Temperatur in der Umgebung hinterher. Das heißt, dass der geothermische Gradient sehr niedrig ist; der Metamorphosepfad im p-T-Diagramm ist steil. Der Extremfall, dass Gestein unter hohe Drücke gerät, ohne dass seine Temperatur signifikant steigt, ist durch keinen tektonischen Prozess realisierbar. Der Bereich nahe an der Druck-Achse bleibt im p-T-Feld daher frei. Der entgegengesetzte Fall, dass ein Gestein aufgeheizt wird ohne sehr tief in der Erde zu stecken, ist dagegen leicht zu realisieren. Solche hohen geothermischen Gradienten werden erreicht wo Magmen in relativ kältere Krustenregionen aufsteigen und das umgebende Gestein im Kontaktbereich verändern. Es kommt zur **Kontaktmetamorphose**.

Jeder Punkt im p-T-Diagramm repräsentiert einen thermodynamischen Zustand, dem sich die beteiligten Komponenten des Gesteins (Elemente, Minerale) unterordnen. Neue Bedingungen bedeuten neues Zusammenfinden der Bestandteile. Es entstehen Minerale, die teilweise typisch sind für einen bestimmten Bereich im p-T-Diagramm. Solche Bereiche, die durch Mineralreaktionen von einander getrennt sind, entsprechen den **metamorphen Fazies**. Sie sind der Abbildung 6.2 zu entnehmen.

6.2 Eigenschaften metamorpher Gesteine

Metamorphose und Tektonik

Es ist fast eine Binsenweisheit, dass man ein metamorphes Gestein an einer **Schieferung** erkennen kann. Das stimmt insofern, als dass ein Gestein das eine Schieferung aufweist, meist tatsächlich ein Metamorphit ist. Das klappt aber nicht umgekehrt. Nicht jedes metamorphe Gestein ist geschieferert.

Als Schieferung bezeichnet man die einheitliche Ausrichtung von Mineralen im Gestein, das dadurch eine Anisotropie erhält. Die wiederum verursacht die bevorzugte Spaltrichtung des Gesteins (Abb. 5.3).

Die Schieferung entsteht durch

- Ausrichtung existierender blättchenförmiger Minerale (Ton, Glimmer) im Gestein,
- Ausrichtung neu gesprossster blättchenförmiger Minerale (Glimmer),
- Plättung und Auswalzung prismatischer Kristalle (z. B. Quarz oder Kalifeldspat)



Abb. 6.3 Das Bild zeigt den Übergang von einem nicht-folierten (oben) in einen folierten Gneis (unten). Die „Gneis-Schieferung“ ist durch tektonische Überprägung (Differenzialspannung) entstanden. Allerdings war dieser Prozess nicht durchgreifend genug um auch das Gestein oben zu erfassen. Beide Gesteine waren jedoch gemeinsam in der Tiefe (ca. 25 km) und haben auch dieselben metamorphen Bedingungen erfahren (0,8 GPa, 650 °C). Vogeltoffel-felsen/Erzgebirge.

jeweils senkrecht zur tektonischen Kraft („gerichteter Druck“, Stress). Eine echte Schieferung im Sinne des Wortes, also ein eng spaltendes Gestein, entsteht nur in den Fällen a) und b). Bei c) entsteht ein mehr oder weniger plattiges Gestein, das der Volksmund nicht als Schiefer bezeichnen würde. Gneis ist ein Beispiel. Unter anderem deshalb ist es sinnvoller, solche metamorphen Lagengefüge neutraler als **Foliation** zu bezeichnen.

Was sind also notwendige Bedingungen zur Herausbildung einer (echten) Schieferung?

1. Die Gegenwart blättchenförmiger Minerale (Schichtsilikate: Tonminerale, Glimmer).
2. Eine, durch tektonische Kräfte verursachte, Differenzialspannung (Differenzialstress).

Dieser Stress ist nicht zu verwechseln mit dem lithostatischen Druck, der mit der Tiefe zunimmt und ähnlich dem hydrostatischen Druck im Wasser allseitig zunimmt. Auch unser Luftdruck wirkt allseitig auf uns und führt nicht dazu, dass wir deformiert werden. Ebenso kann der lithostatische Druck keine Strukturen (Falten, Störungen) und auch keine Schieferung (oder Foliation) im Gestein erzeugen.

Tektonischer Druck bedeutet Struktur, lithostatischer Druck bedeutet Metamorphose. Beide

treten häufig gemeinsam auf, müssen es aber nicht. Somit ist also die Schieferung ein hilfreiches aber kein zuverlässiges Kriterium zum Erkennen eines Metamorphits (Abb. 6.3).

Die Unterteilung der Metamorphite in die mit echter Schieferung, die mit gneisartiger Foliation und die mit gar keinem Lagengefüge (Abb. 6.11) greift die internationale Gliederung für metamorphe Gesteine auf (Abschnitt 6.5).

Metamorphe Gefüge

Wenn die Schieferung der Tektonik gehört, welche Merkmale gehören dann der Metamorphose?

Hier existiert eine kaum überschaubare Anzahl an Fachbegriffen. Manche gelten nur für Metamorphite und manche sind auch auf andere Gesteinsgruppen anwendbar. Lenken wir den Fokus auf solche Gefügemerkmale, die für die Identifizierung metamorpher Gesteine herangezogen werden können und auch ohne Mikroskop noch erkennbar sind.

Entscheidend ist die Tatsache, dass während der Metamorphose Minerale neu entstehen und das vorhandene Gefüge überwachsen. Diese Sprossung neuer Minerale heißt auch **Blastese**.

6

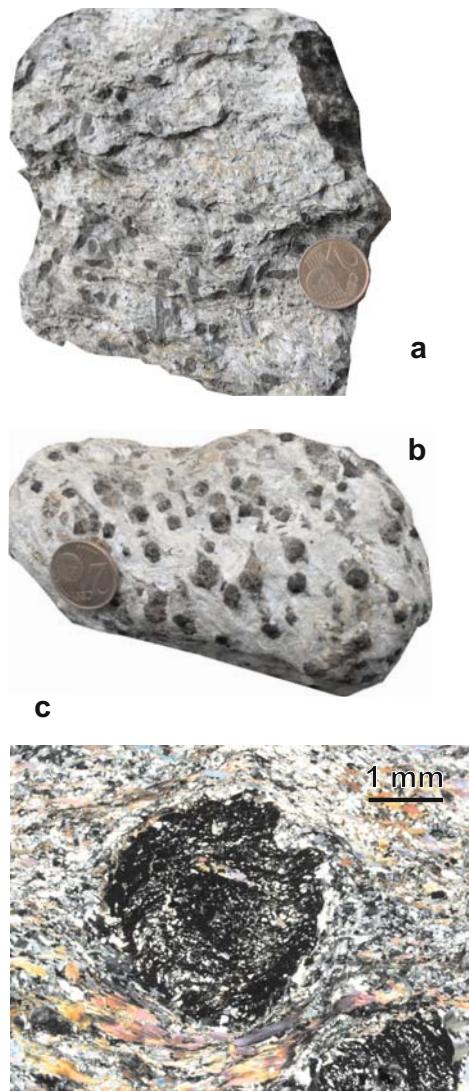


Abb. 6.4 Typische blastische Gefüge metamorpher Gesteine. a) Knotenschiefer mit Andalusitblasten, Kontaktmetamorphose (Triebischtal/Sachsen), b) Granat-Glimmerschiefer, Regionalmetamorphose (Fundort unbekannt), c) Dünnschliff eines Granat-Glimmergneises, Regionalmetamorphose (Ansprung/ Erzgebirge). In der Mikroskopaufnahme ist deutlich zu erkennen, dass der Granat die bestehenden Minerale beim Wachsen in sich eingeschlossen hat. Zur Zeit dieses Wachstums befand sich das Gestein unter tektonischer Zerschrenung, die Granate wurden gerollt und wickelten so die umliegende Foliation in sich ein. Die heute vorliegende Foliation „umfließt“ die Porphyroblasten.

Blastische Gefüge sind somit die Nummer eins unter den metamorphen Gefügen und speziell für kontaktmetamorphe Gesteine charakteristisch („Hitzepickel“). Zum Beispiel:

- **porphyroblastisch** – ähnlich dem porphyrischen Gefüge der Magmatite; einzelne Minerale sprossen als Kristalle, die dann größer sind als die Matrix; beim Wachsen können diese Kristalle die umgebende Foliation „aufbeulen“ (Abb. 6.4)
- **nematoblastisch** – Kristalle wachsen in Form von Nadeln; meist büschelig oder sonnenartig.

Kataklasite und Mylonite

Weitere wichtige tektonische Gefüge sind solche die entstehen, wenn das Gestein im Bereich einer Scherzone unter tektonischem Druck zerstört und in seiner Korngröße reduziert wurde. Pasiert so etwas unter kalten Bedingungen (und hohen Verformungsraten), dann verliert das Gestein seinen Zusammenhalt. Es zerkrümelt. Man spricht dann von **Kataklasit**.

Unter warmen Bedingungen (und niedrigen Verformungsraten) rekristallisiert das Gestein während der Kornverkleinerung. Es entsteht ein **Mylonit**, meistens mit einer mylonitischen Foliation. Unabhängig von der metamorphen Fazies können diese Eigenschaften das Erscheinungsbild des Metamorphits dominieren und damit eine entsprechende Benennung rechtfertigen. Die Abbildung 6.5 zeigt die progressive Kornverkleinerung eines Gesteins in verschiedenen Mylonitstadien.

6.3 Benennung metamorpher Gesteine

Die klassische Vorgehensweise, sich die Nomenklatur metamorpher Gesteine anzueignen, ist das Auswendiglernen der wichtigsten Petrographien. Auch nicht jedem gestandenen Geologen ist klar nach welchem Prinzip er einen Metamorphit benennen soll. Vielleicht röhrt daher auch die allgemeine Unbeliebtheit metamorpher Gesteine.

Wir räumen auf. Für die Benennung kommen infrage:



Turmalingranit → **Protomylonit** → **Ultramylonit**

Abb. 6.5 Der grünschieferfazielle Turmalingranit des Elbtalschiefergebirges (a) ist nicht foliert. Erst der Einbezug in eine Scherzone (Mittelsächsische Störung) gibt dem Gestein ein metamorphes Aussehen (b – Protomylonit, c – Ultramylonit). Ohne eingehende Untersuchung ist die Zuordnung zum Turmalingranit nicht mehr möglich und die Begriffe Protomylonit (b) bzw. Ultramylonit (c) erhalten den Vorrang in der Benennung.

- der Mineralbestand, z. B. Amphibolit,
- das Gefüge, z. B. Schiefer,
- oder beides, z. B. Gneis (20% Feldspat + Foliation),
- die metamorphe Fazies, z. B. Eklogit oder
- das Ausgangsgestein (= Edukt, = Protolith), z. B. Metakonglomerat.

Alle diese Benennungen sind üblich und legitim. Für schwach metamorphe Gesteine bietet es sich an, das letztgenannte Prinzip zu verfolgen, weil die Eigenschaften des Ausgangsgesteins (Edukt) noch zu erkennen sind und damit der Name des Metamorphits einen wertvollen genetischen (entstehungsgeschichtlichen) Inhalt hat.

Aus: wird:

Grauwacke	Metagrauwacke
Granit	Metagranit

Oder etwas neutraler bezeichnet

wird aus: ein:

Pelit	Metapelit
Sediment	Metasediment
Basit	Metabasit

Von gewissen „Eckpetrographien“ ist es üblich, den Mineralbestand weiter zu unterscheiden.

Glimmerschiefer (Mineralbestand + Gefüge) ist demnach nicht gleich Glimmerschiefer, sondern es existieren beispielsweise

- Muskovit-Glimmerschiefer oder
- Staurolith-Granat-Biotit-Glimmerschiefer.

6.4 Die wichtigsten Metamorphe als Funktion von Ausgangsgestein und metamorpher Fazies

Um einen Überblick über die Vielfalt der Metamorphe zu erhalten, zählt man die genannten „Eckpetrographien“ gern im Zusammenhang mit ihrem Ausgangsgestein (Edukt) und ihrer metamorphen Fazies auf. Das heißt, dass sedimentäre und magmatische Gesteine zu chemisch-mineralogischen Gruppen zusammengefasst und dann im p/T-Feld metamorph „gemacht“ werden.

Diese Gruppen sind:

- tonige Gesteine (Ton, Tonstein, Schluff, Schluffstein, Lehm),
- granitische Gesteine (saure Vulkanite und Plutonite; aber auch Sedimente mit „granitischem“ Mineralbestand, wie Arkose und Grauwacke),
- Karbonate (Kalk, Kalkstein, Dolomit),

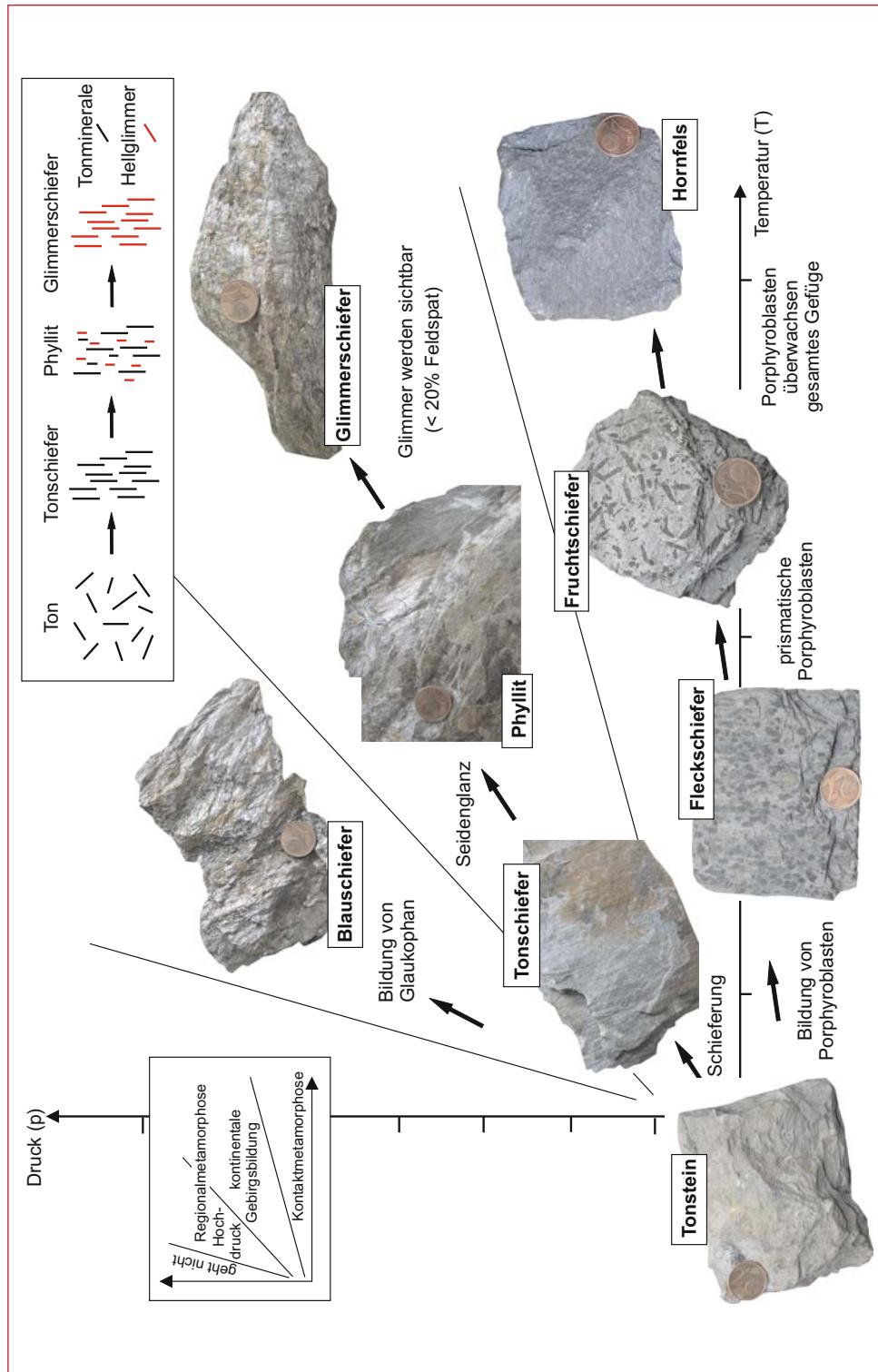


Abb. 6.6 Metamorphose von tonigen Gesteinen. Eine größere Darstellung der Handstücke findet sich in Abbildung 6.7.

- basaltische Gesteine (basische Vulkanite und Plutonite; aber auch Sedimente mit basischem chemischen Charakter, wie Mergel),
- Sandstein.

In den Abbildungen 6.6 bis 6.10 wird die Metamorphose dieser fünf Gruppen in Form von Übersichten behandelt.

Metamorphose von tonigen Gesteinen (Abb. 6.6 und 6.7)

Die Vielfalt der Metamorphite, die aus Tonstein oder ähnlichem Material hervor gegangen sind, ist besonders groß. Das liegt daran, dass Tone eine große Anzahl verschiedener Elemente in die Metamorphose einbringen und dass diese sich zu vielen metamorphen Mineralen neu ordnen können. Besonders der hohe Aluminiumgehalt hilft dabei die jeweils fazieskritischen Minerale auszubilden. Diese Faziesanzeiger sind aber nicht immer in ausreichender Menge enthalten um das Gestein zu dominieren. Es reicht in der Feldansprache der Regionalmetamorphe daher aus, sich auf die Anwesenheit von Glimmer zu beschränken: Tonschiefer – Phyllit – Glimmerschiefer. Wobei beim Phyllit die Glimmer noch zu winzig sind um mit dem bloßen Auge wahrgenommen zu werden. Sie geben dem Gestein lediglich einen seidigen Glanz.

In Abbildung 6.6 ist auch das typische Hochdruckgestein abgebildet. Der Blauschiefer erhielt seinen Namen vom fazieskritischen Mineral Glaukophan. Allerdings ist der nicht unbedingt erkennbar. Der Blauschiefer ist von seinem Erscheinungsbild her – mit bloßem Auge erkennbare Glimmer – ein Glimmerschiefer.

Charakteristisch für Metamorphe aus tonigen Gesteinen ist die Schieferung. Sie ist allgemeinwähig, da einregelbare Minerale wie Ton oder Glimmer immer reichlich vorhanden sind.

In der Kontaktmetamorphose sind es vor allem Andalusit, Cordierit oder Hornblenden, die als Porphyroblasten das Gestein durchdringen. Es sind gewissermaßen Hitzepickel, die durch die Wärmewirkung eines nahen Magmas entstehen. Ein Extremfall ist der Hornfels, bei dem das schiefrige Gefüge völlig ausgelöscht ist. Die Tone oder Glimmer werden zur Bildung der genann-

ten Nicht-Schichtsilikate aufgebraucht. Somit verschwindet die Schieferung.

Metamorphose von granitischen Gesteinen (Abb. 6.8)

Granitische Gesteine geben für die metamorphe Neubildung von Mineralen nicht viel her. Die Minerale Feldspat, Quarz und Glimmer bleiben erhalten. Bekommt der Granit keine Deformation zu spüren, legt sich keine Schieferung an, und der Metamorphit ist von seinem Ausgangsgestein nicht zu unterscheiden (Abb. 6.3). Erst das Lagengefüge (Foliation) weist den Gneis im Gelände als solchen aus. Bei durchschnittlicher Zusammensetzung entsteht auch nichts anderes als Gneis, egal in welcher Ecke des Druck-Temperatur-Diagramms man sich befindet.

Auch bei Sedimenten „granitischer“ Zusammensetzung bleibt die Mineralogie im Wesentlichen erhalten. Das Sedimentgefüge wird jedoch fast immer ausgelöscht. (Zum Begriff Gneis siehe auch Abschnitt 6.5.)

Metamorphose von Karbonaten (Abb. 6.9)

Ein sehr reines Karbonat besteht fast vollständig aus Calcit (CaCO_3) oder Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Möglichkeiten einer Neuzusammenführung von Elementen zu – dem Metamorphosegrad entsprechenden – Mineralen gibt es nicht. Solange also nur vernachlässigbare Beimengungen z. B. von Ton vorhanden sind, ändert sich während der Metamorphose die Mineralogie nicht. Lediglich der feine Karbonatschlamm wird kristallin neu geordnet (Rekristallisation). Dabei wachsen aus energetischen Gründen größere Kristalle auf Kosten der Einzelkörner. So entsteht der körnig-kristalline Marmor, der – wie der Kalkstein auch – auf Salzsäure mit Brausen reagiert.

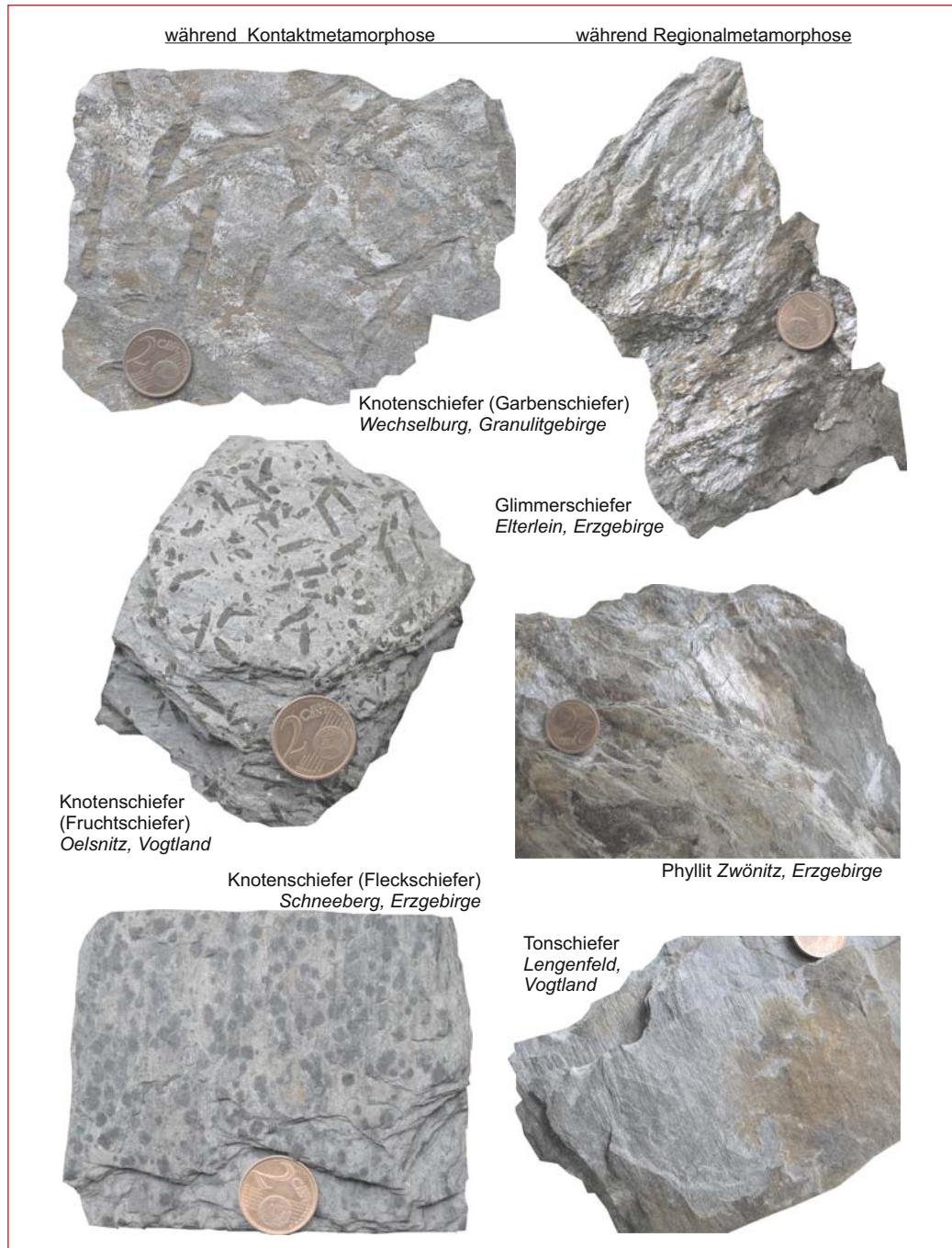


Abb. 6.7 Metamorphite aus tonigem Ausgangsmaterial. Es werden die Handstücke aus der Übersicht in Abbildung 6.6 noch einmal vergrößert dargestellt. Auf die Vergrößerung von Hornfels wurde verzichtet, da er ziemlich merkmalsarm ist. Auch Profis haben Schwierigkeiten ohne den geologischen Zusammenhang den Hornfels von manchen basischen Vulkaniten oder Amphiboliten zu unterscheiden. Dafür ist eine weitere Varietät des Knotenschiefers auf diese Abbildung gekommen. Die Blasen bilden beim Garbenschiefer die Form von Heugarben.

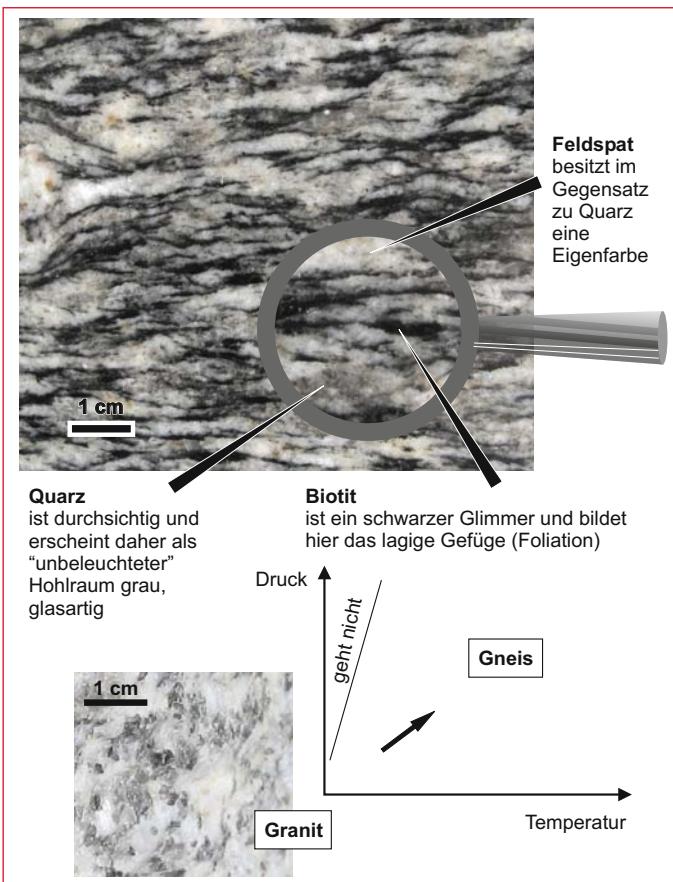


Abb. 6.8 Metamorphose von granitischen Gesteinen (säure Magmatite, Arkose und Grauwacke).

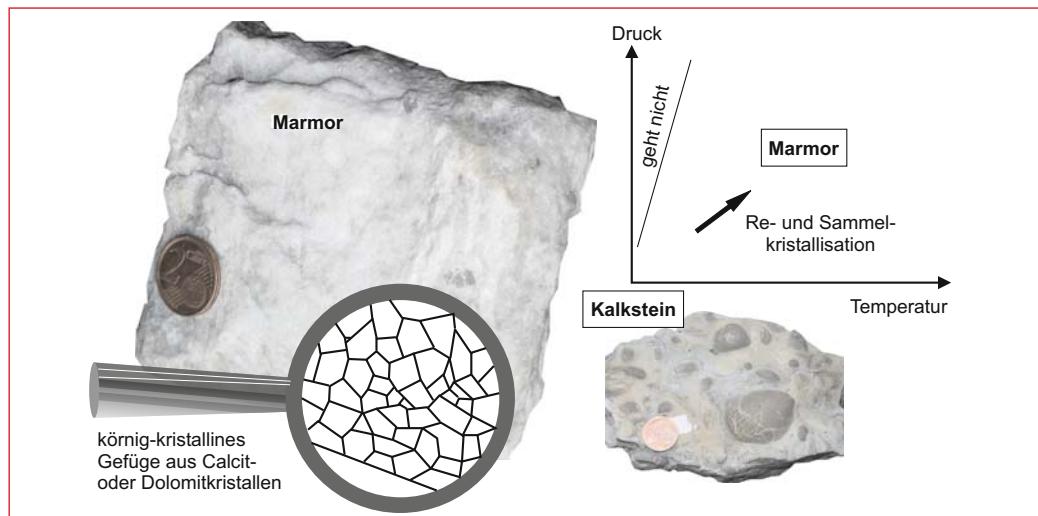


Abb. 6.9 Metamorphose von Karbonaten (Kalkstein, Dolomit). Das Kalkstein-Handstück stammt aus dem thüringischen Muschelkalk und enthält die Muschel *Lima lineata*.

6

Metamorphose von basal-tischen Gesteinen (Abb. 6.10)

Aufgrund ihrer recht bunten mineralischen Zusammensetzung reagieren basaltische Gesteine, wie auch Gabbros oder die sedimentären Mergel, sehr freudig auf die Metamorphose. Das ist der Grund weshalb basische Metamorphite namengebend für so viele metamorphe Faziesbereiche sind (Abb. 6.2).

Bei beginnender Metamorphose bilden sich in basaltischen Gesteinen grüne Minerale, vor allem Chlorit, aber auch Epidot und grüner Amphibol. Die vergrünten Gesteine geben der Grünschieferfazies ihren Namen.

Bei zunehmender Metamorphose bilden sich immer mehr Amphibole. Sind mindestens 30% dieser Minerale im Gestein, darf es Amphibolit, Typusgestein der Amphibolitfazies, genannt werden (nach IUGS). Steigt vor allem die Temperatur weiter und das Gestein verlässt die Amphibolitfazies dann ist es auch mit dem Amphibolit passé, obwohl das Gestein sein Aussehen kaum ändert. In der Granulitfazies schwitzen die Amphibole ihre OH-Gruppen aus und werden zu Pyroxenen. Das entstehende Gestein heißt Pyroxengranulit.

Ist die Regionalmetamorphose eher druckbenton, dann entsteht der so genannte Eklogit (in seiner eigenen Fazies) mit der charakteristischen Mineralzusammensetzung von Omphacit (ein grüner Pyroxen) und Pyrop (ein roter Granat).

Metamorphose von Sandstein (Abb. 6.11)

Wie bei den Karbonaten kann man auch beim Sandstein grob von einem monomineralischen Gestein sprechen. Es besteht lediglich aus Quarz. Was nur Quarz ist, muss auch Quarz bleiben. Die Veränderungen während der Metamorphose beschränken sich auf das Gefüge. Da der Sandstein ein recht poröses Sedimentgestein ist, verschwinden unter dem erhöhten Druck zunächst die Hohlräume. Das geschieht indem sich der Quarz an den Berührungs punkten der Sandkörnchen löst und in den Zwickeln wieder auskristallisiert. Dieser Prozess der Drucklösung

beginnt bereits während der Diagenese, wenn aus einem Sand ein Sandstein wird.

Schließlich werden im porenlösen Quarzit die Kristalle neu geordnet und wie beim Karbonat auch vergrößert. Es entsteht ein Gestein das äußerlich manchmal dem Marmor ähnelt, aber einfach durch die Mineraldiagnose zu unterscheiden ist (Härte, Salzsäure).

Erwähnt werden muss, dass zahlreiche Quarzite auch auf sedimentärem, also diagenetischem Weg entstehen. Das Feldkriterium, die Ausbildung der Bruchfläche, ist Abbildung 6.11 zu entnehmen. Auch magmatische Gangfüllungen aus Quarz werden Quarzit genannt.

Manchmal kommt der Sandstein in unmittelbaren Kontakt zu einem Magma. Er dehnt sich daraufhin aus, zieht sich bei der Abkühlung aber wieder zusammen. Es entstehen Schwundrisse, die den Basaltsäulen ähnliche, prismatische Körper hervorrufen. Der Sandstein ist gefrittet worden.

6.5 Die Metamorphit-Nomenklatur nach IUGS

So wie sich die International Union of Geological Sciences (IUGS) um die internationale Standardisierung der Ansprache von Magmatiten bemüht hat, so bemüht sie sich auch um eine einheitliche Benennung der Metamorphite.

Es wurde ein Regelwerk erstellt, das für den englischsprachigen Raum gut funktioniert. Die Einführung im Deutschen wird aber vermutlich noch auf den Widerstand der Branche stoßen. Schuld ist vor allem ein Gestein, das nicht so recht passen will, obwohl das Konzept der IUGS viele praktische Vorteile bereithält. Der Störenfried heißt Gneis. Der klassische Gneis definiert sich neben der Foliation über die Anwesenheit von Quarz und Feldspat. Vor allem unter deutschsprachigen Geologen wird in der Feldansprache von Gneis 20% Feldspatanteil gefordert.

Die Empfehlungen der IUGS stellen den Gneis in einen neuen Kontext. Über die grundsätzliche Frage, ob ein metamorphes Lagengefüge vorhanden ist oder nicht, und wenn ja, ob das Gestein stark schiefrig oder eher gneisartig ist, kann jedem Metamorphit durch Zusatz der wichtig-

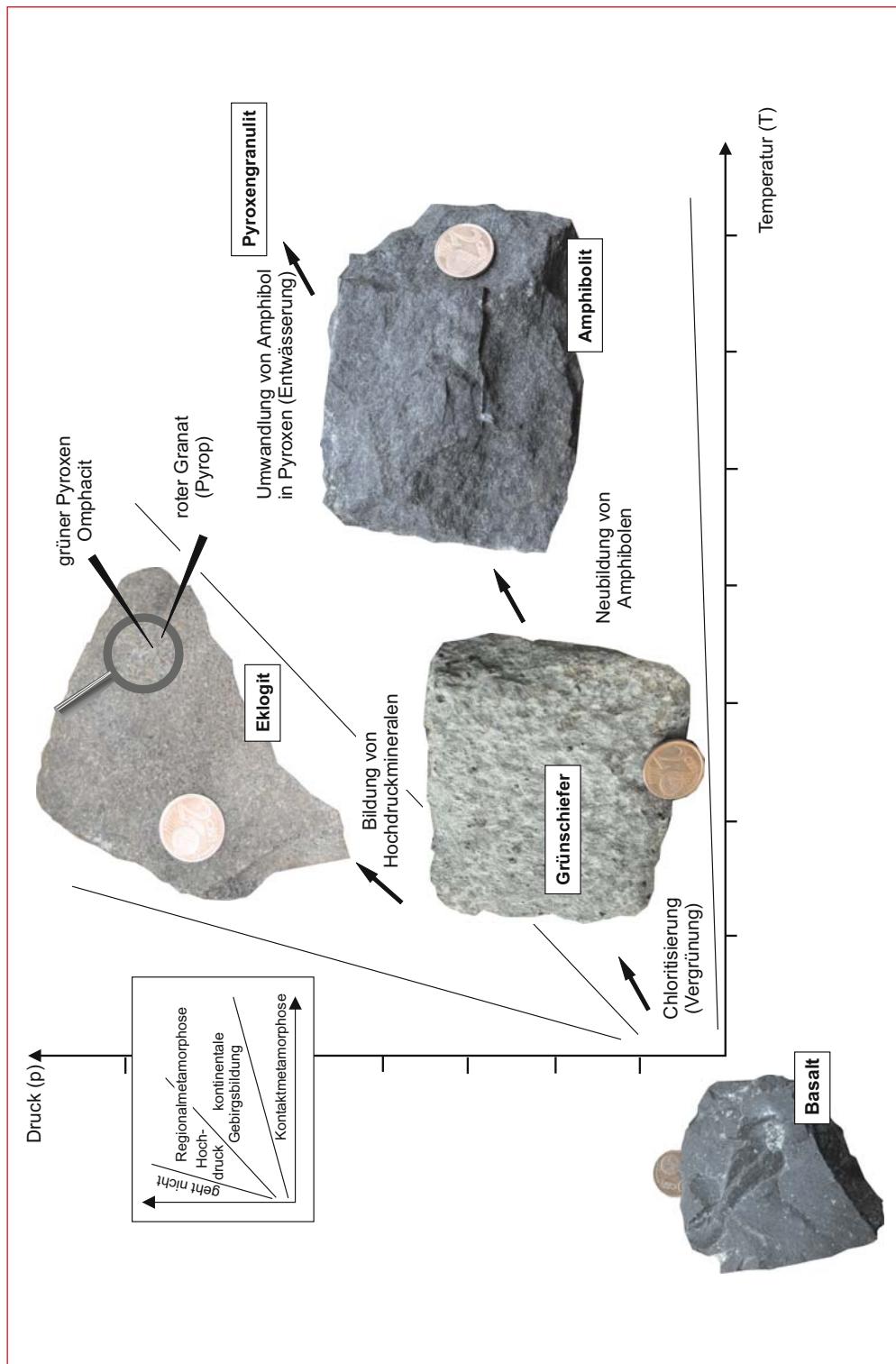


Abb. 6.10 Metamorphose von basaltischen Gesteinen (basische Magmatite, Mergel).

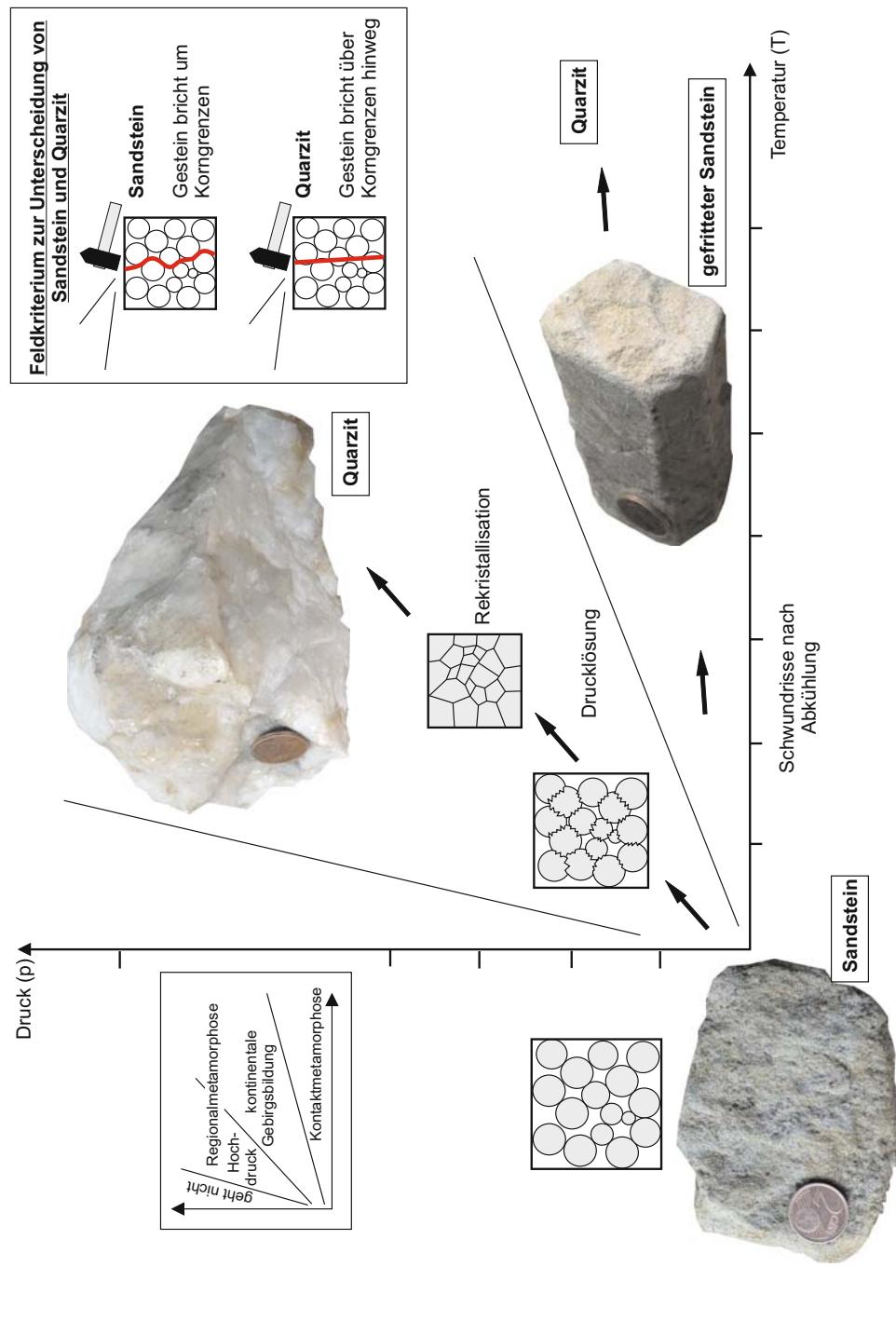




Abb. 6.12 Unterteilung der Metamorphe nach der Ausbildung einer Foliation an Beispielen aus dem Erzgebirge. Links: „echte“ Schieferung (Phyllit); rechts: gneisartige Schieferung (Gneis) und keine Schieferung (Amphibolit).

sten Minerale ein Name zugeordnet werden. Und das recht universell und ohne missverständliche, weil historisch unterschiedlich gewachsene, Inhalte (Abb. 6.12). Gneis wird hier zu einer Gefügebezeichnung und benennt nicht mehr einen Mineralbestand. Abbildung 6.13 zeigt das auf dem Gefüge beruhende Ansprachesschema metamorpher Gesteine. Allerdings ist zu entnehmen, dass vor der Benennung entsprechend dem Gefüge zu klären ist, ob das Gestein nicht besser nach seinem Edukt, einem dominierenden Mineral oder nach einem anderen in der Geologenwelt fest verankerten petrographischen Begriff benannt werden sollte.

Granulite

Ursprünglich verstand man unter einem Granulit (oder Weißstein) ein hochmetamorphes Gestein der Mineralzusammensetzung Kalifeldspat, Quarz und Disthen/Sillimanit. Heute, auch nach Maßgabe der IUGS, müssen Granulite neben der hohen Metamorphose lediglich das Kriterium der Wasserfreiheit erfüllen. Die OH-Gruppen führenden Glimmer und Amphibole fehlen. Aus dieser Forderung ergibt sich der Zusammenhang mit der Granulitfazies, die der Regionalmetamorphose bei hohen Temperaturen entspricht (Abb. 6.2). Ist das Gestein wasserfrei, dann hält es wesentlich höhere Temperaturen aus. Ähnliche Gesteine mit beispielsweise viel Glimmer wären schon längst geschmolzen und daher gar nicht als Metamorphit sondern als Magmatit überliefert.

Typische Granulite sind granitischer Zusammensetzung, eben nur ohne Glimmer. Während der Granit bei 750 °C zu schmelzen beginnt, kann der glimmerfreie Granulit schon mal 1000 °C aushalten. So geschehen im Sächsischen Granulitgebirge, wo der Begriff Granulit geprägt wurde (Abb. 6.14).

Im Gegensatz zum hellen Leukogranulit (oder felsischen Granulit) heißen dunkle Granulite auch mafische Granulite. Dominiert Pyroxen,

6.6 Spezielle Metamorphe

Neben den möglichen Metamorphose-Szenarien, die sich aus dem Druck-Temperatur-Diagramm ergeben, können weitere Randbedingungen der Metamorphose eine Rolle spielen und in den Mittelpunkt der Betrachtung gestellt werden.

6

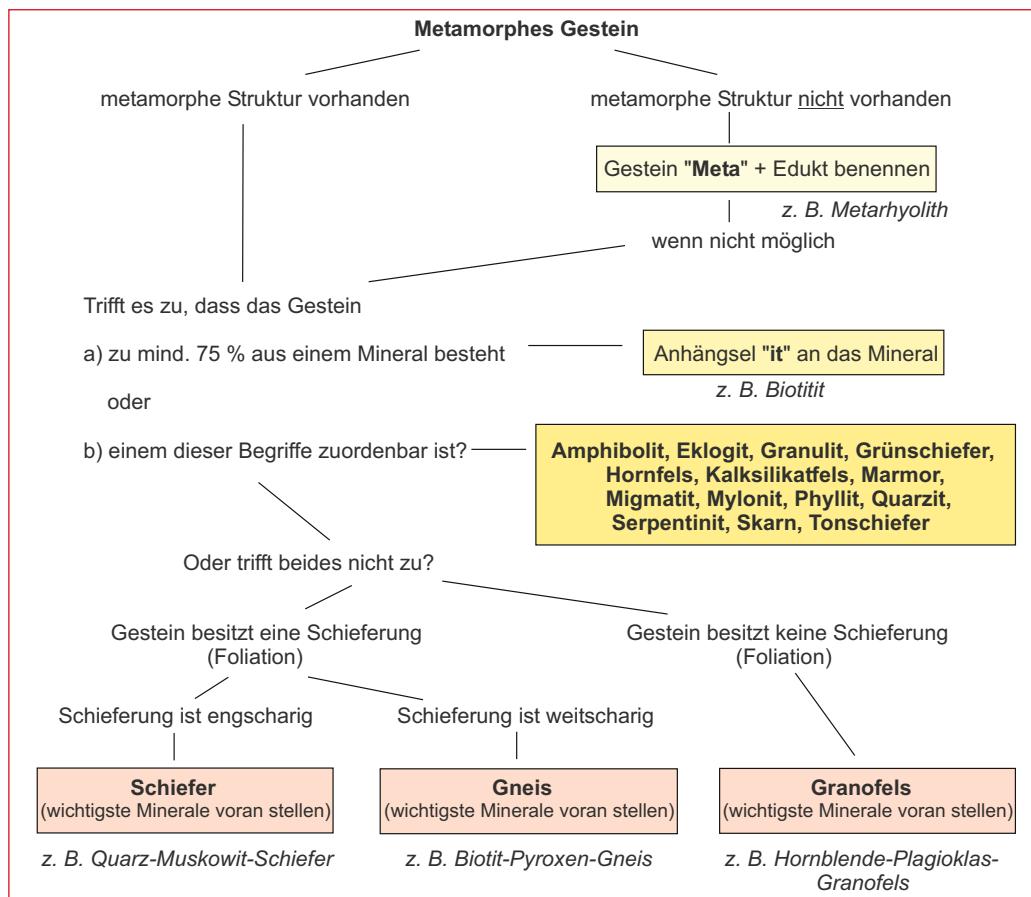


Abb. 6.13 Anspruchsschema für metamorphe Gesteine nach den Empfehlungen der IUGS (vereinfacht nach FETTES & DESMONS (Eds.) 2007).

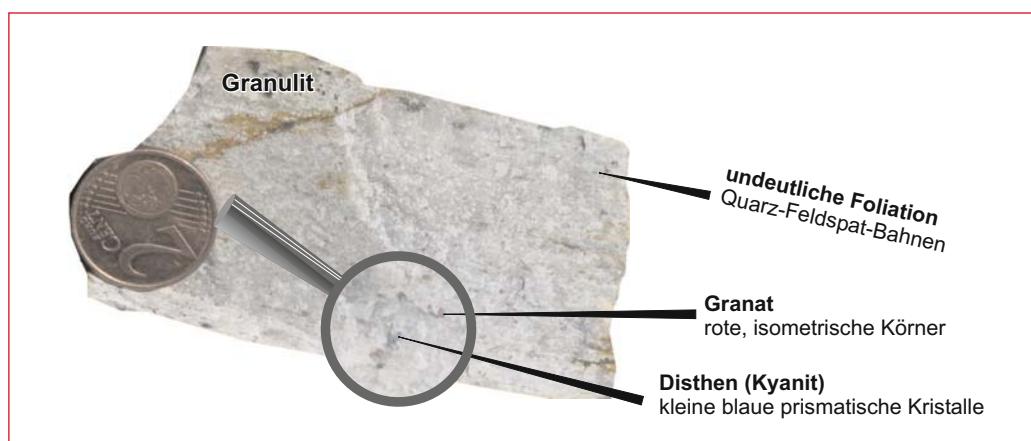


Abb. 6.14 Typischer „Weißstein“-Granulit des Sächsischen Granulitgebirges.

dann spricht man von Pyroxengranulit. Der ist typischer Vertreter granulitfaziell geprägter basischer Gesteine (Abb. 6.10).

Metasomatose

Unsere bisherigen Betrachtungen gingen davon aus, dass der Stoffbestand des jeweiligen Systems gleich bleibt (isochemie Verhältnisse). Aus einem Sandstein wird Quarzit, weil eben außer Quarz, das heißt Silizium und Sauerstoff, kein anderer nennenswerter Bestandteil vorhanden ist und auch nicht von außen zugeführt wird um etwas anderes als Quarz zu bilden. Eine Metamorphose, bei der das Gestein in chemischem Austausch mit seiner Umgebung steht, heißt Metasomatose (allochemie Verhältnisse).

Nicht immer ist ein solcher Austausch von Bedeutung für die Gesteinsansprache. Ein Gneis (klassische Nomenklatur) kann während der Metamorphose z.B. Natrium aufnehmen und neben dem Ablauf weiterer Mineralreaktionen „albitisieren“. Sein Name bleibt jedoch Gneis.

Es können aber Austauschprozesse existieren, die für das Gestein bzw. für uns als Betrachter gravierend sind. Beispiele sind:

- **Skarn** – Kalkstein, der während der Metamorphose nennenswerte Anteile von SiO_2 aufgenommen hat. Bei zusätzlicher Zufuhr z.B. von Eisen, war damit eine Lagerstättenbildung verbunden.
- **Greisen** – Granitische Gesteine, die von überkritischen Lösungen (Fluiden) erfasst worden sind, wobei der Feldspat teilweise völlig in Topas umgewandelt worden sein kann und Zinnlagerstätten entstanden sein können.

