

Universität der Bundeswehr München

Institut für **Werkstoffe**
des Bauwesens

Bauchemie und Werkstoffe des Bau-
wesens

Gesteinskörnung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Frühjahrssemester 2023

Inhaltsverzeichnis

	1	
1	Formelzeichen und Abkürzungen	4
2	Einleitung	5
2.1	Allgemeines	5
2.2	Begriffe	5
3	Normung	8
3.1	Gesteinskörnung für Beton	9
3.1.1	Allgemeines	9
3.1.2	Gesteinskörnungen (normale Gesteinskörnung) [1, 11]	9
4	Anforderungen	12
4.1	Allgemeines	12
4.2	Geometrische Anforderungen	12
4.2.1	Korngruppen	12
4.2.2	Kornzusammensetzung	13
4.2.3	Grobe Gesteinskörnung	15
4.2.4	Korngemische	17
4.2.5	Feine Gesteinskörnung [3, 12]	18
4.2.6	Füller (Gesteinsmehl)	19
4.2.7	Betontechnologische Sieblinien [1, 13]	20
4.2.8	Kornform [13]	24
4.2.9	Feinanteile	25
4.2.10	Anteil gebrochener Oberflächen	26
4.2.11	Muschelschalengehalt grober Gesteinskörnungen	26
4.3	Physikalische Anforderungen	26
4.3.1	Dichte [1, 13]	26
4.3.2	Feuchtigkeit und Wasseraufnahme	28

4.3.3	Kornfestigkeit grober Gesteinskörnung [1, 13]	29
4.3.4	Widerstand gegen Zertrümmerung grober Gesteinskörnung	29
4.3.5	Widerstand gegen Verschleiß	30
4.3.6	Widerstand gegen Polieren	31
4.4	Dauerhaftigkeit	31
4.5	Chemische Anforderungen	34
4.5.1	Chloride	34
4.5.2	Schwefelhaltige Bestandteile	34
4.6	Andere Bestandteile	35
4.6.1	Bestandteile, die das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten von Beton verändern	35
4.6.2	Bestandteile, die die Oberflächenbeschaffenheit von Beton verändern	35
4.7	Weitere Anforderungen	35
4.7.1	Farbe	35
4.7.2	E-Modul	36
4.7.3	Wärmeleitfähigkeit	36
4.8	Regelanforderungen	36
5	Literatur	39

Das vorliegende Skript basiert in weiten Teilen auf dem Skriptum „Gesteinskörnung“ [1] zur Grundvorlesung in Baustoffkunde von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. P. Schießl vom Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffkunde der Technischen Universität München. Für dessen freundliche Genehmigung möchte ich mich ausdrücklich bedanken.

In der vorliegenden Fassung wurde bei vielen Abbildungen die Originalquelle ergänzt. Diese Arbeit ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Hinweise auf noch fehlende oder ggf. unzutreffende Quellenangaben werden gerne in der nächsten Version aufgenommen.

1 Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Bedeutung	Dimension
A	Wasseranspruchszahl	[-]
d	Korndurchmesser	[mm]
d _u	untere Prüfkorngröße einer Korngruppe	[mm]
d _o	obere Prüfkorngröße einer Korngruppe	[mm]
d _{mi}	mittlerer Korndurchmesser	[mm]
D _i	Durchgang durch Sieb i	[%]
F _m	Feinheitsmodul	[-]
F	F-Wert	[-]
k	Körnungsziffer	[-]
m	Masse	[kg]
m _d	Masse, trocken	[kg]
O	spezifische Oberfläche	[m ² / kg]
P	Porenanteil	[Vol.-%]
P _K	Kornporigkeit	[Vol.-%]
P _H	Haufwerksporigkeit	[Vol.-%]
P _S	Gesamtporigkeit	[Vol.-%]
Q	Quersummenzahl	[%]
R _i	Rückstand auf Sieb i	[%]
V	Volumen	[m ³]
ρ	Dichte	[kg/ m ³]
ρ _{Rg}	Kornrohddichte	[kg/ m ³]
ρ _S	Schüttdichte	[kg/ m ³]

2 Einleitung

2.1 Allgemeines

Gesteine werden im Bauwesen als Werksteine (steinmetzmäßig bearbeitet) und in Form von Lockermassen (z. B. Kies und Sand) verwendet. Felsgestein liegt in großer Menge und Vielfalt vor. Davon kann nur ein kleiner Teil im Bauwesen als Werkstein oder gebrochenes Gestein (Brechsand, Splitt, Schotter) Anwendung finden. Von den Lockergesteinen (Kies und Sand) ist ebenfalls nur ein Teil verwendbar. Hier spielt neben der Verwitterungsempfindlichkeit auch der Anteil störender Beimengungen eine wichtige Rolle.

Durch die europäische Normung wurde der Begriff „Gesteinskörnung“ im deutschsprachigen Raum als einheitliche Bezeichnung für körniges mineralisches Material eingeführt. Der Begriff ersetzt die früher üblichen Bezeichnungen „Zuschlag“ für Beton und „Mineralstoffe“ aus dem Straßenbau. **Gesteinskörnung** ist körniges Material für die Verwendung im Bauwesen. Gesteinskörnungen können natürlich, industriell hergestellt oder rezykliert sein. Gesteinskörnung ist mit einem Volumenanteil von 70 bis 80 Vol.-% der Hauptbestandteil des Betons.

2.2 Begriffe

Die Normen für Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel [2-4] verwenden einheitliche Begriffe, die nachfolgend und in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Leichte Gesteinskörnung ist mineralischen Ursprungs mit einer Kornrohichte von nicht mehr als 2000 kg/m^3 oder einer Schüttdichte von nicht mehr als 1200 kg/m^3 .

Normale Gesteinskörnung ist mineralischen Ursprungs mit einer Kornrohichte von mehr als 2000 kg/m^3 und nicht mehr als 3000 kg/m^3 .

Schwere Gesteinskörnung ist mineralischen Ursprungs mit einer Kornrohichte von mehr als 3000 kg/m^3 .

Natürliche Gesteinskörnung entstammt natürlichen mineralischen Vorkommen, die ausschließlich einer mechanischen Aufbereitung unterzogen wurden.

Industriell hergestellte Gesteinskörnung mineralischen Ursprungs, wurde industriell unter Einfluss eines thermischen oder sonstigen Prozesses erzeugt.

Gesteinskörnung aus Nebenprodukten mineralischen Ursprungs, sind in einem industriellen Prozess durch eine ausschließlich mechanische Aufbereitung entstanden.

Recycling-Gesteinskörnung entsteht durch die Aufbereitung anorganischen Materials, das zuvor als Baustoff eingesetzt war.

Tabelle 1: Begriffe für die Anwendung der europäischen Gesteinskörnungsnormen [2-4]

Begriff	Erläuterung
Korngemisch	Gesteinskörnung, die aus einer Mischung grober Gesteinskörnungen und feiner Gesteinskörnungen besteht.
Füller (Gesteinsmehl)	Gesteinskörnung, deren überwiegender Teil durch das 0,063-mm-Sieb hindurchgeht und die Baustoffen zur Erreichung bestimmter Eigenschaften zugegeben werden kann
Korngruppe	Bezeichnung einer Gesteinskörnung mittels unterer (d) und oberer (D) Siebgröße, ausgedrückt als d/D
feine Gesteinskörnung	Bezeichnung für kleinere Korngruppen mit D nicht größer als 4 mm
grobe Gesteinskörnung	Bezeichnung für größere Korngruppen mit D nicht kleiner als 4 mm und d nicht kleiner als 2 mm
Los	Produktionsmenge, Liefermenge, Teilliefermenge (Eisenbahnwagen-, Lastwagen-, Schiffsladung) oder Lagerhalde, die innerhalb eines Zeitraumes unter der Annahme gleicher Bedingungen hergestellt wurde
Feinanteile	Anteil einer Gesteinskörnung, der durch das 0,063-mm-Sieb hindurchgeht
Kategorie	Niveau für die Eigenschaft einer Gesteinskörnung, ausgedrückt als Bandbreite von Werten oder als Grenzwert
Kornzusammensetzung	Korngrößenverteilung, ausgedrückt durch die Siebdurchgänge als Massenanteil in Prozent durch eine festgelegte Anzahl von Sieben

Neben den in den Normen gebräuchlichen Begriffen finden sich weitere Begriffe, die zum Beispiel mit der Packungsdichte der Gesteinskörnung zu tun haben (Tabelle 2). Bild 1 erläutert die Begriffe anschaulich.

Tabelle 2: Benennung von Gesteinskörnung im Zusammenhang mit der Packung

Haufwerk	aus Einzelkörnern ohne Verkittung bestehendes Kornvolumen (lose geschüttet oder verdichtet)
Füllkorn	Korngröße, die gerade in die Zwickel zwischen den nächst größeren Körnern passt, wenn sie nacheinander eingebracht werden kann (Modell von Kugelpackungen)
Schlupfkorn	Korngröße, die in die Zwickel zwischen den nächstgrößeren Körnern eingerüttelt werden kann, wenn die grobe Schüttung zuerst eingebracht wurde
Sperrkorn	Korngröße, die etwas größer als das Füllkorn ist und daher die dichteste Lagerung der größeren Körner verhindert

Natürliche Gesteinskörnung hat je nach Korngröße in Anlehnung an die Benennung und Beschreibung von Böden in der Geotechnik (DIN EN ISO 14688-1 [5]) eigene Namen. Die Grenzen für die Korngrößen stimmen allerdings nicht überein (Tabelle 3).

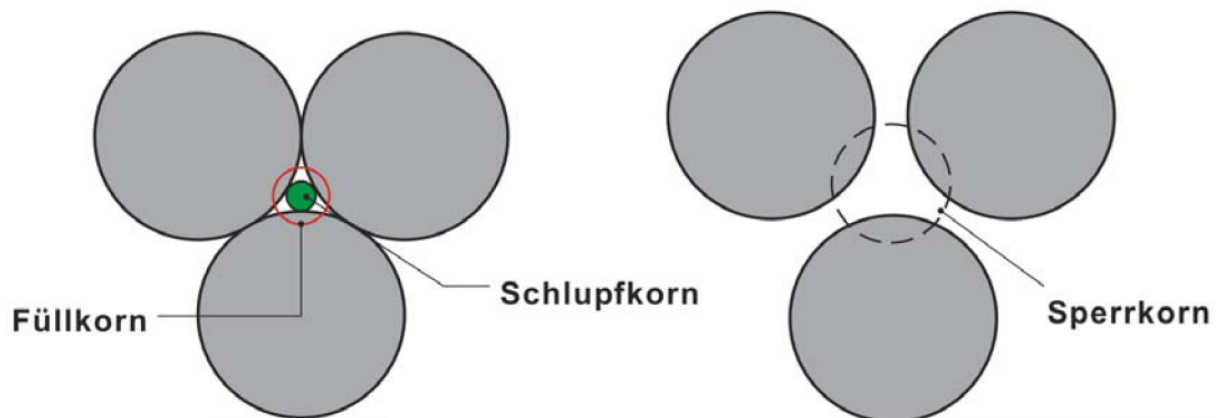


Bild 1: Begriffe für Gesteinskörnung im Zusammenhang mit der Packung [1]

Tabelle 3: Benennung von Gesteinskörnung nach Korngröße [5]

Korngröße [mm]	Ungebrochene Gesteinskörnung	Gebrochene Gesteinskörnung
0 - 4	Sand	Brechsand
0 - 8	Riesel, Estrichsand	
4 - 32	Kies	Splitt
32 - 63	Grobkies	Schotter

3 Normung

Gesteinskörnung für Beton mit einer Kornrohdichte $> 2000 \text{ kg/m}^3$ ist in DIN EN 12620 [3] genormt, Gesteinskörnung für Mörtel in DIN EN 13139 [4]. Leichte Gesteinskörnung für Beton, Mörtel und Einpressmörtel mit einer Kornrohdichte $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$ enthält DIN EN 13055-1 [2].

Die europäischen Produktnormen benennen die Prüfverfahren, die für das jeweilige Produkt anwendbar sind. Sie erfassen nicht die Anwendung in den verschiedenen Einsatzgebieten. Da Gesteinskörnung für mehrere Anwendungen geeignet sind, gibt es zu einigen europäischen Produktnormen verschiedene nationale Anwendungsnormen. Einen Überblick über die verschiedenen europäischen Produktnormen für Gesteinskörnung und die deutschen nationalen Anwendungsdokumente gibt Tabelle 4.

Tabelle 4: europäische Produktnormen für Gesteinskörnung und die deutschen nationalen Anwendungsdokumente

Europäische Norm	Nationales Anwendungsdokument
EN 12620 Gesteinskörnungen für Beton [3]	DIN 1045-2 [6] Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1; Änderung A3
EN 13043 Gesteinskörnungen für Asphalte und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen	TL Gestein-StB 2004 Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
EN 13055-1 Leichte Gesteinskörnungen – Teil 1: Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel [2]	DIN 1045-2 [6] Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1; Änderung A3
EN 13055-2 Leichte Gesteinskörnungen – Teil 2: Leichte Gesteinskörnungen für ungebundene und gebundene Anwendungen [7]	
EN 13139 Gesteinskörnungen für Mörtel [4]	wird in einzelnen Normen geregelt (z. B. DIN 185501, -2 [8, 9])
EN 13242 Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau	TL Gestein-StB, Ausg. 2004, Fassung 2018 Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau [10]
EN 13383-1 Wasserbausteine – Teil 1: Spezifikation	
EN 13450 Gesteinskörnungen für Gleisschotter	

3.1 Gesteinskörnung für Beton

3.1.1 Allgemeines

Beton besteht zu etwa 70 Vol.-% aus Gesteinskörnung. Aus diesem Grund besteht in der Bauindustrie ein großer Bedarf an kostengünstiger und qualitativ hochwertiger Gesteinskörnung. Dieser Bedarf kann weitestgehend durch natürliche Vorkommen befriedigt werden. Da auch die größten Vorkommen endlich sind und kein unnötiger Raubbau betrieben werden soll, sind sowohl das Recycling aus Bauschutt wie auch der Einsatz industrieller Nebenprodukte Möglichkeiten, um Produkte zu erhalten, die die natürlichen Quellen zumindest teilweise ersetzen können.

Die wirtschaftliche Ausbeutung der Vorkommen bedeutet einerseits, Schäden und Mängel an den Bauwerken infolge unzureichender Qualität der Baustoffe zu vermeiden, andererseits aber keine überhöhten Anforderungen zu stellen, durch die brauchbare, preisgünstige Rohstoffe ausgeschlossen werden.

