

Betontechnologie für Betonpumpen

Putzmeister



Betontechnologie für Betonpumpen

Impressum

Herausgeber

Putzmeister Concrete Pumps GmbH
Max-Eyth-Straße 10, 72631 Aichtal, Deutschland

Überarbeitung aktuelle Ausgabe

Dr.-Ing. Knut Kasten, Putzmeister Engineering GmbH

Fachliche Unterstützung

Dr.-Ing. Dieter Bergemann

Dipl.-Ing. H.-Jürgen Wirsching,
Betontechnologe, V+O Valet u. Ott Transportbeton GmbH & Co. KG, Albstadt

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Klafszky,
Geschäftsführer, Betonpumpenunion GmbH & Co. KG, Ulm

Satz und Druck

Offizin Scheufele GmbH & Co. KG
70597 Stuttgart, Deutschland

© 2011 by Putzmeister Concrete Pumps GmbH
Alle Rechte vorbehalten
6. Auflage 12/2011
BP 2158-6

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| | Vorbemerkungen | 5 |
| 1 | Betonbestandteile – Ausgangsstoffe und ihre Einflüsse | 9 |
| 1.1 | Zement | 9 |
| 1.2 | Zugabewasser | 12 |
| 1.3 | Gesteinskörnungen | 12 |
| 1.4 | Zusatzstoffe | 16 |
| 1.5 | Zusatzmittel | 17 |
| 1.6 | Betonzusammensetzung – Rezepturberechnung | 20 |
| 2 | Frischbetoneigenschaften (allgemein) | 24 |
| 2.1 | Rohdichte | 24 |
| 2.2 | Verarbeitbarkeit | 25 |
| 3 | Festbetoneigenschaften | 32 |
| 3.1 | Expositionsklassen | 32 |
| 3.2 | Druckfestigkeit | 35 |
| 3.3 | Korrosionsschutz | 36 |
| 3.4 | Sonstige Festbetoneigenschaften | 37 |
| 4 | Frischbetoneigenschaften und -zustände beim Pumpen | 38 |
| 4.1 | Pumpbarkeit und Pumpwilligkeit | 38 |
| 4.2 | Entstehung und Eigenschaften der Randzonen-Gleitschicht | 40 |
| 4.3 | Frischbetonverhalten in der Betonpumpe | 45 |
| 4.4 | Frischbetonverhalten in der Förderleitung | 52 |
| 4.5 | Ermittlung des Konsistenzbeiwertes von Beton | 56 |

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Kurze Hilfestellung zur Fehlervermeidung und -beseitigung | 59 |
| 5.1 | Bei der Betonanlieferung und Beschickung der Betonpumpe..... | 59 |
| 5.2 | Beim Pumpen | 60 |
| 6 | Vorschriften und Empfehlungen des Technischen Regelwerks | 61 |
| 7 | Weiterführende Literatur | 63 |

Vorbemerkungen

„Beton ist ein künstlicher Stein, der aus einem Gemisch aus Zement, Gesteinskörnung und Wasser – gegebenenfalls auch mit Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen (Betonzusätze) – durch Erhärten des Zementleims (Zement-Wasser-Gemisch) entsteht.“ Durch die Wahl seiner Zusammensetzung können sehr verschiedene Betoneigenschaften erreicht werden. Vor dem Erhärten ist der Frischbeton mehr oder weniger „flüssig“ und kann in nahezu beliebige Form gebracht werden, die er im erhärteten Zustand als künstlicher Stein beibehält.

Aus den vielen Möglichkeiten der Zusammensetzung und Anwendung des Baustoffes Beton ergeben sich verschiedene Unterscheidungen und Kategorien:

■ Nach der Bewehrung unterteilt man

- Stahlbeton
 - schlaff bewehrter Beton
 - Spannbeton
- unbewehrter Beton
- faserbewehrter Beton

■ Nach der Trockenrohddichte unterteilt man

- Leichtbeton leichter als $2,0 \text{ t/m}^3$, jedoch nicht leichter als $0,8 \text{ t/m}^3$
- Normalbeton schwerer als $2,0 \text{ t/m}^3$, jedoch nicht schwerer als $2,6 \text{ t/m}^3$
- Schwerbeton schwerer als $2,6 \text{ t/m}^3$

■ Nach dem Erhärtungszustand unterscheidet man

- Frischbeton, solange er noch verarbeitet werden kann
 - Nach seiner Konsistenz unterscheidet man den Frischbeton in
 - steif (F1), plastisch (F2), weich (F3), sehr weich (F4), fließfähig (F5) und sehr fließfähig (F6)

- Nach der Art des Förderns und Einbringens kennt man
 - Schütt-, Pump-, Unterwasser- und Spritzbeton
- Nach der Art der Verdichtung kennt man
 - Stampf-, Stocher-, Rüttel-, Schock- und Schleuderbeton, leicht verarbeitbarer Beton, selbstverdichtender Beton

- Junger Beton Beton nach Erstarrungsbeginn und während des Erhärtens, ist nicht mehr verarbeitbar (Beginn der Festigkeitsentwicklung)
- Festbeton nach dem Erhärten
 - Nach der Art der Oberflächenbeschaffenheit unterteilt man den Festbeton in
 - Sichtbeton, Waschbeton, Glättbeton usw.

■ Nach dem Ort der Aufbereitung unterscheidet man

- Baustellenbeton die mobile Mischanlage befindet sich auf der Baustelle
- Transportbeton ein stationäres Betonwerk stellt den Beton her, mit Fahrmischern wird der Frischbeton einbaufertig auf die Baustelle geliefert

■ Nach dem Ort des Einbringens unterscheidet man

- Ortbeton Frischbetoneinbau und Erhärten am Ort seiner endgültigen Lage
- Betonzeugnisse in einem Fertigteilwerk oder auf der Baustelle hergestellte Bauteile (Deckenelemente, Stützen etc.), die erst im erhärteten Zustand eingebaut werden

■ **Nach den Anforderungen an Herstellung und Überwachung unterscheidet man**

| Gegenstand | Überwachungs- klasse 1 | Überwachungs- klasse 2 | Überwachungs- klasse 3 |
|--|------------------------------|---|---------------------------|
| Festigkeitsklasse für Normal- und Schwerbeton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 | ≤ C25/30 | ≥ C30/37 und ≤ C50/60 | ≥ C55/67 |
| Festigkeitsklasse für Leichtbeton nach DIN 1045-2 und EN 206-1 der Rohdichteklassen D1,0 bis D1,4 D1,6 bis D2,0 | nicht anwendbar ≤ LC25/28 | ≤ LC25/28 LC30/33 und LC35/38 | ≥ LC30/33 ≥ LC40/44 |
| Expositionsklasse nach DIN 1045-2 | X0, XC, CF1 | XS, XD, XA, XM, XF2, XF3, XF4 | – |
| Besondere Betoneigenschaften | | Beton für wasserundurchlässige Baukörper (z.B. Weiße Wannen) Unterwasserbeton Beton für hohe Gebrauchstemperaturen $T \leq 250 \text{ }^\circ\text{C}$ Strahlenschutzbeton (außerhalb des Kernkraftwerkbaus) Für besondere Anwendungsfälle (z.B. Verzögerter Beton, Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen) sind die jeweiligen DAfStb-Richtlinien anzuwenden. | |

Die Betontechnologie umfasst alle Aufgaben, die vor allem dazu dienen, mit den verfügbaren Ausgangsstoffen die angestrebten baustofflichen Eigenschaften von Beton zu gewährleisten. Vornehmlich betrifft dies nach der Festlegung der erforderlichen Mischungsanteile alle Frischbetonprozesse beginnend beim Mischen über den Transport, den Einbau und die Verdichtung bis zur erforderlichen Nachbehandlung des jungen Betons. Dabei obliegt es der Betontechnologie, auch die Frischbetoneigenschaften gezielt für die vorgesehenen Verarbeitungsstufen in zweckdienlicher Weise zu beeinflussen, allerdings möglichst ohne negative Auswirkungen auf die späteren Festbetoneigenschaften.

Das Pumpen von Frischbeton ist heute ein kaum noch wegzudenkendes Glied dieser Prozesskette. Beim heutigen Stand der Betonpumpentechnik ist pumpbarer Beton kein Spezialbeton mehr, sondern ein in der Betonnorm DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 geregelter Baustoff mit vorgegebener Zusammensetzung, wie er beim Stahlbeton für bewehrte Bauteile (ab C16/20, Konsistenz F3) gefordert wird.

Dennoch sollte jeder Pumpenfahrer auch über ein Grundwissen in der Betontechnologie verfügen. Einerseits sollte er wissen, welche pumptechnischen Konsequenzen aus den verschiedenen stofflichen Eigenschaften resultieren. Andererseits muss er erkennen, welche baustofflichen Konsequenzen eine falsche Behandlung des Frischbetons beim Pumpen zur Folge hätte. Diesem Zweck dient die vorliegende Schrift „Betontechnologie für Betonpumpen“. Weiterführende Informationen findet man im Technischen Regelwerk (siehe Abschnitt 6) sowie in einer Vielzahl weiterführender Fachliteratur (siehe Abschnitt 7).



Abb. 1: Putzmeister Autobetonpumpe M 42-5 in Bonn

1. Betonbestandteile – Ausgangsstoffe und ihre Einflüsse

1.1 Zement

Zement ist meistens ein graues Pulver, das durch Brennen und Mahlen bestimmter kalk- und tonhaltiger Gesteine erzeugt wird. Ein Gemisch aus Zement und Wasser, der Zementleim, bindet (verkitet) während der Erhärtung die einzelnen Gesteinskörner starr aneinander zu künstlichem Stein.

Allgemein gebräuchliche Zemente werden in 5 Hauptarten unterteilt:

- CEM I Portlandzement
- CEM II Portlandkompositzement (Hauptbestandteile neben PZ-Klinker: Hüttensand, Kalksteinmehl, gebrannter Schiefer, Flugasche, u.a.)
- CEM III Hochofenzement
- CEM IV Puzzolanzement
- CEM V Kompositzement

Die verschiedenen Zemente gibt es in unterschiedlichen Qualitätsstufen, eingeteilt nach Festigkeitsklassen. Zum Beispiel:

- CEM I 32,5 R (Portlandzement mit der Festigkeitsklasse 32,5 N/mm² und schneller – rapid Festigkeitsentwicklung)
- CEM II/B-T 42,5 N (Portlandschieferzement der Festigkeitsklasse 42,5 N/mm² und normaler Festigkeitsentwicklung)

Je nach chemischer Zusammensetzung und Mahlfeinheit entwickeln die Zemente ihre Festigkeit unterschiedlich schnell. Portlandzemente gehören in der Regel zu den Zementen mit höherer Frühfestigkeit. Hochofenzemente können die chemische Widerstandsfähigkeit deutlich verbessern. Die maßgebenden Normen für Zement sind:

- in Deutschland die DIN EN 197-1
- diverse weitere länderspezifische Normen

Die Zahlenangaben der Festigkeitsklassen beziehen sich in der Regel auf die zu erreichende Mindestfestigkeit von Probekörpern nach 28 Tagen bei einem bestimmten W/Z-Wert, gemessen in der jeweils landesüblichen Einheit (z. B. in Deutschland: N/mm², in Österreich: kp/cm²). Die Festigkeitsentwicklung ist nach 28 Tagen längst nicht abgeschlossen, jedoch bildet dieser Wert meist die Basis für die Festigkeitsberechnung und die Freigabe des Bauwerkes für die Nutzung.

Das Abbinden des Zementes (Hydratation) ist ein recht komplizierter Vorgang, bei dem Wasser chemisch und physikalisch gebunden wird: Beim Mischen von Zement und Wasser entsteht Zementleim, wobei der Zement sofort beginnt, mit dem Wasser neue, mikroskopisch kleine Kristallverbindungen zu bilden. Diese feinen Kristalle verfilzen immer dichter, es kommt zunächst zum Erstarren und schließlich zum Erhärten des Zementleimes zu Zementstein. Dieser hat folgende besondere Eigenschaften:

- Er bleibt an der Luft wie unter Wasser fest und raumbeständig
- Im Beton liegende Stahlteile (z.B. Bewehrung) werden vor Korrosion geschützt
- Bei Temperaturerhöhungen dehnt er sich im gleichen Maß aus wie Stahl

Hierdurch sind grundlegende Voraussetzungen für die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton gegeben.

Das Erstarren des Zementes darf frühestens 90 Minuten nach Herstellung der Mischung beginnen. Deshalb ist der Beton innerhalb dieser Zeitvorgabe zu verarbeiten.

Zur vollständigen Hydratation benötigt man ca. 40 % der Zementmasse an Wasser. Etwa 25 % werden chemisch gebunden, während der Rest als verdampfbare Wasser in den Gelporen, d. h. physikalisch gebunden, verbleibt. Bei einem Wasserzementwert unter 0,40 können die Zementkörner auch bei ständiger Wasserlagerung nicht vollständig hydratisieren, während bei einem W/Z über 0,40 auch nach vollständiger Hydratation feinste Kapillarporen entstehen, die zunächst noch mit Wasser gefüllt sind, das später verdunstet. Abbildung 2 veranschaulicht diese Verhältnisse. Der Durchmesser dieser Kapillarporen ist etwa 1000 mal so groß wie der der Gelporen.

Zur Herstellung eines verarbeitbaren Betons wird meist mehr als nur 40 % der Zementmasse an Wasser benötigt. Die erforderliche Wassermenge wird mit der Rezeptur festgelegt.

Achtung!

Jede unerlaubte Wasserzugabe auf der Baustelle hat drastische Einbußen der Qualität zur Folge!

Dadurch werden bei Pumpbeton die Festigkeit (bis zu 30 %) und entsprechend auch die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigt.*

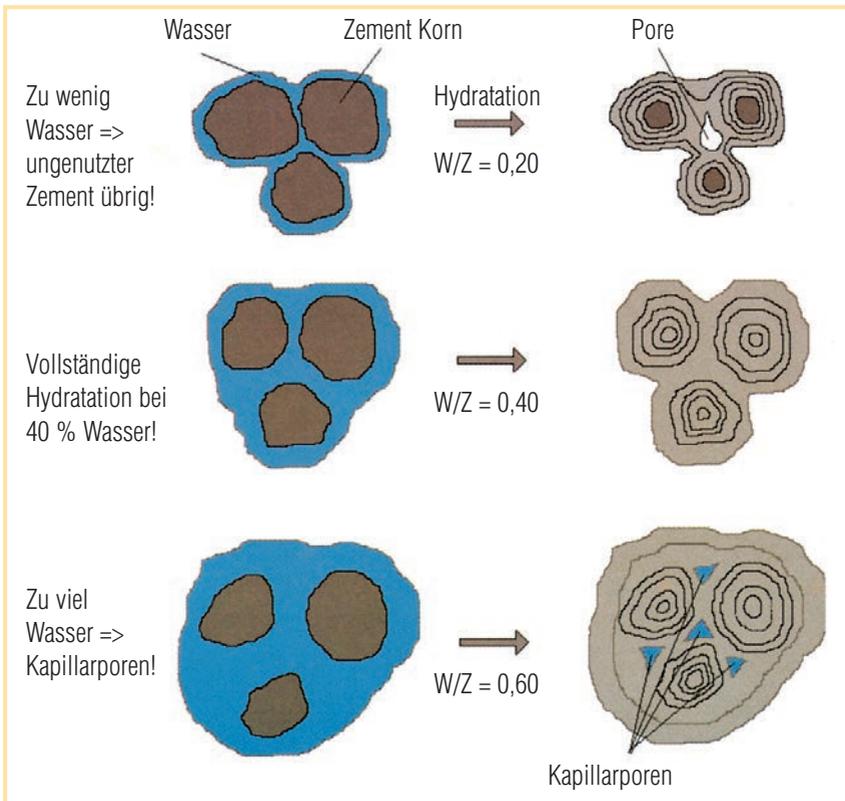


Abb. 2: Schema der Reaktion von Zement und Wasser (Hydratation)

*siehe Kapitel 1.5 und 3

1.2 Zugabewasser

Als geeignet gilt Zugabewasser nach DIN EN 1008. Hierin sind Richtlinien zur Begrenzung des Gehalts schädlicher Stoffe, die korrosionsfördernd oder erhärtungsstörend wirken, geregelt. Prinzipiell gilt: Trinkwasser ist als Zugabewasser immer geeignet.