Impaktmetamorphose

Eine besonders außergewöhnliche Gesteinsumwandlung erfolgt während des Einschlags exo-terrestrischer Körper auf die Erde. Solche Einschläge sind durch extreme Druck- und Temperaturbedingungen gekennzeichnet, wie das Beispiel des in Süddeutschland gelegenen Impakt-Kraters Nördlinger Ries eindrucksvoll zeigt. Vor etwa 15 Millionen Jahren hat ein etwa



Abb. 6.15 Suevit, ein silikatisches Impaktgestein. Hier als Baumaterial in Nördlingen, Ries.

einen Kilometer großer Körper die ca. 500 Meter mächtigen süddeutschen Jura-Kalksteine bis auf das kristalline Fundament durchschlagen. Nach HEINZMANN & REIFF (2002) herrschten Drücke bis 1 000 GPa und Temperaturen bis 30 000 °C. Die silikatischen Gesteine wurden zertrümmert und teilweise aufgeschmolzen. Das Resultat war der **Suevit**, ein brekzienartiges und poröses Gestein mit Bruchstücken von Kristallin und durch völlige Aufschmelzung entstandenen Glas (Abb. 6.15). Die Hochdruckmodifikationen von SiO_2 , Coesit und Stishovit, qualifizieren das Material als echte Impaktite.

Migmatite

Kann ein Gestein den ständig steigenden Druck- und Temperaturbedingungen ewig trotzen? Natürlich nicht. Jedes Gestein würde früher oder



Abb. 6.16 Als Beispiel für einen Migmatit wurde ein Gestein ausgewählt, das häufig verbaut wird und vor allem als Fensterbank anzutreffen ist.

später schmelzen. Wann dieser Vorgang einsetzt, ist abhängig von den spezifischen Schmelztemperaturen der beteiligten Minerale, die ihrerseits mit dem Druck variieren. Eine weitere wichtige Einflussgröße ist die Gegenwart von Flüssmittel, vor allem Wasser. Fehlt einem Granit der OH-führende Glimmer, dann kann das Gestein über 1 000 °C ertragen ohne sich zu verflüssigen.

Noch einmal zurück zur Schmelztemperatur der Minerale. Bei einem polyminalischen Gestein existieren zwangsläufig Minerale die früher und solche die später schmelzen. Das bedeutet, dass bei bestimmten Temperaturen das Gestein aus einem noch nicht geschmolzenen metamorphen Teil und aus einem Teil Schmelze besteht. Erfolgt daraufhin die Abkühlung, liegt schließlich ein Gestein vor, das sowohl Metamorphit (Altbestand = **Paläosom**) als auch Magmatit (Neubestand = **Neosom**) ist. Das Gestein erhält den Namen Migmatit, was „gemischtes Gestein“ bedeutet. Der typische Migmatit besteht zum Teil aus dem noch nicht geschmolzenen Gneis mit einer deutlichen Foliation und zum Teil aus dem daraus hervorgegangenen Granit mit richtungslosem Mosaikgefüge (Abb. 6.16).

Serpentinite

Die bisher betrachteten Metamorphe erlebten die Metamorphose als Gesteine, die von der Erdoberfläche oder von flachkrustalen Niveaus in die Tiefe befördert worden waren.

Ultrabasische Magmatite sind jedoch meist Gesteine des oberen Mantels, also der Tiefe. Ihre Metamorphose vollzieht sich auf dem Weg von „unten“ nach „oben“. Damit ist eine Mineralumwandlung bei Wasseraufnahme verbunden. Vor allem der Olivin reagiert hierbei sehr empfindlich und es entsteht Serpentin, der relativ weich ist. Daher ist das entstehende Gestein, der Serpentinit, zur Natursteinbearbeitung prädestiniert.

Der Serpentinit ist feinkörnig und in Abhängigkeit von den Serpentinehalten unterschiedlich stark grün gefärbt.

Aufgaben

1. Welches metamorphe Gestein entsteht, wenn folgende Ausgangsmaterialien den gegebenen p-T-Bedingungen unterliegen?
 - a) Sandstein; 800 °C; 1 GPa
 - b) Tonschiefer; 400 °C; 0,5 GPa
 - c) Tonstein; 500 °C; 0,1 GPa
 - d) Granodiorit; 300 °C; 0,4 GPa
 - e) Konglomerat; 700 °C; 0,9 GPa
 - f) Gabbro; 450 °C; 1,5 GPa
 - g) Biotitgranit; 1 000 °C; 1 GPa
 - h) Peridotit; 100 °C; 1,4 GPa
2. Benennen Sie die metamorphen Gesteine folgender Struktur und Mineralzusammensetzung nach IUGS!
 - a) keine Foliation; Pyrop-Granat, grüner Pyroxen
 - b) angedeutete Foliation, abgebildet durch ausgewalzte Quarze; Kalifeldspat, Sillimanit, Granat
 - c) deutliche dachschieferartige Foliation, Minerale mit bloßem Auge nicht sichtbar, seidiger Glanz
 - d) konglomeratisch; schwach folierte Matrix mit Muskovit
 - e) keine Foliation; Pyroxen, Plagioklas
 - f) gut ausgebildete Foliation; Biotit, Quarz, wenig Granat
 - g) keine Foliation, fast ausschließlich Quarz

III Technische Gesteinskunde

7 Lockergesteine (Boden)

7.1 Technische Lockergesteinsansprache

Für den Anwender sind die Lockergesteine die wichtigste Gesteinsgruppe. Geologisch betrachtet, umfassen sie im Wesentlichen die Sedimente – also unverfestigtes Ablagerungsmaterial, in dem viele Geologen noch kein richtiges Gestein sehen. Neben den echt sedimentierten Partikeln (transportiert und abgelagert) gehört zu den Lockergesteinen auch solches Material, das an Ort und Stelle durch Verwitterung eines Gesteins gebildet worden ist. Da der ordnende Transport fehlte, ist dieses meist unsortiert und als Lehm zu bezeichnen. Manchmal geht das Lockergestein auch fremd und rekrutiert seine Partikel aus dem Reich der Magmatite. Viele vulkanische Materialien (Aschen, Pyroklastika, Kapitel 5.1) sind unverfestigt und somit hierher zu stellen.

In der Praxis spielen vor allem die klastischen Sedimente eine Rolle. Da meist an der Erdoberfläche gekratzt wird, sind häufig organische Beimengungen aus abgestorbenen und humifizierten Pflanzenteilen enthalten. Klastische Sedimente wurden bereits in Kapitel 4.2 besprochen und dort entsprechend ihrer Korngröße eingeteilt (Abb. 4.4). Bei der Feldansprache geschieht das durch einfaches Abschätzen. Das Ergebnis ist natürlich subjektiv und stark von der Erfahrung des Ansprechenden abhängig.

In Baugrundberichten oder bei Gutachten zu Lagerstätten genügt das Schätzen der einzelnen Korngrößenanteile natürlich nicht und es muss eine konkrete Aussage zur Korngröße getroffen werden. Das geschieht durch **Siebung**. Ein Satz von Sieben mit Sieben verschiedener Maschenweite wird benutzt um das Gesamtvolumen auf einzelne Korngrößenklassen aufzuteilen. Allerdings funktioniert eine Siebung nur bis zu einer gewissen Korngröße. Unter 0,1 mm sind die

Maschen der Siebe so klein, dass die Körnchen durch ihre Oberflächenkräfte die Löcher „verkleben“. Hier muss die **Sedimentationsanalyse** herangezogen werden. Die allmähliche Sedimentation der feinen, bindigen Partikel aus einer Wassersäule bildet das Prinzip dieser Analyse und ist in Abbildung 7.1 skizziert.

Summenkurven

Die Ergebnisse der Sieb- und Sedimentationsanalyse können zusammengefasst und graphisch dargestellt werden. Es bietet sich eine Häufigkeitsverteilung an, bei der das Spektrum auf eine diskrete Anzahl von Klassen – eben die beim Sieben bestimmten – verteilt wird. Zum Beispiel: 5% Ton, 20% Schluff, 70% Sand und 5% Kies. Ein entsprechendes Häufigkeitsdiagramm (Histogramm, Abbildung 7.1) hat jedoch den Nachteil, dass keine weiteren Unterteilungen oder willkürlichen Abgrenzungen möglich sind. Zum Beispiel fordert eine potenzielle Nutzung des Sediments vielleicht, dass die Korngrößen zwischen 1 und 20 mm mindestens 75% ausmachen sollen oder dass Korngrößen unter 0,01 mm einen Anteil von 15% nicht übersteigen sollen. Um solche Anteile bestimmter Korngrößen zu erhalten, bedient man sich der so genannten Summenkurven.

Wie man aus einer Siebung eine Summenkurve erhält, zeigt Abbildung 7.2. Der Vorteil liegt auf der Hand. Die Maschen der Siebe können (fast) völlig willkürlich gewählt werden, also unabhängig von den Abgrenzungen der Korngrößenklassen. Trotzdem ist später jeder x-beliebige Korngrößenbereich quantifizierbar. Wie viel Volumenprozente sind größer oder kleiner als eine beliebige Korngröße? Diese Frage wäre mit einem normalen Häufigkeitsdiagramm nicht zu beantworten.

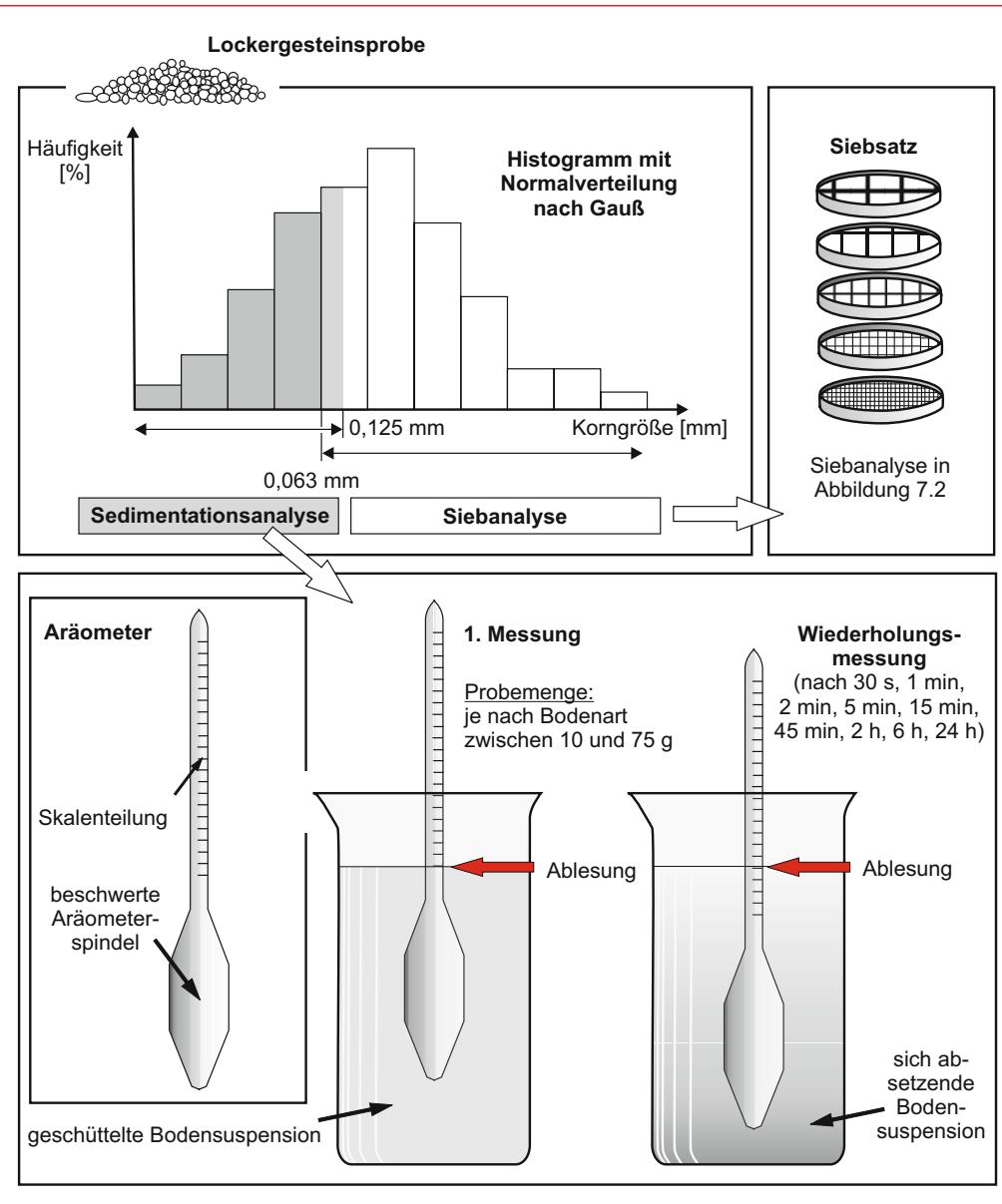


Abb. 7.1 Die Bestimmung der Korngrößenverteilung einer Lockergesteinsprobe im Labor. Meist sind die Anteile am Korngrößenspektrum normal verteilt (Gauß). Die Anteile grober Körner werden durch Siebung und die der feinen Partikel durch Sedimentation bestimmt. Das Prinzip der Sedimentationsanalyse zur Bestimmung der bindigen Korngrößen einer Bodenprobe nach DIN 18123 ist im unteren Teil der Abbildung dargestellt. Wie beim Messen der Zuckerkonzentration in Wein und Bier oder bei der Dichtebestimmung des Kühlwassers wird eine Bodensuspension „gespindelt“. Die Eintauchtiefe der Spindel (Aräometer) ist proportional zur Dichte der Suspension. Da sich das Bodenmaterial absetzt, nimmt die Dichte der Suspension ab, und das Aräometer taucht mit der Zeit immer tiefer ein. Mit den Werten der Ablesungen ermittelt man über Nomogramme (DIN) die Anteile der bindigen Korngrößen.

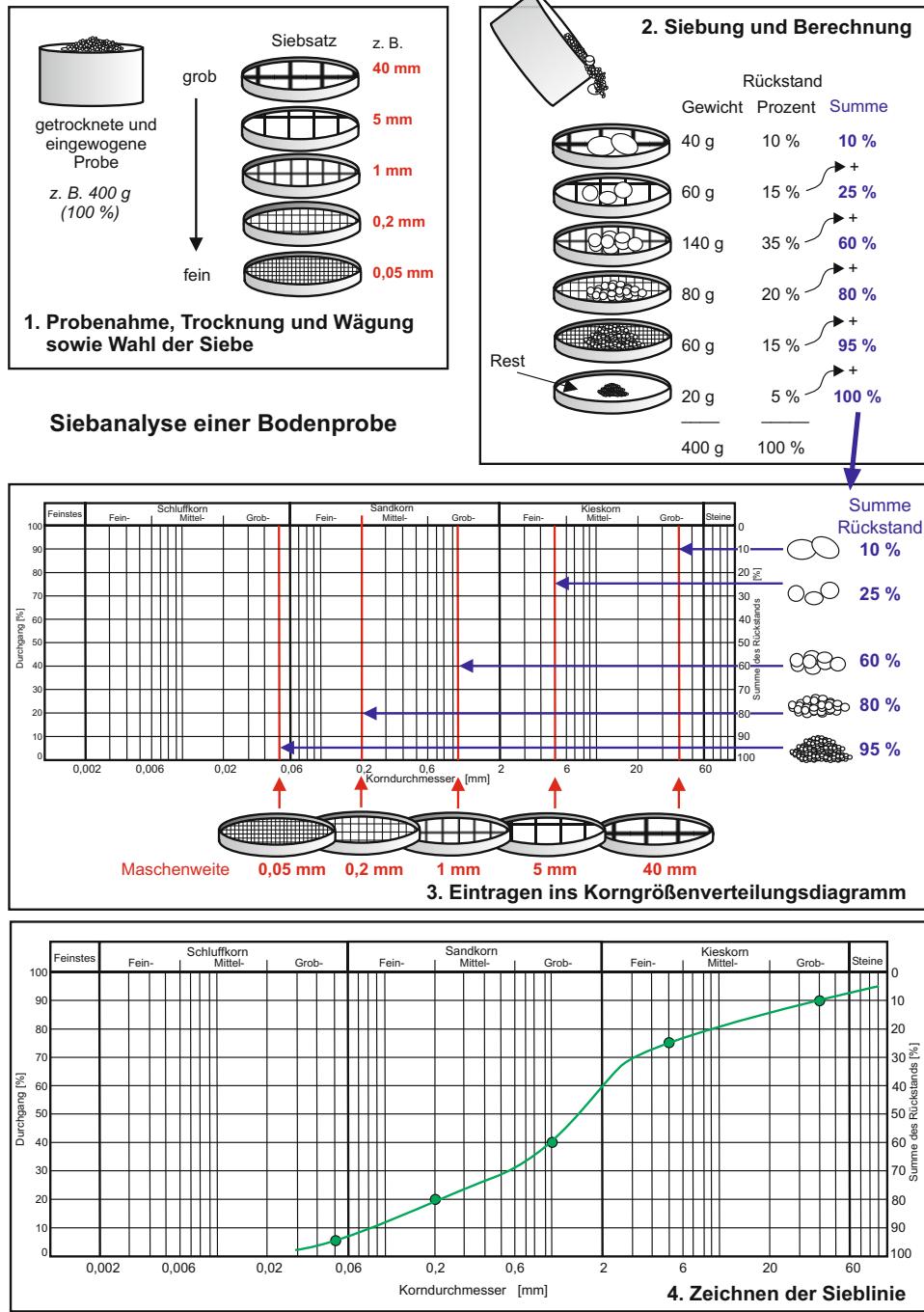


Abb. 7.2 Die Korngrößenverteilungsanalyse von der Siebung bis zur Erstellung einer Summenkurve. Mit Rot und Blau wird ein Beispiel für die Maschenweiten eines Siebsatzes und die Rückstandssummen einer Probe gegeben. Durch Eintrag der rot-blauen Wertepaare ins Diagramm und Verbinden der Punkte, kann eine Körnungslinie (grün) konstruiert werden.

7

Das wichtigste ist jedoch die Ansprache des Lockergesteins. Hier scheiden sich nun wiederum die Geister.

Da klastische Sedimente die mit Abstand am häufigsten untersuchten „Gesteine“ sind, gibt es zu deren Ansprache eine Vielzahl von Vorschriften in DIN-Normen und fachspezifischen Handbüchern, wo sie mal als Boden, mal als Lockergestein bezeichnet werden. Einige Regelwerke sollen hier vorgestellt und besprochen werden. Abgesehen von ihrer Wichtigkeit, dienen sie auch gut zur Veranschaulichung von Gemeinsamkeiten und spezifischen den Anforderungen verschiedener Branchen angepassten Unterschieden.

Lockergesteinsansprache in der geotechnischen Erkundung (nach DIN EN ISO 14688)

Diese Vorschrift heißt „Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden“ (früher DIN 4022). Sie dient als Norm in der Baugrund- und Grundwassererkundung und ist damit das wichtigste deutschsprachige Regelwerk für die Praxis der Lockergesteinsansprache. Wie in Kapitel 3 erläutert, ist unter Boden das unverfestigte Sediment (= Lockergestein) zu verstehen.

Dabei werden laut Vorschrift nicht nur mineralische Bestandteile, sondern auch organische Beimischungen bis hin zum rein organischen Boden (z. B. Torf) betrachtet. Auch die Fragen, ob der Boden künstlich angeschüttet wurde und ob es sich um poröses vulkanisches Material handelt, müssen beantwortet werden (Abb. 7.3).

Die Ansprache der mineralischen Bestandteile eines Bodens nach DIN EN ISO 14688 kann wie bereits besprochen durch Abschätzen der Anteile der Korngrößenkategorien oder durch Auswertung einer Summenkurve erfolgen. Für Korngemische gelten die folgenden Regeln:

1. Man unterscheidet:
 - Hauptanteil (Substantiv, z. B. Sand Sa, siehe Abbildung 4.4) und
 - Nebenanteile (Adjektive, z. B. tonig cl, kiesig gr).
2. Hauptanteil ist die Korngröße, die
 - am häufigsten vorkommt (Masse-%) oder die

b) die Eigenschaften des Bodens prägt.

Der letztere Fall trifft vor allem für Gemische zu, bei denen starke Beimengungen von Ton und Schluff die Eigenschaften eines ansonsten grobkörnigen Materials stark beeinflussen. Die Fallunterscheidung ist dann etwas komplizierter. Meist kommt man mit der Regel a) aus.

3. Nebenanteile werden nach Häufigkeit genannt und als Kürzel vor die Hauptkorngröße gesetzt. z. B. Sand, kiesig, schluffig grSiSa.
4. Als Haupt- und Nebenanteile dürfen auch die Untergruppen des Korngrößenpektrums gewählt werden: grob c, mittel m, fein f. z. B. Mittelsand, grobsandig, feinkiesig csafgrMSa.
5. Nebenanteilen unter 15% wird das Wort „schwach“, über 30% wird das Wort „stark“ voran gestellt; z. B. Grobkies, stark mittelkiesig, schwach steinig.
6. Bei zwei gleichstark vertretenen Anteilen (bis Verhältnis 40/60), die als Hauptanteile in Frage kommen, werden beide genannt und durch ein „und“ verbunden, z. B. Kies und Sand Gr/Sa.

Die Benennung erfolgt also durch Aufzählung der maximal drei wichtigsten Korngrößen. Das wird am Beispiel einer Siebkurve in Abbildung 7.3 noch einmal veranschaulicht. Die benutzten Kürzel stammen aus dem Englischen:

- Ton: Clay Cl, Schluff: Silt Si, Sand: Sand Sa, Kies: Grav Gr, Steine: Cobble Co, Blöcke: Boulder Bo,
- grob: coarse c, mittel: medium m, fein: fine f.

Die DIN EN ISO 14688 sieht keine besondere Benennung für Gemische vor – den Begriff Lehm gibt es hier nicht!

Ungleichförmigkeitsgrad

Bevor das nächste Regelwerk besprochen wird, soll noch eine Größe eingeführt werden, die die technischen Eigenschaften eines Lockergesteins wie kaum eine zweite beschreibt. Der Ungleichförmigkeitsgrad gibt die Steilheit der Siebkurve an. Ein steiler Verlauf bedeutet, dass der Großteil des Bodens in einem engen Bereich des Korngrößenpektrums liegt. Die Kurve ist eng gestuft.

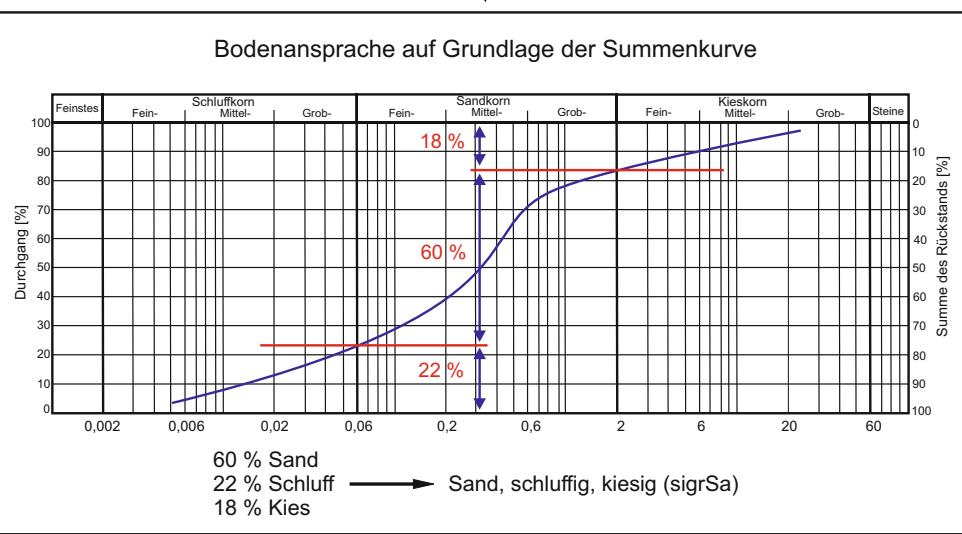
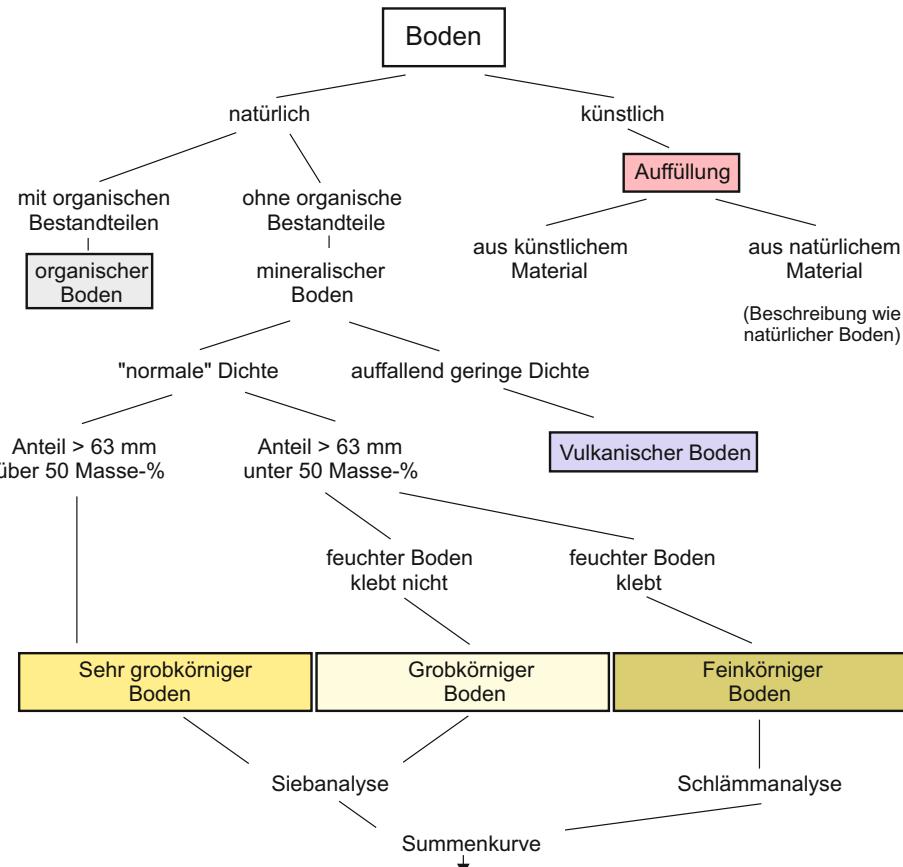


Abb. 7.3 Benennung einer Bodenprobe nach DIN EN ISO 14688 (Nachfolger der DIN 4022). Ein Beispiel zeigt die Benennung der mineralischen Komponenten auf Grundlage der Siebkurve.

7

Umgekehrt beinhaltet ein weit gestufter Boden mehrere Korngrößenklassen. Der Ungleichförmigkeitsgrad wird als C_U oder U angegeben:

$$U = d_{60}/d_{10}$$

d_{60} = Korngröße bei der die Summenkurve die 60%-Linie des Siebdurchgangs schneidet (d. h. dass 60 % der Probe kleiner als diese Korngröße sind),

d_{10} = Korngröße beim Schnittpunkt mit der 10%-Linie des Siebdurchgangs.

Der Ungleichförmigkeitsgrad ist das Spiegelbild der geologischen Bildung des Lockergesteins (Abb. 7.4). Er zeigt wie stark das Material vor sei-

ner Sedimentation transportiert und sortiert wurde. Der Geologe kann mit dem Ungleichförmigkeitsgrad also wichtige genetische Aussagen verknüpfen (Siebkurven in Abb. 4.3). Den Anwender interessiert das weniger. Aber auch er kann eine Vielzahl von Eigenschaften aus U ableiten. Das wichtigste ist die Porosität, die umso höher ist, je kleiner der Ungleichförmigkeitsgrad ist. Das ist leicht einzusehen, wenn man bedenkt, dass bei einem weit gestuften Boden die Zwickel zwischen den großen Körnern durch Körner kleinerer Durchmesser gefüllt werden, deren Zwickel wiederum durch noch kleinere und so weiter (Abb. 7.4).

Aus der Porosität wiederum sind weitere technische Größen ableitbar, wie Wasserdurchlässigkeit

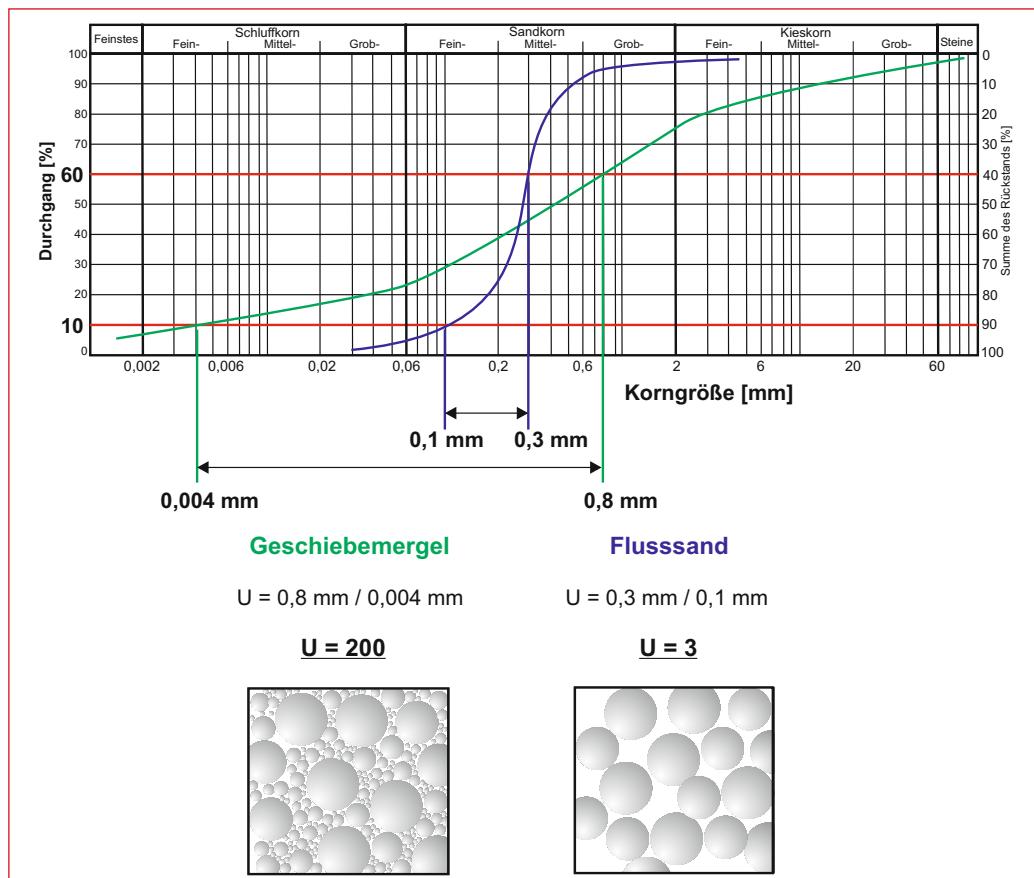


Abb. 7.4 Die Ermittlung des Ungleichförmigkeitsgrades aus der Siebkurve (nach DIN 18196). Zwei Beispiele sollen die prinzipiellen Möglichkeiten „eng gestuft“ und „weit gestuft“, die möglichen Interpretationen und den zugehörigen Kornaufbau illustrieren.

keit, Speichervermögen und Frostbeständigkeit des Bodens. Kein Wunder, dass der Ungleichförmigkeitsgrad für Bauleute Einzug in die Bodenansprache gehalten hat.

Lockergesteinsansprache in der Bautechnik (nach DIN 18196)

Die DIN 18196 stammt nicht aus der Erkundung, sondern direkt aus dem Bauwesen – konkreter: aus Erd- und Grundbau. Die technischen Belange eines Bodens stehen hier also noch stärker als in der DIN EN ISO 14688 im Vordergrund. Die DIN 18196 heißt daher auch „Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke“.

Ausgangspunkt ist wieder eine Korngrößenverteilungsanalyse, am besten in Form einer Siebkurve. Je nach Ton- und Schluffgehalt wird zunächst in grobkörnige, gemischtkörnige und feinkörnige Böden unterschieden (Abb. 7.5). Die Weiterbehandlung erfolgt innerhalb dieser Gruppen sehr unterschiedlich.

1. Grobkörnige Böden. Für die grobkörnigen Böden ist nach dem Kriterium Kiesanteil der Ungleichförmigkeitsgrad wichtig. $U < 6$ bedeutet „eng gestuft“, $U \geq 6$ bedeutet „weit gestuft“.

Aber Vorsicht! Andere Regelwerke legen diese Grenze anders.

Intermittierend heißt hier vereinfacht gesagt: mehrere Kornverteilungsmaxima, was eine stufige Siebkurve bedeutet.

2. Gemischtkörnige Böden. Hier werden lediglich die Kies-, Schluff- und Tonanteile wie in Abbildung 7.5 gezeigt, abgefragt.

3. Feinkörnige Böden. Für die Unterscheidung der Tone und Schliffe werden hier anders als bei anderen Ansprachen keine Schlämmanalysen benötigt. Der Bauingenieur zieht Plastizitätseigenschaften zu Rate, die bereits von ATTERBERG 1911 definiert wurden. Es handelt sich dabei um die Zustandsgrenzen Fließgrenze, Ausrollgrenze und Schrumpfgrenze und um die Plastizitätszahl. Sie sind empirische Größen, die durch genormte Versuche ermittelt (DIN 18122) und im nächsten Abschnitt näher betrachtet werden.

Die Bestimmung einer Bodenprobe nach DIN 18196 führt schließlich zur Einordnung der Probe in eine Bodengruppe. Sie wird mit einem zweibuchstabigen Kürzel belegt, z. B. SE, ST oder TM.

7

Wassergehalt und Zustandsgrenzen

Die Atterberg'schen Zustandsgrenzen sind vor allem für die bautechnische Klassifikation von Lockergesteinen (DIN 18196) ausschlaggebend. Es sind Parameter, die sich auf Eigenschaften beziehen, die mit dem Wassergehalt eines Bodens zusammenhängen. Mancher bindige Boden wird bei einem bestimmten Wassergehalt plastisch und etwas klebrig sein, während ein anderer Boden beim selben Wassergehalt bereits zerfließt. Für diese Unterschiede sind wiederum die Korngrößenanteile verantwortlich und in besonderem Maße ist der Tonmineralgehalt ausschlaggebend. Diese feinen Partikel ($< 0,002$ mm, Kolloide) sind ganz besonders in der Lage Wasser anzulagern und somit die Plastizitätseigenschaften zu beeinflussen.

Mit der Bestimmung dieser Eigenschaften ist man in der Lage bindige Böden anzusprechen. Man umgeht gewissermaßen die Prozedur der Schlämmanalyse und gewinnt gleichzeitig wichtige Informationen über das geotechnische Verhalten dieser Lockergesteine – Informationen, die aus der Summenkurve allein nicht ableitbar wären.

Zunächst aber ein paar Worte zum Wassergehalt. Er stellt eine Konzentrationsangabe dar und kann als solche unterschiedlich angegeben werden. Er kann auf Masse oder Volumen bezogen werden und als Prozentangabe oder einheitsloser Wert (normalerweise < 1) erscheinen. In den deutschen Vorschriften (DIN 18121) ist er definiert als

$$\text{Wassergehalt} = \text{Masse Wasser/Trockenmasse}$$

$$w = m_w/m_D$$

Das bedeutet, dass der Wassergehalt nicht auf die frische und feuchte Probe bezogen wird, sondern auf die Masse der bei 105°C getrockneten Probe. Häufig wird der gewonnene Wert noch mit 100%

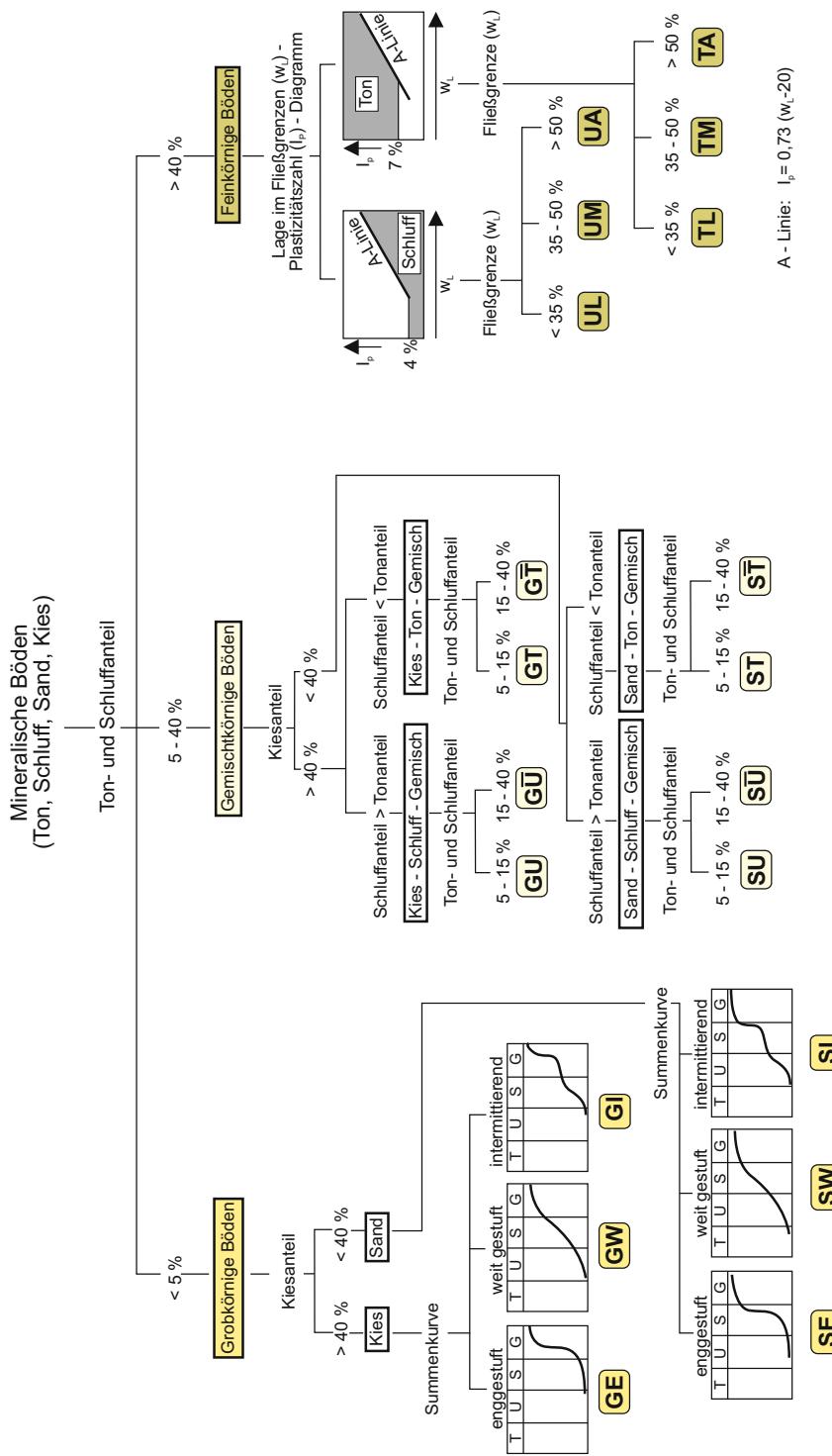


Abb. 7.5 Die Ansprache rein mineralischer Böden nach Bautechnischer Bodenklassifikation (DIN 18196) im Schema.

multipliziert. Damit wird aus einem Wassergehalt von beispielsweise 0,2 die Angabe 20%. Der Ablauf einer Wassergehaltsbestimmung ist in Abbildung 7.6 dargestellt.

Ob ein Lockergestein flüssig oder fest erscheint, hängt vom Wassergehalt ab. Aber nicht nur. Die Korngrößenverteilung und die mineralischen Besonderheiten jedes einzelnen Bodens entscheiden über seine „Verflüssigungsabhängigkeit“. Die Abbildung 7.7 zeigt die möglichen Konsistenzen eines Bodens von flüssig bis fest. Zwei charakteristische Größen kennzeichnen die wichtigen Übergänge:

- von flüssig zu plastisch die **Fließgrenze w_L** und
- von plastisch zu halbfest die **Ausroll- oder Plastizitätsgrenze w_P** .

Dazwischen befindet sich der Wassergehalts-Bereich in dem die Probe plastisch ist, beschrieben durch die **Plastizitätszahl I_p** . Fließ- und Ausrollgrenze, sowie die Plastizitätszahl, sind

materialabhängig und werden experimentell bestimmt, dargestellt in Abbildung 7.7.

Soll ein Boden als Bettungsstoff eingebaut werden oder eine Gebäudegrundung in ihm erfolgen, dann muss sich der Boden mit seinem tatsächlichen und augenblicklichen Wassergehalt an den Werten für die Zustandsgrenzen und die Plastizitätszahl messen. In allen bisherigen Vorschriften war es das Ziel, dem Lockergestein einen Namen zu geben, unabhängig von seinem realen Zustand hinsichtlich des Wassergehalts. Im nächsten Punkt wird jedoch diesbezüglich eine Einschätzung verlangt. Niemand will auf einem triefnassen Boden bauen. Der reale Wassergehalt allein ist jedoch nicht aussagekräftig. Die erforderliche Einschätzung erfolgt über die **Konsistenzzahl I_C** , die den tatsächlichen Wassergehalt ins Verhältnis zu den theoretischen Werten der Plastizität setzt. Erst so kann eine Aussage (über den subjektiven Eindruck hinaus) getroffen werden, ob das Bodenmaterial momentan fest, steif oder doch nur breiig ist (Abb. 7.8).

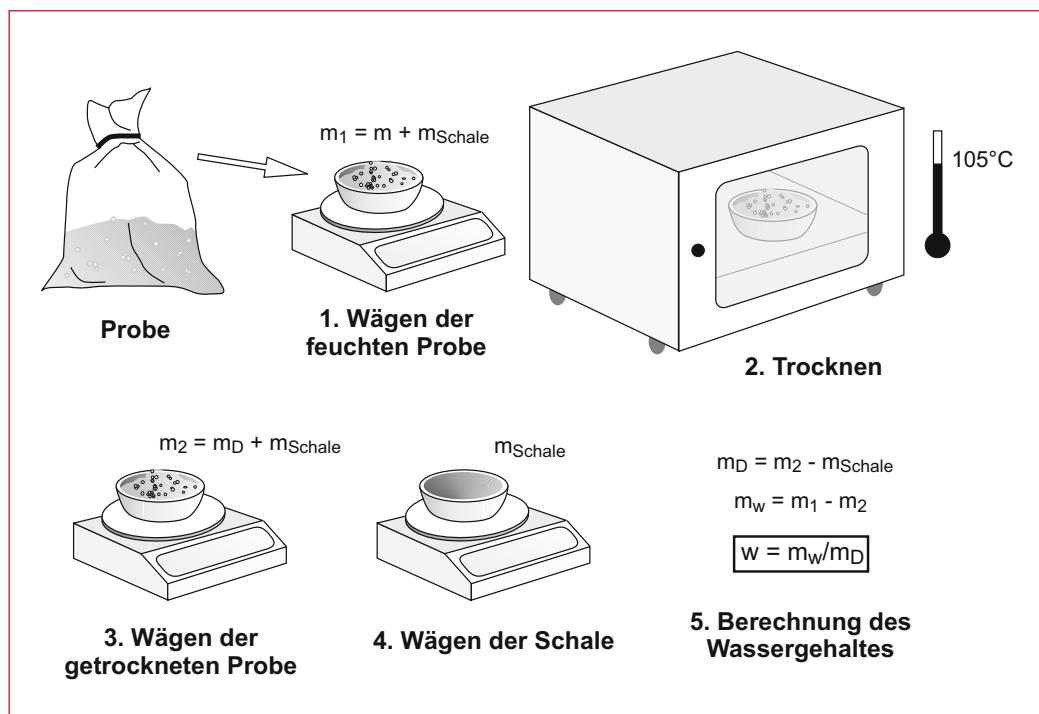


Abb. 7.6 Die Bestimmung des Wassergehaltes einer Bodenprobe nach DIN 18121.

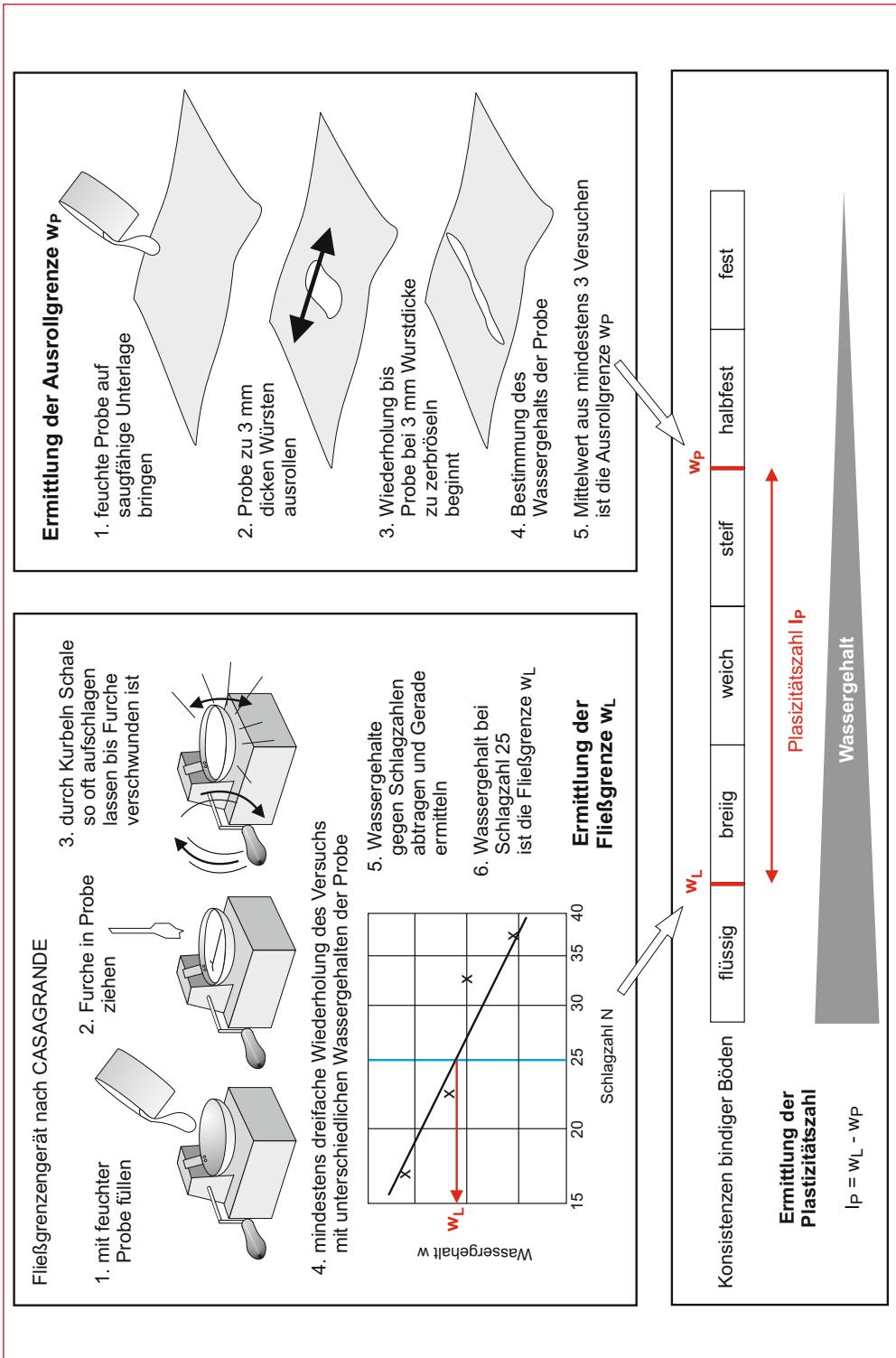


Abb. 7.7 Die Ermittlung der Atterberg'schen Zustandsgrenzen Fließ- und Ausrollgrenze und der Plastizitätszahl nach DIN 18122.

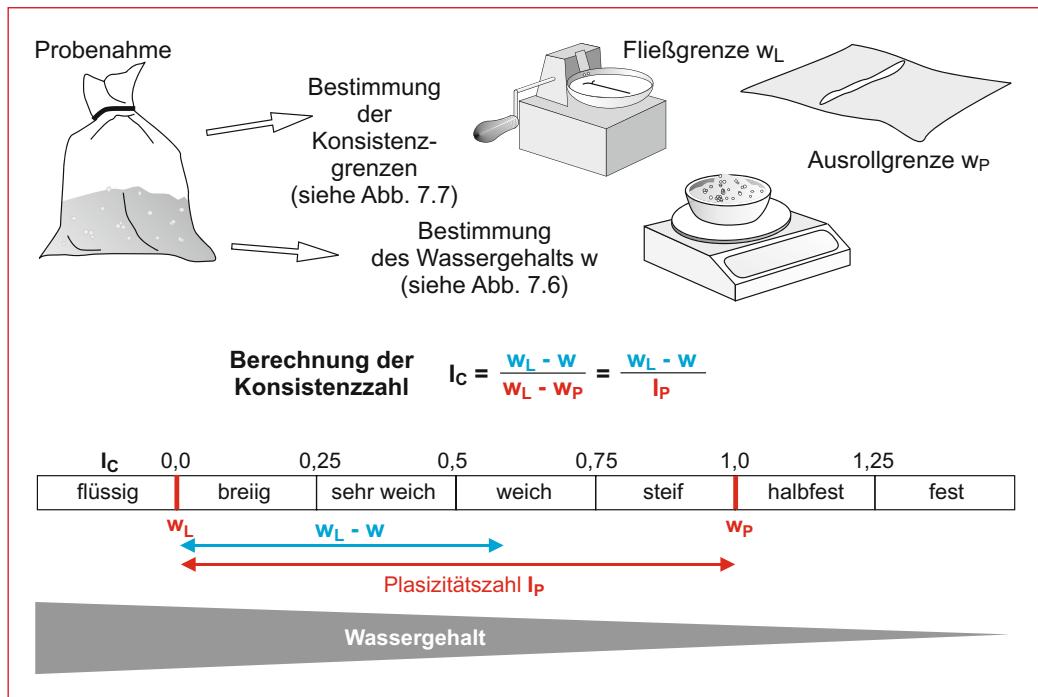


Abb. 7.8 Ermittlung der Konsistenz eines bindigen Bodens von der Probenahme zum Ergebnis (nach DIN 18122).

