



Universität der Bundeswehr München

Institut für **Werkstoffe**
des Bauwesens

Bauchemie und Werkstoffe des
Bauwesens
Frischbeton

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

Frühjahrssemester 2020

Inhaltsverzeichnis

		1
1	Einleitung	4
1.1	Begriffe [1]	4
1.1.1	Allgemeines	4
1.1.2	Ausgangsstoffe	5
1.1.3	Frischbeton	7
1.1.4	Festbeton	8
1.1.5	Konformität und Produktionskontrolle	8
1.2	Abkürzungen und Formelzeichen [1]	9
1.3	Allgemeines, historische Entwicklung	11
1.4	Einteilung	12
1.4.1	Unterscheidung anhand der Trockenrohichte	12
1.4.2	Unterscheidung anhand des Gefüges	12
1.4.3	Unterscheidung nach dem Erhärtungszustand	13
1.4.4	Unterscheidung nach dem Ort der Herstellung	13
1.4.5	Unterscheidung nach der Festigkeit	13
1.4.6	Unterscheidung nach der Art des Einbringens	13
1.5	Betonbestandteile und Zusammensetzung	13
2	Betonnormen und Richtlinien	14
3	Umgebungsbedingungen	17
4	Frischbeton	25
4.1	Zusammensetzung	25
4.1.1	Zement- bzw. Zementleimgehalt	25
4.1.2	Mehlkorngehalt	27
4.1.3	Zugabewasser, Wassergehalt und w/z-Wert	28
4.1.4	Betonzusätze	31

4.2	Verarbeitbarkeit und Konsistenz	41
4.2.1	Begriffsbestimmung	41
4.2.2	Bedeutung von Verarbeitbarkeit und Konsistenz	41
4.2.3	Konsistenzprüfungen und Konsistenzklassen	43
4.3	Einfluss verschiedener Parameter auf den Zementbedarf	48
4.4	Mischen des Frischbetons	48
4.5	Transport und Einbringen des Frischbetons	49
4.6	Verdichten des Frischbetons	51
4.7	Frischbetoneigenschaften	54
4.7.1	Allgemeines (Übersicht)	54
4.7.2	Wasserabsondern (Bluten)	54
4.7.3	Frischbetonrohichte	55
4.7.4	Luftporengehalt	57
4.7.5	Frischbetontemperatur beim Einbau	57
4.7.6	Grünstandfestigkeit (Grüner Beton)	59
5	Literatur	60

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

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

1 Einleitung

1.1 Begriffe [2]

1.1.1 Allgemeines

Beton fr: béton en: concrete	Baustoff, der durch Mischen von Zement, grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser, mit oder ohne Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen oder Fasern, hergestellt wird und seine Eigenschaften durch Hydratation des Zements erhält
Betonfamilie fr: famille de béton en: concrete family	eine Gruppe von Betonzusammensetzungen, für die ein verlässlicher Zusammenhang zwischen maßgebenden Eigenschaften festgelegt und dokumentiert ist
Lieferung fr: livraison en: delivery	der Vorgang der Übergabe des Frischbetons durch den Hersteller
Beton nach Eigenschaften fr: béton à propriétés spécifiées en: designed concrete	Beton, für den die geforderten Eigenschaften und zusätzliche Anforderungen gegenüber dem Hersteller festgelegt sind, der für die Bereitstellung eines Betons, der den geforderten Eigenschaften und den zusätzlichen Anforderungen entspricht, verantwortlich ist
Bemessungslebensdauer fr: durée de vie de projet en: design working life	angenommene Zeitspanne, während der ein Tragwerk oder ein Teil davon für den geplanten Zweck mit der vorgesehenen Instandhaltung, aber ohne die Notwendigkeit einer wesentlichen Instandsetzung verwendet werden kann
Dokument fr: document en: document	Information und ihr Trägermedium, das Papier, ein magnetisches, elektronisches oder optisches Speichermedium, eine Fotografie, ein Bezugsmuster oder eine Kombination davon sein kann
Umwelteinwirkungen fr: actions dues à l'environnement en: environmental actions	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
Betonfertigteil fr: élément préfabriqué en: precast element	Betonprodukt, das an einem anderen Ort als dem endgültigen Ort der Verwendung (im Werk oder auf der Baustelle) hergestellt und nachbehandelt wird
Betonfertigteil (Bauprodukt) fr: produit préfabriqué en: precast product	nach der relevanten europäischen Produktnorm hergestelltes Fertigteil
Beton nach Zusammensetzung fr: béton à composition prescrite en: prescribed concrete	Beton, für den die Zusammensetzung und die Ausgangsstoffe, die verwendet werden müssen, dem Hersteller, der für die Lieferung eines Betons mit der festgelegten Zusammensetzung verantwortlich ist, vorgegeben werden
Hersteller fr: producteur en: producer	Person oder Stelle, die den Frischbeton herstellt
am Ort der Verwendung geltende Regeln	Regeln, die am Ort der Verwendung des Betons gelten und die in einem Nationalen Vorwort oder Anhang zu dieser Norm angegeben sind oder auf die im Nationalen Anhang verwiesen wird

fr: dispositions en vigueur sur le lieu d'utilisation du béton en: provisions valid in the place of use	
Transportbeton fr: béton prêt à l'emploi en: ready mixed concrete	Beton, der in frischem Zustand durch eine Person oder Stelle geliefert wird, die nicht der Verwender ist. Transportbeton im Sinne dieser Norm ist auch – vom Verwender außerhalb der Baustelle hergestellter Beton; – auf der Baustelle nicht vom Verwender hergestellter Beton
selbstverdichtender Beton (SVB) fr: béton auto-plaçant en: self-compacting concrete (SCC)	Beton, der unter seinem eigenen Gewicht fließt und sich selbst verdichtet sowie die Schalung mit Bewehrung, Kanälen, Aussparungskasten usw. ausfüllt und dabei seine Homogenität beibehält
Baustellenbeton fr: béton de chantier en: site-mixed concrete	Beton, der auf der Baustelle vom Verwender des Betons für seine eigene Verwendung hergestellt wird
Baustelle fr: chantier (chantier de construction) en: site (construction site)	Gebiet, auf dem die Bauarbeiten durchgeführt werden
Festlegung fr: spécification (du béton) en: specification (of concrete)	endgültige Zusammenstellung dokumentierter technischer Anforderungen, die dem Hersteller als Leistung oder Zusammensetzung vorgegeben werden
Verfasser der Festlegung fr: prescripteur en: specifier	Person oder Stelle, die die Festlegung für den Frisch- und Festbeton aufstellt
Standardbeton fr: béton à composition prescrite dans une norme en: standardized prescribed concrete	Beton nach Zusammensetzung, dessen Zusammensetzung in einer am Ort der Verwendung des Betons gültigen Norm vorgegeben ist
Verwender fr: utilisateur en: user	Person oder Stelle, die Frischbeton zur Herstellung eines Bauwerks oder eines Bauteils verwendet

1.1.2 Ausgangsstoffe

Betonzusatzstoff fr: addition en: addition	fein verteilter Stoff, der im Beton verwendet wird, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern oder um bestimmte Eigenschaften zu erreichen
Typ I-Zusatzstoff fr: addition de type I en: type I addition	nahezu inaktiver Zusatzstoff
Typ II-Zusatzstoff fr: addition de type II en: type II addition	puzzolanischer oder latenthydraulischer Zusatzstoff

Betonzusatzmittel fr: adjuvant en: admixture	Stoff, der während des Mischvorgangs des Betons in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben wird, um die Eigenschaften des Frischbetons oder Festbetons zu verändern
Gesteinskörnung fr: granulat en: aggregate	für die Verwendung in Beton geeigneter, gekörnter, mineralischer Stoff, der natürlich, künstlich, wiedergewonnen oder recycelt sein kann
Gesteinskörnungsgemisch fr: grave en: all-in aggregate	Gesteinskörnung, bestehend aus einem Gemisch grober und feiner Gesteinskörnungen mit D größer als 4 mm und mit $d = 0$
Zement fr: ciment en: cement	fein gemahlener, anorganischer Stoff, der mit Wasser gemischt, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser stabil und raumbeständig bleibt
grobe Gesteinskörnung fr: gravillon en: coarse aggregate	Bezeichnung für die größeren Korngruppen mit D größer oder gleich 4 mm und d größer oder gleich 1 mm
feine Gesteinskörnung fr: sable en: fine aggregate	Bezeichnung für die kleineren Korngruppen mit D kleiner oder gleich 4 mm und $d = 0$
schwere Gesteinskörnung fr: granulat lourd en: heavy-weight aggregates	Gesteinskörnung mit einer ofentrockenen Kornrohddichte ≥ 3000 kg/m ³ bei Bestimmung nach EN 1097-6
leichte Gesteinskörnung fr: granulat léger en: lightweight aggregate	Gesteinskörnung mineralischen Ursprungs mit einer Rohddichte (ofentrocken) ≤ 2000 kg/m ³ , bestimmt nach EN 1097-6 oder einer Schüttdichte (ofentrocken) ≤ 1200 kg/m ³ , bestimmt nach EN 1097-3
normale Gesteinskörnung fr: granulat courant en: normal-weight aggregate	Gesteinskörnung mit einer Kornrohddichte (ofentrocken) > 2000 kg/m ³ und < 3000 kg/m ³ , bestimmt nach EN 1097-6
Polymerfasern fr: fibres polymères en: polymer fibres	gerade oder verformte Fasern aus extrudiertem, orientiertem oder geschnittenem Material, die für die gleichmäßige Verteilung in Beton- oder Mörtelmischungen geeignet sind
wiedergewonnene gewaschene Gesteinskörnung fr: granulats récupéré par lavage en: reclaimed washed aggregate	Gesteinskörnungen, die durch Waschen von Frischbeton gewonnen und nur in der eigenen Betonherstellung verwendet werden
grobe recycelte Gesteinskörnung fr: gravillon recyclé en: coarse recycled aggregate	Gesteinskörnungen, die durch Aufbereitung von vorher beim Bauen verwendeten anorganischen Stoffen gewonnen werden
Stahlfasern fr: fibres d'acier en: steel fibres	gerade oder verformte Fasern aus kalt gezogenem Stahldraht, gerade oder verformte zugeschnittene Einzelfasern, aus Schmelzgut hergestellte Fasern, von kalt gezogenem Draht

	gespante Fasern oder aus Stahlblöcken gehobelte Fasern, die für eine homogene Einbringung in Beton oder Mörtel geeignet sind
--	--

1.1.3 Frischbeton

Rührwerk fr: cuve agitatrice en: agitating equipment	Ausrüstung, die im Allgemeinen auf einem Fahrgestell mit Eigenantrieb montiert ist und in der Lage ist, während des Transports Frischbeton in einem gleichmäßig gemischten Zustand zu erhalten
Charge fr: gâchée en: batch	Menge Frischbeton, die entweder in einem Arbeitsspiel eines Mixers hergestellt wird oder die während 1 min von einem Durchlaufmischer ausgestoßen wird
Kubikmeter Beton fr: mètre cube de béton en: cubic metre of concrete	die Menge Frischbeton, die bei Verdichtung nach EN 12350-6 ein Volumen von 1 m ³ einnimmt
wirksamer Wassergehalt fr: teneur en eau efficace en: effective water content	Differenz zwischen der Gesamtwassermenge im Frischbeton und der Wassermenge, die von der Gesteinskörnung aufgenommen wird
künstliche Luftporen fr: air entrainé en: entrained air	mikroskopisch kleine Luftporen, die während des Mischens - im Allgemeinen unter Verwendung eines oberflächenaktiven Stoffes - absichtlich im Beton erzeugt werden; typischerweise kugelförmig oder nahezu kugelförmig sowie mit einem Durchmesser von 10 µm bis 300 µm
Lufteinschlüsse fr: air oclus en: entrapped air	Luftporen, die unbeabsichtigt in den Beton gelangen
Fließfähigkeit fr: mobilité en: flowability	durch Schalungen bzw. Bewehrung nicht behinderte Fließeigenschaft eines Frischbetons
Frischbeton fr: béton frais en: fresh concrete	Beton, der fertig gemischt ist, sich noch in einem verarbeitbaren Zustand befindet und durch das gewählte Verfahren verdichtet werden kann
Ladung fr: charge en: load	Menge des in einem Fahrzeug transportierten Betons, die aus einer oder mehreren Chargen besteht
Blockierneigung fr: aptitude à l'écoulement en: passing ability	Neigung von Frischbeton, bei engen Öffnungen wie z. B. zwischen Bewehrungsstäben, durch Entmischen das weitere Fließen zu blockieren oder enge Öffnungen zu verstopfen
Sedimentationsstabilität fr: résistance à la ségrégation en: segregation resistance	Eigenschaft von Frischbeton, hinsichtlich der Zusammensetzung homogen zu bleiben
Setzfließmaß fr: étalement au cône d'Abrams en: slump-flow	mittlerer Ausbreitdurchmesser von Frischbeton, der im Setzfließversuch bestimmt wird
Gesamtwassergehalt fr: teneur en eau totale en: total water content	Summe aus dem Zugabewasser, dem bereits in der Gesteinskörnung und auf dessen Oberfläche enthaltenen Wasser, dem Wasser in Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen, wenn diese in wässriger Form verwendet

	werden, und gegebenenfalls dem Wasser von zugefügtem Eis oder einer Dampfheizung
Fahrmischer fr: camion malaxeur en: truck mixer	Betonmischer, der auf einem Fahrgestell mit Eigenantrieb montiert und in der Lage ist, einen gleichmäßig gemischten Beton herzustellen und auszuliefern
Viskosität fr: viscosité apparente en: viscosity	Fließwiderstand von Frischbeton nach Beginn des Fließens
Wasserzementwert fr: rapport eau/ciment en: water/cement ratio	Masseverhältnis des wirksamen Wassergehaltes zum Zementgehalt im Frischbeton

1.1.4 Festbeton

Leichtbeton fr: béton léger en: lightweight concrete	Beton mit einer Rohdichte (ofentrocken) von mindestens 800 kg/m ³ und höchstens 2000 kg/m ³ ; dabei besteht die Gesteinskörnung entweder ganz oder teilweise aus leichten Gesteinskörnungen
Festbeton fr: béton durci en: hardened concrete	Beton, der sich in einem festen Zustand befindet und eine gewisse Festigkeit entwickelt hat
Schwerbeton fr: béton lourd en: heavy-weight concrete	Beton mit einer Rohdichte (ofentrocken) über 2600 kg/m ³
Normalbeton fr: béton de masse volumique normale en: normal-weight concrete	Beton mit einer Rohdichte (ofentrocken) von mindestens 2000 kg/m ³ und höchstens 2600 kg/m ³

1.1.5 Konformität und Produktionskontrolle

Durchschlupf (AOQ) fr: qualité moyenne après contrôle en: average outgoing quality (AOQ)	Prozentsatz der unbekanntenen Verteilung unterhalb des erforderlichen charakteristischen Wertes, multipliziert mit der entsprechenden Annahmewahrscheinlichkeit dieser Verteilung bei Anwendung der festgelegten Vorgehensweise zur Konformitätsbeurteilung ANMERKUNG Im Falle der Festigkeit bezieht sich das Wort "erforderlich" auf die charakteristische Festigkeit für die festgelegte Druckfestigkeitsklasse oder auf die charakteristische Festigkeit des Referenzbetons einer Familie.
maximaler Durchschlupf (AOQL) fr: limite de la qualité moyenne après contrôle en: average outgoing quality limit (AOQL)	durchschnittliche größte Fraktion unterhalb des erforderlichen charakteristischen Werts des angenommenen (bzw. ausgelieferten) Betons
annehmbare Qualitätsgrenzlage (AQL) fr: niveau de qualité acceptable (NQA)	Anteil der unbekanntenen Verteilung einer betrachteten Eigenschaft, der unterhalb eines festgelegten Werts liegt und in Bezug auf die Produktion als annehmbar angesehen wird

en: average quality level (AQL)	
charakteristische Festigkeit fr: résistance caractéristique en: characteristic strength	Festigkeitswert, unter dem erwartungsgemäß 5 % der Grundgesamtheit aller möglichen Festigkeitsbestimmungen des betrachteten Betonvolumens liegen
Druckfestigkeitsklasse fr: classe de résistance à la compression en: compressive strength class	Klassifizierung, bestehend aus der Betonart (Normal-, Schwer- oder Leichtbeton), dem Mindestwert der charakteristischen Zylinderfestigkeit (bei Zylindern von 150 mm Durchmesser und 300 mm Länge) und dem Mindestwert der charakteristischen Würfelfestigkeit (bei einer Kantenlänge des Würfels von 150 mm)
Konformitätsprüfung fr: essai de conformité en: conformity test	Prüfung, die vom Hersteller durchgeführt wird, um die Konformität des Produkts nachzuweisen
Beurteilung der Konformität fr: évaluation de conformité en: evaluation of conformity	systematische Überprüfung, in welchem Umfang ein Produkt festgelegte Anforderungen erfüllt
Identitätsprüfung fr: essai d'identification en: identity test	Prüfung, um zu bestimmen, ob eine gewählte Charge oder Ladung einer konformen Grundgesamtheit entstammt
Erstprüfung fr: essai initial en: initial test	Prüfung oder Prüfungen vor Herstellungsbeginn des Betons, um zu ermitteln, wie ein neuer Beton oder eine neue Betonfamilie zusammengesetzt sein muss, um alle festgelegten Anforderungen im frischen und erhärteten Zustand zu erfüllen
Konformitätsnachweis fr: vérification en: verification	Bestätigung durch Überprüfung oder Vorlegen gesicherter Erkenntnisse, dass die festgelegten Anforderungen erfüllt worden sind