Achtung!

Die Mischung von Wasser und Zement ist stark alkalisch und wirkt ätzend auf Haut und Schleimhäute. Entsprechende Handschuhe, Schutzbrille und festes Schuhwerk tragen. Bei versehentlichem direkten Kontakt sofort mit reichlich sauberem Wasser spülen.

1.3 Gesteinskörnungen

Gesteinskörnungen sind im Normalfall natürliches Gestein aus Kiesgruben, Flüssen (Kies und Sand) oder Steinbrüchen (Splitt) und verleihen dem Beton bestimmte Eigenschaften. Die zu überwachenden Qualitätsanforderungen sind in entsprechenden Normen festgelegt:

- in Deutschland die DIN EN 12620
- diverse länderspezifische Normen

Diese Normen enthalten neben den Bezeichnungen der Gesteinskörnung und der gebräuchlichen Korngruppen die Anforderungen bezüglich

- | | |
|--|---|
| ■ Kornzusammensetzung | ■ Gehalt an Stoffen organischen Ursprungs |
| ■ Kornform | ■ Gehalt an Sulfaten |
| ■ Widerstand gegen Zertrümmerung | ■ Druckfestigkeit |
| ■ Widerstand gegen Polieren und Abrieb | ■ Gehalt an quellfähigen Bestandteilen |
| ■ Alkali-Kieselsäure-Reaktivität | ■ Gehalt an wasserlöslichem Chlorid |
| ■ Widerstand gegen Verschleiß | |
| ■ Widerstand gegen Frost und Taumittel | |

Man unterteilt Gesteinskörnungen nach Korngrößen in Korngruppen. Dabei werden jeweils

das Kleinst- und Größtkorn angegeben, z.B. 0/2; 0/4; 2/8; 8/16; 16/32. Normalerweise besteht die Gesteinskörnung eines Betons aus einem Gemisch feiner, mittlerer und grober Körnungen. Diese Zusammensetzung kann von Natur aus in einer Gewinnungsstätte vorhanden sein. Meist werden jedoch die natürlich anstehenden oder beim Brechen von Felsgestein entstehenden Korngemische gleich vor Ort klassiert, d.h. durch große Siebanlagen nach Korngruppen getrennt, im Betonmischwerk angeliefert und in getrennten Boxen gelagert.

Bei der Betonaufbereitung im Mischer werden dann die Mengenanteile der verschiedenen Korngruppen in der geforderten Zusammensetzung gemischt. Gemessen wird die Zusammensetzung eines Korngemisches mittels Siebanalyse und als Sieblinie grafisch dargestellt. Hierzu wird im Labor eine zuvor gewogene Probemenge mit einem übereinander gestapelten, vibrierenden Siebsatz aus vorgeschriebenen Maschen oder Quadratlochsieben in einzelne Korngruppen getrennt. Abbildung 3 veranschaulicht diesen Vorgang. Das oberste Sieb hat die größte Maschenweite, das unterste die kleinste. Ganz unten ist der Boden geschlossen zur Aufnahme der feinsten Bestandteile. Auf diesen miteinander schwingenden Siebsatz wird

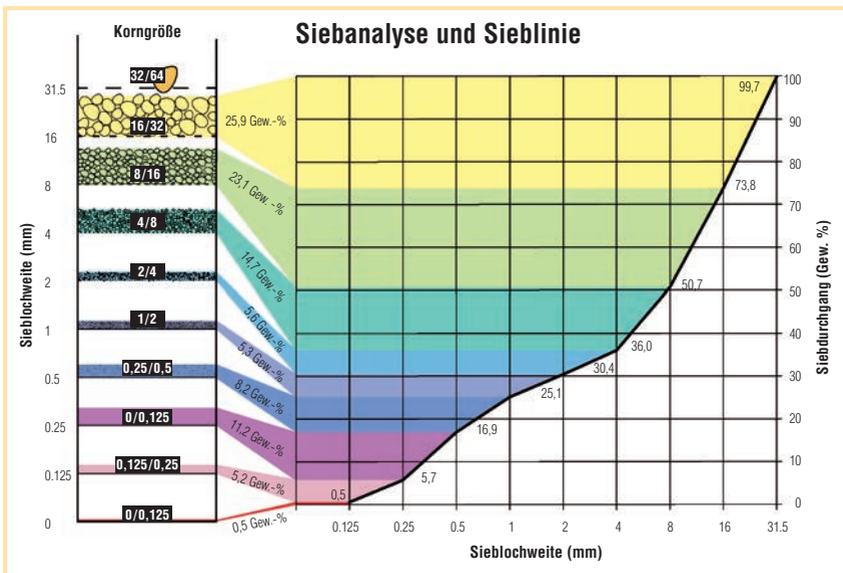


Abb. 3: Siebanalyse und Sieblinie

die zu untersuchende Probe gleichmäßig aufgegeben. Dabei fallen die einzelnen Körnungen von Siebboden zu Siebboden nach unten, bis die Maschen- oder Lochweite für die jeweilige Korngröße zu klein ist.

Die Verteilung von groben und feinen Gesteinskörnern im Korngemisch beeinflusst die zu benetzende spezifische Oberfläche und damit direkt den Zementleimbedarf. Der Wasseranspruch sowie der Zementleimbedarf eines Zuschlaggemisches sind auch von der Kornform abhängig. Abbildung 4 veranschaulicht diesen Umstand am Beispiel eines Würfels, stellvertretend für ein „gedrungenes“ Korn, und einer volumengleichen Platte, stellvertretend für ein „plattiges“ Korn, dessen Oberfläche um 2/3 größer als die des „gedrungenen“ ist. Bei „gebrochenem“ Korn ist dieser Unterschied noch größer, wogegen die Oberfläche eines „Rundkorns“ (Kugel) bei gleichem Volumen um 1/5 kleiner als beim Würfel ist. Darüber hinaus beeinflusst die Kornform (siehe Abbildung 5) auch unmittelbar die Verarbeitbarkeit des Betons. Ein Beton aus runden, gedrunenen und glatten Körnern „fließt“ besser und lässt sich leichter verdichten als ein solcher aus länglicher, plattiger oder einfach gebrochener Gesteinskörnung mit rauer Oberfläche.

Normalerweise ist das Größtkorn der Gesteinskörnung für Beton auf 32 mm Durchmesser begrenzt. Bei besonders massigen Bauteilen kann dieser Wert auf 63 mm heraufgesetzt werden (lässt sich dann aber nur noch mit speziellen Pumpen fördern). Für feingliedrige und dicht bewehrte Bauteile begrenzt man das Größtkorn auf 16 mm oder gar 8 mm Durchmesser.

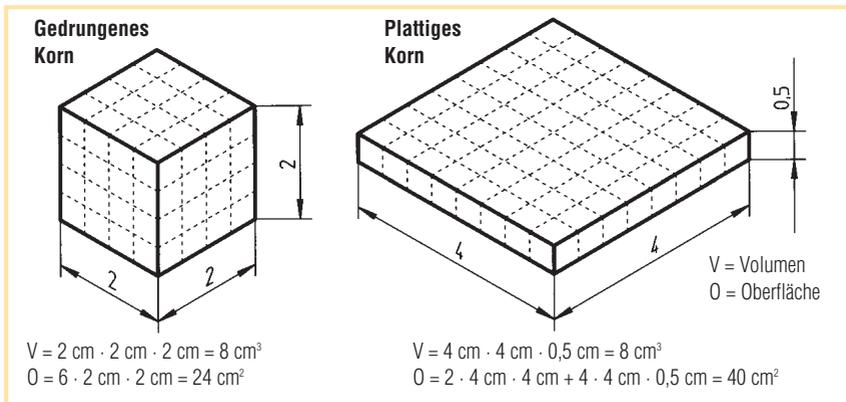


Abb. 4: Unterschiedliche Geometrien ergeben unterschiedliche Oberflächen bei gleichem Rauminhalt



Gedrungenes Korn



Mehrfach gebrochenes Korn



Plattiges Korn



Abb. 5: Einfluss der Kornform auf die Oberfläche

1.4 Zusatzstoffe

Zusatzstoffe beeinflussen die Eigenschaften des frischen oder des festen Betons. Betonzusatzstoffe müssen in Deutschland entweder einer Norm entsprechen, ein Prüfzeichen des Deutschen Instituts für Bautechnik besitzen oder eine CE Konformitätserklärung nachweisen. Es sind meist pulverförmige Zusätze, die dem Beton zugegeben werden. Sie wirken hauptsächlich physikalisch und dienen meist als Hilfsmittel für bessere Verarbeitbarkeit, geringeres Wasserabstoßen (Bluten), höhere Gefügedichtheit oder der Farbgebung.

Zusatzstoffe werden in Typ I und Typ II unterschieden.

- Bei Zusatzstoffen des Typs I handelt es sich um inerte, nicht reaktionsfähige Stoffe, die hauptsächlich durch den Füllereffekt eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit erzielen. Bsp.: Gesteinsmehle, Farbpigmente.
- Zusatzstoffe des Typs II sind reaktionsfähige, festigkeitsbildende Stoffe, die neben einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit auch die Veränderung physikalischer Eigenschaften hervorrufen. Bsp.: Steinkohlenflugasche, Mikrosilica.

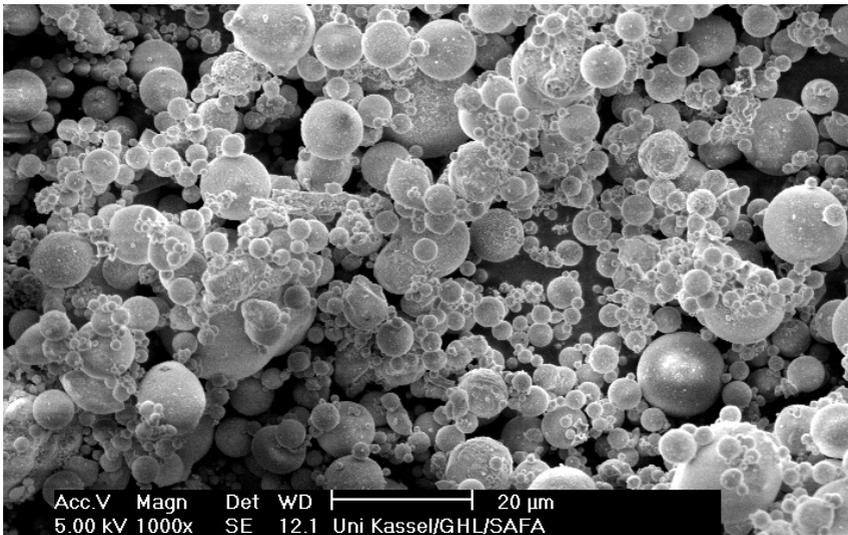


Abb. 6: Flugasche im Rasterelektronenmikroskop von SAFAMENT*

1.5 Zusatzmittel

Betonzusatzmittel sind meist flüssig und werden nur in sehr kleinen Mengen beim Mischen des Betons zugegeben. Sie wirken chemisch-physikalisch und werden nach ihrer Wirkung im Frisch- oder Festbeton in sogenannte Wirkungsgruppen eingeteilt:

- **Betonverflüssiger (BV)**
Diese Zusatzmittel entspannen das Wasser und man verbessert die Verarbeitbarkeit bei gleichzeitiger Verminderung oder Einhaltung des vorgeschriebenen Wasserzementwertes.
- **Fließmittel (FM)**
Diese Zusatzmittel sind weiterentwickelte Betonverflüssiger. Sie wirken besonders stark verflüssigend und erlauben den effizienten Betoneinbau mit sehr weichen bis fließfähigen Konsistenzen. Üblicherweise werden Fließmittel als Betonverflüssiger behandelt und im Transportbetonwerk zugemischt. Fließmittel auf der Basis von Polycarboxylat-ether weisen ein hohes Konsistenzverhalten nach und brauchen nicht mehr auf der Baustelle zugegeben werden.



Abb. 7: Beton vor und nach der Zumischung von Fließmittel

- **Luftporenbildner (LP)**
Beton mit hohem Frost- und Tausalzwidehrstand muss einen Mindestgehalt an Mikro-luftporen (kleiner 0,3 mm) aufweisen, der nur durch die Zugabe von Luftporenbildner erreicht werden kann. Eis hat ein größeres Volumen als Wasser. Wird die Ausdehnung des gefrierenden Wassers im Beton behindert, kann es den Beton sprengen. Die zusätzlichen Luftporen bieten den nötigen Raum für diese Ausdehnung.
- **Dichtungsmittel (DM)**
Sie sollen die Wasserundurchlässigkeit des Betons verbessern. Dichtungsmittel sollen vor allem das Bauwerk vor eindringenden wassergefährdenden Stoffen schützen.
- **Erstarrungsverzögerer (VZ)**
Sie schieben den Erstarrungszeitpunkt des Betons hinaus, was aus verschiedenen Gründen erforderlich sein kann, z. B.: heißes Wetter oder große fugenlose, massige Bauteile (Brückenüberbauten, starke Bodenplatten, Randsteinbeton). Eine Überdosierung kann zum „Umschlagen“ des VZ, d. h. zur Erstarrungsbeschleunigung führen!
- **Erstarrungsbeschleuniger (BE)**
Sie beschleunigen durch chemische Wirkung das Erstarren z. B. von Spritzbeton oder Dichtungsmörtel bis auf wenige Sekunden nach dem Aufspritzen oder Einbringen. Als Alternative ohne den Nachteil der erheblichen Verminderung der 28-Tage- und der Endfestigkeit gilt physikalisch wirkender Microsilicastaub.

Achtung!

Eine Zugabe von bauseits gestellten Betonzusätzen auf der Baustelle ist nicht ratsam, da der Betonabnehmer jeglichen Anspruch auf Gewährleistung verliert.



Abb.8: Erforschung von Zusatzmitteln im Labor und vorschriftsmäßige Lagerung im Transportbetonwerk*

1.6 Betonzusammensetzung – Rezepturberechnung

Die Zusammensetzung des Frischbetons wird durch festgelegte Grenzwerte aus DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 vorgegeben. Entsprechend der angreifenden Umgebung werden Expositionsklassen* unterschieden, die sich auf Beton- und Bewehrungskorrosion beziehen.

| Nr. | Expositionsklassen | Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko XO ^a | Bewehrungskorrosion | | | | | | | | | |
|-----|--|---|--|-----|--------|--------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-----------|-----------|
| | | | durch Karbonatisierung verursachte Korrosion | | | | durch Chloride verursachte Korrosion | | | | | |
| | | | durch Karbonatisierung verursachte Korrosion | | | | Chloride außer aus Meerwasser | | | Chloride aus Meerwasser | | |
| | | | XC1 | XC2 | XC3 | XC4 | XD1 | XD2 | XD3 | XS1 | XS2 | XS3 |
| 1 | Höchstzulässiger W/Z | – | 0.75 | | 0.65 | 0.60 | 0.55 | 0.50 | 0.45 | | | |
| 2 | Mindestdruckfestigkeitsklasse ^b | C8/10 | C16/20 | | C20/25 | C25/30 | C30/37 ^c | C35/45 ^d | C35/45 ^e | | | |
| 3 | Mindestzementgehalt ^e in kg/m ³ | – | 240 | | 260 | 280 | 300 | 320 | 320 | Siehe XD1 | Siehe XD2 | Siehe XD3 |
| 4 | Mindestzementgehalt ^e bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m ³ | – | 240 | | 240 | 270 | 270 | 270 | 270 | | | |
| 5 | Mindestluftgehalt in % | – | – | | – | – | – | – | – | | | |
| 6 | Andere Anforderungen | – | – | | – | – | – | – | – | | | |

^a Nur für Beton ohne Bewehrung oder eingebettetes Metall.