3.1.2 Gesteinskörnungen (normale Gesteinskörnung) [1, 11]

3.1.2.1 Natürliche Gesteinskörnungen

Natürliche Gesteinskörnungen sind Naturprodukte unterschiedlicher Herkunft. Daher sind sie sehr vielfältig in ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung sowie in ihrer Struktur, Kornform und -größe. Nach dem heutigen Stand der Aufbereitungs- und Prüftechnik können natürliche Gesteinskörnungen für den jeweils vorgesehenen Verwendungszweck in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden, sodass von dieser Seite kaum größere Probleme für die Sicherheit und Dauerhaftigkeit unserer Bauwerke bestehen. Die wichtigsten Voraussetzungen für eine gleichmäßig hohe Güte sind die gründliche Erkundung der Lagerstätte und eine gut arbeitende Aufbereitung, die aufgrund der Ergebnisse der werkseigenen Produktionskontrolle gesteuert wird.

3.1.2.1.1 Aufbereitung

Gesteine werden meist in Steinbrüchen, Kies- oder Sandgruben, also im Tagebau gewonnen. Vereinzelt kommt auch Tiefbau mit Stollen- oder Schachtförderung vor. Felsgesteine werden meist durch Bohren und Sprengen mit brennendem Sprengmittel gewonnen, bei klüftigen Gesteinen auch durch Reißen. Lockergesteine baut man mit Baggern oder Schaufelladern ab, unter Wasser mit Schrapfern oder Saugbaggern.

Das Abbau- und Aufbereitungsschema eines Steinbruches besteht idealisiert aus den Stufen Abräumen, Bohren, Sprengen, Laden, Transport, Schubaufgeber, Vorabscheider, Vorbrecher, Erstaufbereitungsanlage, Nachbrecher, Feinbrecher, Edelsplittanlage. Die Brechstufen und die jeweils aufgegebenen Korngrößen können dabei den geologischen Gegebenheiten und örtlichen Bedürfnissen angepasst werden.

Bei Lockergesteinen wird nach dem Entfernen von Humus und Mutterboden das Kiessandgemisch oder der Sand beim Abbau über dem Grundwasserspiegel hauptsächlich mit Radladern, manchmal mit Baggern oder Schürfkübeln abgebaut, unter Wasser, was in vielen Gebieten wegen des Grundwasserschutzes nicht mehr möglich ist, mit Schrapfern, Saugbagger oder Schwimmkübeln abgebaut.

Die Klassierung in die einzelnen Korngruppen erfolgt trocken oder nass durch Vibrationssiebung, bei feinen Körnungen auch durch Windsichten oder Schlämmen. Es gibt keine ideale Siebmaschine, die für alle Materialien und Korngrößen geeignet ist.

3.1.2.1.2 Gesteinskörnungen aus industriellen Nebenprodukten

Industrielle Nebenprodukte fallen, wie der Name nahe legt, bei der Erzeugung von Produkten (z. B. Stahl, NE-Metalle) oder der Abfallverwertung (z.B. Feuerraumasche) an. Auf die industriellen Nebenprodukte wird ausführlich in der Mastervorlesung „Anorganische Bindemittel und Betontechnologie“ eingegangen.

Hochofenstückschlacke entsteht als Nebenprodukt bei der Stahlerzeugung durch langsames Abkühlen der flüssigen Hochofenschlacke und anschließendem Brechen. Dieser Baustoff hat sich, insbesondere im Betonbau, über Jahre hin in der Praxis bestens bewährt. Bei der Stahlerzeugung in Elektroöfen fällt Metallhüttenschlacke (z. B. Elektroofenschlacke) an. Die Elektroofenschlacke wird ähnlich wie Hochofenstückschlacke aufbereitet, allerdings sind Inhaltsstoffe (Freikalk) enthalten, die einen Einsatz in Beton ausschließen. Ein Einsatz in ungebundenen Schichten oder Asphalt ist dagegen möglich.

3.1.2.2 Leichte Gesteinskörnungen

Leichte Gesteinskörnungen haben eine Kornrohichte von weniger $2,0 \text{ kg/dm}^3$ und werden unter anderem zur Herstellung von Leichtbeton oder leichten Normalbetonen verwendet.

Leichte Gesteinskörnungen können sein:

- natürliche Gesteinskörnungen wie z. B. Lava (Lavaschlacke), Naturbims, Tuff;
- aus natürlichen Rohstoffen und/oder aus industriellen Nebenprodukten hergestellte Gesteinskörnungen (Blähglas, Blähglimmer (Vermikulit), Blähperlit, Blähschiefer, Blähton, gesinterte Steinkohlenflugasche-Pellets, Ziegelsplitt aus ungebrauchten Ziegeln);
- industrielle Nebenprodukte (Feuerraumasche Kesselsand).

Organische leichte Stoffe wie Holzfasern, Holzmehl und Schaumkunststoffe gelten nicht als Leichte Gesteinskörnung im Sinne der DIN EN 13055-1 [2].

3.1.2.3 Schwere Gesteinskörnungen

Schwere Gesteinskörnungen werden zur Herstellung von Strahlenschutzbeton (Reaktor- und Krankenhausbau) verwendet. Die Kornrohichte liegt über $3,0 \text{ kg/dm}^3$. Zur Abschirmung der γ -Strahlen werden schwere Elemente benötigt, zum Bremsen der Neutronen sind leichte Elemente wie Wasserstoff und Bor erforderlich. Hierzu werden kristallwasserhaltige Minerale wie Serpentin, Limonit oder Colemanit verwendet. Beispiele für mechanisch zerkleinerte (aufbereitete) schwere Gesteinskörnungen sind Schwerspat (Baryt, BaSO_4), Magnetit, Hämatit, Limonit, Ilmenit und Serpentin. Beispiele für künstlich hergestellte schwere Gesteinskörnungen sind Stahlschrot, Stahlspäne oder Schwermetallschlacken.

3.1.2.4 Recycling-Gesteinskörnungen

Aufgrund von Abriss- und Aushubtätigkeiten fallen jedes Jahr große Mengen von Baureststoffen an. Nach dem Bodenaushub mit rd. 200 Mio. t/a macht dabei der Bauschutt den mengenmäßig größten Anteil aus. Auf die Recycling-Gesteinskörnungen wird ausführlich in der Mastervorlesung „Anorganische Bindemittel und Betontechnologie“ eingegangen.

Die Eigenschaften des aufbereiteten Bauschutts (Recycling-Gesteinskörnung) variieren naturgemäß in der Zusammensetzung. Daher ist die Eingrenzung der Haupt- und Nebenbestandteile eine wichtige Voraussetzung für genügend gleichmäßige und damit kalkulierbare Eigenschaften. Recycling-Gesteinskörnungen für Beton müssen grundsätzlich nach ihrer Herkunft sowie der anteiligen stofflichen Zusammensetzung den Anforderungen der DIN EN 12620 [3] genügen (Tabelle 5).

Tabelle 5: Bestandteile recycelter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 [3] und deren Beschreibung

Bestandteil	Beschreibung
R _C	Beton, Betonprodukte, Mörtel Mauersteine aus Beton
R _U	Ungebundene Gesteinskörner, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörner
R _B	Mauer- und Dachziegel aus gebranntem Ton Kalksandsteine Gasbetonsteine (nicht schwimmend)
R _A	Bitumenhaltige Materialien
FL	Schwimmendes Material im Volumen
X	Sonstige Materialien: Bindige Materialien (d. h. Ton, Erde) Verschiedene sonstige Materialien: (eisenhaltige und nicht eisenhaltige) Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi Gips
G	Glas

4 Anforderungen

4.1 Allgemeines

Zwischen den Eigenschaften von Gesteinskörnungen bestehen vielfältige Wechselbeziehungen. Die Eigenschaften hängen wesentlich ab vom Ausgangsgestein (z.B. von der petrographischen Zusammensetzung des Kieses). Des Weiteren werden sie durch Verfahrensschritte bei der Aufbereitung (Wahl des Brechers bzw. der Brechereinstellung, Siebmaschine) beeinflusst.

An Gesteinskörnungen für das Bauwesen werden einige grundlegende Anforderungen gestellt, der Erfüllung für den Einsatz unabdingbar ist. So darf Gesteinskörnung unter der Einwirkung von Wasser nicht erweichen, sich nicht zersetzen, mit den anderen Bestandteilen des Baustoffgemisches keine schädlichen Verbindungen eingehen und bei Beton den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht beeinträchtigen.

Die Anforderungen an die Eigenschaften von Gesteinskörnung hängen von der vorgesehenen Art der Verwendung und der Herkunft der Gesteinskörnung ab. Es wird unterschieden zwischen

- geometrischen,
- physikalischen und
- chemischen

Anforderungen.

Die europäischen Produktnormen enthalten zum Teil für einzelne Prüfmerkmale Kategorien zum Beschreiben der Gesteinskörnungen. Unter einer **Kategorie** versteht man das Niveau einer Eigenschaft (Prüfmerkmals) einer Gesteinskörnung, die als Bandbreite von Werten oder als Grenzwert ausgedrückt wird (Tabelle 6). So existieren für die Kornform die Kategorien SI₁₅, SI₂₀, SI₄₀, SI₅₅, SI_{angegeben} und SI_{NR}. Für das Prüfmerkmal SI (shape index) bedeutet das, dass der Anteil an nicht kubischen Körnern in der Gesteinskörnung ≤ 15 M.-%, ≤ 20 M.-%, ≤ 40 M.-% oder ≤ 55 M.-% liegen kann bzw. liegt dieser Anteil > 55 M.-% so ist der tatsächlich ermittelte Wert von z.B. 60 als SI₆₀ anzugeben. Wird die Kategorie SI_{NR} (NR = No Requirement) gewählt, so ist diese Eigenschaft ohne Belang, eine Prüfung braucht nicht durchgeführt werden.

Tabelle 6: Kategorie/Prüfung

Kategorie	Bedeutung	Prüfung
X _{xx}	Eigenschaft gefordert, Grenzwert festgelegt (Zahlenwert)	ja
X _{angegeben}	Eigenschaft gefordert, kein Grenzwert festgelegt	ja
X _{NR}	Eigenschaft nicht gefordert	nein

4.2 Geometrische Anforderungen

4.2.1 Korngruppen

Alle Gesteinskörnungen sind durch Angabe der **Korngruppe** unter Verwendung zweier Siebgrößen mit der Bezeichnung d/D zu beschreiben; eine Ausnahme bilden Füller (Gesteinsmehl). Die Bezeichnung muss sich aus den Werten des **Grundsiebsatzes**, des Grundsiebsatzes plus Ergänzungssiebsatz 1 oder des Grundsiebsatzes plus Ergänzungssiebsatz 2 zusammensetzen (Tabelle 7). Eine Kombination der Siebgrößen von Ergänzungssiebsatz 1 und Ergänzungssiebsatz 2 ist nicht zulässig.

Das Verhältnis D/d der Korngruppen darf nicht kleiner als 1,4 sein.

Es werden folgende Korngruppen unterschieden:

- grobe Gesteinskörnung, z.B. 4/8, 8/16, 16/32
- feine Gesteinskörnung, z.B. 0/1, 0/2, 0/4
- Korngemisch, z.B. 0/8, 0/16, 0/32
- Füller (Gesteinsmehl), ($D \leq 0,063$ mm)

Tabelle 7: Siebgrößen zur Bezeichnung von Korngrößen [2]

Grundsiebansatz mm	Grundsiebansatz plus Ergänzungs- siebansatz 1 mm	Grundsiebansatz plus Ergänzungs- siebansatz 2 mm
0	0	0
0,25	0,25	0,25
0,5	0,5	0,5
1	1	1
2	2	2
-	2,8 (3)	3,15 (3)
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4 (22)	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
63	63	63
ANMERKUNG 1	Die in Klammern gesetzten gerundeten Größen können zur vereinfachten Beschreibung der Korngruppen herangezogen werden.	
ANMERKUNG 2	Die <i>orange</i> gedruckten Werte gelten nur für DIN EN 13055-1 [7].	

Liegt nicht bereits ein definiertes und geeignetes **Korngemisch** vor, das zur Herstellung von Beton verwendet werden kann, so ist durch dosiertes Mischen von groben und feinen Gesteinskörnungen unter Umständen unter Zugabe von Füller ein Korngemisch herzustellen, d.h., es ist im Rahmen der Eignungsprüfung eine für den vorgesehenen Anwendungszweck geeignete beton-technologische Sieblinie anzustreben.

4.2.2 Kornzusammensetzung

Die Kornzusammensetzung einer Gesteinskörnung wird durch Sieben und Wägen der im Siebversuch getrennten Korngruppen bestimmt. Dazu werden

- die Maschensiebe 0,063, 0,125, 0,25, 0,50, 1,0 und 2 mm und
- die Quadratlochsiebe 4, 8, 11,2 (11), 16, 22,4 (22), 31,5 (32), 45 und 62,5 (63) mm benutzt und die Rückstände auf diesen Sieben gewogen.

Die ausschließliche Festlegung des unteren (**d: Unterkorn**) und des oberen Siebes (**D: Überkorn**) reicht nicht aus, um eine Gesteinskörnung für den Einsatz im Beton zu charakterisieren. Grobe Gesteinskörnungen müssen daher mit den auf ihre Größenbezeichnung d/D und die gewählten Kategorien zutreffenden allgemeinen Anforderungen an die Kornzusammensetzung nach Tabelle 8 übereinstimmen.

Tabelle 8: Allgemeine Anforderungen an die Kornzusammensetzung [3]

Gesteinskörnung	Korngröße	Durchgang in M.-%					Kategorie G ^d
		Überkorn			Überkorn		
		2 D	1,4 D ^{a, b}	D ^c	D ^b	d/2 ^{a, b}	
Grob	D/d ≤ 2 oder D ≤ 11,2 mm	100 100	98 bis 100 98 bis 100	85 bis 99 80 bis 99	0 bis 20	0 bis 5	G _C 85/20 G _C 80/20
	D/d > 2 und D > 11,2 mm	100	95 bis 100	90 bis 99	0 bis 15	0 bis 5	G _C 90/15
Fein	D ≤ 4 mm und d = 0	100	95 bis 100	85 bis 99	-	-	G _F 85
Natürlich zusammengesetzte Gesteinskörnung 0/8	D = 8 mm und d = 0	100	98 bis 100	90 bis 99	-	-	G _{NG} 90
Korngemisch	D ≤ 45 und d = 0	100	98 bis 100	90 bis 99	-	-	G _A 90 G _A 85
		100	98 bis 100	85 bis 99			

^a Wenn die errechneten Siebgrößen nicht mit der ISO-565:1990-R20-Reihe übereinstimmen, ist stattdessen das nächstliegende Sieb der Reihe heranzuziehen.

