

**Beitrag zur mathematisch-petrographischen
Gefügecharakterisierung für die Beurteilung der Festgesteine
hinsichtlich ihrer Aufbereitung und
ihrer Produkteigenschaften**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.,

vorgelegt

von Dipl.-Geol. Oleg Popov

geboren am 6. August 1958 in Perm/Russland

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Georg Unland, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. Carsten Drebenstedt, Freiberg
Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba, Aachen

Tag der Verleihung: 13.07.2007

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Aufbereitungsmaschinen der Technischen Universität Bergakademie Freiberg unter der Leitung von Herrn Professor Dr.-Ing. G. Unland.

Für die freundliche Unterstützung und Betreuung sowie für die Anregungen zu dieser Arbeit danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. G. Unland ganz herzlich.

Herrn Professor Dr.-Ing. C. Drebenstedt und Herrn Professor Dr.-Ing. H. Wotruba danke ich herzlich für die Übernahme der Korreferate.

Herrn Dr.-Ing. Thomas Folgner danke ich ganz herzlich für seine ständige Hilfsbereitschaft und fachliche Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit über die ganze Zeit meines Promotionsstudiums.

Ich danke auch Herrn Dipl.-Ing. Andreas Peukert für seine wertvollen Hinweise und Anregungen.

Danken möchte ich weiterhin den Mitarbeitern des Institutes für Aufbereitungsmaschinen, sowie der mechanischen und der elektrischen Werkstatt, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Besonders danken möchte ich meiner Familie, die mich bei meiner Arbeit unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XII
1 Einführung	1
2 Wissenschaftlich-technischer Stand zur Charakterisierung von Festgesteinen und Produkteigenschaften	4
2.1 Geologisch-petrographische und physikalische Charakterisierung der Gesteine	5
2.1.1 Geologisch-genetische Einteilung der Gesteinsarten	5
2.1.1.1 Magmatische Gesteine	5
2.1.1.2 Sedimentäre Gesteine	8
2.1.1.3 Metamorphe Gesteine	9
2.1.2 Petrographische Charakterisierung von Festgesteinen	11
2.1.2.1 Modus der Gesteine	11
2.1.2.2 Gefüge der Gesteine	12
2.1.3 Verwitterung und Mineralumwandlungen	27
2.1.3.1 Verwitterung	27
2.1.3.2 Mineralumwandlungen	28
2.1.4 Festigkeit und Härte der Gesteine	29
2.1.4.1 Festigkeit	29
2.1.4.2 Härte	34
2.2 Qualitative Anforderungen an die Aufbereitungsprodukte	37
3 Präzisierung der Aufgabestellung	49
4 Entwicklung einer neuen Methode zur Charakterisierung der Festgesteine durch Anwendung der quantitativen Gefügeanalyse	51
4.1 Probennahme und Probenpräparation	52
4.2 Quantitative Gefügeanalyse	54
4.2.1 Besonderheiten der Gesteinsanalyse	54
4.2.1.1 Grundparameter von Gefügebestandteilen	55

4.2.2	Grundlagen der quantitativen Analyse.....	56
4.2.2.1	Punktanalyse	56
4.2.2.2	Linienanalyse	57
4.2.2.3	Flächenanalyse	59
4.3	Mathematische Formulierung	61
4.4	Realisierung.....	63
4.4.1	Definition der Gesteinscharakteristika	66
4.5	Mathematisch-petrographische Charakterisierung der Gesteine	67
4.5.1	Modus.....	67
4.5.1.1	Phase	67
4.5.1.2	Volumenanteil	67
4.5.2	Struktur.....	69
4.5.2.1	Korngröße	69
4.5.2.2	Kornform.....	71
4.5.2.3	Verwachsung.....	74
4.5.3	Textur	78
4.5.3.1	Verteilung (Clusterbildung)	78
4.5.3.2	Orientierung	79
4.5.3.3	Raumerfüllung.....	81
4.6	Ersatz der mineralogisch-petrographischen Kennzeichnung der Gesteine durch quantitative Gesteinskennwerte	82
5	Mathematisch-statistische Ermittlung der notwendigen Proben- bzw. Gesichtsfeldanzahl für die Gesteinscharakterisierung	83
6	Darstellung ausgewählter Beispiele zum Zusammenhang zwischen Gesteinskennwerten und relevanten Produkteigenschaften bzw. Systemkenngrößen	88
6.1	Zusammenhang zwischen ausgewählten Gesteinskennwerten und relevanten Produkteigenschaften	89
6.1.1	Einfluss ausgewählter Gesteinskennwerte auf den Zerkleinerungsgrad	89
6.1.2	Einfluss des isotropen Orientierungsgrades auf die Produktkornform	91
6.1.3	Einfluss der Gesteinseigenschaften auf die Festigkeit	93
6.1.3.1	Einfluss der Porosität auf die Festigkeit.....	93
6.1.3.2	Einfluss der Verwitterung und der Mineralumwandlungen auf die Festigkeit	94

6.1.3.3	Einfluss des Rauheitsgrades der Mineralkörner auf die Festigkeit.....	98
6.1.3.4	Einfluss des mittleren Mineraldurchmessers auf die Festigkeit.....	99
6.1.3.5	Zusammenhang zwischen der einaxialen Druckfestigkeit und dem Festigkeitsindex.....	101
6.1.3.6	Einfluss der Anisotropie auf die Festigkeit.....	103
6.1.4	Einfluss des Mineralbestandes auf die Hitzebeständigkeit.....	104
6.1.5	Beständigkeit der Minerale gegen chemischen Angriff.....	104
6.1.6	Einfluss des Gehaltes an schädlichen Bestandteilen auf die Eignung von Festgesteinen.....	106
6.1.6.1	Abschlämbare Bestandteile.....	106
6.1.6.2	Alkalireaktive Bestandteile.....	106
6.1.6.3	Stoffe organischen Ursprungs.....	108
6.1.6.4	Schwefelverbindungen.....	108
6.1.6.5	Lösliche Chloride.....	108
6.1.6.6	Oxidische Eisenerze.....	108
6.2	Zusammenhang zwischen ausgewählten Gesteinskennwerten und relevanten Systemkenngrößen.....	109
6.2.1	Einfluss des mittleren Mineraldurchmessers auf den spezifischen Arbeitsbedarf.....	109
6.2.2	Einfluss der Gesteinseigenschaften auf den Schlagleistenverschleiß.....	110
6.2.2.1	Einfluss des äquivalenten Quarzanteils auf den Schlagleistenverschleiß.....	110
6.2.2.2	Einfluss der Gefügekorngröße und des Mineralbestandes auf den spezifischen Schlagleistenverschleiß.....	112
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	115
	Literaturverzeichnis.....	119
	Verzeichnis der Anhänge.....	131
	Anhang A.....	134
	Anhang B. Programmbeschreibung.....	166

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: System Maschine/Anlage (Gesteinsaufbereitung).....	1
Abbildung 2-1: Mineralzusammensetzung der magmatischen Gesteine (umgezeichnet nach [155])	6
Abbildung 2-2: Klassifikation der Sedimentgesteine (beispielhaft nach [1, 49, 58, 59, 127, 140])	8
Abbildung 2-3: Schematische Gliederung der Metamorphite in Gesteinsgruppen (nach [54, 55, 121, 139, 153])	10
Abbildung 2-4: Phasen der Gesteine	12
Abbildung 2-5: Verallgemeinerte Charakterisierung eines Gesteins (nach [148])	15
Abbildung 2-6: Kornstrukturen: a – gleichkörnig, b – ungleichkörnig, c – porphyrtartig, d – porphyrisch	17
Abbildung 2-7: Kornformen der Minerale: a – Idiomorphe Kornform durch unbehindertes Wachstum (Pyroxeneinsprenglinge in Basalt aus Holzappel), b – Hypidiomorphe Kornform (Plagioklas teils idiomorph, teils xenomorph gegen Pyroxen. Diorit aus Hohwald), c – Xenomorphe Kornform (Plagioklas und Pyroxen zeigen fremdgestaltige Wachstumsformen. Gabbro aus Oberrottendorf)	18
Abbildung 2-8: Kornform von Mineralen: a – kugelig, b – tafelig, c – blättrig, d – säulig, e – nadelig, f – skelettförmig, g – dendritisch, h – oolithisch.....	18
Abbildung 2-9: Kornbindung gesteinsbildender Minerale: a – gerade, b – gekrümmt, c – buchtig, d – zerlappt, e – gezackt, f – ausgefranst	19
Abbildung 2-10: Strukturen magmatischer Gesteine: a – panidiomorphkörnig, b – hypidiomorphkörnig, c – allotriomorphkörnig	20
Abbildung 2-11: Implikationsgefüge: a – Intragranulares Implikationsgefüge als Interpositionsgefüge, b – Graphisches Implikationsgefüge.....	20
Abbildung 2-12: Strukturen metamorpher Gesteine: a – idioblastisch, b – xenoblastisch.....	21
Abbildung 2-13: Intergranulares Implikationsgefüge	21
Abbildung 2-14: Strukturen magmatischer Gesteine: a – vitrophyrisch, b – hyalopilitisch, c – intersertal, d – pilotaxitisch, e – trachitisch, f – bostonitisch, g – ortophirisch, h – phonolitisch, i – ozellar.....	22

Abbildung 2-15: Verteilung des Bindemittels: a – Basalzement, b – Porenzement, c – Kontaktzement, d – Filmenzement, e – korrodierender Zement, f – poikiloklastischer Zement	23
Abbildung 2-16: Schematische Darstellung der Begriffe „homogen“, „inhomogen“, „isotrop“ und „anisotrop“	24
Abbildung 2-17: Schematische Darstellung isotroper (a), flächenhaft anisotroper (b) und linear anisotroper (c) Texturen	25
Abbildung 2-18: Arten der Porosität: a – Kapillarporen, b – Haufwerksporen, c – Zellporen	27
Abbildung 2-19: Gebräuchliche Bezeichnungen für die einaxiale Druckfestigkeit von Gesteinen nach Empfehlungen der ISRM [42] mit einigen Beispielen	31
Abbildung 2-20: Point-Load-Test-Gerät	32
Abbildung 2-21: Prüfkörper beim Point-Load-Test mit vorgeschlagenen Proportionsgrenzen [43]	33
Abbildung 2-22: Korngrößenabhängiger Verlauf der PLT-Festigkeit [101]	33
Abbildung 2-23: Zusammenhang zwischen Schleifhärte nach Rosiwal und Ritzhärte nach Mohs (aus [134])	37
Abbildung 2-24: Beispiel einer typischen Schotter- /Splittanlage.	38
Abbildung 4-1: Verfahrensablauf zur Gesteinsuntersuchung	53
Abbildung 4-2: Verfahrensablauf zur Dünnschliffherstellung.....	53
Abbildung 4-3: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Punktanalyse (Phasen α und β)	56
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Linienanalyse	57
Abbildung 4-5: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Flächenanalyse	59
Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des Superpositionsprinzips für ein orientiertes Gefüge [148]	62
Abbildung 4-7: Darstellung eines linien- und flächenhaft geformten Teilchens	63
Abbildung 4-8: DünnschliffanalySELabor	64
Abbildung 4-9: Charakterisierung von Gesteinen	65
Abbildung 4-10: Beispiele nicht differenzierbarer Phasen (a – Andesit aus Kesselsdorf, b – Basalt aus Nieder-Ofleiden, c – Quarzporphyr aus Löbejün).....	67
Abbildung 4-11: Beispiele für die Kennzeichnung des Gesteins nach Dünnschliffen: a – körnig, b – porphyrisch, c – dicht	68

Abbildung 4-12: Mineralzusammensetzung (z. B. Granit aus Meißen)	68
Abbildung 4-13: Teilchenform entsprechend dem Verhältnis von längster (a), mittlerer (b) und kürzester (c) Achse	71
Abbildung 4-14: Beispiele der Teilchenform: Granit (Obercrinitz) – kugelig, Basalt (Deutschland) – nadelig, Gneis (Leubsdorf) – plattig	72
Abbildung 4-15: „Ideale“ und „reale“ Oberfläche der Mikrokörper	73
Abbildung 4-16: Habitus und Rauigkeitsgrad der Minerale (a – Quarzit aus Yichang, China, b – Quarzit aus Oberschöna, c – Sandstein aus Althüttendorf)	74
Abbildung 4-17: Zählung der Schnittpunkte zwischen den Mineralen	75
Abbildung 4-18: Vergleich der Verwachsungsindices für die Minerale der unterschiedlichen Granite (Granit 1 – Heberndorf, Granit 2 – San Diego, USA)	77
Abbildung 4-19: Vergleich der Verwachsungsindices für die Minerale des Granits (Obercrinitz) und des Granodiorits (Kindisch) in drei Messebenen ...	77
Abbildung 4-20: Verteilung der Mikrokörper (Clusterbildung): Granodiorit (Oberottendorf) – dispergierte Phase, Granit (Baden-Baden) – agglomerierte Phase	78
Abbildung 4-21: Bestimmung des Clusterbildungsgrades	79
Abbildung 4-22: Schnitzzahlrose für isotropes Gefüge und für orientiertes Gefüge. (Zahlen bezeichnen die Zahl der Schnittpunkte einer Messlinie mit den Grenzflächen pro mm Linienlänge [117])	80
Abbildung 4-23: Kennwerte einer räumlichen Anordnung des Granits aus Meißen	81
Abbildung 4-24: Raumerfüllung (Basalt aus einer maritimen Lagerstätte)	81
Abbildung 4-25: Ersatz der mineralogisch-petrographischen Kennzeichnung der Gesteine durch quantitative Gesteinskennwerte	82
Abbildung 5-1: Zusammenhang zwischen der Anzahl der erforderlichen Gesichtsfelder und der gewünschten Genauigkeit der Mittelwertbestimmung der Mineralvolumenanteile ($P = 95\%$, $t = 1,96$)	86
Abbildung 5-2: Verschlechterung der Genauigkeit durch Reduzierung der Anzahl der Gesichtsfelder von 200 auf 60	87
Abbildung 6-1: Pareto – Diagramm. Auswirkung der Einflussgrößen auf die Kornform (Zerkleinerung in einer Rotorschleudermühle – RSMS:	

	Aufgabegut 16/31,5 mm, Rotorumfangsgeschwindigkeit $v_R = 58,5$ m/s, Aufgabegutdurchsatz $\dot{m}_A = 50$ t/h) [115].....	88
Abbildung 6-2:	Einfluss der spezifischen Oberfläche und des Rauheitsgrades auf das Zerkleinerungsergebnis (Aufgabegut 16/31,5 mm, Rotorumfangsgeschwindigkeit $v_R = 58,5$ m/s, Aufgabegutdurchsatz $\dot{m}_A = 50$ t/h).....	90
Abbildung 6-3:	Isotroper Orientierungsgrad (Granodiorit aus Oberottendorf, Gneis aus Oberschöna)	91
Abbildung 6-4:	Zusammenhang zwischen dem isotropen Orientierungsgrad K_{is} und dem Fehlkornanteil $FK_{5/8}$ (Zerkleinerung in einer Rotorschleudermühle: Aufgabegut 16/32 mm; Ringpanzerung; Rotorumfangsgeschwindigkeit $v_R = 58,5$ m/s; Aufgabedurchsatz $\dot{m}_A = 50$ t/h)	92
Abbildung 6-5:	Beispiel für die Abhängigkeit zwischen Porosität und Druckfestigkeit beim Bundsandstein aus Thüringen (nach [106, S. 105]).....	94
Abbildung 6-6:	Einfluss der Verwitterung auf den Festigkeitsindex von Granit aus Schärding (Österreich).....	95
Abbildung 6-7:	Einfluss der Verwitterung auf die Festigkeit. Granit 4 (Schärding): Es sind keine farblichen, mikro- oder makroskopischen Veränderungen erkennbar. Granit 1 (Schärding): Die Färbung ist deutlich rotbraun entlang von Klüften, das Gestein ist deutlich entfestigt.	96
Abbildung 6-8:	Einfluss der Mineralumwandlungen auf die Festigkeit. Basalt 1 (Mjanducha, Russland) – Neubildungen von Tremolit, Chlorit, Talk in Olivin; Basalt 2 (Steinefrenz) – Einsprenglinge: Olivin. Grundmasse: Pyroxen, Plagioklas, Magnetit, Glas; Basalt 3 (Steinefrenz) – Neubildung von Iddingsit in Olivin.....	97
Abbildung 6-9:	Sandstein mit kieseligem Zement (Althüttendorf).....	98
Abbildung 6-10:	Einfluss des Rauheitsgrades auf die Festigkeit. Kalkstein 1 (Hermsdorf) – kantige Korngestalt von Calcit, Kalkstein 2 (Lengefeld) – buchtige Korngestalt von Calcit	99
Abbildung 6-11:	Einfluss der mittleren Mineralkorngröße auf die Druckfestigkeit (Grauwacke aus Flagstaff-Formation, Australien [130]).....	100

Abbildung 6-12: Einfluss der mittleren Mineralkorngröße auf die Druckfestigkeit (Quarzit aus Südafrika)	100
Abbildung 6-13: Zusammenhang zwischen $I_{S(50)}$ -Werten und der Druckfestigkeit.....	102
Abbildung 6-14: Abhängigkeit des Festigkeitsindex von der Belastungsrichtung für einen Gneis (Breitenau)	103
Abbildung 6-15: Volumenexpansion einiger gesteinsbildender Minerale beim Erhitzen (nach [94])	104
Abbildung 6-16: Abhängigkeit der Säurebeständigkeit von der Lösungsenthalpie und dem Koeffizienten der Basizität [128].....	105
Abbildung 6-17: Einfluss der mittleren Mineraldurchmesser auf den spezifischen Arbeitsbedarf (Zerkleinerung in einer Rotorschleudermühle: Aufgabegut 16/32 mm; Ringpanzerung; Rotorumfangsgeschwindigkeit $v_R = 58,5$ m/s; Aufgabedurchsatz $\dot{m}_A = 50$ t/h), (aus [115])	109
Abbildung 6-18: Verschleißverhalten der Gesteine (Verschleißwerte aus [46])	110
Abbildung 6-19: Abhängigkeit des spezifischen Schlagleistenverschleißes vom äquivalenten Quarzanteil (nach Tabelle 6-7).....	112
Abbildung 6-20: Einfluss der Gefügekorngröße auf den spezifischen Schlagleistenverschleiß (Granit I aus Meißen, Granit II aus Obercrinitz).....	113
Abbildung 6-21: Einfluss des Mineralbestandes auf den spezifischen Schlagleistenverschleiß (Basalt aus Nieder-Ofleiden, Granodiorit aus Demitz-Thumitz)	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Klassifikation der magmatischen Gesteine	7
Tabelle 2-2:	Größenordnung der Gefüge [6, 15, 106]	13
Tabelle 2-3:	Kennzeichnung der Gesteine nach Porosität [20, S. 56]	26
Tabelle 2-4:	Kennzeichnung der Gesteine nach Porengröße [20, S. 56]	26
Tabelle 2-5:	Umsetzungsprodukte der wichtigsten Mineralgruppen [nach 22, 32, 65]	28
Tabelle 2-6:	Mineralumwandlungen, die eine Erhöhung der Gesteinsfestigkeit bewirken	29
Tabelle 2-7:	Einteilung der Gesteine nach Härtegruppen (nach [20, S. 79])	35
Tabelle 2-8:	Übersicht über Härteprüfverfahren	35
Tabelle 2-9:	Lieferkörnungen von Natursteinprodukten [27] (Edelsplitt und Edelbrechsand erfüllen gegenüber Splitt und Brechsand zusätzliche Anforderungen nach den Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau [136])	39
Tabelle 4-1:	Stereologische Gleichungen für die Grundparameter	55
Tabelle 4-2:	Definition der Gesteinscharakteristika	66
Tabelle 5-1:	Anzahl und Verteilung der untersuchten Gesteine	83
Tabelle 5-2:	Modus und mittlere Korngröße der untersuchten Gesteine	84
Tabelle 5-3:	Ergebnisse der statistischen Auswertungen	85
Tabelle 6-1:	Abhängigkeit der Festigkeit von den Gesteinseigenschaften [114] ...	93
Tabelle 6-2:	Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Porosität, dem Porenwassergehalt und der Probenbehandlung (nach [94, S. 87])	93
Tabelle 6-3:	Einteilung der Minerale nach dem Grad ihrer Wetterbeständigkeit [65, S. 274]	96
Tabelle 6-4:	Zusammenstellung der Ergebnisse	102
Tabelle 6-5:	Chemische Beständigkeit ausgewählter Minerale gegenüber Säuren und Laugen [33]	105
Tabelle 6-6:	Wichtige AAR-reaktive Gesteine und Minerale (aus [57])	107
Tabelle 6-7:	Gesteinscharakteristika	111
Tabelle 6-8:	Gesteinscharakteristika (Fortsetzung)	111

Symbolverzeichnis

Variable

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	[mm ²]
a, b, c	Halbachsen eines ellipsoidförmigen Teilchens	[mm]
A_A	Fläche geschnittener Elemente, bezogen auf die Flächeneinheit der geschnittenden Fläche	[mm ² /mm ²]
A_i	Anteil der Mineralart	[%]
$\ddot{a}Qu$	äquivalenter Quarzanteil	[%]
C	Clusterbildungsgrad	[%]
c	Umrechnungsfaktor	[-]
d	Korngröße	[mm]
D	Probendicke	[mm]
$D_{50,0}$	Zentralwert der Anzahlverteilung	[mm]
$D_{50,3}$	Medianwert der Volumenverteilung der Minerale	[mm]
D_e	äquivalenter Durchmesser	[mm]
D_m	Korndurchmesser	[mm]
$d_{m,3}$	mittlere arithmetische Korngröße	[mm]
D_{MAX}	Klassengrenze	[mm]
E	Elongation der Teilchen	[-]
F	Flachheit der Teilchen	[-]
f	Korngrößenkorrekturfaktor	[-]
F_A	Verteilungsfunktion der Teilchenschnittflächen	[-]
F_L	Verteilungsfunktion der Teilchensehnenlängen	[-]
F_V	Größenverteilungsfunktion	[-]
$I_{A(50)}$	Festigkeitsanisotropie	[-]
$I_{S(50)}$	Festigkeitsindex	[MPa]
K_{fl}	flächiger Grenzflächenorientierungsgrad	[%]
K_{is}	isotroper Grenzflächenorientierungsgrad	[%]
K_{lin}	linearer Grenzflächenorientierungsgrad	[%]
K_R	Rauhigkeitsgrad	[%]

K_{VW}	Verwachsungsgrad	[%]
L_A	Länge von Linienelementen, bezogen auf die Flächeneinheit	[mm/mm ²]
L_L	Länge von Linienabschnitten, bezogen auf die Längeneinheit einer Schnittlinie	[mm/mm]
M	Steigungskonstante	[-]
\dot{m}_A	Aufgabegutdurchsatz	[t/h]
$M_{\alpha\alpha}$	Anzahl der Schnittpunkte entlang einer Messlinie zwischen Mineralen gleicher Art	[-]
$M_{\alpha\beta}$	Anzahl der Schnittpunkte entlang einer Messlinie zwischen Mineralen verschiedener Art	[-]
M_V	Integral der mittleren Krümmung pro Volumeneinheit	[1/mm ²]
N	Anzahl der Schnittpunkte je Längeneinheit	[1/mm]
N_A	Anzahl geschnittener Details, bezogen auf die Flächeneinheit der Schnittfläche	[1/mm ²]
n_{fl}	Radius der räumlichen Schnitzzahlrose für eine ideal flächenorientierte Grenzfläche	[-]
n_{is}	Radius der räumlichen Schnitzzahlrose für eine ideal isometrische Grenzfläche	[-]
n_j	Anzahl der Schnittflächen je mm ²	[mm ⁻²]
N_j	Anzahl der Körner je mm ³	[mm ⁻³]
n_{lin}	Radius der räumlichen Schnitzzahlrose für eine ideal linienorientierte Grenzfläche	[-]
N_V	Anzahl der Mikroteilchen in der Volumeneinheit	[1/mm ³]
P	Bruchlast	[kN]
p	Gesamtzahl der Rasterpunkte	[-]
P_β	Anzahl der Rasterpunkte, die innerhalb der Schnittflächen der β -Phase liegen	[-]
P_L	Punktanzahl pro Längeneinheit der Messlinie	[1/mm]
P_P	Anzahl der punktförmigen Elemente	[-]
Q	Modul	[-]
$Q(d)$	Verteilungshistogramme der Schnittflächen	[-]
$R(\varphi)$	Schnitzzahlrose	[-]

S	Oberfläche eines einzelnen Mikroteilchens	$[\text{mm}^2]$
$S_{\alpha\alpha}$	spezifische Grenzfläche zwischen ein- und derselben Phase	$[\text{mm}^2/\text{mm}^3]$
$S_{\alpha\beta}$	spezifische Grenzfläche zwischen den einzelnen Phasen	$[\text{mm}^2/\text{mm}^3]$
$S_{\alpha l}$	Grenzflächendichte zwischen Phase 1 und anderen Phasen	$[\text{mm}^2/\text{mm}^3]$
S_i	Gesamtfläche einer Kornklasse	$[\text{mm}^2]$
S_{HR}	Schleifhärte nach Rosiwal	$[-]$
S_O/S_U	Spaltweitenverhältnisse	$[-]$
S_V	spezifische Oberfläche der Minerale	$[\text{mm}^2/\text{mm}^3]$
$S_{V(I)}$	ideale spezifische Oberfläche	$[\text{mm}^2/\text{mm}^3]$
$S_{V(\alpha\beta)}$	Grenzflächendichte zwischen den α - und β -ten Mineralen	$[\text{mm}^2/\text{mm}^3]$
$S_{V(R)}$	reale spezifische Oberfläche	$[\text{mm}^2/\text{mm}^3]$
T	normierte Abweichung	$[-]$
V	Volumen eines einzelnen Mikroteilchens	$[\text{mm}^3]$
V_i	Gesamtvolumen einer Kornklasse	$[\text{mm}^3]$
v_R	Rotorumfangsgeschwindigkeit	$[\text{m/s}]$
V_V	Gesamtvolumen der Mikroteilchen in der Volumeneinheit	$[\text{mm}^3/\text{mm}^3]$
W	Probenbreite	$[\text{mm}]$
W_a	Wasseraufnahme	$[\%]$
W_o	spezifischer Arbeitsbedarf	$[\text{kWh/t}]$
Z	Zerkleinerungsgrad bei d_z	$[-]$

Bezeichnung der Minerale/ des Stoffes

\ddot{A}	Ägirin	$[-]$
AF	Alkalifeldspat	$[-]$
Ak	Aktinolith	$[-]$
Au	Augit	$[-]$
Bi	Biotit	$[-]$
Cc	Calcit	$[-]$
Chl	Chlorit	$[-]$

<i>Fs</i>	Feldspat	[–]
<i>Gl</i>	Glas	[–]
<i>Glm</i>	Glimmer	[–]
<i>Hbl</i>	Hornblende	[–]
<i>Ids</i>	Iddingsit	[–]
<i>L</i>	Leucit	[–]
<i>Mg</i>	Magnetit	[–]
<i>Mi</i>	Mikroclin	[–]
<i>Ne</i>	Nephelin	[–]
<i>Ol</i>	Olivin	[–]
<i>Pl</i>	Plagioklas	[–]
<i>Py</i>	Pyroxen	[–]
<i>Q</i>	Quarz	[–]
<i>Slm</i>	Sillimanit	[–]
<i>Tc</i>	Talk	[–]
<i>Tr</i>	Tremolit	[–]

Griechische Buchstaben

α	Anteil der linearen Teilchenorientierung	[–]
β	Anteil der flächigen Teilchenorientierung	[–]
γ	Anteil der isotropen Teilchenorientierung	[–]
Δ	Differenz	[–]
ε	absoluter Fehler der Bestimmung	[%]
ε_{rel}	relativer Fehler	[%]
ε_V	Volumenanteil einer Phase	[%]
ε_{VF}	Raumerfüllungsgrad	[%]
ε_{VH}	Volumenanteil der Ungängen	[%]
σ	Streuungsparameter der Korngröße der Minerale	[–]
σ_D	Druckfestigkeit	[MPa]
φ	Formfaktor	[–]

Abkürzungen

<i>Bild Nr.</i>	Nummer des Gesichtsfeldes
<i>BST</i>	Bestandteile
<i>DS-Nr.</i>	Dünnschliffnummer
<i>DS</i>	Dünnschliff
<i>EG</i>	Einflussgrößen
<i>ZG</i>	Zielgrößen
<i>FK</i>	Fehlkornanteil
<i>ISRM</i>	International Society for Rock Mechanics
<i>IUGS</i>	International Union of Geological Sciences
<i>LNV</i>	Logarithmische Normalverteilung
<i>NDP</i>	nicht differenzierbare Phase
<i>TL Min-StB</i>	Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau
<i>TP Min-StB</i>	Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau

1 Einführung

Aus der Aufbereitungspraxis ist bekannt, dass die Eigenschaften der Gesteine bei der Erzeugung von Endprodukten aus Ausgangsprodukten mit Hilfe von Maschinen und Anlagen eine große Rolle spielen. Ziel einer Systembetrachtung ist es daher, solche Anlagen mit ihren Maschinen richtig auszuwählen und zu dimensionieren, damit sie das gewünschte Endprodukt (z. B. Edelsplitt) während des Betriebes auch erzeugen können.

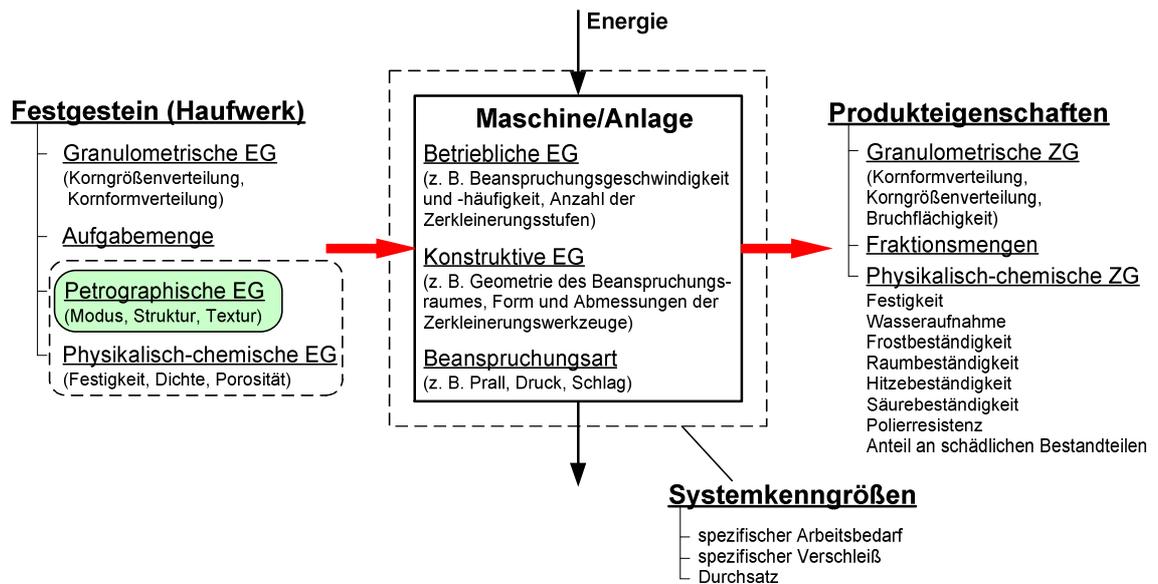


Abbildung 1-1: System Maschine/Anlage (Gesteinsaufbereitung)

Aus der Systembetrachtung (Abbildung 1-1) geht hervor, dass die Endprodukte durch Zielgrößen (z. B. Korngrößen-, Kornformverteilungen) definiert werden können, die vielfach als Qualitätsanforderungen in entsprechenden Vorschriften bzw. Normen [66 bis 90, 135 bis 138] festgelegt sind. Die Maschinen werden durch ihre Beanspruchungsart (z. B. Prall, Druck, Schlag) sowie konstruktive (z. B. Form und Abmessung der Zerkleinerungswerkzeuge) und betriebliche (z. B. Beanspruchungsgeschwindigkeit) Einflussgrößen charakterisiert.

Das Aufgabematerial wird durch seine granulometrischen, petrographischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften sowie seine Aufgabemenge beschrieben. Bei der Wandlung eines Sprenghaufwerkes in ein Qualitäts-Endprodukt spielen darüber hinaus noch systembezogene Größen, wie z. B. der notwendige spezifische Arbeitsbedarf (kWh/t), der auftretende spezifische Verschleiß (g/t) sowie der Maschinen- bzw. Anlagendurchsatz (t/h) eine Rolle.

Je nach Aufgabenstellung für den Prozess „Gesteinsaufbereitung“ sind die Auswirkungen der verschiedenen Einflussgrößen (z. B. Granulometrie und Petrographie des Aufgabematerials, konstruktive und betriebliche Einflussgrößen der Aufbereitungsmaschine) auf unterschiedliche Zielgrößen (z. B. Produkteigenschaften oder Systemkenngrößen) zu untersuchen.

In der Fachliteratur wird bereits im großen Umfang über die Möglichkeiten der Beeinflussung der Produkteigenschaften (z. B. Korngrößenverteilung, Kornform) durch eine gezielte Maschinenauswahl (z. B. Beanspruchungsart, Geometrie und Werkstoff der Zerkleinerungswerkzeuge) bei angepasster Betriebsweise (z. B. Beanspruchungsgeschwindigkeit und -häufigkeit) berichtet [35, 115, 129, 133, 151]. Der Stand der Ermittlung des Einflusses der Gesteinseigenschaften auf relevante Systemkenngrößen bzw. Produkteigenschaften weist demgegenüber erhebliche Defizite auf, die insbesondere darin begründet sind, dass der gegenwärtige Stand der mineralogisch-petrographischen Gesteinscharakterisierung in vielen Fällen nur eine verbale Eigenschaftsbeschreibung (z. B. der Gesteinsstruktur und -textur) erlaubt. Daher sind in der Fachliteratur nur vereinzelt Ergebnisse zum Einfluss der Gesteinseigenschaften auf relevante Systemkenngrößen bzw. Produkteigenschaften zu finden. So ist z. B. bekannt, dass die zu zerkleinernde Gesteinsart, charakterisiert durch die Gesteinsfestigkeit (z. B. einaxiale Druckfestigkeit, Festigkeitskoeffizient nach Protodjakonov), die Granulometrie der Brechprodukte (z. B. Produktgrößenverteilung, Kubizität) erheblich beeinflusst [28, 29, 35, 94, 130]. Des Weiteren wird in der Fachliteratur darauf verwiesen, dass der Gesteinsmodus, insbesondere der Quarzgehalt, den spezifischen Verschleiß an den Arbeitswerkzeugen von Zerkleinerungsmaschinen bestimmt [56, 61, 104, 134]. Eine umfassende Quantifizierung des Einflusses der Gesteinseigenschaften auf ausgewählte Systemkenngrößen bzw. Qualitätseigenschaften der Aufbereitungsprodukte ist jedoch erst möglich, wenn es gelingt, die vielfältigen Gesteinseigenschaften mit mathematischen Kennzahlen zu beschreiben.

Ausgehend von einer grundlegenden Darstellung des gegenwärtigen Standes der Festgesteinsbeschreibung besteht das Hauptziel der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung einer neuen mathematisch-petrographischen Methode zur Charakterisierung der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften mit Hilfe quantitativer Gesteinskennwerte. Die neue Bewertungsmethodik wird im Weiteren einer umfangreichen Testung mit verschiedenen Gesteinstypen (Magmatite, Sedimentite und Metamorphite) unterzogen. Die im Ergeb-

nis dieser Testuntersuchungen anfallenden Datenmengen werden in einer Gesteinsdatenbank zusammengefasst und bilden die Grundlage für die abschließenden anwendungsspezifischen Untersuchungen. Zum Nachweis der Eignung der neuen mathematisch-petrographischen Bewertungsmethodik wird an ausgewählten Anwendungsbeispielen der Einfluss relevanter Gesteinskennzahlen auf definierte Produkteigenschaften bzw. Systemkenngrößen untersucht und quantitativ bewertet.

2 Wissenschaftlich-technischer Stand zur Charakterisierung von Festgesteinen und Produkteigenschaften

Nachfolgend soll der gegenwärtige wissenschaftlich-technische Stand zur Charakterisierung der Eigenschaften von Festgesteinen sowie die Anforderungen an die Qualität der aufbereiteten Produkte dargestellt werden.

Die Erfassung und Analyse der Gefüge von Gesteinen ist eine wichtige Grundlage vieler wissenschaftlicher und angewandter Gebiete der Geologie. Der traditionelle Ansatz zur petrographischen und gefügekundlichen Charakterisierung einer Gesteinsprobe basiert üblicherweise auf der makroskopischen Untersuchung an den Oberflächen eines Handstücks (z. B. Verwitterungszustand) und auf der mikroskopische Untersuchung an Dünn- oder Anschliffen von Gesteinsproben. Das Gefüge eines Gesteins umfasst die Struktur, d. h. die Ausbildung der einzelnen Gemengeteile und die Textur, d. h. die Anordnung der Gemengeteile im Raum [153, S. 5]. Zahlreiche Autoren haben die Gefüge unter formalen Gesichtspunkten zusammengestellt, geordnet und beschrieben, so z. B. Pichler und Schmitt-Riegraf [95, S. 210ff.], Polovinkina [96, 97, 98], Ramdohr [102, S. 88ff.] und Smirnov [131, S. 45ff.].

Bei vielen Ingenieurwissenschaften, insbesondere auch bei der Berechnung und Konstruktion von Gewinnungs- und Aufbereitungsmaschinen, spielt die Gesteinsfestigkeit eine entscheidende Rolle [90, 135]. Die Ermittlung der Gesteinsfestigkeit erfolgt dabei entweder durch Labordruckversuche an würfel- oder zylinderförmigen Probekörpern (einaxiale Druckfestigkeit) oder in-situ bzw. im Labor an Haufwerksbruchstücken mit Hilfe eines tragbaren Point-Load-Testgerätes (Festigkeitsindex).

Das Ziel eines Aufbereitungsprozesses besteht bekanntlich darin, ein Gesteinshaufwerk in verkaufsfähige Produkte, die branchenspezifischen Qualitätsanforderungen genügen müssen, zu wandeln (siehe Abbildung 1-1). Die Qualitätsanforderungen an die Produkte sind dabei in konkreten Vorschriften, z. B. in den „Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau“ (TL Min-StB 2000), den „Technischen Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau“ (TP Min-StB) sowie weiteren Normen [66 bis 90, 135 bis 138] fixiert. Nachfolgende Ausführungen befassen sich daher sowohl mit dem gegenwärtigen Stand der geologisch-petrographischen und physikalischen Charakterisierung der Festgesteine als auch mit den Qualitätsanforderungen an die Aufbereitungs- bzw. Zerkleinerungsprodukte.

2.1 Geologisch-petrographische und physikalische Charakterisierung der Gesteine

2.1.1 Geologisch-genetische Einteilung der Gesteinsarten

Das in den Geowissenschaften übliche Einteilungssystem der Gesteine beruht auf der Entstehung der Gesteine. Der Ort der Entstehung, der Mineralbestand und das Gefüge werden als wichtige Kriterien für die Einordnung der einzelnen Gesteinsarten in bestimmte Gruppen herangezogen. Dieses Klassifizierungsprinzip gestattet es nur dem Fachmann, gewisse Rückschlüsse auf die Eigenschaften von Gestein zu ziehen, da die geologischen Namen der Gesteine nicht ohne weiteres Bezüge auf ihr technologisches Verhalten zulassen.

Es werden nach der Genese drei Gesteinsgruppen unterschieden [50, 53, 54, 55, 105, 108, 126, 152, 153]:

- magmatische Gesteine
- sedimentäre Gesteine
- metamorphe Gesteine

Diese drei Gruppen gehören verschiedenartigen gesteinsbildenden Prozessen an.

2.1.1.1 Magmatische Gesteine

Die magmatischen Gesteine (Magmatite) sind durch Kristallisation in oder auf der Erdkruste aus natürlichen Gesteinsschmelzen (Magmen, Laven) entstanden.

Ausgangspunkt für die Gliederung der Magmatite ist der quantitative Mineralbestand und der SiO₂-Gehalt. Abbildung 2-1 zeigt die Gliederung nach diesen Parametern.

Die weitere Einteilung der magmatischen Gesteine kann zunächst einmal nach ihrer geologischen Stellung, d. h. nach ihrem Bildungsort vorgenommen werden. Hiernach unterscheidet man: Plutonite, Vulkanite und Ganggesteine [24, 54], [55, 121, 139, 153, 155], (Tabelle 2-1).

Plutonite besitzen innerhalb der Erdkruste in Form großer, tiefreichender geologischer Körper, so genannte Batholithe, eine abyssische Stellung ihres Bildungsorts. In Form von Plutonen ragen sie in höhere Krustenabschnitte hinauf. Bei Plutoniten sind weder Lava noch pyroklastische Gesteine bekannt.

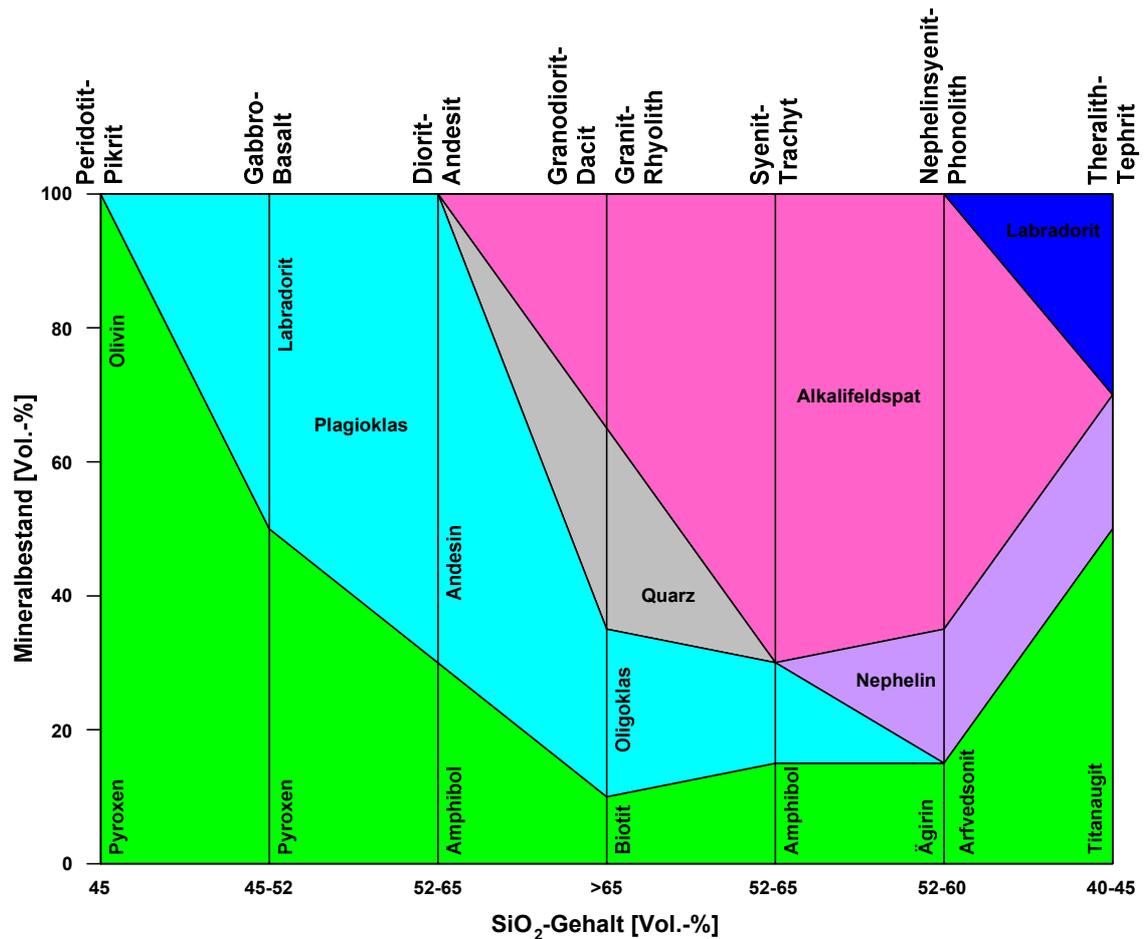


Abbildung 2-1: Mineralzusammensetzung der magmatischen Gesteine (umgezeichnet nach [155])

Unter Vulkaniten werden die extrusiven (effusiven) oder oberflächennah zum vulkanischen Geschehen gehörenden intrusiven Gesteine zusammengefasst. Die extrusiven Vulkanite können subaerisch oder submarin entstanden sein.

Die Gesteine der magmatischen Gänge besitzen im Hinblick auf ihren Bildungsort eine geologische Zwischenstellung. Sie sind hypabyssisch.

Die meisten Vulkane der Erde fördern neben flüssiger Lava auch festes oder halbfestes Material, das sie auswerfen. Unter solchen Lockerstoffen befindet sich auch magmafremdes Material der Schlotwandungen oder des alt- oder nichtvulkanischen Untergrunds. Dieses Material sedimentiert insgesamt je nach der Größenordnung oder Dichte in geringerer oder weiterer Entfernung des fördernden Vulkans und bildet pyroklastische Gesteine. Man ordnet sie nicht zu den Sedimentgesteinen, weil sie nicht aus Verwitterungsprodukten hervorgegangen sind [55, S. 212].

Tabelle 2-1: Klassifikation der magmatischen Gesteine

Gruppe	Bezeichnung	Gesteine			Merkmale	Typ
		Plutonite	Vulkanite	Ganggesteine		
I	Peridotit-Pikrit	Peridotit Pyroxenit Dunit Hornblendit	Pikrit Meimechit Komatiit	Kimberlit	mafische Minerale - 100% keine felsischen Minerale	ultrabasische Gesteine
II	Gabbro-Basalt	Gabbro Norit Troktolith Anorthosit	Basalt Diabas Spilit	Monchiquit Diabas Dolerit	Labradorit - 50% mafische Minerale - 50%	basische Gesteine
III	Diorit-Andesit	Diorit	Andesit	Kersantit Spessartit	Andesin - (65-75)% mafische Minerale - (25-35)%	intermediäre Gesteine
IV	Granit-Rhyolith Granodiorit- Dacit	Granit Granodiorit Tonalit Plagiogranit Alaskit	Rhyolith Dacit Pechstein Obsidian	Pegmatit Aplit	felsische Minerale: Quarz - 30% Alkalifeldspat - 30% Plagioklas - 30% mafische Minerale - 10%	saure Gesteine
V	Syenit- Trachyt	Syenit Monzonit	Trachyt Latit Keratophyr	Vogesit Minette	Alkalifeldspat - (70-80)% mafische Minerale - (20-30)%	Alkaligesteine
VI	Nephelinsyenit- Phonolit	Nephelinsyenit Foyait Khibinit Lujavrit	Phonolith Leucitophyr	Tinguait	felsische Minerale: Alkalifeldspat - (60-70)% Nephelein - 20% mafische Minerale - (10-20)%	
VII	Theralith- Tephrit	Theralith Essexit Schonkinit Ijolith Missourit	Tephrit Nephelinit Limburgit Wyomingit Leucitit	Teschenit Camptonit	felsische Minerale: Plagioklas - 30% Alkalifeldspat - 15% Nephelein - 15% mafische Minerale - 40%	

Nach einem Vorschlag der IUGS¹-Subkommission sind die verschiedenen Komponenten der pyroklastischen Massen bzw. Gesteine als Pyroklasten zu bezeichnen. Pyroklasten bestehen hiernach aus Kristallen, Kristallbruchstücken, Gesteinsglas und Gesteinsbruchstücken. Pyroklasten unterscheiden sich stark in ihrer Größenordnung. Die IUGS-Subkommission schlägt vor:

- Pyroklasten mit durchschnittlicher Größe > 64 mm, je nach den oben geschilderten Eigenschaften, als Bomben oder Blöcke zu bezeichnen. Entsprechend ihrem Rauigkeitsgrad bildet das aus ihnen bestehende pyroklastische Gestein Agglomerate oder pyroklastische Breccien
- Lapilli variieren hiernach zwischen 64 und 2 mm Größe. Die sie zusammensetzenden pyroklastischen Gesteine sind als Lapillituffe zu benennen

¹ International Union of Geological Sciences

- Unter 2 mm liegt nach diesem Vorschlag die Korngröße vulkanischer Aschen bzw. (verfestigt) die der Aschentuffe. Aschen und Aschentuffe werden ihrerseits in grob (0,063–2 mm) und fein (< 0,063 mm) unterteilt

2.1.1.2 Sedimentäre Gesteine

Sedimentäre Gesteine (Sedimentite) sind durch Absatz von Verwitterungsprodukten im Wasser oder an der Erdoberfläche entstanden.

Nach der Art des Ablagerungsvorgangs unterscheidet man [1, 49, 58], [59, S. 214], [127, S. 42ff], [140]: Klastische, organische und chemische Sedimente (siehe Abbildung 2-2). Es wird unterschieden zwischen klastischen Sedimentgesteinen, die durch mechanische Anhäufung von Fragmenten und Einzelkörnern entstanden sind, und chemischen (sowie biochemischen) Sedimentgesteinen, die aus anorganischen (oder organischen) Lösungen ausgefällt wurden. Dabei enthalten klastische Sedimente meistens auch chemisch gefällte Substanz und die chemischen Sedimente ihrerseits ebenso klastisches Material.

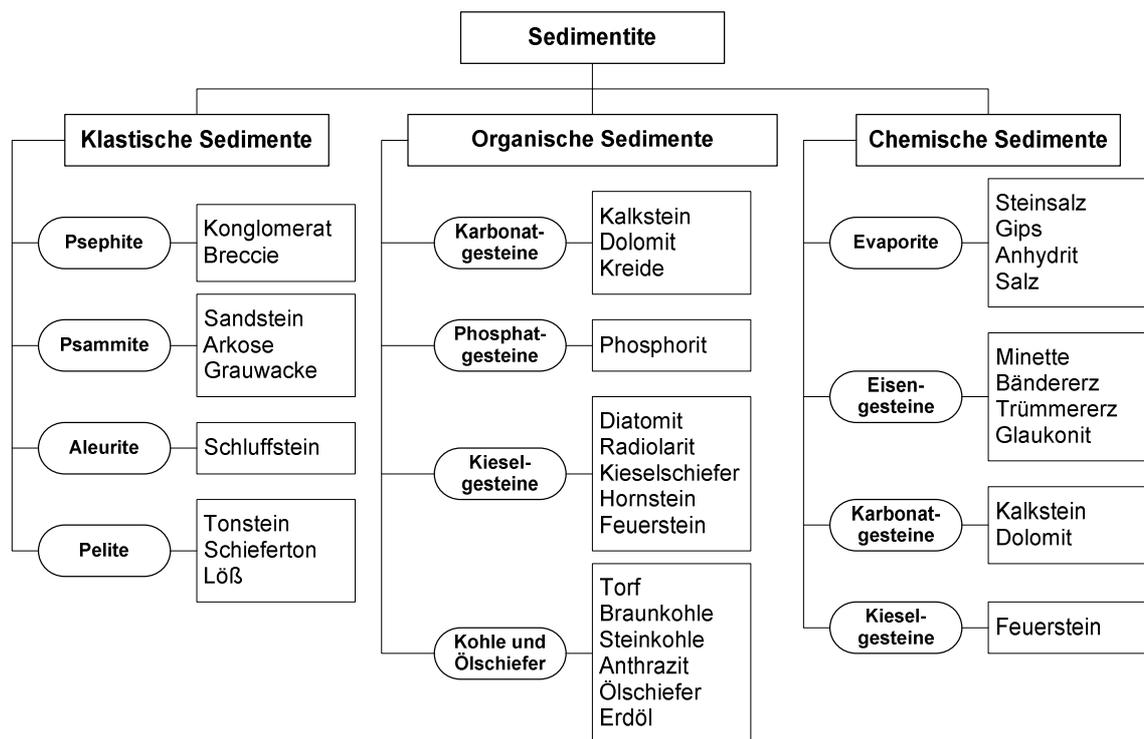


Abbildung 2-2: Klassifikation der Sedimentgesteine (beispielhaft nach [1, 49, 58, 59, 127, 140])

Die klastischen Sedimentgesteine [47, S. 35], [127, S. 70], [140] werden nach ihrer Korngröße gegliedert in (siehe Anlage 5):

Psephite	>2 mm
Psammite	2-0,06 mm
Aleurite	0,06-0,002 mm
Pelite	<0,002 mm

Die chemischen Sedimente (Ausscheidungssedimente) werden im Wesentlichen nach ihrem Chemismus bzw. Stoffbestand unterteilt. Hier bestehen teilweise Überschneidungen mit biochemischen und organogenen Sedimenten, so bei den Kalksteinen, Dolomiten und Phosphaten, etwas weniger bei Kieselschiefern, sedimentären Eisenerzen und sedimentären Kieslagern. Ausschließlich reine Ausscheidungssedimente stellen die Evaporite dar. Bei den Kohlen und Ölschiefern bestehen Beziehungen zu den klastischen Sedimenten.

2.1.1.3 Metamorphe Gesteine

Die metamorphen Gesteine (Metamorphite) sind durch Einwirkung von erhöhtem Druck und/oder erhöhter Temperatur innerhalb der Erdkruste aus bereits vorhandenen Gesteinen durch Umwandlungen des Gefüges oder der Gemengeteile entstanden.

Nach dem Geländebefund lassen sich drei verschiedene Kategorien von metamorphen Gesteinen unterscheiden [54], [55, S. 350], [121, 139, 153]: Produkte der Kontaktmetamorphose, Produkte der Dislokationsmetamorphose (Dynamometamorphose) und Produkte der Regionalmetamorphose (Abbildung 2-3). Das geologische Auftreten der kontaktmetamorph und dislokationsmetamorph geprägten Gesteine ist örtlich begrenzt, während das Auftreten der regionalmetamorph geprägten Gesteine, wie schon der Name zum Ausdruck bringt, meistens ganze Grundgebirgseinheiten umfasst.

Die kontaktmetamorph gebildeten Metamorphite sind Produkte einer thermischen Um- und Rekristallisation des Nebengesteins um einen magmatischen Intrusivkörper. Auch in den Intrusivkörper gelangte Nebengesteinsschollen können so verändert werden. Kontaktmetamorphe Gesteine zeigen im Allgemeinen weder eine bevorzugte Mineralorientierung noch eine Schieferung, da die Deformation meistens fehlt oder nur untergeordnete Bedeutung hat. Wegen der raschen Abkühlung entstehen typischerweise Metamorphite mit sehr feinkörnigem Gefüge, so genannte „Hornfelse“.

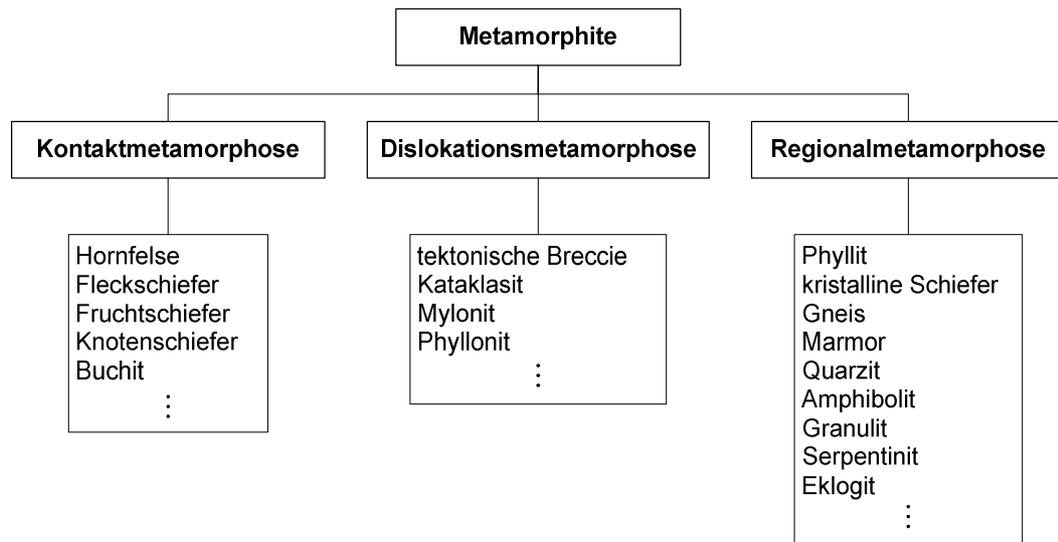


Abbildung 2-3: Schematische Gliederung der Metamorphite in Gesteinsgruppen
(nach [54, 55, 121, 139, 153])

Als Dislokationsmetamorphose (Dynamometamorphose) wird die Gesteinsumwandlung im Zuge bruchhafter Verformung (z. B. Zerschneiden und Zermahlen) entlang von Bewegungshorizonten wie Überschiebungs- oder Abschiebungsflächen und Verwerfungen bezeichnet. Obwohl vorwiegend destruktiv, kommt es dabei z. T. auch zu Mineralneubildungen. Die Dislokationsmetamorphose findet im Allgemeinen bei tiefen Temperaturen statt. Es kommt daher zu keiner ausgeprägten Rekristallisation. Die Produkte der kataklastischen Metamorphose werden als z. B. tektonische Breccien und Kataklasite bezeichnet.

Unter dem Einfluss von Reibungswärme können Gesteine in Bewegungszonen aufgeschmolzen werden. Diese Gesteine werden „Pseudotachylite“ genannt, weil sie wie schwarzes basaltisches Glas (Tachylit) aussehen.

Die Regionalmetamorphose ist an Gebirgsgürtel gebunden, wo in den mittleren und tieferen Teilen der Erdkruste metamorphe Gesteinsumwandlung über ausgedehnte Bereiche stattfindet. Die Regionalmetamorphose wird hauptsächlich durch erhöhte Druck- und Temperaturbedingungen hervorgerufen und wird typischerweise von mehr oder minder intensiver Gesteinsdeformation begleitet.

Die Regionalmetamorphose ist von der Verbreitung her gesehen die wichtigste Art der Gesteinsmetamorphose. Regionalmetamorphose findet im Zusammenhang mit jeder Gebirgsbildung statt. Sie ist neben großräumigen tektonischen Bewegungen und der magmatischen Aktivität einer der wesentlichen Gebirgsbildungsprozesse. Regionalme-

tamorph geprägte Gesteine zeigen im Allgemeinen ein penetratives Gefüge mit bevorzugter Orientierung der Mineralkörner (z. B. Phyllite, Schiefer, Gneise).

Die durch tiefreichende Abtragung freigelegten Kontinentalkerne (Alte Schilde) der Erde bilden mit ihren polymetamorphen Gesteinsserien verschiedener Prägung einen weiteren, oft recht komplexen Typ regionaler Metamorphose. Schließlich wären die Metamorphose der ozeanischen Kruste und die regionale Metamorphose im oberen Erdmantel anzuführen.

2.1.2 Petrographische Charakterisierung von Festgesteinen

Die Petrographie untersucht und beschreibt das Vorkommen, die Zusammensetzung und das Gefüge der Gesteine und der in ihnen auftretenden Mineralbildungen. Sie benennt und klassifiziert die Gesteine nach ihrer Genese (magmatische, metamorphe und Sedimentgesteine), ihrer Zusammensetzung und ihrem Gefüge.

Der wesentlichste Unterschied der Gesteine zu den Mineralen ist, dass Gesteine als heterogene Gemenge in eine große Anzahl von Arten gegliedert werden können. Von den mehr als 4000 Mineralarten [55, S. 4] tritt nur ein kleiner Teil, d. h. ca. 50 Mineralarten, häufig und regelmäßig als Gemengeteil von Gesteinen auf. Man nennt diese Minerale die gesteinsbildenden Minerale. Die einzelnen Gesteine bestehen wiederum in der Regel nur aus bis zu zehn verschiedenen Mineralarten, die man in Hauptgemengeteile, Nebengemengeteile und akzessorische Gemengeteile gliedert.

Zur petrographischen Charakterisierung von Festgesteinen dienen vor allem die folgenden mikroskopisch erfassbaren Gruppen von Eigenschaften:

- qualitativer und quantitativer Mineralbestand (Modus)
- Gefüge

2.1.2.1 Modus der Gesteine

Die qualitative und quantitative Beschreibung der Gemengeteile von Gesteinen wird unter dem Begriff Modus (Mineralbestand) vorgenommen. Der Modus umfasst entsprechend dem erweiterten Verständnis die einzelnen Phasen des Gesteins und ihre Volumenanteile [24, S. 137], [64, S. 87], [105, S. 74], [113], [153, S. 15]. Allgemein werden die Gemengeteile der Gesteine gegliedert in Hauptgemengeteile, Nebengemengeteile und akzessorische Gemengeteile.

Bei Festgesteinen umfassen die Phasen die einzelnen Minerale, aber auch Ungängen (z. B. Poren und Risse), die die Phasen Gas und Flüssigkeit bilden, Gläser und mikrosowie kryptokristalline Massen, die zur nicht differenzierbaren Phase (NDP) zusammengefasst werden (siehe Abbildung 2-4). Jedes einzelne Gemeineteil einer Phase – Mikrokörper genannt – nimmt ein Volumen ein, das durch Grenzflächen definiert wird.

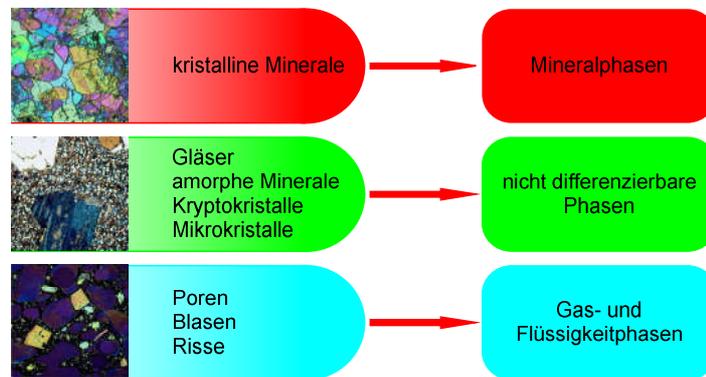


Abbildung 2-4: Phasen der Gesteine

Der Mineralbestand ist das Hauptkriterium für die Klassifikation der Festgesteine. Die Festgesteine können sowohl poly- als auch monomineralisch zusammengesetzt sein. Dabei treten in polymineralischen Gesteinen nur selten mehr als fünf verschiedene gesteinsbildende Minerale auf.