^b Gilt nicht für Leichtbeton.

^c Bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 63 mm darf der Zementgehalt um 30 kg/m³ reduziert werden.

^d Bei Verwendung von Luftporenbeton, z.B. aufgrund gleichzeitiger Anforderungen aus der Expositionsklasse XF, eine Festigkeitsklasse niedriger.

^e Bei langsam und sehr langsam erhärtenden Betonen ($r < 0,30$) eine Festigkeitsklasse niedriger. Die Druckfestigkeit zur Einteilung in die geforderte Druckfestigkeitsklasse ist auch in diesem Fall an Probekörpern im Alter von 28 Tagen zu bestimmen.

Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton – Bewehrungskorrosion

| | | Betonkorrosion | | | | | | | | | | | | |
|-----|--|---|-------------------|---------------------|----------------|---------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------------|---|---------------------|--------------------------|
| | | Frostangriff | | | | | | Aggressive chemische Umgebung | | | Verschleißbeanspruchung ^h | | | |
| Nr. | Expositions-klassen | XF1 | XF2 | | XF3 | | XF4 | XA1 | XA2 | XA3 | XM1 | XM2 | | XM3 |
| 1 | Höchst-zulässiger W/Z | 0,60 | 0,55 ^a | 0,50 ^a | 0,55 | 0,50 | 0,50 ^a | 0,60 | 0,50 | 0,45 | 0,55 | 0,55 | 0,45 | 0,45 |
| 2 | Mindest-druck-festigkeits-klasse ^b | C25/30 | C25/30 | C35/45 ^c | C25/30 | C35/45 ^c | C30/37 | C25/30 | C35/45 ^c | C35/45 ^c | C30/37 ^e | C30/37 ^e | C35/45 ^c | C35/45 ^c |
| 3 | Mindest-zement-gehalt ^e in kg/m ³ | 280 | 300 | 320 | 300 | 320 | 320 | 280 | 320 | 320 | 300 ⁱ | 300 ⁱ | 320 ⁱ | 320 ⁱ |
| 4 | Mindest-zement-gehalt ^e bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m ³ | 270 | ^a | ^a | 270 | 270 | ^a | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 | 270 |
| 5 | Mindest-luftgehalt in % | – | ^f | – | ^f | – | ^g | – | – | – | – | – | – | – |
| 6 | Andere Anforderungen | F ₄ | MS ₂₅ | | F ₂ | | MS ₁₈ | – | – | ⁱ | – | Oberflächenbehandlung des Betons ^k | – | Hartstoffe-nach DIN 1100 |
| | | Gesteinskörnungen für die Expositions-klassen XF1 bis XF4 (siehe DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104) | | | | | | | | | | | | |

^h siehe Fußnoten Tabelle Seite 20.

^f Der mittlere Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau muss bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm ≥ 5,5 % (Volumenanteil), 16 mm ≥ 4,5 % (Volumenanteil), 32 mm ≥ 4,0 % (Volumenanteil) und 63 mm ≥ 3,5 % (Volumenanteil) betragen. Einzelwerte dürfen diese Anforderungen um höchstens 0,5 % (Volumenanteil) unterschreiten.

^a Zusatzstoffe des Typs II dürfen zugesetzt, aber nicht auf den Zementgehalt oder den W/Z angerechnet werden.

^b Es dürfen nur Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 unter Beachtung der Festlegungen von DIN V 20000-103 verwendet werden.

^c Höchstzementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfesten Betonen.

^d Erdfeuchter Beton mit W/Z ≤ 0,40 darf ohne Luftporen hergestellt werden.

^e Z.B. Vakuumieren und Flügelglätten des Betons.

^f Schutzmaßnahmen

Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton – Betonkorrosion

Bei der Mischungsberechnung lautet die Aufgabe, entsprechend den vorliegenden Expositionsclassen, der erforderlichen Konsistenz und des geforderten Größtkorns eine Zusammensetzung festzulegen. Hierfür verwendet man zweckmäßigerweise die Stoffraumrechnung eines baustofftechnischen Berechnungsprogrammes mit entsprechender Ergebnisausgabe.

Der Wasserzementwert als wichtigste Kenngröße für die Qualität

Der Wasser/Zement-Wert wird durch das Mengenverhältnis von Gesamtzugabewasser zu Zementgehalt bestimmt.

Mit zunehmendem Wasserzementwert

- nimmt die Festigkeit des Betons ab
- steigt die Wasserdurchlässigkeit
- trocknet der Beton schneller aus und schwindet mehr, infolgedessen entstehen hohe Schwindspannungen und die Gefahr der Rissbildung
- kann der Beton stärker zum „Bluten“ und Entmischen neigen
- sinkt die Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit und Langlebigkeit

Mehlkorngehalt

Als Mehlkorn bezeichnet man den Feststoffanteil, dessen Korngröße kleiner als 0,125 mm ist, d. h. der Mehlkorngehalt setzt sich zusammen aus Zement, dem im Betonzuschlag enthaltenen Kornanteil 0/0,125 mm und den möglicherweise zugegebenen Betonzusatzstoffen.

Mehlkorn verbessert die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und bewirkt ein dichtes Gefüge des Festbetons. Deshalb ist ein ausreichender Mehlkorngehalt wichtig für pumpbaren Beton, Sichtbeton, bei Beton für dünnwandige, eng bewehrte Bauteile und für wasserundurchlässigen Beton.

Ein zu hoher Mehlkornanteil erhöht jedoch auch den Wasseranspruch und damit den Wasser/Zement-Wert. Der Widerstand gegenüber Frost und Verschleiß sinkt. Deshalb wird in DIN EN 206-1/DIN 1045-2 der Gehalt an Mehlkorn für Beton begrenzt:

| Zementgehalt (kg/m ³) | Höchstzulässiger Mehlkorngesamtgehalt (kg/m ³) |
|-----------------------------------|--|
| ≤ 300 | 400 |
| ≥ 350 | 450 |

Höchstzulässiger Mehlkorngesamtgehalt für Beton mit einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 16 mm bis 63 mm bis einschließlich der Betonfestigkeitsklasse C50/60 und LC50/55 bei den Expositionsklassen XF und XM.

Mörtelgehalt

Als Mörtel werden die Anteile von Zement, Wasser, Luftporen und Zuschlag 0/2 mm bezeichnet. Sein Gehalt wird in dm³ pro 1 m³ verdichteten Frischbeton angegeben.

Der Mörtelgehalt beeinflusst die Pumpbarkeit und die Verarbeitbarkeit des Betons. Als Richtwerte für einen pumpbaren Beton gelten:

| Größtkorn (mm) | Mörtelgehalt (dm ³ /m ³) |
|----------------|---|
| 32 | ≥ 450 |
| 16 | ≥ 500 |

Rezepturberechnung

Für die abschließende Berechnung der Rezeptur für 1 m³ verdichteten Frischbeton ist für die aus der Sieblinie entnommenen %-Anteile der einzelnen Korngruppen zu berücksichtigen, dass diese sowohl untereinander verschiedene Rohdichten als auch eine gewisse, meist voneinander verschiedene Eigenfeuchte aufweisen. Aus diesem Grund ist für jede Korngruppe ihre Trockenmasse, ihre Eigenfeuchte sowie ihre beim Mischen abzuwiegende Gesamtmasse zu berechnen. Die beim Mischen tatsächlich zuzugebende Wassermenge ergibt sich aus dem um die Eigenfeuchte aller Korngruppen reduzierten Wassergehalt.

2. Frischbetoneigenschaften

Die wichtigsten Frischbetoneigenschaften sind:

- Rohdichte (einschl. Verdichtungsgrad und Porengehalt) und
- Verarbeitbarkeit (einschl. Konsistenz, Verformungsverhalten, Homogenität usw.)

2.1 Rohdichte

Unter der Frischbetonrohichte versteht man die Masse in kg pro m³ frischem, vorschrittsmäßig verdichtetem Beton, einschließlich der verbleibenden Luftporen.

Nach sorgfältiger Verdichtung beträgt der im Beton verbleibende Luftgehalt bei einem normalen Beton mit 32 mm Größtkorn noch 1 ... 2 Vol.-%, d. h. 10 ... 20 Liter je m³. Bei feinkörnigem Beton kann dieser Wert bis zu 60 Liter je m³ betragen. Ein zu hoher Luftgehalt, gleich welcher Art, beeinträchtigt allerdings die Festigkeit des Betons.

Der in das Bauteil eingebrachte Frischbeton enthält je nach Konsistenz und Zuschlagemisch mehr oder weniger viele Hohlräume. Diese zunächst mit Luft gefüllten Hohlräume müssen durch die Verdichtung so weit wie möglich entfernt werden. Mittels Außenrüttler an der Schalung oder Rüttelflasche, die in den Frischbeton eingetaucht wird, wird der Frischbeton so in Schwingungen versetzt, dass er innerhalb der Wirkungszone des Rüttlers scheinbar flüssig wird und die Luft aus den Hohlräumen infolge natürlichen Auftriebs an die Oberfläche steigt. Um diesen Weg an die Oberfläche nicht unüberwindbar weit werden zu lassen, bzw. die Verdichtungsdauer und die damit verbundene Entmischungsfahr nicht unnötig zu vergrößern, sollte eine durch Rütteln zu verdichtende Betonierlage nicht höher als ca. 0,5 m sein.

Die Frischbetonverdichtung beinhaltet aber noch mehr: An der durch eine Schalung gebildeten Bauteiloberfläche sowie an der Oberfläche der im Bauteil befindlichen Bewehrungsstäbe oder -matten müssen die Betonbestandteile so umsortiert werden, dass auch diese

Flächen vollständig mit Zementleim benetzt sind. Eine mangelhafte Verdichtung ist nicht selten Ursache für spätere Bauwerksschäden bzw. Beanstandungen schon bei der Bauwerksabnahme. Messen lässt sich allerdings der Verdichtungsgrad eines gerade eingebauten und verdichteten Betons nicht.

2.2 Verarbeitbarkeit

Die Konsistenz ist ein Maß für die Steife und damit für die Verarbeitbarkeit des Betons. Sie hängt, bei sonst gleichbleibender Betongüte, nicht vom W/Z-Wert, sondern von der Menge des Zementleims ab. Gemessen bzw. geprüft wird die Konsistenz mittels verschiedener, genormter Prüfverfahren.

Die in Deutschland gebräuchlichsten Prüfverfahren sind der Ausbreitversuch nach DIN EN 12350-5 und für steifere Betone der Verdichtungsversuch nach Walz (DIN EN 12350-4).

| Ausbreitmaßklassen | | |
|---------------------------|------------------------------|------------------------|
| Klasse | Ausbreitmaß (Durchmesser mm) | Konsistenzbeschreibung |
| F1 | ≤ 340 | steif |
| F2 | 350 bis 410 | plastisch |
| F3 | 420 bis 480 | weich |
| F4 | 490 bis 550 | sehr weich |
| F5 | 560 bis 620 | fließfähig |
| F6 | ≥ 630 | sehr fließfähig |

Bei Ausbreitmaßen über 700 mm ist die DAFStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ bzw. sind die Guidelines der EFNARC zu beachten.

| Verdichtungsmaßklassen | | |
|------------------------|-----------------|------------------------|
| Klasse | Verdichtungsmaß | Konsistenzbeschreibung |
| C0 | $\geq 1,46$ | sehr steif |
| C1 | 1,45 bis 1,26 | steif |
| C2 | 1,25 bis 1,11 | plastisch |
| C3 | 1,10 bis 1,04 | weich |
| C4* | $< 1,04$ | – |

* C4 gilt nur für Leichtbeton

Der Verdichtungsversuch nach DIN EN 12350-4 eignet sich zur Konsistenzbestimmung von steifem, plastischem und weichem Beton, nicht für fließfähigen Beton. In den Konsistenzklassen F2 und F3 kann bei Verwendung von Beton mit gebrochener Gesteinskörnung, sehr mehlkornreichem Beton sowie von Leicht- und Schwerbeton diese Methode zweckmäßiger sein als der Ausbreitversuch.

Der Ausbreitversuch nach DIN EN 12350-5 wird in Deutschland gemäß Abbildung 10 unter den gleichen Versuchsbedingungen zur Konsistenzbestimmung für die Konsistenzbereiche F2 bis F6 angewandt. In den USA wird die Frischbetonkonsistenz üblicherweise mit dem sogenannten Slump-Test (Setzmaß) nach Chapman/Abrams (ASTM) gemäß Abbildung 11 angegeben. Auch in vielen anderen Ländern ist dieser Test sehr verbreitet und bekannt. In Deutschland ist diese Prüfung mittlerweile nach DIN EN 12350-2 genormt.

Die Konsistenz von Frischbeton verändert sich mit dem Verlassen des Mixers kontinuierlich bis zum Verarbeitbarkeitsende etwa wie in Abbildung 12 dargestellt ist. Dieser als „Ansteifen“ bezeichnete Vorgang ist völlig normal und bildet die Voraussetzung für die spätere Festigkeitsentwicklung des Betons und ist nicht zu verwechseln mit der ebenfalls zeitlich begrenzten Wirkung von Fließmitteln (FM).

Die Frischbetontemperatur ist beim Betonieren während extrem kalter und extrem warmer Außentemperaturen von Bedeutung. Sie soll beim Einbau zwischen +5 und +30 °C betragen. Bei Lufttemperaturen unter -3 °C muss die Betontemperatur beim Einbau mindestens +10 °C betragen.