1.2 Abkürzungen und Formelzeichen [2]

- X0 Expositionsklasse ohne Korrosions- oder Angriffsrisiko
- XC1 bis XC4 Expositionsklasse für Gefahr der Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Carbonatisierung
- XD1 bis XD3 Expositionsklasse für Gefahr der Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser
- XS1 bis XS3 Expositionsklasse für Gefahr der Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Chloride aus dem Meerwasser
- XF1 bis XF4 Expositionsklassen für Gefahr von Frostangriff auf den Beton mit oder ohne Taumittel
- XA1 bis XA3 Expositionsklassen für Gefahr des chemischen Angriffs auf den Beton
- XM Expositionsklassen für Angriff auf den Beton durch Verschleiß
- W.. Feuchtigkeitsklassen 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
SF1 bis SF3	Konsistenzklassen, ausgedrückt als Setzfließmaß
VS1, VS2	Viskositätsklassen für die Fließzeit t_{500}
VF1, VF2	Viskositätsklassen für die Trichterlaufzeit
t_{500}	Fließzeit, in Sekunden, bis zum Erreichen eines Setzfließmaßes von 500 mm im Setzfließversuch
PL1, PL2	Klassen des im L-Kasten-Versuch ermittelten Fließvermögens
PJ1, PJ2	Klassen des im Blockierring-Versuch ermittelten Fließvermögens
SR1, SR2	Klassen der Sedimentationsstabilität
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
f_{cm}	mittlere Druckfestigkeit des Betons
$f_{cm, j}$	mittlere Druckfestigkeit des Betons im Alter von (j) Tagen
f_{ci}	einzelnes Prüfergebnis für die Druckfestigkeit von Beton
$f_{tk, sp}$	charakteristische Spaltzugfestigkeit von Beton
$f_{tm, sp}$	mittlere Spaltzugfestigkeit von Beton
f_{ti}	einzelnes Prüfergebnis für die Druckfestigkeit von Beton
Cl	Klasse des Chloridgehalts
D1,0 bis D2,0	Rohdichteklassen für Leichtbeton
k	Faktor für die Berücksichtigung der Mitwirkung eines Betonzusatzstoffes vom Typ II <ul style="list-style-type: none"> ▪ k_f k-Wert zur Anrechnung von Flugasche ▪ k_s k-Wert zur Anrechnung von Silicastaub
f	Flugaschegehalt im Beton
m	Masse
s	Silicastaubgehalt im Beton
w	Wassergehalt im Beton

z	Zementgehalt im Beton
w/z	Wasserzementwert
$(w/z)_{eq}$	äquivalenter Wasserzementwert
σ	Schätzwert für die Standardabweichung einer Grundgesamtheit
s_n	Standardabweichung von n aufeinander folgenden Prüfergebnissen
AOQ	Durchschlupf
AOQL	maximaler Durchschlupf
AQL	annehmbare Qualitätsgrenzlage

1.3 Allgemeines, historische Entwicklung

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).

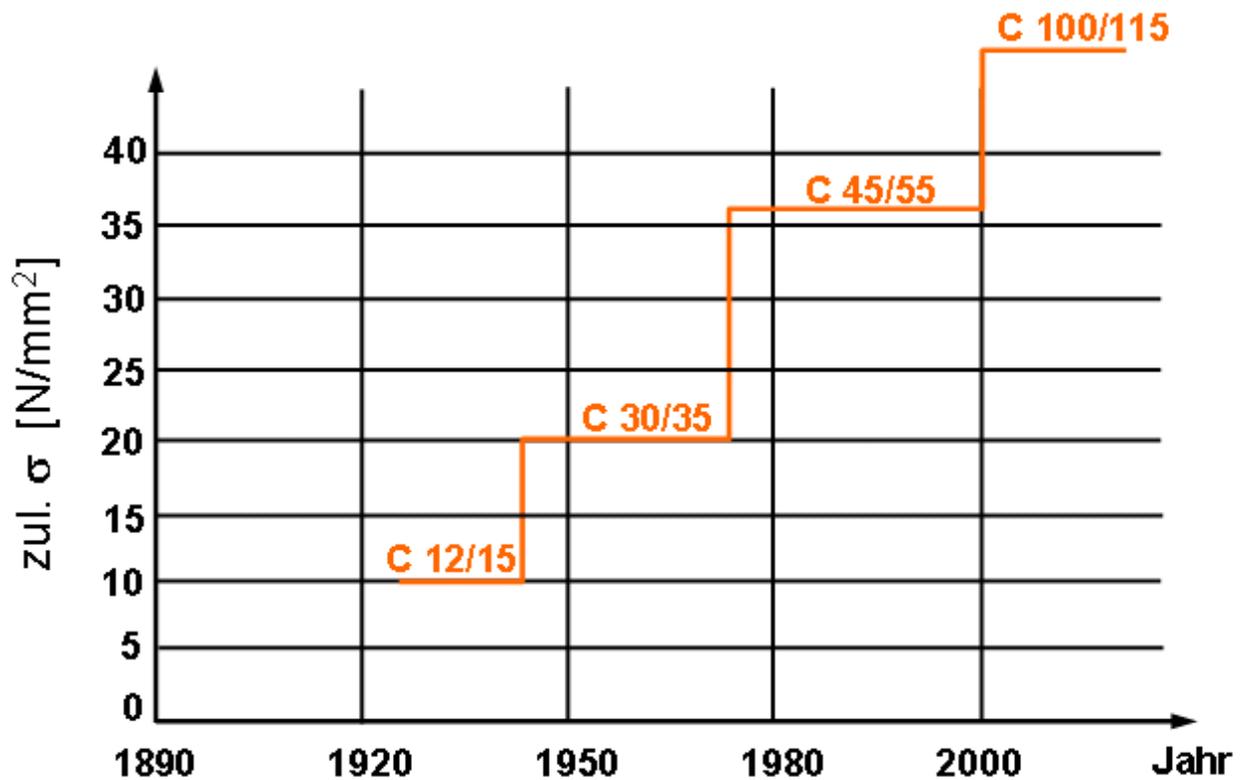


Bild 1: Entwicklung der Betonfestigkeiten [1]

1.4 Einteilung

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

1.4.1 Unterscheidung anhand der Trockenrohdichte

Beton kann nach seiner Trockenrohdichte ρ_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 Gesteinskörner 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 [3] gruppiert die Festigkeitsklassen in drei **Überwachungsklassen**. Überwachungsklasse 1 umfasst Betone bis zu einer Festigkeitsklasse C25/30 und Leichtbeton bis LC25/28 in den Rohdichteklassen D1,6 bis D2,0. Überwachungsklasse 2 deckt den Bereich C30/37 bis C50/60 und Leichtbetone bis LC25/28 in den Rohdichteklassen D1,0 bis D1,4 sowie LC30/33 und LC35/38 28 in den Rohdichteklassen D1,6 bis D2,0 ab. Festigkeitsklassen ab C55/67 sowie Leichtbetone ab LC30/33 in den Rohdichteklassen D1,0 bis D1,4 sowie LC40/44 in den Rohdichteklassen D1,6 bis D2,0 fallen in die Überwachungsklasse 3.

1.4.6 Unterscheidung nach der Art des Einbringens

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

1.5 Betonbestandteile und Zusammensetzung

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

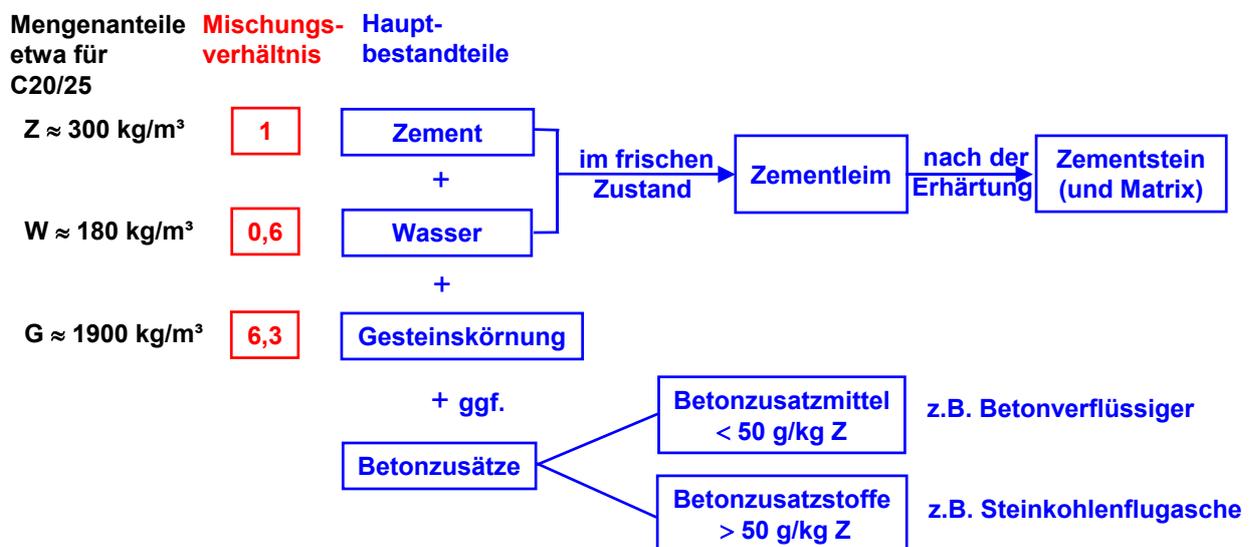


Bild 2: Betonbestandteile und Zusammensetzung [1]

2 Betonnormen und Richtlinien

Die Betonnormung ist auf europäischer Ebene auf mehrere grundlegende Gebiete aufgeteilt. Das Konzept der europäischen Normung sieht eine klare Trennung zwischen Stoff-, Prüf-, Konstruktions- und Bemessungs- und Ausführungsnormen vor. Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau für die Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken enthält der Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1) [4, 5]. Die Normung des Baustoffs Beton erfolgt in DIN EN 206-1 [2] in Verbindung mit DIN 1045-2 [6]. Hinzu kommen zwei Teile der DIN 1045, die die Bauausführung regeln [3, 7] und ergänzende Regeln für die Herstellung und die Konformität von Fertigteilen enthalten [8, 9]. Die Systematik der europäischen Normen für Bemessung, Ausführung und Baustoffwahl von zeigt Bild 3.

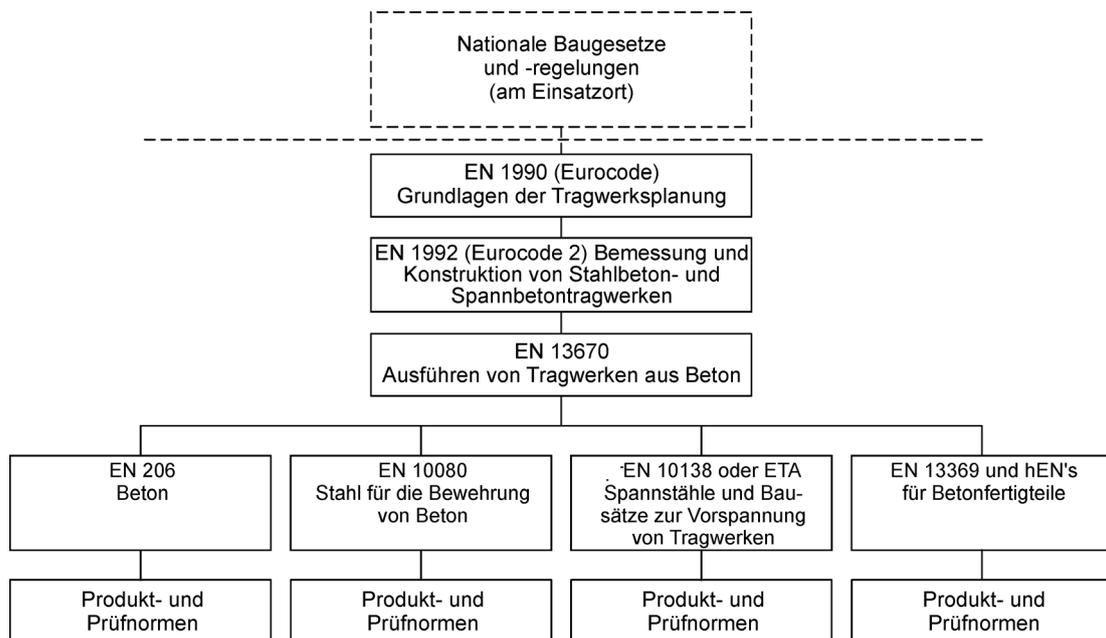


Bild 3: System europäischer Normen als Grundlage für Bemessung, Ausführung und Baustoffwahl für Betonbauwerke (nur Hauptmodule) [7]

Bild 4 zeigt die Beziehungen zwischen EN 206 und den Normen für die Bemessung und die Ausführung, den Normen für die Ausgangsstoffe und den Prüfnormen für die Eigenschaften des Frisch- und des Festbetons.

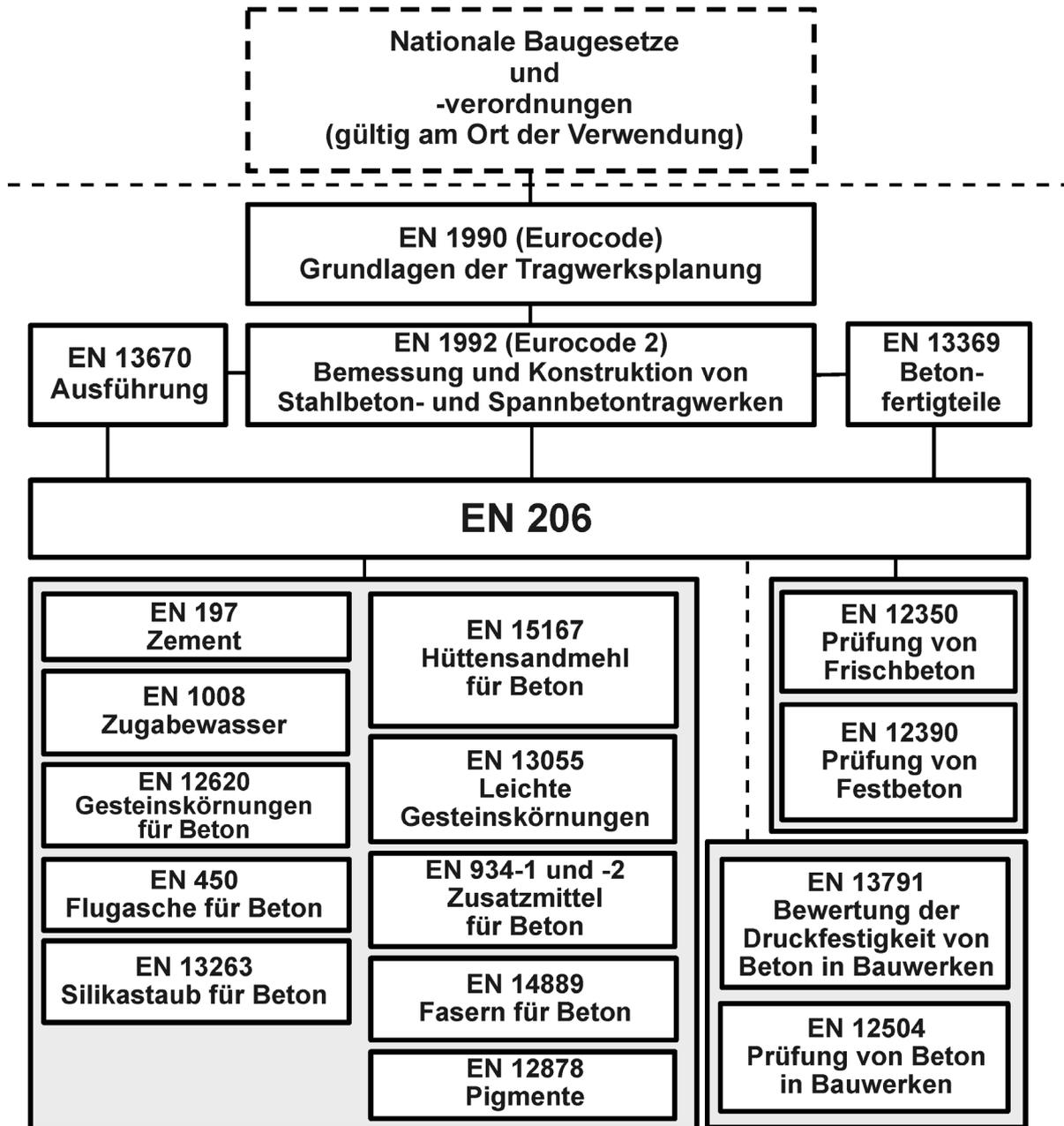


Bild 4: Beziehungen zwischen EN 206 und Normen für die Bemessung und Ausführung sowie Normen für Ausgangsstoffe und Prüfnormen) [10]

Nationale Besonderheiten bzw. abweichende Regelungen werden im Bereich des Betons durch die verschiedenen Teile der Betonnormung [3, 4, 6] berücksichtigt. Das Zusammenspiel der europäischen und der deutschen Norm zeigt Bild 5.