Bodenklassen nach VOB (DIN 18300 und DIN 18311)

Wer eine Bauleistung erbringen will, muss sich beim Auftraggeber um eine solche bewerben. Dafür existiert ein Regelwerk, bestehend aus einer Anzahl von DIN-Vorschriften, das von der äußeren Form der Bewerbung bis zur Art der Abrechnung alles regelt – die **Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB)**.

Jedes Bauwerk ist auf einem Gestein gegründet. Meist ist es locker. Auch hier gibt es also einen Bedarf der Lockergesteinsansprache. Da es sich um Baumaßnahmen handelt, greift die Bau-technische Bodenklassifikation DIN 18196. Aber für das Grobe wird in der VOB das bestehende Regelwerk noch einmal abstrahiert und alle Gesteine werden in sieben Klassen, zwei für Fels- und fünf für Bodenarten, gepresst. Ähnlich geht die DIN 18311 vor, die speziell für Nassbaggerarbeiten gilt und alle Gesteine in zwölf Klassen ein teilt. Die Einordnung in diese sieben bzw. zwölf

Schubladen setzt die Abbildung 7.9 graphisch um. Erläuternd sei lediglich auf einige Besonderheiten hingewiesen, die im Gegensatz zu den bisher besprochenen Regelwerken stehen:

- Nichtbindig heißt hier rollig.
- Der augenblickliche Zustand des Untergrundes interessiert. Damit kommt die Konsistenzzahl ins Spiel.
- Neben der Einordnung in die jeweilige Klasse werden klassenspezifisch weitere Aussagen zum Gestein verlangt.
- Der Einfachheit halber werden hier die zwei Felsklassen mit behandelt.

Lockergesteinsansprache in Land- und Forstwirtschaft (nach DIN 4220 und DIN 19682)

Der Name der Norm (DIN 4220) „Bodenkundliche Standortbeurteilung“ besagt, dass hier eine

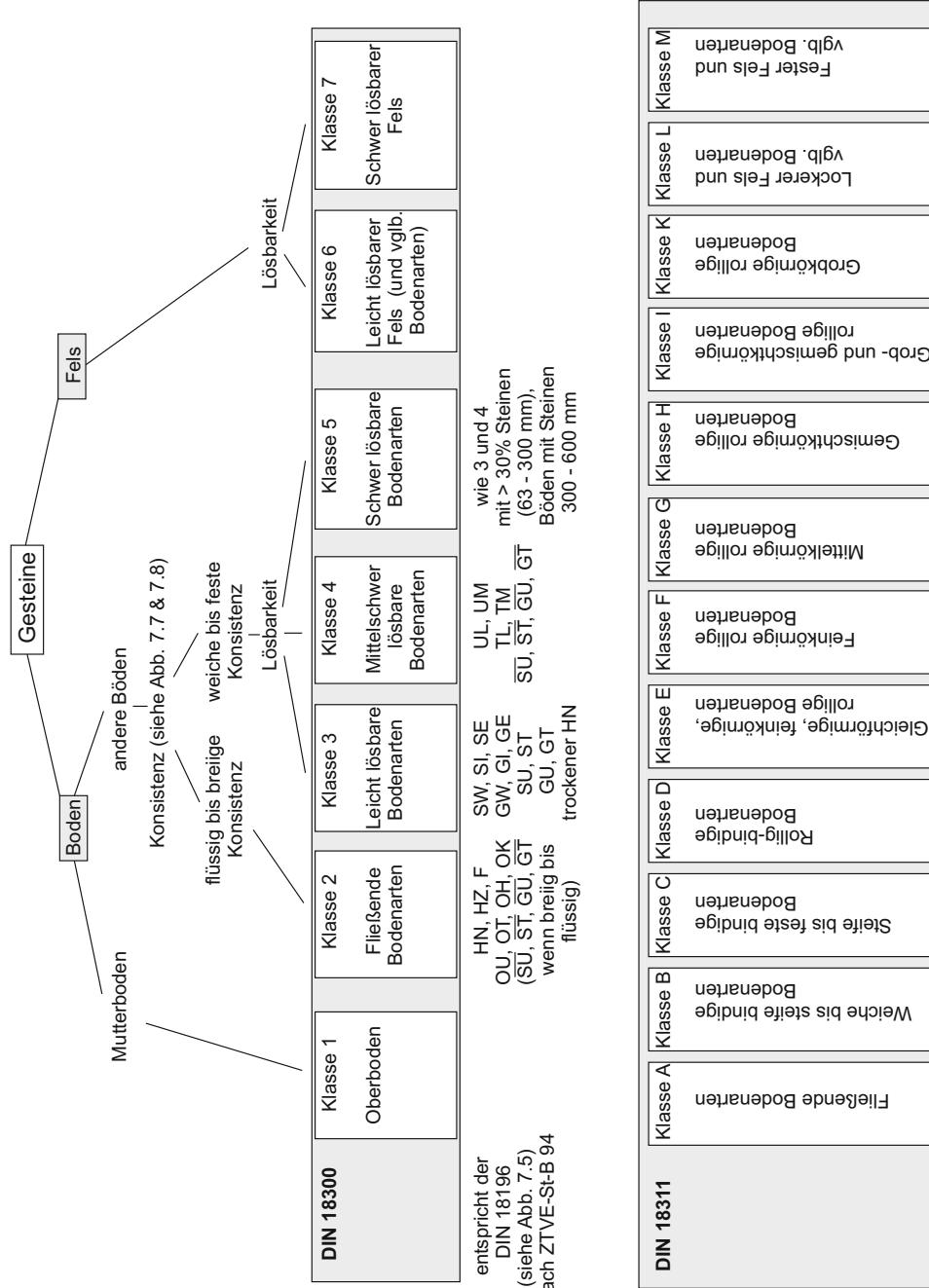


Abb. 7.9 Die Einordnung eines Gesteins in Klassen nach DIN 18300 und DIN 18311 (VOB).

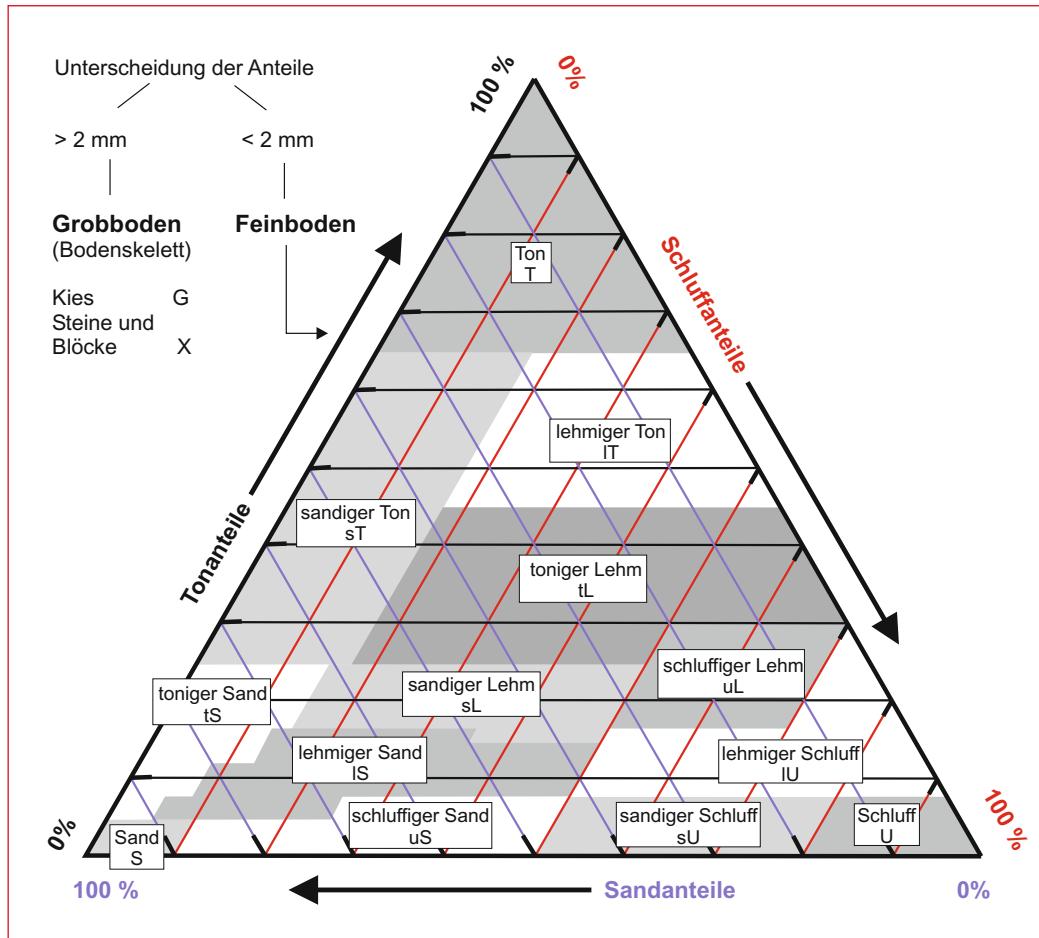


Abb. 7.10 Bodenarten nach DIN 4220 und DIN 19682 (Bodenkunde). Sind Ton, Schluff und Sand vom Bodenskelett getrennt und zu 100 % aufsummiert worden, dann lässt sich mit dem Ablesen von zwei der drei Feinbodengruppen (schwarz, rot, blau) ein Schnittpunkt im Dreieck finden. Dieser Schnittpunkt liegt im Feld der entsprechenden Ansprache für den Feinboden.

weitere Klientel bedient wird, die auch darauf angewiesen ist, dem Boden einen Namen zu geben: Forst- und Landwirtschaftler.

Die technischen Eigenschaften treten wieder in den Hintergrund und ein feldtaugliches Ansprachesschema rückt nach vorn (Abb. 7.10).

Der Bodenkundler (das ist derjenige, der Bodentypen wie Schwarzerde, Braunerde usw. auseinander hält) unterscheidet, anders als alle anderen Anwender, in das Bodenskelett (Kies und größer) und den Feinboden (Sand, Schluff, Ton). Die drei Komponenten des Feinbodens

spannen ein Dreieck auf, das in Felder gegliedert ist, die jeweils für eine andere Bodenbezeichnung stehen. Aufpassen! Die Gesamtzahl im Dreieck ergibt 100 %. Das Bodenskelett muss zuvor abgezogen werden.

Zum Feinboden gehören jedoch nicht nur die Kategorien Sand, Schluff und Ton, sondern auch der Lehm als Mischmaterial.

Bodenskelettanteile von mindestens 75 % am Gesamtboden machen den Boden zum Skelettboden.

7.2 Technische Eigenschaften von Lockergesteinen

7.2.1 Laborbestimmte Eigenschaften

Sollen Gesteine beschrieben werden, dann sind nicht immer nur solche Eigenschaften gefragt, die zur Benennung eines Gesteins führen. Gerade der Anwender fragt eine ganze Reihe weiterer Größen ab, die für ihn entsprechend dem Ziel von Interesse sind. Zum Beispiel werden Gesteine in der oben genannten Verdingungsordnung Bau (VOB) zwar in Klassen eingeordnet. Je nach Gesteinsklasse, müssen aber weitere Angaben gemacht werden, um die Eignung des Materials als Baugrund zu belegen oder auszuschließen.

Einige wichtige Größen, die nicht nur der Bauingenieur braucht, sollen kurz beschrieben und ihre Bestimmung kurz erläutert werden. Wie immer geht es dabei nicht um die korrekte Wiedergabe einer Norm, sondern um das Kennenlernen verschiedener Aspekte des Mediums Gestein. Es geht um prinzipielle Zusammenhänge zwischen natürlichen Gesteinseigenschaften und deren Projektion im Ingenieurwesen.

Lagerungsdichte

Die Dichte eines Gesteins berechnet sich aus seiner Masse im Verhältnis zu seinem Volumen. Das ist genauso wie bei jedem anderen Stoff. Zählen jedoch die Porenräume des Gesteins mit? Spielt die Bodenfeuchtigkeit eine Rolle? Ist die Dichte eines geschütteten Sandhaufens dieselbe, wie wenn sich der Sand „gewachsen“ im Boden befindet? Die Antworten lauten: Ja, Nein und Nein. Aber der Reihe nach.

Zunächst kennen wir die **Dichte der mineralischen Substanzen**, die das Gestein aufbauen:

Dichte der Festsubstanz = Masse der Festsubstanz/Volumen der Festsubstanz

$$\rho_F = m_F/V_F$$

Diese Dichte wurde bereits im Kapitel „Minerale“ angesprochen. Ein Gestein, welches nur aus Quarz besteht, z.B. Quarzit, hat als Dichte der Festsubstanz die Dichte von Quarz, also 2,65 g/cm³.

Da Lockergesteine meist aus Silikaten bestehen, die in ihrer Dichte kaum vom Quarz abweichen und viele Sande sogar größtenteils aus Quarz bestehen, kann dieser Wert für die meisten Böden als gegeben angesehen werden.

Weil sich dieser Wert auf reine Festsubstanz bezieht, spielt der Porenraum keine Rolle und die Dichte der Festsubstanz ist in der Praxis wenig nützlich. Denn alle Lockergesteine haben Porenräume, die im Verhältnis zum Gesamtvolumen oder zur Festsubstanz variieren.

Die wichtigste Dichte der Praxis ist die **Trockendichte**, in der die Masse des getrockneten Materials zum Probenvolumen ins Verhältnis gesetzt wird:

Trockendichte = Masse der getrockneten Probe/
Volumen der Probe

$$\rho_D = m_D/V$$

In einem dichten Quarzit, der keinerlei Porosität hat, ist also ρ_F gleich ρ_D (Abb. 7.11). Einen realen Wert, als Momentaufnahme des Bodens, liefert hingegen die **Feuchtdichte**.

Feuchtdichte = Masse der „frischen“ Probe/
Volumen der Probe

$$\rho = m/V$$

Mit der Porosität im Gestein kommt natürlich auch der Poreninhalt zum Tragen. Wenn nicht gerade Erdöl, Erdgas oder eine Altlast erkundet wird, handelt es sich dabei um Wasser. Für einen Hausbau zum Beispiel, bedeutet Wasser im Porenraum einen Auftrieb der Bodenpartikel und damit manchmal nichts Gutes. Für geotechnische Berechnungen sind somit weitere Angaben notwendig, die sich auf wassergesättigten Boden beziehen und den Verlust der Gewichtskraft mit einbeziehen (Wichte, Dichte unter Auftrieb).

Nun kann jedes Lockergestein je nach Verdichtungsgrad mehr oder weniger Poren haben. Das heißt, die Masse tragende Festsubstanz nimmt mehr oder weniger Raum ein. Ohne Vergleich ist es dabei schwer zu sagen, ob ein unter-

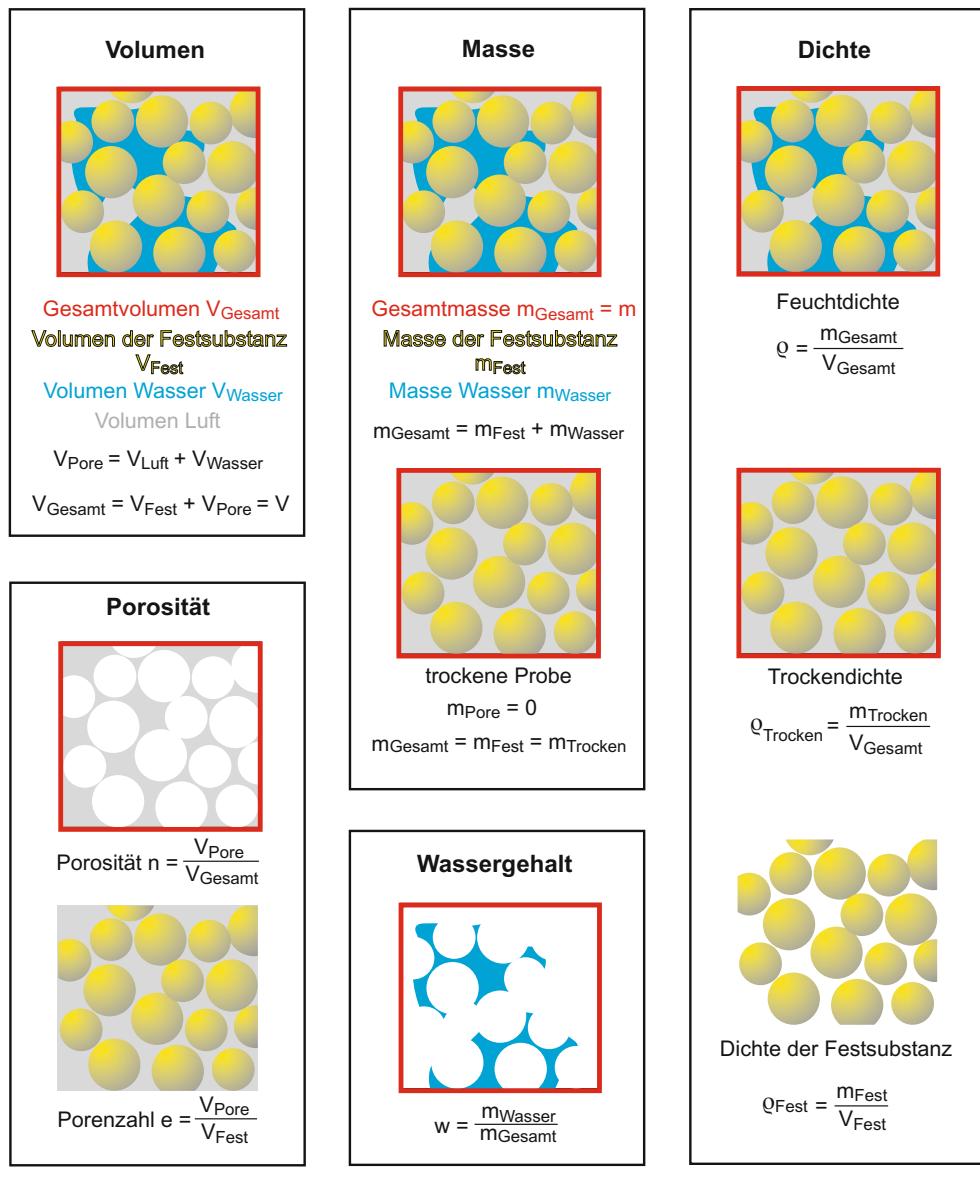


Abb. 7.11 Die Größen Volumen, Masse, Porosität, Wassergehalt und die verschiedenen Dichte-Angaben in einer graphischen Übersicht. Anders als im Text sind die Indizierungen der physikalischen Größen hier ausgeschrieben.

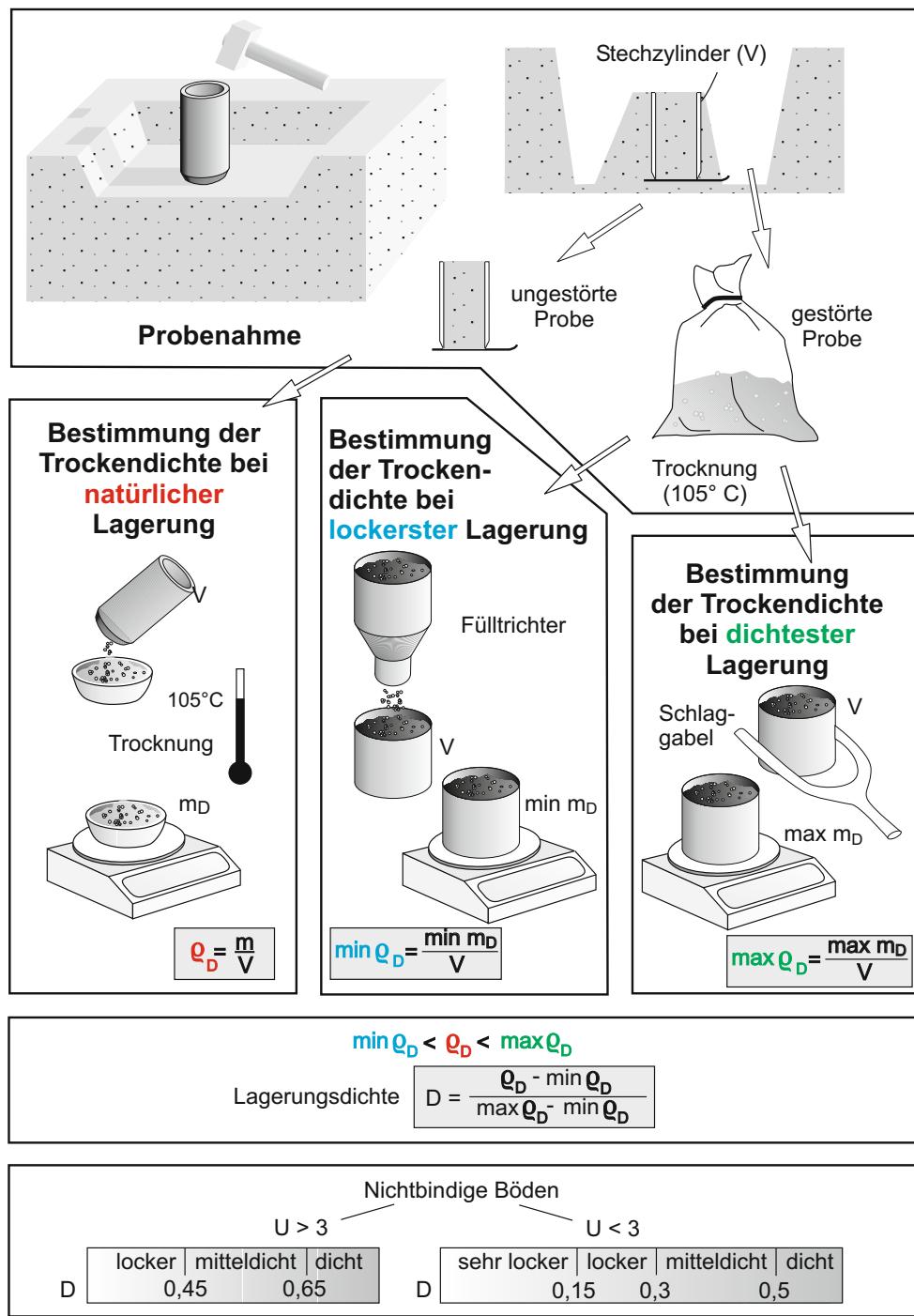


Abb. 7.12 Bestimmung der Lagerungsdichte eines nichtbindigen Bodens (nach DIN 18126) einschließlich der ungestörten Bodenprobenahme (nach DIN 4021). Die ermittelten Werte für den Verdichtungsgrad können, abhängig vom Ungleichförmigkeitsgrad, in eine verbale Formulierung umgesetzt werden (DIN 1054).

suchter Boden bereits seine beste Verdichtbarkeit, oder höchste Dichte, erreicht hat. Ähnlich wie bei der Konsistenz (Abschnitt 7.1) wird der Zustand eines Lockergestein an seinen eigenen Grenzwerten gemessen. Das heißt, dass die dichtesten und die lockersten Lagerungsverhältnisse die möglich sind, experimentell bestimmt werden.

Jeder kennt das Dilemma des Wiedernachfüllens einer Kaffeebüchse. Die Nachfüll-Packung will einfach nicht in die alte Dose gehen. Was hilft sind Schläge. In ähnlicher Weise erfolgt die Bestimmung der **lockersten** (Schüttungen) **und dichtesten Lagerung** (Klopfen) eines Lockergesteins.

Der mathematische Vergleich dieser Parameter mit dem realen Wert ergibt die **Lagerungsdichte**. Um den realen Dichtewert zu erhalten, muss die Probe so gut wie möglich die Realität widerspiegeln. Eine lose eingesammelte Probe nimmt natürlich mehr Volumen in Anspruch als dasselbe Material eingeklemmt im engen „Erdreich“. Der Fachmann entscheidet sich deshalb für die Entnahme einer so genannten **ungestörten Probe**. In ihr wird der Lockergesteinsverband so gut es geht erhalten, obwohl ein Eins-zu-eins-Abbild nie vollständig möglich ist.

Das Prinzip der ungestörten Probenahme, sowie der Bestimmung der Lagerungsdichte, wird in Abbildung 7.12 veranschaulicht.

Proctordichte

Die lockerste und die dichteste Lagerung eines Bodens sind zwei Extremwerte, die experimentell ermittelt werden. Theoretisch ist die dichteste Lagerung die erstrebenswerteste. Ist sie es aber auch, die praktisch am besten zu erreichen ist?

Für den Bauingenieur ist viel wichtiger, was er mit seiner Technik tatsächlich bewerkstelligen kann und wie weit er von diesem Ziel entfernt ist. Eine Rolle bei der Bodenverdichtung spielt die Rauheit der einzelnen Partikel, aber auch der Wassergehalt. Ist genügend Wasser im Boden vorhanden, um die Körner beim verdichten gut zu schmieren? Oder ist zu viel Wasser im Porenraum, so dass eine Verdichtung behindert wird? Hier lernen wir noch eine weitere Dichte kennen – die Proctordichte. Auch sie wird experimentell ermittelt, spiegelt jedoch nunmehr keinerlei Sachverhalt der Natur wider. Sie ist eine rein praktische Größe, die als Ergebnis einer künst-

lichen Einwirkung auf den Boden zu verstehen ist. Ohne den menschlichen Wunsch, einen Baugrund zu verdichten, existierte diese sehr abstrakte Größe nicht.

In einem klar definierten Versuchsrahmen wird ermittelt, bei welchem Wassergehalt der Boden am besten verdichtet werden kann (Abb. 7.13). Die Kopplung mit der Realität erfolgt

- vor dem Einbau des Bodens über den Wassergehalt: Ist der Boden für eine Verdichtung optimal feucht?
- nach dem Einbau über die Trockendichte: Ist das „maximale“ Verdichtungsergebnis (Proctordichte) erreicht?

Spannung und Verformung

Neben verschiedenen Dichten und Verdichtungsgraden von Böden interessieren vor allem Aussagen zur potenziellen Belastbarkeit des Lockergesteins. Wie reagiert das Gestein zum Beispiel auf Scherung?

Dazu muss wieder etwas weiter ausgeholt werden, weil das Konzept von Spannung und Verformung eingeführt werden muss.

Auf ein hinreichend tief gelagertes Gestein, das keiner weiteren Verdichtung mehr ausgesetzt ist, wirkt der lithostatische Druck als Folge der Gewichtskraft (Abschnitt 6.2). Das Gestein ist regelrecht eingeklemmt und der Druck ist rundherum gleich groß. Man spricht von isotropen Spannungsverhältnissen, wobei unter Spannung hier physikalisch Druck (Kraft pro Fläche) zu verstehen ist. Stellt man diese Situation in einem räumlichen und rechtwinkligen Koordinatensystem dar, dann unterliegt das Gestein der Spannung von drei Hauptrichtungen, die alle gleich groß sind (Abb. 7.14). Unter diesen Umständen gibt es keine Spannungs-Unterschiede und damit auch keine Verformung. Genau wie bei der Gebirgsbildung entsteht jedoch auch im direkten Baugrund, also in flachen Bereichen, häufig eine Spannungsdifferenz. Sei es die Auflast eines Bauwerkes oder die eigene Gewichtskraft am Rande einer Böschung, in beiden Fällen wird eine Hauptspannung größer ausfallen als eine andere. Der Einfachheit halber werden meist nur die größte (σ_1) und die kleinste (σ_3) dieser Spannungen in einem zweidimensionalen Schnitt betrachtet (Abb. 7.14).

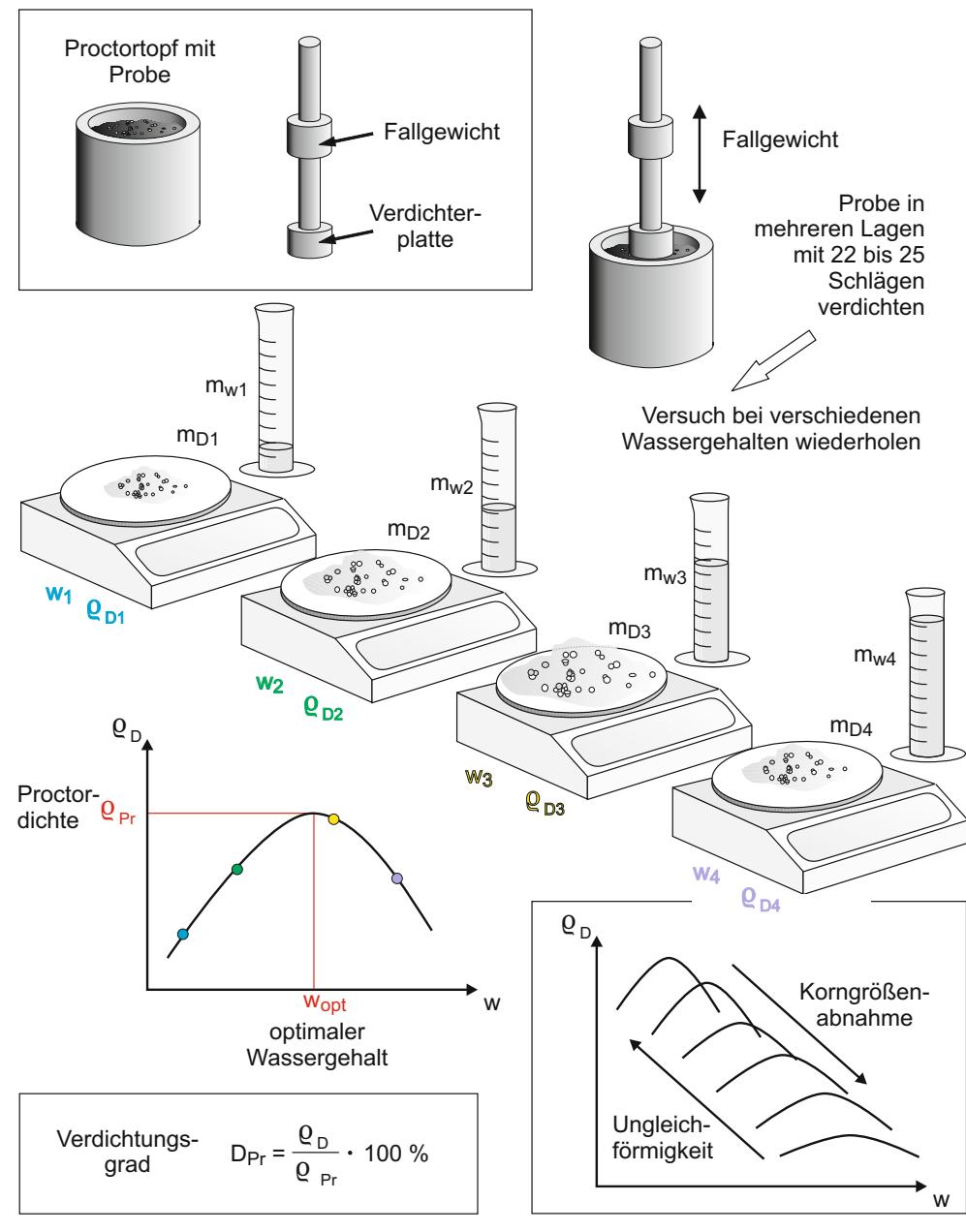


Abb. 7.13 Bestimmung der Procordichte nach DIN 18127. In einem Topf wird die Probe bei verschiedenen Wassergehalten verdichtet, wobei jedes Mal eine andere Menge Probe (Masse) in den Topf passt. Eine graphische Auswertung (Prokorkurve) liefert den optimalen Wassergehalt und die Procordichte. Die Abhängigkeit beider Werte vom Ungleichförmigkeitsgrad und der Korngröße zeigt das Diagramm rechts unten. Aus der Procordichte und der Trockendichte lässt sich der Verdichtungsgrad berechnen.

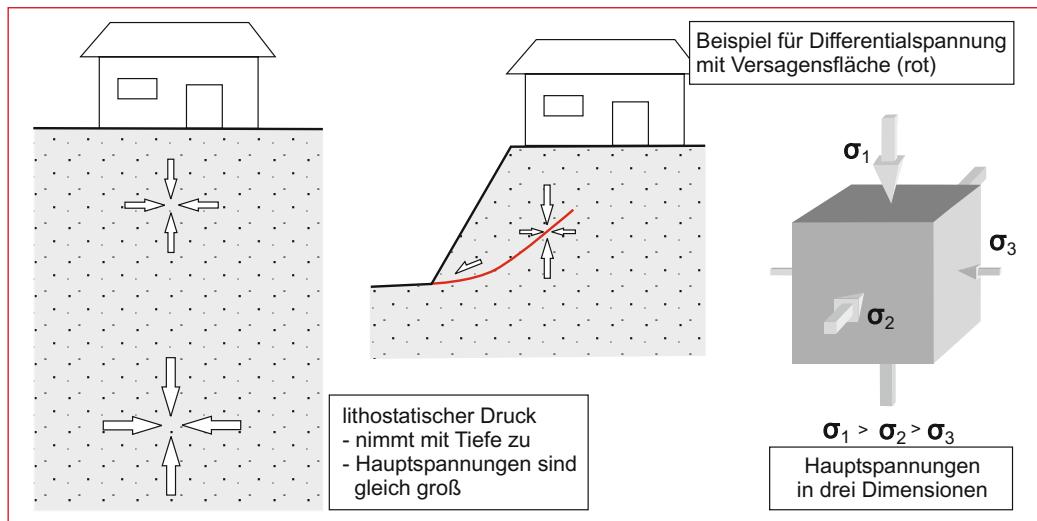


Abb. 7.14 Spannungszustände im Untergrund und ihre Darstellung durch die rechtwinklig zueinander stehenden Hauptspannungen.

Nun ist klar, dass die Spannungsunterschiede, sind sie nur groß genug, nicht ohne Folgen bleiben. Im Bestreben diese Spannungsdifferenz (oder den Differentialstress) auszugleichen, reagiert das Gestein mit Verformung. Die gefürchteten Grundbrüche, Setzungen oder Rutschungen sind die Folge. Wie sensibel das Gestein dabei ist, hängt von seiner Art, also seinen Bildungsbedingungen ab. Viel besser als mit einer genetischen Interpretation lassen sich in der Geotechnik Aussagen zum Gesteinsversagen mithilfe experimentell ermittelter Parameter machen.

Scherfestigkeit

Während sehr tief gelagerte Gesteine auf Differentialstress mit einer durchgreifenden und plastischen Verformung reagieren (hochmetamorphe Gesteine erhalten so ihre Foliation) ist die Deformation im spröden Verformungsbereich des Baugrundes meist an diskrete Flächen gebunden. Bestimmte Gleitflächen wirken dabei wie Rutschbahnen, die nicht etwa zufällig im Raum ausgebildet sind, sondern strengen Gesetzmäßigkeiten unterworfen sind. Die Raumlage solcher Scherflächen und die auf ihnen wirkenden Scherspannungen stehen in einem geometrischen Zusammenhang mit den Hauptspannungen.

Unabhängig von Geologie oder Bauwesen ist von Materialwissenschaftlern zur Visualisierung dieses Zusammenhangs eine Art Diagramm erfunden worden: der **Mohr'sche Spannungskreis**. Seine mathematische Ableitung führt hier zu weit, aber seine geometrischen Entsprechungen im Gestein sind in Abbildung 7.15 dargestellt. Jeder Spannungszustand ein und desselben Gesteins stellt im **Normalspannungs-Scherspannungs-Diagramm** einen Kreis dar, der die Achse der Normalspannung bei den Werten der größten (σ_1) und der kleinsten Normalspannung (σ_3) schneidet. Im Experiment werden verschiedene Spannungszustände simuliert, bei denen jeweils die Differentialspannung so weit erhöht wird, bis das Gestein versagt. An die so ermittelten Kreise kann eine gemeinsame Tangente gelegt werden. Diese Linie wird vereinfacht als Gerade angesehen, wodurch sie mathematisch sehr leicht (durch Anstieg und Schnittpunkt mit „y-Achse“) zu beschreiben ist.

Die Kreise bzw. Spannungszustände können nie in das Feld oberhalb dieser Geraden geraten, die auch **Mohr'sche Einhüllende oder Mohr'sches Kriterium** genannt wird. Das heißt, dass die Lage dieser Geraden über Versagen oder Standhaftigkeit des Baugrundes entscheidet. Was ein Gestein hinsichtlich Scherung also besonders auszeichnet sind der Anstieg der Mohr'schen

7

Einhüllenden und der Schnittpunkt mit der „y-Achse“. Diese zwei scheinbar abstrakten Größen sind für die Geotechnik fundamental und haben eine ganz irdische geometrische Entsprechung:

- Der Anstieg (= Steigung) spiegelt sich im Anstiegswinkel wider. Er wird (Innerer) **Reibungswinkel** φ des Gesteins genannt und ist zum Beispiel für die Ausbildung eines natürlichen Böschungswinkels verantwortlich. Hier

spielt also das Korngefüge mit Korngrößenverteilung, aber auch der Rauigkeit der Einzelkörner eine Rolle. Je hakiger die Partikel um so größer die Innere Reibung und umso steiler kann eine Böschung noch sein, ohne instabil zu werden.

- Der Ordinatenschnittpunkt des Mohr'schen Kriteriums entspricht der **Kohäsion** c des Gesteins. Je höher die Gerade im Diagramm

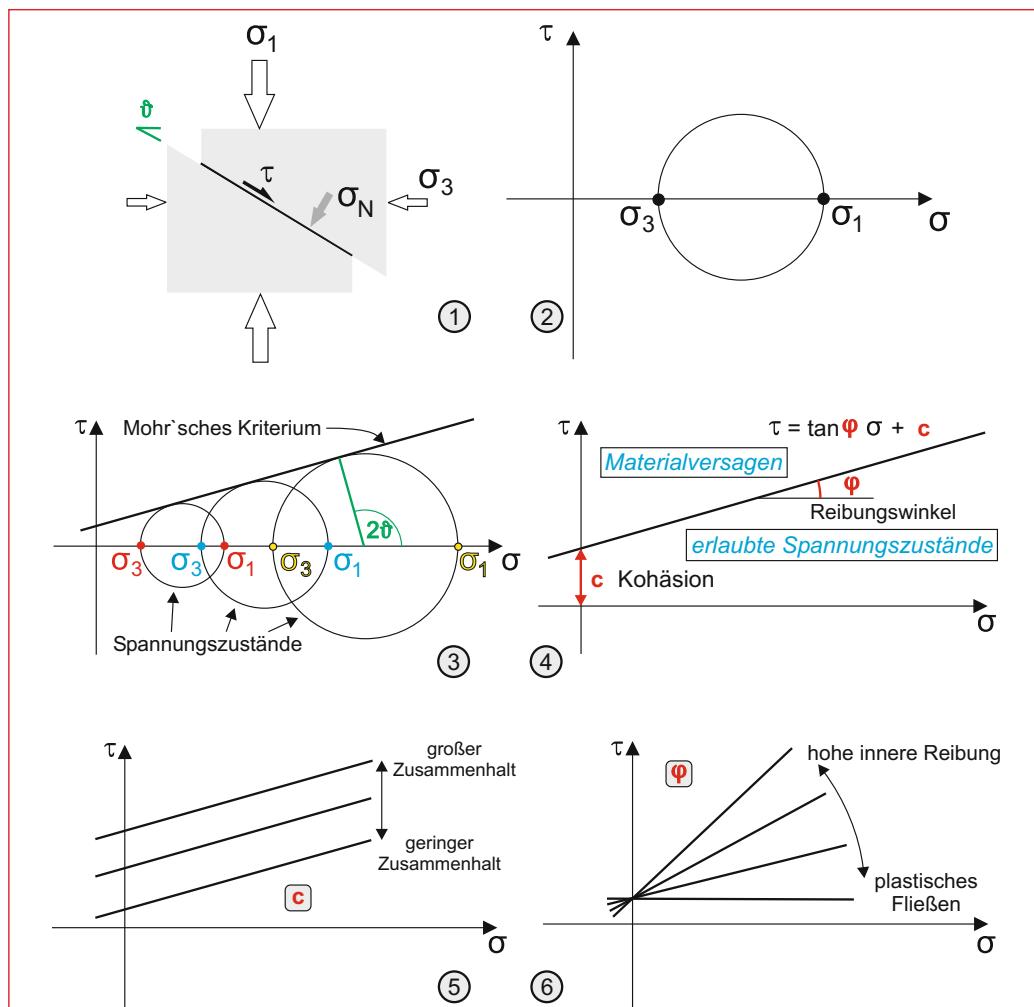


Abb. 7.15 Die Hauptspannungen σ_1 und σ_3 teilen sich auf Normalspannung N und Scherspannung τ entlang einer Versagensfläche auf (1). Ein Kreis, durch die Werte für σ_1 und σ_3 konstruiert, verdeutlicht im σ - τ -Diagramm den herrschenden Spannungszustand (2). Aus mehreren Scherversuchen bis zur Zerstörung des Gesteins, wird das Mohr'sche Kriterium ermittelt (3). Auch der Winkel θ der Versagensfläche ist aus dem Diagramm ableitbar. Wird das Mohr'sche Kriterium als Gerade angenommen, dann lässt es sich durch die Scherparameter Reibungswinkel φ und Kohäsion c beschreiben (4). Die praktische Bedeutung von c und φ zeigen (5) und (6).

liegt, desto größer muss die Differenzialspannung (Mohr'scher Spannungskreis) ausfallen um dem Gestein Schaden zuzufügen (Abb. 7.15). Ist von Scherfestigkeit (gemessen in kN/m^2) die Rede, dann ist darunter meist die Kohäsion c zu verstehen. Geologischer Hintergrund ist die Verfestigung eines Bodens, eine Frage des Bindemittels zum Beispiel, aber auch seiner prinzipiellen Bildung als Sediment.

So einfach, dass jedes Gestein hinsichtlich geotechnischem Verhalten lediglich mit φ und c zu versehen ist, ist es leider nicht. Eine Anzahl Randbedingungen geben den Ausschlag für eine weitere Differenzierung des Problems. Beispielsweise: Wie groß ist σ_2 ? Ähnlich σ_1 oder eher wie σ_3 ? Ist mit einem der Gewichtskraft entgegengesetzten Druck zu rechnen? Das ist bei vorhandenem Porendruck zum Beispiel durch Grundwasser gegeben.

Obendrein ist eine Vielzahl von Experimenten entwickelt worden, die auf die mechanischen Besonderheiten des bautechnischen Vorhabens (Böschungsversagen, Setzung), aber auch auf die unterschiedlichen Gegebenheiten der Gesteine eingehen (DIN 18136, DIN 18137). Die wichtigsten Varianten der Scherparameter in der Praxis sind:

- effektive (= wirksame) Scherparameter φ' und c' – experimentelle Bestimmung unter entwässerten Verhältnissen, d. h. von den Hauptspannungen wird der Porendruck abgezogen;
- scheinbare (= undrainierte) Scherparameter φ_u und c_u – experimentelle Bestimmung unter unentwässerten Verhältnissen.

Eine Zusammenstellung von Scherparametern einiger Böden liefert Abbildung 7.16.

Bodenart nach DIN 18196	Festigkeit/ Konsistenz	φ	c
grob- & gemischt-körnige Böden	geringe Festigkeit	30 - 32,5	0
	mittlere Festigkeit	32,5 - 37,5	0
	große Festigkeit	37,5 - 40	0
UL	weiche Konsistenz	27,5 - 32,5	0
	steife Konsistenz	27,5 - 32,5	2 - 5
	halbfeste Konsistenz	27,5 - 32,5	5 - 10
UM, TL	weiche Konsistenz	25 - 30	0
	steife Konsistenz	25 - 30	5 - 10
	halbfeste Konsistenz	25 - 30	10 - 15
TM	weiche Konsistenz	22,5 - 27,5	5 - 10
	steife Konsistenz	22,5 - 27,5	10 - 15
	halbfeste Konsistenz	22,5 - 27,5	15 - 20
TA	weiche Konsistenz	20 - 25	5 - 15
	steife Konsistenz	20 - 25	10 - 20
	halbfeste Konsistenz	20 - 25	15 - 25

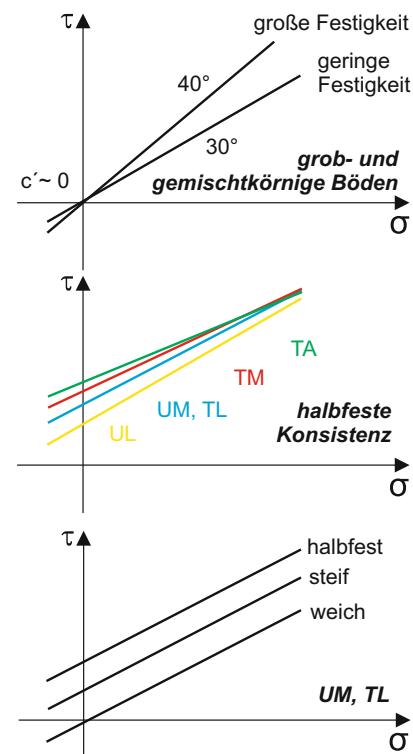


Abb. 7.16 Scherparameter φ und c' einiger Böden (nach EAU 2004) und einige geometrische Entsprechungen im σ - τ -Diagramm.

7.2.2 Feldbestimmte Eigenschaften

Drucksetzungslinien

Unter der Last eines Bauwerkes wird der Baugrund zusammengedrückt. Je nach Lagerungsdichte, Korngrößenverteilung, Porosität, Wassergehalt, Kornform bei nichtbindigen und Plastizität bei bindigen Böden wird das Lockergestein unterschiedlich stark komprimiert. Solange der Untergrund über die Fläche gleichmäßig aufgebaut ist, hat der Bauherr nichts zu befürchten. Erst wenn verschiedene Böden mit signifikanten Unterschieden in der Verdichtbarkeit nebeneinander auftreten, machen Setzungsunterschiede dem künftigen Bauwerk zu schaffen.

Für einige Bauvorhaben, wie zum Beispiel im Straßenbau, wird extra zugeschnittenes Lockergestein als Baugrund eingesetzt. Hier erhofft man sich eine möglichst geringe Setzung. Natürlich ist dabei ausschlaggebend, wie gut das Material verdichtet wird. Dieser Punkt ist bereits im Kapitel 7.2.1 besprochen worden (Lagerungsdichte, Proctordichte). Hier geht es um die mechanische Reaktion des Bodens. Reagiert er elastisch? Ist er also mehrmals zusammendrückbar und dehnt

sich in Erholungsphasen wieder aus? Sicher spielt das für einen Hausbau kaum eine Rolle. Für eine von Vierzitonnern befahrene Straße umso mehr. Oder sackt der Boden bei Belastung einmalig zusammen und verbleibt in dieser Position?

Hier kommt also eine neue Eigenschaft von Böden ins Spiel: das Verformungsverhalten. Es handelt sich um eine Materialeigenschaft, die allen erdenklichen Stoffen zukommt. Das Prinzip ist in Abbildung 7.17 dargestellt.

Man kann das Verformungsverhalten in ein Spannungs-Verformungs-Diagramm eintragen. Dabei wird die geometrische Veränderung des Materials als Reaktion auf eine Spannung (= Stress) aufgezeichnet, es ergibt sich eine typische Kurve. Wird das Diagramm auf Lockergesteine angewandt und entsprechend der Richtung der erwarteten Verformung (= Setzung) gedreht, erhält man die Drucksetzungslinie (Abb. 7.17).

Plattendruckversuch

Zwei wichtige Größen, die aus der im Feld bestimmten Drucksetzungslinie resultieren, sind das Verformungs- und das Bettungsmodul. Genau genommen dient das genormte Experiment

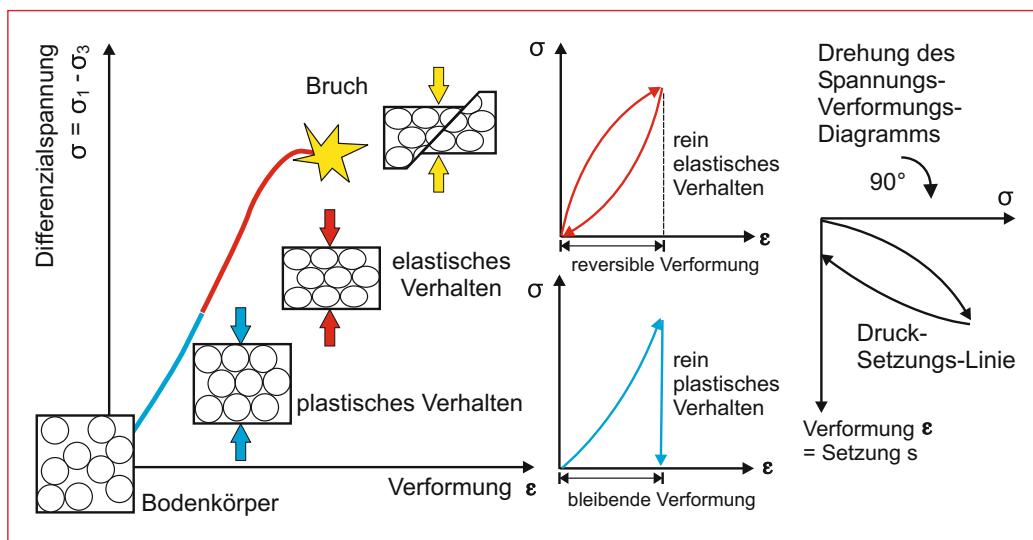


Abb. 7.17 Prinzipielles Materialverhalten im Spannungs-Verformungs-Diagramm und die daraus für den Baugrund abgeleitete Drucksetzungslinie.

