

Institut für Werkstoffe des Bauwesens  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

# Werkstoffe des Bauwesens

## Frischbeton

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

Frühjahrstrimester 2009

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Begriffe	4
1.2	Abkürzungen und Formelzeichen	8
1.3	Allgemeines, historische Entwicklung [Lit 7]	9
1.4	Einteilung	11
1.4.1	Unterscheidung anhand der Trockenrohdichte	11
1.4.2	Unterscheidung anhand des Gefüges	11
1.4.3	Unterscheidung nach dem Erhärtungszustand	11
1.4.4	Unterscheidung nach dem Ort der Herstellung	11
1.4.5	Unterscheidung nach der Festigkeit	11
1.4.6	Unterscheidung nach der Art des Einbringens	11
1.5	Betonbestandteile und Zusammensetzung	12
2	DIN 1045	13
2.1	Aufbau der DIN 1045:07- 2001	13
2.2	Umgebungsbedingungen	14
3	Frischbeton	21
3.1	Zusammensetzung	21
3.1.1	Zement- bzw. Zementleimgehalt	21
3.1.2	Mehlkorngehalt	23
3.1.3	Zugabewasser, Wassergehalt und w/z-Wert	24
3.1.4	Betonzusätze	27
3.2	Verarbeitbarkeit und Konsistenz	37
3.2.1	Begriffsbestimmung	37
3.2.2	Bedeutung von Verarbeitbarkeit und Konsistenz	38
3.2.3	Konsistenzprüfungen und Konsistenzklassen	40
3.3	Einfluss verschiedener Parameter auf den Zementbedarf	45

3.4	Mischen des Frischbetons	45
3.5	Transport und Einbringen des Frischbetons	46
3.6	Verdichten des Frischbetons	47
3.7	Frischbetoneigenschaften	51
3.7.1	Allgemeines (Übersicht)	51
3.7.2	Wasserabsondern (Bluten)	51
3.7.3	Frischbetonrohddichte	52
3.7.4	Luftporengehalt	53
3.7.5	Frischbetontemperatur beim Einbau	54
3.7.6	Grünstandfestigkeit (Grüner Beton)	56
4	Literatur	57

Das vorliegende Skript basiert in weiten Teilen auf dem Skriptum „Beton“ 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.

# 1 Einleitung

## 1.1 Begriffe

äquivalenter Wasserzementwert	Masseverhältnis des wirksamen Wassergehaltes zur Summe aus Zementgehalt und k-fach anrechenbaren Anteilen von Zusatzstoffen.
Baustellenbeton	Beton, der auf der Baustelle durch den Verwender für seine eigene Verwendung hergestellt wird.
Bewehrung	Stahleinlagen bei Stahlbeton und Spannbeton.
Betonfamilie	Eine Gruppe von Betonzusammensetzungen, für die ein verlässlicher Zusammenhang zwischen maßgebenden Eigenschaften festgelegt und dokumentiert ist.
Betonfertigteil	Betonprodukt, das an einem anderen Ort als dem endgültigen Ort der Verwendung hergestellt und nachbehandelt wird.
Beton	Baustoff, erzeugt durch Mischen von Zement, grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser, mit oder ohne Zugabe von Zusatzstoffen oder Zusatzmitteln. Er erhält seine Eigenschaften durch Hydratation des Zements.
Betonkategorie	Einordnung des Betons bezüglich seiner Übereinstimmungslenkung unter Berücksichtigung der Betonfestigkeitsklasse, der Art der Leistungsbeschreibung (Beton nach Eigenschaften, Beton nach Zusammensetzung, Standardbeton) und der vorgesehenen Verwendung.
Beton nach Eigenschaften	Beton, für den die geforderten Eigenschaften und zusätzliche Anforderungen dem Hersteller gegenüber festgelegt sind, der für die Bereitstellung eines Betons, der den geforderten Eigenschaften und den zusätzlichen Anforderungen entspricht, verantwortlich ist.
Beton nach Zusammensetzung	Beton, für den die Zusammensetzung und die Ausgangsstoffe, die verwendet werden müssen, dem Hersteller vorgegeben werden, der für die Lieferung eines Betons mit der festgelegten Zusammensetzung verantwortlich ist.
Bewertung der Übereinstimmung	Systematische Überprüfung, in welchem Umfang ein Produkt festgelegte Anforderungen erfüllt.
Charakteristische Festigkeit	Festigkeitswert, den erwartungsgemäß 5 % der Grundgesamtheit aller möglichen Festigkeitsmessungen der Menge des betrachteten Betons, z. B. im Beurteilungszeitraum, unterschreiten.
Charge	Die Menge Frischbeton, die entweder in einem Arbeitsspiel eines Chargenmischers hergestellt wird oder die während einer Minute von einem Durchlaufmischer ausgestoßen wird.
Erstprüfung	Prüfung, die bei Produktionsbeginn einer neuen Betonsorte oder einer Produktionseinrichtung als erste Prüfung unter Produktionsbedingungen durchgeführt wird, um zu ermitteln, wie ein neuer Beton oder eine neue Betonfamilie zusammengesetzt sein und hergestellt werden müssen, um alle festgelegten Anforderungen im frischen und erhärteten Zustand zu erfüllen.

Expositionsklasse	Klassifizierung der chemischen und physikalischen Umgebungsbedingungen, denen der Beton ausgesetzt werden kann und die auf den Beton, die Bewehrung oder metallische Einbauteile einwirken können und die nicht als Lastannahmen in die Tragwerksplanung eingehen.
Fahrmischer	Betonmischer, der im Allgemeinen auf einem selbstfahrenden Fahrgestell montiert und in der Lage ist, einen gleichmäßig gemischten Beton herzustellen und auszuliefern.
Faserbeton	Beton, dem neben der Gesteinskörnung noch Fasern zugesetzt werden.
Fließbeton	Beton mit der Konsistenzbeschreibung sehr weich, fließfähig oder sehr fließfähig.
Festbeton	Beton, der sich in einem festen Zustand befindet und eine bestimmte Festigkeit entwickelt hat.
Festbetonroh-dichte	Rohdichte des erhärteten Betons.
Fremdüberwachungsprüfung	Prüfung, die unter der Verantwortung einer Zertifizierungsstelle durchgeführt wird, um das Vertrauen in die Prüfergebnisse der Produktionslenkung sicherzustellen.
Frischbeton	Beton, der fertig gemischt ist, sich noch in einem verarbeitbaren Zustand befindet und durch das gewählte Verfahren verdichtet werden kann.
Frischbetonroh-dichte	Rohdichte des verdichteten Frischbetons.
Gesamtwassermenge	Die Gesamtwassermenge ist die Summe aus dem Zugabewasser, dem in der Gesteinskörnung und auf dessen Oberfläche aufgenommenen Wasser, dem Wasser in Zusatzmitteln und Zusatzstoffen, wenn diese in wässriger Form verwendet werden, und dem Wasser von zugefügtem Eis oder einer Dampfbeheizung.
Gesteinskörnung	Körniges mineralisches Material, das für die Verwendung in Beton geeignet ist. Gesteinskörnung kann natürlich oder künstlich sein, oder recycelt aus einem Material, das vorher in Baukonstruktionen verwendet wurde.
Haufwerksporiger Beton	Beton, der so zusammengesetzt ist, dass im verdichteten Zustand ein Teil seines Volumens (typischerweise mehr als 3 Vol.-%) aus Haufwerksporen zwischen der Gesteinskörnung besteht. Die sind Folge eines verminderten Gehalts an feiner Gesteinskörnung und/oder Bindemittel.
Hochfester Beton	Beton mit einer Festigkeitsklasse ab C55/67 im Fall von Normalbeton oder Schwerbeton und einer Festigkeitsklasse ab LC55/60 im Fall von Leichtbeton.
Hydratationsgrad	Maß für die Menge des durch Zement chemisch gebundenen Wassers.
Konsistenz	Maß für die Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit des Frischbetons.
Korngemisch	Gesteinskörnung, die aus einer Mischung grober Gesteinskörnungen und feiner Gesteinskörnungen (Sand) besteht.
Künstliche Luftporen	Mikroskopisch kleine Luftporen, die während des Mischens im Allgemeinen unter Verwendung eines oberflächenaktiven Stoffes absichtlich im Beton erzeugt werden; typischerweise mit 10 µm bis 300 µm

	Durchmesser kugelförmiger oder nahezu kugelförmiger Gestalt.
Leichtbeton	Beton mit einer Trockenrohddichte von nicht weniger als $800 \text{ kg/m}^3$ und nicht mehr als $2000 \text{ kg/m}^3$ . Er wird ganz oder teilweise unter Verwendung von leichter Gesteinskörnung hergestellt.
Leichte Gesteinskörnung	Gesteinskörnung mineralischer Herkunft mit einer Kornrohddichte von $2000 \text{ kg/m}^3$ .
Leistungsbeschreibung	An den Hersteller gegebene Zusammenstellung der dokumentierten technischen Anforderungen bezüglich der Leistung oder der Zusammensetzung des Betons.
Lieferung	Vorgang der Übergabe des Frischbetons vom Hersteller an den Verwender.
Lufteinschlüsse	Luftporen, die unbeabsichtigt in den Beton gelangen.
Luftgehalt	Der im Frischbeton gemessene Gesamtluftgehalt, bestehend aus Luftporen und künstlichen Luftporen.
Luftporenbeton	Beton, der unter Verwendung von Luftporenbildnern hergestellt worden ist und deshalb ein besonderes Porengefüge aufweist.
Massenbeton	Beton für Bauteile mit Dicken über etwa 1 m.
Matrix	Geschlossene Phase im Zweiphasenstoff Beton; im Allgemeinen Zementleim oder Zementstein.
Mehlkorngehalt	Summe aus dem Zementgehalt, dem in den Gesteinskörnungen enthaltenen Kornanteil 0 mm bis 0,125 mm und dem Betonzusatzstoffgehalt.
Mischungsverhältnis	Verhältnis von Bindemittel/Gesteinskörnung (trocken)/Wasser, Angabe erfolgt im Allgemeinen in Massenteilen (MT), in Ausnahmefällen (z. B. bei Leichtbeton und selbstverdichtendem Beton) in Raumteilen (RT).
Nachbehandlung	Maßnahmen, die einen ungestörten Ablauf der Hydratation ermöglichen.
Normalbeton	Beton mit einer Trockenrohddichte über $2000 \text{ kg/m}^3$ , höchstens aber $2800 \text{ kg/m}^3$ .
Normale Gesteinskörnung	Gesteinskörnung mit einer Kornrohddichte $> 2000 \text{ kg/m}^3$ und $< 3000 \text{ kg/m}^3$ .
Nutzungsdauer	Die Zeitspanne, während der die Eigenschaften des Betons auf einem Niveau erhalten bleiben, das vereinbar ist mit der Erfüllung der Leistungsanforderungen an das Bauwerk.
Ortbeton	Beton, der als Frischbeton in Bauteile in ihrer endgültigen Lage eingebracht wird und dort erhärtet.
Pumpbeton	Frischbeton, der durch Rohrleitungen zur Einbringstelle gepumpt wird.
Restwasser	Wasser, das auf dem Gelände der Betonproduktion anfällt und nach Aufbereitung zur Betonproduktion wiederverwendet wird.
Rüttelbeton	Beton, der durch Rütteln verdichtet wird.
Schüttbeton	Beton, der direkt aus dem Fahrmischer oder aus einem Betonkübel an den Einbauort geschüttet wird.

Spannbeton	Bewehrter Beton, dessen Querschnitt zum Abtragen der Schnittgrößen durch so genannte Spannglieder „unter Druck“ gesetzt wird.
Spannleichtbeton	Bewehrter Leichtbeton, der als Spannbeton ausgeführt wird.
Spritzbeton	Beton, der mit Druckluft durch eine Spritzdüse gegen die Auftragsfläche geschleudert und dabei verdichtet wird.
Stahlleichtbeton	Bewehrter Leichtbeton.
Stampfbeton	Erdfeuchter Beton, der durch Stampfen verdichtet wird.
Standardbeton	Beton nach Zusammensetzung, dessen Zusammensetzung in einer am Ort der Verwendung des Betons gültigen Norm vorgegeben ist.
Stoffraum	Volumen der Bestandteile Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoffe und Wasser im Beton, wobei das Gesteinskörnungsvolumen die Kornporen einschließt.
Schwerbeton	Beton mit einer Trockenrohddichte über $2800 \text{ kg/m}^3$ . Abschirmbeton für Reaktorbau und Luftschutz mit geschlossenem Gefüge und einer Festbetonrohddichte über $2800$ bis etwa $6500 \text{ kg/m}^3$ durch Gesteinskörnung mit höherer Dichte. Der Aufbau von Normal- und Schwerbeton ist bis auf diese Dichte praktisch gleich.
Schwere Gesteinskörnung	Gesteinskörnung mit einer Kornrohddichte über $3000 \text{ kg/m}^3$ .
Transportbeton	Beton, der im frischen Zustand dem Verwender von einer Person oder einer Stelle, die nicht der Verwender ist, geliefert wird. Transportbeton im Sinne der DIN 1045 ist auch <ul style="list-style-type: none"> <li>- Beton, der vom Verwender außerhalb der Baustelle hergestellt wird,</li> <li>- Beton, der auf der Baustelle hergestellt wird, jedoch nicht vom Verwender.</li> </ul>
Übereinstimmungsprüfung	Prüfung, die vom Hersteller durchgeführt wird, um die Produktübereinstimmung zu beurteilen.
Überwachungsstelle	Anerkannte unparteiische Stelle, welche die Übereinstimmungslenkung und die Produktionslenkung überprüft, um festzustellen, ob die Anforderungen dieser Norm erfüllt sind.
Umwelteinflüsse	Diejenigen chemischen und physikalischen Einflüsse, denen der Beton ausgesetzt ist und die zu Einwirkungen auf den Beton oder die Bewehrung oder das eingebettete Metall führen, die nicht als Lasten bei der konstruktiven Bemessung berücksichtigt werden.
Verdichtungsgrad	Verhältnis von erreichter zu theoretisch möglicher Frischbetonrohddichte.
Walzbeton	Beton, der durch Walzen verdichtet wird.
Wasserzementwert (w/z-Wert)	Masseverhältnis des wirksamen Wassergehalts zum Zementgehalt im Frischbeton.
Wirksamer Wassergehalt	Die Differenz zwischen der Gesamtwassermenge im Frischbeton und der Wassermenge, die bis zum Erstarren des Betons von der Gesteinskörnung aufgenommen wird.

Zement (hydraulisches Bindemittel)	Fein gemahlener, anorganischer Stoff, der mit Wasser gemischt Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und der nach dem Erhärten eine Festigkeit und Raumbeständigkeit, auch unter Wasser, behält.
Zementleim	Zement und Wasser in frischem Zustand, ggf. mit Zusätzen (Zusatzmittel und Zusatzstoff).
Zementstein	Erhärteter Zementleim (vgl. Matrix).
Zertifizierungsstelle	Anerkannte unparteiische Stelle, welche die Übereinstimmung des Betons mit dieser Norm feststellt, die Ergebnisse der Fremdüberwachung abschließend bewertet und ein Zertifikat erteilt.
Zugabewasser	Wasser, das dem Beton im Mischer zugegeben wird.
Zusatzmittel	Stoffe, die während des Mischvorgangs des Betons in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben werden, um die Eigenschaften des Frischbetons oder Festbetons zu verändern.
Zusatzstoffe	Fein verteilte organische oder anorganische Stoffe, die im Beton verwendet werden, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder um besondere Eigenschaften zu erreichen. DIN 1045 behandelt zwei Arten von anorganischen Zusatzstoffen: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ nahezu inerte Zusatzstoffe (Typ I) und</li> <li>▪ puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe (Typ II).</li> </ul>

## **1.2 Abkürzungen und Formelzeichen**

X	auf die Umgebungsbedingungen bezogene Expositionsklasse
X0	Expositionsklasse ohne Korrosions- oder Angriffsrisiko
XC	Expositionsklasse für Gefahr der Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung
XD	Expositionsklasse für Gefahr der Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser
XS	Expositionsklasse für Gefahr der Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Chloride aus dem Meerwasser
XF	Expositionsklassen für Gefahr von Frostangriff auf den Beton mit oder ohne Taumittel
XA	Expositionsklassen für Gefahr des chemischen Angriffs auf den Beton
XM	Expositionsklassen für Angriff auf den Beton durch Verschleiß
W..	Expositionsklassen für Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäurereaktion
S1 bis S5	Konsistenzklassen, ausgedrückt als Setzmaß
C0 bis C4	Konsistenzklassen, ausgedrückt als Verdichtungsmaß
F1 bis F6	Konsistenzklassen, ausgedrückt als Ausbreitmaß
C.../...	Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwerbeton
LC.../...	Druckfestigkeitsklassen für Leichtbeton

$f_{ck, cyl}$	charakteristische Betondruckfestigkeit, geprüft am Zylinder mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Länge nach 28 Tagen
$f_{c, cyl}$	Betondruckfestigkeit, geprüft am Zylinder
$f_{ck, cube}$	charakteristische Betondruckfestigkeit, geprüft am Würfel mit 150 mm Kantenlänge nach 28 Tagen
$f_{c, cube}$	Betondruckfestigkeit, geprüft am Würfel
$f_{c, dry}$	Betondruckfestigkeit von Probekörpern, gelagert nach DIN EN 12390-2:2001-06, Anhang NA, oder DIN 1048-5
$f_{cm}$	mittlere Druckfestigkeit des Betons
$f_{cm, j}$	mittlere Druckfestigkeit des Betons im Alter von (j) Tagen
$f_{tk}$	charakteristische Spaltzugfestigkeit von Beton
D...	Rohdichteklasse von Leichtbeton
k	Faktor für die Berücksichtigung der Mitwirkung eines Zusatzstoffes Typ II <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>k_f</math> k-Wert zur Anrechnung von Flugasche</li> <li>▪ <math>k_s</math> k-Wert zur Anrechnung von Silikastaub</li> </ul>
f	Flugaschegehalt im Beton
m	Masse
s	Silikastaubgehalt im Beton
w	Wassergehalt im Beton
z	Zementgehalt im Beton
$(w/z)_{eq}$	äquivalenter Wasserzementwert
$\sigma$	Standardabweichung
$\sigma_F$	Standardabweichung der Betonfamilie

### ***1.3 Allgemeines, historische Entwicklung [Lit 7]***

Beton ist der dominante Baustoff des letzten Jahrhunderts, weil er den Architekten und den Planern nahezu unendlich Gestaltungsräume für das Umsetzen ihrer Ideen bietet. Seine Eigenschaften des Betons lassen sich in weiten Bereichen (Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte) einstellen. Weitere Vorteile sind die gute Beständigkeit und Wirtschaftlichkeit von Betonbauwerken, sowie seine Recyclierbarkeit.

Nachteilig ist bei den normalen Betonen das – im Vergleich zu anderen Konstruktionswerkstoffen - ungünstige Verhältnis von Eigengewicht zur Druckfestigkeit und erst recht zur Zugfestigkeit. Weitere Nachteile des Betons ist sein zeitabhängiges Verformungsverhalten (Kriechen, Schwinden) und die schlechte Demontierbarkeit.

Beton ist ein künstlich hergestellter Verbundwerkstoff. Den Hauptbestandteil bildet ein Gemisch aus Gesteinskörnungen unterschiedlicher Größe (z. B. Sand, Kies, Splitt), die mit einem erhärteten Bindemittel verkittet werden. Das Bindemittel ist namensgebend. Im Allgemeinen unter dem Begriff Beton mit Zementbeton gleichgesetzt, wenn nicht ausdrücklich etwas anderes gesagt wird.

Die Römer nutzten für zahlreiche Bauwerke „Opus Cemaentitium“. Dieses Material nutzte hydraulischen Kalk als Bindemittel und war namensgebend für das Wort „Zement“. Der Name Beton kommt aus dem Altfranzösischen (bethyn / becton für Mauerwerk) und leitet sich vom lateinischen Bitumen (schlammiger Sand, Erdharz, Bergteer, Kitt) ab. Die Wortschöpfung geht auf Bernard de Bélidor zurück, der das Wort Béton erstmalig 1753 in seinem Standardwerk „Architecture hydraulique“ als Synonym für ein Mörtelgemisch benutzte.

Die Entwicklung des Betons in der Neuzeit begann 1755 mit dem Engländer J. Smeaton. Dieser führte, auf der Suche nach einem wasserbeständigen Mörtel, Versuche mit gebrannten Kalken und Tonen durch und stellte fest, dass für einen selbst erhärtenden (hydraulischen) Kalk ein bestimmter Anteil an Ton notwendig ist. Die Erfindung des Romanzements 1796 durch den Engländer J. Parker sowie des Portlandzements durch seinen Landsmann J. Aspdin im Jahre 1824 leitete letztendlich den modernen Betonbau ein.

Ein weiterer großer Entwicklungssprung war die Erfindung des Stahlbetons durch den Gärtner Joseph Monier (Patent: 1867), als er nach einer Möglichkeit suchte, Blumentöpfe billiger herzustellen. Deshalb wird der Bewehrungsstahl oder Betonstahl auch heute noch gelegentlich als Moniereisen bezeichnet.

Die heutzutage im Brückenbau häufig anzutreffende Spannbetonbauweise geht zurück auf die Idee von Eugène Freyssinet zu Beginn der 20. Jahrhunderts.

Die technische Entwicklung spiegelt sich wider in der Entwicklung der Betonfestigkeitsklassen in der deutschen Betonnorm DIN 1045 (Bild 1).

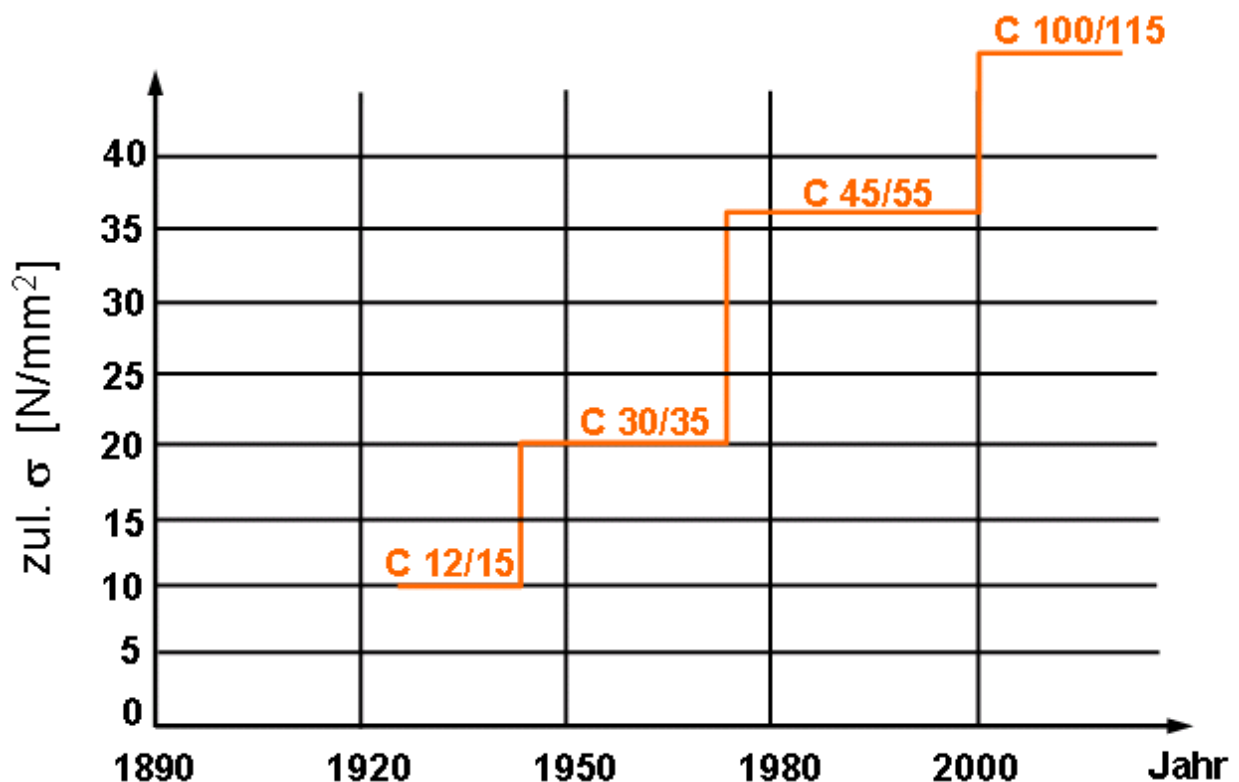


Bild 1: Entwicklung der Betonfestigkeiten [Lit 6]

## 1.4 Einteilung

In der Praxis haben sich viele Möglichkeiten eingebürgert, Betone einzuteilen und zu bezeichnen.