Bild 5: Zusammenspiel europäischer und deutscher Betonnormen

Neben den Hauptnormen gibt es eine Reihe zusätzlicher europäischer Normen für Bauprodukte aus Beton, wie z. B. Fertigteilgaragen, Bohrpfähle, ... auf die im Rahmen dieses Skriptes nicht weiter eingegangen wird. Hinzu kommen eine Reihe von Richtlinien des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Eine Zusammenstellung der wichtigsten Vorschriften enthält [11].

Diese Struktur wird in absehbarer Zeit nochmals verändert (Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammenhand der europäischen und der zugehörigen deutschen Normen im Kontext der neuen Betonbauqualitätsklassen



3 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.

Den Umgebungsbedingungen sind 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 6 werden daher beide in XF 4 eingestuft.

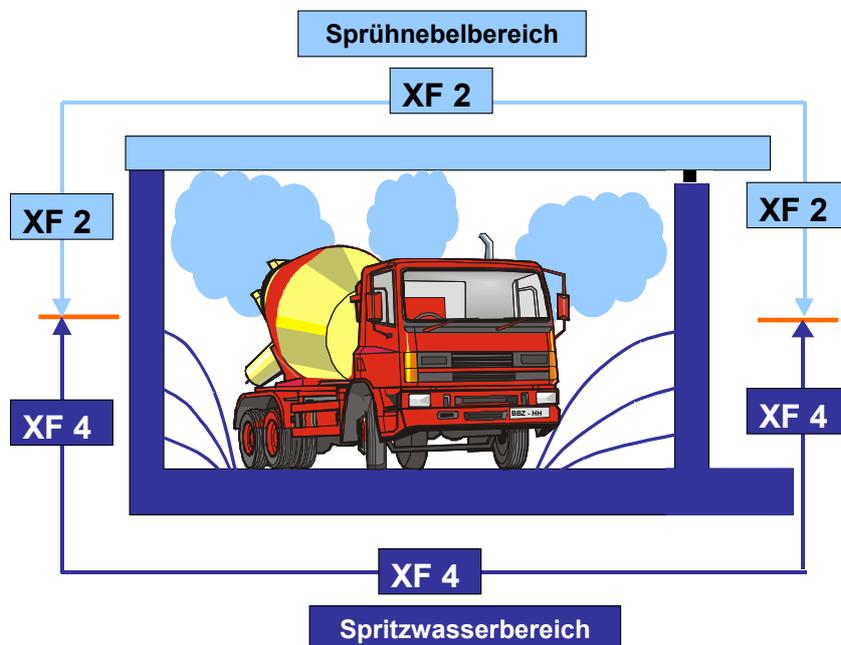


Bild 6: Beispiel für eine Einteilung in verschiedene Expositionsklassen (Darstellung: Bauberatung Zement)

Es werden die folgenden **Expositionsklassen** unterschieden (Bild 7):

- X0 Kein Angriffsrisiko

Bewehrungskorrosion verursacht durch

- XC Carbonatisierung (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)

Hinzu kommt für die Betonkorrosion die stets zu beachtenden **Feuchtigkeitsklassen** (Bild 8 und Bild 9)

- W.. Alkali-Kieselsäurereaktion

Expositionsklassen

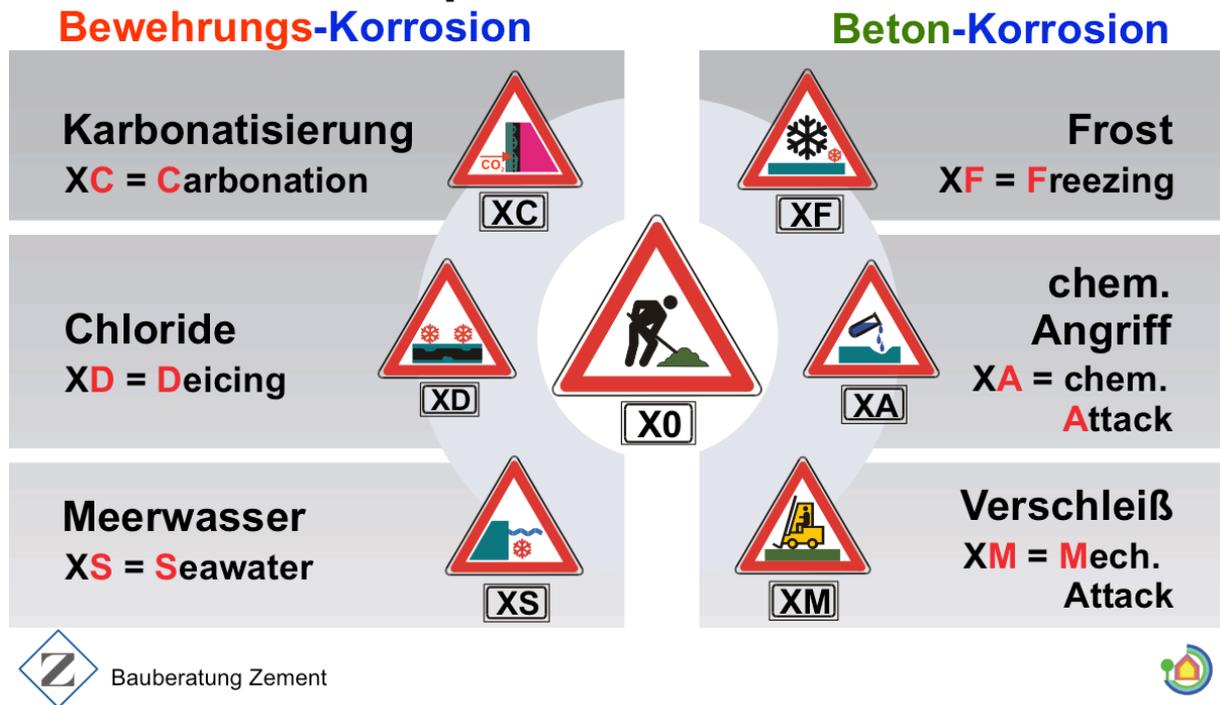


Bild 7: Expositionsklassen (Darstellung: Bauberatung Zement)

Innerhalb jeder Klasse findet eine weitere Differenzierung hinsichtlich der jeweiligen Einwirkung statt (vgl. Tabelle 1). Durch die zu wählende Expositionsklasse wird auch die erforderliche Überwachungsklasse vorgegeben [3]. Für die Expositionsklassen X0, XC und XF1 genügt die Überwachungsklasse 1. Die Überwachungsklasse 2 wird gefordert für die Expositionsklassen XS, XD, XA, XM (außer für Industrieböden), XF2, XF3 und XF4.

Tabelle 2: Expositionsklassen [2, 6]

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
1 Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko 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; Innenbauteile ohne Bewehrung

Fortsetzung Tabelle 1: Expositionsklassen [2, 6]

<p>2 Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Carbonatisierung 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>3 Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride, ausgenommen Meerwasser 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 ^a
<p>^a Ausführung nur mit zusätzlichen Maßnahmen (z. B. rissüberbrückende Beschichtung, s. a. DafStb Heft 526)</p>		

Fortsetzung Tabelle 1: Expositionsklassen [2, 6]

<p>4 Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser 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>5 Frostangriff mit und ohne Taumittel 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 oder Meerwasser	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 [2, 6]

<p>6 Betonkorrosion durch chemischen Angriff 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 1045-2 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; Füttertische der Landwirtschaft; Kühltürme mit Rauchgasableitung
<p>7 Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung 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 [2, 6]

8 Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäurereaktion Anhand der zu erwartenden Umgebungsbedingungen ist der Beton einer der vier nachfolgenden 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 dynamischen Beanspruchung und direktem Alkalieintrages ausgesetzt ist.	Bauteile unter Tausalzeinwirkung mit zusätzlicher hoher dynamischer Beanspruchung (z. B. Betonfahrbahnen)

Die folgende Klasseneinteilung (Tabelle 3) 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. Details enthält DIN 4030-1 [12].

Der schärfste Wert für jedes einzelne chemische Merkmal bestimmt die Klasse. Wenn zwei oder mehrere angreifende Merkmale zur selben 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 [12].

Tabelle 3: Grenzwerte für die Expositionsklassen bei chemischem Angriff durch natürliche Böden und Grundwasser [6]

Chemisches Merkmal	Referenzprüfverfahren	XA1	XA2	XA3
Grundwasser				
SO ₄ ²⁻ 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 ₂ mg/l angreifend	DIN EN 13577	≥ 15 und ≤ 40	> 40 und ≤ 100	> 100 bis zur Sättigung
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 oder ISO 7150-2	≥ 15 und ≤ 30	> 30 und ≤ 60	> 60 und ≤ 100
Mg ²⁺ mg/l	ISO 7980	≥ 300 und ≤ 1000	> 1000 und ≤ 3000	> 3000 bis zur Sättigung
Boden				
SO ₄ ²⁻ mg/kg insgesamt	DIN EN 196-2	≥ 2000 und ≤ 3000	> 3000 und ≤ 12000	> 12000 und ≤ 24000
Säuregrad ml/kg	DIN 4030-2	> 200 nach Baumann-Gully	in der Praxis nicht anzutreffen	

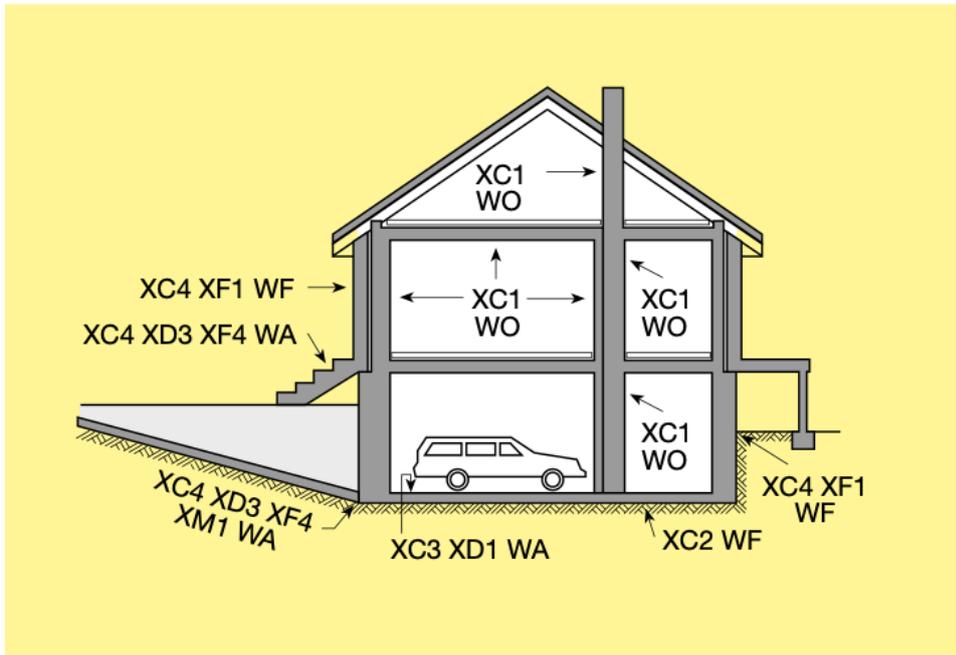
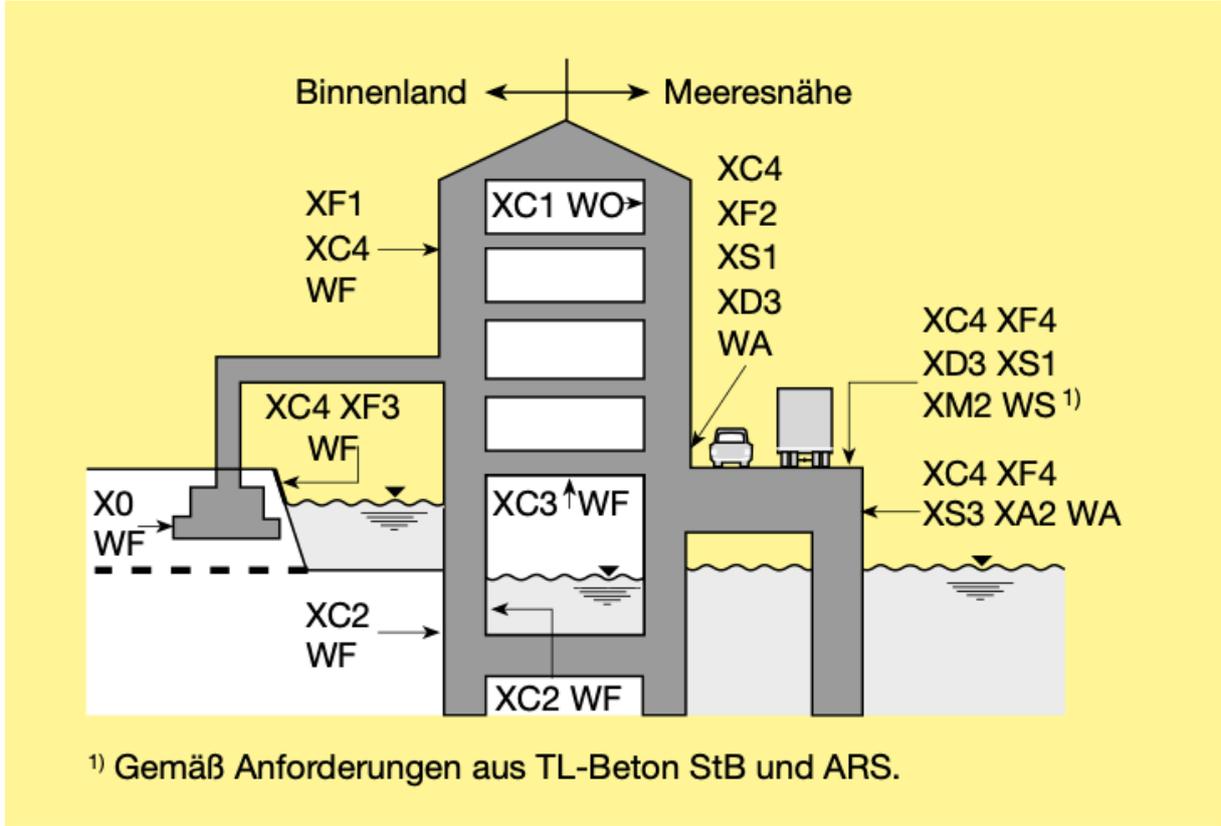


Bild 8: Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositions- und Feuchtigkeitsklassen an einem Wohnhaus [13]



1) Gemäß Anforderungen aus TL-Beton StB und ARS.

Bild 9: Beispiele für mehrere, gleichzeitig zutreffende Expositions- und Feuchtigkeitsklassen im Hoch- und Ingenieurbau ([13] in Anlehnung an [14])

4 Frischbeton

4.1 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
ω	=	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 4.1.4.3) 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:

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

4.1.1 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 9) ab.