Die Untersuchungen des Dünn- oder Anschliffes im polarisierten Licht ergeben den Mineralbestand des Gesteins. Aus dem Mineralbestand kann man meistens wertvolle Schlüsse auf Eignung des Gesteins für technische Zwecke ziehen (siehe Anhang A, Anlagen 1 und 2).

2.1.2.2 Gefüge der Gesteine

Definition

Das Wort „Gefüge“ ist in geologisch–mineralogischen Fachbereichen vermutlich zuerst von Naumann [63] gebraucht worden, später von Sander [118, 119, 120] definiert worden. In der Sprache einiger Fächer, welche sich mit bestimmten Gefügen befassen (Mineralogie, Petrographie, Tektonik, Metallographie, Biologie u. a.), wird der Begriff „Gefüge“ unterschiedlich gebraucht. Der Begriff „Gefüge“ wird hier nur als die Menge aller geometrischen Daten eines geologischen Körpers verstanden [62], [93, S. 51ff.], [119, S. 2ff.].

Arten

Verschiedene Gefügearten werden in der Literatur z. T. sehr unterschiedlich definiert und mit unterschiedlichen Namen belegt. So gibt es neben Gefügeklassifikationen, die rein nach geometrischen Kriterien aufgebaut sind, zahlreiche andere, die genetische und tektonische Gesichtspunkte berücksichtigen oder ausschließlich benutzen [9, 17, 23, 45], [99, S. 462ff.], [103, S. 179], [150]. Da eine formale Gesteinscharakterisierung interpretatorische Elemente nicht beinhalten sollte, eignen sich zur Klassifikation nur solche Systematiken, die rein geometrisch ausgerichtet sind [148].

Die geometrischen Charakteristika eines Gefüges, die wahrgenommen und beschrieben werden können, hängen aber vom Beobachtungsmaßstab ab [6, S. 2f.], [93, S. 27]. Die Wahl des Maßstabes muss auf das zu lösende Problem abgestimmt werden.

In Abhängigkeit des Maßstabes der Betrachtung werden von verschiedenen Autoren unterschiedliche Begriffe gebraucht [6, 9], [131, S. 45ff.], [153, S. 5ff.]. Smirnov [131] unterscheidet beispielsweise zwischen einer Mega-, Makro-, Mikrotextur bzw. Makro-, Mikrostruktur.

Wimmenauer [153] spricht vom Gefüge des Gesteines und auch von Strukturen innerhalb des Einzelkorns. Baumann und Leeder [9] sprechen von formalen und genetischen Gefügen von Erzen. Beobachtungen und Messungen an den formalen Gefügen von Erzen entscheiden häufig über wirtschaftliche Belange (Aufbereitbarkeit, Aufbereitungsmethoden usw.). Sie sind Hauptobjekt stereologischer Analysen.

Tabelle 2-2: Größenordnung der Gefüge [6, 15, 106]

Gefügearten	Mikrogefüge	Mesogefüge	Makrogefüge
Bereich	Handstück	Erdkruste	Tektonosphäre
Maßstab	$<10^{-1}$ m	10^{-1} m - 10^4 m	$>10^4$ m
Wissenschaft	Petrographie	Strukturgeologie	Geotektonik
Gefügeelemente	materielle: Mineralkörner Klüftkörper nicht materielle: Poren, Lücken, Blasen	Falten, Schichten, Klüfte, Störungen. Faltenflügel, Faltenscheitel, Faltenachsen, Schichtflächen, Klüftflächen, Störungsflächen, Schieferungsflächen, Sattelfirste, Knitterungen, Rutschstreifen usw.	Schilde, Tafeln, Anteklisen, Syneklisen, Aulakogene, Wölbungen, Senken

Da der Begriff „Gefüge“ als die Menge aller geometrischen Daten eines geologischen Körpers unabhängig vom Beobachtungsmaßstab definiert wurde, soll der Maßstab be-

grifflich durch ein Suffix zum Wort „Gefüge“ berücksichtigt werden [94, 106]. Das Makrogefüge wird deshalb in dieser Abhandlung als das Gefüge der Tektonosphäre (siehe Anhang A, Anlage 3), das Mesogefüge als das Gefüge der Erdkruste und das Mikrogefüge als das Gefüge eines Gesteins in seiner mikroskopischen Ausbildung definiert (siehe Tabelle 2-2) [6, 15, 106]. Unter Mikrogefüge wird die Gesteinsdimension verstanden, die zweckmäßigerweise nicht am natürlichen Vorkommen, sondern im Labor untersucht wird. Die Untersuchungen werden an Handstücken durchgeführt.

Gefügeelemente

Eine allgemeine quantitative Charakterisierung der Gesteinsgefüge setzt eine Annahme über die Zerlegung der Gefüge in definierbare Gefügeelemente [18, S. 22ff.], [93, S. 51ff.] voraus. Es wird angenommen, dass ein Gefüge eines zu untersuchenden Gesteinskörpers im Allgemeinen aus verschiedenen Bereichen (Gefügeelemente der Ordnung „i“) besteht, die eine bestimmte Position (Koordinaten), Größe, Form sowie eine Orientierung und Stoffeigenschaften haben (Abbildung 2-5). Ein Bereich wiederum setzt sich aus Gesteinsvarietäten zusammen, die aus einer statistisch ausreichend großen Anzahl von Gefügeelementen mit gleichen Eigenschaften bestehen. Eine Gesteinsvarietät lässt sich durch einen bestimmten Modus, eine Korngrößen- und Kornformverteilung sowie durch die Orientierung und Verteilung der Gefügeelemente der Ordnung „i-1“ quantitativ charakterisieren [148].

Bezogen auf das Mikrogefüge, ein Gesteinshandstück, besteht z. B. ein Hartgestein unter natürlichen Bedingungen nicht nur aus festen (Phasen der einzelnen Minerale), sondern auch aus flüssigen und gasförmigen Phasen, aus Gläsern und mikro- sowie kryptokristallinen Massen, die zur nicht differenzierbaren Phase zusammengefasst werden (siehe Abbildung 2-4). Jedes einzelne Gemengeteil einer Phase – Mikrokörper genannt – nimmt ein Volumen ein, das durch Grenzflächen definiert wird [148].

Die Eigenschaften eines Gesteins werden also durch die Art der Gemengeteile und ihre geometrischen Merkmale bestimmt, wobei die Art des Gemengeteiles synonym für seine speziellen Eigenschaften (bei dem Gemengeteil Mineral z. B. Spaltbarkeit, Härte) steht, diese also inhärent beinhaltet. Zu beachten ist aber, dass die technischen Eigenschaften des Gesteins nicht identisch mit den isolierten technischen Eigenschaften seiner Gemengeteile sind [148]!

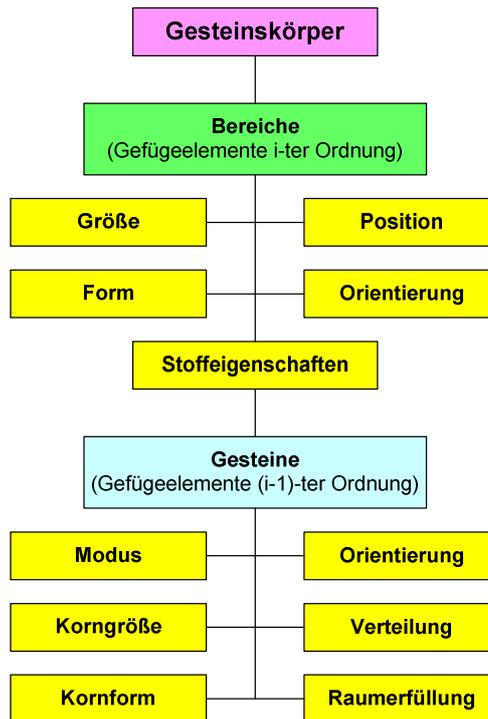


Abbildung 2-5: Verallgemeinerte Charakterisierung eines Gesteins (nach [148])

Die Gefügeanalyse geht sowohl von der phasenbezogenen Analyse als auch von der Analyse aller Phasen, die gleichberechtigt sind und nicht differenziert werden, aus. Im letzten Fall bedeutet das, dass das Gefüge eines Gesteins die Summe aller geometrischen Daten darstellt.

Grundbegriffe zur Kennzeichnung der Gefüge magmatischer, sedimentärer und metamorpher Gesteine sind Modus, Struktur (Korngröße, Kornform, Kornbindung) und Textur (Verteilung, Orientierung, Raumerfüllung) (siehe Anhang A, Anlagen 4 bis 7).

Struktur

Strukturmerkmale beziehen sich zwar auf die einzelnen Mineralkörner, können aber nur allgemein beschrieben werden. Häufig zeigen die verschiedenen Mineralarten in einem Gestein deutlich unterschiedliche Strukturmerkmale. Die einzelnen Kristallkörner eines Gesteins können im Prinzip nur nach einer von drei möglichen Bildungsarten entstanden sein:

- Mineralkörper sind als Kristalle in einem flüssigen und/oder gasförmigen Medium gewachsen

- Mineralkörner sind Bruchstücke von Kristallen, die nach Zerfall des Muttergesteins und Umlagerung zu sekundären Kornverbänden zusammengefügt wurden
- Mineralkörper können durch Reaktion im festen Zustand aus anderen Mineralkörpern entstanden, also am Ort im festen Verband gewachsen, sein

Kristallinität

Nur indirekt zum Gefüge gehören Angaben zur Kristallinität. Der Kristallinitätsgrad [51, S. 4], [55, S. 185], [152, S. 30], [153, S. 44] magmatischer Gesteine variiert von vollständiger Kristallinität bis zu vollständig glasiger Ausbildung. Dieser Aspekt wird mit Begriffen wie holokristallin (alle Bestandteile sind voll auskristallisiert), hypokristallin (präziser können hypokristalline Gesteine mittels ihres Kristall/Glas-Mengenverhältnisses beschrieben werden) und hyalin (glasig) charakterisiert.

Korngröße

Die Korngröße der gesteinsbildenden Minerale übt einen entscheidenden Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften der Gesteine aus. Für die Prüfung und Beurteilung der Gesteine ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer sicheren Korngrößenmessung. Um die mittlere Korngröße eines Gesteins zu kennzeichnen, werden im Allgemeinen nur die Korngrößen der Hauptgemengeteile herangezogen.

- Zur Strukturbeschreibung gehören Angaben zur absoluten Korngröße. Qualitativ wird die Korngröße wie folgt untergliedert: phaneritisch ($>0,1$ mm) [24, S. 135f.], [51, S. 9], [60, S. 175], [152, S. 31] und aphanitisch ($<0,1$ mm) [24, S. 135f.], [51, S. 9], [60, S. 175], [94, S. 43], [152, S. 31]. Phaneritisch (mit bloßem Auge zu erkennen) unterteilt man weiter in großkörnig > 10 mm, grobkörnig – 5-10 mm, mittelkörnig – 1-5 mm und feinkörnig – 0,1-1 mm. Aphanitisch (die einzelnen Körner sind mit dem bloßen Auge nicht mehr zu erkennen) unterteilt man in mikrokristallin – 0,01-0,1 mm, kryptokristallin – 0,0001-0,01 mm und kolloidkristallin $<0,0001$ mm. Aus den absoluten Größen der Gefügekörner sind bei Magmatiten die Abkühlungsbedingungen und damit die geologische Stellung der Magmenkörper, bei Metamorphiten grob die Aufheizungstemperaturen (und damit die Versenkungstiefe) und bei klastischen Sedimentiten Transportwege und Ablagerungsbedingungen abzuschätzen.

- Angaben zur relativen Korngröße [55, S. 185], [105, S. 76f.], [155] können mit den Begriffen gleichkörnig (die Hauptgemengeteile haben eine ähnliche Korngröße), ungleichkörnig (Korngröße variiert stark (etwa bis zum Verhältnis 1:10), ohne dass sich Großkristalle von einer feinkörnigeren „Grundmasse“ abheben), porphyrtartig – für phaneritische Gesteine (Korngrößenunterschiede mehr als 10fach, aber es gibt keine gleichmäßige Korngrößenänderung) und porphyrisch – für aphanitische Gesteine (bei dem größer entwickelte Einsprenglinge in einer feineren, auch glasigen Grundmasse eingebettet sind) beschrieben werden (Abbildung 2-6). In einem porphyrischen Gefüge unterscheidet man die zumeist phaneritischen Großkörner als Einsprenglinge (Phenokristen) und eine feinkörnige bis kolloidkristalline Matrix als Grundmasse.

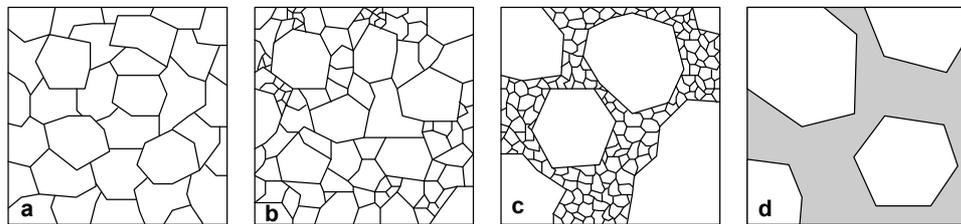


Abbildung 2-6: Kornstrukturen: a – gleichkörnig, b – ungleichkörnig, c – porphyrtartig, d – porphyrisch

Kornform

Die Kornform der gesteinsbildenden Minerale kann man mit Bezug auf die Beschaffenheit der Kristallflächen oder mit Bezug auf die Proportionen der einzelnen Kristalle beschreiben [25]. Die folgenden Kornformen (Abbildung 2-7) werden nach dem Grad der kristallographischen Eigengestalt unterschieden [32, 53, 112]:

- Eigengestaltige (idiomorphe bzw. idioblastische), durch ebene Kristallflächen umgrenzte Formen. Diese entstehen durch allseitig unbehindertes Wachstum der Kristallindividuen.
- Teilweise eigengestaltige (hypidiomorphe) Kornformen. Die einzelnen Kristalle sind teils eigengestaltig, teils durch angrenzende Nachbarkörner fremdgestaltig.
- Fremdgestaltige (xenomorphe bzw. xenoblastische) Kornformen. Sie bilden sich bei allseitiger Wachstumsbehinderung durch gleichzeitig wachsende oder vorhandene benachbarte Kristallindividuen.

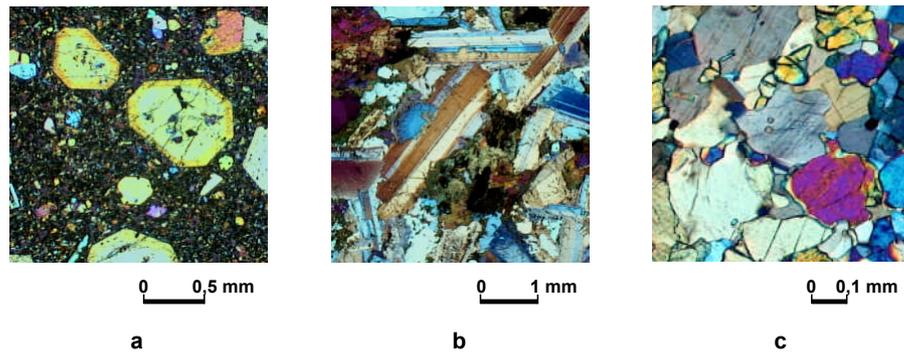


Abbildung 2-7: Kornformen der Minerale: a – Idiomorphe Kornform durch unbehindertes Wachstum (Pyroxeneinsprenglinge in Basalt aus Holzappel),
b – Hypidiomorphe Kornform (Plagioklas teils idiomorph, teils xenomorph gegen Pyroxen. Diorit aus Hohwald),
c – Xenomorphe Kornform (Plagioklas und Pyroxen zeigen fremdgestaltige Wachstumsformen. Gabbro aus Oberrottendorf)

In Bezug auf die Proportionen kann eine Kristallform entweder isometrisch oder anisometrisch sein [51]. Die häufigsten Kornformbezeichnungen sind [51, 53, 95, 153]: kugelig, tafelig (plattig), blättrig, säulig (prismatisch), nadelig (faserig, haarartig, stängelig), skelettförmig, dendritisch, oolithisch (Abbildung 2-8).

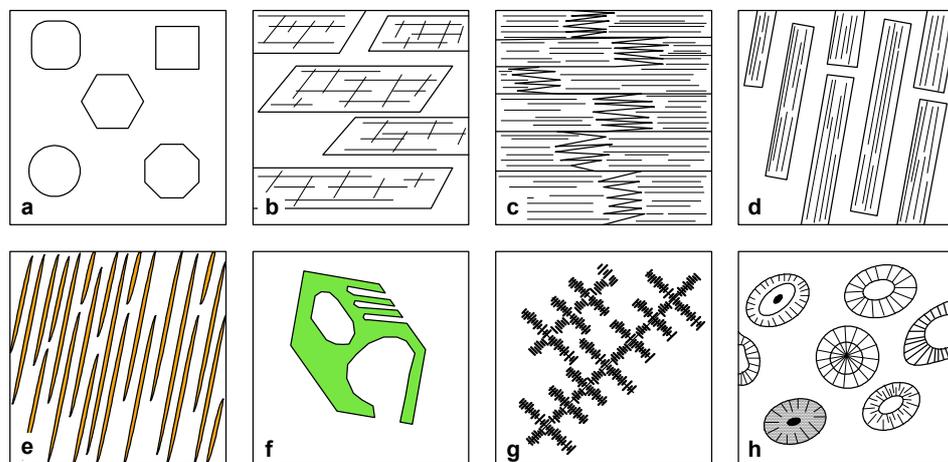


Abbildung 2-8: Kornform von Mineralen: a – kugelig, b – tafelig, c – blättrig, d – säulig, e – nadelig, f – skelettförmig, g – dendritisch, h – oolithisch

Das Kristalleinzelkorn im Gestein ist im Idealfall homogen, frei von Einschlüssen und Umwandlungserscheinungen. Häufig kommen aber folgende Inhomogenitäten vor [52, 153]: Zonarbau, Sandstruktur, Entmischungserscheinungen, Zwillingsbildung, postkristalline Deformation und Einschlüsse verschiedener Art, Zahl und Größe.

Kornbindung

Festigkeitseigenschaften der Gesteine ebenso wie ihre Verwitterungsbeständigkeit hängen sehr stark von der Kornbindung ab. Man kann zwei Haupttypen der Kornbindung unterscheiden, die unmittelbare und die mittelbare Kornbindung.

a) Unmittelbare Kornbindung

Die unmittelbare Kornbindung ist nahezu allen magmatischen, metamorphen und dem überwiegenden Teil der chemischen Sedimentgesteine eigen. Die einzelnen Gefügekörner grenzen hier unmittelbar aneinander. Die Intensität der Kornbindung hängt dabei von der Korngestalt und der Korngröße ab. Das Erscheinungsbild der Körner im Dünnschliff oder Anschliff wird auch oft allgemein durch die Gestalt der Korngrenzen charakterisiert [25, 153]: gerade, gekrümmt, buchtig, zerlappt, gezackt, ausgefranst usw. (Abbildung 2-9).

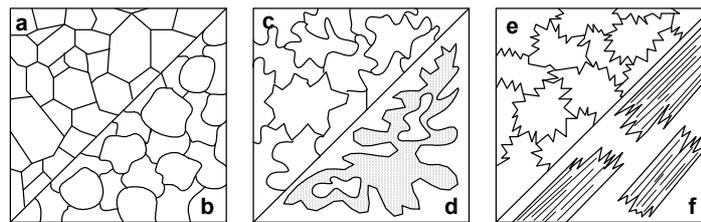


Abbildung 2-9: Kornbindung gesteinsbildender Minerale: a – gerade, b – gekrümmt, c – buchtig, d – zerlappt, e – gezackt, f – ausgefranst

Nach dem Grad der gegenseitigen Verzahnung der Korngrenzen kann man in Anlehnung an Niggli [65] folgende Gefügetypen unterscheiden:

- Mosaikgefüge
- Implikationsgefüge
- Retikulargefüge

Mosaikgefüge

Mosaikgefüge sind durch einfache gerade bis schwach gebogene Korngrenzen charakterisiert. Mehr oder weniger mosaikartigen Charakter besitzen z. B. die panidiomorphkörnigen, hypidiomorphkörnigen und allotriomorphkörnigen Strukturen der magmatischen Gesteine.

Panidiomorphkörnige Strukturen [139, 152, 153] – die meisten Körner der Hauptminerale sind idiomorph (Abbildung 2-10 a), hypidiomorphkörnig [152, 153] – ein Teil der

Hauptminerale hat idiomorphe, hypidiomorphe und teilweise xenomorphe Formen (Abbildung 2-10 b), allotriomorphkörnig [60, 139, 152] – alle Hauptminerale sind xenomorph ausgebildet; sie stoßen mit einfachen, buchtigen oder anders gestalteten Grenzen aneinander (Abbildung 2-10 c).

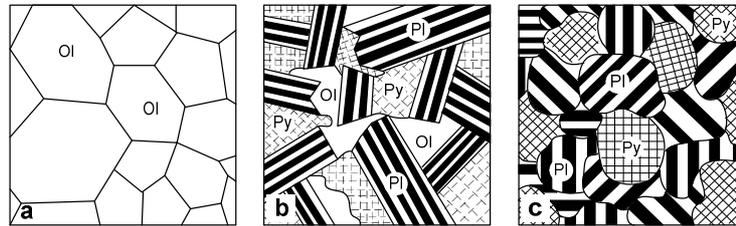


Abbildung 2-10: Strukturen magmatischer Gesteine: a – panidiomorphkörnig, b – hypidiomorphkörnig, c – allotriomorphkörnig

Implikationsgefüge

Implikationsgefüge entwickeln sich durch zunehmende Kornverzahnung bzw. Durchdringung aus den Mosaikgefügen. Im Grenzfall ist zu unterscheiden zwischen intragranularem und intergranularem Implikationsgefüge.

Für intragranulare Implikationsgefüge sind bei magmatischen Gesteinen besonders kennzeichnend:

Interpositionsgefüge

Größere Kristallindividuen umschließen kleine Kristalle, die xenomorph oder mehr oder weniger idiomorph ausgebildet sein können. Abbildung 2-11 a zeigt z. B. ein größeres xenomorphes Pyroxenindividuum, in das zeilreiche idiomorphe Plagioklaskristalle eingelagert sind.

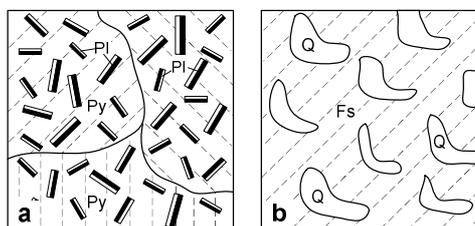


Abbildung 2-11: Implikationsgefüge: a – Intragranulares Implikationsgefüge als Interpositionsgefüge, b – Graphisches Implikationsgefüge

Interpositionsgefüge sind für metamorphe Gesteine besonders charakteristisch. Die Interpositionen können dabei idioblastisch oder xenoblastisch ausgebildet sein (siehe Abbildung 2-12).

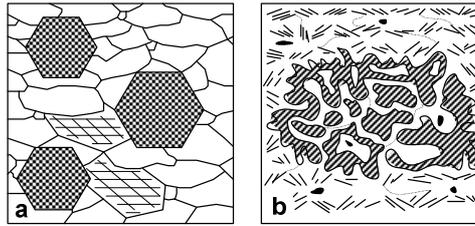


Abbildung 2-12: Strukturen metamorpher Gesteine: a – idioblastisch, b – xenoblastisch

Graphische Implikationsgefüge

Unter graphischen Implikationsgefügen werden solche verstanden, bei denen die einschlussartige, unregelmäßige, oft wurmförmige Gestalt Schriftzeichen gleicht. Das graphische Implikationsgefüge [51, 60, 152, 153] besteht z. B. aus der Verwachsung und Durchdringung von je einem Alkalifeldspat- und Quarzindividuum (siehe Abbildung 2-11 b).

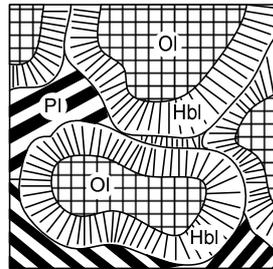


Abbildung 2-13: Intergranulares Implikationsgefüge

Bei intergranularem Implikationsgefüge kann zwischen Wirt und Einschluss oft nicht unterschieden werden, da sich zwei oder mehrere Kristallarten als feines Gewebe innig durchdringen (Abbildung 2-13).

Retikulargefüge

Bildet bei polymineralischen Aggregaten eine Mineralart ein zusammenhängendes Netz, so spricht man von Retikulargefüge. Bei mehr oder weniger retikulärer Aggregationsweise idiomorpher (besonders tafeliger bzw. leistenförmiger) oder dendritischer Kristalle entstehen sperrige intersertale Gefüge (siehe Abbildung 2-14 c). Dabei können die Lücken des sperrigen Gefüges durch xenomorphe Kristallkörner, feinkristalline Aggregate oder durch amorphe Bestandteile (Glas) ausgefüllt sein oder auch leere Porenräume bilden.

Durch Zunahme des glasigen Grundmassenanteils vollzieht sich der Übergang in hyalopilitische und schließlich in vitrophyrische Gefüge. Gesteine mit Einsprenglingen in

einer vorwiegend glasigen Grundmasse (Glasanteil > 95%) heißen vitrophyrisch (Abbildung 2-14 a). Strukturen nennt man hyalopilitisch (Abbildung 2-14 b) bei überwiegendem Glasanteil zwischen den Mikrolithen in der Grundmasse. Bei intersertalen Strukturen (Glasanteil < Mikrolithe) füllt Glas die keilförmigen Zwischenräume von leisten- oder tafelförmigen Plagioklasen ganz oder teilweise aus.

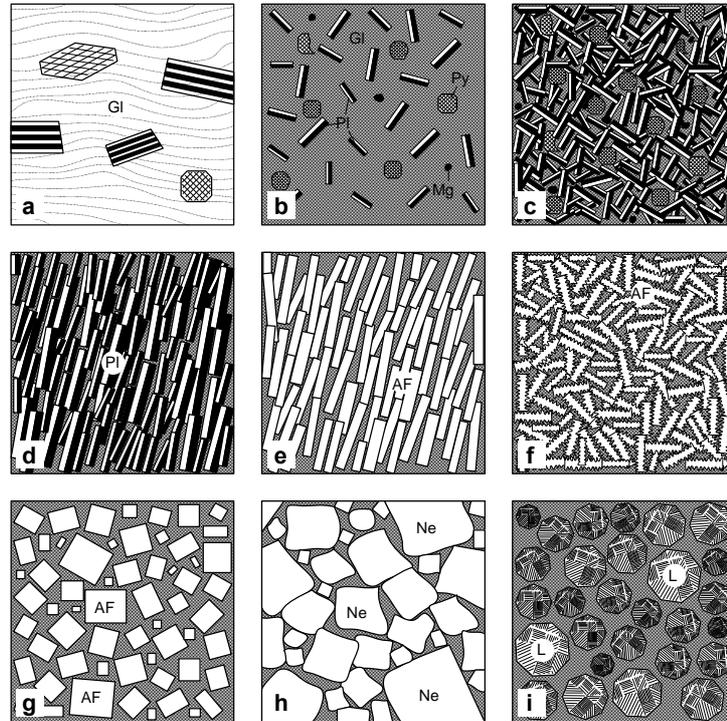


Abbildung 2-14: Strukturen magmatischer Gesteine: a – vitrophyrisch, b – hyalopilitisch, c – intersertal, d – pilotaxitisch, e – trachitisch, f – bostonitisch, g – ortophirisch, h – phonolitisch, i – ozellar

Die feinere Struktur der Grundmasse vieler porphyrischer Gesteine ist oft mikrolithisch (pilotaxitisch, trachitisch, bostonitisch, ortophirisch, phonolitisch, ozellar usw.) (Abbildung 2-14). Sie besteht aus sehr vielen kleinen geregelt oder regellos angeordneten Kristallen in einer noch feineren kristallinen oder glasigen Matrix (Glasanteil < 10%).

b) Mittelbare Kornbindung

Mittelbare Kornbindung ist auf klastische Sedimentgesteine, auf einige chemische Sedimentgesteine und die Pyroklastite beschränkt.

Für die mittelbare Kornbindung sind bei den klastischen Sedimentgesteinen die Art und die Verteilung des Bindemittels („Zement“) kennzeichnend. Nach der Art werden vor allem silikatische (kieselige, tonige), karbonatische, oxidische und ferritische Bindemittel

tel unterschieden. Über die mögliche Verteilung des Bindemittels gibt Abbildung 2-15 Auskunft [32, 94, 149].

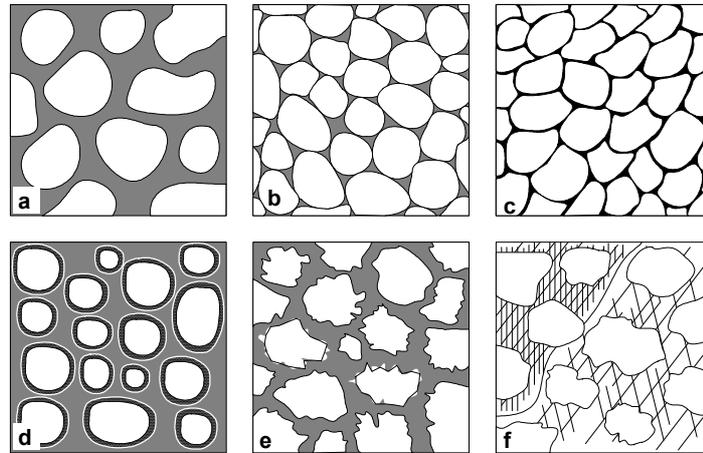


Abbildung 2-15: Verteilung des Bindemittels: a – Basalzement, b – Porenzement, c – Kontaktzement, d – Filmenzement, e – korrodierender Zement, f – poikiloklastischer Zement

Textur

Die Textur ist ebenso von besonderer Bedeutung bei der Nutzung von Gesteinen als Rohstoff. Die Textur beinhaltet die gegebene Anisotropie oder Isotropie der räumlichen Anordnung der Gesteinsteile zueinander. Alle Gesteinsteilkörner, die nicht ausgesprochen isometrische Kornformen, sondern stängelige, leistige, plattige Formen haben, können bei paralleler Ausrichtung im Gestein diesem eine Gefügeanisotropie verleihen, die sich insbesondere auf die mechanischen Eigenschaften (z. B. Druckfestigkeit) des Gesteins auswirken kann.

Die Texturbeschreibung eines Gesteins soll die Anordnung der Gesteinsteile im Raum erfassen. Drei Aspekte sind dabei zu berücksichtigen, nämlich die Verteilung der Mineralbestandteile, die Orientierung der Mineralbestandteile und der Grad der Raumerfüllung des Gesteins. Zur Abschätzung einer Orientierung im Raum eignen sich besonders tafelförmig bis blättchenförmig (z. B. Glimmer) oder stängel- bis nadelförmig (z. B. Hornblenden) ausgebildete Mineralkomponenten.

Verteilung

Die Verteilung der Mineralkörner in einer begrenzten Volumeneinheit wird durch die Homogenität bzw. Heterogenität der Gefügebestandteile verkörpert. Ein Gestein ist homogen, wenn beliebig gleichorientierte und gleichgroße Teilkörper in der Anordnung

der Gefügeelemente bzw. in ihren physikalischen Eigenschaften nicht unterscheidbar sind. Andernfalls gilt ein Gestein als inhomogen (Abbildung 2-16).

Der Grad der Homogenität eines Gesteins kann sich auf die Anordnung seiner Gefügeelemente (gestaltliches Gefüge) oder auf seine physikalischen Eigenschaften (funktionales Gefüge) beziehen.

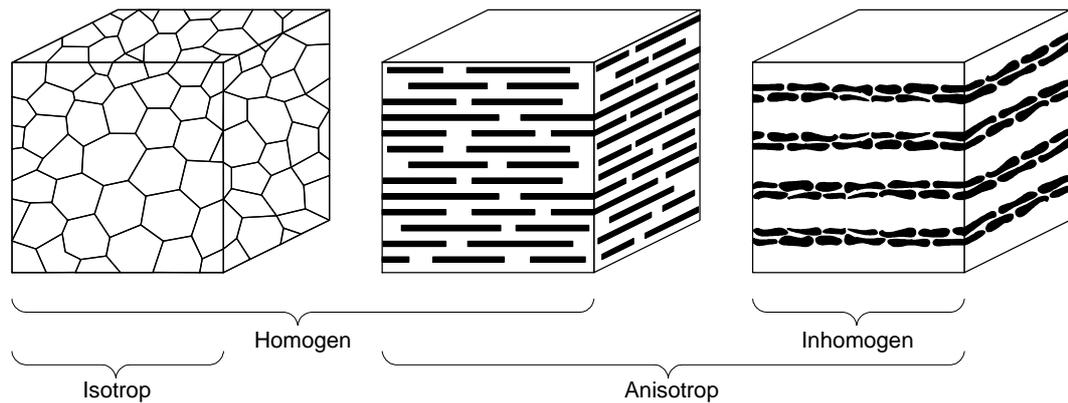


Abbildung 2-16: Schematische Darstellung der Begriffe „homogen“, „inhomogen“, „isotrop“ und „anisotrop“

Allein aufgrund des Aufbaus der Gesteine aus Mineralen kann es eine strenge Homogenität bei Gesteinen nicht geben, da stets Bereiche so klein gewählt werden können, dass diese untereinander nicht mehr identisch sind. Die Konsequenz daraus ist, dass der zu untersuchende Probenkörper immer groß genug gegenüber den vorhandenen Strukturelementen (Minerale, Kluftkörper) gewählt werden muss, damit eine repräsentative Verteilung dieser Strukturelemente im betrachteten Bereich vorliegt.

Homogene geologische Körper müssen nicht unbedingt gleichzeitig auch isotrop sein, inhomogene Körper sind dagegen auch immer anisotrop.

Ein Gestein heißt isotrop, wenn seine Gefügeelemente hinsichtlich ihrer Anordnung keine bevorzugte Orientierung zeigen, bzw. anisotrop, wenn eine solche Orientierung vorhanden ist (Abbildung 2-16). Die Begriffe isotrop und anisotrop werden auch auf physikalische Eigenschaften bezogen. Ein Gestein ist hinsichtlich einer bestimmten physikalischen Eigenschaft, wie der Druckfestigkeit isotrop, wenn diese Eigenschaft von einem Punkt im Körper ausgehend, in allen Raumrichtungen unverändert ist. Im Gegensatz dazu spricht man von einer Anisotropie, wenn die Kenngröße richtungsabhängig ist.

Eine typische anisotrope Eigenschaft ist die Schieferung von bestimmten metamorphen Gesteinen wie Schiefen oder Gneisen, die durch ein bevorzugt paralleles Wachstum von Phyllosilikaten, wie Glimmern oder Chlorit entlang der Schieferungsflächen hervorgerufen wird.

Orientierung

Die häufigsten Formen der Textur sind: isotrope, flächenhaft anisotrope und linear anisotrope Texturen [51, 153] (siehe Abbildung 2-17). Eine weitere petrographische Spezifizierung ist oft mit der Gesteinsgenese verbunden. So werden z. B. flächenhaft anisotrope Texturen der Magmatite oft als Fließtexturen, der Sedimentite als Schichtung und der Metamorphite als Schieferung bezeichnet.

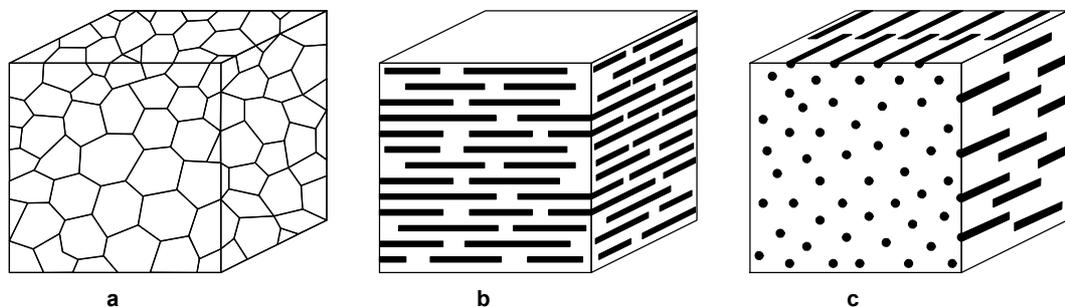


Abbildung 2-17: Schematische Darstellung isotroper (a), flächenhaft anisotroper (b) und linear anisotroper (c) Texturen

Man spricht von einer richtungslos-körnigen bis richtungslos-dichten Textur. Diese Beschaffenheit wird als massig bezeichnet. Magmatite nennt man deshalb auch Massengesteine. Die lagige, anisotrope Orientierung und inhomogene Verteilung der Komponenten bei vielen Sedimentiten führt zu einer geschichteten Textur, deshalb spricht man von Schichtgesteinen. Viele Metamorphite entwickeln zum Teil extreme Paralleleinregelungen der beteiligten Minerale und ausgeprägte Inhomogenitäten. Man spricht von Schieferung und hat den Metamorphiten traditionell auch den Beinamen kristalline Schiefer gegeben. In Einzelfällen gibt es in allen drei Gesteinsgruppen Ausnahmen.

Raumerfüllung

Jedes Gestein enthält zwischen den festen Bestandteilen (Mineralen, Gesteinsbruchstücken und organischen Gemengteilen) auch Poren, die von unterschiedlicher Größe und Form sind sowie von flüssiger und gasförmiger Phase eingenommen werden.

Die Raumerfüllung eines Gesteins wird mit den Begriffen porös und kompakt beschrieben. Viele Gesteine aus dem Bereich des Vulkanismus, aber auch gewisse Absatzge-

steine zeigen eine mehr oder weniger große Porosität. D. h., sie besitzen Hohlräume. Solche Gefüge werden beschrieben als schaumig, porös, blasig. Die Hohlräume können durch sekundäre Mineralisationen gefüllt sein. Metamorphite sind in der Regel kompakte Gesteine.

Die Porosität eines Gesteins ist abhängig von der Größe des Porenraumes, d. h. von der Anzahl und der Größe der Poren. Als absolute Porosität wird der prozentuale Anteil des Gesamtporenvolumens am Gesamtvolumen eines Gesteins bezeichnet. Nach der absoluten Porosität lässt sich folgende Klassifizierung durchführen (Tabelle 2-3):

Tabelle 2-3: Kennzeichnung der Gesteine nach Porosität [20, S. 56]

Porosität [Vol.-%]	Kennzeichnung
< 1	sehr kompakt
1 – 2,5	geringporig
2,5 – 5	mäßig porig
5 – 10	erheblich porig
10 – 20	stark porig
> 20	sehr stark porig

Für die Bezeichnung der Porengröße ist folgende Einteilung üblich (Tabelle 2-4):

Tabelle 2-4: Kennzeichnung der Gesteine nach Porengröße [20, S. 56]

minimale Weite der Poren [mm]	Porenbezeichnung
< 0,005	Mikropore
0,005 – 0,2	Feinpore
0,2 – 2	Grobpore
> 2	Großpore

Für die Permeabilität, die Durchlässigkeit eines Gesteins für Flüssigkeiten und Gase, ist vor allem die Porenform und -größe und die Art der meist richtungsabhängigen Porenverbindung mitbestimmend.

Man unterscheidet nach Abbildung 2-18 offene Poren, vor allem enge kapillare Poren oder weite Haufwerksporen, sowie geschlossene Poren, z. B. Zellporen.

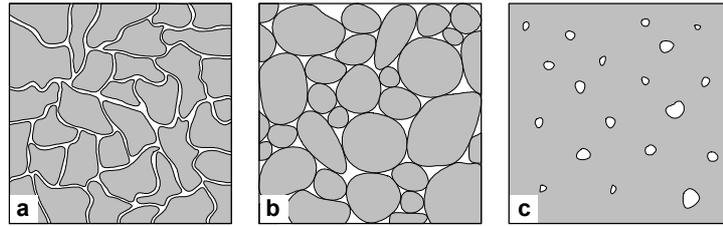


Abbildung 2-18: Arten der Porosität: a – Kapillarporen, b – Haufwerksporen, c – Zellporen

Porosität und Permeabilität beeinflussen in entscheidendem Maße viele technisch wichtigen Gesteinseigenschaften, wie z. B. das Wasseraufnahmevermögen, die Wetter- und Frostbeständigkeit, die mechanische Festigkeit, Abnutzbarkeit und die Rohdichte.

2.1.3 Verwitterung und Mineralumwandlungen

2.1.3.1 Verwitterung

Unter dem Begriff „Verwitterung“ versteht man die Veränderung der Gesteine und Minerale durch Kontakt mit der Atmosphäre und Hydrosphäre infolge physikalischer, chemischer oder biogener Prozesse. Man unterscheidet meist zwischen physikalischer und chemischer Verwitterung. Zusätzlich betrachtet man oft auch die biogene Verwitterung als eine eigenständige Verwitterungsform. Ein besonderes Merkmal ist, dass Verwitterungsprozesse bei Gesteinen nur in situ stattfinden, wobei keine Makrotransportvorgänge vorkommen. Die Verwitterung geht einher mit einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des Gesteins.

Die Verwitterungsbeständigkeit ist das Verhalten der Gesteine gegenüber natürlich und anthropogen verursachten, zerstörend wirkenden Faktoren [78]. Dazu gehören die natürlichen Witterungseinflüsse und künstlich erzeugte Stoffe. Nachteilig wirken sich auch Gehalte an verwitterungsanfälligen Bestandteilen (Markasit, Pyrit, Calcit, Gips, Salze und quellfähige Tonminerale) und Poren aus.

Viele gesteinsbildende Minerale sind nicht stabil und werden durch Verwitterung zerstört oder verändert. Für eine große Zahl von Mineralen ist deren Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen typisch. Die nachfolgende Übersicht ermöglicht eine grobe Orientierung:

- mafische Minerale sind unbeständiger als salische Minerale
- die Unbeständigkeit der Plagioklase wächst mit ihrem Anorthitgehalt
- basische Plagioklase sind im allgemeinen weniger beständig als Orthoklase

- Quarz ist unter den Hauptgemengeteilen das beständigste Mineral

2.1.3.2 Mineralumwandlungen

In Zusammenhang mit der eigentlichen Verwitterung, die sich an der Erdoberfläche abspielt, muss man gewisse Veränderungen an den Gesteinen unterscheiden, die sich in einer geringen Erdtiefe ereignen. Diese Veränderungen sind jedoch nicht identisch mit der Gesteinsmetamorphose. Häufig tragen die hierbei stattfindenden Mineralumwandlungen den Charakter metasomatischer Prozesse. Dabei spielen Stoffaustauschvorgänge unter Mitwirkung von meist wässrigen Lösungen eine wichtige Rolle. So erklärt es sich, dass bei diesen Umsetzungen aus primären, wasserfreien Silikatmineralen wie z. B. Feldspat, Pyroxen und Olivin bevorzugt Sericit, Kaolinit, Karbonate, Zeolithe, Chlorit, Serpentin, Iddingsit, Tremolit und Hydroxyde gebildet werden (Tabelle 2-5).

Tabelle 2-5: Umsetzungsprodukte der wichtigsten Mineralgruppen [nach 22, 32, 65]

Mineralgruppe	Neubildungen
Quarz	nicht verändert
Feldspatgruppe	Sericit, Kaolinit, Gemenge von Karbonaten, Hydrargillit, Diaspor, Böhmit, Zeolithe
Foide	Zeolithe, Analcim, Diaspor, Hydrargillit, Muskovit
Glimmergruppe	Neben Chlorit auch Epidot, Calcit, Rutil, Anatas, Brookit. Muskovit und Sericit sind sehr stabil
Pyroxengruppe	Chlorit, Uralit. Gemenge von Karbonaten, Limonit und Quarz (auch als Chalcedon und Opal)
Amphibolgruppe	Chlorit, Epidot, Calcit und Quarz
Olivingruppe	Serpentin, Chlorit, Talk, Iddingsit, Tremolit. Gemenge von Karbonaten, Limonit, Quarz (auch als Chalcedon und Opal)
vulkanische Gläser	Tonminerale

In Gesteinen, die hydrothermalen Prozessen ausgesetzt waren, sind neue sekundäre Minerale mit anderen physikalischen Eigenschaften entstanden. So besitzen diese neu gebildeten Minerale meist eine geringere Härte, bessere Spaltbarkeit und eine niedrigere Kornbindungsfestigkeit. Die Festigkeit des Gesteins sinkt entsprechend der Umwandlungsintensität ab.

Einige Beispiele von Mineralumwandlungen, die eine Verminderung der Gesteinsfestigkeit zur Folge haben, finden sich in Anhang A, Anlagen 1 und 2.

Die durch Metasomatose stattfindenden Umwandlungen führen einerseits zu einer Herabsetzung des Festigkeitsverhaltens und der Witterungsbeständigkeit.

Tabelle 2-6: Mineralumwandlungen, die eine Erhöhung der Gesteinsfestigkeit bewirken

Mineral	Neubildung
Klinopyroxen	Amphibol Epidot
Plagioklas	Epidot Zoisit Serizit
Olivin	Tremolit Opal Chalcedon Quarz

Andererseits können sich aber auch durch die Neubildung faseriger Minerale, die oft wirt miteinander verwachsen sind, die Kornbindung verstärken und die Witterungsbeständigkeit und die Festigkeitseigenschaften verbessern (Tabelle 2-6) [114].

2.1.4 Festigkeit und Härte der Gesteine

Die Gesteinseigenschaften sind bei der technischen Verwendung, insbesondere als Baustoff, von elementarer Bedeutung. Hier sollen die Begriffe „Festigkeit“ und „Härte“ definiert werden. Festigkeiten und Härten der Gesteine sind in keiner Weise mit den Eigenschaften der Minerale zu vergleichen. Minerale sind homogene, feste, anorganische und natürliche Festkörper. Gesteine sind Gemenge aus Mineralen. Dies bedeutet, dass die Eigenschaften der Gesteine sich nicht aus der Summe der Eigenschaften der darin enthaltenen Mineralen ergeben, sondern wesentlich durch die Grenzflächen der Mineralkörner im Gestein, durch die Verwachsung der Mineralkörner miteinander, durch die Inhomogenität und den Grad der Anisotropie des Gesteines bestimmt werden.

2.1.4.1 Festigkeit

Die Festigkeit ist als Widerstand eines festen Körpers gegen eine Beanspruchung bis zum Bruch definiert. Zunächst lässt sich eine Unterscheidung treffen zwischen den eigentlichen Festgesteinen, die ihre Festigkeit bei Wasserzutritt nicht oder nur unmaßgeblich ändern, und den veränderlich festen Gesteinen, welche unter dem Einfluss des Wasserzutritts ihre Festigkeit innerhalb kurzer Zeit, also in Tagen, Monaten oder Jahren, z. T. sehr deutlich verändern.

Die Grenze zwischen Festgesteinen (im Allgemeinen als „Fels“ bezeichnet) und Lockergesteinen (im allgemeinen als „Boden“ bezeichnet) mit relativ guter Kornbindung sind nicht eindeutig zu definieren, z. B. bei bindigen Lockergesteinen mit fester Konsistenz. Nach DIN 18300 ist Fels dadurch charakterisiert, dass er eine mineralische Kornbindung besitzt. Streng genommen gilt die Bindung zwischen Tonmineralen und damit die Bindung toniger Gesteine noch nicht als mineralische Kornbindung, da sie durch Wassereinfluss verloren geht.

Die Festigkeit der Gesteine, die durch die Druck-, Zug-, Schlag-, Scher- und Biegefestigkeit gekennzeichnet wird, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Diese Faktoren werden nach De Quervain [20] kurz zusammengefasst:

- Innere Festigkeit der einzelnen Minerale. Z. B. bei anisotropen Mineralen zeigt sich eine von der Richtung abhängige Festigkeit bzw. Spaltbarkeit, die bei der Festigkeitsprüfung Schwächezonen festlegt
- Porosität, sowie der Art und Qualität des Bindemittels
- Wassersättigung des Gesteins. Im Allgemeinen sind im wassergesättigten Zustand die Festigkeiten geringer als im trockenen Zustand
- Inhomogenitäten des Gesteines. Dieser Faktor ist für die Festigkeit entscheidend. Die Festigkeitswerte zeigen meist große Streuungen, was auf diesen Faktor zurückzuführen ist
- Anisotropie. Dieser Faktor ist nur bei statistisch anisotropen Gesteinen (geschieferte Gesteine) von Bedeutung
- Kornbindungsfestigkeit. Sie hängt ab von der Verwachsung der Mineralbestandteile untereinander
- Korngröße. Die Korngröße der kristallinen Gesteine ist von entscheidender Bedeutung für die Gesteinsfestigkeit, da jede Spaltfläche der Minerale, aus denen das Gestein zusammengesetzt ist, eine Schwächezone darstellt. Die Auswirkung der Spaltbarkeit der Minerale auf die Festigkeit ist beim feinkörnigen Gestein bedeutend geringer als beim grobkörnigen. Daher ist eine Einteilung der Gesteine nach der Korngröße wichtig
- Verwitterungsgrad

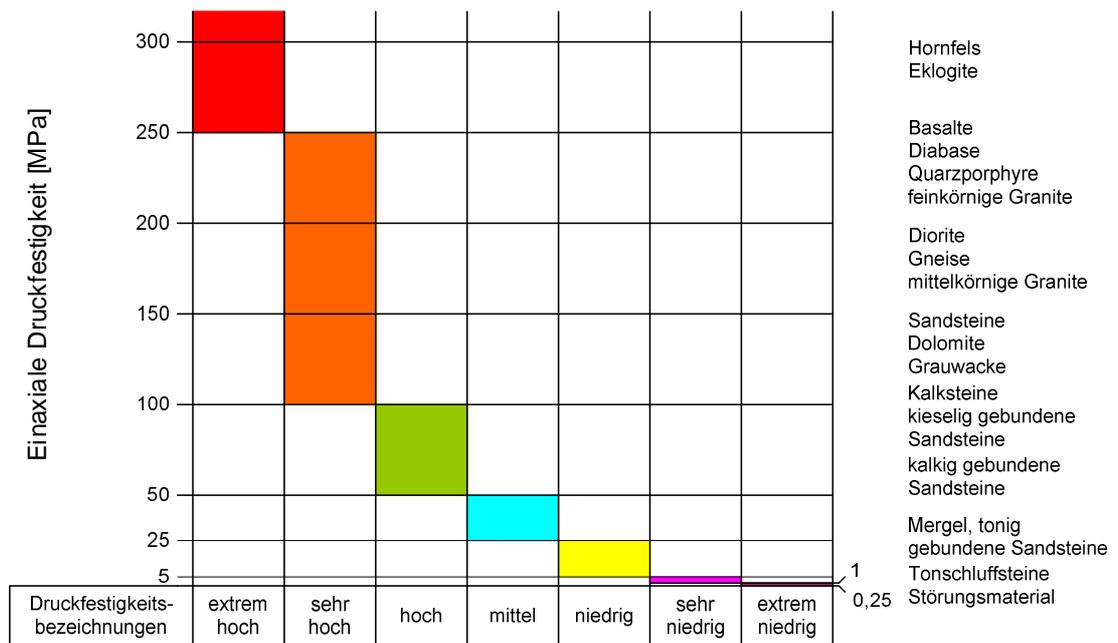


Abbildung 2-19: Gebräuchliche Bezeichnungen für die einaxiale Druckfestigkeit von Gesteinen nach Empfehlungen der ISRM [42] mit einigen Beispielen

Abbildung 2-19 zeigt eine Einteilung der Festgesteine nach ihrer einaxialen Druckfestigkeit, wie sie in den Empfehlungen zur Beschreibung von Fels der International Society for Rock Mechanics [42] enthalten sind. Als Ersatzverfahren zur Festigkeitsuntersuchung werden an unregelmäßig geformten Handstücken Punktlastversuche durchgeführt, welche im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

Verfahren zur Festigkeitsuntersuchung

Der Punktlastversuch (Point-Load-Test) gilt als mittelbare Messung der einaxialen Druckfestigkeit und nebenbei auch als indirekte Bestimmung der Zugfestigkeit. Eine quantitative Charakterisierung der Gesteinsfestigkeit spielt in vielen Ingenieur Anwendungen eine entscheidende Rolle, besonders bei der Projektierung und Konstruktion der Gewinnungs- und Aufbereitungsmaschinen [101, 148]. Die Ermittlung der Gesteinsfestigkeit erfordert fachlich durchgeführte Messverfahren, die eine statistische Absicherung der Messwerte gewährleisten können. Der Point-Load-Test wird bekanntlich als ein Messverfahren zur Klassifizierung der Gesteinsfestigkeit eingesetzt [11, 12, 43].

Ein bedeutender Vorteil dieses Verfahrens gegenüber den weit verbreiteten Druck- und Spaltzugfestigkeitsversuchen ist der geringe Aufwand zur Vorbereitung der Gesteinsproben. Er kann mit Hilfe eines tragbaren Gerätes (Abbildung 2-20) schnell und einfach im Steinbruch bzw. im Labor durchgeführt werden.

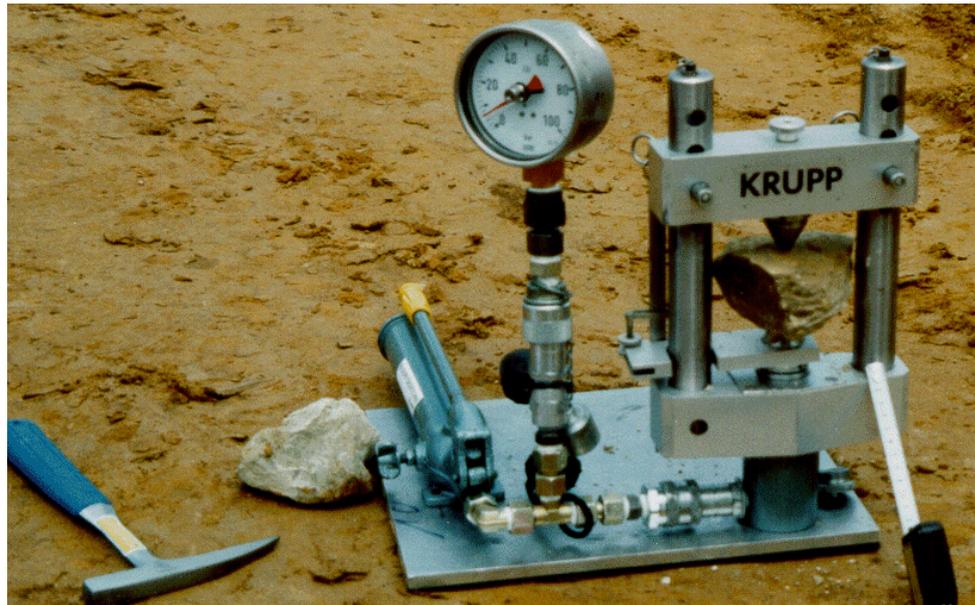


Abbildung 2-20: Point-Load-Test-Gerät

Der beim Aufbringen einer konzentrierten Last auf eine Gesteinsprobe bis zum Bruch ermittelte Festigkeitsindex kann zur Klassifizierung bzw. Charakterisierung des Gesteins verwendet werden. Der Festigkeitsindex I_s kennzeichnet die Festigkeit einer Gesteinsprobe, die unter der punktförmig aufgebrachten Kraft P zu Bruch geht. Aus Bruchlast, Prüfspitzenabstand und Breite der erhaltenen Bruchfläche errechnet sich der Festigkeitsindex I_s [11, 43]:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} = \frac{\pi \cdot P}{4 \cdot W \cdot D} \quad (1)$$

mit	I_s	Festigkeitsindex	[MPa]
	P	Bruchlast	[kN]
	D_e	äquivalenter Durchmesser	[mm]
	D	Probendicke	[mm]
	W	Probenbreite	[mm]

Die Einführung des äquivalenten Durchmessers D_e war nötig, um die Ergebnisse der Handstück-Tests (Irregular Lump Test) mit denen der Diametral Tests vergleichen zu können (siehe Abbildung 2-21).

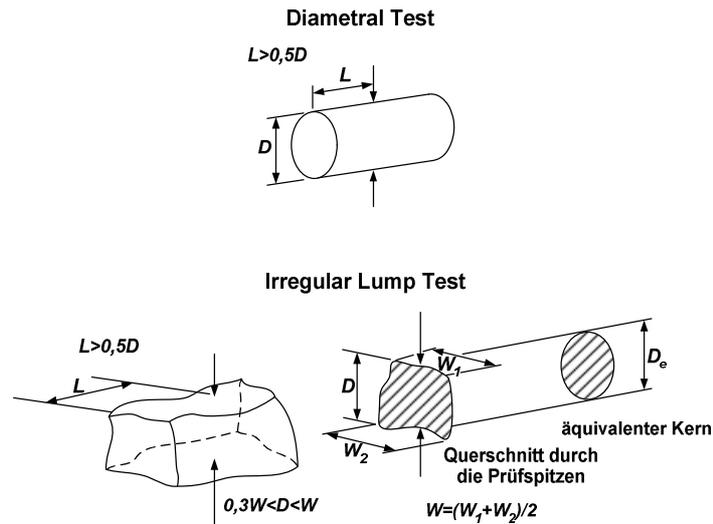


Abbildung 2-21: Prüfkörper beim Point-Load-Test mit vorgeschlagenen Proportionsgrenzen [43]

Der gemessene Festigkeitsindex ist im hohem Maße abhängig von der absoluten Größe des Prüfkörpers (Abbildung 2-22). Dieser Effekt, der auch bei allen anderen Testverfahren (z. B. einaxialer Druckversuch) vorkommt, wird in der Felsmechanik allgemein als Maßstabeffekt bezeichnet [134].

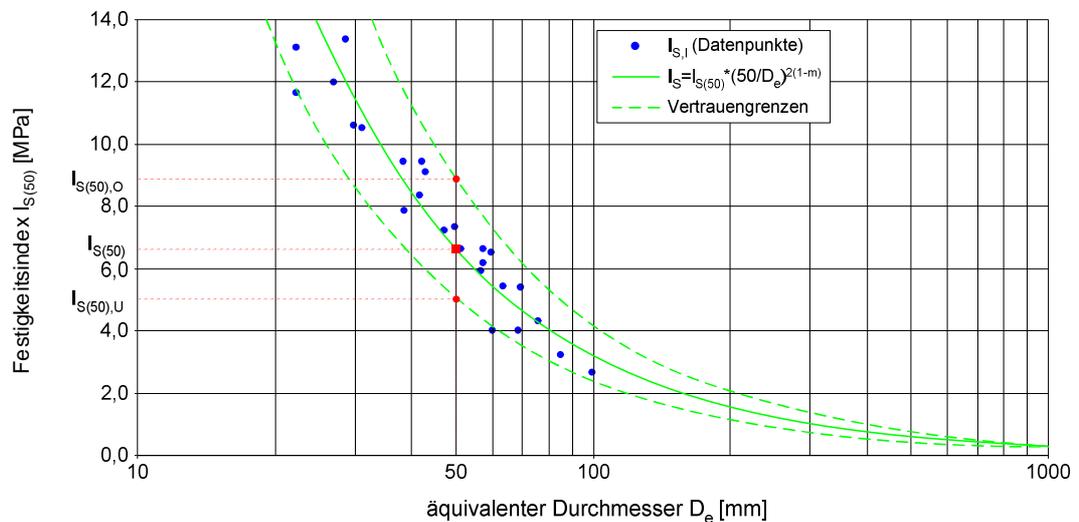


Abbildung 2-22: Korngrößenabhängiger Verlauf der PLT-Festigkeit [101]

Da die Prüfkörpergröße den Festigkeitsindex beeinflusst, müssen die Festigkeitsindizes von Gesteinsstücken unterschiedlicher Abmessungen auf ein „Standardhandstück“, das einen Standard-Durchmesser D_e von 50 mm aufweist, umgerechnet werden. Damit geht der Festigkeitsindex I_S in $I_{S(50)}$ über.

Broch und Franklin [11] verwendeten eine idealisierte Kurvenschar, die die Reduktion eines jeden Einzelwertes von I_S bei beliebigem Abstand D zu einem Standardwert $I_{S(50)}$ möglich machen sollte.

Für den Fall, dass eine Regression der Messergebnisse im logarithmischen Netz erforderlich ist, geben Brook [12, S. 65ff.] und ISRM [43, S. 59] einen Korngrößenkorrekturfaktor f an, der die Umrechnung in den $I_{S(50)}$ für Gesteine ermöglicht.

$$I_{S(50)} = f \cdot \frac{P}{D_e^2} = \frac{P}{D_e^2} \cdot \left(\frac{D_e}{50} \right)^{2(1-m)} \quad (2)$$

mit m Steigungskonstante

Die Festigkeitsindizes I_S wurden mit einem Testgerät ermittelt. Der Messbereich dieses tragbaren Handgeräts liegt zwischen 0 und 250 bar. Der ermittelte Festigkeitsindex ist von den Prüfkörperabmessungen und -formen abhängig. Gemäß Abbildung 2-20 besteht das Point-Load-Test-Gerät aus einem steifen Rahmen mit den erforderlichen Belastungs- und Messvorrichtungen. Der Rahmen ist so dimensioniert, dass Gesteinsproben bis ca. 120 mm Kantenlänge geprüft werden können. Der Belastungsdruck wird mit einer hydraulischen Handpumpe aufgebracht. Die Kraftmessung erfolgt durch Manometerablesung beim Bruch des Prüfkörpers. Der Point-Load-Test kann sowohl an unregelmäßig geformten Handstücken als auch an Bohrkernen durchgeführt werden. Durchschnittlich wurden 30 Einzelversuche je Gesteinsart und Belastungsrichtung ausgeführt.

Die Berechnung der Punktlastindizes I_S erfolgte nach den Richtlinien der ISRM [43]. Die $I_{S(50)}$ -Werte wurden nach Raaz [101] ermittelt.