### 1.4.1 Unterscheidung anhand der Trockenrohddichte

Beton kann nach seiner Trockenrohddichte  $\rho_d$  unterschiedet werden in:

- **Leichtbeton** ( $800 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_d \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ ),
- **Normalbeton** ( $2000 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_d \leq 2600 \text{ kg/m}^3$ ) und
- **Schwerbeton** ( $\rho_d \geq 2600 \text{ kg/m}^3$ ).

Sofern keine Verwechslung mit Leicht- oder Schwerbeton möglich ist, wird Normalbeton er nur als Beton bezeichnet.

### 1.4.2 Unterscheidung anhand des Gefüges

Beton für tragende Bauteile nach DIN 1045 ist **gefügedicht**. Der Beton ist so zusammengesetzt, dass die zwischen der abgestuften Gesteinskörnung verbleibenden Hohlräume minimiert werden. In einem **haufwerksporigen** Beton werden die Gesteinskörnung im Beton nur punktuell verkittet. Dieses Gefüge kommt bei Dränbeton, Mauersteine und wärmedämmenden Betonen zum Einsatz.

### 1.4.3 Unterscheidung nach dem Erhärtungszustand

Mit dem Mischen entsteht aus den Ausgangsstoffen der **Frischbeton**. Er wird transportiert, in eine Form eingebaut und verdichtet. Mit dem Erstarren wird der Frischbeton zu **Festbeton**, der in der Form erhärtet.

### 1.4.4 Unterscheidung nach dem Ort der Herstellung

**Baustellenbeton** wird am Ort seiner Verwendung, **Transportbeton** in einem Transportbetonwerk gemischt und zu seinem Einsatzort geliefert. **Ortbeton** wird auf der Baustelle in seiner endgültigen Geometrie und Lage im Bauwerk eingebaut. Aus **Fertigteilbeton** werden in einem Fertigteilwerk Elemente hergestellt, die im erhärteten Zustand auf die Baustelle transportiert und dort montiert werden.

### 1.4.5 Unterscheidung nach der Festigkeit

Alle Betone werden in **Festigkeitsklassen** eingeteilt. Beton nach DIN 1045-3 gruppiert die Festigkeitsklassen in drei **Überwachungsklassen**. Überwachungsklasse 1 umfasst Betone bis zu einer Festigkeitsklasse C25/30. Überwachungsklasse 2 deckt den Bereich C30/37 bis C50/60 ab. Festigkeitsklassen ab C55/67 fallen in die Überwachungsklasse 3. Eine ähnliche Unterteilung gilt für Leichtbeton, wobei hier noch die Trockenrohddichte für die Festlegung der Grenzen berücksichtigt wird.

### 1.4.6 Unterscheidung nach der Art des Einbringens

**Schüttnbeton** wird direkt aus dem Mischfahrzeug oder aus einem Kübel in die Form geschüttet. **Pumpbeton** wird mit einer Betonpumpe an seinen Einbauort gefördert. **Spritzbeton** wird aus einer Düse auf die Oberfläche gespritzt.

## 1.5 Betonbestandteile und Zusammensetzung

Beton ist ein maßgeschneiderter Baustoff. Moderner Beton besteht aus Gesteinkörnung, Bindemittel (Zement, Flugasche, Silikastaub) Wasser und Betonzusatzmitteln. Ein üblicher Beton der Festigkeitsklasse C20/25 setzt sich mengenmäßig aus den vorgenannten Betonbestandteilen wie folgt zusammen:

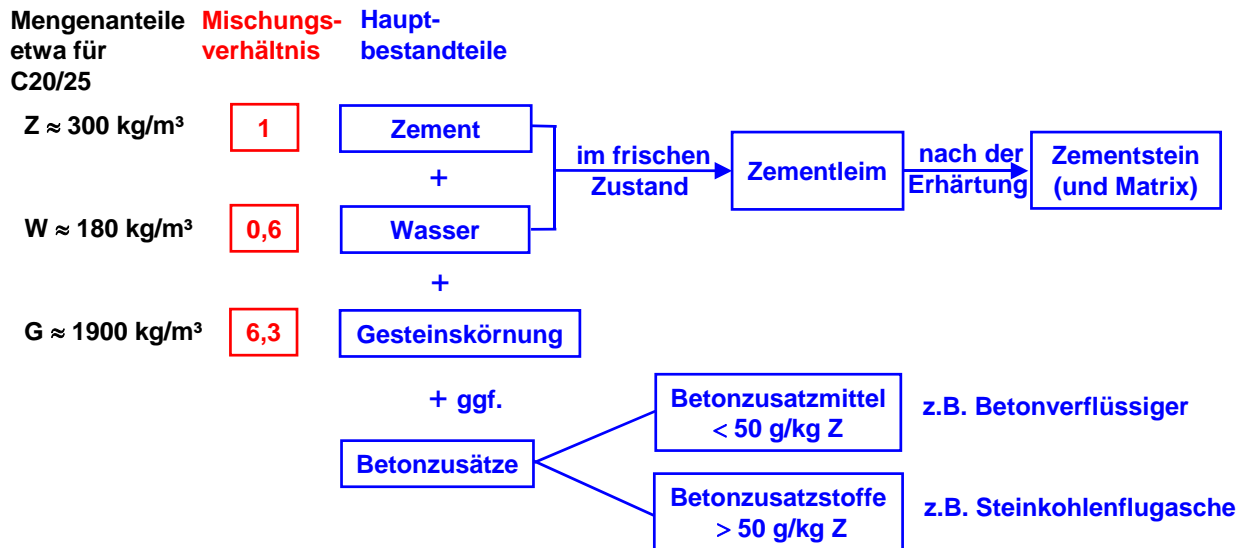


Bild 2: Betonbestandteile und Zusammensetzung [Lit 6]

## 2 DIN 1045

DIN 1045 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton“ (Ausgabe Juli 2001) ist die Betonnorm. Sie besteht aus 4 Teilen:

- Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- Teil 3: Bauausführung
- Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und die Konformität von Fertigteilen

### 2.1 Aufbau der DIN 1045:07- 2001

Das Konzept der europäischen Normung sieht eine klare Trennung zwischen Stoff-, Prüf-, Konstruktions- und Bemessungs- und Ausführungsnormen vor. Diese Trennung zwischen den einzelnen Bereichen wurde auch bei der Erstellung der neuen DIN 1045 berücksichtigt. DIN 1045-2 enthält Verweise auf die relevanten Stoffnormen (Bild 3) und die relevanten Prüfnormen (Bild 4).

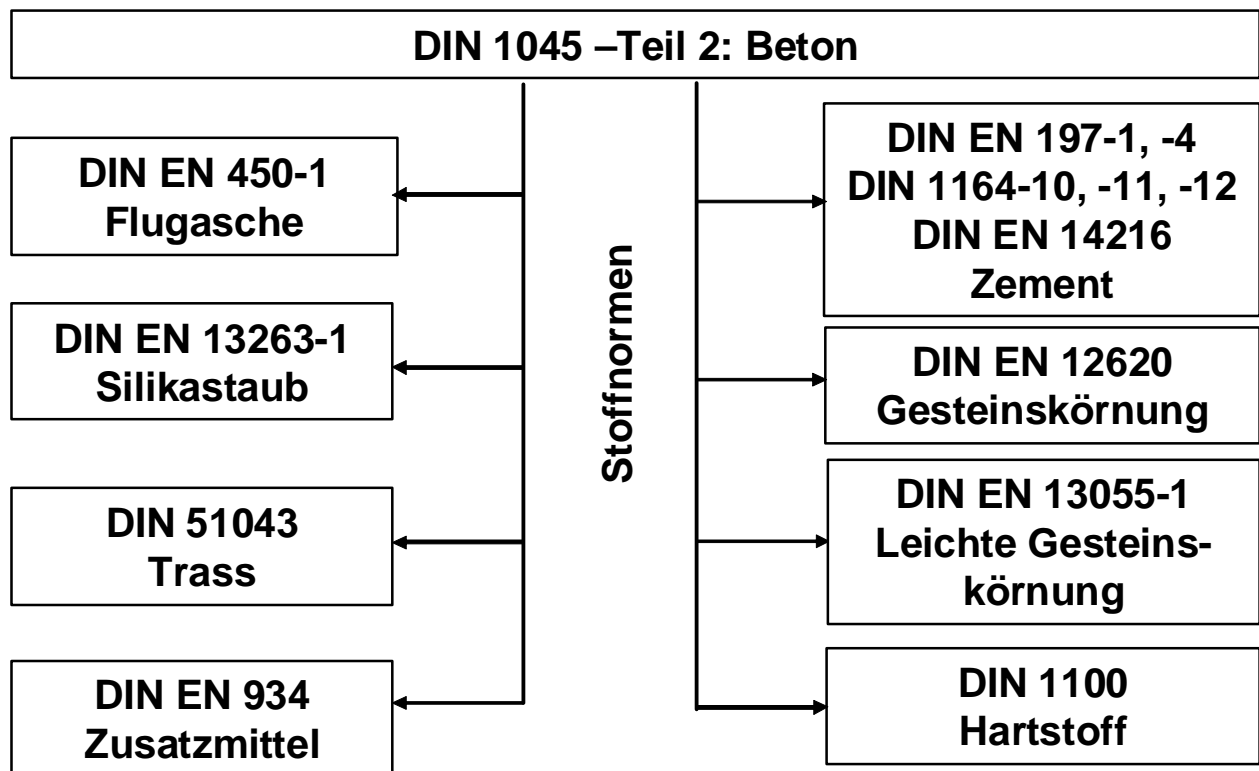


Bild 3: Struktur DIN 1045-2:7-2001 (wesentliche Stoffnormen)

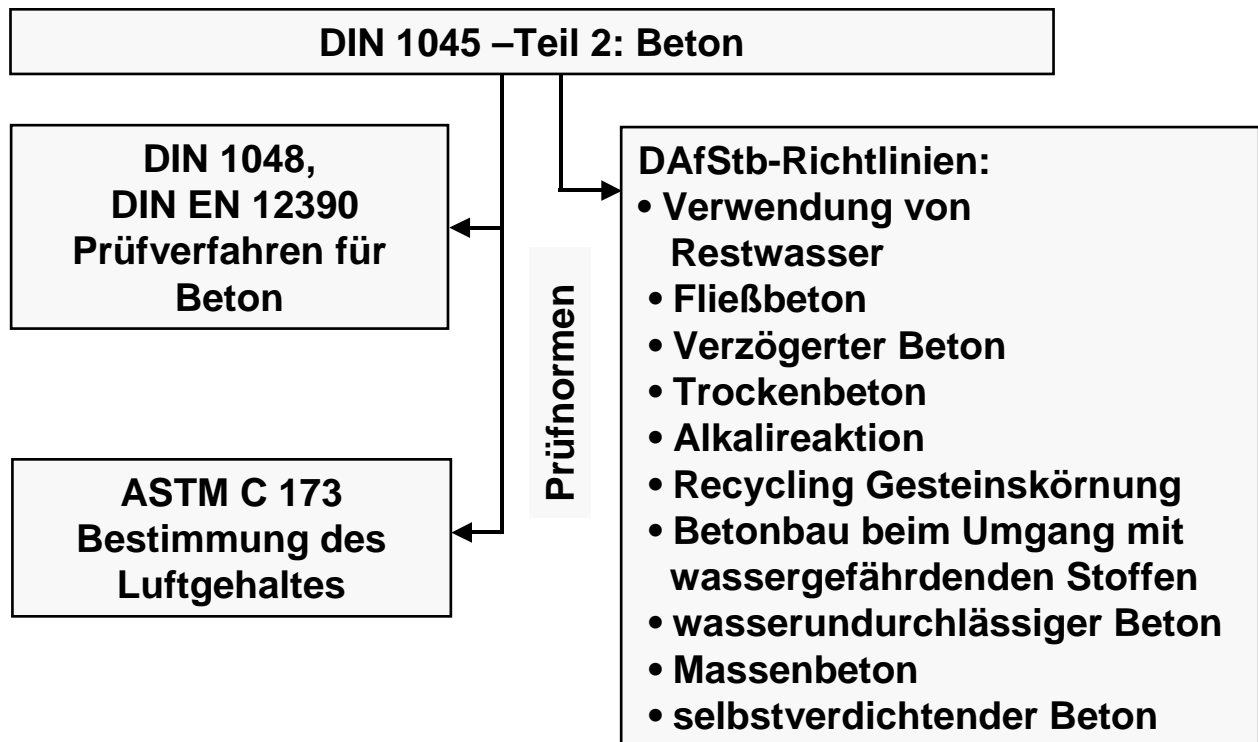


Bild 4: Struktur DIN 1045-2:7-2001 (Prüfnormen)

## 2.2 Umgebungsbedingungen

Die Forderung nach Gebrauchstauglichkeit erfordert von Beton eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber den zu erwarteten Einwirkungen. Die Anforderungen an die Betonzusammensetzung betreffen den Mindestwert für den Zementgehalt, den Höchstwert für den Wasserzementwert (w/z-Wert) und die Festigkeit. Sie richten sich nach der jeweiligen Umgebungsbedingung, der der Beton ausgesetzt ist.

In DIN 1045 sind den Umgebungsbedingungen wiederum Expositionsklassen zugeordnet. Die Expositionsklassen sind charakterisiert durch die maßgebenden Einwirkungen, welchen der Beton aufgrund der vorherrschenden Umgebungsbedingung ausgesetzt ist und durch die möglichen zu erwartenden Folgen für den Beton bzw. das bewehrte Bauteil. Bei den Umgebungsbedingungen ist zu beachten, dass praktisch immer das so genannte „Mikroklima“, also die Bedingungen unmittelbar an der betrachteten Betonoberfläche gemeint sind. Da ein Bauteil in der Regel nicht aus verschiedenen Betonen hergestellt wird, wird das gesamte Bauteil für die anspruchsvollste Expositionsklasse ausgelegt. Die Stützen in Bild 5 werden daher beide in XF 4 eingestuft.

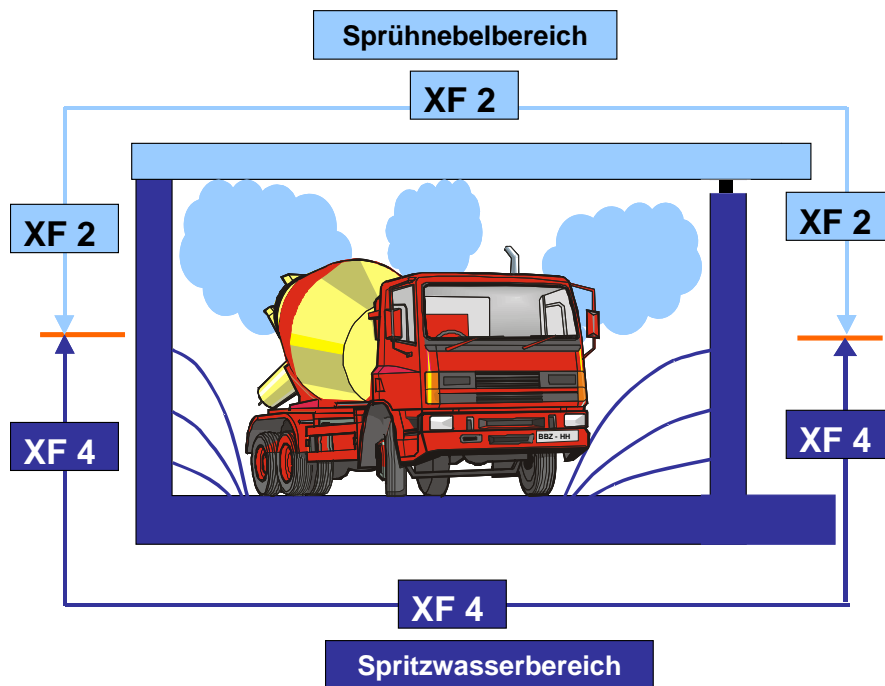


Bild 5: Beispiel für eine Einteilung in verschiedene Expositionsklassen [Lit 1]

Es werden die folgenden Expositionsklassen unterschieden:

- X0 Kein Angriffsrisiko

Bewehrungskorrosion verursacht durch

- XC Karbonatisierung (Carbonation)
- XD Chloride (Deicing salt)
- XS Meerwasser (Seawater)

Betonkorrosion verursacht durch

- XF Frost und Frost-Tausalz (Frost)
- XA chemischer Angriff (Acid)
- XM Verschleiß (Mechanical abrasion)
- W Alkali-Kieselsäurereaktion

Innerhalb jeder Klasse findet eine weitere Differenzierung hinsichtlich der jeweiligen Einwirkung statt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Expositionsklassen [Lit 3]

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
<b>1 Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko</b>		
Für Bauteile ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall in nicht Beton angreifender Umgebung kann die Expositionsklasse X0 zugeordnet werden.		
X0	Für Beton ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall: alle Umgebungsbedingungen, ausgenommen Frostangriff, Verschleiß oder chemischer Angriff	Fundamente ohne Bewehrung ohne Frost; Innenteile ohne Bewehrung

Fortsetzung Tabelle 1: Expositionsklassen [Lit 3]

<p><b>2 Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung</b>                  Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:                  ANMERKUNG Die Feuchtigkeitsbedingung bezieht sich auf den Zustand innerhalb der Betondeckung der Bewehrung oder anderen eingebetteten Metalls; in vielen Fällen kann jedoch angenommen werden, dass die Bedingungen in der Betondeckung den Umgebungsbedingungen entsprechen. In diesen Fällen darf die Klasseneinteilung nach der Umgebungsbedingung als gleichwertig angenommen werden. Dies braucht nicht der Fall sein, wenn sich zwischen dem Beton und seiner Umgebung eine Sperrschicht befindet.</p>		
XC1	trocken oder ständig nass	Bauteile in Innenräumen mit üblicher Luftfeuchte (einschließlich Küche, Bad und Waschküche in Wohngebäuden); Beton, der ständig in Wasser getaucht ist
XC2	nass, selten trocken	Teile von Wasserbehältern; Gründungsbauteile
XC3	mäßige Feuchte	Zugang hat, z. B. offene Hallen, Innenräume mit hoher Luftfeuchtigkeit z. B. in gewerblichen Küchen, Bädern, Wäschereien, in Feuchträumen von Hallenbädern und in Viehställen
XC4	wechselnd nass und trocken	Außenbauteile mit direkter Beregnung
<p><b>3 Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride, ausgenommen Meerwasser</b>                  Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, chloridhaltigem Wasser, einschließlich Taumittel, ausgenommen Meerwasser, ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p>		
XD1	mäßige Feuchte	Bauteile im Sprühnebelbereich von Verkehrsflächen Einzelgaragen
XD2	nass, selten trocken	Solebäder; Bauteile, die chloridhaltigen Industrieabwässern ausgesetzt sind
XD3	wechselnd nass und trocken	Teile von Brücken mit häufiger Spritzwasserbeanspruchung; Fahrbahndecken; direkt befahrene Parkdecks <sup>a</sup>
<p><sup>a</sup> Ausführung nur mit zusätzlichen Maßnahmen (z. B. rissüberbrückende Beschichtung, s. a. DafStb Heft 526)</p>		

Fortsetzung Tabelle 1: Expositionsklassen [Lit 3]

<p><b>4 Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser</b>                  Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Chloriden aus Meerwasser oder salzhaltiger Seeluft ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p>		
XS1	salzhaltige Luft, aber kein unmittelbarer Kontakt mit Meerwasser	Außenbauteile in Küstennähe
XS2	unter Wasser	Bauteile in Hafenanlagen, die ständig unter Wasser liegen
XS3	Tidebereiche, Spritzwasser und Sprühnebelbereiche	Kaimauern in Hafenanlagen
<p><b>5 Frostangriff mit und ohne Taumittel</b>                  Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p>		
XF1	mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	Außenbauteile
XF2	mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	Bauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von Taumittel behandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4; Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser
XF3	hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	offene Wasserbehälter; Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser
XF4	hohe Wassersättigung, mit Taumittel	Verkehrsflächen, die mit Taumitteln behandelt werden; Überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von Taumittel behandelten Verkehrsflächen; Räumerlaufbahnen von Kläranlagen; Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone

Fortsetzung Tabelle 1: Expositionsklassen [Lit 3]

<p><b>6 Betonkorrosion durch chemischen Angriff</b>                  Wenn Beton chemischem Angriff durch natürliche Böden, Grundwasser, Meerwasser nach Tabelle 2 und Abwasser ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:                  ANMERKUNG Bei XA3 und unter Umgebungsbedingungen außerhalb der Grenzen von Tabelle 2, bei Anwesenheit anderer angreifender Chemikalien, chemisch verunreinigtem Boden oder Wasser, bei hoher Fließgeschwindigkeit von Wasser und Einwirkung von Chemikalien nach Tabelle 2 sind Anforderungen an den Beton oder Schutzmaßnahmen in Kapitel 5.3.2 von DIN 1045 vorgegeben.</p>		
XA1	chemisch schwach angreifende Umgebung nach Tabelle 2	Behälter von Kläranlagen; Güllebehälter
XA2	chemisch mäßig angreifende Umgebung nach Tabelle 2 und Meeresbauwerke	Betonbauteile, die mit Meerwasser in Berührung kommen; Bauteile in Beton angreifenden Böden
XA3	chemisch stark angreifende Umgebung nach Tabelle 2	Industrieabwasseranlagen mit chemisch angreifenden Abwässern; Futtertische der Landwirtschaft; Kühltürme mit Rauchgasableitung
<p><b>7 Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung</b>                  Wenn Beton einer erheblichen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:</p>		
XM1	Mäßige Verschleißbeanspruchung	Tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luftbereifte Fahrzeuge
XM2	Starke Verschleißbeanspruchung	Tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch luft- oder vollgummibereifte Gabelstapler.
XM3	sehr starke Verschleißbeanspruchung	Tragende oder aussteifende Industrieböden mit Beanspruchung durch elastomer- oder stahlrollenbereifte Gabelstapler; Oberflächen, die häufig mit Kettenfahrzeugen befahren werden; Wasserbauwerke in Geschiebe belasteten Gewässern, z. B. Tosbecken

Fortsetzung Tabelle 1: Expositionsklassen [Lit 4]

<b>8 Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäurereaktion</b> Wenn Beton Gesteinskörnung mit alkaliempfindlichen Bestandteilen enthält, ist dieser den folgenden Feuchtigkeitsklassen zuzuordnen:		
WO	Beton, der nach normaler Nachbehandlung nicht längere Zeit feucht und nach dem Austrocknen während der Nutzung weitgehend trocken bleibt.	a) Innenbauteile des Hochbaus; b) Bauteile, auf die Außenluft, nicht jedoch z. B. Niederschläge, Oberflächenwasser, Bodenfeuchte einwirken können und/oder die nicht ständig einer relativen Luftfeuchte von mehr als 80 % ausgesetzt werden.
WF	Beton, der während der Nutzung häufig oder längere Zeit feucht ist.	a) Ungeschützte Außenbauteile, die z. B. Niederschlägen, Oberflächenwasser oder Bodenfeuchte ausgesetzt sind; b) Innenbauteile des Hochbaus für Feuchträume, wie z. B. Hallenbäder, Wäschereien und andere gewerbliche Feuchträume, in denen die relative Luftfeuchte überwiegend höher als 80 % ist; c) Bauteile mit häufiger Taupunktunterschreitung, wie z. B. Schornsteine, Wärmeübertragerstationen, Filterkammern und Viehställe; d) Massige Bauteile gemäß DAfStb-Richtlinie "Massige Bauteile aus Beton", deren kleinste Abmessung 0,80 m überschreitet (unabhängig vom Feuchtezutritt).
WA	Beton, der zusätzlich zu der Beanspruchung nach Klasse WF häufiger oder langzeitiger Alkalizufuhr von außen ausgesetzt ist.	a) Bauteile mit Meerwassereinwirkung; b) Bauteile unter Tausalzeinwirkung ohne zusätzliche hohe dynamische Beanspruchung (z. B. Spritzwasserbereiche, Fahr- und Stellflächen in Parkhäusern); c) Bauteile von Industriebauten und landwirtschaftlichen Bauwerken (z. B. Güllebehälter) mit Alkalisalzeinwirkung.
WS	Beton, der hoher dynamischer Beanspruchung und direktem Alkalieintrages ausgesetzt ist.	Bauteile unter Tausalzeinwirkung mit zusätzlicher hoher dynamischer Beanspruchung (z. B. Betonfahrbahnen)

Die folgende Klasseneinteilung in chemisch angreifender Umgebung gilt für natürliche Böden und Grundwasser mit einer Wasser-/Boden-Temperatur zwischen 5 °C und 25 °C und einer Fließgeschwindigkeit des Wassers, die klein genug ist, um näherungsweise hydrostatische Bedingungen anzunehmen.