(Plattendruckversuch nach DIN 18134, Abb. 7.18) der Kontrolle der Verformbarkeit, aber auch der Verdichtung eines als Baugrund eingebauten Bodens. Im Ergebnis ähnelt dieser Versuch somit der Bestimmung der Lagerungsdichte. Allerdings ist der Ansatz ein anderer, da nicht über die physikalische Größe der Dichte sondern über das Verformungsverhalten auf die Gesteins-eignung geschlossen wird. Der Plattendruckversuch gipfelt in verschiedenen Aussagen über den Baugrund (auch Abb. 7.18):

1. Das **Verformungsmodul E_v** entspricht grafisch dem Anstieg (Steigung der Kurve) im elastischen Teil der Drucksetzungslinie. Einfach ausgedrückt: Reagiert der Boden bei gegebener Druckerhöhung mit viel oder mit wenig Setzung? Hier spiegelt sich vor allem die Verdichtung wider. Die Korrelation von Verdichtung und Verformungsmodul wird aus der Zusammenstellung von Werten für einige Böden am Ende des Kapitels ersichtlich (Abb. 7.20).
2. Vom selben Prinzip, jedoch etwas einfacher, ist die Bestimmung des **Bettungsmoduls**. Anstelle des Anstiegs wird ein einzelnes Wertepaar der Drucksetzungslinie herausgegriffen. Für die Vergleichbarkeit verschiedener Kurven wird immer die Spannung bei 1,25 mm Setzung abgelesen und beide Werte werden dividiert. Die Aussage entspricht der des Verformungsmoduls.
3. Gewöhnlich wird beim Plattendruckversuch die Belastung des Untergrundes nach einer Erholungsphase wiederholt. Die sich ergebende Drucksetzungslinie spiegelt somit die Elastizitätseigenschaften des Bodens wider. Im ideal plastischen Lockergestein wäre während der zweiten Belastung keine andere Verformung möglich, als bei der ersten Belastung. Die Drucksetzungslinien im ideal elas-

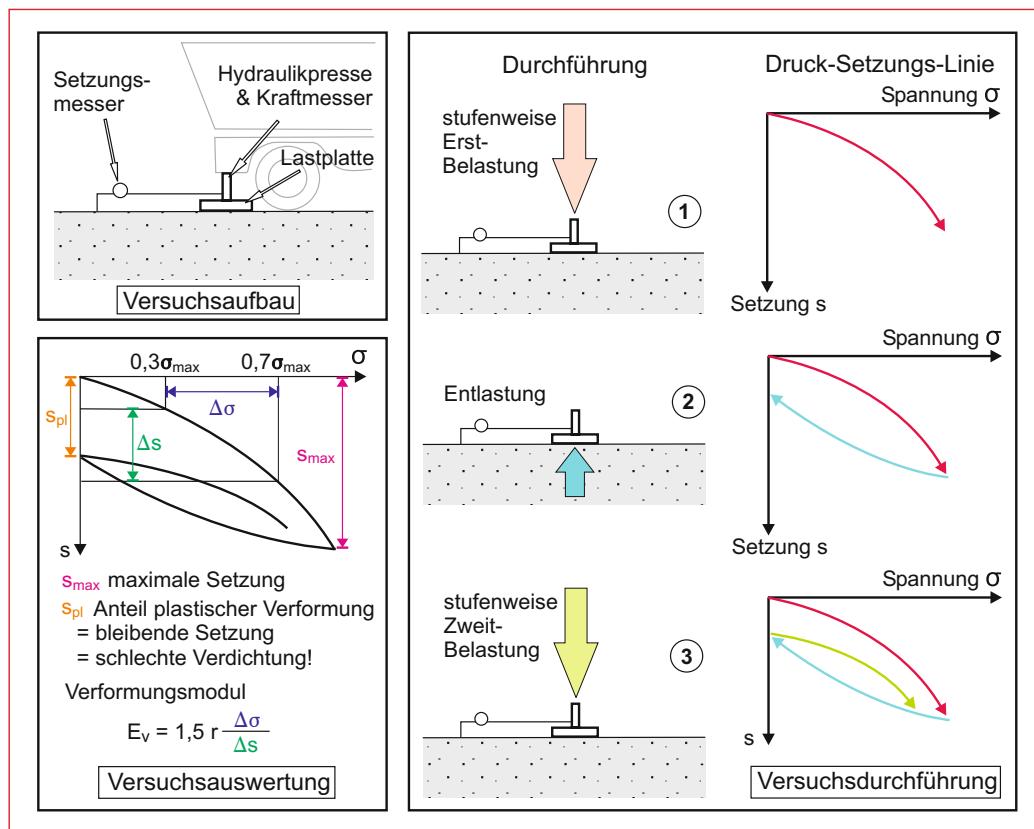


Abb. 7.18 Aufbau, Durchführung und Auswertung des Plattendruckversuchs nach DIN 18134.

tischen Gestein müssten genau übereinander liegen. Meist tun sie das nicht und aus der Differenz der Setzungen ergibt sich der Anteil der plastischen Verformung s_{pl} . Dem Bauingenieur offenbaren sich so Aufschlüsse über **dynamische Eigenschaften des Bodens** (Abb. 7.18).

Auswertung von Sondierungen

Inzwischen dürfte klar geworden sein, dass kaum eine Eigenschaft des Lockergesteins für sich steht. Vielmehr sind die meisten Eigenschaften Spiegelbild desselben komplexen Systems Boden.

Am Anfang steht die Korngrößenzusammensetzung, also die Sieblinie. Sie gibt Auskunft über Anteile an Ton und Schluff. Aus der Sieblinie ergeben sich die Porosität und damit das Wasseraufnahmevermögen und die Plastizität, die Dichte und die Verdichtbarkeit. Hinter all diesen Eigenschaften stehen geologische Ursachen, die mit der Entstehung des Lockergesteins im Zusammenhang stehen: Transport- und Klimabedingungen bei der Ablagerung und die Mineralo-

gie des abgelagerten Materials, um nur einige zu nennen (Abb. 4.3).

Später angelegt ist die natürliche Lagerung, in der wir den Boden heute vorfinden. Sie entsteht auch durch geologische Prozesse, wie die Diagenese, die für eine natürliche Verdichtung sorgt. Dazu kommen meteorologische Bedingungen, die darüber entscheiden, ob das Material, obwohl prinzipiell wasseraufnahmefähig, momentan tatsächlich plastisch oder fest vorliegt. Und schließlich trägt der Mensch sein Scherlein zur Verdichtung des Bodens bei, zum Beispiel durch schwere Landmaschinen. Alle diese Einflüsse bewirken die Lagerungsdichte oder das Verformungsmodul.

In diesen Zusammenhang gehört noch ein letztes wichtiges Beispiel im Sammelsurium der technischen Eigenschaften von Lockergesteinen. Bei Sondierungen wird untersucht, wie sich der Untergrund beim gewaltsamen Einführen einer Sonde verhält. Die Sonde ist eine Art Stange, die in den Boden gerammt oder gedrückt wird. Je nach Art des Bodens und des Verdichtungsgrads muss man hohen oder niedrigen Druck anlegen bzw. viele oder wenige Schläge ausführen (Abb. 7.19). Die Ergebnisse der Ramm- oder Druck-

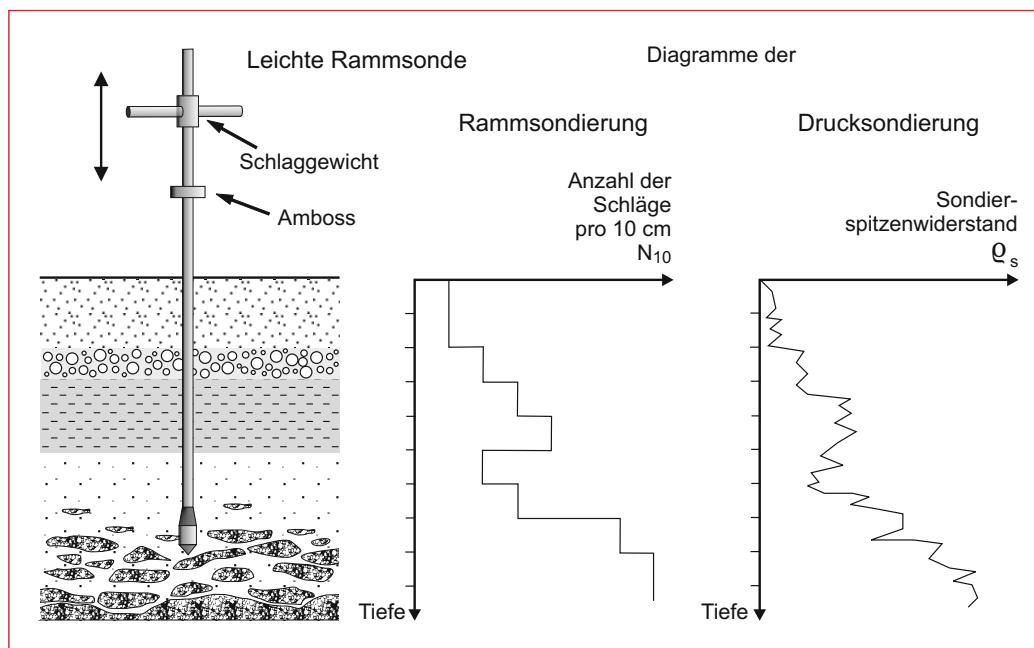


Abb. 7.19 Die Ergebnisse von Ramm- und Drucksondierungen (nach DIN 4094) lassen dreidimensionale Aussagen über die Lagerungsdichte aber auch die Bodenart selbst zu.

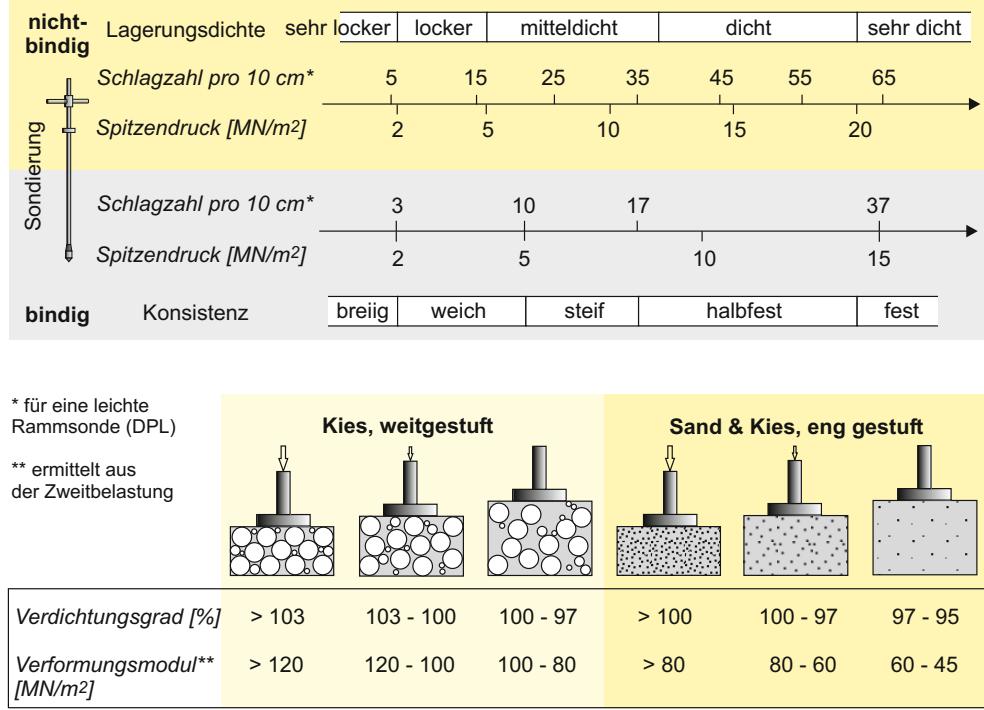


Abb. 7.20 Korrelation technisch ermittelter Kennwerte für Böden (nach verschiedenen Autoren). Oben: Die Schlagzahl pro 10 Zentimeter der Rammsondierung und der Spitzendruck der Drucksondierung korrespondieren mit der Lagerungsdichte nichtbindiger und der Konsistenz bindiger Lockergesteine. Unten: Gegenüberstellung von Verdichtungsgrad und Verformungsmodul für zwei Gruppen von Bodenarten. Nach PRINZ UND STRAUSS (2006).

sondierungen korrespondieren also mit der Lagerungsdichte bzw. der Konsistenz (Werte in Abb. 7.20).

Großer Vorteil der Sondierung ist, dass man im Gegensatz zu anderen Untersuchungsverfahren auch über tiefer liegende Bodenschichten Informationen erhält. Mithilfe von Sondierungen lassen sich daher Profile über den Untergrund erstellen (Abb. 7.19). Sie leiten uns somit perfekt zum nächsten Abschnitt über, in dem es um Bohrungen und die Bohrbarkeit von Lockergesteinen geht.

7.3 Bohren in Lockergesteinen

Bohrverfahren

Bohrungen werden zum Zweck des Erkenntnisgewinns über den Untergrund abgeteuft. Oder aber der Untergrund ist bereits bekannt und die Bohrungen dienen der Gewinnung von zum Beispiel Grundwasser oder Erdwärme.

Die Auswahl des Bohrverfahrens aus dem reichlich vorhandenen Spektrum erfolgt vor allem unter drei Gesichtspunkten:

1. Welche Art von Proben des Untergrunds wird gewünscht? Brauchen wir eine ungestörte Probe oder genügt es das ausgebrachte Lockergestein in der Spülung zu begutachten?

- Wie tief soll gebohrt werden? Komme ich mit einem handgetriebenen Bohrer tief genug oder wird für eine Forschungsbohrung ein Loch von über tausend Metern Tiefe benötigt?
- Mit welchem Gestein ist zu rechnen? Hier fragt der Bohrmeister nicht nach Magmatit oder Metamorphit, sondern nach fest oder locker. (Die Bohrbarkeit von Fels wird im Abschnitt 8.3 besprochen.)

Im Rahmen unserer Gesteinskunde steht natürlich Kriterium 3 im Vordergrund. Wie verhalten sich Gesteine beim Bohrvorgang? Spielt es überhaupt eine Rolle ob in Kies oder Ton gebohrt wird, oder ist locker gleich locker? Und gibt es quantifizierbare Eigenschaften der Bohrbarkeit, die sich aus der Petrographie ableiten lassen?

Zuvor aber ein kurzer Blick auf eine Auswahl der wichtigsten Bohrverfahren für Lockergesteine. In Abbildung 7.21 werden zunächst die Sondierbohrverfahren, die man auch Kleinbohrverfahren nennt und die laut DIN 4021 einen Durchmesser zwischen 3 und 8 cm haben, abgetrennt. Das sind solche Bohrungen, die durch Muskelkraft oder ein kleines Rammgerät niedergebracht werden können. Damit ist deren Ein dringtiefe sehr stark begrenzt. Vor allem das Herausziehen des Bohrgestänges stellt bei Tiefen über 6 m häufig ein Problem dar.

Die weitere Unterteilung erfolgt nach Art des Lösevorganges, also drehend, rammend oder schlagend. Neben Bemerkungen zum Bohrwerkzeug sind die üblicherweise bohrbaren Korngrößen in der DIN EN ISO 22475-1 aufgeführt. Vor allem hinsichtlich der Probenahme gibt das Regelwerk eine umfassende Übersicht zu den Bohrverfahren.

Bohrbarkeit von Lockergesteinen

Da Lockergesteine per Definitionem in Form von losen Körnern vorliegen, entfällt bei deren Bohren das Zerstören des Gesteins, so wie es beim Fels der Fall ist. Die Körnung (Sieblinie) des zu erbohrenden Bodens spielt vor allem in zweierlei Hinsicht eine Rolle.

Erstens darf die Korngröße nicht zu groß für das jeweilige Verfahren sein. Dreißig Zentimeter

große Steine passen nun mal nicht in ein Rammgestänge von 5 cm Durchmesser. Aber auch Korngrößen knapp kleiner als der Bohrdurchmesser verklemmen sich gern und verhindern jeden weiteren Bohrfortschritt. Für die meisten Verfahren wird daher häufig ein maximaler Korndurchmesser von einem Drittel, manchmal auch von einem Fünftel des Innendurchmessers des Bohrwerkzeugs gefordert. Aber was tun bei großen Gerölle? Hier muss das Einzelkorn zerstört werden, was dann dem Bohren in Festgestein entspricht. Dafür sollte man ein schlagendes Bohrverfahren anwenden, da die Gerölle sich vor einem rotierenden Bohrmeißel unter Umständen einfach mitdrehen.

Zweitens wird der Zusammenhalt der Körner vom Anteil kleinsten Korngrößen bestimmt. Vor allem die Adsorptionskräfte der Tonminerale machen feinkörnige und gemischtkörnige Böden manchmal zu einem stark bindigen und damit schwer bearbeitbaren Material. Wie im Abschnitt 7.1 gezeigt, spielt dabei auch der Wassergehalt eine herausragende Rolle und entscheidet über flüssig, breiig oder fest.

Damit ist ein weiterer Aspekt der Bohrbarkeit von Lockergestein angesprochen, die Wasserführung. Die Frage, ob über oder unter dem Grundwasserspiegel gebohrt wird, kann über Erfolg und Misserfolg einer Bohrung entscheiden. Zwar kann Wasser die Bodenpartikel für die Aufnahme ins Bohrwerkzeug schmieren, andererseits hemmt das Wasser in den Poren die Beweglichkeit der Körner, die ja für die Platznahme des Bohrgestänges beiseite gedrückt werden sollen. Schließlich ist das Porenwasser auch für eine Gewichtszunahme des Bodens verantwortlich, was einen erhöhten Kraftaufwand bei der Hebung des Bodens im Bohrloch bedeutet.

Für die Einteilung der Lockergesteine in Gruppen von Bohrbarkeiten, stehen also prinzipiell die Korngröße, der Wassergehalt und eventuell die Abrasivität (Quarzkiesel oder Tongestein) zur Debatte. Meist zieht sich die Praxis jedoch auf abgeleitete Größen (wie zum Beispiel die Festigkeit) zurück, die zwar die genannten Ursachen haben, aber besser zu quantifizieren sind.

Vor allem russische Autoren haben versucht die Gesteine in verschiedene Klassen der Bohrbarkeit zu packen. Beim globalen Vergleich aller Gesteine schneiden die Böden natürlich um Größenordnungen besser ab als beispielsweise die

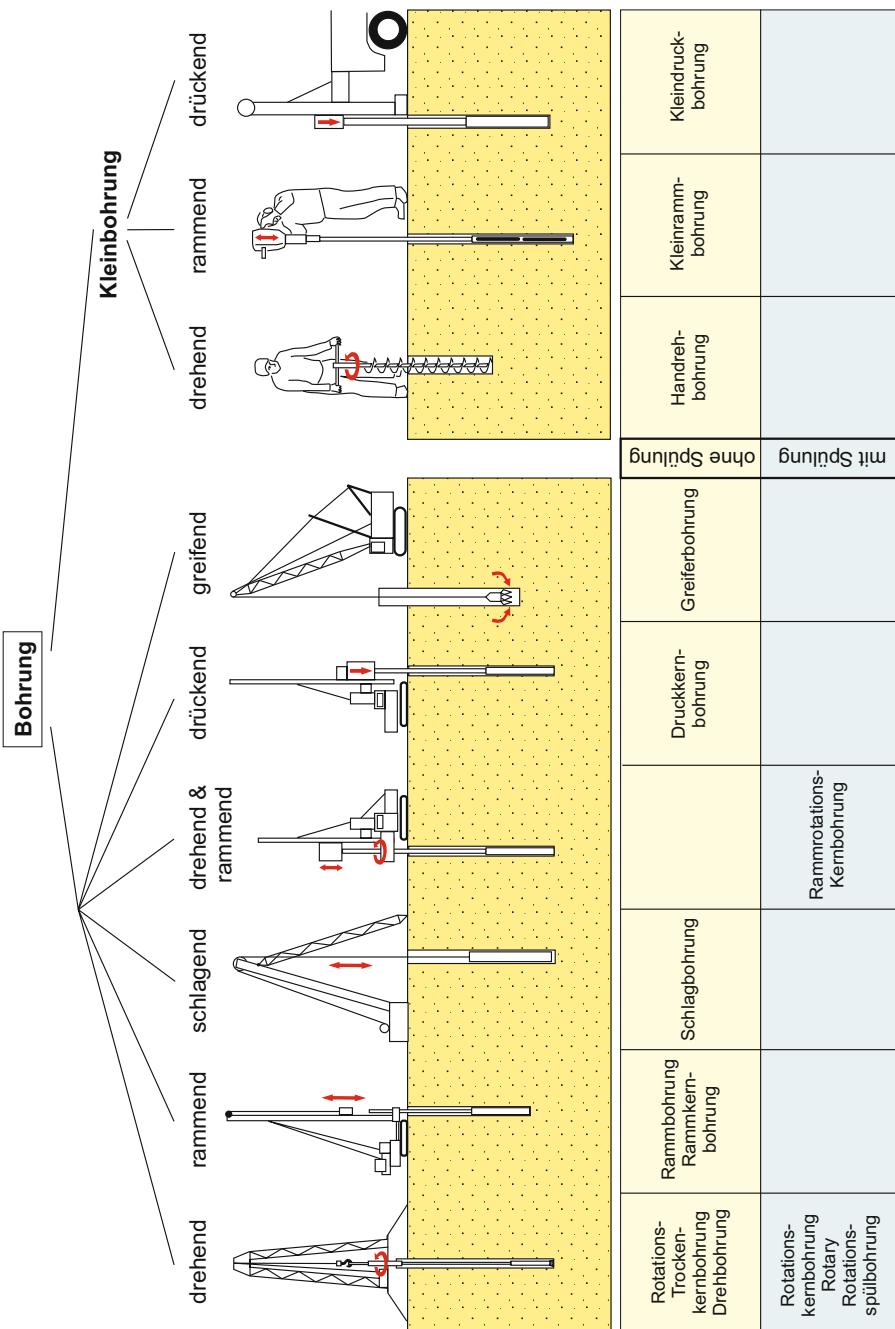


Abb. 7.21 Die Verfahren für das Bohren in Lockergesteinen nach DIN 4021 (ungültig) und der Nachfolgenorm DIN EN ISO 22475-1. Die Einteilung erfolgt nach Art des Lösevorgangs und danach, ob mit einer Spülung gearbeitet wird. Diese und weitere Kriterien, wie zum Beispiel die Auswahl der Bohrwerkzeuge, entscheiden letztlich über die Art und die Qualität der möglichen Proben oder die erreichbare Endteufe.

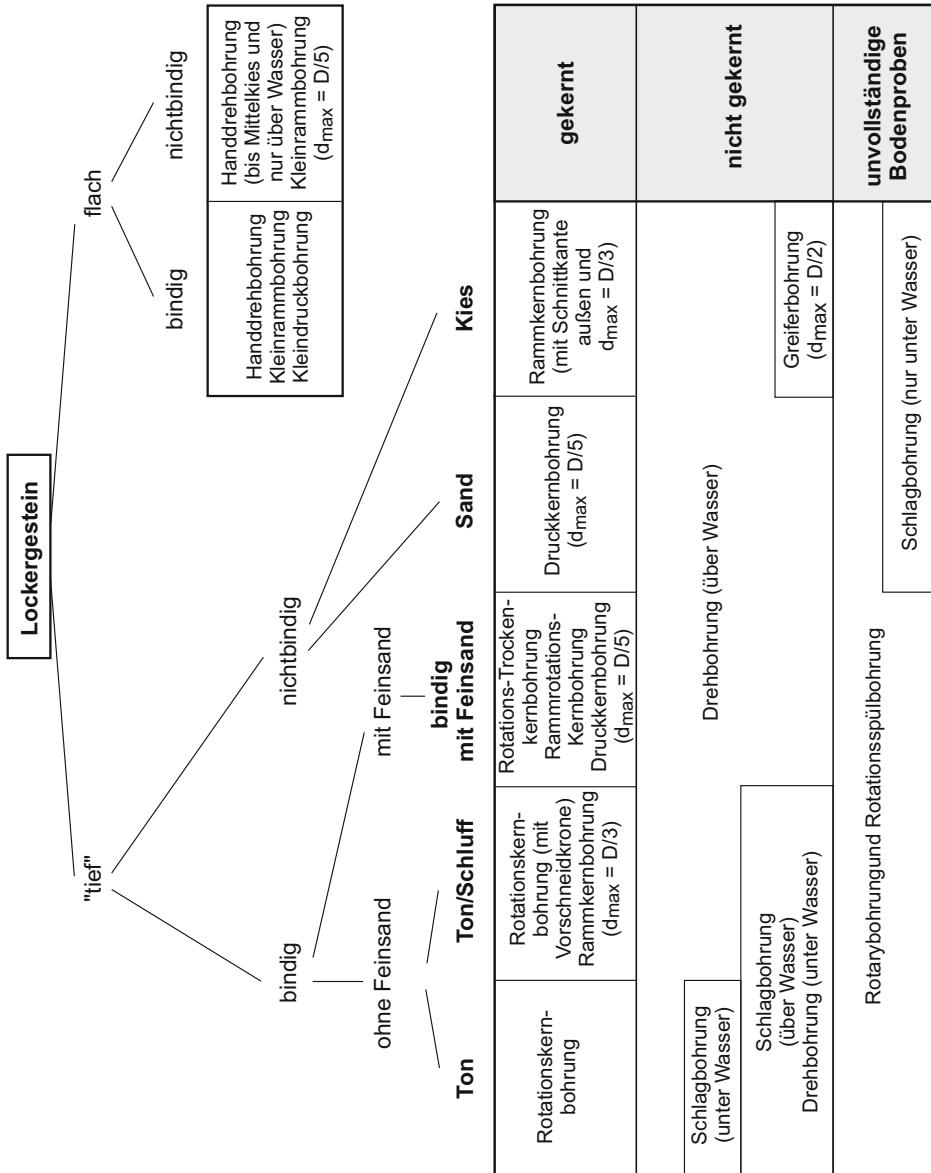


Abb. 7.22 Welches Bohrverfahren für welches Lockergestein?

Magmatite. Dass Sand und Ton auf einer Skala von 1 bis 12 hinsichtlich Bohrbarkeit mit drehenden Verfahren in die Kategorie 1 bis 3 eingeordnet werden, unterstreicht das (Abbildung 8.12). Auch bei der von LOCKER 1967 aufgestellten Lösbarkeit, die sich am Metallverschleiß der Bohrwerkzeuge orientiert, wird dem Ton eine zweihundertmal bessere Bohrbarkeit bescheinigt als dem Granit.

Es erscheint also für Lockergesteine sinnvoller, der Auswahl des Bohrverfahrens eine größere Bedeutung beizumessen als um Feinheiten in der Bohrbarkeit des Bodens zu feilschen, die ein geringes Plus oder Minus an Verschleiß und Kraftverbrauch bedeuten würden. Einen kleinen Leitfaden zur Auswahl liefert die Abbildung 7.22, die auf den Informationen der DIN 4021 bzw. DIN EN ISO 22475-1 beruht.

7.4 Hydrogeologische Eigenschaften von Lockergesteinen

Wasserkreislauf und Gestein

Den Wasserkreislauf hat jeder in der Schule kennen gelernt. Etwas spezieller gefasst ergibt sich

aus ihm der Wasserhaushalt, der durch die **Wasserhaushaltsgleichung** quantifiziert werden kann:

$$\text{Niederschlag} = \text{Verdunstung/Transpiration} + \text{oberirdischer Abfluss} + \text{unterirdischer Abfluss}.$$

Die Wassermenge, die uns der Niederschlag zur Verfügung stellt, teilt sich auf in einen Teil, der zurück in die Atmosphäre geht, einen Teil, der sich sammelt und in Form von Rinnalen, Bächen und Flüssen abfließt, und einen Teil, der versickert, das Grundwasser speist und von dort über Quellen oder den unterirdischen Zufluss zu Gewässern dem Wasserkreislauf wieder zurückgegeben wird (Abb. 7.23).

Während alle anderen Größen von Meteorologen und Hydrologen gemessen werden können, verhält sich der unterirdische Anteil des Wasserhaushaltes wie in einer „black box“. Wohin bewegt sich das Wasser im Untergrund? Wie schnell tut es das? Und wie verändert sich dabei seine Qualität? Das sind nur einige Fragen, denen sich die Hydrogeologie widmet. Ziel ist es, Aussagen zu Qualität und Quantität des Grundwassers zu erhalten, damit wir es bewirtschaften, seinen Einfluss auf Bauvorhaben ermitteln oder Schadstoffpfade rekonstruieren können.

In diesem Kapitel betrachten wir das Gestein also vor allem als Transport- und Speichermedium. Die Wasserwegsamkeit in Festgesteinen

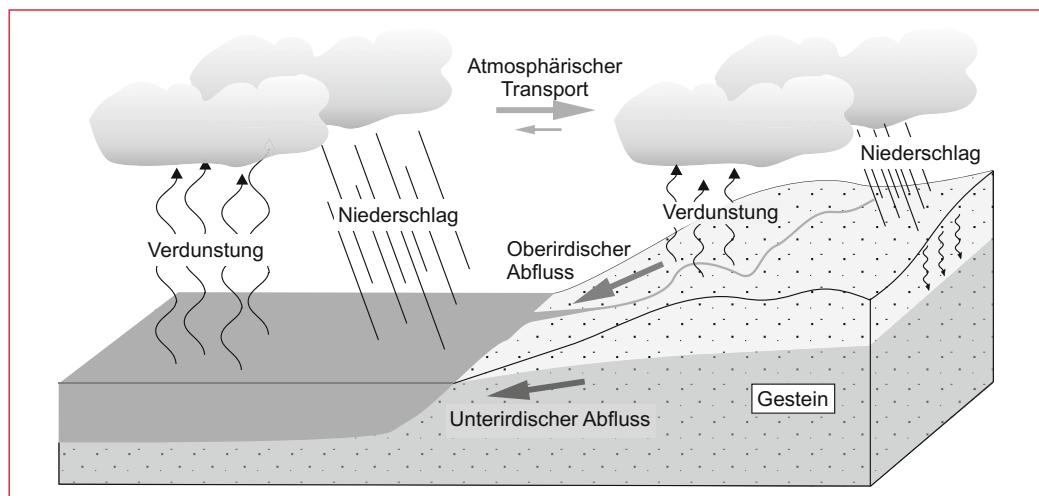


Abb. 7.23 Die Position des Gesteins im Wasserkreislauf.

wird hauptsächlich vom Trennflächengefüge, also Klüften und Störungszonen, bestimmt (Kapitel 8.3). Bei löslichen Gesteinen wie Kalkstein und Gips auch von Karsthohlräumen.

Lockergesteine sind in ihrem Gesamtvolumen wesentlich poröser und durchlässiger als Fels. Entsprechend ist die hydrogeologische Betrachtung der Böden komplexer und wirtschaftlich von größerem Interesse.

Porosität und Permeabilität

Die hydrogeologischen Eigenschaften von Lockergesteinen liegen wiederum in ihrer Korngrößenverteilung (Sieblinie) begründet. Kleine Körnchen, kleine Löcher, große Körner, große Löcher. Aber ist das gesamte „Lochvolumen“ eines grobkörnigen Bodens tatsächlich größer als das eines feinkörnigen?

Doch zunächst ist dieses „Lochvolumen“ näher zu definieren. Man unterscheidet die **Porosität n oder Φ** , die das Porenvolumen ins Verhältnis zum Gesamtvolumen setzt und die **Porenzahl**

e , welche die Poren am Volumen der Festsubstanz misst (Abb. 7.11 und 7.24).

Im Allgemeinen ist die Porosität eines feinkörnigen Gesteins tatsächlich höher als die eines groben Bodens, wo die Zwickel zwischen den Körnern zwar groß sind, die Substanz der Körner selbst aber auch viel Platz beansprucht. Allerdings kann daraus noch nicht auf die Wasserergiebigkeit eines Lockergesteins geschlossen werden. Schuld daran ist die Tatsache, dass im Boden Wasser nicht gleich Wasser ist. In feinkörnigen Medien sind die Poren so klein, dass Kapillarkräfte wirken, die das Wasser zwar hinein, jedoch nicht wieder heraus lassen – die Sedimente enthalten so genanntes **Haftwasser**. Saugspannungen von bis zum Tausendfachen des Luftdrucks sorgen dafür, dass bindige Böden nie vollständig austrocknen. Von praktischem Belang ist also vor allem die Porosität, die nur die Poren betrachtet, die frei von Adsorptions- und Kapillarkräften sind. Das ist die **effektive oder entwässerbare Porosität n_{eff}** , deren Werte für einige Lockergesteine in Abbildung 7.24 den einfachen Porositäten gegenüber gestellt werden.

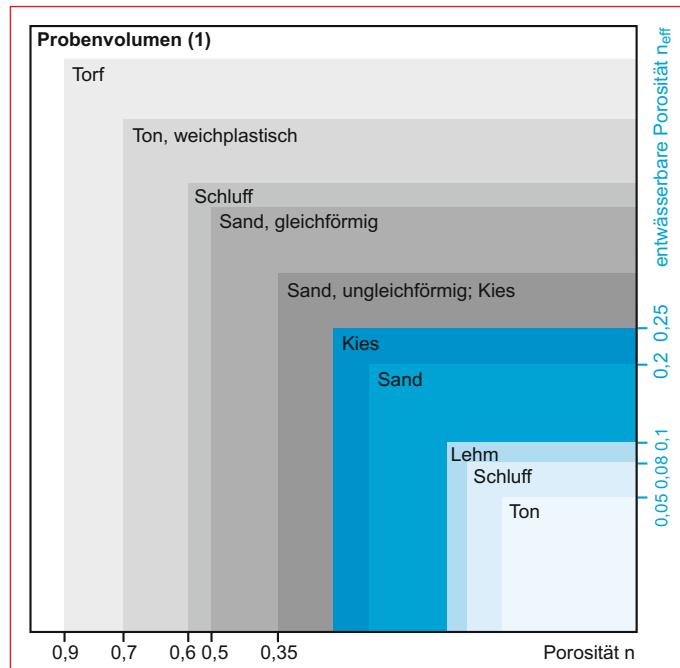


Abb. 7.24 Das Porenvolumen einer Probe hier als Fläche dargestellt. Das große Quadrat entspricht dem Gesamtvolumen (1 oder 100%). Für verschiedene Böden sind ihre Porosität (grau, Skalierung unten) und ihre effektive oder entwässerbare Porosität (blau, Skalierung Seite) angegeben.

Außer von der schlichten Korngröße wird die Porosität von weiteren Eigenschaften bestimmt. Tonminerale und Huminstoffe wirken als so genannte Kolloide sehr adsorptiv. Die Art der feinsten Partikel im Boden ist also von großer Wichtigkeit, vor allem für die effektive Porosität. Genauso wichtig ist das Korngrößenspektrum, das sehr gut durch den Ungleichförmigkeitsgrad U charakterisiert wird. Wie in Abbildung 7.4 bereits gezeigt, nehmen stark ungleichförmige Böden bezogen auf die Masse sehr viel weniger Volumen in Anspruch als gleichförmige, da die kleineren Bestandteile in die Zwischenräume der großen passen. Für viele hydrogeologische Fragestellungen hat somit der Ungleichförmigkeitsgrad eine zentrale Bedeutung.

Schließlich sei noch auf einen letzten Sachverhalt hingewiesen. Porosität allein garantiert noch nicht, dass Wasser auch fließen kann. Nicht immer stehen die womöglich reichlich vorhandenen Poren auch in einem guten Zusammenhang untereinander. Dieses Problem der geringen **Permeabilität** besteht allerdings eher bei Festgestein als bei Lockermaterialien. Ein gutes Beispiel ist der Bimsstein, der reich an Poren ist und daher im Extremfall sogar auf Wasser schwimmen kann. Das schafft er nur, weil seine Poren untereinander nicht in Verbindung stehen und weil damit kein Wasser eindringt.

Durchlässigkeitsbeiwert

Die Permeabilität führt uns gleich zu einer weiteren Größe, wenn man nämlich zu den Gesteins-eigenschaften Porosität und Permeabilität noch die Eigenschaften des sich bewegenden Mediums hinzunimmt. Grundwasser, Erdöl oder Schadstoffe sind aufgrund ihrer spezifischen Viskosität (temperaturabhängig) unterschiedlich beweglich im Boden. All diese Eigenschaften fließen in die fundamentale hydrogeologische Größe des Durchlässigkeitsbeiwertes ein. Als so genannter k_f -Wert bildet er die Grundlage für hydraulische Berechnungen, wie zum Beispiel für den Betrieb von Brunnen. Hier gilt dieser Wert vornehmlich für Wasser und „normale“ Temperaturen. Über den k_f -Wert lässt sich auch die Funktion eines Gesteins als Grundwasserleiter oder Grundwasserstauer ableiten:

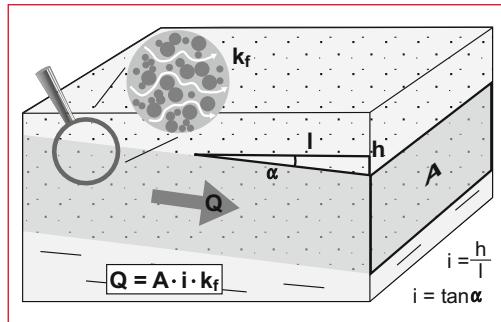


Abb. 7.25 Das Darcy-Gesetz beschreibt den Zusammenhang von fließender Wassermenge Q , Gefälle i und Fließquerschnitt A . Der für die Gleichung notwendige Proportionalitätsfaktor ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_f in den alle gesteins- und fluidbestimmten Eigenschaften einfließen.

- Grundwasserleiter, $> 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$
- Grundwasserhemmer, $10^{-4} - 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$
- Grundwasserstauer, $< 10^{-8} \text{ ms}^{-1}$.

Mit der Einheit [ms^{-1}] beschreibt der Durchlässigkeitsbeiwert physikalisch eine Geschwindigkeit. Betrachtet man auch das hydraulische Gefälle i des Fließens ergibt sich die **Filtergeschwindigkeit** v nach:

$$v = k_f \cdot i$$

Da das Gefälle in der Natur kaum 1 übersteigt (0 – kein Gefälle, 1 – theoretisch 45° Gefälle), kann man sich den k_f -Wert als die mögliche Migrationsgeschwindigkeit von Wasser im jeweiligen Boden vorstellen. Der exakte Zahlenwert ist meist gar nicht so wichtig, wenn nur die Größenordnung bekannt ist. Die Frage lautet: Im Bereich welcher Potenz von 10 liegt der Durchlässigkeitsbeiwert? In groben Flusskiesen mit einem k_f -Wert um 10^{-2} ms^{-1} kann sich das Wasser also etwa in der Größenordnung Zentimeter pro Sekunde oder hunderte Meter pro Stunde bewegen. Bei Tonen liegt der k_f -Wert hingegen unter 10^{-9} ms^{-1} , was Bewegungen von unter einem Tausendstel Mikrometer pro Sekunde oder unter einem Millimeter am Tag entspricht. Das ist so wenig, dass es meist vernachlässigbar ist und der Ton als perfekter Stauer angesehen werden kann.

Meist nähert man sich dem Durchlässigkeitsbeiwert gar nicht über den theoretischen Ansatz,

sondern empirisch. Wie Abbildung 7.25 zeigt, beschreibt der k_f -Wert alle Unbekannten eines fließenden Regimes, in dem Gefälle und Fließquerschnitt bekannt sind (**Darcy-Gesetz**). Aus diesem Ansatz heraus resultiert die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes mittels Experiment, entweder im Labor oder im Gelände.

Bestimmung von Durchlässigkeitsbeiwerten in Pumpversuchen

Es ist relativ einfach, eine im Feld genommene Probe, möglichst ungestört (Abschnitt 7.2.1 und Abb. 7.12), in einen Versuchsaufbau zu integrieren, der das Darcy-Gesetz nachspielt. Ein Wasserreservoir drückt auf die Bodenprobe, Querschnitt und hydraulisches Gefälle sind gegeben und das Wasservolumen, das pro Zeit durch die Probe rinnt, wird gemessen und ergibt Q . Die einzige Unbekannte heißt Durchlässigkeitsbeiwert und kann berechnet werden. Aber spiegelt dieser räumlich sehr begrenzte Versuch wirklich die Realität wieder? Sicher nicht. Inhomogenitäten im Gestein, unvorhersehbare Einlagerungen, die hydraulischen Randbedingungen des Grundwasserleiters und vieles andere mehr können im Labor nicht vollständig simuliert werden. Besser, man verlegt den Versuch ins Gelände. Unter realen Bedingungen – denn meistens ist die Beurteilung der möglichen Wasserförderung das Ziel einer hydrogeologischen Erkundung – können die hydraulischen Eigenschaften eines Gesteins mithilfe einer Bohrung und der probeweisen Förderung von Wasser viel besser bestimmt werden. Pumpversuche stellen damit das wichtigste Handwerkszeug des Hydrogeologen dar.

Das Prinzip eines Pumpversuches ist recht einfach und wird in Abbildung 7.26 dargestellt. In einem mit Filtermaterial versehenen Bohrloch (Brunnen, Pegel) wird eine Pumpe im Bereich des Grundwassers eingebaut. Nach Einschalten der Pumpe wird durch Lotung die Absenkung des Grundwasserspiegels beobachtet. Das geschieht in einem weiteren Pegel oder der Einfachheit halber auch im selben Bohrloch. Zwei Fragestellungen können verfolgt werden (Abb. 7.27):

1. **Leistungspumpversuch.** Ist die geplante Fördermenge dem Grundwasserreservoir zuzu-

muten oder wird sich der Vorrat bald erschöpfen? Das heißt, senkt sich der Grundwasserspiegel bis hin zur Trockenlegung des Reservoirs oder stellt sich ein hydrodynamisches Gleichgewicht aus Absenkung und Nachfließen ein? Mit zunehmend gesteigerten Förderraten kann so die Ergiebigkeit eines Brunnens ermittelt werden. Das Warum ist dabei egal.

2. **Hydrogeologischer Pumpversuch.** Welche hydrogeologischen Eigenschaften hat der Untergrund?

Die Beantwortung der zweiten Frage ist die kompliziertere und erfordert etwas mehr Input. Im Mittelpunkt stehen eigentlich wieder der Durchlässigkeitsbeiwert und damit ein Versuchsaufbau nach dem Darcy-Gesetz. Die Größe Q entspricht der Fördermenge und sollte aus der Pumpenleistung bekannt sein. Das hydraulische Gefälle ergibt sich aus dem Absenkungstrichter und der durchflossene Querschnitt aus der Mächtigkeit des Grundwassers. Im Idealfall ist somit wiederum der k_f -Wert des Gesteins bestimmbar. Nicht immer ist jedoch beim Niederbringen der Bohrung der Grundwasserleiter vollständig durchteuft worden. Die Grundwassermächtigkeit M bleibt damit unklar und es ist nicht möglich den Durchlässigkeitsbeiwert zu berechnen. Da das häufig der Fall ist, hat man sich eine Hilfsgröße geschaffen, die auf M verzichten kann. Die **Transmissivität T** ergibt sich als Produkt aus k_f -Wert und Grundwassermächtigkeit und hat deshalb die Einheit $[m^2 s^{-1}]$. Im Gegensatz zum Durchlässigkeitsbeiwert ist diese Größe recht abstrakt, aber der erfahrene Hydrogeologe liest sie wie den k_f -Wert.

Zurück zum Pumpversuch in Abbildung 7.26. Die Absenkung des Grundwasserspiegels erfolgt zeitlich nicht linear sondern logarithmisch, anfangs schnell, dann immer langsamer. Dabei nähert sich der Grundwasserspiegel im Idealfall asymptotisch einem Grenzwert. Die so genannten **stationären Verhältnisse** sind dann erreicht wenn sich Förderung und Nachfließen die Waage halten. Das kann sehr lange dauern (Stunden bis Tage) und da Zeit bekanntlich Geld ist, wartet man nicht ab, sondern wertet oft bei **instationären Verhältnissen** aus.

Ein weiterer Trick ist es, zwar bei instationären Verhältnissen abzubrechen, jedoch auch den **Wiederanstieg** zu beobachten. Die Pumpe wird

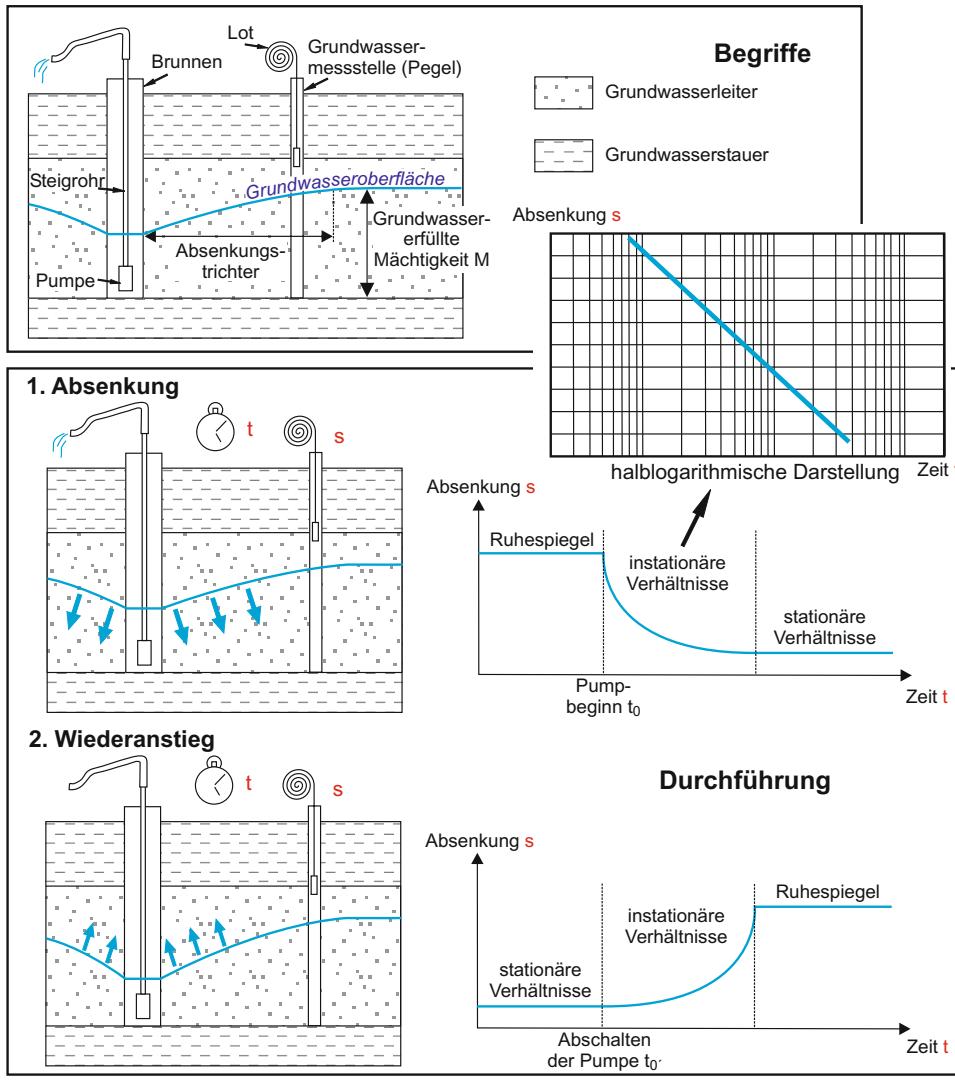


Abb. 7.26 Begriffe (oben) und Durchführung (unten) eines Pumpversuches. Der zeitliche Verlauf der Grundwasserabsenkung wird graphisch dargestellt und bildet die Grundlage der Auswertung.

abgeschaltet, aber in regelmäßigen Abständen wird durch Lotung die Höhe des Grundwasserspiegels bis zur Einstellung des Urzustandes gemessen. Wie der Abbildung 7.26 zu entnehmen ist, entspricht die sich ergebende Wasseranstiegs-Zeit-Kurve der gespiegelten Absenkungs-Zeit-Kurve.

Die Vielfalt der einzelnen Auswerteverfahren kann hier nicht besprochen werden, aber die

Abbildung 7.27 gibt einen Überblick über gängige Verfahren.