Da zwischen dem Punktlastindex $I_{S(50)}$ und der einaxialen Druckfestigkeit eine empirische Beziehung besteht, lässt sich die Größenordnung der einaxialen Druckfestigkeit abschätzen, wenn der $I_{S(50)}$ -Wert mit einem Umrechnungsfaktor c multipliziert wird [43]:

$$\sigma_D = c \cdot I_{S(50)} \quad (3)$$

2.1.4.2 Härte

Härte ist der Widerstand, den ein Körper einem mechanischen Eingriff entgegensetzt, wobei die Art der Beanspruchung berücksichtigt werden muss. Die einfachste Art der

Härtebestimmung ist die Bestimmung des Widerstands, den eine Kristallfläche dem Ritzen entgegensetzt (Ritzhärte). Der Mineraloge F. Mohs hat 1817 eine Reihe von 10 Standardmineralen verschiedener Härte in der Reihenfolge ihrer Ritzhärte zusammengestellt.

Tabelle 2-7: Einteilung der Gesteine nach Härtegruppen (nach [20, S. 79])

mittlere Druckfestigkeit [MPa]	Gehalt an Mineralen härter als Stahl ($H > 5,5$)			
	0-25%	25-50%	50-75%	75-100%
>220	mittelhart	hart	hart	sehr hart
180-220	mittelhart	mittelhart	hart	hart
140-180	mittelhart	mittelhart	mittelhart	hart
100-140	weich	weich	mittelhart	mittelhart
60-100	weich	weich	weich	mittelhart
<60	sehr weich	sehr weich	weich	weich

Wenn in der Umgangssprache gesprochen wird, versteht man unter der Gesteinshärte eine komplexe Eigenschaft, die von der Härte der Gemengeteile, dem Gefüge, der Durchfeuchtung des Gesteins und der Geschwindigkeit des angreifenden Werkzeuges abhängt. Nach De Quervain [20, S. 79] kann die Gesteinshärte als Druckfestigkeit bestimmt werden, welche von der Kombination und dem Gehalt an Mineralen bestimmten Härtegrades abhängt (siehe Tabelle 2-7).

Tabelle 2-8: Übersicht über Härteprüfverfahren

Härteprüfung nach	Charakterisierung der Härte
Mohs	Ritzhärte
Vickers Rockwell Brinell Knoop	Eindruckhärte
Rosival	Schleifhärte
Shore	Rückprallhärte

Als „hart“ würde man dann ein Gestein mit hoher Druckfestigkeit, das auch einen hohen Gehalt an harten Mineralen aufweist, bezeichnen. Die häufig verwendeten Bezeichnungen wie „hart“ und „weich“ dienen nur zur allgemeinen Charakterisierung der Gesteine.

Für Minerale und Gesteine gibt es zahlreiche Härteprüfverfahren (siehe Tabelle 2-8). Die Stellung verschiedener Härteskalen zueinander zeigt Anlage 9. Die Ritzhärte (Prüfung nach Mohs) und die Eindruckhärte (Prüfung nach Vickers, Brinell, Rockwell, Knoop) werden allerdings vornehmlich zur Charakteristik von Mineralen verwendet. Obwohl verschiedene Ermittlungsverfahren zur Härteprüfung existieren, ist die Schleifhärte nach Rosiwal besonders geeignet.

Schleifhärte nach Rosiwal

Bei einer Art der Härteprüfung wird der Widerstand einer Probe gegen das Abschleifen benutzt. Diese wird als Schleifhärte nach Rosiwal [109, 110] bezeichnet, kann aber auch als Schleiffestigkeit definiert werden. Die Schleiffestigkeit ist ein Maß für die Abrasivität eines Gesteins. Die Abrasivität eines Gesteins beeinflusst entscheidend das Verschleißverhalten von Gewinnungs- und Aufbereitungswerkzeugen [14].

Die Abrasivität eines Gesteins ist von verschiedenen Parametern abhängig. Zu ihnen gehören der Gehalt an schleifscharfen Mineralien, die Struktur und Textur, der Verwitterungsgrad oder auch hydrothermale Einflüsse.

Obwohl Quarz mit seiner Mohshärte von 7 und seiner weiten Verbreitung in Gesteinen als besonders abrasives Mineral gegenüber Werkzeugen gilt, sind auch alle anderen Minerale mit einer Härte größer als Stahl als verschleißrelevant anzusehen. Darüber hinaus dürfen jedoch auch Minerale mit geringerer Härte aufgrund ihrer Schleifwirkung nicht völlig außer Acht gelassen werden. Diese Einflussgrößen können mit Hilfe des äquivalenten Quarzanteils beschrieben werden. Dabei ist aber zu beachten, dass die Gesamtheit eines Gesteinsgefüges anders reagiert, als die Summe der Einzelminerale.

Die Berechnung eines äquivalenten Quarzanteils wird als die Gesamtheit der den Verschleiß bestimmenden Minerale als Summe ihrer Prozentanteile multipliziert mit der Schleiffestigkeit bezogen auf Quarz gemäß Gleichung 4 vorgenommen [134].

$$\ddot{a}Qu = \sum_{i=1}^n A_i \cdot S_{HR} \quad (4)$$

mit	$\ddot{a}Qu$	äquivalenter Quarzanteil	[%]
	A_i	Anteil der Mineralart	[%]
	S_{HR}	Schleifhärte nach Rosiwal in Prozent von Quarz	[-]
	n	Anzahl aller Mineralarten	[-]

Bei der Bestimmung der Schleiffestigkeit (Schleifhärte) der Minerale bezieht man sich immer noch auf die Arbeiten von Rosiwal [109, 110].

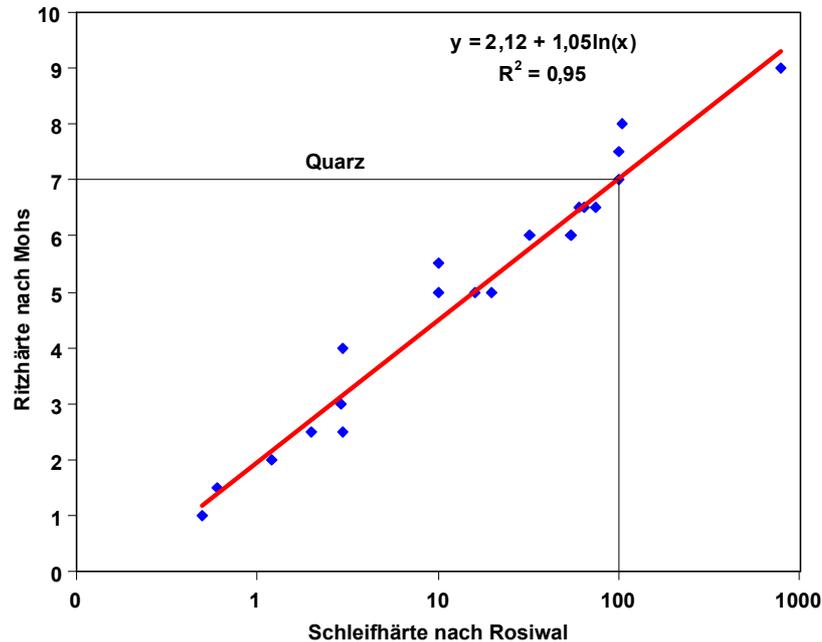


Abbildung 2-23: Zusammenhang zwischen Schleifhärte nach Rosiwal und Ritzhärte nach Mohs (aus [134])

Den Zusammenhang zwischen Ritzhärte nach Mohs und Schleifhärte nach Rosiwal stellt Abbildung 2-23 dar. Mit dem Diagramm lassen sich auch von solchen Mineralen die Schleifhärten abschätzen, die nicht im Versuch bestimmt worden sind. Die Streuung kommt dabei durch die Mischkristallbildung einzelner Mineralfamilien, die unterschiedliche Härte entlang einzelner Spaltflächen sowie durch Unterschiede in der Verwitterungs- oder Zersetzungsresistenz der Minerale zustande. In der Anlage 10 sind die verwendeten Schleifhärten nach Rosiwal und Ritzhärten nach Mohs aufgeführt.

2.2 Qualitative Anforderungen an die Aufbereitungsprodukte

Das Gestein im Steinbruch kann z. B. durch Bohren und Sprengen aus dem Gebirge gelöst werden. Mit der Gewinnung des Gesteines im Steinbruch beginnt der Herstellungsprozess. Voraussetzung ist eine ergiebige Lagerstätte, die sehr hohen Anforderungen genügen muss. Neben guten technischen Gesteinseigenschaften spielt die Umweltverträglichkeit für den Abbaubetrieb eine wichtige Rolle. Die wirtschaftliche Herstellung von Schotter und Splitt erfolgt in Zerkleinerungs- und Klassieranlagen. Es ist ein möglichst hoher Mengendurchsatz notwendig, um eine Kostendeckung des hohen Kapitalaufwandes zu erwirtschaften.

In Abbildung 2-24 ist ein Beispiel für die Stoffwandlung eines Haufwerkes zur Herstellung verkaufsfähiger Qualitätsprodukte dargestellt. Das gewonnene Gestein wird in der Vorklassierung (1) vom Feingut (Erde, lehmige Bestandteile) getrennt. Der Überlauf gelangt in den Vorbrecher (2). In Abhängigkeit von der Materialart werden an dieser Stelle Backen-, Kegel-, Walzen-, Prall- oder Hammerbrecher eingesetzt. Der Austrag des Vorbrechers wird in mehrere Fraktionen klassiert. Das Mittelgut (z. B. 80/250 mm) wird dem Nachbrecher (3) und das Feingut (z. B. <80 mm) über Fördereinrichtungen der Siebanlage (4) zugeführt. Als Nachbrecher werden je nach Gesteinsart Backen-, Prall- oder Kegelbrecher installiert. In der Siebanlage (4) wird das Brechprodukt in verschiedene Körnungen abgesiebt und in Silos (5) gelagert. In einer weiteren Brechstufe werden Splitt und Schotter zu Edelbrechsand und Edelsplitt heruntergebrochen. Aus den Edelsplittbrechern (Prall- oder Kegelbrecher) (6) gelangt das Brechgut in die Siebanlage (7), wo es in verschiedene Körnungen abgesiebt und in Silos (8) bevorratet wird. Die größeren Körnungen können bei Bedarf weiter heruntergebrochen werden. Die Fertigprodukte werden mit den Fördereinrichtungen (9) verladen und bei den Produktanwendern zur Herstellung von Beton, Asphalt o. Ä. eingesetzt.

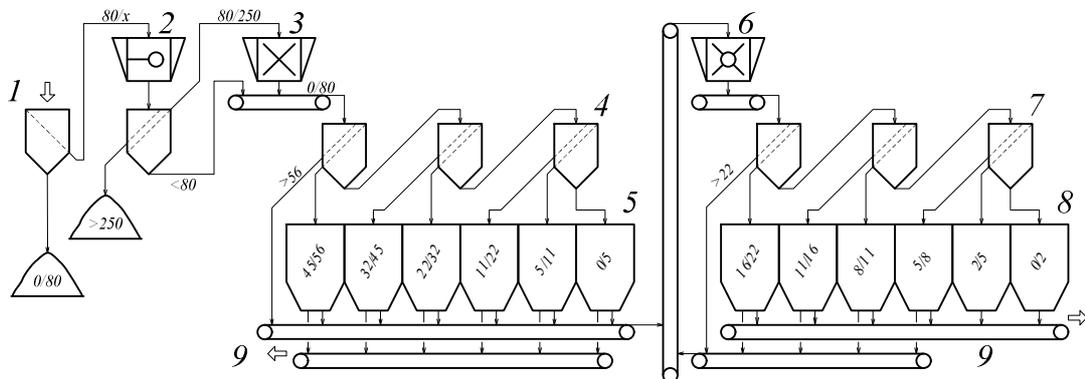


Abbildung 2-24: Beispiel einer typischen Schotter- /Splittanlage.

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| 1 – Vorklassierung | 5 – Silos |
| 2 – Vorbrecher | 6 – Prallbrecher |
| 3 – Nachbrecher | 7 – Siebanlage |
| 4 – Siebanlage | 8 – Silos |
| | 9 – Fördereinrichtung |

Die Natursteinprodukte, die in Aufbereitungsanlagen in bestimmten Lieferkörnungen hergestellt werden (Tabelle 2-9), haben ihre Einsatzgebiete in vielen Industriebereichen.

Tabelle 2-9: Lieferkörnungen von Natursteinprodukten [27]
(Edelsplitt und Edelbrechsand erfüllen gegenüber Splitt und Brechsand zusätzliche Anforderungen nach den Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau [136])

Natursteinprodukt	Lieferkörnungen
Schotter	31,5/45 ; 45/56 mm
Splitt	5/11,2 ; 11,2/22,4 ; 22,4/31,5 mm
Edelsplitt	2/5 ; 5/8 ; 8/11,2 ; 11,2/16 ; 16/22,4 mm
Brechsand	0/5 mm
Edelbrechsand	0/2 mm
Gesteismehl (Füller)	0/0,09 mm
Korngestufte Mineralstoffgemische	0/31,5 ; 0/45 ; 0/56 mm (z. B. Tragschichtmaterial)

Je nach Einsatzbereich bestehen folgende spezifische Qualitätsanforderungen: Druckfestigkeit (DIN 52105) [77], Frostbeständigkeit (DIN 52104) [76], Polierresistenz (DIN 52108) [79], Verwitterungsbeständigkeit (DIN 52106) [78].

Spezielle Qualitätsanforderungen spielen dabei eine entscheidende Rolle. Diese Anforderungen definieren die gebrauchswertbestimmenden Eigenschaften von Zerkleinerungsprodukten wesentlich. Zu diesen gehören:

- Eigenschaften, wie Festigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Schlag, Verwitterung, Polieren oder Hitzebeanspruchung. Die entsprechenden Normen beschreiben die Beurteilungsgrundlagen dieser Parameter [78, 82, 85, 86, 87, 136]
- Eigenschaften, wie Korngrößenverteilung, Kornform oder Anteil des gebrochenen Korns. Für die Bestimmung dieser Kennzeichen werden diesbezügliche Prüfmethoden vorgesehen [66, 88, 89, 90, 124]

Die Qualitätsanforderungen an die Aufbereitungsprodukte sind geregelt in den „Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau“ (TL Min-StB 2000) sowie den „Technischen Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau“ (TP Min-StB).

Die Technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB) [136] bestimmen die Anforderungen an die Korngrößen und Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen. Dazu werden u. a. die zulässigen Höchstwerte für Unterkorn- und Überkornanteile festgelegt.

Zwischen den Eigenschaften von Gesteinskörnungen bestehen vielfältige Wechselbeziehungen. So wird z. B. der Widerstand gegen Zertrümmerung von der Zug- und

Druckfestigkeit des Ausgangsgesteins und der Kornform beeinflusst. Hierbei ist anzumerken, dass der Widerstand gegen Zertrümmerung und die Kornform von gebrochenen Gesteinskörnungen auch von der Wahl des Brechers bzw. der Brechereinstellung abhängig sind. Genauso kann durch die Wahl des Aufgabeguts die Bruchflächigkeit und somit die Kornrauigkeit beeinflusst werden. In ähnlicher Weise können auch andere Eigenschaften durch gezielte technische Maßnahmen verbessert werden.

Neben den technologischen Gesteinsprüfungen, wie z. B. Schlag- und Frost-Tau-Wechsel-Versuch, erhält man oft bereits aus den petrographischen Untersuchungen der Gesteine und aus der Beurteilung der Gewinnungsstätten wesentliche Anhaltspunkte über die voraussichtliche Eignung der Gesteine. So ist beispielsweise Kalkstein meist wenig resistent gegen eine Polierbeanspruchung durch Gummireifen. Enthält Kies oder Sand reaktionsfähige Kieselsäure, so kann es im Beton mit bestimmten Zementen zu Treiberscheinungen kommen. Pyriteinschlüsse im Korn oder Einlagerungen von quellfähigen Tonmineralen können ebenfalls schädlich sein. Glimmer im Sand setzt die Festigkeit und die Beständigkeit des Betons herab.

Eine Gesteinskörnung muss je nach Verwendungszweck und Aufgabe hinsichtlich Kornzusammensetzung, Reinheit, Festigkeit, Kornform, Widerstand gegen Frost und Abnutzung besonderen Anforderungen genügen. Die Gesteinskörnung darf unter der Einwirkung von Wasser nicht erweichen, sich nicht zersetzen und mit den anderen Bestandteilen des Baustoffgemisches keine schädlichen Verbindungen eingehen.

Um sicher zu stellen, dass die verwendeten Natursteinmaterialien für den vorgesehenen Zweck geeignet sind, dienen genormte Prüfverfahren. Im Nachfolgenden wird ein Überblick über einige wichtige Naturstein-Eigenschaften und deren Prüfung gegeben:

Rohdichte

- Ein Gestein setzt sich zusammen aus festen Bestandteilen und einer flüssigen und/oder gasförmigen Porenfüllsubstanz. Bezüglich der Gesteinsdichte wird zwischen der Korndichte (Reindichte) und der Raumdichte (Rohdichte) unterschieden. Die Korndichte ergibt sich aus der Trockenmasse der Festsubstanz bezogen auf das Volumen der Festsubstanz. Die Raumdichte ist die Masse der festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteile eines Gesteins bezogen auf das Gesamtvolumen eines Gesteins. In der DIN 52 102 [73] wurden 6 Verfahren zur

Rohdichtebestimmung und ein Verfahren zur Ermittlung der Dichte bei Gesteinskörnungen und Naturstein genormt.

Porosität

- Die Porosität bezeichnet den Grad der Raumerfüllung bzw. den Hohlraumanteil, der von den Phasen (Gase, Flüssigkeiten) eingenommen werden kann (siehe Abschnitt 2.1.2.2). Die wahre (absolute) Porosität ist der Anteil des Volumens der offenen und geschlossenen Poren, die mit Wasser oder Luft/Gas gefüllt sein können, bezogen auf das Gesamtvolumen des Gesteins. Die scheinbare (effektive) Porosität ist der Anteil des Volumens der offenen, miteinander verbundenen Poren, die mit Wasser oder Luft/Gas gefüllt sein können, bezogen auf das Gesamtvolumen des Gesteins. Die scheinbare Porosität ist von bautechnischer Bedeutung (z. B. Frostbeständigkeit), da sie den prozentualen Hohlraumanteil des Festgesteins angibt, der mit der freien Oberfläche in Verbindung steht und Wasser aufnehmen kann [20, 106]. Als scheinbare Porosität unter Atmosphärendruck gilt die Wasseraufnahme des Festgesteins. Die scheinbare Porosität ist immer kleiner als die wahre Porosität. In der DIN 52 102 [73] wurde ein Verfahren zur Ermittlung der Gesamtporosität bei Gesteinskörnungen und Natursteinen genormt.

Wasseraufnahme

- Nach DIN 52 103 [74] kann die Wasseraufnahme von Einzelstücken und Gesteinskörnungen unter zwei verschiedenen Umgebungsbedingungen (Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck W_a und Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar W_d) bestimmt werden. Unter Wasseraufnahmefähigkeit versteht man die Wasseraufnahme der Felsgesteine in den Porenräumen, die mit der Gesteinsoberfläche in Verbindung stehen. Sie stellt ein entscheidendes Kriterium für die Verwitterungsbeständigkeit und Frostbeständigkeit dar. Zusammenhängender Porenraum führt in Abhängigkeit von der Porengröße zu einer größeren Wasseraufnahmefähigkeit als in sich abgeschlossene Poren. Die Wasseraufnahmefähigkeit wird auch als scheinbare Porosität bezeichnet. Aus der Differenz der Trockenmasse m_{tr} und dem Gewicht nach Wasserlagerung kann die Wasseraufnahme W_a ermittelt werden. Nach den technischen Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau [136] ist eine ausreichende Widerstandsfestigkeit gegen

Frosteinwirkung gegeben, sofern der massebezogene Wasseraufnahmegrad $W_a < 0,5 \%$ ist.

Frostbeständigkeit

- Frostbeständigkeit ist die Resistenz der Natursteine gegenüber der den Kornverband sprengenden Wirkung des Frostes. Ungünstige Verhältnisse liegen dann vor, wenn das Gestein viele kleine Poren oder einen zusammenhängenden Porenraum mit engen Kapillaren aufweist, so dass beim Übergang von Wasser in Eis ein Druckausgleich in den Poren nicht oder nur langsam erfolgen kann. Prüfkriterien für die Frostbeständigkeit sind der Wassersättigungswert S (siehe DIN 52103 [74]) und der Frost-Tau-Wechsel-Versuch (siehe DIN 52104-1, 52104-3 [75, 76]). Der Wassersättigungswert S ist das Verhältnis der Wasseraufnahme W_a und der Wasseraufnahme W_d . Es gelten dabei folgende Richtwerte für den Sättigungswert [94]: $< 0,75$ – verwitterungs- und frostbeständig; $0,75 \dots 0,90$ – zweifelhaft, gegebenenfalls weitere Untersuchungen erforderlich; $> 0,90$ nicht verwitterungs- und frostbeständig. Der Frost-Tau-Wechsel-Versuch [75, 76] ist ein standardisiertes Verfahren, das sich auf die Bestimmung des Gewichtsverlustes von Gesteinsproben nach 25maligem Einfrieren und Auftauen sowie auf eine visuelle Bewertung ihres Zustandes nach den einzelnen Gefriervorgängen stützt. Nach der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung wird das Prüfgut auf dem nächst kleineren Prüfsieb nach der Siebfolge der TP Min StB 94 [138], das auf die untere Prüfkorngröße folgt, nass gesiebt. Der Rückstand wird 24 Stunden lang bei 110°C getrocknet und gewogen. Der Durchgang des Prüfgutes nach dem Frost-Tau-Wechsel durch das nächst kleinere Prüfsieb wird als Absplitterung bezeichnet und in Gew.-%, bezogen auf die Einwaage angegeben.

Raumbeständigkeit

- Die Mineralstoffe müssen ausreichend raumbeständig sein. Zu entscheiden ist nach der stofflichen Zusammensetzung. Im Einzelfall ist eine Raumbeständigkeitsprüfung für Mineralstoffe nach TL Min-StB Teil 4.4 Abschnitt 4.4.2 [136] vertraglich zu vereinbaren. In diesem Fall gelten folgende Anforderungen: Nach dem Kochversuch dürfen die Absplitterungen 1 Gew.-% nicht überschreiten. Wird dieses Kriterium überschritten, darf der Unterschied zwischen den Schlagzertrümmerungswerten $SD 10$ bzw. $SZ 8/12$ vor und nach dem Kochversuch bei Schotter bzw. Splitt nicht größer als 5 Gew.-%, bei Edelsplitt nicht größer als 3

Gew.-% sein Basalt kann ein Mineral (Analcim) aufweisen, das sich unter Einfluss von Luftfeuchtigkeit, Sonnenlicht und Wärme bei Volumenvergrößerung umwandeln kann. Dabei wird das Gefüge des Gesteins geschädigt und es treten Risse auf, die den vollständigen Zerfall des Kornes bewirken können.

Hitzebeständigkeit

- Bei der Hitzeprüfung werden die Absplitterungen in Gew.-% nach der Hitzebeanspruchung direkt bzw. die Differenz gemessen, die sich zwischen der normalen Schlagzertrümmerung und der Schlagzertrümmerung nach der Hitzebeanspruchung ergibt. Sie dürfen 3 Gew.-% nicht übersteigen (siehe TP Min-StB [138]).

Druckfestigkeit

- In der DIN 52105 [77] werden Würfel und Zylinder als Probekörper festgelegt. Für würfelförmige Probekörper wird eine Kantenlänge von 70 mm (± 5 mm) vorgegeben. Für zylinderförmige Probekörper wird eine Höhe und ein Durchmesser von 70 mm (± 5 mm) gefordert. Zur Prüfung der Druckfestigkeit eines Gesteins wird ein (kubischer oder zylindrischer) Steinkörper einer einachsigen, über den Probenquerschnitt möglichst gleichmäßig verteilten, exakt zentrierten Druckbelastung bis zum Bruch unterworfen. Die Druckfestigkeit ist dann der Quotient aus Höchstkraft und Anfangsquerschnitt (in kp/cm^2 bzw. N/cm^2 oder N/mm^2).

Polierresistenz

- Eine sehr spezielle Form der Ermittlung des Abriebwiderstandes ist die Ermittlung der Polierresistenz. An der Oberfläche von Straßendecken in gebundenen Bauausführungen, wo scharfkantige Splitte hydraulisch- oder bitumengebunden eingebettet sind, ist sie von großer Bedeutung für den Erhalt der Griffigkeit der Fahrbahndecke. In Deutschland erfolgt die Prüfung zur Beurteilung des Polierwiderstandes von Mineralstoffen gemäß TP Min-StB 94 Teil 5.5.1 an der Splittkörnung 8/10 mm durch Ermittlung des Polished Stone Value (PSV) [138]. Bisher wurde die Prüfung nach DIN 52108 [79] mit der Böhme-Scheibe durchgeführt. Die Ermittlung des Dicken- bzw. Volumenverlustes erfolgte dabei nach 16 Schleifperioden, bezogen auf 50 cm^2 Prüffläche.

Kornform

- Nach EN 933-4 [89] wird ein Korn als kubisch angesehen, wenn das räumliche Ausdehnungsverhältnis der größten Abmessung (Kornlänge) zur kleinsten Abmessung (Korndicke) das Verhältnis 3:1 nicht überschreitet. In der DIN 4226 Teil 1 [1] ist dazu festgelegt, dass der Anteil der kubischen Körner für die Fraktionen über 4 mm mindestens 50 Gew.-% für Einfachsplitt und mindestens 80 Gew.-% für Edelsplitt betragen muss. Diese Anforderung kann i. d. R. nach Augenschein beurteilt werden, in Zweifelsfällen ist nach DIN 52 114 [80] zu verfahren. Hier wird zur Beurteilung ein Kornformmessschieber herangezogen, der ein vorgegebenes Messweitenverhältnis hat. Es werden jeweils ca. 300 Körner mit einem Mindestdurchmesser von 4 mm geprüft. Die Verfahren sind auf Kies, Splitt und Schotter anwendbar.

Schlagfestigkeit

- Mit dem Schlagversuch wird die Widerstandsfähigkeit von Gesteinen gegen Zertrümmerung an einer ausgewählten Kornklasse geprüft. Die Zertrümmerung erfolgt durch 20 Schläge aus 420 mm Höhe im Schlaggerät nach DIN 52115 [81]. Der Grad der Zertrümmerung wird durch Prüfsiebung mit festgelegten Analysensieben festgestellt. Der Schlagversuch an Schotter wird in DIN 52115-2 geregelt [82]. Dieser Wert wird als SD 10 bezeichnet. Splitte und Kiese der Kornklassen 8/12,5 mm werden nach DIN 52115-3 geprüft [83]. Dieser Wert wird als $SZ_{8/12}$ bezeichnet. Der Schlagzertrümmerungswert ist als oberer Grenzwert in Gew.-% für den Straßenbau festgelegt. Solche Grenzwerte sind auch in den TL Min-StB 2000 zu finden [136].

Los Angeles-Prüfung

- Die Los Angeles-Prüfung liefert ein Maß für die Kornzerkleinerung von Mineralstoffen infolge des Zusammenwirkens verschiedener Beanspruchungen wie Abrieb, Schlag und Mahlen in einer rotierenden Stahltrommel mit einer festgelegten Anzahl von Stahlkugeln, die von der Korngrößenverteilung des Prüfgutes abhängt [7]. Die zu untersuchende Probe und die Reibmittelladung werden in die Los Angeles-Trommel gefüllt. Im Anschluss werden 500 Umdrehungen mit einer Geschwindigkeit von 31 bis 33 min^{-1} ausgeführt. Der Los Angeles-Koeffizient (LA) wird nach DIN EN 1097-2 [85] bestimmt und errechnet sich nach Absieben des Rückstandes auf einem 1,6 mm-Sieb und dessen Gewichts-

ermittlung. Durch die Subtraktion des Gewichtes des Rückstandes R vom Gewicht des Prüfgutes vor dem Versuch, der Einwaage E, ergibt sich das Gewicht des Verlustes. Gibt man diesen Verlust als prozentualen Wert von E an, so erhält man den gesuchten LA-Koeffizient für die jeweilige geprüfte Kornzusammensetzung.

Reinheit (Gehalt an abschlämmbaren Bestandteile)

- Unter abschlämmbaren Bestandteilen versteht man im Allgemeinen tonige Stoffe oder sehr feines Gesteinsmehl $<0,063$ mm. Diese Bestandteile sind nicht schädlich, solange sie in nur geringen Mengen, im Zuschlag gleichmäßig verteilt, vorliegen. Diese Stoffe können schädlich wirken, wenn sie in großen Mengen vorhanden sind, am Gesteinskorn fest anhaften und sich nicht abreiben lassen oder als Klumpen bei der Betonaufbereitung nicht völlig zerrieben werden. Der Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen wird mit dem Auswaschversuch bestimmt. Der ebenfalls in DIN 4226-3 [69] beschriebene Absetzversuch liefert nur Anhaltswerte. Beim Auswaschversuch wird eine, je nach Korngruppe bzw. Lieferkörnung unterschiedlich große Probemenge auf dem Sieb 0,063 mm mit Wasser gespült. Aus der Massendifferenz vor und nach dem Spülvorgang kann der Anteil der Bestandteile $< 0,063$ mm bestimmt werden. Beim Absetzversuch wird eine Probe des Zuschlags mit Wasser versetzt und in einem Messzylinder geschüttelt. Die Durchführung des Versuchs bei Zuschlag mit dichtem und porigem Gefüge unterscheidet sich lediglich hinsichtlich der Einwaage bedingt durch die geringere Dichte des Leichtzuschlags. Die Dicke der abgesetzten Schicht bis zum scharfen Feinsand wird abgelesen. Das Gewicht der abgesetzten Bestandteile ergibt sich aus dem Volumen und einer je nach Absetzzeit unterschiedlich angenommenen Dichte. Der Absetzversuch ist nur für Korngruppen bis 4 mm Größtkorn geeignet. Die Anforderungen der DIN 4226 für den Gehalt an abschlämmbaren Bestandteilen sind für Zuschläge mit dichtem und porigem Gefüge unterschiedlich. Eine Einschränkung der beiden Versuche bzgl. der Anwendung auf Recyclingmaterialien scheint nicht gegeben.

Organische Stoffe

- Stoffe organischen Ursprungs können in feinverteilter Form das Erhärten des Betons oder Mörtels stören. In körniger Form, z. B. als braunkohleartige Teile, können sie Verfärbungen oder durch Quellen Absprengungen an der Oberfläche

hervorrufen. Organische Stoffe in feinverteilter Form werden nach DIN 4226-3 [69] bzw. DIN 52 099 [71] mit dem Natronlauge-Test nachgewiesen. Der Versuch ist für Zuschlag mit einem Größtkorn < 8 mm vorgesehen. Eine Zuschlagprobe wird mit 3 %iger Natronlauge versetzt und anhand der sich einstellenden Verfärbung bewertet. Ist die Lösung farblos bis gelb, so kann mit großer Wahrscheinlichkeit das Vorhandensein wesentlicher Mengen von Stoffen organischen Ursprungs ausgeschlossen werden. Bei bräunlicher bis schwarzer Verfärbung ist davon auszugehen, dass ihr Gehalt höher ist. Dann ist zusätzlich zu prüfen, ob die Reaktion nicht von wenigen groben Stücken hervorgerufen wird. Die Aussagefähigkeit des Natronlauge-Tests ist umstritten, da die Korngröße der organischen Bestandteile und die Art des Huminstoffträgers einen unterschiedlichen Einfluss auf die Verfärbung der Lösung haben. Eine Abschätzung der Schädigung und des Festigkeitsverlustes im Beton kann aufgrund der Verfärbung allein nicht vorgenommen werden. Quellfähige organische Bestandteile können aufgrund ihrer geringeren Dichte durch Aufschwimmen in einer schweren Flüssigkeit, z. B. in einer Zinkchloridlösung, bestimmt werden. Dieses Verfahren ist in DIN 4226-3 [69] und auch in DIN 52 099 [71] genormt. Die Anforderungen der DIN 4226-1 [67] an Zuschlag hinsichtlich des Gehalts an quellfähigen, organischen Stoffen ist unabhängig von den Gefügeeigenschaften. Bis zu einem Korndurchmesser von 4 mm darf der Anteil 0,5 Gew.-%, über 4 mm Durchmesser höchstens 0,1 Gew.-% betragen.

Erhärtungsstörende Stoffe

- Bei Verdacht auf Stoffe, die die planmäßige Erhärtung des Betons stören können, wie z. B. Zucker oder lösliche Salze, ist eine Eignungsprüfung nach DIN 4226-3 [69] durchzuführen. Hierzu werden Probekörper mit einer festgelegten Rezeptur zum einen mit Zuschlag, dessen Qualität erwiesen ist, und zum anderen mit dem zu prüfenden Zuschlag hergestellt. Je nach Korngrößenbereich unterscheiden sich die Probekörperabmessungen und die Rezeptur. Nach festgelegten Zeiträumen wird die Druckfestigkeit der Proben ermittelt. Ist die Druckfestigkeit des mit dem zu untersuchenden Zuschlag hergestellten Betons nur um höchstens 15% geringer als die des Vergleichbetons, so kann von einer Eignung des Zuschlages ausgegangen werden.

Schwefelverbindungen

- Schwefelverbindungen können in gewissen Mengen und unter besonderen Bauwerksverhältnissen zu Treiberscheinungen und Festigkeitsverlusten führen. Sie sind vor allem schädlich, wenn sie im Feinzuschlag enthalten und wasserlöslich oder oxidierbar sind, wie z. B. Gips oder Pyrit. In DIN 4226-3 [69] wird nach der Behandlung der Probe mit Salzsäure der Sulfatgehalt als Bariumsulfat bestimmt und als SO_3 -Gehalt, auf den Zuschlag bezogen, in Gew.-% angegeben. Die Bestimmung des Gehalts an Schwefelverbindungen wird zwischen der Bestimmung der wasserlöslichen Sulfate, der Bestimmung des Gesamtschwefels, der Bestimmung der säurelöslichen Sulfate und der Bestimmung der säurelöslichen Sulfide unterschieden. Bei der Bestimmung der wasserlöslichen Sulfate wird der Schwefel als Bariumsulfat ausgefällt und als SO_3 angegeben. Bei der Bestimmung des Gesamtschwefelgehaltes wird die Probe vorher mit Salpetersäure behandelt, Schwefel als Bariumsulfat gefällt, aber als Schwefel (S) in Gew.-% angegeben. Die Bestimmung des Gehaltes an säurelöslichen Sulfaten ist identisch mit dem Verfahren aus DIN 4226-3 [69]. Die mengenmäßige Bestimmung säurelöslicher Sulfide geschieht über die Ausfällung in einer ammoniakalischen Zinksulfatlösung. Das Ergebnis wird in Gew.-% Schwefel angegeben. Nach DIN 4226-1 und -2 [67, 68] ist der zulässige Gehalt an SO_3 bei Zuschlag mit dichtem Gefüge, wie auch bei Leichtzuschlag, auf 1 Gew.-% beschränkt.

Stahlangreifende Stoffe

- Um den Korrosionsschutz der Bewehrung zu gewährleisten, dürfen im Zuschlag und im Beton keine größeren Mengen an Salzen, wie Nitrate und Halogenide, enthalten sein. Der Gehalt an wasserlöslichem Chlorid darf, bestimmt nach DIN 4226-3 [69], bei Zuschlag für Beton, Stahlbeton und Spannbeton mit nachträglichem Verbund 0,04 Gew.-% und bei Spannbeton mit sofortigem Verbund 0,02 Gew.-% nicht übersteigen. Die Bestimmung des Chloridgehaltes erfolgt potentiometrisch an einer in Wasser extrahierten Probe über die Bestimmung des Verbrauchs einer Silbernitratlösung. Der Chloridgehalt (wasserlösliches Chlorid) wird auf das Gewicht des trockenen Zuschlags bezogen angegeben.

Alkali-Kieselsäure-Reaktion

- Bestimmte Gesteinskörnungen können u. a. mit den in der Porenflüssigkeit des Betons vorhandenen Alkalien reagieren. Unter ungünstigen Bedingungen und in

Anwesenheit von Feuchtigkeit kann dies zu Treiberscheinungen und nachfolgender Rissbildung oder Zerstörung des Betons führen. Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion tritt zwischen Alkalien aus dem Zement und aus Zusatzmitteln und/oder Zusatzstoffen und bestimmten Formen der Kieselsäure aus der Gesteinskörnung auf. Bei noch nicht erschlossenen und nicht erprobten Vorkommen, die Gestein mit gefährdender, alkalilöslicher Kieselsäure enthalten, oder bei denen der Verdacht hierauf besteht, ist die Gesteinskörnung nach der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ Teil 1-3 (Ausgabe Dezember 1997) [107] zu beurteilen.

3 Präzisierung der Aufgabestellung

Die Analyse des wissenschaftlich-technischen Standes zeigte, dass der gegenwärtige Stand der mineralogisch-petrographischen Gesteinscharakterisierung in vielen Fällen nur eine verbale Gefügebeschreibung erlaubt. Deshalb besteht das Ziel der vorliegenden Arbeit in der Entwicklung einer neuen mathematisch-petrographischen Methode zur Charakterisierung der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften mit Hilfe quantitativer Gesteinskennwerte. Bisherige Zusammenstellungen dieser Kenngrößen (z. B. Amstutz und Giger [3], Blaschke [10, S. 1978ff.], Ohser und Lorz [91], Saltykov [117], Wimmener [153, S. 20ff.]) haben allerdings entweder den Nachteil, nicht ausreichend zur Beschreibung eines anisotropen räumlichen Gefüges oder zu abstrakt im Hinblick auf eine Korrelation mit den beschreibenden formalen Gefügemerkmalen zu sein. Deshalb werden in dieser Arbeit mit Hilfe der stereologischen Methoden quantifizierbare Gefügemerkmale, die sich an die mathematisch-petrographische Charakterisierung der Gesteine anlehnen, definiert. Diese Vorgehensweise wird gewählt, um die Anschaulichkeit der ermittelten geometrischen Merkmale zu ermöglichen und die Verständigung zwischen einem Geologen und einem Ingenieur mit ihren jeweiligen Begriffswelten zu vereinfachen [117, 147, 148].

Aus der Bewertung des wissenschaftlich-technischen Standes ergeben sich daher nachfolgende Schwerpunkte, die zur Entwicklung und Testung der neuen mathematisch-petrographischen Methode zu bearbeiten sind:

- Festlegung des Verfahrensablaufs zur Probenahme, -anzahl sowie Dünnschliffherstellung.
- Definition, Auswertung und Ermittlung von quantitativen Gefügekennwerten durch Anwendung der Flächen-, Linien- und Punktmessverfahren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Quantifizierung der Eigenschaften der Gesteinsgefüge die mathematischen Kennzahlen im dreidimensionalen Raum zu ermitteln sind.
- Die Anwendbarkeit der neuen mathematisch-petrographische Methodik ist mit verschiedenen Gesteinstypen (Magmatite, Sedimentite und Metamorphite) zu untersuchen. Die Ergebnisse der quantifizierten Gefügebewertungen werden in einer Gesteinsdatenbank zusammengefasst. Durch eine formale Interpretation bzw. durch Anwendung mathematisch-statistischer Methoden (z. B. Neuronale

Netze, multiple Regressions- und Korrelationsanalyse) soll die Anwendbarkeit der neuen Gesteinskennwerte zur Prognostizierung des Gesteinseinflusses auf relevante Produkteigenschaften (Produktqualität) und Systemkenngrößen (optimale Maschinenauswahl) nachgewiesen werden. Insbesondere soll dabei an ausgewählten Anwendungsbeispielen überprüft werden, inwieweit sich Zusammenhänge zwischen relevanten quantitativen Gesteinskennwerten und den Produkteigenschaften (z. B. Korngrößenverteilung, Kornform) bzw. Systemkenngrößen (z. B. spezifischer Arbeitsbedarf, spezifischer Verschleiß) nachweisen lassen.

Nachfolgend werden die Entwicklungsschritte für die neue mathematisch-petrographische Methode zur quantifizierten Gesteinscharakterisierung ausführlich dargestellt.

4 Entwicklung einer neuen Methode zur Charakterisierung der Festgesteine durch Anwendung der quantitativen Gefügeanalyse

Grundlage der mathematischen Auswertung sind die Methoden der quantitativen Gefügeanalyse (siehe Abschnitt 4.2.2). Die quantitative Gefügeanalyse ist seit mehreren Jahrzehnten ein wichtiger Bestandteil zur Kennzeichnung von Werkstoffen. Die Anwendung der Stereologie und die zur Datenerfassung für die Ermittlung stereologischer Kennwerte notwendige Bildanalyse sind nicht auf die Werkstoffkunde und Werkstofftechnik beschränkt. Mit denselben Verfahren wird z. B. auch in der Geologie und Mineralogie der Aufbau von Gesteinen und Mineralen analysiert [2, 3, 4, 30, 40, 102].

Die ersten praktischen Versuche, den geometrischen Aufbau von Stoffen durch Zahlenwerte zu charakterisieren, stammen aus der Mitte des 19. Jahrhunderts. Anfang des 20. Jahrhunderts griffen die Werkstoffkundler die Verfahren der Volumen- und Größenbestimmung auf, entwickelten sie weiter und wandten sie erfolgreich in ihren Forschungsarbeiten an. In den dreißiger Jahren wurden auch komplizierte Probleme, wie beispielsweise die Bestimmung der Größenverteilung von Zellen und Körnern, unter Annahme einfacher geometrischer Modelle, gelöst. Dabei waren Wissenschaftler aus den verschiedensten Fachrichtungen beteiligt [21, 34, 111, 118, 119, 120].

Ab 1950 wurden die theoretischen Grundlagen der stereometrischen Analyse weitgehend vervollständigt und der Bau von Hilfsgeräten zur Datenbeschaffung in stärkerem Umfang aufgenommen. Aus dieser Zeit stammt auch das erste Lehrbuch über Stereometrische Metallographie von Saltykov [117].

Die quantitative Gefügeanalyse ist ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Methoden zur Untersuchung der Geometrie von Gefügebestandteilen. In vielen Fällen besteht das Ziel darin, den Zusammenhang zwischen der Gefügebildung einerseits und den Eigenschaften des Gesteines oder den Entstehungsbedingungen andererseits zu untersuchen. Merkmale der Gefügebildung werden zur Gliederung von Gesteinen herangezogen. Die Methoden der Gefügebewertung sind seit langem Bestandteil der Gesteinsforschung, der Gesteinsprüfung und der Produktionsüberwachung. Die zunehmende Breite der Anwendungsmöglichkeiten (Petrographie, Mineralogie, Metallographie, Untersuchung der Struktur von Baustoffen usw.) und die Entwicklung der theoretischen Grundlagen (stochastische Geometrie, digitale Bildverarbeitung) haben dazu geführt,

dass die quantitative Gefügeanalyse in den vergangenen Jahren zu einem eigenständigen Wissenschaftsgebiet geworden ist [19, 38, 48, 91, 125].

Der Ansatz zur mineralogisch-petrographischen Charakterisierung einer Gesteinsprobe basiert normalerweise auf die mikroskopischen Untersuchungen von Dünn- oder Anschliffen. Da gesteinsbildende Minerale und Gesteinsgefüge zumeist eine sehr komplexe, dreidimensionale Geometrie aufweisen, ist die aus einer relativ geringen Anzahl derartiger Schnittflächen entnehmbare Information häufig unzureichend, um die Minerale und die Gefüge geologischer Materialien räumlich quantitativ charakterisieren zu können. Die dreidimensionale Rekonstruktion von Mineralen und Gesteinsgefügen ermöglicht eine quantitative Beschreibung der für geologische Materialien typischen komplexen räumlichen Strukturen. Die Ergebnisse der mathematisch-petrographischen Gesteinscharakterisierung sind Voraussetzung dafür, um mit Hilfe der mathematisch-statistischen Modellierung (z. B. multiple Regressions- und Korrelationsanalyse, Neuronale Netze) die Zusammenhänge zwischen relevanten Gesteinskennwerten und relevanten Produkteigenschaften bzw. Systemkenngrößen prognostizieren zu können.

Die quantitative Gesteinsanalyse hat die Aufgabe, die Gesteinsgefüge so zu erfassen, dass ihr Einfluss auf technische Maßnahmen beurteilt werden kann. Für diese Zielstellung sind Erkenntnisse und Methoden der Stereologie zu nutzen. Die Untersuchungen können verschiedene Bereiche umfassen und müssen stets neben Mineralbestand und Diskontinuitäten die Tropie- und Genitätsverhältnisse [118, 119] mit erfassen, da geologische Körper in starkem Maße als inhomogen, anisotrop und diskontinuierlich anzusehen sind.

4.1 Probennahme und Probenpräparation

Die Aussagekraft und Repräsentanz der Gesteinscharakteristika hängt wesentlich von der Entnahme repräsentativer Proben und deren Präparation ab. Bei den Probenahmen handelt es sich zunächst darum, aus sämtlichen Teilen des Steinbruches Proben von allen vorhandenen Abarten des Gesteins zur mikroskopischen Untersuchung zu entnehmen, um auf diese Weise zunächst einen Überblick über die Beschaffenheit der gesamten Lagerstätte zu gewinnen (siehe Abbildung 4-1).

Eingehende und zweckmäßige Vorschriften für die Durchführung der Probenahme von Festgesteinen am Gewinnungsort enthält das Normblatt DIN 52101 [72]. Als geeignete Probengröße dienen Handstücke, aus denen Dünnschliffe zur mikroskopischen Untersu-

chung und Charakterisierung der Gesteine hergestellt werden können. Bei sehr inhomogen aufgebauten Gesteinen (z. B. Gneisen) muss die Probegröße mindestens der eines so genannten Elementarkörpers entsprechen. Als Elementarkörper wird ein Gesteinsbereich von definierter Homogenität in Bezug auf eine bestimmte Eigenschaft des Mikrogefüges bezeichnet [32, 65]. In jedem Falle empfiehlt es sich, die aus den Steinbruchwänden entnommenen Handstücke orientiert zu entnehmen. Es müssen auch vor allem die Entnahmestellen der Proben genau gekennzeichnet werden.

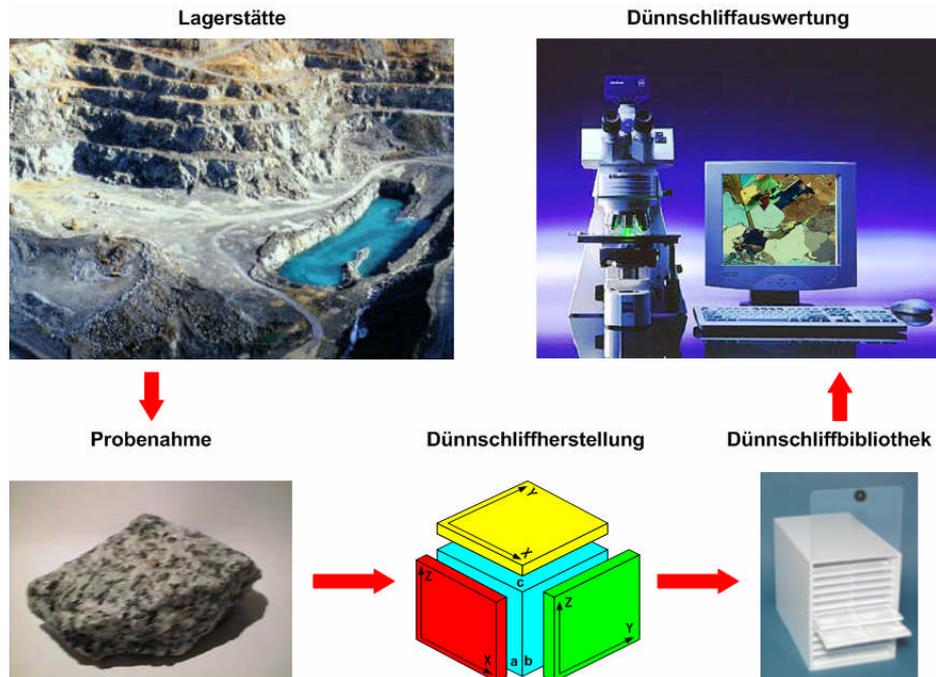


Abbildung 4-1: Verfahrensablauf zur Gesteinsuntersuchung

Die Gefügeanalyse geht dann von einem Gesteinshandstück aus. Um ein räumliches Gefüge beurteilen zu können, müssen pro Handstück drei orthogonal zueinander stehende Dün- oder Anschliffe xy, yz und zx gefertigt werden (siehe Abbildung 4-2).

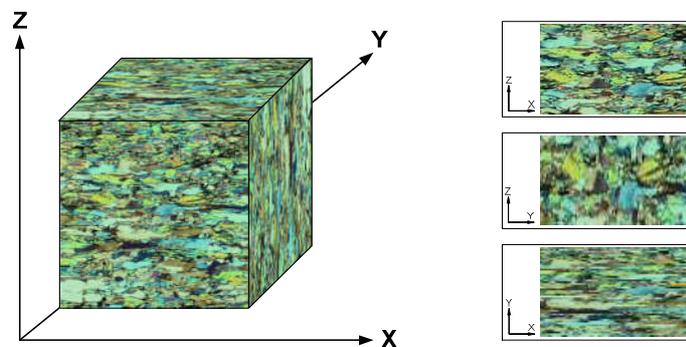


Abbildung 4-2: Verfahrensablauf zur Dünnschliffherstellung

Diese drei Schliffebene spannen das kartesische Bezugskordinatensystem xyz auf. Die Orientierung der Dünnschliffe ist zu beachten und das Bezugskordinatensystem xyz ist auf dem Glasträger aufzubringen. Die so gefertigten Dünnschliffe werden in einer Dünnschliffbibliothek eingeordnet.

Anhand dieser Dünn- oder Ansliffe werden nun die Gefügekennwerte quantitativ mit Hilfe von stereologischen Methoden bestimmt. Der Ablauf dieser Methodik wird vereinfacht im Abschnitt 4.2.2 beschrieben.

4.2 Quantitative Gefügeanalyse

4.2.1 Besonderheiten der Gesteinsanalyse

Die quantitative Gefügeanalyse hat das Ziel, den räumlichen Gefügebau von Gesteinen zahlenmäßig durch exakt definierte Gefügekenngößen zu charakterisieren. Unter dem räumlichen Gefügebau von Gesteinen ist vor allem die Beschreibung der Geometrie von Gefügebestandteilen zu verstehen. Ausgegangen wird dabei von einer optischen Abbildung des Gefüges in Dünn- und Ansliffen [40, 91, 125].

Die Analyse der häufigsten Strukturen und Texturen der wichtigsten Gesteinstypen (Abschnitt 2.1.2) hat gezeigt, dass sich ein Gesteinsgefüge durch die Ermittlung der Volumenanteile und der mineralspezifischen Kornform-, Korngrößenverteilung, Verwachsung, Verteilung, Orientierung und Raumerfüllung weitgehend charakterisieren lässt. Zur quantitativen Beschreibung dieser Gesteinskennwerte sind bereits zahlreiche stereometrische Messverfahren in der quantitativen Gefügeanalyse bekannt. Zu den Grundlagen der quantitativen Gefügeanalyse gehören [125]:

- die Bildanalyse, d. h. die Analyse von Abbildungen ebener Dünn- und Ansliffe von Gefügen mit Hilfe digitaler Bildverarbeitungssysteme
- die Stereologie, d. h. die Ermittlung geometrischer Parameter des räumlichen Gefüges aus Messwerten, die an ebenen Dünn- und Ansliffen gewonnen werden
- die stochastische Geometrie, durch die vor allem mathematische Modelle zur Behandlung von Problemen der Bildanalyse und der Stereologie bereitgestellt werden

Für die Realisierung des Arbeitsziels werden die Probennahme der Gesteinsstücke, die Dünn- bzw. Ansliffpräparation, sowie die Auswertverfahren weiterentwickelt. Aus-

gegangen wird dabei von einer optischen Abbildung des Gefüges in mehreren unterschiedlich orientierten Dünn- bzw. Anschliffen. Dabei werden die Merkmale des räumlichen Gefüges mit Hilfe von stereologischen Methoden ermittelt und statistisch erfasst.

4.2.1.1 Grundparameter von Gefügebestandteilen

Zur Beschreibung von Gefügen in der modernen Werkstoffforschung ist eine Vielfalt von Gefügeparametern entwickelt worden, die oft eine gegenseitige Korrelation aufweisen. Um eine Redundanz der Gefügeparameter ausschließen zu können, wird ein Gefüge aus der Sicht der stochastischen Geometrie durch vier Grundparameter charakterisiert: Volumenanteil V_V , spezifische Grenzfläche S_V , Integral der mittleren Krümmung pro Volumeneinheit M_V und die Anzahl der Teilchen pro Volumeneinheit N_V [91, S. 98], [125, S. 134], [142, S. 51f.].

Die stereologischen Gleichungen für die Grundparameter isotroper Gefüge sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst. Aus Tabelle 4-1 geht hervor, dass durch die Flächenanalyse die meisten Grundparameter gewonnen werden können. Durch die Linienanalyse oder durch die Punktanalyse werden die Messungen allerdings einfacher.

Die Gleichungen für den Volumenanteil V_V in Tabelle 4-1 gelten auch für anisotrope Gefüge, während die übrigen Gleichungen ausschließlich für isotrope Gefüge gültig sind. Bei orientierten Gefügen sind die zu messenden Parameter Punktanteil P_L , Länge von Linienelementen L_A und Anzahl geschnittener Details N_A stark von der Lage der Messlinien bzw. des Messfeldes zu den Orientierungsrichtungen abhängig.

Tabelle 4-1: Stereologische Gleichungen für die Grundparameter

Grundparameter	Flächenanalyse	Linienanalyse	Punktanalyse	Dimension
V_V	$=A_A$	$=L_L$	$=P_P$	[%]
S_V	$=4/\pi L_A^*$	$=2P_L^*$		$[\text{mm}^{-1}]$
M_V	$=2\pi N_A^*$			$[\text{mm}^{-2}]$
N_V	$=f(F_A)^{**}$	$=f(F_L)^{**}$		$[\text{mm}^{-3}]$
* gültig nur für isometrische Gefüge ** nur mit Hilfe von stereologischen Methoden unter bestimmten Gefügeannahme möglich				

Eine Vielzahl von anderen gebräuchlichen Parametern (z. B. die Korngröße) für ein isotropes Gefüge stehen oft mit den Grundparametern im engen Zusammenhang und lassen sich sogar direkt daraus berechnen [91, 125].

Die mittlere Teilchenanzahl pro Volumeneinheit N_V lässt sich nur mit zusätzlichen Annahmen für die Geometrie des zu untersuchenden Gefügebestandteils stereometrisch bestimmen [148].

Trotz weitgehender Charakterisierung der Geometrie von Gefügebestandteilen durch die Grundparameter lassen sich einige, aus der Sicht der Zerkleinerung wichtige petrographische Gefügemerkmale (z. B. Parameter der Korngrößenverteilung, Kornform, Verwachsung, Verteilung, Orientierung) nicht daraus ableiten.

4.2.2 Grundlagen der quantitativen Analyse

Die stereologischen Methoden dienen der Ermittlung geometrischer Parameter des räumlichen Gefüges und untergliedern sich in Punktanalyse, Linienanalyse und Flächenanalyse [19, 38, 40, 44, 48, 117].

4.2.2.1 Punktanalyse

Im Jahre 1930 entwickelte Glagolev [34] ein Punktzählverfahren, mit welchem der Mineralanteil bestimmbar ist.

Bei der Punktanalyse werden die Messungen auf punktförmigen Messfeldern durchgeführt (Abbildung 4-3).

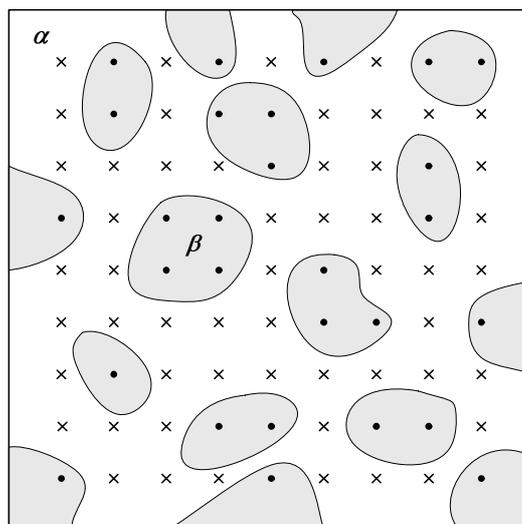


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Punktanalyse (Phasen α und β)

In das auszuwertende Bild der Probe wird ein Punktraster mit frei wählbarem Rasterabstand eingeblendet. Im nächsten Schritt werden die Phasenpunkte (Punkte, die innerhalb der zu untersuchenden Phase liegen) ausgezählt. Das kann manuell erfolgen. Der Volumenanteil V_β berechnet sich wie folgt.

$$V_\beta = \frac{p_\beta}{p} \cdot 100 \quad (5)$$

- p_β Anzahl der Rasterpunkte, die innerhalb der Schnittflächen der β -Phase liegen
- p Gesamtzahl der Rasterpunkte

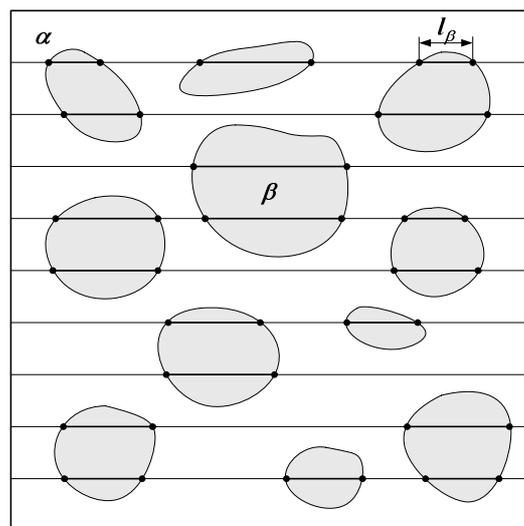
Mit der Punktanalyse kann zur Bestimmung der Grundparameter nur eine Größe gemessen werden:

- Punktanteil P_P : das ist die Anzahl der Punkte eines Punktrasters im Gefügebestandteil bezogen auf die Gesamtpunktzahl des Rasters.

Diese Kennzahlen werden mit den Flächen- bzw. Volumenanteil des Gefügebestandteiles gleichgesetzt.

4.2.2.2 Linienanalyse

1898 entwickelte Rosiwal [111] eine andere Methode, um den Volumenanteil eines Minerals zu bestimmen.



- Schnittpunkte der Messgeraden mit den Phasengrenzen

Abbildung 4-4: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Linienanalyse

Rosiwal legte über das Präparat eine Schar relativ weit auseinander stehender, paralleler Linien (Abbildung 4-4).

Der prozentuale Anteil der Linien, welche durch eine Mineralphase verlaufen, entspricht dann dem Linienanteil dieses Minerals.

Bei der Linienanalyse werden die Schnittpunkte und Sehnenlängen von Messgeraden der untersuchten Phasen innerhalb einer vorgegebenen Messfläche gezählt und ausgemessen (Abbildung 4-4).

Die Messgrößen sind also:

- Linienanteil L_L , als Quotient aus der Gesamtlänge der Schnittsehnen durch einen Gefügebestandteil im Messfeld und der Gesamtlänge der Messlinien (Gleichung 6).

$$L_L = \frac{L_\beta}{L} = \frac{\sum_{i=1}^{m_\beta} l_{\beta i}}{L} \cdot 100 \quad (6)$$

L_β Summe aller Sehnenlängen in der β -Phasen
 L Gesamtlänge der Messlinien
 $l_{\beta i}$ Sehnenlängen, die die Schnittflächen der Mikroteilchen der verschiedenen Phasen auf den Messlinien abschneiden
 m_β Anzahl der Sehnen in der β -Phase

- Punktanzahl pro Längeneinheit P_L , als Quotient aus der Anzahl der Schnittpunkte von Grenzflächen mit der Messlinie im Messfeld und der Gesamtlänge der Messlinien.

$$P_L = \frac{N_{\alpha\beta}}{L} \quad (7)$$

$N_{\alpha\beta}$ Anzahl der Schnittpunkte der Messlinien mit den Phasengrenzen $\alpha\beta$
 L Gesamtlänge der Messlinien

Aus dem so markierten Bild werden dann der Linienanteil oder Volumenanteil, die Anzahl der Schnittpunkte der Phase mit den Testlinien bezogen auf die Testlinienlänge (die spezifische Grenzlinienlänge pro Testflächeneinheit oder spezifische Oberfläche pro Volumeneinheit) und eine Statistik über die Sehnenlängen (minimale, maximale, mittlere Sehnenlänge, Standardabweichung und Histogramm der Sehnenlängenverteilung)

ermittelt. Außerdem wird ausgehend vom Histogramm der Sehnenlängenverteilung und unter Annahme von kugelförmigen Teilchen eine stereologische Transformation vorgenommen und ein Histogramm räumlicher Durchmesserverteilungen berechnet [148].

4.2.2.3 Flächenanalyse

Der erste Versuch einer quantitativen Bildanalyse datiert zurück in das Jahr 1848. Der französische Mineraloge Delesse [21] bestimmte den Volumenanteil eines Minerals innerhalb eines Gesteins dadurch, dass er die Fläche, die das Mineral in einem zufällig orientierten Schnitt einnahm, maß. Sein Verfahren war jedoch sehr aufwendig. Er fertigte zuerst mit einem öligen und durchscheinenden Tuch einen Abdruck der Gesteinsoberfläche an. Dieses Tuch drückte er anschließend auf eine Stanniolfolie gleicher Größe. Daraufhin schnitt er die auf der Stanniolfolie abgebildeten und durch ihre Form spezifizierten Minerale mit einer Schere aus. Mit einer Analysenwaage bestimmte er nun das Gewicht der ausgeschnittenen Teile. Die Verhältnisse dieser Gewichte zum Gesamtgewicht der Folie ergaben den prozentualen Flächenanteil des Minerals im Schnitt. Delesse postulierte nun, dass dieser Flächenanteil dem Volumenanteil des Minerals entspricht.