Abb. 9: Verdichten des Betons mit Rüttelflasche

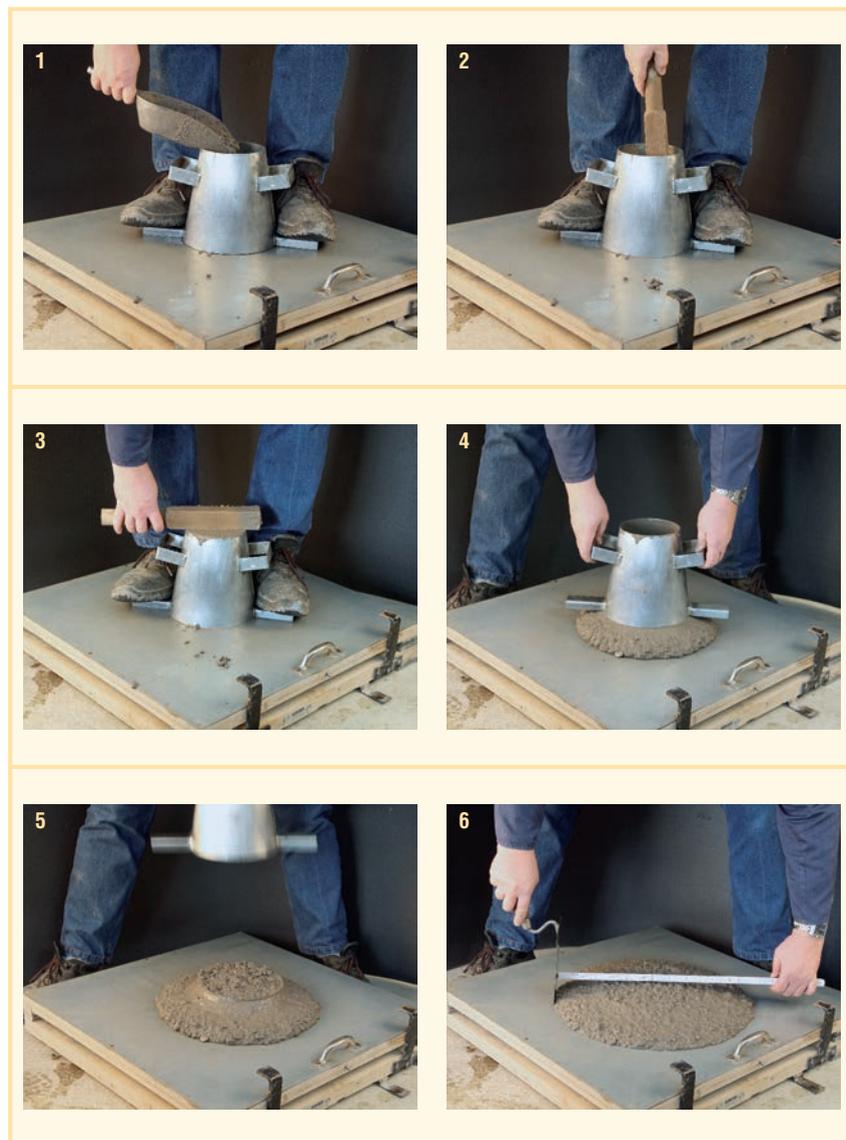


Abb. 10: Messung des Ausbreitmaßes gemäß DIN EN 12350-5

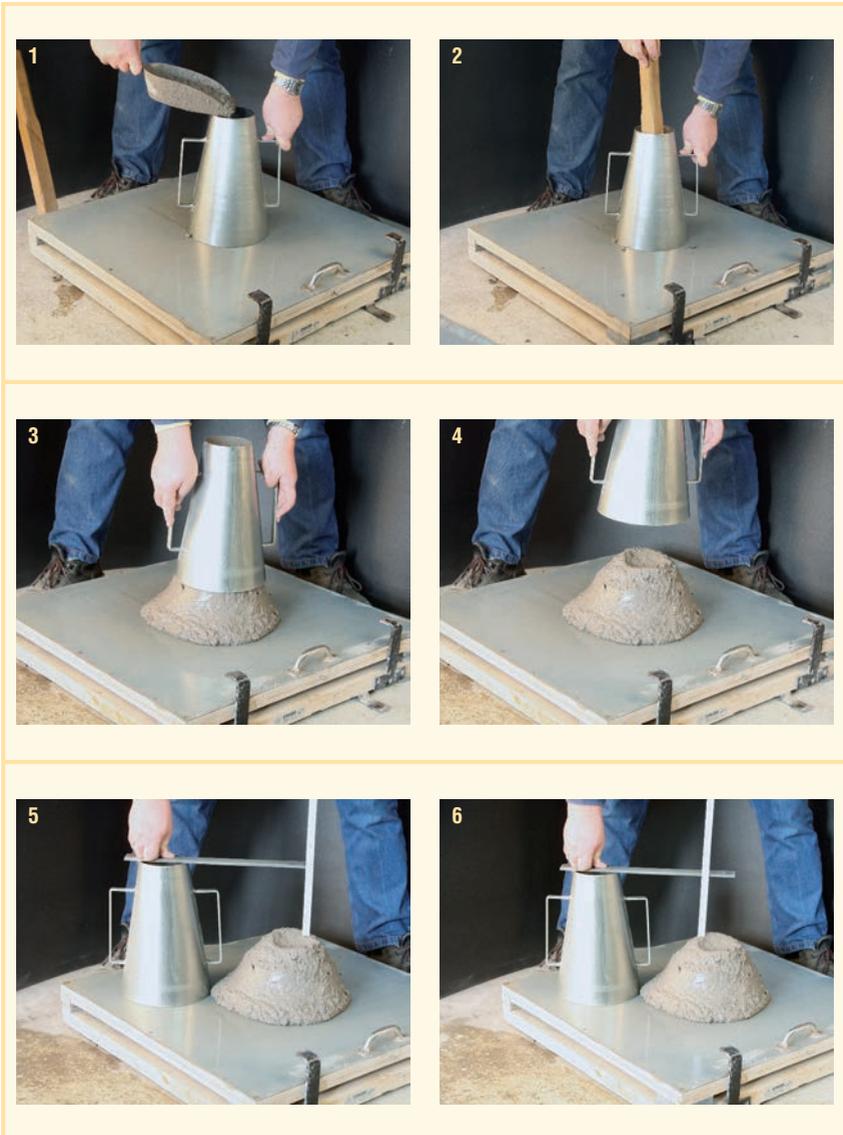


Abb. 11: Messung des Setzmaßes gemäß DIN EN 12350-2

Frischbetoneigenschaften (allgemein)

Erhöhte Frischbetontemperaturen (deutlich über +20 °C) beschleunigen im allgemeinen das Ansteifen. Hohe Sommertemperaturen oder künstlich erhöhte Frischbetontemperaturen (Warmbeton für den Winterbau) verkürzen die Zeitspanne zwischen Anmachen und Erstarungsbeginn stark.

Liegt ein längerer Zeitraum zwischen Herstellen und Verarbeiten des Betons, so muss sein Ansteifen entsprechend berücksichtigt werden. Das bedeutet z. B., dass Transportbeton beim Mischen im Werk unter Berücksichtigung der Fahrzeit und der Temperatur so weich eingestellt sein muss, dass er bei der Übergabe auf der Baustelle die gewünschte Konsistenz hat.

Achtung!

Eine unerlaubte Wasserzugabe auf der Baustelle zum erneuten „Weichmachen“ des Betons hat drastische Einbußen der Qualität zur Folge!

Die verschiedenen Konsistenz-Kennwerte widerspiegeln aber nur einen Teil der als Verarbeitbarkeit zu bezeichnenden Frischbetoneigenschaften. Hierzu gehören ferner das Wasserhaltevermögen, die Pumpbarkeit und Pumpwilligkeit (s. Abschnitt 4.1.), das Verformungs- und Umordnungsverhalten bei der Verdichtung (s. Abschnitt 2.1.) usw.

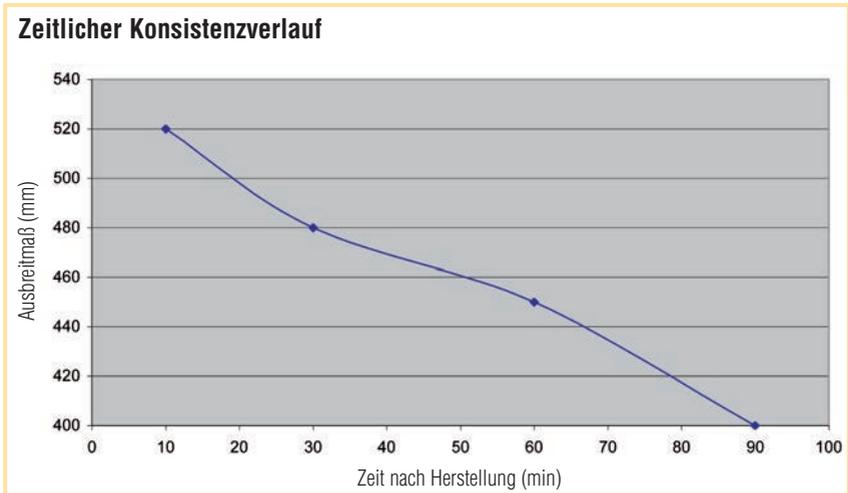


Abb. 12: Zeitabhängigkeit der Konsistenz

3. Festbetoneigenschaften

3.1 Expositionsklassen

Mit Expositionsklassen werden chemische und physikalische Umgebungsbedingungen, denen der Beton ausgesetzt werden kann, beschrieben. Zur Sicherstellung einer beabsichtigten Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren und einer Dauerhaftigkeit für die beabsichtigte Verwendung werden in Abhängigkeit von den Expositionsklassen Anforderungen an die Betonzusammensetzung festgelegt (siehe Abschnitt 1.6).

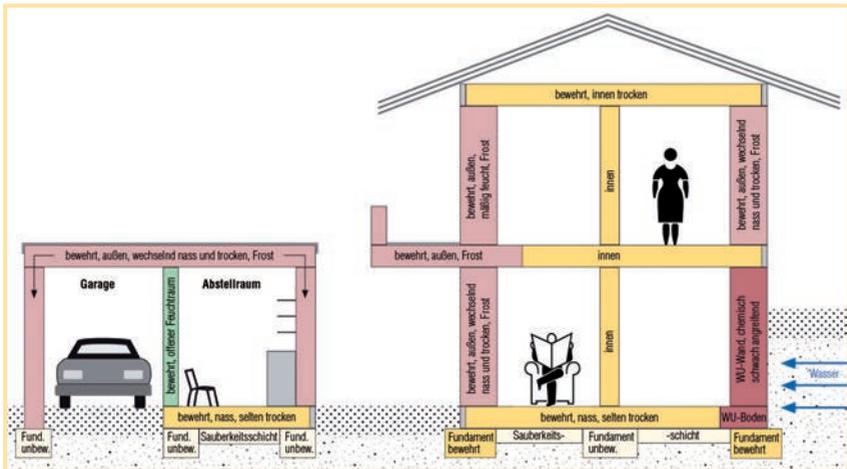


Abb. 13: Expositionsklassen im Wohnungsbau*

| Expositionsklasse | Korrosions- und Angriffsart |
|-----------------------------|--|
| X0 | Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko |
| XC1, XC2 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung |
| XC3 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, mäßige Feuchte |
| XC4, XF1 oder XC4, XF1, XA1 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, Betonangriff durch Frost ohne Taumittel, chemisch schwach angreifende Umgebung |
| XC4, XF1, XA1 | Beton mit hohem Wassereindringwiderstand (WU-Beton) nach DIN 1045-2 und WU-Richtlinie |

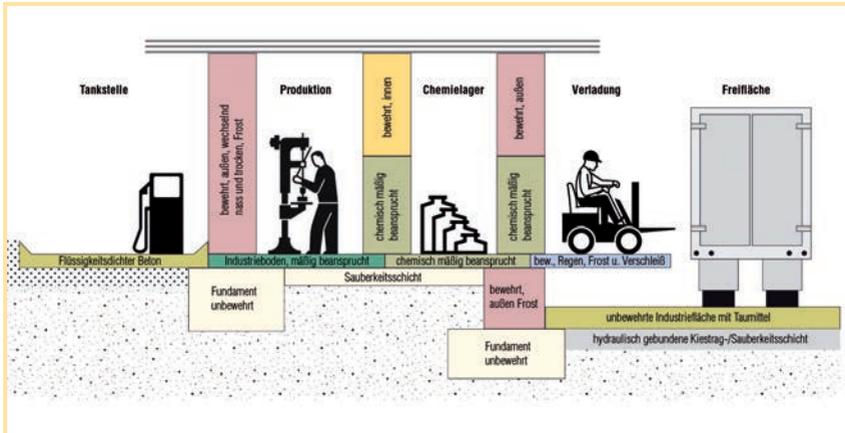


Abb. 14: Expositionsklassen im Industriebau*

| Expositionsklasse | Korrosions- und Angriffsart |
|-------------------------------|--|
| X0 | Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko |
| XC1, XC2 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung |
| XC4, XF1 oder XC4, XF1, XA1 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, Betonangriff durch Frost ohne Taumittel, chemisch schwach angreifende Umgebung |
| XC2, XM1 bzw. XM2 XC2, XM2 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, Betonangriff durch mäßige bis starke Verschleißbeanspruchung |
| XC4, XA2, XF3, XM1, XM2 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, Betonangriff durch chemisch mäßig angreifende Umgebung, Frost und Verschleißbeanspruchung |
| XC4, XA2, XF3, XM1, XM2 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, Betonangriff durch chemisch mäßig angreifende Umgebung, Frost sowie mäßige bis starke Verschleißbeanspruchung |
| XC4, XF4, XD3, XA2, XM1, XM2 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung und Chloride, Betonangriff durch Frost mit Taumittel, chemisch mäßig angreifende Umgebung sowie mäßige bis starke Verschleißbeanspruchung |

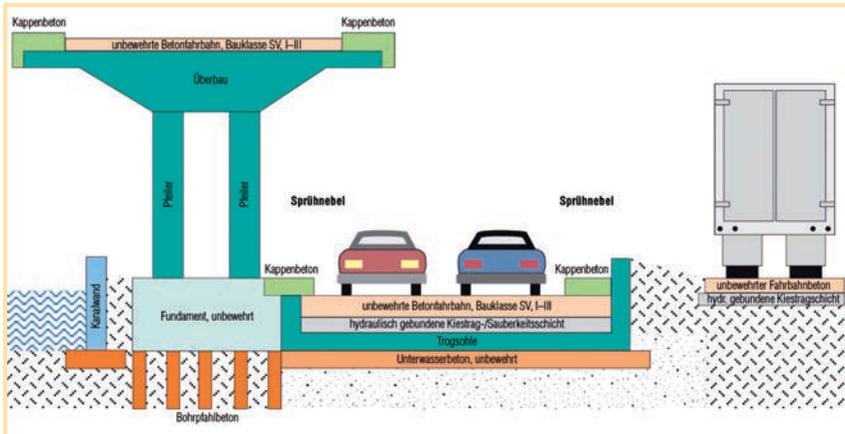


Abb. 15: Expositionsklassen im Ingenieurbau*

| Expositionsklasse | Korrosions- und Angriffsart |
|---|---|
| XC4, XF1, XA1 oder XC4, XF1, XA1, XD1 XM1 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, Betonangriff durch Frost und chemisch schwach angreifende Umgebung |
| XC4, XF3, XA1 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, Betonangriff durch Frost und chemisch schwach angreifende Umgebung |
| XC4, XD3, XF4 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung und Chloride, Betonangriff durch Frost mit und ohne Taumittel |
| XC4, XD1, XD2, XF2, XF3, XA2, XM1, XM2 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung und Chloride, Betonangriff durch Frost mit und ohne Taumittel, chemisch mäßig angreifende Umgebung und Verschleißbeanspruchung |
| XF4, XM1 oder XF4, XM2 | Betonangriff durch Frost mit und ohne Taumittel, mäßige bis starke Verschleißbeanspruchung |
| XA1 oder XA2 | Betonangriff durch chemisch mäßig bis stark angreifende Umgebung |
| XC2, XA1 oder XC2, XA2 | Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, Betonangriff durch chemisch mäßig bis stark angreifende Umgebung |

3.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist die wichtigste Betoneigenschaft. Die Normprüfung zur Ermittlung der Druckfestigkeit (DIN EN 12390, Teil 4) wird im allgemeinen nach 28 Tagen an Probewürfeln von 15 cm Kantenlänge durchgeführt. Die Druckfestigkeit errechnet man aus der in der Prüfpresse maximal (vor dem Bruch) aufgebrauchten Last in Newton geteilt durch die dabei belastete Fläche des Prüfkörpers in mm^2 . Je nach Druckfestigkeit wird der Beton einer der in Kapitel 1.6 genannten Festigkeitsklassen zugeordnet. Eine bestimmte Würfeldruckfestigkeit kann auch schon zu einem früheren Zeitpunkt als nach 28 Tagen erforderlich sein, z. B. beim Ausschalen von Wänden oder Decken. Sie kann aber auch für einen späteren Zeitpunkt vereinbart werden, z. B. bei Verwendung von langsam erhärtendem Zement.

Ursachen für nicht erreichte Druckfestigkeiten können durch unsachgemäße Behandlung des Betons beim Einbau hervorgerufen werden.

Dazu gehören vor allem:

- unerlaubte Wasserzugabe auf der Baustelle
- Frischbetoneinbau erst nach Erstarrungsbeginn
- unzureichende Verdichtung, insbesondere infolge zu großer Schüttlagen
- unsachgemäße Nachbehandlung, z. B. unzureichender Schutz gegen vorzeitiges Austrocknen



Abb. 16: Druckfestigkeitsprüfung

3.3 Korrosionsschutz

Ein dauerhafter Korrosionsschutz der Bewehrung ist allein durch den ihn umgebenden Beton gegeben, allerdings nur wenn der Zementstein ausreichend dicht und die Betondeckung dick genug sind. Hier kommt es leider des öfteren schon bei der Festlegung des Größtkornes zu einer Unterschätzung des beim Schütten tatsächlich noch verfügbaren Platzes zwischen den Bewehrungsstäben für das „Hindurchschlüpfen“ des Betons.