Neben der Frage stationär oder instationär, ist sowohl für die Durchführung als auch für die Auswertung des Pumpversuches wichtig, ob das Grundwasser **gespannt** oder **ungespannt ist**, ob sich der Grundwasserspiegel also über oder unter der Hangengrenze des Grundwasserleiters befindet (Abb. 7.27). Dazu muss natürlich der

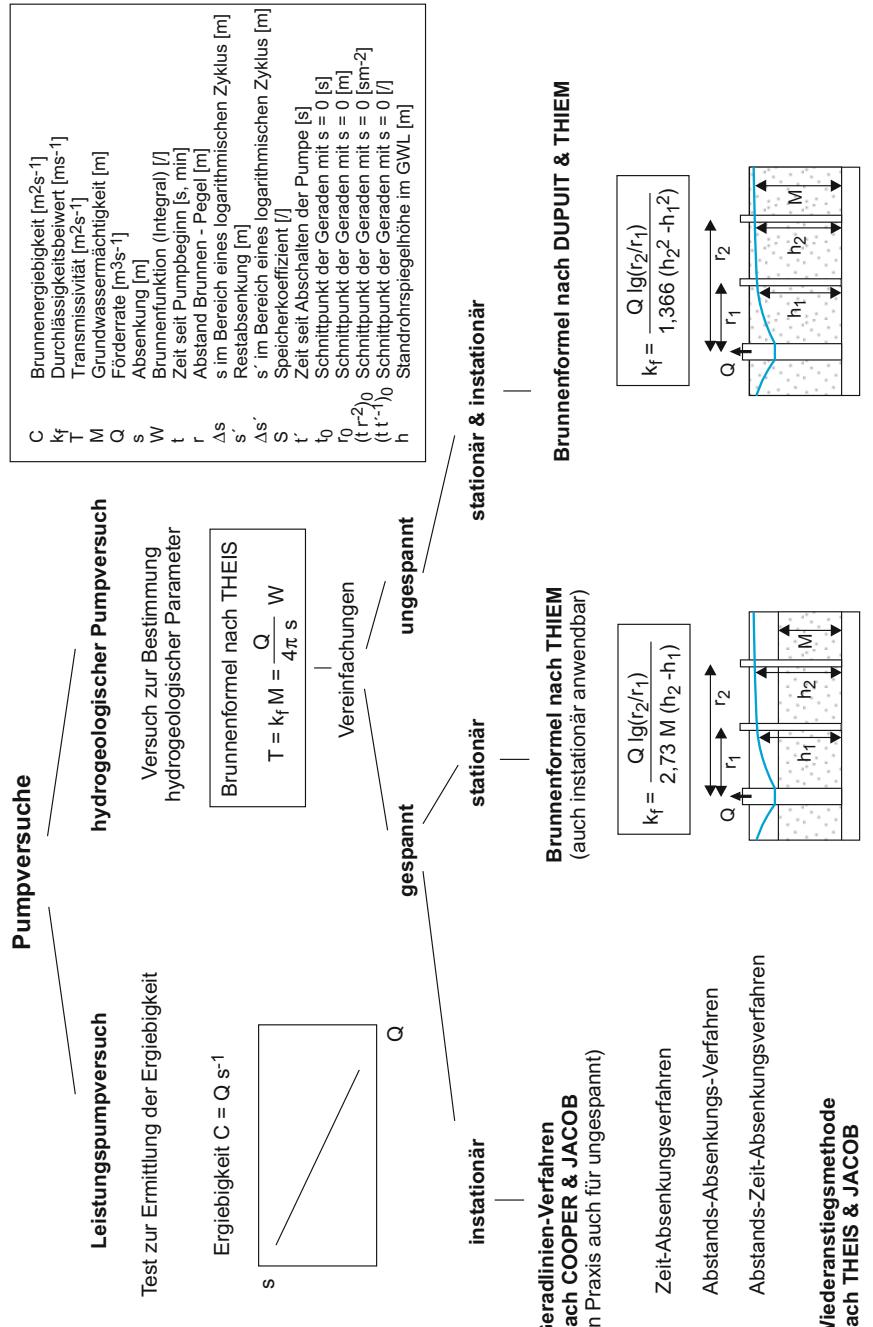


Abb. 7.27 Übersicht über die Verfahren zur Durchführung und Auswertung von Pumpversuchen (zusammengestellt nach LANGGUTH & VOLGT 1980).

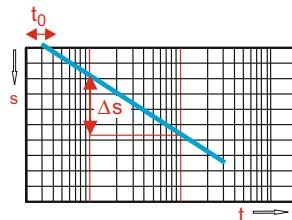
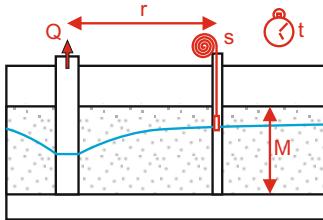
Messung/Voraussetzung

Graphische Auswertung

Berechnung

A) Geradlinienverfahren nach COOPER & JACOB

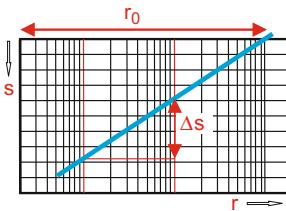
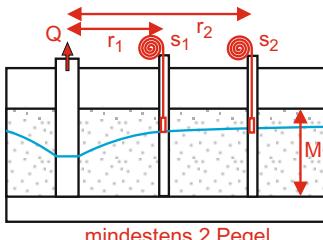
Zeit-Absenkungs-Verfahren



$$T = k_f \cdot M = \frac{2,3 Q}{4\pi \cdot \Delta s}$$

$$S = 2,25 T t_0 r^2$$

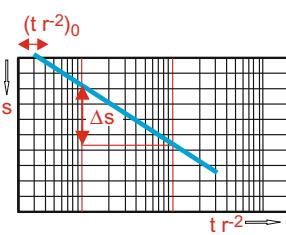
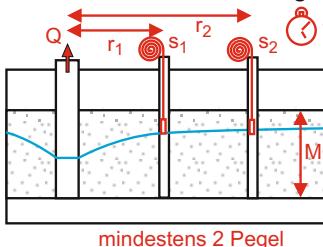
Abstand-Absenkungs-Verfahren



$$T = k_f \cdot M = \frac{2,3 Q}{2\pi \cdot \Delta s}$$

$$S = 2,25 T t r_0^{-2}$$

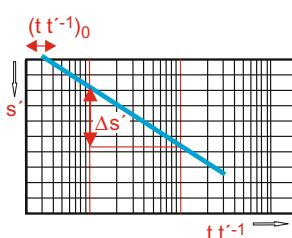
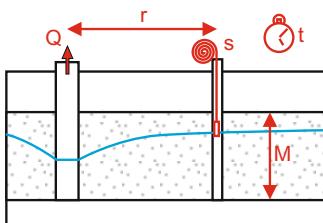
Abstand-Zeit-Absenkungs-Verfahren



$$T = k_f \cdot M = \frac{2,3 Q}{4\pi \cdot \Delta s}$$

$$S = 2,25 T (t r^{-2})_0$$

B) Wiederanstiegsmethode nach THEIS & JACOB

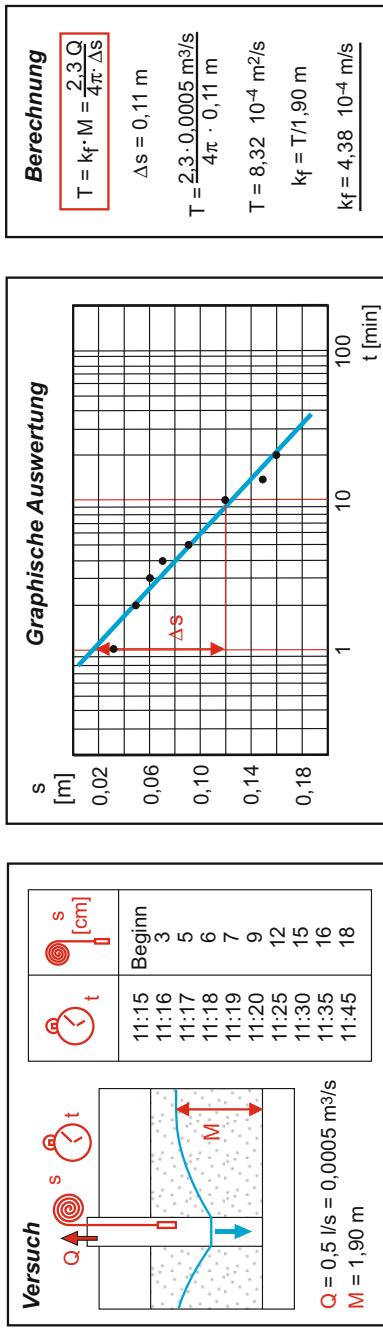


$$T = k_f \cdot M = \frac{2,3 Q}{4\pi \cdot \Delta s'}$$

- $(t t^{-1})_0 = 1$ Idealbedingungen
- $(t t^{-1})_0 > 2$ Fremdspeisung
- $(t t^{-1})_0 < 1$ GWL räumlich begrenzt
- $1 < (t t^{-1})_0 < 2$ Änderung von S

Abb. 7.28 Auswertung von Pumpversuchen unter instationären Bedingungen mittels Geradlinienverfahren (dekadischer Logarithmus) und theoretisch gespannten Verhältnissen (zusammengestellt nach LANGGUTH & VOIGT 1980).

1. Absenkung (Zeit-Absenkungs-Verfahren nach COOPER & JACOB)



2. Wiederanstieg (Wiederanstiegsmethode nach THEIS & JACOB)

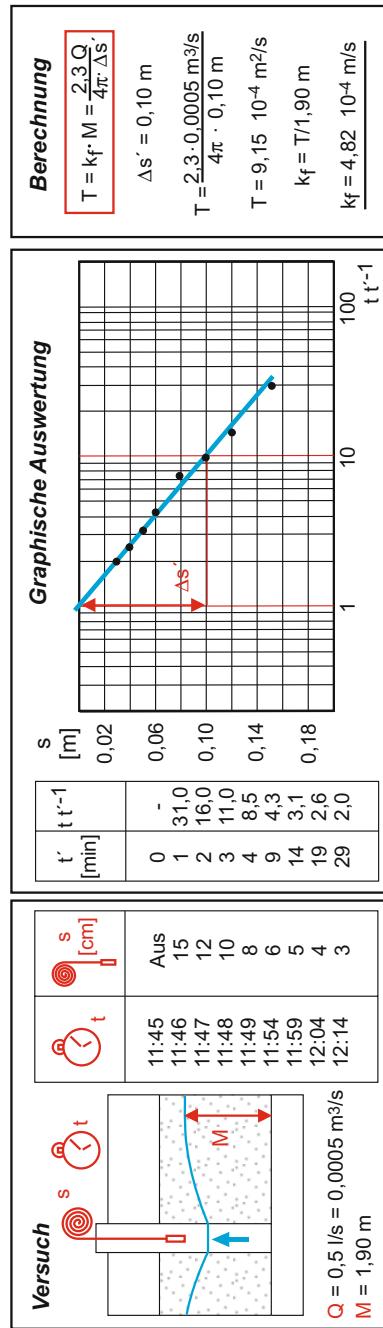


Abb. 7.29 Pumpversuchsdurchführung und -auswertung anhand eines Beispiels. Es wird ein Pumpversuch bei instationären Verhältnissen mit gleichbleibender Förderrate gefahren. Die Auswertung erfolgt mittels Zeit-Absenkungs-Verfahren nach COOPER & JACOB sowie nach THEIS & JACOB für den Wiederanstieg.

geologische Aufbau der Region bekannt sein, dem Hydrogeologen sollten die Ergebnisse aus der Bohrung vorliegen.

Gewissermaßen die Vollversion der Auswertung eines hydrogeologischen Pumpversuches erfolgt rein mathematisch, wobei sich in der Brunnenformel nach THEIS hinter dem W (Abb. 7.27) die Integralrechnung verbirgt. Weit verbreitet sind jedoch vereinfachte Verfahren, die zum Teil auf graphischer Auswertung beruhen und die mathematischen Untiefen der Hydraulik geschickt umschiffen.

Da der Fall ungespannten Grundwassers als ein Spezialfall der gespannten Grundwassersituation aufgefasst werden kann, und da die stationären Verhältnisse selten erreicht werden, fokussiert sich die Auswertung in der Praxis auf die **Geradlinien-Verfahren nach COOPER & JACOB** bzw. die **Wiederanstiegsmethode nach THEIS & JACOB** (alle in LANGGUTH & VOIGT 1980). Sie sind noch einmal etwas ausführlicher in der Übersicht in Abbildung 7.28 behandelt. Vor allem werden die Voraussetzungen und Messgrößen dargestellt und die jeweiligen Berechnungsformeln angegeben.

Die Geradlinien-Verfahren heißen so, weil die eigentlich gekrümmte Absenkungs-Zeit-Kurve durch Eintrag der Messwerte in halblogarithmisches Papier zu einer Geraden transformiert wird. Die analytische Berechnung wird dadurch einfacher und lässt sich sehr gut auf graphischem Wege bewerkstelligen. Berechnet wird jeweils nur der k_f -Wert (bzw. die Transmissivität, wenn die

Grundwassermächtigkeit nicht bekannt ist) mit der rechts in der Übersicht gegebenen einfachen Formel. Diese Formeln sind wiederum Spiegelbilder des Darcy-Gesetzes (Abb. 7.25), wobei sich das hydraulische Gefälle im Δs verbirgt.

Neben Durchlässigkeitsbeiwert und Transmissivität wird häufig der **Speicherkoeficient S** bestimmt, ebenfalls eine gesteinsspezifische Größe. Sie beschreibt das Wasservolumen, das in Abhängigkeit von der Änderung der Grundwasserspiegelhöhe im Brunnen freigesetzt oder aufgenommen wird. Es handelt sich um die Formulierung einer flächenspezifischen Speicherkapazität des Grundwasserleiters.

Um dieses Kapitel noch etwas abzurunden und das genannte plastischer zu machen, gibt Abbildung 7.29 ein Beispiel zur Durchführung eines Pumpversuchs.

Überschlägige Bestimmung von Durchlässigkeitsbeiwerten

Mittlerweile existiert eine Vielzahl von Erfahrungswerten aus denen auf den k_f -Wert, grob gesagt die Durchlässigkeit eines Gesteins, geschlossen werden kann. Ausschlaggebend ist das Korngefüge. Kondensiert in der Sieblinie werden Korngrößenspektrum, Ungleichförmigkeitsgrad und Gegenwart von Kolloidmineralen (Tone), überschlägig für die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes herangezogen (Abb. 7.30).

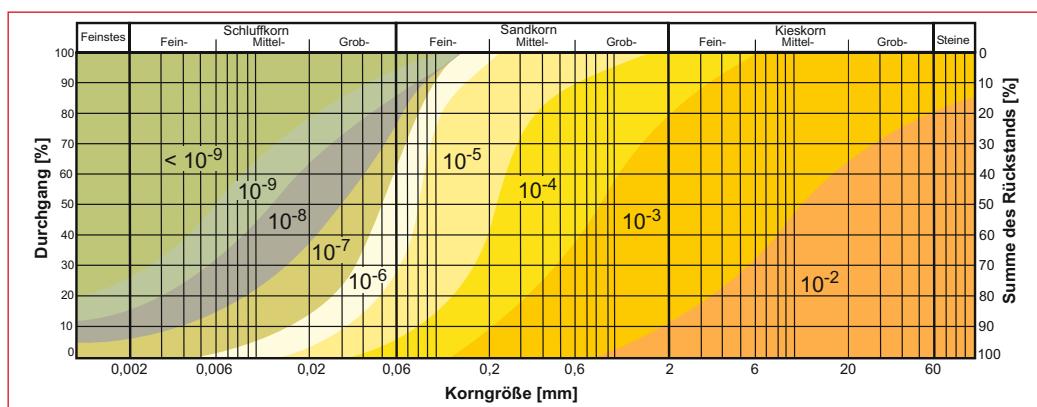


Abb. 7.30 Das Korngrößenspektrum als Spiegelbild der Wasserdurchlässigkeit. Mit einer gegebenen Summenkurve lässt sich der k_f -Wert eines Bodens überschlägig abschätzen (nach KRAPP nach PRINZ UND STRAUSS 2006).

Genauere Schätzungen ziehen auch den Ungleichförmigkeitsgrad und weitere Parameter zu Rate. Aber: Schätzung bleibt Schätzung und nichts geht über eine experimentelle Bestimmung am Objekt selbst.

7.5 Verwendung von Lockergesteinen

Betonzuschlag

Wenn jeder Deutsche im Lauf seines Lebens etwa 300 Tonnen Sand und Kies verbraucht, dann liegt das vor allem an der Unmenge Beton, die pro Kopf in Häusern und Straßen, Brücken und Plätzen, Mauern und Kanälen verbaut wird. Grundbestandteil des Betons ist der Zement, in dem jene wichtigen chemischen Reaktionen zwischen Brandkalk, silikatischem Gesteinsmehl und Wasser ablaufen, die zu seinem Aushärten führen. Zum Zement werden Zuschläge gemischt, die zum einen bloßes Füllmaterial sind, zum anderen aber wichtige Eigenschaften des Betons, wie seine Festigkeiten, beeinflussen. Solche Zuschläge sind künstlich, wie die Hochofenschlacke, natürlich aber gebrochen, wie Schotter und Splitt oder natürlich und ungebrochen, also Sand und Kies.

Für eine Verwendung im Beton muss unser wichtigster Rohstoff einige Anforderungen, die in der DIN EN 12620 festgehalten sind, erfüllen. Für verschiedene Anwendungen, aber auch für einen individuellen Handel von Kies und Sand, definiert die DIN EN 12620 dabei eine Reihe von Anforderungsniveaus an bestimmte Kategorien von Eigenschaften, die im Folgenden dargestellt werden. Der Einfachheit halber wird hier aber nur auf die so genannten Regelanforderungen eingegangen.

- **Abschlämmbare Bestandteile**, also Korngrößen unter 0,06 mm (Ton und Schluff), beeinträchtigen das Aushärten des Betons und können gewissermaßen Blähungen erzeugen, die das Gefüge des Betons sprengen. Grund ist das schon wiederholt besprochene Quellvermögen der Tonminerale. Je nach Lieferkorngröße werden Höchstgehalte festgelegt. Für die



Abb. 7.31 In einem Stück ausgebrochenem Beton sind gut die Kies-Zuschlagstoffe zu erkennen.

meisten Korngemische verlangt die Regelanforderung Gehalte von $\leq 3\%$

- Die **Korngrößenverteilung** regelt den zulässigen Anteil von Über- und Unterkorn.
- **Plattigkeitskennzahl und Kornformkennzahl** beschreiben die Kornform. Isometrische Körner werden plattigen oder stenglichen vorzogen. Bei echten „Kieselsteinen“, also Kiesen und Sanden aus Quarz dürfte generell kein Problem bestehen.
- **Organische Stoffe** dürfen vor allem wegen ihres Reduktionsvermögens und ihrer Quellfähigkeit nicht im Beton mitspielen. Auch hier gelten unterschiedliche Grenzwerte. Die höchste Obergrenze gilt für feine Körnungen und liegt bei 0,5%.
- Beim wiederholten Wechsel von Frost- und Tauperioden darf Zuschlagstoff im Beton, wie natürlich der gesamte Beton selbst, nicht verwittern. Dafür gibt es wiederum Normen, die prüfen wie viel Prozent einer Probe bei bestimmter Anzahl von **Frost-Tau-Wechseln** „abbröckeln“.

- **Schwefelverbindungen** können ungewollte Oxidationsvorgänge verursachen. Sulfatgehalte dürfen daher laut Regelanforderung 0,8% nicht übersteigen (berechnet als SO_3).
- **Nitrate und Chloride** greifen Stahl an, der häufig als Bewehrung im Beton eingebaut ist. Der Grenzwert der Regelanforderung liegt bei 0,04% Chlorid.

Bei der Beurteilung als Zuschlagstoff steht also weniger das Gefüge eines Lockergesteins zur Debatte, als viel mehr die stoffliche Zusammensetzung. Eigentlich bestehen Kies und Sand mehr oder weniger aus Quarz. Die Kieswerke bieten daher gewaschene Produkte an, die den stofflichen Regelanforderungen Genüge tun. Durch Kombination verschiedener Siebe werden unterschiedliche, auf die Erfordernisse der Industrie angepasste Gemische hergestellt.

Diese Lieferkörnungen werden immer mit zwei Zahlen angegeben: D bezeichnet die Nenn-Obergrenze in Millimeter, d die Nenn-Untergrenze. In einem Korngemisch mit Korngrößen zwischen 2 mm und 8 mm ist $d = 2$ und $D = 8$, die Körnung d/D heißt also 2/8. Allerdings bedeutet die Körnung 2/8 nicht zwangsläufig, dass überhaupt keine Partikel unter 2 mm oder über 8 mm vorkommen. Ein zulässiger Anteil an Unterkorn und Überkorn wird für jede Körnung und Anforderung definiert.

Folgende Gruppen von Gesteinskörnungen werden laut DIN EN 12620 festgelegt und gebräuchliche Körnungen genannt:

1. grob
 - Quotient $D/d \leq 2$ oder $D \leq 11,2$; Körnungen: 2/4, 2/5, 2/8, 5/8, 8/11, 8/16, 11/16, 16/22, 16/32, 22/32
 - Quotient $D/d > 2$ und $D > 11,2$; Körnungen: 2/16, 4/16, 4/32, 8/32
2. fein; $D \leq 4$ und $d = 0$; Körnungen: 0/2, 0/4
3. natürlich zusammengesetzt; $D = 8$ und $d = 0$; Körnung: 0/8
4. Korngemisch; $D \leq 45$ und $d = 0$; Körnungen: 0/16, 0/32

Straßenbau

Zur Gestaltung des Untergrundes greift man bei verschiedenen Baumaßnahmen auf die Verwen-

dung von Lockergesteinen zurück. Bahngleise, Häuserfundamente und Straßen ruhen auf Sand und Kies. Als Beispiel für die Vielschichtigkeit in der Anwendung dieser Materialien wird hier kurz auf die unterschiedlichen Ansprüche an Lockergesteine im Straßenbau eingegangen.

Der Aufbau einer Straße hängt vor allem von ihrer Nutzung ab. Autobahnen müssen wesentlich robuster sein als Anliegerstraßen. Der Grundaufbau ist im Wesentlichen jedoch gleich und wird in Abbildung 7.32 gezeigt. Abgesehen von der Aufschüttung des Unterbaus, der dem Baugrund eine neue Oberflächengestalt „aufsetzt“ (Damm, Aufschüttung am Hang), werden Sande und Kiese für die Frostschutzschicht, die Tragschicht und für die Straßendecke benötigt. Alle drei Schichten unterscheiden sich in ihrer Funktion und erfordern damit verschiedene Eigenschaften der verwendeten Lockergesteine.

Frostschutzschichten haben die Aufgabe, den Untergrund der Fahrbahn wasserfrei zu halten um so den Druck sich bildenden Eises im Winter zu vermeiden. Dazu ist ein Material notwendig, das über ein hohes Porenvolumen verfügt. Und zwar ein so hohes, dass es das anfallende Wasser auch bereitwillig in den Straßengraben abgibt und nicht als Haftwasser an sich bindet. Damit kommen Bodenarten in Frage, die unter natürlichen Lagerungsbedingungen gute Grundwasserleiter wären. Wie in vorangegangenen Kapiteln gezeigt, ergibt sich eine hohe Durchlässigkeit (k_f -Wert) durch hohe Korngrößen und einen niedrigen Ungleichförmigkeitsgrad, also gute Sortierung. Damit kommen die grobkörnigen Böden der DIN 18196 in Frage (Abb. 7.5), die in den Zusätzlichen Technischen Vorschriften Erdbau – Straßenbau (ZTVE-StB 1994) als nicht frostempfindlich eingestuft werden (Abb. 7.33).

Wer trägt die Hauptlast des Straßenverkehrs? Natürlich die **Tragschicht**. Sie gibt die Belastung verteilt an den Untergrund weiter. Damit werden vor allem Anforderungen an die Druckfestigkeit, Frost- und Verwitterungsbeständigkeit der eingesetzten Mineralstoffe gestellt. Neben Tragschichten aus bloßem Kies oder gebrochenem Festgestein (Schotter), kann man auch mit Beton oder Asphalt abgebundenes Material verwenden. Das Spektrum der Auswahlkriterien ist groß, jede Straße erhält ihre Rezeptur aus Bindemittel, Quarzmehl, Kies, Brechmaterial und Bitumen. Von der Lockergesteinsseite her, steht laut den

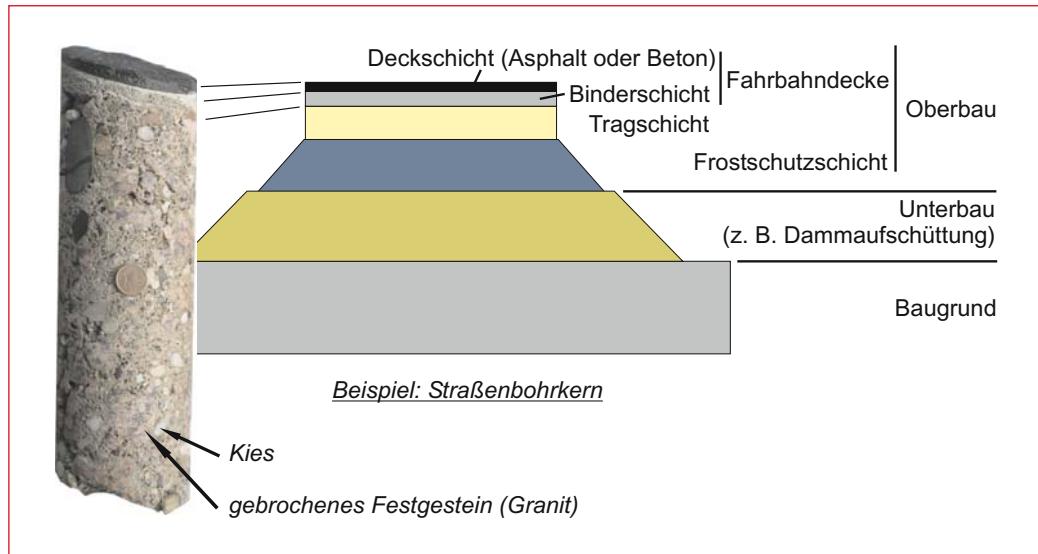


Abb. 7.32 Prinzipieller Aufbau einer Straße. Der Bohrkern zeigt einen Teil des Oberbaus.

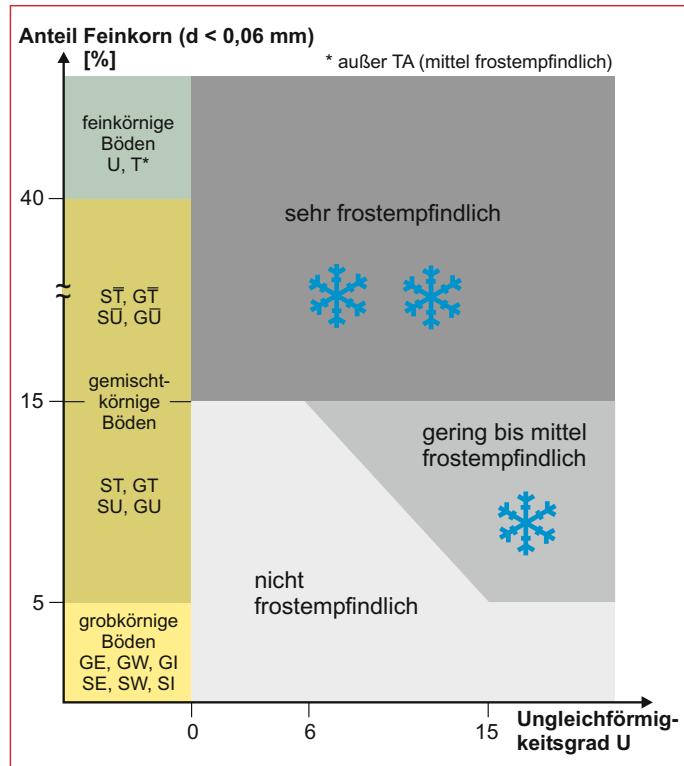


Abb. 7.33 Frostempfindlichkeitsklassen nach ZTVE-StB 1994 (Ausgabe 1997) und die zugehörigen Bodengruppen nach DIN 18196.

Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 94) eine begrenzte Anzahl von Körnungen zur Mischung in die Tragschicht zur Verfügung:

Sand: 0 mm – 2 mm

Kies: 2 mm – 4 mm, 4 mm – 8 mm, 8 mm – 16 mm, 16 mm – 32 mm, 32 mm – 63 mm

Kies-Sand-Gemische: 0 mm – 32 mm, 0 mm – 45 mm, 0 mm – 56 mm.

Straßendecken werden aus Beton oder Asphalt gefertigt. Obwohl an den Beton für Straßendecken ganz bestimmte Eigenschaften geknüpft werden, wie Rauhigkeit, Druckfestigkeit und hohe Verschleißfestigkeit, gilt für den Betonzu-

schlag das oben bereits gesagte. Bei Asphaltmischungen kommt es auf das richtige Verhältnis von Mineralstoffen, Bitumen und Luftporen an. Für gewöhnlich werden als Mineralstoffe aber Brechprodukte, wie Schotter und Splitt, verwendet und an natürlichem Korn kommt nur der Sand der Fraktion 0 bis 2 mm zu Ehren.

Filtersand und Filterkies

Filtermaterialien haben die Aufgabe, den Übertritt von Grundwasser aus dem Grundwasserleiter in einen Brunnen zu gewährleisten. Dabei sind zwei Überlegungen wichtig (Abb. 7.34):

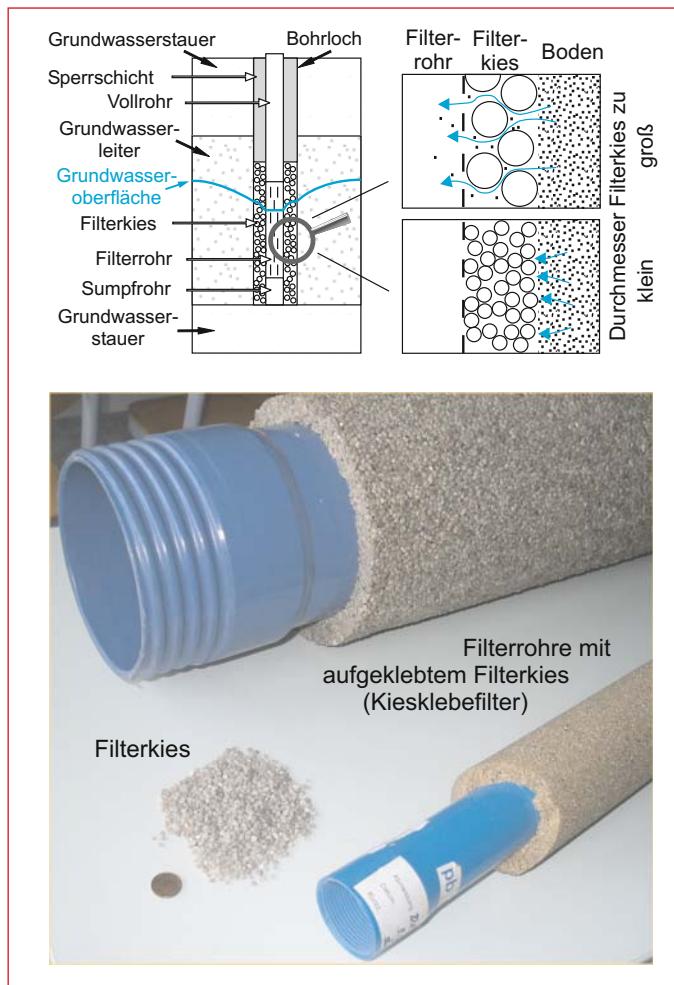


Abb. 7.34 Der Aufbau eines Bohrbrunnens (einfache Kiesschüttung) und die Anforderungen an das geschüttete Filtermaterial. Das Foto zeigt Filterrohre auf die der Filterkies aufgeklebt ist.

1. Zum einen muss der Filter so grob sein (k_f -Wert hoch), dass das Wasser auch wirklich aus den Poren des abzufilternden Bodens gepumpt werden kann. Ein bestimmter Anteil von Feinkorn darf und soll dabei aus dem umliegenden Boden entfernt werden.
2. Andererseits darf der nutzbare Porenraum des Filters auch nicht unermesslich groß sein, da sonst der gesamte Boden der Umgebung mit ins Filtermaterial gespült würde. Die Folge wäre ein Zusetzen der Filter und die Unbrauchbarkeit des Brunnens.

Die Kunst bei der Auswahl von Filtersanden und -kiesen besteht also darin, auf der Gratwanderung zwischen „zu fein“ und „zu grob“ die richtige Korngröße auszusuchen. Es gibt eine Vielzahl von Methoden, um, ausgehend von der Korngrößenverteilung des abzufilternden Bodens, dieses Problem mit Schätzformeln, Überschlägen oder graphischen Ansätzen zu lösen. Meist wird nur eine Korngröße (**Schüttkorndurchmesser D**) für den Filtersand oder -kies ermittelt. Der Rest des Kornspektrums ergibt sich zwingend aus der Forderung, dass ein Filtermaterial sehr gleichförmig sein muss, also sortiert ist bzw. dass der Ungleichförmigkeitsgrad sehr niedrig ist. Die sehr steile Sieblinie des Filters verläuft durch den Schüttkorndurchmesser D.

Da die Lieferkorngrößen für Filterkiese und -sande genormt sind (DIN 4924), wird also geprüft, in welchem der folgenden Bereiche der Schüttkorndurchmesser D [mm] liegt:

Filtersand $0,25\text{--}0,5; > 0,5\text{--}1; > 0,71\text{--}1,4; > 1\text{--}2$
Filterkies $> 2\text{--}3,15; > 3,15\text{--}5,6; > 5,6\text{--}8; > 8\text{--}16; > 16\text{--}31,5$.

In der Abbildung 7.35 sind einige wichtige Verfahren zur Bestimmung des Schüttkorndurchmessers dargelegt:

- Bestimmung nach Augenschein (ohne Sieblinie des abzufilternden Bodens),
- Bestimmung mit Kennkornlinie,
- 80%-Regel,
- Filterregel nach TERZAGHI.

Zu erkennen ist, dass alle Methoden auf empirischen Füßen stehen, also letztlich aus Erfahrungswerten abgeleitet wurden. Auch die **Kennkornlinie** ist ein so erworbenes Hilfsmittel. Ihre

graphische Entsprechung ist in etwa die: Jede Sieblinie eines beliebigen abzufilternden Bodens schneidet die Kennkornlinie. Alles Material, das feiner als die Korngröße d am Schnittpunkt ist, wird beim Filtern theoretisch aus dem Kornverband herausgelöst. Durch die Multiplikation der Korngröße d am Schnittpunkt mit einem **Filterfaktor** ergibt sich der Schüttkorndurchmesser D des Filters. Der Filterfaktor ist tatsächlich eine rechnerische Größe, die angibt um wie viel größer das Korn des Filters sein muss um alle Körner, die kleiner als d sind, durch seine Zwickel abzufiltern. Der Wert ist abhängig von der Lagerungsdichte des Filters, wird aber meist mit 4 angenommen.

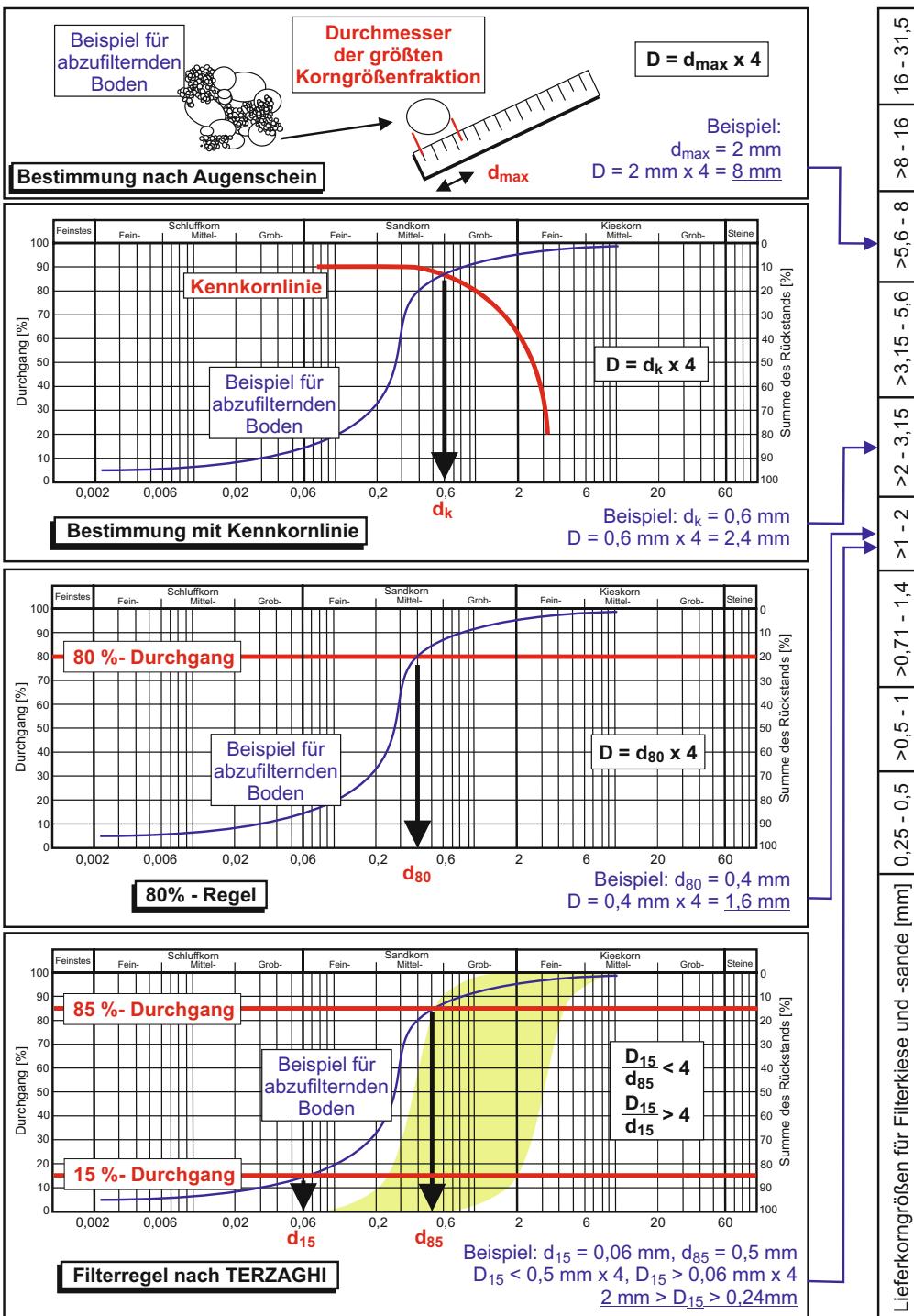
Dieser Wert „4“ taucht auch in der Bestimmung nach TERZAGHI auf, wobei hier etwas detaillierter vorgegangen wird. Die Filterregel nach TERZAGHI zerfällt nämlich in zwei Teile, die jeweils der Forderung (siehe 1. und 2. oben) nach Mindestkorngröße und Höchstkorngröße Genüge tun.

Deponiebau

Zu guter Letzt noch ein paar Bemerkungen zu Lockergesteinen im Deponiebau. Mit diesem Kapitel soll die Ehre der bindigen Böden gerettet werden, da diese in allen bisherigen Anwendungen eher unerwünscht waren. Hier können sie zeigen was in ihnen steckt: hohes Adsorptionsvermögen und kleine Durchlässigkeitsbeiwerte.

Eine Deponie soll zu allererst eins sein: dicht. Was beim Ablagern von Bauschutt vielleicht tolerierbar ist, kann beim Haus- und Industriemüll,

→
Abb. 7.35 Die Dimensionierung von Filterkiesen und -sanden (Bestimmung des Schüttkorndurchmessers D) mit Hilfe einiger wichtiger Methoden (nach THOLEN 1997 und TERZAGHI & PECK 1948). Das Beispiel in Blau berechnet die Schüttkorngröße und ordnet D einer Lieferkorngröße rechts zu. Wie ersichtlich, gehen die Ergebnisse für ein und denselben Boden auseinander. Hier entscheidet der Brunnenbauer entsprechend seiner Erfahrung. Bei der Methode nach TERZAGHI ergibt sich für das Filtermaterial, das eine Ungleichförmigkeit von $U \leq 2$ haben muss, ein Bereich für seine Sieblinie (grün). Weitere Erläuterungen siehe Text.



oder gar Sondermüll, katastrophale Folgen für Umwelt und menschliches Wohlergehen haben. Nicht umsonst wird in Vorschriften des Bundes und der Länder ein strenger Maßstab an die Sicherheit von Deponien gelegt (z. B. TA Siedlungsabfall).

Im so genannten **MultibARRIERENkonzept** muss unter anderen Sicherheitskriterien nachgewiesen werden, dass der unmittelbare geologische Untergrund keine Schadstoffe zum Grundwasser durchlassen würde (geologische Barriere). Tone und Tonsteine sind geeignete Medien. Je nach Art des Abfalls werden k_f -Werte von 10^{-6} bis 10^{-9} ms^{-1} erwartet und auch die Mächtigkeit der Sperrsicht darf nicht zu gering ausfallen. Für Siedlungsabfall muss sie mindestens 5 m mächtig sein und der k_f -Wert soll unter 10^{-7} ms^{-1} liegen.

Bei wackeligen geogenen Bedingungen wird allerdings nachgeholfen und eine künstliche mineralische Barriere mit mindestens 3 m Mächtigkeit und einem Durchlässigkeitsbeiwert von 10^{-8} ms^{-1} eingebracht.

Zusätzlich bekommen alle Deponien eine Basisabdichtung. Die besteht unter anderem noch einmal aus einer mineralischen Schicht mit einer Mindestmächtigkeit entsprechend der Abfallart. In der Sprache der Bautechnischen Bodenklassifikation (DIN 18196) sind es die Bodengruppen TA und TM, also ausgeprägt plastische und mittelplastische Tone, die sich dafür eignen. Der tatsächliche Tonanteil muss über 20% liegen und der k_f -Wert sollte 10^{-10} ms^{-1} erreichen.

Aufgaben

- Gegeben sind 5 Korngrößenverteilungskurven (Abb. 7.36). Benennen Sie die Proben jeweils nach DIN EN ISO 14688, DIN 18196 und DIN 4220 und berechnen Sie den Ungleichförmigkeitsgrad! Für Probe d) gilt darüber hinaus $w_L = 45\%$, $I_p = 15\%$ und für Probe e) $w_L = 55\%$, $I_p = 20\%$.
- Ermitteln Sie für die in Tabelle 7.1 gegebenen drei Proben jeweils Wassergehalt, Fließgrenze, Ausrollgrenze, Plastizitätszahl, Konsistenzzahl, die Bodenkennzeichnung nach DIN 18196 und die Bodenklassen nach VOB!
- Es wurden 3 ungestörte Proben im Stechzyliner genommen (Tabelle 7.2).

Als Dichte für den Feststoff wird $\rho_F = 2,65 \text{ gcm}^{-3}$ angenommen.

- Welches Volumen V hat die Probe?
- Wie groß ist seine Trockendichte ρ_D ?
- Berechnen Sie die Porosität n (Φ)!
- Wie groß ist die Porenzahl e?
- Welchen Wassergehalt w hat die Probe?

- Berechnen Sie die Porosität n der Proben a bis d!
- a) $V_{\text{gesamt}} = 234 \text{ cm}^3$; $V_{\text{Pore}} = 64 \text{ cm}^3$
- b) $V_{\text{Pore}} = 123 \text{ cm}^3$; $V_{\text{Feststoff}} = 148 \text{ cm}^3$
- c) $V_{\text{gesamt}} = 97 \text{ cm}^3$; $m_D = 213 \text{ g}$;
 $\rho_{\text{Feststoff}} = 2,65 \text{ gcm}^{-3}$
- d) $e = 0,42$

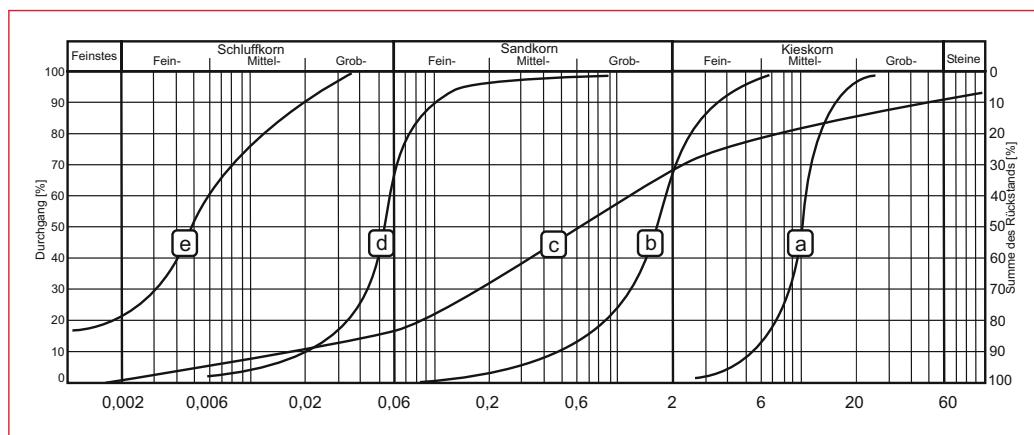


Abb. 7.36 Korngrößenverteilungskurven zur Übung.

Tabelle 7.1 Laborwerte für Aufgabe 2.

Probe Nr.	1	2	3
Wassergehalt			
Masse Schale m_B [g]	35	48	39
Masse Schale und Probe feucht $m_B + m$ [g]	165	125	144
Masse Schale und Probe trocken $m_B + m_D$ [g]	143	105	131
<i>Masse Probe trocken m_D [g]</i>			
<i>Masse Wasser m_w [g]</i>			
Wassergehalt w			
Wassergehalt w [%]			
Fließgrenze			
Versuch 1: Schlagzahl	18	35	32
Versuch 1: Wassergehalt w_1	0,473	0,344	0,221
Versuch 2: Schlagzahl	35	37	29
Versuch 2: Wassergehalt w_2	0,387	0,332	0,233
Versuch 3: Schlagzahl	21	25	33
Versuch 3: Wassergehalt w_3	0,453	0,356	0,209
Versuch 4: Schlagzahl	27	23	19
Versuch 4: Wassergehalt w_4	0,421	0,361	0,256
Fließgrenze w_L			
Ausrollgrenze			
Versuch 1: Wassergehalt w_5	0,201	0,275	0,095
Versuch 2: Wassergehalt w_6	0,197	0,266	0,098
Versuch 3: Wassergehalt w_7	0,207	0,272	0,087
Ausrollgrenze w_P			
Plastizitätszahl I_P			
Konsistenzzahl I_C			
Konsistenz verbal			
Bodenkennzeichnung nach DIN 18196			
Bodenklasse nach VOB			

Tabelle 7.2 Werte für die Berechnungen in Aufgabe 3.

	1	2	3
Durchmesser [Zoll]	2,86	4,00	6,00
Länge [cm]	10,00	25,00	10,00
Masse feucht [g]	727	3534	3997
Masse trocken [g]	607	3278	3522

5. Werten Sie die folgenden Pumpversuche aus und berechnen Sie den k_f -Wert!
 - a) instationäre Verhältnisse, gespannter Grundwasserleiter, $Q = 0,33 \text{ l/s}$, $M = 12 \text{ m}$ (Tabelle 7.3)
 - b) stationäre Verhältnisse, gespannter Grundwasserleiter, $Q = 50 \text{ l/s}$, $M = 15 \text{ m}$
Pegel 1: $r = 15 \text{ m}$; $h = 18 \text{ m}$;
Pegel 2: $r = 21 \text{ m}$; $h = 20 \text{ m}$
6. Schätzen Sie den Durchlässigkeitsbeiwert k_f nach KRAPP für die Summenkurven a bis e in Abbildung 7.36 ab!
7. Finden Sie für die Kurve b in Abbildung 7.36 ein geeignetes Filtermaterial mit Hilfe der Kennkornlinie, der 80%-Regel und der Filterregel nach Terzaghi!

Tabelle 7.3 Messwerte für die Pumpversuchsberechnung in Aufgabe 5.a).

Uhrzeit	Wasserspiegel unter Gelände [m]
10:54	2,80
10:55	2,97
11:00	3,25
11:05	3,40
11:10	3,49
11:15	3,67
11:30	3,73

8 Festgesteine (Fels)

8.1 Technische Festgesteinsansprache

Gestein, Fels und Gebirge

Im geologischen Sinne sind Gesteine immer fest. Damit widmet sich dieses Kapitel den „echten“ Gesteinen, die im Auge des Geologen diesen Namen überhaupt verdienen.

Denkt man an einen Ton, der bei hinreichen- der Wassersättigung plastisch ist, bei Austrocknung aber fest wird, dann wird klar, dass die Grenze zum Lockergestein zunächst verschwommen ist und einer Definition bedarf. Ein Gestein darf sich Fels (= Festgestein) nennen, wenn es nach mehrstündiger Lagerung in Wasser nicht aufweicht oder zerbröckelt.

Während Lockergesteine in der Baugrund-Praxis sehr detailliert untersucht werden, ist bei Festgesteinen die Ansprache häufig mit dem Befund „Fels“ bereits beendet. Wie der Verdin- gungsordnung Bau (VOB) zu entnehmen ist, existieren lediglich zwei bautechnisch relevante Gruppen: leicht lösbarer Fels und schwer lösbarer Fels (Abb. 7.9). Soll eine genauere Benennung erfolgen, dann bedient man sich der geologischen Gliederung in

- Sedimentgesteine
- Magmatische Gesteine und
- Metamorphe Gesteine.

Für diesen Fall sind auch für Ingenieure und Techniker die Kapitel vier bis sechs relevant. Alles was dem Geologen hilft ein Gestein zu benennen, wird auch dem Anwender nützen. Dazu gehören natürlich Mineral- und Gefügekenntnis. Allerdings wird der nackte Gesteinsname meist mit technischen Informationen gespickt. Solche Merkmale sind zum Beispiel:

- Körnigkeit (grob, fein)
- Raumerfüllung (dicht, porös, kavernös)
- Härte (Leider wird hier manchmal die Härteskala nach Mohs auf Gesteine übertragen. Da Gesteine aus verschiedenen Mineralen mit sehr unterschiedlicher Härte bestehen können, sind solche Angaben nicht ganz richtig.)
- Festigkeit (auf Zug, auf Biegung, auf Druck, Abrasivität)
- Verwitterungsgrad (stark verwittertes oder frisches Gestein) oder
- Löslichkeit in Wasser (nicht löslich, gut löslich).

Damit sind Eigenschaften angesprochen, die einer genaueren Besprechung bedürfen, da sie die Eignung eines Gesteins, für welche Anwendung auch immer, bestimmen (Abschnitt 8.2.1).

Festgesteine haben aber noch eine wesentliche Eigenschaft, die sie vom Boden unterscheidet. Aufgrund seines prinzipiellen Zusammenhalts ist Fels anfällig für „Brüche“, die in ihrer Gesamtheit das so genannte **Trennflächengefüge** bilden. Diese Anisotropien bestimmen die technischen Eigenschaften des Gesteins meist mehr als die Gesteinsart.

Es ist sicher aufgefallen, dass der Begriff „Gestein“ im letzten Satz in zwei verschiedenen Bedeutungen verwendet wurde: Gestein als Bezeichnung der Entstehung (Gesteinsart) und Gestein als heutige Daseinsform (Gesteinsverband). Man hilft sich durch die Einführung des Begriffes „**Gebirge**“ aus der Bredouille. Was der Geologe als eine tektonisch verursachte Auftragung von Gesteinsschichten sieht, wird vom Anwender als abstrakter Begriff betrachtet:

Gebirge = Gestein + Trennflächengefüge
(Abb. 8.1).