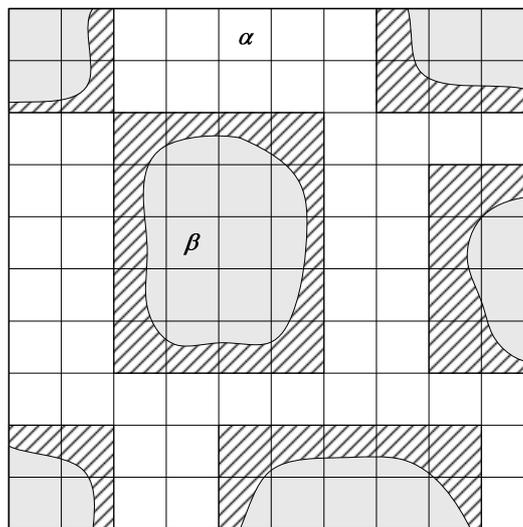


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung zur Erläuterung der Flächenanalyse

Die Ideen von Delesse waren fundiert und haben bis in unsere heutigen Tage noch ihre Gültigkeit. Es gab zur damaligen Zeit jedoch keine Möglichkeiten, den enormen Arbeitsaufwand seines Verfahrens zu reduzieren. Aus diesem Grund fand seine Methode keine große Anhängerschaft. Die Entwicklungen in der Computertechnik machen es

heutzutage jedoch möglich, Delesses Gedanken als Grundlage für ein automatisches Bildanalysesystem zu verwenden.

Bei der Flächenanalyse werden die Schnittflächen der Einzelkristalle der zu untersuchenden Phasen innerhalb einer vorgegebenen Messfläche gezählt und ausgemessen, z. B. durch Planimetrieren (siehe Abbildung 4-5 und Anhang A, Anlage 8).

Die Messgrößen sind also:

- Flächenanteil A_A (Volumenanteil V_V), als Quotient aus der gesamten Fläche eines Gefügebestandteiles im Messfeld und der Fläche des Messfeldes (Gleichung 8).

$$A_A = \frac{A_\beta}{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n_\beta} A_{\beta i}}{A} \cdot 100 \quad (8)$$

$\sum_{i=1}^{n_\beta} A_{\beta i}$ Summe der Flächeninhalte der Schnittflächen der β -Phase innerhalb der

Messfläche

A Flächeninhalt der Messfläche

n_β Anzahl der in der Messfläche liegenden β -Teilchen

- spezifische Linienlänge L_A , als Quotient aus der gesamten Länge der durch die Schliffebene geschnittenen Grenzflächen und der Fläche des Messfeldes (Gleichung 9).

$$L_A = \frac{L_\beta}{A} = \frac{\sum_{i=1}^{m_\beta} L_{\beta i}}{A} \quad (9)$$

$\sum_{i=1}^{m_\beta} L_{\beta i}$ Summe aller Sehnenlängen in der β -Phasen

A Flächeninhalt der Messfläche

m_β Anzahl der Sehnen in der β -Phase

- spezifische Teilchenanzahl pro Flächeneinheit N_A , als Quotient aus der Anzahl der Teilchen im Messfeld und der Fläche des Messfeldes.

Ausgehend von dem mit einem Raster markierten Bild wird das Histogramm der Flächenverteilung ermittelt.

4.3 Mathematische Formulierung

Die im Aufsatz von Unland und Raaz [148] formulierte Methode der räumlichen Charakterisierung der Gesteinsgefüge wurde in Form eines Auswerteprogramms realisiert und erfolgreich verifiziert. Die Auswertung der Daten im Programm erfolgt folgendermaßen.

Die gewonnenen Messdaten sind in einem Bezugskoordinatensystem xyz zu ermitteln, das die drei orthogonal zueinander stehenden Schliffebene erfasst. Aus jedem der drei orthogonal zueinander stehenden Dünnschliffe („xy“, „yz“ und „xz“) werden mit Hilfe eines speziell dafür entwickelten Messfeldes der Punktanteil P_p , die Schnitzzahlrose $R(\varphi)$ und die Verteilungshistogramme der Schnittflächen $q(d)$ bestimmt (siehe Abschnitt 4.2.2). Der mittlere Punktanteil aus allen drei Schlifffen wird als Volumenanteil V_v definiert. Die Schnitzzahlrose $R(\varphi)$ wird dabei als Schnittpunktzahl P_L pro Längeneinheit der Messlinie in vier Auswerterichtungen pro Schliff ($\varphi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ und 135°) erfasst.

Unter der Annahme gleicher Form und Orientierung der Teilchen lassen sich aus diesen drei orthogonal zueinander stehenden ebenen Schnitzzahlrosen ($R_{XY}(\varphi)$, $R_{YZ}(\varphi)$ und $R_{XZ}(\varphi)$) die Parameter einer räumlichen Schnitzzahlrose (n_{is} , n_{lin} und n_{fl}) berechnet, die mit folgender Gleichung (10) beschrieben wird:

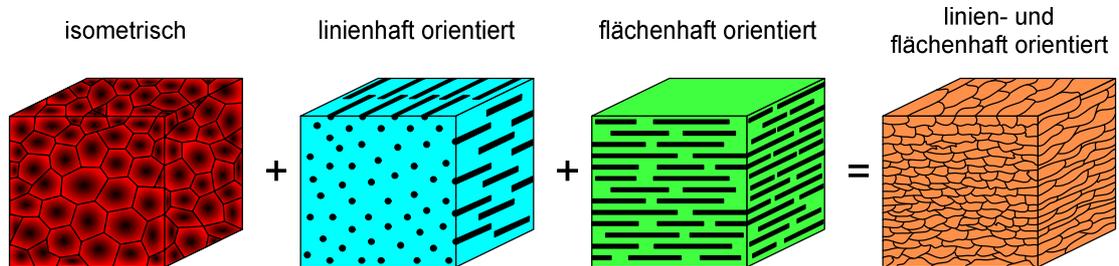
$$x^2 + y^2 + z^2 = n_{is} \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + n_{lin} \sqrt{y^2 + z^2} + n_{fl} \sqrt{z^2} \quad (10)$$

Die Ermittlung der Parameter dieser räumlichen Schnitzzahlrose sowie deren Orientierungswinkel im Raum wird durch eine Approximierung durchgeführt. Dabei wird die Abweichung der räumlichen Schnitzzahlrose von den Messdaten in jeder Raumrichtung minimiert.

Die räumliche Schnitzzahlrose eines ideal isometrischen Grenzflächensystems ist eine Kugel mit dem Durchmesser n_{is} . Die eines ideal linienorientierten Systems ist ein Torus mit dem Durchmesser n_{lin} . Die eines ideal flächenorientierten Systems ist eine Doppelkugel mit dem Durchmesser n_{fl} . Eine räumliche Schnitzzahlrose eines orientierten Gefüges ist demnach als eine Superposition der Schnitzzahlrosen idealer Grenzflächensysteme (Abbildung 4-6) zu betrachten. Allgemein addiert sich die Schnitzzahl eines orientierten Gefüges für jede Raumrichtung aus Schnitzzahlen dieser drei Grenzflächensysteme [143, 148].

Die reale Oberfläche $S_{V(R)}$ lässt sich direkt aus den Parametern der räumlichen Schnittzahlrose ableiten (siehe Gleichung 20).

Addition von elementaren Grenzflächensystemen



Addition der räumlichen Schnittzahlrosen

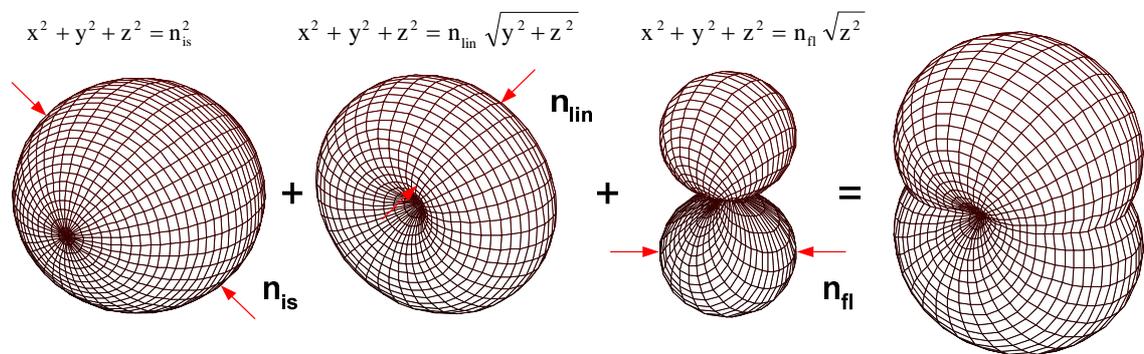


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des Superpositionsprinzips für ein orientiertes Gefüge [148]

Aus den Parametern der räumlichen Schnittzahlrose werden die Halbachsen a , b und c (siehe Anhang B, Abbildung B. 2) eines Einheits-Teilchens (siehe Abbildung 4-7) berechnet (Gleichungen 11, 12 und 13).

$$a = \frac{3V_V}{2n_{is}} \quad (11)$$

$$b = \frac{V_V}{\left(\frac{2}{3}n_{is} + \frac{\pi}{4}n_{lin}\right)} \quad (12)$$

$$c = \frac{V_V}{\left(\frac{2}{3}n_{is} + \frac{\pi}{4}n_{lin} + n_{fl}\right)} \quad (13)$$

Unter Berücksichtigung der Orientierungswinkel im Raum (α , β und γ) werden die Schnittflächen des Einheits-Ellipsoides ($f_{A,0xy}$, $f_{A,0yz}$, und $f_{A,0xz}$) berechnet und durch

eine entsprechende Größenkorrektur die Werte $q_{A,0xy}$, $q_{A,0yz}$, und $q_{A,0xz}$ im Schnittflächenhistogramm normiert (siehe Anhang B).

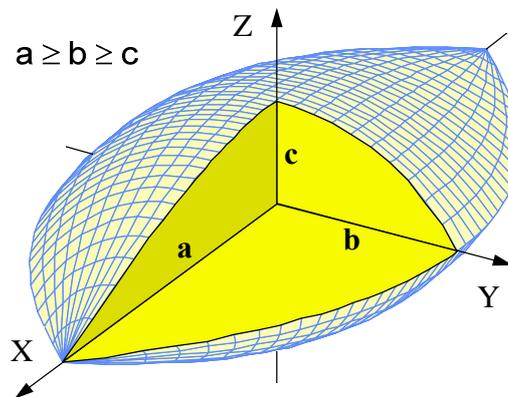


Abbildung 4-7: Darstellung eines linien- und flächenhaft geformten Teilchens

Aus dem integralen Schnittflächenhistogramm werden mit Hilfe der stereologischen Formeln für kugelförmige Teilchen die räumlichen Anzahlverteilungshistogramme berechnet und, unter der Annahme, dass die Teilchen logarithmisch normal verteilt sind, die Parameter der Verteilung ($d_{50,0}$ und σ_{ln}) ermittelt. Die mittlere arithmetische Korngröße $d_{m,3}$ und der Zentralwert der Volumenverteilung $d_{50,3}$ lassen sich dabei auch ableiten (siehe Tabelle 4-2).

Die Parameter der Volumenverteilung von Teilchen einer Phase erlauben die Ermittlung der gesamten Oberfläche von allen Teilchen dieser Phase unter der Annahme der idealen ellipsoidischen Form („ideale“ Oberfläche $S_{V(I)}$). Der Rauigkeitsgrad K_R der Mineralteilchen wird dabei als Verhältnis der Differenz zwischen der „realen“ Oberfläche $S_{V(R)}$ und der „idealen“ Oberfläche $S_{V(I)}$ zur „realen“ Oberfläche $S_{V(R)}$ der ellipsoidförmigen Teilchen berechnet (siehe Gleichung 14).

$$K_R = \frac{S_{V(R)} - S_{V(I)}}{S_{V(R)}} \quad (14)$$

4.4 Realisierung

Die mathematisch-petrographische Gesteinscharakterisierung kann sowohl die mineralische Zusammensetzung als auch den Gefügebau der wichtigsten Gesteinstypen quantitativ beschreiben.

Für die praktische Realisierung des Verfahrensablaufs zur Ermittlung der Gesteinsparameter ist am Institut für Aufbereitungsmaschinen der Technische Universität Bergakademie Freiberg ein Programm (siehe Anhang B) entwickelt worden, das ein vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung von Gefügeparametern realisiert. Die Vereinfachung liegt darin, dass im Vorfeld eine Annahme über gleiche Orientierung von allen Teilchen einer Phase getroffen worden ist. Diese Annahme hat dazu geführt, dass die aufwendige Ermittlung der Schnittsehnenlängenverteilung überflüssig geworden ist.

Ausgangspunkt der quantitativen Gefügeanalyse sind die Bilder von den Schliffebenen einzelner Proben. Diese Bilder werden mit entsprechenden Messfeldern (das können Gitter-, Linien- oder Punktraster sein) überlagert (siehe Abbildung B. 1). Anschließend werden phasenbezogen die Größe der Flächen, die Anzahl der Punkte und Phasengrenzen bestimmt und in Größenklassen aufgeteilt. Danach werden die Messfelder schrittweise um einen bestimmten Winkel auf den Bildern der Schliffebenen gedreht und oben genannter Messvorgang wiederholt. Die daraus ermittelten Flächenverteilungen werden als Histogramm bzw. die Anzahlverteilungen der Schnittpunkte als so genannte Schnittzahlrosen dargestellt. Die Schnittzahlrose ist demnach die Häufigkeitsverteilung von Schnittpunkten einer Messstrecke mit Phasengrenzen in Abhängigkeit von der Winkel-lage dieser Messstrecke. Die Bilder der Schnittebenen ergeben also je Probe drei ebene, zweidimensionale Schnittzahlrosen. Die ebenen Schnittzahlrosen einer Probe können dann als zentrale Schnitte einer räumlichen Schnittzahlrose betrachtet werden (siehe Abbildung B. 2) [148].

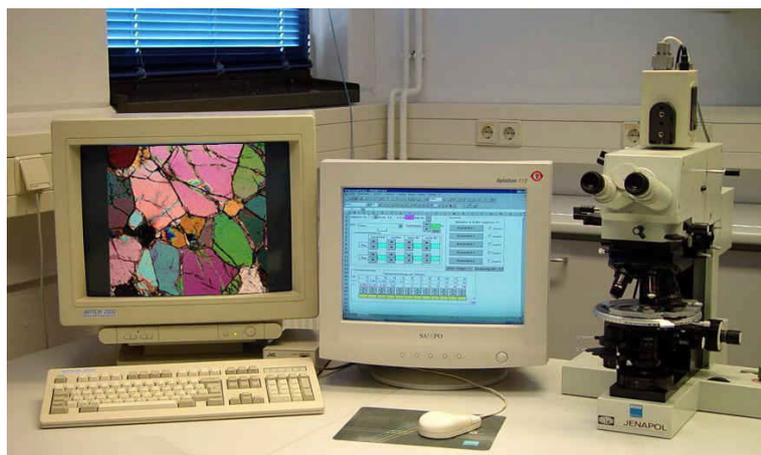


Abbildung 4-8: DünnschliffanalySELabor

So erhält man für die weitere mathematische Bearbeitung je Schliffebene phasenbezogene Histogramme der Flächenverteilungen sowie Punktanteile und Schnittzahlrosen.

Durch Addition aller mikrokörperbezogenen Informationen erhält man die Informationen des Gesamtgefüges.

Auf der Abbildung 4-8 ist die technische Ausrüstung eines Dünnschliffanalyzelabors dargestellt.

Die Hauptausrüstung ist ein Polarisationsmikroskop. Die auf dem Mikroskop aufgebaute digitale Bildkamera erlaubt eine direkte Übertragung des Dünnschliffbildes auf einen Live-Bild-Monitor und somit die Weiterbearbeitung der aufgenommenen Bilder mit Hilfe von stereologischen Methoden.

Für die halbautomatische Gefügeanalyse wird vorausgesetzt, dass die entsprechenden Gefügebestandteile eindeutig identifiziert und ausreichend kontrastiert sind. Darüber hinaus gestattet das Programm eine interaktive Auswahl der gewünschten Gefügebestandteile.

Aufgrund der Gesteinsanalyse und ihrer mathematischen Formulierung lassen sich nun Gesteinscharakteristika in Form von Kennzahlen berechnen. Zur Charakterisierung des Gesteins werden die folgenden Kennwerte verwendet (siehe Abbildung 4-9).

- Modus: Art und Volumenanteile der Phasen
- Struktur: Größe, Form, Rauhigkeit und Verwachsung
- Textur: Verteilung, Orientierung und Raumerfüllung

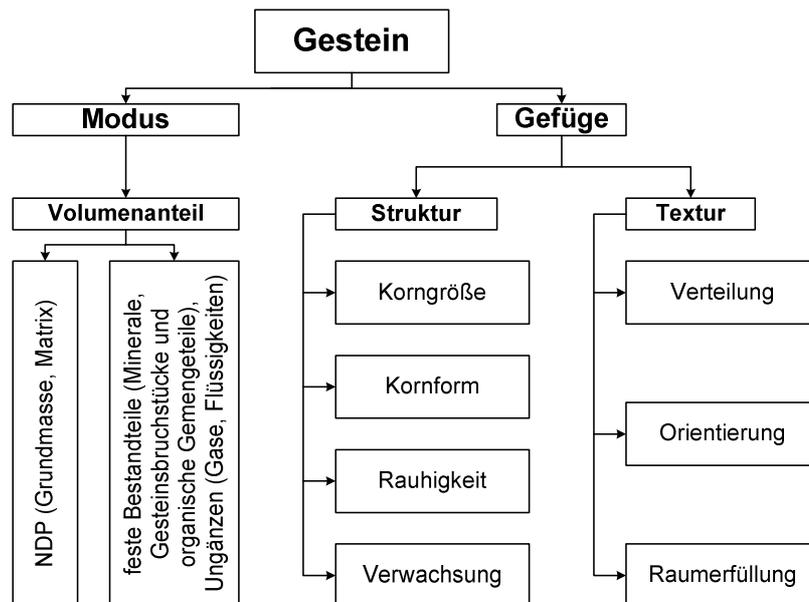


Abbildung 4-9: Charakterisierung von Gesteinen

4.4.1 Definition der Gesteinscharakteristika

Um die ausgewählten Gesteinskennwerte quantitativ bestimmen zu können, ist es notwendig, zuerst eine exakte Definition aller dieser Parameter durchzuführen und einen möglichen Ermittlungsweg zu beschreiben.

In der Tabelle 4-2 sind alle mathematischen Definitionen der ausgewählten Gesteinscharakteristika, eine kurze Beschreibungen des Ermittlungsweges und eine einfache anschauliche Skizze eingetragen.

Tabelle 4-2: Definition der Gesteinscharakteristika

Parameter	Definition	Ermittlungsweg	Skizze
<u>Volumenanteil</u> V_v [%]	$V_{vi} = \sum_{j=1}^{N_{vi}} V_{ij} / V$ i Phasen, wobei $i=1..k$	Punktanalyse: $V_{vi} = P_{pi}$ Volumenverhältnis	
<u>Korngröße</u> Medianwert, $d_{50,3}$ Standardabweichung, σ_{ln}	$f_{v,3(d)} = \frac{1}{\sigma_{ln} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(d) - \ln(d_{50,3})}{\sigma_{ln}} \right)^2 \right]$	Flächenverteilung, stereologische Transformationen, Volumenverteilung	
<u>Kornform</u> Elongation, E Flachheit, F	$E = \frac{a}{b} \quad F = \frac{b}{c}$	3D-Schnittzahlrose: a, b, c Orientierungsgrad	
<u>Rauhigkeitsgrad</u> K_R [%]	$K_R = \frac{S_{v(R)} - S_{v(I)}}{S_{v(R)}}$	Volumenverteilung, Teilchenform, Oberflächenverhältnis	
<u>Verwachsungsgrad</u> K_{vw} [%]	$K_{vw(\alpha, \beta)} = \frac{S_{v(\alpha, \beta)}}{S_v}$	Linienanalyse, Volumenverteilung, Teilchenform, Oberflächenverhältnis	
<u>Clusterbildungsgrad</u> C [%]	$C = \frac{S_{\alpha\alpha}}{S_{\alpha\alpha} + S_{\alpha\beta}}$	Linienanalyse: $S_{\alpha\alpha} = 2P_{L\alpha\alpha}$ $S_{\alpha\beta} = P_{L\alpha\beta}$ Flächenverhältnis	
<u>Orientierungsgrad:</u> Linearer, K_{lin} [%] Flächiger, K_{fl} [%] Isotroper, K_{is} [%]	$K_{lin} = \frac{\pi}{2} n_{lin} / \left(2n_{is} + \frac{\pi}{2} n_{lin} + n_{fl} \right)$ $K_{fl} = n_{fl} / \left(2n_{is} + \frac{\pi}{2} n_{lin} + n_{fl} \right)$ $K_{is} = 2n_{is} / \left(2n_{is} + \frac{\pi}{2} n_{lin} + n_{fl} \right)$	2D-Schnittzahlrosen, 3D-Schnittzahlrose: n_{is}, n_{lin}, n_{fl} Orientierungsgrad	

4.5 Mathematisch-petrographische Charakterisierung der Gesteine

4.5.1 Modus

Der Modus umfasst entsprechend dem erweiterten Verständnis die einzelnen Phasen des Gesteins und ihre Volumenanteile (siehe Abschnitt 2.1.2.1).

4.5.1.1 Phase

Die Phasen werden mikroskopisch bestimmt. Bei Hartgesteinen umfassen die Phasen einzelne Minerale, aber auch Ungängen (z. B. Poren und Risse), die die Phasen Gas und Flüssigkeit bilden, Gläser und mikro- sowie kryptokristalline Masse (siehe Abbildung 4-10), die zur nicht differenzierbaren Phase (NDP) zusammengefasst werden (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Jedes einzelne Gemeineteil einer Phase – Mikrokörper genannt – nimmt ein Volumen ein, das durch Grenzflächen definiert wird.

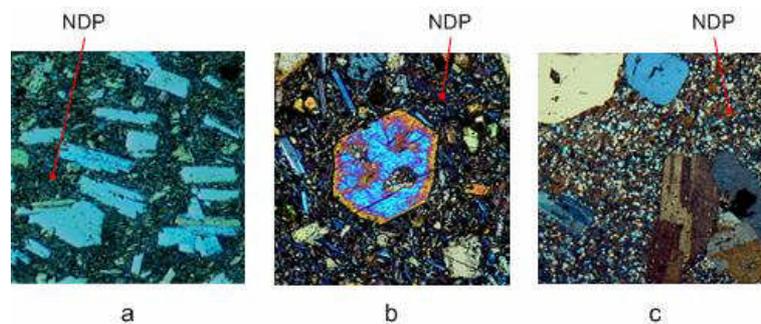


Abbildung 4-10: Beispiele nicht differenzierbarer Phasen (a – Andesit aus Kesselsdorf, b – Basalt aus Nieder-Ofleiden, c – Quarzporphyr aus Löbejün)

4.5.1.2 Volumenanteil

Die Analyse der Volumenanteile ist das am häufigsten verwendete Verfahren der Stereologie. Der Volumenanteil einer Mineralgruppe V_{Vi} ist als Quotient aus der Summe der Volumina der Mineraleinzelkörner der Probe und dem Probenvolumen definiert und kann mit Hilfe der Punktzählmethode am einfachsten bestimmt werden [34, 40, 117, 125, 153]. Im Rahmen der statistischen Streuung entsprechen die Volumenanteile den Flächen-, Linien- und Punktanteilen (siehe Abschnitt 4.2.2). Es ist:

$$V_V \hat{=} A_A \hat{=} L_L \hat{=} P_P \quad (15)$$

Die Bestimmung der Volumenanteile der Phasen im Gesteinsgefüge erfolgt anhand der Bilder der drei orthogonal zueinander stehenden Schliffebenen. Die Ermittlung des

Punktanteils einer Phase mit Hilfe eines den Bildern überlagerten Punktrasters und des arithmetischen Mittelwertes der Punktanteile aus den drei Schliffebene ergibt den Volumenanteil $\varepsilon_{v,j}$ einer Phase.

Eine grobe Kennzeichnung des Gesteines nach dem Verhältnis zwischen den Kristallen und der dichten Bestandsmasse (NDP) führt zu folgenden Begriffen (Abbildung 4-11):

- körnig: praktisch ist für die Gesamtmasse ein kristalliner Aufbau nachweisbar
- porphyrisch: Gefüge besteht teils aus Kristallen, teils aus einer dichten Bestandsmasse
- dicht: kryptokristalline, amorphe, hornfels- bis opalgelartige oder gar hyaline Massen

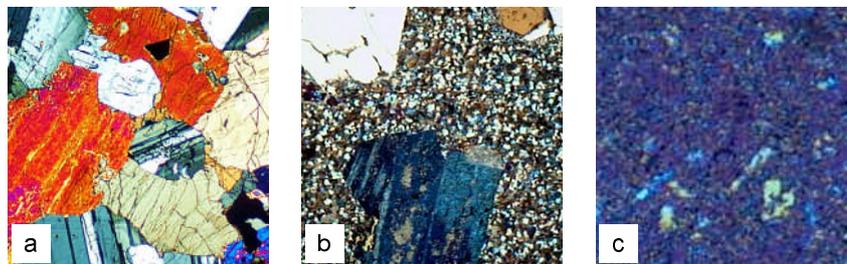
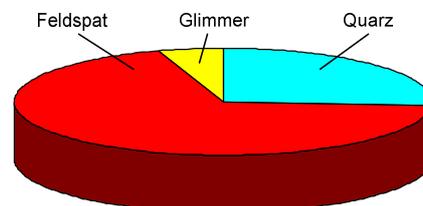
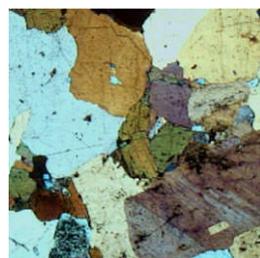


Abbildung 4-11: Beispiele für die Kennzeichnung des Gesteins nach Dünnschliffen: a – körnig, b – porphyrisch, c – dicht

Die quantitative Angabe der Mineralzusammensetzung nennt man den Modus des Gesteins (siehe Abschnitt 2.1.2.1). Die Modusanalysen wurden am Dünnschliff mit Hilfe der Punktanalyse durchgeführt (siehe Abschnitt 4.2.2.1). Das Prinzip der Messung geht aus Abbildung 4-3 hervor. Die Angabe der Gemengeanteile erfolgt in der Regel tabellarisch (Abbildung 4-12).



Phasen	Art	Einheit	Quarz	Feldspat	Glimmer	Gas	NDP
Volumenanteil	ε_v	%	27	70	3	0	0

Abbildung 4-12: Mineralzusammensetzung (z. B. Granit aus Meißen)

Über die Zusammensetzung der nicht differenzierbaren Phase für die Gesteine z. B. Basalt, Quarzporphyr und Grauwacke werden nur qualitative Aussagen gemacht. Die mikrokristalline Ausbildung der nicht differenzierbaren Phase bei Quarzporphyr, der hohe Glasanteil an der nicht differenzierbaren Phase bei Basalt und die stark schwankenden Korngrößen des klastischen Materials bei Grauwacke, führen zu keinen aussagekräftigen Ergebnissen bei der Interpretation.

4.5.2 Struktur

Die Struktur umfasst die Ausbildung der einzelnen, das Gestein aufbauenden Phasen in Gestalt ihrer Mikrokörper. Die Mikrokörper können sowohl phasenabhängig als auch phasenunabhängig (also gesteinsbezogen) analysiert werden. Die Struktur wird dann durch die Größe, die Form und die Ausbildung der Grenzflächen der Mikrokörper charakterisiert [9, S. 119], [32, S. 383ff.].

4.5.2.1 Korngröße

Die mittlere Korngröße einer Mineralgruppe $d_{m,3 i}$ und die Streuung der Korngrößen σ_i sind als Standardparameter einer Volumenverteilung von Mineralkörnern definiert [122, 123]. In der Praxis werden oft die Parameter einer logarithmischen Normalverteilung (der Medianwert $d_{50,3 i}$ und die Streuung $\sigma_{ln i}$) benutzt [8, 30]. Die Größenverteilung der Mineralteilchen im Raum wird durch eine stereologische Transformation aus den Schnittflächenverteilungen in den Schliffebenen gewonnen (siehe Anhang B, Abbildung B. 2).

Die stereologische Bestimmung der Größenverteilungsfunktion bzw. der Verteilungsdichte von Mikrokörpern im Raum ist nur mit folgenden Annahmen möglich [30, 91, 117, 125]:

- Mikroteilchen sind im Raum statistisch gleichmäßig verteilt
- Mikroteilchen haben die gleiche geometrische Form und unterscheiden sich nur hinsichtlich ihrer Größe
- Mikroteilchen sind im Raum zufällig orientiert

Unter diesen Voraussetzungen lässt sich aus einer bekannten Größenverteilungsfunktion F_V die Verteilungsfunktionen der Schnittflächen F_A für die einzelnen Schliffebenen berechnen [117].

Um die Teilchengrößenverteilung für ein Gefüge, dessen Kornform und Orientierung unbekannt ist, bestimmen zu können, muss man zuerst für mehrere unterschiedlich im Raum orientierte Schliffebenen die Verteilungsfunktionen der Schnittflächen F_A für mehrere Schnittrichtungen in jeder Schnittfläche messen. Aus einer beschränkten Anzahl gemessener Schnittflächen können die Verteilungsfunktionen nur angenähert werden. Meist wird ein Histogramm der Schnittflächen erstellt. Im zweiten Schritt werden die optimalen Parameter für Form, Orientierung und Teilchengrößenverteilung bestimmt, die die beste Näherung zu den Messwerten liefern (siehe Anhang B).

Bevor mit der Aufnahme eines Schnittflächenhistogramms begonnen werden kann, ist die Vorgabe der verschiedenen Größenklassen erforderlich. Für die systematische Stufung der Größenklassen kommen oft lineare oder logarithmische Klasseneinteilungen in Betracht [30, 117]. Bei der linearen Klasseneinteilung werden die Klassengrenzen entsprechend einer arithmetischen Reihe mit der Differenz Δ festgelegt: $\Delta, 2\Delta, 3\Delta, \dots, K\Delta$. Bei der logarithmischen Klasseneinteilung sind die Klassengrenzen entsprechend einer geometrischen Reihe mit dem Modul q und der obersten Klassengrenze D_{MAX} abgestuft: $D_{MAX}, q^{-1}D_{MAX}, q^{-2}D_{MAX}, q^{-3}D_{MAX}, \dots, q^{-K}D_{MAX}$ [40].

Da bei vielen Korngrößenverteilungen die größten Häufigkeiten bei kleinen Größen auftreten, ist oft statt einer linearen eine geometrisch gestaffelte Klasseneinteilung mit dem Modul $q = \sqrt{2}$ günstiger, weil dann die großen Klassen nicht unter- und die kleinen nicht zu stark überbesetzt werden. Die oberste Klassengrenze D_{MAX} ist dem jeweiligen Gefüge anzupassen [30, 117].

Zur Verringerung des Zeit- und Arbeitsaufwandes ist es zweckmäßig, eine zusätzliche Annahme über die gleiche Orientierung aller Teilchen einer Phase vorzunehmen. Diese Annahme macht die Aufnahme der zeit- und arbeitsaufwendigen Schnittsehnenshistogramme überflüssig. Die „durchschnittliche“ Teilchenform und ihre Orientierung kann man dabei aus den Parametern der räumlichen Schnitzzahlrose und ihrer Orientierung bestimmen. Die Verteilungsfunktion der „durchschnittlich“ geformten Teilchen im Raum lässt sich näherungsweise mit Hilfe stereometrischer Formeln berechnen (siehe Anhang B).

Die einzelnen Mikrokörper liegen im Gesteinsgefüge polydispers vor, so dass die Größe der Mikrokörper durch eine Größenverteilungsfunktion approximiert werden muss. Die Größenverteilungsfunktion $F_V(d)$ kann häufig durch eine logarithmische Normalvertei-

lung (LNVT) approximiert werden, die durch einen Medianwert $d_{50,3}$ und einen Streuungsparameter σ_{ln} eindeutig beschrieben wird. So lässt sich die Verteilungsdichte $f_{v,3}(d)$ der Mikrokörperdurchmesser d einer logarithmischen Normalverteilungsfunktion durch einen Medianwert $d_{50,3}$ und einen Streuungsparameter σ_{ln} beschreiben [8, 19, 48, 123] (siehe Tabelle 4-2).

4.5.2.2 Kornform

Die Kornform eines Mikrokörpers entspricht seiner äußeren Erscheinung, die durch seinen Habitus und seine Rauigkeit bestimmt wird.

Habitus

Der Habitus wird als allgemeine Form des Mikrokörpers ohne Bezug auf Kristallsystem und Kristallklasse betrachtet. Als Grundtypen des Habitus können unterschieden werden (Abbildung 4-13):

- Isometrische Formen, d. h. Formen, die nach den drei Raumdimensionen in gleichem Maße entwickelt sind (kugelig)
- Eindimensionale Formen, die nach einer Richtung gestreckt sind (nadelig)
- Zweidimensionale Formen, die hauptsächlich nach zwei Richtungen ausgedehnt sind (plattig)

Habitus ist ein geometrisches Teilchenmerkmal, d. h. ein Merkmal, das alle drei Dimensionen berücksichtigen muss [144]. Der Habitus eines Mikrokörpers kann näherungsweise als Ellipsoid mit den Hauptachsen a , b und c , wobei $a \geq b \geq c$ ist, betrachtet werden. Die Verhältnisse der Hauptachsen zueinander beschreiben dann die Form des Mikrokörpers (Abbildung 4-13).

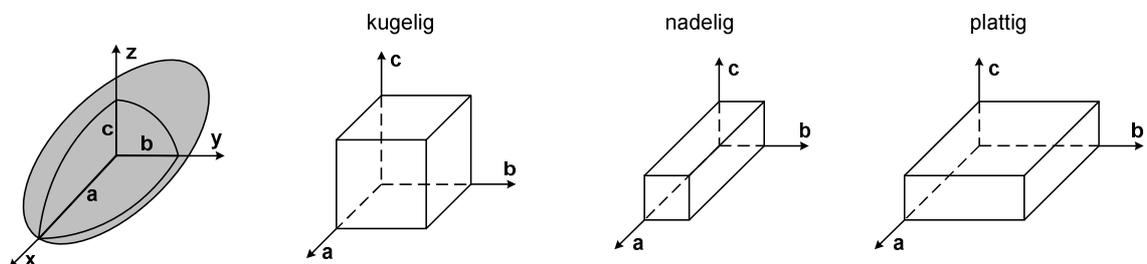


Abbildung 4-13: Teilchenform entsprechend dem Verhältnis von längster (a), mittlerer (b) und kürzester (c) Achse

Aus den räumlichen Schnitzzahlrosen können die Formen der „durchschnittlichen“ Mikrokörper der Phasen unter bestimmten Annahmen über die Orientierungsanteile der Mikrokörper abgeleitet werden. Unter der Annahme, dass alle Mikrokörper einer Phase die gleiche Orientierung ($\alpha=\beta=\gamma$) haben, lässt sich die Mikrokörperform aus der räumlichen Schnitzzahlrose unter Berücksichtigung des Phasenvolumenanteils ε_{v_j} berechnen (Gleichung 16).

$$\frac{2}{3}n_{is}\sqrt{x^2+y^2+z^2} + \frac{\pi}{4}n_{lin}\sqrt{y^2+z^2} + n_{fl}\sqrt{z^2} = \varepsilon_v \quad (16)$$

Mit Hilfe der Hauptachsen ergeben sich die Parameter Elongation und Flachheit. Die Elongation beschreibt die „Nadeligkeit“ eines Teilchens und die Flachheit beschreibt die „Plattigkeit“. Für die Elongation E und die Flachheit F gilt mit Beachtung der Gleichungen (11, 12 und 13) [148]:

$$E = \frac{a}{b} = \frac{\frac{2}{3}n_{is} + \frac{\pi}{4}n_{lin}}{\frac{2}{3}n_{is}} \quad (17)$$

$$F = \frac{b}{c} = \frac{\frac{2}{3}n_{is} + \frac{\pi}{4}n_{lin} + n_{fl}}{\frac{2}{3}n_{is} + \frac{\pi}{4}n_{lin}} \quad (18)$$



Gesteinscharakteristika			Gesteinsmerkmale		
			Granit	Basalt	Gneis
Elongation	E	-	1,095	3,908	1,000
Flachheit	F	-	1,061	1,365	1,834

Abbildung 4-14: Beispiele der Teilchenform: Granit (Obercrinitz) – kugelig, Basalt (Deutschland) – nadelig, Gneis (Leubsdorf) – plattig

Die Vergleichende Idealform wäre ein dreiachsiges Ellipsoid, das bei $a=b=c$ zur Kugel wird, oder bei ebener Flächenbegrenzung ein Prisma mit der Spezialisierung zum Wür-

fel bei $a=b=c$. Nach dem Verhältnis der Achsen a/b und b/c kann man die Teilchen in nadelig und plattig gliedern (Abbildung 4-14).

Rauhigkeit

Neben dem Habitus ist die Beschaffenheit der Oberfläche zu beachten. Oft ist es mit Hilfe der Rauhigkeit notwendig, eine Oberfläche nach feineren Maßstäben zu charakterisieren. Die Rauhigkeit ist ein Begriff, der die Unebenheit der Oberflächen bezeichnet. Unter dem Mikroskop kann man nicht den Mikrokörper in seiner vollen räumlichen Form erkennen, sondern man beobachtet nur zufällige Kornschnitte, die jedoch keine eindeutigen Aussagen über die dreidimensionale Form gestatten.

Stark buchtige, gezackte und ähnliche komplizierte Kornformen können in Dünnschliffen statistisch erfasst und durch den Rauhigkeitsgrad charakterisiert werden.

Die Berechnung der „idealen“ Oberfläche $S_{V(I)}$ (Abbildung 4-15) basiert auf der Mikrokörpergrößenverteilung unter Berücksichtigung der Mikrokörperform φ und des Phasenvolumenanteils ε_V und ist durch folgende Gleichung 19 gegeben [84].

$$S_{V(I)} = \frac{\varepsilon_V \cdot 6 \cdot \varphi \cdot \exp(\sigma_{\ln}^2 / 2)}{d_{50,3}} \quad (19)$$

Die „reale“ Oberfläche $S_{V(R)}$ (Abbildung 4-15) errechnet sich aus der räumlichen Schnitzzahlrose [19, 48].

$$S_{V(R)} = 2n_{is} + \frac{\pi}{2}n_{lin} + n_{fl} \quad (20)$$

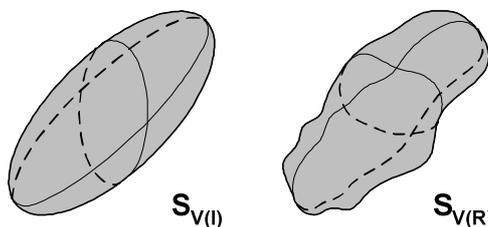


Abbildung 4-15: „Ideale“ und „reale“ Oberfläche der Mikrokörper

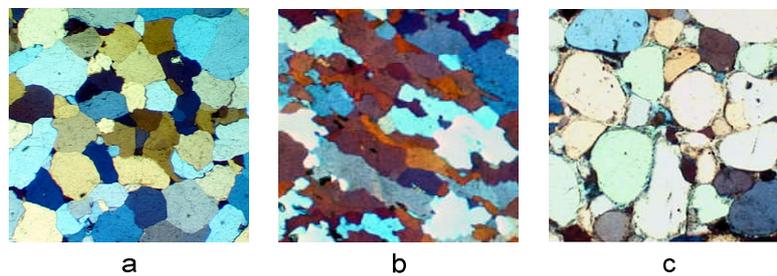
Nach Gleichung 14 wird dann der Rauhigkeitsgrad K_R wie folgt bestimmt:

$$K_R = 1 - \frac{\varepsilon_v \cdot 6 \cdot \varphi \cdot \exp(\sigma_{ln}^2 / 2)}{d_{50,3} \cdot \left(2n_{is} + \frac{\pi}{2} n_{lin} + n_{fl} \right)} \quad (21)$$

wobei φ der Formfaktor des durchschnittlichen Mikrokörpers ist.

Nach Gleichung 21 ist der Rauigkeitsgrad K_R umso größer, je größer die Differenz zwischen der „realen“ Oberfläche $S_{V(R)}$ und der „idealen“ Oberfläche $S_{V(I)}$ der einzelnen Phasen ist.

Das gleiche Mineral wechselt den Habitus und Rauigkeitsgrad je nach seinem Vorkommen.



Gesteinscharakteristika			Gesteinsmerkmale		
			Quarzit	Quarzit	Sandstein
Elongation	E	-	1,119	1,442	1,089
Flachheit	F	-	1,076	1,527	1,147
Rauhigkeitsgrad	K_R	[%]	25	29	5

Abbildung 4-16: Habitus und Rauigkeitsgrad der Minerale (a – Quarzit aus Yichang, China, b – Quarzit aus Oberschöna, c – Sandstein aus Althüttendorf)

Die Teilchen in den Dünnschliffbildern a, b und c sind Quarzminerale. Es haben die Teilchen in den Dünnschliffbildern a und b einen unterschiedlichen Habitus, aber einen gleichen Rauigkeitsgrad. Hingegen besitzen die Teilchen in den Dünnschliffbildern a und c den gleichen Habitus, aber verschiedene Rauigkeitsgrade (siehe Abbildung 4-16).

4.5.2.3 Verwachsung

Mineralassoziationen können quantitativ mit dem Parameter „Verwachsungsgrad“ beschrieben werden. Mit den Ergebnissen einer Linienanalyse lässt sich dieser Index berechnen [28, 29].

Die Übertragung des Begriffs der Grenzflächendichte zwischen zwei Phasen führt zu Begriffsbildungen, wie z. B. die von Amstutz [2, 3] („index of intergrowth“), Dörfler [26] („proximity“) und Gurland [37] („contiguity“) eingeführten Verwachsungsmaße.

Amstutz [2, 3] definiert den Verwachsungsgrad K_{VW} als Quotient aus der Grenzflächendichte $S_{V(\alpha,\beta)}$ (siehe Gleichung 22) zwischen den α und β Mineralen und der Dichte der Gesamtoberfläche S_V aller Minerale (siehe Gleichung 23).

$$S_{V(\alpha,\beta)} = \frac{2 \cdot N_{\alpha,\beta} \cdot d}{a_o} \quad (22)$$

- $N_{\alpha,\beta}$ Anzahl der Schnittpunkte mit den Grenzlinien zwischen den Phasen α und β auf der Gittergeraden
- d Abstand zweier aufeinander folgender Geraden im Raster
- a_o Fläche des mikroskopischen Gesichtsfeldes

Der Verwachsungsgrad eines Minerals α in Bezug zu einem Mineral β berechnet sich wie folgt (siehe Tabelle 4-2):

$$K_{VW(\alpha,\beta)} = \frac{S_{V(\alpha,\beta)}}{S_V} \quad (23)$$

Bei der Bestimmung der oben definierten Parameter eines Gesteinsdünnschliffs wird ein Bereich ausgewählt, der für das Gesamtgefüge repräsentativ ist. Um die Parameter mit kleinem Zeitaufwand und gleichzeitig möglichst exakt bestimmen zu können, wird die Linienanalyse angewendet (siehe Abschnitt 4.2.2.2).

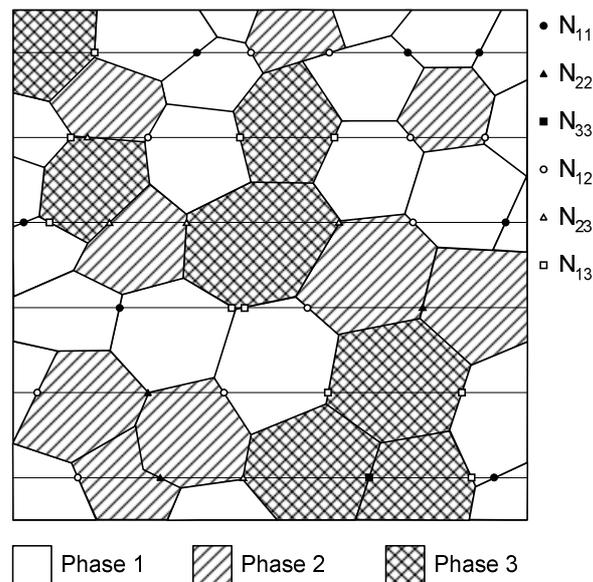


Abbildung 4-17: Zählung der Schnittpunkte zwischen den Mineralen

Auf dem repräsentativen Bereich wird ein Raster ausgelegt und die Anzahl der Schnittpunkte (z. B. N_{11} , N_{22} , N_{33} , N_{12} , N_{13} , N_{23}) entlang einer Messlinie zwischen den Mineralen der gleichen oder verschiedenen Art bestimmt (Abbildung 4-17).

Zur Ermittlung des Verwachsungsgrades in einem aus drei Mineralarten bestehenden Gestein gibt es sechs verschiedene Arten von Korngrenzen, die an ihren Schnittpunkten mit der Messlinie durch unterschiedliche Symbole bezeichnet sind (Abbildung 4-17). Der Grenzflächendichte zwischen den verschiedenen Arten von Korngrenzen (S_{11} , S_{22} , S_{33} , S_{12} , S_{13} , S_{23}) wird mit der Gleichung 32 bestimmt.

Das Ergebnis ist als Matrix darstellbar.

$$S_{V(1,2,3)} = \begin{Bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{Bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{cases} S_{\alpha 1} = S_{12} + S_{13} \\ S_{\alpha 2} = S_{12} + S_{23} \\ S_{\alpha 3} = S_{13} + S_{23} \end{cases} \quad (25)$$

$S_{\alpha 1}$, $S_{\alpha 2}$, $S_{\alpha 3}$ – Grenzflächendichte zwischen Phase 1 (bzw. 2 oder 3) und anderen Phasen.

Bestimmung der Grenzflächendichte:

$$S_{12} = S_{\alpha 1} - S_{13} \quad (26)$$

$$S_{\alpha 2} = S_{\alpha 1} - S_{13} + S_{23} \quad (27)$$

$$S_{13} = S_{\alpha 1} - S_{\alpha 2} + S_{23} \quad (28)$$

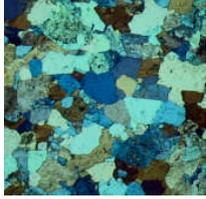
$$S_{\alpha 3} = S_{\alpha 1} - S_{\alpha 2} + S_{23} + S_{23} \quad (29)$$

$$2S_{23} = S_{\alpha 3} + S_{\alpha 2} - S_{\alpha 1} \quad (30)$$

$$S_{23} = \frac{S_{\alpha 3} + S_{\alpha 2} + S_{\alpha 1}}{2} \quad (31)$$

$$S_V = S_{11} + S_{22} + S_{33} + S_{12} + S_{13} + S_{23} \quad (32)$$

In Abbildung 4-18 sind als Beispiel die aus einem Linienmessverfahren resultierenden Verwachsungsindices von zwei unterschiedlichen Graniten (z. B. Granit 1 und Granit 2) aufgelistet.

Grenzflächenanteil von gegen	Granit 1	Quarz	Feldspat	Glimmer	
	Quarz	0,11	50,56	2,82	
	Feldspat		35,00	11,51	
	Glimmer			0,00	

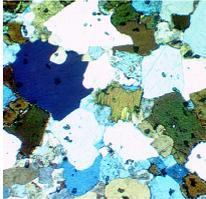
Grenzflächenanteil von gegen	Granit 2	Quarz	Feldspat	Glimmer	
	Quarz	20,38	42,46	4,31	
	Feldspat		16,15	16,34	
	Glimmer			0,00	

Abbildung 4-18: Vergleich der Verwachsungsindices für die Minerale der unterschiedlichen Granite (Granit 1 – Heberndorf, Granit 2 – San Diego, USA)

Um die räumliche Anordnung der Mikrokörper zu prüfen, wurden die Gesteine (z. B. Granit und Granodiorit) auf den drei orthogonalen Dünnschliffen mit Hilfe der Linienanalyse gemessen (siehe Abschnitt 4.2.2.2). In allen drei Schnitten des Granits sind die Verwachsungsindices fast identisch (Abbildung 4-19).

Granit					Granodiorit				
Grenzflächenanteil von gegen	a	Quarz	Feldspat	Glimmer	a	Quarz	Feldspat	Glimmer	
	Quarz	13,58	49,87	2,70		Quarz	28,55	23,58	10,81
	Feldspat		32,09	1,76		Feldspat		19,06	16,28
	Glimmer			0,00		Glimmer			1,73

Grenzflächenanteil von gegen	b	Quarz	Feldspat	Glimmer	b	Quarz	Feldspat	Glimmer	
	Quarz	13,87	48,65	1,89		Quarz	3,38	20,89	35,17
	Feldspat		32,42	3,17		Feldspat		12,34	23,65
	Glimmer			0,00		Glimmer			4,57

Grenzflächenanteil von gegen	c	Quarz	Feldspat	Glimmer	c	Quarz	Feldspat	Glimmer	
	Quarz	13,15	50,75	2,44		Quarz	12,85	22,72	24,05
	Feldspat		29,28	4,38		Feldspat		14,49	21,96
	Glimmer			0,00		Glimmer			3,92

Abbildung 4-19: Vergleich der Verwachsungsindices für die Minerale des Granits (Obercrinitz) und des Granodiorits (Kindisch) in drei Messebenen

In Gegensatz zu Granit weist der untersuchte Granodiorit in den drei Messebenen stark unterschiedliche Verwachsungsindices auf (Abbildung 4-19).

4.5.3 Textur

Die Textur kennzeichnet die Anordnung der Mikrokörper im Raum. Dabei wird in Verteilungs-, Richtungs- und Raumerfüllungsgefüge unterschieden [9, S. 119], [32, S. 383ff.], [99, S. 733], [105, S. 75]. Zur Charakterisierung des Verteilungsgefüges dient hier die Clusterbildung von Mikrokörpern gleicher Phase, zu der des Richtungsgefüges die Orientierung der Mikrokörper und zu der des Raumerfüllungsgefüges der Volumenanteil der Ungängen.

4.5.3.1 Verteilung (Clusterbildung)

Mikrokörper einer Phase können gleichmäßig im Raum verteilt sein, aber sie können auch Ansammlungen, so genannte Cluster, bilden, in denen die Mikrokörper einer Phase gemeinsame Grenzflächen haben (Abbildung 4-20).

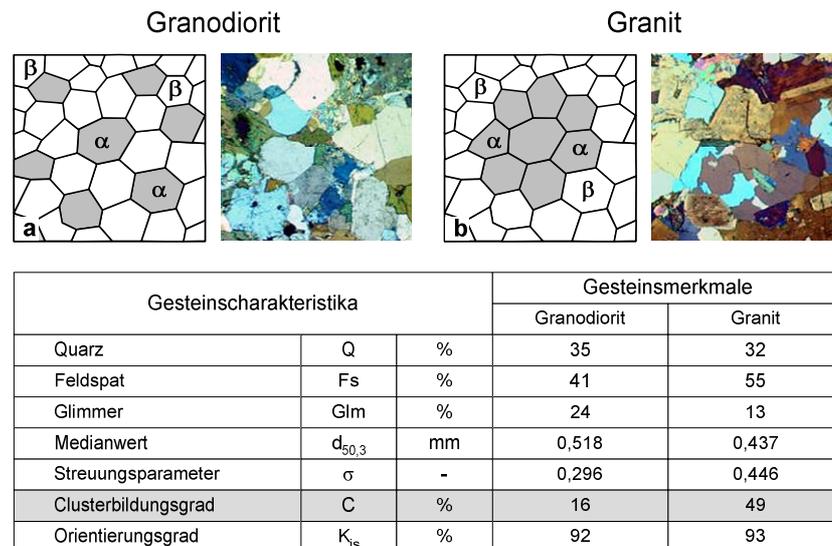


Abbildung 4-20: Verteilung der Mikrokörper (Clusterbildung): Granodiorit (Oberottendorf) – dispergierte Phase, Granit (Baden-Baden) – agglomerierte Phase

Es wurde vorgeschlagen, den Grad des Kontakts zwischen den Mikrokörper ein und derselben Phase mit Hilfe eines Clusterbildungsgrades zu bestimmen [19, 30, 37, 117]. Es soll eine Phase α in einem zwei- oder mehrphasigen Gestein betrachtet werden. Alle übrigen Phasen werden mit β bezeichnet. In einen solchen Gestein beobachtet man unter dem Mikroskop zwei Kategorien von Grenzflächen – zwischen den unterschiedli-

chen Phasen (α - β) und zwischen den Mikrokörpern ein und derselben Phase (α - α) (Abbildung 4-21).

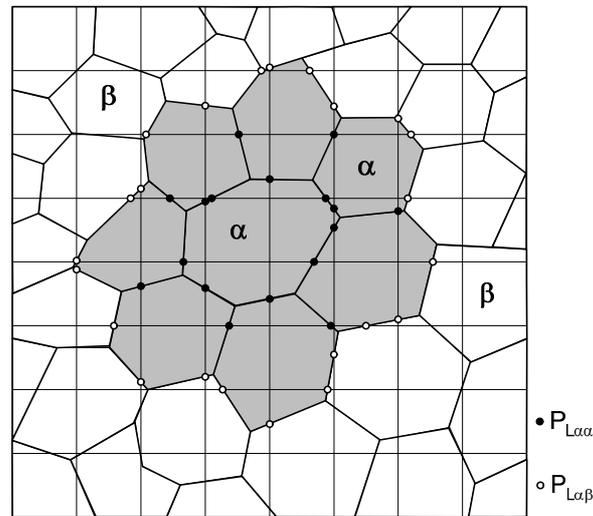


Abbildung 4-21: Bestimmung des Clusterbildungsgrades

Mit Hilfe der Methode der zufälligen Schnittlinien kann man die entsprechenden spezifischen Grenzflächen $S_{\alpha\beta}$ und $S_{\alpha\alpha}$ getrennt ermitteln. Dann wird der Clusterbildungsgrad der Phase α wie folgt bestimmt:

$$C_{\alpha} = \frac{S_{\alpha\alpha}}{S_{\alpha\alpha} + S_{\alpha\beta}} = \frac{2P_{L\alpha\alpha}}{2P_{L\alpha\alpha} + P_{L\alpha\beta}} \quad (33)$$

4.5.3.2 Orientierung

Ein orientiertes Gefüge kann man durch so genannte ebene Schnittzahlrosen $R(\varphi)$, die den Zusammenhang zwischen den mittleren Schnittpunktzahlen P_L je Längeneinheit und den Sekantenrichtungen zeigt und in Polarkoordinaten dargestellt wird, in mehreren Schliffebenen quantitativ erfassen. Diese sind für Schliffebenen durch Proben ohne Vorzugsorientierung ein Kreis, für stark orientierte Mikrokörper ergeben sich zwei, sich nur wenig überlagernde, Kreise (Abbildung 4-22). Die ebenen Schnittzahlrosen kann man als ebene Schnitte einer räumlichen Schnittzahlrose betrachten [117].

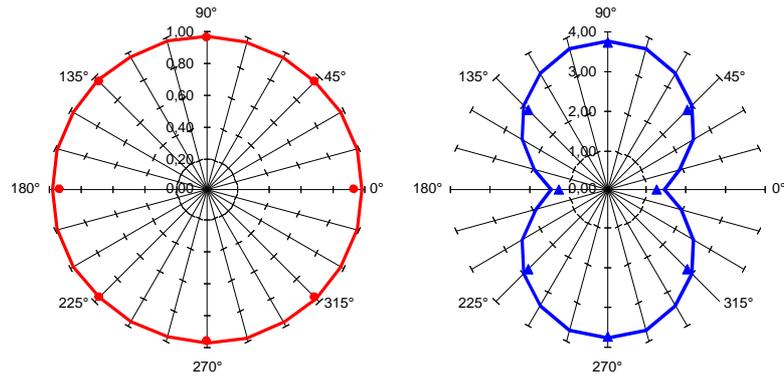


Abbildung 4-22: Schnitzzahlrose für isotropes Gefüge und für orientiertes Gefüge. (Zahlen bezeichnen die Zahl der Schnittpunkte einer Messlinie mit den Grenzflächen pro mm Linienlänge [117])

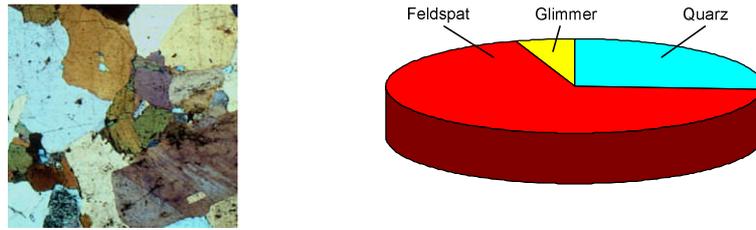
Für ein gleichzeitig flächen- und linienhaft orientiertes Gefüge sind Messungen an drei senkrecht aufeinander stehenden Schnittflächen erforderlich [117, 125]. Die Grundparameter des orientierten Gefüges lassen sich dabei aus den gemessenen Schnittpunktzahlen in orthogonalen Raumrichtungen und aus der Anzahl der Teilchen pro Flächeneinheit ermitteln.

Aus den Parametern der räumlichen Schnitzzahlrose (siehe Abschnitt 4.3) lassen sich auch die Kennwerte einer räumlichen Anordnung (Anteile linien- und flächenorientierter sowie orientierungsloser Grenzflächen) ableiten (siehe Abbildung 4-23) [19, 48, 117, 143, 148]:

$$K_{lin} = \frac{\frac{\pi}{2} n_{lin}}{2n_{is} + \frac{\pi}{2} n_{lin} + n_{fl}} \quad (34)$$

$$K_{fl} = \frac{n_{fl}}{2n_{is} + \frac{\pi}{2} n_{lin} + n_{fl}} \quad (35)$$

$$K_{is} = 1 - K_{lin} - K_{fl} \quad (36)$$



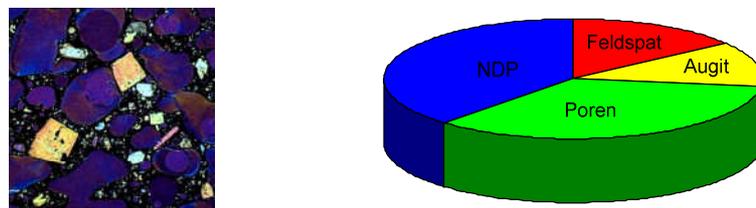
Phasen	Art	Einheit	Quarz	Feldspat	Glimmer	ΣMikrokörper
Volumenanteil	ϵ_V	%	27	70	3	100
Linearer Orientierungsgrad	K_{lin}	%	0	9	16	4
Flächiger Orientierungsgrad	K_{fl}	%	11	2	5	1
Isotroper Orientierungsgrad	K_{is}	%	89	89	79	95

Abbildung 4-23: Kennwerte einer räumlichen Anordnung des Granits aus Meissen

4.5.3.3 Raumerfüllung

Die Gesteine sind praktisch nie vollkommen kompakt, d. h. der Aggregatraum ist nicht nur von Festbestandteilen erfüllt, sondern zwischen ihnen befinden sich Hohlräume (z. B. Poren), die normalerweise Gas (z. B. Luft) und/oder wässrige Lösungen enthalten. Der Raumerfüllungsgrad kann für verschiedene Gesteine innerhalb weiter Grenzen variieren. Aber auch die Größe, Verteilung und Art der Poren weisen große Unterschiede auf. Zur Beurteilung mancher Eigenschaften der Gesteine ist es notwendig, den Charakter der Raumerfüllung näher zu untersuchen. So lässt sich von vornherein sagen, dass Festigkeitseigenschaften, aber auch jegliches Verhalten, das mit der Durchdringungsfähigkeit (Durchlässigkeit, Permeabilität) des Aggregates mit Wasser, wässrigen Lösungen oder Gasen in Zusammenhang steht, davon abhängig sein werden. Der Volumenanteil ϵ_{VH} dieser Ungängen kann zur Bestimmung des Raumerfüllungsgrades ϵ_{VF} dienen (Gleichung 37).

$$\epsilon_{VF} = 1 - \epsilon_{VH} \tag{37}$$



Phasen	Art	Einheit	Feldspat	Augit	Poren	NDP
Volumenanteil	ϵ_{VF}	%	15	12	35	38

Abbildung 4-24: Raumerfüllung (Basalt aus einer maritimen Lagerstätte)

Die Angabe der Ungängen erfolgt in der Regel tabellarisch (Abbildung 4-24).

4.6 Ersatz der mineralogisch-petrographischen Kennzeichnung der Gesteine durch quantitative Gesteinskennwerte

In Ergebnis der neuen mathematisch-petrographischen Methode kann festgestellt werden, dass die verbale Beschreibung der Gesteinsstruktur und -textur durch quantitative Gesteinskennwerte ersetzt werden kann.