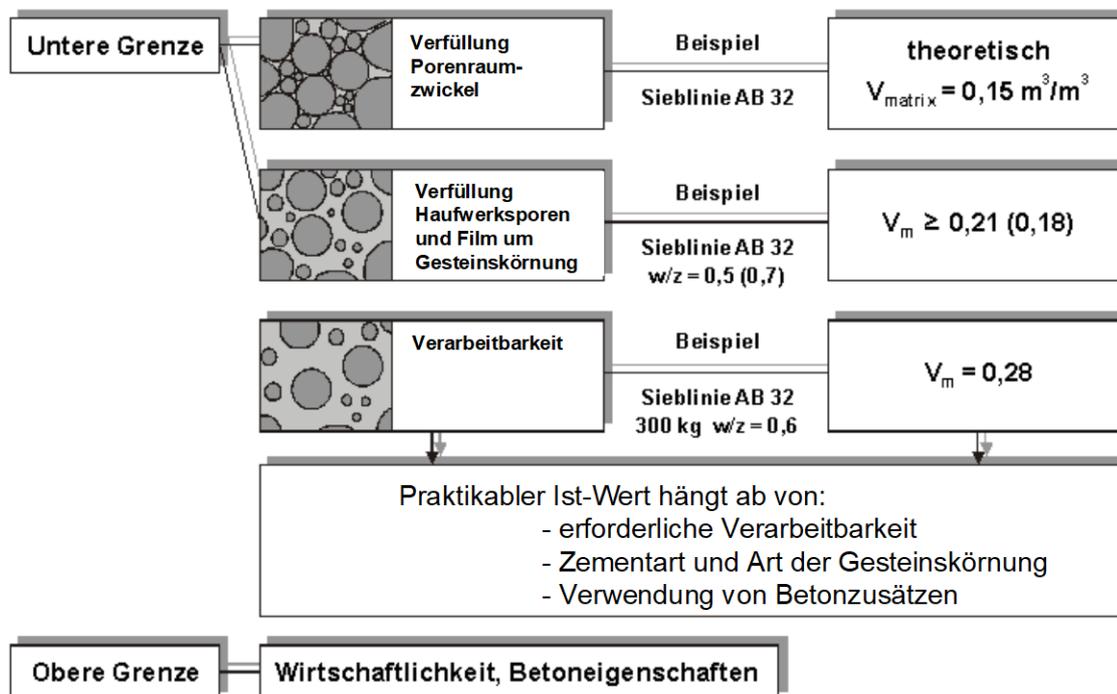


Bild 10: Zementleimgehalt [1]

Die Betone müssen so zusammengesetzt werden, dass sie für den vorgesehenen Anwendungsbereich und die maßgeblichen Expositionsklassen geeignet sind. Die entsprechenden Festlegungen sind in [6] zu finden. Da die richtige Wahl der maßgeblichen Expositionsklassen mitunter sehr schwierig ist, gibt es dafür unter anderem den Bauteilkatalog [15].

Nach DIN 1045-2 [6] muss der **Mindestzementgehalt** je 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 4: Mindestwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton [6]

Kriterium	Ursache	Festigkeitsklasse für Normalbeton	Mindestzementgehalt z [kg/m^3]
Festigkeit	unbewehrter Beton	$\geq \text{C}8/10$	-
	bewehrter Beton (Innenbauteil)	$\geq \text{C}16/20$	-
Korrosionsschutz der Bewehrung	Carbonatisierung	$\geq \text{C}16/20$	240 - 280
	Chloride	$\geq \text{C}30/37$	300 - 320
Betonkorrosion	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 Gesteinskörnung und insbesondere das Größtkorn den natürlichen Hohlraumgehalt des Korngemisches maßgeblich beeinflusst, gibt die DIN 1045-2

[6] auch Mindestzementgehalte für Standardbetone in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse an (Tabelle 4). Der dort genannte Zementgehalt muss vergrößert werden um

- 10 % bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 16 mm und
- 20 % bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung 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 Gesteinskörnung von 63 mm.

Tabelle 5: Mindestzementgehalt für Standardbeton mit einem Zement der Festigkeitsklasse 32,5 nach DIN EN 197-1 [16] und einem Größtkorn von 32 mm [6]

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

4.1.2 Mehlkorngehalt

Beton muss eine ausreichende Menge **Mehlkorn** enthalten, um ihn gut verarbeiten zu können, ein geschlossenes Gefüge zu erhalten und damit er kein Wasser absondert. Das Mehlkorn besteht aus dem Gehalt an Zement, Zusatzstoff und Gesteinskörnung $\leq 0,125$ mm. Während in Natursanden Mehlkorn fast ganz fehlt, sind Brechsande feinstoffreich. Ein ausreichender Mehlkorngehalt 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 Mehlkorngehalt 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 10).

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

Mindestmehlkorngehalt:

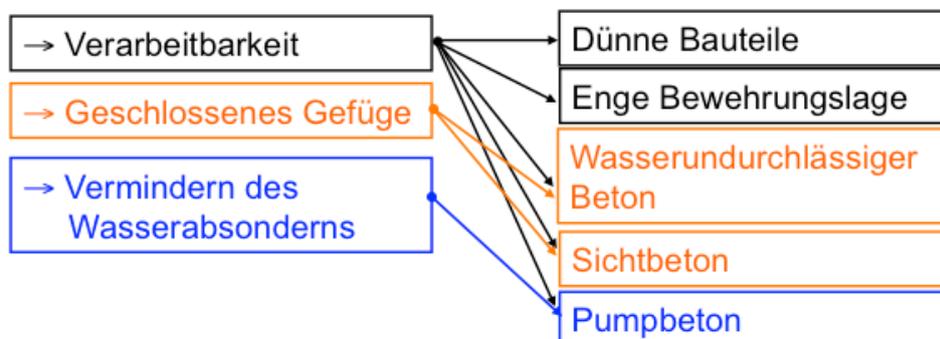


Bild 11: Einflüsse des Mehlkorngehalts [17]

Der Gehalt an Mehlkorn $\leq 0,125$ wird daher national in DIN 1045-2 [6] auf die Werte in Tabelle 5 und Tabelle 6 begrenzt. Zwischen den genannten Zementgehalten wird geradlinig interpoliert. Die Werte dürfen um bis zu 50 kg/m³ erhöht werden, wenn

- der Zementgehalt 350 kg/m³ übersteigt, um den darüber hinausgehenden Zementgehalt,
- ein puzzolanischer Zusatzstoff des Typs II verwendet wird, um dessen Gehalt.

Tabelle 6: Höchstzulässiger Mehlkorngehalt für Beton bis zur Festigkeitsklasse C50/60 und LC50/55 in Abhängigkeit von den Expositionsklassen [6]

Zementgehalt [kg/m ³]	Höchstzulässiger Mehlkorngehalt [kg/m ³]		
	Expositionsklassen		
	XF, XM		X0, XC, XD, XS, XA
	Größtkorn der Gesteinskörnung		
	8 mm	≥ 16 mm	≥ 8 mm
≤ 300	450	400	550
≥ 350	500	450	550

Tabelle 7: Höchstzulässiger Mehlkorngehalt für Beton ab der Festigkeitsklasse C55/67 und LC55/60 für alle Expositionsklassen [6]

Zementgehalt [kg/m ³]	Höchstzulässiger Mehlkorngehalt [kg/m ³]	
	Expositionsklassen	
	X0, XC, XD, XS, XA, XF, XM	
	Größtkorn der Gesteinskörnung	
	8 mm	≥ 16 mm
≤ 400	550	500
450	600	550
≥ 500	650	600

Im Fahrbahndeckenbau erhöht das Mehlkorn das Bilden 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.

4.1.3 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 CO₂-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 SO₃, 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 [18] zu beachten.

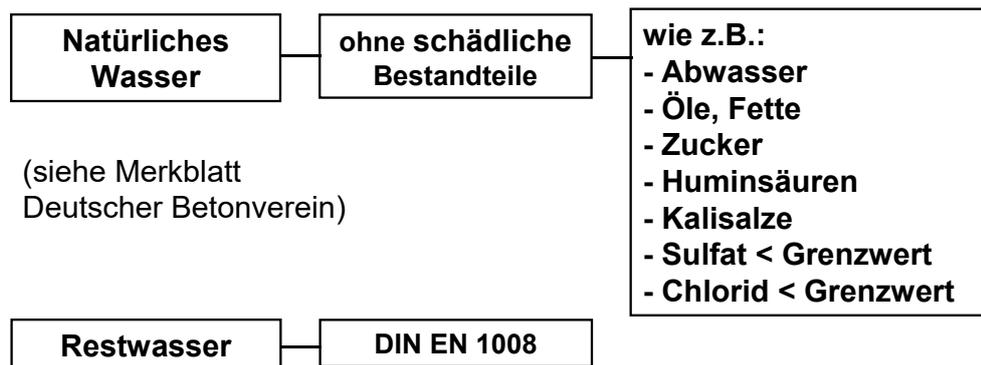


Bild 12: Zugabewasser [18]

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 12, 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 13). 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 9). Mit abnehmendem w/z-Wert werden praktisch alle Betoneigenschaften positiv beeinflusst. Der w/z-Wert sollte deshalb immer so klein wie möglich gewählt werden.

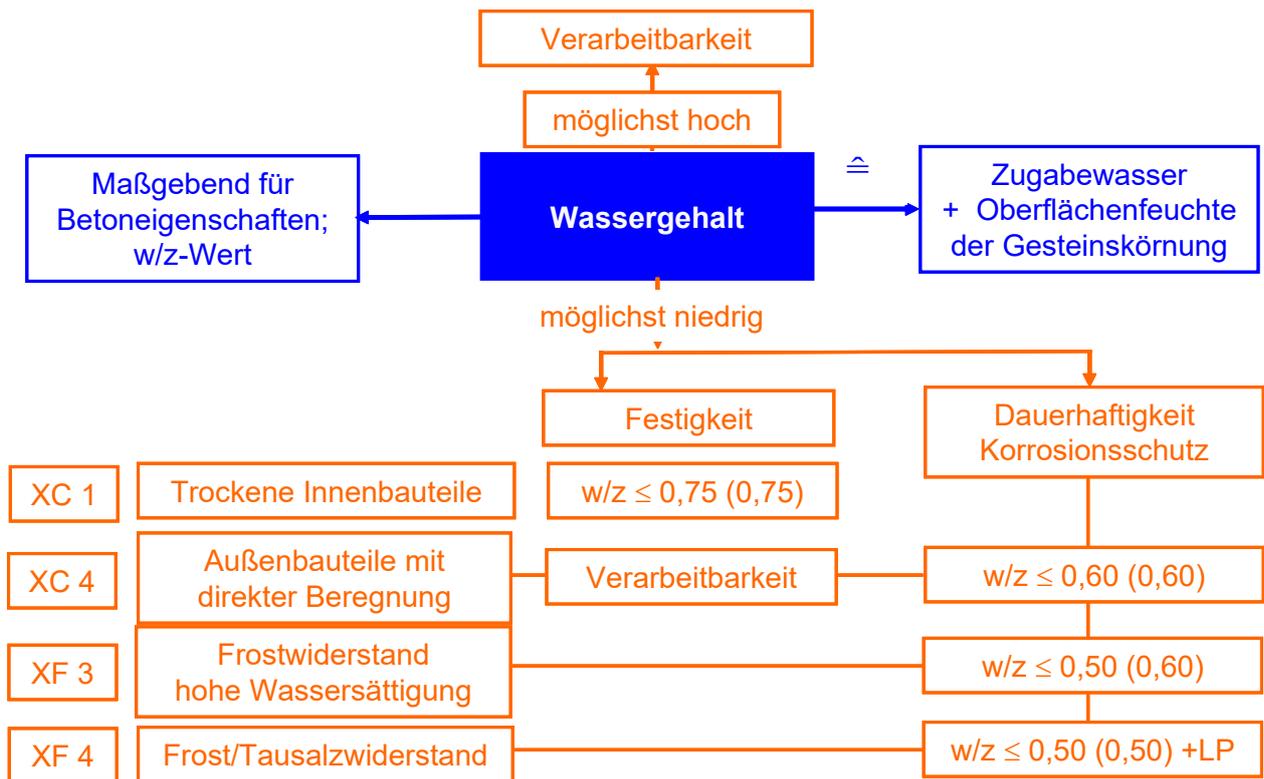


Bild 13: Wassergehalt; w/z-Wert für ausgewählte Expositionsklassen [1]

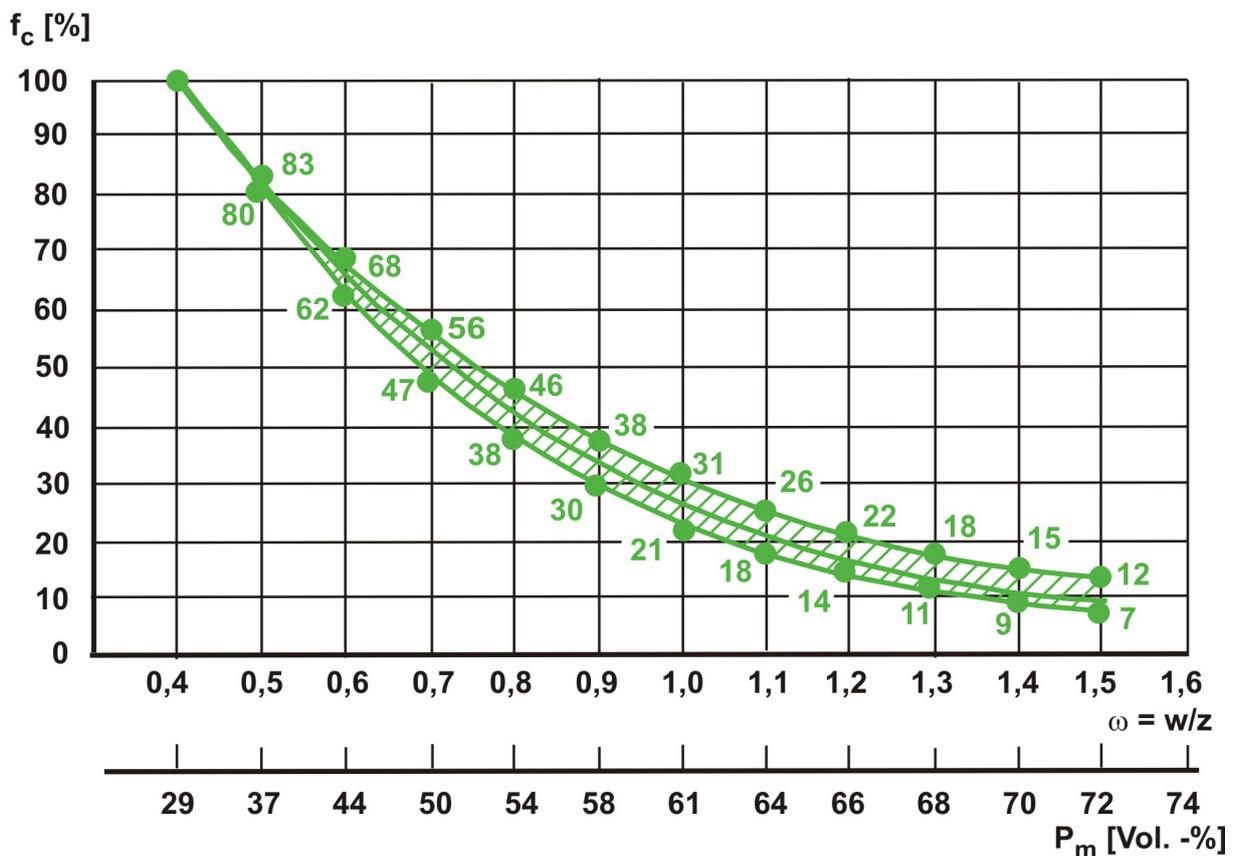


Bild 14: Beziehung zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit von Normalbeton [19]

Tabelle 8: Maximale w/z-Werte nach DIN 1045-2 [6] für die verschiedenen Expositionsklassen

Expositionsklasse	Angriff	Umgebung	Maximaler w/z-Wert
X0	-	alle Umgebungsbedingungen, ausgenommen Frostangriff, Verschleiß oder chemischer Angriff	-
XC1	Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Carbonatisierung	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

4.1.4 Betonzusätze

4.1.4.1 Definitionen

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

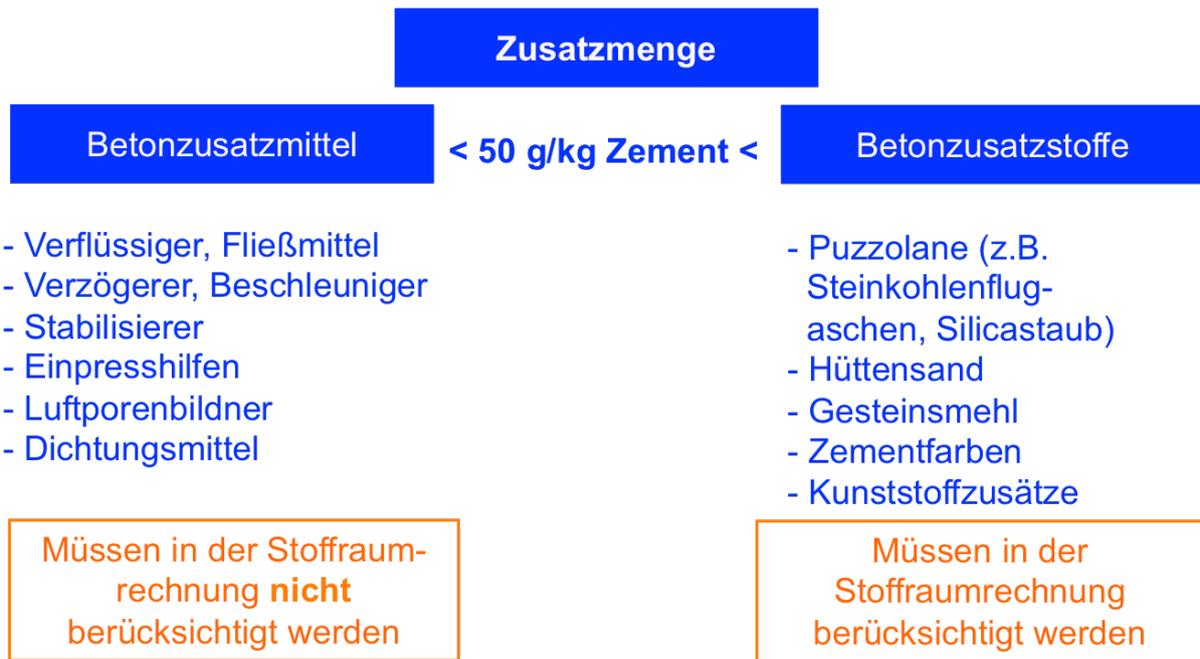


Bild 15: Betonzusatzmittel und –zusatzstoffe

4.1.4.2 Betonzusatzmittel

Betonzusatzmittel sind in DIN EN 934 [20] genormt. Sie werden während des Mischvorgangs in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben. Man gibt sie dem Beton flüssig pulverförmig (max. 5 M.-% > 1 mm) oder als Granulat (max. 5 M.-% > 4 mm) 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 (≤ 50 g bzw. 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 9: Wirkungsgruppen von Betonzusatzmitteln nach DIN EN 934-2 [21] und deutschen Anwendungsregeln

Wirkungsgruppe	Kurzzeichen	Farbzeichen	Wirkung
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 eines mäßigen 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 10: 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	SB	orange	Einführung von Luftporen (Schaumbeton)

4.1.4.2.1 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 15). Da weniger Wasser zum Benetzen der Oberfläche benötigt wird, kann der Wassergehalt reduziert werden.