^b Für Beton mit Ausfallkörnung oder andere spezielle Verwendungszwecke können zusätzliche Anforderungen vereinbart werden.

^c Der Siebdurchgang durch D darf unter Umständen auch mehr als 99 % Massenanteil betragen; in diesen Fällen muss der Hersteller die typische Kornzusammensetzung aufzeichnen und angeben, wobei die Siebgrößen D, d, d/2 und die zwischen d und D liegenden Siebe des Grundsiebsets plus Ergänzungssiebsetz 1 oder des Grundsiebsets plus Ergänzungssiebsetz 2 enthalten sein müssen. Siebe, die nicht mindestens 1,4-mal größer sind als das nächst kleinere Sieb, können davon ausgenommen werden.

^d Weitere Produktnormen für Gesteinskörnungen umfassen andere Anforderungen an die Kategorien.

Wird der Anteil der einzelnen Korngruppen am Gesamtsiebgut über den Siebweiten aufgetragen, erhält man die **Sieblinie**. Für die Siebrückstände fällt diese mit steigender Siebweite von 100 % auf 0 %. Da jedoch eine steigende Sieblinie die Korngruppenanteile von 0 mm bis zum jeweiligen Sieb direkt angibt und daher übersichtlicher und verständlicher ist, wird der **Siebdurchgang** (= 100 % - Siebrückstand) errechnet und daraus die Sieblinie als grafische Darstellung der Kornzusammensetzung gezeichnet.

Für die Betontechnologie ist im Grunde nur die Kenntnis der volumenmäßigen Zusammensetzung von Interesse, weil diese die zu umhüllende Oberfläche und die Packungsdichte bestimmt, von denen der Zementleimgehalt und die von ihm abhängigen Eigenschaften beeinflusst werden. Für die praktische Handhabung ist die massenmäßig durchgeführte Ermittlung der Sieblinie einfacher. Bei der Umsetzung muss man sich darüber im Klaren sein, dass mit der Festlegung der gravimetrischen Sieblinienbereiche stets eine volumenmäßige Vorstellung verbunden

ist (Bild 2). Für normale Gesteinskörnungen stimmen gravimetrische und volumetrische Kurve häufig überein. Deutliche Unterschiede treten durch unterschiedliche Kornrohdichten der einzelnen Korngruppen auf. Dies ist insbesondere bei leichten Gesteinskörnungen und rezyklierten Gesteinskörnungen der Fall. Dies muss bei der Umrechnung in die volumetrische Kornverteilung in jedem Fall beachtet werden.

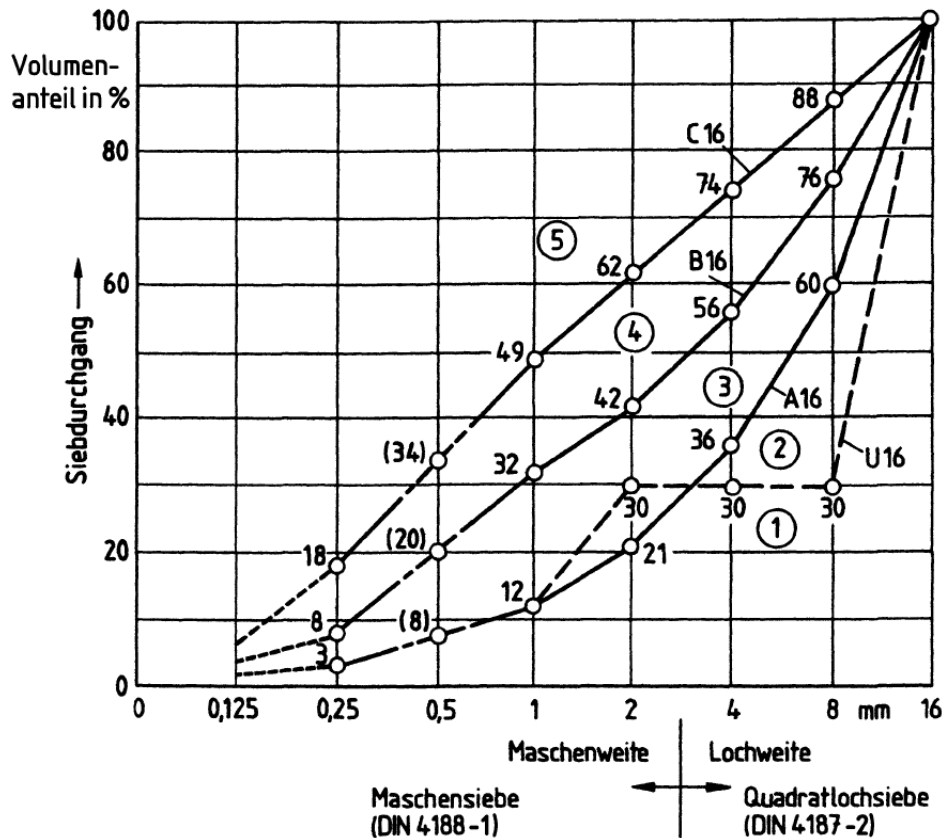


Bild 2: Sieblinien mit einem Größtkorn von 16 mm [6]

4.2.3 Grobe Gesteinskörnung

Groben Gesteinskörnungen werden unterschieden in **eng gestuft** und **weit gestuft**. Bei eng gestuften groben Gesteinskörnungen gibt es lediglich Anforderungen an den zulässigen Über- und Unterkornanteil, während bei weit gestuften groben Gesteinskörnungen auch noch Anforderungen an den Siebdurchgang eines zwischen den Begrenzungssieben liegenden „Mittleren Siebes“ gestellt werden.

Eng gestufte grobe Gesteinskörnungen sind z. B. die häufig verwendeten Korngruppen 2/8; 8/16 und 16/32. Bezüglich der Regelanforderung darf die Korngröße des Überkorns nicht mehr beliebig groß sein, sondern muss zu 98 % durch das nächst größere Prüfsieb (1,4facher Durchmesser des Nenngrößtkorns) hindurchgehen. Analog gilt dies auch für die Korngröße des Unterkorns: Es darf nicht beliebig klein sein, sondern muss zu 95 % auf dem Sieb der Siebweite $d/2$ liegen bleiben.

Nach den DIN 1045-2, Anhang U gilt für Beton als Regelanforderung an die Kornzusammensetzung von groben Gesteinskörnungen die Kategorie $G_{C85/20}$. Das bedeutet, dass der Anteil an Unterkorn max. 20 M.-% und der an Überkorn max. 20 M.-% betragen darf. Zudem ist festgelegt, dass mindestens 1 M.-% Überkorn in der Korngruppe enthalten sein muss. Damit soll sichergestellt werden, dass z.B. in einer Lieferkornung 16/32 der gesamte Kornbereich von

16 bis 32 mm enthalten ist. Diese Regelung gilt auch für feine Gesteinskörnungen und Kornmische. Die verschiedenen Randbedingungen sind für die Korngruppe 8/16 beispielhaft im Bild 3 dargestellt.

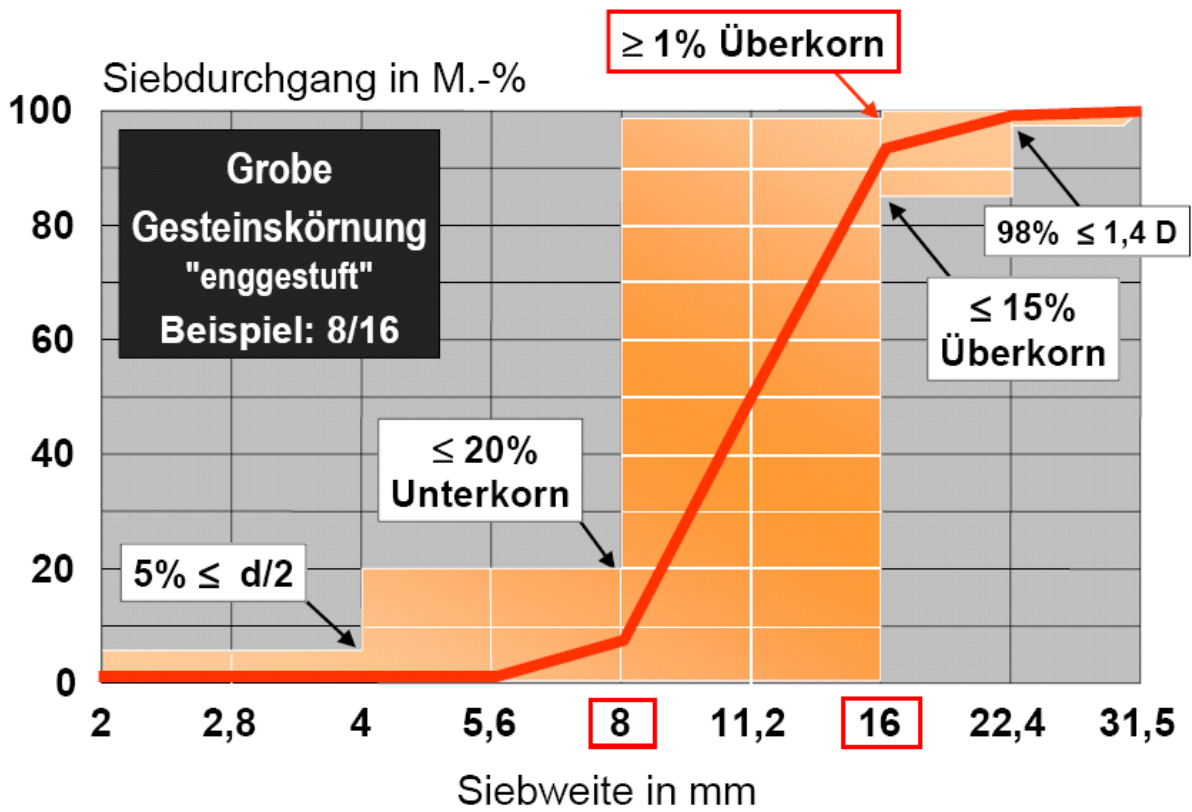


Bild 3: Regelanforderung an die Kornzusammensetzung einer groben Gesteinskörnung "eng gestuft", dargestellt am Beispiel der Korngruppe 8/16; die Sieblinie dieser Korngruppe muss in dem orange hinterlegten Bereich verlaufen. [12]

Während eng gestufte grobe Gesteinskörnungen mit Anforderungen an das Über- bzw. Unterkorn auskommen, muss bei weit gestuften zusätzlich ein bestimmter Siebdurchgang durch ein sog. „Mittleres Sieb“ eingehalten werden. Dies ist am Beispiel der Korngruppe 2/32 im Bild 4 dargestellt. Der Über- bzw. Unterkornanteil darf für weit gestufte grobe Gesteinskörnungen maximal 10 bzw. 15 % betragen. Das „Mittlere Sieb“ ist in Abhängigkeit vom Größtkorn D und dem Verhältnis D/d in der Norm definiert. Für die Korngruppe 2/32 ist das 16-mm-Sieb als „Mittleres Sieb“ festgelegt worden. Der Siebdurchgang durch dieses Sieb ist aufzuzeichnen und muss im Bereich 25 - 70 % (Massenanteile) liegen. Der vom Hersteller festgelegte Siebdurchgang ist mit einer Grenzabweichung von ± 15 M.-% (für $D/d < 4$) bzw. $\pm 17,5$ M.-% (für $D/d \geq 4$) einzuhalten.

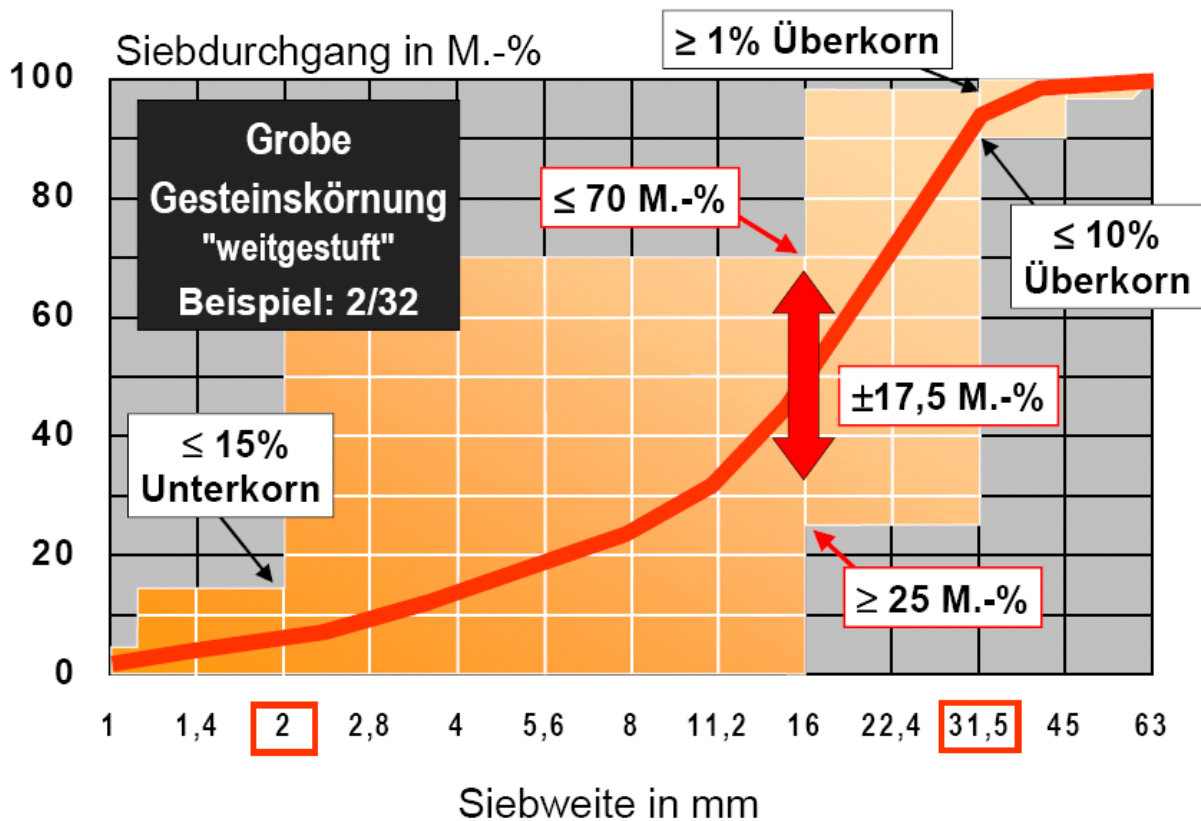


Bild 4: Regelanforderung an die Kornzusammensetzung einer groben Gesteinskörnung "weit gestuft"; dargestellt am Beispiel der Korngruppe 2/32; die Sieblinie muss in dem orange hinterlegten Bereich verlaufen, wobei die Grenzabweichung beim "Mittleren Sieb" (hier: 16 mm) höchstens $\pm 17,5$ M.-% betragen darf. [12]

4.2.4 Korngemische

Korngemische sind Gemische aus feinen und groben Gesteinskörnungen, d ist bei Korngemischen also stets Null. Die Sieblinien für die verschiedenen definierten Korngemische müssen in einem bestimmten Bereich liegen, der etwa dem Sieblinienbereich 3 (grob- bis mittelkörnig) entspricht (vgl. Bild 2). Für ein Korngemisch 0/32 ist dies beispielhaft im Bild 5 dargestellt. Zu jedem Korngemisch sind in DIN EN 12620 zwei Zwischensiebe (bei dem Korngemisch 0/32 sind dies die Siebe 4 mm und 16 mm) angegeben, für die ein bestimmter Siebdurchgang mit den vorgegebenen Grenzabweichungen (20 M.-%) einzuhalten ist. Die Anforderungen sind so festgelegt, dass sich im Ergebnis Sieblinien einstellen, die zwischen den Sieblinien A und B liegen (vgl. Bild 2).