Ebenso ist die beim Verdichten zum vollständigen Benetzen der Bewehrung erforderliche „Mischarbeit“ nicht zu unterschätzen. Erschwerend kommt noch hinzu, dass die Bewehrung notwendigerweise in den oberflächennahen Bereichen konzentriert ist, wo der Beton beim Verdichten auch noch so „umgeordnet“ werden muss, dass die Oberfläche durch Feinkornanreicherung geschlossen wird.

Die erforderliche Betondeckung, Voraussetzung für den ausreichenden Korrosionsschutz, muss durch genügend Abstandhalter zur Schalung gewährleistet werden. Die Kräfte, die der fallende bzw. fließende Frischbeton auf die Bewehrung ausübt, sind oft enorm und die nachträgliche Verschiebung einer korrekt eingebrachten Bewehrung wird vom Beton verdeckt. Der Schaden offenbart sich dann erst erheblich später, wenn die Bewehrung rostet und der Beton abplatzt.



Abb. 17/18: Abplatzen der Betondeckung durch Bewehrungskorrosion (starke Meersalzbelastung)

Die Wasserundurchlässigkeit von Beton dient nicht nur der Gewährleistung des Korrosionsschutzes für die Bewehrung, sondern verhindert auch das Ein- oder Durchdringen von Wasser, das unter Druck steht, z. B. bei Talsperren oder Gebäudegründungen unterhalb des Grundwasserspiegels. Die Prüfung der Wasserundurchlässigkeit erfolgt nach DIN EN 12390-8 durch Einwirkung eines Wasserdrucks von $0,5 \text{ N/mm}^2$ (5 bar) für drei Tage. Danach darf die mittlere Eindringtiefe des Wassers nicht mehr als 50 mm betragen. Besonderes Augenmerk ist hier neben der intensiven Verdichtung vor allem dem Vermeiden von Arbeitsfugen zwischen den einzelnen Betonierabschnitten zu widmen. Es ist unbedingt darauf zu achten, dass die Betonierlagen „frisch auf frisch“ eingebracht werden. Betonierlagen von nicht mehr als 30 bis 50 cm gewährleisten, dass z. B. die Rüttelflasche bei normaler Eintauchtiefe auch noch bis in die vorangegangene Schüttlage gelangt, bevor diese ihren Erstarrungsbeginn erreicht hat.

3.4 Sonstige Festbetoneigenschaften

Der **Widerstand gegen chemische Angriffe** wird in drei Angriffsklassen unterteilt: Chemisch schwach, chemisch mässig und chemisch stark angreifende Umgebung.

Bei starker Sulfatbelastung des angreifenden Wassers (mehr als 0,6 g je Liter) ist Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement) zu verwenden. Beton, der allerdings längere Zeit „sehr starken“ chemischen Angriffen ausgesetzt wird, muss vor Zutritt der angreifenden Stoffe dauerhaft und zuverlässig durch einen Schutzüberzug geschützt werden.

Frostwiderstand setzt einen wasserundurchlässigen Beton, ausreichende Festigkeit und gegen Frost widerstandsfähige Gesteinskörnungen voraus. Eine Verbesserung des Frost- und Tausalzwidestandes erreicht man durch luftporenbildende Zusatzmittel (LP).

Hohen **Verschleißwiderstand** benötigt ein Beton, dessen Oberfläche einer starken mechanischen Beanspruchung ausgesetzt ist, z.B. durch starken Verkehr, rutschendes Schüttgut, Bewegen schwerer Gegenstände oder durch stark strömendes und Feststoffe führendes Wasser.

4. Frischbetoneigenschaften und -zustände beim Pumpen

4.1 Pumpbarkeit und Pumpwilligkeit

Pumpbarer Beton ist kein Spezialbeton. Aber nicht jeder Beton erfüllt auch die Anforderungen an einen pumpbaren Beton. Die Frage nach der Pumpbarkeit von Frischbeton ist in zwei Schritten zu stellen und zu beantworten:

1. Ist der Beton unter den gegebenen Bedingungen überhaupt pumpbar?
2. Wenn ja, wie lässt sich der Beton pumpen, d. h. mit welchem Aufwand?

Die Pumpbarkeit eines Frischbetons ist gegeben, wenn dieser während des gesamten Pumpvorganges gefügedicht ist und bleibt. Gefügedichter Beton heißt, dass alle festen Bestandteile vollständig von Flüssigkeit (Wasser) umgeben und gegeneinander beweglich sind. Die Druckübertragung im Beton darf also nur über die Flüssigkeit erfolgen. Dazu muss also in jedem Querschnitt entlang des Förderweges das Gesteinskörnung-Zement-Gemisch zumindest mit Wasser gesättigt sein. Der Strömungswiderstand innerhalb des Gesteinskörnung-Zement-Gemisches muss größer als der Widerstand in der äußeren Gleitschicht sein.



Abb. 19: Typischer Stopfer



Abb. 20: Pumpen von hochfestem Beton der Druckfestigkeitsklasse C100/115

Hieraus resultiert die besondere Bedeutung der Betonzusammensetzung im Feinstkornbereich. Der Zement und die anderen Feinstkornanteile sorgen beim Pumpen von Beton also nicht nur für die „Schmierung“ an der Rohrwand und damit für eine Reduzierung des Wandreibungswiderstandes, sondern ebenso für eine nahezu vollständige Packung des Korngefüges.

Die Pumpbarkeit bzw. Gefügedichtheit eines Frischbetons ist aber nicht nur eine Frage seiner Zusammensetzung, sondern auch des Rohrleitungsdurchmessers und der damit in Zusammenhang stehenden „Randzonen-Gleitschicht“.

Aus Erfahrung gilt für die Pumpbarkeit:

- eine Kornzusammensetzung für eine stetige Sieblinie zwischen den Grenzsieblinien A und B nach DIN 1045-2
- ein Zementgehalt von mindestens 240 kg/m³ bei Beton mit einem Größtkorn von 32 mm
- ein Mehlkorn- und Feinstsandgehalt ($\leq 0,25$ mm) von mindestens 400 kg/m³ bei Beton mit einem Größtkorn von 32 mm
- ein Mörtelgehalt von mindestens 450 dm³/m³ mit einem Größtkorn von 32 mm
- ein Rohrleitungsdurchmesser von mindestens dem 3-fachen des Größtkorndurchmessers

Die Pumpwilligkeit bei gegebener Pumpbarkeit beinhaltet nicht nur den von Konsistenzbeiwert und Strömungsgeschwindigkeit abhängigen spezifischen Förderwiderstand, sondern auch die innere Beweglichkeit des Frischbetons beim Ansaugen sowie beim Passieren von Rohrbögen und Querschnittsveränderungen. Der relevante Parameter bezüglich der Pumpwilligkeit wird über den Konsistenzbeiwert zahlenmäßig im sogenannten „Betondruck-Leistungs-Nomogramm“ (siehe Abschnitt 4.4) ausgedrückt. Mit dem Konsistenzbeiwert wird die Viskosität des Betons bezüglich Rohrförderung erfasst. Das in der Literatur dem Beton häufig zugeordnete „Bingham“-Modell erfordert neben der Viskosität zur Beschreibung zusätzlich noch eine so genannte Fließgrenze des Materials. Diese Fließgrenze stellt den Widerstand dar, der zur Bewegung des Materials mindestens überwunden werden muss. Die Einbeziehung der Fließgrenze in das Nomogramm wurde noch nicht vollzogen. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass die Berechnung des Rohrleitungswiderstandes von Beton über die dem Nomogramm zu Grunde liegende Formel hinreichend genau berechnet werden kann.

Die Vielzahl der verschiedensten Verfahren zur Konsistenzbeschreibung und die breiten Streubereiche beim Vergleich ihrer physikalisch nicht exakt beschreibbaren Messwerte lassen die Kompliziertheit erkennen. Nachfolgend soll jedoch versucht werden, auch eine Vorstellung von dieser Eigenschaft zu vermitteln.

4.2 Entstehung und Eigenschaften der „Randzonen-Gleichschicht“

Bei der Rohr- und Schlauchförderung von Beton wird stets die Notwendigkeit eines „Schmierfilms“ aus Zementleim unmittelbar an der Rohrwand betont. Beim Austreten des Betons aus der Rohrleitung erkennt man an der Außenseite der „Betonwurst“ auch deutlich eine Feinkornanreicherung. Die Ursachen und Wirkungen dieser „Randzonen-Gleichschicht“ sind bisher nur wenig bekannt.

Wie schon erwähnt wurde, ist pumpbarer Frischbeton in jedem Teil der Förderleitung gefügedicht, d.h. das Gesteinskorn-Gemisch „schwimmt“ zwangungsfrei im „Betonbrei“. Die Kornzwischenräume sind „satt“ mit Zementleim gefüllt. Die außerdem vorhandenen, verflüssigend wirkenden Luftporen werden durch den beim Pumpen erforderlichen Förderdruck auf einen Bruchteil ihrer natürlichen Größe zusammengedrückt und verlieren so beim Pumpen ihre verflüssigende Wirkung.

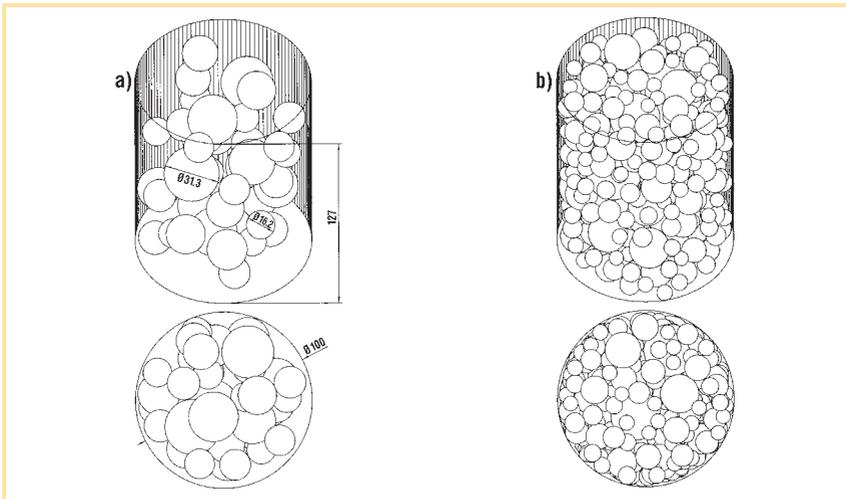


Abb. 21: Raumfüllung eines Rohrabchnittes (1 Liter) mit Kugelkörnern des Beispielmisches:
a) Korngröße 16/32 b) Korngrößen 8/16 und 16/32

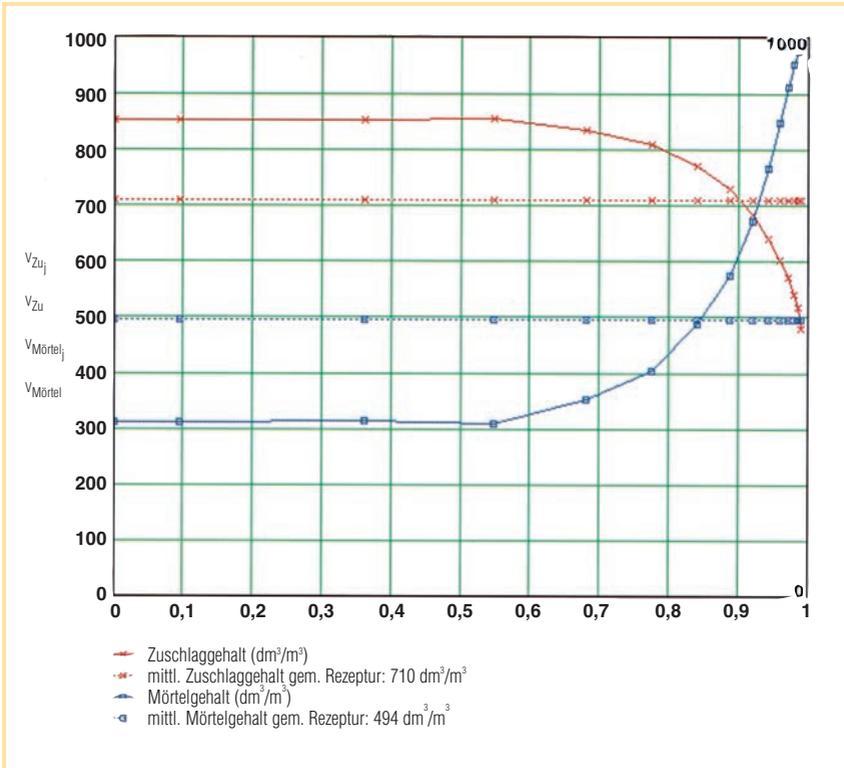


Abb. 22: Randzonen-Entmischung bei einem Förderrohrdurchmesser von 100 mm für Beispiel-Beton (Zusammensetzung in Abhängigkeit vom relativen Abstand von der Rohrmittelachse)

Beispielsweise sinkt der Luftporengehalt von 10 % in einem lose geschütteten Beton bei einem Förderdruck von 85 bar auf einen Restanteil von nur 0,12 %. Die Zuschlagkörner des Betons sind entsprechend ihrem Volumenanteil an der Raumfüllung beteiligt. Zur besseren Veranschaulichung kann man z. B. ein Leitungsstück \varnothing 100 mm, 127 mm lang mit einem Volumen von 1 Liter und alle Zuschlagkörner der Körnungen 8/16 und 16/32 als Kugeln unterschiedlicher Größe betrachten. Abbildung 21 zeigt eine mögliche, zufällige Anordnung dieser Kugelwolken in einem solchen Rohrabschnitt.

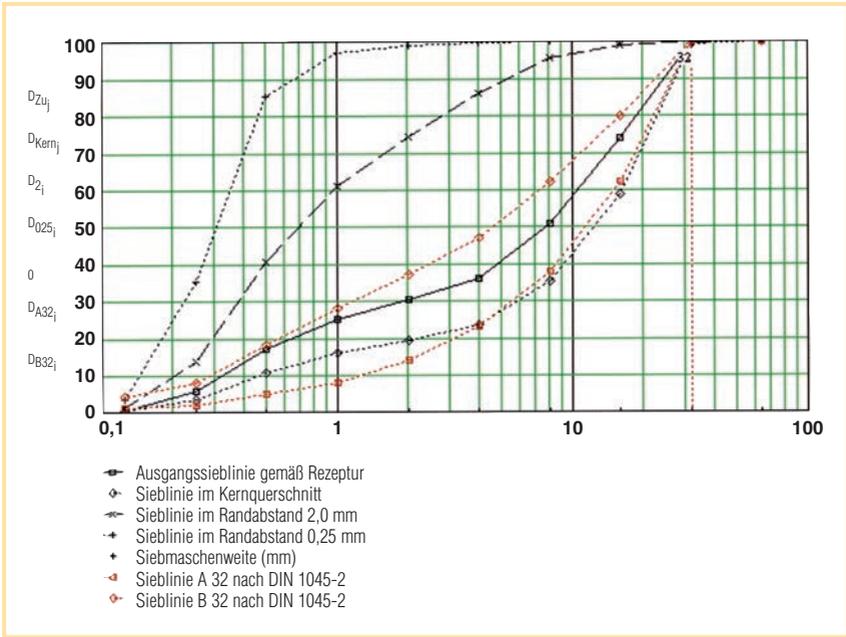


Abb. 23: Sieblinienveränderung in Kern- und Randzone



Abb. 24: Axialer Schnitt durch den Betonstrang; links Stopfer, rechts Durchfluss*



Abb. 25: Radialer Schnitt durch den Betonstrang; links Stopfer, rechts Durchfluss*

Die größten, „sperrigsten“ Körner weisen bekanntlich einen Durchmesser von bis zu $1/3$ des sie umschließenden Rohres auf. Jedes Korn kann sich der Rohrwand jedoch nur bis zur Berührung mit seiner Oberfläche annähern. „Begibt“ man sich nun in eine zur Rohrwand parallele Schicht, z. B. im Abstand von 1 mm, so „trifft“ man dort von den großen Körnern auch nur auf deren äußere Schichten, während alle Körner mit einem Durchmesser kleiner 1 mm mit ihrem ganzen Volumen zur Raumfüllung beitragen und den „Mangel“ an Grobkorn ausgleichen können. Mit anderen Worten, um den Rohrquerschnitt vollständig mit den Betonbestandteilen zu füllen, müssen zumindest in den Randzonen die großen Körner nach innen und ein entsprechender Anteil kleinerer Körner und Wasser nach außen gedrückt werden. Dieser Vorgang ist vergleichbar mit dem Glattstreichen der Betonoberfläche mit einer Kelle.