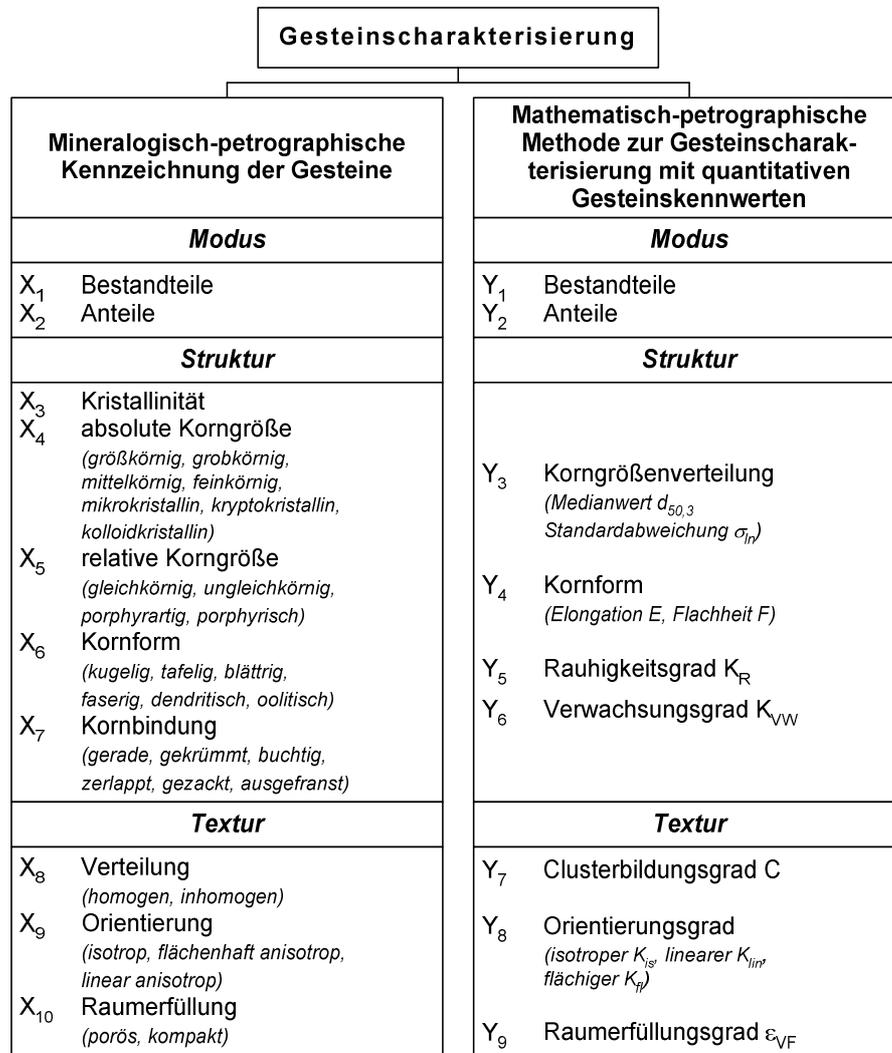


Abbildung 4-25: Ersatz der mineralogisch-petrographischen Kennzeichnung der Gesteine durch quantitative Gesteinskennwerte

Diese neuen Werte werden zunächst unabhängig und anwendungsneutral ermittelt und können dann durch Interpretation für den speziellen Anwendungsfall benutzt werden (Abbildung 4-25). Der große Vorteil dieser Methodik ist aber, dass die quantitativen Kennwerte einer Gesteinsprobe immer gleich bleiben, es ändert sich nur ihre Interpretation.

5 Mathematisch-statistische Ermittlung der notwendigen Proben- bzw. Gesichtsfeldanzahl für die Gesteinscharakterisierung

Bei visueller Zählung ist es zweckmäßig, die Vergrößerung des Mikroskops in Abhängigkeit der mittleren Mineralkorngröße zu wählen. Als Faustregel zur Wahl der passenden Vergrößerung gilt, dass die durchschnittliche Anzahl der im Gesichtsfeld gleichzeitig zu sehenden Körner im Allgemeinen im Bereich von 10 bis 20 liegen sollte. Die Festlegung der Koordinaten der Gesichtsfelder ist im Dünnschliffplan zu vermerken. Je nach Anzahl der Gesichtsfelder sind diese gleichmäßig über die Dünnschlifffläche zu verteilen (siehe Anhang B, Abbildung B. 5).

Für die Untersuchung der Anwendung der mathematisch-petrographischen Methode zur Quantifizierung der petrographischen Eigenschaften der Festgesteine wurden insgesamt 341 Proben verschiedener Gesteinstypen (z. B. Magmatite, Sedimentite und Metamorphite) untersucht (siehe Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Anzahl und Verteilung der untersuchten Gesteine

Gesteine					
Magmatite	Anzahl	Sedimentite	Anzahl	Metamorphite	Anzahl
Andesit	5	Dolomit	9	Amphibolit	6
Basalt	37	Feuerstein	3	Eklogit	1
Dacit	2	Grauwacke	16	Fruchtschiefer	4
Diabas	39	Kalkstein	69	Gneis	31
Diorit	4	Mergel	10	Granulit	7
Gabbro	3	Sandstein	16	Hornfels	1
Granit	22			Marmor	5
Granodiorit	3			Mylonit	1
Pyroxenit	1			Phyllit	3
Quarzporphyr	21			Quarzit	17
Syenit	1			Schiefer	4

Als Kriterien für die Bewertung der Methode werden die Bestimmungsgenauigkeit und der erforderlichen Zeitaufwand verwendet. Die mathematisch-petrographische Methode erlaubt die Ermittlung aller mineralspezifischen (z. B. Modus) sowie allgemeinen Gefügeparameter (z. B. Struktur und Textur) mit festgelegter Genauigkeit. Die zweckmäßige Bestimmungsgenauigkeit liegt bei ca. $\pm 5\%$ und ist von der Anzahl der ausgewerteten Gesichtsfelder abhängig (siehe Anhang B, Abbildung B. 5). Der erforderliche Zeitauf-

wand für die Auswertung ist in der Regel mit ca. 2 Wochen pro Gestein (3 Proben) anzusetzen.

Die Ermittlung der mathematischen Kennzahlen erfolgt in Form von Mittelwerten, die mit Messfehlern versehen sind. Es ist Aufgabe der Fehlerabschätzung zu ermitteln, in welchem Bereich der „wahre“ Wert bei angenommener statistischer Sicherheit P liegt. Ziel einer physikalischen Messung ist die Ermittlung des wahren Wertes, der den Messwerten der Stichprobe zugrunde liegt. Die Gesetze der mathematischen Statistik besagen, dass auf Grund der endlichen Anzahl von erhaltenen Messwerten über den wahren Wert nur eine Wahrscheinlichkeitsaussage möglich ist. Der beste Schätzwert für den wahren Wert ist das arithmetische Mittel \bar{x} , ermittelt aus n Stichprobeneinzelwerten x_i :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{38}$$

Bei den praktischen Gesteinsuntersuchungen kommt es vor allem darauf an, die durchschnittliche Zusammensetzung größerer Gesteinsbereiche, z. B. eines Steinbruchs, zu ermitteln. Die Ausmessung einer definierten Anzahl von Gesichtsfeldern wird in jedem Fall mehr oder weniger starke Streuungen der Messergebnisse aufweisen. Dieser Sachverhalt soll beispielhaft durch die Bewertung nachfolgender 4 Gesteinsproben (Granite aus Obercrinitz, Heberndorf und Meißen sowie Gneis aus Oberschöna) verdeutlicht werden. In Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse der Modusbestimmung sowie die mittlere Korngröße der 3 relativ homogenen Granite mit einem anisotropen Gneis aus der Lagerstätte Oberschöna gegenübergestellt (Gesteinsdaten der Gesteine, siehe Anhang A, Anlagen 17 bis 32).

Tabelle 5-2: Modus und mittlere Korngröße der untersuchten Gesteine

Gestein	Modus [Vol.-%]			mittlere Korngröße [mm]
	Quarz	Feldspat	Glimmer	
Granit, Obercrinitz	29,4	68,8	1,8	0,565
Granit, Heberndorf	25,1	71,7	3,2	1,317
Granit, Meißen	29,3	68,4	2,3	2,135
Gneis, Oberschöna	36,3	34,8	28,9	0,528

Für jede Lagerstätte wurden jeweils 9 Dünnschliffe mit ca. 180 bis 225 Gesichtsfelder ausgewertet (siehe Tabelle 5-3), wobei ein Gesichtsfeld einer Messung entspricht.

Tabelle 5-3: Ergebnisse der statistischen Auswertungen

Gestein	Anzahl der Gesichtsfelder	Vergrößerung des Mikroskops	Standardabweichung σ	Standardabweichung des Mittelwertes $\Delta \bar{x}$
Granit, Obercrinitz	185	32	10,1	1,5
Granit, Heberndorf	180	16	10,3	1,5
Granit, Meißen	225	16	21,5	2,8
Gneis, Oberschöna	180	32	16,8	2,5

Als Maß für die Streuung der Messwerte um den Mittelwert wurde die Standardabweichung σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (39)$$

berechnet.

Unter der Voraussetzung, dass die Messwerte normalverteilt sind, liegen ca. 68 % aller Messwerte im Bereich $\bar{x} \pm \sigma$. Diese Streuung der Messwerte bestimmt somit die Zuverlässigkeit des Ergebnisses der gesamten Messreihe. Sie ist zugleich ein Maß für die Breite der Häufigkeitsverteilung.

Die Zuverlässigkeit des Gesamtmittelwertes ist umso höher, je kleiner die Standardabweichung σ der Einzelmessungen ist und je höher deren Anzahl n ist. Als Maß für die Verlässlichkeit des Gesamtmittelwertes kann die Standardabweichung des Mittelwertes gemäß Gleichung 40

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (40)$$

berechnet werden [30, 116].

Nach der Theorie der Beobachtungsfehler (t-Verteilung nach Student) berechnet man die zufällige Standardabweichung des Mittelwertes $\Delta \bar{x}$, die den Vertrauens- bzw. Konfidenzbereich abgrenzt mit einem Faktor $t_{(P,n)}$, der von der geforderten statistischen Si-

cherheit P und von der Anzahl der Messungen (Gesichtsfelder) n abhängt (siehe Gleichung 41) [116, 132].

$$\Delta\bar{x} = t_{(P,n)} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{41}$$

Die berechneten Größen sind ebenfalls in Tabelle 5-3 eingetragen. Durch Umstellung von Gleichung 41 kann bei Annahme einer statistischen Sicherheit (z. B. P = 95%) und Vorgabe einer gewünschten Genauigkeit der Mittelwertbestimmung (z. B. Mittelwerte der Mineralvolumenanteile) die erforderliche Anzahl der Gesichtsfelder

$$n = \frac{t_{(P,n)}^2 \cdot \sigma^2}{\Delta\bar{x}^2} \tag{42}$$

prognostiziert werden [132].

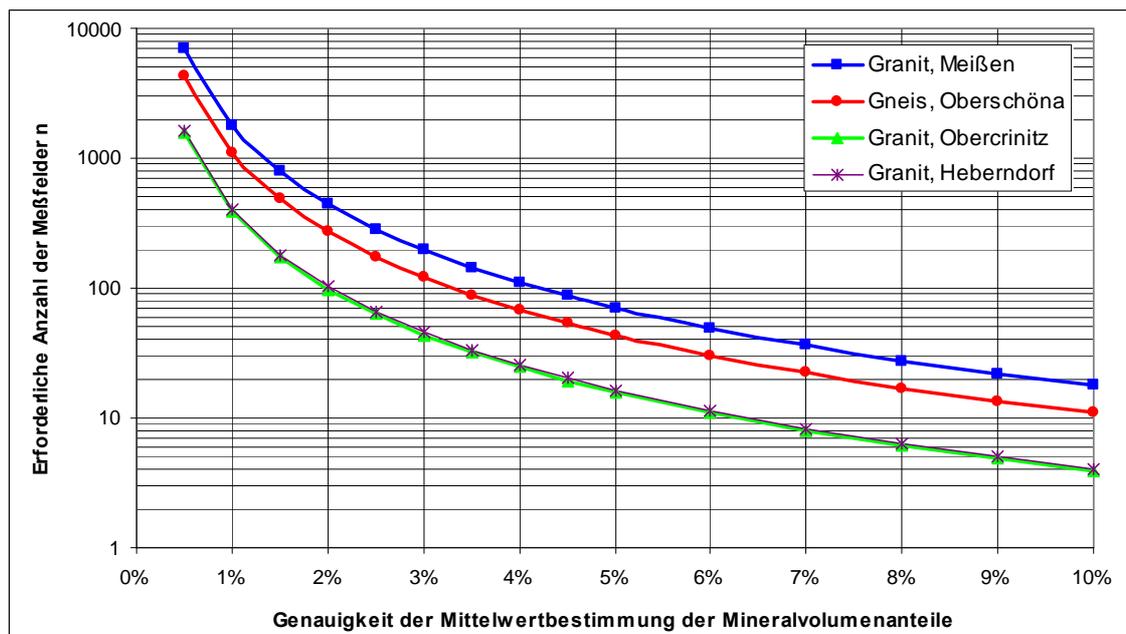


Abbildung 5-1: Zusammenhang zwischen der Anzahl der erforderlichen Gesichtsfelder und der gewünschten Genauigkeit der Mittelwertbestimmung der Mineralvolumenanteile (P = 95%, t = 1,96)

Der Zusammenhang zwischen der erforderlichen Anzahl der Gesichtsfelder und der gewünschten Genauigkeit der Mittelwertbestimmungen der Mineralvolumenanteile ist in Abbildung 5-1 grafisch dargestellt.

Aus der Abbildung 5-2 geht hervor, dass bei Reduzierung der Anzahl der Gesichtsfelder von ca. 200 auf ca. 60 Gesichtsfelder je Gesteinstyp eine Verschlechterung der

Genauigkeit der Mittelwertbestimmung, je nach „Isotropie“ der ausgewählten Gesteinsgefüge, um ca. 1 bis 2% zu verzeichnen ist.

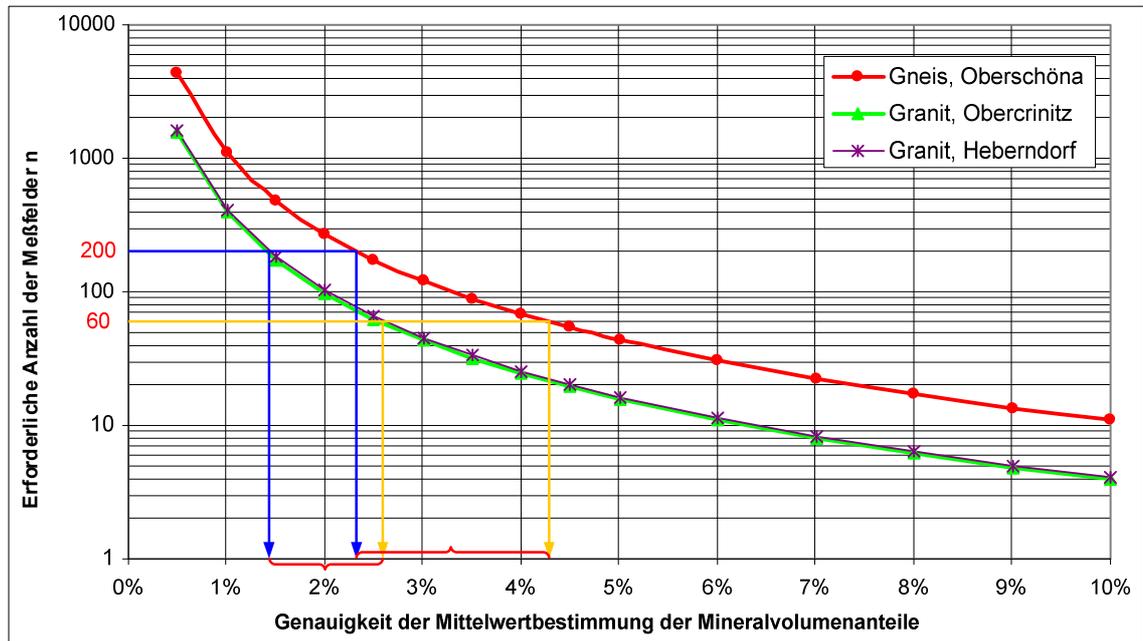


Abbildung 5-2: Verschlechterung der Genauigkeit durch Reduzierung der Anzahl der Gesichtsfelder von 200 auf 60

Durch die Reduzierung der Anzahl der Gesichtsfelder von 200 auf 60 kann jedoch der Zeitaufwand für die Dünnschliffauswertung von ca. 2 Wochen auf ca. 3 Tage reduziert werden.

Analoge statistische Betrachtungen sind ergänzend auch für die anderen mathematischen Kennwerte vorzunehmen.

6 Darstellung ausgewählter Beispiele zum Zusammenhang zwischen Gesteinskennwerten und relevanten Produkteigenschaften bzw. Systemkenngrößen

Nach dem wissenschaftlich-technischer Stand (siehe Kapitel 2) werden Gesteine nach petrographischen Gesichtspunkten beschrieben. In der Aufbereitungstechnik ist diese Verfahrensweise nicht ausreichend. Hier ist eine mathematisch-petrographische Charakterisierung der Gesteine erforderlich.

Im Ergebnis umfangreicher experimenteller Zerkleinerungsuntersuchungen mit ca. 20 verschiedenen Gesteinsarten in unterschiedlichen Zerkleinerungsmaschinen (z. B. Prall- und Kegelbrecher) konnte mit Hilfe der mathematisch-statistischen Modellierung (z. B. multiple Regressions- und Korrelationsanalyse, Neuronale Netze) eine Einflussgewichtung der verschiedenen Einflussgrößen auf ausgewählte Zielgrößen vorgenommen werden [31, 145].

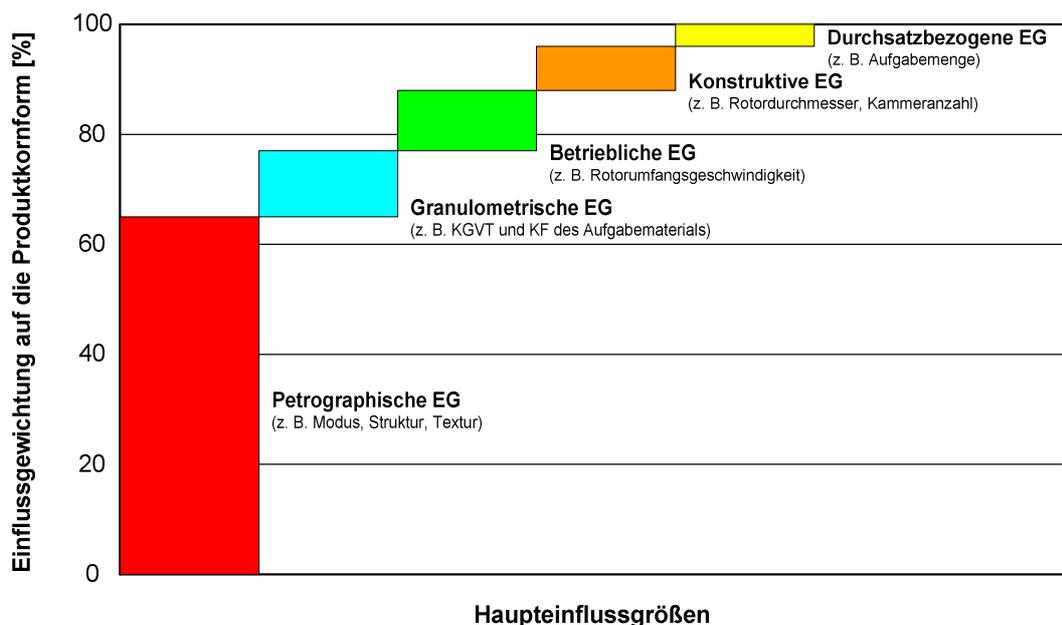


Abbildung 6-1: Pareto – Diagramm. Auswirkung der Einflussgrößen auf die Kornform (Zerkleinerung in einer Rotorschleudermühle – RSMS²: Aufgabegut 16/31,5 mm, Rotorumfangsgeschwindigkeit $v_R = 58,5$ m/s, Aufgabegutdurchsatz $\dot{m}_A = 50$ t/h) [115]

In Abbildung 6-1 wird beispielhaft aufgezeigt, dass die Gesteinseigenschaften (z. B. petrographische Einflussgrößen) bei der Gesteinszerkleinerung in einer Rotorschleudermühle einen überragenden Einfluss von ca. 65% auf die Produktkornform (z. B.

² Rotorschleudermühle – RSMS 0913; Hersteller BHS, Sonthofen

Fehlkornanteil der Kornfraktion 5/8 mm) haben [115]. Das bedeutet z. B., dass bei bestimmten Gesteinseigenschaften die Kornform der Endprodukte durch maschinentechnische und technologische Maßnahmen nur noch bedingt beeinflusst werden kann.

Das aufgeführte Beispiel soll verdeutlichen, dass detaillierte Kenntnisse über die abzubauenende Gesteinslagerstätte zur Sicherung eines optimalen Maschinen- bzw. Anlagenbetriebes und zur Erreichung der erforderlichen Qualitätswerte (z. B. Zerkleinerungsergebnis, Kornform) der Endprodukte von großem Interesse sind.

Um den Einfluss des Mineralbestandes und des Gefüges auf die spezifischen Produkteigenschaften und die Systemkenngrößen sichtbar zu machen, werden weitere qualitative Korrelationen vorgenommen (siehe Anhang A, Anlagen 13 bis 16).

Nachfolgend werden Zusammenhänge zwischen den ausgewählten Gesteinskennwerten und den relevanten Produkteigenschaften bzw. ausgewählten Systemkenngrößen dargestellt.

6.1 Zusammenhang zwischen ausgewählten Gesteinskennwerten und relevanten Produkteigenschaften

Die im folgenden Abschnitt dargestellten Erkenntnisse basieren auf Zusammenhängen aus der Fachliteratur, auf Versuchsergebnissen, die im Institut für Aufbereitungsmaschinen gewonnen wurden und auf eigenen Untersuchungen.

6.1.1 Einfluss ausgewählter Gesteinskennwerte auf den Zerkleinerungsgrad

Die Auswirkung der Gesteinscharakteristika auf den Zerkleinerungsvorgang wurde am Beispiel der Prallzerkleinerung untersucht.

Zur Beurteilung der Zerkleinerungswirkung wird der Zerkleinerungsgrad z verwendet [5, 122]. Er wird hier als Quotient aus dem Medianwert der Korngröße des Aufgabegutes d_{zA} und des Fertiggutes d_{zF} definiert:

$$z = \frac{d_{zA}}{d_{zF}} \quad (43)$$

Durch diese Beziehung (siehe Gleichung 43) kann die relevante Korngröße des Fertiggutes d_{zF} durch Verhältnisse zwischen dem Medianwert der Korngröße des Aufgabegutes d_{zA} und des gemessenen Zerkleinerungsgrades z abgeleitet werden.

$$d_{zF} = \frac{d_{zA}}{z} \quad (44)$$

Aus der Fachliteratur [5, 115, 122] ist bekannt, dass die spezifische Oberfläche und auch der Rauigkeitsgrad der Mineralkörner einen Einfluss auf den Zerkleinerungsgrad der Gesteine haben. Über diese beiden Kennwerte tritt eine starke Auswirkung auf das Zerkleinerungsergebnis, d. h. auf den Korngrößenaufbau des zerkleinerten Gutes ein. Wie die Untersuchungen gezeigt haben, verringert sich der Zerkleinerungsgrad mit zunehmender spezifischer Oberfläche und wachsendem Rauigkeitsgrad erheblich.

In Abbildung 6-2 ist der statistische Zusammenhang zwischen dem Zerkleinerungsgrad und dem Produkt aus spezifischer Oberfläche und Rauigkeitsgrad dargestellt. Es ist erkennbar, dass z. B. der Granit (Obercrinitz) mit einer spezifischen Oberfläche von 3,4 mm²/mm³ und einem Rauigkeitsgrad von 8% unter definierten Zerkleinerungsbedingungen einen Zerkleinerungsgrad von 4,2 aufweist. Im Vergleich dazu besitzt Basalt mit einer spezifischen Oberfläche von 43,3 mm²/mm³ und einem Rauigkeitsgrad von 26% nur einen Zerkleinerungsgrad von 2,0. Das heißt, unter gleichen Zerkleinerungsbedingungen besitzt das Produkt aus Basalt (Nieder-Ofleiden) eine deutlich gröbere Korngrößenverteilung gegenüber dem Produkt aus Granit (Obercrinitz).

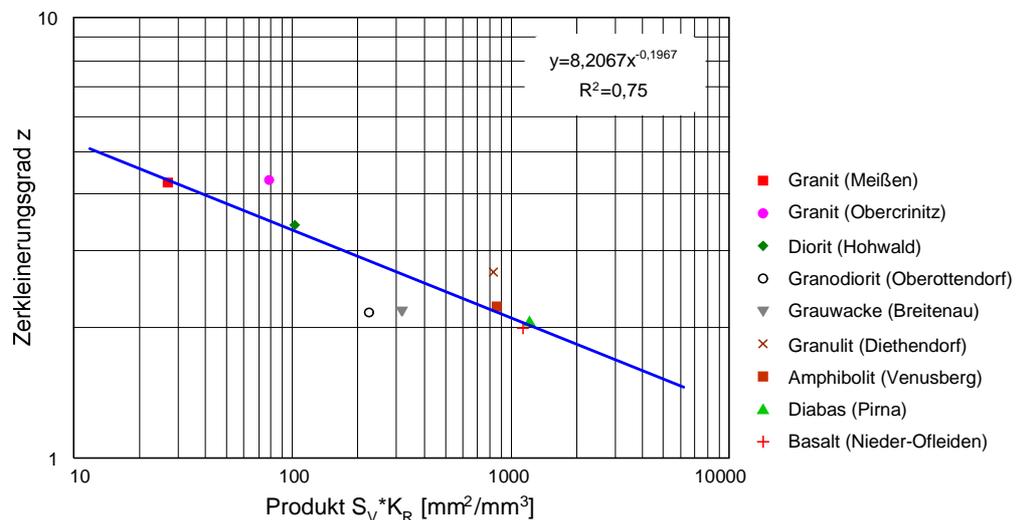


Abbildung 6-2: Einfluss der spezifischen Oberfläche und des Rauigkeitsgrades auf das Zerkleinerungsergebnis (Aufgabegut 16/31,5 mm, Rotorumfangsgeschwindigkeit $v_R = 58,5$ m/s, Aufgabegutdurchsatz $\dot{m}_A = 50$ t/h)

In der Arbeit von Rychel [115] wird ergänzend angegeben, dass der Zerkleinerungsgrad außerdem mit der Erhöhung des Aufgabegutdurchsatzes sinkt und bei höherer Rotorumfangsgeschwindigkeit ein besseres Zerkleinerungsergebnis erreicht wird.

6.1.2 Einfluss des isotropen Orientierungsgrades auf die Produktkornform

Die Produktkornform bei der Prallzerkleinerung ist im Wesentlichen von den Gesteinscharakteristika abhängig. Gesteine können starke Unterschiede hinsichtlich der Orientierung der Minerale aufweisen, so dass bei gleichem Mineralbestand voneinander abweichende physikalische Eigenschaften auftreten. Die Ausrichtung der Gefügebestandteile wird durch die Orientierungsgrade (siehe Abbildung 6-3) charakterisiert, welche ein wichtiges Indiz zur Beurteilung der zu produzierenden Produktkornform ist.

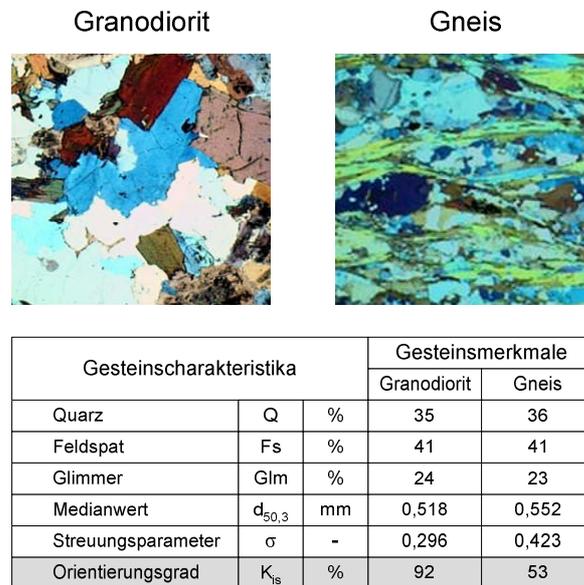


Abbildung 6-3: Isotroper Orientierungsgrad (Granodiorit aus Oberottendorf, Gneis aus Oberschöna)

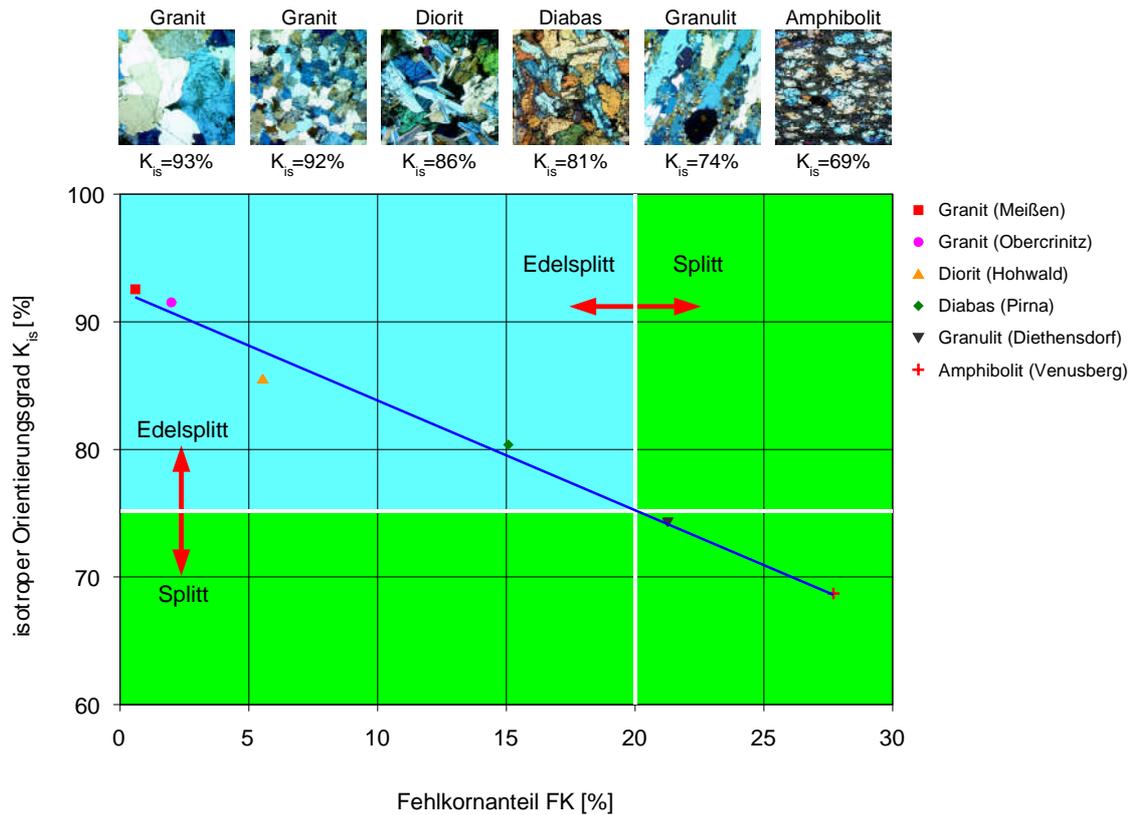


Abbildung 6-4: Zusammenhang zwischen dem isotropen Orientierungsgrad K_{is} und dem Fehlkornanteil $FK_{5/8}$ (Zerkleinerung in einer Rotorschleudermühle: Aufgabegut 16/32 mm; Ringpanzerung; Rotorumfangsgeschwindigkeit $v_R = 58,5$ m/s; Aufgabedurchsatz $\dot{m}_A = 50$ t/h)

Ausgehend von Untersuchungen in [115] kann man feststellen, dass die Gesteine mit einem isotropen Orientierungsgrad kleiner 75% Hinweise darauf geben, dass die Erzeugung von kubischen Produkten nur durch einen erhöhten Maschinenaufwand bei abgestimmter Fahrweise einer Aufbereitungsmaschine bzw. -anlage möglich ist (Abbildung 6-4).

6.1.3 Einfluss der Gesteinseigenschaften auf die Festigkeit

Zur Charakterisierung der Festigkeit eines Gesteins dienen eine Reihe von Gesteinseigenschaften (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Abhängigkeit der Festigkeit von den Gesteinseigenschaften [114]

Festigkeit der Gesteine wächst	Festigkeit wird herabgesetzt
mit dem Gehalt an druckfesten Mineralen (z. B. Quarz)	durch höhere Gehalte an leicht spaltbaren Mineralen (z. B. Glimmer, Tonminerale)
mit der Feinheit des Kornes	durch Porenräume, Klüfte und Risse
mit der Vergrößerung des Rauheitsgrades	durch Verwitterung und chemische Umwandlungen (z. B. Kaolinisierung, Sericitisierung)

6.1.3.1 Einfluss der Porosität auf die Festigkeit

Die Größe des Gesamtporenraumes in einem klastischen Sedimentgestein hängt von der räumlichen Anordnung der festen Bestandteile, ihrer Kornform und der Korngrößenverteilung ab. Je unterschiedlicher die Korngrößenzusammensetzung ist, desto geringere Werte kann die Porosität annehmen, da in den Hohlräumen zwischen den einzelnen größeren Körnern kleinere Körner Platz haben.

Tabelle 6-2: Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Porosität, dem Porenwassergehalt und der Probenbehandlung (nach [94, S. 87])

Gestein	Porosität [Vol.-%]	Porenwassergehalt, lufttrocken [%]	relative Festigkeitsminderung lufttrockener oder wassergesättigter Proben [%]	
			lufttrocken	wassergesättigt
			Festigkeit im Exsikkator getrockneter Proben=100%	
Quarzitischer Schiefer	0,25	25	64	53
Pennant-Sandstein	2,5	42	51	45
Markham-Sandstein	6,0	22	57	
Parkgate-Sandstein	10,0	9	68	45
Quarzitischer Sandstein	15,0	4	70	48
Darley Dale-Sandstein	19,5	3	80	45

Die Porosität und die Verteilung des Porenraumes sind für die Festigkeit entscheidend. Insbesondere tritt durch die Ausfüllung des Porenraumes mit Wasser eine Festigkeitsminderung ein. Die Druckfestigkeit einer wassergesättigten Probe liegt in Abhängigkeit vom Wasseraufnahmevermögen und von anderen Faktoren niedriger als die einer tro-

ckenen Probe. Nach Peschel [94] ist sie bei magmatischen und metamorphen Gesteinen um 3 bis 15%, bei Sedimentgesteinen um 10 bis 50% niedriger. Die in Tabelle 6-2 dargestellten Fakten sprechen für diese Deutung, da selbst geringe Porenwassergehalte lufttrockener Proben festigkeitsmindernd wirken.

Die Festigkeit eines Gesteins sinkt bei sonst gleicher Zusammensetzung, um so mehr, je größer seine Porosität ist (Abbildung 6-5) [92, 106].

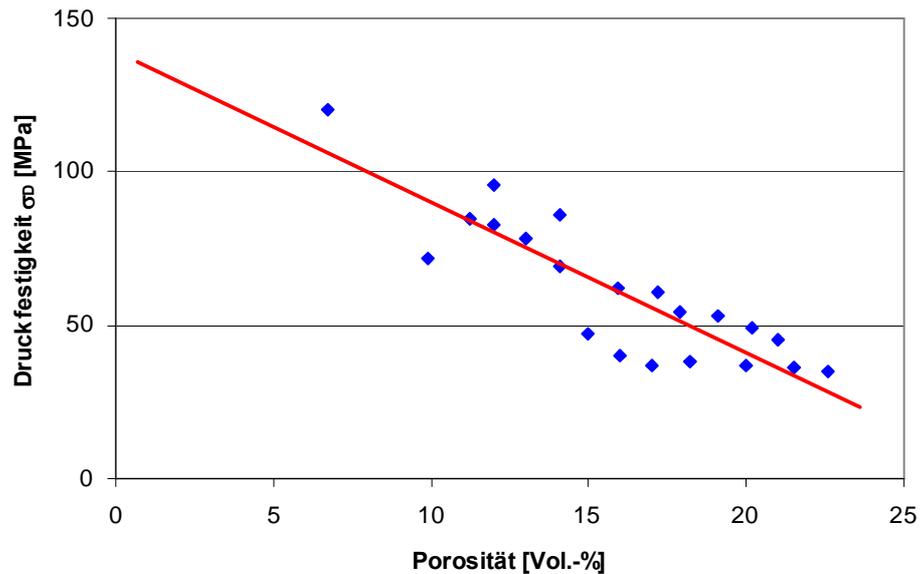


Abbildung 6-5: Beispiel für die Abhängigkeit zwischen Porosität und Druckfestigkeit beim Bundsandstein aus Thüringen (nach [106, S. 105])

Poröse Gesteine sind oft schlagfester als hohlraumfreie. Die Poren dämpfen die dynamische Welle und der Schlag bewirkt eine oberflächige Zertrümmerung, aber keine Spaltung.

6.1.3.2 Einfluss der Verwitterung und der Mineralumwandlungen auf die Festigkeit

Einfluss der Verwitterung auf die Festigkeit

Durch den Einfluss der Atmosphäre unterliegen Gesteine mechanischen, chemischen und biologischen Zerstörungsprozessen, die als Gesteinsverwitterung bezeichnet werden. Die Art der Verwitterung hängt vom Klima (Temperaturen und Temperaturschwankungen, Luftfeuchtigkeit) und den auf das Gestein einwirkenden Agenzien (Sauerstoff, Spurengase, Säuren, Wasser) ab.

Bei der Verwitterung wird der Gesteinsverband allmählich aufgelöst, was zu einer deutlichen Verminderung der Gesteinsfestigkeit führen kann (Abbildung 6-6). Für die Natursteinindustrie ist es wichtig, den Verwitterungsgrad eines Gesteines quantitativ zu erfassen. Zur Beschreibung von Verwitterungsgraden hat sich international eine Einteilung in 6 Klassen der Verwitterungsgrade durchgesetzt (siehe Anhang A, Anlage 11).

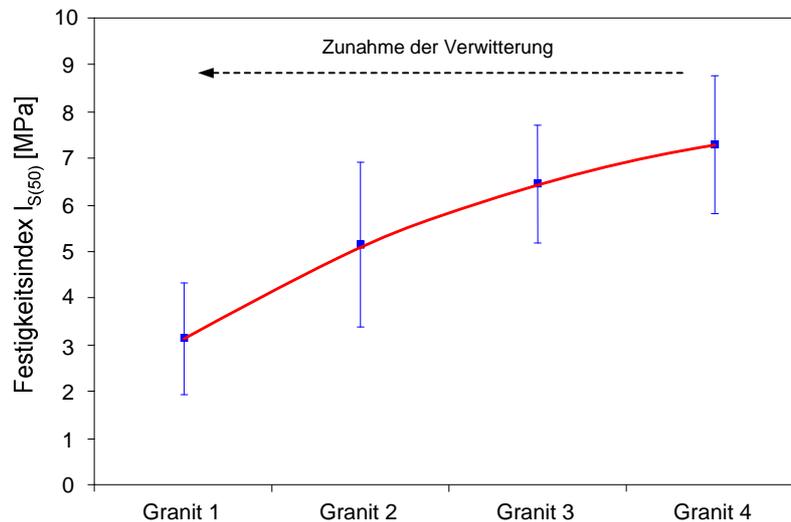


Abbildung 6-6: Einfluss der Verwitterung auf den Festigkeitsindex von Granit aus Schärding (Österreich)

Eine der wichtigsten Prüfungen auf Wetterbeständigkeit der Gesteine besteht daher in der Feststellung des Verwitterungsgrades der benutzten Materialien.

Nur durch mikroskopische Untersuchungen lässt er sich einwandfrei bestimmen (siehe Abbildung 6-7). Eine ungleiche Temperaturoausdehnung in verschiedenen Richtungen innerhalb eines Mineralkornes oder von benachbarten Mineralkörnern verursacht bei Temperaturänderung innere Spannungen im Gestein. Dadurch entstehen Spannungsrisse und Klüfte, die den Verwitterungsagenzien neuen Zutritt verschaffen.

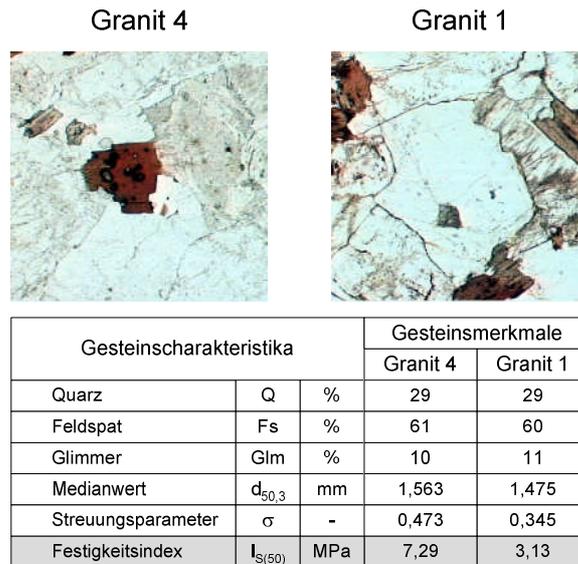


Abbildung 6-7: Einfluss der Verwitterung auf die Festigkeit.
 Granit 4 (Schärding): Es sind keine farblichen, mikro- oder makroskopischen Veränderungen erkennbar.
 Granit 1 (Schärding): Die Färbung ist deutlich rotbraun entlang von Klüften, das Gestein ist deutlich entfestigt.

Nach Niggli [65] lassen sich die Hauptgemengeteile der Gesteine nach ihrer Wetterbeständigkeit folgendermaßen einteilen (siehe Tabelle 6-3).

Tabelle 6-3: Einteilung der Minerale nach dem Grad ihrer Wetterbeständigkeit [65, S. 274]

sehr beständig	beständig	weniger beständig	unbeständig	relativ löslich
Quarz Muskovit Turmalin Zirkon Rutil Brucit Anatas	Spinell Granat Ilmenit Magnetit Chlorit Talk Sillimanit Disthen Staurolith Andalusit Epidot Sphen	Augit Hornblende Orthoklas Mikroklin Albit Oligoklas Zeolithe	Olivin Labradorit Andesin Biotit Serpentin Leucit Nephelin Apatit Glaukonit Pyrit Glas	Calcit Dolomit Gips Anhydrit

Eine besondere Rolle spielt die mittelbare Kornbindung bei Sedimenten. Hier bestimmt das Bindemittel oft entscheidend die Witterungsbeständigkeit. Falls das Bindemittel zwischen den körnigen Bestandteilen (z. B. Quarzkörner) ein karbonatischer oder toniger Zement ist, verlaufen die Bruchflächen durch das Bindemittel. Liegt ein kieseliger Zement vor, so wird der Bruch vorwiegend durch die weniger harten körnigen Bestand-

teile verlaufen. Die Festigkeit und somit die Witterungsbeständigkeit werden aber dennoch weitgehend vom Zement beeinflusst.

Einfluss der Mineralumwandlungen auf die Festigkeit

Durch Mineral- und Gesteinsumwandlungen wird der Mineralbestand und demzufolge auch das Gefüge verändert. Bereits ausgeschiedene Mineralarten (z. B. Olivin) können sich zu anderen Mineralen, wie insbesondere Tremolit, Chlorit, Talk und Albit, sowie auch Hydroxyden und Iddingsit umwandeln (Abbildung 6-8). Derartige Umwandlungen beeinflussen die petrophysikalischen Eigenschaften und somit auch die Festigkeit eines Gesteins.

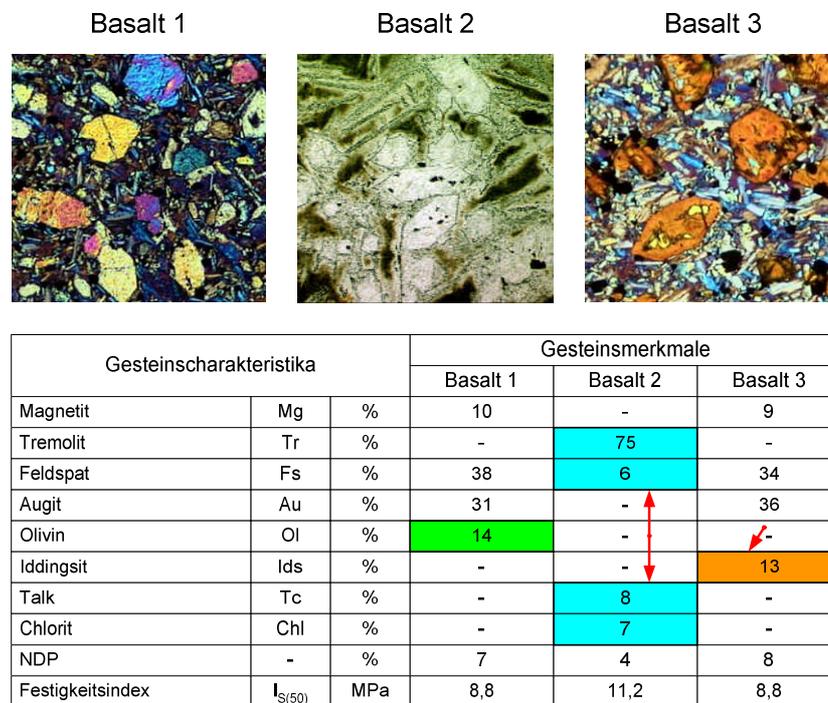


Abbildung 6-8: Einfluss der Mineralumwandlungen auf die Festigkeit.
 Basalt 1 (Mjanducha, Russland) – Neubildungen von Tremolit, Chlorit, Talk in Olivin;
 Basalt 2 (Steinefrenz) – Einsprenglinge: Olivin. Grundmasse: Pyroxen, Plagioklas, Magnetit, Glas;
 Basalt 3 (Steinefrenz) – Neubildung von Iddingsit in Olivin

In Abbildung 6-8, Basalt 1 liegt Olivin als nicht umgewandeltes Mineral vor.

In Abbildung 6-8, Basalt 2 ist nur noch die charakteristische Form von Olivin zu erkennen. Die opaken Ränder von diesen Formen bestehen aus Hydroxyden. Olivin wurde selber völlig in andere Minerale, z. B. Tremolit, Albit und Chlorit umgewandelt. Die hohe Festigkeit als charakteristisches Merkmal des Basaltes wird vor allem durch den Gehalt dieser Minerale und ihren Verwachsungsverhältnissen begründet.

In Abbildung 6-8, Basalt 3 ist Olivin zu Iddingsit umgewandelt. Der Iddingsit stellt selber kein Mineral dar, sondern ist ein Mineralgemenge aus Goethit, Hämatit, Chlorit und Tonmineralen. Diese Minerale sind größtenteils weder verwitterungsbeständig noch festigkeitsfördernd, sondern, wie Tonminerale, quellfähig. Diese Tonminerale erhöhen ihr Volumen bei Zutritt von Wasser und können das Gesteinsgefüge, insbesondere bei wechselnden Witterungsbedingungen (Frost, Tau), aufsprengen.

Mit sinkender Temperatur kondensieren die pneumatolytischen zu wässrigen hydrothermalen Lösungen, die ebenfalls auf den primären Mineralbestand der Gesteine einwirken können. Folgende Umsetzungserscheinungen werden durch hydrothermale Lösungen verursacht: Kaolinisierung, Sericitisierung, Chloritisierung, Zeolithisierung, Karbonatisierung, Alunitisierung und Verkieselung.

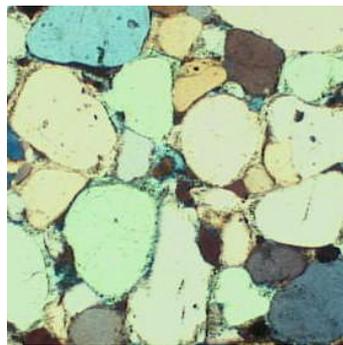


Abbildung 6-9: Sandstein mit kieseligem Zement (Althüttendorf)

Für bautechnische Zwecke sind metasomatisch und hydrothermal zersetzte Gesteine fast immer unbrauchbar. Eine Ausnahme können Gesteine bilden, die durch solche Vorgänge stark verkieselt wurden (Abbildung 6-9).

6.1.3.3 Einfluss des Rauigkeitsgrades der Mineralkörner auf die Festigkeit

Sämtliche Festigkeitseigenschaften der Gesteine ebenso wie ihre Wetterbeständigkeit hängen unmittelbar von Art und Grad der gegenseitigen Verbindung der Mineralkörner des Gefüges ab. Je größer die spezifische Oberfläche ist, mit der sich die Mineralkörner miteinander berühren, desto widerstandsfähiger ist das Gestein in mechanischer Hinsicht sowie gegenüber den Einwirkungen der Verwitterungsprozesse.

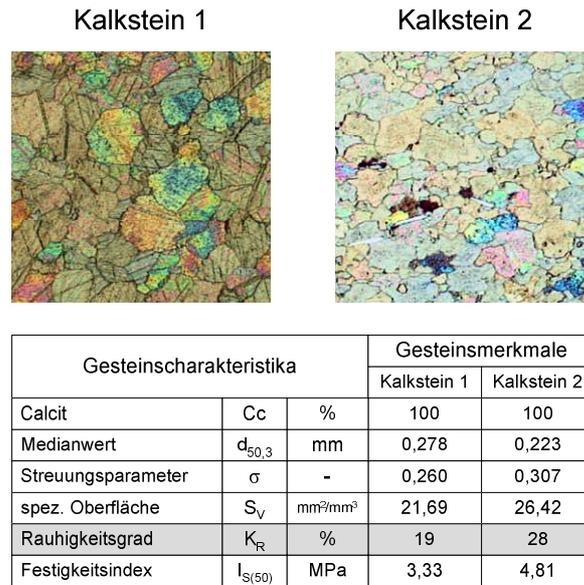


Abbildung 6-10: Einfluss des Rauhigkeitsgrades auf die Festigkeit.
 Kalkstein 1 (Hermsdorf) – kantige Korngestalt von Calcit,
 Kalkstein 2 (Lengefeld) – buchtige Korngestalt von Calcit

Der Grad der Kornbindung hängt von der Kornform und der Korngröße ab. Mit abnehmender Korngröße und entsprechender Zunahme der spezifischen Oberfläche steigert sich der Zusammenhalt des Gefüges. Feinkörnige Gesteine zeigen daher bei sonst gleichen Verhältnissen stets eine größere Festigkeit und Wetterbeständigkeit als mittel- und grobkörnige [28, 29, 130]. Je unregelmäßiger die Kornform, desto größer ist die Kornoberfläche und umso intensiver die gegenseitige Verzahnung benachbarter Kornindividuen (Abbildung 6-10).

6.1.3.4 Einfluss des mittleren Mineraldurchmessers auf die Festigkeit

Zur Bestimmung des Einflusses des mittleren Mineraldurchmessers auf die Gesteinsfestigkeit (z. B. Druckfestigkeit) wurden von zahlreichen Autoren [28, 29, 100, 130] umfangreiche experimentelle Untersuchungen mit verschiedenen Gesteinen durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Gesteine mit größerer Mineralkorngröße niedrigere Gesteinsfestigkeitswerte aufweisen als feinkörnige Gesteine. Dies wird gemäß Abbildung 6-11 an einem ausgewählten Beispiel für die Gesteinsart Grauwacke (Flagstaff-Formation aus Australien) dokumentiert.

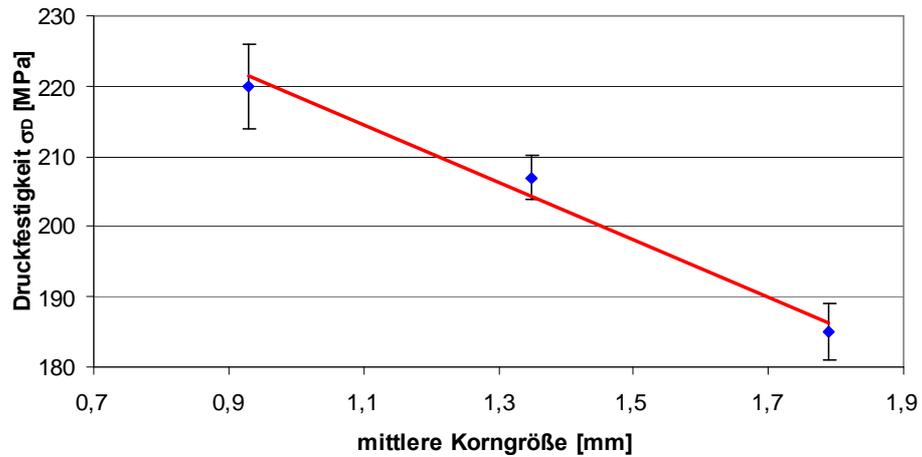


Abbildung 6-11: Einfluss der mittleren Mineralkorngröße auf die Druckfestigkeit (Grauwacke aus Flagstaff-Formation, Australien [130])

In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden eigene Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der mittleren Mineralkorngröße auf die Druckfestigkeit durchgeführt. Zur Verfügung standen Bohrkernproben aus einer Quarzitlagerstätte (Südafrika), die nach den Empfehlungen der ISRM [42] und unter Berücksichtigung der Technischen Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil C1 [137] bezüglich ihrer Druckfestigkeiten bewertet wurden.

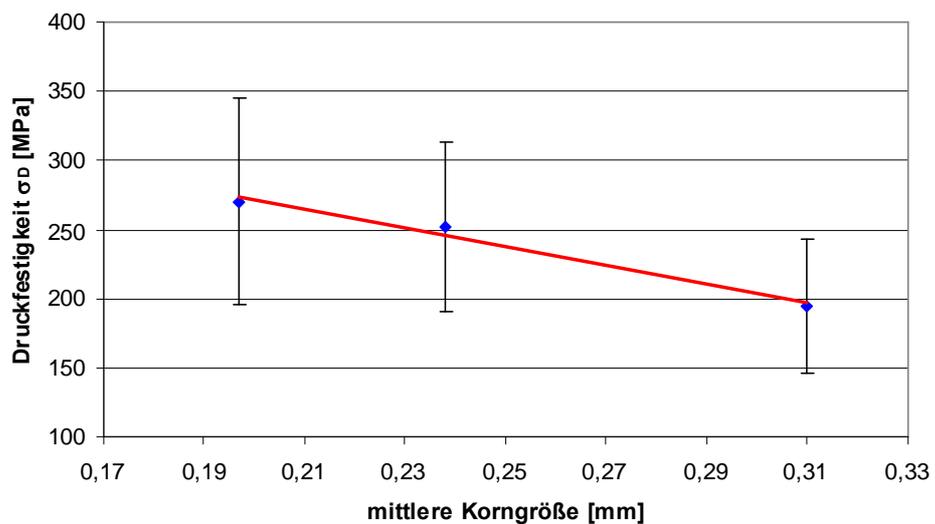


Abbildung 6-12: Einfluss der mittleren Mineralkorngröße auf die Druckfestigkeit (Quarzit aus Südafrika)

Die Ermittlung der mittleren Mineraldurchmesser erfolgte nach der im Abschnitt 4.5 beschriebenen Bewertungsmethodik. Der Einfluss des mittleren Mineraldurchmessers der Quarzminerale auf die Druckfestigkeit ist in Abbildung 6-12 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass bereits geringe Abweichungen im Mineraldurchmesser des Quarzes erhebliche Auswirkungen auf die Druckfestigkeiten der Zylinderproben haben.

6.1.3.5 Zusammenhang zwischen der einaxialen Druckfestigkeit und dem Festigkeitsindex

Für die Gesteinsbeurteilung sind dabei insbesondere nachfolgende Kennwerte wichtig:

- Festigkeitsindex $I_{S(50)}$ (in MPa), der Rückschlüsse auf die Gesteinsdruckfestigkeit und das Zerkleinerungsverhalten zulässt. Dadurch lassen sich auch in Bereichen, in denen keine Prüfkörper für Zylinderdruckversuche gewonnen werden können, Aussagen über die Festigkeit in Gesteinen treffen.
- Variationskoeffizient [116, 132] σ/\bar{x} (in %) als eine Maßzahl für die Beurteilung der Homogenität der Gesteinsstücke hinsichtlich ihrer Struktur und Textur sowie ihres Mineralbestandes.
- Einaxiale Druckfestigkeit σ_D (in MPa), die auch über indirekte Versuche, insbesondere den Point-Load-Test, ermittelt werden kann.

Zur Bewertung der Gesteinsfestigkeit der Lagerstätten wurden aus den Beprobungsbereichen je ca. 30 Gesteinshandstücke für die Durchführung der Point-Load-Tests entnommen. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind in der Tabelle 6-4 zusammengestellt. Das Verhältnis zwischen dem Festigkeitsindex $I_{S(50)}$ und der Druckfestigkeit σ_D ist von vielen Forschern bereits als eine Konstante beschrieben worden [13, 16, 134]. In den Empfehlungen der ISRM [43] wird ein Verhältnis $\sigma_D/I_{S(50)}$ mit 20 bis 25 angegeben. Für die hier behandelten Gesteine variiert der Umrechnungsfaktor zur Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit je nach Gesteinsart zwischen 19 und 31 (siehe Tabelle 6-4).

Tabelle 6-4: Zusammenstellung der Ergebnisse

Nr.	Gestein	Ort	Druckfestigkeit σ_D [MPa]	Festigkeitsindex $I_{S(50)}$ [MPa]	Faktor c
1	Andesit	Kesselsdorf	141,40	5,89	24
2	Basalt	Nieder-Ofleiden	224,90	9,37	24
3	Diabas	Mühlbach-Hausdorf	168,00	6,87	24
4	Diabas	Friedrichswalde-Ottendorf	223,60	9,08	25
5	Diorit	Hohwald	220,00	8,18	27
6	Dolomit	Lauterhofen	128,10	5,97	21
7	Gneis	Oberschöna	115,90	4,83	24
8	Granit	Obercrinitz	173,30	6,31	27
9	Granit	Heberndorf	188,50	6,39	29
10	Granit	Meißen	155,30	6,86	23
11	Granit	Schärding	206,00	7,29	28
12	Granodiorit	Demitz-Thumitz	175,50	7,04	25
13	Grauwacke	Pressing-Förtschendorf	209,00	8,13	26
14	Hornfels	Breitenau	293,00	9,45	31
15	Kalkstein	Hermsdorf	89,60	3,33	27
16	Kalkstein	Regensburg	69,40	3,72	19
17	Kalkstein	Bernburg	80,00	4,29	19
18	Kalkstein	Lengefeld	90,80	4,81	19
19	Quarzit	Oberschöna	171,00	7,12	24
20	Quarzporphyr	Löbejün	219,00	9,44	23

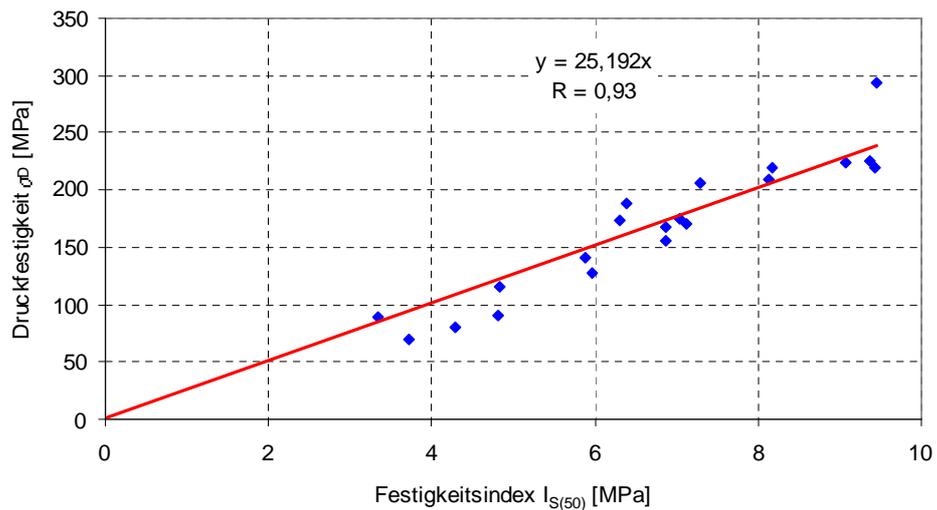


Abbildung 6-13: Zusammenhang zwischen $I_{S(50)}$ -Werten und der Druckfestigkeit

In Abbildung 6-13 wird ersichtlich, dass sich die $I_{S(50)}$ -Werte mit einem durchschnittlichen Faktor von 25 auf die einaxiale Druckfestigkeit umrechnen lassen. Dies gilt aber

nur für die Gesamtheit der Gesteine, denn wie in den Untersuchungen festgestellt wurde, benötigt jedes Gestein einen eigenen Umrechnungsfaktor.

6.1.3.6 Einfluss der Anisotropie auf die Festigkeit

Der Einfluss der Anisotropie auf die Festigkeit ist sowohl bei geschieferten Gesteinen (Metamorphite) als auch geschichteten Gesteinen (Sedimentite) zu erkennen. Deshalb ist sowohl senkrecht als auch parallel zur Schieferung bzw. Schichtung eine separate Auswertung der Belastung notwendig.

Bei der Prüfung der Festigkeitsanisotropie in geschieferten Gesteinen lassen sich die in Abbildung 6-14 dargestellten Abhängigkeiten erkennen. Abbildung 6-14 zeigt die Abhängigkeit des Festigkeitsindex von der Orientierung der Schieferung. Der geringste Festigkeitsindex wird in den Versuchen immer dann ermittelt, wenn die Belastung parallel zur Schieferung verläuft. Der höchste Festigkeitsindex tritt immer senkrecht zur Schieferung auf.

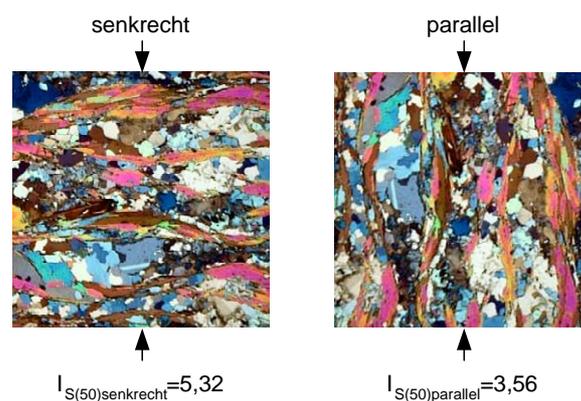


Abbildung 6-14: Abhängigkeit des Festigkeitsindexes von der Belastungsrichtung für einen Gneis (Breitenau)

Zur Quantifizierung der Anisotropie ist das Verhältnis der $I_{S(50)}$ -Werte beider Belastungsrichtungen zu bilden:

$$I_{A(50)} = \frac{I_{S(50)senkrecht}}{I_{S(50)parallel}} \quad (45)$$

6.1.4 Einfluss des Mineralbestandes auf die Hitzebeständigkeit

Gesteine müssen die hohen Temperaturen, die im Brenner von Asphaltmischanlagen auftreten, schadlos überstehen können. Bereits aus dem Mineralbestand der Gesteine können deren thermische Eigenschaften abgeleitet werden. Die gesteinsbildenden Minerale verhalten sich in ihrer Ausdehnung stark temperaturabhängig. Abbildung 6-15 zeigt, dass die Volumenexpansion der einzelnen gesteinsbildenden Minerale mit steigender Temperatur degressiv zunimmt. Bei Quarz ist dieser Effekt der temperaturabhängigen Volumenänderung besonders stark ausgeprägt.