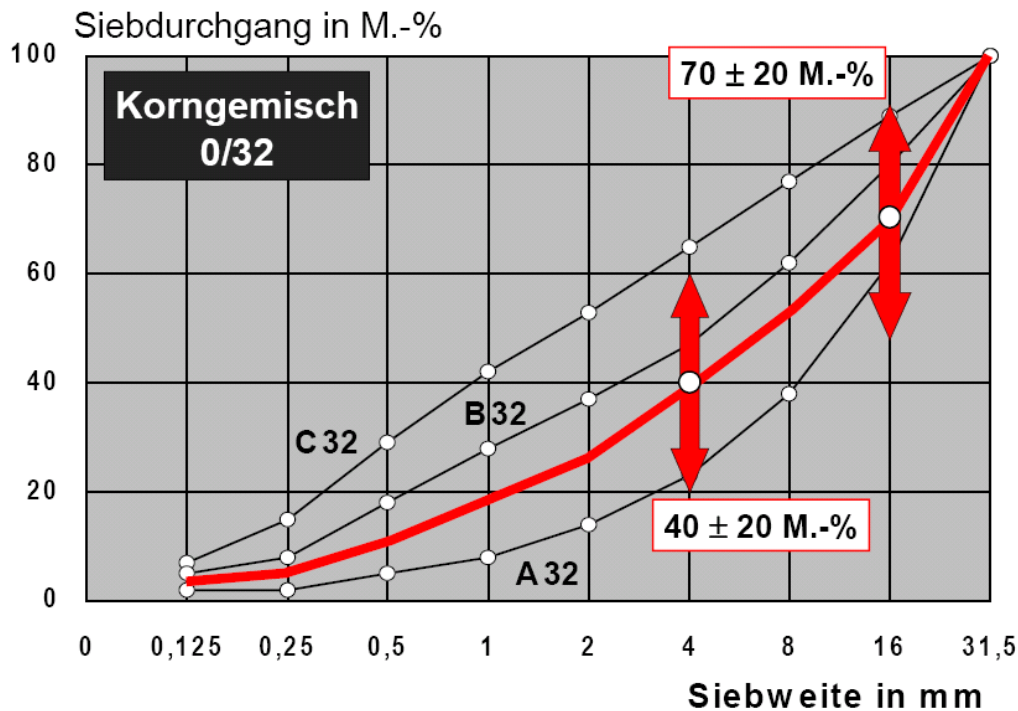


Bild 5: Anforderung an die Kornzusammensetzung eines Korngemisches dargestellt am Beispiel der Lieferkörung 0/32. [12]

4.2.5 Feine Gesteinskörnung [3, 12]

Feine Gesteinskörnungen müssen die auf die obere Siebgröße D bezogenen allgemeinen Anforderungen an die Kornzusammensetzung nach Tabelle 8 erfüllen. Es gibt keine „Absolut-Anforderungen“ an die Kornzusammensetzung. Der Hersteller muss angeben, welche Sieblinie seine feine Gesteinskörnung im Mittel aufweist und diese „Typische Kornzusammensetzung“ dann mit vorgegebenen Grenzabweichungen einhalten (Bild 6). Zusätzlich gelten feste Anforderungen an den Feinanteilgehalt $\leq 0,063$ mm und den erlaubten Überkornanteil (Tabelle 9).

Tabelle 9: Grenzabweichungen für die vom Hersteller angegebene typische Kornzusammensetzung von feinen Gesteinskörnungen

Siebgröße [mm]	Grenzabweichungen für den Siebdurchgang in Massenanteil [%]		
	0/4	0/2	0/1
4	$\pm 5^a$	-	-
2	-	$\pm 5^a$	-
1	± 20	± 20	$\pm 5^a$
0,250	± 20	± 25	± 25
0,063 ^b	± 3	± 5	± 5

^a Zusätzlich zu der Grenzabweichung von $\pm 5\%$ Massenanteil gelten die Anforderungen an den Siebdurchgang durch D nach Tabelle 8.
^b Für den Siebdurchgang durch das 0,063-mm-Sieb gelten zusätzlich zu den angegebenen Grenzabweichungen die in Tabelle 11 [3] für die gewählte Kategorie angegebenen Höchstwerte des Gehaltes an Feinanteilen.

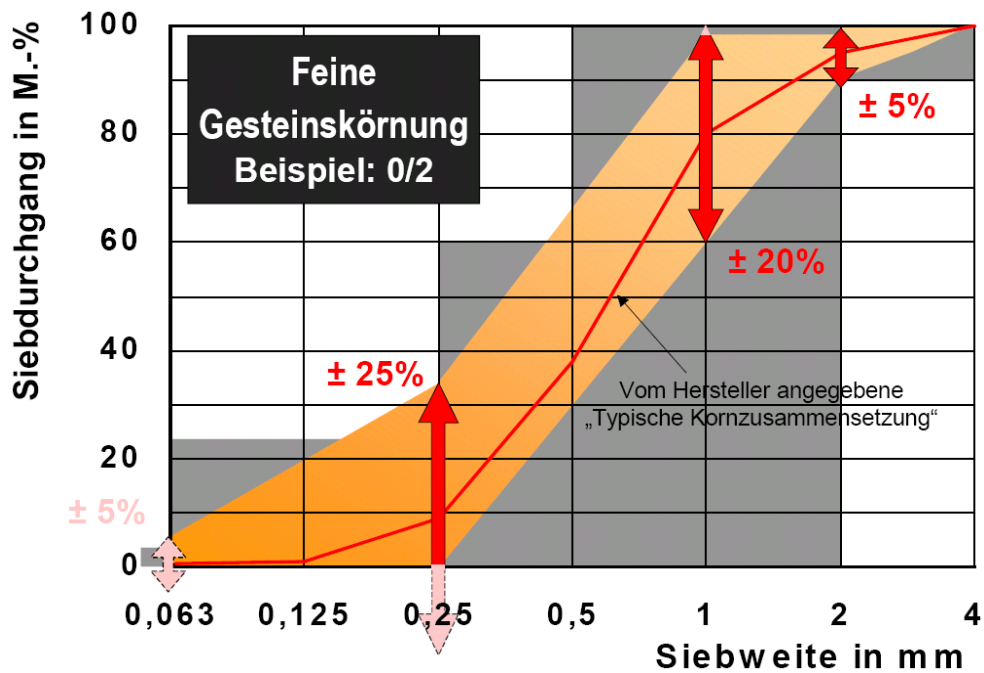


Bild 6: Zulässige Grenzabweichungen (Regelanforderung) der Korngruppe 0/2 für die „Typische Sieblinie“ [12]

Die „Typische Kornzusammensetzung“ wird vom Hersteller der feinen Gesteinskörnung in Abhängigkeit seiner örtlichen Gegebenheiten festgelegt. Die feine Gesteinskörnung erhält mit ihrer einmal festgelegten typischen Kornzusammensetzung eine Sortennummer. Für diese Sorte kann die typische Kornzusammensetzung dann nicht mehr verändert werden, es sei denn, dass eine neue Sortennummer vergeben wird. Der Abnehmer, der eine bestimmte Sortennummer gemäß Sortenverzeichnis bestellt hat, muss also keine abrupte Änderung der Kornzusammensetzung befürchten.

4.2.6 Füller (Gesteinsmehl)

Als Füller werden Gesteinsmehle bezeichnet, deren überwiegender Teil der Körner durch das 0,063 mm hindurchgeht. Sie dürfen max. 15 M.-% an Korn größer 0,125 mm und keine Körner größer 2 mm besitzen. Hier hat der Hersteller der Gesteinskörnung einen maximalen Wert für die Schwankungsbreite für den Durchgang bei 0,063 mm und 0,125 mm anzugeben (Tabelle 10).

Tabelle 10: Anforderungen an die Kornzusammensetzung von Füller [3]

Siebgröße in mm	Siebdurchgang in Massenanteil in Prozent	
	Absolutbereich für Einzelwerte	Maximaler Wert für die Größe des vom Hersteller anzugebenden Bereiches ^a
2	100	-
0,125	85 bis 100	10
0,063	70 bis 100	10

^a Größe des anzugebenden Bereiches der Kornzusammensetzung auf Grundlage der letzten 20 Werte. 90 % der Ergebnisse müssen innerhalb dieses Bereiches liegen; aber alle Ergebnisse müssen innerhalb des Absolutbereiches der Kornzusammensetzung liegen (siehe Spalte 2 oben).

4.2.7 Betontechnologische Sieblinien [1, 13]

Die Betontechnologie fordert zur Herstellung von Beton mit möglichst vollständiger Verdichtung vom Kornaufbau eines Korngemisches die Erfüllung zweier Aufgaben:

- Der Kornaufbau soll ein dichtes Korngerüst ergeben, damit der Zementleimgehalt zum Umhüllen der Körner und zum Ausfüllen der Zwischenräume gering ist. Eine Vergrößerung der Packungsdichte kann durch Zusatz von Feinstsand erreicht werden, der jedoch wegen der damit verbundenen Oberflächenvergrößerung bei gleichem Zementleimgehalt zu geringerer Verdichtbarkeit führt. Eine diese Wirkung ausgleichende Zementleimvermehrung hebt dagegen die Vorteile des größeren Dichtigkeitsgrades wieder auf.
- Die Oberfläche soll möglichst klein, die Gesteinskörnung also möglichst grob sein, um die zur Umhüllung benötigte Zementleimmenge gering halten zu können.

Das Optimum liegt zwischen diesen Extremwerten, d.h., dass die Gesteinskörnungsfläche und gleichzeitig der Haufwerksporenraum möglichst klein sein sollen. Die günstigsten Bedingungen werden durch zahlreiche "Idealsieblinien" angegeben, die sowohl stetig als auch unstetig sein können.

Eine bestimmte Verarbeitbarkeit des Betons erfordert einen bestimmten Zementleimbedarf, der sich wiederum aus spezifischer Oberfläche und Packungsdichte der Gesteinskörnung ergibt. Da die spezifische Oberfläche der Gesteinskörnung nur mit beträchtlichem Aufwand zu messen ist, verwendet man in der Betontechnologie aus der Kornzusammensetzung abgeleitete Kenngrößen. Mit ihnen lassen sich Korngemische beurteilen, die von einer vorgeschriebenen Sieblinie abweichen, da Kornzusammensetzungen mit gleichen Kennwerten betontechnologisch gleichwertig sind.

Die gebräuchlichen Gesteinskörnungskennwerte sind in den nachfolgenden Abschnitten zusammengestellt. In DIN 1045-2 [6] sind die für Stahlbeton üblichen Sieblinien angegeben. Die Auswertung eines Siebversuchs ist in Tabelle 11 gezeigt.

Tabelle 11: Auswertung eines Siebversuchs

Maschenweite	2	4	8	Summe
Durchgang [M.-%]	40	70	100	
Korngruppe	0/2	2/4	4/8	
Anteil [M.-%]	40	30	30	
ρ_{Rg} [kg/m ³]	2600	1400	900	
Volumenanteil = $\frac{M}{\rho_G}$ [m ³]	0,0154	0,0214	0,0333	0,0701 $\triangleq 100\%$
Durchgang Vol. [m ³]	0,0154	0,0365	0,0701	
Durchgang [Vol.-%]	22	52	100	

4.2.7.1 Idealsieblinie

Die bekannteste Idealsieblinie ist die von Fuller [14], die sich auf das trockene Betongemisch einschließlich Zement bezieht, durch die Gleichung

$$A_{0-d} = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad [\text{Vol.} - \%]$$

mit z. B. $n = 0,5$ (berücksichtigt die Kornform) ausgedrückt wird und im Wurzelmaßstab dargestellt einer Geraden entspricht.

Beispiel ($n = 0,5$):

$d = 8 \text{ mm}$, $D = 16 \text{ mm}$

$$\Rightarrow A_{8-16} = 100 \cdot \left(\frac{8}{16}\right)^{0,5} = 70,7 \%$$

$$\Rightarrow 8/16: 100 - 70,7 = 29,3 \%$$

Berücksichtigen des Zements

$$A = \frac{100}{1 - \left(\frac{0,1}{D}\right)^n} \cdot \left[\left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{0,1}{D}\right)^n \right]$$

für Sieblinie A $n = 0,667$ bis $0,70$

B $n = 0,25$ bis $0,30$

C $n \sim 0,01$

4.2.7.2 Abschätzen des Wasseranspruchs

Feinheitenmodul [15]

$$F_m = \frac{1}{100} \sum F_{mi} = \frac{1}{100} \sum \frac{R_{i-1} + R_i}{2}$$

R: Rückstände der einzelnen Korngruppen [M.-%]

F-Wert (nach Hummel [16])

$$F_i = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot [\log(10 \cdot d_u) + \log(10 \cdot d_o)]$$

$$F = \sum \frac{a_i}{100} \cdot F_i$$

mit

d_u : untere Prüfkorngröße einer Korngruppe

d_o : obere Prüfkorngröße einer Korngruppe

a_i : Anteil der einzelnen Korngruppen

F_i : F-Wert der einzelnen Korngruppe

Körnungsziffer

$$k = \frac{1}{100} \sum R_i$$

R_i : Rückstand auf Sieb i

Quersummenzahl

$$Q = \sum D_i$$

D_i : Durchgang durch Sieb i

Wasseranspruchszahl (A-Wert nach Kluge [17])

$$A = \sum \frac{a_i}{100} \cdot A_i$$

A_i : Wasseranspruch der einzelnen Korngruppen aus Versuchen

Spezifische Oberfläche [m²/kg] [13]

$$O = O_i = a_f \sum \frac{10 \cdot a_i}{\rho_{Rg} \cdot d_{mi}}$$

a_f : Formbeiwert; für Kugeln gilt $\frac{O}{V} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot 6}{\pi \cdot d^3} = \frac{6}{d}$, also $a_f = 6$

d_{mi} : mittlerer Durchmesser

$$d_{mi} = \sqrt{d_u \cdot d_o}$$

4.2.7.3 Zusammensetzung sich überschneidender Korngruppen (Sieblinienverbesserung) [1, 13]

Wenn der natürliche Kiessand zu fein- oder grobkörnig ist oder gelieferte Korngruppen größere Mengen Unter- oder Überkorn enthalten, muss die Kornzusammensetzung durch Zugabe von Grob- oder Feinkorn so verbessert werden, dass sie einer vorgesehenen Sieblinie möglichst nahe kommt. Das Problem kann als Optimierungsaufgabe rechnerisch oder grafisch gelöst werden, wobei einzelne Einflüsse, z. B. Abweichung von der Soll-Sieblinie im Sandbereich kleiner als im Kiesbereich oder unterschiedliche Preise für Sand und Kies, berücksichtigt werden können.