Der schärfste Wert für jedes einzelne chemische Merkmal bestimmt die Klasse. Wenn zwei oder mehrere angreifende Merkmale zu derselben Klasse führen, muss die Umgebung der nächst höheren Klasse zugeordnet werden, sofern nicht in einer speziellen Studie für diesen

Fall nachgewiesen wird, dass dies nicht erforderlich ist. Auf eine spezielle Studie kann verzichtet werden, wenn keiner der Werte im oberen Viertel (bei pH im unteren Viertel) liegt.

Tabelle 2: Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser [Lit 3]

Chemisches Merkmal	Referenzprüfverfahren	XA1	XA2	XA3
<b>Grundwasser</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	DIN EN 196-2	≥ 200 und ≤ 600	> 600 und ≤ 3000	> 3000 und ≤ 6000
pH-Wert	ISO 4316	≤ 6,5 und ≥ 5,5	< 5,5 und ≥ 4,5	< 4,5 und ≥ 4,0
CO <sub>2</sub> mg/l angreifend	DIN 4030-2	≥ 15 und ≤ 40	> 40 und ≤ 100	> 100 bis zur Sättigung
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	ISO 7150-1 oder ISO 7150-2	≥ 15 und ≤ 30	> 30 und ≤ 60	> 60 und ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/l	ISO 7980	≥ 300 und ≤ 1000	> 1000 und ≤ 3000	> 3000 bis zur Sättigung
<b>Boden</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/kg insgesamt	DIN EN 196-2	≥ 2000 und ≤ 3000	> 3000 und ≤ 12000	> 12000 und ≤ 24000
Säuregrad nach Baumann-Gully	DIN 4030-2	> 200	in der Praxis nicht anzutreffen	

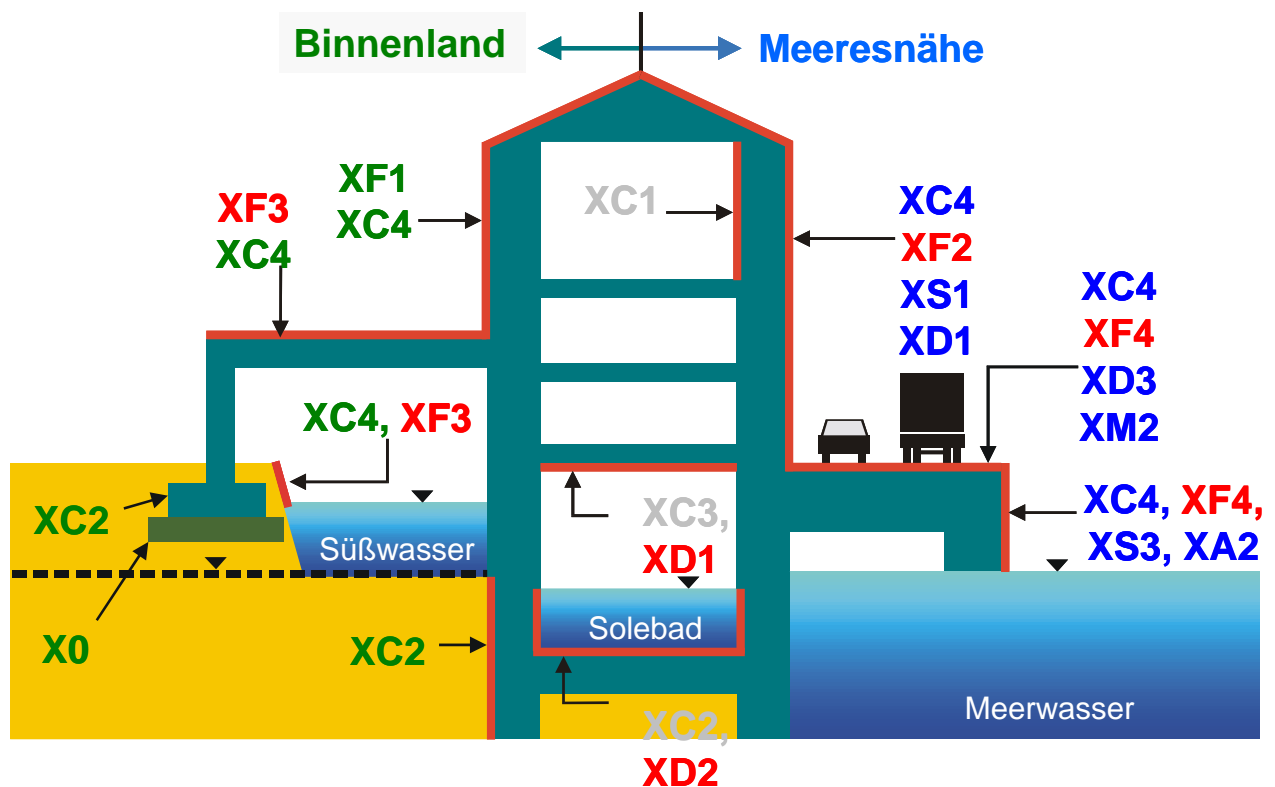


Bild 6: Beispiele für die Zuordnung der Expositionsklassen im Hochbau

## 3 Frischbeton

### 3.1 Zusammensetzung

Beton muss so zusammengesetzt sein, dass der Frischbeton gut durchmischt und mit den vorgesehenen Einrichtungen ohne wesentliche Entmischung sachgerecht gefördert, verarbeitet und eingebaut werden kann und dass der Festbeton die geforderten Eigenschaften erreichen kann. Das Mischungsverhältnis wird bei Normalbeton üblicherweise in Masseteilen angegeben, da so die Anteile der einzelnen Komponenten genau festgelegt sind. Die Feuchte der Gesteinskörnung muss entsprechend berücksichtigt werden.

Es gelten folgende Abkürzungen, Formelzeichen und Beziehungen:

MV	Mischungsverhältnis	
z	Zementgehalt	
b	Bindemittelgehalt	
g	Gehalt der Gesteinskörnung (g von Gestein, grain, granulat)	
w	Wassergehalt	
g	=	$g/z$ oder $g/b$
$\omega$	=	$w/z$ oder $w/b$
MV	=	$z : g : w$ oder $b : g : w$ nach Masse
	=	$1 : \gamma : \omega$ in Masseteilen

Für moderne Betone wird in der Regel als Bindemittel Zement zusammen mit Betonzusatzstoffen (Siehe Kapitel 3.1.4.3) verwendet. Diese bleiben bei den Grundsatzbetrachtungen zunächst außer Acht.

Der Anteil des **Zementleims** ( $V_{zl}$ ) bzw. des **Zementsteins** ( $V_{zst}$ ) im Beton wird in  $m^3/m^3$  oder in Vol.-% angegeben und setzt sich zusammen aus den Stoffraumteilen von Zement ( $V_z$ ) und Wasser ( $V_w$ ) und den **Luft- oder Frischbetonporen** ( $V_l$ ) je  $m^3$  Beton. Die Luftporen können **Verdichtungsporen** oder künstlich eingeführte **Mikroluftporen** sein. In der Praxis wird dabei die Volumenänderung durch Schrumpfen und Schwinden vernachlässigt.

Statt der Indizes  $z_l$  bzw.  $z_{st}$  wird besser der Index m für den allgemeineren Begriff **Matrix** eingeführt:

$$V_{zl} = V_{zst} = V_m$$

Das Volumen der Matrix ergibt sich zu:

$$V_m = V_z + V_w + V_l = 1000 - V_g \text{ (m}^3/\text{m}^3\text{)}.$$

#### 3.1.1 Zement- bzw. Zementleimgehalt

Die Frischbetoneigenschaften werden maßgeblich vom Zementleimgehalt und von den Eigenschaften des Zementleims selbst beeinflusst. Hinsichtlich des Zementleimgehaltes gibt es eine untere Grenze, die sich aus dem natürlichen Hohlraumvolumen der Gesteinskörnung ergibt, das aufgefüllt werden muss, und eine obere Grenze, die bedingt ist durch die Wirtschaftlichkeit des Betons und dessen gewünschte Eigenschaften. Letztendlich hängt der Zementgehalt

von der erforderlichen Verarbeitbarkeit, der Zementart und der Gesteinskörnung sowie von der Verwendung von Betonzusätzen (vgl. Bild 7) ab.

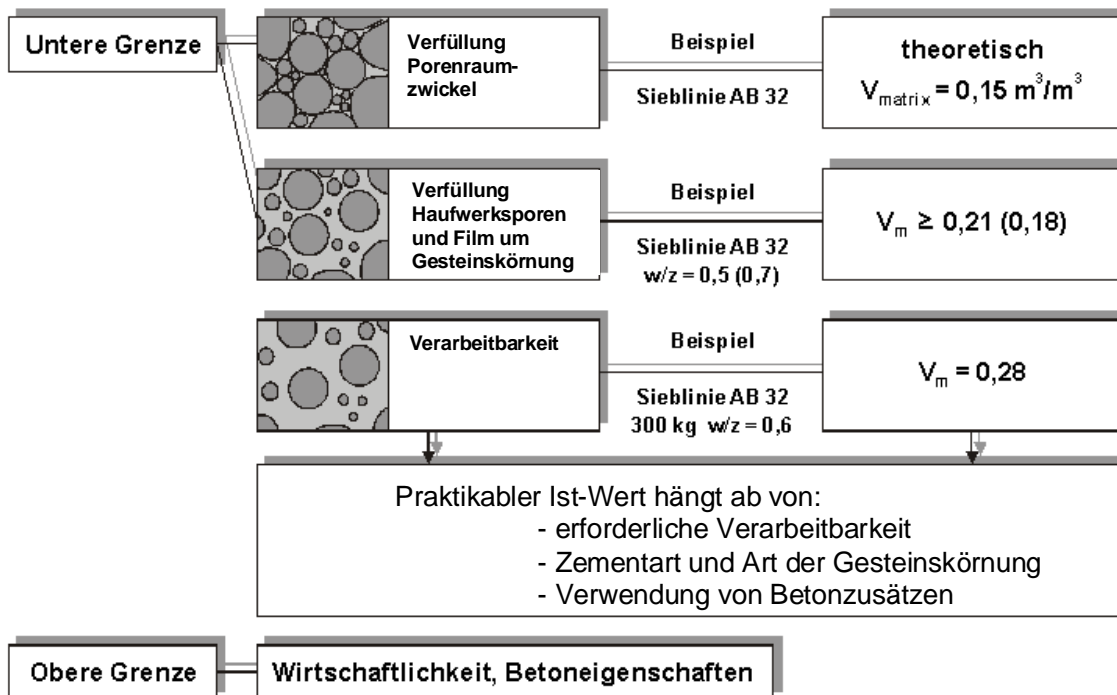


Bild 7: Zementleimgehalt

In DIN 1045-2 werden Betonzusammensetzungen festgelegt, die von dem Anwendungsbereich und den Expositionsklassen abhängen. Die Angaben umfassen Regelungen hinsichtlich des Personals und der Ausstattung der Unternehmen sowie der Betonzusammensetzung.

Nach DIN 1045-2 muss der **Mindestzementgehalt** je  $\text{m}^3$  verdichteten Beton bei ausgewählten Expositionsklassen den in Tabelle 3 angegebenen Werten entsprechen. Die angegebenen Festigkeitsklassen gelten nicht für Leichtbeton, da bei Leichtbeton kein Zusammenhang zwischen Festigkeit und Dauerhaftigkeit besteht.

Tabelle 3: Mindestwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton [Lit 3]

Kriterium	Ursache	Festigkeitsklasse für Normalbeton	Mindestzementgehalt z [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
<b>Festigkeit</b>	unbewehrter Beton	$\geq \text{C}8/10$	-
	bewehrter Beton (Innenbauteil)	$\geq \text{C}16/20$	-
<b>Korrosionsschutz der Bewehrung</b>	Karbonatisierung	$\geq \text{C}16/20$	240 - 280
	Chloride	$\geq \text{C}30/37$	300 - 320
<b>Betonkorrosion</b>	Frost ohne Taumittel	$\geq \text{C}25/30$	280 - 320
	Frost mit Taumittel	$\geq \text{C}25/30$	300 - 320
	chemischer Angriff	$\geq \text{C}25/30$	280 - 320
	Verschleiß	$\geq \text{C}30/37$	300 - 320

Da die Zusammensetzung der Gesteinkörnung und insbesondere das Größtkorn den natürlichen Hohlraumgehalt des Korngemisches maßgeblich beeinflusst, gibt die DIN 1045-2 auch Mindestzementgehalte für Standardbetone in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse an (Tabelle 4). Der dort genannte Zementgehalt muss vergrößert werden um

- 10 % bei einem Größtkorn der Gesteinkörnung von 16 mm und
- 20 % bei einem Größtkorn der Gesteinkörnung von 8 mm.

Der Zementgehalt nach Tabelle 4 darf verringert werden um

- höchstens 10 % bei Zement der Festigkeitsklasse 42,5 und
- höchstens 10 % bei einem Größtkorn der Gesteinkörnung von 63 mm.

Tabelle 4: Mindestzementgehalt für Standardbeton mit einem Größtkorn von 32 mm und Zement der Festigkeitsklasse 32,5 nach DIN EN 197-1 [Lit 3]

Druckfestigkeitsklasse	Mindestzementgehalt in kg/m <sup>3</sup> für Konsistenzbeschreibung		
	steif	plastisch	weich
C8/10	210	230	260
C12/15	270	300	330
C16/20	290	320	360

### 3.1.2 Mehlkorngesamt

Beton muss eine ausreichende Menge **Mehlkorn** enthalten, um gut verarbeitbar zu sein, ein geschlossenes Gefüge zu erhalten und kein Wasser abzusondern. Das Mehlkorn besteht aus dem Gehalt an Zement, Zusatzstoff und Gesteinskörnung  $\leq 0,125$  mm. Während in Natur-sanden Mehlkorn fast ganz fehlt, sind Brechsande feinstoffreich. Ein ausreichender Mehlkorngesamt ist besonders bei Beton wichtig, der über längere Strecken und in Rohrleitungen gefördert wird. Er ist aber auch bei Beton für dünnwandige, eng bewehrte Bauteile, bei wasserundurchlässigem Beton und bei Sichtbeton erforderlich. Ein zu hoher Mehlkorngesamt macht sich durch einen übermäßig erhöhten Wasseranspruch bemerkbar und kann dann Eigenschaften, wie z. B. den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel, Frost-Tausalz-Einwirkung, chemischen Angriff oder mechanischen Verschleiß beeinträchtigen (Bild 8).

**Mehlkorn**      Korngröße < 0,125 mm (i.w. Zement + Zusatzstoffe)

Mindestmehlkorngehalt :

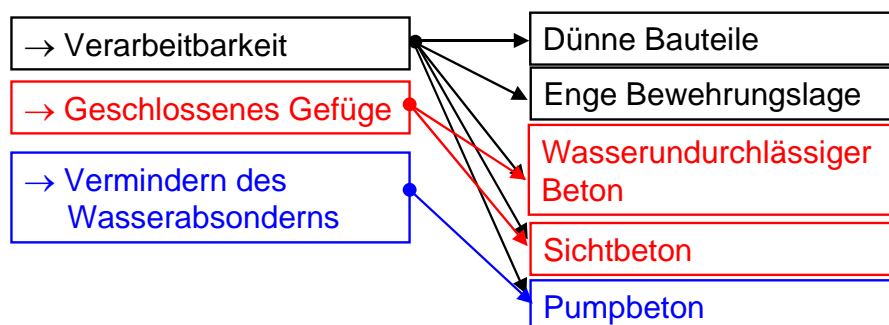


Bild 8: Einflüsse des Mehlkorngesamts [Lit 6]

Der Gehalt an Mehlkorn  $\leq 0,125$  wird daher in DIN 1045-2 auf die Werte in Tabelle 5 und Tabelle 6 begrenzt. Zwischen den genannten Zementgehalten wird geradlinig interpoliert. Die Werte dürfen um bis zu  $50 \text{ kg/m}^3$  erhöht werden, wenn

- der Zementgehalt  $350 \text{ kg/m}^3$  übersteigt, um den darüber hinausgehenden Zementgehalt,
- ein puzzolanischer Zusatzstoff des Typs II verwendet wird, um dessen Gehalt.

Tabelle 5: Höchstzulässiger Mehlkorngehalt für Beton bis zur Festigkeitsklasse C50/60 und LC50/55 in Abhängigkeit von den Expositionsklassen [Lit 5]

Zementgehalt [ $\text{kg/m}^3$ ]	Höchstzulässiger Mehlkorngehalt [ $\text{kg/m}^3$ ]		
	Expositionsklassen		
	XF, XM		X0, XC, XD, XS, XA
	Größtkorn der Gesteinskörnung		
	8 mm	$\geq 16 \text{ mm}$	$\geq 8 \text{ mm}$
$\leq 300$	450	400	550
$\geq 350$	500	450	550

Tabelle 6: Höchstzulässiger Mehlkorngehalt für Beton ab der Festigkeitsklasse C55/67 und LC55/60 für alle Expositionsklassen [Lit 5]

Zementgehalt [ $\text{kg/m}^3$ ]	Höchstzulässiger Mehlkorngehalt [ $\text{kg/m}^3$ ]	
	Expositionsklassen	
	X0, XC, XD, XS, XA, XF, XM	
	Größtkorn der Gesteinskörnung	
	8 mm	$\geq 16 \text{ mm}$
$\leq 400$	550	500
450	600	550
$\geq 500$	650	600

Im Fahrbahndeckenbau erhöht das Mehlkorn die Bildung von Zementschlämme auf der Oberfläche und erschwert das Ausbilden künstlich eingeführter Luftporen. Es ist daher zweckmäßig, den Mehlkorngehalt je 1% künstlich eingeführter Mikroluftporen um etwa 15 kg herabzusetzen.

### 3.1.3 Zugabewasser, Wassergehalt und w/z-Wert

Der **Wassergehalt** setzt sich aus dem Zugabewasser und der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung zusammen. Die Kernfeuchte wassergesättigter poriger Körner wirkt sich auf den Wassergehalt des Zementleims nicht aus. Wenn die Poren nicht wassergefüllt sind, können sie aber dem Zementleim Wasser entziehen, was die geforderte Verarbeitbarkeit des Betons verschlechtert.

Der für einen Beton erforderliche Wassergehalt ergibt sich aus der gewünschten oder geforderten Konsistenz und Verarbeitbarkeit bzw. Verdichtbarkeit. Das für die Hydratation notwendige Wasser ist dadurch im Allgemeinen ausreichend vorhanden.

Als **Zugabewasser** ist Trinkwasser und im Allgemeinen jedes in der Natur vorkommende Wasser geeignet, soweit es nicht Bestandteile enthält, die das Erhärten oder andere Eigenschaften des Betons ungünstig beeinflussen oder den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen. Auch CO<sub>2</sub>-haltige Wässer, die den erhärteten Beton angreifen, können häufig als Anmachwasser verwendet werden, da die angreifenden Stoffe bei der Zementerhärtung gebunden werden.

Ungeeignet sind z. B. Industrierwässer, die Öle, Fette, Zucker, Huminsäure, Kalisalze und größere Anteile an SO<sub>3</sub>, freiem MgO und Chloriden enthalten.

Aus Gründen des Umweltschutzes kann **Restwasser**, das in der Betonproduktion anfällt, z. B. beim Reinigen der Mischer, wegen des hohen pH-Wertes nicht als Abwasser abgeleitet werden. Für Betone bis zur Festigkeitsklasse C50/60 oder LC50/55 kann dieses Restwasser als Zugabewasser verwendet werden. Dabei ist die DIN EN 1008 zu beachten.

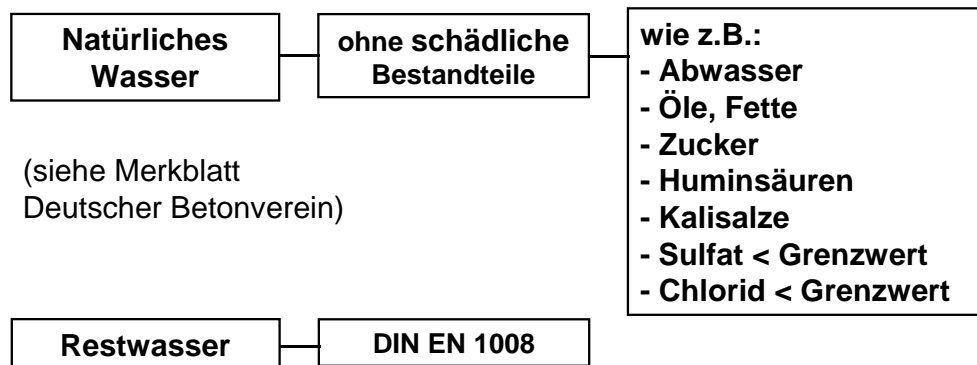


Bild 9: Zugabewasser

Ausgehend von einem gegebenen Zementgehalt bestimmt der Wassergehalt den **w/z-Wert** und damit die Dichte des Zementsteins. Daher ist für den Korrosionsschutz und die Dauerhaftigkeit des Betons die Festlegung des w/z-Wertes sinnvoller als die des Mindestzementgehaltes, da mit dem w/z-Wert der unterschiedliche Wasseranspruch der Gesteinskörnungen berücksichtigt wird, während bei einem großen w/z-Wert selbst ein hoher Zementgehalt den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht mehr gewährleistet. Anforderungen an den maximal zulässigen w/z-Wert in Abhängigkeit ausgewählter Expositionsklassen zeigt Bild 10, eine detaillierte enthält Tabelle 7.