Das Trennflächengefüge kann man nicht am einzelnen Handstück untersuchen, es muss zumindest im Bohrkern, besser noch im Gelände bestimmt werden. Dem gehen wir in Kapitel 8.2.2 nach.

Bautechnische Benennung von Fels nach DIN EN ISO 14689-1

Die Benennung von Festgestein, so wie sie Bauingenieure und Geotechniker vornehmen, beruht im Wesentlichen auf der geologischen Ansprache. Allerdings wird nach Bedarf diese Benennung durch weitere Aussagen ergänzt. Abbildung 8.1 zeigt, dass die DIN EN ISO 14689-1 (Nachfolger der DIN 4022) zwischen Benennung und Beschreibung von Fels unterscheidet. Sowohl die Kategorien, als auch mögliche Bezeichnungen werden von der Vorschrift vorgegeben. Hinzu kommen die Kriterien nach denen der Gesteinsverband, also das Gebirge, beschrieben wird. Damit ergibt sich für den Anwender eine Checkliste (Abb. 8.1), die es abzuarbeiten gilt, wenn es darum geht ein Gestein auf seine technische Eignung hin zu untersuchen.

Ähnlich wie die Begriffe Fels und Gebirge muten aus geologischer Sicht manche Bezeichnungen im Regelwerk etwas ungewohnt an. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Anwender ein Vokabular entwickelt haben, das von dem der Naturwissenschaftler abweicht. Hier folgen einige Formulierungen, die so in der geologischen

Nomenklatur nicht vorkommen, aber Bestandteil der technischen Vorschriften sind:

- teilkörnig: dichte Grundmasse mit erkennbaren Einzelkörnern (= porphyrisch bei magmatischen Gesteinen)
- vollkörnig: Gestein besteht nur aus erkennbaren Einzelkörnern (z. B. Granit, Sandstein)
- massig: regelloses Gestein ohne Anisotropien
- frisch: unverwittertes, unverändertes Gestein
- zerfallen: durch physikalische Verwitterung zerlegtes Gestein
- zersetzt: durch chemische Verwitterung umgewandeltes Gestein
- organische Gesteine: im Sinne der biogenen Sedimente (Kapitel 4.4).

Welche Bedeutung die Korngröße für den Anwender auch bei den Festgesteinen hat, kommt in einer im Anhang der DIN EN ISO 14689-1 aufgestellten Hilfe zur Benennung von Fels zum Ausdruck (Abb. 8.2). Diese Übersicht hilft zwar nicht bei der Gesteinsansprache selbst, sie zeigt aber die geologischen Gesteinsbezeichnungen in einem neuen Zusammenhang. Struktur, Zusammensetzung und vor allem die Korngröße erhalten hier einen anderen Stellenwert. Sieht man von geologischen Unzulänglichkeiten dieses

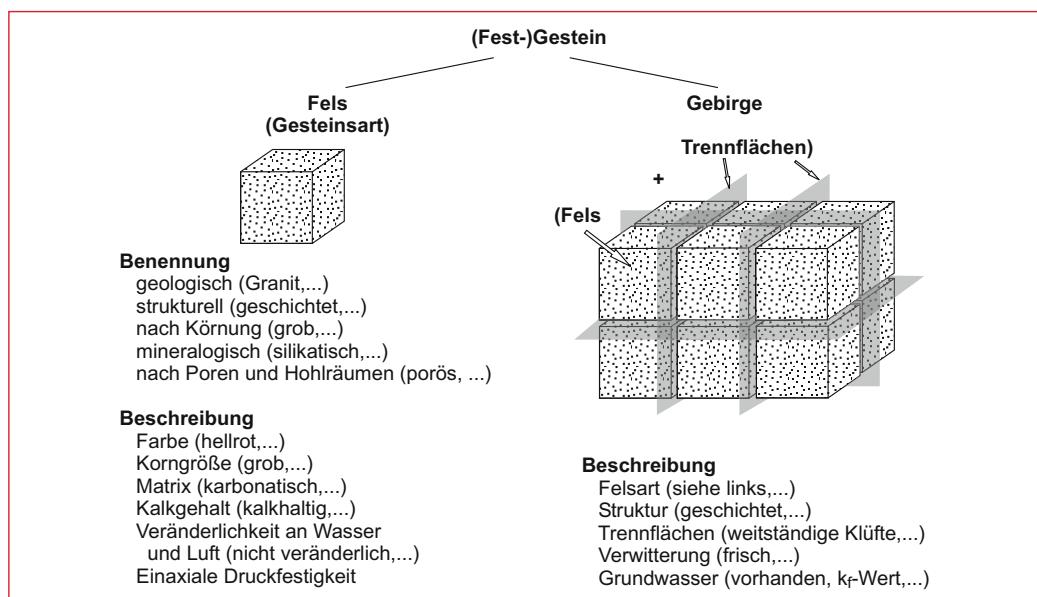


Abb. 8.1 Ausgehend von der Unterscheidung zwischen Gesteinsart und Gebirge formuliert die DIN EN ISO 14689-1 eine Art Checkliste zur Benennung und Beschreibung von Fels.

Gruppe	Magmatisches Gestein			Sedimentgestein			Metamorphes Gestein	
Untergruppe	pyroklastisch			klastisch	chemisch/organisch			
Gefüge	regellos			geschiebert			geschiebert	regellos
Zusammensetzung	Quarz, Feldspäte, Glimmer, dunkle Minerale	Feldspäte, dunkle Minerale	dunkle Minerale	mind. 50 % magmatisch	Gesteinskörper	Salze, Karbonat, quarzitisch kohlig	Quarz, Feldspat, Glimmer, dunkle Minerale	Quarz, Feldspat, Glimmer, dunkle Minerale, Karbonate
sauer	intermediär	basisch	ultrabasisch					
sehr grob-körnig ≥63	Pegmatit			runde Körner: Konglomerat			tektonische Brekzie	
grob-körnig ≥2				runde Körner: Konglomerat			Migmatit	Hornfels
mittel-körnig ≥0,63	Granit	Diorit	Gabbro	Pyroxenit	eckige Körner: Brekzie			Marmor
fein-körnig ≥0,063	Rhyolith			Peridotit	Tuff	Sandstein	Granulit	
sehr fein-körnig ≥0,002				Dolerit	feinkörniger Tuff			Quarzit
glasig	Vulkanisches Glas			Schluffstein > 50 % feinkörnig			Amphibolit	Amphibolit
				Tonstein > 50 % sehr feinkörnig			Tonschiefer	
				Schluff-Tonstein > 50 % feinkörnig			Myonit	
				Tonstein > 50 % sehr feinkörnig			quarzitisch: Feuerstein	
				Kalkstein Dolomit			kohlig: Lignit, Kohle	

Abb. 8.2 Hilfe für die Benennung und Beschreibung von Fels (verändert nach DIN EN ISO 14689-1).

Schemas ab und bewertet beispielsweise die Aussagen zur Zusammensetzung nicht über, dann eignet es sich durchaus als Übersicht zum „Pauken“ von Gesteinsnamen.

Felsklassifikation von Natursteinen

Man muss sich nicht mit Geologie beschäftigen, um mit Gesteinsnamen in Berührung zu kommen. Den Marmor für die Fensterbank oder den Granit für die Tischplatte kann man im Handel erwerben – Petrographiestunde im Baumarkt. Aber ist Granit wirklich Granit und Marmor wirklich Marmor?

Jedoch zunächst die Frage: Was ist eigentlich Naturstein, wo doch jedes Gestein natürlich gebildet wird? Gestein wird hier in einen anderen Kontext gestellt. Gestein, das in einer ganz bestimmten Form zur Verwendung kommen soll, wird Werkstein genannt. Es wird vor allem durch Spalten oder Sägen gewonnen und unterscheidet sich damit vom unregelmäßigen, aus dem Gebirge gesprengten Brechmaterial. Allerdings weiß jeder Bauherr, dass solches Gestein ziemlich teuer ist und durch ein künstliches Produkt, den Kunststein, ersetzt werden kann. Somit unterscheidet man Kunstwerkstein und Naturwerkstein. In beiden Begriffen wird das „-werk-“ aber meist unterschlagen.

Im Gegensatz zu Wissenschaft und Technik stehen in der Natursteinindustrie noch weitere Benennungskriterien zur Debatte. Der Naturstein ist eine Ware und muss unter den Bedingungen des Marktes an den Mann gebracht werden. Damit wird ein wissenschaftlicher Begriff häufig zu Gunsten eines wohl klingenden Handelsnamens aufgegeben. Wie schon angedeutet, sind vor allem zwei Begriffe sehr beliebt:

- Granit für körnige und auch sehr harte Gesteine und
- Marmor für feinkörnige, häufig streifige (marmorierte) und relativ weiche Gesteine.

Viele Natursteinproduzenten bedienen sich also petrographischer Begriffe im Wissen tatsächlich ein ganz anderes Gestein anzubieten.

Der Anspruch an den ästhetischen Wert eines Gesteins spiegelt sich auch in Bezeichnungen

wider, die sich auf besondere strukturelle oder farbliche Besonderheiten beziehen. Kurz gesagt: der Handelsname ist nicht zwangsläufig ein geologisch begründeter Fachbegriff.

Da sich eine Körperschaft wie die Europäische Union nicht mit solcher Willkür bis hin zur Mogelpackung zufrieden geben kann, hat sie eine Norm entwickelt, die die vertriebenen Gesteine europäischer Länder klar benennt. Die Regel der DIN EN 12440 (Naturstein, Kriterien für die Bezeichnung) besagt, dass jeder Hersteller seinen Handelsnamen zwar pflegen darf, jedoch weitere sachliche Erläuterungen dem Kunstnamen anfügen hat. Wie jeder gute Wein von einem ganz bestimmten Winzer stammt, so stammt jeder spezielle Naturstein aus einem speziellen Steinbruch. Gott sei Dank gibt es mehr Weingüter als Naturstein produzierende Steinbrüche und die für 20 Länder vergebenen Handelsnamen listet die DIN EN 12440 in ihrer Ausgabe von 2007 auf lediglich 91 Seiten.

Bestandteile der Bezeichnung sind demnach:

1. der Handelsnamen (Großbuchstaben)
2. die Petrographie
3. die typische Farbe und
4. der Herkunftsname.

Die gute Nachricht ist, dass der petrographische Name nach den internationalen Gepflogenheiten (Streckeisen-Diagramm usw.) vergeben werden muss. Die dabei für Naturstein geltenden Regeln werden in der DIN EN 12670 (Naturstein, Terminologie) aufgeführt und entsprechen etwa unseren Kapiteln vier bis sechs.

Zum Schluss einige mehr oder weniger bekannte Beispiele für Naturstein und ihre regelgerechte Bezeichnung:

- BLUE PEARL, Larvikit (Monzonit), blau, Larvik/Norwegen (Abb. 8.15f)
- BIANCO CARRARA, Marmor, weiß, Carrara/Italien (Abb. 8.4)
- JURA MARMOR (TREUCHTLINGER KALKSTEIN), Kalkstein, gelb, Treuchtlingen/Deutschland (Abb. 8.4).

Die in den Abbildungen 8.3 und 8.4 gezeigten Natursteine zeigen, wie wenig der Handelsname über die Geologie aussagt und wie weit in der Branche die Begriffe „Granit“ und „Marmor“ gefasst sind.

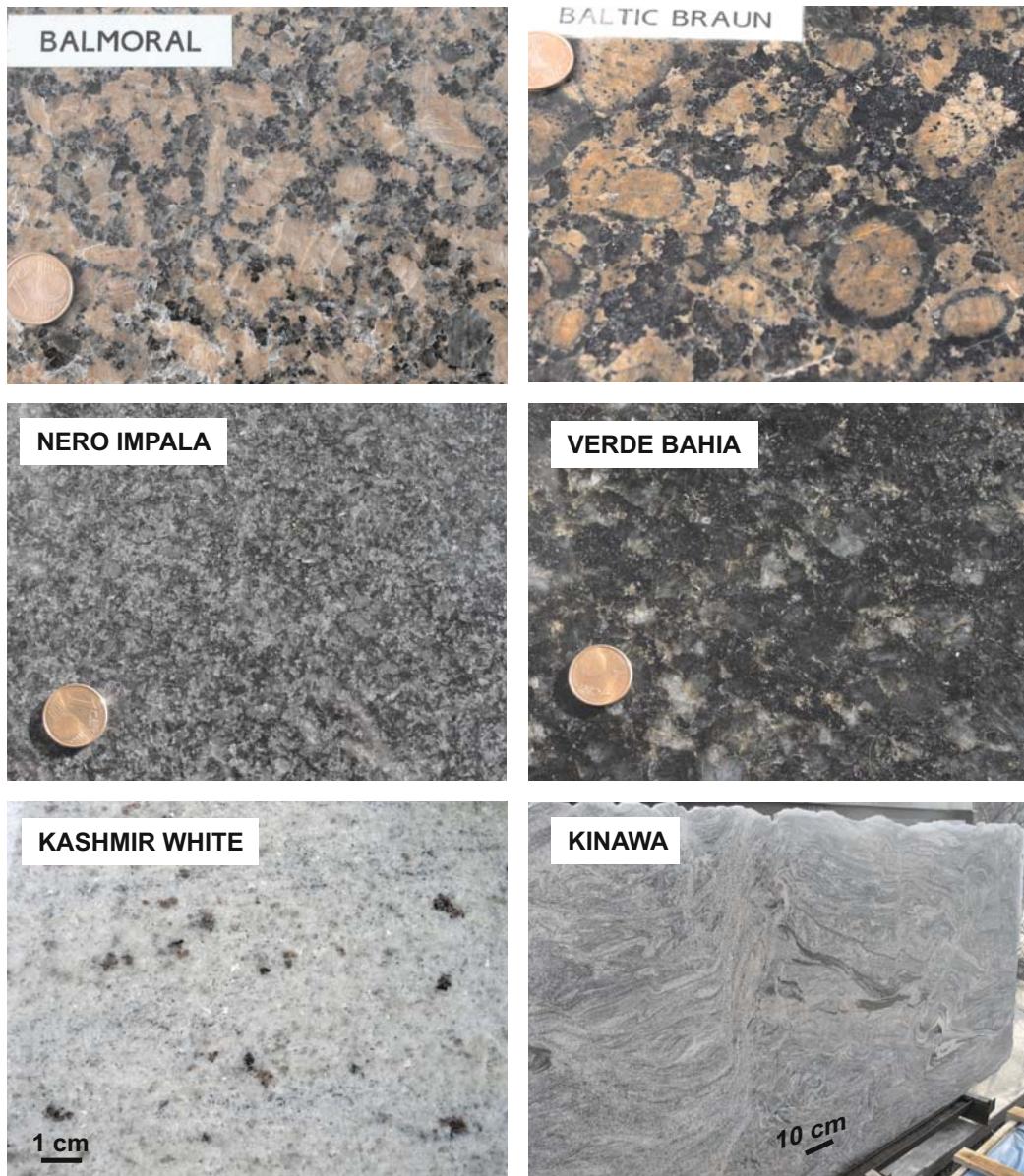


Abb. 8.3 Naturstein-„Granite“. Der Balmoral ist ein echter Granit und vom Gefüge her als solcher zu erkennen (DIN EN 12670: BALMORAL RED (COARSE), Granit, rot, Taivassalo/Finnland). Auch beim Baltic Braun handelt es sich um einen Granit (DIN EN 12670: BALTIC BROWN, Granit, braun, Ylämaa/Finnland). Allerdings gehört er zu einer bestimmten Sorte, Rapakivi genannt, die sich durch große, oft kugelige, Feldspataggregate auszeichnet, die typisch für das östliche Skandinavien ist und in dieser Form nur vor ca. 1,5 Milliarden Jahren entstanden ist. Gewissermaßen einen „Tiefkrustengranit“ stellt der Verde Bahia aus Brasilien dar. Solche pyroxenführenden Granite heißen Charnockite. Der Naturstein Nero Impala aus Südafrika hat zwar ein körniges granitisches Gefüge, seine Mineralzusammensetzung qualifiziert ihn jedoch als Gabbro. Kashmir White ist weder ein Granit noch überhaupt ein magmatisches Gestein. Die roten Granate weisen auf ein metamorphes Gestein hin: Granulit aus Indien. Wegen seines abwechslungsreichen Gefüges ist der Kinawa-Migmatit aus Brasilien sehr beliebt und entsprechend seiner Entstehung wenigstens zu einem Teil Granit (Abschnitt 6.6).



Abb. 8.4 Naturstein-„Marmore“. Der vielleicht berühmteste Marmor ist der Carrara-Marmor (DIN EN 12670: BIANCO CARRARA, Marmor, weiß, Carrara/Italien) aus dem Michelangelo seinen David gemeißelt hat. Der hochreine Kalzit-Marmor enthält lediglich einzelne diffuse Schlieren dunkler Minerale, die die typische Marborierung erzeugen. Zwar nicht um Marmor, aber zumindest um einen Kalkstein handelt es sich beim Jura gelb aus Treuchtlingen, der in Deutschland ein beliebtes Material für Fensterbänke darstellt (DIN EN 12670: JURA MARMOR, Kalkstein, gelb, Treuchtlingen/Deutschland). Hinter grünen Marmoren, wie dem Verde alpi (DIN EN 12670: VERDE ALPI, Ophicalcit, graugrün mit weißen Adern, Verrayes/Italien), verbergen sich meist Serpentinite und Ophicalcrite. Das sind basische Metamorphe aus Mantelgestein oder ozeanischer Kruste, die im Zuge einer Gebirgsbildung in kontinentales Krustenmaterial eingefaltet wurden. Von diesen Prozessen zeugt die häufige Brekziierung des Gesteins.

8.2 Technische Eigenschaften von Festgesteinen

8.2.1 Festigkeiten

Natürlich gelten dieselben physikalischen und geotechnischen Größen für Locker- und Festgesteine. Auch der Fels hat eine Dichte, eine Porosität oder einen Wassergehalt. Allerdings kommen diese Eigenschaften hier nicht in gleicher Weise zum Tragen. Die Porositäten magmatischer Gesteine beispielsweise gehen in der Regel gegen Null, damit auch die möglichen Wasserge-

halte und ohne Porosität entspricht die Dichte der Festsubstanz der Dichte des Gesteins. Auch Lagerungsdichte und Verdichtbarkeit spielen, von Ausnahmen abgesehen, für Festgesteine daher keine Rolle.

Dafür gewinnt eine andere Gruppe von Eigenschaften an Bedeutung. Die im Kapitel 7.2.1 besprochene Scherfestigkeit ist nur eine Facette im Komplex der Gesteinsfestigkeiten. Sie wird durch die Scherfestigkeitsparameter näher charakterisiert (Abb. 7.15). Für die Festgesteine ist vor allem die Kohäsion bestimend, die den Zusammenhalt des Korngefüges widerspiegelt. Dieser Zusammenhalt kommt in Gestalt weiterer Festigkeiten immer wieder zum Ausdruck. Je nach Versuchsaufbau, abgestimmt auf die Verwendung der Gesteine, können verschiedene

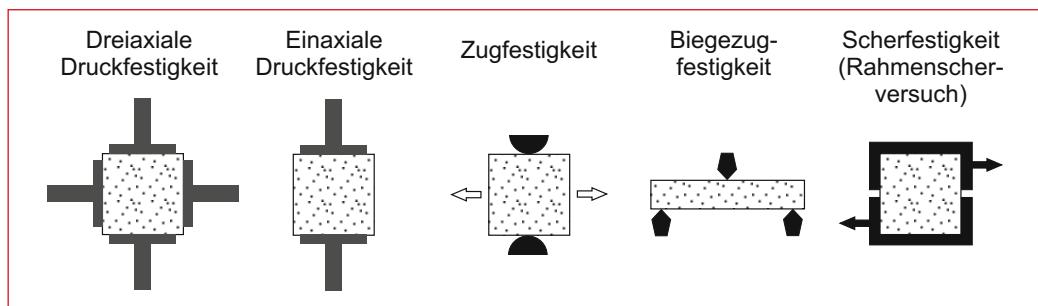


Abb. 8.5 Bestimmungsprinzipien einiger Festigkeiten im Schnitt. (Bei der dreiaxialen Druckfestigkeit kommt ein drittes Stempelpaar in Blickrichtung des Betrachters hinzu). Die Kraftübertragung erfolgt über die schwarzen Bau-teile.

Größen ermittelt werden (Abb. 8.5). Physikalisch betrachtet handelt es sich um Kräfte die das Gestein „aushält“ bevor es zerbricht. Da die Kräfte auf eine bestimmte Fläche bezogen werden, ergibt sich als Maßeinheit die Einheit des Druckes, N/m^2 oder Pa (bzw. N/mm^2 oder MPa).

Die wichtigsten Festigkeiten sind:

- **Dreiaxiale Druckfestigkeit.** Obwohl hier sämtliche Spannungszustände durch Auftrag aller Hauptspannungsrichtungen (Abb. 7.15) simuliert werden können, findet diese Größe seltener Anwendung in der Praxis.
- **Einaxiale Druckfestigkeit** R (DIN EN 1926) oder q_u (DIN 18136). Sie ist die kleine Schwester der dreiaxialen Druckfestigkeit und mit wesentlich weniger Aufwand zu bestimmen. Die Gesteinsprobe (Würfel oder Zylinder) wird dabei lediglich in einer Richtung in die Zange genommen. Da diese Größe einfach zu bestimmen ist, wird sie auch in der Praxis universal angewandt und bildet die Grundlage geotechnischer Gesteinsklassifikationen (Abb. 8.6). Für eine grobe Einordnung in die Gesteinsklassen, kann sie sogar mit Hilfe von Fingernagel, Messer und Hammer bestimmt werden. Die Druckfestigkeit offenbart so ihre Verwandtschaft mit der Härte.
- **Zugfestigkeit.** Durch lineare Kraftübertragung auf den Probenkörper erfolgt eine keilförmige Ausbreitung des Drucks. Die resultierende Zugkraft führt zum Reißen der Probe. Oder einfach ausgedrückt: das Gestein wird gespalten (Spaltzugversuch). Anders als die Druckfestigkeiten, ist die Zugfestigkeit hauptsächlich von der Kornbindung, also der Bin-

dung der Körner untereinander, abhängig (Denken Sie an das „Zerreißen“ von Sand im Gegensatz zu Sandstein!). Die Festigkeit der Körner spielt erst dann eine Rolle, wenn die Kornbindung größer ist als die Kohäsion innerhalb der Einzelkristalle („Zerreißen“ von Quarzit).

- **Biegezugfestigkeit.** Vor allem an Naturstein werden hohe Anforderungen an die Biegezugfestigkeit gestellt. Bestes Beispiel ist vielleicht die Tischplatte aus Granit, die randlich den Tischbeinen (oder einem Rahmen) aufliegt und in der Mitte einer Auflast aus beispielsweise einem Stapel Bücher standhalten soll.

Und zum Vergleich noch die Bestimmung der

- **Scherfestigkeit.** Die Auswertung erfolgt im τ - σ -Diagramm unter Ermittlung der Scherparameter ϕ und c .
 - Triaxialversuch: Hier werden natürlich vorkommende Spannungssituationen an einem zylindrischen Probenkörper nachgestellt. Eine Kraft wird mittels Stempeln auf einen Probekörper gegeben (σ_1). Im Winkel von 90° wirkt eine zweite Kraft rundum auf die Mantelfläche ($\sigma_2 = \sigma_3$). Der Vorteil des Verfahrens besteht unter anderem darin, dass auch verschiedene Porendrücke mit simuliert werden können.
 - Scherversuch (z. B. Rahmenscherversuch): Zwei Teile eines Probenkörpers werden gegeneinander verschoben. Im Gegensatz zum Triaxialversuch kann sich die Scherfläche nicht beliebig ausbilden, sondern ist vorgegeben.

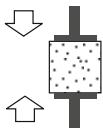
Felsklasse	Labor	Feld	Beispiele							
Druckfestigkeit ist			Boden stark verwitterter Fels verwitterter Fels	Salze	Kreide	Sandstein	Tonstein	Tonschiefer	Dolomit	Kalkstein
außerordentlich gering	< 1 MPa									
sehr gering	1 - 5 MPa									
gering	5 - 25 MPa									
mäßig hoch	25 - 50 MPa									
hoch	50 - 100 MPa									
sehr hoch	100 - 250 MPa									
außerordentlich hoch	> 250 MPa									

Abb. 8.6 Nach DIN EN ISO 14689-1 lassen sich Gesteine aufgrund ihrer einaxialen Druckfestigkeit klassifizieren. Mit einfachen Hilfsmitteln ist die Zuordnung zu den Klassen im Gelände möglich. Druckfestigkeiten einiger Gesteine nach PRINZ & STRAUSS 2006 und MÜLLER 1984.

Ist das Gestein anisotrop, das heißt die physikalischen Eigenschaften variieren mit der Raumrichtung, dann hängt die Festigkeit des Gesteins von der Orientierung der Anisotropie im Experiment ab. Schichtungen und Schieferungen können das schnelle Ende eines Probenkörpers im Druckversuch bedeuten. Lastet aber beispielsweise der ein-

axiale Druck senkrecht auf einem Schichtpaket, verhält sich die Druckfestigkeit wie im isotropen Gestein oder ist sogar noch höher. Wird die Anisotropie des Gesteins durch Trennflächen gebildet, sind keine Festigkeitsmessungen am Fels möglich. Alle technischen Eigenschaften werden dann vom Trennflächengefüge dominiert.

8.2.2 Trennflächengefüge

Arten von Trennflächen

Ob als Baugrund, als Grundwasserleiter oder als Werkstein, die Eignung eines Festgesteinsteins steht und fällt mit dem Trennflächengefüge. Viel mehr als die geologische Gesteinsart bestimmen die Flächen, an denen das Gestein zerbrochen ist, die Eigenschaften des Gebirges.

Letztendlich ist es dem Ingenieur zwar egal auf welche Art die Fläche entstanden ist, die seine Böschung zum Absturz gebracht hat, aber die Entstehungsweise einer Fläche bringt auch eine Anzahl von Eigenschaften mit sich, die die Stabilität des Gebirges maßgeblich beeinflussen können. Und deren Kenntnis kann helfen den Felssturz vorherzusagen oder gar zu verhindern.

Solche geologischen Flächen sind (Abb. 8.7):

- die **Schichtung**. Sie stellt ein Anlagerungsgefüge dar, das mit der Ablagerung der Sedimente selbst entsteht. Schichtung ist Materialwechsel und je abrupter ein Wechsel in der Sedimentation war, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine ausgeprägte Schichtfuge gebildet hat. Meist ist der Materialunterschied in den einzelnen Schichtpaketen aber gering und die Schichtung bildet keine aktiven Trennflächen.
- die **Schieferung**. Eine echte Schieferung (Kapitel 6.2) entsteht durch Ausrichtung bereits existierender Schichtsilikate (Tone oder Glimmer) oder durch gerichtetes Wachstum dieser Minerale. Der dahinter stehende tektonische Prozess führt zu raumgreifenden Veränderungen im Gebirge und eine Schieferung ist über ein großes Gebiet relativ einheitlich ausgebildet. Wie gut die Schieferung ausgeprägt ist, hängt vor allem vom Anteil der Schichtsilikate ab.
- die **Klüfte**. Durch Spannungen im Gebirge entstehen unter spröden Bedingungen Brüche. Verschiebt sich das Gestein gegeneinander nicht, handelt es sich um Klüfte. Sie sind meist weitständiger als Schieferungsflächen und im Gegensatz zu diesen im Raum unterschiedlich verteilt. Häufig ist das Gebirge von einem System aus zwei oder drei Kluftflächenscharen durchzogen.

• die **Störungen** oder **Verwerfungen**. Ihre Entstehung ist ähnlich der von Klüften. Die gegenüberliegenden Gesteinspartien sind jedoch versetzt. Im Gegensatz zu allen zuvor genannten Flächen sind Störungen normalerweise Einzelgänger oder kommen in weitständigen Scharen vor. Aufgrund der Reibung beim Versatz sind Störungen meist an einer charakteristischen Striemung zu erkennen, dem so genannten Harnisch. Ist der Versatz hinreichend groß, führt die Reibung zur Zerstörung und zum „Aufmahlen“ des Gesteins beiderseits der Störung. Die dabei entstehenden feinkörnigen Kataklastite, die auch neu gebildete Tonminerale enthalten können, schmieren bei Gegenwart von Wasser solche Trennflächen und machen sie zum Alptraum des Ingenieurgeologen.

Um sichere Vorhersagen für das Gebirgsverhalten zu treffen, muss das Trennflächengefüge akribisch dokumentiert werden, wobei eine Vielzahl von Kriterien zu beachten ist. Rauhigkeit, Öffnungsweite, Abstände, Wasserführung und Orientierung der Trennflächen sind nur einige davon.

Häufigkeit der Trennflächen

Die Häufigkeit der Trennflächen kann auf verschiedene Art und Weise angegeben werden – als Kluftabstand, als Kluftvolumen (unter Beachtung der Öffnungsweite der Trennflächen) oder als Klüftigkeitsziffer (Abb. 8.8). Hier wird „Trennfläche“ oft gleich „Kluft“ gesetzt, da die Klüfte meist das Gros der Trennflächen ausmachen.

Das ideelle Spektrum reicht dabei von Null bis unendlich – vom nicht geklüfteten Gebirge, dem **Monolith** – den es real nicht gibt, bis zum völlig zerklüfteten Gestein, dem **Kataklasit**.

Ändert sich die Häufigkeit der Trennflächen im Gebirge stark, dann bietet sich für eine Quantifizierung die Klüftigkeitsziffer an. Hier werden pro „laufendem Meter“ die Trennflächen gezählt. So ist das Gebirge entlang einer Böschung, einer Tunnel- oder Bergwerksstrecke oder sogar in Verlauf einer Bohrung in Abschnitte verschiedener Klüftigkeitsklassen einteilbar.

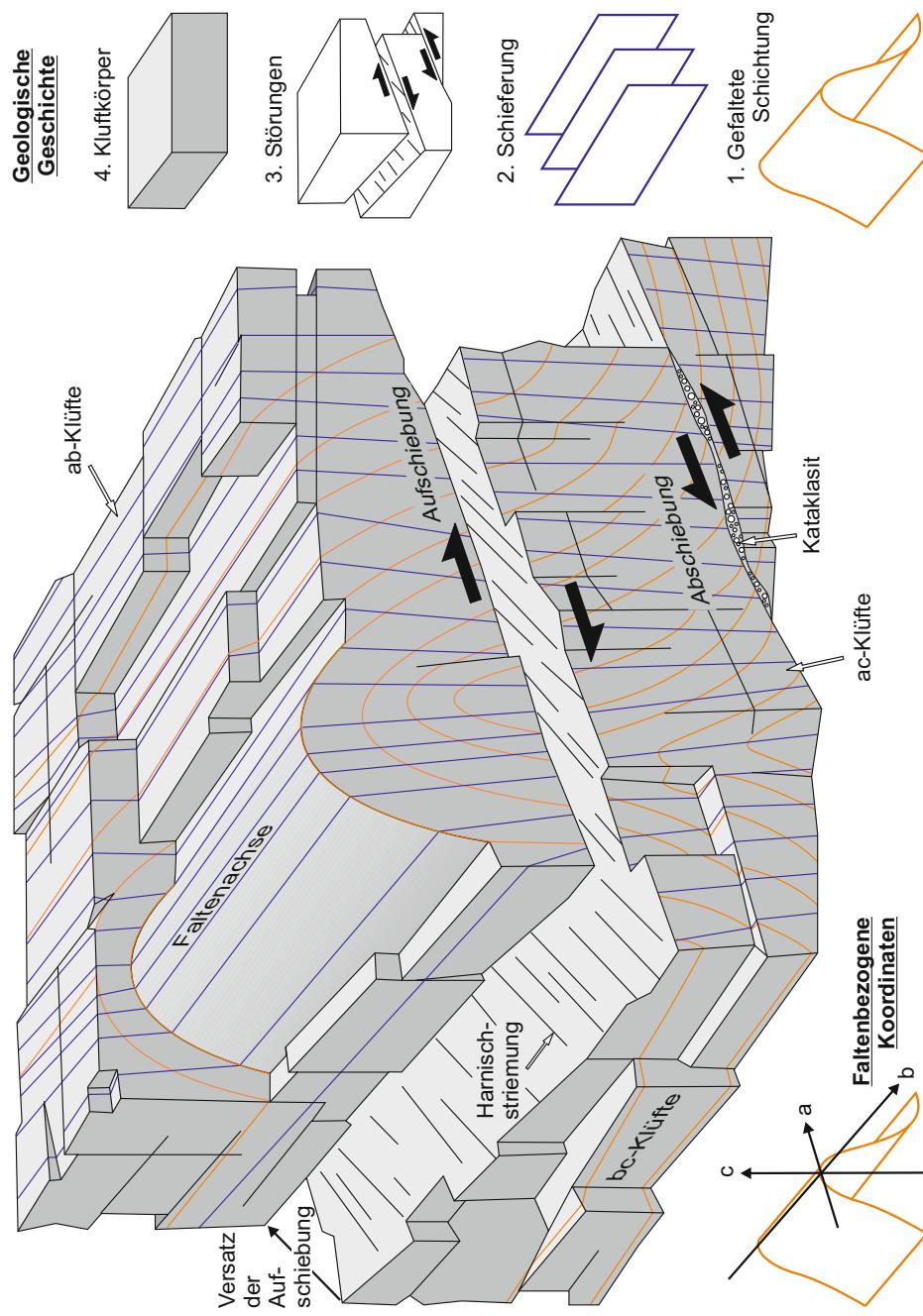


Abb. 8.7 Arten von Trennflächen und ihr Erscheinungsbild im Gelände. Aus den tektonischen Koordinaten (a, b, c), hier bezogen auf die verfaltete Schichtung, lassen sich die bevorzugten Kluftrichtungen benennen.

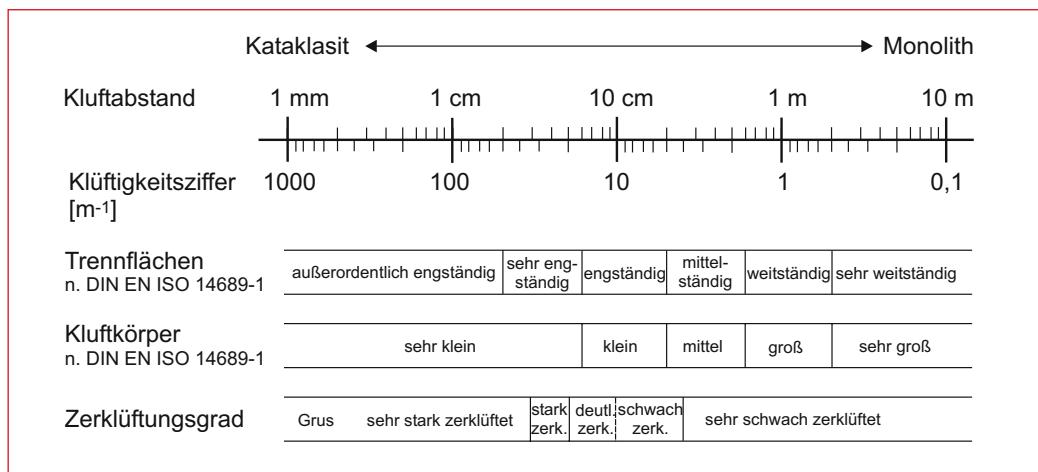


Abb. 8.8 Verschiedene Möglichkeiten, die Häufigkeit von Trennflächen im Gebirge auszudrücken.

Den Grundbaustein des Gebirges bildet der kleinste von Trennflächen umgebene Gesteinsabschnitt. Er wird Kluftkörper genannt und repräsentiert den dreidimensionalen Kluftabstand (Abb. 8.7, 8.8).

Raumlage von Trennflächen

Ist es nun gut oder schlecht, wenn viele Trennflächen im Gebirge vorkommen? Das kommt darauf an. Die Flächen können so orientiert sein, dass sie das Abrutschen des Kluftkörpers zu einer Felsböschung hin begünstigen. Das wäre schlecht. In der Praxis nimmt man in solchen Fällen Verankerungen vor und bringt Fangnetze an. Trennflächen können aber auch so im Raum angeordnet sein, dass das auf ihnen fließende Grundwasser das Reservoir eines Wasserwerkes speist. Das wäre gut.

Abhängig vom Ziel der Untersuchung eines Gesteins, ist es also manchmal notwendig die Raumlage der Trennflächen festzuhalten (Abb. 8.9). Die Himmelsrichtung in die eine Fläche geneigt ist (Fallrichtung) und die Neigung der Fläche, gemessen an der Horizontalen (Fallwinkel), werden mit dem Geologenkompass ermittelt. Die dreidimensionale Visualisierung der Ergebnisse erfolgt in **stereographischer Projektion**. Dazu wird die Trennfläche in eine Halbkugel

gel projiziert und entweder die Schnittlinie der Fläche oder der Berührungsrand der Flächennormale (Senkrechte auf der Fläche) mit der Halbkugel dargestellt. Entsprechend der Häufigkeit der Trennflächen und der Streuung der Lage einer Flächenschar im Raum, ist diese Darstellung statistisch abzusichern. Eine Schwalbe macht noch keinen Sommer und eine Trennfläche noch kein Trennflächengefüge.

Mit etwas Übung lassen sich aus einem solchen **Schmidt'schen Netz** viele technische Ableitungen machen, zum Beispiel dreidimensionale Darstellungen des Kluftkörpers oder Aussagen zur Standsicherheit einer Felsböschung.

Die Abbildung 8.9 zeigt neben zwei Beispielen für Kluftkörper und deren stereographischer Projektion noch eine weitere Variante der Visualisierung des Trennflächengefüges. In der Richtungsrose werden lediglich zweidimensionale Informationen aus der Gefügemessung verarbeitet. Dazu nutzt man die Streichrichtung einer Fläche, gewissermaßen die Schnittlinie der Fläche mit der Horizontalen: Im linken Beispiel streichen die Flächen annähernd Nordwest-Südost, im rechten Nordwest-Südost und Nordost-Südwest. Liegen genügend Messungen vor, dann können diese Streichwerte auf ihre Häufigkeit in bestimmten (Himmelsrichtungs-)Intervallen hin untersucht und als zirkuläres Histogramm dargestellt werden. Die Richtungsrose ist wesentlich einfacher zu interpretieren als die stereographi-

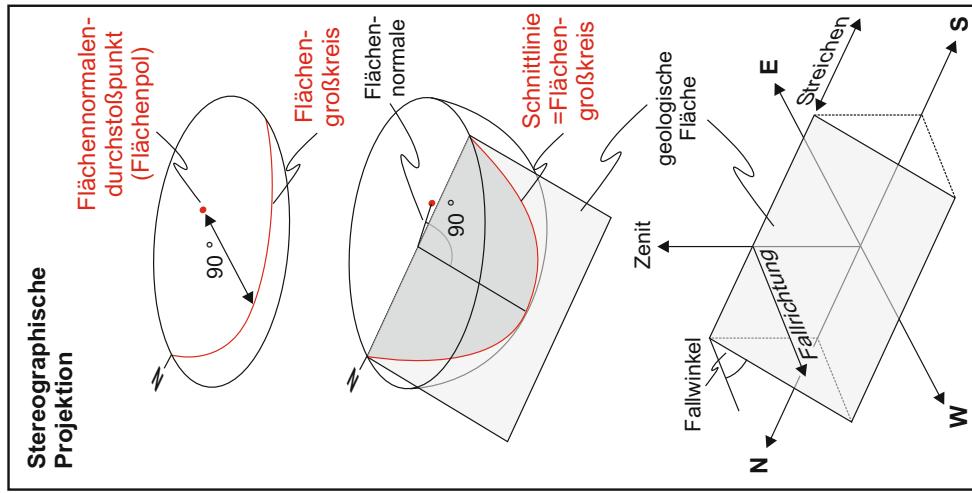
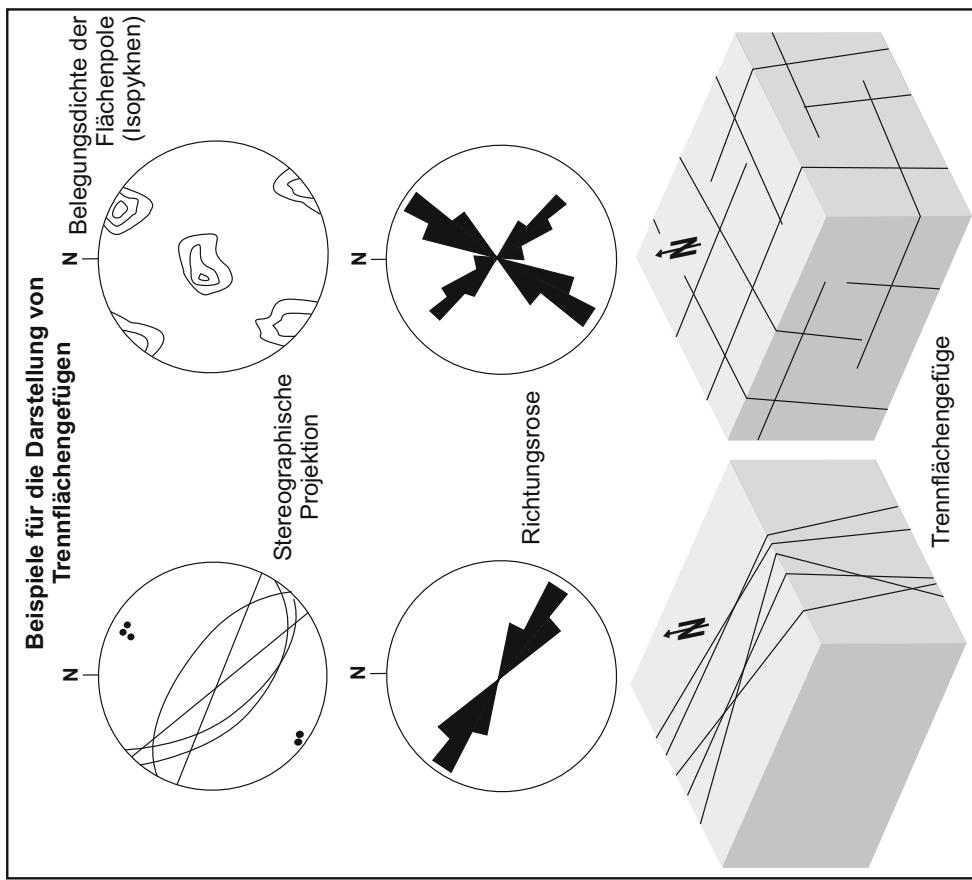


Abb. 8.9 Die Raumlage von Trennflächen. Eine geologische Fläche ist durch die Streich- bzw. die Fallrichtung und den Fallwinkel im Raum orientiert (links unten). Solche Daten werden am besten in stereographischer Projektion dargestellt (links oben). Zwei Beispiele für Flächenscharen zeigen das Prinzip der Darstellung von Flächen in der Richtungsrose und der stereographischen Projektion (rechts). Bei genügender Anzahl von Messdaten, werden die Flächenpole nicht mehr als einzelne Punkte, sondern als ihre Häufigkeit in Form von Isolinien dargestellt.



sche Projektion, hat aber den Nachteil, dass sie die Flächen nicht vollständig räumlich wiedergeben kann. Damit ist die Richtungsrose für geotechnische Aufgabenstellungen meist ungeeignet. Sedimentologen, die die Himmelsrichtung geologischer Sachverhalte im Schichtenverband untersuchen (eingeregelte Fossilien oder Schrägschichtungslamellen), greifen jedoch gern auf diese Darstellung zurück.

8.3 Hydrogeologische Eigenschaften von Festgesteinen

Wie im Verlauf von Kapitel 8 sicher klar wurde, ist das Trennflächengefüge für den Fels das, was für den Boden das Korngrößenspektrum ist. Das gilt insbesondere für die hydrogeologischen Eigenschaften.

Aus der Sieblinie des Lockergesteins lassen sich die Porosität des Bodens und daraus auch der Durchlässigkeitsbeiwert ableiten. Da dem Festgestein eine Porosität weitestgehend fehlt, wird der Grundwassertransport hier anders realisiert, nämlich über das Trennflächengefüge. Man spricht daher auch vom **Kluftwasserleiter** im Gegensatz zum Porenwasserleiter. Genau genommen ist also gar nicht das Gestein das Transportmedium für Wasser, sondern das Gebirge. Zwei Ausnahmen fallen aus dieser Regel heraus.

Erstens verhalten sich Sandsteine und Konglomerate, wenn ihr Porenvolumen durch die Zementation nicht allzu sehr vermindert worden

ist, wie ihre unverfestigten Pendants. Man könnte also einen Sandstein „zerkrümeln“, eine Siebkurve erstellen und daraus die Durchlässigkeit (k_f -Wert) des Gesteins bestimmen. Die zweite Ausnahme bilden stärker lösliche Gesteine, wie Kalkstein und Gips. In ihnen treten Karsthohlräume auf, die unter Umständen den Transport gewaltiger Mengen von Grundwasser zulassen und manchmal oberirdischen Abflüssen in nichts nachstehen. Solche Wasserwegsamkeiten sind unvorhersehbar und nur mithilfe von geophysikalischen Messungen und Tracerversuchen, bei denen der Grundwasserstrom durch Zugabe eines Markierungsmittels verfolgt wird, zu erkunden.

Der Regelfall „Kluftwasserleiter“ wird dagegen über die Eigenschaften des Trennflächengefüges untersucht. Es sind vor allem vier Kriterien, die die Grundwasserleitfähigkeit des Gebirges ausmachen:

- Trennflächenabstand (Klüftigkeitsziffer usw.)
- Durchtrennungsgrad der Trennflächen (ähnlich dem Problem Porosität/Permeabilität beim Boden)
- Rauhigkeit der Trennflächen (laminares oder turbulentes Fließen)
- Öffnungsweite der Trennflächen (Kluftweite).

Aus diesen vier Punkten ergibt sich ein Kluftvolumen, das mehr oder weniger stark untereinander in Verbindung steht und Ausdruck der potenziellen Wasserdurchlässigkeit ist. In welchen Größenordnungen die k_f -Werte zu erwarten sind, zeigt die Übersicht in Abbildung 8.10.

8.4 Bohren in Festgesteinen

Bohrverfahren

Der große Unterschied zum Bohren in Lockergesteinen ist die Tatsache, dass das Gestein zunächst zerstört, also sein Kornverband gelöst, werden muss. Aus diesem Zwang heraus ergeben sich fast alle anderen Randbedingungen der Bohrdurchführung:

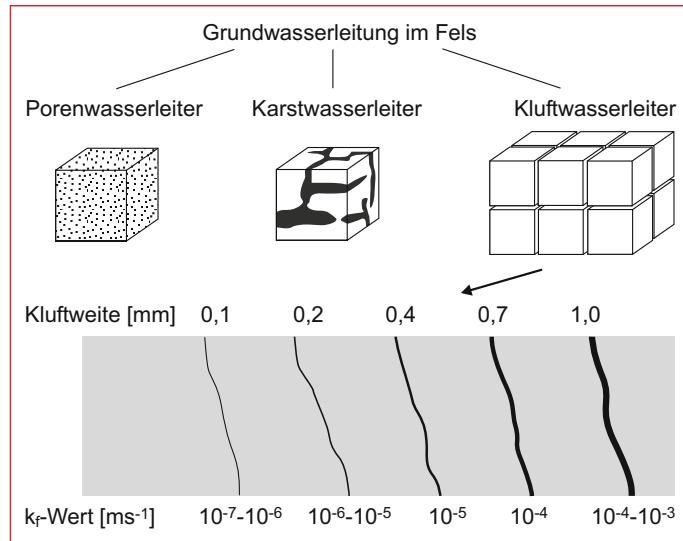


Abb. 8.10 Grundwasserleitung im Festgestein. Dazu Beispiele für Durchlässigkeitsbeiwerte bei Kluftabstand von einem Meter in Abhängigkeit von der Kluftweite (nach WITTKE 1990). Die Kluftweite ist der Anschaulichkeit halber im Originalmaßstab dargestellt.

- höhere Ansprüche an das Bohrwerkzeug, was Härte und Verschleiß angeht
- Spülung wegen höherer Reibung und Wärmeerzeugung bis auf wenige Ausnahmen Pflicht
- notwendige Kraftübertragung nur durch drehende Bohrverfahren möglich.

Das breite Spektrum der Bohrverfahren, das bei den Böden Anwendung findet, schrumpft so auf ein Minimum. Unterschiede bestehen lediglich in der Auswahl der Bohrwerkzeuge und hinsichtlich der gewünschten Probenahmeprozeduren.

Das maßgebende Kriterium für die Planung einer Bohrung im Festgestein ist die Frage, ob Bohrkerne gewonnen werden sollen oder das Gestein durch den Bohrmeißel völlig zerstört werden darf. Bohrkerne zu gewinnen ist aufwendiger, hat aber den Vorteil, dass das erbohrte Gestein geologisch besser untersucht werden kann. Aussagen zum Trennflächengefüge beispielsweise, sind beim Fördern von Bohrklein nicht möglich. Es hängt also von der Aufgabenstellung ab, ob gekernt oder nicht gekernt gebohrt wird. Den technologischen Unterschied zwischen beiden Verfahren verdeutlichen die in Abbildung 8.11 gezeigten Bohrwerkzeuge.

Bohrbarkeit von Festgestein

Ist die Auswahl des Bohrverfahrens für Böden von der Korngröße und damit der Bindigkeit sowie von der Wasserführung des Lockergesteins abhängig, dann hängt sie hier von der Festigkeit des Felses ab. Dahinter stecken die Kornbindung, die ja aufgebrochen werden muss, und die Härte der einzelnen Mineralkörper selbst. Leider ist die Korrelation zwischen Gesteinsart und Bohrbarkeit nicht ganz einfach herzustellen, was an weiteren Eigenschaften des Fels liegt (Benennungskriterien für Fels in Abschnitt 8.1). Die Festigkeitsunterschiede zwischen verwittertem und unverwittertem Festgestein zum Beispiel sind gravierend, wie Abbildung 8.6 zeigt. Aber können wir von vornherein sagen, wie verwittert der Fels im Untergrund ist? Natürlich nicht. Die einaxiale Druckfestigkeit oder die Härte der zu erwartenden Minerale – hier ist vor allem der Quarzgehalt ausschlaggebend – geben aber eine Vorstellung davon was den Bohrmeister erwartet.