Für einfache Fälle und als Überschlagsrechnung ist das an folgendem Beispiel erläuterte "Probierverfahren" zweckmäßig.

Gegeben: Sieblinie 1 0/4
Sieblinie 2 0/8

Gesucht: Sieblinie 0/8
mit 60 % Anteil 0/4

Gesucht: Anteil der Sieblinie 1 + 2
60 % + 40 % (Bild 7)

Siebdurchgang in Vol.-%

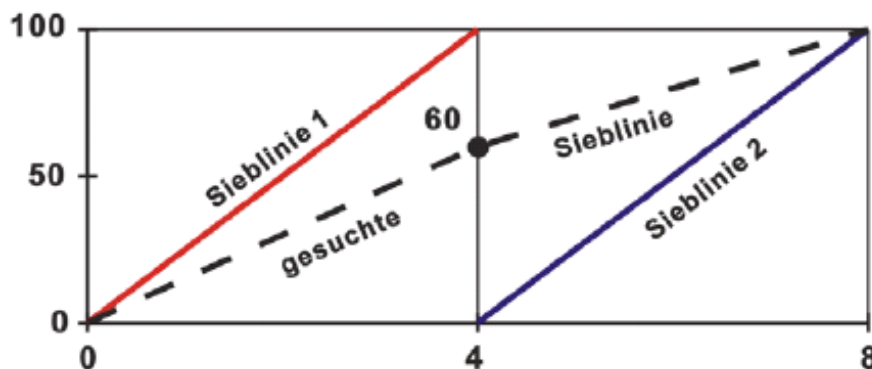


Bild 7: Prinzipielles Vorgehen bei zusammengesetzten Sieblinien [1]

Der Ablauf der Berechnung wird am Beispiel einer Soll-Sieblinie B16 nachfolgend erläutert.

Tabelle 12: Sieblinienberechnung (Soll-Sieblinie B16) [1]

Nr.	Sieb	0,25	0,50	1,0	2	4	8	16	32
1	Natursand Siebdurchgang	36	70	90	100	100	100	100	100
2	Leichte Gesteinskörnung Siebdurchgang	0	1	15	25	42	70	95	100
3	Soll - Sieblinie B16	8	20	32	42	56	76	100	100
4	1. Versuch ③/① · 100	22	29	-	-	-	-	-	-
5	2. Versuch $(22 + 29)/2 = 26$	9	18	23	26	26	26	26	26
6	Rest ③ - ⑤	-1	2	9	16	30	56	74	74
7	$0,74 \cdot ②$ ($0,74 = 1,0 - 0,26$)	0	1	11	18	31	52	70	74
8	IST – Sieblinie ⑤ + ⑦	9	19	34	44	57	78	98	100
9	Abweichungen ⑧ - ③	+ 1	- 1	+ 2	+ 2	+ 1	+ 2	<u>-2</u>	0

Beispiel:

Natursand $\rho_G = 2630 \text{ kg/m}^3$
 Leichte Gesteinskörnung $\rho_G = 1050 \text{ kg/m}^3$

Bedarf: z. B. $0,680 \text{ m}^3$

$$V_1 = 0,26 \cdot 0,680 \text{ m}^3 = 0,177 \text{ m}^3$$

$$V_2 = 0,74 \cdot 0,680 \text{ m}^3 = 0,503 \text{ m}^3$$

$$m_1 = 0,177 \text{ m}^3 \cdot 2630 \text{ kg/m}^3 = 466 \text{ kg}$$

$$m_2 = 0,503 \text{ m}^3 \cdot 1050 \text{ kg/m}^3 = \underline{528 \text{ kg}}$$

$$994 \text{ kg}$$

Massenanteile [%]

$$m_1 \Rightarrow \frac{466 \cdot 100}{994} = 47 \text{ M.} - \%$$

$$m_2 \Rightarrow \frac{528 \cdot 100}{994} = 53 \text{ M.} - \%$$

KG 1, 2 : Korngruppe 1,2
 SL : Sieblinie
 γ_i : Residuen
 x_i : Anteil der KG i
 Bedingung $x_1 + x_2 = 1$
 $x_2 = 1 - x_1$

Nr.	Sieb	Anteil KG 1 +	Anteil KG 2 - Soll = γ
1	0,25	$36 \cdot x_1 +$	$0 \cdot x_2 - 8 = \gamma_1$
2	0,50	$70 \cdot x_1 +$	$1 \cdot x_2 - 20 = \gamma_2$
3	1	$90 \cdot x_1 +$	$15 \cdot x_2 - 32 = \gamma_3$
4	2	$100 \cdot x_1 +$	$25 \cdot x_2 - 42 = \gamma_4$
5	4	$100 \cdot x_1 +$	$42 \cdot x_2 - 56 = \gamma_5$
6	8	$100 \cdot x_1 +$	$70 \cdot x_2 - 75 = \gamma_6$
7	16	$100 \cdot x_1 +$	$95 \cdot x_2 - 100 = \gamma_7$
8	32	$100 \cdot x_1 +$	$100 \cdot x_2 - 100 = \gamma_8$

Mit $X_2 = 1 - X_1 \rightarrow \gamma_i$

Nr.	Sieb	γ_i	
1	0,25	$(36 - 0) x_1 - (2 - 0) x_2$	$36 x_1 = 8$
2	0,50	$(70 - 1) x_1 - (20 - 1) x_2$	$69 x_1 = 19$
3	1	$(86 - 15) x_1 - (32 - 15) x_2$	$75 x_1 = 17$
4	2	$(100 - 25) x_1 - (42 - 25) x_2$	$75 x_1 = 17$
5	4	$(100 - 42) x_1 - (56 - 42) x_2$	$56 x_1 = 14$
6	8	$(100 - 70) x_1 - (75 - 70) x_2$	$30 x_1 = 6$
7	16	$(100 - 95) x_1 - (100 - 95) x_2$	$5 x_1 = 5$
8	32	$(100 - 100) x_1 - (100 - 100) x_2$	

$\Sigma \gamma_i^2 = \text{Min.}$:

$$x_1 = \frac{\Sigma y^2}{\Sigma xy} \rightarrow 0,244 \quad \hat{=} 24,4\%$$

$$x_2 = 1 - 0,244 = 0,756 \quad \hat{=} 75,6\%$$

4.2.8 Kornform [13]

Die Kornform sollte möglichst gedrungen sein. Ungünstig geformte Körner, d.h., plattige oder spießige Körner verringern die Verdichtungswilligkeit sowie die Festigkeit und Stabilität der gebundenen und ungebundenen Korngemische. Die Kornform von groben Gesteinskörnungen wird entweder durch die Plattigkeitskennzahl (engl.: flakiness index) (FI) (Referenzprüfverfahren) oder die Kornformkennzahl (engl.: shape index) (SI) bestimmt (Tabelle 13). Ein Korn gilt als ungünstig geformt, wenn sein Verhältnis Länge zu Dicke größer als 3 : 1 ist (Kornformkennzahl). Der Anteil ungünstig geformter Körner darf im Regelfall ein Höchstmaß von 55 M.-% nicht überschreiten.

Tabelle 13: Kategorien für Höchstwerte der Plattigkeitskennzahl und der Kornformkennzahl [3]

Plattigkeitskennzahl	Kategorie FI	Kornformkennzahl	Kategorie SI
≤ 15	FI ₁₅	≤ 15	SI ₁₅
≤ 20	FI ₂₀	≤ 20	SI ₂₀
≤ 35	FI ₃₅	≤ 40	SI ₄₀
≤ 50	FI ₅₀	≤ 55	SI ₅₅
> 50	FI_{angegeben}	> 55	SI_{angegeben}
keine Anforderung	FI _{NR}	keine Anforderung	SI _{NR}

4.2.9 Feinanteile

Als Feinanteile (engl.: fines) werden bei Gesteinskörnung die Anteile bezeichnet, die das 0,063-mm-Sieb passieren. Sie sind im Allgemeinen unschädlich, wenn ihr Massenanteil 3 % nicht übersteigt. Der Nachweis der Unschädlichkeit von Feinanteilen kann durch Prüfung des Sand-äquivalent-Wertes (SE) oder des Methylen-Blau-Wertes (MB) oder durch zurückliegende Erfahrungen über die zufrieden stellende Verwendung in Beton erfolgen. Tabelle 14 enthält die Kategorien für Höchstwerte des Gehalts an Feinanteilen nach DIN EN 12620 [3].

Tabelle 14: Kategorien für Höchstwerte des Gehalts an Feinanteilen [3]

Gesteinskörnung	Siebdurchgang durch das 0,063-mm-Sieb in Massenanteil in Prozent	Kategorie f
Grobe Gesteinskörnung	$\leq 1,5$	$f_{1,5}$
	≤ 4	f_4
	> 4	$f_{\text{angegeben}}$
	keine Anforderung	f_{NR}
Natürlich zusammengesetzte Gesteinskörnung 0/8 mm	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	> 16	$f_{\text{angegeben}}$
	keine Anforderung	f_{NR}
Korngemisch	≤ 3	f_3
	≤ 11	f_{11}
	> 11	$f_{\text{angegeben}}$
	keine Anforderung	f_{NR}
Feine Gesteinskörnung	≤ 3	f_3
	≤ 10	f_{10}
	≤ 16	f_{16}
	≤ 22	f_{22}
	> 22	$f_{\text{angegeben}}$
	keine Anforderung	f_{NR}

4.2.10 Anteil gebrochener Oberflächen

Sande und Kiese zeichnen sich durch eine glatte bis mäßig raue Oberfläche aus. Beton und Mörtel aus solchen Gesteinskörnungen sind besonders gut zu verarbeiten. Bei einer rauen Oberfläche ist die Haftung des Zementsteins und die Zugfestigkeit des Betons besser, andererseits aber auch der Wasseranspruch etwas größer.

In Asphaltsschichten ist für die Kraftübertragung von Korn zu Korn eine möglichst raue Oberfläche günstig, die am besten bei gebrochenen Körnern, die auch aus Kies hergestellt werden können, gewährleistet ist. Für Fahrbahndecken aus Asphalt ist für die Körnung größer 2 mm deshalb gebrochenes Korn vorgeschrieben. Dadurch soll neben einer Verbesserung der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche auch die Standfestigkeit der Fahrbahndecke erhöht werden.

Als bruchflächig gilt ein Korn, dessen Oberfläche zu mindestens 50 % aus Bruchflächen besteht. Bei Schotter, Splitt und Edelsplitt nach TL Gestein-StB müssen mindestens 90 M.-% der Körner bruchflächig sein, wobei mindestens 30 % der Körner vollständig gebrochen sein müssen. Es darf nicht mehr als 1 M.-% ungebrochene Körner enthalten sein.

Die Entscheidung für eine gebrochene oder ungebrochene Gesteinskörnungen hängt oft vom örtlichen Vorkommen ab. Im Bereich der Mittelgebirge wird im Ingenieurbau bei der Herstellung von Beton neben Kies auch Splitt aus Festgestein verwendet. Brechsand aus Festgestein wird dagegen nur selten verwendet, da er oft zu viel Feinstteile enthält. In jenen Gegenden Süddeutschlands, in welchen wenig Natursand vorkommt, verwendet man häufig aus Kies hergestellten Brechsand (Kies-Edelbrechsand).

4.2.11 Muschelschalengehalt grober Gesteinskörnungen

Für grobe Gesteinskörnung, die aus dem Meer gewonnen wurde, ist der Muschelschalengehalt (engl.: shell content) SC nachzuweisen (Tabelle 15).

Tabelle 15: Kategorien für den Höchstwert des Muschelschalengehaltes grober Gesteinskörnungen [3]

Muschelschalengehalt in Prozent	Kategorie SC
≤ 10	SC ₁₀
> 10	SC _{angegeben}
keine Anforderung	SC _{NR}

4.3 Physikalische Anforderungen

4.3.1 Dichte [1, 13]

Es gibt Definitionen für die verschiedenen Dichten (Bild 8).

- Die **Dichte** ρ [kg/m³] ist der Quotient aus Masse und porenfreiem Stoffvolumen.
- Als **Kornrohichte** ρ_G [kg/m³] wird der Quotient aus Masse und Stoffvolumen einschließlich der im Stoff enthaltenen Kornporen verstanden.
- Die **Schüttdichte** ρ_s [kg/m³] bezeichnet den Quotienten aus Masse und Stoffvolumen einschließlich der im Stoff enthaltenen Kornporen und aller Hohlräume zwischen den Körnern.

Aus den Dichten lassen sich die Porenräume nach den nachstehenden Formeln berechnen. Die Ergebnisse werden bei der Stoffraumrechnung für Beton benötigt oder können zur Abschätzung des Zementleimbedarfs für Beton herangezogen werden.