Bild 16: Wirkungsweise grenzflächenaktiver Betonzusatzmittel [22]

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 16). Tabelle 10 ordnet die für BV und FM gebräuchlichen Wirkstoffe den genannten Mechanismen zu und hebt Eigenschaften hervor.

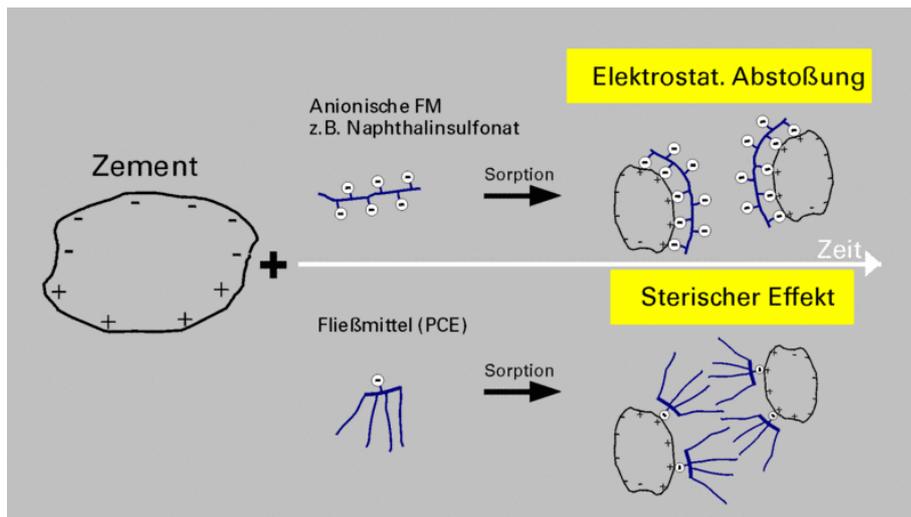
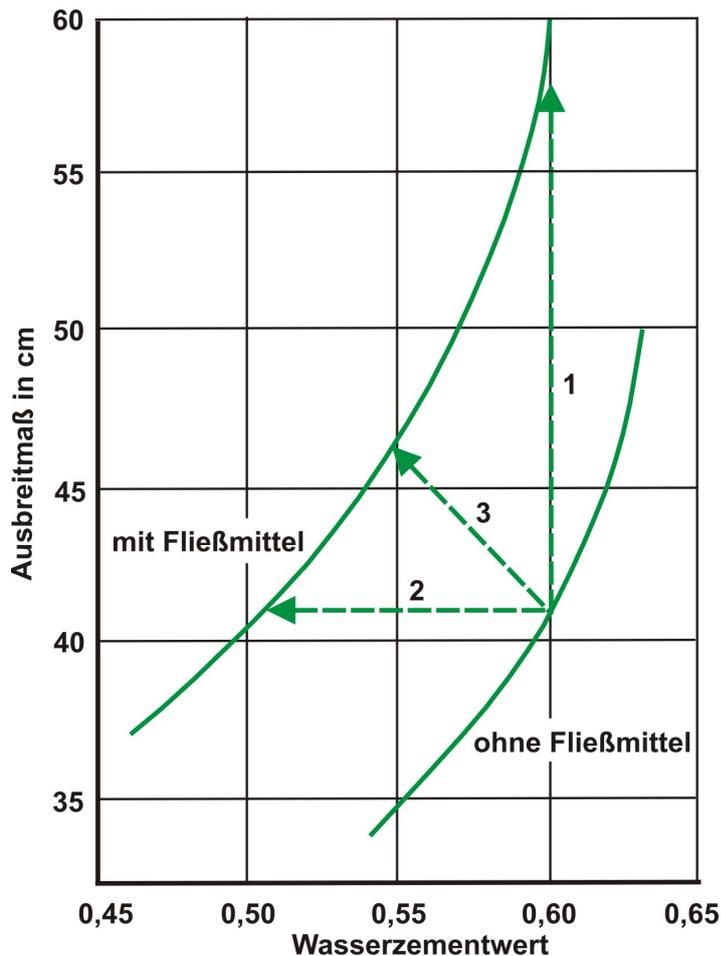


Bild 17: Wirkungsweise dispergierender Betonzusatzmittel [23]

Tabelle 11: Wirkstoffe für BV / FM und ihre Eigenschaften [22]

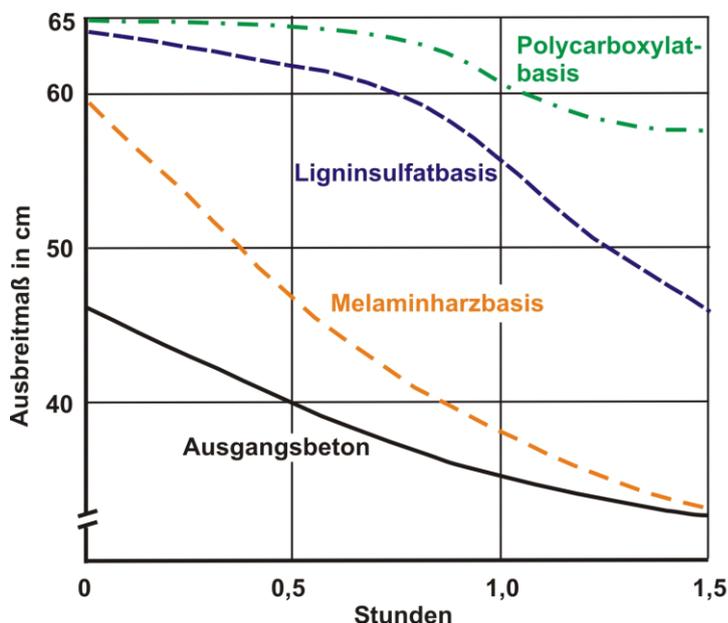
	Wirkstoff	Eigenschaften	Anwendungen
grenzflächenaktiv	Ligninsulfonate	<ul style="list-style-type: none"> ▪ können verzögern ▪ sehr gute Plastifizierung ▪ neigen zur Luftporenbildung ▪ kommerziell sehr interessant ▪ Nebenprodukt der Zelluloseindustrie 	BV
	Naphthalinsulfonate	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sehr gute Plastifizierung ▪ synthetisch hergestellt ▪ billige Qualitäten neigen zur Luftbildung 	BV / FM
dispergierend	Melaminharze	<ul style="list-style-type: none"> ▪ gute Plastifizierung, müssen jedoch höher dosiert werden ▪ keine Verzögerung ▪ Klebe-Effekt ▪ hervorragend geeignet für LP-Betone 	BV / FM
	Polycarboxylate / Polycarboxylatether	<ul style="list-style-type: none"> ▪ sehr gute Plastifizierung, bei teilweise sehr geringen Dosiermengen ▪ sehr lange anhaltende Plastifizierung ▪ gutes Zusammenhaltevermögen der Betonmischung 	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 17). Die Wirkungsdauer von BV und FM ist begrenzt (Bild 18). Die Konsequenz ist, dass diese beiden Zusatzmittel im Transportbetonmischer zu- bzw. nachdosiert werden dürfen.



1. Erhöhung des Ausbreitmaßes bei gleichem w/z-Wert
⇒ Bessere Verarbeitbarkeit
2. Reduzierung des Wasseranspruchs bei gleicher Verarbeitbarkeit
3. ⇒ höhere Festigkeiten (Kombination aus 1 + 2)

Bild 18: Mögliche Nutzung der verflüssigenden Wirkung von BV und FM



Beton mit 320 kg/m³ CEM I
 $\omega = 0,56$
 $T = 20 \text{ °C}$

Konsequenz
 Zugabe der Fließmittel auf der Baustelle bei längerer Einbaudauer

Bild 19: Wirkungsdauer von Fließmittel bei sofortiger Zugabe [1]

4.1.4.2.2 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 12: Wirkstoffe für Luftporenbildner und ihre Eigenschaften [22]

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

4.1.4.2.3 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 13: Wirkstoffe für Betonverzögerer und ihre Eigenschaften

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

4.1.4.3 Betonzusatzstoffe

Betonzusatzstoffe sind fein aufgeteilte Stoffe, die dem Beton zugegeben werden, um einzelne Eigenschaften zu beeinflussen [24, 25]. 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 19 zu entnehmen.

Anorganisch-mineralische Stoffe

Unterscheidung nach ihrer Reaktionsfähigkeit in:

Inerte Stoffe

Zusatzstoff des Typs I
nach DIN 1045-2

z. B.:

- Gesteismehl
- Bentonit
- Zementfarben

Puzzolanische und latent hydraulische Stoffe

Zusatzstoff des Typs II
nach DIN 1045-2

-z. B.:

- Hüttensand
- Steinkohlenflugasche
- Silicastaub
- Trass

Organische Stoffe

z. B.:

- Kunststoffe, Kautschuk, Bitumen
insbesondere für Instandsetzungsmörtel

Bild 20: Betonzusatzstoffe - Einteilung [1]

4.1.4.3.1 Anorganisch mineralische Stoffe

Sie werden in Mehlkorngröße verwendet. Die wichtigsten Vertreter sind Gesteismehle, Steinkohlenflugasche und Silicastaub (Nebenprodukt durch Kondensation verdampfter Kieselsäure bei der Herstellung von Silicium- und Ferrosilicium-Legierungen). Anorganische Zusatzstoffe werden in zwei Typen unterteilt [2, 26]:

- **inerte Zusatzstoffe (Typ I)**, dazu zählen Gesteismehl, Bentonit, Farbstoffe, Zementfarben,
- **puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe (Typ II)**, dazu zählen z. B. Trass, Steinkohlenflugasche calcinierte Tone 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 (w/z)“ gegen den „äquivalenten Wasserzementwert (w/z_{eq})“ oder auch Wasserbindemittelwert (w/b) mit Hilfe des k-Wert-Konzeptes [2, 6]. Der ansetzbare k-Wert hängt vom jeweiligen Zusatzstoff ab. Um den Ca(OH)₂-Verbrauch für die puzzolane Reaktion zu begrenzen und so durch eine ausreichende Alkalität der Porenlösung einen sicheren Schutz gegen das Carbonatisieren zu gewährleisten, wird zusätzlich der maximale Gehalt der Betonzusatzstoffe begrenzt [6, 27].

Nach DIN 1045-2 [2] sind bei der Anrechnung die in Tabelle 13 aufgeführten Randbedingungen einzuhalten. Die DIN EN 206 [2] weicht von diesen Regelungen in einigen Punkten ab. So ist für Silicastaub der Klasse 1 (SiO₂-Gehalt ≥ 85 M.-%) nach DIN EN 13263-1 [28] für Beton, der Zement CEM I und CEM II/A (ausgenommen CEM II/A-D) nach DIN EN 197-1 [16] enthält, folgendes zulässig:

- Für einen festgelegten Wasserzementwert $\leq 0,45 \Rightarrow k_s = 2,0$;
- für einen festgelegten Wasserzementwert $> 0,45 \Rightarrow k_s = 2,0$, ausgenommen für die Expositionsklassen XC und XF, für die $k_s = 1,0$ ist.

Für Silicastaub der Klasse 2 (SiO₂-Gehalt ≥ 80 M.-%) können nationale Regeln festgelegt werden.

Für Hüttensandmehl (h) nach DIN EN 15167-1 [29] wird in DIN EN 2061 [2] für Beton, der Zement CEM I und CEM II/A enthält, ein k-Wert von $k_h = 0,6$ empfohlen. Der Höchstanteil an Hüttensandmehl sollte die folgende Anforderung erfüllen:

$$\text{Hüttensandmehl/Zement} \leq 1,0 \text{ Massenanteile.}$$

Tabelle 14: Maximal zulässige Zusatzstoffgehalte des Typs II (f, z und s in [kg/m³]) [2, 27]

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

4.1.4.3.2 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.

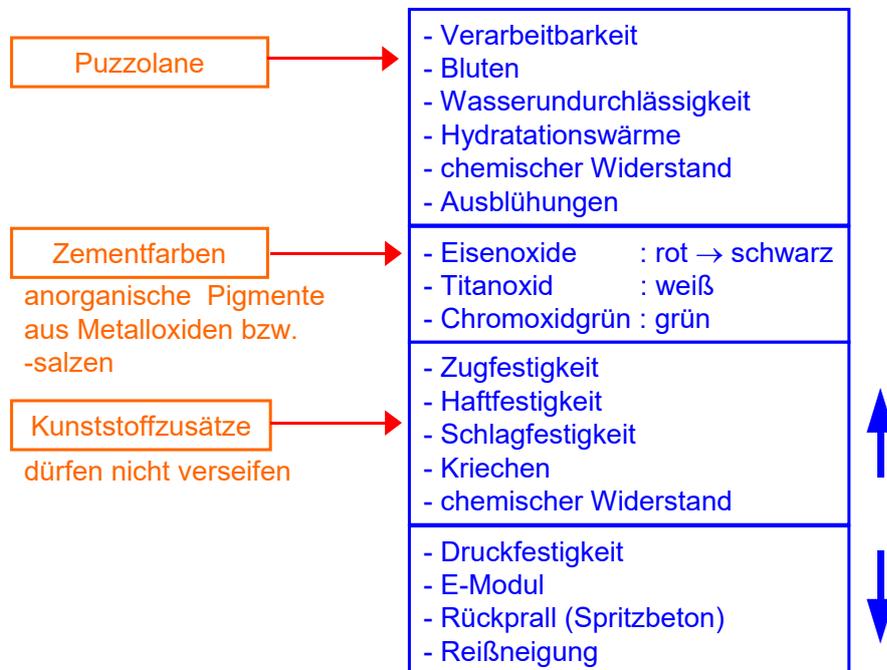


Bild 21: Betonzusatzstoffe [1]

4.2 Verarbeitbarkeit und Konsistenz

4.2.1 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 21).

4.2.2 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 9). 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.

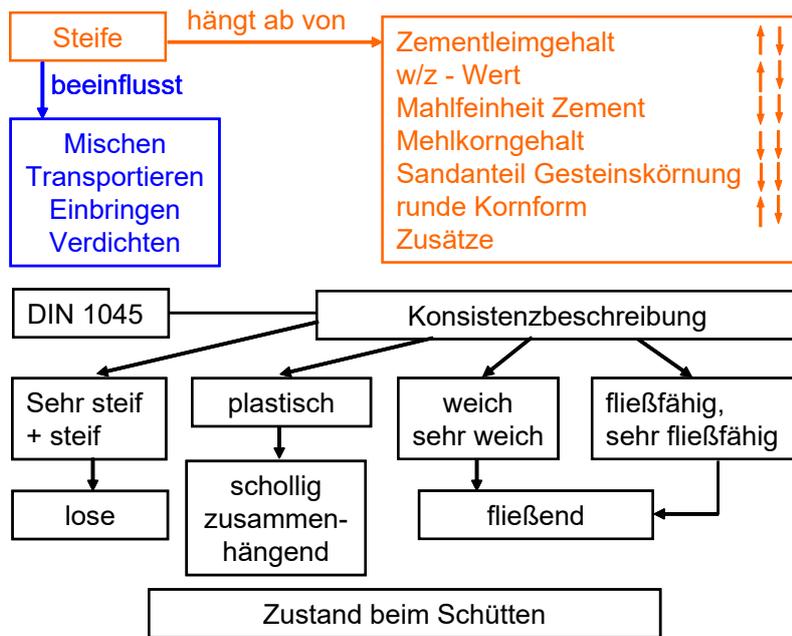


Bild 22: Verarbeitbarkeit – Konsistenz [1]

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 22). 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.