Maßgebend für praktisch alle Betoneigenschaften des Normalbetons ist also der w/z-Wert (vgl. Beziehung zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit Bild 11). Der Zementgehalt spielt nur insofern eine Rolle, als bei zunehmendem Zementgehalt und gleichem w/z-Wert die Verarbeitbarkeit des Frischbetons verbessert wird, weil sich ein dickerer Film aus Zementleim um die einzelnen Gesteinskörner legen kann (vgl. Bild 7). Mit abnehmendem w/z-Wert werden praktisch alle Betoneigenschaften positiv beeinflusst. Der w/z-Wert sollte deshalb immer so klein wie möglich gewählt werden.

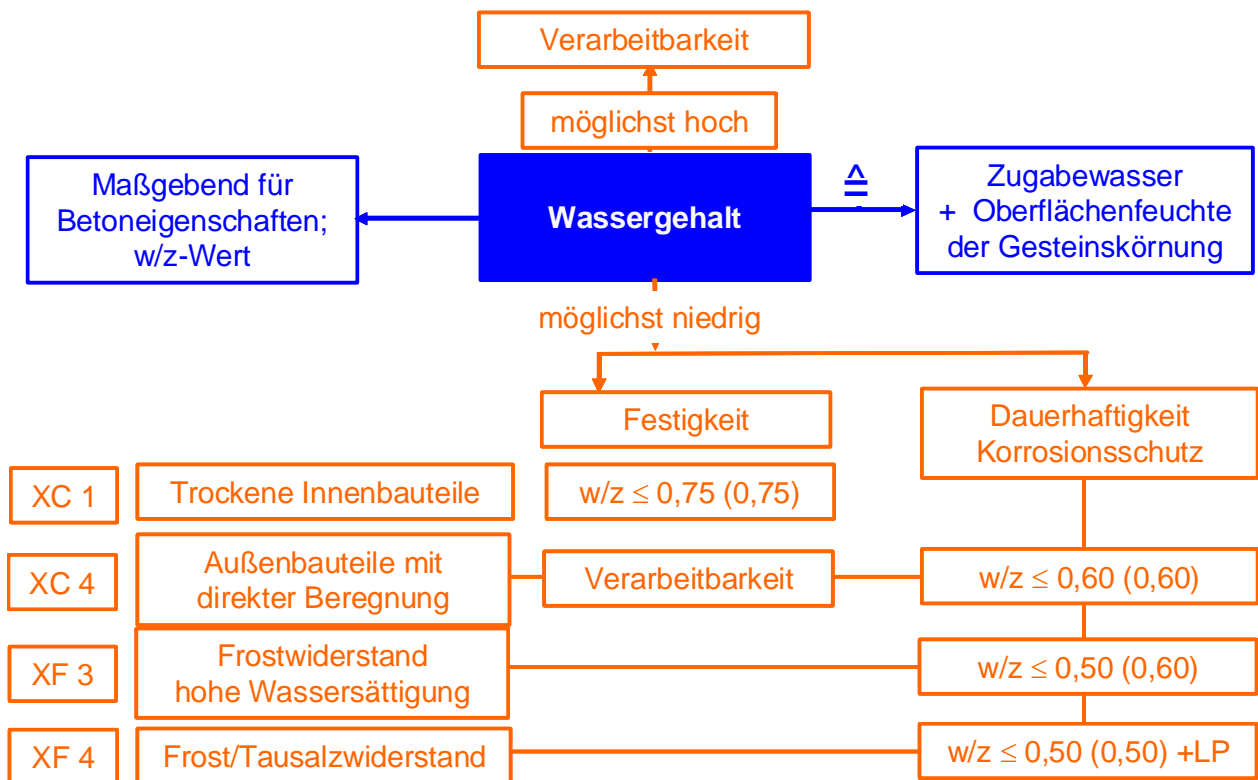


Bild 10: Wassergehalt; w/z-Wert für ausgewählte Expositionsklassen

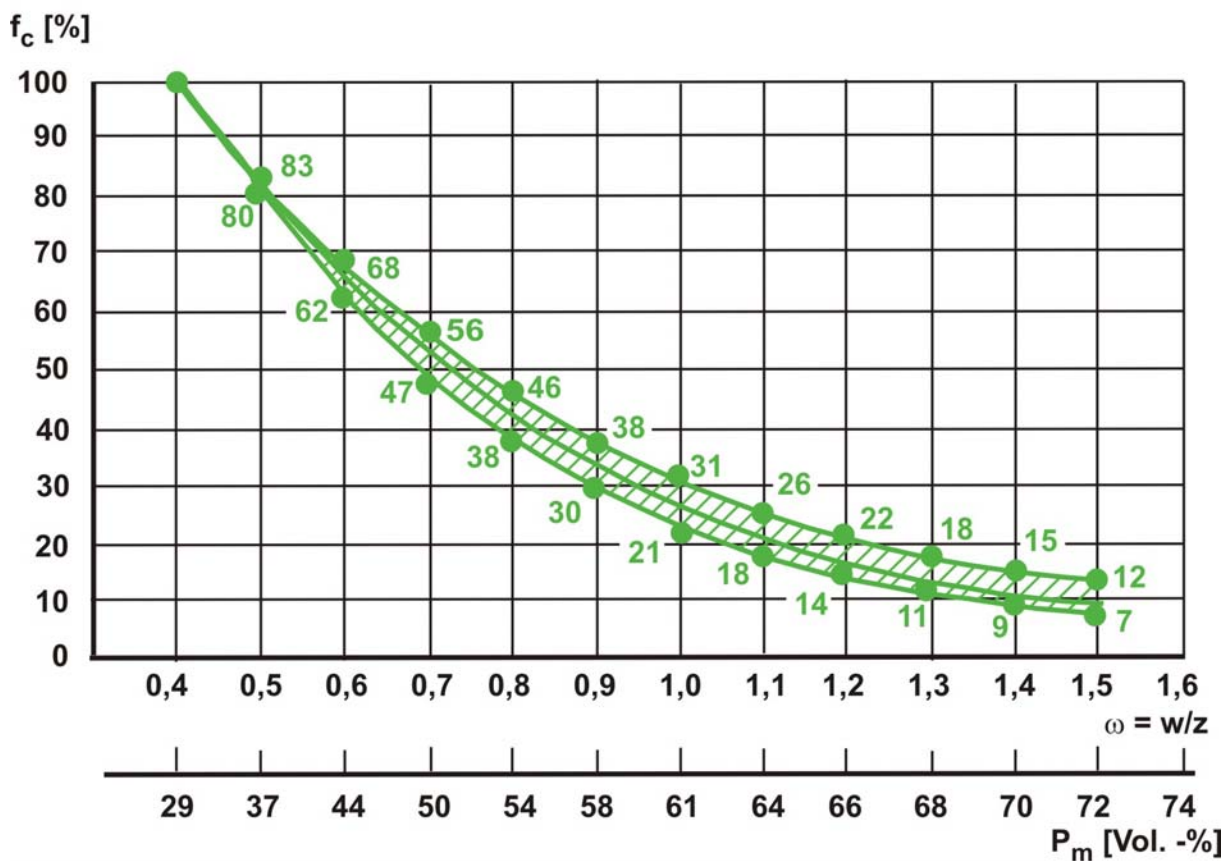


Bild 11: Beziehung zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit von Normalbeton

Tabelle 7: Maximale w/z-Werte nach DIN 1045-2 für die verschiedenen Expositionsklassen

Expositionsklasse	Angriff	Umgebung	Maximaler w/z-Wert
X0	-	alle Umgebungsbedingungen, ausgenommen Frostangriff, Verschleiß oder chemischer Angriff	-
XC1	Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung	trocken oder ständig nass	≤ 0,75
XC2		nass, selten trocken	≤ 0,75
XC3		mäßige Feuchte	≤ 0,65
XC4		wechselnd nass und trocken	≤ 0,60
XD1	Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride	mäßige Feuchte	≤ 0,55
XD2		nass, selten trocken	≤ 0,50
XD3		wechselnd nass und trocken	≤ 0,45
XS1	Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser	salzhaltige Luft	≤ 0,55
XS2		unter Wasser	≤ 0,50
XS3		Tidebereiche, Spritzwasser	≤ 0,45
XF1	Frostangriff ohne Taumittel	mäßige Wassersättigung,	≤ 0,60
XF3		hohe Wassersättigung	≤ 0,55
XF2	Frostangriff mit Taumittel	mäßige Wassersättigung	≤ 0,55
XF4		hohe Wassersättigung	≤ 0,50
XA1	Chemischer Angriff	schwach	≤ 0,60
XA2		mäßig	≤ 0,50
XA3		stark	≤ 0,45
XM1	Verschleißbeanspruchung	mäßig	≤ 0,55
XM2		stark	≤ 0,50
XM3		sehr stark	≤ 0,45

### 3.1.4 Betonzusätze

#### 3.1.4.1 Definitionen

Man unterscheidet zwischen **Betonzusatzmitteln** und **Betonzusatzstoffen**, wobei die Unterscheidung durch die Zugabemenge erfolgt. Zusatzmittel werden beim Mischungsentwurf und der Stoffraumrechnung mengenmäßig nicht berücksichtigt, Zusatzstoffe müssen berücksichtigt werden.

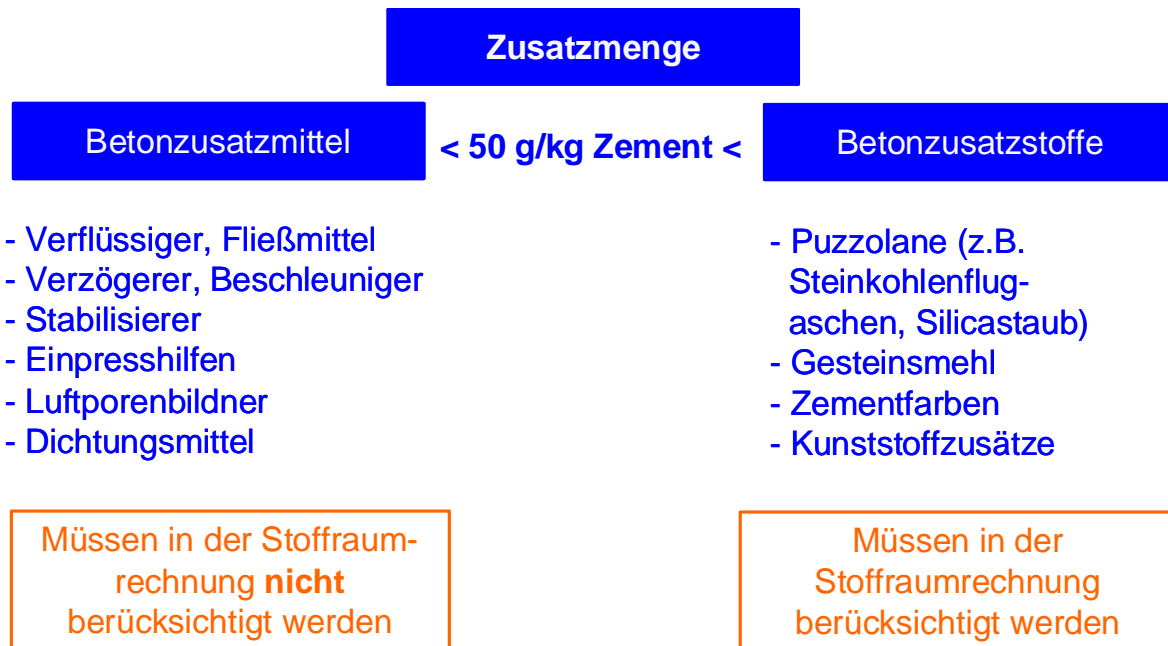


Bild 12: Betonzusatzmittel und –zusatzstoffe

### 3.1.4.2 Betonzusatzmittel

Betonzusatzmittel sind in DIN EN 934 genormt. Sie werden während des Mischvorgangs in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben. Man gibt sie dem Beton flüssig oder pulverförmig zu, um durch chemische und/oder physikalische Wirkung die Frisch- und Festbetoneigenschaften positiv zu verändern. Die Wirkungsweise der Zusatzmittel ist vielseitig. Sie beruht unter anderem auf elektrochemischen Vorgängen, wobei organische, meist positiv geladene Ionen hydrophob (z. B. bei Luftporenbildnern) oder hydrophil (z. B. bei Betonverflüssigern) wirken. Da Betonzusatzmittel dem Beton nur in geringen Mengen ( $\leq 50$  g bzw.  $\text{cm}^3$  je kg Zement) zugegeben werden, müssen sie in der Stoffraumrechnung nicht berücksichtigt werden. Die verschiedenen in DIN EN 934 genormten Betonzusatzmittel, ihre Kurzzeichen, Farbkennzeichnung und Wirkungsweise sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Neben den genormten Betonzusatzmitteln gibt Wirkungsgruppen mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Tabelle 9), die nicht DIN EN 934 geregelt sind.

Der Name des Betonzusatzmittels mit dem in Klammern nachgestellten Kurzzeichen der Wirkungsgruppe darf keine Zusage für eine andere Eigenschaft als die der angestrebten Wirkung (Gruppe BV, LP, DM, VZ, BE, EH, ST) des Zusatzmittels oder des damit hergestellten Betons enthalten. Bei der Anwendung von Betonzusatzmitteln ist zu berücksichtigen, dass diese auch nachteilige Wirkungen haben können, wie z. B.:

- übermäßige Lufteinführung (z. B. von BV bei besonders langen Mischzeiten),
- verzögertes bzw. beschleunigtes Erstarren (von BV bekannt),
- "Umschlagen", das heißt, eine Umkehrung der Wirkung auf das Erstarrungsverhalten von Zementen je nach Zusatzmenge (insbesondere von VZ und BE bekannt),
- erhöhtes Schwindmaß beim Austrocknen des Betons (insbesondere von BV, LP, DM und VZ bekannt),
- Förderung der Reißneigung durch Frühschwinden (insbesondere bei VZ bekannt, weniger bei BV),
- Beeinträchtigung der Festigkeitsentwicklung und der Endfestigkeit (insbesondere von LP, DM und BE bekannt),

- Vergrößertes Kriechen,
- schlechte Sichtbetonflächen – Fleckenbildung - (von VZ bekannt),
- verminderter Widerstand gegen chemisch angreifende Wasser und Böden,
- mittelbar Korrosion fördernde Wirkung.

Tabelle 8: Wirkungsgruppen von Betonzusatzmitteln nach DIN EN 934 und deutschen Anwendungsregeln

<b>Wirkungsgruppe</b>	<b>Kurzzeichen</b>	<b>Farbkennzeichen</b>	<b>Wirkung</b>
Betonverflüssiger	BV	gelb	Verminderung des Wasseranspruchs und/oder Verbesserung der Verarbeitbarkeit
Fließmittel	FM	grau	Wie BV (aber stärker) und zur Herstellung von Beton mit fließfähiger Konsistenz
Verzögerer/ Fließmittel	FM	grau	Kombinierte Wirkung FM (Hauptwirkung) und VZ (Nebenwirkung)
Stabilisierer	ST	violett	Vermindern des Absonderns von Zugabewasser (Bluten)
Luftporenbildner	LP	blau	Einführen gleichmäßig verteilter kleiner Luftporen zur Erhöhung des Frost- / Taumittelwiderstands
Erstarrungsbeschleuniger	BE	grün	Beschleunigt Übergang vom plastischen in den festen Zustand
Erhärtungsbeschleuniger	BE	grün	Beschleunigt Anfangsfestigkeit
Verzögerer	VZ	rot	Verlängert Zeit bis zum Übergang von plastisch zu fest
Dichtmittel	DM	braun	Verringerung der kapillaren Wasseraufnahme von Festbeton
Einpresshilfe (DIN EN 934-4)	EH	weiß	Verbesserung der Fließfähigkeit, Verminderung des Wasseranspruchs, Verminderung des Absetzens bzw. Erzielen einesmäßigen Quellens von Einpressmörteln

Außerdem können die Betonzusatzmittel die Raumbeständigkeit, das Erstarren, den Frostwiderstand, die Wasseraufnahme und die Wasserdichtheit beeinflussen. Gelegentlich wird eine Eigenschaft auf Kosten einer anderen verbessert. Eine Eignungsprüfung ist daher immer erforderlich.

Tabelle 9: Wirkungsgruppen von Betonzusatzmitteln mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung

Wirkungsgruppe	Kurzzeichen	Farbkennzeichen	Wirkung
Chromatreduzierer	CR	rosa	Reduzierung von Chrom (VI) zu Chrom (III)
Recyclinghilfe für Washwasser	RH	schwarz	Wiederverwendung von Washwasser, das beim Reinigen von Mischfahrzeugen, Mischern, usw. anfällt
Recyclinghilfe für Restbeton	RB	schwarz	Wiederverwendung von Restbeton, der als Rückbeton von der Baustelle zurückkommt
Schaumbildner	FM	grau	Einführung von Luftporen (Schaumbeton)

### 3.1.4.2.1 Fließmittel und Betonverflüssiger

Neben den Fließmitteln beeinflussen auch Betonverflüssiger die Konsistenz und Verarbeitbarkeit. Die verflüssigende Wirkung wird entweder durch grenzflächenaktive Stoffe oder durch dispergierende Stoffe erreicht.

Die grenzflächenaktiven Stoffe setzen die Oberflächenspannung des Wassers herab und verbessern dadurch die Benetzung von Bindemittel und Gesteinskörnung (Bild 13). Da weniger Wasser zum Benetzen der Oberfläche benötigt wird, kann der Wassergehalt reduziert werden.

Bei den dispergierenden Stoffen sind durch ihren molekularen Aufbau Polarisierungen innerhalb des Moleküls möglich. Nach der Anlagerung (Adsorption) der Moleküle an die Gesteinskörnung bzw. den Zement entsteht eine Abstoßung (Dispersion) der Teilchen über die polarisierten Molekülgruppen (Bild 14). Tabelle 10 ordnet die für BV und FM gebräuchlichen Wirkstoffe den genannten Mechanismen zu und hebt Eigenschaften hervor.

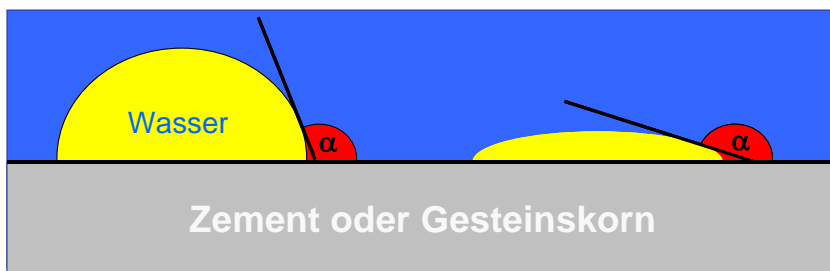


Bild 13: Wirkungsweise grenzflächenaktiver Stoffe

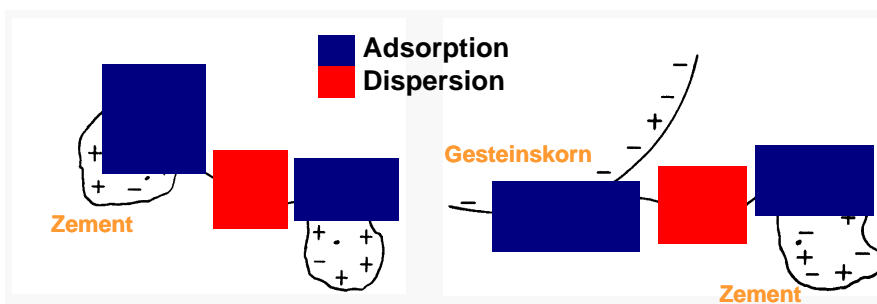


Bild 14: Wirkungsweise dispergierender Stoffe

Tabelle 10: Wirkstoffe für BV / FM und ihre Eigenschaften

	<b>Wirkstoff</b>	<b>Eigenschaften</b>	<b>Anwendungen</b>
<b>grenzflächenaktiv</b>	Naphthalinsulfonate	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ können verzögern</li> <li>▪ sehr gute Plastifizierung</li> <li>▪ neigen zur Luftporenbildung</li> <li>▪ kommerziell sehr interessant</li> <li>▪ Nebenprodukt der Zelluloseindustrie</li> <li>▪ sehr gute Plastifizierung</li> </ul>	BV / FM
	Ligninsulfonate	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ synthetisch hergestellt</li> <li>▪ billige Qualitäten neigen zur Luftbildung</li> <li>▪ gute Plastifizierung, müssen jedoch höher dosiert werden</li> </ul>	BV
<b>dispergierend</b>	Melaminharze	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ keine Verzögerung</li> <li>▪ Klebe-Effekt</li> <li>▪ hervorragend geeignet für LP-Betone</li> <li>▪ sehr gute Plastifizierung, bei teilweise sehr geringen Dosiermengen</li> </ul>	BV / FM
	Polycarboxylate / Polycarboxylatether	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ sehr lange anhaltende Plastifizierung</li> <li>▪ gutes Zusammenhaltevermögen der Betonmischung</li> </ul>	BV / FM

Durch Verflüssiger und Fließmittel kann z. B. ein plastischer Beton (mit 400 mm Ausbreitmaß) in einen weichen Beton umgewandelt werden. Andererseits ist es auch möglich bei gleicher Konsistenz durch die Verwendung von BV oder FM den Wassergehalt zu reduzieren, was sich günstig auf die Betoneigenschaften auswirkt (Bild 15). Die Wirkungsdauer von BV und FM ist begrenzt (Bild 16). Die Konsequenz ist, dass diese beiden Zusatzmittel im Transportbetonmischer zu- bzw. nachdosiert werden dürfen.