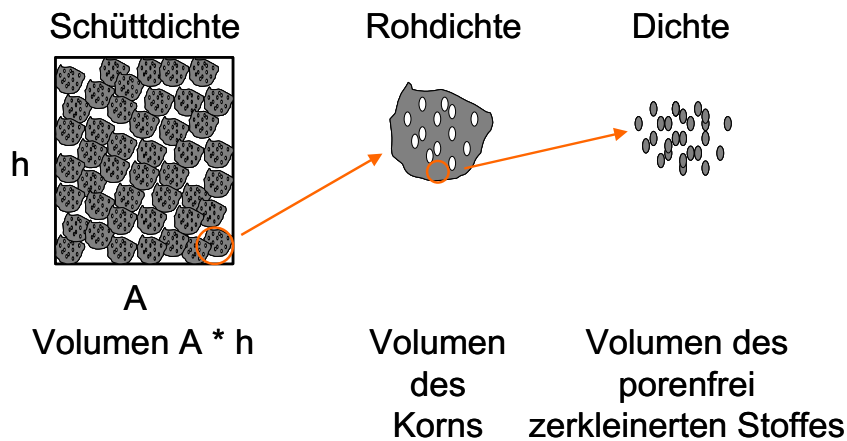


Bild 8: Zusammenhang zwischen verschiedenen Dichten

Gesamtporigkeit

$$P_s = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho}\right) \cdot 100 \quad [\text{Vol.} - \%]$$

Kornporigkeit

$$P_k = \left(1 - \frac{\rho_G}{\rho}\right) \cdot 100 \quad [\text{Vol.} - \%]$$

Haufwerksporigkeit

$$P_H = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_G}\right) \cdot 100 = P_s - P_k \cdot \frac{\rho_s}{\rho_G} \quad [\text{Vol.} - \%]$$

Dichtigkeitsgrad des Haufwerks

$$d_H = \frac{\rho_s}{\rho_G} \cdot 100 \quad [\text{Vol.} - \%]$$

Ein Beispiel für den Einsatz dieser Beziehungen ist nachfolgend für eine leichte Gesteinskörnung durchgerechnet.

Ausgangsdaten:

$$\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_G = 1270 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_s = 570 \text{ kg/m}^3$$

Gesamtporigkeit

$$P_s = \left(1 - \frac{570}{2600}\right) \cdot 100 = 78,1 \% \text{ bezogen auf das Gesamtvolumen.}$$

Kornporigkeit

$$P_k = \left(1 - \frac{1270}{2600}\right) \cdot 100 = 51,2 \% \text{ bezogen auf das Kornvolumen.}$$

Haufwerksporigkeit

$$P_H = \left(1 - \frac{570}{1270}\right) \cdot 100 = 55,1 \% \text{ bezogen auf das } \textit{Gesamt}\text{volumen.}$$

Kornvolumen

$$V_G = 100 - 55,1 = 44,9 \%$$

Kornporen

$$P_K = 78,1 - 55,1 = 23,0 \% \text{ oder}$$

$$P_K = 51,2 \cdot 0,449 = 23,0 \% \text{ bezogen auf das } \textit{Gesamt}\text{volumen.}$$

Bilanz bezogen auf das *Gesamt*volumen.

$$\begin{array}{l} 23,0 \% \text{ Kornporen} \\ + 55,1 \% \text{ Haufwerksporen} \\ \hline = 78,1 \% \text{ Gesamtporen} \\ + 21,9 \% \text{ porenfreier Stoff} \\ \hline = 100,0 \% \end{array}$$

Bilanz bezogen auf das *Korn*volumen.

$$\begin{array}{l} 51,2 \% \text{ Kornporen} \\ + 48,8 \% \text{ porenfreier Stoff} \\ \hline = 100,0 \% \end{array}$$

4.3.2 Feuchtigkeit und Wasseraufnahme

Wasser kann bei Gesteinskörnungen als Oberflächenfeuchte vorliegen und/oder als Kernwasser vorhanden sein. Die Wasseraufnahme des Kerns spielt bei den meisten normalen Gesteinskörnungen keine Rolle, ist jedoch bei porösem Material wie leichter Gesteinskörnung und Recycling-Gesteinskörnung von Bedeutung.

Die Oberflächenfeuchte muss bekannt sein, da dieses Wasser unmittelbar bei der Herstellung von Beton verfügbar ist und für das Einstellen eines konstanten Wasserzementwerts berücksichtigt werden muss. Die Feuchtigkeit ändert sich mit dem Transport und mit den Lagerungs- und Klimabedingungen. Sand kann wegen seiner großen Oberfläche mehr Feuchtigkeit als gröbere Korngruppen halten und wird daher meist mit mehr als 5 M.-% Wassergehalt angeliefert.

Leichte Gesteinskörnung und Recycling-Gesteinskörnung sind aufgrund ihrer Porosität in der Lage, Wasser im Inneren aufzunehmen. Die Geschwindigkeit dieser Wasseraufnahme hängt von der Porenstruktur der Gesteinskörnung, dem bereits vorhandenen Wassergehalt und der vorhandenen Feuchtigkeitsverteilung ab. Die Wasseraufnahme erfolgt zum größten Teil innerhalb der ersten 60 Minuten. Die weitere Wasseraufnahme ist so gering, dass sie normalerweise für die Herstellung von Beton nicht berücksichtigt werden muss. Bei der Herstellung von Beton muss die Wasseraufnahme berücksichtigt werden, damit der Wasserzementwert in ausreichend engen Grenzen eingehalten wird. Das Anmachwasser muss um die Wasseraufnahme innerhalb der ersten 60 Minuten erhöht werden. Der resultierende Wasserzementwert ist dadurch größer als der „wirksame“ Wasserzementwert.

Leichte Brechsande (z. B. aus Bims, Blähschiefer oder Blähton) können eine Wasseraufnahme von über 35 M.-% haben [18]. Die Wasseraufnahme dieser Sande kann nach DIN V 18004 [19]

mit dem „BVK-Verfahren“ bestimmt werden. Für die Berechnung des „wirksamen“ Wasserzementwerts sollte nur 70 % dieser Wasseraufnahme in Ansatz gebracht werden, da die Leichtsande in der Praxis aus dem Bindemittelleim weniger Wasser aufsaugen können, als in der Prüfung ermittelt wurde [20].

4.3.3 Kornfestigkeit grober Gesteinskörnung [1, 13]

Gesteinskörnung muss ausreichend fest sein, um das Herstellen von Betonen der üblichen Festigkeitsklassen zu ermöglichen. Diese Forderung wird von normalen Gesteinskörnungen im Allgemeinen erfüllt. Gesteinskörnung aus gebrochenem Festgestein kann ohne weitere Untersuchung als ausreichend fest angenommen werden, wenn das Gestein im durchfeuchteten Zustand eine Druckfestigkeit von mindestens 100 MPa aufweist. Bei Beton wird die angestrebte Festigkeit in erster Linie durch die Zusammensetzung des Bindemittels und nur unwesentlich durch die Gesteinsfestigkeit beeinflusst.

Bei leichten Gesteinskörnungen wird die Kornfestigkeit im Drucktopf geprüft [2, 21]. Der Wert der Kornfestigkeit leichter Gesteinskörnungen dient ausschließlich der Kontrolle der Produktion. Zwischen der Kornfestigkeit leichter Gesteinskörnungen und den Eigenschaften bei ihrer Endanwendung, insbesondere der Betondruckfestigkeit, besteht keine allgemein gültige Beziehung. Da die Kornfestigkeit von der Kornform beeinflusst wird, ist ein Vergleich unterschiedlicher leichter Gesteinskörnungen anhand der Kornfestigkeitswerte nicht zielführend [18].

4.3.4 Widerstand gegen Zertrümmerung grober Gesteinskörnung

Der Widerstand gegen Zertrümmerung ist wichtig bei hochfesten Betonen und Betonflächen, die einer schlagenden Beanspruchung ausgesetzt sind. Er wird nach dem Los-Angeles-Verfahren LA (Referenzverfahren) (Tabelle 16) oder mittels des Schlagzertrümmerungswerts SZ bestimmt.

Tabelle 16: Kategorien für Höchstwerte von Los-Angeles-Koeffizienten [3]

Los-Angeles-Koeffizient	Kategorie LA
≤ 15	LA ₁₅
≤ 20	LA ₂₀
≤ 25	LA ₂₅
≤ 30	LA ₃₀
≤ 35	LA ₃₅
≤ 40	LA ₄₀
≤ 50	LA ₅₀
> 50	LA _{angegeben}
keine Anforderung	LA _{NR}

Bei der weltweit eingesetzten "Los-Angeles-Prüfung" wird die zu untersuchende Probe gemeinsam mit 6 bis 12 Stahlkugeln in eine Stahltrommel gegeben, die sich 500-mal um die eigene Achse dreht und das Prüfgut durch Abrieb- und Schlagbeanspruchung zerkleinert.

In Deutschland wird die Festigkeit von Gesteinskörnungen für den Straßenbau bei Routineuntersuchungen mit dem Schlagversuch geprüft (Tabelle 17). Dabei befindet sich das Prüfgut in einem Mörser mit einem Stempel, auf den ein Fallhammer schlägt. Im Straßenbau werden je

nach Art der herzustellenden Schicht und je nach Verkehrsbelastung der Straße unterschiedliche Anforderungen an den Widerstand gegen Schlagzertrümmerung von Gesteinskörnungen gestellt.

Tabelle 17: Kategorien für Höchstwerte des Widerstandes gegen Schlagzertrümmerung [3]

Schlagzertrümmerungswert %	Kategorie SZ
≤ 18	SZ ₁₈
≤ 22	SZ ₂₂
≤ 26	SZ ₂₆
≤ 32	SZ ₃₂
> 32	SZ _{angegeben}
keine Anforderung	SZ _{NR}

Zwischen den Ergebnissen der beiden Verfahren kann ein Zusammenhang hergestellt werden (Bild 9).

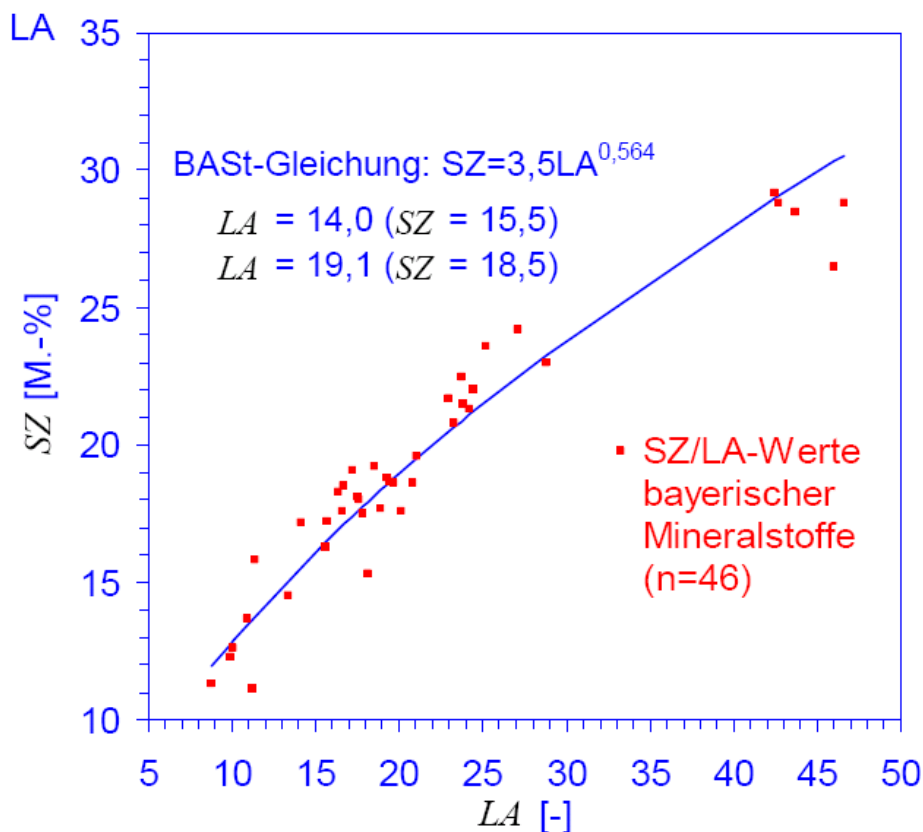


Bild 9: Zusammenhang zwischen den Ergebnissen des Los-Angeles-Versuchs und des Schlagzertrümmerungsversuchs [1]

4.3.5 Widerstand gegen Verschleiß

Zahlreiche Bauteile sind einer hohen Verschleißbeanspruchung ausgesetzt. Hierzu zählen Industriefußböden, Ausläufe von Silos, Kohlerutschen und Gerinnen mit schnell strömendem oder Geschiebe führendem Wasser. Besonders verschleißfest sind Gesteinskörnungen mit einem hohen Quarzanteil, gedrungener Form und nur mäßig rauer Kornoberfläche. Die feine

Gesteinskörnung sollte überwiegend aus Quarz oder vergleichbar harten Mineralen bestehen. Für den Verschleißwiderstand der Bauteile ist die richtige Zusammensetzung des Estrichs oder Betons von größter Wichtigkeit. Es muss möglichst viel verschleißfeste Gesteinskörnung nahe der Oberfläche liegen, weil der Feinmörtel, in den die Gesteinskörnung eingebettet ist, stets weniger verschleißfest ist. Tabelle 18 führt die Kategorien für den Widerstand gegen Verschleiß auf.

Tabelle 18: Kategorien für Höchstwerte des Widerstands gegen Verschleiß [3]

Micro-Deval-Koeffizient	Kategorie M_{DE}
≤ 10	M_{DE10}
≤ 15	M_{DE15}
≤ 20	M_{DE20}
≤ 25	M_{DE25}
≤ 30	M_{DE30}
≤ 35	M_{DE35}
> 35	M_{DE} angegeben
keine Anforderung	M_{DENR}

4.3.6 Widerstand gegen Polieren

Ein hoher Widerstand gegenüber der polierenden Wirkung des Verkehrs ist vor allem in Fahrbahndecken wichtig. Gesteinskörnungen aus unterschiedlichen Mineralien, z. B. der aus Quarz, Feldspat und Glimmer bestehende Granit, verhalten sich besser als viele monomineralische Gesteine wie z. B. Kalkstein. Tabelle 19 führt die Kategorien für den „Polished stone value“ an.

Tabelle 19: Kategorien für Höchstwerte des Widerstandes gegen Polieren [3]

Polierwert	Kategorie PSV
≥ 68	PSV_{68}
≥ 62	PSV_{62}
≥ 56	PSV_{56}
≥ 50	PSV_{50}
≥ 44	PSV_{44}
Zwischenwerte und solche < 44	PSV angegeben
keine Anforderung	PSV_{NR}

4.4 Dauerhaftigkeit

4.4.1.1 Frost- und Frost-Tausalz widerstand

Damit Beton im durchfeuchteten Zustand problemlos Temperaturwechseln um den Gefrierpunkt des Wassers ausgesetzt sein kann, muss er einen ausreichend hohen Frostwiderstand haben. Das Ausfrieren einzelner Körner an der Betonoberfläche lässt sich aber oft nicht ganz vermeiden. Je nach Beanspruchungsart werden unterschiedlich stark wassergesättigte Proben der Gesteinskörnung (meist Kornklasse 8/16 mm) wiederholten Frost-Tau-Wechseln (meist 10)

ausgesetzt. Hier ist davon auszugehen, dass bei weniger als 8 M.-% Absplitterungen ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand der Gesteinskörnung vorliegt. Für den Frost-Tausalz-Widerstand hat sich der Frost-Tau-Wechsel-Versuch mit einer niedrig konzentrierten Tausalzlösung (1 % NaCl-Lösung, Frost-Tausalz-Versuch) als praxisgerecht erwiesen.