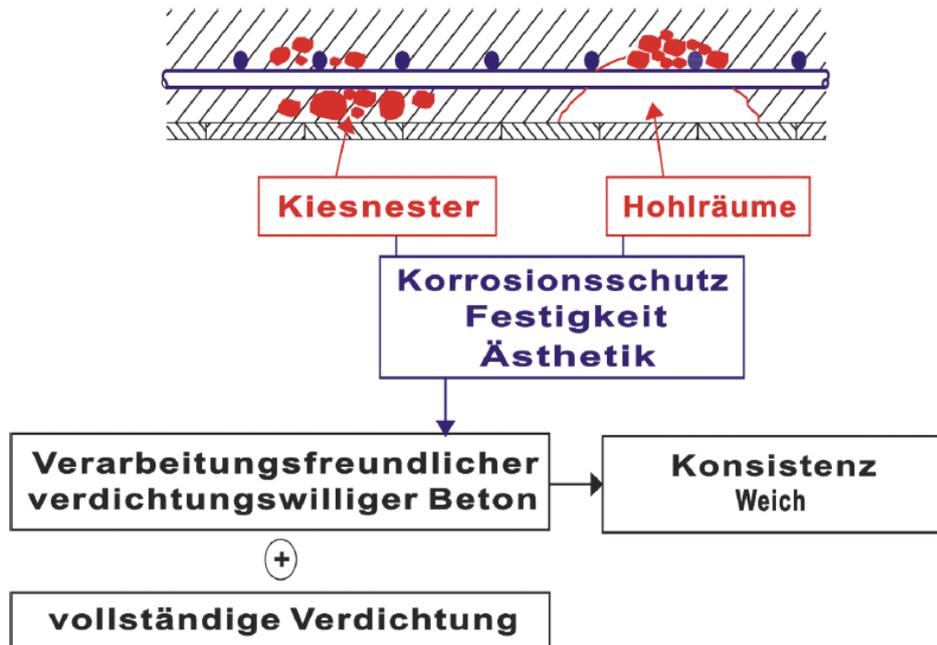


Bild 23: Bedeutung der Konsistenz und der Verdichtung [1]

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 23.

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 beim Konstant halten 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 23 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, je kleiner die Gesteinskörnung wird. Zugleich nimmt die Kohäsion des Zementmörtels durch die größere spezifische Oberfläche zu und da erschwert das Herauslösen kleiner Luftporen.

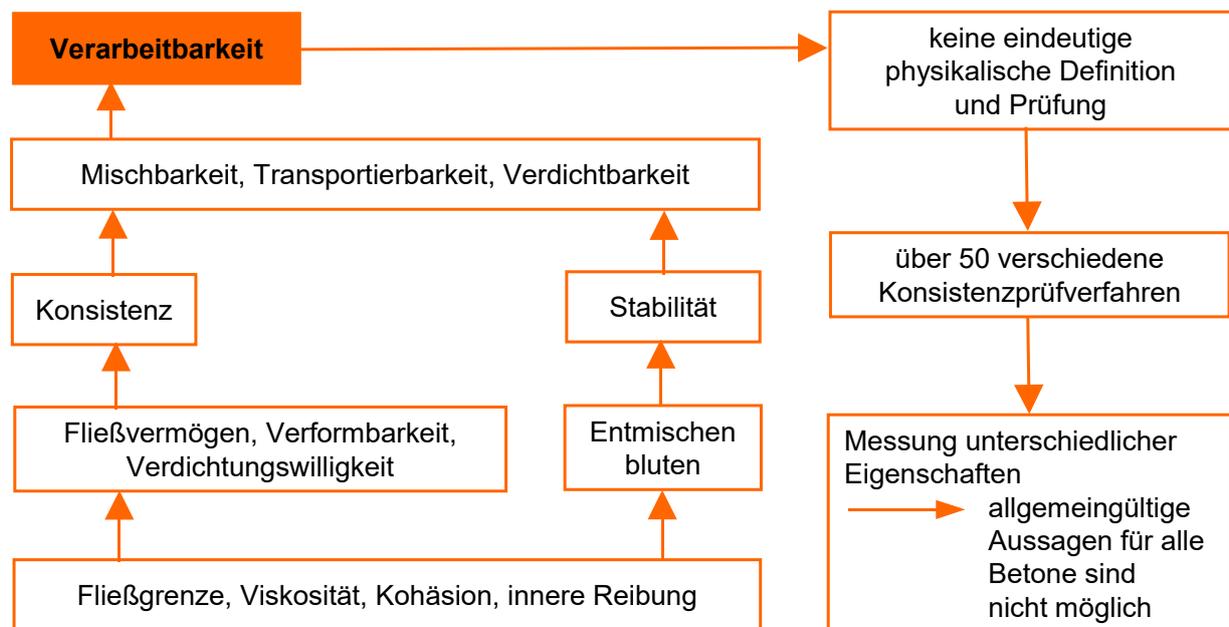


Bild 24: Verarbeitbarkeit von Beton [1]

4.2.3 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. 4.7.4) gestatten die Konsistenzmaße eine gute Frischbetonüberwachung.

Zum Bestimmen der Frischbetonkonsistenz wurde eine Reihe von Verfahren entwickelt. Auf baustellengerechte Verfahren wie den **Verdichtungsversuch**, den **Ausbreitversuch** und den **Setzmaß-Versuch (Slump-Test)** wird in DIN 1045-2 Bezug genommen (Bild 24 und Bild 25).

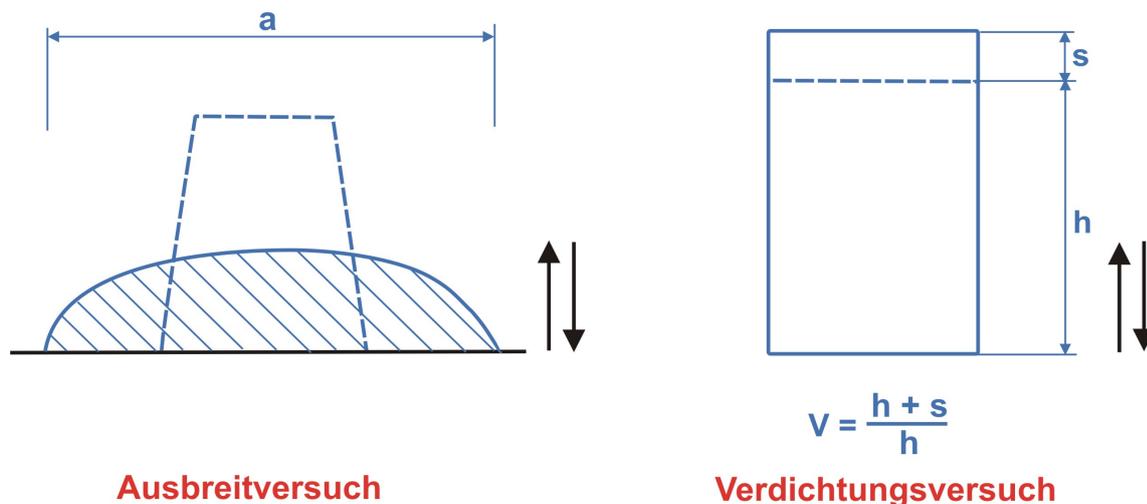


Bild 25: Wirkungweise verschiedener Konsistenzprüfverfahren [26]

Da eine zuverlässige Korrelation zwischen den Ergebnissen der drei 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). Der Slump-Test ist vor allem im anglo-amerikanischen Raum gebräuchlich.

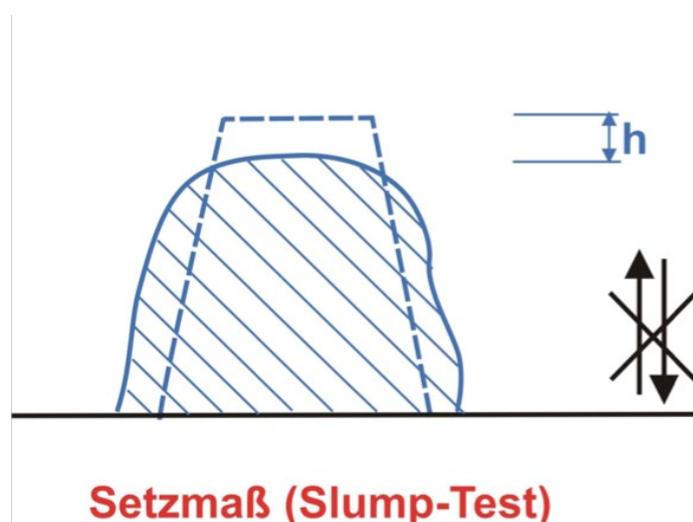


Bild 26: Wirkungweise des Slump-Tests [26]

Tabelle 15: Konsistenzbereiche [2]

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 (≥ 630 mm).

Selbstverdichtender Beton (SVB)

Beton mit einem Ausbreitmaß von mehr als 700 mm werden als Selbstverdichtende Betone bezeichnet. Sie sind in Deutschland inzwischen DIN 1045-2 [6] geregelt und werden europäisch in DIN EN 206 [10] 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 Trichterauslaufversuch (Bild 26) über die Auslauftrichterzeit 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 Blockiererringversuch (Bild 27). Während des Fließens und nach dem Einbau darf sich der SVB nicht durch Sedimentieren entmischen.

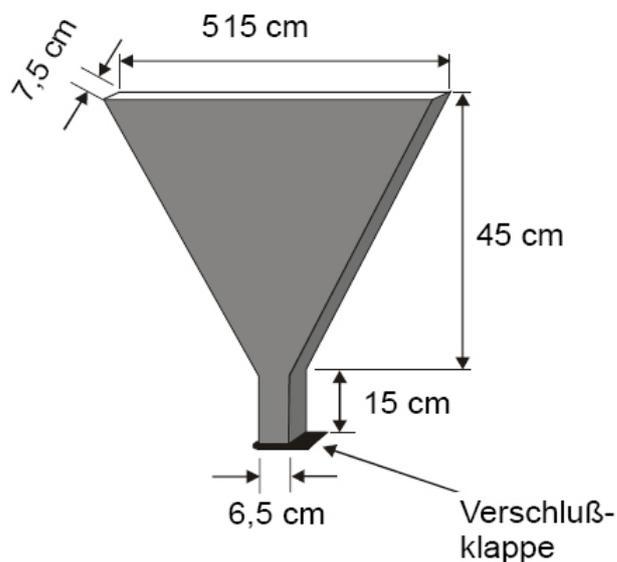


Bild 27: Auslauftrichter nach DIN EN 12350-9 [30]

Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit von SVB kann die relative Trichtergeschwindigkeit $R = 1/t$ über dem Setzfließmaß s_m aufgetragen werden (Bild 28). 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.

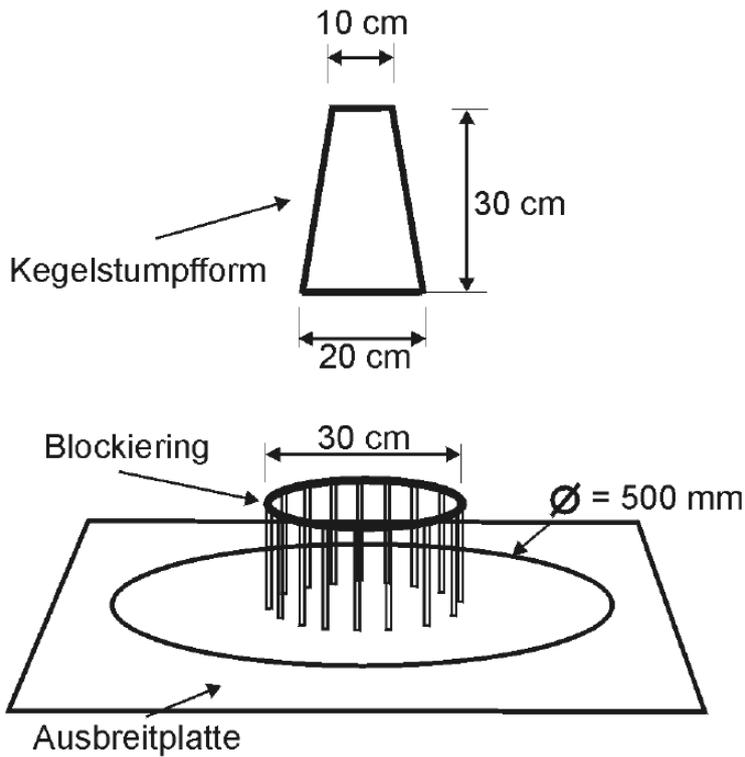


Bild 28: Bodenplatte für den Setzfließversuch nach DIN EN 12350-8 [31] mit Blockierring nach DIN EN 12350-12 [32]

Durch die Lage im Diagramm 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.

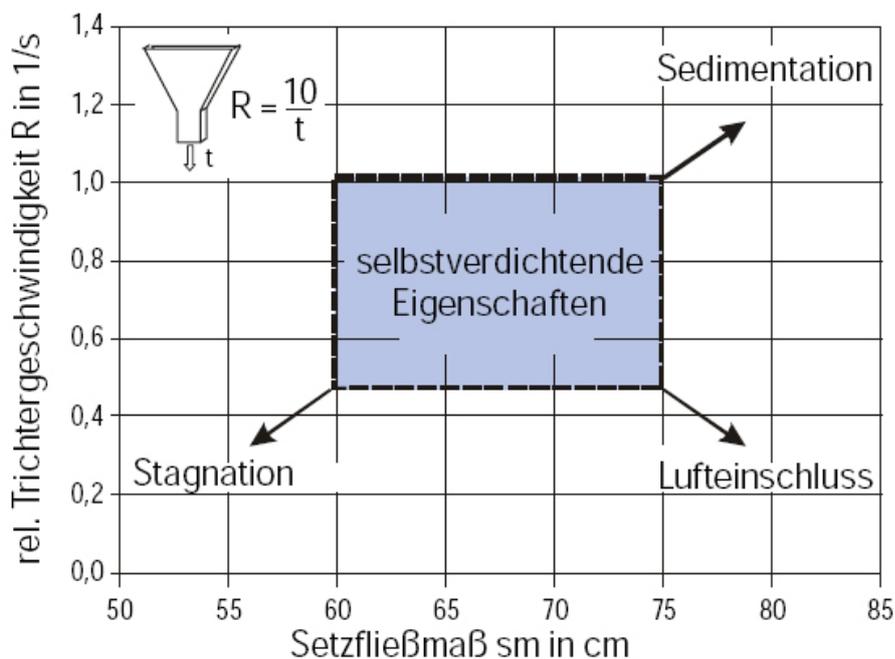


Bild 29: Zielfenster für die Konsistenz von SVB auf Basis von Setzfließversuch und Auslauftrichterversuch

Die Konsistenz wird nach DIN EN 206 [10] anhand der genannten Verfahren in folgende Klassen eingeteilt (Tabelle 15):

Tabelle 16: Konsistenzklassen nach DIN EN 206 [10]

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}	VS1	s	≤ 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	≤ 10 mit 12 Bewehrungsstäben
	PJ2	mm	≤ 10 mit 16 Bewehrungsstäben
Sedimentierter Anteil	SR1	%	≤ 20
	SR2	%	≤ 15

4.3 Einfluss verschiedener Parameter auf den Zementbedarf



Bild 3.25: Einfluss verschiedener Parameter auf den Zementbedarf [1]

4.4 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 Art des Mischens 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 Mehlkorngehalt, sperrige Kornformen und Leichtbeton erforderlich. Durchlaufmischer sind ausnahmsweise zulässig, wenn ein gleichmäßiger Zufluss gewährleistet ist.

In **Mischerfahrzeugen** 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.

4.5 Transport und Einbringen des Frischbetons

Der Transport des Betons erfolgt chargenweise in Behältern oder kontinuierlich durch Förderbänder und Rohrleitungen. Die Konsistenz muss wegen der Entmischungsgefahr 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 Entmischungsgefahr.

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/m³; andererseits verringert ein wesentlich über 350 kg/m³ 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.