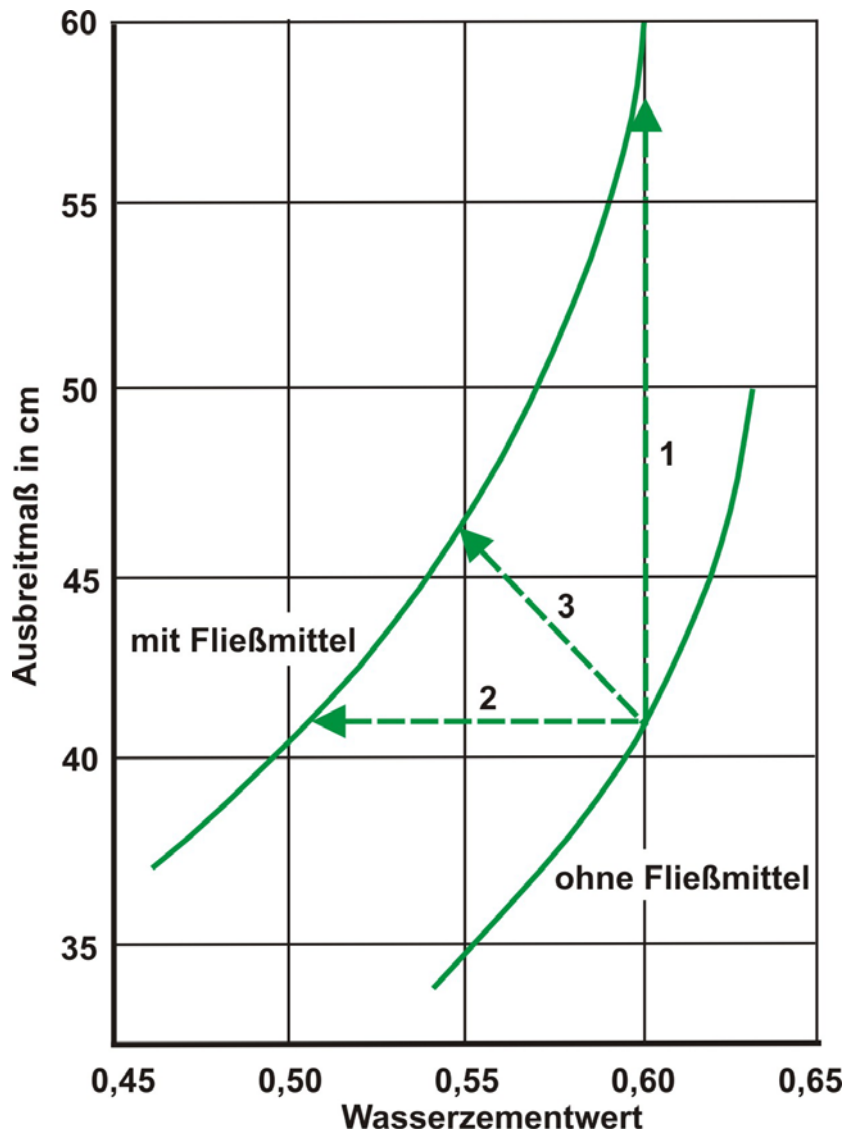
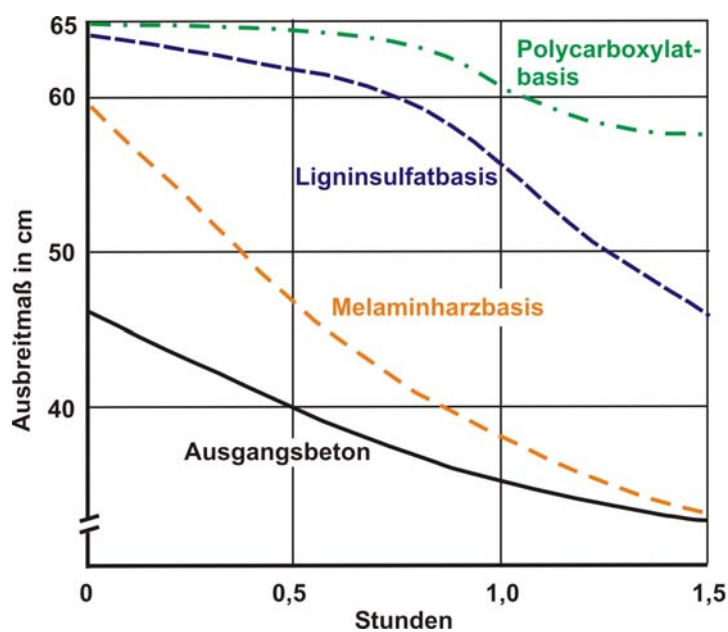


Bild 15: Mögliche Nutzung der verflüssigenden Wirkung von BV und FM



Beton mit 320 kg/m<sup>3</sup> CEM I  
 $\omega = 0,56$   
 $T = 20\text{ °C}$

**Konsequenz**  
 Zugabe der Fließmittel  
 auf der Baustelle bei  
 längerer Einbaudauer

Bild 16: Wirkungsdauer von Fließmittel bei sofortiger Zugabe [Lit 6]

### 3.1.4.2.2 Luftporenbildner

Luftporenbildner (LP) sind grenzflächenaktive Stoffe (Detergentien). Sie besitzen ein hydrophiles und ein hydrophobes Ende. Dadurch können sie sich an der Grenzfläche Luft/Wasser ausrichten. Die Luftporen entstehen in Wasser bzw. einer wässrigen Matrix durch den Eintrag von Mischenergie und bleiben durch den Luftporenbildner stabil. Aufgrund ihrer Geometrie verbessern Luftporenbildner die Verarbeitbarkeit durch den „Kugellagereffekt“. Es ist daher teilweise möglich, fehlendes Mehlkorn zu ersetzen.

Die Luftporenbildner sollen im Beton ein fein verteiltes System aus **Mikroluftporen** mit einem Abstand von  $< 0,2$  mm und einem Durchmesser  $< 0,3$  mm bilden. Diese Mikroluftporen unterbrechen die Kapillarporen und erzielen so eine Frostbeständigkeit des Betons.

Tabelle 11: Wirkstoffe für Luftporenbildner und ihre Eigenschaften

	<b>Wirkstoff</b>	<b>Eigenschaft</b>
<b>natürlich</b>	Wurzelharz	<ul style="list-style-type: none"><li>• ca. 50 % Mikroluftanteil</li><li>• Porengefüge kann leichter zerstört werden</li><li>• begrenzte Verfügbarkeit</li></ul>
<b>synthetisch</b>	synthetische Tenside	<ul style="list-style-type: none"><li>• ca. 80 % Mikroluftanteil</li><li>• stabiles Porengefüge</li><li>• gute Verfügbarkeit</li></ul>

### 3.1.4.2.3 Verzögerer

Der Ablauf der Hydratation mit VZ entspricht im Wesentlichen dem Ablauf bei der allgemeinen Hydratation. Die Verzögerer bewirken eine Verlängerung der Ruhephase. Der Mechanismus ist noch nicht vollständig geklärt. Es gibt folgende Hypothesen:

- Adsorption des VZ an der reaktiven Oberfläche,
- Adsorption von Reaktionsprodukten des VZ an der Oberfläche oder
- Komplexbildung des VZ mit den Calciumionen.

Als Verzögerer werden organische und anorganische Wirkstoffe eingesetzt (Tabelle 12):

Tabelle 12: Wirkstoffgruppen für Betonverzögerer

	Art	Eigenschaft
anorganisch	Phosphate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr gute Wirkung</li> <li>• für Verzögerungszeiten &gt; 24 h geeignet</li> <li>• keine verflüssigende Wirkung</li> <li>• moderate, stetige Zunahme der Wirkung mit der Dosierung</li> <li>• für verzögerten ZTV-K-Beton vorgeschrieben</li> </ul>
organisch	Saccharose (Zucker)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr gute Wirkung</li> <li>• Neigung zum Umschlagen</li> <li>• für Verzögerungszeiten &gt; 24 h geeignet</li> <li>• bevorzugter Einsatz im Mörtelbereich</li> </ul>
	Hydroxy-carbonsäuren (z. B. Zitronensäure)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• gute Wirkung</li> <li>• wirkt gleichzeitig verflüssigend</li> <li>• für Verzögerungszeiten bis wenige Stunden geeignet</li> <li>• keine Zulassung für ZTV-K-Beton</li> </ul>
	Lignin-sulfonate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wirkt gleichzeitig verflüssigend</li> <li>• geringe Wirkung</li> </ul>

### 3.1.4.3 Betonzusatzstoffe

Betonzusatzstoffe sind fein aufgeteilte Stoffe, die dem Beton zugegeben werden, um einzelne Eigenschaften zu beeinflussen. Dies sind vorrangig die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und die Dichtigkeit des Festbetons. Wegen der höheren Zugabemenge als bei Betonzusatzmitteln sind sie als Stoffraumkomponente in der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen. Betonzusatzstoffe dürfen das Erhärten und die Beständigkeit des Betons nicht beeinträchtigen und den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht gefährden. Eine Einteilung der Betonzusatzstoffe ist Bild 17 zu entnehmen.

#### Anorganisch-mineralische Stoffe

Unterscheidung nach ihrer Reaktionsfähigkeit in:

##### Inerte Stoffe

Zusatzstoff des Typs I  
nach DIN 1045-2

- z. B.:
- Gesteinsmehl
  - Bentonit
  - Zementfarben

##### Puzzolanische und latent hydraulische Stoffe

Zusatzstoff des Typs II  
nach DIN 1045-2

- z. B.:
- Hüttensand
  - Steinkohlenflugasche
  - Mikrosilika
  - Trass

#### Organische Stoffe

- z. B.:
- Kunststoffe, Kautschuk, Bitumen
  - insbesondere für Instandsetzungsmörtel

Bild 17: Betonzusatzstoffe - Einteilung [Lit 6]

### 3.1.4.3.1 Anorganisch mineralische Stoffe

Sie werden in Mehlkorngröße verwendet. Die wichtigsten Vertreter sind Gesteinsmehle, Steinkohlenflugasche und Silikastaub (Nebenprodukt durch Kondensation verdampfter Kieselsäure bei der Herstellung von Silicium- und Ferrosilicium-Legierungen). Anorganische Zusatzstoffe werden in DIN 1045-2 in zwei Typen unterteilt:

- **inerte Zusatzstoffe (Typ I)**, dazu zählen Gesteinsmehl, Bentonit, Farbstoffe, Zementfarben,
- **puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe (Typ II)**, dazu zählen z. B. Trass, Steinkohlenflugasche oder granuliert glasige Hochofenschlacke (Hüttensand).

Puzzolane können

- die Verarbeitbarkeit bei gleichem Wassergehalt verbessern,
- das Bluten vermindern,
- die Wasserdichtheit durch Quellen erhöhen,
- die Hydratationswärme, das Schwindmaß und damit die Reißneigung verringern,
- die chemische Widerstandsfähigkeit verbessern und
- die Entstehung von Ausblühungen durch  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Bindung verhindern.

**Zementfarben** sind anorganische Pigmente aus Metalloxiden und Metallsalzen. Organische Farbstoffe sind nicht geeignet. Verwendet werden sie bei Sichtbeton, im Straßenbau zur Schwarzeinfärbung oder für weiße Randsteine und farbige Fahrspuren.

Ausgewählte Metalloxide sind z. B.:

- Eisenoxide für Rot-, Gelb-, Braun-, Schwarzfärbung,
- Titandioxid für Weißfärbung,
- Chromoxidgrün für Grünfärbung.

Bei der Festlegung der Betonzusammensetzung können Betonzusatzstoffe des Typs II auf den Wasserzementwert und den Mindestzementgehalt angerechnet werden. In der Stoffraumrechnung geschieht dies durch Austausch des Begriffes „Wasserzementwert“ gegen den „äquivalenten Wasserzementwert“ mit Hilfe des k-Wert-Konzeptes. Der ansetzbare k-Wert hängt vom jeweiligen Zusatzstoff ab. Um den  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Verbrauch für die puzzolane Reaktion zu begrenzen und durch eine ausreichende Alkalität der Porenlösung einen sicheren Schutz gegen das Carbonatisieren zu gewährleisten, wird zusätzlich der maximale Gehalt der Betonzusatzstoffe begrenzt.

Nach [Lit 4] sind bei der Anrechnung folgende Randbedingungen einzuhalten:

Tabelle 13: Maximal zulässige Zusatzstoffgehalte des Typs II (f, z und s in [kg/m<sup>3</sup>])

	<b>Flugasche (f)</b>	<b>Silikastaub (s)</b>	<b>Flugasche und Silikastaub</b>
Maximaler Zusatzstoffgehalt zur Sicherstellung der Alkalität der Porenlösung	keine Beschränkung <sup>1)</sup>	$s/z \leq 0,11$	$s/z \leq 0,11$ $f/z \leq 3 \cdot (0,22 - s/z)^{7)}$ $f/z \leq 3 \cdot (0,15 - s/z)$
Anrechenbarer Zusatzstoffgehalt für den äquivalenten Wasserzementwert	$f/z \leq 0,33$ <sup>2)</sup> $f/z \leq 0,25$ <sup>3)</sup> $f/z \leq 0,15$ <sup>1)</sup>	$s/z \leq 0,11$	$f/z \leq 0,33$ $s/z \leq 0,11$
k-Wert	$k_f = 0,4$	$k_s = 1,0$	$k_f = 0,4$ $k_s = 1,0$
äquivalenter Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$	$w/(z + k_f \cdot f)$	$w/(z + k_s \cdot s)^{6)}$	$w/(z + k_f \cdot f + k_s \cdot s)^{6)}$
Reduzierter Mindestzementgehalt $z_{min}$	$z + f \geq z_{min}$	$z + f \geq z_{min}$	$z + f + s \geq z_{min}^{6)}$
Zulässige Zementarten	CEM I CEM II/A-D CEM II/A-S oder CEM II/B-S CEM II/A-T oder CEM II/B-T CEM II/A-LL CEM II/A-P CEM II/A-V <sup>4)</sup> CEM II/A-M (S, D, P, V, T, LL) <sup>5)</sup> CEM II/B-M ((S-D), (S-T), (D-T)) <sup>5)</sup> CEM III/A <sup>4)</sup> CEM III/B ( $S_{max} \leq 70$ M-%) <sup>6)</sup>	CEM I CEM II/A-S oder CEM II/B-S CEM II/A-P CEM II/B-P CEM II/A-V CEM II/A-T oder CEM II/B-T CEM II/A-LL CEM II/A-M (S, P, V, T, LL) <sup>5)</sup> CEM II/B-M ((S-T), S-V) <sup>5)</sup> CEM III/A CEM III/B	CEM I CEM II/A-S oder CEM II/B-S CEM II/A-T oder CEM II/B-T CEM II/A-LL CEM II/A-M ((S-T), (S-LL), (T-LL)) CEM II/B-M (S-T) CEM III/A
<sup>1)</sup> $f/z \leq 0,15$ für CEM mit dem Hauptbestandteil D <sup>2)</sup> für CEM ohne die Hauptbestandteile P, V und D <sup>3)</sup> für CEM mit den Hauptbestandteilen P oder V ohne D <sup>4)</sup> für die Expositionsklasse XF4 ist DIN 1045-2/A2, Tab. F.3.1 zu beachten <sup>5)</sup> für die Expositionsklassen ist DIN 1045-2/A2, Tab. F.3.2 zu beachten <sup>6)</sup> für alle Expositionsklassen mit Ausnahme von XF2 und XF4 <sup>7)</sup> für CEM I für die Verwendung von Flugasche in Unterwasserbeton gilt: $(z + f) \geq 350$ kg/m <sup>3</sup> ; $(w/z)_{eq} = w/(z + 0,7 \cdot f) \leq 0,60$			

### 3.1.4.3.2 Organische Zusatzstoffe

Organische Zusatzstoffe (Kunststoffe, Kautschuk, Bitumen, Kunstharzdispersionen) werden insbesondere für Instandsetzungsmörtel verwendet, um die Haftung, Zugfestigkeit und Dichtigkeit zu verbessern und das Aushärten in dünnen Schichten ohne zusätzliche Feuchtnachbehandlung zu ermöglichen. Kunststoffzusätze dürfen im alkalischen Milieu nicht verseifen.

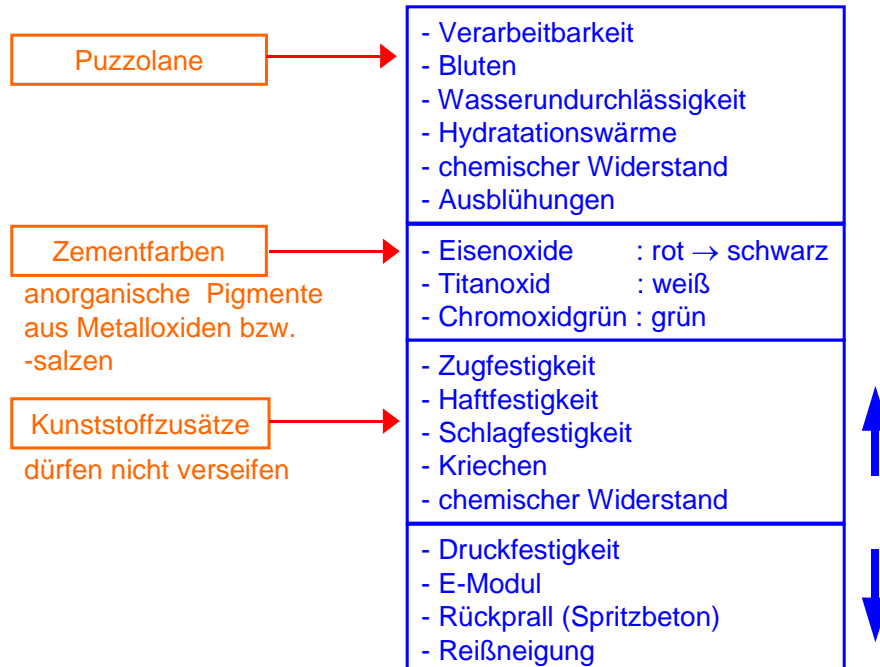


Bild 18: Betonzusatzstoffe [Lit 6]

## 3.2 Verarbeitbarkeit und Konsistenz

### 3.2.1 Begriffsbestimmung

Die Verarbeitbarkeit beeinflusst maßgeblich das Verhalten des Frischbetons unter äußerer Beanspruchung beim Mischen, Transportieren, Einbringen, Verdichten und Verarbeiten. Sie ist genauso wie die Druckfestigkeit eine maßgebende Betoneigenschaft und wird in den meisten Fällen durch die Konsistenz gekennzeichnet.

Unter **Konsistenz** versteht man den messbaren Steifezustand des Frischbetons. Er kann sehr steif, steif, plastisch, weich, sehr weich, fließfähig oder sehr fließfähig sein (Bild 19).

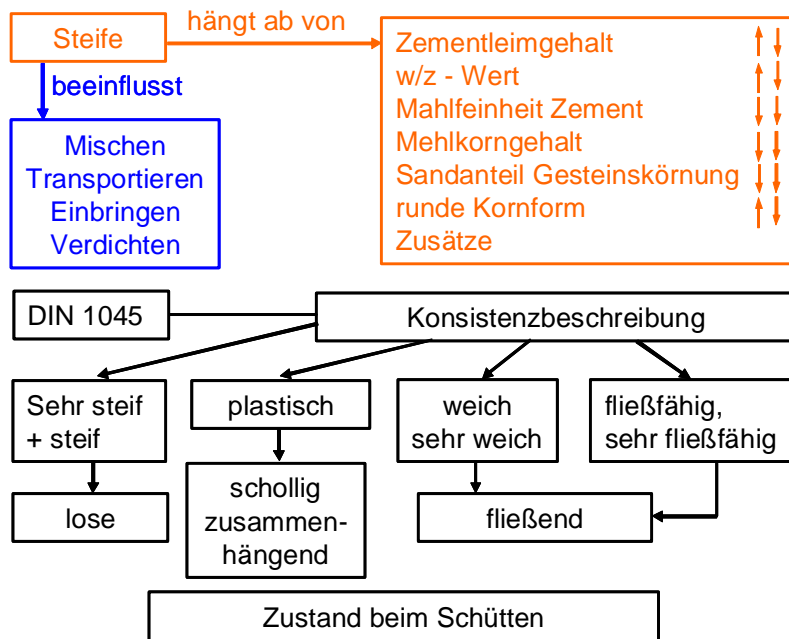


Bild 19: Verarbeitbarkeit – Konsistenz

### 3.2.2 Bedeutung von Verarbeitbarkeit und Konsistenz

Frischbeton ist ein Zweiphasenstoff, dessen Verformungsverhalten vom Zementleim und der darin bewegten Gesteinskörnung (z. B. Sand und Kies) beeinflusst wird (siehe Bild 7). Die Verarbeitbarkeit wird daher wesentlich durch die Zementleimmenge und durch den w/z-Wert des Leims beeinflusst. Je höher die Zementleimmenge ist, desto dicker ist der Film aus Zementleim, der sich nach Füllen der Haufwerksporen der Gesteinskörnung um jedes Gesteinspartikel legen kann. Je höher der w/z-Wert wiederum ist, desto fließfähiger ist der Zementleim und desto eher neigt der Beton zur Entmischung. Eine weichere Betonkonsistenz, die durch einen erhöhten Wassergehalt erzielt wurde, ist also nicht immer gleichbedeutend mit einer verbesserten Verarbeitbarkeit, weil der Zusammenhalt des Frischbetons durch einen zu hohen Wassergehalt verschlechtert wird. Nur wenn die Verarbeitbarkeit auf die Anforderungen des Festbetons abgestimmt wird, können dessen vorgesehene Eigenschaften optimal werden.

Die erforderliche Konsistenz richtet sich nach dem Verwendungszweck und den Einbaumöglichkeiten des Frischbetons. Sie ist so zu wählen, dass sich der Beton nicht entmischt und vollständig verdichtet werden kann (Bild 20). Je weicher der Frischbeton ist, desto leichter lässt er sich im Allgemeinen einbringen und verdichten. Jedoch neigt weicher Beton eher zum Entmischen als plastischer Beton mit gutem Zusammenhaltevermögen.

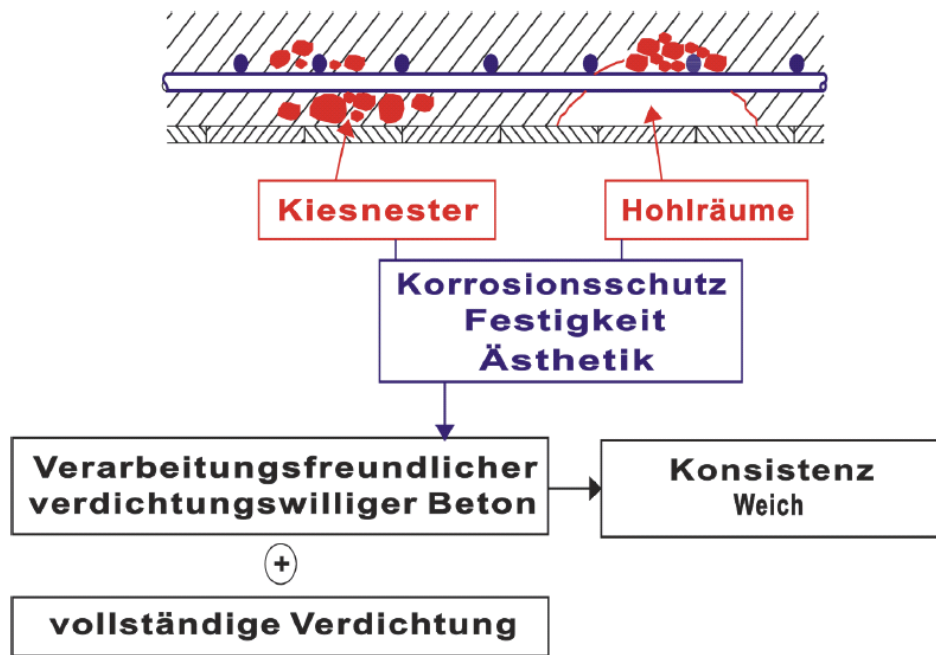


Bild 20: Bedeutung der Konsistenz und der Verdichtung [Lit 6]

Die Verarbeitbarkeit ist eine komplexe, physikalisch nicht genau definierbare rheologische Eigenschaft, die die Begriffe Mischbarkeit, Transportierbarkeit (Widerstand gegen Entmischen beim Transport) und Verdichtbarkeit umschließt. Die Komplexität der Zusammenhänge zeigt Bild 21.