Es sind vielfältige Überlegungen angestellt worden, wie die verschiedenen technischen Gesteinseigenschaften in Bohrbarkeitsskalen umzusetzen sind. Einige davon werden zusammen mit bohrrelevanten Gesteinseigenschaften in der Abbildung 8.12 gelistet:



Abb. 8.11 Bohrwerkzeuge zum Bohren im Fels, rechts mit und links ohne Kerngewinn. Links oben: Kreuzmeißel. Links unten: Rollenmeißel. Rechts zwei Beispiele für Bohrkronen, die bei Rotation den Bohrkern (mit im Bild) aus dem Gestein fräsen.

- Dichte – Masse des Gesteins pro Gesamtvolume (= Rohdichte); nach RÖSLER & LANGE 1969,
- Druckfestigkeit – Festigkeit des Gesteins bei (einaxialer) senkrechter Belastung; nach MÜLLER 1991,
- Gesteinsritzhärte – Analog zur Mohs-Ritzhärte der Minerale aufgestellte Skala (1 bis 10) zur Klassifikation der Gesteine hinsichtlich ihrer Reaktion auf Ritzen; härtestes Material = 10; nach DIN 4022 und PRINZ & STRAUSS 2006,
- Gesteinsfestigkeit – Kennziffer für Formänderungsarbeit beim Bruch (keine Druckfestigkeit!); Maß für Gewinnbarkeit beim Bohren; härtestes Material = I; nach PROTODJAKONOV 1961,
- Lösbareit – Einteilung auf Skala zwischen 1 und 100 bei Zugrundelegung des Metallverbrauchs an Bohr-, Gewinnungs- und Vortriebsmaschinen; nach LOCKER 1967,
- Abriebfestigkeit – Volumen des Gesteinsabriebs beim Schleifen, bezogen auf 50 cm^2 ; nach MÜLLER 1991,
- Daten aus russischer Literatur; nach AUTORENKOLOLETTIV 1976:
 - Gesteinsklassifikation nach Plastizitätskoeffizient und Härte in N mm^{-2} ,
 - Abrasivitätswert – Metallstab wird in bestimmter Zeit, mit bestimmter Drehzahl und Belastung auf Probe gedreht, Masseverlust wird in mg gemessen,

- Bohrbarkeiten für verschiedene Bohrverfahren – je höher die Ziffer, desto schlechter bohrbar ist das Gestein.

8.5 Verwendung von Festgesteinen

8.5.1 Brecherprodukte

Festgesteine werden meist im Festgesteinstagebau, dem Steinbruch, abgebaut. Hier entscheidet sich bereits die künftige Nutzung. Wird gesprengt, Haufwerk gebaggert und alles zur Brecheranlage gefahren oder wird der Fels „schonend“ durch Abspalten oder Heraussägen gewonnen?

Mit dem Brechen des Festgestein wird wieder ein Lockergestein erzeugt, das auch in ähnlichen Branchen wie die Böden Anwendung findet. Genau wie Lockergesteine, werden die Brecherprodukte gesiebt und nach ihrer Korngröße klassifiziert. Man unterscheidet:

- Brechsand ($0\text{--}2 \text{ mm}$),
- Splitt ($2\text{--}32 \text{ mm}$) und,
- Schotter ($> 32 \text{ mm}$).

Der wichtigste Unterschied zum ungebrochenen Korn (Sand und Kies) ist die eckige, rauhe und



	Dichte [g/cm ³]	Druckfestigkeit [MPa]	Gesteinshärte [1 - 10]	Gesteinsfestigkeit [X - I]	Lösbarkeit [100 - 0]	Abriebsfestigkeit [cm ³ / 50 cm ²]	Klasse n. Plastizitätskoeff. [1 - 12]	Abrasivitätswert [mg]	Bohrbarkeit drehend [I - XII]	Bohrbarkeit Schlag [I - VII]	Bohrbarkeit Schnecke [I - IV]
Lockergesteine	Sand 1,4 - 2,1 Ton 1,3 - 2,6			VIII - IX VII	0,5		1-2 2-3	5 - 10	1 - III II - III	I - IV II - V	I - IV II - IV
Sedimentgesteine	Sandstein 1,9 - 2,9 Tonstein 1,6 - 2,7 Tonschiefer 1,9 - 2,9 sandiger Tonschiefer 2,0 - 2,9 Kalkstein 2,4 - 2,9 Dolomitstein 2,4 - 2,9 Steinsalz 2,0 - 2,2 Gips 2,3 - 2,6 Anhydrit 2,3 - 2,9	50 - 120	3 - 6 3 - 5 V - VI V - VI 3 - 4 4 3 3 4 - 5	III - IV VI V - VI V - VI II - VI III - IV VI VI VII	55 9 22 18 22 2 20 21	7 - 30 20 - 100 20 - 100 4 - 7 4	3-8 3 4 4 4-7 7	11 - 45 5 - 10 4 < 5 < 5 V III - V II IV	II - VI IV - V V - VI IV - VI VI IV	II - VI IV - V V - VI VI IV	I - IV II - V
Magmatische Gesteine	Granit 2,3 - 2,7 Syenit 2,4 - 2,9 Granodiorit 2,2 - 2,7 Diorit 2,1 - 2,8 Gabbro 2,2 - 3,1 Rhyolith 2,4 - 2,6 Trachyt 2,4 - 2,9 Andesit 2,2 - 2,7 Basalt 2,5 - 3,3	150 - 200	6 - 8 6 - 8 II - III II - III 5 - 6 6 - 8 6 - 7 II 6 - 8	II - III II - III	100 0 - 10 9 9 0 - 10 0 - 10 0 - 10 10	0 - 10 0 - 10 9 9 0 - 10 0 - 10 0 - 10 10	9-10 9 31 - 65 31 - 65 46 - 90 31 - 45 11 - 18 46 - 90 19 - 30	46 - 90 31 - 65 VII - X VII - X	VII - X VII - X	VII - X VII - X	VII - X VII - X
Metamorphe Gesteine	Quarzit 2,4 - 2,7 Marmor 2,6 - 2,8 Gneis 2,5 - 2,8 Phyllit 2,5 - 2,8 Glimmerschiefer 2,5 - 2,8 Amphibolit 2,4 - 3,7 Serpentinit 2,4 - 2,9	150 - 250 100 - 200 100 - 200 100 - 200 100 - 150	7 - 9 6 - 7 6 - 7 75 37 100 - 150	1 - II III - IV 0 - 7 0 - 7 3 - 22	2 - 7 10 - 40 0 - 7 0 - 7 5 - 6 46 - 65	11-12 5 10 10 3 - 22	19 - 65 < 5 31 - 45 31 - 45 46 - 65 IV	XI - XII V X V V - VII IV	XI - XII V VI VI V - VII VI	XI - XII V VI VI V - VII VI	XI - XII V VI VI V - VII VI

Abb. 8.12 Bohrbarkeit von Festgestein. Es wird ersichtlich, dass Bohrbarkeit keine fest definierte Größe ist, sondern vom Betrachter abhängt. Die angegebenen Werte sind lediglich zur Orientierung gedacht und müssen mit Sachverständigkeiten interpretiert werden (Nähere Erläuterungen zur Entstehung der Skalen im Text). Da die Angaben aus sehr unterschiedlicher Literatur stammen und jeder Autor andere Gesteine untersucht hat, klaffen in dieser Übersicht so viele Lücken.



Abb. 8.13 Brecherprodukte. Splitt aus einem Phonolith (links) und Schotter aus einem Granit (rechts).

unregelmäßige Kornform (Abb. 8.13). Die Kanten und Brüche sorgen für eine gewisse Sperrigkeit beim Schütteln, was man sich vor allem beim Gleisschotter zunutze macht. Außerdem sorgt die Rauigkeit der Körner für bessere Haftung von Bindemitteln, als das bei glatten Kieseln der Fall ist.

Weil die Einzelkörner der Brecherprodukte aus Gesteinen bestehen, sind sie meist polymineralisch aufgebaut. Unterschiedliche Mineralausdehnungskoeffizienten führen zu einer geringeren Frost-Tau-Resistenz, aber auch zu einer größeren Zähigkeit als beim spröden Quarzkiesel. Vor- und Nachteile werden in der Praxis aufgewogen, indem Brecherprodukte beispielsweise beim Zuschlag zu Beton oder bei der Beimengung in eine Straßentragschicht mit ungebrochenem Sand und Kies verschnitten werden.

Straßenbau

Wie Sand und Kies, werden Brecherprodukte im Straßenbau in Frostschutz- und Tragschichten eingesetzt, zusätzlich auch in Fahrbahndecken aus Asphalt. Die Lieferkörnungen sind in der TL Min-StB 94 festgelegt. Sie werden durch Nennung der Unter- und Obergrenze in Millimetern angegeben:

- Brechsand-Splitt 0/5
- Splitt 5/11, 11/22, 22/32
- Schotter 32/45, 45/56
- Splitt-Sand-Gemisch 0/32
- Schotter-Splitt-Sand-Gemische 0/45, 0/56.

In der Vorschrift festgelegte Korngrößenanteile unter der jeweiligen Untergrenze (Unterkorn) bzw. über der Obergrenze (Überkorn) sind zulässig.

Typische Anforderungen an das Brechermaterial sind Widerstandsfähigkeit gegen Verwitterung, Frostbeständigkeit, Druckfestigkeit und die Widerstandsfähigkeit gegen Schlag (Abb. 8.14). Bei letzterem wird stellvertretend für eine Gesteinsart die Körnung 35/45 für Schotter und 8/12 für Splitt untersucht. Nach Durchführung eines genormten Schlagversuchs werden die Siebdurchgänge bei 10 mm für Schotter (SD10) bzw. die mittleren Siebdurchgänge von 8, 5, 2, 0,6 und 0,2 mm für Splitt ermittelt (SZ8/12). Da die entsprechenden Werte der einzelnen Gesteinsarten bekannt sind (TL Min-StB 94) spiegelt der Schlagversuch den physischen Zustand, vor allem hinsichtlich Verwitterung, wieder. Die Werte korrespondieren so mit der einaxialen Druckfestigkeit (Abb. 8.6).

Die Mächtigkeit von Frost- und Tragschicht orientiert sich an der späteren Nutzung der Straße und damit am geforderten Verformungsmodul E_{v2} . Mächtigkeiten von Tragschichten aus Brecherprodukten sollen mindestens das Dreifache der oberen Korngrenze betragen: bei einem Schotter 0/45 bedeutet das etwa 15 cm Mächtigkeit. Die Dimensionierung der Schichten ist übrigens unabhängig davon, ob eine Deckschicht aufgetragen werden soll oder nicht (Schotterstraße).

Abb. 8.14 Richtwerte für die Widerstandsfähigkeit einiger Brecherprodukte gegen Schlag. Dabei werden die Werte aus verschiedenen, für Straßen- und Gleisbau üblichen, Schlagversuchen gegenübergestellt und mit der einaxialen Druckfestigkeit verglichen (nach TL Min-StB 94 und LICHTBERGER 2004).

	Widerstandsfähigkeit gegen Schlag [Gew.-%]			Druckfestigkeit [MPa]
				
	SD 10	SZ8/18	LA	
Basalt	7 - 17	9 - 20	8,7 - 9,5	250 - 400
Rhyolith	9 - 22	11 - 23	10,3	180 - 300
Kalkstein	16 - 30	17 - 28	13,7 - 23	80 - 180

Schotterbett für Gleise

Denkt man an Schotter, denkt man an Bahngleise. Damit das Schotterbett den Schwellendruck gleichmäßig an den Untergrund abgeben kann, dabei aber auch die Elastizität der Gleise gewährleistet ist, muss das Bettungsmaterial hohe Druckfestigkeit und hohe Zähigkeit aufweisen. Darüber hinaus sollen die Schwellen stabil liegen und das Bett soll gut luft- und wasserdurchlässig sein, wofür scharfkantige und annähernd würfelförmige Schotter sorgen.

Besonders eignen sich Magmatite, wie Granit oder Basalt, die vor allem in zwei Körnungen verbaut werden (nach LICHTBERGER 2004):

- 25/60 für Hauptgleise und
- 15/30 für Nebengleise (geringere Unfallgefahr bei Rangierarbeiten).

Neben den Prüfungen, die auch im Straßenbau verwendet werden, kennt die Bahn eine Reihe anderer Verfahren, wie zum Beispiel den Los Angeles-Test (LA in Abb. 8.14). Ähnlich wie bei SD10 und SZ8/12 wird der absiebbare Anteil nach Schlagbelastung einer Probe bestimmt. Zehn Kilogramm Probe werden im Stahlzylinder eine halbe Stunde lang mit 33 Umdrehungen pro Minute dem Schlag von Stahlkugeln ausgesetzt. Der Siebdurchgang bei 1,6 mm wird ermittelt. Wie gut die Werte mit anderen Schlagtests und der Druckfestigkeit korrelieren zeigt die Abbildung 8.14.

8.5.2 Werksteine

Werksteine müssen im Gegensatz zu Schotter und Splitt eine trennflächenfreie Mindestgröße haben und kommen unter anderem als

- Mauersteine, Bodenplatten, Pflastersteine, Bordsteine,
- Gestaltungsmittel im Landschaftsbau,
- Grabsteine, Grabmale,
- Wandverkleidungen für innen und außen,
- Bodenbeläge, Fensterbänke, Tür- und Fensterstürze,
- Schleifsteine, Mühlsteine, Maschinenfundamente,
- Kunstgegenstände (Skulpturen, Monamente, Gebäudeverzierungen, Briefbeschwerer usw.)

zum Einsatz (Abb. 8.15). Dabei ist nicht jeder Werkstein natürlicher Herkunft. Kunstwerkstein oder kurz Kunststein wird durch Zugabe verschiedener gebrochener und ungebrochener Zuschläge zu einer Betonmatrix erzeugt (Abb. 8.16). Die edlere aber teurere Variante ist jedoch der Naturwerkstein oder Naturstein.

So vielfältig die Verwendung von Naturstein ist, so reich ist auch das Spektrum technischer Anforderungen an das Gestein. Generell eignet sich jedes Festgestein zu irgendeinem Werkstein-

Abb. 8.15 Naturwerkstein im Alltag. a) Historische Grabmale. Vor allem saurer Regen hat dem Sandstein bereits stark zugesetzt. Daher müssen Sandsteine im Außenbereich, wie das Renaissanceportal von 1500 (b), regelmäßig restauriert werden. c) Die wahrscheinlich älteste Anwendung von Naturstein: Mauersteine. Historische Stadtmauer aus Gneis. Pflastersteine aus Quarzit (d) und Gehwegplatten und Bordsteine aus Granodiorit (e). f) Besonders Kreditinstitute schmücken sich innen und außen mit Naturstein - hier mit Sandstein, oben, und Larvikit (BLUE PEARL, Monzonit), unten. g) Tür- und Fenstereinfassungen aus Porphyrtuff (rhyolitischer Ignimbrit). h) Manches Badezimmer wird durch die Verwendung von Naturstein zur Rafinesse. Bioklastischer Kalkstein (DAINO-MARMO DI OROSEI).



a b



c d



e



f



g h

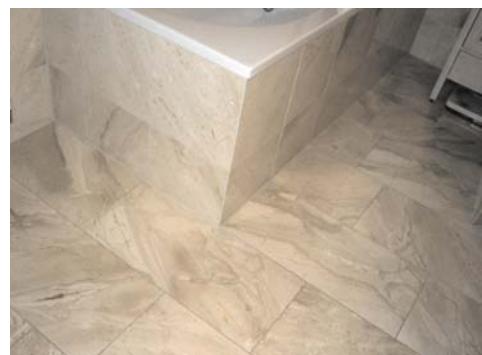




Abb. 8.16 Das einzige künstliche Gestein des Buches: Kunststein aus Beton mit einem Zuschlag verschiedener gebrochener und ungebrochener Mineralstoffe.

zweck. Voraussetzung ist ein Trennflächengefüge, das weitständig genug ist um aus dem Kluftkörper die gewünschten Werksteinmaße zu sägen (Abb. 8.17). Natürlich darf das Gestein nicht verwittert oder angewittert sein. Damit wäre nicht nur ein Verlust an Druckfestigkeit, sondern auch eine Einbuße an ästhetischem Wert durch Farbveränderungen (Rostflecken), verbunden.

Da es sich beim Werkstein meist um ein Baumaterial handelt, werden entsprechende Anforderungen an die physikalischen Eigenschaften gestellt. Im Außenbereich ist es neben der Festigkeit vor allem die Frostbeständigkeit, abhängig von Porosität und mineralischer Zusammensetzung, die zählt. Für Fenster- und Türstürze oder

Tischplatten ist nicht nur eine Druck- sondern vor allem eine hohe Biegezugfestigkeit erforderlich (Abschnitt 8.2.1). Für Treppenstufen und Gehwegplatten wird zudem eine gewisse Abriebfestigkeit verlangt, damit nicht bald der kostbare Naturstein unter den Füßen weggetreten ist. Diese Forderungen liegen im Grenzbereich zu chemischen Voraussetzungen für eine Werksteinnutzung, da gerade leichter lösliche Gesteine, wie Kalkstein, einer schnellen Abnutzung unterliegen. Damit im Zusammenhang steht letztlich auch die Haltbarkeit einer Politur, die bei einem Granit über 500 Mal so hoch ist wie bei einem Alabaster (Gips) und immerhin über 50 Mal so hoch wie bei einem Marmor.



Abb. 8.17 Abbau von Werksteinen lohnt sich nur dort, wo ein weitständiges Trennflächengefüge vorliegt. GRANITO BIANCO MONTORFANO, Granit, hellgrau, Mergozzo/Italien.

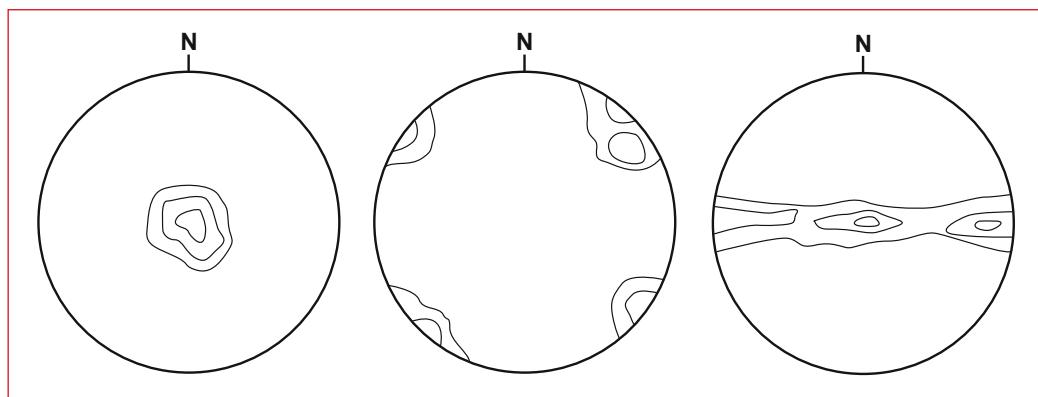


Abb. 8.18 Verschiedene Trennflächengefüge in stereographischer Projektion.

Aufgaben

1. Spüren Sie Naturstein in ihrer Stadt, ihrer Nachbarschaft oder vielleicht sogar in ihrem Haushalt auf! Sprechen sie das Gestein geologisch an! Überlegen Sie in welche Gruppe der Natursteine das Gestein fällt und versuchen Sie seinen Handelsnamen herauszubekommen! Eine Digitalkamera und das Internet helfen weiter.
2. Geben Sie für folgende Kluftabstände die Klüftigkeitsziffer an und charakterisieren Sie Trennflächenabstand und Kluftkörpergröße nach DIN EN ISO 14689-1!
 - a) 5 mm
 - b) 15 cm
 - c) 3 m
3. Beschreiben Sie das Trennflächengefüge der in Abbildung 8.18 dargestellten stereographischen Projektionen!
4. Welchem Lockergestein entspricht die Durchlässigkeit eines Kluftwasserleiters mit einem Meter Kluftabstand und einer Kluftweite von
 - a) 0,1 mm
 - b) 0,5 mm
 - c) 1,2 mm?
5. Ordnen Sie folgende Festgesteine nach ihrer Bohrbarkeit (beginnend mit leicht bohrbar)! Basalt, Quarzit, Tonschiefer, Anhydrit, Andesit

9 Darstellung von Gesteinen

9.1 Zeichen und Farben

Mit der Vergabe des Namens ist für den Geologen oder Geotechniker die Aufnahme eines Gesteins meist nicht beendet. Die Ergebnisse von Bohrungen oder einer Kartierung müssen so aufbereitet werden, dass weitere Anwender davon profitieren können. Vor allem graphische Umsetzungen, wie geologische Karten, Bohrprofile oder geologische Schnitte sind für Entscheidungsträger wichtige Grundlagen bei Bauvorhaben, in der Landschaftsplanung oder im Umweltschutz.

Dazu muss für den abstrakten Gesteinsbegriff eine graphische Entsprechung her. Jeder Gesteinsart werden:

- eine Farbe,
- ein Zeichen (= Schraffur = Signatur) und
- ein Buchstabenkürzel

zugeordnet. Das kann je nach Land, Branche und Tradition auf sehr unterschiedlichem Weg erfolgen. Jedoch existieren gewisse Gepflogenheiten, die auf internationale Vereinbarungen aus dem 19. Jahrhundert und teilweise sogar auf Goethe zurückgehen. Als allgemein gültige Konventionen können angesehen werden:

- Zeichen für Sedimente und Sedimentgesteine sollen möglichst der horizontalen Ablagerung Rechnung tragen (z. B. Striche parallel zu Schichtgrenzen),
- Zeichen für klastische Sedimente spiegeln das Korngefüge wieder (z. B. Punkte für Sand),
- Kalkstein erhält die Mauerwerkssignatur,
- isometrische Zeichen für die regellosen Gefüge der Magmatite (z. B. Kreuze, keine schichtgrenzenparallelen Zeichen),
- wellenförmige Zeichen symbolisieren die Schieferung (Foliation) der metamorphen Gesteine,
- Farben orientieren sich am Original (z. B. gelb für Sand, rötliche Farben für saure Magmatite).

Neben diesen grundlegenden Vereinbarungen bestehen selbstverständlich Normen, die die Vergabe von Zeichen und Farben für Gesteine in Baugrundgutachten (DIN 4023) und bergmännischen Zeichnungen (DIN 21920) in Deutschland regeln. Für die Zeichen der Bodenarten herrscht dabei Gleichmäßigkeit, was für die Farben nicht ganz zutrifft (Abb. 9.1). Da sich die Kurzzeichen der DIN 4023 nach dem Usus der Branche (und der heute nicht mehr gültigen DIN 4022) richten, wird im Anhang der DIN 4023

	Kurzzeichen nach DIN EN ISO 14688	Kurzzeichen nach DIN 4023	Kurzzeichen nach DIN 21920	Zeichen nach DIN 4023 und DIN 21920	Farbe nach DIN 4023	Farbe nach DIN 21920
Kies	Gr	G	Ki			
Sand	Sa	S	Sd			
Schluff	Si	U	Slf			
Ton	Cl	T	T			

Abb. 9.1 Kurzzeichen, Zeichen und Farben für die wichtigsten Bodenarten nach DIN 4023, DIN 21920 und DIN EN ISO 14688.

	DIN 4023 (1984)		DIN 4023 (2006)		DIN 21920	
	Zeichen	Farbe und Kürzel	Zeichen	Farbe und Kürzel	Zeichen	Farbe und Kürzel
Konglomerat	° Z	Gst	○○○○○	Ko	○○○○○	Kgl
Sandstein	Z *	Sst	●●●●●	Sst	●●●●●	Sst
Tonstein	Z -	Tst	— — —	Tst	— — —	Tst
Kalkstein	Z I	Kst		Kst		Kast
Anhydrit	Z ▲	Ahst	▲▲	Ahst	▲▲	A
Quarzit	Z ▼	Q	▼▼▼▼	Q	▼▼▼▼	Qzt
Rhyolith	Z +	Ma	++ + +	Vu	▽▽▽▽	Rhy
Granit	Z +	Ma	Y Y Y	Pl	++ + +	Gr
Basalt	Z +	Ma	++ + +	Vu	▽▽▽▽	Bas
Gabbro	Z +	Ma	Y Y Y	Pl	++ + +	Gab
Metamorphe "Schiefer"	Z ~	Bl	~~~	Meb	~~~	

Abb. 9.2 Zeichen, Kurzzeichen und Farben für einige Felsarten nach DIN 4023 (1984), DIN 4023 (2006) und DIN 21920.

eine Übersetzung in die Lesart der gültigen DIN EN ISO 14688 mitgeliefert.

Zeichen und Farben für Fels können von Vorschrift zu Vorschrift erheblich voneinander abweichen. Für Ingenieurgeologen war lange Zeit jedes Festgestein mit dem Zeichen „Z“ versehen (und so in der DIN 4023 verankert). Die grundlegende Unterscheidung des Baugrundes in locker und fest, war so auf den ersten Blick ersichtlich. Mit der Normenangleichung an europäische Maßstäbe veränderte sich auch die DIN 4023. Weil die „Z-Schreibweise“ in der Praxis sehr verbreitet ist und in der deutschen Literatur bis 2006 die Regel darstellte, werden in Abbildung 9.2 einige Felsarten nach alter und neuer DIN 4023 vorgestellt.

Die in den Abbildungen 9.1 und 9.2 gezeigten graphischen Darstellungen für Gesteine stellen nur Eckpunkte im petrographischen Dschungel dar. Die Normen sehen Variationen dieser Grundformen vor und listen diese teilweise auf. Aber nicht immer muss nach DIN gearbeitet

werden und jeder kann dann die Spielregeln abwandeln: Varietäten von Gesteinen werden durch Variation der Zeichen dargestellt. Allein die Kreuze des Granits lassen sich in nahezu unendlicher Zahl verändern (Abb. 9.3).

Granit	+++ ++ ++	Monzonit	††† †† ††
Granodiorit	++ + ++	Diorit	++ ++ ++
Alkaligranit	+- -+ +-	Quarzdiorit	‡‡‡ ‡‡ ‡‡
Syenit	++ ++ ++	Foidplutonit	‡‡‡ ‡‡ ‡‡
Alkalisyenit	++ ++ ++	Ultrabasit	‡‡‡ ‡‡‡ ‡‡‡

Abb. 9.3 Variationen eines Themas: Das Granitzeichen wird für weitere magmatische Gesteine abgewandelt (nach DIN 21920).

9.2 Graphische Auswertung von Erkundungsergebnissen

Bohrergebnisse

Die Arbeit von Bauingenieuren, Wasserwirtschaftlern, Planern von Erdwärmeanlagen, Bergleuten und Wissenschaftlern basiert zum großen Teil auf den Ergebnissen von Erkundungsbohrungen. Sie alle erwarten, dass diese Ergebnisse gut aufbereitet, leicht abrufbar und übersichtlich dargestellt vorliegen. Der erste Schritt dazu ist die Erstellung eines Schichtenverzeichnisses, das die vielfältigen Merkmale des Bohrkerns abstrahiert. In einer Art Formular werden Gesteinsart und weiterführende Merkmale, wie Wasserführung, Farbe oder Verwitterungszustand, tabellarisch gelistet. Auf Grundlage dieser Abstraktion wird im nächsten Schritt ein Bohrprofil (= Bohrstäbchen) gezeichnet, welches die Bohrung in einem geeigneten Maßstab graphisch wiedergibt. Hier ist die Bohrung zu einer Aneinanderreihung von Zeichen (sowie Farben) und Zusatzsymbolen kondensiert (Abb. 9.4). Eine Anleitung zum Zeichnen von Bohrstäbchen liefert die DIN 4023 und ein reichhaltiges Angebot an Computersoftware konkurriert darum, beim Umsetzen dieser Vorschrift in Schichtenverzeichnisse und Bohrprofile, dem Bearbeiter behilflich zu sein.

Sind mehrere Bohrungen mehr oder weniger linear hintereinander angeordnet, dann lassen sich die geologischen Grenzen der Bohrstäbchen miteinander korrelieren. Es entsteht ein geologischer Schnitt, der zusammen mit der Oberflächengeologie einen ersten räumlichen Eindruck vom Untergrund gibt. Mit solchen Schnitten lassen sich besonders gut die Erkundungsergebnisse im Vorfeld von trassenförmigen Bauvorhaben (Verkehrswege, Dämme) visualisieren.

Aufschlussdokumentation

Um weit reichende Erkenntnisse über den Untergrund zu erlangen, ist es oft sinnvoll natürliche (beispielsweise in Flusstälern) und künstliche

Aufschlüsse (wie Schürfe und Straßenanschnitte) zu dokumentieren. Ähnlich wie beim geologischen Schnitt werden die Lagerungsverhältnisse der Gesteine dann zweidimensional wiedergegeben werden. Der einfachste Weg wäre das Foto. Es hat aber den Nachteil der fehlenden Abstraktion, und wichtige geologische Fakten gehen in der detailgetreuen Wiedergabe einer Fotografie unter.

Im Mittelpunkt steht auch hier die Gesteinsart, wiedergegeben durch Zeichen (Schraffur) und/oder Farbe. Aus der Aufschlussdokumentation kommen jedoch räumliche Informationen hinzu, die die Lage der einzelnen Gesteine zueinander näher beschreiben (Kontakte, Durchdringungen, Übergänge, Fazieswechsel). Auch das Trennflächengefüge kann hier besser untersucht und entsprechend graphisch dargestellt werden als bei der nadelstichartigen Bohrung.

Kartierung

Die Krönung der geologischen Arbeit ist die geologische Karte. In eine geologische Kartierung fließen weitere Erkundungsergebnisse unter anderem aus Luftbildauswertung, Geophysik und Bohrungen ein. Die Karte ist eine maßstäblich verkleinerte und vereinfachte (generalisierte) Wiedergabe der Natur. Im Fall der geologischen Karte bezieht sich die Wiedergabe auf die an der Erdoberfläche anstehenden Gesteine. Meist werden allerdings die oberen ein bis zwei Meter Verwitterungsschicht nicht mit dargestellt.

Da neben der Geologie auch ein Minimum an Topographie in die geologische Karte gehört, wird sie schnell unübersichtlich und es ist nicht ratsam die Gesteine mithilfe von Schraffuren zu kennzeichnen. Hauptgestaltungsmittel der geologischen Karte ist die Farbe, ergänzt durch Kurzzeichen (Buchstabenkürzel), da weit mehr Menschen an einer Farbschwäche leiden, als die, die es sich selbst eingestehen. Aber aufgepasst! Ein Blick auf die Legende einer solchen Karte verrät, dass meist nicht die Gesteinsarten dargestellt sind. Vor allem Karten kleiner Maßstäbe (große wiedergegebene Fläche) zeigen die zeitliche Einordnung der Gesteine und nicht oder nur zweitrangig die Gesteinsart. Entsprechend anders ist die farbliche Abstufung im Kartenbild, die bei amtlichen Kar-

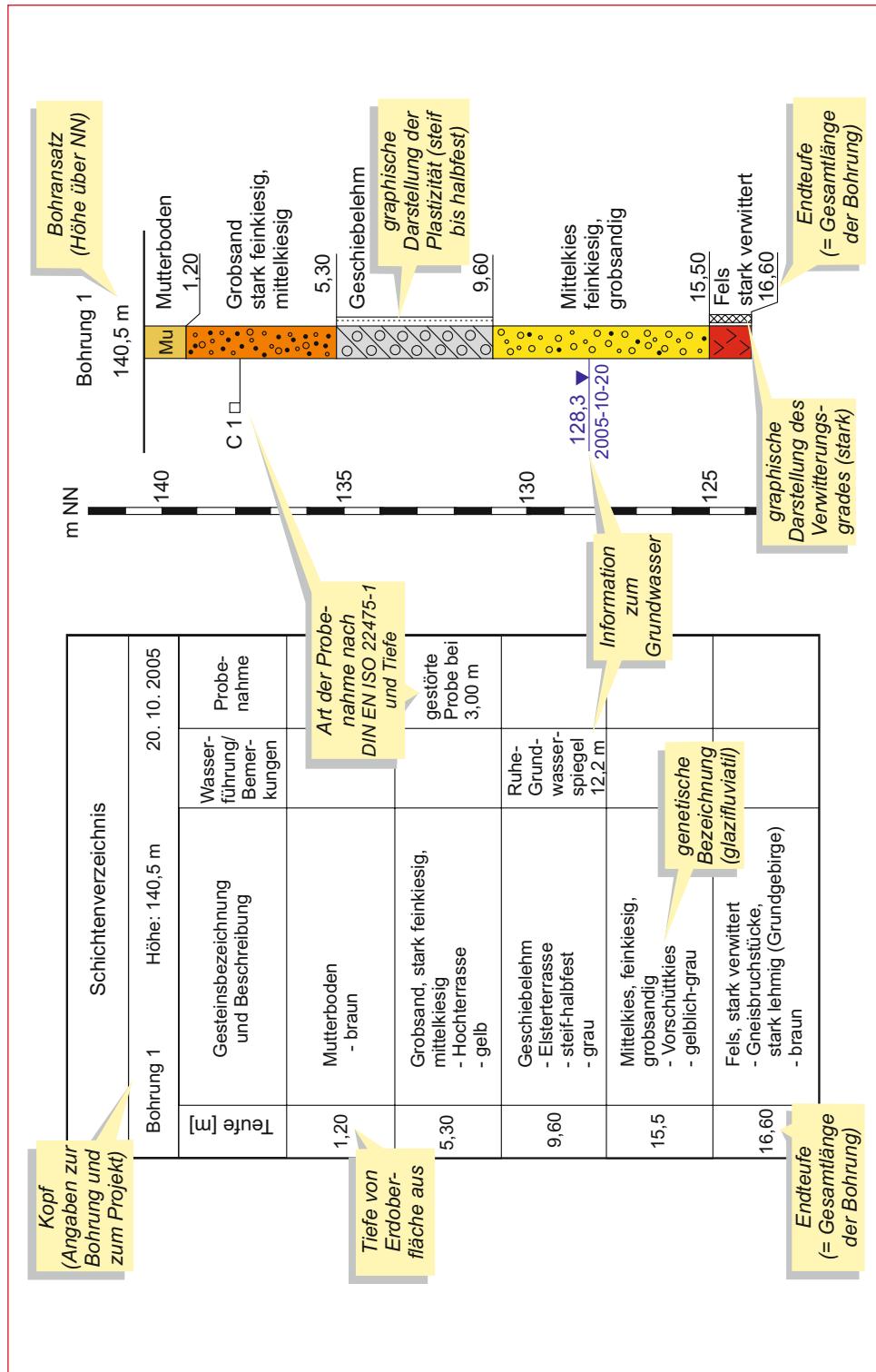


Abb. 9.4 Der Weg vom Bohrkern zum Bohrprofil (rechts, nach DIN 4023) führt über das Schichtenverzeichnis (links, in Anlehnung an DIN 4022).

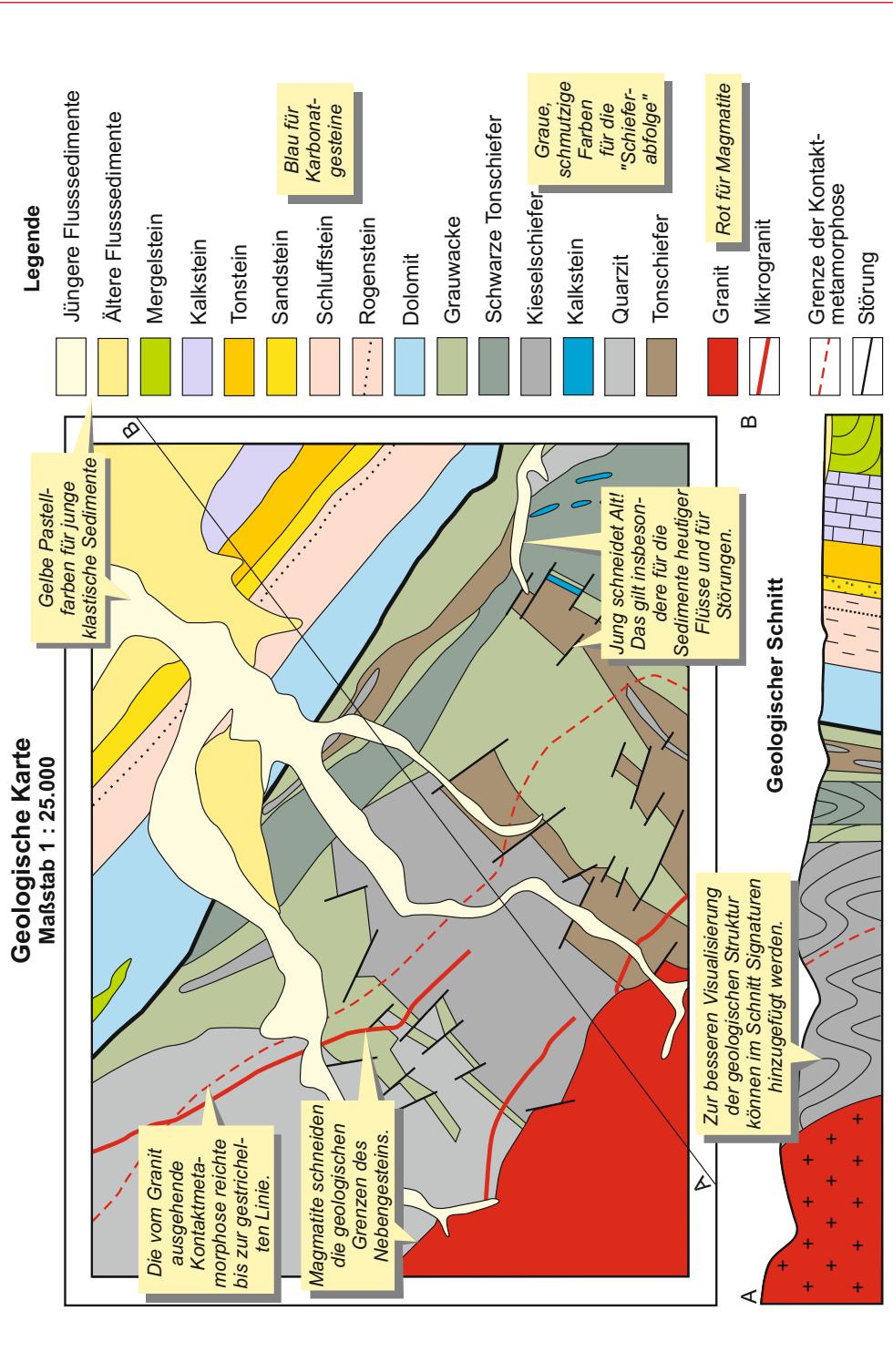


Abb. 9.5 Beispiel für eine geologische Karte und den dazu gehörigen geologischen Schnitt entlang der Schnittspur A - B. Topographische Inhalte wurden weggelassen.

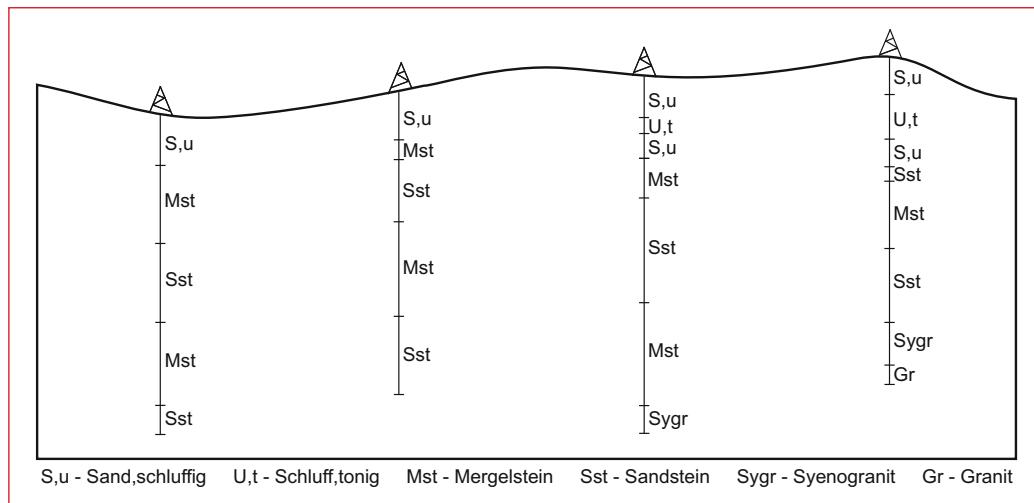


Abb. 9.6 Ergebnisse aus vier, mehr oder weniger hintereinander angeordneten, Bohrungen. Durch sinnvolle Korrelation entsteht ein geologischer Schnitt, wobei verschiedene Interpretationen möglich sind.

ten von den zuständigen Behörden des Bundes und der Länder festgelegt wird. Spezialkartierungen, die auf ein bestimmtes Vorhaben zielen und in großen Maßstäben angefertigt werden (kleine wiedergegebene Fläche) fußen jedoch auf den Gesteinsarten.

In Kombination mit geologischen Schnitten – auch Profile genannt – liefern geologische Karten dreidimensionale Informationen über die Natur zu unseren Füßen (Abb. 9.5).

Aufgaben

1. Zeichnen Sie auf Grundlage des Schichtenverzeichnisses in Tabelle 9.1 ein Bohrstäbchen im Maßstab 1:100 (Bohransatz 344,0 m NN)! Benutzen Sie die Vorgaben der DIN 4023!
2. Konstruieren Sie aus den gegebenen Bohrstäbchen (Abb. 9.6) einen geologischen Schnitt! Geben Sie den Gesteinen selbst gewählte Schraffuren und Farben entsprechend den geologischen Gepflogenheiten!

Tabelle 9.1 Schichtenverzeichnis zur Aufgabe 1.

Teufe [m]	Gestein	Bemerkung	Probenahme
0,8	Mutterboden		
2,1	Grobkies, schwach sandig		Probe 1 1,9 m
3,7	Ton, stark schluffig, schwach sandig	steif	Probe 2 3,5 m
4,5	Mittelsand, grobsandig, schwach kiesig	Ruhe-Grundwasser 4,9 m	
7,2	Verwitterter Sandstein		
8,0	Rhyolith		

10 Lösungen der Aufgaben

Kapitel 4: Sedimente und Sedimentgesteine

2. a) Brekzie, b) Kalksandstein, c) oolithischer Kalkstein (Rogenstein), d) Gips
3. a) DUNHAM: Packstone, FOLK: Oomikrit
b) DUNHAM: Floatstone, FOLK: Intramikrit
c) DUNHAM: Rudstone, FOLK: Biosparit
d) DUNHAM: Boundstone, FOLK: Biolithit

Kapitel 5: Magmatite

2. a) Phonolithischer Tephrit, b) Hornblendit, c) Syenogranit, d) Mikrogabbro
3. a) Trachyt, b) Rhyolith, c) Foidit oder Basanit/Tephrit, d) Basalt, e) Latit oder Trachyt, f) Dacit

Kapitel 6: Metamorphite

1. a) Quarzit, b) Phyllit, c) Knotenschiefer, d) Gneis, e) ist das konglomeratische Gefüge noch zu erkennen: Metakonglomerat, handelt es sich um ein Quarz-Konglomerat: Quarzit, ein Konglomerat aus verschiedenen Komponenten (vor allem mit viel Feldspat): Gneis, f) Eklogit, g) kein Metamorphit sondern Schmelze, h) p-T-Bedingungen nicht möglich
2. a) Eklogit, b) Granulit, c) Phyllit, d) Metakonglomerat, e) Pyroxen-Plagioklas-Granofels, f) Biotit-Quarz-Schiefer, g) Quarzit

Kapitel 7: Lockergesteine

1. Gesteinsansprache nach DIN in Tabelle 10.1
2. Die Zwischenrechnungen und Ergebnisse sind in Tabelle 10.2 aufgeführt.

Tabelle 10.1 Auflösung der Aufgabe 7.1.

DIN EN ISO 14688	DIN 18196	DIN 4220	U
a) Mittelkies, schwach feinkiesig (fgrMGr)	GE	Skelettboden	2
b) Grobsand, stark feinkiesig, schwach mittelsandig (fgrmsaCSa)	SE	Sand	4
c) Sand, kiesig, schluffig (grsiSa)	SÜ	schluffiger Sand	60
d) Schluff, stark sandig (saSi)	UM	sandiger Schluff	3
e) Schluff, tonig (clSi)	UA	lehmiger Schluff	-

Tabelle 10.2 Zwischenrechnungen und Ergebnisse der Aufgabe 7.2.

Probe Nr.	1	2	3
Wassergehalt			
Masse Schale m_B [g]	35	48	39
Masse Schale und Probe feucht m_B+m [g]	165	125	144
Masse Schale und Probe trocken m_B+m_D [g]	143	105	131
Masse Probe trocken m_D [g]	108	57	92
Masse Wasser m_w [g]	22	20	13
Wassergehalt w	0,20	0,35	0,14
Wassergehalt w [%]	20	35	14
Fließgrenze			
Versuch 1: Schlagzahl	18	35	32
Versuch 1: Wassergehalt w_1	0,473	0,344	0,221
Versuch 2: Schlagzahl	35	37	29
Versuch 2: Wassergehalt w_2	0,387	0,332	0,233
Versuch 3: Schlagzahl	21	25	33
Versuch 3: Wassergehalt w_3	0,453	0,356	0,209
Versuch 4: Schlagzahl	27	23	19
Versuch 4: Wassergehalt w_4	0,421	0,361	0,256
Fließgrenze w_L	0,435	0,357	0,240
Ausrollgrenze			
Versuch 1: Wassergehalt w_5	0,201	0,275	0,095
Versuch 2: Wassergehalt w_6	0,197	0,266	0,098
Versuch 3: Wassergehalt w_7	0,207	0,272	0,087
Ausrollgrenze w_P	0,202	0,271	0,093
Plastizitätszahl I_P	0,233	0,086	0,147
Konsistenzzahl I_C	0,991	0,071	0,673
Konsistenz verbal	steif	breiig	weich
Bodenkennzeichnung nach DIN 18196	TM	UM	TL
Bodenklasse nach VOB	C	A	B

3. a) $V_1 = 413,02 \text{ cm}^3$; $V_2 = 2026,83 \text{ cm}^3$; $V_3 = 1824,15 \text{ cm}^3$
- b) $\rho_{D1} = 1,47 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{D2} = 1,62 \text{ g/cm}^3$; $\rho_{D3} = 1,93 \text{ g/cm}^3$
- c) $n_1 = 0,45$; $n_2 = 0,39$; $n_3 = 0,27$
- d) $e_1 = 0,80$; $e_2 = 0,64$; $e_3 = 0,37$
- e) $w_1 = 19,77\%$; $w_2 = 7,81\%$; $w_3 = 13,49\%$
4. a) $n = 0,274$; b) $n = 0,454$; c) $n = 0,171$;
d) $n = 0,296$
5. a) $\Delta s \sim 0,6 \text{ m}$; $T \sim 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$; $k_f = 10^{-5} \text{ m/s}$
b) $k_f = 8,92 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
6. k_f [m/s] nach KRAPPP 1983: a) 10^{-2} bis 10^{-3} , b) 10^{-3} , c) $-$, d) 10^{-6} bis 10^{-7} , e) 10^{-10}
7. Kennkornlinie: $D \sim 8 \text{ mm}$; 80%-Regel:
 $D \sim 10 \text{ mm}$; TERZAGHI: $2,8 \text{ mm} < D_{15} < 12 \text{ mm}$. Als Lieferkorn kommt somit in Frage [mm]: $> 8-16$.

Kapitel 8: Festgesteine

2. Ansprache des Trennflächengefüges nach Tabelle 10.3.
3. a) horizontale Flächenschar (z. B. Schichtung)
b) zwei senkrecht zueinander orientierte vertikale Flächenscharren (Streichen NW-SE und NE-SW)
- c) N-S streichende Trennflächen mit unterschiedlichem Einfallen (eventuell Faltung um N-S streichende Faltenachse).
4. a) Feinsand bis Grobschluff, b) Sand, c) Kies
5. Tonschiefer \geq Anhydrit \geq Andesit $>$ Basalt $>$ Quarzit

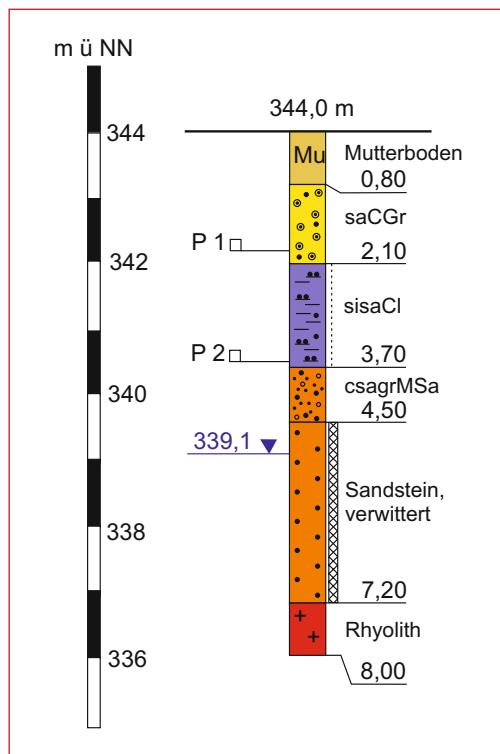
Tabelle 10.3 Auflösung der Aufgabe 8.2.