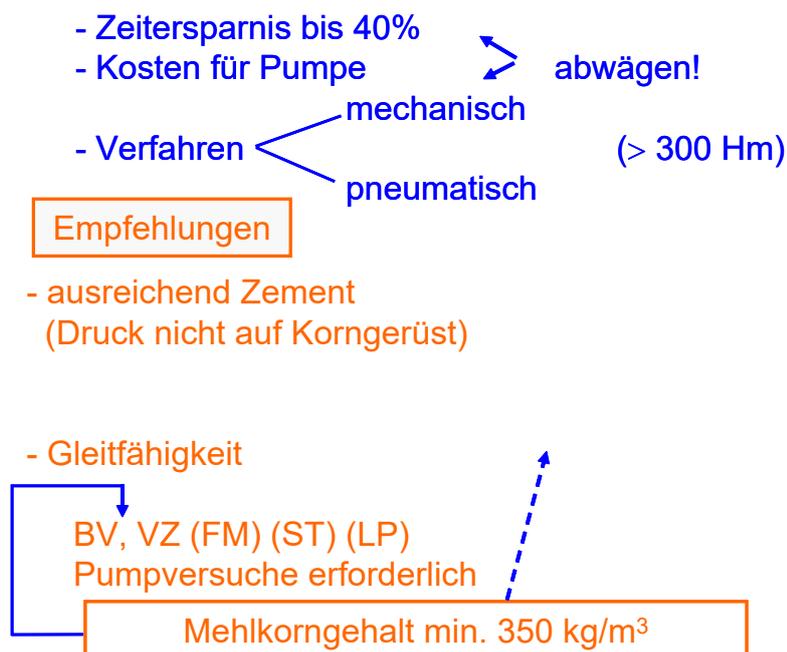


Bild 30: Transport – Pumpbeton [1]

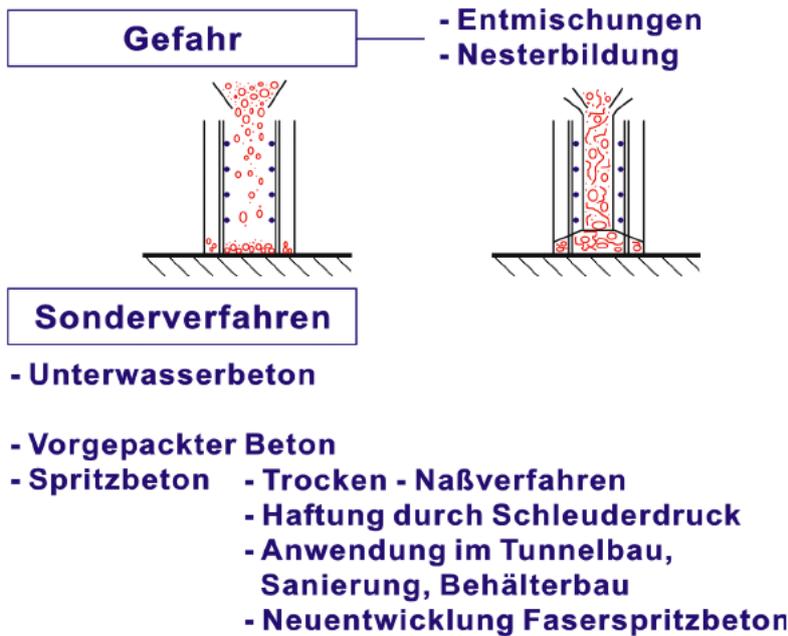


Bild 31: Einbringen des Betons [1]

4.6 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 31; bei 8 Vol.-% Betonporen sinkt die Betondruckfestigkeit um etwa 50 %, bei 1 Vol.-% bereits um circa 10 %.

Betonfestigkeit in %

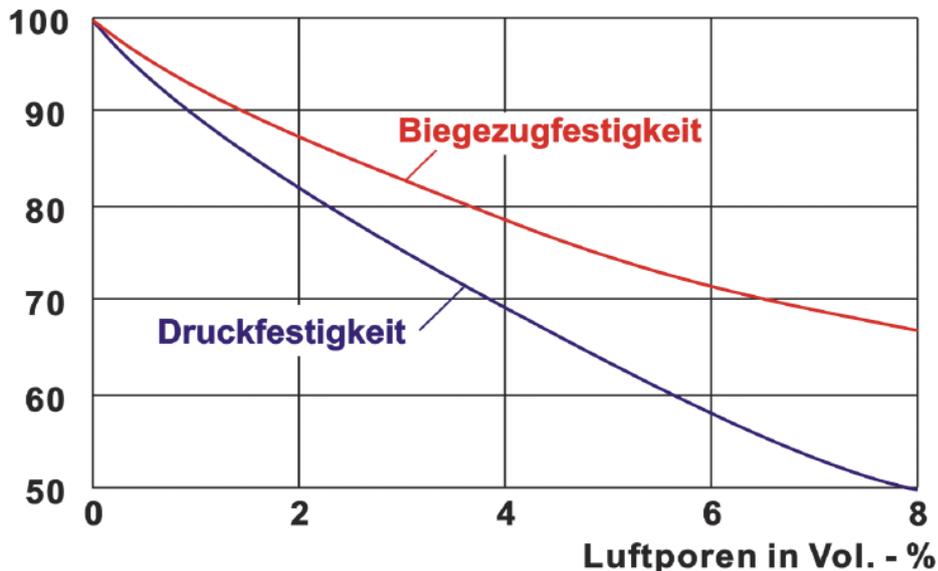


Bild 32: Einfluss der Verdichtung auf die Biegezug- und Druckfestigkeit von Beton [33]

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 32). 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.

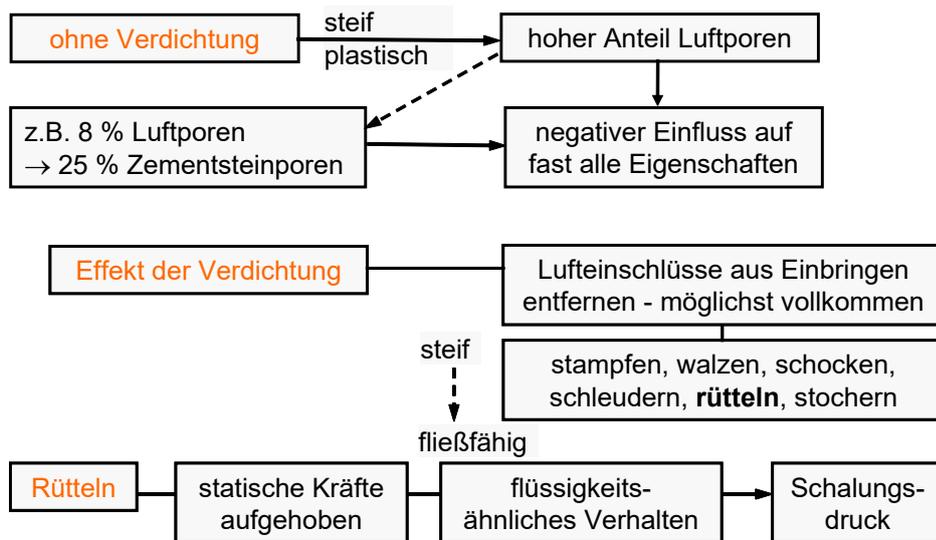


Bild 33: Verdichten [1]

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 33), 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 Rundstählen wird zum Beispiel in den USA für Standardprüfkörper genutzt oder für sehr weiche Betonkonsistenz verwendet.

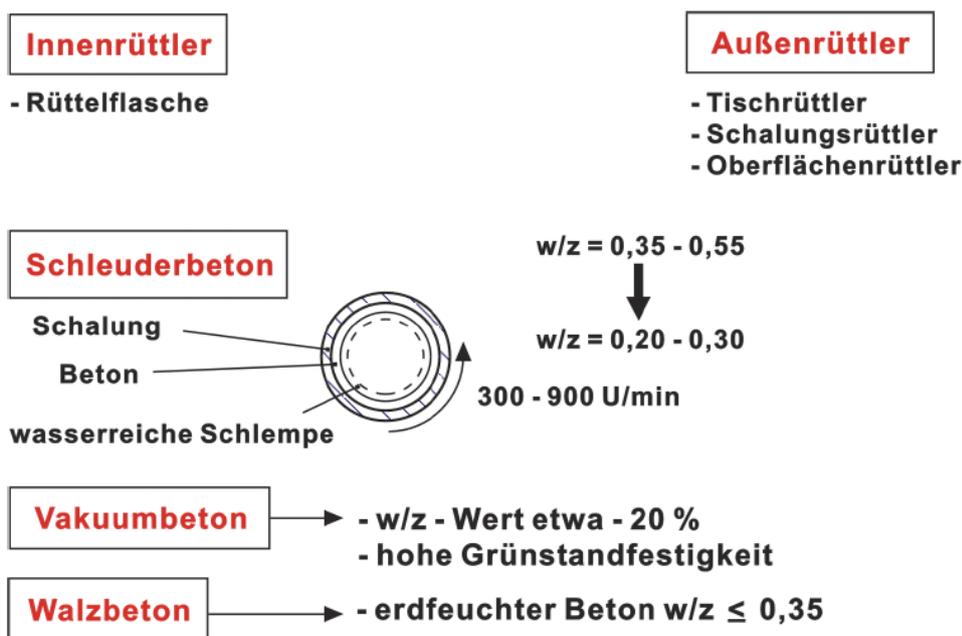


Bild 34: Rüttelverfahren – Sonderverdichtungsverfahren [1]

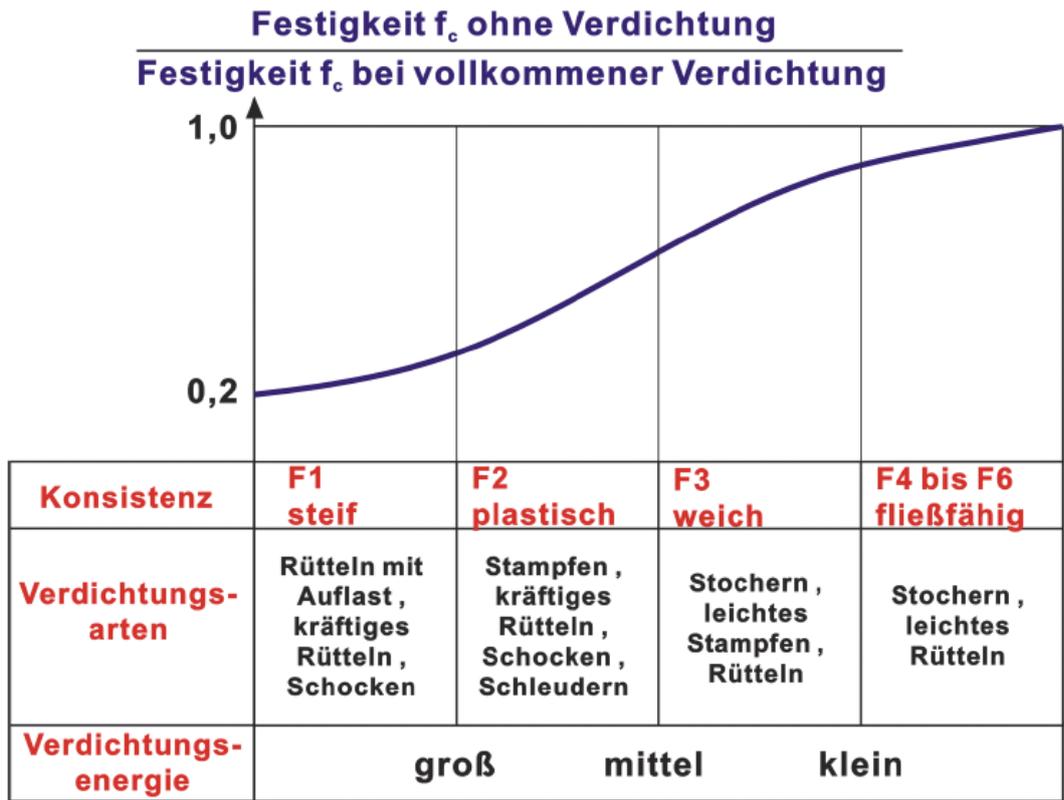


Bild 35: Festigkeit und Verdichtung [1]

Betondruckfestigkeit f_c in %

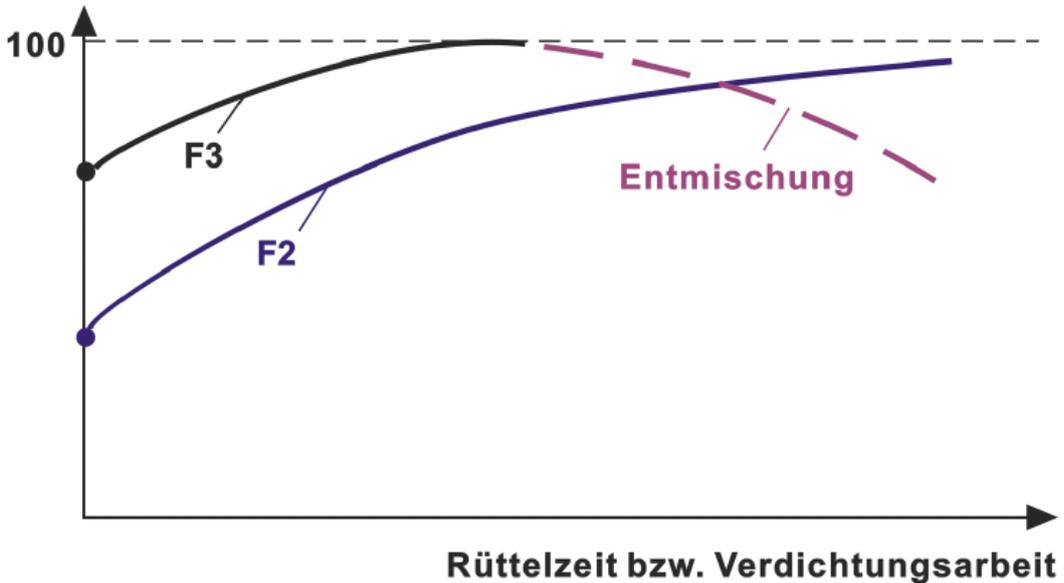


Bild 36: Beziehung zwischen Festigkeit, Verdichtbarkeit und Verdichtungsenergie bei normalem Zementgehalt [1]

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 cm/s gerade schließt. Der Beton wird in waagerechten Lagen eingebracht, die Innenrüttler dürfen nicht zum Ausbreiten des Betons benutzt werden. Die Schichthöhe beträgt im Allgemeinen 30 bis 50 cm. Die Rütteldauer ist von der Schichtdicke und der Schwingungsfrequenz abhängig. Der Wirkungsbereich eines Innenrüttlers ist 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 Wirkungsbereich sein.

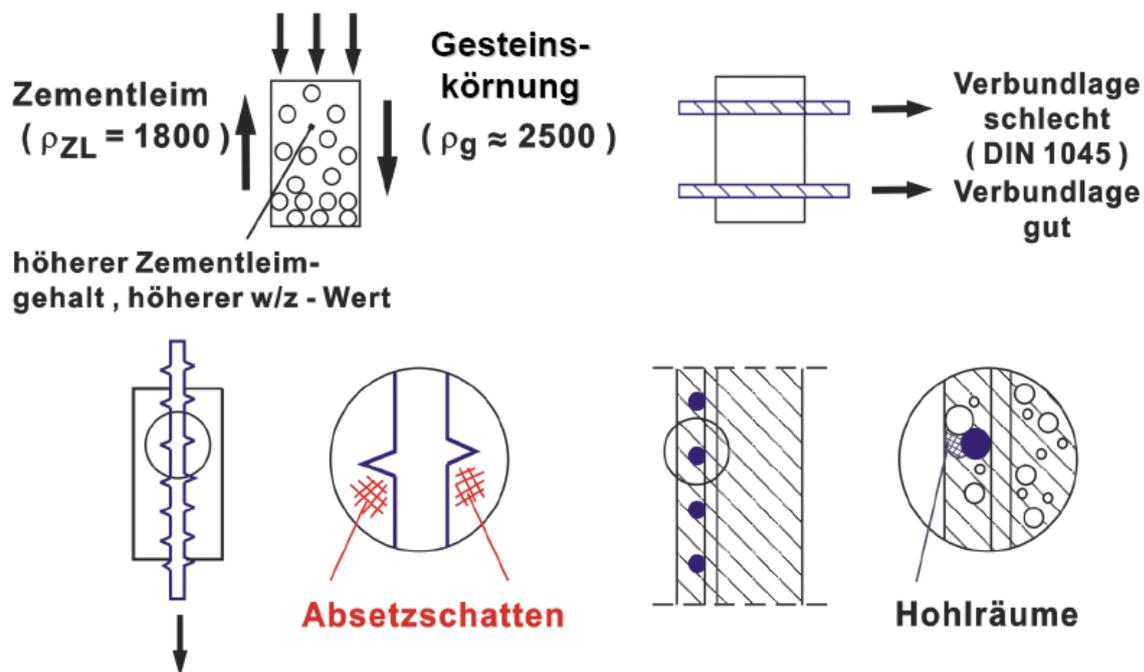


Bild 37: Auswirkung Rütteln – Beispiele [1]

4.7 Frischbetoneigenschaften

4.7.1 Allgemeines (Übersicht)

Die wichtigste Frischbetoneigenschaft ist die Verarbeitbarkeit. Sie wurde bereits in Kapitel 4.2 besprochen. Weitere Frischbetoneigenschaften werden nachfolgend behandelt.