Die Verarbeitbarkeit ist vor allem eine Funktion des Wasser-, Zement- und Mehlkorngehaltes, des w/z-Wertes, der Zementart, der Kornzusammensetzung und der Kornform der Gesteinskörnung. Der Beton wird bei Konstanthalten der jeweils anderen Einflüsse weicher mit

- größerem Wasser- bzw. Zementleimgehalt,
- größerem Wasser-Zement-Wert,
- größerem Zement,
- kleinerem Mehlkorngehalt,
- sandärmerer Kornzusammensetzung und
- rundlicherer Kornform.

Die in Bild 21 genannten Einflüsse wirken sich auf die verschiedenen Frischbetonbeanspruchungen nicht gleichmäßig aus. So lässt sich zwar der Frischbeton bei gleicher Verarbeitbarkeit, aber sandreicher Kornzusammensetzung leichter verteilen und auf der Oberfläche glätten, aber nur mit größerem Energieaufwand verdichten. Dies hängt zum einen zusammen mit der abnehmenden inneren Reibung im Beton mit kleiner werdender Gesteinskörnung. Zugleich nimmt die Kohäsion des Zementmörtels durch die größere spezifische Oberfläche zu und da erschwert das Herauslösen kleiner Luftporen.

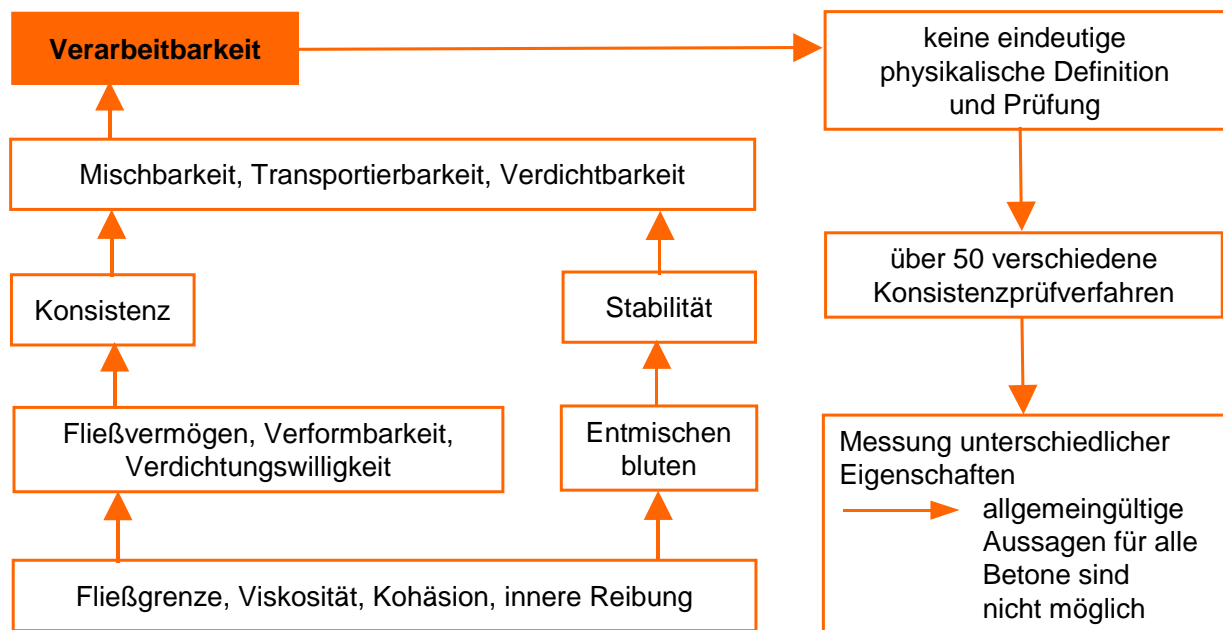


Bild 21: Verarbeitbarkeit von Beton [Lit 6]

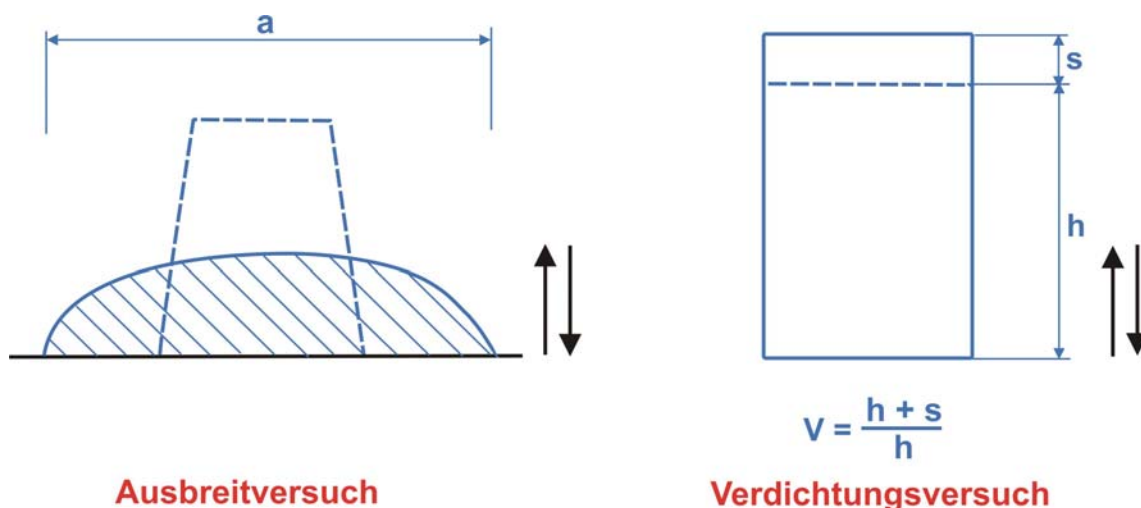
### 3.2.3 Konsistenzprüfungen und Konsistenzklassen

Die Verarbeitbarkeit ist kein physikalischer Begriff, sondern stellt eine unbekannte Mischung der Eigenschaften Fließvermögen, Verformbarkeit und Verdichtbarkeit dar. Eine eindeutige physikalische Definition und Prüfung ist überhaupt nicht möglich. Hinzu kommt, dass sich der Frischbeton beim Transport im plastischen, beim Mischen und Verdichten dagegen im flüssigen Zustand und beim Einbringen zeitweise in beiden Zuständen befindet. Während man sich nun bei der Verformung des Festbetons und dessen Prüfung weitgehend rheologischer Kenntnisse und Verfahren bedient, wurde die Frischbetonverformung zunächst einmal in Bezug auf die vorgesehene Beanspruchung qualitativ nach Augenschein beurteilt, z. B. nach der Neigung zum Entmischen in Behältern und Pumpleitungen, nach dem Fließen des Betons beim Einbringen und Rütteln, nach dem Schließen des Betons beim Ziehen des Innenrüttlers usw..

Im Laufe der Zeit wurden verschiedene praxisnahe Prüfverfahren entwickelt, die den Frischbeton auch quantitativ beurteilen sollen, die jedoch jeweils nur Teilbereiche der Frischbetonverformung erfassen. Sie arbeiten fast alle mit dem Einfluss der Schwerkraft, wirken aber unterschiedlich und messen damit immer andere Frischbetoneigenschaften.

Die Konsistenz als Messgröße für die Verarbeitbarkeit ist kein Maßstab für die Betongüte. Konsistenzänderungen geben jedoch Hinweise auf Mischungsänderungen. Zusammen mit der Frischbetonrohddichte (gemessen z. B. mithilfe des Luftporentopfes, vgl. Kap. 3.7.4) gestatten die Konsistenzmaße eine gute Frischbetonüberwachung.

Zum Bestimmen der Frischbetonkonsistenz wurde eine Reihe von Verfahren entwickelt. Auf baustellengerechte Verfahren wie den **Verdichtungsversuch**, den **Ausbreitversuch**, den **Setzzeitversuch** (Vébé) und den **Setzmaß-Versuch (Slump-Test)** wird in DIN 1045 Bezug genommen (Bild 22 und Bild 23).

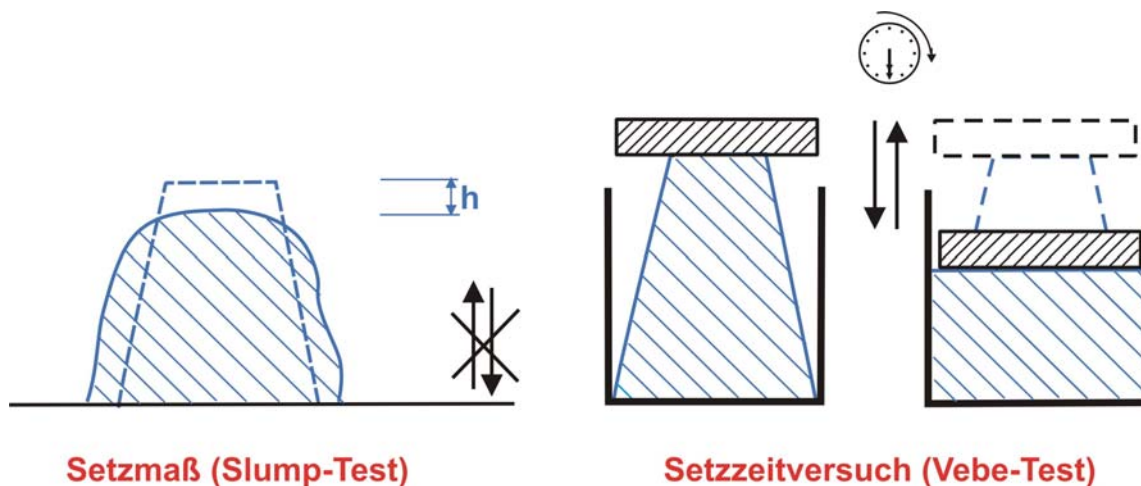


**Ausbreitversuch**

**Verdichtungsversuch**

Bild 22: Wirkungweise verschiedener Konsistenzprüfverfahren [Lit 6]

Da eine zuverlässige Korrelation zwischen den Ergebnissen der vier verschiedenen Prüfmethoden nicht möglich ist, muss stets das zugehörige Prüfverfahren angegeben werden. In DIN 1045-2 sind für den Verdichtungsversuch (C von compaction), und den Ausbreitversuch (F von flow), Angaben über **Konsistenzklassen** gegeben, die nachfolgend näher umschrieben werden (Tabelle 14).



**Setzmaß (Slump-Test)**

**Setzzeitversuch (Vebe-Test)**

Bild 23: Wirkungweise verschiedener Konsistenzprüfverfahren [Lit 6]

Tabelle 14: Konsistenzbereiche

Konsistenzbereich	Ausbreitmaßklasse [mm]		Verdichtungsmaßklasse [-]	
sehr steif	-	-	C0	≥1,46
steif	F1	≤ 340	C1	1,45 – 1,26
plastisch	F2	350 – 410	C2	1,25 – 1,11
weich	F3	420 – 480	C3	1,10 – 1,04
sehr weiche	F4	490 – 550	C4 (nur LC)	< 1,04
fließfähig	F5	560 – 620	-	-
sehr fließfähig	F6	≥ 630	-	-
selbstverdichtend	-	> 700		

### **Sehr steifer Beton (C0)**

Der Feinmörtel des Betons ist erdfeucht. Beim Schütten zerfällt der Frischbeton in größere Brocken, die überwiegend etwas größer sind als das Größtkorn. Sehr steifer Beton wird für Bauteile aus Roller Compacted Concrete eingesetzt, er wird mit Rüttelwalzen verdichtet.

### **Steifer Beton (C1; F1)**

Der Feinmörtel im Beton ist etwas nasser als erdfeucht. Der Beton ist beim Schütten noch lose. Er ist durch kräftig wirkende Rüttler bzw. durch kräftiges Stampfen dünner Schüttlagen verdichtbar.

### **Plastischer Beton (C2; F2)**

Der Feinmörtel im Beton ist weich. Beim Schütten ist der Beton schollig bis knapp zusammenhängend. Er ist durch Rütteln leicht, aber auch durch Stochern und Stampfen von Hand zuverlässig zu verdichten.

### **Weicher Beton (C3; F3)**

Der Feinmörtel des Betons ist flüssig, der Beton beim Schütten schwach fließend. Zu seiner Verdichtung ist keine größere Verdichtungsarbeit erforderlich.

Dieser Konsistenzbereich wurde in der alten DIN 1045 als „Regelkonsistenz“ (KR) bezeichnet, womit zum Ausdruck gebracht wurde, dass dieser Konsistenzbereich im Regelfall verwendet werden sollte. Auch die aktuelle DIN 1045-2 empfiehlt den Einsatz von Beton mit weicher Konsistenz.

### **Pumpbarer Leichtbeton (C4)**

Leichtbeton zeigt wegen seiner geringeren Rohdichte ein anderes Fließverhalten als Normalbeton. Für die Beurteilung der Konsistenz fließfähiger und pumpbarer Leichtbetone wurde deshalb extra die Verdichtungsmaßklasse C4 eingeführt. Sie gilt nur für Leichtbeton und darf nicht für Normal- und Schwerbeton angewendet werden.

### **Fließfähiger Beton (F4 bis F6)**

Fließfähiger Beton darf nur als mit einem Fließmittel hergestellter **Fließbeton** verwendet werden. Die Konsistenz des Ausgangsbetons (Beton ohne Fließmittel) soll einem Ausbreitmaß von 380 bis 420 mm, höchstens aber 440 mm entsprechen. Die DIN 1045- 2 teilt drei Konsistenzbereiche ein: sehr weich (490 – 550 mm), fließfähig (560 – 620 mm) und sehr fließfähig ( $\geq 630$  mm).

### **Selbstverdichtender Beton (SVB)**

Beton mit einem Ausbreitmaß von mehr als 700 mm werden als Selbstverdichtende Betone bezeichnet. Sie sind in Deutschland in der Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ des DAfStb geregelt und werden europäisch in E DIN EN 206-9 behandelt.

Die üblichen Verfahren der Konsistenzbestimmung sind für Selbstverdichtende Betone nicht geeignet. Die Fließfähigkeit von SVB wird im Setzfließversuch bestimmt. Aussagen zur Viskosität werden entweder aus dem Setzfließversuch über die Fließzeit  $t_{500}$  oder im Trichter-auslaufversuch über die Auslauftrichterzeit (Bild 24) gewonnen.

Die Fähigkeit des SVBs, Hindernisse zu umfließen bzw. enge Bereiche (z. B. dichte Bewehrung) zu passieren, wird anhand der Neigung zum Blockieren überprüft. Aussagen hierzu liefern der L-Kasten-Versuch oder der Blockieringversuch (Bild 25). Während des Fließens und nach dem Einbau darf sich der SVB nicht durch Sedimentieren entmischen.

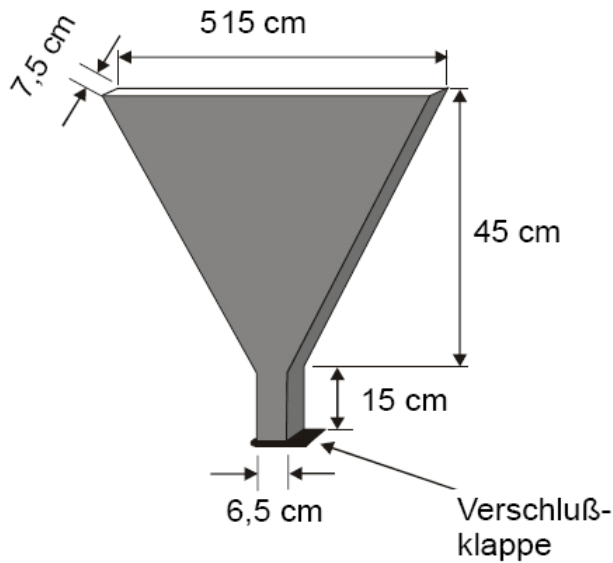


Bild 24: Auslauftrichter nach E DIN EN 12350-9

Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB kann die relative Trichtergeschwindigkeit  $R = 1/t$  über dem Setzfließmaß  $s_m$  aufgetragen werden (Bild 26). Der entstehende Bereich grenzt erfahrungsgemäß ausreichend fließfähige und entmischungsarme SVB ein, wenn man für die Versuche ein blockierungsfreies Fließen voraussetzt. Außerhalb dieses Bereiches liegen Betonzusammensetzungen, die zu Sedimentation neigen bzw. nicht ausreichend entlüften oder nicht ausreichend fließen (Stagnation). Betone, die durch den linken oberen Eckbereich beschrieben werden (geringes Fließvermögen bei geringer Viskosität), sind physikalisch nicht möglich.

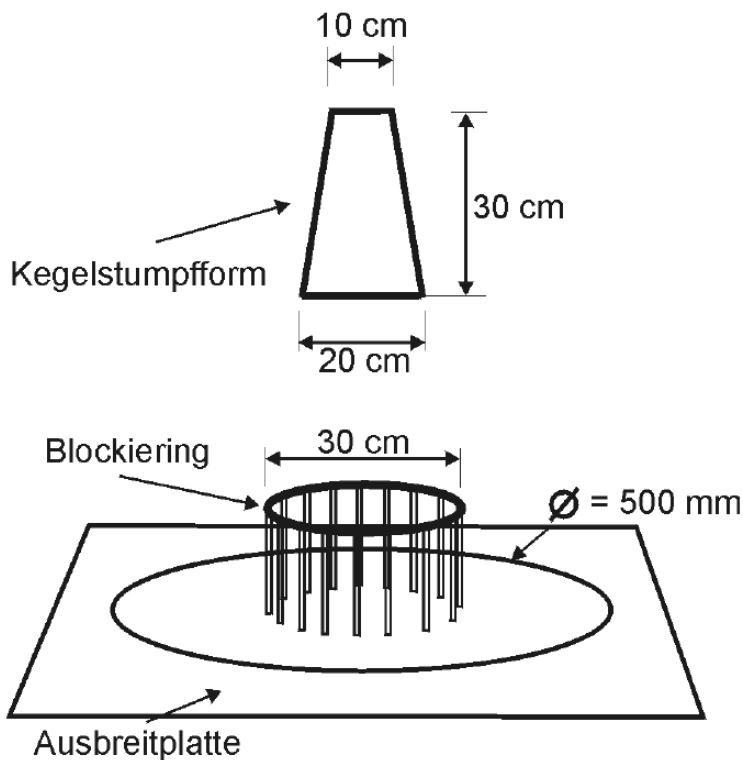


Bild 25: Bodenplatte für den Setzfließversuch nach E DIN EN 12350-8 mit Blockiererring nach E DIN EN 12350-12

Durch die Lage des Setzfließmaßes  $s_m$  und der relativen Trichtergeschwindigkeit  $R$  können Veränderungen im Wasser- und Fließmittelgehalt beurteilt werden. Eventuell notwendige Korrekturen sind so gezielt vorgenommen möglich.

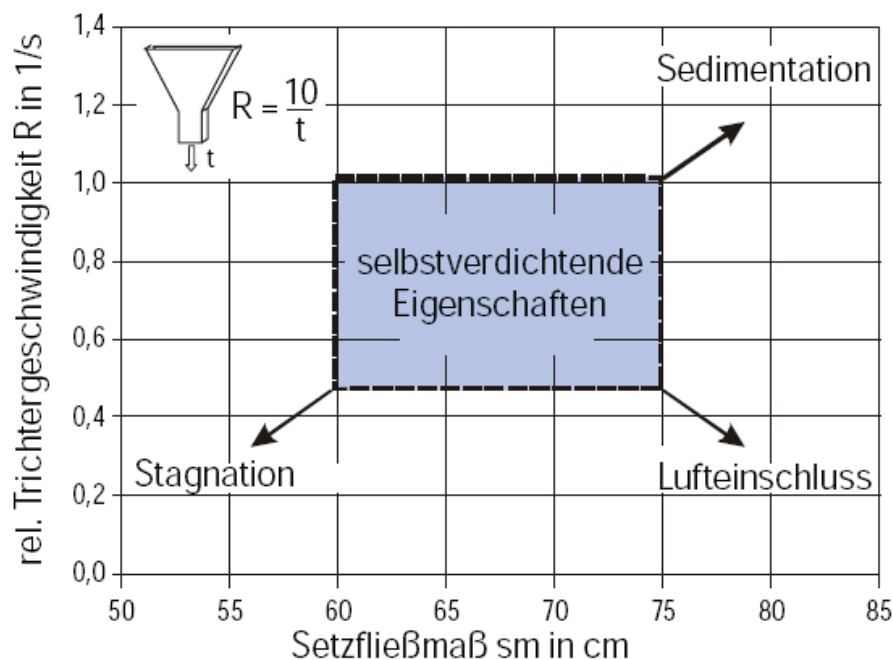


Bild 26: Zielfenster für die Konsistenz von SVB auf Basis von Setzfließversuch und Auslauftrichterversuch

Die Konsistenz wird nach E DIN EN 206-9 anhand der genannten Verfahren in folgende Klassen eingeteilt (Tabelle 15):

Tabelle 15: Konsistenzklassen nach E DIN EN 206-9

Konsistenzmaß	Klasse	Dimension	Grenzwert für individuelle Chargen
Setzfließmaß	SF1	mm	550 bis 650
	SF2	mm	660 bis 750
	SF3	mm	760 bis 850
$t_{500}$ -Zeit	VS1	s	$\leq 2$
	VS2	s	3 bis 6
	VS3	s	$> 6$
Auslauftrichterzeit	VF1	s	$< 9$
	VF2	s	9 bis 25
L-Kasten-Wert	PL1	-	$\geq 0,80$ mit 2 Bewehrungsstäben
	PL2	-	$\geq 0,80$ mit 3 Bewehrungsstäben
Blockierring Absatz	PJ1	mm	$\leq 10$ mit 12 Bewehrungsstäben
	PJ2	mm	$\leq 10$ mit 16 Bewehrungsstäben
Sedimentierter Anteil	SR1	%	$\leq 20$
	SR2	%	$\leq 15$

### 3.3 Einfluss verschiedener Parameter auf den Zementbedarf

Veränderlicher Parameter		erfordert	Bedeutung für den Zementbedarf
Konsistenz	steif → weich	mehr Zementleim	steigt ↑
Betondruckfestigkeit	C8/10 → C55/67 → C100/115	geringeren w/z Wert	steigt ↑
Größtkorn-durchmesser	8 → 16 → 32 → 63	kleines Matrixvolumen	fällt ↓
Sieblinie	brauchbar → günstig	geringeres Matrixvolumen	fällt ↓

Bild 3.25: Einfluss verschiedener Parameter auf den Zementbedarf [Lit 6]

### 3.4 Mischen des Frischbetons

Die Wirksamkeit des Mischvorganges hat Einfluss auf den Wasserbedarf, die Verdichtbarkeit und die Hydratation. Es soll eine gute Durchmischung und eine gleichmäßige Verteilung der Betonkomponenten gewährleistet werden. Zement und Wasser müssen, Gesteinskörnung soll in der Regel nach Masse zugegeben werden.

**Handmischung** sollte nicht mehr angewendet werden.

**Maschinenmischung** erfolgt chargenweise in Freifall- oder Zwangsmischern oder kontinuierlich in Durchlaufmischern. Die Mischart muss auf das Mischgut abgestimmt sein.