Die „Randzonen-Entmischung“ erfolgt zwangsläufig bei jeder Raumfüllung mit Beton, also bereits beim Füllen der Förderzylinder ebenso wie bei der abschließenden Einbringung z. B. in eine Wandschalung. Voraussetzung hierfür ist allerdings die schon genannte innere Beweglichkeit des Frischbetons.

In der Randzone kommt es zu einer stetig zunehmenden Verfeinerung der Mischung bis hin zum reinen Zementmörtel unmittelbar an der Rohrwand. Dementsprechend ergibt sich

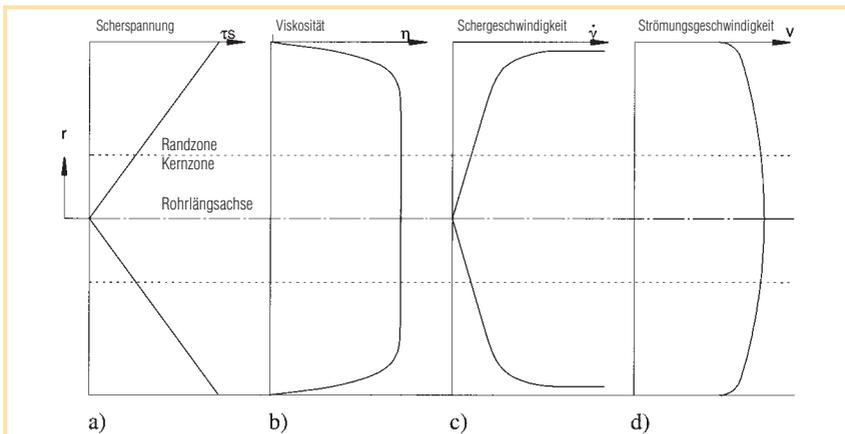


Abb. 26: Strömungsverhältnisse bei der Rohrförderung von Frischbeton
a) Scherbeanspruchung b) Viskosität c) Schergeschwindigkeit d) Geschwindigkeitsprofil

für die Kernzone Grobkornanreicherung und Zementleimentzug. Für die Pumpbarkeit des Betons ist jedoch Voraussetzung, dass die Gefügedichtheit der Kernzone trotz Randzonen-Entmischung erhalten bleibt. Das erklärt, warum ein Beton nur bis zu einem bestimmten Mindestrohrdurchmesser pumpbar ist. Abbildung 23 zeigt die Sieblinienveränderungen in verschiedenen Abständen zur Rohrwand.

Diese im Rohrquerschnitt radiusabhängige Betonzusammensetzung zeigt, dass auch die Frischbetoneigenschaften querschnitts- und radiusabhängig und während des Pumpvorganges entsprechenden Veränderungen unterworfen sind. Auf dem Weg durch die Förderleitung unterliegt der Frischbeton verschiedenen Beanspruchungen und Verformungen, denen er einen bestimmten Widerstand entgegensetzt. Bei der Förderung im geraden zylindrischen Rohr erfolgt eine ausschließliche, mit dem Radius linear zunehmende Scherbeanspruchung τ_S gemäß Abb. 26a.

Dieser Beanspruchung setzt der Beton einen Scherwiderstand (Betonzähigkeit) τ_W entgegen, der zwar geschwindigkeitsabhängig, aber nicht über den Querschnitt konstant ist. Vielmehr entspricht die Viskosität des Betons der zur Wand hin stark abnehmenden „Verzahnung“ des Zementleimes mit Zuschlagkörnern (s. Abb. 22): In der Kernzone ist der Gesteinskörnungs-

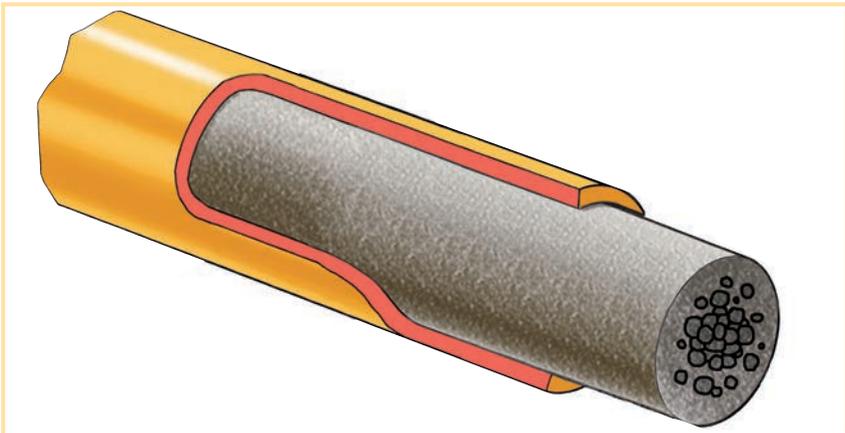


Abb. 27: Schematische Darstellung der Randzonen-Entmischung

anteil ein Mehrfaches vom Zementleimanteil, während zum Rand hin der Gesteinskörnungsanteil praktisch auf Null sinkt. Anhand des Vergleichs der mittlere Korngröße vom Zement (ca. 0,01 mm) und dem Größtkorn (z. B. 32 mm) wird dieser Unterschied ebenfalls deutlich. Insgesamt ergibt sich für die Viskosität der in Abbildung 26b dargestellte Verlauf: An der Wand etwa entsprechend der des Zementleims wie sie aus rheologischen Messungen bekannt ist, zur Kernzone hin ansteigend auf ein Vielfaches.

Die wesentlich größere Viskosität der Kernzone gegenüber der Randzone (s. Abb. 26b) und die mit dem Radius zunehmende Scherbeanspruchung (s. Abb. 26a) ergeben eine zum Rand hin sehr stark steigende Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ gemäß Abbildung 26c und ein der sogenannten Pfropfenförderung sehr ähnliches Geschwindigkeitsprofil für den Betonstrom im Rohr nach Bild 26d. Die hierzu von RÖSSIG mit Normalbeton durchgeführten Versuche im Labor zeigten innerhalb der Kernzone nach einer Förderstrecke von 10 m lediglich eine Schubverformung von insgesamt 0,3 bis 0,5 m. Das entspricht einer um etwa 100- bis 200-fachen Schubverformung der gesamten Randzone gegenüber der Kernzone. Hieraus folgt auch, dass die gerade Rohrförderung von Frischbeton keine zusätzliche Mischwirkung ergibt. Lediglich in Rohrbögen und nach dem Verlassen der Förderleitung erfolgt beim Einbauen und Verdichten eine gewisse Nachmischung und gegebenenfalls, wie schon erwähnt, eine erneute Randzonen-Entmischung, z. B. an den Schalungsflächen sowie an der Bewehrung.

4.3 Frischbetonverhalten in der Betonpumpe

Die betontechnologische Aufgabe der Pumpe ist, den Frischbeton möglichst ohne Beeinträchtigung seiner vorgegebenen Zusammensetzung und Eigenschaften als geschlossenen, kontinuierlichen Förderstrom in die Förderleitung und durch diese hindurch zur Einbaustelle zu pressen. Das Frischbetonverhalten in der Betonpumpe umfasst einerseits sein passives Verhalten infolge der aktiven Wirkungen der Betonpumpe auf ihn und andererseits seine eigene, reaktive Wirkung auf die Betonpumpe und deren Verhalten. Dabei durchlaufen der Frischbeton und die Betonpumpe verschiedene „Betriebszustände“.

Einerseits muss man nach dem Betriebszustand der Pumpe (Anpumpen, normaler Förderbetrieb, Leitung leeren und reinigen, Störungen) und andererseits nach dem Betriebszustand des Betons (Übergabe und Verweilen im Trichter, Ansaugen, Füllen des Förderraumes, Passieren des Schiebersystems und der Reduzierungen danach) unterscheiden. Die verwendete Betonpumpenbauart (Kolbenpumpe oder Schlauchquetschpumpe) und die bei einer Kolbenpumpe verwendete Schieberbauart (z. B. Rüssel- oder S-Rohrweiche) können einen Einfluss auf das Frischbetonverhalten innerhalb der Betonpumpe haben. Auf die Besonderheiten und Merkmale der beiden prinzipiellen Pumpenarten sowie der verschiedenen Schiebersysteme von Kolbenpumpen (siehe Abb. 28) soll hier nicht näher eingegangen werden. Mit der vorliegenden Schrift soll lediglich versucht werden, die Vorgänge innerhalb der Betonpumpe aus betontechnologischer Sicht verständlich zu machen.

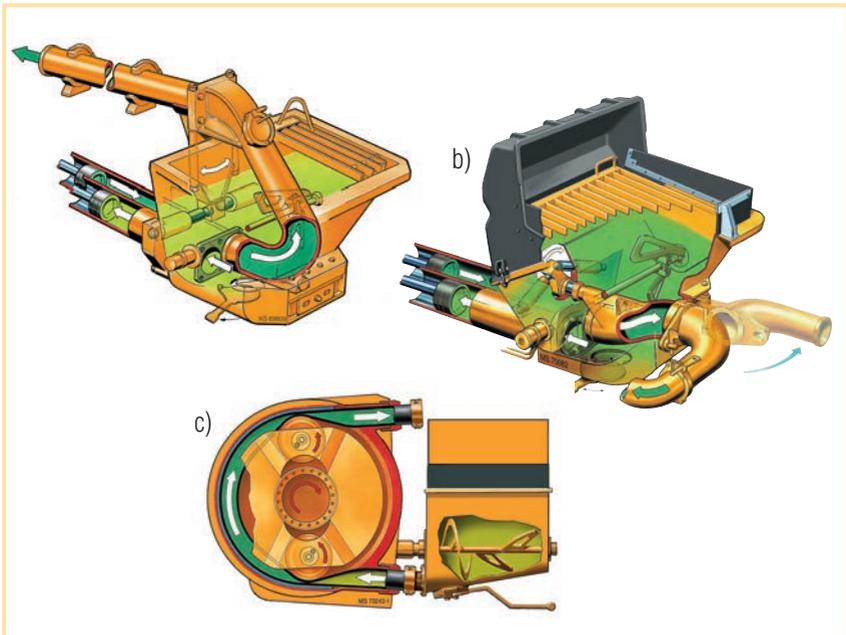


Abb. 28: Betonpumpen-Bauarten:
a) Kolbenpumpe mit Rüssel-Schieber, b) Kolbenpumpe mit S-Rohrschieber, c) Schlauchquetschpumpe



Abb. 29: Putzmeister stationäre Betonpumpen der 1400 Serie

Beton lässt sich nur durch die Förderleitung drücken, wenn dieser vorher aus einem offenen Behälter (Trichter) durch Volumenvergrößerung des Förderraumes (Kolbenhub) der Pumpe angesaugt wurde und der Beton den Förderraum möglichst vollständig füllt. Durch Volumenverkleinerung des Förderraumes wird der Beton unter Verdrängung der gesamten in der Förderleitung befindlichen Betonsäule in die Förderleitung gedrückt. Das Ansaugen ist bei genauerer Betrachtung ebenfalls ein Drücken: Bei der Volumenvergrößerung des Förderraumes (d.h. Bewegung des Förderkolbens im Förderzylinder von der Ansaugöffnung weg) bewirkt einen Unterdruck gegenüber der Atmosphäre, die mit maximal 1 bar den Beton aus dem Trichter in den Förderraum drückt, allerdings vorausgesetzt, dass es keine durchgehende „Luftbrücke“ zwischen Förderraum und Atmosphäre gibt.

Das geringe Druckniveau beim Saugen und Füllen erfordert einen möglichst geringen Fließ- und Verformungswiderstand des Betons. Hierzu tragen das Rührwerk des Trichters und dessen geometrische Gestalt bei. Das Rührwerk dient nämlich nicht nur dazu, den Beton in Förderpausen fließfähig zu halten und ein Absetzen zu vermeiden, sondern den Beton beim Ansaugen so zu bewegen und nachzuschieben, dass der Beton „aus der Bewegung heraus“ und ohne Stau in die möglichst große Ansaugöffnung fließen kann. Der Füllgrad des Förderraumes ist ein wesentliches Kriterium für die Leistungsfähigkeit einer Pumpe.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit der Förderkolben bzw. des Rotors führt zu keiner Verbesserung eines unzureichenden Füllgrades infolge schlecht fließenden Betons, denn die atmosphärische Druckdifferenz von 1 bar kann nicht vergrößert werden. Im Gegenteil – der Füllgrad und damit die Effizienz der Betonpumpe werden eher schlechter. Für optimale Ansaugbedingungen sollten die Ansaugöffnungen und Förderraumdurchmesser möglichst gleich und möglichst groß sein. Hierin liegen auch die wesentlichen Unterschiede der Kolben- und Schlauchquetschpumpen: Kolbenpumpen saugen den Beton durch große Querschnitte an und reduzieren den Querschnitt druckaufwendig beim Ausdrücken, wobei große Förderleistungen realisierbar sind. Schlauchquetschpumpen sind in ihrem Förderdruck auf ca. 30 bar eingeschränkt und saugen den Beton deshalb vorzugsweise mit dem gleichen Querschnitt an, wie er auch anschließend durch die Leitung gefördert wird. Dadurch ist ihre Förderleistung vornehmlich durch die Ansaugleistung begrenzt.

Bei den Kolbenpumpen wird das Ansaugverhalten des Frischbetons aber nicht nur durch die Größe der Ansaugöffnung und die Wirksamkeit des Rührwerktrichters bestimmt, sondern auch durch die aus dem verwendeten Schiebersystem resultierende „Behinderung“ des Ansaugens.

Das Füllen des Förderraumes beinhaltet auch die im Abschnitt 4.2 beschriebene „Randzonen-Entmischung“ zur vollständigen Raumfüllung und der damit verbundenen Entstehung der fließfähigeren Randzonen-Gleitschicht. Hierfür steht nur sehr wenig Zeit zur Verfügung, denn mit der Bewegungsumkehr des Förderkolbens muss der Förderraum sofort gefügedicht gefüllt und der Beton pumpbar sein.

Beim Drücken des Betons aus den Förderzylindern einer Kolbenpumpe in die Förderleitung erfährt der Betonstrom beim Passieren des Schiebers (Rüssel oder S-Rohr) und auch noch danach eine Querschnittsreduzierung auf den Förderleitungsdurchmesser (100 bzw. 125 mm). Für den Beton bedeutet dies nicht nur eine erhebliche Verformung (Längsstreckung und Querstauchung) sondern auch eine starke Geschwindigkeitszunahme sowie eine entsprechende Zunahme der Randzonen-Gleitschicht je Volumeneinheit des Betons. Zur Reduzierung der hiermit verbundenen Förderwiderstände erfolgt die Querschnittsreduzierung möglichst kontinuierlich (ohne Absätze oder Stufen) über eine ausreichend lange Strecke. Diese Querschnittsreduzierung innerhalb bzw. unmittelbar nach der Pumpe liefert nebenbei auch noch einen Pumpbarkeits-Test für den Beton: Passiert ein schwieriger Beton dieses „Hindernis“ problemlos, so ist er tatsächlich pumpbar und die Gefahr eines Stopfers infolge falscher Betonzusammensetzung entlang der Förderleitung wenig wahrscheinlich.