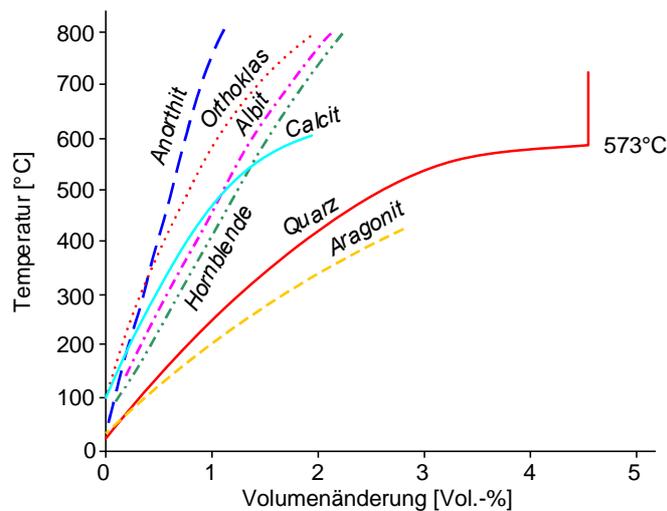


Abbildung 6-15: Volumenexpansion einiger gesteinsbildender Minerale beim Erhitzen (nach [94])

Deshalb sind quarzreiche Gesteine (Quarzite, Sandsteine, Gneise, saure Plutonite) gegenüber hohen Temperaturen in ihrem Zusammenhalt nicht beständig. Geeignete Gesteine für Beton mit hohem Hitzewiderstand sind z. B. Basalt, Diabas und Andesit.

6.1.5 Beständigkeit der Minerale gegen chemischen Angriff

Die Beständigkeit eines Gesteins gegenüber chemischen Aggressoren (Säuren und Laugen) wird wiederum von dessen Mineralgehalt bestimmt. Nach Sidorenko [128] wurde festgestellt, dass die Beständigkeit der Minerale gegen Säuren von der Lösungsenthalpie und dem Koeffizienten der Basizität abhängt (Abbildung 6-16). Der Koeffizient der Basizität K_B lässt sich mit der folgenden Gleichung berechnen [128]:

$$K_B = 0,5n \cdot (0,5n - m) \tag{46}$$

- n Ladung des Anions
- m Gesamtzahl der Sauerstoffatome

Aus der Abbildung 6-16 ist zu erkennen, dass sich die nicht säurebeständigen Minerale im oberen Bereich des Diagramms befinden. Das Eindringen einer aggressiven Lösung in Gesteinsbereiche ist von der Gesteinsporosität abhängig.

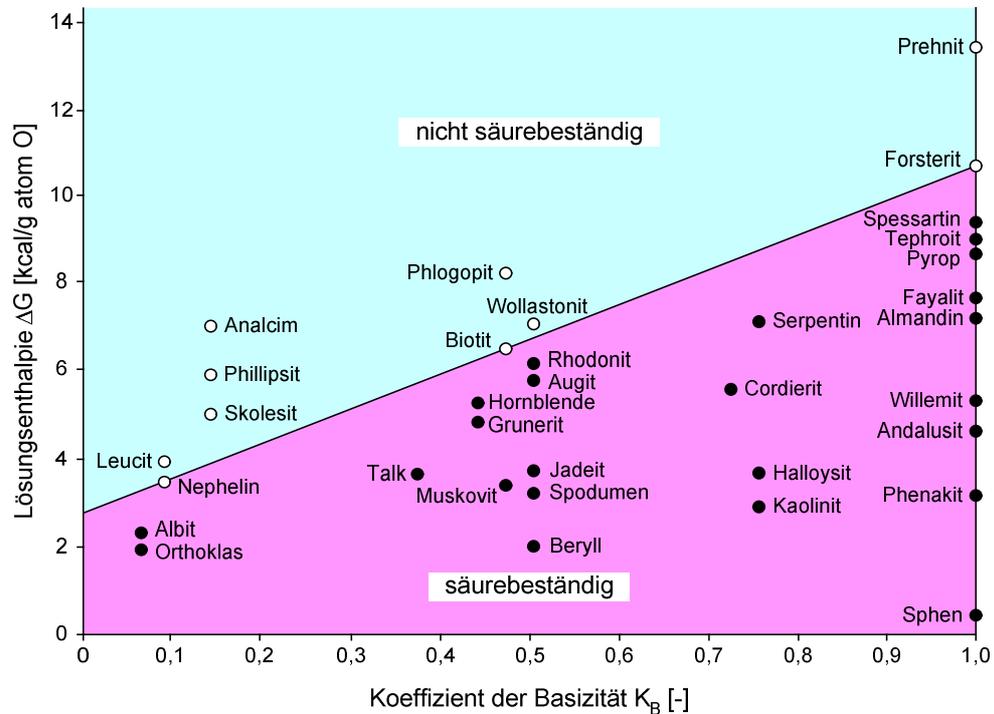


Abbildung 6-16: Abhängigkeit der Säurebeständigkeit von der Lösungsenthalpie und dem Koeffizienten der Basizität [128]

Tabelle 6-5: Chemische Beständigkeit ausgewählter Minerale gegenüber Säuren und Laugen [33]

Mineral	Beständigkeit gegenüber Säuren und Laugen
Kalifeldspat	nur in Flusssäure und Kalilauge löslich
Olivin	wird von konzentrierter Salzsäure angelöst, in Schwefelsäure findet eine stürmische Zersetzung statt
Ca-reicher Plagioklas	wird von Säuren angegriffen
Augit	außer gegen Flusssäure säurebeständig
Diopsid	außer gegen Flusssäure säurebeständig
Quarz	wird von Flusssäure stärker, von Kalilauge leicht angelöst. Gegen andere Säuren stabil
Calcit, Siderit	werden von Säuren stark angegriffen
Dolomit	Zersetzung etwas langsamer als bei Calcit
Sodalith	gegen Säuren sehr unbeständig
Nephelin	wird von Salzsäure gelöst

Die Beständigkeit des jeweiligen Minerals gegenüber Säuren und Laugen unterschiedlicher Art und Konzentration lässt sich jedoch nur bedingt von seinem Verwitterungsverhalten ableiten (Tabelle 6-5).

6.1.6 Einfluss des Gehaltes an schädlichen Bestandteilen auf die Eignung von Festgesteinen

Als wesentliche schädliche Bestandteile von Gesteinen gelten (nach [39, 94, 149]):

- abschlämmbare Bestandteile
- alkalireaktive Bestandteile
- Stoffe organischen Ursprungs
- Schwefelverbindungen
- lösliche Chloride
- oxidische Eisenerze

6.1.6.1 Abschlämmbare Bestandteile

Abschlämmbare Bestandteile sind nach TL Min-StB [136] alle Bestandteile <0,063 mm. Sie bestehen im Wesentlichen aus Tonmineralen (tonige Substanzen; lehmige Substanzen: Gemisch aus Ton, Schluff und Sand). Auch organische Beimengungen und nichttonige Verwitterungsprodukte können enthalten sein. Die Haftung zwischen dem Zuschlagstoffkorn und dem Bindemittel wird durch tonig-lehmige Bestandteile, die das Zuschlagstoffkorn umhüllen, beeinträchtigen. Dadurch wird die Festigkeit des Betons vermindert. Deshalb gelten diese Bestandteile als schädlich.

6.1.6.2 Alkalireaktive Bestandteile

Bei Betonen, deren Gesteinskörnungen alkalireaktive Kieselsäure enthalten, können unter bestimmten Voraussetzungen Gefügeschäden infolge einer Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) auftreten. Alkali-Aggregat-Reaktionen lassen sich in drei Arten unterteilen:

- Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR)
- Alkali-Silikat-Reaktionen (ASR)
- Alkali-Karbonat-Reaktionen

Alkali-Kieselsäure- und Alkali-Silikat-Reaktionen verlaufen ähnlich. Der Hauptunterschied liegt in der Reaktionsgeschwindigkeit: Alkali-Kieselsäure-Reaktionen treten in der Regel innerhalb einiger Jahre, Alkali-Silikat-Reaktionen meist erst einige Jahrzehnte nach der Herstellung eines Betons auf.

Die weitaus selteneren Alkali-Karbonat-Reaktionen werden vor allem bei Gesteinskörnungen aus tonigem Dolomit sowie feinkörnigen Kalksteinen mit Einschlüssen aus Tonmineralien beobachtet.

Amorphe Kieselsäure (Opal, Chalcedon) und Cristobalit sind wegen ihrer hohen Löslichkeit in alkalischen Lösungen zu beachten. Auf Grund ihrer Reaktionsfähigkeit im alkalischen Milieu (pH-Werte > 7,5) kommt es bereits im normalen Zementbeton zu begrenzten Reaktionen, die im Bereich der Zuschlagstoffkornoberflächen ablaufen. Begleiterscheinungen dieser Reaktionen sind Kornerweichungen und Volumenexpansionen [94].

Neben der amorphen Kieselsäure sind im Gestein Anteile an vulkanischem Glas, an Illit und Sericit sowie an Chlorit besonders reaktionsfähig [94].

Tabelle 6-6: Wichtige AAR-reaktive Gesteine und Minerale (aus [57])

Gesteine	Gesteine, in denen reaktive Mineralphasen auftreten können	reaktive Mineralphasen	Reaktionstyp
kristalline Gesteine	Granite, Granodiorite, Diorite	poröser, mikrofaseriger Quarz	ASR
vulkanische Gesteine	Rhyolite, Dacite, Andesite, Basalte, Obsidiane, Tuffe	instabile Hochtemperaturformen des Quarzes: Trydimit, Cristobalit	AKR
		kryptokristalline Kieselsäure: Chalcedon	AKR
		amorphe, hydratisierte Kieselsäure: Opal	AKR
metamorphe Gesteine	Gneise, Schiefer, Mylonite, Quarzite, Hornfelse	deformierter, gerissener Quarz	ASR
		deformierte, poröse, verwitterte Feldspäte	ASR
		fein kristalline Glimmer	ASR
Sedimentgesteine	Sandsteine, Grauwacken, Siltite, Feuersteine, kieselige Kalke	krypto- und mikrokristalliner Quarz	AKR
		deformierte, poröse, verwitterte Feldspäte	ASR
		fein kristalline Tone, Glimmer	ASR
		kryptokristalline Kieselsäure: Chalcedon	AKR
		amorphe, hydratisierte Kieselsäure: Opal	AKR

Die wichtigsten AKR- und ASR-reaktiven Gesteine und Mineralien sind in Tabelle 6-6 zusammengestellt. Gesteinskörnungen mit amorpher oder teilkristalliner Kieselsäure reagieren schneller als kristalline Silikate. Poröse, gerissene sowie gebrochene Körner sind reaktiver als dichte, ungerissene oder natürlich gerundete Körner.

6.1.6.3 Stoffe organischen Ursprungs

Unter den Stoffen organischen Ursprungs sind Huminverbindungen besonders wichtig, da sie in Sedimentgesteinen (z. B. Sandsteinen, Kalksteinen, Schiefertönen) auftreten können. Huminverbindungen dürfen in Betonzuschlagstoffen nicht in solchen Mengen enthalten sein (siehe Abschnitt 2.2), die Treiberscheinungen im Beton auslösen und damit zu Festigkeitsminderungen führen (siehe DIN 4226-3, 52099 [69, 71]).

6.1.6.4 Schwefelverbindungen

Schwefelverbindungen (Sulfide, wasserfreie Sulfate) können bei größeren Anteilen zu störenden Veränderungen (Quellen, Treiben) führen (siehe DIN 4226-1 [67]). Bedeutung erlangen hier die Art der Schwefelverbindung und ihre Verteilung im Zuschlagstoff. Schwefelverbindungen in Betonzuschlagstoffen, beispielsweise der Oxidation unterworfenen Sulfide (Pyrit, Markasit, Chalkopyrit), können mit Komponenten des Bindemittels Zement über das Zwischenglied CaSO_4 mit seinen Hydratstufen unter Bildung von Ettringit reagieren. Diese Reaktion läuft unter Volumenzunahme (auf das 2–3 fache) ab und führt zu Spreng- und Treiberscheinungen im Beton. Eine Ausnahme bildet hierbei der Schwerspat, weil er sich im feuchten Medium nicht umsetzt.

6.1.6.5 Lösliche Chloride

Verschiedene Sedimentgesteine enthalten lösliche Chloride, die bei ihrer Herauslösung aus dem Naturstein Gefügeflockungen und Festigkeitsminderungen zur Folge haben. Lösliche Chloride beeinträchtigen den Korrosionsschutz der Bewehrungen (siehe DIN 4226-1 [67]).

6.1.6.6 Oxidische Eisenerze

Oxidische Eisenerze sind unter bestimmten Bedingungen als schädliche Bestandteile der Natursteine anzusehen, da sie leicht der Oxydationsverwitterung unterliegen und Hydroxide bilden (Rosterscheinungen sowohl an Natursteinbauelementen als auch an Betonzuschlagstoffen in Außenbauteilen bzw. im Sichtbeton) [94].

6.2 Zusammenhang zwischen ausgewählten Gesteinskennwerten und relevanten Systemkenngrößen

Die im folgenden Abschnitt dargestellten Erkenntnisse basieren auf Zusammenhängen aus der Fachliteratur, auf Versuchsergebnissen, die im Institut für Aufbereitungsmaschinen gewonnen wurden und auf eigenen Untersuchungen.

6.2.1 Einfluss des mittleren Mineraldurchmessers auf den spezifischen Arbeitsbedarf

Von Rychel [115] wurde festgestellt, dass der spezifische Arbeitsbedarf durch die Rotorumfangsgeschwindigkeit des Prallbrechers, dem Aufgabegutdurchsatz und der Gesteinsart wesentlich beeinflusst wird. Der spezifische Arbeitsbedarf der Prallzerkleinerung ist von dem mittleren Mineraldurchmesser abhängig [115].

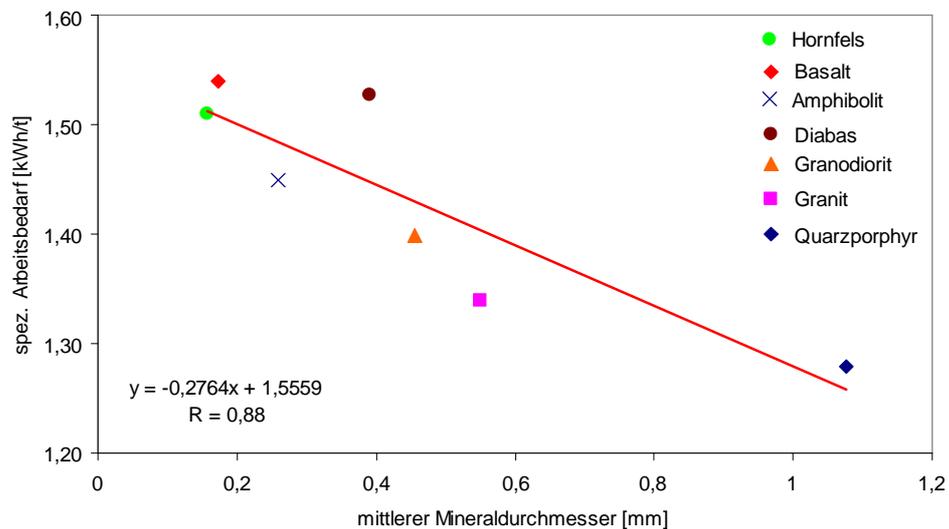


Abbildung 6-17: Einfluss der mittleren Mineraldurchmesser auf den spezifischen Arbeitsbedarf (Zerkleinerung in einer Rotorschleudermühle: Aufgabegut 16/32 mm; Ringpanzerung; Rotorumfangsgeschwindigkeit $v_R = 58,5$ m/s; Aufgabedurchsatz $\dot{m}_A = 50$ t/h), (aus [115])

Aus der Abbildung 6-17 ist zu erkennen, dass für die Zerkleinerung der Gesteine mit verschiedenen mittleren Mineraldurchmessern unterschiedliche spezifische Energiebeiträge benötigt werden. Während bei der Zerkleinerung von Gesteinen, wie z. B. Granit und Quarzporphyr, ein Energiebedarf von $W_o \approx 1,3$ kWh/t ermittelt wurde, steigt dieser bei Basalt bzw. Diabas auf über 1,5 kWh/t an [115].

6.2.2 Einfluss der Gesteinseigenschaften auf den Schlagleistenverschleiß

6.2.2.1 Einfluss des äquivalenten Quarzanteils auf den Schlagleistenverschleiß

Für die Untersuchungen des Einflusses der Gesteinsparameter auf den Verschleiß werden die Messergebnisse der Versuche bei Prallzerkleinerung mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 60,5 m/s und die Verschleißwerte der drei Spaltweitenverhältnisse ($S_O/S_U=40/12$, $50/20$ und $60/10$) von Kenn [46] herangezogen (Anlage 12). Die Spaltweiteneinstellsituationen ließen keine auswertbaren Auswirkungen auf den Verschleiß erkennen. In Abbildung 6-18 sind das Verschleißverhalten der untersuchten Gesteine vergleichend dargestellt. Das Aufgabegut stellt eine entscheidende Einflussgröße auf den Verschleiß dar. Der spezifische Schlagleistenverschleiß differiert ca. um den Faktor 10.

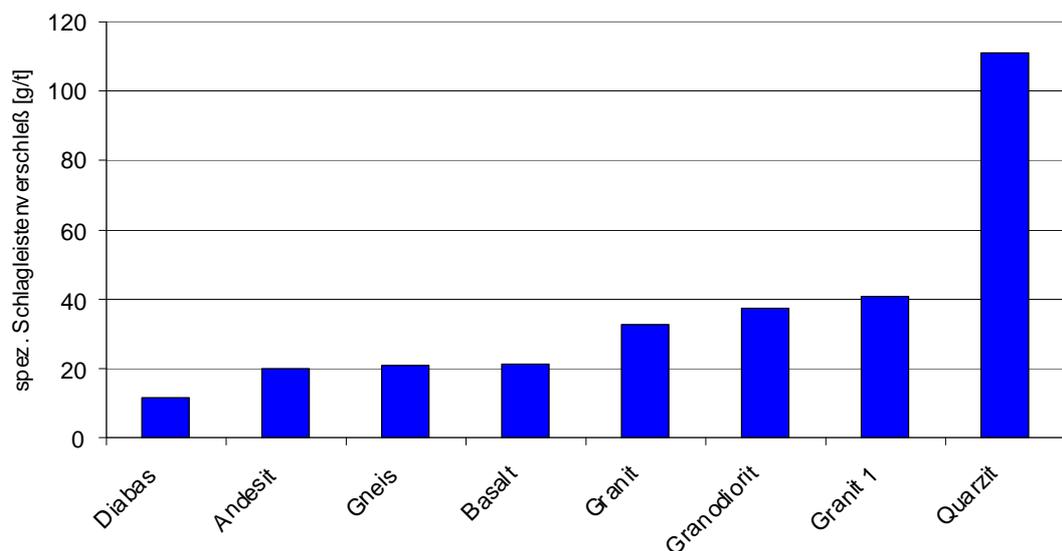


Abbildung 6-18: Verschleißverhalten der Gesteine (Verschleißwerte aus [46])

Die untersuchten Gesteine wurden daraufhin mit Hilfe der quantitativen Gefügeanalyse hinsichtlich ihrer petrographischen und morphologischen Eigenschaften analysiert (siehe Kapitel 4). In der Tabelle 6-7 und Tabelle 6-8 sind die für den Verschleiß relevanten, gesteinspezifischen Betrachtungsgrößen zusammengestellt.

Tabelle 6-7: Gesteinscharakteristika

Nr.	Gestein	spez. Schlagleistenverschleiß [g/t]	mittlerer Aufgabegutdurchmesser [mm]	Druckfestigkeit σ [MPa]	äquivalenter Quarzanteil [%]	mittlerer Mineraldurchmesser [mm]
1	Andesit	19,9	23,3	141,4	32,90	0,131
2	Basalt	21,2	31,6	224,9	40,60	0,195
5	Gneis	20,6	24,9	115,9	47,40	0,483
3	Diabas	11,5	19,0	223,6	40,80	0,361
6	Granit	32,5	20,5	173,3	51,10	0,551
7	Granit 1	40,8	28,0	188,5	50,80	0,973
4	Granodiorit	37,4	24,9	175,5	48,74	0,536
8	Quarzit	111,2	19,4	171,0	100,00	0,388

Tabelle 6-8: Gesteinscharakteristika (Fortsetzung)

Nr.	Gestein	Anteile der gesteinsbildenden Minerale [Vol.-%]							C	K _R	K _{is}
		Mg	Q	Fs	Glm	OI	Au	NDP			
1	Andesit	2	0	27	0	0	5	64	0	24	74
2	Basalt	4	0	58	0	12	24	2	24	25	76
5	Gneis	0	35	36	29	0	0	0	30	15	71
3	Diabas	8	0	42	0	0	42	8	5	45	81
6	Granit	0	29	69	2	0	0	0	47	6	92
7	Granit 1	0	29	68	3	0	0	0	42	13	87
4	Granodiorit	0	35	41	24	0	0	0	18	12	86
8	Quarzit	0	100	0	0	0	0	0	100	29	58

Aus der Tabelle 6-7 lassen sich Zusammenhänge zwischen den Gesteinseigenschaften und dem Verschleiß ableiten, z. B. die Abhängigkeit des spezifischen Schlagleistenverschleißes (g/t Aufgabematerial) vom äquivalenten Quarzanteil (siehe Abschnitt 2.1.4.2) des Gesteins. Dieser Zusammenhang ist in der Abbildung 6-19 dargestellt.

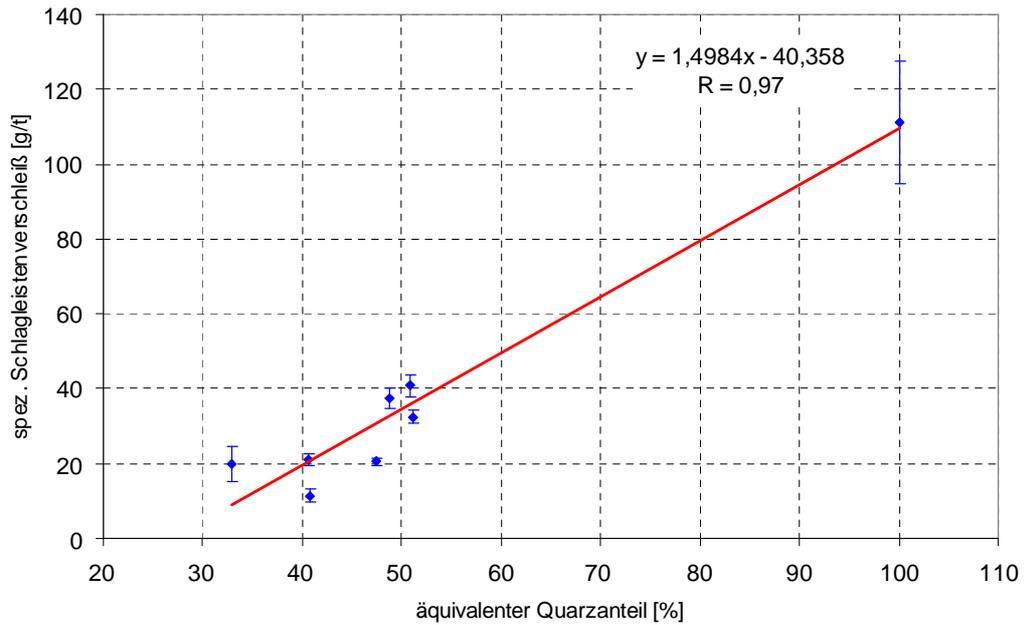


Abbildung 6-19: Abhängigkeit des spezifischen Schlagleistenverschleißes vom äquivalenten Quarzanteil (nach Tabelle 6-7)

Dieses Diagramm zeigt, dass der äquivalente Quarzanteil eine grobe Aufklärung über das Verschleißverhalten der Gesteine gibt.

6.2.2.2 Einfluss der Gefügekorngröße und des Mineralbestandes auf den spezifischen Schlagleistenverschleiß

In der Literatur findet man eine Vielzahl von Hinweisen auf die Abrasivität der verschiedenen Hartgesteine [94]. Noch komplizierter werden Aussagen zur Abrasivität von Gesteinen mit gleichem Mineralbestand, aber unterschiedlichem Gefüge (z. B. Korngröße). In Abbildung 6-20 sind Ausschnitte der digitalisierten Bilder zweier Granite dargestellt. Der Mineralbestand der Hauptminerale ist annähernd gleich. Unterschiede gibt es aber in der mittleren Mineralkorngröße. Beim Granit I beträgt der Medianwert $d_{50,3} = 2,837$ mm und beim Granit II 0,551 mm.

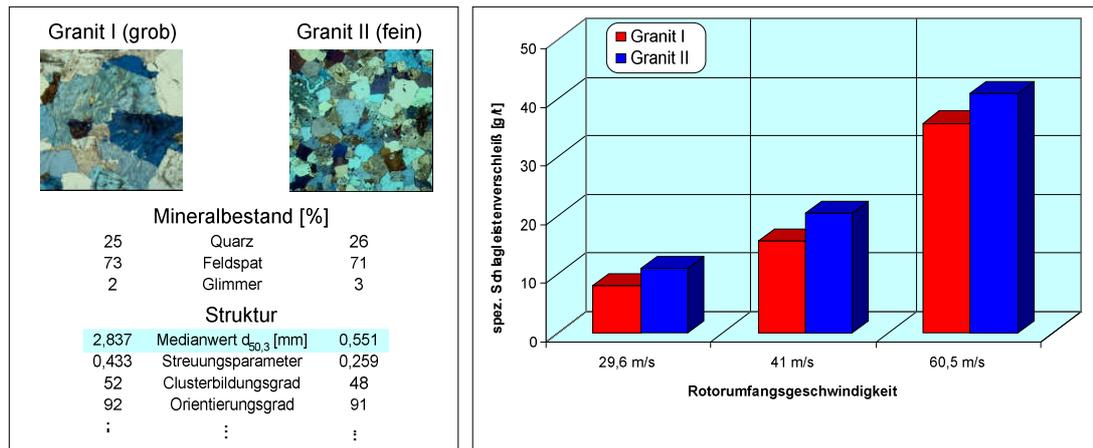


Abbildung 6-20: Einfluss der Gefügekorngröße auf den spezifischen Schlagleistenverschleiß (Granit I aus Meißen, Granit II aus Obercrinitz)

Die Mineralkorngröße wirkt sich nicht nur auf das Zerkleinerungsverhalten der beiden Gesteine aus. Bei der Bestimmung des spezifischen Schlagleistenverschleißes wurden durch die Beanspruchung der Pralleisten mit dem Granit II bis zu 30 Prozent höhere Verschleißwerte gemessen [56].

Wenn man Aussagen zu Lagerstätten aus der Fachliteratur analysiert, wird für die Gesteine häufig nur die chemische Zusammensetzung angegeben. Diese chemische Zusammensetzung kann aber zu Fehlinterpretationen bezüglich der Abrasivität dieses Gesteins führen. In Abbildung 6-21 wird dies an einem Beispiel (Vergleich Basalt und Granodiorit) verdeutlicht.

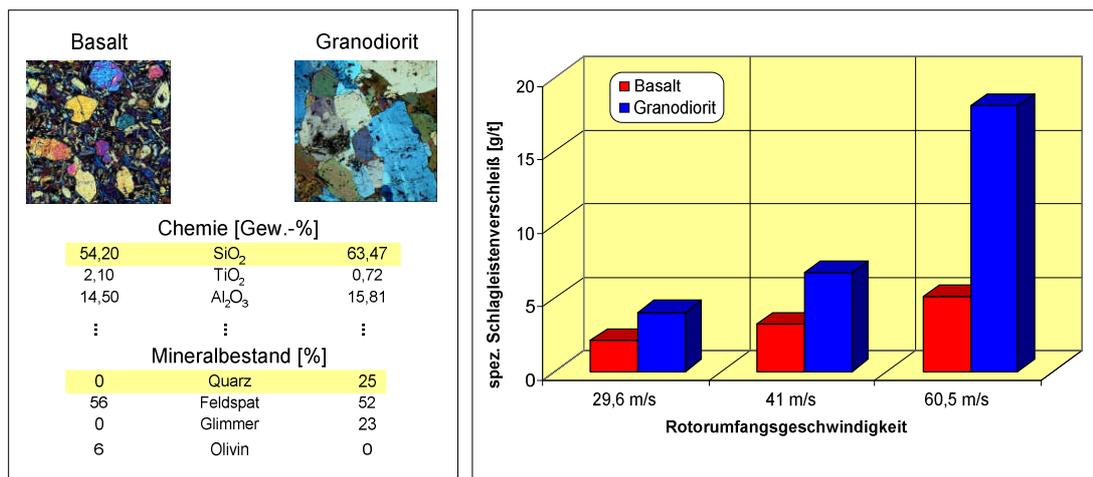


Abbildung 6-21: Einfluss des Mineralbestandes auf den spezifischen Schlagleistenverschleiß (Basalt aus Nieder-Ofleiden, Granodiorit aus Demitz-Thumitz)

Betrachtet man die Werte der chemischen Analysen, so sollte man annehmen, dass beide Gesteine mit einem ähnlichen SiO₂-Anteil die gleiche Abrasivität besitzen. Erst die

mineralogische Analyse zeigt, dass im Basalt kein Quarz vorhanden ist, dieser aber im Granodiorit einen Wert von 25% erreicht. Dieser Unterschied ist auch im Vergleich der Verschleißwerte sehr deutlich zu erkennen. Der Granodiorit erzielt bis zu dreifach höhere Verschleißwerte. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die chemische Zusammensetzung eines Gesteins keine Aussage über dessen Verschleißwirkung ergibt. Vielmehr ist es erforderlich den Mineralbestand zu untersuchen.

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Analyse des wissenschaftlich-technischen Standes zeigte, dass der gegenwärtige Stand der mineralogisch-petrographischen Gesteinscharakterisierung in vielen Fällen nur eine verbale Gefügebeschreibung erlaubt. In der Aufbereitungstechnik ist diese Verfahrensweise jedoch nicht ausreichend. Hier ist eine quantitative Charakterisierung der Gesteine erforderlich. Deshalb bestand die Aufgabe darin eine neue mathematisch-petrographische Methode zur Charakterisierung der unterschiedlichen Gesteinseigenschaften mit Hilfe quantitativer Gesteinskennwerte zu entwickeln.

Die Entwicklung der „Neuen Methode“ erfolgte auf der Basis der Anwendung stereologischer Methoden. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um die Anschaulichkeit der ermittelten geometrischen Merkmale zu ermöglichen und die Verständigung zwischen einem Geologen und einem Ingenieur mit ihren jeweiligen Begriffswelten zu vereinfachen.

Die auf der „Neuen Methode“ basierende Gesteinsanalyse erlaubt die mathematische Ableitung von Gesteinscharakteristika in Form von Kennzahlen. Zur Charakterisierung des Gesteins werden die nachfolgenden Kennwerte verwendet.

- Modus: Bestandteile und Volumenanteile der Phasen
- Struktur: Korngrößenverteilung (Medianwert $d_{50,3}$, Standardabweichung σ_{ln}), Kornform (Elongation E , Flachheit F), Rauigkeitsgrad K_R
- Textur: Clusterbildungsgrad C , Orientierungsgrade (linearer Orientierungsgrad K_{lin} , flächiger Orientierungsgrad K_{fl} , isotroper Orientierungsgrad K_{is}) und Raumerfüllungsgrad ϵ_{VF}

Im Ergebnis der neuen mathematisch-petrographischen Methode wurde festgestellt, dass insbesondere die verbale Beschreibung der Gesteinsstruktur und -textur durch quantitative Gesteinskennwerte ersetzt werden kann.

Diese mathematisch–statistischen Gesteinskennwerte werden zunächst unabhängig und anwendungsneutral ermittelt und können dann durch Interpretation für den speziellen Anwendungsfall benutzt werden. Der große Vorteil dieser Methodik ist aber, dass die quantitativen Kennwerte einer Gesteinsprobe immer gleich bleiben, es ändert sich nur ihre Interpretation.

Die neue Bewertungsmethodik wurde im Weiteren einer umfangreichen Testung mit verschiedenen Gesteinstypen (Magmatite, Sedimentite und Metamorphite) unterzogen. Die im Ergebnis dieser Testuntersuchungen anfallenden Datenmengen wurden in einer Gesteinsdatenbank zusammengefasst. Diese bildete die Grundlage für die abschließenden anwendungsspezifischen Untersuchungen.

Zum Nachweis der Eignung der neuen mathematisch-petrographischen Bewertungsmethodik wurde an ausgewählten Anwendungsbeispielen der Einfluss relevanter Gesteinskennzahlen auf definierte Produkteigenschaften bzw. Systemkenngrößen untersucht und quantitativ bewertet.

Nach der hier beschriebenen Methodik der Bestimmung formaler Gesteinscharakteristika sind zahlreiche Steinbrüche untersucht worden. Mit den dort vorkommenden Gesteinen sind einige hundert Zerkleinerungsversuche mit verschiedenen Maschinen (z. B. Prallbrechern) systematisch durchgeführt worden. Diese Untersuchungsergebnisse liefern mathematisch-statistische Zusammenhänge zwischen den Gesteinseigenschaften (z. B. Korngröße, Kornform, Verwachsung der Minerale, usw.), ausgewählten Maschinenparametern (z. B. Beanspruchungsgeschwindigkeit) und den erzielbaren Produktparametern (Korngrößen-, Kornformverteilung). Dabei konnte nicht nur eine Gewichtung des Einflusses der verschiedenen Gesteinskennwerte auf einzelnen Zielgrößen gefunden, sondern auch mathematisch-statistische Zusammenhänge zwischen ausgewählten Zielgrößen und den verschiedenen konstruktiven und betrieblichen Einflussgrößen nachgewiesen werden. In Einzelnen wurden nachfolgende Ergebnisse gefunden:

Im ersten Teil der anwendungsspezifischen Untersuchungen wurde der Anteil des Einflusses der Gesteinseigenschaften auf ausgewählte Produkteigenschaften untersucht. Durch Anwendung der mathematisch-statistischen Modellierung (z. B. multiple Regressions- und Korrelationsanalyse, Neuronale Netze) konnte am Beispiel der Produktkornform nachgewiesen werden, dass ein überragender Einfluss (ca. 65%) der summarischen Gesteinseigenschaften auf die Kornform der Brechprodukte einer Rotor-schleudermühle besteht.

Im zweiten Teil der anwendungsspezifischen Untersuchungen wurde an einigen ausgewählten Beispielen der Einfluss einzelner Gesteinseigenschaften auf relevante Produkt- bzw. Systemkenngrößen näher untersucht. Dabei konnten auszugsweise nachfolgende Abhängigkeiten nachgewiesen werden:

- Einfluss des isotropen Orientierungsgrades auf die Produktkornform. Gesteine mit einem isotropen Orientierungsgrad kleiner 75% geben einen Hinweis darauf, dass die Erzeugung von kubischen Produkten nur durch einen erhöhten Maschinenaufwand bei abgestimmter Fahrweise einer Aufbereitungsmaschine bzw. -anlage möglich ist.
- Einfluss des Rauheitsgrades der Mineralkörner auf die Festigkeit. Mit Zunahme des Rauheitsgrades der Mineralkörner steigt die Festigkeit des Gesteins. Je unregelmäßiger die Kornform, desto größer ist die Kornoberfläche und umso intensiver ist die gegenseitige Verzahnung benachbarter Kornindividuen.
- Einfluss des mittleren Mineraldurchmessers auf die Festigkeit. Gesteine mit größerer Mineralkorngröße weisen niedrigere Gesteinsfestigkeitswerte auf als feinkörnige Gesteine.
- Einfluss der Anisotropie auf die Festigkeit. Der geringste Festigkeitsindex wird immer dann ermittelt, wenn die Belastung parallel zur Schieferung bzw. Schichtung verläuft. Der höchste Festigkeitsindex tritt immer senkrecht zur Schieferung bzw. Schichtung auf.
- Einfluss des mittleren Mineraldurchmessers auf den spezifischen Arbeitsbedarf. Für die Zerkleinerung der Gesteine mit kleineren Mineraldurchmessern werden größere spezifische Energiebeträge benötigt.
- Einfluss des äquivalenten Quarzanteils auf den Schlagleistenverschleiß. Je größer der äquivalente Quarzanteil des Gesteins, desto größer ist der spezifische Schlagleistenverschleiß.

Wie die Anwendungsbeispiele zeigen, kann mit Hilfe der quantitativen Gesteinskennwerte eine Prognostizierung relevanter Produkt- bzw. Systemkenngrößen, ohne zerkleinerungstechnische Untersuchungen, vorgenommen werden.

Die Gesteinskenngrößen erlauben eine Einschätzung des Gesteins hinsichtlich Brechbarkeit, Produktkornform, Verschleiß und erforderlichem Energieaufwand und stellen somit eine wichtige Grundlage für die Auswahl und den Betrieb der Maschinen und Anlagen der Naturstein-Industrie sowie zur Prognostizierung der zu erwartenden Produktqualität dar.

Für die weitere anwendungsspezifische Nutzung dieser Methodik sind jedoch noch weiterführende Untersuchungen, wie z. B. die Ermittlung weiterer Abhängigkeiten zwischen den Zielgrößen (z. B. spezifischer Arbeitsbedarf, spezifischer Verschleiß, Durchsatz) und weiteren relevanten petrographischen (z. B. Verwachsung, Verteilung, Raumerfüllung) sowie maschinenspezifischen (z. B. Rotordurchmesser, Spaltweite) Einflussgrößen, nötig.

Literaturverzeichnis

1. Adams, A. E. ; MacKenzie, W. S. ; Guilford, C. : Atlas der Sedimentgesteine in Dünnschliffen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1986
2. Amstutz, G. C. & Giger, H. : Metric and topological properties of rock and ore textures. In: Experimental and Natural Rock Deformation, S. 496–516, Springer-Verlag, Berlin, 1970
3. Amstutz, G. C. & Giger, H. : Stereological methods applied to mineralogy, petrology, mineral deposits and ceramics. In: *J. Microsc.*, Vol. 95, S. 145–164, 1971
4. Amstutz, G. C. : A quantitative approach to paragenetic relations of ore minerals. Freiburger Forschungsheft FFH, C 186, S. 41–50, 1965
5. Andreev, S. A. ; Perov, V. A. ; Zverevitsch, V. V. : Droblenie, izmeltschenie i grochotschenie polesnych iskopaemych, Nedra, Moskau, 1980
6. Ashgirei, G. D. : Strukturgeologie. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1963
7. Ballmann, P. : Vergleichende Untersuchungen zwischen Los Angeles-Prüfverfahren und Schlagversuch. Die Naturstein-Industrie, Heft 6, 1996.
8. Batel, W. : Einführung in die Korngrößenmesstechnik. Springer Verlag, Berlin, 1971
9. Baumann, L. ; Leeder, O. : Einführung in die Auflichtmikroskopie. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig, 1991
10. Blaschke, R. : Spezifische Oberflächen und Grenzflächen der Mineralphasen als Gefügeparameter. In: *Fortschr. Miner.*, Nr. 47, S. 197–241, 1970
11. Broch, E. ; Franklin, J. A. : The Point-Load Strength Test. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 9, S. 669–697, 1972
12. Brook, N. : The Equivalent Core Diameter Method of Size and Shape Correction in Point Load Testing. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 22, S. 61–70, 1985
13. Brook, N. : The use of irregular specimens for rock strength tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 14, S. 193–202, 1977

14. Büchi, E. ; Mathier, J. F. ; Wyss, C. : Gesteinsabrasivität – ein bedeutender Kostenfaktor beim mechanischen Abbau von Fest- und Lockergestein. Tunnel, 5, 1995
15. Chain, V. E. ; Michajlov, A. E. : Allgemeine Geotektonik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1989
16. Chau, K. T. ; Wong, R. H. C. : Unaxial Compressive Strength and Point Load Strength of Rocks. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 33, S. 183–188, 1996
17. Craig, J. R. ; Vaughan, D. J. : Ore microscopy and ore petrography. Mir, Moskau, 1983
18. Davis, G. H. ; Reynolds, S. J. : Structural geology of rocks and regions. Verlag John Wiley & Sons, New York, 1996
19. De Hoff, R. ; Rhines, F. N. : Quantitative Microscopy. McGraw Hill, Inc. 1968
20. De Quervain, F. : Technische Gesteinskunde. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1967
21. Delesse, M. A. : Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. Ann. Mines, 13, 1848
22. Delvigne, J. E. : Atlas of Mineral Alteration and Weathering. Mineralogical Association of Canada, Ottawa, 1998
23. Dennis, J. G. ; Muravski, H. ; Weber, K. : International tectonic lexikon. Stuttgart, 1979
24. Dietrich, R. V. ; Skinner, B. J. : Die Gesteine und ihre Mineralien. Ott Verlag Thun, 1995
25. DIN EN 12 407 August 1996. Prüfung von Naturstein. Petrographische Beschreibung von Naturstein.
26. Dörfler, G. : Sequenzanalyse, ein neues Analysenverfahren zur quantitativen Ermittlung der Phasenverteilung von Festkörpern. Fortsch. in der Metallographie, 3/4, S. 781–784, 1967
27. Drozdowski, G. : Gewinnungsstätten von Festgesteinen in Deutschland. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen, Krefeld, 1999

28. Erkan, Y. : Ein Versuch zur quantitativen Erfassung der Festigkeitseigenschaften und zur quantitativen Charakterisierung der Granite. N. Jb. Miner. Abh., 113, 1, S. 91–109, Stuttgart, 1970
29. Erkan, Y. : Zum Einfluss einiger Gefügeparameter auf die Würfeldruckfestigkeit der Granite. Rock Mechanics 3, S. 113–120, Springer Verlag, 1971
30. Exner, H. E. ; Hougardy, H. P. : Einführung in die Quantitative Gefügeanalyse. Informationsgesellschaft, Verlag, Oberursel, 1986
31. Folgner, T. : Optimierung in der Aufbereitung. Naturstein–Forum, Würzburg, 2003
32. Freund, H. : Handbuch der Mikroskopie in der Technik. Band IV, Mikroskopie der Silikate. Teil 1, Mikroskopie der Gesteine. Umschau Verlag, Frankfurt am Main, 1955
33. Germann, A. ; Komnatzki, R. ; Rohowski, H. : Gesteinseigenschaften besser prüfen. Naturstein, 1, 2003
34. Glagolev, A. A. : Quantitative analysis with the microscope by the „point” method. Eng. Min. J., 1934
35. Göll, G. : Modellierung des Zerkleinerungsprozesses bei vorherrschender Druckbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung des Stoffeinflusses. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Technische Wissenschaften des Wissenschaftlichen Rates, Dissertation, 1975
36. Grubenmann, U. ; Niggli, P. : Die Gesteinsmetamorphose. Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1924
37. Gurland, J. : A study of contact and contiguity of dispersion in opaque samples. Trans. Met. Soc. AIME, Vol. 236, S. 642–646, 1966
38. Howard, C. V. ; Reed, M. G. : Unbiased Stereology. Three-Dimensional Measurement in Microscopy. BIOS Scientific Publishers Limited, New York, 1998
39. Hultsch, A. : Kiese und Sande. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1986
40. Hunger, H. J. : Ausgewählte Untersuchungsverfahren in der Metallkunde. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1987

41. ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 15, S. 319–368
42. ISRM – International Society for Rock Mechanics (1978): Suggested method for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock material. Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr., 16, S. 135–140
43. ISRM – International Society for Rock Mechanics (1985): Suggested method for determining point load strength. Commission on Testing Method. Working Group on Revision of the Point Load Test Method. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 2 S. 51–60
44. Jones, M. P. : Methoden der Mineralogie. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1997
45. Juschko, S. A. : Methoden der Laboruntersuchungen von Erzen. Nedra, Moskau, 1971
46. Kenn, T. : Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Brechgütern in Prall- und Strahlprozessen. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Diplomarbeit, 1995
47. Klengel, K. J. ; Wagenbreth, O. : Ingenieurgeologie für Bauingenieure. 3. Auflage, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989
48. Kurzydłowski, K. J. ; Ralph, B. : The quantitative description of the microstructure of materials. CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995
49. Leeder, M. R. : Sedimentology. Mir, Moskau, 1986
50. Lieber, W. : Mineralogie in Stichworten. Verlag Ferdinand Hirt, Kiel, 1969
51. MacKenzie, W. A. ; Donaldson, C. H. ; Guilford, C. : Atlas der magmatischen Gesteine in Dünnschliffen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1989
52. MacKenzie, W. A. ; Guilford, C. : Atlas gesteinsbildender Minerale in Dünnschliffen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1981
53. MacKenzie, W. S. ; Adams, A. E. : Minerale und Gesteine in Dünnschliffen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1995

54. Maresch, W. ; Medenbach, O. ; Trochim, H. D. : Gesteine. Mosaik Verlag GmbH, München, 1996
55. Matthes, S. : Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Springer Verlag, Berlin, 1996
56. Meltke, K. : Verschleiß an den Hauptausrüstungen von Aufbereitungsanlagen. Steinbruch und Sandgrube, 1, 2003
57. Merz, C. ; Hammerschlag, J.-G. : Alkali-Aggregat-Reaktionen (Teil 1). TFB Cementbulletin 5, 68. Jahrgang, 2000
58. Milner, G. B. : Petrographie von Sedimentgesteinen. Band I. Nedra, Moskau, 1968
59. Milner, G. B. : Petrographie von Sedimentgesteinen. Band II. Nedra, Moskau, 1968
60. Moorhouse, W. W. : The study of rocks in thin sections. Verlag Harper & Brothers, New York, 1959
61. Müller, B. : Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung, gesteintechnischen Eigenschaften und dem Trennflächengefüge in Karbonatgesteinen. In: Z. geol. Wiss. 6, Berlin, 1978
62. Murawski, H. : Geologisches Wörterbuch. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1977
63. Naumann, C. F. : Elemente der Mineralogie. Verlag Breitkopf und Härtel, Leipzig, 1850
64. Nickel, E. : Grundwissen in Geologie. Teil 1: Grundkursus. Ott Verlag Thun (Schweiz), Thun, 1995
65. Niggli, P. : Gesteine und Minerallagerstätten. Band I. Verlag Birkhäuser, Basel, 1948
66. NORM DIN 18 123 November 1996. Baugrund. Untersuchung von Bodenproben: Bestimmung der Korngrößenverteilung
67. NORM DIN 4226 Teil 1 Dezember 1999. Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel: Normale und schwere Gesteinskörnungen
68. NORM DIN 4226 Teil 2 April 1983. Zuschlag für Beton: Zuschlag mit porigem Gefüge (Leichtzuschlag): Begriffe, Bezeichnung und Anforderungen

69. NORM DIN 4226 Teil 3 April 1983. Zuschlag für Beton: Prüfung von Zuschlag mit dichtem oder porigem Gefüge
70. NORM DIN 4226 Teil 4 April 1983. Zuschlag für Beton: Überwachung
71. NORM DIN 52 099 März 1995. Prüfung auf Reinheit
72. NORM DIN 52 101 August 2004. Prüfverfahren für Gesteinskörnungen – Probe-
nahme
73. NORM DIN 52 102 August 1988. Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte,
Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität
74. NORM DIN 52 103 Oktober 1988. Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnun-
gen: Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert
75. NORM DIN 52 104 Teil 1 November 1982. Prüfung von Naturstein: Frost-Tau-
Wechsel-Versuch
76. NORM DIN 52 104 Teil 3 September 1992. Prüfung von Naturstein und Gesteins-
körnungen: Frost-Tau-Wechsel-Versuch
77. NORM DIN 52 105 August 1988. Prüfung von Naturstein: Druckversuch
78. NORM DIN 52 106 August 1994. Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen:
Untersuchungsverfahren zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit
79. NORM DIN 52 108 Juli 2002. Prüfung anorganischer nichtmetallischer Werkstof-
fe: Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme
80. NORM DIN 52 114 August 1988. Bestimmung der Kornform mit dem Kornform-
Meßschieber
81. NORM DIN 52 115 Teil 1 Juni 1997. Prüfung von Gesteinskörnungen: Schlagver-
such: Schlagprüfgerät
82. NORM DIN 52 115 Teil 2 Juni 1997. Prüfung von Gesteinskörnungen: Schlagver-
such: Schlagversuch an Schotter
83. NORM DIN 52 115 Teil 3 Juni 1997. Prüfung von Gesteinskörnungen: Schlagver-
such: Schlagversuch an Splitt und Kies, Kornklasse 8/12,5 mm
84. NORM DIN 66 144 März 1974. Logarithmisches Normalverteilungsnetz. Darstel-
lung von Korn- (Teilchen-) größenverteilungen

85. NORM EN 1097 Teil 2 Juni 1998. Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung
86. NORM EN 1367 Teil 5 Januar 1999. Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen: Bestimmung des Widerstandes gegen Hitzebeanspruchung
87. NORM EN 1926 Mai 1999. Prüfverfahren von Naturstein - Bestimmung der Druckfestigkeit
88. NORM EN 933 Teil 1 Oktober 1997. Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen: Bestimmung der Korngrößenverteilung: Siebverfahren
89. NORM EN 933 Teil 4 Dezember 1999. Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen: Bestimmung der Kornform: Kornformkennzahl
90. NORM EN 933 Teil 5 Februar 1998. Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen: Bestimmung des Anteils von gebrochenen Körnern in groben Gesteinskörnungen
91. Ohser, J. ; Lorz, U. : Quantitative Gefügeanalyse: theoretische Grundlagen und Anwendung. Freiburger Forschungshefte FFH, B 276, 1994
92. Palchik, V. , Hatzor, Y. H : The Influence of Porosity on Tensile and Compressive Strength of Porous Chalks. In: Rock Mechanics and Rock Engineering. S. 331–341, Springer-Verlag, 2004
93. Park, R. G. : Foundation of structural geology. Chapman & Hall, London, 1997
94. Peschel, A. : Natursteine. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1977
95. Pichler, H. ; Schmitt-Riegraf, C. : Gesteinsbildende Minerale im Dünnschliff. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1993
96. Polovinkina, Ju. I. : Strukturen und Texturen der magmatischen und metamorphen Gesteine. Magmatische Gesteine, B. 1, Nedra, Moskau, 1966
97. Polovinkina, Ju. I. : Strukturen und Texturen der magmatischen und metamorphen Gesteine. Metamorphe Gesteine, B. 2, Nedra, Moskau, 1966

98. Polovinkina, Ju. I. ; Vikulova, M. F. ; Rasumovskaja, E. E. : Das Gefüge der Gesteine. Sedimentgesteine, B. 2, Leningrad, 1948
99. Price, N. J. ; Cosgrove, J. W. : Analysis of geological structures. Cambridge University Press, Cambridge, 1990
100. Přikryl, R. : Some microstructural aspects of strength variation in rocks. In: Rock Mechanics and Mining Sciences. S. 671–682, 2001
101. Raaz, V. : Charakterisierung der Gesteinsfestigkeit mit Hilfe eines modifizierten Punktlastversuches. In: *Z. geol. Wiss.* 30 (2002), Nr. 3, S. 213–226
102. Ramdohr, P. : Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. Akademie – Verlag, Berlin, 1975
103. Ramsay, J. G. ; Huber, M. I. : The techniques of modern structural geology. Vol. 2, Folds and fractures. Academic Press, London, 1987
104. Reiners, E. : Mechanismus der Prallzerkleinerung beim geraden Stoß und die Anwendung dieser Beanspruchungsart bei der Zerkleinerung insbesondere bei der selektiven Zerkleinerung von spröden Stoffen. Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, 1059, 1962
105. Reinsch, D. : Natursteinkunde. Eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1991
106. Reuter, F. ; Klengel, K. J. und Pasek, J. : Ingenieurgeologie. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig, Stuttgart, 1992
107. Richtlinie für vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Ausgabe 12.1997)
108. Rosenbusch, H. : Elemente der Gesteinslehre. 4. neu bearbeitete Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Erwin Nägele) GmbH, 1923
109. Rosiwal, A. : Neue Untersuchungsergebnisse über die Härte von Mineralien und Gesteinen. Verhandlg. d. k. k. geol. R.-A., Wien, 475–491, 1896
110. Rosiwal, A. : Neuere Ergebnisse der Härtebestimmung von Mineralien und Gesteinen. Ein absolutes Maß für die Härte spröder Körper. Verhandlg. d. k. k. geol. R.-A., Wien, 117–147, 1916

111. Rosiwal, A. : Über geometrische Gesteinsanalysen usw. Verhandl. d. k. k. geol. R.-A., Wien, 5–6, 143, 1898
112. Rösler, H. J. : Lehrbuch der Mineralogie. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1981
113. Rösler, H. J. ; Blankenburg, H.-J. und Pfeiffer, L. : Nutzbare Gesteine. Lagerstättenbildung – Rohstoffeigenschaften – Technologischer Prozess – Werkstoff. Bergakademie Freiberg. Sektion Geowissenschaften, 1975
114. Rösler, H. J. ; Lange, H. : Angewandte Petrographie. Bergakademie Freiberg, Weiterbildung, 1969
115. Rychel, R. : Modellierung des Betriebsverhaltens von Rotorschleuderbrechern. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Dissertation, 2001
116. Sachs, L. : Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997
117. Saltykov, S. A. : Stereometrische Metallographie. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1974
118. Sander, B. : Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. Erster Teil: Allgemeine Gefügekunde und arbeiten in Bereich Handstück bis Profil, Springer – Verlag, Wien und Innsbruck, 1948
119. Sander, B. : Einführung in die Gefügekunde der geologischen Körper. Zweiter Teil: Die Korngefüge, Springer – Verlag, Wien und Innsbruck, 1950
120. Sander, B. : Gefügekunde der Gesteine. Verlag von Julius Springer, Wien, 1930
121. Sarantschina, G. M. ; Schinkarev, N. F. : Petrologie der magmatischen und metamorphen Gesteine. Nedra, Leningrad, 1973
122. Schubert, H. : Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Bd. 1: Kennzeichnung von Körnerkollektiven. Kennzeichnung von Aufbereitungs- und Trennerfolg. Zerkleinerung. Klassierung. 4. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1964
123. Schubert, H. : Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. Bd. 1, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2003

124. Schulze, K. : Schnellverfahren zur Kornformbeurteilung und Vorschläge zur Determination von Splitt und Edelsplitt. Straße und Autobahn 4, H. 8, S. 253–257, 1953
125. Schumann, H. : Metallographie. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig, 1991
126. Schumann, W. : Der neue BLV Steine- und Mineralienführer. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München, 1994
127. Shvanov, V. N. ; Frolov, V. T. ; Sergeeva, E. I. : Systematics and classifications of sedimentary rocks and their analogs. Nedra, Saint-Petersburg, 1998
128. Sidorenko, G. A. ; Alexandrova, I. T. ; Petrova, N. V. : Technologische Mineralogie der seltenen Metalle. Nauka, Sankt-Petersburg, 1992
129. Silbermann, F : Beitrag zur Modellierung der Arbeitsweise von Kegelbrechern in Bezug auf den Materialstrom. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Dissertation, 2004
130. Singh, S. K. : Relationship Among Fatigue Strength, Mean Grain Size and Compressive Strength of a Rock. In: Rock Mechanics and Rock Engineering. S. 271–276, Springer-Verlag, 1988
131. Smirnov, V. I. : Geologie der Lagerstätten mineralischer Rohstoffe. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1970
132. Storm, R. : Wahrscheinlichkeitsrechnung mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. Fachbuchverlag Leipzig GmbH, 1995
133. Szczelina, P : Auslegung von Backenbrechern durch Modellierung des Körnerverhaltens. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Dissertation, 2000
134. Thuro, K. : Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb. Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte. Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Angewandte Geologie, B 1, 1–145, I–XII, 1996

135. TL 918061. Lieferbedingungen Gleisschotter der Deutsche Bahn AG. Ausgabe Juni 1997
136. TL Min-StB 2000. Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau: Gesteinskörnungen und Werksteine im Straßenbau. Ausgabe 2000
137. TP BF-StB T C1, 1979 : Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau; Teil C1: Einaxialer Druckversuch an Gesteinsproben
138. TP Min-StB. Technische Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau. Ausgabe 1994
139. Trusova, I. F. ; Tschernov, V. I. : Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine. Nedra, Moskau, 1982
140. Tucker, M. E. : Einführung in die Sedimentpetrologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1985
141. Uetz, H. : Abrasion und Erosion. Grundlagen, Betriebliche Erfahrungen, Verminderung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1986
142. Underwood, E. E. : Quantitative evaluation of sectioned material. Research Laboratory, Lockheed-Georgia Company, Marietta, Georgia
143. Unland, G. : Untersuchungen zur Prallzerkleinerung sowie granulometrische Bewertung der Zerkleinerungsprodukte. Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe, 1996
144. Unland, G. ; Folgner, T. : Automatische Kornformbestimmung durch photooptische Partikelanalyse. In: Die Naturstein-Industrie 33, (1997), Heft 5, S. 20–28
145. Unland, G. ; Folgner, T. ; Raaz, V. : Erzeugung von Splitt und Schotter durch Prallbrecher. 3. Internationales Symposium Technik und Technologie des Straßenbaus, München, 1998
146. Unland, G. ; Meltke, K. ; Popov, O. ; Silbermann, F. : Die Beurteilung der Mahlbarkeit von Zementklinker, Teil 2. Cement International 2, (2003), S. 54–63
147. Unland, G. ; Popov, O. : Charakterisierung und quantitative Beurteilung von Rohstoffen mit stereologischen Methoden. 14. Freiburger Steine- und Erden-Kolloquium, Freiberg, 2000

-
148. Unland, G. ; Raaz, V. : Die formale Charakterisierung der Gesteine – ein Beitrag aus der Sicht des Maschinenbaus. In: *Z. geol. Wiss.* 26 (1998), Nr. 3/4, S. 315–328
149. Wagenbreth, O. : Naturwissenschaftliches Grundwissen für Ingenieure des Bauwesens. Band 3. Technische Gesteinskunde. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1977
150. Wallbrecher, E. : Tektonische und gefügeanalytische Arbeitsweisen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1986
151. Wegner, T. : Prallzerkleinerung grober Einzelpartikel als Auslegungsgrundlage für Rotorprallbrecher. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Dissertation, 2005
152. Williams, H. ; Turner, F. J. ; Gilbert, C. M. : Petrography. An introduction to the study of rocks in thin sections. University of California, Berkeley, San Francisco, 1954
153. Wimmenauer, W. : Petrographie der magmatischen und metamorphen Gesteine. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1985
154. Yardley, B. W. D. ; MacKenzie, W. A. ; Guilford, C. : Atlas metamorpher Gesteine und ihrer Gefüge in Dünnschliffen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1992
155. Zavarickij, A. N. : Izverzhennye gornye porody. AN SSSR, Moskau, 1956

Verzeichnis der Anhänge

Anlagenverzeichnis für Anhang A

Anlage 1:	Charakteristische Eigenschaften wichtiger gesteinsbildender Minerale (aus [32, 94, 141]).....	134
Anlage 2:	Charakteristische Eigenschaften wichtiger gesteinsbildender Minerale (aus [32, 94, 141]).....	135
Anlage 3:	Hauptstrukturelemente der Erdkruste und der Lithosphäre (aus [15]).....	136
Anlage 4:	Gefüge magmatischer Gesteine	137
Anlage 5:	Gefüge sedimentärer Gesteine (klastische Sedimente).....	138
Anlage 6:	Gefüge sedimentärer Gesteine (organische und chemische Sedimente).....	139
Anlage 7:	Gefüge metamorpher Gesteine	140
Anlage 8:	Zählung	141
Anlage 9:	Korrelation verschiedener Härteskalen für ausgewählte Minerale ...	142
Anlage 10:	Schleiffestigkeit gesteinsbildender Minerale. Absolute Schleifhärte nach Rosiwal und relative Ritzhärte nach Mohs [109, 110].....	143
Anlage 11:	Verwitterungsgrade nach Empfehlung der ISRM [41].....	144
Anlage 12:	Messwerte der Versuche mit dem Prallbrecher [46]	145
Anlage 13:	Qualitative Korrelation der Gesteinsparameter mit spezifischen Produkteigenschaften und Systemkenngrößen	146
Anlage 14:	Qualitative Korrelation der Gesteinsparameter mit spezifischen Produkteigenschaften und Systemkenngrößen (Fortsetzung)	147
Anlage 15:	Qualitative Korrelation der Gesteinsparameter mit spezifischen Produkteigenschaften und Systemkenngrößen (Fortsetzung)	148
Anlage 16:	Qualitative Korrelation der Gesteinsparameter mit spezifischen Produkteigenschaften und Systemkenngrößen (Fortsetzung)	149
Anlage 17:	Ausschnitte aus den digitalisierten Bildern der Granitprobe aus Obercrinitz	150
Anlage 18:	Gesteinsparameter der Granitprobe 1 aus Obercrinitz.....	151
Anlage 19:	Gesteinsparameter der Granitprobe 2 aus Obercrinitz.....	152
Anlage 20:	Gesteinsparameter der Granitprobe 3 aus Obercrinitz.....	153

Anlage 21:	Ausschnitte aus den digitalisierten Bildern der Granitprobe aus Heberndorf	154
Anlage 22:	Gesteinsparameter der Granitprobe 1 aus Heberndorf	155
Anlage 23:	Gesteinsparameter der Granitprobe 2 aus Heberndorf	156
Anlage 24:	Gesteinsparameter der Granitprobe 3 aus Heberndorf	157
Anlage 25:	Ausschnitte aus den digitalisierten Bildern der Granitprobe aus Meißen	158
Anlage 26:	Gesteinsparameter der Granitprobe 1 aus Meißen.....	159
Anlage 27:	Gesteinsparameter der Granitprobe 2 aus Meißen.....	160
Anlage 28:	Gesteinsparameter der Granitprobe 3 aus Meißen.....	161
Anlage 29:	Ausschnitte aus den digitalisierten Bildern der Gneisprobe aus Oberschöna	162
Anlage 30:	Gesteinsparameter der Gneisprobe 1 aus Oberschöna.....	163
Anlage 31:	Gesteinsparameter der Gneisprobe 2 aus Oberschöna.....	164
Anlage 32:	Gesteinsparameter der Gneisprobe 3 aus Oberschöna.....	165