Nach der Frost-Prüfung wird das untersuchte Material auf ein Sieb mit der halben Lochweite der unteren Prüfkorngröße gegeben und von Hand nass gesiebt. Der Durchgang durch dieses Prüfsieb in M.-% ist der Maßstab für den Frostwiderstand. In Tabelle 20 sind die Kategorien für die Höchstwerte der Frost-Tau-Widerstandsfähigkeit (Tabelle 20) angegeben.

Tabelle 20: Kategorien für Höchstwerte des Frost-Tau-Widerstands [3]

Frost-Tau-Widerstand Masseverlust in Prozent^a	Kategorie <i>F</i>
≤ 1	F ₁
≤ 2	F ₂
≤ 4	F₄
> 4	F _{angegeben}
keine Anforderung	F _{NR}
^a In extremen Situationen von kaltem Wetter und/oder einer Sättigung mit Salz oder Taumittellösung kann es sinnvoller sein, Prüfungen unter Verwendung einer Salzlösung oder Urea, wie in EN 1367-1,1999, Anhang B, beschrieben, durchzuführen. Die Grenzwerte dieser Tabelle sind dann nicht anwendbar.	

4.4.1.2 Raumbeständigkeit (auch HOS und Sonnenbrand) [12, 15]

Basalt kann ein Mineral (Analcim) aufweisen, das unter Einfluss von Luftfeuchtigkeit, Sonnenlicht und Wärme sich unter Volumenvergrößerung umwandeln kann. Dabei wird das Gefüge des Gesteins geschädigt und es treten Risse auf, die den vollständigen Zerfall des Korn bewirken können. Ein ähnlicher Vorgang kann bei Hochofenstückschlacke oder Stahlwerksschlacke auftreten. Hier wird die Zerstörung durch die Umwandlung von freiem Kalk (CaO) bewirkt.

4.4.1.3 Alkali-Kieselsäure-Reaktivität

Einige natürliche Gesteinskörnungen enthalten alkalireaktive Kieselsäure. Diese Gesteinskörnungen können mit dem im Porenwasser des Betons gelösten Alkalihydroxid zu einem quellfähigen Alkalisäuregel reagieren. Unter bestimmten Voraussetzungen kann diese Reaktion zu einer Volumenvergrößerung mit anschließender Schädigung des Betons führen. Diese Volumenvergrößerung wird als „Alkalitreiben“ und die ursächliche chemische Reaktion als „Alkali-Kieselsäure-Reaktion“ (AKR) bezeichnet. Ablauf und Ausmaß der Reaktion hängen insbesondere von der Art und Menge der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung, ihrer Größe und Verteilung, dem Alkalihydroxidgehalt in der Porenlösung sowie den Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen des erhärteten Betons ab. Bei trockenem Beton kommt die Alkali-Kieselsäure-Reaktion zum Stillstand. Durch Alkalizufuhr von außen kann die AKR verstärkt werden. Eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton kann auch noch nach Monaten oder Jahren an einem zuvor unter normalen Bedingungen erhärteten Beton zu Ausblühungen, Ausscheidungen, Ausplatzungen von nahe an der Oberfläche liegenden alkaliempfindlichen Gesteinskörnern (pop-outs), ferner zu netzartigen oder strahlenförmig verlaufenden Rissen führen. Das Ausmaß der Schäden nimmt bis zum Festigkeitsverlust durch Gefügestörungen zu, wenn mehrere ungünstige Bedingungen zusammentreffen. [22]

In Deutschland wird die Verwendung in Beton von Gesteinskörnung, die alkalireaktive Kieselsäure enthalten, in der Alkali-Richtlinie [22] geregelt. Dort ist das kritisch eiszeitliche Ablagerungsgebiet und der angrenzende Bereich für die Vorkommen von Opalsandstein, Kieselkreide und Flint verzeichnet (Bild 10). Darüber hinaus gibt es weitere kritische Gesteinskörnungen, die insbesondere als gebrochene Körnung alkaliempfindlich sind. Hierzu zählen:

- Gesteinskörnungen aus gebrochener Grauwacke,
- gebrochenem Quarzporphyr (Rhyolith),
- gebrochenem Kies des Oberrheins,
- rezyklierten Gesteinskörnungen
- ungebrochene Gesteinskörnungen (Kiese) mit mehr als 10 M.-% gebrochener Anteile der zuvor genannten Gesteinskörnungen,
- ungebrochene Gesteinskörnungen (Kiese), unabhängig vom Anteil an gebrochenen Körnern aus den Flussläufen und anderen Ablagerungsräumen in den Gebieten der Saale, Elbe, Mulde und Elster im angrenzenden Bereich gemäß Bild 10 sowie aus diesen hergestellte gebrochene Gesteinskörnungen (Kiessplitte).

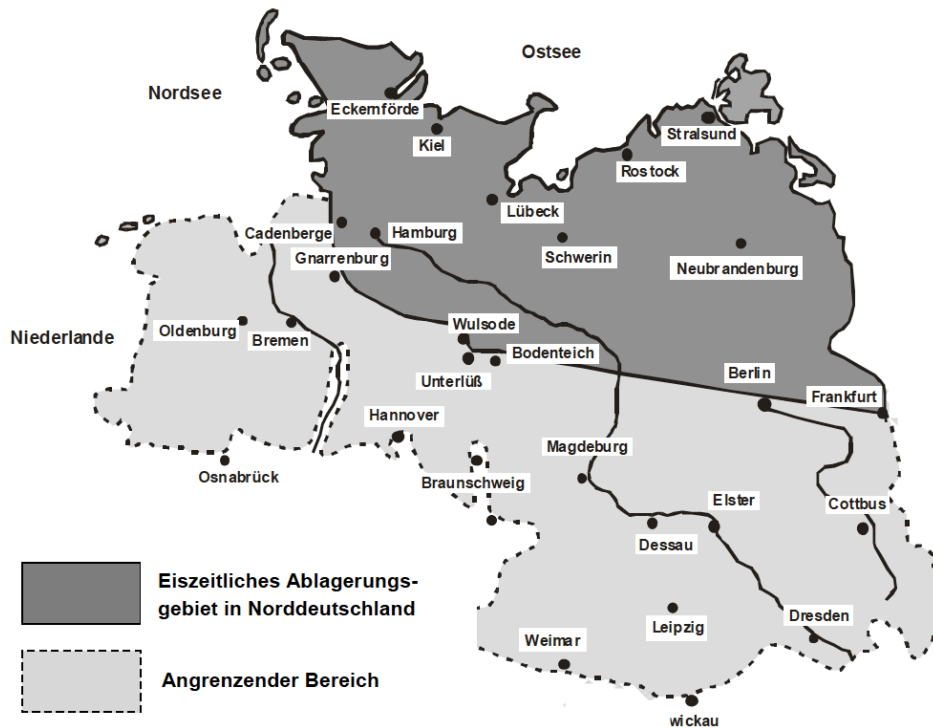


Bild 10: Vorkommen von Gesteinskörnungen mit Alkali-Kieselsäure-Reaktivität [22]

Gesteinskörnungen werden hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit nach folgendem Schema (Bild 11) eingestuft.

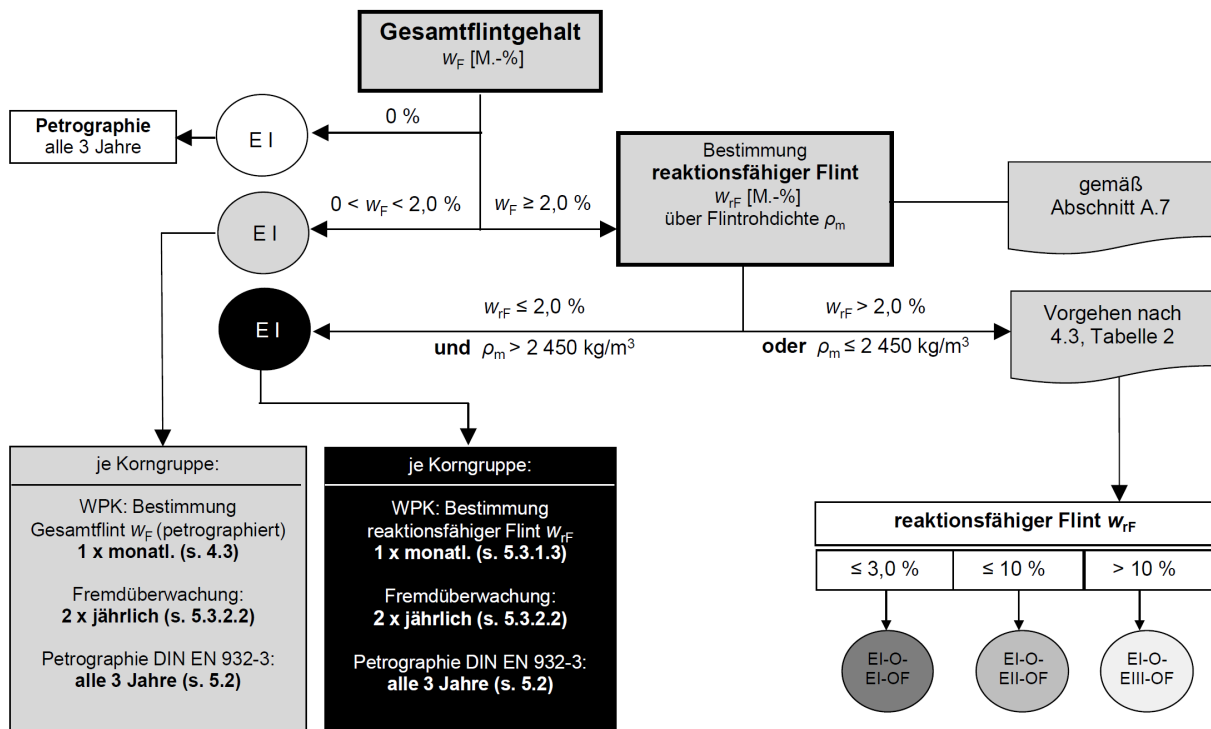


Bild 11: Systematik zur Prüfung und Einstufung der Gesteinskörnungen mit Flint [22]

4.5 Chemische Anforderungen

Die Grenzwerte für die chemischen Anforderungen beziehen sich immer auf die Masse der Gesteinskörnung. Damit leichte Gesteinskörnungen nicht wegen ihrer geringeren Dichte benachteiligt werden, dürfen die Messwerte vor der Beurteilung auf einen Vergleichswert umgerechnet werden [2].

$$V_c = V_m \cdot \frac{\text{Schüttdichte}}{1500}$$

Dabei ist

V_c der Vergleichswert;

V_m der nach EN 1744-1 [23] gemessene Wert;

1500 die angenommene Nennschüttdichte einer Gesteinskörnung normaler Dichte.

4.5.1 Chloride

Stahl angreifende Stoffe wie Chloride, aber auch Nitrate und Halogenide (außer Fluorid) dürfen nicht in schädlichen Mengen im Stahlbeton enthalten sein. Der Gehalt an wasserlöslichem Chlorid darf bei Gesteinskörnung für Beton und Stahlbeton 0,04 M.-%, für Spannbeton 0,02 M.-%, nicht überschreiten [6].

4.5.2 Schwefelhaltige Bestandteile

Gips und Anhydrit können durch chemische Reaktion mit dem Zementstein im feuchten, erhärteten Beton zum Treiben führen. Schwefelkies (Pyrit) kann schon in geringen Mengen die Gesteinskörnung für Sichtbeton unbrauchbar machen. Pyrit (FeS_2 , messingfarbene kubische Kristalle) verwittert unter Bildung von den Beton weiter angreifenden Stoffen. Grenzen für den säurelöslichen Sulfatgehalt enthält Tabelle 21.

Tabelle 21: Kategorien für Höchstwerte säurelöslicher Sulfatgehalte [3]

Gesteinskörnung	Säurelöslicher Sulfatgehalt in Masseanteilen in Prozent	Kategorie <i>AS</i>
Alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstüchschlacken	$\leq 0,2$	AS _{0,2}
	$\leq 0,8$	AS _{0,8}
	$> 0,8$	AS _{angegeben}
	keine Anforderung	AS _{NR}
Hochofenstüchschlacken	$\leq 1,0$	AS _{1,0}
	$> 1,0$	AS _{angegeben}
	keine Anforderung	AS _{NR}

4.6 Andere Bestandteile

4.6.1 Bestandteile, die das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten von Beton verändern

Enthält eine Gesteinskörnung organische oder andere Stoffe, die das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten von Beton beeinflussen, so muss festgestellt werden, ob der Anteil solcher Stoffe noch akzeptabel ist oder nicht. Maßgebend ist das Verhalten im Beton. Deshalb sieht DIN EN 12620 [3] als Referenzversuch die Mörtelprüfung vor, bei der sich infolge des Einflusses solcher Stoffe die Erstarrungszeit um nicht mehr als 2 h verlängern und die Druckfestigkeit um nicht mehr als 15 % vermindern darf.

Die aufwendige Mörtelprüfung ist allerdings erst erforderlich, wenn sich in einem Vorversuch Hinweise auf das Vorhandensein organischer Stoffe ergeben haben. Die Prüfung der Gesteinskörnung mit Natronlauge kann bereits Hinweise geben.

Industriell hergestellte Gesteinskörnungen, die in ihrem Herstellprozess eine thermische Behandlung bei entsprechend hohen Temperaturen erfahren haben, wie dies bei den industriell hergestellten leichten Gesteinskörnungen der Fall ist, können herstellbedingt keine organischen Bestandteile enthalten. Eine Prüfung ist deshalb nicht erforderlich.

4.6.2 Bestandteile, die die Oberflächenbeschaffenheit von Beton verändern

Quellfähige Bestandteile, wie z. B. Holz oder Kohlestücke, können zu Verfärbungen oder Abspaltungen der Oberfläche des Betons führen. Sie können auch den Korrosionsschutz der Stahleinlagen gefährden.