Abb. 30: Reduzierung von DN 150 auf DN 65

Eine wesentliche Bedingung für die Aufrechterhaltung der Pumpbarkeit des Betons innerhalb der Pumpe ist die zuverlässige Dichtheit des Schiebersystems während der Druckphase. Ein undichtes Schiebersystem bedeutet Wasser- bzw. Zementleimverlust in der Randzone und damit die Gefahr eines nicht mehr gefügedichten Betons, dessen Wandreibung auch nicht mehr druckunabhängig ist, was zwangsläufig zum Stopfer führt. Ähnliches gilt natürlich auch für die Schlauchquetschpumpe. Hier besteht die Gefahr, dass eine unzureichende Dichtheit des Quetschspaltes zum Abfließen von Wasser bzw. Zementleim führt und so unmittelbar vor der Quetschrolle der Beton seine Pumpbarkeit verliert.

Unter hohem Druck entsteht im Beton an Leckagestellen ein Effekt, der im Baustellen-Jargon „Kranzbildung“ genannt wird. An den Spalten lagert sich Feinstmörtel an, durch den ein Teil des Anmach-Wassers hindurchgedrückt wird. Unter dem Einfluss von Druck und Zeit vermehrt sich die Kranzbildung ringförmig von außen nach innen. Querschnittsverengungen von mehr als 50 % sind keine Seltenheit. Stopferneigung ist die Folge. Da dieser Kranz während des Einsatzes aushärtet, ist es beim späteren Reinigen der Betonpumpe nicht möglich, diesen Betonkranz mit üblichen Methoden zu entfernen. Wird der Betonkranz vom Maschinisten nicht bemerkt, tritt beim nächsten Einsatz nach dem Wegpumpen der Vorlaufschlempe häufige Stopferneigung auf.



Abb. 31: Rohrverschleiß im Rohrbogen

Die möglichst vollständige Leerung des Förderraumes bei jedem Pumhub ist bei Kolben-Betonpumpen besonders wichtig, da ein sogenanntes Totvolumen zumindest bis zur nächsten Reinigung der Pumpe im Förderraum, vornehmlich am Förderkolben verbleibt, dort erstarrt bzw. abbindet und u. U. zur Zerstörung von Dichtungen, des Förderkolbens bzw. der Förderzylinderinnenwand führt. Bei Schlauchquetschpumpen besteht diese Gefahr nicht, da der Beton den Förderraum (den Pumpschlauch) nur in einer Richtung durchströmt und dieser damit immer von frischem Beton durchgespült wird. Die o.g. besonderen Betriebszustände der Betonpumpe (Anpumpen, Leeren usw.) haben auf das Betonverhalten innerhalb der Pumpe wesentlich geringeren Einfluss als auf das Verhalten in der Förderleitung, weshalb diese Probleme auch erst im nachfolgenden Abschnitt erörtert werden. Neben den bereits erwähnten Rückwirkungen des Betonverhaltens auf die Betonpumpe ist neben der Beanspruchung infolge Betonförderdruck vor allem die Verschleißwirkung des Betons auf alle mit Beton in Berührung kommenden Teile zu nennen. Die Verschleißwirkung des Betons in der Betonpumpe, wie auch danach in der Förderleitung ist ebenso wie der Förderwiderstand vornehmlich konsistenz- und geschwindigkeitsabhängig, jedoch eher druckunabhängig. Die enorme Abrasivität des Betons beruht in den Verschleißigenschaften sowohl des Zementmörtels als auch der darin eingebetteten Zuschläge, insbesondere überall dort, wo der Beton nicht parallel zu der Bauteiloberfläche fließt, sondern der Beton

sich im Winkel auf die Oberfläche zu bewegt, also im Trichter, am Rührwerk, im Schieber-system, in Reduzierungen und in Bögen (außen). Die Zuschläge weisen eine größere Relativgeschwindigkeit auf, mit der sie auch durch die Rand-Gleitzone bzw. die Mörtelschicht hindurch an der Kontaktfläche entlangkratzen. Ihre unregelmäßige Form und die enge Verzahnung des Korngemischs behindern außerdem ein verschleißminderndes Abrollen an der Kontaktfläche, sie führen vielmehr zu einer Verdrehwirkung auf benachbarte Körner, die dadurch noch zusätzlich zur Kontaktfläche hingedreht werden.



Abb. 32: Rohrverschleiß-Messung: Für Zweilagrohr eignet sich das Wandstärkenmessgerät (li.), für Einlagrohr das Ultraschall-Messgerät (re.)

4.4 Frischbetonverhalten in der Förderleitung

Beim Durchströmen eines geraden, zylindrischen Rohres „beruhigt“ sich dieser Prozess nach kurzer Zeit unter Nutzung des zwischen den Körnern vorhandenen „Verzahnungsspiels“, vorausgesetzt die Rohrstöße weisen keine Absätze oder sogar Undichtheiten auf. Letztere führen im Extremfall zum Verlust der Pumpbarkeit und damit zum Stopfer oder auch „nur“ zur Bildung eines festen, querschnittsverengenden Betonkranzes mit erhöhtem Förderwiderstand. Bei großen senkrechten Förderhöhen mit qualitativ einwandfreien Förderrohren kommt es zur teilweisen Reduzierung des Wandkontaktes grober Zuschläge und damit sowohl zu geringeren Förderwiderständen als auch zu geringerem Verschleiß.

Bei horizontaler bzw. gegen die Vertikale geneigter zylindrischer Förderleitung kann der Effekt nur entsprechend abgeschwächt auftreten, da bereits ein geringes Setzen der groben Zuschläge wiederum zu den Wandkontakten mit allen bereits erwähnten Folgen kommt, allerdings vorrangig an der unteren Rohrrinnenwand.

Das Durchströmen von Rohrbögen bedeutet für den Frischbeton zusätzlich eine Biege- und Scherbeanspruchung. Da ein Rohrbogen in der „Außenkurve“ eine größere Fläche als ein gerades Rohr aufweist, wird hier die feinkornreiche Randzone dünner, in der „Innenkurve“ dagegen dicker. Die sehr zähe Kernzone verdrängt die weichere, geschwächte äußere Randzone und wird beim Auftreffen auf die Rohrwand verschleißintensiv durch Scherung und Biegung umgelenkt. Hierbei kann es durchaus zu örtlich nicht mehr gefüggedichten Zonen und damit zu noch höherem Förderwiderstand und Verschleiß kommen. Außerdem bedarf der Betonstrom nach einem Rohrbogen erst wieder einer Konsolidierungs- und Beruhigungsphase.

Der Frischbetondurchsatz durch eine Förderleitung ergibt sich aus dem Gleichgewicht von Leistungsvermögen der Betonpumpe (Motorleistung [kW], eff. Fördermenge [m^3/h], eff. Förderdruck [bar]), Geometrie der Förderleitung (Durchmesser [mm], Leitungslänge [m], Förderhöhe [m]) und Konsistenzbeiwert des Frischbetons (auch Zähigkeits-Beiwert oder Reibwert genannt). Die gegenseitige Abhängigkeit dieser Parameter veranschaulicht das in Abbildung 33 dargestellte, von der verwendeten Betonpumpe unabhängige Betondruck-Leistungs-Nomogramm.

Achtung:

Der Konsistenzbeiwert des Betons muss durch einen Pumpversuch oder durch eine Messung mit dem Sliding Pipe Rheometer (siehe Kapitel 4.5) ermittelt werden. Eine Herleitung der Pumpeigenschaften auf Grundlage des Ausbreitmaßes oder Setzmaßes ist nicht mehr eindeutig möglich

Die alte Methode ist nur noch vereinzelt anwendbar, wo der Beton ohne bzw. fast ohne Zusatzmittel hergestellt wird. Daher sollte man sich bezüglich der Pumpwilligkeit nicht mehr auf das Ausbreitmaß bzw. Setzmaß verlassen. Die Formel zur Druckberechnung hat jedoch nach wie vor Gültigkeit.

Das in Abb. 33 dargestellte Beispiel geht von einer effektiven Förderleistung von $Q = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ aus. Für den angenommenen Förderrohrdurchmesser von $D = 125 \text{ mm}$ kann man im ersten Quadranten eine mittlere Fließgeschwindigkeit von ca. 1 m/s ablesen. Die Abhängigkeit des Förderdruckes vom Förderrohrdurchmesser ist noch stärker als die Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit: Eine Reduzierung des Rohrdurchmessers von 125 mm auf 100 mm entspricht z. B. einer Vergrößerung der Geschwindigkeit des Betons im Rohr auf knapp $1,5 \text{ m/s}$, während sich der erforderliche Förderdruck nahezu verdoppelt. Der dargestellte Bereich entspricht langjährigen Erfahrungen mit vielen Betonrezepturen. Sind Werte für einen bestimmten Anwendungsfall erforderlich, so bedarf es entsprechender Pump- oder Rheometerversuche mit der vorgesehenen Betonrezeptur. Für das Beispiel in Abbildung 33 bei einem plastischen Beton mit einem Konsistenzbeiwert von $2 \text{ (*}10^{-6} \text{ bar*h/m)}$ ergibt sich ein Fließwiderstand von $0,21 \text{ bar}$ je lfd. Meter Förderleitung. Die angenommene Leitungslänge von $L = 300 \text{ m}$ ergibt einen abzulesenden Förderdruck von $p = 63 \text{ bar}$, der noch um den aus der Hochförderung resultierenden Anteil von $0,25 \text{ bar}$ je Höhen-Meter zu vergrößern ist, im Beispiel 20 bar für 80 m Förderhöhe. Der Förderwiderstand in Rohrbögen sowie an tropfenden Rohrkupplungen mit Kranzbildung wird in der Praxis umgerechnet in eine äquivalente Rohrlänge:

| | Bogenradius | äquiv. Rohrlänge |
|--------------------------|--------------------|-------------------------|
| Großrohrbogen 90° | 1000 mm | 3 m |
| Rohrbogen 90° | 281 mm | 1 m |
| Tropfende Kupplung | – | 1 m |

Anpumpen

Das Frischbetonverhalten in der Förderleitung beim Anpumpen bedarf der besonderen Aufmerksamkeit des Pumpenfahrers. Das Problem besteht in der bis zum stationären Pumpbetrieb erforderlichen Benetzung der Innenwand mit Zementleim. Die hierfür notwendige Menge je lfd. Meter Förderleitung entspricht der Menge, die in einem 1 m-Stück verbleiben würde, wenn man es zunächst vollständig mit Frischbeton füllt und diesen dann wieder herausgleiten lässt. (10 m einer 125-er Förderleitung haben eine zu benetzende Innenfläche von ca. 4 m².) Diese Zementleimmenge wird beim Anpumpen ausschließlich dem ersten durch die Förderleitung fließenden Beton „entnommen“. Aus diesem Grund sollte zum Anpumpen eine mit Zementüberschuss angereicherte Anfahr Mischung oder sogar ein im Pumpentrichter extra angerührter Sandbeton/Glattstrich bis 30 m – $\frac{1}{4}$ m³ und ab 30 m – $\frac{1}{2}$ m³ dem ersten Beton vorausgeschickt werden (s. Bedienungsanleitung).

Eine kostengünstigere und effektivere Lösung zur Erstellung einer Anfahr Mischung ist die Verwendung einer PM-Anpumpschlepe die in Pulverform vorliegt und mit Wasser angemacht wird. Die nach wenigen Minuten entstandene Substanz wird über die Reinigungsöffnung eingefüllt. Beim Anpumpen wird diese Substanz vor der Betonfront hergeschoben und benetzt so die Rohrrinnenwand.

Die in der Praxis verbreitete Methode der Benetzung der Förderstrecke vor dem Anpumpen mit Wasser stellt nur einen Behelf dar und kann nur bei kurzen Förderrohrängen zweckdienlich sein. Unterlässt man jedoch beides, ist bereits beim Anpumpen mit einem Stopfer zu rechnen, denn es entsteht nach relativ kurzer Förderstrecke ein nicht pumpbarer, ausgemagerter und trockener Betonpfropfen, der den Betonstrom an einem der ersten Bögen oder auch in einem langen geraden Rohrstück zum Stillstand bringt.

Wichtige Voraussetzung für einen störungsfreien Betonfluss ist auch das fachgemäße Leeren und Reinigen der Förderleitung bei einer längeren Förderpause, damit keine alten, erhärteten Beton- oder Zementleimreste zurückbleiben, die beim nächsten Anpumpen ebenfalls zu Stopfern führen würden.

4.5 Ermittlung des Konsistenzbeiwertes von Beton

Auf Grund immer komplexerer Betonrezepturen kann mit Hilfe des Ausbreitmaßes kein realitätsnaher Konsistenzbeiwert des Betons mehr ermittelt werden. Diese Möglichkeit ergab sich nur bei Beton ohne Betonzusatzmittel. Zur Ermittlung des Rohrleitungswiderstandes von Frischbeton ist heute daher erhöhter Aufwand notwendig.

Das Standardverfahren zur Sicherstellung der Pumpfähigkeit und Pumpwilligkeit ist der Pumpversuch. Beim Pumpen einer neu entwickelten Betonrezeptur durch einen definierten Leitungsdurchmesser und einer optional verkürzten Leitungslänge bei einer gewünschten Fördermenge kann der Druckverlust gemessen werden. Hieraus ergibt sich mit Hilfe des Nomogramms der Konsistenzbeiwert, welcher zur Berechnung der Baustellensituation verwendet wird.

Dabei kann der Konsistenzbeiwert durchaus weit über den im Nomogramm dargestellten Größtwert von $6 \cdot 10^{-6} \text{ bar} \cdot \text{h}/\text{m}$ hinausgehen, obwohl das Setzfließmaß z. B. mehr als 650 mm beträgt. In diesem Fall wird trotz Konsistenz F6 ein hoher Rohrleitungswiderstand erzeugt.

Da dieses Verfahren mittels Pumpversuch mit hohem Aufwand verbunden ist, wurde bei Putzmeister ein Laborgerät entwickelt, welches die gleichen Ergebnisse liefert. Beim Sliding Pipe Rheometer, kurz SLIPER genannt, wird mit einer kleinen Betonprobe das Rohrströmungsverhalten in kleinem Maßstab simuliert, so dass auch hier der Konsistenzbeiwert berechnet werden kann.

Das robuste Gerät, welches schon in vielen Einsatzfällen seine exakte Funktion unter Beweis gestellt hat, kann sowohl im Labor als auch auf der Baustelle verwendet werden.

In Abbildung 34 ist dieses Gerät dargestellt. Das Messgerät ist aufgebaut aus einem stehenden Kolben, über den ein Rohr vertikal nach unten gleitet. Dabei übt der im Rohr befindliche Dickstoff einen dynamischen Druck auf den Sensor im Kolben aus. Auf Grund des Bewegungsablaufes – des abwärts gleitenden Rohres – entstand der Name Gleitrohr-Rheometer oder Sliding Pipe Rheometer. Durch die Verwendung verschiedener Massen als Zusatzgewichte wird die Gleitgeschwindigkeit variiert. Mittels Druck- und Wegmessung wird beim Gleitrohr-Rheometer die Abhängigkeit zwischen Förderdruck und Fördermenge in mehreren Punkten bestimmt. Hieraus lässt sich der Konsistenzbeiwert mit Hilfe eines ausgeklügelten Softwareprogramms errechnen.