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis für Anhang B

Abbildung B. 1:	Dünnschliffauswertungsmethoden	166
Abbildung B. 2:	Vereinfachter Berechnungsablauf zur Ermittlung der Gesteinsparameter [148]	167
Abbildung B. 3:	Softwarepaket zur Dünnschliffauswertung.....	167
Abbildung B. 4:	Arbeitsblatt „Zähler“	168
Abbildung B. 5:	Dünnschliffplan	169
Abbildung B. 6:	Speicherung der Bilddaten.....	171
Abbildung B. 7:	Gruppen-Matrix	172
Abbildung B. 8:	Fehlerabschätzung	173
Abbildung B. 9:	2D-Schnittzahlrose	176
Abbildung B. 10:	3D - Schnittzahlrose	177
Abbildung B. 11:	3D - Ellipsoid.....	177
Abbildung B. 12:	Bestimmung der LNV-Parameter der Volumenverteilung der Teilchen aus den stereologischen Daten der Anzahlverteilung	180

Tabelle B. 1:	Daten-Matrix 2.....	172
Tabelle B. 2:	Ausgangsdaten	174
Tabelle B. 3:	A-B-C Dünnschliffe.....	175
Tabelle B. 4:	Stereologische Umrechnung der Schnittflächenverteilung in die räumlichen Anzahlverteilung der Teilchen	178
Tabelle B. 5:	LNV-Approximation	179
Tabelle B. 6:	Datenblatt „Gesteinscharakteristika“	180

Anhang A

Nr.	Minerale	Dichte	Mohshärte	Vickershärte	Einfluß auf die Festigkeit		Einfluß auf die Beständigkeit	
1	Quarz	2,65	7,0	1103-1260	+	sehr spröde, meist eingeregelt	+	verwitterungsbeständig; nicht hitzebeständig; säurebeständig
2	Opal	1,98-2,50	5,5-6,5		+	spröde	-	kryotokristalline und amorphe Kieselsäure im alkalischen Milieu löslich
3	Granate	3,51-4,25	7,0-7,5	850-1350	+	bei Anhäufung z. T. Gleitgefahre an den Kristallflächen	+	säure- und wärmebeständig
4	Cordierit	2,50-2,75	7,0-7,5	1100	+	spröde	+/-	bei Verwitterung Übergang in glimmerartige Substanzen
5	Kalifeldspäte	2,53-2,56	6,0	600-750	+	Spaltbarkeit und Zwillingsbildung beachten	+/-	Verwitterungsprodukte: Kaolinit, Illit, Serpizit; säurebeständig
6	Plagioklase	2,61-2,77	6,0-6,5	700-850	+	Spaltbarkeit und Zwillingsbildung beachten	+/-	bei Verwitterung Kaolinisierung und Calcitisierung
7	Foide	2,45-2,65	5,5-6,0	530-700	+	spröde	+/-	nicht säurebeständig; nicht stabil. Ursache des Sonnenbrandes von Basaltoiden. Kaolinit, Analcim, Zeolith, Serpizit
8	Sillimanit	3,22-3,25	6,0-7,0	700-1100	+	Spaltbarkeit beachten	+	säurebeständig
9	Disthen	3,53-3,65	4,5-7,0	500-1187	+	Spaltbarkeit beachten	+	säurebeständig
10	Diopsid	3,27-3,31	5,0-6,0	700-1100	+	spröde	+	säure- und wärmebeständig; Verwitterung führt zur Bildung von Karbonaten, Hämatit und Quarz
11	Epidot	3,30-3,50	6,0-7,0	700-1100	+	bei Anhäufung z. T. Gleitgefahre an den Kristallflächen	+	relativ stabil; gelegentlich Chlorifizierung
12	Olivin	3,21-4,34	6,5-7,0	870-1100	+	sehr spröde	-	Serpentinisierung; Iddingsitisierung; nicht voll säurebeständig; oft Ausscheidung von Magnetit und Limonit
13	Pyroxene	3,20-3,60	5,0-6,5	600-640	+	zäh	+	ziemlich säure- und wärmebeständig; Verwitterung führt zur Bildung von Karbonaten neben Fe-Hydroxiden oder Hämatit
14	Amphibole	3,02-3,27	5,0-6,0	400-700	+	zäh	+	säure- und wärmebeständig; bei der Verwitterung entsteht aus der grünen Hornblende ein Gemenge von Karbonaten, Limonit und Quarz

Anlage 1: Charakteristische Eigenschaften wichtiger gesteinsbildender Minerale (aus [32, 94, 141])

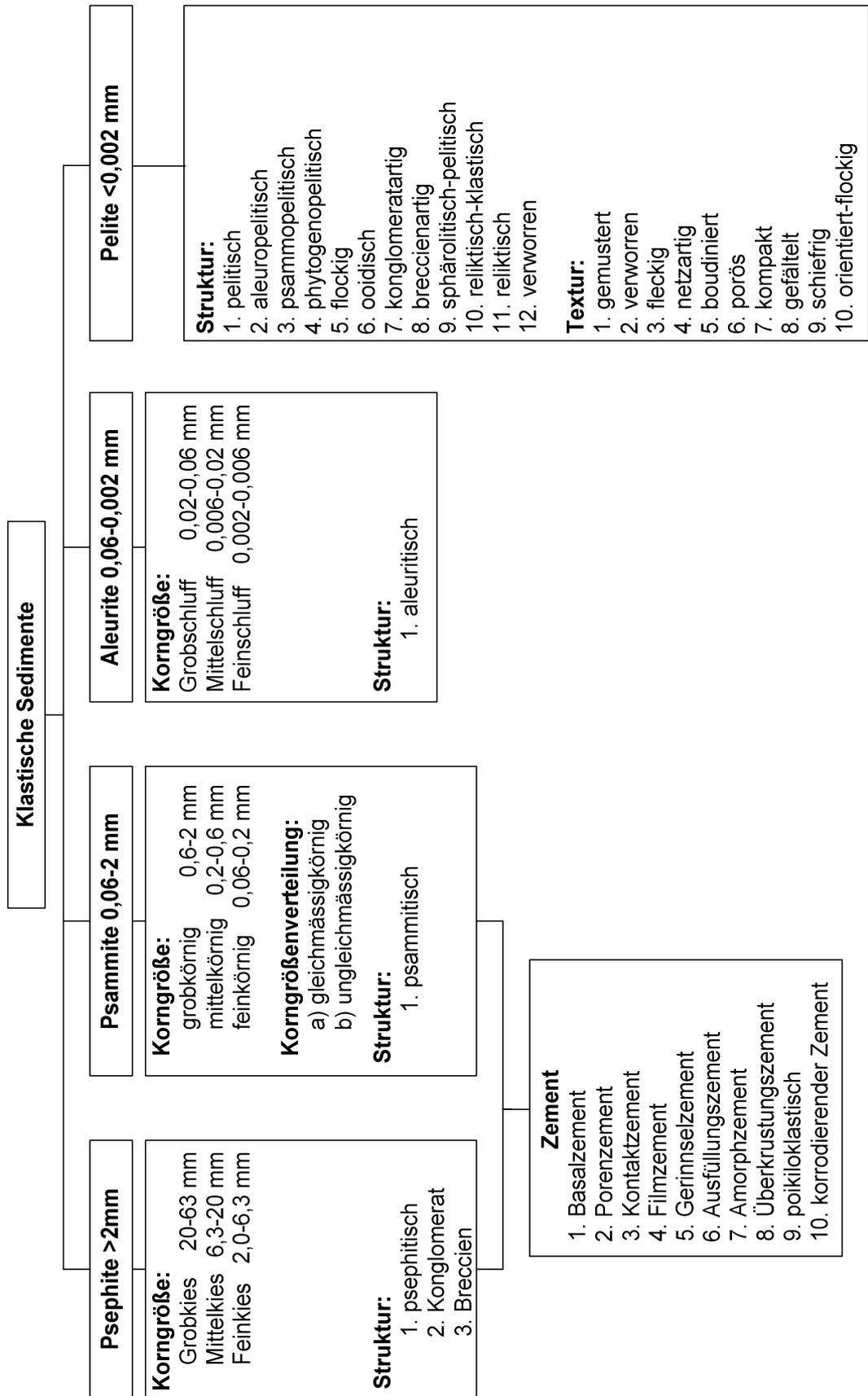
Nr.	Minerale	Dichte	Mohshärte	Vickershärte	Einfluss auf die Festigkeit		Einfluss auf die Beständigkeit	
15	Glimmer	2,70-3,30	2,0-3,0	25-90	-	Gleitflächenbildung wirkt festigkeitsmindernd	-	nicht säurebeständig; leicht spaltbar; leicht zersetzbar
16	Serpentin	2,00-2,60	2,5-4,0	80-200	-	oft blättrig und dann festigkeitsmindernd	-	nicht säurebeständig; Wasser und Eisengehalt begünstigen Verwitterung
17	Chlorit	2,60-3,40	2,0-3,0		-	oft blättrig und dann festigkeitsmindernd	-	relativ stabil; durch Wasseraufnahme in andere Tonminerale zerfallend
18	Talk	2,70-2,80	1,0	7-19	-	oft blättrig und dann festigkeitsmindernd	-	sehr gleitfähig; beim Erhitzen unter Wasserverlust erhärtend
19	Tonminerale	1,90-2,90	1,5-2,0	5	-	oft blättrig und dann festigkeitsmindernd	-	Zwischen (200...400)°C wird Kaolinit vollständig gewandelt, starke Aufblähung durch Wasseraufnahme; große Thixotropie
20	Glaukonit	2,20-2,80	2,0-3,0		-	spröd	-	bei Verwitterung Bildung von Fe-Hydroxiden und SiO ₂
21	Magnetit	5,20	5,5-6,5	480-740	+	spröd	+/-	relativ stabil; Oxidation zu Hämatit
22	Hämatit	5,20-5,30	6,0-6,5	818-1097	+	spröd	+/-	hydratisiert langsam
23	Pyrit, Markasit	5,00-5,20	6,0-6,5	1027-1620	+/-	festigkeitsmindernd durch chemische Beeinflussung benachbarter Minerale	-	sehr leicht verwitterbar; Eisenvitriol-, Schwefelsäure-, Brauneisensteinbildung
24	Calcit	2,60-2,80	3,0	127-146	+/-	spröd	-	Löslichkeit in H ₂ O: 0,52 g/l bei 20°C; CO ₂ -Gehalt 0,034%
25	Dolomit	2,85-2,95	3,5-4,0	358-437	+/-	spröd	+	Löslichkeit in H ₂ O: 0,52 g/l bei 20°C; CO ₂ -Gehalt 0,034%
26	Gips	2,20-2,40	1,5-2,0	31-48	-	Löslichkeit mindert Festigkeit erheblich	-	Löslichkeit in H ₂ O: (1,75...2,15) g/l; Subrosion, besonders in Gegenwart von NaCl
27	Anhydrit	2,90-3,00	3,5	130	-	Hydratation mindert Festigkeit erheblich	-	auslaugbar; Löslichkeit in H ₂ O: (0,2...0,5) g/l; bei Wasseraufnahme Volumenerweiterung um 60%

Anlage 2: Charakteristische Eigenschaften wichtiger gesteinsbildender Minerale (aus [32, 94, 141])

<p>Mittelozeanische Rücken</p> <p>Ozeanische Tafeln Intratafelhebungen Mikrokontinente</p> <p>Submarine Kontinentalränder passive Kontinentalränder aktive Kontinentalränder</p> <p>Geosynklinalen Eugeosynklinalen Mioeosynklinalen</p> <p>Epigeosynklinale Orogene</p>	<p>Kontinentale Tafeln alte Tafeln -Grünsteingürtel/ -Granit-Gneis-Areale junge Tafeln Schilder Massive Zonen der perikratonen Senken Anteklise Syneklise Aulakogene Wölbungen Senken Wälle lokale Nebungen</p> <p>Epitafel-Orogene Gebirgssystemen intramontane Senken</p> <p>Kontinentale Riffe</p>	<p>Tiefenbrüche pankrustale Brüche Lithosphärenbrüche Mantelbrüche Tiefenverwerfungen Tiefenaufschiebungen Tiefenüberschiebungen Tiefenblattverschiebungen</p> <p>Ringstrukturen Meteoritenkrater Astrobleme Ringstrukturen</p>	<p>Krustenfalten endogene Faltung Deckgebirgsfaltung -Horst-Antiklinale -Gräben-Synklinale -störungsnahe Falten -Gravitationsgleitfalten -Diapirfalten Bruchschieferung -schichtkonforme -schichtdiskonforme -fächerförmige -mellerförmige -s-förmige -achsennebenparallele Granit-Gneis-Kuppeln Granit-Gneis-Wälle exogene Faltung -reliefbedingte Falten -Kompaktionsfalten -Quellfalten -Setzungsfalten -Glaziodislokationen</p>	<p>Krustenbrüche Abschiebungen Aufschiebungen Horizontalverschiebungen Spalten Überschiebungen</p> <p>Tektonische Decken Klippen tektonische Fenster Melange präplikative Decken synplikative Decken postplikative Decken Scherdecken Gravitationsdecken Kompressionsdecken</p>
---	--	---	--	---

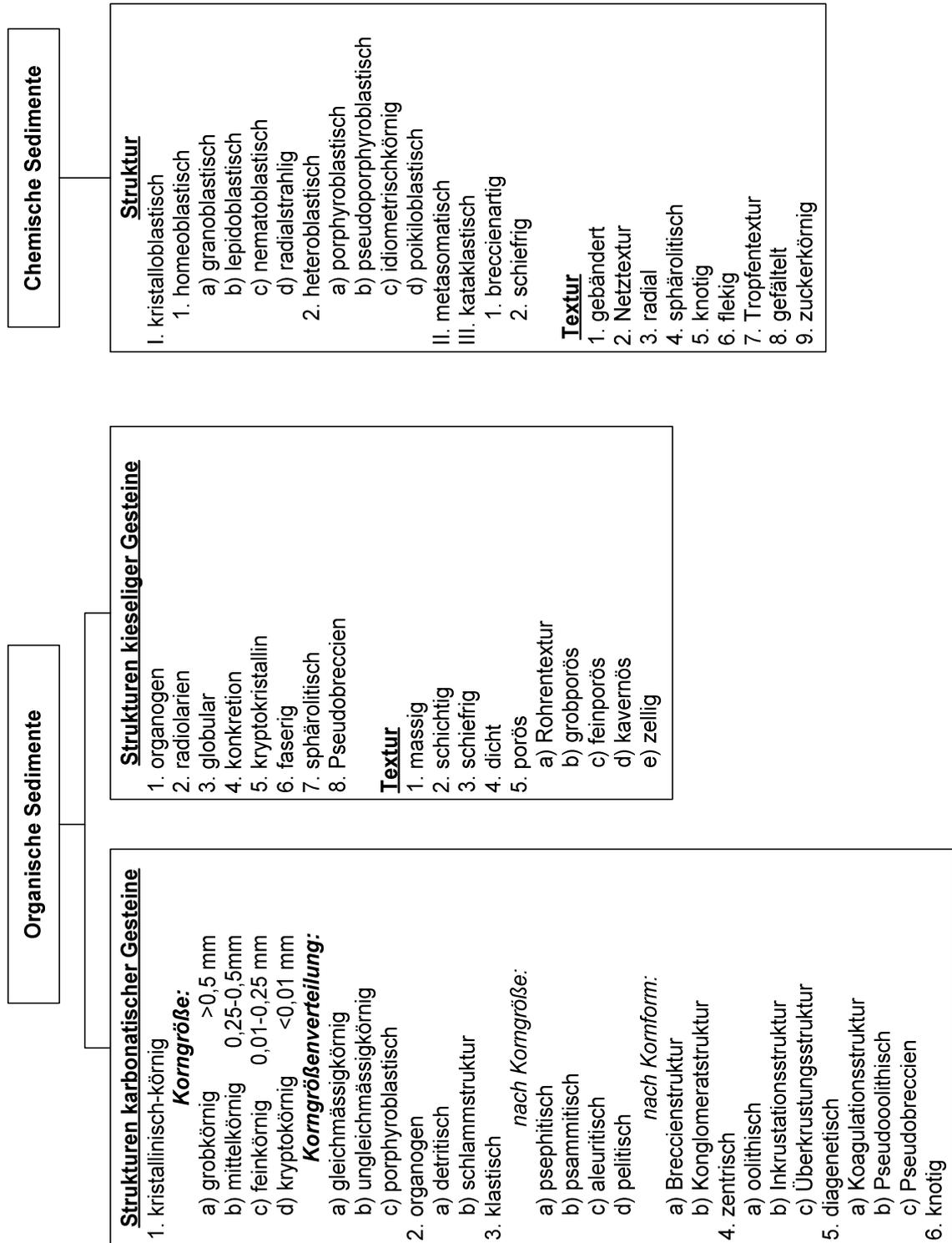
Struktur	Plutonite	Vulkanite
<u>Kristallinitätsgrad</u> Verhältnis von Kristallen zu glasigen (amorphen) Bestandteilen	<u>Holokristallin</u> alle Bestandteile sind voll auskristallisiert	<u>Hypokristallin</u> meist kristallin, mit kleinem Glasanteil <u>Hyalin</u> mit hohem Glasanteil
<u>Korngröße</u> absolute Größe der Gemengeteile	<u>Phaneritisch</u> > 0,1 mm a) grobkörnig >10 mm b) grobkörnig 5-10 mm c) mittelkörnig 1-5 mm d) feinkörnig 0,1-1 mm	<u>Aphanitisch</u> < 0,1 mm a) mikrokristallin 0,01-0,1 mm b) kryptokristallin 0,0001-0,01 mm c) kolloidkristallin < 0,0001 mm
<u>Korngrößenverhältnis</u> relative Korngrößenverteilung	<u>Körnig</u> a) gleichkörnig geringe Korngrößenunterschiede, max 1:10 b) ungleichkörnig Korngrößenunterschiede mehr als 10fach, aber Korngrößen ändern sich gleichmässig c) porphyrtartig Korngrößenunterschiede mehr als 10fach, aber es gibt keine gleichmässige Korngrößenänderung	<u>Porphyrisch</u> mikro- bis kolloidkristalle Grundmasse, mit makrokristallinen Einsprenglingen
<u>Kornform</u> Gestalt	<u>Xenomorph bis Hypidiomorph</u> Eigengestalt (Idiomorphie) nicht oder nur wenig ausgebildet	<u>Idiomorph</u> (Einsprenglinge) <u>Xenomorph</u> (Grundmasse)
<u>Kornbindung</u> Kornverband, das heißt Verzahnung der Korngrenzen	<u>Mosaikartig - ohne Glas</u> 1. panidiomorphkörnig 2. hypidiomorphkörnig a) granitisch b) ophitisch c) doleritisch d) sideronitisch e) drusitisch 3. allotriomorphkörnig a) gabbrostruktur b) aplitisch 4. poikilitisch a) poikilophitisch b) monzonitstruktur 5. graphisch a) pegmatitisch	<u>Sperrig</u> Strukturelemente: a) Kristallite b) Mikrolithe 1. vitrophyrisch (Glas \geq 95%) 2. hyalopilitisch (Glas > Mikrolithe) 3. intersertal (Glas < Mikrolithe) 4. mikrolithisch (Glas < 10%) a) pilotaxitisch b) trachitisch c) bostonitisch d) orthophyrisch e) phonolitisch f) ozellar g) mikrolithisch 5. mikropoikilitisch 6. sphärolithisch 7. variolithisch 8. felsitisch 9. grobfelsitisch 10. spilitisch
Textur	Plutonite	Vulkanite
<u>Räumliche Anordnung der Gemengeteile</u>	<u>Richtunglos</u> 1. Massivtextur 2. taxitisch a) konstitutionstaxit b) pseudotaxit	<u>Fluidal</u> - meist lagenartige Einregelung der Einsprenglinge 1. direktive a) trachytoid b) sphärisch c) fluidal 2. breccien-taxitisch 3. gebändert
<u>Raumerfüllung</u>	Massig bis kompakt 1. kompakt (ohne äußerlich erkennbare Zwischenräume zwischen den Mineralen)	Etwas porös 1. poröse a) poröse (Porengröße < 2mm) b) blasige (Porengröße > 2mm) c) Bimssteintextur ($V_{\text{Poren}} > V_{\text{Gestein}}$) 2. mandelsteinartig 3. miarolithisch

Anlage 4: Gefüge magmatischer Gesteine



Anlage 5:

Gefüge sedimentärer Gesteine (klastische Sedimente)

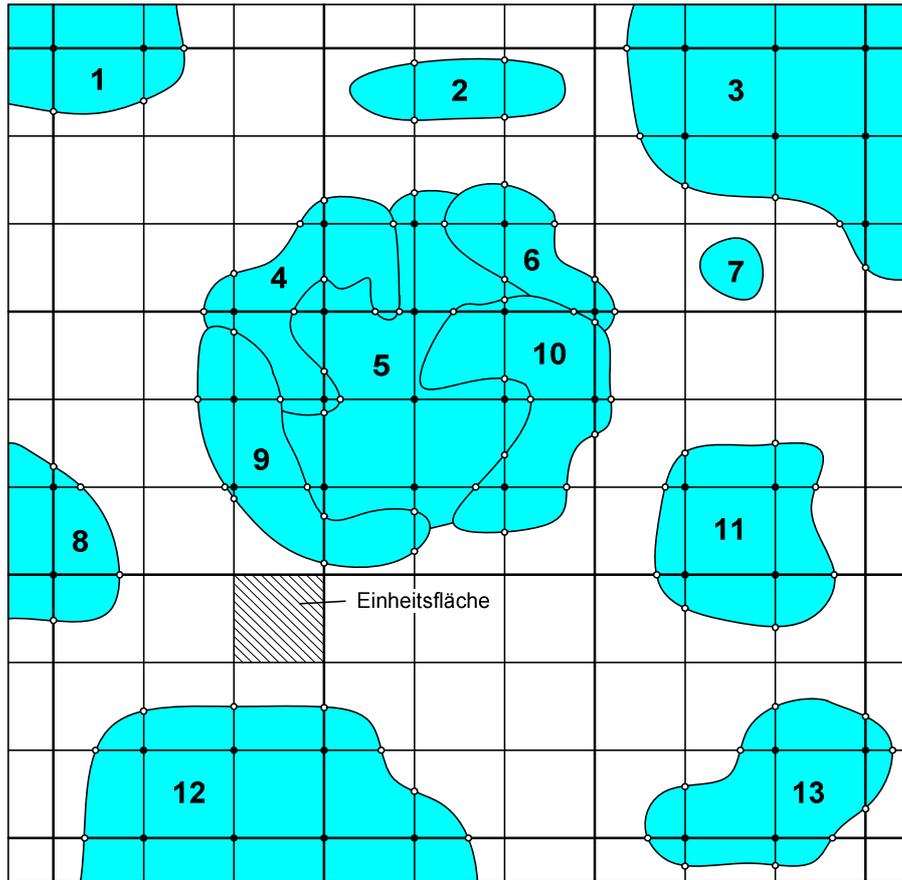


Anlage 6:

Gefüge sedimentärer Gesteine (organische und chemische Sedimente)

Struktur	Kristalloblastische Strukturen	Reliktstrukturen
Korngröße	a) groblastisch > 5 mm b) mittelblastisch 1 - 5 mm c) feinblastisch 0,1 - 1 mm d) mikroblastisch < 0,1 mm	Relikte groblastischer Sedimentstrukturen Relikte feinklastischer Sedimentstrukturen Relikte plutonischer Strukturen Kissenlaven und heterogene Pyroklastite
Korngrößenverhältnis	a) gleichkörnig (Homeoblastisch) b) ungleichkörnig (Heteroblastisch) c) porphyroblastisch	blastovitroklastisch Blastogabbrostruktur blastogranitisch blastodiabasisch blastopoikilophitisch blastoporphyrisch
Kornform	a) idioblastische Körner b) xenoblastische Körner	
Kornbindung	1. granoblastisch 2. lepidoblastisch 3. nematoblastisch 4. fibroblastisch 5. poikiloblastisch a) poikiloblastisch b) Siebstruktur c) helizitisch 6. diablastisch a) Symplektite 7. kataklastisch 8. mylonitisch	
Textur	Metamorphisch	Relikttextur
massige Texturen planare Texturen lineare Texturen	1. massig a) fleckig b) knotig 2. schiefbrig a) parallelschiefrig b) gneisig c) gefältschiefrig d) linearschiefrig 3. gebändert 4. Augentextur	Relikte plutonischer Texturen Relikte sedimentären Texturen

Anlage 7: Gefüge metamorpher Gesteine



Nr.	Anzahl der Knotenpunkten pro Teilchen	Schnittpunktzahl der Linien mit der Flächen der Teilchen				Anzahl der Klassen berührter Einheitsflächen pro Teilchen							
		$\alpha\alpha0$	$\alpha\alpha90$	$\alpha\beta0$	$\alpha\beta90$	0,5-1	1-2	2-4	4-8	8-16	16-32	32-64	64-128
1	2			1	2					1			
2	0			0	4			4					
3	7			3	3							1	
4	3	6	4	2	2				4				
5	7	10	9	0	1					4			
6	2	2	2	2	2			4					
7	0			0	0	4							
8	2			2	2				2				
9	2	2	3	2	3				4				
10	3	4	4	2	2				4				
11	4			4	4					4			
12	7			4	4						2		
13	4			4	6				4				
Σ	43	24	22	26	35	4		8	18	9	2	1	

Anlage 8: Zählung

Minerale	Schleifhärte			Ritzhärte		
	min	mittel ³	max	min	mittel ³	max
Diamant	–	117000	–	–	10,0	–
Korund	647	798	949	–	9,0	–
Topas	87	104	121	–	8,0	–
Staurolith, Zirkon	–	100	–	7,0	7,5	8,0
Quarz	86	100	100	–	7,0	–
Granat	50	75	100	6,5	6,5	7,5
Olivin	–	65	–	6,5	6,5	7,0
Epidot, Zoisit	30	60	100	6,0	6,5	7,0
Amphibole, Pyroxene	22	55	65	5,5	6,0	6,5
Pyrit, Hämatit	50	55	60	–	6,0	6,5
Orthoklas	25	32	37	–	6,0	–
Plagioklas	25	32	37	5,0	6,0	6,0
Apatit, Rutil	4,0	10	16	–	5,0	–
Titanit, Magnetit	5,0	10	15	5,0	5,5	5,5
Fluorit	2,8	3,0	3,1	–	4,0	–
Glimmer	2,0	3,0	4,0	2,5	2,5	3,0
Calcit	1,9	2,9	3,9	–	3,0	–
Chlorit	1,0	2,0	3,0	2,0	2,5	2,5
Salz	1,2	1,2	1,4	–	2,0	–
Gips	0,4	0,6	0,6	–	1,5	–
Talk	0,5	0,5	0,6	–	1,0	–

Anlage 10: Schleiffestigkeit gesteinsbildender Minerale. Absolute Schleifhärte nach Rosival und relative Ritzhärte nach Mohs [109, 110]

³ für das Diagramm in Abbildung 2-23 verwendete Mittelwerte

W	ISRM	V	Bezeichnung
I	fresh	1	frisch und unverwittert (Fels) Es sind keine farblichen, mikro- oder makroskopischen Veränderungen erkennbar.
II	slightly	2	angewittert Erste Verfärbungen sind durch mikroskopische Zersetzung von Mineralen erkennbar, verringerte Druckfestigkeit des Gesteins.
...	...	3	leicht verwittert Die Färbung ist deutlich rotbraun entlang von Klüften; das Gestein ist deutlich (bis zu 15%) entfestigt.
III	moderately	4	mittelstark verwittert Entlang von Klüften tritt starke Verwitterung auf; die Reibung entlang dieser Trennflächen ist deutlich herabgesetzt; weniger als 40-50% des Gesteins sind zersetzt; alle niedrigeren Verwitterungsstufen treten nebeneinander auf; ein für das Baugeschehen besonders kritischer Zustand.
IV	highly	5	stark verwittert Mehr als 40-50% des Gesteins sind zersetzt, die ursprüngliche Struktur ist aber noch gut erkennbar, die Klüfte bestimmen noch das Gesamtverhalten des Gesteins, obwohl die Reibung entlang der Klüfte stark herabgesetzt ist.
V	extremely	6	sehr stark verwittert Die Trennflächen sind nun wirkungslos, der ursprüngliche Zusammenhalt des Gesteins ist kaum noch vorhanden, aber die ursprüngliche Gesteinsstruktur ist noch in großen Bereichen erkennbar.
VI	residual soil	7	völlig verwittert (Boden) Die ursprünglichen Strukturen und die Gesteinszusammensetzung sind restlos zerstört, es ist eine deutliche Volumenänderung feststellbar, aber der Boden ist nicht wesentlich transportiert worden.

Anlage 11: Verwitterungsgrade nach Empfehlung der ISRM [41]

Gestein	mittlerer Aufgabegutdurchmesser [mm]	Spaltweitenverhältnis S_O/S_U	Umfangsgeschwindigkeit v_R [m/s]	Verschleiß [g/t]	Mittelwert [g/t]
Andesit (Kesselsdorf)	23,31	60/10	60,5	16,57	19,87
		50/20	60,5	18,03	
		40/12	60,5	25,00	
Basalt (Nieder-Ofleiden)	31,58	60/10	60,5	20,89	21,15
		50/20	60,5	19,82	
		40/12	60,5	22,73	
Diabas 1 (Pirna)	22,47	60/10	60,5	14,28	11,50
		50/20	60,5	11,16	
		40/12	60,5	10,23	
Diabas 2 (Pirna)	16,53	60/10	60,5	10,35	
		50/20	60,5	9,19	
		40/12	60,5	8,86	
Diabas 3 (Pirna)	26,13	60/10	60,5	11,96	
		50/20	60,5	12,14	
		40/12	60,5	15,05	
Diabas 4 (Pirna)	10,98	60/10	60,5	11,96	
		50/20	60,5	10,26	
		40/12	60,5	12,55	
Granodiorit (Oberottendorf)	24,92	60/10	60,5	37,50	37,36
		50/20	60,5	34,64	
		40/12	60,5	39,94	
Granit (Obercrinitz)	20,48	60/10	60,5	33,57	32,50
		50/20	60,5	30,35	
		40/12	60,5	33,57	
Granit 1 (Henneberg)	28,00	60/10	60,5	42,85	40,79
		50/20	60,5	37,50	
		40/12	60,5	42,02	
Gneis (Oberschöna)	24,86	60/10	60,5	21,33	20,63
		50/20	60,5	19,55	
		40/12	60,5	21,01	
Quarzit (Oberschöna)	19,38	60/10	60,5	129,19	111,24
		50/20	60,5	96,97	
		40/12	60,5	107,55	

Anlage 12: Messwerte der Versuche mit dem Prallbrecher [46]

		6.1 Produkteigenschaften									6.2 Systemkenngrößen				
		Korngrößenverteilung (6.1.1)	Kornformverteilung (6.1.2)	Festigkeit (6.1.3)	Wasseraufnahme (6.1.3.1)	Frostbeständigkeit (6.1.3.2)	Raumbeständigkeit	Hitzebeständigkeit (6.1.4)	Säurebeständigkeit (6.1.5)	Polierresistenz	Anteil an schädlichen Bestandteilen (6.1.6)	spezifischer Arbeitsbedarf (6.2.1)	spezifischer Verschleiß (6.2.2)	spezifischer Durchsatz	
Struktur	Medianwert $d_{50,3}$ [mm]	Quarz	●↑		●↑					●↑		●↑	●↓		
		Feldspäte	●↑		○↑					●↑		●↑	●↓		
		Glimmer	●↓		○↓		●↓			●↓		●↑	●↑		
		Olivin	●↓		●↑					●↑		●↓	●↓		
		Pyroxene	●↓		●↑					●↑		●↓	●↓		
		Amphibole	●↓		●↑					●↑		●↓	●↓		
		Calcit	●↑		○↑					●↓		●↑	●↑		
		Poren	●↓		○↓	●↓	●↓	●↓		●↓	●↓				
		NDP	●↓		○↑					●↑		●↓	●↑		
	Streuungsparameter σ	Quarz	●↑		●↑					●↑					
		Feldspäte	●↑		●↑					●↑					
		Glimmer	●↓		○↓					●↓					
		Olivin	●↓		●↑					●↑					
		Pyroxene	●↓		●↑					●↑					
		Amphibole	●↓		●↑					●↑					
		Calcit	●↑		○↑					●↓					
		Poren	●↓		○↓	●↓	●↓	●↓		●↓					
		NDP			○↑					●↑					

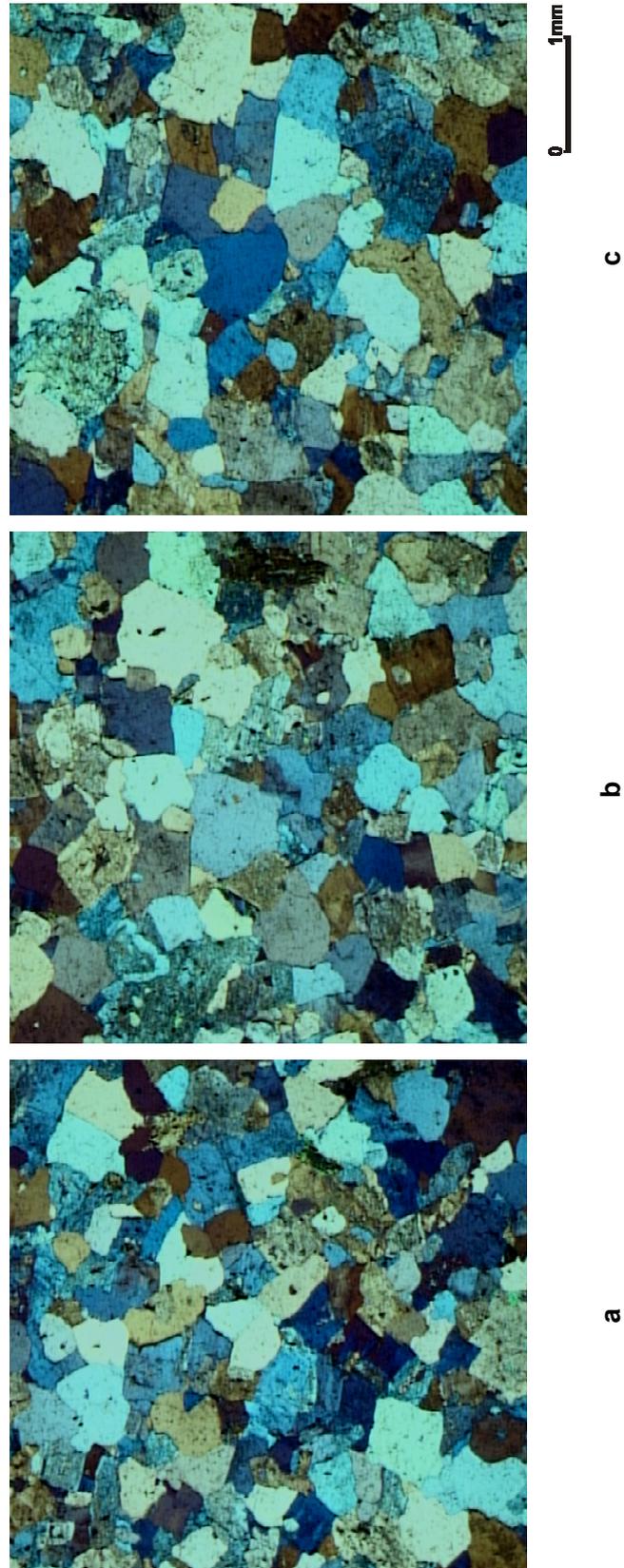
Anlage 14: Qualitative Korrelation der Gesteinsparameter mit spezifischen Produkteigenschaften und Systemkenngrößen (Fortsetzung)

		6.1 Produkteigenschaften										6.2 Systemkenngrößen								
		Korngrößenverteilung (6.1.1)	Kornformverteilung (6.1.2)	Festigkeit (6.1.3)	Wasser Aufnahme (6.1.3.1)	Frostbeständigkeit (6.1.3.2)	Raumbeständigkeit	Hitzebeständigkeit (6.1.4)	Säurebeständigkeit (6.1.5)	Poterresistenz	Anteil an schädlichen Bestandteilen (6.1.6)	spezifischer Arbeitsbedarf (6.2.1)	spezifischer Verschleiß (6.2.2)	spezifischer Durchsatz						
Struktur	spezifische Oberfläche S_v [mm^2/mm^3]	Quarz	●↑		●↑															
		Feldspäte	●↑		●↑															
		Glimmer	●↑		◐↓															
		Olivin	●↓		●↑															
		Pyroxene	●↓		●↑															
		Amphibole	●↓		●↑															
		Calcit	●↑		●↑															
		Poren				●↓	●↓	◐↓												
		NDP			●↑															
	Kornform	Quarz	◐↑	◐↑	●↑							●↑								
		Feldspäte	◐↑	◐↑	●↑							●↑								
		Glimmer	◐↓	●↓	●↓		◐↓					◐↓								
		Olivin	◐↑	◐↑	●↑							●↑								
		Pyroxene	◐↑	◐↑	●↑							●↑								
		Amphibole	◐↑	◐↑	●↑							●↑								
		Calcit	◐↑	◐↑	●↑							◐↑								
		Poren	◐↓	◐↓	◐↓	●↓	●↓	◐↓				◐↓								
		NDP		◐↑	◐↑							◐↑								
	Rauhigkeitsgrad K_R [%]	Quarz	●↑		●↑							●↑								
		Feldspäte	●↑		●↑							●↑								
		Glimmer	●↑		◐↓							◐↓								
		Olivin	●↑		●↑							●↑								
		Pyroxene	●↑		●↑							●↑								
		Amphibole	●↑		●↑							●↑								
		Calcit	●↑		●↑							◐↑								
		Poren	◐↓		◐↓	●↓	●↓	◐↓				◐↓								
		NDP			◐↑							◐↑								

Anlage 15: Qualitative Korrelation der Gesteinsparameter mit spezifischen Produkteigenschaften und Systemkenngrößen (Fortsetzung)

		6.1 Produkteigenschaften										6.2 Systemkenngrößen		
		Korngrößenverteilung (6.1.1)	Kornformverteilung (6.1.2)	Festigkeit (6.1.3)	Wasser Aufnahme (6.1.3.1)	Frostbeständigkeit (6.1.3.2)	Raumbeständigkeit	Hitzebeständigkeit (6.1.4)	Säurebeständigkeit (6.1.5)	Polierresistenz	Anteil an schädlichen Bestandteilen (6.1.6)	spezifischer Arbeitsbedarf (6.2.1)	spezifischer Verschleiß (6.2.2)	spezifischer Durchsatz
Textur	Orientierung K_{is} [%]	Quarz	☉↑	☉↑										
		Feldspäte	☉↑	☉↑										
		Glimmer	●↓	●↓			☉↓							
		Olivin	☉↑	☉↑										
		Pyroxene	☉↑	☉↑										
		Amphibole	☉↑	☉↑										
		Calcit	☉↑	☉↑										
		Poren	☉↓	☉↓	●↓	●↓	☉↓							
		NDP	☉↓	☉↓										
	Clusterbildung C [%]	Quarz	☉↑											
		Feldspäte	☉↑											
		Glimmer	●↓				☉↓							
		Olivin	☉↑											
		Pyroxene	☉↑											
		Amphibole	☉↑											
		Calcit	☉↑											
		Poren				●↓	●↓	☉↓						
		NDP												

Anlage 16: Qualitative Korrelation der Gesteinsparameter mit spezifischen Produkteigenschaften und Systemkenngrößen (Fortsetzung)



Granit aus Obercrinitz. Dünnschliffe Nr.: 73, 74, 75. Vergrößerung 16fach.

Gestein	Typ: Granit 1		Phase nbezog e Merkmale						Gesteins- merkmale	
	Lagerstätte: Obercrinitz	Land: Sachsen	Quarz	Feldspat	Glimmer	Gas	NDP*			
Modus	Phasen		Art	Einheit						
	Phasenteil	Volumenanteil	ϵ_V	%	Quarz	Feldspat	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper
Struktur	Korngröße	Medianwert	$d_{50,3}$	mm	0,549	0,567	0,578	-	-	0,562
		Streuungsparameter	σ	-	0,268	0,274	0,492	-	-	0,274
	Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S_V	mm ² /mm ³	9,491	8,779	15,900	-	-	9,045
	Kornform	Elongation	E	-	1,101	1,232	1,917	-	-	1,199
Flachheit		F	-	1,017	1,049	1,126	-	-	1,040	
Gefüge	Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K_R	%	5	1	33	-	-	1
		Linearer Orientierungsgrad	K_{lin}	%	7	15	39	-	-	9
	Richtung	Flächiger Orientierungsgrad	K_{fl}	%	1	3	7	-	-	2
		Isotroper Orientierungsgrad	K_{is}	%	92	82	54	-	-	89
Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	17	61	0	-	-	47	
	Raumerfüllung	Raumerfüllungsgrad	ϵ_{VF}	%	-	-	-	-	-	100

NDP* - nicht differenzierbare Phase

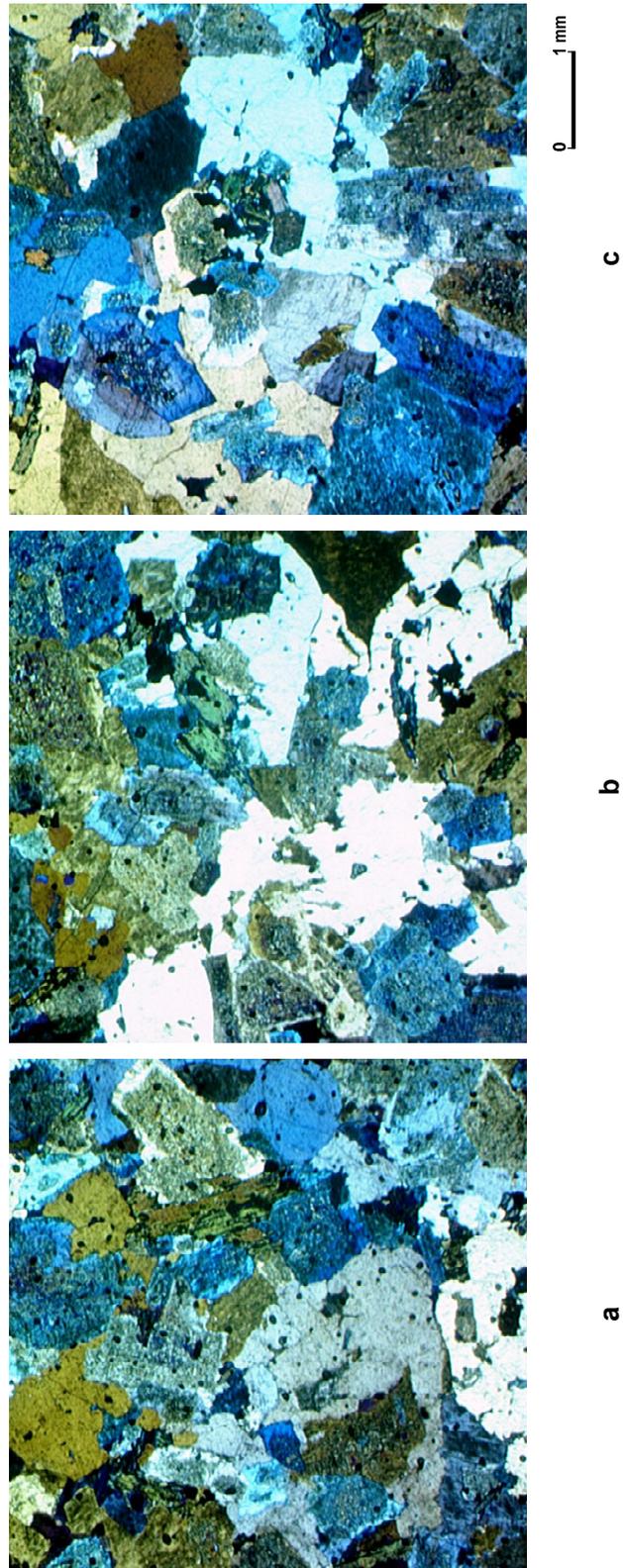
Gestein	Typ: Granit 2		Phasenbezogene Merkmale		Gesteinsmerkmale					
	Lagerstätte: Obercrinitz		Land: Sachsen							
	Phasenanteil	Phasen	Art	Einheit						
Modus	Phasenanteil	Volumenanteil	ε_V	%	Quarz	Feldspat	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper
	Korngröße	Medianwert	$d_{50,3}$	mm	0,661	0,531	0,898	-	-	
Struktur	Kornoberfläche	Streuungsparameter	σ	-	0,552	0,296	0,620	-	-	0,386
		Spezifische Oberfläche	S_V	mm^2/mm^3	12,971	9,448	15,965	-	-	10,735
		Elongation	E	-	1,151	1,132	1,282	-	-	1,142
		Flachheit	F	-	1,040	1,095	1,711	-	-	1,090
		Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K_R	%	15	7	53	-	-
Gefüge	Richtung	Linearer Orientierungsgrad	K_{lin}	%	10	9	13	-	-	9
		Flächiger Orientierungsgrad	K_{fl}	%	2	5	27	-	-	3
		Isotroper Orientierungsgrad	K_{is}	%	88	86	60	-	-	88
		Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	34	54	0	-	-
	Raumfüllung	Raumfüllungsgrad	ε_{VF}	%	-	-	-	-	-	100

NDP* - nicht differenzierbare Phase

Gestein	Typ: Granit 3		Phasenbezogene Merkmale		Gesteinsmerkmale				
	Lagerstätte: Obercrinitz	Land: Sachsen	Quarz	Feldspat/Glimmer		Gas	NDP*	Σ Mikrokörper	
Modus	Phasen		Art	Einheit					
	Gefüge	Phasenanteil	Volumenanteil	ε_V	%	26	71	3	0
Korngröße		Medianwert		$d_{50,3}$	mm	0,491	0,564	0,798	-
	Struktur	Streuungsparameter		σ	-	0,282	0,244	0,462	-
Kornoberfläche		Spezifische Oberfläche		S_V	mm ² /mm ³	10,125	8,823	10,499	-
	Kornform	Elongation		E	-	1,077	1,115	1,750	-
Rauigkeit		Flachheit		F	-	1,040	1,022	1,327	-
	Richtung	Rauhigkeitsgrad		K_R	%	2	4	20	-
Verteilung		Linearer Orientierungsgrad		K_{lin}	%	6	8	31	-
	Raumerfüllung	Flächiger Orientierungsgrad		K_{fl}	%	2	1	15	-
Raumerfüllung		Isotroper Orientierungsgrad		K_{is}	%	92	91	54	-
	Raumerfüllung	Clusterbildungsgrad		C	%	14	62	0	-
Raumerfüllung		Raumerfüllungsgrad		ε_{VF}	%	-	-	-	-

NDP* - nicht differenzierbare Phase

Anlage 20: Gesteinsparameter der Granitprobe 3 aus Obercrinitz



Granit aus Heberndorf. Dünnschliffe Nr.: 107, 108, 109 Vergrößerung 16fach.

Anlage 21: Ausschnitte aus den digitalisierten Bildern der Granitprobe aus Heberndorf

Gestein	Typ: Granit 1		Land: Thüringen		Phase nbezog e Merkmale							Gesteins- merkmale
	Lagerstätte: Heberndorf	Phasen	Art	Einheit	Quarz	Feldspat	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper		
Modus	Phasenanteil	Volumenanteil	ε _V	%	29	68	2	0	0	100		
	Korngröße	Medianwert	d _{50,3}	mm	1,047	0,968	0,377	-	-	0,973		
Struktur		Streuungsparameter	σ	-	0,576	0,340	0,342	-	-	0,408		
	Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S _V	mm ² /mm ³	7,388	5,288	21,025	-	-	6,352		
	Kornform	Elongation	E	-	1,125	1,177	1,229	-	-	1,164		
		Flachheit	F	-	1,100	1,053	1,145	-	-	1,069		
Gefüge	Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K _R	%	23	8	45	-	-	13		
	Richtung	Linearer Orientierungsgrad	K _{lin}	%	9	12	14	-	-	10		
		Flächiger Orientierungsgrad	K _{fl}	%	5	3	7	-	-	3		
		Isotroper Orientierungsgrad	K _{is}	%	86	85	79	-	-	87		
	Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	24	52	0	-	-	42		
Raumfüllung	Raumfüllungsgrad	ε _{VF}	%	-	-	-	-	-	100			

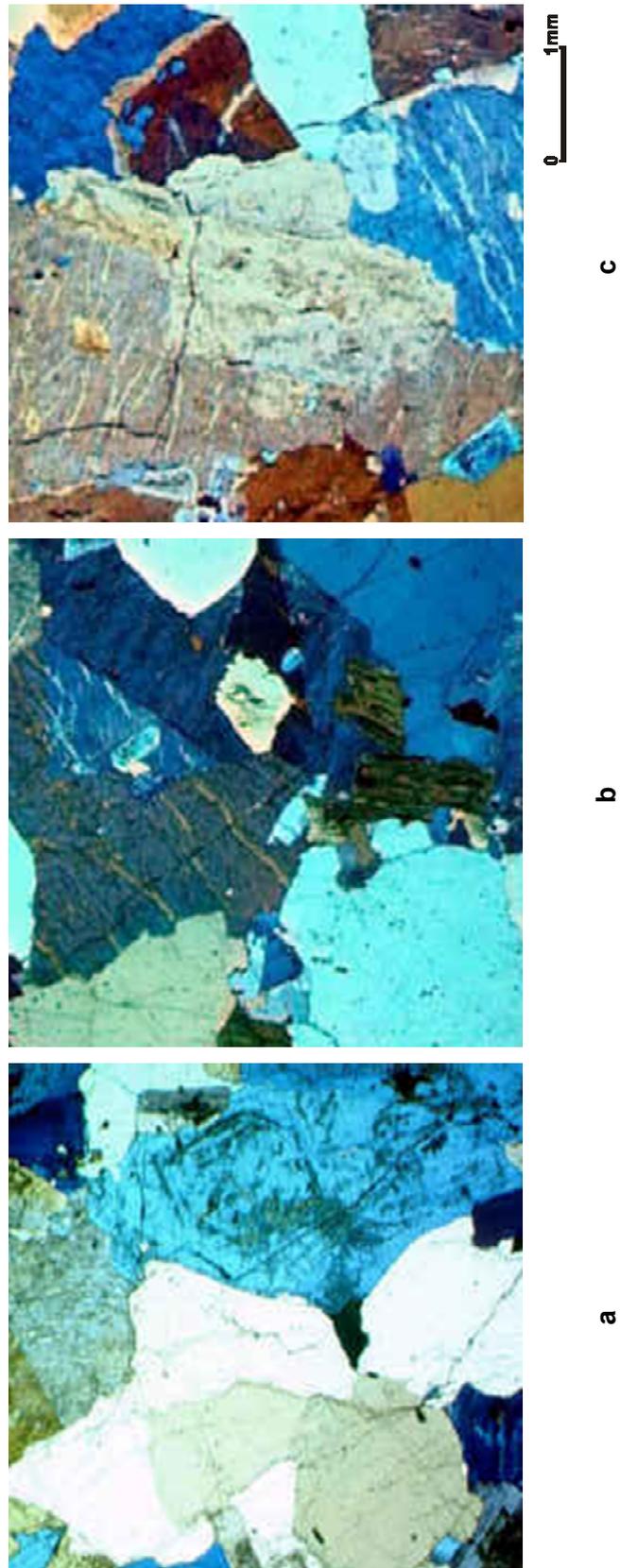
NDP* - nicht differenzierbare Phase

Gestein	Typ: Granit 2		Phasen		Art	Einheit	Phasenbezogene Merkmale					Gesteinsmerkmale
	Lagerstätte: Heberndorf	Land: Thüringen	Volumenanteil				Quarz	Feldspat	Glimmer	Gas	NDP*	
Modus	Phasenanteil		Volumenanteil		ε_V	%	22	74	4	0	0	100
	Korngröße		Medianwert		$d_{50,3}$	mm	2,276	1,296	0,641	-	-	1,485
Struktur			Streuungsparameter		σ	-	0,724	0,322	0,490	-	-	0,418
		Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche		S_V	mm ² /mm ³	6,234	4,848	10,590	-	-	5,391
		Kornform	Elongation		E	-	1,175	4,054	1,417	-	-	1,095
			Flachheit		F	-	1,000	1,076	1,125	-	-	1,061
Gefüge	Rauhigkeit		Rauhigkeitsgrad		K_R	%	23	17	21	-	-	19
	Richtung		Linearer Orientierungsgrad		K_{lin}	%	12	4	23	-	-	3
			Flächiger Orientierungsgrad		K_{fl}	%	0	4	6	-	-	2
Verteilung			Isotroper Orientierungsgrad		K_{is}	%	88	92	71	-	-	95
			Clusterbildungsgrad		C	%	24	52	0	-	-	42
			Raumfüllungsgrad		ε_{VF}	%	-	-	-	-	-	100

NDP* - nicht differenzierbare Phase

Gestein	Typ: Granit 3		Phasenbezogene Merkmale		Gesteinsmerkmale				
	Lagerstätte: Heberndorf	Land: Thüringen	Quarz	Feldspat		Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper
Modus	Phasen		Art	Einheit					
	Phasenanteil	Volumenanteil	ε _V	%	24	73	3	0	100
Struktur	Korngröße	Medianwert	d _{50,3}	mm	2,276	2,293	1,268	0,414	1,494
		Streuungsparameter	σ	-	0,704	0,262	0,366	-	0,373
	Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S _V	mm ² /mm ³	5,731	4,763	13,459	-	5,240
	Kornform	Elongation	E	-	1,118	1,085	1,272	-	1,098
		Flachheit	F	-	1,000	1,003	1,012	-	1,003
Gefüge	Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K _R	%	25	18	27	-	20
		Linearer Orientierungsgrad	K _{lin}	%	8	6	16	-	8
	Richtung	Flächiger Orientierungsgrad	K _{fl}	%	3	5	7	-	0
		Isotroper Orientierungsgrad	K _{is}	%	89	89	77	-	92
	Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	0	53	0	-	39
Raumfüllung		Raumfüllungsgrad	ε _{VF}	%	-	-	-	-	100

NDP* - nicht differenzierbare Phase



Granit aus Meissen. Dünnschliffe Nr.: 185,186,187. Vergrößerung 16fach.

Gestein	Typ: Granit 1		Phasenbezogene Merkmale				Gesteinsmerkmale			
	Lagerstätte: Meißen	Land: Sachsen								
Modus	Phasen		Art	Einheit	Quarz	Feldsp.	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper
	Phasenanteil	Volumenanteil	ε _V	%	29	69	2	0	0	
Struktur	Korngröße		d _{50,3}	mm	0,970	1,321	0,589	-	-	1,206
	Kornoberfläche		Spezifische Oberfläche	σ	0,598	0,380	0,306	-	-	0,443
Gefüge	Kornform		S _V	mm ² /mm ³	3,820	3,786	13,196	-	-	3,950
	Rauhigkeit		Elongation	E	1,000	1,131	1,261	-	-	1,095
Textur	Richtung		Flachheit	F	1,247	1,042	1,094	-	-	1,103
	Verteilung		Rauhigkeitsgrad	K _R	21	14	40	-	-	17
Raumerfüllung	Raumerfüllung		Linearer Orientierungsgrad	K _{lin}	0	9	16	-	-	4
	Raumerfüllung		Flächiger Orientierungsgrad	K _{fl}	11	2	5	-	-	1
Raumerfüllung	Raumerfüllung		Isotroper Orientierungsgrad	K _{is}	89	89	79	-	-	95
	Raumerfüllung		Clusterbildungsgrad	C	40	71	1	-	-	60
Raumerfüllung		Raumerfüllungsgrad	ε _{VF}	%	-	-	-	-	-	100

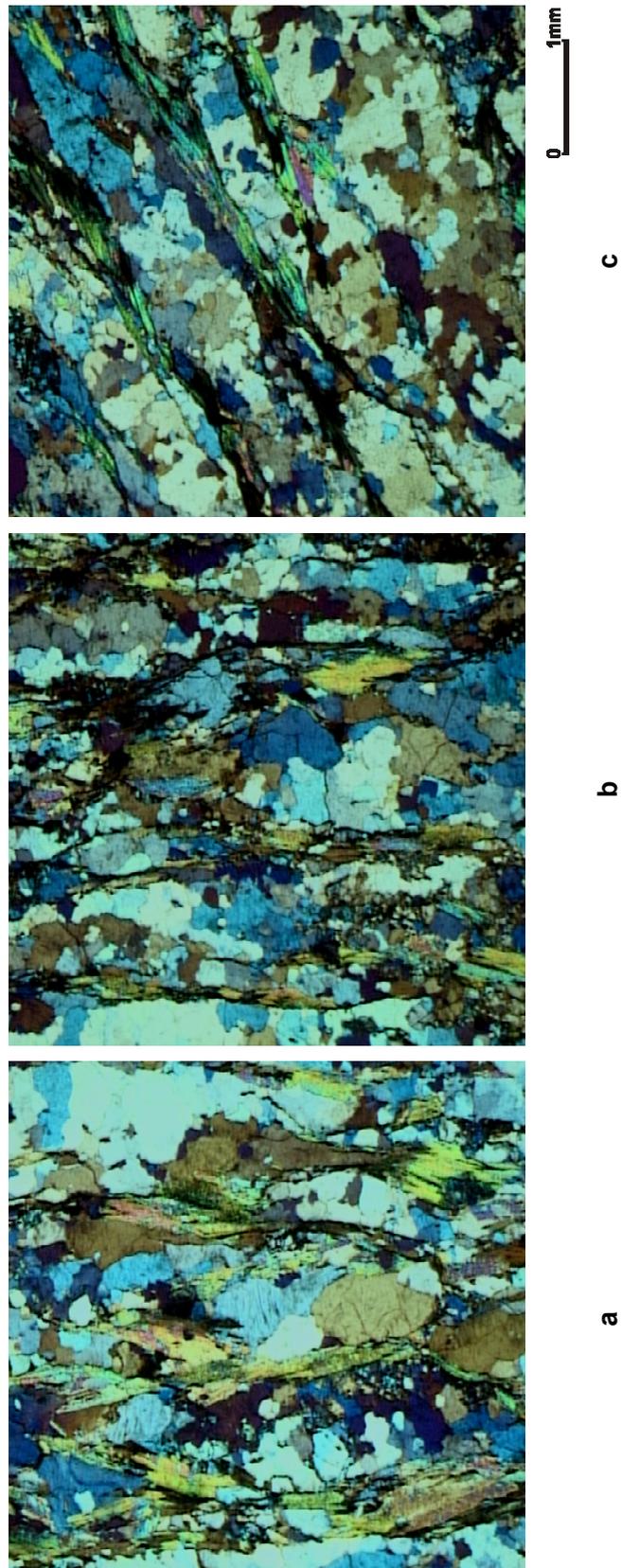
NDP* - nicht differenzierbare Phase

Gestein	Typ: Granit 2		Land: Sachsen		Phasenbezogene Merkmale							Gesteinsmerkmale
	Lagerstätte: Meißen	Phasen	Art	Einheit	Quarz	Feldsp.	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper		
Modus	Phasenanteil	Volumenanteil	ϵ_V	%	34	63	3	0	0	100		
	Korngröße	Medianwert	$d_{50,3}$	mm	4,137	1,484	0,788	-	-	2,362		
		Streuungsparameter	σ	-	0,726	0,302	0,322	-	-	0,446		
Struktur	Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S_V	mm^2/mm^3	2,614	3,157	9,214	-	-	3,149		
	Kornform	Elongation	E	-	1,179	1,068	1,317	-	-	1,113		
		Flachheit	F	-	1,045	1,051	1,236	-	-	1,055		
Gefüge	Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K_R	%	10	3	34	-	-	6		
		Linearer Orientierungsgrad	K_{lin}	%	12	5	18	-	-	9		
Textur	Richtung	Flächiger Orientierungsgrad	K_{fl}	%	2	3	11	-	-	0		
		Isotroper Orientierungsgrad	K_{is}	%	86	92	71	-	-	91		
	Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	40	71	1	-	-	60		
	Raumerfüllung	Raumerfüllungsgrad	ϵ_{VF}	%	-	-	-	-	-	100		

NDP* - nicht differenzierbare Phase

Gestein	Typ: Granit 3			Phasenbezogene Merkmale										Gesteinsmerkmale
	Lagerstätte: Meißen	Land: Sachsen		Quarz	Feldsp.	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper					
Modus	Phasen		Art	Einheit	Quarz	Feldsp.	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper				
	Gefüge	Phasenanteil	Volumenanteil	ε _V	%	25	73	2	0	0	100			
Korngröße		Medianwert	d _{50,3}	mm	6,628	1,578	1,598	-	-	2,837				
Struktur	Kornoberfläche	Streuungsparameter	σ	-	0,852	0,282	0,658	-	-	0,433				
		Spezifische Oberfläche	S _V	mm ² /mm ³	2,843	2,628	8,777	-	-	2,820				
Gefüge	Kornform	Elongation	E	-	1,148	1,103	1,195	-	-	1,117				
		Flachheit	F	-	1,086	1,094	1,243	-	-	1,095				
Textur	Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K _R	%	10	0	28	-	-	1				
		Linearer Orientierungsgrad	K _{lin}	%	10	7	12	-	-	4				
Textur	Richtung	Flächiger Orientierungsgrad	K _{fl}	%	4	5	11	-	-	4				
		Isotroper Orientierungsgrad	K _{is}	%	86	88	77	-	-	92				
Textur	Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	17	66	0	-	-	52				
		Raumerfüllungsgrad	ε _{VF}	%	-	-	-	-	-	100				

NDP* - nicht differenzierbare Phase



Gneis aus Oberschöna. Dünnschliffe Nr.: 37,38,39. Vergrößerung 16fach.