4.7 Weitere Anforderungen

4.7.1 Farbe

Das Aussehen der Gesteinskörnungen ist nur in Sonderfällen von praktischer Bedeutung. Bei Edelputzen und Waschbeton wird auf eine gefällige optische Wirkung Wert gelegt. Auch für weißen oder farbigen Sichtbeton müssen die Gesteinskörnungen entsprechend ausgewählt werden. In Fahrbahndecken, insbesondere in Tunnels, tragen helle Mineralstoffe zur Verkehrssicherheit bei. Auch bei Straßen in Stadtgebieten sind helle Fahrbahndecken vorteilhaft, weil sie

nachts weniger stark beleuchtet werden müssen. Neben der Eigenfarbe des Gesteins spielt bei Steinmehlen die Korngröße eine wichtige Rolle: Je feiner ein Steinmehl gemahlen ist, desto heller ist seine Farbe.

4.7.2 E-Modul

Die Fähigkeit, durch äußere Kräfte oder Momente hervorgerufene Formänderungen nach Fortfall der Ursache spontan und ohne Rest zurückzubilden, spielt bei dem Baustoff Beton eine große Rolle. Der Materialkennwert, der diese Eigenschaft beschreibt, ist der Elastizitätsmodul (E-Modul), der sich ergibt aus dem Quotienten von Normalspannung und elastischer Dehnung. Er hängt bei Beton von den Eigenschaften der Gesteinskörnung und Zementsteins ab. Der E-Modul der Gesteine kann sehr unterschiedlich sein und wird z.B. bei Kies und Kiessplitt stark von der petrografischen Zusammensetzung bestimmt. Der E-Modul der Gesteinskörnung beeinflusst außerdem die zeitabhängigen Verformungen. So verringert "steife" Gesteinskörnung, also Material mit hohem E-Modul, das Kriechen und Schwinden von Beton. Leichtbeton hat aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls leichter Gesteinskörnung einen niedrigeren E-Modul als Normalbeton.

4.7.3 Wärmeleitfähigkeit

Die thermisch bedingte Längenänderung von Gesteinskörnung, die mit der Temperaturdehnzahl charakterisiert wird, beeinflusst sehr stark die Temperaturdehnzahl des Betons. Sie ist bei leichter Gesteinskörnung am geringsten. Bei den normalen Gesteinskörnungen weist Kalkstein niedrigere Werte auf als Quarz. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Verwendung von Gesteinskörnung mit geringer Temperaturdehnzahl die Rissneigung des Betons verringert wird.

4.8 Regelanforderungen

Die **Regelanforderungen** an Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 [3] sind in DIN 1045-2 [6] festgelegt. Für diese Regelanforderungen wurden aus der DIN EN 12620 für die betreffenden Eigenschaften die Kategorien ausgewählt, die das gewünschte Qualitätsniveau beschreiben z. B. bei der Kornform SI₅₅. Entsprechend dem Verwendungszweck des Betons können die gestellten Anforderungen an die Gesteinskörnung modifiziert werden. Selbstverständlich kann ein Abnehmer von Gesteinskörnungen bei Bedarf eine von der Regelanforderung abweichende Kategorie auswählen. Dies ist dann im Liefervertrag festzuhalten. Existieren für eine Eigenschaft Kategorien in der europäischen Norm, so muss aus diesen ausgewählt werden. Die Festlegung einer eigenen Kategorie wie z. B. SI₁₅ ist nicht gestattet. Um vorhandene Ressourcen optimal zu nutzen können „verminderte“ Kategorien z. B. bei Gehalt an Feinanteilen von feinen Gesteinskörnungen aus der zugrunde liegenden DIN EN 12620 ausgewählt werden. Darüber hinaus können zusätzliche, „erhöhte“ Anforderungen z. B. hinsichtlich des Gehalts an Chloriden oder des Frost-Tau-Widerstands oder weitere Anforderungen an Recycling-Gesteinskörnungen gestellt werden.

Die nationale Festlegung von Regelanforderungen (Tabelle 22, Tabelle 23) stellt für die Praxis eine erhebliche Erleichterung dar. Der Hersteller muss nicht jede Eigenschaft separat aufführen, solange sein Material die Regelanforderungen erfüllt.

Tabelle 22: Eigenschaften von Gesteinskörnungen, für die Regelanforderungen festgelegt wurden [12]

Eigenschaft	Anforderungskategorien		Regelanforderung	
Kornzusammensetzung	Feine Gesteinskörnung	Grenzabweichungen für die vom Hersteller angegebene typische Kornzusammensetzung entweder nach Tab. 4 oder nach Anhang C (reduzierte Grenzabweichungen) der Norm	Tab. 4	
	Grobe Gesteinskörnung	enggestuft	15 M.-% Überkorn (G_{D85}); 20 M.-% Überkorn (G_{D90})	G_{D85}
		weitgestuft	10 M.-% Überkorn (G_{D90})	G_{D90}
Kornmisch	10 M.-% Überkorn (G_{D90}); 15 M.-% Überkorn (G_{D85})	G_{D90}		
Kornform	Plattigkeitskennzahl; Anteil ungünstig geformter Körner $\leq 15\%$ (Fl_{15}); 20 % (Fl_{20}); 35 % (Fl_{35}); 50 % (Fl_{50}); keine Anforderung (Fl_{NR})		Fl_{50}	
Muschelschalengehalt	Muschelschalengehalt für grobe Gesteinskörnungen darf 10 M.-% nicht überschreiten			
Feinanteile [Höchstwerte für den Gehalt an Feinanteilen $\leq 0,063$ mm in M.-%]	Feine Gesteinskörnung	4 (f_4); 10 (f_{10}); 16 (f_{16}); 22 (f_{22}); keine Anforderung (f_{NR})	f_4	
	Grobe Gesteinskörnung	1,0 ($f_{1,0}$); 1,5 ($f_{1,5}$); 4 (f_4); keine Anforderung (f_{NR})	$f_{1,0}$	
	Kornmisch	2 (f_2); 11 (f_{11}); keine Anforderung (f_{NR})	f_2	
Frostwiderstand	Zulässiger Masseverlust in % nach Frostversuch in Wasser: ≤ 1 (F_1); ≤ 2 (F_2); ≤ 4 (F_4); keine Anforderung (F_{NR})		F_4	
Chloridgehalt	Höchstwerte für den Gehalt an wasserlöslichen Chlorid-Ionen in M.-%: 0,02 ($Cl_{0,02}$); 0,04 ($Cl_{0,04}$); 0,15 ($Cl_{0,15}$)		$Cl_{0,04}$	
Schwefelhaltige Bestandteile	Säurelöslicher Sulfatgehalt SO_3 in M.-%	$\leq 0,2$ ($AS_{0,2}$); $\leq 0,8$ ($AS_{0,8}$)	$AS_{0,8}$	
	Gesamtschwefelgehalt	$\leq 1\%$ (Massenanteile)		
Organische Stoffe	Natronlaugenversuch, Prüfung auf Fulvosäure oder Versuch mit Vergleichsmörtelprismen			
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen [Höchstwert in M.-%]	Feine Gesteinskörnung	$\leq 0,50\%$ ($Q_{0,50}$); $\leq 0,25\%$ ($Q_{0,25}$)	$Q_{0,50}$	
	Grobe Gesteinskörnung und Kornmische	$\leq 0,10\%$ ($Q_{0,10}$); $\leq 0,05\%$ ($Q_{0,05}$)	$Q_{0,10}$	

Tabelle 23: Eigenschaften von Gesteinskörnungen, für die als Regelanforderung die Kategorie „Keine Anforderung“ festgelegt wurde [12]

Eigenschaft	Anforderungskategorien		Regelanforderung
Widerstand gegen Zertrümmerung ^{a)}	Los Angeles-Koeffizient	≤ 15 (LA ₁₅); ≤ 20 (LA ₂₀); ≤ 25 (LA ₂₅); ≤ 30 (LA ₃₀); ≤ 35 (LA ₃₅); ≤ 40 (LA ₄₀); ≤ 50 (LA ₅₀); keine Anforderung (LA _{NR})	LA _{NR}
	Schlagzertrümmerungswert in %	≤ 18 (SZ ₁₈); ≤ 22 (SZ ₂₂); ≤ 26 (SZ ₂₆); ≤ 32 (SZ ₃₂); keine Anforderung (SZ _{NR})	SZ _{NR}
Widerstand gegen Verschleiss	Micro-Deval-Koeffizient	≤ 10 (M _{DE10}); ≤ 15 (M _{DE15}); ≤ 20 (M _{DE20}); ≤ 25 (M _{DE25}); ≤ 35 (M _{DE35}); keine Anforderung (M _{DENR})	M _{DENR}
Widerstand gegen Polieren	Polierwert	≥ 68 (PSV ₆₈); ≥ 62 (PSV ₆₂); ≥ 56 (PSV ₅₆); ≥ 50 (PSV ₅₀); ≥ 44 (PSV ₄₄); keine Anforderung (PSV _{NR})	PSV _{NR}
Widerstand gegen Abrieb	Abriebwert	≤ 10 (AAV ₁₀); ≤ 15 (AAV ₁₅); ≤ 20 (AAV ₂₀); keine Anforderung (AAV _{NR})	AAV _{NR}
Widerstand gegen Abrieb durch Spike-Reifen	Nordischer Abriebwert	≤ 7 (A _{N7}); ≤ 10 (A _{N10}); ≤ 14 (A _{N14}); ≤ 19 (A _{N19}); ≤ 30 (A _{N30}); keine Anforderung (A _{NNR})	A _{NNR}
Frost-Tausalz-Widerstand	Magnesiumsulfat-Wert ^{b)}	Zulässiger Masseverlust in %: ≤ 18 (MS ₁₈); ≤ 25 (MS ₂₅); ≤ 35 (MS ₃₅); keine Anforderung (MS _{NR})	MS _{NR}

a) Für übliche Gesteinskörnungen wird – ohne Prüfung – davon ausgegangen, dass die Anforderungen der Kategorie LA₅₀ oder SZ₃₂ erfüllt sind.

b) Alternativ kann auch eine Prüfung in 1%iger NaCl-Lösung nach DIN EN 1367-1:2000-1, Anhang B, vereinbart werden (Grenzwert: 8 M.-% Absplitterung). Darüber hinaus ist es möglich, den Nachweis des Frost-Tausalz-Widerstandes über einen Betonversuch nach Anhang L der Norm zu führen.

5 Literatur

- [1] Schiebl, P., *Gesteinskörnung. Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde*, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, Editor. 2005: München. p. 33.
- [2] DIN EN 13055-1. *Leichte Gesteinskörnungen Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel (Lightweight aggregates — Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout)*. 2002, p. 39.
- [3] DIN EN 12620. *Gesteinskörnungen für Beton (Aggregates for concrete)*. 2008, p. 61.
- [4] DIN EN 13139. *Gesteinskörnungen für Mörtel (Aggregates for mortar)*. 2002, p. 36.
- [5] ISO 13320. *Particle size analysis - Laser diffraction methods*. 2009, p. 51.
- [6] DIN 1045-2. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1)*. 2008, p. 62.
- [7] DIN EN 13055-2. *Leichte Gesteinskörnungen Teil 2: Leichte Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen sowie für ungebundene und gebundene Verwendung (Lightweight aggregates — Part 2: Lightweight aggregates for bituminous mixtures and surface treatments and for unbound and bound applications)*. 2004, p. 47.
- [8] DIN 18550-1. *Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen – Teil 1: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-1:2016-09 für Außenputze (Design, preparation and application of external rendering and internal plastering – Part 1: Supplementary provisions for DIN EN 13914-1:2016-09 for external rendering)*. 2018, p. 22.
- [9] DIN 18550-2. *Planung, Zubereitung und Ausführung von Außen- und Innenputzen – Teil 2: Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 13914-2:2016-09 für Innenputze (Design, preparation and application of external rendering and internal plastering – Part 2: Supplementary provisions for DIN EN 13914-2:2016-09 for internal plastering)*. 2018, p. 25.
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. *TL Gestein-StB 04/18 - Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Ausgabe 2004, Fassung 2018*. 2018, p. 56.
- [11] Dingethal, F.J.; Jürging, P.; Kaule, G. and Weinzierl, W., *Kiesgrube und Landschaft. Handbuch über den Abbau von Sand und Kies, über Gestaltung, Rekultivierung und Renaturierung*. 3 ed. 1998, Donauwörth: Verlag Ludwig Auer. 338 p.
- [12] Kern, M., *Gesteinskörnung nach DIN EN 12620*, in *Heft 526 Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN EN 13670, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN EN 12620*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Editor. 2011, Beuth Verlag: Berlin, Germany. pp. 81-93.
- [13] Wesche, K., *Baustoffe für tragende Bauteile - Band 2: Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit*. 3. ed. Vol. 2. 1993, Wiesbaden: Bauverlag. XXII, 502 p.
- [14] Fuller, W.B.; Thompson, S.E., *The Laws of Proportioning Concrete*. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1907. LIX(2): pp. 67-143.
- [15] Abrams, D.A., *Design of Concrete Mixtures*, in *Bulletin 1*. 1925, Structural Materials Research Laboratory - Lewis Institute: Chicago. pp. 309-330.
- [16] Hummel, A., *Das Beton-ABC : ein Lehrbuch der Technologie des Schwerbetons und des Leichtbetons*. 12 ed. 1959, Berlin: Ernst und Sohn Verlag. 288 p.
- [17] Kluge, F., *Vorausbestimmung der Wassermenge bei Betonmischungen für bestimmte Betongüten und Frischbetonkonsistenzen*. *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, 1977. 43(5): pp. 266-269.

- [18] Thienel, K.-C.; Haller, T. and Beuntner, N., *Lightweight Concrete—From Basics to Innovations*. Materials, 2020. 13(5): pp. 1120.
- [19] DIN V 18004. *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Prüfverfahren für Gesteinskörnungen nach DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104*. 2004, p. 14.
- [20] Thienel, K.-C., *Besonderheiten bei Leichtbeton in DIN FB 100*, in *Heft 526 Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN EN 13670, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN EN 12620*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Editor. 2011, Beuth Verlag: Berlin. pp. 80-84.
- [21] Государственного Комитета Совета Министров Ссср По Дела́м Строи́тельства (State Committee of the Council of Ministers of the USSR on Construction). *GOST 9758-77 Заполнители пористые неорганические для бетона. Методы испытаний (Porous inorganic aggregates for concrete. Test Methods)*. 1971, p. 49.
- [22] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton. *Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*. 2013, p. 43.
- [23] DIN EN 1744-1. *Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Chemische Analyse (Tests for chemical properties of aggregates - Part 1: Chemical analysis)*. 2013, p. 62.