Das System ist auch für andere Dickstoffe, wie z. B. Klärschlamm einsetzbar.



Abb. 34: Messung des Konsistenzbeiwertes von Frischbeton mit dem Sliding Pipe Rheometer

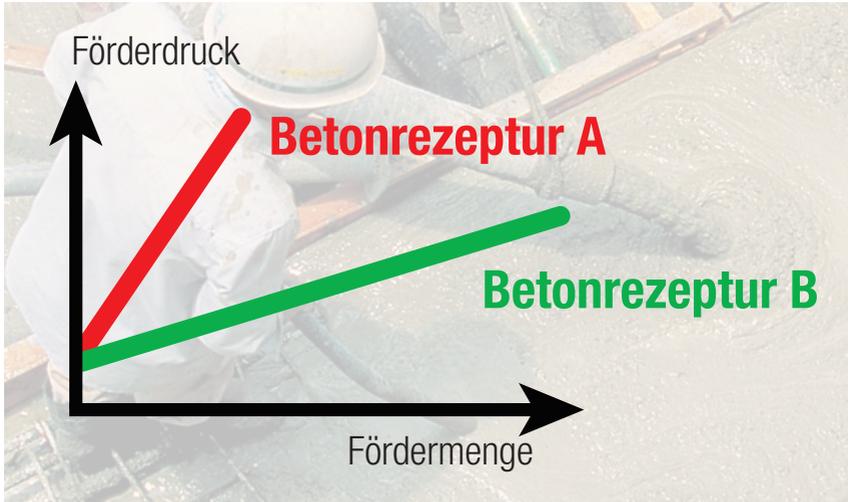


Abb. 35: Auswirkung verschiedener Betonrezepturen beim Pumpen

Der Konsistenzbeiwert stellt einen Wert für die Viskosität des Betons bezüglich Rohrförderung dar. In Abbildung 35 sind die Auswirkungen verschiedener Betonrezepturen dargestellt. Die Abhängigkeit zwischen Förderdruck und Fördermenge ist in der Regel linear, d.h. im Diagramm beschreibt eine Gerade das Verhalten des Betons. Je größer die Steigung dieser Geraden ist, um so höher ist die Viskosität bzw. der Konsistenzbeiwert des Betons. Bei einem maximal zur Verfügung stehenden Förderdruck kann z.B. Betonrezeptur A nur mit viel geringerer Menge gefördert werden als Betonrezeptur B.

Insbesondere bei hochfesten Betonrezepturen wurde festgestellt, dass sich der Konsistenzbeiwert allein durch Toleranzschwankungen im Mischwerk bis zu Faktor zwei ändern kann. Dabei kann das Ausbreitmaß (oder Setzmaß bzw. Setzfließmaß) fast identisch sein. Das bedeutet, dass bei hochwertigen Betonrezepturen kleine Änderungen in der Zusammensetzung große pumpteknische Auswirkungen haben können, obwohl auf dem Ausbreittisch keine große Änderung festzustellen ist.

Bei Optimierungen bezüglich Pumpwilligkeit der Betonrezeptur müssen alle Bestandteile und deren Wechselwirkungen in Betracht gezogen werden. Mit dem SLIPER können dabei die Auswirkungen der Modifikationen bereits im Labor ermittelt werden. In der Regel sind dabei die Modifikationen so zu gestalten, dass die geforderten Expositionsklassen nicht beeinträchtigt werden.

5. Kurze Hilfestellung zur Fehlervermeidung und -beseitigung

5.1 Bei der Betonanlieferung und Beschickung der Betonpumpe

| Erkennbare Unregelmäßigkeit | Mögliche Ursachen | Empfohlene Maßnahmen |
|--|-----------------------------|--|
| Kies- und Schottergeräusche in der Fahrmischertrommel | Zu geringer Feinkornanteil | Lieferschein überprüfen |
| Auf- und abschwellige Geräusche des Betons in der Fahrmischertrommel | Zu flüssige Betonkonsistenz | Lieferschein überprüfen, ggf. Ausbreitmaß feststellen |
| Beton bricht beim Verlassen der Fahrmischertrommel scharfkantig ab | Zu steife Betonkonsistenz | Lieferschein überprüfen, beim Anpumpen reichlich Zementleim zugeben |
| Konsistenzveränderung während der Betonübergabe | Entmischung | Übergabe unterbrechen und Beton intensiv (mehrere Minuten) nachmischen |
| Häufiges Blockieren der Rührwerkswelle | Zu geringer Feinkornanteil | Lieferschein überprüfen |

5.2 Beim Pumpen

| Erkennbare Unregelmäßigkeit | Mögliche Ursachen | Empfohlene Maßnahmen |
|---|--|--|
| Förderdruck deutlich oberhalb des zu erwartenden Wertes | <ul style="list-style-type: none"> – Wirkungsdauer von BV, FM oder VZ überschritten oder verkürzt (Sommerhitze, heiße Förderleitung) – Ungünstige Betonrezeptur | <p>Abdeckung der Förderleitung</p> <p>Betonrezeptur modifizieren für weniger Förderdruck</p> |
| Schneller Druckanstieg über normalen Wert hinaus | Stopfer in oder unmittelbar nach der Betonpumpe | Parallel mit zweitem Fahrmi-scher befüllen, im Trichter auf-mischen, langsam anpumpen |
| Langsamer Druckanstieg über normalen Wert hinaus | Stopfer mehr am Ende der Förderleitung | Einige Hübe zurückpumpen, langsam weiter pumpen, ggf. Stopfer mit Hammerstielprobe orten und Leitung vom Ende beginnend demontieren |
| Schlechter Füllgrad der Förderzylinder | <ul style="list-style-type: none"> – zu steife Konsistenz – Trichterfüllstand zu niedrig | Lieferschein überprüfen, ggf. Ausbreitmaß feststellen Trichterfüllstand bis über Rührwerkswelle |
| Stopfer im Förderzylinder der Pumpe | <ul style="list-style-type: none"> – zu geringer Feinkornanteil – zu steife Betonkonsistenz – Entmischung – Schiebersystem undicht oder schaltet nicht durch | siehe oben siehe oben siehe oben Einstellung Schieber und Umschaltung überprüfen |
| Stopfer in der Förderleitung | <ul style="list-style-type: none"> – alte Betonreste oder Fremdkörper in der Förderleitung – undichte Rohrstöße oder Schweißnahttrisse – ungünstige Förderleitungsverlegung – abgeknickter Endverteilerschlauch bzw. abgeknickte Förderschläuche – zu geringer Feinkornanteil – zu steife Konsistenz | <p>Entfernen der Behinderung</p> <p>Rohrkupplung überprüfen, Risse beheben Alternative Verlegung</p> <p>Abknickung beseitigen</p> <p>siehe oben siehe oben</p> |

6. Vorschriften und Empfehlungen des Technischen Regelwerks

| Kennung | Ausgabe | Titel |
|-----------------------------|-------------------------|--|
| DIN-Fachbericht 100 „Beton“ | 03.10 | Zusammenstellung von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 |
| DIN EN 206-1 | 07.01 | Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Deutsche Fassung EN 206-1:2000 |
| DIN EN 206-1/A1 | 10.04 | Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Deutsche Fassung EN 206-1:2000/ A1:2004 |
| DIN EN 206-1/A2 | 09.05 | Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Deutsche Fassung EN 206-1:2000/ A2:2005 |
| DIN EN 206-9 | 09.10 | Beton Teil9: Ergänzende Regeln für selbstverdichtenden Beton (SVB) |
| DIN 1045-2 | 08.08 | Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 |
| DIN 1045-3 | 08.08 | Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung |
| DIN EN 12350-2 | 08.09 | Prüfung von Frischbeton – Teil 2: Setzmaß |
| DIN EN 12350-4 | 08.09 | Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß |
| DIN EN 12350-5 | 08.09 | Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß |
| DIN EN 197-1 | 08.04 | Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement / A3:2007 |
| DIN EN 197-4 | 08.04 | Zement – Teil 4: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Hochofenzement |
| DIN 1164-10-12 | 08.04 11.03 06.05 | Zement mit besonderen Eigenschaften, Teil 10, 11, 12 |
| DIN EN 450-1 | 05.08 | Flugasche für Beton – Teil1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien |
| DIN EN 12620 | 07.08 | Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002 + A1:2008 |

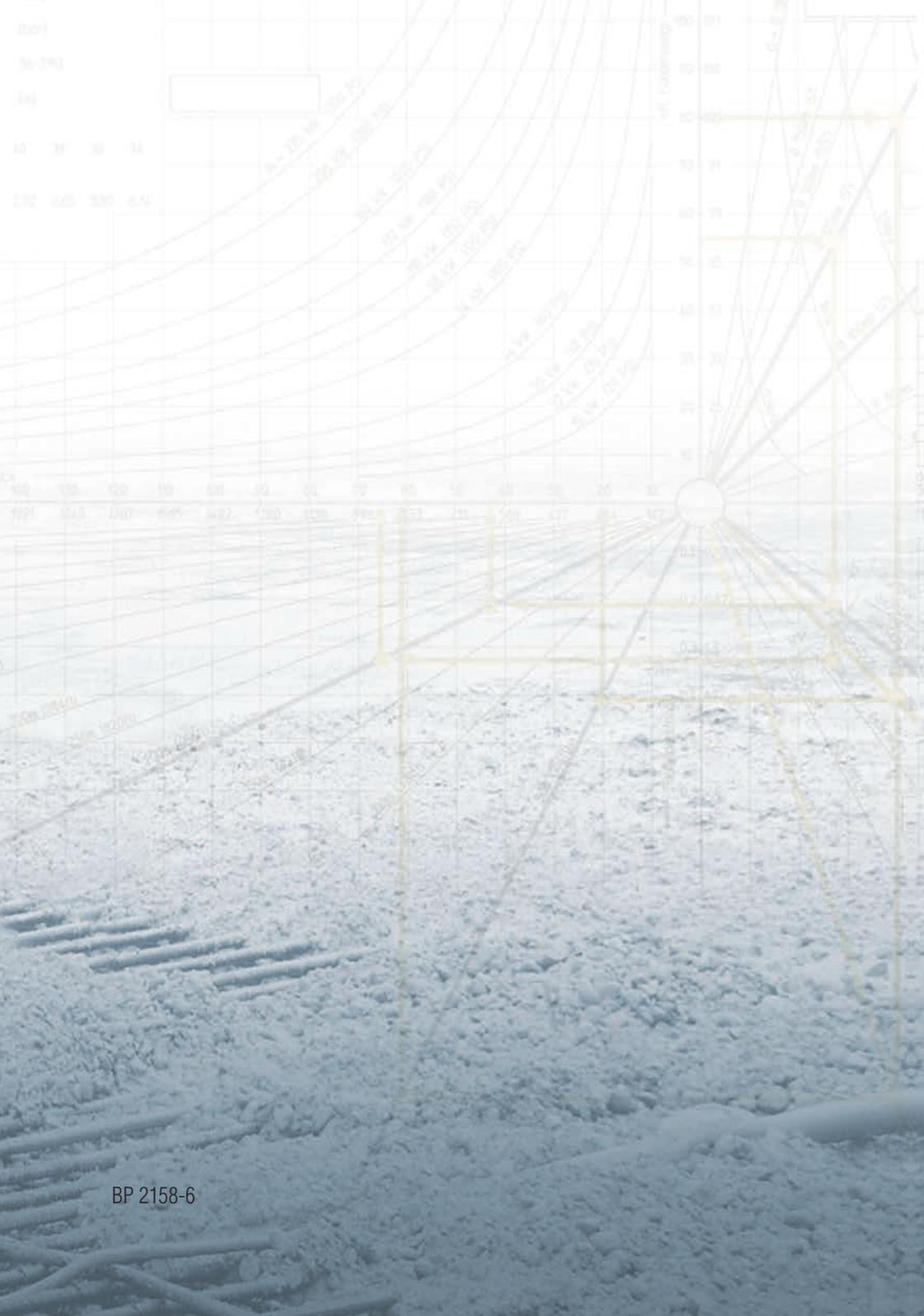
| Kennung | Ausgabe | Titel |
|-------------------|----------------|--|
| DIN EN 1008 | 10.02 | Zugabewasser für Beton – Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser |
| DAfStb-Richtlinie | 11.03 | Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie) |
| DAfStb-Richtlinie | 11.06 | Für Beton mit verlängerter Verarbeitbarkeitszeit (Verzögerter Beton) |
| DAfStb-Richtlinie | 11.03 | Selbstverdichtender Beton |
| DAfStb-Richtlinie | 04.10 | Massige Bauteile aus Beton – Teil 1: Ergänzungen zu DIN 1045-1 Teil 2: Änderungen und Ergänzungen zu DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 Teil 3: Änderungen und Ergänzungen zu DIN 1045-3 |
| FGSV 818 | 2004 | Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton |
| EFNARC | 05.05 | The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use |

7. Weiterführende Literatur

| | |
|----|---|
| 1 | „Betontechnische Daten“, Ausgabe 2009, Heidelberg Cement |
| 2 | Bauteilkatalog, Planungshilfe für dauerhafte Betonbauteile nach der neuen Normengeneration, Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie, Herausgeber: Betonmarketing Deutschland GmbH, Erschienen 02/2011 |
| 3 | Teilnehmerunterlage „Vor-Ort-Seminar“, Putzmeister Akademie |
| 4 | Rössig, M.: „Fördern von Frischbeton, insbesondere von Leichtbeton, durch Rohrleitungen“, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 2456, Westdeutscher Verlag 1974 |
| 5 | Weber: „Guter Beton, Ratschläge für die richtige Betonherstellung“, Verlag Bau und Technik, 2010 |
| 6 | Pickhardt, Bose, Schäfer: „Beton – Herstellung nach Norm, Arbeitshilfe für Ausbildung, Planung und Baupraxis“, Verlag Bau und Technik, 2009 |
| 7 | Eifert, Bethge: „Beton – Prüfung nach Norm, die neue Normengeneration“, Verlag Bau und Technik, 2005 |
| 8 | Müller, H. S.: „Bauwerkserrichtung mit selbstverdichtendem pumpbarem Leichtbeton“, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie Karlsruhe, ISBN: 3-8167-7006-1, 2004 |
| 9 | Prof. Dr. Ing. K. Bergmeister: „Betonkalender 2005“, Kap. VIII Beton, ISBN: 3-433-01670-4 |
| 10 | Kasten, K.: „Gleitrohr-Rheometer – Ein Verfahren zur Ermittlung der Fließ-eigenschaften von Dickstoffen in Rohrleitungen“, Shaker Verlag, 2010 |
| 11 | In puncto Transportbeton GmbH: 10 Argumente für das Pumpen von Beton. Erschienen 08/2005 |

Weiterführende Literatur

| | |
|----|--|
| 12 | Zement-Merkblatt Betontechnik B4: Frischbeton Eigenschaften und Prüfungen, Herausgeber: Verein Deutscher Zementwerke e. V., 01/2007 |
| 13 | Zement-Merkblatt Betontechnik B29: Selbstverdichtender Beton, Eigenschaften und Prüfungen, Herausgeber: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 07/2006 |
| 14 | Busson et al., Pompage des bétons, Guide technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées LCPC, 2002 |
| 15 | Feys, D.: Interactions between Rheological Properties and Pumping of Self-Compacting Concrete. Dissertation. Fakultät Ingenieurwissenschaften, Universität, Gent, 2009 |
| 16 | SIKA Betonhandbuch, SIKA Schweiz AG, 2004 |
| 17 | Springenschmid, R.: Betontechnologie für die Praxis, Bauwerk Verlag, Berlin, 2007 |
| 18 | Thomaseth, D., Lukas, W., Malfertheiner, A. / Niederegger, C.: Bewertung der Klebrigkeit von Betonen – Neue Versuchseinrichtungen, Zeitschrift Beton, 11/2005, pp. 548 – 549 |



BP 2158-6