Anlage 29: Ausschnitte aus den digitalisierten Bildern der Gneisprobe aus Oberschöna

Gestein	Typ: Gneis 1			Phasenbezogene Merkmale										Gesteinsmerkmale
	Lagerstätte: Oberschöna		Land: Sachsen	Phasen	Art	Einheit	Quarz	Feldsp.	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper		
	Phasenanteil	Volumenanteil	ε _v											
Modus	Korngröße	Medianwert	d _{50,3}	mm	0,442	0,535	0,754	-	-	-	0,552			
		Streuungsparameter	σ	-	0,430	0,328	0,578	-	-	-	0,423			
		Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S _v	mm ² /mm ³	13,462	11,703	13,169	-	-	-	12,679		
Gefüge	Struktur	Elongation	E	-	1,406	2,465	2,744	-	-	-	2,145			
		Kornform	Flachheit	F	-	1,024	10,960	1,125	-	-	-	1,076		
	Rauigkeit	Rauhigkeitsgrad	K _R	%	3	13	41	-	-	-	-	16		
		Richtung	Linearer Orientierungsgrad	K _{lin}	%	22	50	52	-	-	-	41		
			Flächiger Orientierungsgrad	K _{fl}	%	10	7	10	-	-	-	6		
Textur	Isotroper Orientierungsgrad	K _{is}	%	68	43	38	-	-	-	-	53			
	Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	44	35	0	-	-	-	30			
	Raumfüllung	Raumfüllungsgrad	ε _{vF}	%	-	-	-	-	-	-	100			

NDP* - nicht differenzierbare Phase

Gestein	Typ: Gneis 2		Land: Sachsen		Phasenbezogene Merkmale						Gesteinsmerkmale
	Lagerstätte: Oberschöna		Phasen		Quarz	Feldsp.	Glimmer	Gas	NDP*		
	Phasenanteil	Volumenanteil	Art	Einheit							
Modus	Phasenanteil	Volumenanteil	ε_V	%	37	28	35	0	0	100	
	Korngröße	Medianwert	$d_{50,3}$	mm	0,479	0,493	0,679	-	-	0,550	
		Streuungsparameter	σ	-	-	0,456	0,318	0,446	-	-	0,412
Struktur	Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S_V	mm^2/mm^3	14,728	10,094	9,628	-	-	11,576	
	Kornform	Elongation	E	-	1,042	1,364	1,466	-	-	1,273	
		Flachheit	F	-	-	1,283	1,398	1,919	-	-	1,530
Gefüge	Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K_R	%	15	6	24	-	-	24	
	Richtung	Linearer Orientierungsgrad	K_{lin}	%	3	18	18	-	-	9	
		Flächiger Orientierungsgrad	K_{fl}	%	12	17	33	-	-	22	
Textur	Verteilung	Isotroper Orientierungsgrad	K_{is}	%	85	65	49	-	-	69	
		Clusterbildungsgrad	C	%	46	19	4	-	-	23	
	Raumfüllung	Raumfüllungsgrad	ε_{VF}	%	-	-	-	-	-	100	

NDP* - nicht differenzierbare Phase

Anlage 31: Gesteinsparameter der Gneisprobe 2 aus Oberschöna

Gestein	Typ: Gneis 3			Phasenbezogene Merkmale										Gesteinsmerkmale
	Lagerstätte: Oberschöna		Land: Sachsen	Phasen	Art	Einheit	Quarz	Feldsp.	Glimmer	Gas	NDP*	Σ Mikrokörper		
	Phasenanteil	Volumenanteil	ε _v											
Modus	Korngröße	Medianwert	d _{50,3}	mm	0,416	0,508	0,543	-	-	-	0,483			
		Streuungsparameter	σ	-	0,428	0,292	0,344	-	-	-	0,353			
Gefüge	Struktur	Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S _v	mm ² /mm ³	15,537	10,678	10,427	-	-	-	12,248		
		Kornform	Elongation	E	-	1,058	1,946	1,692	-	-	-	1,552		
			Flachheit	F	-	1,256	1,063	1,545	-	-	-	1,262		
		Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K _R	%	13	7	28	-	-	-	15		
		Textur	Richtung	Linearer Orientierungsgrad	K _{lin}	%	4	41	27	-	-	-	19	
Flächiger Orientierungsgrad	K _{fl}			%	11	3	23	-	-	-	10			
Isotroper Orientierungsgrad	K _{is}			%	85	56	50	-	-	-	71			
Verteilung	Raumerfüllung	Clusterbildungsgrad	C	%	56	29	0	-	-	-	30			
		Raumerfüllungsgrad	ε _{vF}	%	-	-	-	-	-	-	100			

NDP* - nicht differenzierbare Phase

Anlage 32: Gesteinsparameter der Gneisprobe 3 aus Oberschöna

Anhang B. Programmbeschreibung

B.1 Programmstruktur

Das Programm dient zur Bestimmung von geometrischen Parametern des räumlichen Gefüges auf der Grundlage von stereologischen Methoden (Abbildung B. 1). Die Messungen werden in ebenen Messfeldern, auf Messlinien oder in Punktrastern durchgeführt. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem flächenhaften, linienhaften oder punktförmigen Messfeld. Der Dimension des Messfeldes entsprechend gliedern sich die stereologischen Methoden in Flächenanalyse, Linienanalyse und Punktanalyse.

Das Hauptprogramm ist als Excel Arbeitsmappe mit dem Namen „3D_AN.XLS“ aufgebaut und beinhaltet eine Reihe von Arbeitsblättern, auf denen die Eingangsdaten, Berechnungen, Zwischenergebnisse und Resultate der räumlichen Gefügeanalyse in Form von Tabellen und Grafiken dargestellt sind.

Alle Arbeitsblätter der Arbeitsmappe sind so miteinander verknüpft, dass bei einer Änderung der Eingangsdaten alle Berechnungen automatisch neu ausgeführt und entsprechende Ergebniswerte und Grafiken erneuert werden.

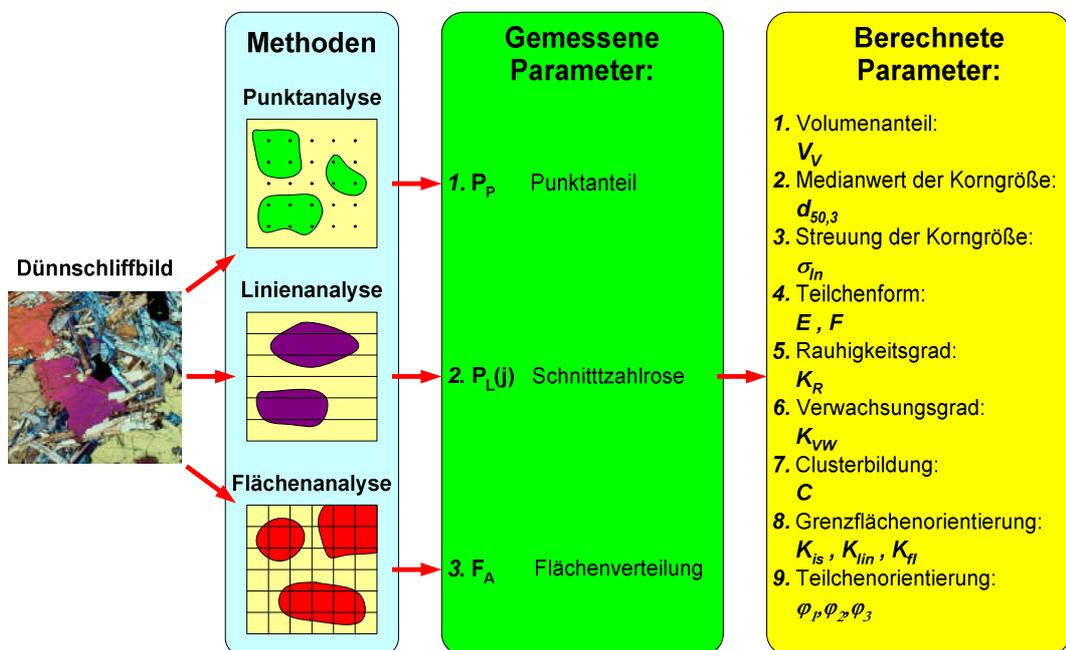


Abbildung B. 1: Dünnschliffauswertungsmethoden

Der Arbeitsablauf des Programms „3D_AN.XLS“ spiegelt den Verfahrensablauf zur Ermittlung der Gesteinsparameter (Abbildung B. 2) wider.

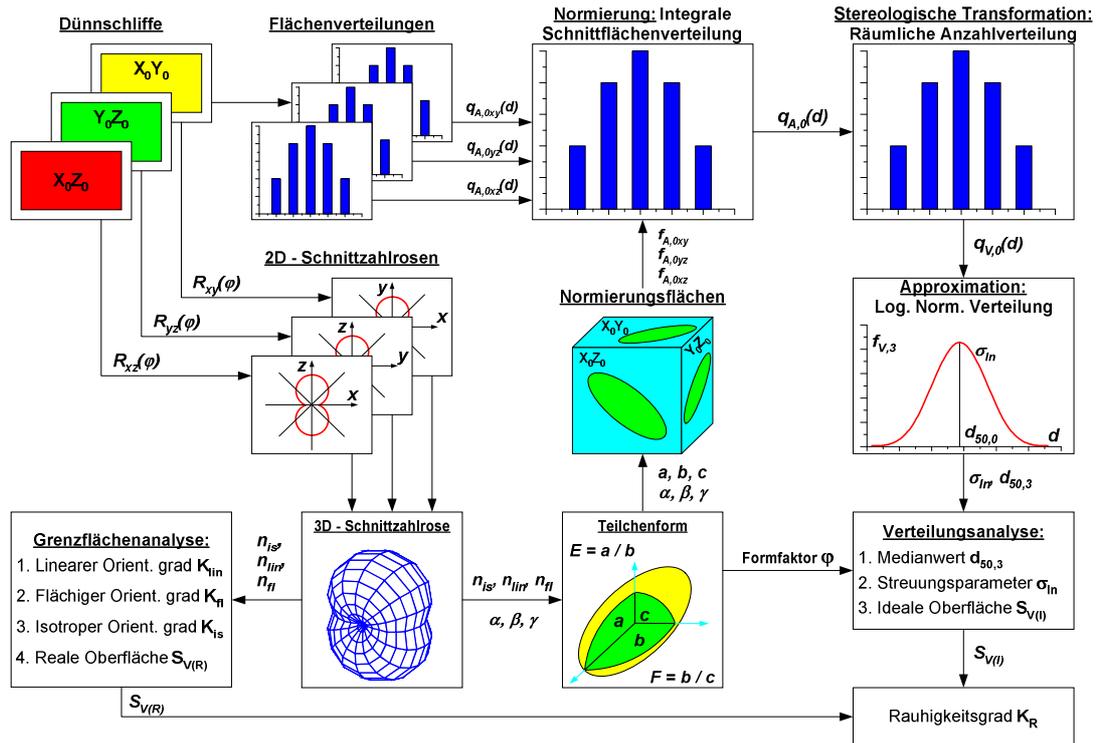


Abbildung B. 2: Vereinfachter Berechnungsablauf zur Ermittlung der Gesteinsparameter [148]

Die Eingangsdaten zum Hauptprogramm sind mit Hilfe des „Softwarepaketes zur Dünnschliffauswertung“ zu ermitteln (Abbildung B. 3). Die Programme dieses Softwarepaketes sind auch als Excel Arbeitsmappen mit den Namen „Zähler.XLS“, „DS_DB.XLS“ und „DSANK.XLS“ aufgebaut.

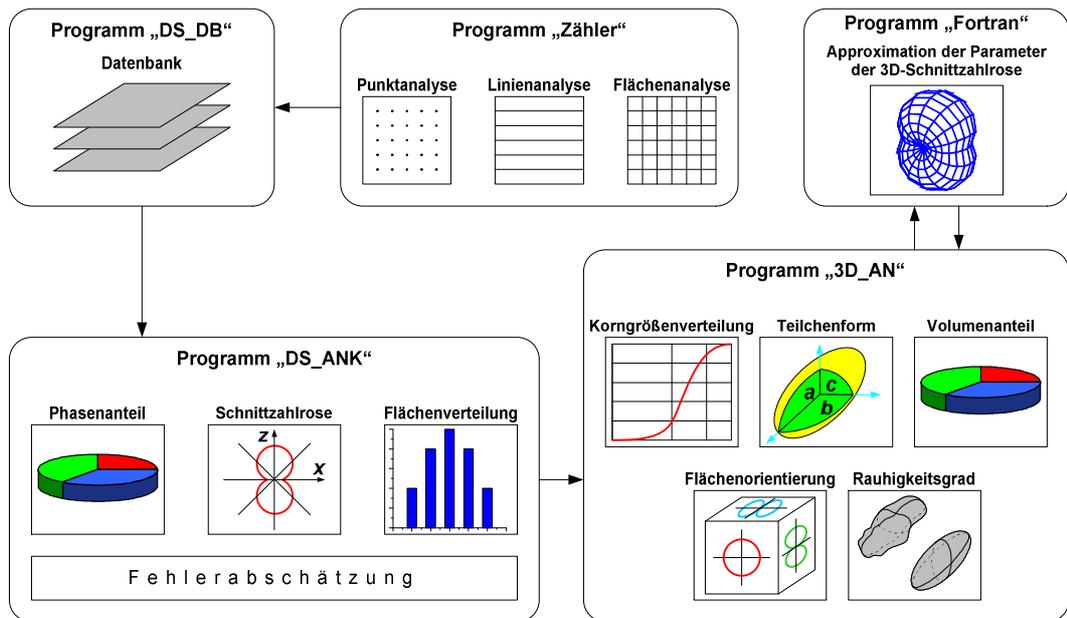


Abbildung B. 3: Softwarepaket zur Dünnschliffauswertung

Das Programm „Zähler.XLS“ ist zur Erleichterung der Zählvorgänge auf den Messfeldern entwickelt worden und erlaubt eine direkte Übertragung der gemessenen, mineral-spezifischen Daten (Punktanteil, Schnitzzahlrose und Schnittflächenhistogramm) in das Arbeitsblatt „Daten-Matrix“. Die Arbeitsblätter „Daten-Matrix“ für jeden Dünnschliff werden in einer mineralspezifischen Datenbank (Datei „DS_DB.XLS“) als eine Arbeitsmappe gespeichert.

Je nach Mineral werden Daten aus der Datenbank im Programm „DSANK.XLS“ zu einer „Ausgangsmatrix“ verarbeitet und gleichzeitig wird eine Fehlerabschätzung durchgeführt. Die „live“-laufende Fehlerabschätzung erlaubt dem Mineralogen eine Entscheidung über die ausreichende Zahl der ausgewerteten Ansichtsbilder. Die Arbeitsblätter „Ausgangsmatrix“ werden als Eingangsdaten für das Programm „3D_AN.XLS“ übergeben (siehe Abbildung B. 3).

B.2 Programm „Zähler“

Das Hilfsprogramm „Zähler.xls“ beinhaltet eine Eingabemaske mit folgenden Feldern (Abbildung B. 4):

Objektiv Nr. Breit: 2,1 DS-Nr. Bild Nr.

BST Punktanteil %

Gränzlinienübergänge

	horizontal	vertikal	horiz.45°	vertik.45°
$m_{\alpha\alpha}$	<input type="text" value="12"/>	<input type="text" value="9"/>	<input type="text" value="13"/>	<input type="text" value="12"/>
$m_{\alpha\beta}$	<input type="text" value="26"/>	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="28"/>	<input type="text" value="23"/>

Steuerung

Zähldaten in Buffer kopieren !!!!

Bestandteil 1 Kopiert

Bestandteil 2 Kopiert

Bestandteil 3 Kopiert

Bestandteil 4 Kopiert

Bestandteil 5 Kopiert

Zähler reinigen !!!! Steuerung rein. !!!!

Flächenverteilung

Flächenverteilung von Teilchen

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
von	0	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16	32	64
bis	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16	32	64	128
	<input type="text"/>											
	0	0	0	12	12	24	20	8	0	0	0	0

37,5
62,5

Abbildung B. 4: Arbeitsblatt „Zähler“

- Listenfeld „Objektiv Nr.“ – hier wird die Vergrößerung vom Objektiv ausgewählt, mit dem die aktuellen Messungen durchgeführt werden müssen. Als Faustregel zur Wahl der passenden Vergrößerung gilt, dass die durchschnittliche

Anzahl der im Gesichtsfeld gleichzeitig zu sehenden Körner im Bereich von 10 bis 20 liegt und das größte Korn im Schliff nicht größer als das Gesichtsfeld sein darf. Falls aber die Korngrößen von mindestens einer Phase wesentlich größer bzw. kleiner als die anderen im Schliff sind, wird eine getrennte Analyse mit zwei unterschiedlichen Vergrößerungen durchgeführt.

- „DS-Nr.“ – hier wird die Dünnschliffnummer angegeben.
- „Bild Nr.“ – hier wird die Nummer des Gesichtsfeldes angegeben. Die Nummerierung der Koordinaten der Gesichtsfelder ist im Dünnschliffplan zu vermerken. Je nach Anzahl der Gesichtsfelder, sind diese gleichmäßig am Dünnschliff zu verteilen (siehe Abbildung B. 5).

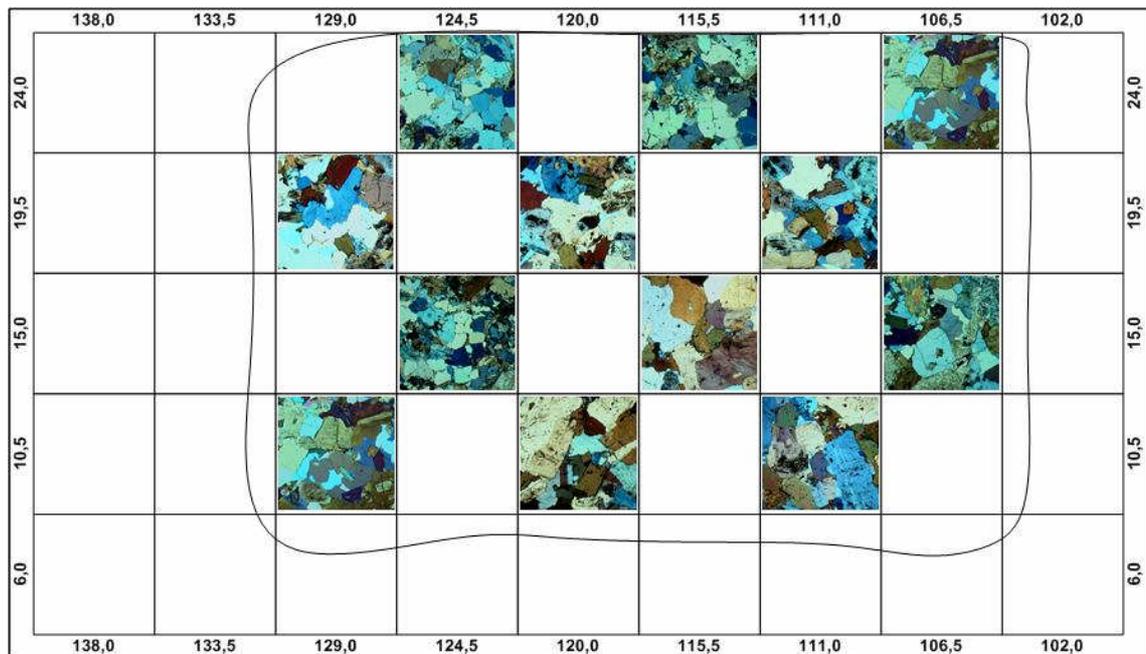


Abbildung B. 5: Dünnschliffplan

- Listenfeld „BST“ – hier wird der auszuwertende Bestandteil ausgewählt. Die Liste der Bestandteile ist auf dem Arbeitsblatt „Mineralienliste“ angegeben und kann korrigiert bzw. vervollständigt werden.
- „Punktanteil“ – hier ist die Anzahl der Punkte des Punktrasters (100 Punkte) anzugeben, die auf den Körnern des zu analysierenden Bestandteils im Gesichtsfeld liegen. Zur Erleichterung der Zählvorgänge sind neben dem Feld Hilfsknöpfe mit Pfeilen, sowie das Bedienfeld „Rest“ platziert. Durch Betätigung des Be-

dienfeldes „Rest“ wird die restliche Anzahl der Punkte ermittelt, die nicht auf den schon analysierten Bestandteilen dieses Gesichtsfeldes liegen.

- Feldbereich „Grenzlinienübergänge“ – hier wird die Anzahl der Überquerungen des Linienrasters (10 Messlinien in jede der 4 Richtungen) mit „inneren“ Korngrenzen $m_{\alpha\alpha}$ zwischen den Körnern der zu analysierenden Bestandteile und „äußeren“ Korngrenzen $m_{\alpha\beta}$ dieser Phase mit anderen angegeben. Die Anzahl der Überquerungen im Gesichtsfeld wird getrennt für die horizontalen und vertikalen Messlinien angegeben sowie auch nach der Drehung des Gesichtsfeldes um 45° (im Uhrzeigersinn). Die Hilfsknöpfe mit den Pfeilen dienen zur Erleichterung der „live“-Zählung.
- Feldbereich „Flächenverteilung“ – hier wird die Anzahl der Körner der zu analysierenden Bestandteile je nach Flächengröße angegeben. Zur genaueren Größenabschätzung der Teilchen (je nach Größengruppe 1 bis 12) wird ein Flächenraster mit 100 gleichen Messquadraten (10×10) mit dem Gesichtsfeld überlagert. In den Zellen „von“ und „bis“ sind die jeweiligen unteren und oberen Grenzen für jede Größengruppe angegeben. Zur Vereinfachung der Zählung von randgeschnittenen Teilchen ist die angegebene Anzahl in „Viertelteilchen“ zu messen. D. h. ein ganzes Teilchen wird mit 4, ein mit Rand geschnittenes Teilchen mit 2 und ein mit der Ecke geschnittenes Teilchen mit 1 bewertet [117, S. 258f.]. Die Fläche der mit dem Rand geschnittenen Teilchen wird dabei verdoppelt und mit der Ecke geschnittene Teilchen vervierfacht (siehe Anhang A, Anlage 8). Die Hilfsknöpfe mit den Pfeilen sind zur Erleichterung der „live“-Zählung neben jedem Feld angebracht.
- Feldbereich „Steuerung“ – Knöpfe dieses Bereiches sind nur nach der Vollendung der Analyse von jeweiligen Bestandteilen bzw. Gesichtsfeldern zu betätigen. Die Bedienfelder „Bestandteil 1“, „Bestandteil 2“ usw. kopieren die gemessenen Daten für die entsprechenden Bestandteile im gelb hinterlegten Zwischenspeicherbereich (Abbildung B. 6) auf dem Arbeitsblatt „Bilddaten speichern“ und markieren gleichzeitig das nebenstehende Kontrollfeld zur Verhinderung der versehentlichen Überschreibung von Daten im Zwischenspeicherbereich mit Daten des nächsten Bestandteiles. Das Bedienfeld „Zähler reinigen !!!!“ löscht alle angegebenen Messwerte auf dem Arbeitsblatt „Zähler“ und ist nur nach dem

Tabelle B. 1: Daten-Matrix 2

DS Nr.: 37		Bild-Breite: 2,1 mm								Bildanzahl: 20,00											
Min.Nr.	%	$\alpha\alpha 0$	$\alpha\alpha 90$	$\alpha\alpha 45$	$\alpha\alpha 135$	$\alpha\beta 0$	$\alpha\beta 90$	$\alpha\beta 45$	$\alpha\beta 135$	f1	f2	f3	f4	f5	f6	f7	f8	f9	f10	f11	f12
1																					
2																					
3																					
4																					
5																					
6																					
7																					
8	35%	197	171	162	195	500	269	379	411				28	81	172	209	160	62	8		
9	25%					789	273	600	632				24	8	18	46	32	14	40	10	2
10																					
11																					
12																					
13																					
14																					
15																					
16																					
17																					
18	40%	309	305	252	268	671	302	542	579			100	178	243	376	398	154	14	4		

Das Arbeitsblatt „Daten-Matrix 2“ (Tabelle B. 1) stellt tabellarisch die auf dem Arbeitsblatt „Bilddaten speichern“ angegebenen Daten getrennt nach dem Mineraltyp dar. Für jedes Mineral sind die gemessenen Daten (Anteil, Größenverteilung und Schnitzzahlroten) in der Tabelle dargestellt. Für die weitere Verarbeitung sind die auf dem Arbeitsblatt „Daten-Matrix 2“ ermittelten Daten in das Arbeitsblatt „Daten-Matrix“ zu kopieren. So enthält das Arbeitsblatt „Daten-Matrix“ identische Informationen wie das Arbeitsblatt „Daten-Matrix 2“, jedoch ohne Formeln.

Das Arbeitsblatt „Gruppen-Matrix“ (Abbildung B. 7) stellt tabellarisch die auf dem Arbeitsblatt „Daten-Matrix“ angegebenen Daten getrennt nach der Mineralgruppe dar.

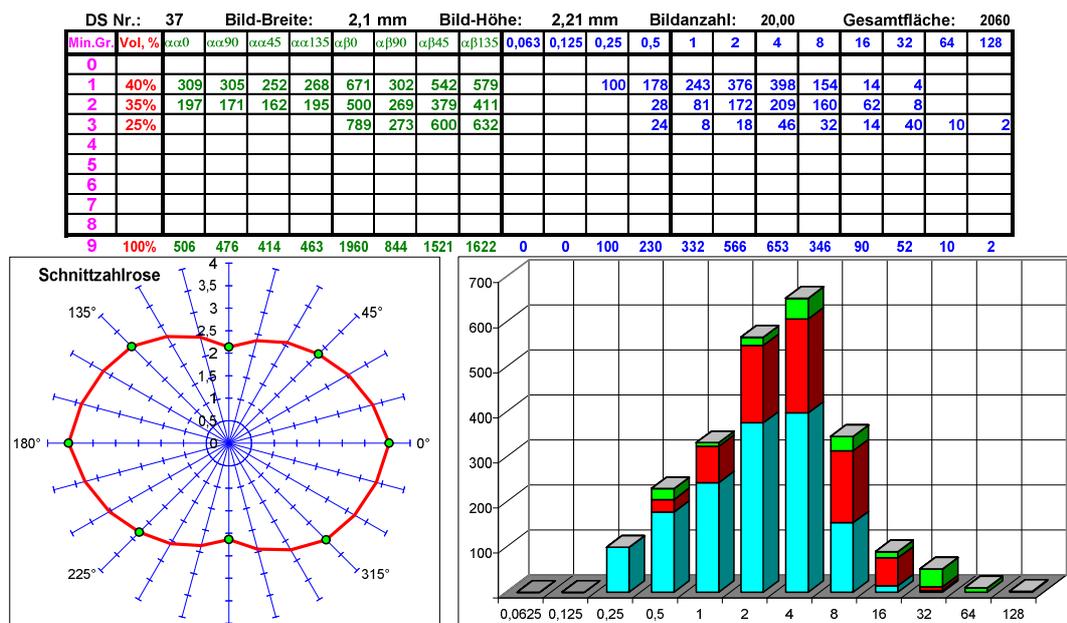


Abbildung B. 7: Gruppen-Matrix

Außer der Tabelle enthält das Arbeitsblatt „Gruppen-Matrix“ (Abbildung B. 7) eine in Polarkoordinaten dargestellte Schnitzzahlrose und ein Korngrößenverteilungshistogramm für jede Mineralgruppe.

Das Arbeitsblatt „Fehlerabschätzung“ (Abbildung B. 8) enthält eine Fehlerabschätzung der Volumenanteil- und Grenzflächenbestimmung für ausgewählte Mineralgruppen mit einer ausgewählten statistischen Sicherheit [132].

Die Gesamtzahl der gezählten Punkte der Volumenanteilermittlung bestimmt vorrangig die Genauigkeit des Ergebnisses. Ein Gestein kann als Menge von zufällig im Raum angeordneten Mineralkörnern verschiedener Arten angesehen werden. Die Zuverlässigkeit der Aussage über den Anteil einer dieser Mineralarten kann durch den absoluten Fehler charakterisiert werden. Nach Hunger [40, S. 61] und Saltykov [117, S. 124] wird der absolute Fehler ε mit der Gleichung (47) berechnet:

$$\varepsilon = t \cdot \sqrt{\frac{V_{\beta}(100 - V_{\beta})}{p}} \quad (47)$$

- ε absoluter Fehler der Volumenanteilermittlung
 t normierte Abweichung
 p Gesamtzahl der Rasterpunkte
 V_{β} Volumenanteil der untersuchten Phase

Fehlerabschätzung der Parametrbestimmung für DS: 37

Gruppe: Gr. 1 Statistische Sicherheit $p =$
Normierte Abweichung $t =$

Abschätzung der absoluter Fehler der Volumenanteilbestimmung

$$\varepsilon = t \sqrt{\frac{V_{\beta}(100 - V_{\beta})}{p}}$$

$V_{\beta} =$ **39,8% ± 2,1%**

Abschätzung der relativer Fehler der Gränzflächenbestimmung

$\varepsilon_{rel} = K t / \sqrt{z}$		ε_0	ε_{45}	ε_{90}	ε_{135}
$K=1$	$\alpha\beta$	7,6%	11,3%	8,4%	8,1%
	$\alpha\alpha$	11,2%	11,2%	12,3%	12,0%
	$\alpha\alpha+\alpha\beta$	9,3%	11,2%	10,3%	10,0%

Abbildung B. 8: Fehlerabschätzung

Wie bereits Saltykov [117] hervorgehoben hat, ist der Fehler bei der Bestimmung der spezifischen Grenzflächen gleich dem Fehler bei der Bestimmung der mittleren Schnitt-

punktzahl. Man findet den relativen Fehler dieser Größe nach folgender Gleichung [117]:

$$\varepsilon_{\text{rel}} = \frac{K \cdot t}{\sqrt{Z}} \cdot 100 \quad (48)$$

ε_{rel} relativer Fehler der Schnittpunktzahl
 Z Schnittpunktzahl, die bei der Analyse ermittelt wurde
 t normierte Abweichung
 K Koeffizient

Die Ergebnisse der Fehlerabschätzung von der Grenzflächenbestimmung sind in der Tabelle (siehe Abbildung B. 8) zusammengefasst. Dabei ist eine separate Bestimmung für die Grenzflächen zwischen Mikrokörper ein und derselben Phase ($\alpha\alpha$) sowie einzelnen Phasen ($\alpha\beta$) und der gesamten Grenzflächen ($\alpha\alpha+\alpha\beta$) möglich.

Tabelle B. 2: Ausgangsdaten

N.	37	Schnittzahlen [1/mm]				Größenverteilung der Teilchen in der Schliiffebene [1/mm ²]												
		0°	45°	90°	135°	0,054	0,076	0,108	0,152	0,215	0,304	0,43	0,609	0,861	1,217	1,721	2,435	
0																		
1	40%	3,86	3,13	2,60	3,18			0,27	0,48	0,66	1,02	1,07	0,42	0,04	0,01			
2	35%	3,04	2,39	1,98	2,59				0,08	0,22	0,46	0,56	0,43	0,17	0,02			
3	25%	3,73	2,83	1,23	2,84				0,06	0,02	0,05	0,12	0,09	0,04	0,11	0,03	0,01	
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9	100%	3,54	2,80	2,04	2,89	0,00	0,00	0,27	0,62	0,90	1,53	1,76	0,93	0,24	0,14	0,03	0,01	

Das Arbeitsblatt „Ausgangsdaten“ (Tabelle B. 2) enthält eine Tabelle mit den nach der Mineralgruppe getrennten Daten, die für die weitere Verarbeitung im Programm „3D_AN.XLS“ erforderlich sind.

B.4 Programm „3D_AN.XLS“

Das Hauptprogramm „3D_AN.XLS“ führt eine räumliche Gefügeanalyse durch und stellt das Ergebnis in Form von Tabellen und Grafiken dar. Das Programm beinhaltet folgende Arbeitsblätter: „A-B-C_DS“, „2D-Schnittzahlrose“, „3D-Schnittzahlrose“, „3D-Ellipsoid“, „SZR_Daten“, „Diagramme“, „Gesteinscharakteristika“, „DS-Orientierung“, „Exportdaten“, „Importdaten“, „Stereo-Tab“, „LNV-Approximation“, „Berechnungen“ und „Berechnungen 2“.

Das Arbeitsblatt: „A-B-C_DS“ (Tabelle B. 3) besteht aus drei untereinander stehenden, identisch aufgebauten Feldern, die die nach der Mineralgruppe geordneten Dünnschliffdaten aus den Arbeitsblättern „Ausgangsdaten“ enthaltenden Dateien „DSANK.XLS“ für drei orthogonal zueinander stehenden Dünnschliffe „A“, „B“ und „C“ beinhalten. Diese Datenbereiche sind von den entsprechenden Dateien „DS_ANK“ zu kopieren. Die Bezeichnungen der Dünnschliffe „A“, „B“ und „C“ sind durch deren Lage im Koordinatensystem des Gesteinsbrockens festgelegt und in den DS-Namen enthalten. Die Winkelorientierung jedes Dünnschliffes (um die Normale zu seiner Ebene) ist im Arbeitsblatt „DS-Orientierung“ anzugeben.

Tabelle B. 3: A-B-C Dünnschliffe

DS:"a"																	
KS_Winkel: 90°					KS_Drehung: 1												
N.	37	0°	45°	90°	135°	0,054	0,076	0,108	0,152	0,215	0,304	0,43	0,609	0,861	1,217	1,721	2,435
0																	
1	40%	3,86	3,13	2,60	3,18			0,27	0,48	0,66	1,02	1,07	0,42	0,04	0,01		
2	35%	3,04	2,39	1,98	2,59				0,08	0,22	0,46	0,56	0,43	0,17	0,02		
3	25%	3,73	2,83	1,23	2,84				0,06	0,02	0,05	0,12	0,09	0,04	0,11	0,03	0,01
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9	100%	3,54	2,80	2,04	2,89	0,00	0,00	0,27	0,62	0,90	1,53	1,76	0,93	0,24	0,14	0,03	0,01
90 135 0 45																	
DS:"b"																	
KS_Winkel: 90°					KS_Drehung: 1												
N.	38	0°	45°	90°	135°	0,054	0,076	0,108	0,152	0,215	0,304	0,43	0,609	0,861	1,217	1,721	2,435
0																	
1	35%	3,66	3,79	3,40	3,23			0,26	0,33	0,50	0,88	0,83	0,47	0,08	0,01		
2	43%	3,92	3,83	3,54	3,53				0,02	0,32	0,76	0,95	0,46	0,13			
3	21%	4,10	4,06	3,50	3,58			0,21	0,19	0,30	0,28	0,26	0,15	0,13	0,04	0,01	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9	100%	3,87	3,86	3,48	3,44	0,00	0,00	0,46	0,55	1,12	1,92	2,04	1,08	0,35	0,05	0,01	0,00
90 135 0 45																	
DS:"c"																	
KS_Winkel: 90°					KS_Drehung: 1												
N.	39	0°	45°	90°	135°	0,054	0,076	0,108	0,152	0,215	0,304	0,43	0,609	0,861	1,217	1,721	2,435
0																	
1	34%	4,07	3,58	2,65	3,14			0,19	0,50	0,69	1,09	0,95	0,28	0,02			
2	44%	3,05	2,45	1,85	2,38				0,02	0,07	0,27	0,61	0,51	0,24	0,04	0,01	
3	23%	4,21	3,51	1,66	3,24			0,08	0,11	0,10	0,24	0,26	0,13	0,10	0,03	0,03	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9	100%	3,65	3,07	2,07	2,83	0,00	0,00	0,27	0,63	0,86	1,60	1,82	0,92	0,36	0,06	0,04	0,00

Das Arbeitsblatt: „2D-Schnittzahlrosen“ (Abbildung B. 9) enthält eine tabellarische Auflistung der spezifischen Schnittzahlen aller Mineralgruppen für alle drei Dünnschliffe. Diese Schnittzahlen sind unter Berücksichtigung der wirklichen Dünnschlifforientierungen noch einmal korrigiert. Die zu analysierende Mineralgruppe wird dabei durch das Listenfeld bestimmt. Die korrigierten Schnittzahlen bilden die Grundlage zum Ableiten von Parametern einer dreidimensionalen Schnittzahlrose. Durch eine Betätigung des Bedienfeldes „3D-Approx.“ wird die Anpassung der Schnittzahlen durch einen 6-

parametrischen Approximierungsvorgang im Programm „3DSZROSE.EXE“ durchgeführt. Durch eine Betätigung des Bedienfeldes „Import“ werden die Ergebnisse der Anpassung an EXCEL zurückgegeben. Die Arbeitsblätter „Exportdaten“ und „Importdaten“ sowie die Programmmodule „exp“ und „imp“ enthalten notwendige Details der Übergabe von Daten bei der Approximation. Die Ergebnisse der Anpassung sind auf allen drei orthogonalen ebenen Schnitten der approximierten 3D-Schnittzahlrose zu sehen.

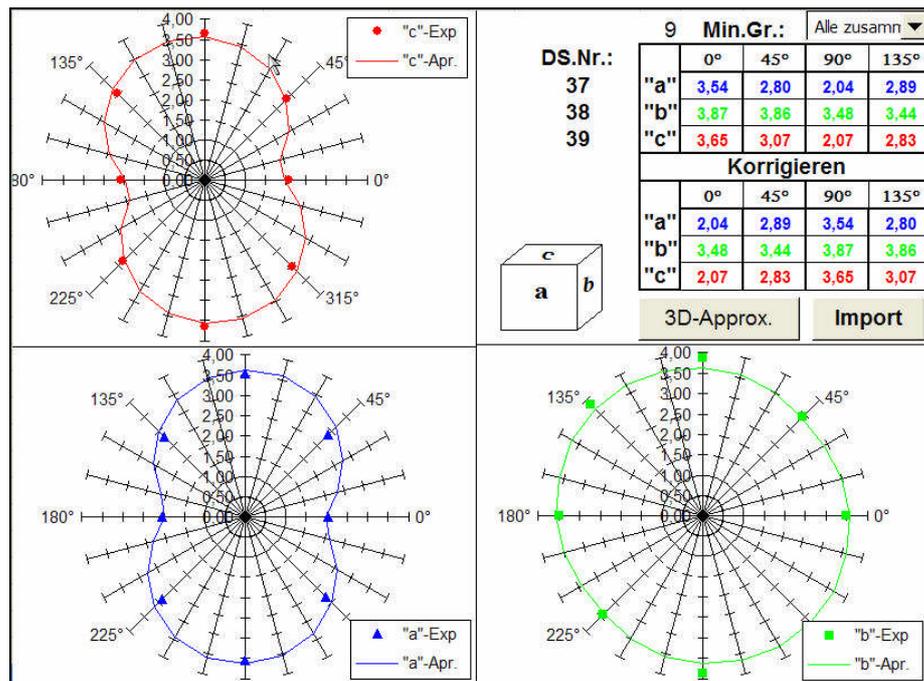


Abbildung B. 9: 2D-Schnittzahlrose

Auf dem Arbeitsblatt: „3D-Schnittzahlrose“ (Abbildung B. 10) sind die Parameter der approximierten 3D-Schnittzahlrose (n_{is} , n_{lin} , n_{fl}) mit deren Orientierungswinkeln (α , β , und γ) im Raum sowie eine kombinierte Darstellung der drei orthogonalen Schnittebenen der Schnittzahlrose dargestellt. Darüber hinaus sind auf dem Arbeitsblatt noch die Oberflächenorientierungskennzahlen (isotrop, nadelig und plattig) abgeleitet und die approximierten Kontrollschnittdaten mit den experimentellen Dünnschliffdaten für die Schnittzahlrose zusammengestellt.

Auf dem Arbeitsblatt: „3D-Ellipsoid“ (siehe Abbildung B. 11) sind die Hauptachsen (a, b, c) eines ellipsoidförmigen Teilchens mit dem Volumen einer Einheitskugel, die der approximierten 3D-Schnittzahlrose entsprechen sowie eine kombinierte Darstellung der drei orthogonalen Schnittflächen dieses Teilchens unter der Berücksichtigung der

Orientierungswinkel (α , β , und γ) dargestellt. Darüber hinaus sind auf dem Arbeitsblatt noch die Kornformkennzahlen (Elongation und Flachheit) abgeleitet und die approximierten Kontrollschnittdaten für das Teilchen zusammengestellt.

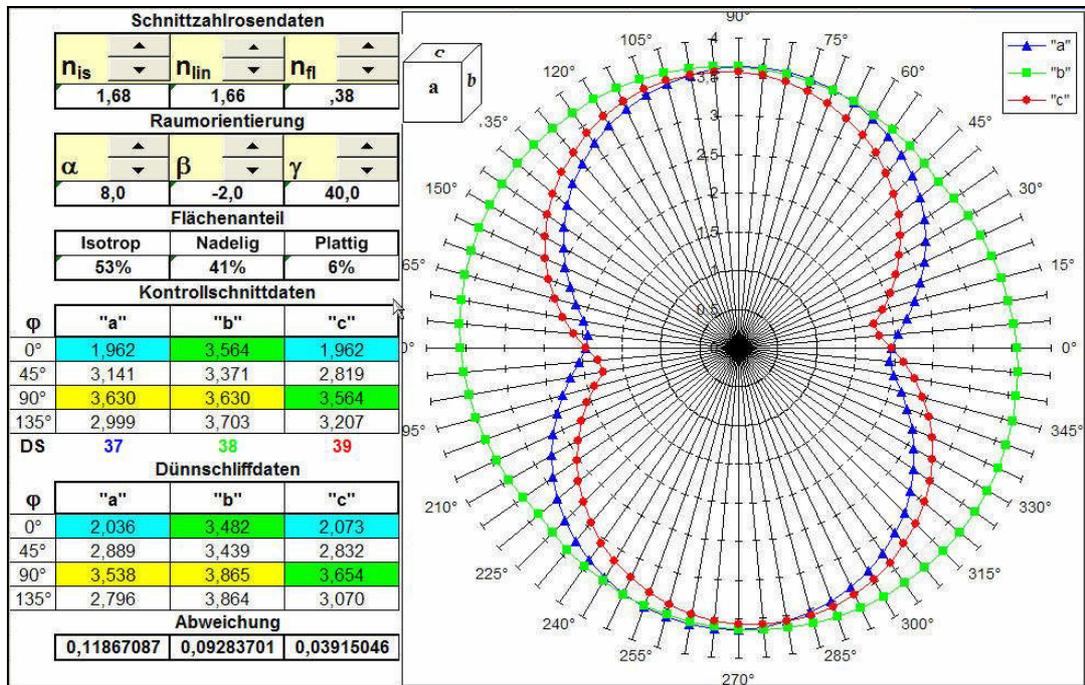


Abbildung B. 10: 3D - Schnitzzahlrose

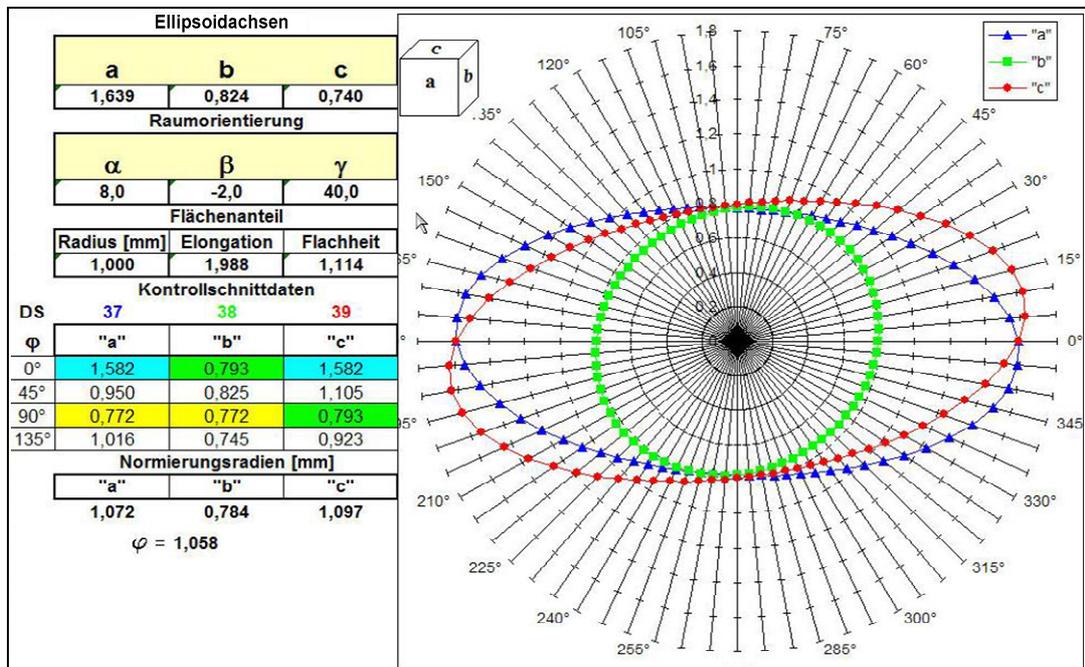


Abbildung B. 11: 3D - Ellipsoid

Auf dem Arbeitsblatt „Stereo-Tab“ (Tabelle B. 4) wird die stereologische Umrechnung der experimentell ermittelten Schnittflächenverteilung in die Anzahlverteilung der Teilchen [117], unter Berücksichtigung von deren Form und Orientierung, durchgeführt (Gleichung 49).

$$N_i = \frac{q^{i-1}}{D_1} \left[\frac{n_1}{\sqrt{1-1/q^2}} - \sum_{j=1}^{i-1} \left(n_j \frac{\sqrt{1-q^{2(j-i-1)}} - \sqrt{1-q^{2(j-i)}}}{\sqrt{1-1/q^2}} \right) \right] \quad (49)$$

Tabelle B. 4: Stereologische Umrechnung der Schnittflächenverteilung in die räumlichen Anzahlverteilung der Teilchen

q= 1,414			j	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Gr. 9	
Nr	i	von	D _i [mm]	0,054	0,076	0,108	0,152	0,215	0,304	0,430	0,609	0,861	1,217	1,721	2,435	N _i [mm ⁻³]	
1	12	0,038	0,054	1,414	-0,32	-0,14	-0,07	-0,03	-0,02	-0,01	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00		
2	11	0,054	0,076		1,414	-0,32	-0,14	-0,07	-0,03	-0,02	-0,01	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00		
3	10	0,076	0,108			1,414	-0,32	-0,14	-0,07	-0,03	-0,02	-0,01	-0,00	-0,00	-0,00		
4	9	0,108	0,152				1,414	-0,32	-0,14	-0,07	-0,03	-0,02	-0,01	-0,00	-0,00	1,530	
5	8	0,152	0,215					1,414	-0,32	-0,14	-0,07	-0,03	-0,02	-0,01	-0,00	2,486	
6	7	0,215	0,304						1,414	-0,32	-0,14	-0,07	-0,03	-0,02	-0,01	4,860	
7	6	0,304	0,430							1,414	-0,32	-0,14	-0,07	-0,03	-0,02	4,618	
8	5	0,430	0,609								1,414	-0,32	-0,14	-0,07	-0,03	2,003	
9	4	0,609	0,861									1,414	-0,32	-0,14	-0,07	0,579	
10	3	0,861	1,217										1,414	-0,32	-0,14	0,138	
11	2	1,217	1,721											1,414	-0,32	0,023	
12	1	1,721	2,435												1,414	0,001	
				n _i [mm ⁻²]		0,043	0,294	0,631	0,942	1,536	1,666	0,962	0,384	0,126	0,029	0,003	16,239
				N _i [mm ⁻³]				1,530	2,486	4,860	4,618	2,003	0,579	0,138	0,023	0,001	0,664
				D _m [mm]	0,046	0,065	0,092	0,130	0,184	0,260	0,367	0,520	0,735	1,039	1,469	2,078	1,086
				V _i [mm ³]	0,000	0,000	0,000	0,003	0,013	0,072	0,193	0,236	0,193	0,130	0,062	0,011	0,914
				S _i [mm ²]	0,000	0,000	0,000	0,111	0,362	1,414	2,687	2,331	1,349	0,643	0,217	0,027	9,141

Die Ergebnisse der stereologischen Umwandlung werden auf dem Arbeitsblatt „LNV-Approximation“ durch eine logarithmische Normalverteilung approximiert. Die Volumenverteilungssumme wird aus der Anzahlverteilungssumme durch Parallelverschiebung gewonnen. Nach Gleichung 50 gilt hierfür [84].

$$d_{50,3} = d_{50,0} \cdot \exp(3\sigma_{\ln}^2) \quad (50)$$

Das Ergebnis der Mineralgruppenauswertung wird auf dem Arbeitsblatt „Diagramm“ (Abbildung B. 12) zusammengestellt. Dabei sind die experimentellen sowie approximierten Anzahl- und Volumenverteilungen von Teilchen in einem Diagramm dargestellt. Nachdem das Bedienfeld „Import“ des Arbeitsblattes „2D-Schnittzahlrose“ betätigt wird, werden die Auswertedaten für die jeweilige Mineralgruppe in die entsprechende Spalte des Arbeitsblattes „Gesteinscharakteristika“ (Tabelle B. 6) übertragen. Vor Beginn der Auswertung der ersten Mineralgruppe muss der Knopf „Tabelle reinigen“ betätigt werden. Nachdem alle der in dem Gestein vorhandenen Mineralgruppen

ausgewertet sind, ist das Ergebniss der Auswertung zusammenfassend im Arbeitsblatt „Gesteinscharakteristika“ zu finden.

Tabelle B. 5: LNV-Approximation

0,054	0,076	0,108	0,152	0,215	0,304	0,430	0,609	0,861	1,217	1,721	2,435	Gr. 9	
0,000	0,000	0,000	1,530	2,486	4,860	4,618	2,003	0,579	0,138	0,023	0,001	16,239	
0,00%	0,00%	0,00%	9,42%	15,31%	29,93%	28,44%	12,34%	3,57%	0,85%	0,14%	0,01%		
0,00%	0,00%	0,00%	9,42%	24,73%	54,66%	83,09%	95,43%	99,00%	99,85%	99,99%	100,00%		
												σ_{in}	$X_{50,0}$
0,054	0,076	0,108	0,152	0,215	0,304	0,430	0,609	0,861	1,217	1,721	2,435	0,00976	
3,70906	2,71645	1,73292	0,85415	0,23119	0,04695	0,39465	1,13706	2,06071	3,04279	4,03957	0,25	0	
3,24791	2,33067	1,42178	0,65203	0,14559	0,00976	0,2787	0,88812	1,71729	2,65581	3,63093	0,5	0,304319	
2,80823	1,99674	1,21409	0,57596	0,17455	0,0699	0,27828	0,7687	1,476	2,32158	3,22429	0,75	0	
2,44016	1,74311	1,09427	0,57706	0,2572	0,17483	0,34144	0,74091	1,33398	2,0643	2,86355	1	0	
2,15563	1,5661	1,03403	0,61742	0,36272	0,29923	0,43687	0,76646	1,2615	1,88093	2,5729	1,25	0	
1,94483	1,44888	1,01271	0,67708	0,4751	0,42841	0,54522	0,81987	1,23369	1,75676	2,35088	1,5	0	
1,79258	1,37548	1,0168	0,74572	0,58605	0,55366	0,65491	0,8861	1,23391	1,6766	2,18617	1,75	0	
1,685	1,33353	1,03726	0,81746	0,69137	0,67058	0,75982	0,95658	1,25124	1,62801	2,06629	2	0	
1,61096	1,31384	1,06789	0,88879	0,78918	0,77749	0,85723	1,02658	1,27856	1,60157	1,98039	2,25	0	
0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0,50	0,304
												σ_{in}	$X_{50,0}$
0,228	0,242	0,256	0,271	0,287	0,304	0,322	0,342	0,362	0,383	0,406	0,00089		
0,13797	0,0881	0,05171	0,0293	0,02124	0,02776	0,04887	0,08434	0,13374	0,19649	0,27189	0,3	0	
0,11809	0,07102	0,03685	0,01599	0,00872	0,01518	0,03533	0,06901	0,11586	0,17543	0,2471	0,35	0	
0,1049	0,06047	0,02836	0,00887	0,00223	0,00852	0,02772	0,05966	0,10406	0,16052	0,22854	0,4	0	
0,09751	0,05555	0,0253	0,00703	0,00089	0,00696	0,02519	0,05546	0,09751	0,15101	0,21553	0,45	0,287239	
0,09509	0,05542	0,02688	0,00968	0,00395	0,00976	0,02705	0,05571	0,09553	0,14623	0,20743	0,5	0	
0,09691	0,05936	0,03237	0,01614	0,01076	0,01628	0,03267	0,05981	0,09753	0,14559	0,20367	0,55	0	
0,10235	0,06675	0,04119	0,02583	0,02075	0,02599	0,04152	0,06723	0,10299	0,14858	0,20374	0,6	0	
0,11087	0,07708	0,05283	0,03826	0,03345	0,03841	0,05313	0,07752	0,11146	0,15475	0,20718	0,65	0	
0,12203	0,08991	0,06688	0,05303	0,04846	0,05316	0,06713	0,09029	0,12253	0,16369	0,21358	0,7	0	
0	0	0	0	0,45	0	0	0	0	0	0	0	0,45	0,287
												σ_{in}	$X_{50,0}$
0,274	0,276	0,279	0,282	0,284	0,287	0,290	0,293	0,296	0,299	0,301	0,00078		
0,00613	0,00451	0,00324	0,00233	0,00177	0,00157	0,00173	0,00223	0,0031	0,00432	0,00589	0,41	0	
0,0056	0,004	0,00275	0,00186	0,00131	0,00112	0,00127	0,00178	0,00264	0,00385	0,00541	0,42	0	
0,00526	0,00369	0,00246	0,00158	0,00104	0,00086	0,00101	0,00152	0,00238	0,00358	0,00512	0,43	0	
0,00512	0,00357	0,00236	0,00149	0,00096	0,00078	0,00094	0,00145	0,0023	0,00349	0,00502	0,44	0,287239	
0,00516	0,00363	0,00243	0,00158	0,00106	0,00089	0,00105	0,00155	0,0024	0,00358	0,0051	0,45	0	
0,00538	0,00387	0,00269	0,00185	0,00134	0,00117	0,00134	0,00184	0,00267	0,00384	0,00535	0,46	0	
0,00577	0,00428	0,00312	0,00229	0,00179	0,00162	0,00179	0,00229	0,00312	0,00428	0,00577	0,47	0	
0,00633	0,00485	0,00371	0,00289	0,0024	0,00224	0,00241	0,0029	0,00372	0,00487	0,00635	0,48	0	
0,00705	0,00559	0,00446	0,00366	0,00318	0,00302	0,00319	0,00368	0,00449	0,00563	0,00709	0,49	0	
0	0	0	0	0	0,44	0	0	0	0	0	0	0,44	0,287
												σ_{in}	$X_{50,0}$
0,2849	0,2854	0,2859	0,2863	0,2868	0,2872	0,2877	0,2882	0,2886	0,2891	0,2896	0,00078		
0,00096	0,00091	0,00088	0,00085	0,00083	0,00083	0,00083	0,00084	0,00086	0,00089	0,00093	0,432	0	
0,00093	0,00089	0,00085	0,00083	0,00081	0,0008	0,00081	0,00082	0,00084	0,00087	0,00091	0,434	0	
0,00092	0,00087	0,00084	0,00081	0,0008	0,00079	0,00079	0,0008	0,00083	0,00086	0,0009	0,436	0	
0,00091	0,00086	0,00083	0,0008	0,00079	0,00078	0,00078	0,0008	0,00082	0,00085	0,00089	0,438	0	
0,00091	0,00086	0,00083	0,0008	0,00079	0,00078	0,00078	0,0008	0,00082	0,00085	0,00089	0,44	0,287239	
0,00091	0,00087	0,00084	0,00081	0,00079	0,00079	0,00079	0,0008	0,00083	0,00086	0,0009	0,442	0	
0,00093	0,00088	0,00085	0,00082	0,00081	0,0008	0,00081	0,00082	0,00084	0,00087	0,00091	0,444	0	
0,00095	0,0009	0,00087	0,00085	0,00083	0,00082	0,00083	0,00084	0,00086	0,00089	0,00094	0,446	0	
0,00098	0,00093	0,0009	0,00087	0,00086	0,00085	0,00086	0,00087	0,00089	0,00092	0,00096	0,448	0	
0	0	0	0	0	0,44	0	0	0	0	0	0	0,440	0,287
												σ_{in}	$X_{50,0}$
												$X_{50,3}$	0,513
KG	0,054	0,076	0,108	0,152	0,215	0,304	0,430	0,609	0,861	1,217	1,721	2,435	
SD	0,00%	0,00%	0,00%	9,42%	15,31%	29,93%	28,44%	12,34%	3,57%	0,85%	0,14%	0,01%	
	0,01%	0,13%	1,28%	7,44%	25,58%	55,22%	82,09%	95,61%	99,37%	99,95%	100,00%	100,00%	
AV	0,01%	0,12%	1,16%	6,15%	18,14%	29,64%	26,87%	13,51%	3,76%	0,58%	0,05%	0,00%	
	0,00%	0,00%	0,02%	0,29%	2,41%	11,73%	34,42%	65,05%	87,99%	97,51%	99,70%	99,98%	
VV	0,00%	0,00%	0,02%	0,27%	2,12%	9,32%	22,69%	30,63%	22,94%	9,53%	2,19%	0,28%	
	0,00%	0,00%	0,09%	1,01%	6,22%	22,70%	51,55%	79,58%	94,68%	99,18%	99,93%	100,00%	
FV	0,00%	0,00%	0,09%	0,91%	5,22%	16,48%	28,85%	28,02%	15,10%	4,51%	0,74%	0,07%	

KG - Korngröße; SD - Stereo-Daten; AV - Anzahlverteilung; VV - Volumverteilung; FV - Flächenverteilung

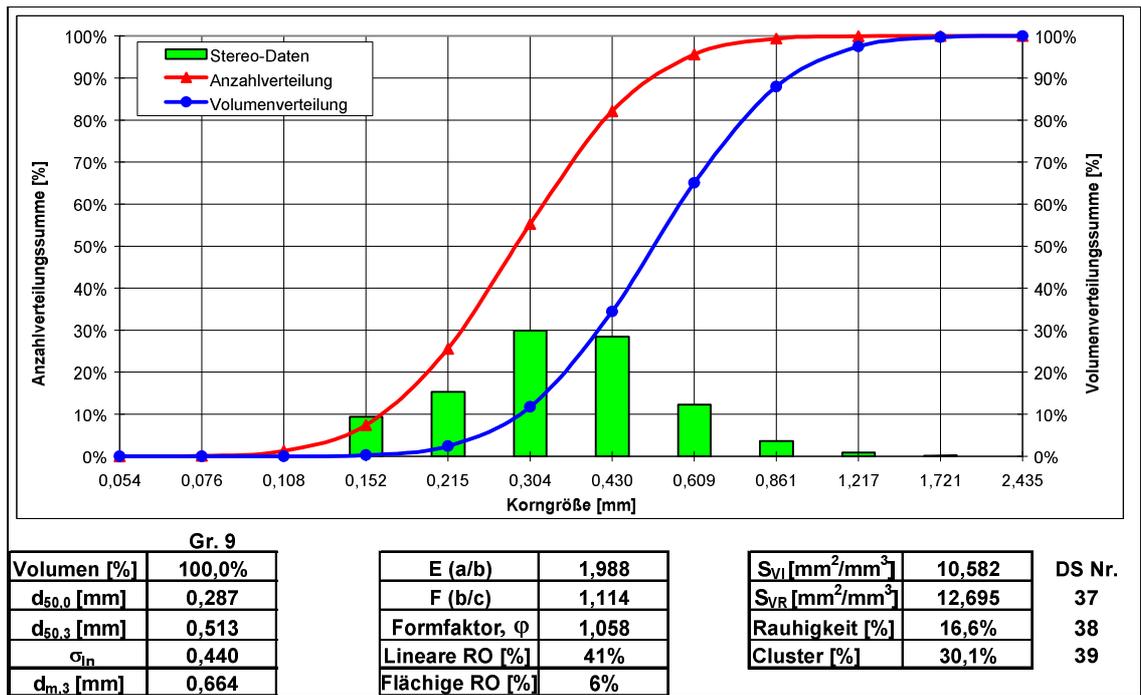


Abbildung B. 12: Bestimmung der LNV-Parameter der Volumenverteilung der Teilchen aus den stereologischen Daten der Anzahlverteilung

Tabelle B. 6: Datenblatt „Gesteinscharakteristika“

Gestein	Typ: Gneis 1				Phasenbezogene Merkmale					Gesteinsmerkmale	
	Lagerstätte: Oberschöna		Land: Sachsen		Quarz	Feldsp.	Glimmer	Gas	NDP*		Σ Mikrokörper
Modus	Phasen				Art	Einheit					
	Phasenanteil	Volumenanteil			ε_V	%	36	41	23	0	0
Gefüge	Struktur	Korngröße	Medianwert	$d_{50,3}$	mm	0,442	0,535	0,754	-	-	0,552
			Streuungsparameter	σ	-	0,430	0,328	0,578	-	-	0,423
		Kornoberfläche	Spezifische Oberfläche	S_V	mm ² /mm ³	13,462	11,703	13,169	-	-	12,679
		Kornform	Elongation	E	-	1,406	2,465	2,744	-	-	2,145
			Flachheit	F	-	1,024	10,960	1,125	-	-	1,076
	Rauhigkeit	Rauhigkeitsgrad	K_R	%	3	13	41	-	-	16	
	Textur	Richtung	Linearer Orientierungsgrad	K_{lin}	%	22	50	52	-	-	41
			Flächiger Orientierungsgrad	K_{fl}	%	10	7	10	-	-	6
			Isotroper Orientierungsgrad	K_{is}	%	68	43	38	-	-	53
		Verteilung	Clusterbildungsgrad	C	%	44	35	0	-	-	30
Raumerfüllung	Raumerfüllungsgrad	ε_{VF}	%	-	-	-	-	-	100		

NDP* - nicht differenzierbare Phase