**Freifallmischer** sind nicht für steife und sehr zementreiche Mischungen geeignet.

**Zwangsmischer** sind besonders für Mischungen mit hohem Bindemittelgehalt, mit Kalk- und Trasszusatz, für sehr steife Betone mit hohem Mehlkorngelalt, sperrige Kornformen und Leichtbeton erforderlich. Durchlaufmischer sind ausnahmsweise zulässig, wenn ein gleichmäßiger Zufluss gewährleistet ist.

In **Mischfahrzeugen** müssen alle Betone mit nicht steifer Konsistenz zur Baustelle transportiert werden. Sie dienen auch zum Mischen von Beton, der im Transportbetonwerk entweder nur dosiert oder auch gemischt wurde.

Die **Mischdauer** soll bei Maschinenmischung mit besonders guter Mischwirkung mindestens 30 s, sonst allgemein 1 bis 1,5 min, bei zementreichen Mischungen im Freifallmischer jedoch 1,5 bis 2 min betragen. Eine Mischdauer über 2 min ergibt im Allgemeinen keine bessere Durchmischung und keine höhere Festigkeit, außer bei steifen, feinstoffreichen Mischungen.

In Mischerfahrzeugen wird der Beton während der Fahrt ständig bewegt oder mit stehender Trommel zur Verwendungsstelle gefahren. Dort wird er in beiden Fällen noch einmal ausreichend lange durchmischt. Nach der Entladung darf der Frischbeton nicht mehr in der Zusammensetzung verändert werden.

### **3.5 Transport und Einbringen des Frischbetons**

Der Transport des Betons erfolgt chargenweise in Behältern oder kontinuierlich durch Förderbänder und Rohrleitungen. Die Konsistenz muss wegen der Entmischungsfahr durch Rüttelwirkung beim Transport entsprechend eingestellt werden.

#### **Transportbeton**

Da das Herstellen und der Transport des Betons als Transportbeton besonders wirtschaftlich sind, wird Baustellenbeton fast ausschließlich als Transportbeton geliefert und eingebaut.

Bis auf wenige Ausnahmen (sehr große Baustellen) ist der auf der Baustelle gemischte Beton praktisch verschwunden. Transportbeton wird durch Mischerfahrzeuge, bei Betonen steifer Konsistenz auch in Fahrzeugen ohne Rührwerkzeuge zur Baustelle befördert. Bei einer begrenzten Dauer der verflüssigenden Wirkung kann ein Fließmittel zum Teil erst kurz vor Entleeren des Fahrmischers zugegeben werden.

#### **Transport mit Förderbändern**

Für den Transport mit Förderbändern ist nur steifer bis plastischer Beton geeignet. Bandart und Bandsteigung müssen auf die Konsistenz des zu fördernden Betons abgestimmt sein. An der Abwurfstelle besteht vor allem bei steifen Betonen eine Entmischungsfahr.

#### **Pumpbeton**

Der Transport von Beton in Rohren aus Stahl oder Kunststoff als Pumpbeton wird meist dort angewendet, wo die räumlichen Verhältnisse es erfordern bzw. wo es billiger ist. Gegenüber anderen Einbringverfahren kann sich eine Zeitersparnis bis zu etwa 40 % beim Betonieren ergeben. Zu unterscheiden sind das seltener verwendete pneumatische Pumpen mit Luftüberdruck und das mechanisch hydraulische Pumpen mit Kolben- oder Schlauchpumpen. Das Pumpen kann durch stationäre Anlage oder durch bewegliche auf LKW montierte Pumpsysteme erfolgen.

Für die Zusammensetzung von Pumpbeton sind die nachfolgenden Grundsätze zu beachten: Die grobe Gesteinskörnung muss ausreichend von Feinmörtel umgeben sein, damit der auf den Frischbeton ausgeübte Druck vom Zementleim übertragen wird und nicht nur auf das Korngerüst wirkt. Dies erfordert einen Zementgehalt von mindestens 250, besser 300 kg/m<sup>3</sup>; andererseits verringert ein wesentlich über 350 kg/m<sup>3</sup> hinausgehender Zementgehalt die Gleitfähigkeit des Gemisches. Zemente mittlerer Mahlfeinheit sind vorzuziehen, erwünscht ist ferner ein gutes Wasserrückhaltevermögen des Zements. Plastifizierende Zusätze können die Geschmeidigkeit des Betongemisches erhöhen, erstarrungsverzögernde Zusätze verhindern ein Ansteifen des Betons während des Pumpbetriebes. Das Pumpen kann das künstlich eingeführte Luftporensystem negativ beeinflussen. Das Pumpen von Leichtbeton stellt nach wie vor eine besondere Herausforderung dar, weil Leichtbeton wegen der in der leichten Gesteinskörnung enthaltenen Luft begrenzt kompressibel ist. Dies kann zum Entmischen des Leichtbetons und nachfolgend zu Scheitern des Pumpens führen.

#### **Einbringen**

Beim Einbringen des Frischbetons können Entmischungen und Nesterbildung auftreten, wodurch Festigkeit, Wasserdichtheit, Aussehen (Sichtbeton) und Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigt werden.

- Zeitersparnis bis 40%
  - Kosten für Pumpe
  - Verfahren
    - mechanisch
    - pneumatisch
- abwägen!  
(> 300 Hm)

### Empfehlungen

- ausreichend Zement  
(Druck nicht auf Korngerüst)

- Gleitfähigkeit

BV, VZ (FM) (ST) (LP)  
Pumpversuche erforderlich

Mehlkorngehalt min. 350 kg/m<sup>3</sup>

Bild 27: Transport – Pumpbeton [Lit 6]

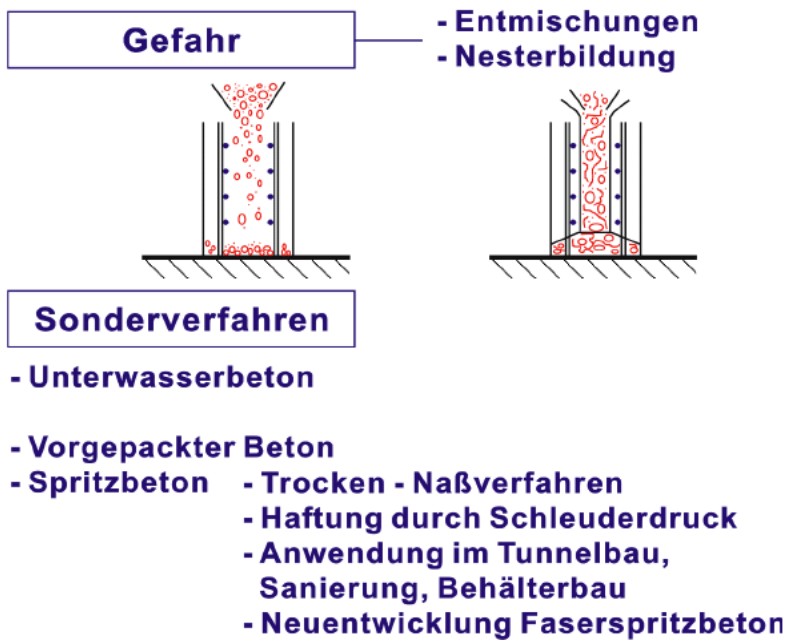


Bild 28: Einbringen des Betons [Lit 6]

### 3.6 Verdichten des Frischbetons

Würde der Frischbeton, vor allem bei steifer und plastischer Konsistenz, ohne weitere Behandlung erhärten, so enthielte der Festbeton ein mehr oder weniger großes Volumen an Luftporen, das den Zementsteinporenraum vergrößert und damit fast alle Betoneigenschaften negativ beeinflusst. Wie stark dieser Einfluss ist, zeigt Bild 29; bei 8 Vol.-% Betonporen sinkt die Betondruckfestigkeit um rd. 50 %, bei 1 Vol.-% bereits um rd. 10 %.

## Betonfestigkeit in %

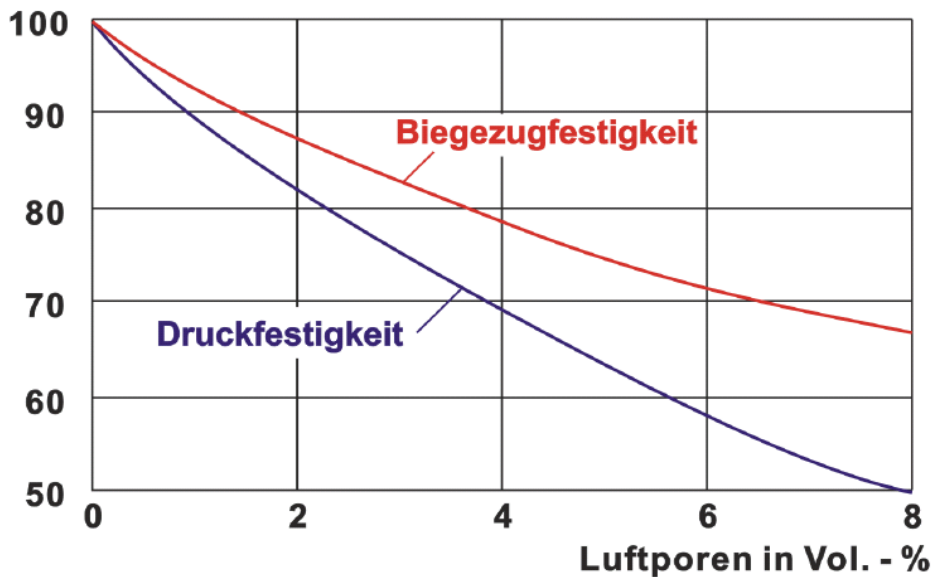


Bild 29: Einfluss der Verdichtung auf die Biegezug- und Druckfestigkeit von Beton [Lit 6]

Die starke Festigkeitsverringeringung bei mangelnder Verdichtung ist darauf zurückzuführen, dass bei üblicher Betonzusammensetzung der Zementleim etwa 1/3 des Betonvolumens einnimmt. Daher entsprechen 8 % Luftporen im Beton etwa 25 % Zementsteinporen (Bild 30). Der Einfluss der Luftporen auf die Festigkeit ist damit auch von dem Ausgangsporenraum des Zementleims ohne Luftporen abhängig, zu dem die Luftporen addiert werden müssen.

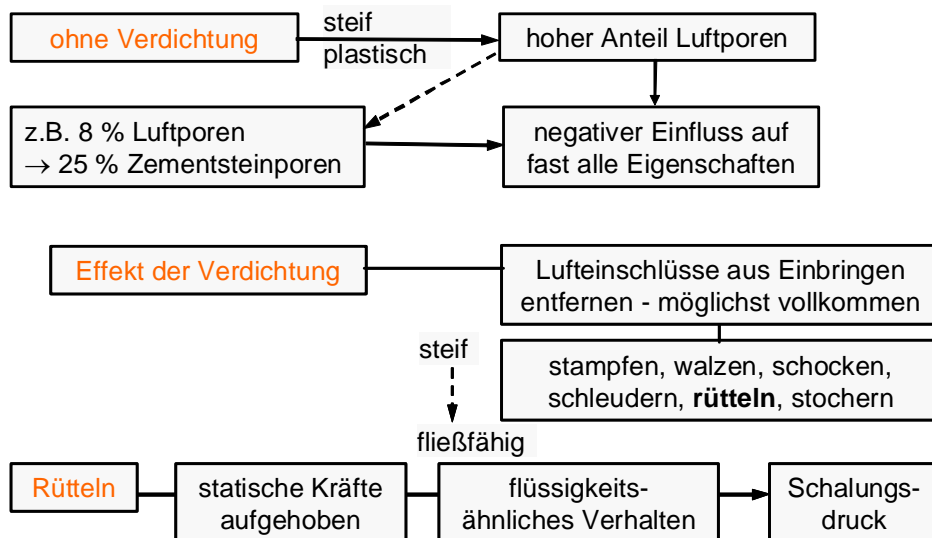


Bild 30: Verdichten [Lit 6]

Diese Überlegungen zeigen, wie wichtig es ist, den Frischbeton möglichst vollkommen zu verdichten, also möglichst alle Luftporen aus dem Beton zu entfernen. Dazu dienen verschiedene Verdichtungsgeräte bzw. Verdichtungsverfahren (Bild 31), deren Wirkung sehr unterschiedlich ist, sodass ihr Einsatz auf die verschiedenen Einsatzgebiete und auf die Verdichtbarkeit des Betons eingestellt werden muss.

Die wichtigsten Verdichtungsverfahren sind heute das Rütteln mit Innenrüttlern, Außenrüttlern, Oberflächenrüttlern, Schalungsrüttlern oder das Verdichten auf Schaltischen mittels Rütteln oder Schütteln. Verfahren wie das Stampfen von Hand oder mit Rüttelstampfer kommen zumeist nur bei untergeordneten Bauteilen und höchstens bis zu einer Schichtdicke

von 15 cm zum Einsatz. Das Stochern mit Rundstäben wird zum Beispiel in den USA für Standardprüfkörper genutzt oder für sehr weiche Betonkonsistenzen verwendet.

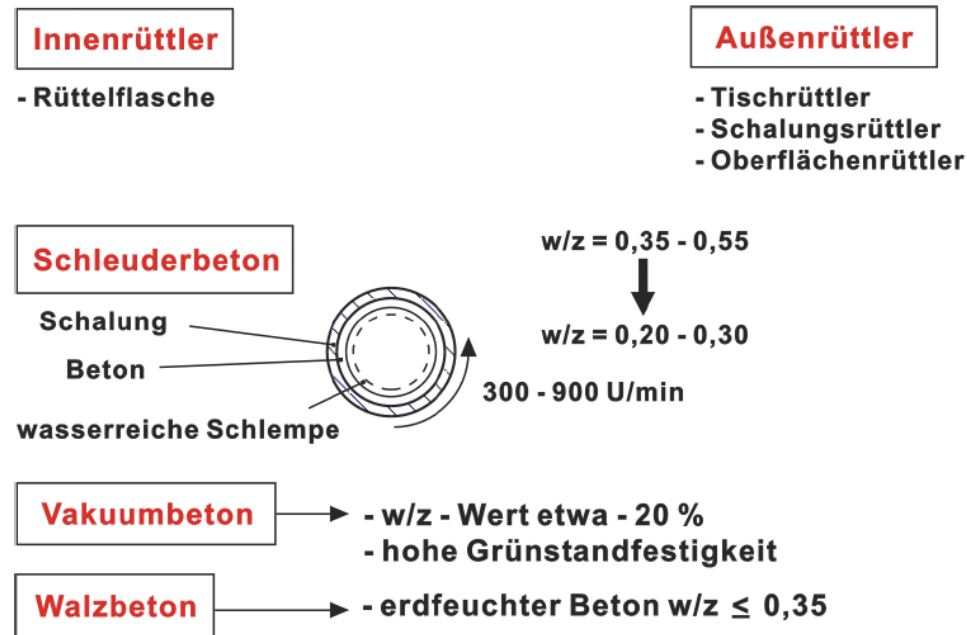


Bild 31: Rüttelverfahren – Sonderverdichtungsverfahren [Lit 6]

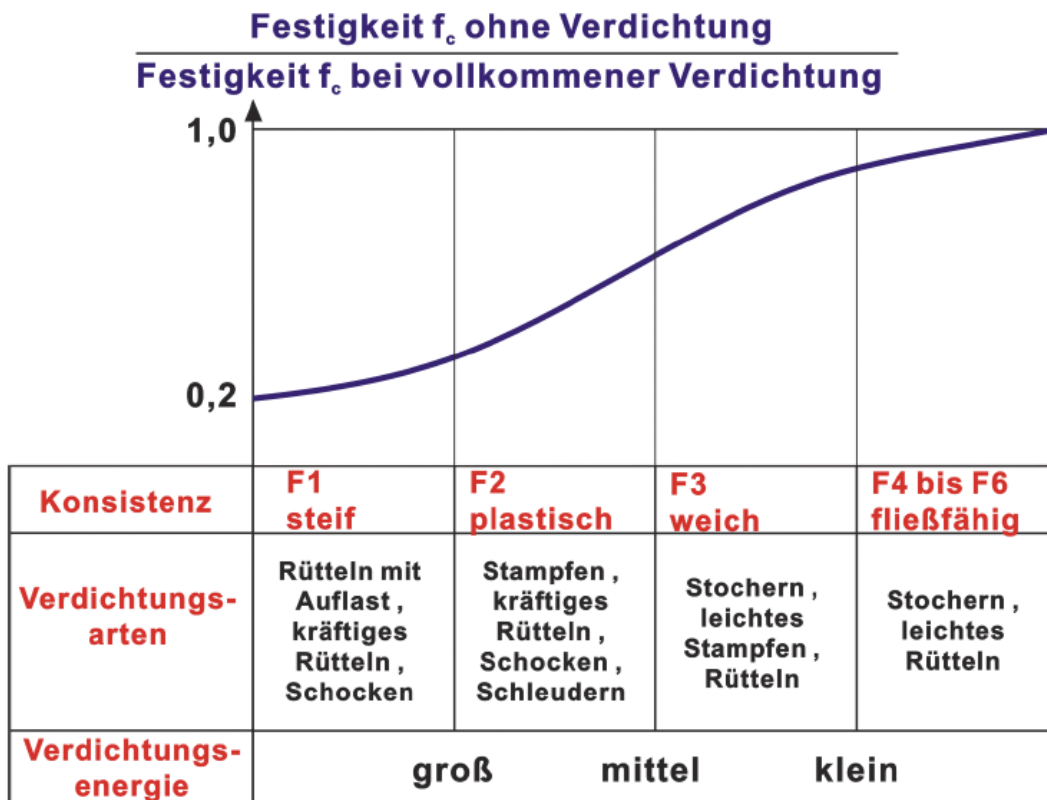


Bild 32: Festigkeit und Verdichtung [Lit 6]

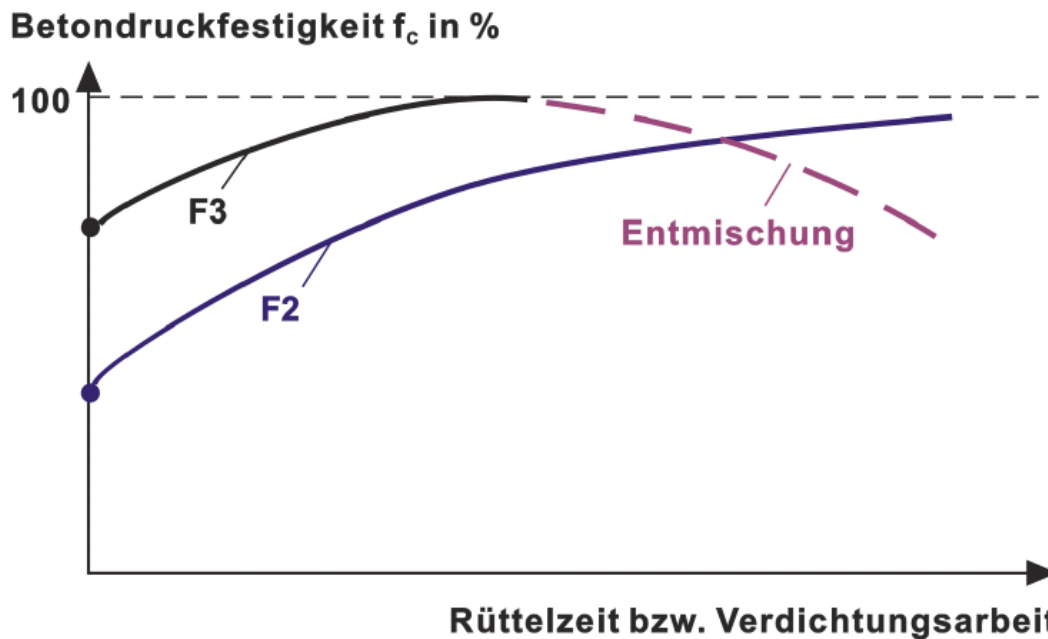


Bild 33: Beziehung zwischen Festigkeit, Verdichtbarkeit und Verdichtungsenergie bei normalem Zementgehalt [Lit 6]

Durch das Rütteln werden die statischen Kräfte aufgehoben, der Beton verhält sich ähnlich einer Flüssigkeit, die schweren Teile sinken nach unten und nehmen eine dichtere Lagerung ein. Sehr weiche Betone lassen sich nicht mehr rütteln, weil sich im Fall großer Dichteunterschiede von Gesteinskorn ( $\rho_G = 2500 \text{ kg/m}^3$ ) und Zementleim ( $\rho_m = 1600 \text{ bis } 1900 \text{ kg/m}^3$ ) der Beton leicht entmischt. Beim Rütteln soll sich auf der Oberfläche eine geschlossene Schicht zähen Mörtels bilden, wässriger Zementleim weist auf **Entmischung** hin.

Eine - im günstigen Falle geringfügige - Entmischung des Betons durch **Bluten** und Rütteln lässt sich kaum vermeiden. Sie hängt von allen Faktoren ab, die auch für das Wasserabsondern maßgebend sind, und führt im oberen Bereich zu einer stärkeren Anreicherung von Zement als von Wasser. Das Zementsteinvolumen nimmt vertikal steigend zu, der w/z-Wert aber ab. Dadurch kann z. B. die obere Schicht von Prüfkörpern eine höhere Festigkeit und eine größere Verformbarkeit aufweisen, wie sich beim Vergleich der Prüfergebnisse an verschiedenen Prüfkörpern auswirken kann: Bei Zylindern liegt die bei der Herstellung obere Schicht senkrecht zur Druckrichtung, bei Würfeln und liegend hergestellten Prismen aber in Druckrichtung.

Bei Verwendung von Innenrüttlern soll die Konsistenz so sein, dass die Rüttelflasche durch ihr Eigengewicht senkrecht in den Beton eindringt und der Frischbeton sich beim Herausziehen der Flasche mit einer Geschwindigkeit von rd.  $8 \text{ cm/s}$  gerade schließt. Der Beton wird in waagerechten Lagen eingebracht, die Innenrüttler dürfen nicht zum Ausbreiten des Betons benutzt werden. Die Schichthöhe ist im Allgemeinen 30 bis 50 cm. Die Rütteldauer ist von der Schichtdicke und der Schwingungsfrequenz abhängig. Der Bereich der Verdichtungswirkung ist in seinem Durchmesser etwa 10mal so groß wie der Durchmesser der Rüttelflasche. Bei Leichtbeton verringert sich der Wirkungsbereich etwa im Verhältnis von Leichtbetonrohddichte zu Normalbetonrohddichte. Bei Wänden und Säulen sollte deren Dicke etwa 15 bis 20 cm kleiner als dieser Verdichtungsbereich sein.