	Klüftigkeitsziffer [m^{-1}]	Trennflächen n. DIN	Kluftkörper n. DIN
a) 5 mm	200	außerordentlich engständig	sehr klein
b) 15 cm	~ 7	engständig	klein
c) 3 m	~ 0,33	sehr weitständig	sehr groß

Kapitel 9: Darstellung von Gesteinen

- Bohrprofil in Abbildung 10.1. Abkürzungen für die Lockergesteine nach DIN EN ISO 14688-1.
- Abbildung 10.2 liefert lediglich zwei von vielen möglichen Varianten. Das soll jedoch nicht bedeuten, dass dem interpretierenden

Geologen Tür und Tor zur Phantasie geöffnet sind. Dem Bearbeiter stehen normalerweise mehr Informationen als die hier gegebenen spärlichen Bohrergebnisse zur Verfügung. Darüber hinaus wählt der Geologe aus dem möglichen Spektrum von Lösungen das geologisch plausibelste Modell aus. So sind die liegenden Falten im Mergelstein des oberen Schnitts in Abbildung 10.2 aufgrund der bestehenden Verformungseigenschaften eher unrealistisch.

**Abb. 10.1** Auflösung Bohrprofil aus Aufgabe 9.1.

10

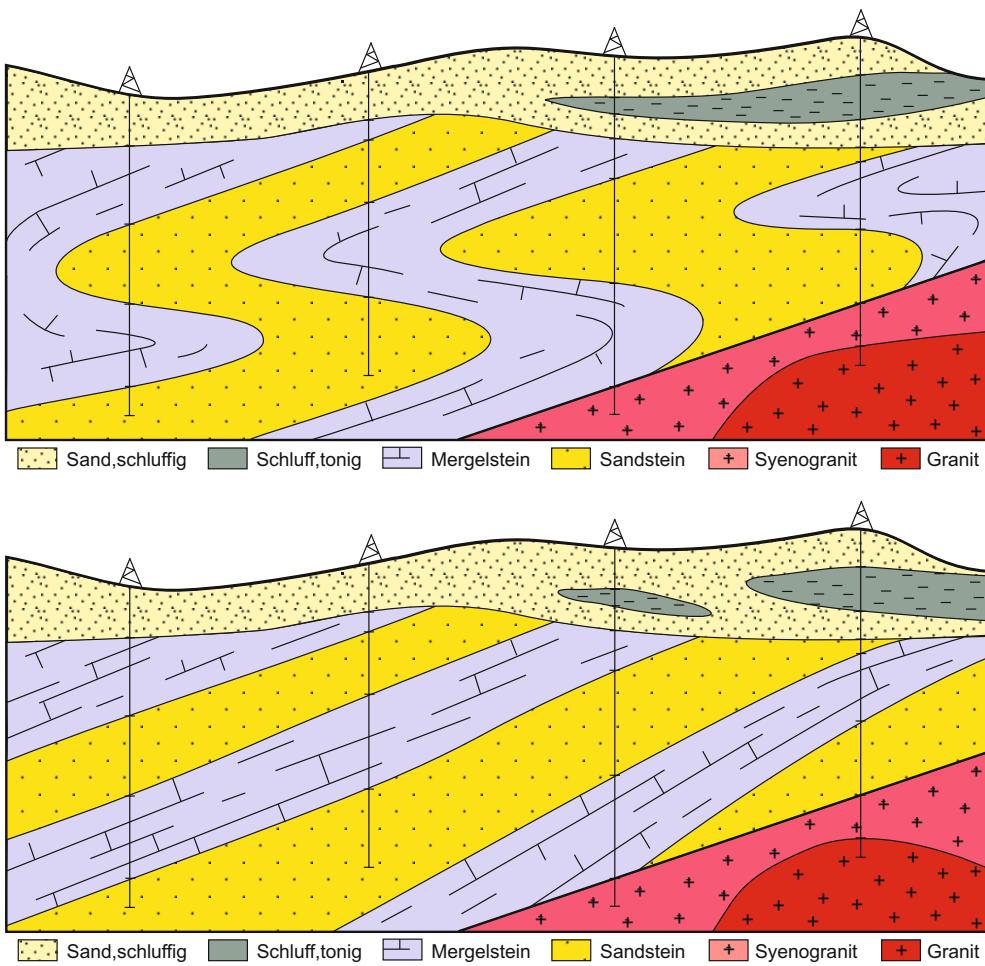


Abb. 10.2 Auflösung geologischer Schnitt aus Aufgabe 9.2.

Literatur

- Atterberg A (1911) Die Plastizität der Tone. Int. Mitt. Bodenkde 1, Verlag für Fachliteratur, Berlin: 10–43
- Autorenkollektiv (1976) Gesteine – Eigenschaften und Bohrbarkeit, Reihe Bohrtechnik. VEB Geologische Forschung und Erkundung Halle
- Beyer W (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilung. Wasserwirtschaft-Wasser-technik, Akademischer Verlag, Berlin: 165–169
- Bildungszentrum für das Steinmetz- und Bildhauerhandwerk Königslutter (1995) Steinmetzpraxis. Ebner
- Faure G (1991) Inorganic Geochemistry. Prentice Hall, Upper Saddle River
- Fettes D, Desmons J (eds 2007) Metamorphic Rocks – A Classification and Glossary Terms. Cambridge University Press
- Floss R (1997) ZTVE – StB 94, Kommentar und Kompendium Erd- und Felsbau. Kirschbaum, Bonn
- Flügel E (2004) Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application. Springer Berlin
- Graßhoff H, Siedek P, Floss R (1982) Handbuch Erd- und Grundbau, Teil 1 Boden und Fels, Gründungen, Stützbauwerke. Werner, Düsseldorf
- Heizmann EPJ, Reiff W (2002) Der Steinheimer Meteorkrater. Pfeil, München
- Henningsen D, Katzung, G (2006) Einführung in die Geologie Deutschlands, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Jubelt R, Schreiter P (1984) Gesteinsbestimmungsbuch. Grundstoffverlag, Leipzig
- Langguth H-R, Voigt R (1980) Hydrogeologische Methoden. Springer
- Le Maitre RW (ed), Streckeisen A, Zanettin B, Le Bas MJ, Bonin B, Bateman P, Bellieni G, Dudek A, Efremova S, Keller J, Lamayre J, Sabine P A, Schmid R, Sørensen H, Wooley A R (2004) Igneous rocks: a classification and glossary of terms. Cambridge University Press, Cambridge
- Lichtberger B (2004) Handbuch Gleis. Tetzlaff, Hamburg
- Locke F (1967) Eine Klassifikation der Gesteine nach dem Hartmetallverbrauch an den Untertage-Vortriebsgewinnungsmaschinen. Felsmechanik u. Ingenieurgeologie Suppl. III, Springer-Verlag, Wien-New York: 11–18
- Markl G (2007) Minerale und Gesteine. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Mojon A (2006) Steinkunde kompakt. Weber AG, Thun
- Müller F (1991) Gesteinskunde. Ebner, Ulm
- Murawski H, Meyer W (2004) Geologisches Wörterbuch. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Pape H (1988) Leitfaden der Gesteinsbestimmung. Enke Stuttgart
- Press F, Siever R (2008) Allgemeine Geologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Prinz H, Strauß R (2006) Abriss der Ingenieurgeologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Protodjakonov MM (1961) In der Sowjetunion angewandte Methoden zur Festigkeitsuntersuchung von Gesteinen. Abh. DAW Berlin, Kl Bergb Hüttenw u Montangeol 2: 62–76
- Richter D, Heindel M (2004) Straßen- und Tiefbau. Teubner, Wiesbaden
- Richwien W, Lesny K (2004) Bodenmechanisches Praktikum. Glückauf GmbH, Essen
- Rösler H-J, Lange H (1969) Angewandte Petrographie. Lehrbrief Bergakademie Freiberg
- Rothe P (2002) Gesteine. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- Schäfer A (2005) Klastische Sedimente. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Schmincke H-U (2004) Volcanism. Springer, Berlin Heidelberg

- Spear F (1993) Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths. Min Soc Am Monograph
- Stosch H-G, Hollerbach R, Eckhardt JD (2001) Übungen zur Mineral- und Gesteinsbestimmung für Studierende der Geologie und Mineralogie. Skripte, Karlsruhe Köln
- Streckeisen A (1976) To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Reviews* 12: 1–33
- Terzaghi K, Peck RB (1948) Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley & Sons, New York
- Tholen M (1997) Arbeitshilfen für den Brunnenbauer. Rudolf Müller, Köln
- Tucker M E (1985) Einführung in die Sedimentpetrologie. Enke, Stuttgart
- Vinx R (2008) Gesteinsbestimmung im Gelände. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Wimmenauer W (1985) Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine. Enke, Stuttgart
- Wittke W (1990) Rock Mechanics – Theory and application with Case Histories. Springer

Zitierte Normen

DIN 1054	2005	Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau
DIN 1055-2 (Entwurf)	2007	Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Bodenkenngrößen
DIN 4020	2003	Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke
DIN 4021 (ungültig)	1990	Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben
DIN 4022 (ungültig)	1987	Benennung und Beschreibung von Boden und Fels
DIN 4023	2006	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Bohrungen und sonstigen direkten Aufschlüssen
DIN 4094-1	2002	Felduntersuchungen, Teil 1: Drucksondierungen
DIN 4094-2	2003	Felduntersuchungen, Teil 2: Bohrlochrammsondierungen
DIN 4220 (Entwurf)	2007	Bodenkundliche Standortbeurteilung – Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten
DIN 4924	1998	Sande und Kiese für den Brunnenbau
DIN 18121-1	1998	Wassergehalt, Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung
DIN 18122-1	1997	Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze
DIN 18122-2	2000	Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen), Teil 2: Bestimmung der Schrumpfgrenze
DIN 18123	1996	Bestimmung der Korngrößenverteilung
DIN 18126	1996	Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung
DIN 18127	1997	Proctorversuch
DIN 18134	2001	Plattendruckversuch
DIN 18136	2003	Einaxialer Druckversuch
DIN 18137-1	1990	Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 1: Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen
DIN 18137-2	1990	Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 2: Triaxialversuch
DIN 18137-3	2002	Bestimmung der Scherfestigkeit, Teil 3: Direkter Scherversuch
DIN 18196	2006	Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke
DIN 19682-2	2007	Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen, Teil 2: Bestimmung der Bodenart
DIN 21920-1	1988	Bergmännisches Rißwerk – Petrographie, Teil 1: Allgemeingültige Zeichen, Sedimente

DIN 21920-2	1996	Bergmännisches Rißwerk – Petrographie, Teil 2: Magmatite
DIN 21920-3	1988	Bergmännisches Rißwerk – Petrographie, Teil 3: Metamorphe und sonstige Gesteinsumbildungen
DIN 21920-4	1996	Bergmännisches Rißwerk – Petrographie, Teil 4: Minerale
DIN 21920-5	1994	Bergmännisches Rißwerk – Petrographie, Teil 5: Steinkohlenbergbau
DIN 21920-7	1996	Bergmännisches Rißwerk – Petrographie, Teil 7: Kali- und Steinsalzbergbau
DIN EN 932-3	2003	Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 3: Durchführung und Terminologie einer vereinfachten petrographischen Beschreibung
DIN EN 1926	2007	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der einachsigen Druckfestigkeit
DIN EN 1936	2007	Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität
DIN EN 12407	2007	Prüfverfahren für Naturstein – Petrographische Prüfung
DIN EN 12440 (Entwurf)	2007	Naturstein – Kriterien für die Bezeichnung
DIN EN 12620	2003	Gesteinskörnungen für Beton
DIN EN 12620/A1 (Entwurf)	2006	Gesteinskörnungen für Beton
DIN EN 12670	2002	Naturstein – Terminologie
DIN EN ISO 14688-1	2003	Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung
DIN EN ISO 14688-2	2004	Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen der Bodenklassifizierung
DIN EN ISO 14689-1	2004	Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels – Teil 1: Benennung und Beschreibung
DIN EN ISO 22475-1	2007	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Probenahmeverfahren und Grundwassermessungen – Teil 1: Technische Grundlagen der Ausführung
DIN EN ISO 22476-1 (Entwurf)	2005	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruk
DIN EN ISO 22476-2	2005	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 2: Rammsondierungen
DIN EN ISO 22476-12 (Entwurf)	2006	Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 12: Drucksondierungen mit mechanischen Messwertaufnahmen
EAU	2004	Empfehlungen des Arbeitskreises „Ufereinfassungen“ der DGQT
TA Siedlungsabfall	1993	Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz
TL Gestein-StB	2004	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (= FGsv 613)
TL Min-StB 94	1994	Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau
ZTVE-StB 94	1997	Zusätzliche Techn. Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (= FGsv 599)

Kleines Lexikon und Register der Gesteinsnamen

A-Typ-Granit Granit, der nicht bei einer Gebirgsbildung (anorogen) entstanden ist, sondern an Intraplattenbereiche und Riftzonen gebunden Granite ist.

Agglomerat Pyroklastisches (vulkanisches Auswurf-) Material, in dem gerundete Pyroklasten vorherrschen.

Alkalibasalt Nephelinführender (SiO_2 -armer) Basalt.

Anatexit Magmatisches Gestein, das durch Aufschmelzung von Krustengestein entstanden ist.

Andesit Intermediärer Vulkanit, v.a. aus Plagioklas, Pyroxen, Hornblende/Biotit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Anorthosit Plutonisches Gestein, das im Wesentlichen aus Plagioklas besteht. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Amphibolit Metamorphes Gestein der Amphibolitfazies mit mindestens 30% Amphibol (Hornblende). Dazu meist Plagioklas.

Anhydrit Chemisches Sedimentgestein aus dem Mineral Anhydrit.

Anthrazit Organisches Sedimentgestein aus inkohlter Pflanzensubstanz mit über 94% Kohlenstoff.

Aplit = Mikrogranit.

Arkose Feldspatreicher Sandstein.

Aschentuff Pyroklastisches (vulkanisches Auswurf-) Material der Korngröße 2 bis 0,06 mm (Sandkorngröße).

Basalt Vulkanit, hauptsächlich aus anorthitreicher Plagioklas und Pyroxen (+ Olivin/Foid oder Quarz) zusammengesetzt. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Basanit Basischer Vulkanit. Früher: Foid und Olivin führender Basalt. Heute definiert im Streckeisen-Diagramm.

Bauxit Al_2O_3 -reiches Rückstandsgestein der Verwitterung im tropischen Klima.

Bimsstein Blasenreiches, meist SiO_2 -reiches Lavagestein.

Blauschiefer (= Glaukophanschiefer) Metamorphit der Blauschieferfazies mit Glaukophan (Amphibol). Subduktionszonanzeiger.

Blöcke Klastisches Sediment der Korngröße über 20 cm.

Braunkohle Organisches Sediment aus inkohlter Pflanzensubstanz mit 70 bis 82% Kohlenstoff.

Brekzie Gestein aus eckigen Bruchstücken mit über 2 mm Korngröße. Kann sedimentär oder tektonisch entstehen.

Charnockit Granit mit Hypersten (Pyroxen).

Dacit Saures vulkanisches Gestein, v.a. aus Quarz und Na-reichem Plagioklas. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Diabas Basalt mit mittelkörnigem, ophitischem (Leisten-) Gefüge. = Dolerit, = Mikrogabbro.

Diorit Intermediärer Plutonit mit Na-reichem Plagioklas. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Dolerit Ganggestein zu Basalt/Gabbro. = Mikrogabbro, = Diabas.

Dolomit Chemisches Sedimentgestein aus dem Mineral Dolomit.

Dunit Ultrabasisches plutonisches Gestein, hauptsächlich aus Olivin bestehend.

Eklogit Hochdruck-metamorphes Gestein der Eklogitfazies vor allem aus Omphacit (Pyroxen) und Granat. Kein Feldspat.

Essexit = Foid-Monzodiorit oder Foid-Monzogabbro nach Streckeisen.

Evaporit Sammelbezeichnung für chemische Sedimentgesteine, die durch Eindampfung des Lösemittels ausgefällt wurden (Steinsalz, Anhydrit, Gips).

Fanglomerat Sedimentgestein mit eckigen oder schwach gerundeten Komponenten der Korngröße über 2 mm.

Felsit Mikrokristalline Gesteine granitischer Zusammensetzung.

Feuerstein Dunkelgraue oder braune kryptokristalliner Quarz-Konkretionen.

- Fleckschiefer** Form des Knotenschiefers.
- Foiddiorit** Basischer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Foidgabbro** Basischer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Foid-Monzodiorit** Basischer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Foid-Monzogabbro** Basischer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Foid-Monzosyenit** Basischer bis Intermediärer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Foidit** Basischer bis ultrabasischer Vulkanit mit über 60% Feldspatvertretern. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Foidolith** Basischer bis ultrabasischer Plutonit mit über 60% Feldspatvertretern. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Foidsyenit** Intermediärer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Fruchtschiefer** Form des Knotenschiefers.
- Gabbro** Basischer Plutonit mit anorthitreichem Plagioklas. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Garbenschiefer** Form des Knotenschiefers.
- Geschiebelehm** Eistransportiertes Sediment ohne Karbonatanteile.
- Geschiebemergel** Eistransportiertes Sediment mit Karbonatanteilen.
- Gips** Chemisches Sedimentgestein aus dem Mineral Gips.
- Glimmerschiefer** Glimmerreicher, gut folierter Metamorphit.
- Glaukophanschiefer** siehe Blauschiefer.
- Gneis** Klassisch: Metamorphes Gestein mit Quarz und mindestens 20% Feldspat. IUGS: Metamorphes Gestein mit Foliation mindestens im 1 cm-Abstand.
- Granit** Plutonisches Gestein, dominiert durch Quarz und Kalifeldspat. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Granitporphyr** Granitisches Ganggestein mit grobem porphyrischem Gefüge.
- Granodiorit** Saures plutonisches Gestein. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Granofels** Metamorphe Gesteine ohne Foliation.
- Granophyr** Porphyrisches Gestein mit schriftgranitischer Verwachsung von Quarz und Kalifeldspat in der Grundmasse.
- Granulit** Im weiteren Sinne, Metamorphite der Granulitfazies ohne OH-führende Minerale (Wasserfreiheit). Zusätzliche Forderung im engeren Sinne: Hauptminerale Quarz und Kalifeldspat.
- Graphophyr** = Granophyr.
- Grauwacke** Schlecht sortiertes klastisches Sedimentgestein mit Komponenten in Sandkorngröße und Anteilen von Feldspat und Gesteinsbruchstücken. Sediment des Kontinentalrands.
- Greisen** Pneumatolytisch veränderter Granit, wobei die Feldspäte umgewandelt sind. Besteht v.a. aus Quarz und Glimmer. Dazu können Topas, Turmalin und Zinn-, Wolfram- und Lithiumerze kommen.
- Grünschiefer** Geschieferter chloritreicher Metamorphit der Grünschieferfazies.
- Harzburgit** Peridotit (Ultrabasischer Plutonit) v.a. aus Orthopyroxen und Olivin.
- Hawaiit** Na-reiche Varietät von Trachybasalt.
- Hornblendit** Ultrabasisches Gestein vorwiegend aus Amphibolen. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Hornfels** Hochtemperatur-Kontaktmetamorphit.
- Hornstein** Sedimentär gebildetes, dichtes, graues bis schwarzes Quarzgestein.
- Hyaloklastit** Verfestigter Pyroklastit mit eckigen Glasfragmenten. Fragmente können entglast sein.
- I-Typ-Granit** Granit der aus aufgeschmolzenem Gestein magmatischer Zusammensetzung erstarrt ist.
- Ignimbrit** Saurer bis intermediärer Tuff aus Kristallen und Gesteinsfragmenten in einer Matrix aus Glasfetzen. Matrix kann zusammen geschmolzen sein.
- Impaktit** Metamorphes Gestein, entstanden durch Teilaufschmelzung bei einem Meteoriteinschlag.
- Itabirit** Metamorpher hämatitreicher Quarzit (Eisenerz).
- Kalkalkalibasalt** Basalt der Orogen- (Gebirgsbildung-)gürtel und Inselbögen.
- Kalkstein** Chemisch-biogenes Sedimentgestein aus Calcit.
- Karbonatit** Plutonisches Gestein mit erheblichem Gehalt an magmatisch gebildeten Karbonatmineralen.
- Kataklasit** In Störungszonen mechanisch zerkleinertes Gestein ohne Rekristallisation.

- Keratophyr** Quarzführender oder albitisierter dichter Vulkanit.
- Kersantit** Plagioklasreicher und foidfreier Lamprophyr.
- Kimberlit** Ultrabasisches Ganggestein mit serpentiniertem Olivin, Phlogopit und Pyroxen.
- Kies** Klastisches Sediment der Korngröße 2 bis 63 mm.
- Kieselgur** Kieselig-organisches Sediment aus Diatomeenskeletten.
- Kieselschiefer** = Radiolarit, aber mit geschiefer-ten Sedimentgesteinen oder schwach meta-morphen Gesteinen vergesellschaftet. Selbst aber nicht geschiefert!
- Knotenschiefer** Kontaktmetamorphes Gestein aus meist tonigem Ausgangsmaterial. Wachstum von Amphibol-, Andalusit- oder Cordieritkristallen.
- Komatiit** Ultrabasischer Vulkanit mit hohem Mg- und niedrigem K/Na-Gehalt.
- Konglomerat** Klastisches Sedimentgestein mit gerundeten Komponenten der Korngröße über 2 mm.
- Konkretion** Meist Knollen ausgefällten und verfestigten Materials in Sedimenten.
- Kristalltuff** Pyroklastisches Gestein. Tuff bei dem der Anteil an Kristallen den Anteil an Glas- und Gesteinssetzen überwiegt.
- Lamproit** Basisches Ganggestein von peralkalini- nem Charakter ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > \text{Al}_2\text{O}_3$).
- Lamprophyr** Gruppe basischer Ganggesteine v. a. mit Biotit/Amphibol.
- Lapillituff** Pyroklastisches Material mit Partikelgrößen von 2 bis 63 mm (Kieskorn).
- Larvikit** Syenit oder Monzonit mit Augit (Pyro-xen) und irisierenden ternären Feldspäten.
- Latit** Intermediärer alkalireicher Vulkanit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Lehm** Klastisches Sediment der Mischung Sand, Schluff, Ton.
- Leptit** Sehr feinkörniger Metamorphit mit Quarz und Feldspat.
- Lherzolith** Ultrabasischer Plutonit (Peridotit) mit Klin- und Orthopyroxenen.
- Liparit** = Rhyolith.
- Löss** Windtransportiertes Sediment mit Kalk. Meist Schluffkorngröße.
- Lösslehm** Kalkfreier Löss.
- Lydit** = Radiolarit.
- Marmor** Metamorphit aus Calcit oder Dolomit.
- Melilitith** Ultrabasischer Vulkanit aus Melilith und Pyroxen.
- Mergel** Klastisch-chemisches Mischsediment aus Ton und Kalk.
- Migmatit** Durch Teilaufschmelzung entstan-denes Übergangsgestein von Metamorphit und Magmatit.
- Mikro-** Vor den Namen eines plutonischen Gesteins gesetzt, bezeichnet der Begriff ein Ganggestein.
- Minette** 1) Kalifeldspatreicher, foidfreier Lamprophyr (basisches Ganggestein); 2) oolithi-sches Eisenerz des unteren Doggers.
- Monzodiorit** Intermediärer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Monzogabbro** Intermediärer Plutonit. Defi-niert im Streckeisen-Diagramm.
- Monzogranit** Granitvarietät mit gleichen Tei- len Alkalifeldspat und Plagioklas. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Monzonit** Intermediärer Plutonit mit gleichen Alkalifeldspat- und Plagioklasanteilen. Defi-niert im Streckeisen-Diagramm.
- Mylonit** In tektonischen Störungszonen me-chanisch zerkleinertes und rekristallisiertes Gestein.
- Nephelinit** Basischer Vulkanit. Varietät des Foidit aus Nephelin und Klinopyroxen.
- Norit** Basischer Plutonit. Gabbrovarietät mit intermediären Plagioklasen und Orthopyro-xen.
- Oolith** Aus konzentrisch aufgebauten und aus flachem bewegtem Wasser ausgefällten Kück-chen (Ooiden) bestehendes chemisch-bioge-nes Sediment.
- Obsidian** Vulkanisches Glas mit Wassergehalt unter 1%.
- Pechstein** Wasserhaltiges vulkanisches Glas.
- Pegmatit** Grob- bis riesenkörnige meist saure Ganggesteine und Plutonite.
- Peridotit** Gruppe ultrabasischer Plutonite aus Olivin und Pyroxen. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Phonolith** Intermediärer alkalireicher Vulka-nit, v. a. aus Alkalifeldspat und Foid. Definiert im Streckeisen-Diagramm.
- Phosphorit** Chemisches oder chemisch-bioge-nes Sedimentgestein aus Phosphat (Apatit) bestehend.

Phyllit Metamorphit der Grünschieferfazies mit viel Tonmineralen und intensiver Schieferung. Der seidenmatte Glanz zeigt die beginnende Helliglimmerbildung an.

Phyllonit Mylonit (Störungsgestein), der durch Glimmerreichtum einem Phyllit ähnelt.

Pikrit Ultrabasisches Vulkan- oder Ganggestein mit meist reichlich Olivin.

Plagiogranit = heller Tonalit.

Polzenit Melilithführender Lamprophyr (Basisches Ganggestein).

Pseudotachylit Durch Reibungswärme in Störungen erzeugter glasiger, meist schwarzer „Mini-Magmatit“.

Pyroklastit Vulkanisches Auswurfmateriel.

Pyroxengranulit Basisches hochmetamorphes Gestein der Granulitfazies.

Pyroxenit Gruppe ultrabasischer Gesteine, v.a. aus Pyroxen. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Quarzit Kompaktes quarzreiches (mind. 80%) Gestein unterschiedlicher Entstehung: diagenetisch stark verfestigter oder metamorpher Sandstein, sowie magmatische Gänge.

Quarzolith Plutonit mit mehr als 90% Quarz. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Radiolarit Kieselig-biogenes Sediment. SiO_2 stammt von Kieselalgen. Häufig schwarz durch organischen Kohlenstoff.

Rapakivigranit Granitvarietät mit großen ovalen von Plagioklas ummantelten Orthoklastkristallen.

Rhyolith Saurer Vulkanit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Rogenstein Oolithischer Kalkstein des Buntsandsteins.

S-Typ-Granit Aus aufgeschmolzenem Sediment hervor gegangener Granit (saurer Plutonit) typisch mit Muskovit, Sillimanit/Disthen und Granat/Cordierit.

Sand Klastisches Sediment der Korngröße 0,06 bis 2 mm.

Sandstein Klastisches Sedimentgestein der Korngröße 0,06 bis 2 mm.

Schalstein = Diabastuff.

Schluff Klastisches Sediment der Korngröße 0,002 bis 0,06 mm.

Schluffstein Klastisches Sedimentgestein der Korngröße 0,002 bis 0,06 mm.

Schreibkreide Wenig verfestigter feiner weißer Kalkstein, aus kalkigem Nannoplankton gebildet.

Schwarzschiefer Geschichtete Tonsteine oder Tonschiefer mit organischem Kohlenstoff, der beim Darüberreiben abfärbt.

Seife Durch gravitative Schweretrennung (Strömungsschatten, Strand oder Ausblasen) angereichertes Sediment von nutzbaren Schwermineralen (z. B. Gold, Zinnstein, Magnetit).

Serpentinit Retrograd metamorphisierter Peridotit (ultrabasischer Plutonit).

Silt = Schluff.

Skarn Metasomatischer Kalkstein.

Spessartit Lamprophyrvarietät (Basisches Ganggestein) mit Hornblende-Einsprenglingen und viel Plagioklas.

Spilit Veränderter Basalt.

Steine Klastisches Sediment der Korngröße 6,3 bis 20 cm.

Steinkohle Organogenes Sedimentgestein aus Pflanzensubstanz mit 82 bis 94 % Kohlenstoff. Schwarz glänzend.

Steinsalz Chemisches Sedimentgestein aus dem Mineral Halit (Kochsalz).

Subalkalibasalt Basalt ohne Nephelin.

Suevit Silikatisches Gestein, entstanden bei einem Meteoriteinschlag (Impakt) mit brekziösem bis vulkanitartigem Gefüge und Glasfetzen.

Syenit Alkalifeldspatreicher intermediärer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Syenogranit Alkalifeldspatreiche Granitvarietät (saurer Plutonit). Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Tephra Unverfestigtes pyroklastisches (vulkanisches Auswurf-) Material.

Tephrit Basischer Vulkanit mit Plagioklas, Foid, Pyroxen und wenig Olivin. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Theralith = Nephelingabbro. Basischer Plutonit mit Foid.

Tholeiit = Tholeiitbasalt. Pyroxen-Basalt.

Tillit Durch Eis transportiertes und abgelagertes (glazigenes) und verfestigtes Sediment.

Ton Klastisches Sediment der Korngröße unter 0,002 mm.

Tonalit Plagioklasreicher saurer Plutonit. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Tonschiefer Toniges stark geschiefertes Sedimentgestein, das zur Metamorphose überleitet bzw. auch schwach metamorph sein kann.

Tonstein Klastisches Sedimentgestein der Korngröße unter 0,002 mm.

Torf Organogenes Sediment aus Pflanzensubstanz, das nur leicht inkohlt ist. Pflanzengewebe deutlich erkennbar.

Trachyandesit Alkalireicher Andesit (intermediärer Vulkanit).

Trachybasalt Alkalireicher Basalt (basischer Vulkanit).

Trachydacit Alkalireicher Dacit (saurer Vulkanit) mit mindestens 20 % Quarz.

Trachyt Alkalifeldspatreicher intermediärer Vulkanit mit weniger als 20% Quarz. Definiert im Streckeisen-Diagramm.

Travertin Aus kalkigem Quellwasser ausgefällter meist poröser Kalkstein.

Troktolith Gabbrovarietät (basischer Plutonit) mit anorthitreichem Plagioklas und Olivin.

Trondhjemit = Plagiogranit. Helle Tonalitvarietät (saurer Plutonit).

Tuff = Aschentuff bzw. verfestigte Tephra allgemein.

Tuffit Mischung aus pyroklastischem (vulkanischem Auswurf-)Material und klastischem Sediment.

Vogesit Basisches Ganggestein. Lamprophyrvarietät mit Alkalifeldspat- und Amphibolvormacht.

Websterit Ultrabasischer Plutonit. Pyroxenitvarietät mit gleichen Anteilen an Klin- und Orthopyroxen.

Wehrlit Ultrabasischer Plutonit. Peridotitvarietät mit Olivin und Klinopyroxen.

Weißstein = Granulit.

Index

A

A-Linie 80
Abrasivitätswert 133, 134
Abriebfestigkeit 133, 134
Abschiebung 128
Absenkungstrichter 105
Agglomerat 121
Albit 9
Alkalifeldspat 42
Alkalifeldspatgranit 42
Alkalifeldspatrhyolith 42
Alkalifeldspatsyenit 42
Alkalifeldspatatrachyt 42
Amethyst 11
Amphibol 9, 11, 42, 43, 45, 62
Amphibolit 54, 63, 65, 66, 121, 134
Amphibolitfazies 62
Andalusit 54, 59
Andesin 9
Andesit 42, 45, 46, 49, 121, 134
Anhydrit 12, 29, 30, 121, 134
Anorthit 9
Anorthosit 42
Anthrazit 33
äolisch 23
Apatit 32
Aplit 45, 48
Aräometer 74
Arkose 27, 28
Asche 37, 39
Asthenosphäre 4
Aufschiebung 128
Augit 9
Ausrollgrenze 81, 82, 83

B

Bankung 22
Basalt 42, 45, 46, 50, 121, 134
Basanit 42, 46
Base Surge 39
basische Magmatite 47, 50
Bentonit 10
Bergkristall 11
Beton 110, 138
Betonzuschlag 110, 111
Bettungsmodul 95
Biegezugfestigkeit 125
Bimsstein 39
Binderschicht 112
bindig 25
biogene Sedimentgesteine 14, 29
Biolithit 31
Biomikrit 31
Biosparit 31
Biotit 9, 11, 45, 46, 61
Blastese 55
Blauschiefert 54, 58, 59
Block-and-ash-flow 39
Blöcke 24, 25, 76
Boden 14, 15, 73, 76, 77
Bodenkunde 85
Bodenskelett 85
Bohrbarkeit 134
Bohrbarkeit von Festgestein 132, 134
Bohrbarkeit von Locker-
gestein 98
Bohrbrunnen 113
Bohrprofil 143
Bohrstäbchen 143
Bohrwerkzeug 132, 133
Bomben 37, 39
Borate 7
Böschungswinkel 92

Boundstone 31
Braunkohle 33
Brecherprodukte 133, 135, 136
Brechsand 133, 135
Brekzie 27
Bruch 8
Brunnenenergiebigkeit 106
Brunnenformel 106
Bytownit 9

C

Calcit 10, 11, 30
Caldera 37
Charnockit 123
chemische Sedimentgesteine 14, 27
Chlorit 62
Coesit 67
Cordierit 59

D

Dacit 42, 45, 46, 48
Darcy-Gesetz 103, 104
Deckenerguss 37
Deckenschicht 112
Deponiebau 114
Diabas 43
Diagenese 21, 62
Dichte 8, 87, 134
Dichte der Festsubstanz 86, 87
Differenzialspannung 55, 91, 94
Differenzialstress 55, 91
Diorit 42, 45, 46, 49, 121, 134
Disthen 54, 66

Dolerit 121
 Dolomit 10, 30, 121
 Dolomitstein 30, 134
 Drehbohrung 99, 100
 dreiaxiale Druckfestigkeit 125
 Druck 53
 Druck-Setzungs-Linie 94, 95
 Druckfestigkeit 125, 134
 Druckkernbohrung 99, 100
 Drucklösung 64
 Drucksetzungslinie 94
 Drucksondierung 96, 97
 Dunit 51
 Durchlässigkeitsbeiwert 103, 104, 109, 114, 132
 Durchsichtigkeit 8
 Dyke 37

E

effektive Scherparameter 93
 einaxiale Druckfestigkeit 125, 136
 Einsprenglinge 38, 44, 46
 Eklogit 54, 62, 63, 66
 Elemente 7
 entwässerbare Porosität 102
 Epidot 62
 Epidotamphibolit 54
 Erdkruste 3
 Erdmantel 3
 Eruptionswolke 37
 Evaporite 28
 exogene Dynamik 21, 22

F

Fallout 39
 Fallrichtung 129, 131
 Fallwinkel 129, 131
 Faltenachse 128
 Fanglomerat 27
 Farbe 8
 Feinboden 85
 feinkörnige Böden 79, 80, 112
 Feldspat 8, 11, 12, 43, 48, 61, 66

Feldspatdreieck 9
 Feldspatvertreter 10
 Fels 14, 15, 119, 120
 Ferromagnetismus 8
 Festgestein 14, 15, 119, 120
 Festigkeit 124, 125
 Feuchtdichte 86, 87
 Feuerstein 121
 Fiamme 39
 Filterfaktor 114
 Filtergeschwindigkeit 103
 Filterkies 113, 114
 Filtermaterial 113
 Filterregel nach Terzaghi 114
 Filterröhre 113
 Filtersand 113, 114
 Flächengroßkreis 131
 Flächennormale 131
 Flächennormalendurchstoßpunkt 131
 Fleckschiefer 58, 60
 Fließgrenze 81, 82, 83
 Fließgrenzengerät 82
 Floatstone 31
 fluviatil 23
 Foid 10, 42, 43, 46
 Foid-Diorit 42, 46
 Foid-Gabbro 42, 46, 50
 Foid-Monzodiorit 42
 Foid-Monzogabbro 42
 Foid-Monzosyenit 42
 Foid-Syenit 42, 46, 50
 Foidit 42, 46, 50
 Foidolith 42, 46, 50
 Foliation 55, 56, 59, 66
 Frostempfindlichkeitsklassen 112
 Frostschutzschicht 111, 112, 135
 Fruchtschiefer 58, 60

G

Gabbro 42, 45, 46, 50, 121, 134
 Ganggestein 36, 38
 Garbenschiefer 60
 Gebirge 119, 120
 gefritteter Sandstein 64

gemischt-körnige Böden 79, 80, 112
 Geologenkompass 129
 geologische Barriere 116
 geologische Karte 143, 145
 geologischer Schnitt 143
 geothermischer Gradient 53
 Geraidlinien-Verfahren 106, 107, 109
 gespanntes Grundwasser 105
 Gesteine 13
 Gesteinsfestigkeit 133, 134
 Gesteinskreislauf 16, 17
 Gesteinsrithärte 133, 134
 gestörte Probe 88
 Gips 12, 29, 30, 121, 134
 Glanz 8
 glazifluviatil 23
 glazigen 23
 Glimmer 9, 11, 12, 43
 Glimmerschiefer 58, 59, 60, 121, 134
 Gneis 37, 55, 59, 61, 62, 65, 66, 121, 134, 136
 Goethit 10
 Grainstone 31
 Granat 51, 63, 66
 Granat-Glimmerschiefer 56
 Granit 38, 45, 46, 48, 121, 122, 123, 134
 Granodiorit 37, 42, 45, 46, 48, 134, 136
 Granofels 66
 Granulit 54, 65, 66, 121
 Graphit 33
 Grauwacke 27, 28
 Greiferbohrung 99, 100
 Greisen 67
 Grobboden 85
 grobkörnige Böden 79, 80, 112
 Grundmasse 38
 Grundwasser 101, 104
 Grundwasserhemmer 103
 Grundwasserleiter 103
 Grundwasserstauer 103
 Grünschiefer 54, 63, 66
 Grünschieferfazies 62

H

Haftwasser 102
 Halit 12, 29, 121
 Halogenide 7, 29
 Hämatit 10
 Handdrehbohrung 99
 Harnischstriemung 128
 Hauptspannung 89, 91, 92
 Hellglimmer 11
 Histogramm 73
 Hornblende 9, 59
 Hornblendit 42, 51
 Hornfels 54, 58, 59, 66, 121
 hydrogeologischer Pumpversuch 104, 106
 Hydroxide 7

I

Ignimbrit 39, 136
 Illit 10
 Impaktit 67
 Impaktmetamorphose 67
 Inkohlung 32
 Inkohlungsreihe 33
 Inselbogen 53
 instationäre Verhältnisse 104, 105, 106
 interdiäre Magmatite 47, 49
 Intramikrit 31
 Intrasparit 31
 Isopyknen 131

K

Kalifeldspat 8, 9, 11, 45
 Kalisalz 29
 Kalk-Arenit 121
 Kalk-Ludit 121
 Kalk-Rudit 121
 Kalk-Siltit 121
 Kalksandstein 25
 Kalksilikatfels 66
 Kalkstein 30, 31, 121, 134, 136
 Kaolinit 10
 Karbonate 7
 Karbonatgestein 30

Karstwasserleiter 132
 Kataklasit 56, 127, 128, 129
 Kationenaustauschkapazität 10
 Kennkornlinie 114
 Kern 4
 k_f -Wert 103, 104, 109, 116, 131, 132
 Kies 24, 25, 76
 Kieselgur 32
 kieselige Sedimentgesteine 32
 Kieselschiefer 32
 Klasten 25
 klastische Sedimente 21
 klastische Sedimentgesteine 14
 Kleinbohrverfahren 98
 Kleindruckbohrung 99
 Kleinrammbohrung 99
 Klinopyroxen 46
 Kluftabstand 127, 129
 Klüfte 127, 128
 Klüftigkeitsziffer 127, 129
 Kluftkörper 128, 129
 Kluftwasserleiter 131, 132
 Kluftweite 132
 Knotenschiefer 56, 60
 Kohäsion 92
 Kohle 121
 Kollision 15
 Konglomerat 27
 Konsistenz 81, 97
 Konsistenzzahl 81, 83
 kontaktmetamorphe Gesteine 14
 Kontaktmetamorphose 53, 54
 kontinentale Kruste 16, 35, 36
 kontinentaler Intraplatten-vulkanismus 35
 kontinentaler Orogengürtel 16, 53
 Kornformkennzahl 110
 Korngrößenverteilungsanalyse 75
 Kreide 121
 Kreuzmeißel 133
 Kristallform 8
 Kunststein 122, 138
 Kunstwerkstein 122

L

Labradorit 9
 Lagergang 37
 Lagerungsdichte 86, 88, 89, 97
 Lahars 39
 Lamprophyre 45
 Lapilli 39
 Larvikit 136
 Latit 42, 46
 Lava 37, 39
 Lehm 25, 26, 73
 leichte Rammsonde 96
 Leistungspumpversuch 104, 106
 Lepidokrokit 10
 Leucit 10
 Leukogranulit 65
 Lieferkörnung 111
 Lignit 121
 limnisch 23
 Limonit 10
 Lithosphäre 4
 Lithosphärenplatten 16
 lithostatischer Druck 89, 91
 Lockergestein 14, 15, 73, 76
 Los Angeles-Test 136
 Lösbarkeit 84, 133, 134

M

Magma 35, 36
 magmatische Gesteine 13, 14, 17, 35, 42, 121
 magmatische Provinzen 35
 magmatischer Gang 37
 Magmatismus 17
 Magmatit siehe magmatische Gesteine
 Magmendifferenziation 36
 Magmenkammer 37
 Mantel 4
 marin 23
 Markasit 12
 Marmor 59, 61, 66, 121, 122, 124, 134
 Masse 87
 Mergel 25
 Mergelstein 25, 121
 metamorphe Fazies 54

metamorphe Gesteine 13, 14, 17, 56, 65, 121
 Metamorphit siehe metamorphe Gesteine
 Metamorphose 17, 53, 59, 62
 Metasomatose 67
 Migmatit 66, 67, 68, 121, 123
 Mikrit 31
 Mikrodiorit 49
 Mikrofaziesanalyse 32
 Mikrofoidgabbro 50
 Mikrofoidolith 50
 Mikrofoidsyenit 50
 Mikrogabbro 43, 50
 Mikrogranit 48
 Mikroklin 8, 9
 Mikrosyenit 49
 Milchquarz 11
 Mineral 7, 13
 Mittelozeanische Rücken 15, 16, 53
 Mittelozeanischer-Rücken-Magmatismus 35
 Mohr'sche Einhüllende 91
 Mohr'scher Spannungskreis 91
 Mohr'sches Kriterium 91, 92
 Mohshärte 8
 Monolith 127, 129
 Monzonit 49
 Montmorillonit 10
 Monzodiorit 42
 Monzogabbro 42
 Monzogranit 42
 Monzonit 42, 46, 136
 Mosaikgefüge 42, 48
 Mudstone 31
 Multibarrierenkonzept 116
 Muskovit 9, 45
 Mylonit 56, 66, 121

N

Naturstein 122
 Naturwerkstein 122, 136
 nematoblastisch 56
 Neosom 68
 Nephelin 10
 Nephelinit 42
 nichtbindig 25

Nitrate 7
 Normalspannung 92
 Normalspannungs-Scherspannungs-Diagramm 91

O

oberer Mantel 35
 Oligoklas 9
 Olivin 10, 42, 43, 45, 46, 51
 Omphacit 62, 63
 Oolith 30
 Oomikrit 31
 Oosparit 31
 Ophicalcit 124
 optimaler Wassergehalt 90
 organogene Sedimentgesteine 32
 Orthoklas 8, 9
 Ortstein 10
 Oxide 7
 ozeanische Kruste 15, 16, 35, 36
 ozeanischer Intraplattenvulkanismus 35

P

p-T-Diagramm 53
 Packstone 31
 Paläosom 68
 Pegmatit 121
 Pelmikrit 31
 Pelsparit 31
 Peridotit 42, 45, 51, 121
 Permeabilität 103
 Perthit 9
 Phonolith 42, 46, 50, 135
 phonolithischer Basanit 42
 Phosphate 7
 Phosphorit 32
 phreatomagmatische Eruption 39
 Phyllit 58, 59, 60, 65, 66, 121, 134
 Plagioklas 8, 9, 11, 42, 43, 45, 46, 50
 Planetesimal 3
 Plastizitätsgrenze 81

Plastizitätszahl 81, 82, 83
 Plattendruckversuch 94, 95
 Plattentektonik 14, 16, 35
 Plättigkeitskennzahl 110
 plutonische Gesteine 13, 14, 36, 38, 42, 45
 Plutonit siehe plutonische Gesteine
 Porenwasserleiter 132
 Porenzahl 102
 Porosität 87, 102
 porphyrisches Gefüge 38, 42
 Porphyroblasten 58, 59
 porphyroblastisch 56
 Porphyrtuff 136
 Prehnit-Pumpelleyit-Fazies 54
 Procordichte 89, 90
 Proctorkurve 90
 Protomylonit 57
 Pumpversuch 104, 105, 106, 107, 108
 Pyrit 12
 pyroklastischer Strom 37, 39
 Pyroklastit 39
 Pyrop 62, 63
 Pyroxen 9, 11, 12, 42, 43, 45, 50, 51
 Pyroxengranulit 62, 63, 67
 Pyroxenit 42, 51, 121

Q

QAPF-Doppeldreieck 40, 41
 Quarz 8, 11, 12, 42, 43, 45, 46, 48, 61, 66
 Quarzit 62, 64, 66, 121, 134, 136
 Quarzolith 42

R

Radiolarit 32
 Rahmenscherversuch 125
 Rammbohrung 99
 Rammkernbohrung 99, 100
 Rammrotations-Kernbohrung 99, 100
 Rammsondierung 96, 97

Rapakivi 123
 regionalmetamorphe Gesteine 14
 Regionalmetamorphose 53
 Reibungswinkel 92
 Rhyolith 38, 42, 45, 46, 48, 121, 134
 Richtungsrose 129, 131
 Riffkalk 30
 Ritzhärte 8
 Rollenmeißel 133
 rollig 83
 Rotarybohrung 99, 100
 Rotations-Trockenkernbohrung 99, 100
 Rotationskernbohrung 99, 100
 Rotationsspülbohrung 99, 100
 Rudstone 31

S

Sand 24, 25, 76, 85, 134
 Sandstein 27, 121, 134, 136
 Sanidin 8, 9, 46, 49
 Sanidinit-Fazies 54
 saure Magmatite 47, 48
 Schalenbau 3, 4
 scheinbare Scherparameter 93
 Scherfestigkeit 91, 93, 125
 Scherparameter 93, 125
 Scherspannung 92
 Scherversuch 125
 Schichtenverzeichnis 143, 144
 Schichtung 21, 22, 127
 Schichtvulkan 37
 Schiefer 66
 Schieferung 54, 55, 59, 65, 127, 128
 Schildvulkan 37
 Schillkalk 30
 Schlagbohrung 99, 100
 Schlagversuch 135, 136
 Schlagzahl 97
 Schlot 37
 Schluff 24, 25, 76, 85
 Schluffstein 27, 121

Schmelzignimbrit 39
 Schmelztuff 39
 Schmidtsches Netz 129
 Schotter 133, 135, 136
 Schrägschichtung 22
 Schreibkreide 30
 Schüttkorndurchmesser 114
 sedimentäre Fazies 21, 23
 sedimentäre Gesteine 13, 14, 17, 21, 121
 Sedimentation 17
 Sedimentationsanalyse 73, 74
 Sedimente 17, 21
 Sedimentgestein siehe sedimentäre Gesteine
 Sedimentit siehe sedimentäre Gesteine
 Sedimentstrukturen 22
 Serpentin 10, 68
 Serpentinit 51, 66, 68, 124, 134
 Setzung 94, 95
 Sieblinie 23, 75
 Siebung 73, 75
 Silikate 7
 Sill 37
 Sillimanit 54
 Silt 25
 Skarn 66, 67
 Skelettboden 85
 Sondierbohrverfahren 98
 Sonnensystem 3
 Spaltbarkeit 8
 Spalteneruption 37
 Spannung 89, 94, 127
 Spannungs-Verformungs-Diagramm 94
 Sparit 31
 spätorogener Magmatismus 35
 Speicherkoefizient 109
 Spitzendruck 97
 Splitt 133, 135
 stationäre Verhältnisse 104, 105, 106
 Staukuppe 37
 Steine 24, 25, 76
 Steinkohle 33
 Steinsalz 29, 134
 stereographische Projektion 129, 131

Stishovit 67
 Störung 127, 128
 Streckeisen-Diagramm 40, 41, 43, 44
 Streichen 129, 131
 Stress 55, 94
 Strichfarbe 8
 Subduktionszone 15, 16, 53
 Subduktionszonenmagma- tismus 35
 Subvulkan 37
 Suevit 67
 Sulfate 7, 29
 Sulfide 7
 Summenkurve 73, 77
 Surges 39
 Syenit 42, 46, 49, 134
 Syenogranit 42
 Sylvin 29

T

TAS-Diagramm 44
 Tektonik 54
 Temperatur 53
 Tephra 39, 40
 Tephrit 42, 46, 50
 tephritischer Phonolith 42
 Thixotropie 10
 Ton 24, 25, 76, 85, 134
 Tonalit 42
 Tonminerale 9, 11
 Tonschiefer 58, 59, 60, 66, 121, 134
 Tonstein 27, 58, 121, 134
 Topas 67
 Torf 33
 Trachyt 42, 43, 46, 49, 134
 Tragschicht 111, 112, 135
 Transmissivität 104
 Travertin 29, 30
 Trennflächen 120, 128, 129
 Trennflächengefüge 119, 127, 131, 138
 Triaxialversuch 125
 Trockendichte 86, 87, 89
 Tuff 39, 121
 Tuffit 39

U

ultrabasische Magmatite 47, 51
Ultramylonit 57
ungespanntes Grundwasser 105
ungestörte Probe 88, 89
Ungleichförmigkeit 90
Ungleichförmigkeitsgrad 76, 78
Urknall 3

V

Verdichtungsgrad 90, 97
Verdingungsordnung für Bau- leistungen 83

Verformung 89, 94
Verformungsmodul 95, 97
Verwerfung 127
Volumen 87
Vulkaniklastika 39
vulkanische Förderprodukte 39
vulkanische Gesteine 14
Vulkanit 13, 38, 42, 45
Vulkanite 36

W

Wackestone 31
Wassergehalt 79, 81, 83, 87, 89
Wasserhaushaltsgleichung 101

Wasserkreislauf 101
Weißstein 65
Wellenrippeln 22
Werkstein 136

Z

Zement 31
Zeolith 54
Zerklüftungsgrad 129
Zugfestigkeit 125
Zustandsgrenze 82