4.7.2 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.

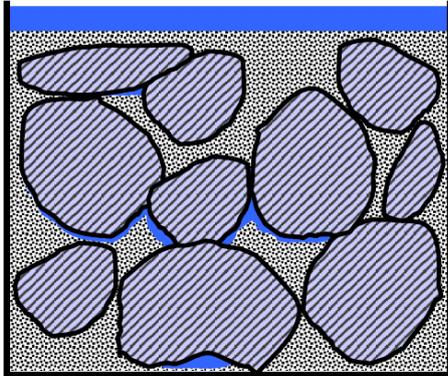


Bild 38: Schematische Darstellung des Wasserabsonderns im Beton [34]

Das Bluten hängt außer von der Betonzusammensetzung (Wassergehalt, Feinanteile - Mehlkorngelalt (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 Mehlkorngelalt und
- die Abstimmung sämtlicher Feinstoffe.

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

Zur Abschätzung der Blutneigung eines Betons eignet sich der „Eimertest“ [35].

4.7.3 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 m³ 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_l: Volumen der Frischbetonporen [m³] (vgl. LP-Topf, Kapitel 4.7.4)

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

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

Bei vollkommener Verdichtung ist $V_l = 0$, was in der Praxis nicht zu erreichen ist. In diesem theoretischen Fall entspräche die Rohdichte der Sollrohddichte ρ_{fs} bei vollkommener Verdichtung ρ_{fv} . Die Sollrohddichte ρ_{fs} 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_f 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 39) bzw. aus dem Volumen der Probekörper nach dem Entschalen errechnet wird.

Ist $\rho_f = \rho_{fv}$, so ist der Beton vollkommen verdichtet.

Ist $\rho_f < \rho_{fv}$, 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.

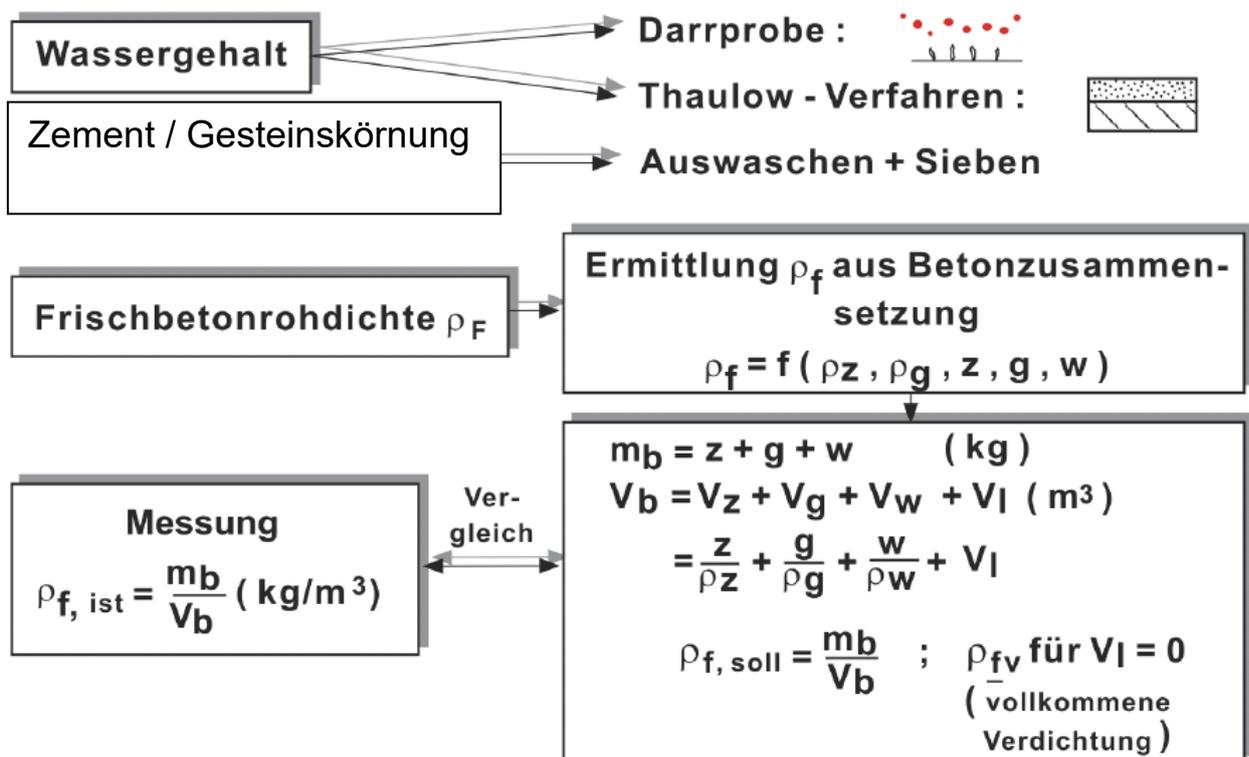


Bild 39: Prüfung der Betonzusammensetzung [1]

4.7.4 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 Kornrohdichten 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 [36] genutzt.

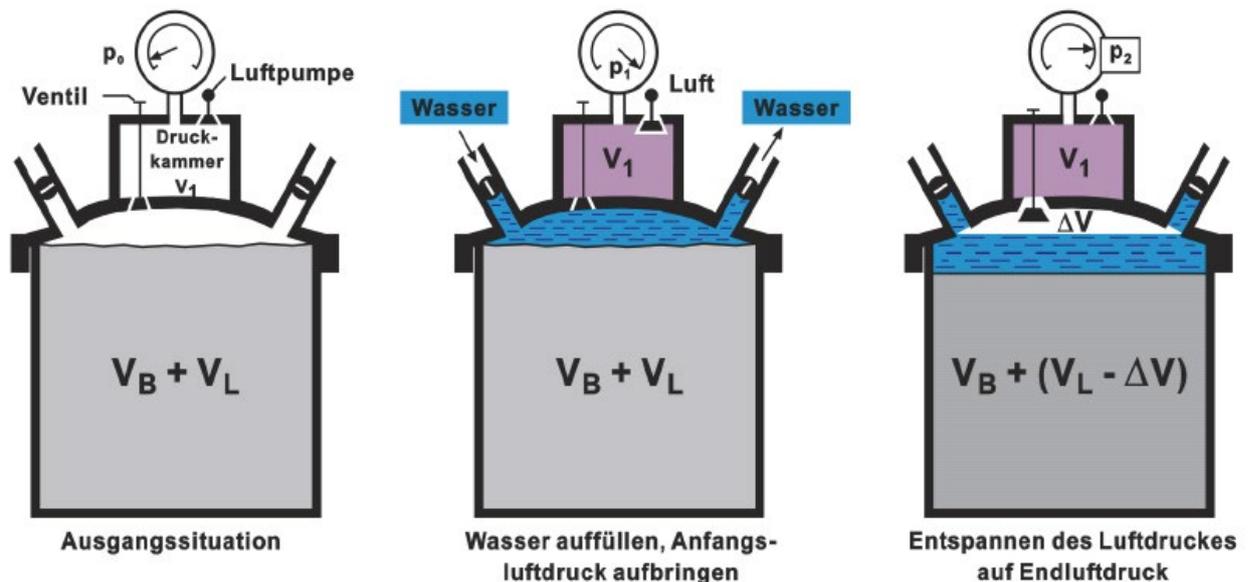


Bild 40: Druckausgleichsverfahren zur Bestimmung des Luftporengehaltes (nach [26])

4.7.5 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 verstärkten 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 °C und –3 °C darf die Betontemperatur beim Einbau +5 °C nicht unterschreiten. Bei Lufttemperaturen unter –3 °C darf die Betontemperatur +10 °C nicht unterschreiten. Bei Zementgehalten unter 240 kg/m³ bzw. bei Verwendung von Zementen mit niedriger Hydratationswärme darf die Betontemperatur beim Einbringen +10 °C nicht unterschreiten.

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

Der oben angegebenen Formel für T_B kann man entnehmen, dass die Temperatur eines Normalbetons mit durchschnittlicher Zusammensetzung um ±1 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 °C die Schmelzwärme des Eises mit 335 kJ/kg besonders wirksam. Gesteinskörnungen können in der warmen Jahreszeit durch Besprühen gekühlt werden, da das verdunstete Wasser eine

Wärmemenge von 2260 kJ/kg zum Teil der umgebenden Luft, zum Teil der Gesteinskörnung entzieht.

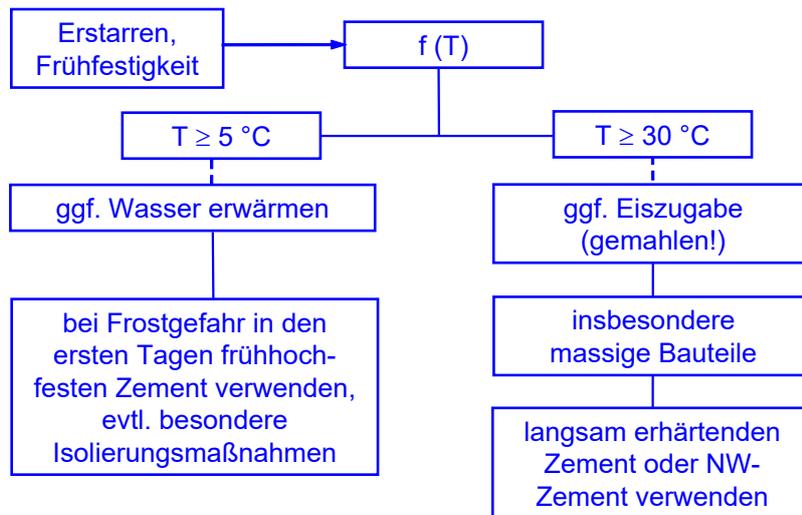


Bild 41: Frischbetontemperatur beim Einbau [1]

4.7.6 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/mm². Bei hohem Zementgehalt, niedrigem Wassergehalt und Verdichtungszeit über 60 s können 0,4 bis 0,5 N/mm² erreicht werden. Bei Wassergehalten unter 120 kg/m³ muss dann allerdings mit wesentlicher Beeinträchtigung der Festbetoneigenschaften gerechnet werden.

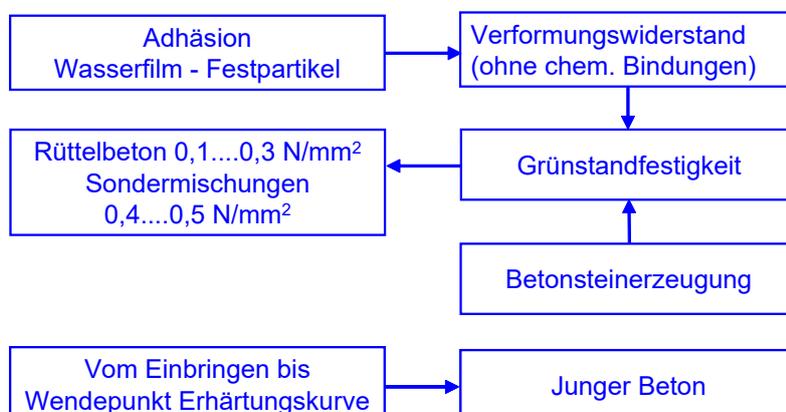


Bild 42: Grüner und junger Beton [32]

5 Literatur

- [1] Schießl, P., *Beton - Kapitel 4-7. Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde*, ed. Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung. 2006, München. 114 p.
- [2] DIN EN 206-1. *Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. 2001.
- [3] DIN 1045-3. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670*. 2012, p. 41.
- [4] DIN EN 1992-1-1. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2011.
- [5] DIN EN 1992-1-1/NA. *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2013, p. 97.
- [6] DIN 1045-2. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1)*. 2008, p. 62.
- [7] DIN EN 13670. *Ausführung von Tragwerken aus Beton (Execution of concrete structures)*. 2011, p. 74.
- [8] DIN EN 13369. *Allgemeine Regeln für Betonfertigteile (Common rules for precast concrete products)*. 2018, p. 78.
- [9] DIN 1045-4. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 4: Ergänzende Regeln für die Herstellung und die Konformität von Fertigteilen (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 4: Additional rules for the production and the conformity of prefabricated elements)*. 2012, p. 19.
- [10] DIN EN 206. *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (Concrete - Specification, performance, production and conformity)*. 2017, p. 98.
- [11] Pickhardt, R.; Bose, T. and Schäfer, W., *Beton – Herstellung nach Norm*. 19 ed, ed. InformationsZentrum Beton GmbH. 2012, Erkrath: Verlag Bau+Technik GmbH. 101 p.
- [12] DIN 4226-1. *Zuschlag für Beton - Zuschlag mit dichtem Gefüge ; Begriffe, Bezeichnungen und Anforderungen (Aggregates for concrete - aggregate of compact structure; Terms, Definitions and Requirements)*. 1983, p. 8.
- [13] Oesterheld, R., *Zement-Merkblatt Betontechnik - Expositionsclassen für Betonbauteile im Geltungsbereich des EC2*, InformationsZentrum Beton GmbH, Editor. 2020: Erkrath.
- [14] Grube, H.; Kerkhoff, B., *Die neuen deutschen Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 als Grundlage für die Planung dauerhafter Bauwerke*. Bbeton, 2001. 51(3): pp. 173-177.
- [15] Kampen, R.; Peck, M.; Pickhardt, R. and Richter, T., *Bauteilkatalog. Planungshilfe für dauerhafte Betonbauteile*. 8 ed. Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie; Edition Beton. 2014, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH p.
- [16] DIN EN 197-1. *Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement (Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements)*. 2011, p. 8.
- [17] Wolter, A., *Einfluss des Ofensystems auf die Klinkereigenschaften*. ZKG International, 1985. 38(10): pp. 612-614.
- [18] DIN EN 1008. *Zugabewasser für Beton - Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem Wasser, als Zugabewasser für Beton (Mixing water for concrete -*

- Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete*). 2002, p. 18.
- [19] Hummel, A., *Das Beton-ABC : ein Lehrbuch der Technologie des Schwerbetons und des Leichtbetons*. 12 ed. 1959, Berlin: Ernst und Sohn Verlag. 288 p.
- [20] DIN EN 934-2. *Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Betonzusatzmittel - Teil 2: Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung (Admixtures for concrete, mortar and grout – Part 2: Concrete admixtures – Definitions, requirements, conformity, marking and labelling)*. 2012, p. 23.
- [21] DIN EN 934-2/A1. *Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Betonzusatzmittel - Teil 2: Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung; Deutsche Fassung*. 2004.
- [22] Ising, B., *Zusatzmittel für Beton nach DIN EN 934 Teil 2 – Arten, Wirkungsweisen und Anwendungen*, in *Schulungsveranstaltung BÜV Ost*. 2010: Neugattersleben.
- [23] Meier, S. BASF: Wirkungsweise neuer Fließmittel. Receptent: Thienel, 2011.
- [24] Mc Millan, F.R.; Powers, T.C., *A Method of Evaluating Admixtures*. ACI Journal Proceedings, 1934. 30(3): pp. 325-344.
- [25] Mc Millan, F.R.; Powers, T.C., *Classification of Admixtures as to Pozzolanic Effect by Means of Compressive Strength of Concrete*. ACI Journal Proceedings, 1937. 34(11): pp. 129-144.
- [26] Wesche, K., *Baustoffe für tragende Bauteile - Band 2: Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit*. 3. ed. Vol. 2. 1993, Wiesbaden: Bauverlag. XXII, 502 p.
- [27] Manns, W., *Gemeinsame Anwendung von Silikastaub und Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff*. Beton, 1997. 47(12): pp. 716 - 720.
- [28] DIN EN 13262-1. *Silikastaub für Beton – Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien (Silica fume for concrete – Part 1: Definitions, requirements and conformity criteria)*. 2009, p. 22.
- [29] DIN EN 15167-1. *Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien*. 2006.
- [30] DIN EN 12350-9. *Prüfung von Frischbeton - Teil 9: Selbstverdichtender Beton – Auslauftrichterversuch (Testing fresh concrete □- Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test)*. 2010, p. 8.
- [31] DIN EN 12350-8. *Prüfung von Frischbeton - Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch (Testing fresh concrete □- Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test)*. 2019, p. 8.
- [32] DIN EN 12350-12. *Prüfung von Frischbeton - Teil 12: Selbstverdichtender Beton – Blockierring-Versuch (Testing fresh concrete □- Part 12: Self-compacting concrete – J-ring test)*. 2010, p. 11.
- [33] Meyer, A., *Betonwaren für den Strassenbau*. 2 ed. 1963, Wiesbaden, Germany: Bauverlag. 159 p.
- [34] Czernin, W., *Zementchemie für Bauingenieure*. 3 ed. 1977, Wiesbaden – Berlin: Bauverlag GmbH. 194 p.
- [35] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. *Merkblatt „Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton“ (Leaflet - Special methods for testing fresh concrete)*. 2007, p. 24.
- [36] ASTM C173M - 16. *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Volumetric Method*. 2016.