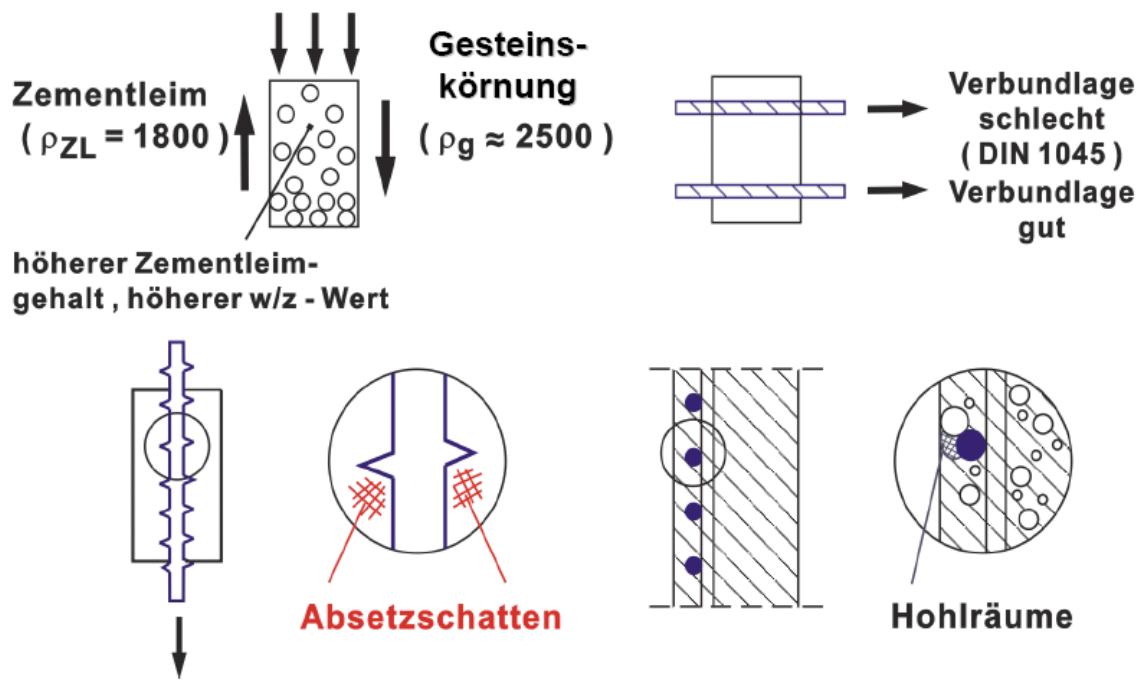


Bild 34: Auswirkung Rütteln – Beispiele [Lit 6]

### 3.7 Frischbetoneigenschaften

#### 3.7.1 Allgemeines (Übersicht)

Die wichtigste Frischbetoneigenschaft ist die Verarbeitbarkeit. Sie wurde bereits in Kapitel 3.2 besprochen. Weitere Frischbetoneigenschaften werden nachfolgend behandelt.

#### 3.7.2 Wasserabsondern (Bluten)

Unter dem Begriff des Blutens wird das Abstoßen oder Absondern von Wasser eines fertig gemischten, eingebrachten und verdichteten Mörtels oder Betons verstanden. Dieses Phänomen tritt während oder nach dem Verarbeiten eines Mörtels oder Betons auf und dauert bis zum Beginn des Erstarrungs- bzw. Erhärtungsprozesses an. Das aufsteigende Wasser führt zu einer Wasseranreicherung und Auflockerung in der obersten Betonschicht und damit zu Festigkeitsmängeln bei Verkehrsflächen bzw. Haftproblemen bei Beschichtungen. Außerdem hinterlässt das an den Schalungsflächen aufsteigende Wasser bei Sichtbeton zu beanstandende Adern und Schlieren.

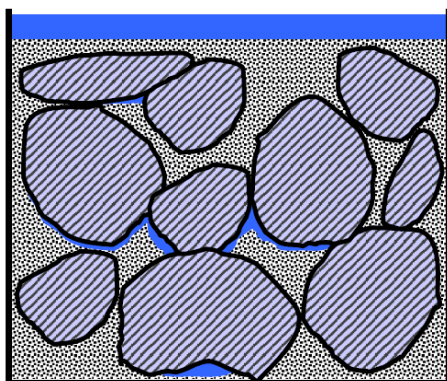


Bild 35: Schematische Darstellung des Wasserabsonderns im Beton [Lit 6]

Das Bluten hängt außer von der Betonzusammensetzung (Wassergehalt, Feinanteile - Mehlkorngehalt (Gesteinskörnung, Zementart und -feinheit)), der Herstellung und Verarbeitung auch von der Bauteilhöhe, der Schalungsdichtheit, den Temperaturen von Beton, Luft und Schalung sowie den Austrocknungsbedingungen ab. Die Neigung zum Bluten wird verringert durch

- feiner gemahlene Zemente,
- einen höheren Zementgehalt,
- auf den Beton abgestimmte Zusatzstoffe,
- einen günstigen Mehlkorngehalt und
- die Abstimmung sämtlicher Feinstoffe.

Vorsicht ist bei massigen Bauteilen geboten, da die vorstehenden Maßnahmen die Rissgefahr erhöhen.

### 3.7.3 Frischbetonrohichte

Die Rohdichte ergibt sich aus den Dichten und den Massenteilen der Betonkomponenten. Sie wird sehr stark vom Wasser-Zement-Wert und vom Luftgehalt beeinflusst. Zusammen mit der Konsistenz ermöglicht sie eine gute Kontrolle der Betonzusammensetzung und der Verdichtung. Allgemein gelten folgende Beziehungen:

$$\rho_f = \frac{m_b}{V_b} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

für 1 m<sup>3</sup> gilt:  $m_b = z + g + w$  [kg]

$$V_b = V_z + V_g + V_w + V_l = \frac{z}{\rho_z} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{w}{\rho_w} + V_l \quad [\text{m}^3]$$

V<sub>l</sub>: Volumen der Frischbetonporen [m<sup>3</sup>] (vgl. LP-Topf, Kapitel 3.7.4)

$$\rho_f = \frac{m_b}{V_b} = \frac{z + g + w}{\frac{z}{\rho_z} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{w}{\rho_w} + V_l} \quad \text{bzw. mit } \frac{g}{z} = \gamma \text{ und } \frac{w}{z} = \omega$$

$$\rho_f = \frac{m_b}{V_b} = \frac{1 + \gamma + \omega}{\frac{1}{\rho_z} + \frac{\gamma}{\rho_g} + \frac{\omega}{\rho_w} + \frac{V_l}{z}} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

Bei vollkommener Verdichtung ist V<sub>l</sub> = 0, was in der Praxis nicht zu erreichen ist. In diesem theoretischen Fall entspräche die Rohdichte der Sollrohichte ρ<sub>fs</sub> bei vollkommener Verdichtung ρ<sub>fv</sub>. Die Sollrohichte ρ<sub>fs</sub> ist ein Vergleichswert, der gemäß der Stoffraumberechnung vorgegeben wurde oder sich aus der Eignungsprüfung ergibt. Sie sollte möglichst der Rohdichte bei vollkommener Verdichtung entsprechen, es können aber auch, z. B. bei ungünstiger Kornzusammensetzung oder bei Verwendung von LP-Mitteln, Restluftporen bewusst in Kauf genommen werden. Die Ist-Rohdichte ρ<sub>f</sub> ist die vorhandene Rohdichte, die aus der Masse des Betons und dem Volumen der Form, in die der Beton gefüllt wird, (z. B. LP-Topf, vgl. Bild 37) bzw. aus dem Volumen der Probekörper nach dem Entschalen errechnet wird.

Ist ρ<sub>f</sub> = ρ<sub>fv</sub>, so ist der Beton vollkommen verdichtet.

Ist ρ<sub>f</sub> < ρ<sub>fv</sub>, so ist der Beton nicht vollkommen verdichtet, er enthält also noch Luftporen.

Ist  $\rho_f > \rho_{fv}$ , so ist der Beton überverdichtet, er muss seine Zusammensetzung durch Entmischen verändert haben: Beim Verdichten steigt Wasser oder wasserreicher Zementleim nach oben und wird abgestrichen, der Anteil der leichteren Bestandteile wird geringer.

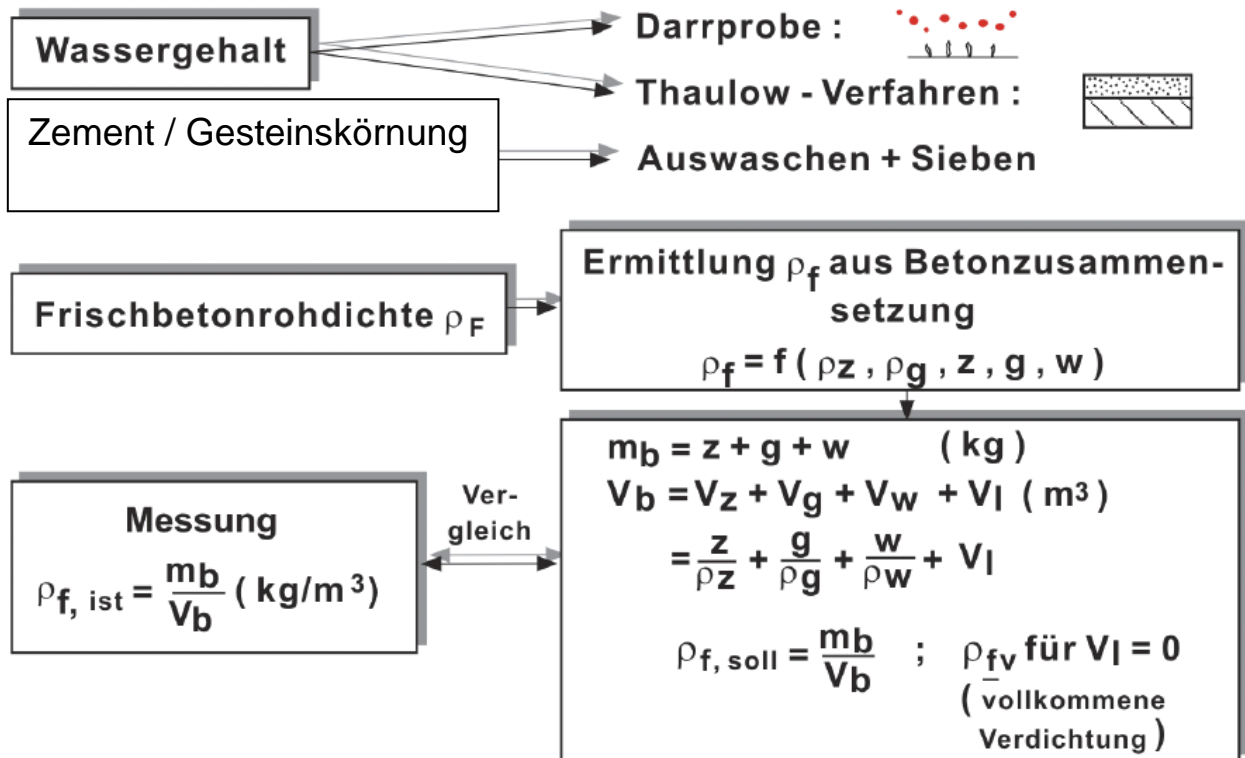


Bild 36: Prüfung der Betonzusammensetzung

### 3.7.4 Luftporengehalt

Selbst bei guter Verdichtung verbleibt ein Luftporengehalt von 1 bis 2 % im Beton. Wird dieses Porenvolumen in der Stoffraumrechnung berücksichtigt, liegt die Annahme einem praxisgerechten Beton sicher näher als die theoretische Annahme eines vollständig verdichteten Betons.

Der Luftporengehalt (LP-Gehalt) kann bei Normalbeton ohne Kenntnis der Dichten und Kornrohddichten mit dem Druckausgleichsverfahren im LP-Topf ermittelt werden, was bei Straßenbeton vorgeschrieben ist. Dieses Verfahren beruht auf dem physikalischen Gesetz von Boyle-Mariotte, wonach das Produkt aus dem Druck  $p$  und dem Volumen  $V$  eines idealen Gases bei konstanter Temperatur unverändert bleibt ( $p \cdot V = \text{konstant}$ ). Dieses Gesetz kann unter Vernachlässigung geringer Abweichungen auf normale Luft im Frischbeton angewendet werden.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot (\Delta V + V_1)$$

$$\Rightarrow V_L = \frac{V_1 \cdot (p_1 - p_2)}{p_2}$$

Für Leichtbeton ist das Druckausgleichsverfahren im LP-Topf nicht geeignet, da im Versuch nicht zwischen den Luftporen und den Kornporen unterschieden werden kann. Ersatzweise wird bei Leichtbeton das drucklose Verfahren nach ASTM C 173 genutzt.

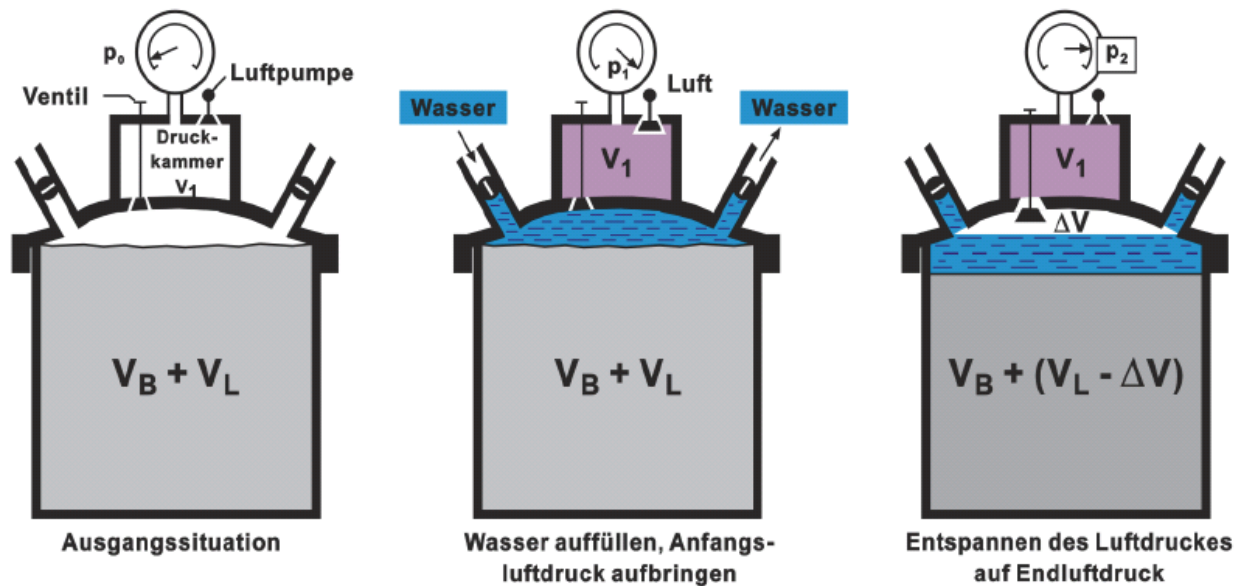


Bild 37: Druckausgleichverfahren zur Bestimmung des Luftporengehaltes

### 3.7.5 Frischbetontemperatur beim Einbau

Die Frischbetontemperatur beeinflusst das Erstarren und damit die Verarbeitbarkeit. Sie kann aus der Zusammensetzung des Betons und den Temperaturen der einzelnen Ausgangsstoffe errechnet werden:

Wärmemenge des Frischbetons = Summe der Wärmemengen aller einzelnen Ausgangsstoffe

Die Wärmemenge errechnet sich über:

Wärmemenge = Masse  $m$  · Wärmekapazität  $w$  · Temperatur  $T$

Durch Auflösung der Gleichung errechnet sich die Frischbetontemperatur folgendermaßen:

$$T_B = \frac{m_z \cdot c_z \cdot T_z + m_g \cdot c_g \cdot T_g + m_w \cdot c_w \cdot T_w}{m_z \cdot c_z + m_g \cdot c_g + m_w \cdot c_w}$$

$T_B$  = Temperatur des Frischbetons in °C

$m_z$  = Masse des Zements (z) [kg]

$m_g$  = Masse der Gesteinskörnung (g) [kg]

$m_w$  = Masse des Wassers (w) [kg]

$c_z$  = spezifische Wärmekapazität des Zements [kJ/(kg · K)]

$c_g$  = spezifische Wärmekapazität der Gesteinskörnung [kJ/(kg · K)]

$c_w$  = spezifische Wärmekapazität des Wassers [kJ/(kg · K)]

$T_z$  = Temperatur des Zements [°C]

$T_g$  = Temperatur der Gesteinskörnung [°C]

$T_w$  = Temperatur des Wassers [°C]

Mit  $c_z = c_g = 0,84$  kJ/(kg · K) und  $c_w = 4,2$  kJ/(kg · K) ergibt sich:

$$T_B = \frac{0,84 \cdot (m_z \cdot T_z + m_g \cdot T_g) + 4,2 \cdot m_w \cdot T_w}{0,84 \cdot (m_z + m_g) + 4,2 \cdot m_w}$$

Höhere Temperaturen bewirken ein schnelles Ansteifen und Erstarren, eine schlechtere Verarbeitbarkeit, eine höhere Frühfestigkeit, eine geringere Endfestigkeit und durch den ver-

stärkten Feuchtigkeitsentzug ein größeres Schwinden. Daher soll die Ausgangstemperatur des Frischbetons in der warmen Jahreszeit möglichst gering sein. Dies gilt besonders beim Herstellen massiger Bauteile. Durch niedrige Temperaturen wird das Erstarren und Erhärten verzögert. Bei niedriger Außentemperatur sollte der Beton daher eine möglichst hohe Ausgangstemperatur haben. Wenn kein Austrocknen und keine Gefügestörung durch Frost auftritt, werden im späteren Alter meist höhere Festigkeiten erreicht.

Bei Lufttemperatur zwischen  $+5\text{ °C}$  und  $-3\text{ °C}$  darf die Betontemperatur beim Einbau  $+5\text{ °C}$  nicht unterschreiten. Bei Lufttemperaturen unter  $-3\text{ °C}$  darf die Betontemperatur  $+10\text{ °C}$  nicht unterschreiten. Bei Zementgehalten unter  $240\text{ kg/m}^3$  bzw. bei Verwendung von Zementen mit niedriger Hydratationswärme darf die Betontemperatur beim Einbringen  $+10\text{ °C}$  nicht unterschreiten.

Die Frischbetontemperatur soll  $+30\text{ °C}$  nicht überschreiten. Zum Kühlen des Betons kann gemahlenes Eis zugegeben werden, das nach dem Mischvorgang aufgetaut sein soll, oder die Gesteinskörnung wird mit kaltem Wasser vorgehäst. Bei Frost muss die Frischbetontemperatur auf  $+10\text{ °C}$  bis  $+20\text{ °C}$  gebracht werden. Dies erfolgt entweder durch das Erwärmen des Anmachwassers auf  $+60\text{ °C}$  bis  $+80\text{ °C}$  und ggf. durch das Anwärmen der Gesteinskörnung.

Der oben angegebenen Formel für TB kann man entnehmen, dass die Temperatur eines Normalbetons mit durchschnittlicher Zusammensetzung um  $\pm 1\text{ K}$  verändert werden kann, wenn sich die Temperatur der Ausgangsstoffe wie folgt ändert:

- beim Zement um ca. 10 K oder
- beim Wasser um ca. 3,6 K oder
- bei der Gesteinskörnung um ca. 1,6 K.

Durch teilweise Zugabe von Wasser in Form von Eis ist neben der Temperatur von  $0\text{ °C}$  die Schmelzwärme des Eises mit  $335\text{ kJ/kg}$  besonders wirksam. Gesteinskörnungen können in der warmen Jahreszeit durch Besprühen gekühlt werden, da das verdunstete Wasser eine Wärmemenge von  $2260\text{ kJ/kg}$  zum Teil der umgebenden Luft, zum Teil der Gesteinskörnung entzieht.

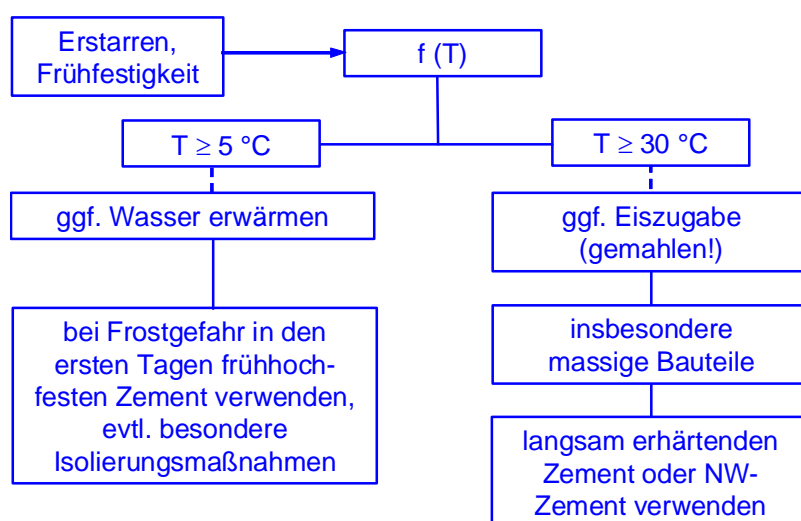


Bild 38: Frischbetontemperatur beim Einbau

### 3.7.6 Grünstandfestigkeit (Grüner Beton)

Durch die Adhäsion des Wasserfilms mit den festen Bestandteilen des Betons setzt der Beton sofort nach der Herstellung im entformten Zustand einer Belastung oder Verformung einen Widerstand entgegen. Man bezeichnet diesen Beton als grünen Beton und seinen Widerstand als Grünstandfestigkeit oder Gründruckfestigkeit. Die Grünstandfestigkeit ist für die Produktion von Betonsteinerzeugnissen von Bedeutung, bei denen die Schalung möglichst oft umgeschlagen werden soll und die in entformten Zustand durch ihr Eigengewicht (z. B. Betonrohre) und zusätzlich durch Erschütterungen beim Transport (z. B. Hohlblocksteine) beansprucht werden.

Die Gründruckfestigkeit ist vor allem vom Wasser- und Zementgehalt und von der Verdichtungsenergie abhängig und liegt bei steifen Rüttelbetonen im Allgemeinen zwischen 0,1 und 0,3 N/mm<sup>2</sup>. Bei hohem Zementgehalt, niedrigem Wassergehalt und Verdichtungszeit über 60 s können 0,4 bis 0,5 N/mm<sup>2</sup> erreicht werden. Bei Wassergehalten unter 120 kg/m<sup>3</sup> muss dann allerdings mit wesentlicher Beeinträchtigung der Festbetoneigenschaften gerechnet werden.

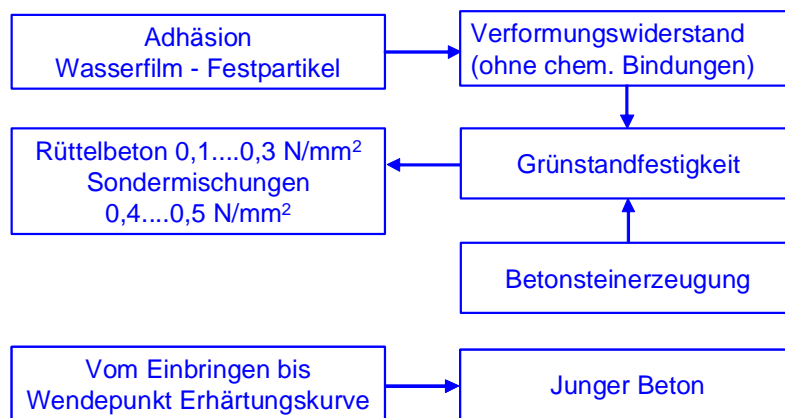


Bild 39: Grüner und junger Beton

## 4 Literatur

- Lit 1: Bauberatung Zement: Folien
- Lit 2: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton
- Lit 3: DIN-Fachbericht 100 „Beton“, 2006
- Lit 4: DIN 1045-2/08-2008: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- Lit 5: HeidelbergCement (Hrsg.): Betontechnische Daten, Ausgabe Januar 2004
- Lit 6: Schießl, P.: Beton. Vorlesungsskript zur Grundvorlesung in Baustoffkunde. Technische Universität München, 2006
- Lit 7: Wikipedia: Online-Enzyklopedie. [www.de.wikipedia.org](http://www.de.wikipedia.org), 2006